

海洋創新A世代–
AI · Autonomy · Acoustics

2026中華民國海洋及水下技術協會年會

暨 第27屆海洋與水下技術研討會

論 文 集

5/22 2026 Fri.

高雄軟體科技園區會議中心

序　言

隨著全球對海洋資源利用與環境永續議題的高度關注，海洋科技正面臨由傳統工程導向邁向智慧化與系統整合之關鍵轉型。本研討會以「海洋創新 A 世代 - AI · Autonomy · Acoustics」為主題，延續歷屆對海洋與水下技術之深耕基礎，進一步聚焦於人工智慧（AI）、自主系統（Autonomy）與水中聲學（Acoustics）三大核心技術之融合發展，回應當前海洋科技跨領域整合與高階應用之趨勢。

在技術快速演進的背景下，海洋觀測與作業模式正由單一感測或單平台架構，轉型為跨感測模態、跨平台協同與多層級自主決策之複合系統。人工智慧技術的導入，使海洋資料得以進行高效率分析與即時解析；自主系統能力的提升，則進一步推動遠端操控、半自主乃至全自主海洋系統之實現；而水中聲學則持續在水下監控與感測、成像與通訊中扮演不可替代之關鍵角色。三者之交互整合，正逐步形塑新世代海洋科技之發展樣貌。

大會特別規劃三場專題演講，從國家政策、技術前瞻到產業應用，呈現海洋科技發展之多元面向。首先，以「臺灣海洋觀測系統建置與應用：國家海洋研究院的發展與成果」為題，回顧我國海洋觀測體系之建構歷程與關鍵成果，凸顯長期基礎建設對海洋治理與科研發展之重要性。其次，「海洋創新 A 世代 - 邁入深藍的技術神兵」將從前瞻科技視角，探討新興技術如何驅動海洋科技邁向更高層次之整合與應用。最後，「AI 領航　邁向智慧港灣 A 世代」則聚焦於人工智慧於港灣與海事場域之實際落地，展現智慧化系統在提升營運效率與安全管理上的潛力。

研討會議內容涵蓋上述核心技術之理論發展與實務應用，並特別關注其於水下技術整合、海洋觀測、文化資產調查、海洋能源開發、生態保育及永續治理等領域之應用需求與挑戰。透過跨領域觀點之交流與案例分享，期能促進技術創新與系統整合能力之提升，並強化我國在海洋科技領域之國際競爭力。

同時，亦感謝來自全國各界產官學研單位之踴躍投稿，投稿主題涵蓋人工智慧應用、自主系統發展、水中聲學技術，以及多元海洋場域之實務應用等，與本次主軸高度契合，充分展現我國在海洋科技領域之豐沛能量與跨域整合成果。

最後，期盼藉由此一會議，進一步匯聚各界能量，加速新興技術之研發與落地應用，為未來海洋探索、資源管理與環境監測奠定堅實之技術基礎。

第 27 屆海洋與水下技術研討會

研討會主席　邱永盛

謹誌於 2026 年 5 月 22 日

中華民國海洋及水下技術協會
115 年年會與會員大會暨第 27 屆海洋與水下技術研討會
籌備委員會工作人員名單

主 任 委 員	楊偉甫
名譽主任委員	李志鵬
副 主 任 委 員	邱永盛
總　幹　事	簡連貴
副 總 幹 事	黃偉柏、周佑誠
總　務　組	楊光哲、葉芝吟
會　程　組	陳信宏、周佑誠、謝孟璋、楊光哲
註　冊　組	葉芝吟、李汴軍、楊萬蓉、黃郁媚
活　動　組	臺灣港務公司
論　文　組	陳信宏、魏瑞昌、邱永盛、周佑誠、謝孟璋、王兆璋
提案及編輯組	簡連貴
出　版　組	張順雄、邱永盛
財　務　組	陳吉紀、邱永盛
獎　章　組	歐善惠
貴　賓　組	楊偉甫、簡連貴、許硯蓀、李汴軍、黃偉柏

中華民國海洋及水下技術協會
115 年年會與會員大會暨第 27 屆海洋與水下技術研討會
會　程　表

<table>
<tr><th colspan="5">日期：115 年 5 月 22 日(星期五)　地點：高雄軟體園區</th></tr>
<tr><th>會議</th><th>時　間</th><th colspan="3">會　　程　　內　　容</th></tr>
<tr><td rowspan="8">年會與會員大會（C 棟 B1 國際會議廳）</td><td>09:30-10:00</td><td colspan="3">報　　到：領取出席證、資料、紀念品</td></tr>
<tr><td>10:00-10:20</td><td colspan="3">開幕典禮：理事長致詞、貴賓致詞</td></tr>
<tr><td>10:20-10:50</td><td colspan="3">籌備委員會報告．會務報告．提案討論．頒獎</td></tr>
<tr><td>10:50-11:10</td><td colspan="3">茶　　敘</td></tr>
<tr><td>11:10-11:30</td><td colspan="3">專題演講（一）：臺灣海洋觀測系統建置與應用：國家海洋研究院的發展與成果
主講人：陳璋玲　院長
海洋委員會國家海洋研究院</td></tr>
<tr><td>11:30-11:50</td><td colspan="3">專題演講（二）：海洋創新A世代 – 邁入深藍的技術神兵
主講人：詹耀坤　主持人
國家中山科學研究院資訊通信研究所亢龍計畫</td></tr>
<tr><td>11:50-12:10</td><td colspan="3">專題演講（三）：AI 領航　邁向智慧港灣A世代
主講人：王錦榮　總經理
臺灣港務股份有限公司</td></tr>
<tr><td>12:10-13:30</td><td colspan="3">午　　餐</td></tr>
<tr><td>13:30-17:00</td><td colspan="3">參觀活動 - 高雄港洲際碼頭參觀
（集合時間：13:30，地點：高雄港旅運中心群樓一樓）</td></tr>
<tr><td rowspan="6">海洋與水下技術研討會（A 棟）</td><td>12:30-13:30</td><td colspan="3">研討會報到</td></tr>
<tr><td rowspan="2">13:30-15:20</td><td>301 會議室</td><td>401 會議室</td><td>701 會議室</td></tr>
<tr><td>A1: 水中聲學感測技術</td><td>A2: 海洋載具技術 I</td><td>A3: 水下作業系統</td></tr>
<tr><td>15:20-15:40</td><td colspan="3">茶　　敘</td></tr>
<tr><td rowspan="2">15:40-17:30</td><td>301 會議室</td><td>401 會議室</td><td>701 會議室</td></tr>
<tr><td>B1: 聲學訊號分析與處理</td><td>B2: 海洋載具技術 II</td><td>B3: 水下文資與海洋產業</td></tr>
<tr><td>18:00-20:30</td><td colspan="3">晚宴與頒獎（中鋼集團會館：高雄市前鎮區忠勤路 23 號 2 樓）</td></tr>
</table>

研討會論文發表議程

A1：水中聲學感測技術

- 時　間：13:30-15:20
- 地　點：A 棟 301 會議室
- 主持人：陳琪芳、吳柏賢

基於濾波器正交分頻多工水下聲學修正混沌強化串接邏輯正弦映射文字加密展頻隱藏通訊技術應用寬吻海豚聲

謝慶隆[1]、林進豐[1]、張順雄[2]、姚永正[2]
[1]國立臺灣海洋大學 電機工程學系
[2]國立高雄科技大學 半導體工程學

西子灣近岸海浪之分散式聲學連續監測與下一代基於光頻梳之 WDM-DAS 系統設計

林庭寬、洪裕涵
國立中山大學 光電工程學系

船舶水下噪音量測技術之現況與未來挑戰

王啟存[1]、魏瑞昌[2]、謝孟璋[2]
[1]國立中山大學 海洋科學與科技全英語博士學位學程
[2]國立中山大學 海下科技研究所

崩波型碎波氣泡聲學特性與尺寸分布之實驗研究

林佑安、劉冠汶、楊瑞源
國立成功大學 水利及海洋工程學系

探討多層堆疊壓電換能器之水下聲學特性研究

陳胤齊、邱永盛
國立中山大學 海下科技研究所

A2：海洋載具技術 I

- 時　間：13:30-15:20
- 地　點：A 棟 401 會議室
- 主持人：湛翔智、黃盛煒

簡易型自主式水下載具於淺海影像調查任務之設計與初步驗證

吳孟修、周佑誠
國立中山大學 海下科技研究所

自主水下載具控制與動力分配之嵌入式實現與實驗驗證

陳永裕[1]、呂楷貿[1]、施丞恩[1]、郭俊霆[2]
[1]國立成功大學 系統及船舶機電工程學系
[2]永亮股份有限公司

基於前向掃描聲納之 AUV 水下三維地形建模之研究

彭光源、王舜民
國立成功大學 系統及船舶機電工程研究所

水下履帶車系統設計與研製

張家溥、陳柏棋、宋雨霖
財團法人國家實驗研究院 台灣海洋科技研究中心

水下無人載具與海洋科技之應用

陳建璋[1]、徐慶瑜[2]、陳雅惠[2]、苗志銘[3]、邱永盛[4]
[1]國立中山大學 電機工程學系
[2]中華民國海軍軍官學校 船舶機械系
[3]國立屏東科技大學 生物機電工程系
[4]國立中山大學 海下科技研究所

整合 USV、一般船舶與 UAV 多平台遙測之水上水下無縫高精度三維模型建置

郭重言[1]、李啓民[1]、蔡旻軒[1]、洪志偉[2]、陳麗雯[3]、蔣昊澐[1]、劉庭瑜[1]
[1]國立成功大學 測量及空間資訊學系
[2]詮華國土測繪股份有限公司
[3]國家海洋研究院

A3：水下作業系統

- 時　間：13:30-15:20
- 地　點：A 棟 701 會議室
- 主持人：趙修武、唐宏結

水下電動機械手臂軟體設計輔助

王若庭、王兆璋
國立中山大學 海下科技研究所

以 ROS2 為基礎之影像輔助多重輸入機械手臂操作介面開發

李育承、王兆璋
立中山大學 海下科技研究所

拖曳式載具海床調查作業之不同影像品質估算方法比較

陳睿騰、周佑誠
國立中山大學 海下科技研究所

UVC 發光二極體應用於預防水下生物附著

羅貫予[1]、陳彥倫[1]、謝孟璋[2]
[1]國立高雄師範大學 工業科技教育學系
[2]國立中山大學 海下科技研究所

港灣鋼構實時腐蝕探頭之陰極保護設計最優化、腐蝕運維在地化及雜散電流腐蝕示警防災

王自強[1]、鄭智文[2]、林俊達[3]、王笙宇[4]、趙立德[5]
[1]王強科技有限公司
[2]臺灣港務股份有限公司 高雄港務分公司
[3]台灣世曦工程 港灣工程部
[4]金屬工業研究發展中心 海洋產業推廣服務處
[5]滙茂實業

兩孤立波於同向追越碰撞作用下之水下流場特性探討

林呈、羅立芳、閻菁菁、薛儒謙、林欣誼
國立中興大學 土木工程學系

B1：聲學訊號分析與處理

- 時　間：15:40-17:30
- 地　點：A 棟 301 會議室
- 主持人：張順雄、劉冠汶

鯨豚喀搭聲定位與軌跡追蹤研究

楊凱傑[1]、翁仕賢[1,2]、胡惟鈞[3]、陳琪芳[1]
[1]國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系
[2]洋聲股份有限公司
[3]國立臺灣大學 船舶及海洋技術研究中心

基於 YOLO 物件偵測模型於臺灣西部海豚哨叫聲自動偵測與聲學特徵分析

陳宜欣[1]、胡惟鈞[2]、陳琪芳[1]
[1]國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系
[2]國立臺灣大學 船舶及海洋技術研究中心

以水下聲學監測探討颱風對墾丁南灣淺海魚類訊號之影響

黃馨[1]、邱永盛[1]、楊穎堅[2]
[1]國立中山大學 海下科技研究所
[2]國立臺灣大學 海洋研究所

應用螺旋形陣列與 HR-CLEAN-SC 於多重噪音源定位技術建立

林時賢、吳柏賢
國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

臺灣東南海域鯨豚哨叫聲偵測研究

蔡子亮[1]、胡惟鈞[2]、陳琪芳[1]
[1]國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系
[2]國立臺灣大學 船舶及海洋技術研究中心

基於稀疏聲學陣列之目標方位估測技術探討

溫柏諭、吳柏賢
國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

B2：海洋載具技術 II

- 時　間：15:40-17:30
- 地　點：A 棟 401 會議室
- 主持人：陳永裕、蕭毓宏

極淺水域無人水面載具之推進系統改良與感測整合

楊承穆、陳信宏
國立中山大學 海下科技研究所

無人船基地規劃與靠泊技術之可行性研究

湛翔智
知洋科技股份有限公司

基於 CNN 與 NPU 加速之無人水面載具水下聲紋辨識研究

鍾育仁[1]、羅濬智[1]、張翊翔[1]、謝祥佑[1]、胡沁榆[2]
[1] 中華民國海軍軍官學校 海洋科學系
[2] 中華民國海軍軍官學校 資訊管理系

Predictor-based leader-follower formation control of unmanned surface vehicles with communication delays

Chia-Chun Lin, Ming-Han Tsai, Hung-Ping Su, Jen-Hwa Guo
國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

海洋管道機器人的開發

陳震宇[1]、黃盛煒[1]、陳冠宇[2]
[1] 國立臺灣海洋大學 系統工程暨造船學系授
[2] 國立臺灣大學 船舶及海洋技術研究中心

基於深度學習之台灣東北海域海床生物影像自動辨識

薛芳妤[1]、周佑誠[2]
[1] 國立中山大學 海洋科學系
[2] 國立中山大學 海下科技研究所

B3：水下文資與海洋產業

- 時　間：15:40-17:30
- 地　點：A 棟 701 會議室
- 主持人：簡連貴、董東璟

海洋監測產業關鍵人才與職務屬性之探討

張珮錡[1]、魏孟君[1]、周瑋珊[2]
[1]國家海洋研究院 綜合規劃及人力培訓中心
[2]國立成功大學 水工試驗所

海洋文化與觀光遊憩產業關鍵人力需求與職務樣貌研析

張珮錡[1]、施瓊華[1]、周瑋珊[2]
[1]國家海洋研究院 綜合規劃及人力培訓中心
[2]國立成功大學 水工試驗所

基於多模態調查資料建構水文空間資料方塊流程之研究： 以水下文化資產調查場域為例

陳冠宇[1]、黃千芬[2]、劉金源[1]
[1]淡江大學 電機工程學系
[2]國立臺灣大學 海洋研究所

AI 驅動之 ESG 永續治理模型：水下文化資產保育績效之量化評估與應用

麥永竑
國立高雄科技大學 財務金融學院

可調變減搖飛輪阻尼系統應用於浮式平台之實驗研究

黃瀚寬[1]、曾以帆[1]、唐宏結[2]、芮向磊[1]
[1]國立中山大學 海洋環境及工程學系
[2]國立台灣海洋大學 海洋工程科技學士學位學程(系)

洋流發電機於拖曳情況下之運動響應

許植証、趙修武
國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

論文目錄

A1：水中聲學感測技術

基於濾波器正交分頻多工水下聲學修正混沌強化串接邏輯正弦映射文字加密展頻隱藏通訊技術應用寬吻海豚聲 …… 1
謝慶隆、林進豐、張順雄、姚永正

西子灣近岸海浪之分散式聲學連續監測與下一代基於光頻梳之 WDM-DAS 系統設計 …… 5
林庭寬、洪裕涵

船舶水下噪音量測技術之現況與未來挑戰 …… 11
王啟存、魏瑞昌、謝孟璋

崩波型碎波氣泡聲學特性與尺寸分布之實驗研究 …… 18
林佑安、劉冠汶、楊瑞源

探討多層堆疊壓電換能器之水下聲學特性研究 …… 23
陳胤齊、邱永盛

A2：海洋載具技術 I

簡易型自主式水下載具於淺海影像調查任務之設計與初步驗證 …… 31
吳孟修、周佑誠

自主水下載具控制與動力分配之嵌入式實現與實驗驗證 …… 35
陳永裕、呂楷貿、施丞恩、郭俊霆

基於前向掃描聲納之 AUV 水下三維地形建模之研究 …… 44
彭光源、王舜民

水下履帶車系統設計與研製 …… 54
張家溥、陳柏棋、宋雨霖

水下無人載具與海洋科技之應用 …… 60
陳建璋、徐慶瑜、陳雅惠、苗志銘、邱永盛

整合無人船、一般船舶與無人機多平台遙測之水上水下無縫高精度三維模型建置 …… 68
郭重言、李啓民、蔡旻軒、洪志偉、陳麗雯、蔣昊澐、劉庭瑜

A3：水下作業系統

水下電動機械手臂設計輔助軟體開發 ……76
王若庭、王兆璋

以 ROS2 為基礎之影像輔助多重輸入機械手臂操作介面開發……83
李育承、王兆璋

拖曳式載具海床調查作業之不同影像品質估算方法比較……89
陳睿騰、周佑誠

UVC 發光二極體應用於預防水下生物附著……93
羅貫予、陳彥倫、謝孟璋

港灣鋼構實時腐蝕探頭之陰極保護設計最優化、腐蝕運維在地化及雜散電流腐蝕示警防災……98
王自強、鄭智文、林俊達、王笙宇、趙立德

兩孤立波於同向追越碰撞作用下之水下流場特性探討…… 101
林呈、羅立芳、閻菁菁、薛儒謙、林欣誼

B1：聲學訊號分析與處理

海豚喀搭聲定位與追蹤研究 …… 106
楊凱傑、翁仕賢、胡惟鈞、陳琪芳

基於 YOLO 物件偵測模型於臺灣西部海豚哨叫聲自動偵測與聲學特徵分析 …… 112
陳宜欣、胡惟鈞、陳琪芳

以水下聲學監測探討颱風對墾丁南灣淺海魚類訊號之影響…… 117
黃馨、邱永盛、楊穎堅

應用螺旋形陣列與 HR-CLEAN-SC 於多重噪音源定位技術建立…… 125
林時賢、吳柏賢

臺灣東南海域鯨豚哨叫聲偵測研究 …… 135
蔡子亮、胡惟鈞、陳琪芳

基於稀疏聲學陣列之目標方位估測技術探討 …… 142
温柏諭、吳柏賢

B2：海洋載具技術 II

極淺水域無人水面載具之推進系統改良與感測整合 …… **152**
楊承穆、陳信宏

無人船基地規劃與靠泊技術之可行性研究 …… **162**
湛翔智

基於 CNN 與 NPU 加速之無人水面載具水下聲紋辨識研究 …… **167**
鍾育仁、羅濬智、張翊翔、謝祥佑、胡沁榆

Predictor-based Leader-Follower Formation Control of Unmanned Surface Vehicles with Communication Delays …… **172**
Chia-Chun Lin, Ming-Han Tsai, Hung-Ping Su, Jen-Hwa Guo

海洋管道機器人的開發 …… **180**
陳震宇、黃盛煒、陳冠宇

基於深度學習之台灣東北海域海床生物影像自動辨識 …… **188**
薛芳妤、周佑誠

B3：水下文資與海洋產業

海洋監測產業關鍵人才與職務屬性之探討 …… **192**
張珮錡、魏孟君、周瑋珊

海洋文化與觀光遊憩產業關鍵人力需求與職務樣貌研析 …… **197**
張珮錡、施瓊華、周瑋珊

基於多模態調查資料建構水文空間資料方塊流程之研究： 以水下文化資產調查場域為例 …… **202**
陳冠宇、黃千芬、劉金源

AI 驅動之 ESG 永續治理模型：水下文化資產保育績效之量化評估與應用 …… **211**
麥永竑

可調變減搖飛輪阻尼系統應用於浮式平台之實驗研究 …… **221**
黃瀚寬、曾以帆、唐宏結、芮向磊

洋流發電機於拖曳情況下之運動響應 …… **226**
許植証、趙修武

基於濾波器正交分頻多工水下聲學修正混沌強化串接邏輯正弦映射文字加密展頻隱藏通訊技術應用寬吻海豚聲紋

謝慶隆[1]　林進豐[2]　張順雄[3]　姚永正[4]

摘要

水下聲學隱藏通訊技術為軍事和海洋應用的重要關鍵技術，本篇文章提出基於濾波器正交分頻多工水下聲學具修正混沌強化串接邏輯正弦映射文字資料加密展頻隱藏通訊技術。

整合混沌強化串接邏輯正弦文字展頻加密機制(16)，8x8 間隔器，寬吻海豚聲紋資料隱藏方法，(2000,1000) 低密度奇偶檢查碼編碼機制，四相位偏移調變和濾波器正交分頻多工調變。我們分析所提出水下加密隱藏通訊技術，原始寬吻海豚聲音和所接收加密隱藏文字資訊寬吻海豚聲音隱藏效能平均振幅變化強度參數，原始文字和所接收文字平均字元變化率效能。

關鍵詞：水下聲學隱藏式通訊、濾波器正交分頻多工、修正混沌強化串接邏輯正弦、文字資料加密展頻、

F-OFDM-based covert underwater acoustic communication using modified chaotic logistic-sine text encryption, spread spectrum, and hiding mechanisms with Bottlenose dolphin vocalizations

Ching-Lung Hsieh[1] Chin-Feng Lin[2]　Shun-Hsyung Chang[3]　Yung-Cheng Yao[4]

ABSTRACT

Covert underwater acoustic communication (CUAC) is an important research area for the military and marine applications. In this paper, we propose filter-orthogonal frequency-division multiplexing (F-OFDM) based CUAC integrating modified chaotic logistic-sine text encryption, spread spectrum (SS), and bottlenose dolphin vocalizations (BDVs) based hiding mechanisms.

The proposed CUAC method will incorporate F-OFDM, a 8x8 interleaver, (2000, 1000) low-density parity-check (LDPC) code, quadrature phase shift keying (QPSK), and a logistic-sine/Henon encryption and SS (16) mechanism. The performances of the average unified averaged amplitude changed intensity (UACI) parameters of the original BDVs and received BDVs with text encryption, SS, and hiding mechanisms (TESSHM) will be evaluated. The average number of char rates in the original and de-hiding/decryption text will be analyzed.

Keywords: Covert underwater acoustic communication; F-OFDM; modified chaotic logistic-sine; text encryption and spread spectrum

一、緒論

實體層隱蔽式通訊技術又稱為低偵測機率通訊技術，是一種降低駭客偵測傳輸資訊內容的加密通訊技術，目前為資通訊領域重要關鍵研究領域，

[1] 國立臺灣海洋大學電機工程研究所 博士班研究生
[2] 國立臺灣海洋大學電機工程學系 副教授
[3] 國立高雄科技大學半導體工程學系 教授
[4] 國立高雄科技大學半導體工程學系 助理教授

已經引起許多注意和研究興趣 [1]。Jiang et al. [1] 論述數種實體層隱蔽式通訊技術通道模型自然特徵(natural characteristics)例如雜訊和干擾、通道編碼、加密金鑰、隱藏資訊容量和隱蔽效能參數(例如原始寬吻海豚聲紋和具隱藏資訊接收寬吻海豚聲紋相鄰相關係數參數和平均振幅變化強度參數。第六代非陸地行動物聯網通訊技術，例如飛機、船隻、無人機和水下載具通訊，須具備更強韌保密性，無線隱蔽式物聯網通訊技術可能可抵禦駭客攻擊 [2] ，具多維度安全保護為第六代非陸地行動物聯網通訊技術實體層設計解決方案。隱蔽訊號空間設計、隱蔽訊號複雜度和被偵測機率為設計的挑戰。

Taher et al. [3] 提出一種具短脈衝響應濾波器技術整合至濾波器正交分頻多工，減少子頻帶外傳輸功率輻射，降低相鄰通道干擾效應；相較正交分頻多工技術濾波器正交分頻多工可達到更高傳輸樹率，更適合物聯網和機器通訊模式。濾波器分為子載波濾波器、和子頻帶濾波器和全頻帶(full-band)濾波器三類。子頻帶濾波器具最佳抗相鄰子通道干擾效應，具最佳頻譜使用效率，但因頻率最窄導致時間域脈衝響應最長，增加系統設計複雜度。子頻帶濾波器由濾波頻率範圍為數個子載波頻帶，系統設計複雜度較子頻帶濾波器低，但抗相鄰通道干擾效應和頻譜使用效率也較低。

Lin et al. [4] 提出『一種應用寬吻海豚聲紋濾修正混沌強化埃農映射文字資料加密隱藏通訊技術』，為 NSTC-113-2221-E-992-098 與 NSTC-114-2221-E-992-054 計畫部分成果，已接受於 Sensors 國際期刊。

二、系統架構

本篇文章提出『一種應用寬吻海豚聲紋濾波器正交分頻多工混沌修正強化串接邏輯正弦映射文字資料加密隱藏通訊技術』，架構圖如圖 1 所示，整合原始文字資訊輸入模組、ASCII 碼轉換位元串流模組、8x8 間隔器模組、具 16 展頻因子， 混沌強化串接邏輯正弦混沌映射 (Logistic-Sine chaotic map) [5] 展頻模組、寬吻海豚 (Bottlenose Dolphin ，Tursiops truncatus)聲紋 [6-7] 隱藏機制、低密度奇偶檢查碼編碼 [8] 、水下聲學通道 [8] 、四相位鍵移調變與濾波器正交分頻多工機制。

我們將具文字資料加密隱藏寬吻海豚聲紋振幅應用 16 位元量化為振幅位元串流，探究原始寬吻海豚聲紋和所接收具文字資料加密隱藏寬吻海豚聲紋之平均振幅變化強度參數(unified averaged amplitude changed intensity parameter) [4, 9] 評估加密和隱藏效能；原始文字字串 ASCII 碼二進位展頻位元串流和所接收強化串接邏輯正弦混沌映射文字展頻加密文字展頻位元串流平字元變化率 (number of changing char rate) [4, 9] 加解密效能。

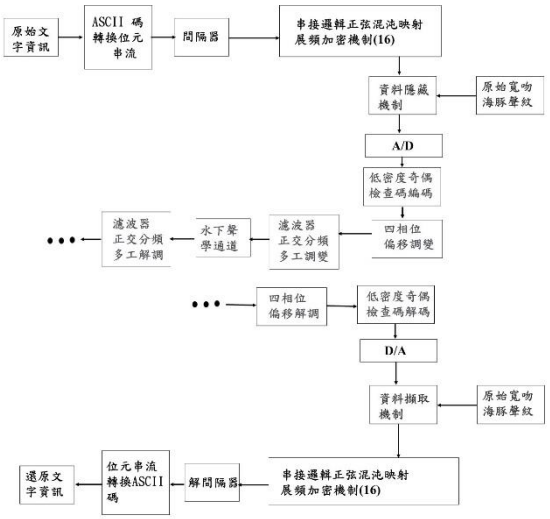


圖 1：基於應用寬吻海豚聲紋濾波器正交分頻多工混沌修正強化串接邏輯正弦映射文字資料加密隱藏通訊技術架構圖

三、模擬結果

本篇文章整合修正加密統一平均振幅變化強度參數(unified averaged amplitude changed intensity parameter，UAACI) [4, 9]，探究原始寬吻海豚聲紋和所接收水中聲學寬紋海豚聲紋具原始文字 ASCII 展頻混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號隱藏效能，UAACI 描述如方程式 (1) 所示::

$$UAACI = \frac{1}{N}\frac{|\sum_{i=1}^{N} A_i - B_i|}{S_{max}} \quad (1)$$

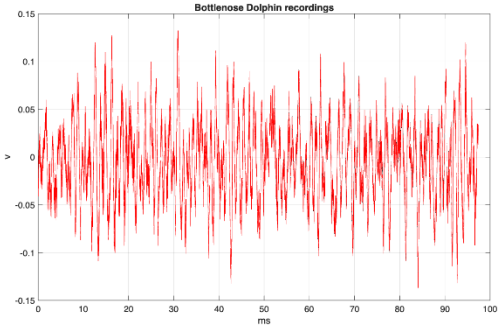
A_i 為原始寬吻海豚聲紋振幅，B_i 為所接收水中聲學寬紋海豚聲紋具原始文字 ASCII 展頻展頻混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號振幅，N 原始寬吻海豚聲紋長度，S_a 為原始寬吻海豚聲紋最大振幅，S_b 為所接收水中聲學寬紋海豚聲紋具原始文字 ASCII 展頻展頻混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號最大振幅，S_{max} 為 S_a ，如果 $|S_a| > |S_b|$，否則，S_{max} 為 S_b 。

本篇文章整合字元數變化率(number of changing char rate，NBCR)參數 [4, 9]分析原始字串字元串流和混沌解隱藏解密字串字元串流加密效能論述如方程式(2)所示::

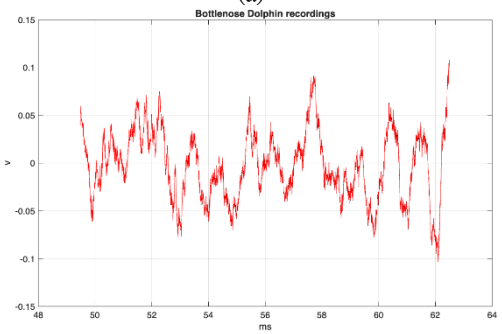
$$NCCR = \frac{\sum_{i=1}^{M} D(j)}{M} \times 100\% \quad (2)$$

$$D(j) = 1 \quad C_1(j) \neq C_2(j)$$

$$D(j) = 0 \quad C_1(j) = C_2(j)$$



(a)



(b)

圖 2(a)：時間長度為 97.40 ms，黑色為原始寬吻海豚哨叫聲紋，紅色為所接收水中聲學寬吻海豚哨叫聲紋具原始文字 ASCII 展頻因子 16 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號，**具**完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.87×10^{-4}；**(b)**時間區間 49.48 ms 至 54.69 ms，黑色為原始寬吻海豚哨叫聲紋，紅色為所接收水中聲學寬吻海豚哨叫聲紋具原始文字 ASCII 展頻因子 16 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號，**具**完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.87×10^{-4}。

$C_1(j)$ 為第 j 個原始字串字元串流，$C_2(j)$ 為原混沌解隱藏解密字串 字元串流，M 為第 j 個原始字串字元串流長度。

參考文獻 [6, 7] 下載原始寬紋海豚哨叫聲紋 (006_whistle.wav)，如圖 2 所示，取樣頻率為 144 kHz。圖 2(a) 為時間長度為 97.40 ms，黑色為原始寬吻海豚哨叫聲紋，紅色為所接收水中聲學寬吻海豚哨叫聲紋具原始文字 ASCII 展頻因子 16 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.87×10^{-4}；圖 8 (b) 為時間區間 49.48 ms 至 54.69 ms，黑色為原始寬吻海豚哨叫聲紋，紅色為所接收水中聲學寬吻海豚哨叫聲紋具原始文字 ASCII 展頻因子 16 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密隱藏訊號。模擬結果顯示，**具**完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.87×10^{-4}，水中聲學隱藏式通訊技術視覺隱藏效能優越。

混沌修正強化串接邏輯正弦映射論述如方程式 (3):

$$x_{n+1} = \sin(\pi r x_n(1 - x_n)) \quad (3)$$

x_0 為初始值加密參數，$x_0 \in (0,1)$， r 為混沌振盪參數，$r \in (3.6, 4)$.，ε_x 和 N_1 為加密參數；所產生混沌修正強化串接邏輯正弦映射時間序列 x_n 小於 ε_x，$\varepsilon_x \in (0.1, 0.9)$ 刪除，保留混沌修正強化串接邏輯正弦映射時間序列大於等於 ε_x，破壞混沌軌跡，產生時間長度為 L 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密序列；刪除前 N_1，破壞混沌軌跡，產生時間長度為 N_2 混沌修正強化串接邏輯正弦映射加密序列。

假設正確解隱藏，加密參數 (x_0 、r、ε_x、N_1) 為 (0.1、4、0.1、10000) ，解密參數 (x_0 、r、ε_x、N_1) 為 (0.1、4、0.1、10000) ，加密與解密參數相同，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.87×10^{-4}，正確解隱藏正確解密文字訊息如圖 3 所示，文字訊息正確恢復。NCCR 加密效能參數與 UAACI 隱藏效能參數分別為 0% 與 0.005596，NCCR 加密效能參數與 UAACI 隱藏效能參數最佳值分別為 0% 與 0，隱藏效能與正確解隱藏正確解密效能優越。

假設正確解隱藏，加密參數為 (0.101、4、0.11、9700) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000) ，加密與解密參數(x_0 、ε_x、N_1)三個加解蜜參樹不相同，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.26×10^{-4}，正確解隱藏錯誤解密文字訊息如圖 4 所示，文字訊息無法恢復與辨識。NCCR 加密效能參數與 UAACI 隱藏效能參數分別為 100% 與 0.005427，NCCR 加密效能與 UAACI 隱藏效能優越。

假設正確解隱藏，加密參數為 (0.104、4、0.14、10100) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000) ，加密與解密參數(x_0 、ε_x、N_1)三個加解蜜參樹不相同，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.70×10^{-4}，正確解隱藏錯誤解密文字訊息如圖 5 所示，文字訊息無法恢復與辨識。NCCR 加密效能參數與 UAACI 隱藏效能參數分別為 100% 與 0.005163，NCCR 加密效能與 UAACI 隱藏效能優越。

假設正確解隱藏，加密參數為 (0.105、4、0.15、10200) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000) ，加密與解密參數(x_0 、ε_x、N_1)三個加解蜜參樹不相同，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，傳輸位元錯誤率為 9.96×10^{-4}，正確解隱藏錯誤解密文字訊息如圖 5 所示，文字訊息無法恢復與辨識。NCCR 加密效能參數與 UAACI 隱藏效能參數分別為 100% 與 0.005428，NCCR 加密效能與 UAACI 隱藏效能優越。

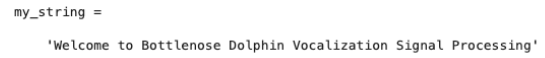


圖 3 正確解隱藏正確解密文字訊息

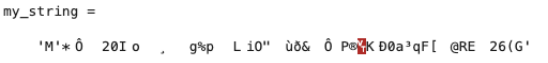


圖 4 正確解隱藏錯誤解密文字訊息 (，加密參數為 (0.104、4、0.14、10100) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000)

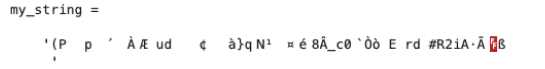


圖 5 正確解隱藏錯誤解密文字訊息 (，加密參數為 (0.104、4、0.14、10100) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000)

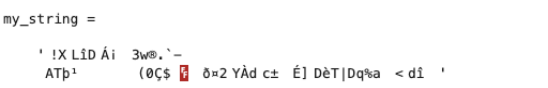


圖 6 正確解隱藏錯誤解密文字訊息 (，加密參數為 (0.105、4、0.15、10200) ，解密參數為 (0.1、4、0.1、10000)

模擬結果顯示，假設正確解隱藏錯誤解密，模擬參數為完美水中聲學通道估測，訊號雜訊比為 6.11 dB，平均傳輸位元錯誤率為 9.64×10^{-4}，，平均 NCCR 加密效能參數與平均 UAACI 隱藏效能參數分別為 100% 與 0.005340，平均 NCCR 錯誤解密效能與平均 UAACI 隱藏效能優越。

四、結論

本篇文章提出『一種應用寬吻海豚聲紋濾波器正交分頻多工混沌修正強化串接邏輯正弦映射文字資料加密隱藏通訊技術』，模擬結果顯示具優越隱藏式通訊技術、正確解隱藏正確解密文字資訊視覺效能、正確解隱藏錯誤解密文字資訊視覺效能平均 NCCR 加密效能與平均 UAACI 隱藏效能。

謝誌

本文作者團隊感謝國科會水下技術學門專題計畫 NSTC 114-2221-E-992-054 補助和審查委員建 議。

參考文獻

[1] Y. Jiang, L. Wang, H. H. Chen, and X. Shen, “Physical layer covert communication in B5G wireless networks—its research, applications, and challenges,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 112, no. 1, pp. 47-82, 2024.

[2] J. An , B. Kang , Q. Ouyang, J. Pan, and N. Ye, “Covert communications meet 6G NTN: a comprehensive enabler for safety-critical IoT,” *IEEE Network,* vol. 38, 17-24, 2024.

[3] M. A. Taher, H. S. Radhi, and A. K. Jameil, ”Enhanced F-OFDM candidate for 5G applications,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol.12, pp. 635–652, 2021.

[4] C. F. Lin, C. L. Hsieh, S. H. Chang, Ivan A. Parinov , and S. Shevtsov, “Modified chaotic Hénon map-based text information encryption and hiding mechanism using bottlenose dolphin vocalizations,” *Sensors, accepted*.

[5] Z. Hua, B. Zhou, and Y. Zhou, “Sine chaotification model for enhancing chaos and Its hardware implementation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 66, No.2, pp.1273-1284, 2019.

[6] F. D. Nardo , R. D. Marco , A. Lucchetti and D. Scaradozzi,”A WAV File Dataset of Bottlenose Dolphin Whistles, Clicks, and Pulse Sounds During Trawling Interactions,” *Scientific Data*, vol.10, pp.1, 2023.

[7]https://figshare.com/collections/Bottlenose_dolphin_s_Tursiops_truncatus_Montagu_1821_acoustic_emissions_recorded_during_interaction_with_bottom_trawl_nets_in_the_central-northern_Adriatic_Sea/6313308 [Accessed: April 18, 2026].

[8] C. F. Lin, C. F. Wu, C. L. Hsieh, S. H. Chang, Ivan A. Parinov , and S. Shevtsov, “Generalized frequency division multiplexing-based low-power underwater acoustic image transceiver,” *Sensors, 22*, 313, pp.1-14, 2022.

[9] Y. Wu, J. P. Noonan, and S. Agaian, “NPCR and UACI randomness tests for image encryption,” *Cyber Journals: Multidisciplinary, Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*, pp. 31-38, 2011.

西子灣近岸海浪之分散式聲學連續監測與下一代基於光頻梳之 WDM-DAS 系統設計

林庭寬[1]　洪裕涵[2]

摘要

分散式光纖聲學感測（Distributed Acoustic Sensing, DAS）透過量測光纖中瑞利散射回波的相位變化，可實現長距離、高解析度之連續聲學監測。近年研究趨向利用既有海底通訊光纖進行感測以降低部署成本，然而國內技術發展仍高度仰賴昂貴的國外商用系統。為推動海洋感測技術自主化，本研究致力發展國產化 DAS 系統，並進一步提出基於光學頻率梳之波分複用（WDM-DAS）架構，以突破現有技術瓶頸。

本研究首先完成自主化 DAS 系統之建置，並利用國立中山大學向西子灣外海延伸之實驗型海底光纜進行實地量測。該海纜全長約 1 公里，包含 200 公尺沙灘段與 800 公尺海床段。實驗結果顯示，本系統能成功偵測海流變化等自然現象，並可依據量測數據計算流速隨離岸遠近的空間分布。此成果充分驗證了利用既有海纜進行海洋環境監測之可行性，並為未來船舶活動偵測與海纜安全監控提供基礎數據。

為進一步提升系統的訊號品質、穩定性與抗干擾能力，本研究亦發展了基於相位鎖定窄線寬光學頻率梳（Phase -lcked Narrow-linewidth Optical Frequency Comb, PNOFC）的多載波 WDM-DAS 技術。透過單一微波參考訊號驅動聯級光注入鎖定半導體雷射，成功產生 20 GHz 間隔、具 kHz 等級窄線寬之多載波光頻梳。在 1 公里光纖結合 600 Hz 外部擾動模擬的實測中，各梳線皆能精準還原振動訊號，且訊雜比（SNR）超過 24 dB，展現極高的感測性能與相干一致性。

綜合上述，本研究從系統實證與關鍵光源技術雙管齊下。不僅確立了自主研發之 DAS 系統於實際海洋環境中的監測能力，更透過 PNOFC 技術大幅優化了感測穩定度，共同為未來大規模水下感測網路的建置奠定堅實的技術基礎。

關鍵詞：分散式光纖聲學感測、聲學監測、海洋感測技術、相位鎖定窄線寬光學頻率梳、聯級光注入鎖定半導體雷射

Title

Ting-Kuan Lin[1]　Yu-Han Hung[2]

ABSTRACT

Distributed Acoustic Sensing (DAS) enables long-distance and high-resolution continuous acoustic monitoring by measuring the phase variation of Rayleigh backscattered signals in optical fibers. In recent years, the use of existing submarine telecommunication fibers for sensing has attracted increasing attention due to its potential for reducing deployment costs. However, domestic research and development in this field still heavily rely on expensive commercial systems from abroad. To promote the localization and technological independence of ocean sensing, this study aims to develop a self-built DAS system and further proposes a wavelength-division multiplexing DAS (WDM-DAS) architecture based on optical frequency combs to overcome current technical limitations.

In this work, a fully self-developed DAS system is first implemented and experimentally validated using a submarine optical fiber deployed from National Sun Yat-sen University to the coastal region of Sizihwan. The

[1] 國立中山大學光電工程學系 博士班研究生
[2] 國立中山大學光電工程學系 助理教授

total fiber length is approximately 1 km, consisting of a 200 m beach section and an 800 m seabed section. The experimental results demonstrate that the proposed system can successfully detect natural phenomena such as ocean current variations and further estimate the spatial distribution of flow velocity along the sensing fiber. These results confirm the feasibility of utilizing existing submarine communication fibers for large-scale ocean environmental monitoring and provide fundamental data for future applications such as vessel activity detection and submarine cable security monitoring.

To further enhance system performance in terms of signal quality, stability, and interference immunity, a multi-carrier WDM-DAS system based on phase-locked narrow-linewidth optical frequency combs (PNOFCs) is proposed. By employing a cascaded optical injection locking scheme driven by a single microwave reference signal, a multi-carrier optical frequency comb with 20 GHz spacing and kHz-level linewidth is successfully generated. In the experimental demonstration using a 1 km sensing fiber with a 600 Hz external perturbation, all comb lines can accurately reconstruct the vibration signals with a signal-to-noise ratio (SNR) exceeding 24 dB, indicating excellent sensing performance and coherence consistency.

In conclusion, this study addresses both system-level implementation and key optical source technology. The proposed self-developed DAS system is validated in a real marine environment, and the PNOFC-based WDM-DAS technique significantly improves sensing stability and coherence. These results provide a solid technical foundation for the future development of large-scale underwater distributed sensing networks.

Keywords: Distributed Acoustic Sensing (DAS), Acoustic Monitoring, Ocean Sensing Technology, Phase-Locked Narrow-Linewidth Optical Frequency Comb (PNOFC), Cascaded Optical Injection Locking Semiconductor Laser

一、緒論

分布式光纖聲學感測（DAS）近年於水下聲學領域受到重視，有別於傳統離散式感測單元需要解決多點訊號同步的問題，DAS 可利用整段光纖進行感測，可將光纖分割成多個連續感測單元，其優勢在於可進行長距離、連續、高空間分辨率且高動態範圍的聲學與振動監測，因此常被應用於地震偵測及水下聲學研究[1,2]。早期的感測光纖會使用散射增強光纖或利用增敏材料所製成的光纖水聽器等結構做為增加靈敏度的方法[3]，近年研究為了降低部署成本並提升空間使用效率，逐漸嘗試利用既有海底通訊光纖進行感測[4]。

國內相關研究多停留於低逼真度環境小型驗證，缺乏實際海洋環境下的長期應用成果，加上商用 DAS 系統多為國外廠商把持，其成本昂貴，系統調教靈活度受限於廠商，限制了技術普及與在地應用。因此，發展具自主能力之國產化 DAS 系統，對於推動海洋感測與海纜監測技術具有關鍵意義。

本研究利用自主研發分布式光纖聲學感測系統(Distributed Acoustic Sensing, DAS)，使用國立中山大學西子灣海域附近之實驗型通訊用海底光纜做為測試平台進行實際量測實驗，海纜位於國立中山大學海工實驗室外部區域，海纜沿著長約 150 公尺的沙灘，在沙灘靠近海岸的區域埋進海床，其餘海纜延伸至外海，長度約 850m。實驗結果表示，本研究自主研發之 DAS 系統可成功利用量測到海流變化等自然環境現象，亦可根據量測結果計算海流在離岸遠近時的流速變化，顯示本研究研發的系統利用海底通訊光纜進行海洋環境監測之可行性。相關結果亦為未來利用 DAS 技術進行船舶活動監測與海纜安全監控提供基礎研究資料。

此外，進一步提出相位鎖定窄線寬光學頻率梳（PNOFC）之多載波 WDM-DAS 方法。藉由單一微波參考訊號驅動光注入鎖定，不僅可產生 20 GHz 間隔之多載波光頻梳，亦能將主雷射之窄線寬與相位鎖定特性延伸至各梳線，使所有載波均維持 kHz 等級窄線寬及關係。為驗證其感測能力，將各梳線分別用於 1 公里光纖之聲學量測，並於末端設置 12 m 光纖拉伸器模擬外部振動。實驗結果顯示，在 600 Hz 正弦波激發下，各梳線皆可成功還原振動訊號，且在 600 Hz 處均可獲得超過 24 dB 的訊雜比，證明該多載波光梳在相干性、穩定性與感測表現上具有良好一致性。

本研究從系統建置與光源技術兩個層面完成關鍵驗證。一方面，自主化 DAS 系統已成功建置，並透過西子灣近岸海纜之實地量測，確認其在實際海洋環境中的監測能力，進而驗證既有海纜應用於分布式聲學感測之可行性。另一方面，亦發展出基於 PNOFC 的多載波 WDM-DAS 架構，有效增進系統之相干性、穩定度與感測表現。上述成果共同顯示，分布式聲學感測技術具備應用於海洋環境監測之潛力，亦為後續大範圍水下感測網路之建構奠定基礎。

二、系統架構及理論分析

2.1 Phi-OTDR 系統原理

相位敏感光時域反射器 (Phase-sensitivity Optical Time-Domain Reflectometry, Phi-OTDR) 是分佈式光纖感測技術之一，此技術以窄線寬雷射作為探測光源，並透過脈衝式量測機制取得光纖沿線之散射訊號。當光纖受到振動、聲音或其他外部擾動時，光纖會產生局部微小形變，進而導致瑞利向後散射（Rayleigh backscattering, RBS）訊號之相位

發生變化。藉由對該相位變化進行解調，可有效還原外部擾動的資訊[5,6]。

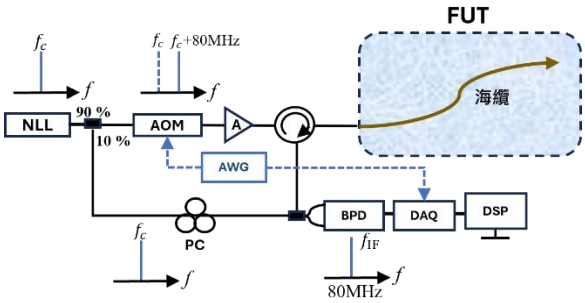


圖 1 phi-OTDR 系統架構圖，NNL, narrow-linewidth laser; AOM, acousto-optic modulator; AWG, arbitrary waveform generator; A, erbium-doped fiber amplifier; FUT, fiber under test; PC, polarization controller; BPD, balanced photodetector; DAQ, data acquisition card, DSP, digital signal processing.

phi-OTDR 系統架構如圖 1 所示。首先，利用窄線寬雷射(NLL)作為 phi-OTDR 系統的探測光源，再經由一個 90:10 耦合器分為探測光路與本地振盪器（local oscillator, LO）光路。在探測光路中，先透過聲光調變器(AOM) 產生 80 MHz 的頻移。訊號產生器(AWG)輸出脈衝訊號與 AOM 進行調變，並與訊號擷取卡(DAQ)同步。這些光脈衝經由摻鉺光纖放大器(EDFA)使能量放大，再透過光循環器(CIR)進入 FUT。當感測後的 RBS 訊號會與 LO 匯流產生干涉，進入 BPD 進行光電轉換，由取樣率為 250 MS/s 的資料擷取卡 DAQ 進行訊號擷取，最後進行 IQ demodulation[7]解調出相位變化資訊。

2.1 光纖感測原理

分布式光纖感測是基於光纖本身受到外部擾動時，光纖受到外部應力(徑向)使光纖長度(軸向)及折射率產生變化，從而產生相位上的變化，原理如下，光在光纖中傳播的相位 ϕ 可以表示為：

$$\phi = \beta \cdot L \qquad (1)$$

其中β是光傳播常數，其中$\Delta\beta = k_0\Delta n$，$L$是光纖的長度。假設光纖受到外力擾動時的相位變化可表示為：

$$\Delta\phi = \beta \cdot \Delta L + L \cdot k_0 \cdot \Delta n \qquad (2)$$

其中k_0為真空波數，Δn 為光纖有效折射率變化量。在 Phi-OTDR 系統中，主要感測來自光纖徑向的振動及聲音，因此相位變化會以光纖長度的變化為主導。

三、實驗結果

3.1 自主研發 DAS 系統於西子灣近岸海纜之海洋環境監測驗證

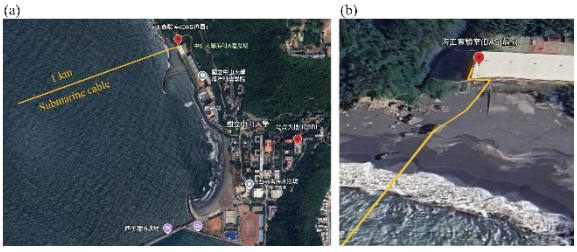


圖 2 西子近岸海纜國立中山大學西子灣近岸海域之實驗場域配置。(a)為整體地理位置示意，標示由海工實驗室(DAS 系統位置)延伸至外海之實驗型海底光纜路徑，全長約 1 km。(b)為近岸區域之放大示意。

海纜測試平台為位於高雄市國立中山大學校內，海工實驗室旁的海灘，纜線總長為 1 公里，從沙灘延伸至海床，海纜被海沙所包覆掩蓋，與海床形成良好的耦合狀態，如圖 2 所示，海纜由八條通訊用光纖組成，其中四條為單模光纖，另外四條為多模光纖，光纖外部用防水及堅固的塑膠層包覆，如圖 3 所示，

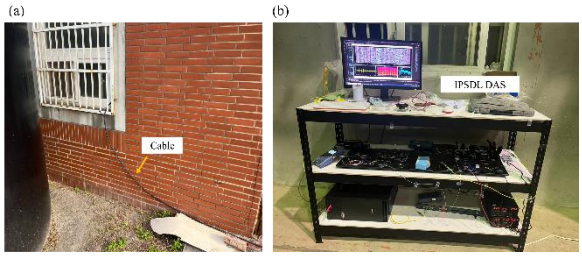


圖 3 DAS 系統之實際部署情形。(a)為海底光纜於陸地端進入點之實景，可見光纜由室內引出並沿建築外牆進入地下，作為分布式感測之傳輸媒介。(b)為自主建置之 DAS 系統平台，包含光路、資料擷取裝置與訊號處理電腦。

圖 3b 為自主研發 DAS 系統架構，中下層為光路架構，系統架構如圖 1，脈衝重複率為 1kHz，脈衝寬為 100ns，對應的 gauge length 為 10m，通道間距為 0.4m，為了分析海流特徵，將數據進行帶通濾波，濾波範圍為 0.1~0.3Hz，實驗結果如下，

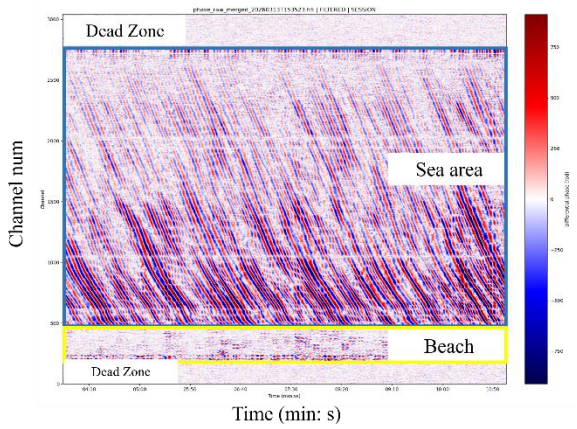


圖 4 DAS 系統於西子灣海底光纜所量測之時空分佈圖（waterfall map），橫軸為時間，縱軸為通道位置（對應光纖距離）。圖中上方與下方標示為 dead zone，為脈衝間隔期間未回波之區域，不具物理意義。中間主要區域為海域（sea area），可觀察到明顯沿時間方向傾斜之條紋結構，顯示海流或波浪所引起之相位擾動具有連續傳遞特性，反映出海洋動態行為之空間與時間相關性。下方黃色標示區域為沙灘（beach）。

圖 4 為自主研發 DAS 於西子灣近岸量測結果，X 軸是通道數量，可以視為將光纖分割成多個感測單元，可換算成光纖實際物理位置，Y 軸為量測時間，量測時長為 40 分鐘，圖中標示之死區（dead zone）對應於脈衝發射後的等待區段，主要由系統量測時序所決定，並不代表實際環境中的物理訊號，因此不納入後續海流特徵分析，藍框區域對應海域中的連續流動訊號，其主要特徵為沿時間軸呈現明顯斜向延伸的條紋結構，顯示該區域存在具有方向性與連續性的動態變化。此類斜紋通常反映海流或波浪作用下，光纖沿線所量測到的相位擾動隨時間持續傳遞，表示海水運動並非隨機雜訊，而是具有一定空間相關性與時間延續性的環境訊號。相較於下方沙灘區域較為零散或較弱的訊號分布，海域區段中的條紋更密集且分布較一致，顯示海流作用在該區域較為明顯，此外，條紋的傾斜方向與斜率差異亦可能對應海流傳播方向與流速變化，因此可作為後續海流速度估算與流場分析的重要依據。

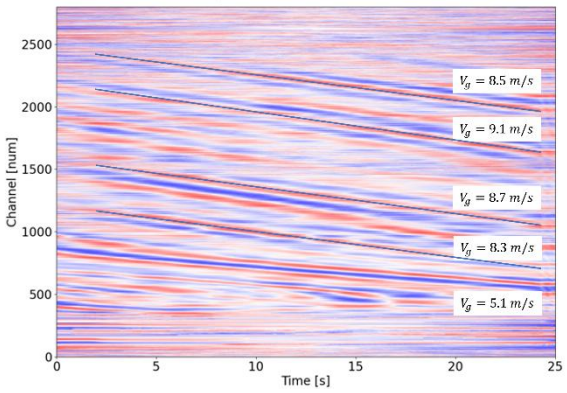


圖 5 DAS 系統於海底光纜量測所得之相位差時空分佈圖，橫軸為時間，縱軸為通道位置（對應光纖距離）。圖中可觀察到多組明顯沿時間軸呈現斜向延伸之條紋結構，顯示擾動訊號沿光纖方向具有傳播行為。透過分析條紋之傾斜斜率，海流的傳播速度（群速度，v_g）。

圖 5 顯示西子灣近岸海域量測結果中，具有代表性之波包傳播軌跡。圖中橫軸為時間，縱軸為通道數量，可更直觀的觀察到多組明顯沿時間方向斜向延伸之條紋結構。為量化此類波包之傳播行為，本研究選取數條具代表性之斜向條紋，根據其在時空圖中的斜率估算對應之表觀群速度（group velocity, Vg）。結果顯示，不同位置之群速度分別約為 8.5 m/s、9.1 m/s、8.7 m/s、8.3 m/s 及 5.1 m/s。

由圖中可進一步發現，靠近岸邊區域之波包斜率相對較大，對應之群速度則明顯下降；相對地，較外側區域之波包傳播速度則較高。此結果顯示波動訊號在近岸傳播過程中，隨著水深逐漸變淺，其群速度呈現下降趨勢。此現象與近岸淺水波理論相符，亦即波速會隨水深降低而減小。因此，本研究量測結果不僅顯示自主研發 DAS 系統可清楚解析近岸波動之時空傳播特徵，亦可進一步作為估算近岸群速度分布及分析海流與波浪動力行為之依據。

上述結果說明，本研究自主研發的 DAS 系統除可用於偵測海洋環境中的動態訊號外，亦具備進一步解析近岸波動傳播特性與空間變化趨勢之潛力。

3.2 基於 PNOFC 的多載波 WDM-DAS

Phi-OTDR 是基於 Coherent detection 的干涉系統，為了維持準確的相位訊息，系通需要維持良好的干涉條件及相干長度(Coherent length)[5]，需要穩定高品質的光源，因此窄線寬雷射對於基於相位變化的分布式光纖感測系統不可或缺的元件，窄線寬雷射也是 DAS 系統主要成本支出之一，如果使用多個獨立窄線寬雷射光源，不利於建立大規模且長距離的分布式水下感測網路系統，需要更有效率的光源產生機制，因此基於光頻梳(Optical

Frequency Comb, OFC)的多載波雷射光源有助於提供一種更有效率且穩定的感測光源[8,9]。

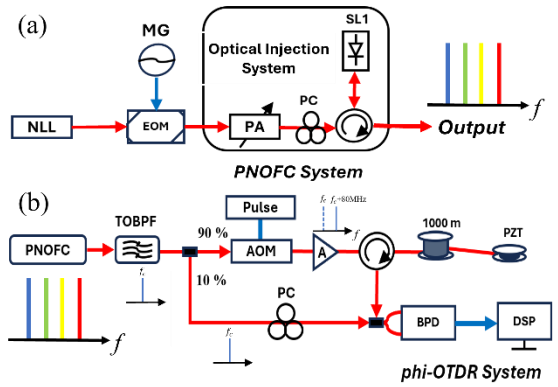


圖 6 PNOFC DAS 系統架構圖，(a) PNOFC 系統架構，(b)phi-OTDR 系統架構圖，FUT 配置為 1 公里光纖跳線，尾端連接 PZT 光纖拉伸器。EOM, electric optical modulator; MG, microwave generator; PA, power adjustor; PC, polarization controller; C, circulator; SL1, slave laser 1; TOBPF, tunable optical bandpass filter; PZT, PZT-based fiber stretcher.

3.2.1 PNOFC 原理

本研究提出一種基於 Period one nonleaner laser dtnamic 的光注入系統結合外部調變進行相位鎖定窄線寬光學頻率梳（PNOFC）[10]，系統架構圖如圖 6(a)，使用雷射線寬為 DFB laser 作為 Mater laser，工作頻率 194.396 THz，另使用雷射線寬為 270 kHz 的 Free running DFB laser 作為 slave laser(SL1)，工作頻率為 194.394 THz，如圖 7 所示，

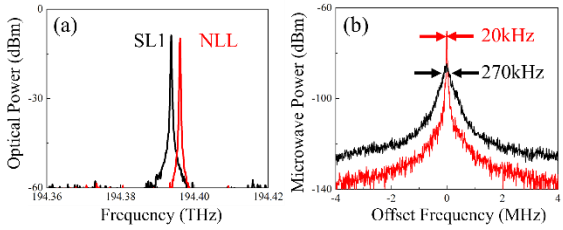


圖 7 (a) SL1 與 ML 之光譜。(b)為雷射線寬量測結果，其中黑色曲線為 SL1，其頻譜寬度約為 270 kHz；紅色曲線 ML，其線寬約為 20 kHz。

在光注入過程中，首先將主雷射（master laser）透過光環行器注入至從雷射一（slave laser 1）。透過摻鉺光纖放大器（EDFA）與偏振控制器調整注入光功率與偏振狀態，使從雷射一進入非線性動態區域。當注入功率提升至 $P_{i1} = 1.82\text{mW}$，且主從雷射之間的頻率失諧（detuning）控制在適當範圍內時，從雷射一會產生週期一（period-one, P1）動態，其對應的振盪頻率為 $f_0 = 20\text{GHz}$。在此狀態下，光譜中會出現以 20 GHz 為間距的離散側頻，形成初步的光學頻率梳（optical frequency comb, OFC）。

為了進一步實現相位鎖定，將一穩定的 20 GHz 微波訊號輸入至電光調變器（EOM），產生光學雙邊帶（double-sideband, DSB）訊號。由於這些 DSB 側頻具有固定的相位關係，當其與主雷射共同注入至從 SL1 時，可提供一個外部相位參考，當側邊帶注入 P1 震盪出的頻率分量時，會形成 OIL，此機制會使 SL 產生的載波繼承 ML 的特性，包含線寬的特性，因此，原本的 P1 動態與外部微波訊號達到同步。在此條件下，從 SL1 會被拉頻並鎖定於 DSB 訊號的其中一個側頻，使得原先由 P1 動態產生的頻率成分轉變為具有 6 根梳線的相位關聯性且窄線寬的光學頻率梳，完成窄線寬相位鎖定 P1 OFC，如圖 8(a)所示。

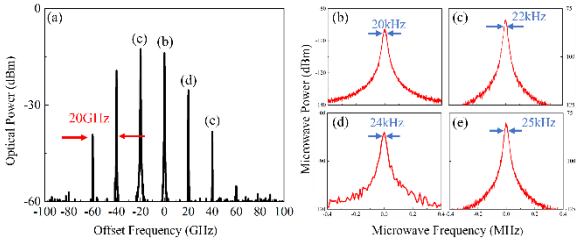


圖 8 .(a)窄線寬相位鎖定 P1 光學頻率梳之光譜，間隔為 20 GHz 之梳線。(b)–(e) 為四條代表性梳線之線寬量測結果，其頻譜寬度分別為 20 kHz、23 kHz、24 kHz 與 25 kHz。相較於 SL1 的 270 kHz 之線寬，各梳線均顯著壓縮至 sun-ten kHz 等級，並接近主雷射之線寬。

本研究選擇其中四根梳線進行線寬量測，如圖 8(a)所示，圖 8(b)-圖 8(e)，透過延遲自外差（delayed self-heterodyne）線寬量測[11]，實驗結果顯示，各個代表性梳線從 270 kHz 所小至與 ML 線寬相近的範圍，分別為 20kHz、23kHz、24kHz 與 25kHz。證實 Period one nonleaner laser dtnamic 的光注入系統結合外部調變進行相位鎖定窄線寬光學頻率梳（PNOFC）僅用一組窄線寬雷射及一組微波訊號即可產生六根窄線寬光頻梳。

3.1.2 PNOFC 應用於 phi-OTDR 系統

將 PNOFC 通過 TOBPF 進行濾波，分別將各個梳線作為 phi-OTDR 系統的光源，如圖 6(b)，FUT 為 1kmSMF 尾端連接 PZT 光纖拉伸器，驅動頻率 600Hz 弦波訊號模擬外部振動源，實驗結果如下，

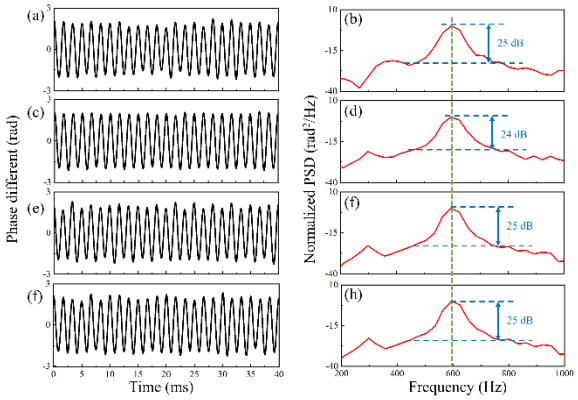


圖 9 (a)–(d) 為四條代表性光頻梳載波於 600 Hz 外部振動擾動下之差分相位（Δφ）隨時間變化結果。(e)–(h) 為對應功率譜密度（power spectral density, PSD）。

實驗結果表示選擇的梳線作為光源皆可以成功還原 600Hz 的波型，如圖 9(a)所示，將其進行 PSD 轉換，可以發現各個梳線能夠正確的還原出 600Hz 弦波訊號，SNR 在 24-25dB，顯示 PNOFC 的載波能夠作為 phi-OTDR 系統的光源並提供一致的感測結果，有效提升系統之相干性與感測穩定度。

四、總結

本研究成功完成自主化分布式光纖聲學感測（DAS）系統之建置，並於西子灣近岸實際海底通訊光纜進行長距離量測，驗證系統在真實海洋環境下之連續監測能力。實驗結果顯示，該系統不僅能有效量測海流與海浪等自然環境變化，亦可進一步分析不同距岸位置之流速特性，證實利用既有海底通訊光纜進行大範圍海洋感測之可行性，並具備低成本與高空間效率之優勢。

此外，本研究進一步提出並實現基於相位鎖定窄線寬光學頻率梳（PNOFC）之多載波 WDM-DAS 架構。透過級聯光注入鎖定技術，使主雷射之窄線寬與相位一致性成功傳遞至各梳狀頻率成分，形成具高度相干性之多載波光源。實驗結果驗證，所產生之 20 GHz 間隔光頻梳具有 kHz 等級線寬與穩定相位關係，並能於 1 km 光纖聲學量測中穩定重建 600 Hz 外部振動訊號，各載波皆展現一致且優異之感測性能，其訊雜比均超過 24 dB。

綜合而言，本研究從實際系統建置與關鍵光源技術兩方面出發，不僅驗證了 DAS 於海洋環境監測之應用潛力，亦透過 PNOFC 提升多載波感測之穩定性與一致性，為未來發展高容量、高可靠度之水下分布式感測系統提供重要技術基礎，並有助於推動海纜監測、海洋觀測與智慧海域應用之進一步發展。

謝誌

致謝：
[1]本研究承國科會補助，計畫編號 NSTC 114-2221-E-110-000-
[2]本研究特別感謝臺灣大學海洋研究所柯彥廷教授提供位於國立中山大學沿岸之海纜資源，使本研究得以進行實地分布式聲學感測量測與驗證。

參考文獻

[1] M. R. Fernández-Ruiz, Z. Zhan, and M. Williams, “Seismic monitoring with distributed acoustic sensing from the near-surface to the deep oceans,” J. Lightwave Technol. 40(5), 1453–1463 (2022).
[2] K. Cui, Y. Liu, J. Li, and X. Bao, “A high-precision underwater acoustic source localization system based on φ-OTDR technique,” J. Lightwave Technol. (2025).
[3] W. Cao and G. Cheng, “Modeling and experimental research on receiving signal of multi-layer distributed acoustic sensing optical fiber in shallow water,” Opt. Fiber Technol. 67, 102692 (2021).
[4] J. Lin, et al., “Monitoring ocean currents during the passage of Typhoon Muifa using optical-fiber distributed acoustic sensing,” Nat. Commun. 15(1), 1111 (2024).
[5] Z. Pan, Y. Zhang, X. Bao, and L. Chen, “Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection,” IEEE Photon. Conf. (ACP), 1–3 (2011).
[6] S. Du, Y. Wang, J. Liu, and X. Fan, “Hardware-efficient phase demodulation for digital φ-OTDR receivers with baseband and analytic signal processing,” Sensors 25(10), 3218 (2025).
[7] F. Jiang, et al., “Low computational cost distributed acoustic sensing using analog I/Q demodulation,” Sensors 19(17), 3753 (2019).
[8] B. Yang, H. Zhang, and Y. Wang, “Recent advances in integrated vibration sensing and communication in digital subcarrier multiplexing systems,” Photonics 12(3), 2025.
[9] J.-T. Li, Y. Zhao, B. Stern, and M. Lipson, “Coherently parallel fiber-optic distributed acoustic sensing using dual Kerr soliton microcombs,” Sci. Adv. 10(3), eadf8666 (2024).
[10] H.-T. Tang and Y.-H. Hung, “Optical frequency comb generation using cascaded injection of semiconductor lasers,” Opt. Lett. 48(24), 6436–6439 (2023).
[11] J. Q. Chen, Y. Liu, and X. Bao, "Linewidth measurement of a narrow-linewidth laser: principles, methods, and systems," Sensors 24, 3656 (2024).

船舶水下噪音量測技術之現況與未來挑戰

王啟存[1]　魏瑞昌[2]　謝孟璋[3]

摘要

隨著全球海洋保護意識提升與國際海事組織（IMO）多年探討，對船舶排放之水下噪音日益重視亦逐步研擬管制措施，而標準化及可施行的量測技術也將成為造船產業對於水下噪音量測的核心課題。本文針對現行船舶水下噪音量測方法進行系統性綜述。首先，深入對比 ISO 17208 與船級協會等國際主流規範在量測場域、儀器佈置及資料或標準上的差異；其次，分析深海與淺海環境對傳播損失修正及背景噪音所帶來的技術挑戰。透過彙整國內外實船量測案例，總結現行方法在船舶水下噪音量測於實務上所面臨之挑戰。最後，針對未來量測流程的標準化與實際可施行之方法提出展望，旨在為船舶水下噪音量測方法提供具價值的理論參考與實務指南。

關鍵詞：船舶噪音、水下噪音規範、水下噪音量測方法

Current Status and Future Challenges of Underwater Noise Measurement Techniques for Ships

Chi-Chun Wang[1]　Ruey-Chang Wei[2]　Meng Chang Hsieh[3]

ABSTRACT

With the increase in global awareness of marine environmental protection and years of discussion by the International Maritime Organization (IMO), underwater noise emissions from ships have received increasing attention, and regulatory measures are gradually being developed. Standardized and implementable measurement techniques will also become a core issue for the shipbuilding industry in underwater noise measurement.

This paper provides a systematic review of existing underwater noise measurement methods for ships. First, a detailed comparison is made between ISO 17208 and major international regulations such as those from classification societies in terms of measurement sites, instrument arrangements, and data or standards. Second, the technical challenges caused by propagation loss correction and background noise in deep-water and shallow-water environments are analyzed.

By compiling domestic and international full-scale ship measurement cases, this study summarizes the challenges faced in practical applications of current underwater noise measurement methods. Finally, future prospects for the standardization of measurement procedures and practical implementable methods are proposed, aiming to provide valuable theoretical references and practical guidelines for underwater noise measurement of ships.

Keywords: Ship Noise; Underwater Noise Guidelines; Underwater Noise Measurement Methods

一、前言

海洋環境噪音來源可分為自然噪音與人為噪音。自然噪音包括風浪、地震及雨滴落於水面所產生之聲音；人為噪音則包括海洋工程及船舶活動等。其中，船舶噪音具有長期性、聚集性及低頻性等特徵。

過去的研究發現，隨著全球航運增長與船舶大型化，海洋水下噪音呈現逐年攀升的趨勢。根據 Andrew 等人[1]針對北美西岸海域的長期聲學觀測，對比 1963~1965 年與 1994~2007 年的資料發現，在約三十年的期間內，100 Hz 的低頻背景噪音顯著增長了 2~11 dB。該研究推測，這主要來源於船舶噸位與主機馬力的提升，以及航線運輸密度的成長。

[1] 國立中山大學海洋科學與科技全英語博士學位學程 博士生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 助理教授
[3] 國立中山大學海下科技研究所 助理教授

進一步探究其原由，隨著全球經濟(World GDP)與貿易量成長，世界商船總噸位數不斷攀升。Frisk[2]提出了噪音經濟學(Noiseonomics)的概念，透過比對過去 60 年來的船舶總噸位與 GDP 成長，證明了此經濟趨勢直接導致全球海洋低頻背景噪音呈現每十年平均上升 3.3 dB 的現象。

隨著船舶水下輻射噪音(Underwater Radiated Noise, URN)的影響日益明確，此議題已逐漸成為國際海事界關注的焦點之一。IMO 早在 2008 年(MEPC 58)[3]即將此議題納入議程，並與 ISO 17208-1[4]量測標準同步於 2014 年推出首份減噪指引，但受限於非強制性質，業界實務上的採用率極低。面對此一瓶頸，IMO 於 2023 年(MEPC 80)提出具體對策，發布了取代舊規的修訂版指南(MEPC.1/Circ.906）[5]。該指南提出更具體的水下噪音管理計畫，更強調須將噪音評估提前至船舶設計階段。為達此目標，IMO 目前已展開經驗建構階段以盤點實務困境；此一進程明確顯示了法規正由自願性朝向強制性邁進的必然趨勢，也使得建立準確、具可行性的標準化水下噪音量測方案，成為當前造船業即將迎來的挑戰。

IMO 持續推動此議題的主因，在於長年研究指出，大量商船所產生之低頻背景噪音已顯著提升海洋環境噪音水準；Erbe 等人[6]之綜述亦顯示，大量商船所產生之低頻背景噪音已顯著提升海洋環境噪音水準，並可能導致海洋哺乳類發生聽覺遮蔽(auditory masking)，進而壓縮其聲學通訊空間，影響覓食、導航、避敵、繁殖及生物互動等生存行為。此類影響對於棲息於沿岸、河口及陸棚等相對淺水海域之物種尤為敏感，例如：台灣白海豚、加拿大南方居留型虎鯨、加拿大聖羅倫斯河口白鯨及地中海僧海豹等，其核心棲地往往與港口、航道及高密度航運活動海域高度重疊，因此更易受到船舶水下噪音之長期累積影響。

基於此，本文將進一步整理目前國際上常見之船舶水下噪音量測規範與方法，聚焦於 ISO 17208 與各主要船級協會相關規範之差異，並比較其在量測場域、水深條件、儀器佈設、資料處理及適用目的等面向之技術要求，進而探討現行量測技術之限制與未來發展挑戰。

二、量測方法

ISO 17208 系列標準自 17208-1 發布至今已逾十年，而至 17208-3 的發布，顯示國際間對船舶水下噪音量測方法之標準化需求已逐步成形。其中，ISO 17208-3 所提出之量測指引，進一步納入淺水水域之船舶水下噪音量測方法，使原先多以深水精密量測為主的技術架構，開始朝向更貼近實務場域的方向發展。此一演進不僅反映出船舶水下噪音議題已由研究導向逐步走向工程應用與管理需求，也凸顯不同水域條件、量測目的與實務限制下，量測方法仍存在明顯差異。基於此，現行船舶水下噪音量測規範除 ISO 標準外，各主要船級協會亦分別提出相應之量測與評估方法，形成目前多套標準並行之技術架構。為釐清各規範間之異同，以下將分別介紹 ISO、DNV、ABS、BV、LR 等規範之量測方法，並比較其在量測場域、水深條件、儀器布設、資料處理及適用目的等面向之差異。

2.1 ISO 標準

ISO 17208-3[7]主要針對船舶水下輻射噪音之量測方法建立技術性指引，其核心內容涵蓋量測頻率範圍、船舶操作條件、最近通過距離(Closest Point of Approach,CPA)、試驗場地選擇、海面狀況、儀器性能、水下麥克風部署方式以及背景噪音量測等項目。與部分船級社規範不同，ISO 並未直接規定船舶噪音排放之上限值或分級標準，而是著重於提供一套可重現、可比較且具實務可行性的量測程序。因此，其定位較偏向建立標準化量測方法，而非作為噪音合格與否的直接判定依據。

在受測船舶條件方面，ISO 強調試驗前應明確掌握船舶之主要參數，包括船長、吃水、推進系統配置、主機功率、螺槳轉速及其他可能影響輻射噪音之操作資訊。量測期間應盡可能維持穩定且一致的航行與機械運轉條件，以降低不同航向間的變異。此要求係因船舶 URN 中螺槳空化噪音，對於船體與周圍流場狀態極為敏感，容易受到風及流變化影響。因此，量測控制上不宜以對地速度作為判據，而應更重視對水速度及主機、軸系與螺槳操作條件之恆定性。

在量測頻率範圍方面，ISO 建議量測應至少涵蓋 10 Hz 至 20 kHz，以取得足以反映船舶低頻機械噪音與中高頻空化噪音之特性。於場域空間條件方面，CPA 距離應於試驗前加以設定，且須確保量測期間船舶與水下麥克風之相對位置。標準要求 CPA 應足以滿足資料窗長度，使所取得訊號可進行後續分析與換算。

對於試驗場地選擇，ISO 對於淺水域量測關注重點並不僅限於水深是否符合定義，更重視場地是否有利於船舶穩定通過、是否能正確掌握 CPA 空間條件，以及是否具備相對穩定之背景噪音環境。海面狀況亦為重要考量因素，因風浪、降雨及周圍船舶活動皆可能提高背景噪音，影響受測船訊號之辨識與資料品質，因此量測應盡可能安排於環境條件穩定之情況下進行。

在儀器與部署方面，量測系統應具備足夠之頻率響應、動態範圍與低自噪聲特性，並完成必要校正，以確保資料可信度。水下麥克風配置上，ISO 保留一定彈性，可依場域條件採用單一或多支水下麥克風之部署方式，但前提是水下麥克風深度、位置與受測船之相對關係必須清楚已知。此外，背景噪音量測亦為不可忽略之步驟，通常應於試驗前後

進行，以確認量測期間受測船訊號未遭環境噪音或其他外界聲源掩蔽。整體而言，ISO 的目的並非嚴格限制單一量測配置，而是在兼顧技術合理性的前提下，降低量測執行門檻，擴大量測方法的適用性與參與度。如此可使更多不同條件下的船舶、場域與研究單位皆能依循共同原則進行量測，避免因要求過於嚴苛而造成實務推動困難，進而提升船舶水下噪音監測與管理工作的普及性。

2.2 船級社規範

本文如表 1 綜整挪威船級社(DNV)之 DNV-RU-SHIP[8]、美國驗船協會(ABS)之 Guide for the Classification Notation – Underwater Noise[9]、法國驗船協會(BV)之 NR-614[10]，以及英國勞氏驗船協會(LR)之 LR ShipRight-ADP[11]等四家船級社有關船舶 URN 之量測規範與噪音上限要求。以發展時序來說，DNV 為最早提出 URN 規範之船級社，於 2010 年即已發布相關規範，甚至早於 ISO 的指引之建立。其後，BV、LR 與 ABS 則多依循 ISO 17208-1 所提出之量測方法，逐步建立各自之量測程序與分級標準。DNV 則於 2018 年發布更新版本，將 ISO 對深水量測之指引納入其規範之中。值得注意的是，儘管 ISO 其後已發布 ISO 17208-3，然截至今各家船級社現行版本，包括 DNV、ABS、BV 及 LR，其主要引用與依循之量測基礎仍以 ISO 17208-1 為主。

表 1：船級社規範名稱及版本

	規範名稱	最早出版	最新版本
DNV	DNV-RU-SHIP[8]	2010	2024
ABS	Guide for the Classification Notation – Underwater Noise[9]	2018	2024
BV	NR-614[10]	2017	2018
LR	LR ShipRight-ADP[11]	2018	2018

2.2.1 淺水與深水量測

在深、淺水定義方面，各船級社之門檻並不一致。DNV 規定深水量測適用於水深大於 150 m，其判定不隨船長改變，定義相對單純。ABS 則要求深水量測時，自船舶龍骨以下起算之最小水深須為 150 m 或 1.5 倍的 LOA 取較大者，因此對大型商船而言，所需水深通常需要更深。LR 的深水定義亦與船長相關，基本上採大於 150 m 或 1.5 倍的 LOA 取較大者。BV 的規定則相對複雜，要求可概括為大於 200 m、2 倍 LOA，或在 LOA 大於 200 m 時採 1.5 倍 LOA 的條件。

在淺水量測方面，DNV 明確將 30 m 至 150 m 定義為淺水水域，因此其規範同時給出了淺水量測的明確下限與上限。ABS 則將 60 m 至 150 m 視為淺水量測範圍。BV 規範所對應之淺水量測範圍約為 50 m 至 150 m。LR 的淺水定義同樣與船長有關，規定為小於 150 m 或 1.5 倍 LOA 取其中較小者。

整體而言，若僅作概略區分，各規範對深、淺水量測之分界大致可視 150 m 為門檻，但實際適用時仍應依各船級社對船長與水深之要求判定，如表 2 所示。

表 2：船級社於量測水域水深要求

	水深	
	深水量測	淺水量測
DNV	>150 m	30~150 m
ABS	Max(>150 m, >1.5xLOA)	60~150 m
BV	Max(>200 m, >2 x LOA, LOA>200 m 時要>1.5 x LOA)	50~150 m
LR	Max(>150 m, >1.5 x LOA)	Min (<150 m, 1.5 x LOA)

在 CPA 方面，各家規範亦呈現不同設計邏輯。DNV 要求 CPA 應介於 100 m 至 200 m 之間，且不隨船長調整。ABS 則採較具空間概念之方式，其 CPA 要求為 100 m 與船舶 LOA 兩者取較大值，因此隨船舶 LOA 增加，所要求之 CPA 亦會隨之增大。LR 是直接參考 ISO 17208-1 的原則，因此為較接近 ISO 的量測方法。BV 則要求 200 m 或 1 倍 LOA 取較大者，在大型船舶上相對也會形成較大的通過距離要求。

在水下麥克風數量與配置方面，ABS 以量測角度作為主要限制條件，要求要有三支水下麥克風分別依相對於船舶聲源中心之垂直角 15°、30°、45°位置進行佈設。BV 同樣要求使用三支水下麥克風，但其配置方式較偏向以垂直固定麥克風間距為原則，而非直接以量測角度要求。至於 DNV 與 LR，在深水量測部分則多直接參照 ISO 17208-1，未再另行提出明顯不同之佈設要求。

但在淺水量測中，DNV 是四家之中最明確也最早將淺水量測發展為一套量測辦法的先行者，因此 DNV 對淺水量測就不再直接參考 ISO。在水下麥克風的佈置上 DNV 主要以單一水下麥克風以底碇方式佈放於海床上，並且提供明確的安裝方法，如圖 1，而 LR 則另外要求三支水下麥克風分別設於水深的 1/10、約半水深及海床上方約 5 m。而 ABS 及 BV 在淺水量測時，則大致沿用其深水量測之配置原則，如表 3 所示。

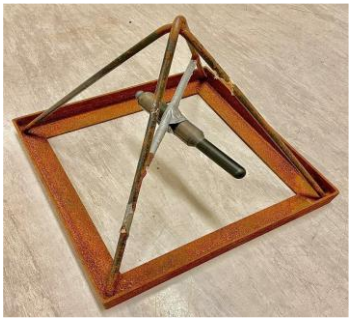


圖 1：DNV 海床底碇水下麥克風籠具範例[8]

表 3：船級社深、淺水量測船舶與儀器佈放要求

	CPA	水下麥克風	
		深水	淺水
DNV	100~200 m	參照 ISO 17208-1	底碇式 水下麥克風 x1
ABS	Max(100 m, LOA)	水下麥克風 x3 15°、30°、45°	水下麥克風 x3 15°、30°、45°
BV	Max(200 m, LOA)	水下麥克風 x3 固定間距	水下麥克風 x3 固定間距
LR	依照 ISO 17208-1	參照 ISO 17208-1	水下麥克風 x3 水深 1/10 & 半水深 & 離底 5m

在背景噪音量測與處理方面BV明定背景噪音應於試驗前後各量測一次，且受測船須遠離水下麥克風至少 2 英里，每次背景噪音量測時間至少 2 分鐘。ABS 則要求每一輪量測的開始與結束皆須進行背景噪音量測，每次至少 1 分鐘，且受測船應距離量測區至少 2 km。相較之下，DNV 與 LR 在深水量測部分仍主要依循 ISO 17208-1，但 DNV 在對於背景噪音門檻與修正方式有另行要求，但僅限於淺水量測上。

在海況與天候限制方面，各規範之要求如表 4 所示。ABS、LR 與 DNV 均有明確之操作條件。ABS 要求量測應在 SeaState 3 以下進行，且最大風級不超過 Beaufort 4。LR 規定測試時天候應不超過 Beaufort 4，通常以 SeaState 2 為原則，若可證明背景噪音不影響結果，方可接受 SeaState 3，並明確指出應避免降雨。DNV 直接限制可接受的最大海況為 Beaufort 4 及 SeaState 3。BV 則依不同水下麥克風佈放型式採取不同海況限制，例如底碇式可接受相對較高之海況，而浮動式則要求較低海況。

表 4：船級社於量測的海況要求

	Sea State	Beaufort
DNV	<3 (0.5~1.25 m)	<4 (11~16 kts)
ABS	<3	<4
BV	<2 (0.1~0.5 m)	浮動式<2 (4~6 kts) 底碇<3 (7~10 kts)
LR	<2 若可證明無影響可<3	<4

最後，在船舶航行與測量操作條件方面，ABS 要求受測船須沿預先設定之直線航道，以固定速度、固定機械設定及最小舵角通過量測區；測試起點設定為 CPA 前 2 倍長的資料視窗，終點則為 CPA 後 2 倍長的資料視窗；且每一測試條件下須完成左右舷各兩次，共四次。BV 則較強調多個資料視窗的分析概念，每次量測將針對−45°至+45°、每 5°間隔之不同視角切分資料視窗，且資料視窗至少應為 100 m 或 1 個船長取較大者。

相較之下，LR 與 DNV 在深水量測之船舶航行條件上，仍大致依循 ISO17208-1 的基本要求，未額外發展出如 ABS 或 BV 的獨立程序。但 DNV 於淺水上有明確指引要求每個完整的量測須包含左右舷各兩次的測試，且依不同船速對應規範中之要求改變測試之起點與結束點，這與其深水中的要求就完全不一樣。

2.2.2 規範曲線

目前各船級社對船舶 URN 之分級方式，並不是以船型作為主要分類依據，而是多以船舶用途或是操作方式作為規範曲線的適用標準。以 DNV 為例，其分類較為完整，區分為 Acoustic(A)、Seismic(S)、Fishery(F)、Research(R)及適用所有船舶的 Environmental(E)五類，顯示 DNV 依不同用途需求建立相應之噪音要求曲線，使各類具特殊功能之船舶得以對應其操作目的進行評估。

ABS 則將適用對象分為 propelled commercial vessels、research vessels 與 acoustic research vessels，並進一步以 T(Transit)、Q(Quiet Operation)、R(Research)、AT(thruster condition)及 AL(light survey condition)等標記對應不同噪音要求。其中，T 與 Q 主要適用於一般商業船舶，而 AT 與 AL 則多用於聲學研究船；此外，ABS 還設有 UWN+等級，用來對應需要比基本要求更嚴格的噪音限制。

LR 的分類方式相對簡易，僅區分為 Transit、Quiet 與 Research 三類。其中，Transit 跟 Quiet 並未明確限定適用之船型，而是較偏重於船舶航行區域的環境敏感程度作為依據；當船舶航行對水下噪音較敏感之區域時，Quiet 等級相較於 Transit 就更為適合。BV 的分類方式則與其他船級社略有差異，其主要分為 controlled vessel、advanced vessel 與 specified vessel 三類。前兩者分別對應 BV 提供的標準曲線，代表著不同程度的控制要求；specified vessel 則不預設固定曲線，而是由船級社依個案需求另行認定，並可引用如 ICES 209 等特定標準，主要適用於 seismic vessels、research vessels 等具有特殊低噪音需求的船舶。

為比較 DNV、ABS、BV 與 LR 之船舶水下噪音規範曲線，本文依各規範之近似標準進行分類整理。對 IMO 目前較為關注之商船，其對應之規範曲線比較結果如圖 2 所示；而對於在噪音影響評估上更為重視之研究船，則整理如圖 3。

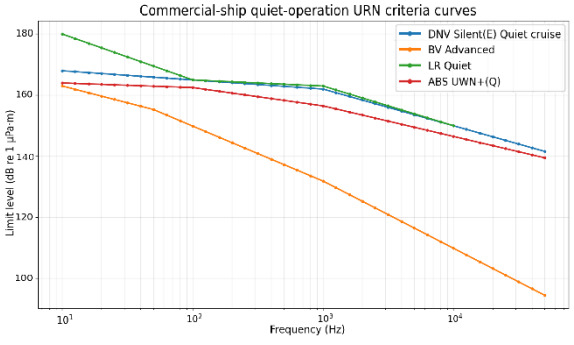


圖 2：商船 URN 規範曲線

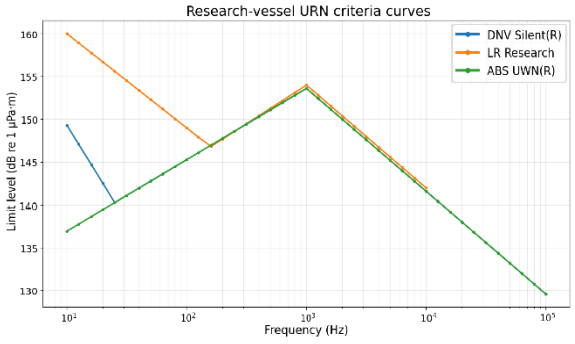


圖 3：研究船 URN 規範曲線

各家規範雖在量測方法、儀器配置、執行難易度及許多要求上存在明顯差異，但由標準曲線比較可見，不論商船或研究船，標準曲線於 100 Hz 以下低頻段仍存在較大差異，而於 100 Hz 以上頻段則普遍呈現較高的一致性或相似性。此結果顯示，各規範在高頻的量測結果上已有相當大之共識。換言之，若要使不同量測方法所得結果具備可比性，其關鍵可能不僅在於量測方法本身，而更在於量測後如何透過合理的傳輸損失修正，將不同場域與不同環境條件下的量測結果回歸至共同基準。相較之下，低頻範圍之差異則可能反映出各規範對場域效應、傳播模型及保守程度仍存在不同假設。

三、傳輸損失

就船舶 URN 的量測而言，傳輸損失(transmission loss, TL)之處理方式，一直是量測結果是否被合理推算回 1 m 聲源相互比較的重要參數。尤其在淺水水域中，聲波傳遞不再近似深水條件，除空間擴散外，尚會受到海面反射、海床反射、聲速、水深、聲源深度以及水下麥克風佈放深度等因素共同影響，因此量測所得之接收聲壓級若未經適當修正，往往難以直接作為船舶噪音表現之評價依據。比較 ISO 17208-3、DNV、BV、ABS 與 LR 可見，各規範雖皆試圖將量測結果轉換為可與標準曲線比對之代表量，但在 TL 的處理與方法選擇上，仍存在明顯差異。

首先，ISO 17208-3 已顯示國際標準對淺水傳播問題的處理，正逐步由簡化距離修正走向較完整的物理傳播模型。該標準明確指出，淺水量測所得之聲源大小應由量測聲壓與透過傳輸損失校正而得。ISO 17208-3 在淺水環境下，若仍僅以單一擴散方式近似所有頻率與場址，將不足以反映實際聲波傳遞的情形，因此必須透過較具物理基礎的空間修正，才能使量測結果具有較佳的代表性與可比性。而 LR 大致參考 ISO 之方法，僅要求提供計算方法及使用之相關參數供查證。

DNV 在深水量測可依 ISO 17208-1 執行，並允許聲源位準由實測的 TL，或直接以式(1)之形式進行距離修正；對淺水量測，亦延續相似思維，允許在測試場實測 TL 或式(1)作為修正方式。然而 DNV 並未完全忽略淺水中空間與聲源位置差異所帶來的影響，對底碇式水下麥克風，若其高度不超過海床上方 0.2 m，尚需額外給予底床反射的校正。此顯示 DNV 已意識到海床反射效應，對最終結果仍有不可忽略之影響。

$$TL = 18\log_{10}\frac{r}{r_{1m}} \quad (1)$$

BV 對於 TL 的處理方式則更注重於的空間造成的變化。依其規範，淺水條件下的 TL 應考量聲速、聲源深度、水下麥克風佈放深度，以及來自海面及海床的反射等影響因素來進行計算。對不同頻率範圍，BV 建議採用不同數值方法，例如低頻使用 wave integration，高頻則可採 ray tracing，若使用其他計算方式，則須提供足夠參數供查證。在 BV 的規範中僅在無法採用前述計算方式時，才允許使用經驗式，而此方法將導致較保守且較不準確的評估，甚至增加量測不確定性。

ABS 將深水與淺水 TL 以經驗式提供計算，深水如式 2，淺水則如式 3，其中 N 為幾何擴散的係數，α 為吸收項。若具備場址量測或詳細分析資料，則 N 可依實際情況計算；若無，則可採用 N=18 作為計算值。另外底碇式水下麥克風與海床距離小於 0.2 m，可對量測值做修正以反映海床之反射。

$$TL = 20\log_{10}\frac{D_{total}}{D_{ref}} \quad (2)$$

$$TL = \mathrm{N}\log_{10}\frac{D_{total}}{D_{ref}} + \alpha\left(\frac{D_{total}}{D_{ref}}\right) \quad (3)$$

綜上所述，各規範在前端量測配置方面雖存在一定差異，例如水下麥克風數量、佈放方式、船舶航行方式、CPA 的要求，甚至在試驗難度也不一致，但在最終資料解讀上，都必須仰賴 TL 修正，才能回推聲源進行比較。也因此，量測方法主要影響的是資料取得的穩定性、背景噪音敏感度與實施成本；而不同方法所得結果能否被拉回相同基準，則更大程度取決於 TL 修正是否足以反映實際場域中的水深、海床、幾何條件與頻率效應。從這個角度來看，TL 並非單純的後處理步驟，而是連結量測值與規範判定結果之間最關鍵的一環。

因此，若進一步從規範發展趨勢觀察，可以發現現行淺水量測已逐漸由經驗式，轉向實際量測值。其中 ISO 17208-3 與 BV 較偏向數值模擬建立 TL，DNV 與 ABS 則可用經驗式修正，亦接受實際量測來校正 TL。此種差異反映各規範制定時有許多不同的考量，也說明目前對淺水 TL 的標準化仍處於持續收斂之過程。然而，不論採用何種形式，所有規範都顯示在淺水船舶水下噪音量測中，TL 修正的重要性，尤其在不同量測方法及不同場域量測時，更可能成為主導結果差異的關鍵因素。

四、量測案例

Wang[12]於 2019 年依據 DNV 船舶水下噪音淺水海域量測規範，分別於台灣西南與北部海域，對兩艘研究船進行水下輻射噪音量測。其中，一艘為新造研究船，量測時處於輕船載況；另一艘為已服役數年的勵進號，量測時則為一般裝載載況。兩處量測皆採底碇式佈放單一水下麥克風，佈設水深約 30~40 m，受測船舶航行水深約 40~50 m，並依規範完成各項標準量測程序。由兩艘船之量測結果(圖 4 及圖 5)可見，兩艘船各自取得的三組量測資料，在反算聲源位準後之差異約介於±1.2 dB，顯示各組量測結果間變異極小。就船舶水下噪音量測而言，此一差異幅度已屬相當有限，代表在不同海域與不同船舶載況條件下，該量測方法仍具有良好的重複性，亦驗證了依循 DNV 淺水量測程序於台灣近岸海域執行船舶水下噪音量測之可行性。另一方面，該研究亦指出，船舶聲源位準的反算結果與 TL 的設定密切相關；若僅採用規範中的固定 TL 模型，可能無法充分反映實際海域中受海床、海面及地形影響之聲傳特性，進而影響最終噪音曲線與合規判定。

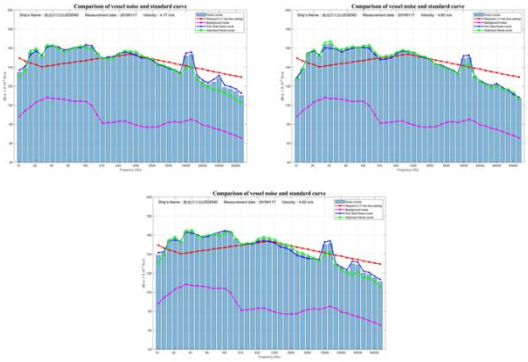


圖 4：勵進號 11 kt 量測結果

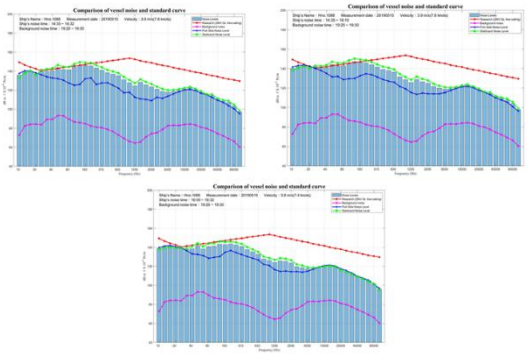


圖 5：新研究船 8 kt 量測結果

相較之下，MacGillivray 等人[13]於 2023 年在加拿大以大規模實海域試驗系統性探討淺水量測方法本身的可重複性。該研究在淺水環境中由於海床反射會造成多重傳播路徑，致使 TL 之估算遠較深水複雜，因此若要在淺水中獲得可重現的船舶聲源位準，必須建立明確且穩定的 TL 推估方法。其團隊於 2021 年 5 至 7 月間，在 30 m、70 m 與 180 m 三種水深條件下，針對 3 艘相似類型的船舶進行多次重複量測，累積取得 1880 次船舶通過紀錄，參考 ISO 17208-2 配置水下麥克風於 3 組垂直陣列及 2 組水平陣列中，如圖 6。研究結果顯示，淺水量測所得之船舶聲源位準可與深水量測之結果達到約±2.5 dB 內的一致性，於相同量測場域之結果約為±1.5 dB 以內，說明淺水海域並非不能進行可靠量測。

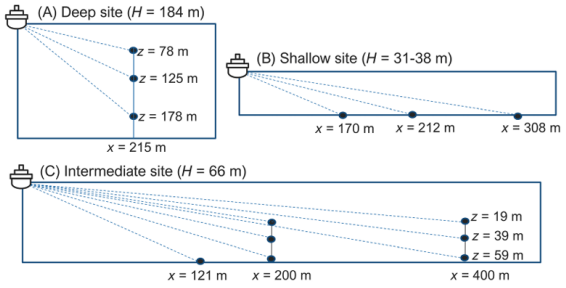


圖 6：船舶水下噪音量測儀器佈置

綜合上述兩項研究，Wang 實際依循 DNV 規範於台灣近岸海域進行實船量測的可行性，並指出 TL 的計算將直接影響聲源反算與標準符合性判讀；而 MacGillivray 等人則從 ISO 方法來證明，只要妥善處理淺水環境中的多重路徑與海床反射效應，淺水量測同樣可以得到具有良好重複性與深水標準相容的結果。兩者共同說明，淺水船舶水下噪音量測的核心問題並不僅在於是否能量測，而更在於如何建立合理的 TL 估算方式、選擇適當的水下麥克風佈放形式，以及控制現地環境條件對結果的影響。

五、結論

本文彙整 ISO 17208 系列與 DNV、ABS、BV、LR 等主要船級規範之船舶水下輻射噪音量測方法，結果顯示，各規範雖皆以取得可比較之船舶聲源位準為目標，但在量測場域、水深條件、CPA 設定、水下麥克風佈放方式、背景噪音處理及傳輸損失修正等方面，仍存在明顯差異。此一差異不僅反映各規範制定時對技術可靠度、保守性與適用海域之不同考量，也直接影響量測執行的難易度、風險與成本。尤其對新船而言，URN 量測多半須於試俥階段配合執行，量測程序若過於複雜，往往將進一步增加船廠在船期安排、支援船舶調度、儀器佈放與回收、人員操作及航行安全上的負擔。因此，未來若船舶 URN 認證需求逐漸提升，量測方法是否具備實務可操作性，將成為船東、船廠與驗證單位共同面對的重要課題。

由本文比較亦可發現，雖然各家規範在前端量測配置上有所差異，但若欲使不同場域、不同方法所得結果可能具備可比性，關鍵並不僅在於量測方式本身，而更在於後續傳輸損失修正是否足以反映實際聲傳條件。特別是在淺水環境中，聲波傳播會受到水深、海床底質、海面與海床反射、聲源深度

及接收深度等多重因素影響，若仍僅以簡易距離衰減概念處理，則可能難以真實反映淺水中船舶聲源特性。換言之，量測方法決定的是資料取得的穩定性與執行成本，而 TL 修正則更直接決定最終結果能否回歸同一基準，並作為不同規範曲線或不同船舶間比較的依據。這也說明了，未來淺水量測技術發展的核心，不應僅停留於儀器如何佈設及理想海域的量測場，而應進一步聚焦於 TL 模型、海域特性與量測結果之關聯性建立。

另一方面，本文所整理之實船案例與相關研究亦顯示，淺水海域並非無法進行可靠之船舶 URN 量測。既有研究指出，在量測程序與 TL 修正獲得妥善控制的前提下，淺水量測之重複性可達約±1.5 dB，顯示其結果具有良好穩定性，且在一定條件下可與深水量測結果相互對照。此一結果具有重要實務意義，因為全球多數航運繁忙區域、港口外海與沿岸航道，其水深本就多屬淺水或中等水深範圍。若未來量測制度仍過度依賴深水場域，則不僅執行門檻較高，也難以符合大多數船舶實際營運海域之需求。是故，發展可於近岸或淺水海域執行、且能與既有深水標準相互比擬之量測方法，不僅具有研究價值，更具高度實務必要性。

此外，若未來 IMO 或各船級社進一步將 URN 管理由現行指引性質推向更具拘束力之要求，則船舶水下噪音量測之需求勢必大增，對於海洋生物保育與敏感海域管理亦將帶來正面效益。然而，船舶噪音表現並非一成不變。隨著船齡增加，機械設備老化、推進效率變化、船體表面污損及海生物附著等因素，均可能使船舶阻力上升、流場惡化，進而增加實際水下噪音排放。相較之下，現行制度大多聚焦於新船交付前後之一次性量測與認證，但船舶設計壽命通常可達 20 至 25 年，實際服役年限甚至可能更長，若於其全壽期中缺乏後續追蹤或再評估機制，則僅憑新船階段之量測結果作為長期環境表現依據，顯然仍有不足。從海洋環境管理角度而言，未來制度設計除應重視新船符合性外，亦應思考如何建立船舶服役期間之週期性追蹤或分階段評估機制。就實務面而言，許多大型船舶進出港之航道或近岸水域，未來或可作為建立長期量測場域之潛在候選地點。

綜上所述，船舶 URN 量測未來之發展方向，應不僅止於提升量測精度或增加規範要求，而更應朝向可執行、可比較、可追蹤之整體制度建構。對新船而言，量測方法必須兼顧實務操作性與驗證需求；對量測結果而言，應建立更具代表性之 TL 修正與淺水場址評估方法；對長期管理而言，則應補強現行規範對船舶服役期間噪音變化之關注。唯有如此，船舶水下噪音量測制度方能真正兼顧工程可行性、認證實務與海洋保育目的，並回應未來國際法規趨勢下之實際需求。

參考文獻

[1] R. K. Andrew, B. M. Howe, and J. A. Mercer, "Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast," J. Acoust. Soc. Am., vol. 129, no. 2, pp. 642-651, 2011.

[2] G. V. Frisk, "Noiseonomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends," Sci. Rep., vol. 2, 2012, Art. no. 437.

[3] International Maritime Organization, "Provisions of the work programme and agenda of the Committee," Marine Environment Protection Committee, Rep. MEPC 58/19, 2008.

[4] International Organization for Standardization, "Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships," ISO, Standard 17208-1, 2012.

[5] International Maritime Organization, "Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life," IMO, Rep. MEPC.1/Circ.906, 2023.

[6] C. Erbe, S. A. Marley, R. P. Schoeman, J. N. Smith, L. E. Trigg, and J. Z. Embling, "The effects of ship noise on marine mammals-A review," Front. Mar. Sci., vol. 6, 2019, Art. no. 606.

[7] International Organization for Standardization, "Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships," ISO, Standard 17208-3, 2025.

[8] DNV, "Measurement procedures for noise emission," in Rules for Classification: Ships (RU-SHIP), DNV GL, 2024, pt. 6, ch. 7, sec. 6.

[9] American Bureau of Shipping, "Underwater Noise and External Airborne Noise," ABS, 2024.

[10] Bureau Veritas, "Underwater radiated noise (URN)," Bureau Veritas, Rep. NR 614, 2018.

[11] Lloyd's Register, "Additional Design and Construction Procedure for the Determination of a Vessel's Underwater Radiated Noise," Lloyd's Register, UK, 2018.

[12] C. C. Wang, "Establishment of Vessel Underwater Noise Measurement and Analysis System," M.S. thesis, Inst. Undersea Tech., National Sun Yat-sen Univ., Kaohsiung, Taiwan, 2020.

[13] A. O. MacGillivray, S. B. Martin, M. A. Ainslie, J. N. Dolman, Z. Li, and G. A. Warner, "Measuring vessel underwater radiated noise in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., vol. 153, no. 3, pp. 1506-1524, 2023.

崩波型碎波氣泡聲學特性與尺寸分布之實驗研究

林佑安[1] 劉冠汶[2,*] 楊瑞源[3] 張鈞翔[4] 陳品嘉[1] 王佩妘[4] 黃清哲[5]

摘要

大洋中較大尺度之碎波現象，已透過水槽實驗量測碎波氣泡聲音並配合經驗公式，建立氣泡尺寸與波浪能量耗散率之關係。然而，針對近岸地區碎波過程中所生成氣泡之相關研究仍有限。因此，本研究旨在探討波浪於近岸因潛化而發生破碎時，其所產生之氣泡尺寸分布特性。本研究於國立成功大學水工試驗所流力實驗室造波水槽中進行實驗。水槽長 20 公尺、寬 0.5 公尺、深 0.7 公尺，並設有直推式造波機。藉由於水槽底部設置坡度為 1/20 之人工緩坡，使波浪於傳播過程中發生潛化，進而形成崩波型碎波(spilling breaker)。實驗條件包括水深 20 公分與 30 公分、波浪週期 0.8 秒與 1.3 秒，以及波高 4 公分、6 公分與 8 公分，以模擬不同碎波強度下之氣泡生成情形。研究方法為於碎波帶下方布設水下聽音器(hydrophone)，量測碎波過程中氣泡生成所產生之聲音訊號。由於氣泡於形成初期會因振動而輻射聲音，且其輻射頻率與氣泡半徑呈反比，因此可藉由聲學訊號推估氣泡尺寸。本研究初步分析結果顯示，可擷取持續時間約 0.025 秒之氣泡聲音訊號，並進一步透過頻譜分析辨識氣泡尺寸及其分布特性。本研究同步利用高速攝影機記錄碎波發展歷程及氣泡群動態演變，並嘗試由影像估算單位體積含氣率，以進一步推估碎波之能量衰減。未來將進一步比較聲學分析與光學方法所得結果，以評估被動式聲學技術應用於近岸碎波氣泡尺寸分布研究之可行性與適用性。

關鍵詞：碎波氣泡聲學特性、崩波型碎波、氣泡尺寸分布、造波水槽實驗

Acoustic Characteristics and Size Distribution of Bubbles in Spilling Breaker

You-An Lin[1] Kuan-Wen Liu[2] Ray-Yeng Yang[3] Chin-Hsiang Chang[4] Pin-Chia Chen[1] Pei-Yun Wang[4] Ching-Jer Haung[5]

ABSTRACT

In the open ocean, Large-scale breaking wave phenomena have been characterized by measuring bubble noise in flume experiments and utilizing empirical formulas to establish the relationship between bubble size distribution and wave energy dissipation rates. However, research regarding the characteristics of bubbles generated during the breaking process in nearshore area remains limited. Consequently, this study aims to find out the size distribution of bubbles produced when waves undergo shoaling and subsequent breaking in nearshore regien. Experiments were conducted in a wave flume at the Hydraulics Laboratory of the National Cheng Kung University, measuring 20 m in length, 0.5 m in width, and 0.7 m in depth, equipped with a piston-type wave maker. An artificial slope with a gradient of 1/20 was installed at the end of the flume to let the wave shoaling happened, resulting in the spilling breakers. The experimental factors included water depths of 20 cm and 30 cm, wave periods of 0.8 s and 1.3 s, and wave heights of 4 cm, 6 cm, and 8 cm to simulate bubble generation under varying conditions of breaking waves . By equipping hydrophones on the bottom, it can clearly capture acoustic signals of bubbles. Since the oscillation occured during the initial formation of bubbles, and the radius of bubbles are related to the frequency of the oscillation, the bubble size can be estimated via acoustic signals. Preliminary results indicate that bubble acoustic signals is about 0.025 s, allowing for the identification of bubble sizes and characteristics through spectral analysis. Simultaneously, a high-speed camera was utilized to record the evolution of the breaking process. These images were used to estimate the void fraction per unit volume, further facilitating the estimation of wave energy dissipation. Future work will involve a comparative analysis between acoustic and optical results to evaluate the feasibility and applicability of passive acoustic techniques for studying bubble size distributions in nearshore breaking waves.

Keywords: Acoustic signal of breaking wave; Spilling breaker; Bubble size distribution; Flume experiment

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士班研究生
[2] 國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授；通訊作者 (E-mail：kwliu@gs.ncku.edu.tw)
[3] 國立成功大學水利及海洋工程學系 教授
[4] 國立成功大學水利及海洋工程學系 學士班
[5] 國立成功大學水利及海洋工程學系 名譽教授

一、研究目的

關於大洋中深水區域的碎波現象，學術界已經有先進進行碎波的氣泡聲學訊號量測實驗，結合經驗公式，成功建構出氣泡尺寸分布與波浪能量耗散率之間的定量關聯(Na et al., 2020)[1]。這項技術為理解深海能量交換提供了重要基礎。

然而，當場景轉換至近岸海域時，受限於地形較淺與波流潛化作用，針對碎波過程中氣泡演化機制的相關研究仍顯不足。有鑑於此，本研究聚焦於探討波浪在近岸緩坡的推移過程中，受地形影響產生潛化作用而使波浪破碎時，其中所生成的氣泡尺寸分布特性。期望能夠填補近岸碎波聲學觀測的空缺，並於未來剖析氣泡在近岸能量衰減中所扮演的重要角色。

二、研究方法

分析聲音的工具主要是傅立葉轉換以及短時傅立葉轉換，將時域訊號轉換成頻域訊號以及時頻圖，有助於進一步的分析討論。

2.1 研究流程

首先提出欲透過聲音訊號分析氣泡尺寸分布特性，接著設計不同波浪條件進行實驗進行聲音收錄，再者針對音訊進行快速傅立葉轉換(FFT)及短時傅立葉轉換(STFT)，由頻譜圖及時頻圖來分析氣泡主要集中的頻帶。最後經由 Minnaert (1933)[2]提出的自然頻率與氣泡半徑之關係式，將頻率轉換成對應之氣泡半徑，得出氣泡尺寸的分布。

目前本研究推進到頻譜圖(spectrum)及時頻圖(spectogram)之階段。關於數據處理的流程，首先將音訊進行讀檔，產出顯示音訊基本資訊，如資料點數、取樣頻率、音訊時長等；接著做電壓(單位：伏特，Voltage)與聲壓(單位：帕，Pascal)之間的靈敏度轉換，水下麥克風所收錄之資料為電壓值，透過聲場壓力變化導致壓電材料做出相應變化，因此透過水下麥克風的靈敏度轉換便能得知該生場之聲壓變化；下一步先行確認原始時域訊號，並將結果進行 FFT 產出頻譜圖；之後將原始時域訊號進行高通濾波，氣泡相對於環境噪音及其他外在干擾屬於高頻訊號，因此採用高通濾波初步過濾掉噪音；在濾波後對其進行 FFT 轉換產出新的頻譜圖，並將頻譜圖由聲壓轉換成聲壓位準，與原始訊號的頻譜圖做比較；最後針對濾波後訊號進行短時傅立葉轉換，產出時頻圖。

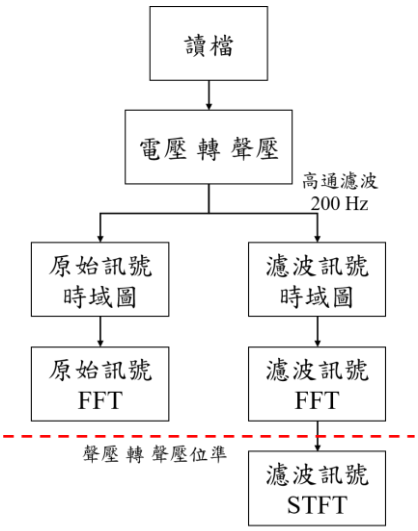


圖 1：資料分析流程圖

2.2 伽伯轉換(Gabor transform)

伽伯轉換是一種短時傅立葉轉換，可以看作特殊窗函數的短時傅立葉轉換，所套用之窗函數為高斯窗函數(Gaussian window)，數學式如下：

$$G_x(t,f) = \sqrt[4]{\sigma}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\sigma\pi(\tau-t)^2}\, e^{-i\omega\tau} x(\tau)\, d\tau \qquad (1)$$

其中$x(\tau)$為輸入之聲音訊號，$e^{-\sigma\pi(\tau-t)^2}$這個部分即為高斯窗函數，而σ作為調整窗函數寬度的參數，σ越大窗函數越窄，時域解析度高而頻域解析度低；反之則時域解析度低、頻域解析度高。$e^{-i\omega\tau}$則是傅立葉轉換的核心。

使用伽伯轉換的目的，主要有以下優點，第一為時頻解析度最佳化，能夠在時頻兩軸之間達到最小時頻積。第二為使產出結果有時間維度，優於傅立葉轉換。第三為窗函式的形式與氣泡衰減形狀相似，同為指數衰減(exponential decay)，收斂效果佳。

相關參數設定，窗函數寬度為 2048 個點，重疊點數 1536 點(重疊 75%之窗函數寬度)。資料採用閾值設定為高於平均值 1.1 倍將會被納入，未達標者剔除其值設定為 0。而頻率採用 500 Hz 至 25 kHz，由於 300 Hz – 400 Hz 的訊號大多屬於氣泡團所發出的聲音，而非單一氣泡之振動，且 300 Hz 所對應之氣泡半徑為 1 cm，已經算是相當巨大之氣泡，故下限採用 500 Hz；由 Zou et al. (2022)發表，其中之水槽實驗所量測到之氣泡頻率不超過 10 kHz，因此上限預留為 25 kHz。

三、實驗配置

實驗是於國立成功大學水工試驗所的流力實驗室造波水槽中進行。水槽長 20 m、寬 0.5 m、深 0.7 m，搭配直推式造波機。實驗設計參考了 Lee (2022)[3]所發表的論文，所使用的造波水槽為同一座。

3.1 水深地形

為了能夠模擬近岸碎波發展之環境，於水槽另一端設置了一座人造斜坡，目的在於模擬波浪傳遞至近岸時的潛化過程。為了更貼近於真實的海岸，參考了近岸防護相關論文等(Lee, 2022)[3]實際應用於環境的案例，最終採用斜率 1/20 的人造斜坡，長約 8 m。而水深部分根據 Lee (2022)[3]的實驗設計定為 30 cm，另外增加 20 cm 水深條件進行實驗。

除此之外，由於後續將配置水下麥克風置於底床，尚有一定厚度，為求嚴謹不影響波浪傳遞，於斜坡底床中央設有長條形凹槽，水下麥克風可於凹槽內調整至最佳收音位置，再將其餘凹槽部分蓋住維持平整，如下圖 2。

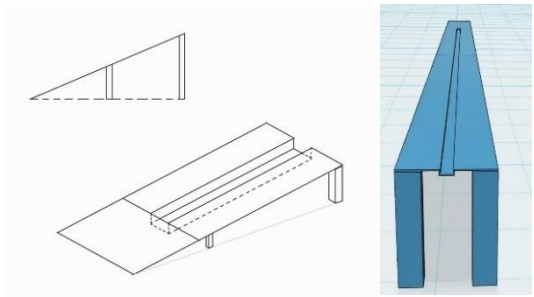


圖 2：人造斜坡側視圖(左上)、立體示意圖(左下)、模型圖(右)

3.2 波浪條件

利用直推式造波機，分別產生週期 0.8 s、1.3 s，以及波高 4 cm、6 cm、8 cm 的波浪，經過計算所有波浪皆屬於崩波型碎波(spilling breaker)，共 12 種波浪條件，如下表 1。

表 1：波浪條件

編號	水深 h(m)	波高 H(m)	週期 T(s)	碎波相似參數(ξ)	碎波點水深(m)
N01	0.2	0.04	0.8	0.24	0.056
N02	0.2	0.06	0.8	0.19	0.081
N03	0.2	0.08	0.8	0.17	0.108
N04	0.2	0.04	1.3	0.32	0.032
N05	0.2	0.06	1.3	0.26	0.046
N06	0.2	0.08	1.3	0.23	0.059
N07	0.3	0.04	0.8	0.25	0.052
N08	0.3	0.06	0.8	0.20	0.075
N09	0.3	0.08	0.8	0.17	0.100
N10	0.3	0.04	1.3	0.35	0.028
N11	0.3	0.06	1.3	0.29	0.040
N12	0.3	0.08	1.3	0.25	0.051

每一組波浪條件將執行 5 次，每一次造波為 3、8、3 個波；由於硬體設備的關係，需要漸進時間達到目標波浪條件，因此前 3 個波為直推式造波機啟動並逐漸加大推動幅度直到設定值，接著 8 個波將會是目標之波浪條件，後續即取該期間之資料進行分析，最後停止時亦同理，造波機利用最後 3 個波逐漸減少推動幅度直至停止。

3.3 儀器設置

3.3.1 收音系統

收錄聲音最主要的設備，為 Brüel & Kjær 8104 兩支，搭配專用的訊號放大器。靈敏度分別為 46.5 μV/Pa、49.0 μV/Pa，放大倍率為 10 mV/Pa。兩支水下麥克風安裝在斜坡底床上，相隔 10 cm，為了防止鋼材斜坡結構直接對其產生震動影響，在接觸面以吸音棉作為鋪墊，以達到減噪之效果，如下圖 3 所示。

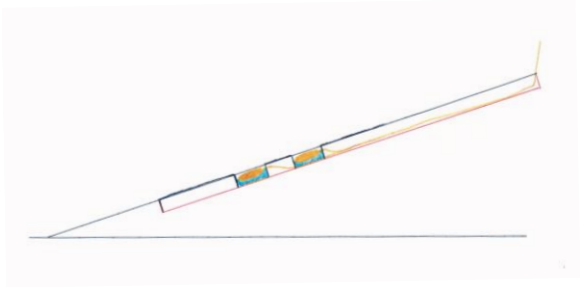


圖 3：水下麥克風示意圖(淺藍色為吸音棉鋪墊)

連接到 NI 的訊號擷取器(DAQ)，其中取樣頻率設置為 50 kHz，由 Zou et al.(2022)[4]的實驗結果，碎波氣泡的聲音頻率集中於 2 k – 10 kHz，因此設計 50 kHz 的取樣頻率，以測量到 25 kHz 以下的聲音訊號。

3.3.2 波高計

主要用來觀測波浪是否符合本研究所設計之條件。另外之用途，亦可觀察波浪潛化過程之波高變化。總共配備 6 支電容式波高計，於造波機前方架設第一支，往後每 6 公尺一支，第三支起往後每 1 公尺一支(斜坡起始處)，如圖 4 所示。其取樣頻率為 25 Hz。

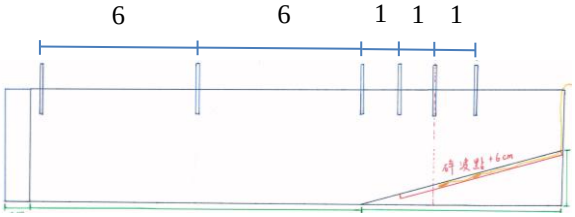


圖 4：波高計配置示意圖(公尺)

3.3.3 高速攝影機

目的要能夠清楚捕捉到某一個瞬間的氣泡分布之畫面，本研究亦嘗試使用手機慢動作錄影、Go pro 高幀率錄影，但效果皆不盡人意，無法辨識出碎波發生瞬間清晰的氣泡輪廓。因此最後採用最有效的方式，利用高速攝影機捕捉碎波瞬間的畫面。

除此之外，本研究於背景架設珍珠板，並加入照明燈提供光源，提高光線於氣泡表面的折射、反射，使肉眼更能輕易識別，結果如圖 5 所示。

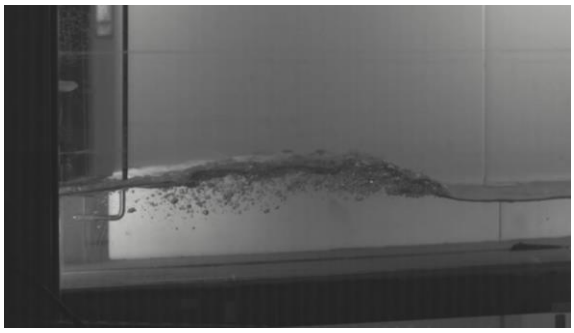


圖 5：碎波產生氣泡的瞬間

四、初步結果

以 N03 這組波浪條件，水深 20 cm、波高 6 cm、週期 0.8 s，之測量結果為例。首先檢查時域訊號是否有收錄到目標聲音訊號。由圖 6 可以發現，所呈現之訊號似乎被波浪衝擊波所主導，因此進行 200 Hz 高通濾波，將造波機所產生的波浪脈衝以及低頻的噪音一併濾除，結果如圖 7，即為常見合理之聲音訊號。最後放大局部時域訊號至 0.01 秒等級，發現呈現指數衰減之氣泡振動聲音訊號，如圖 8。

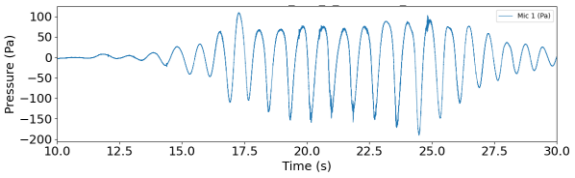


圖 6：原始音檔時域訊號

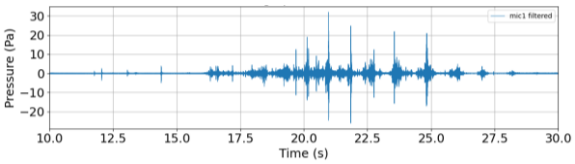


圖 7：濾波音檔時域訊號

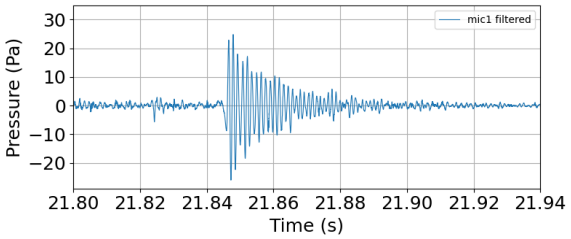


圖 8：氣泡振動之聲音時域訊號

接著進行傅立葉轉換，於圖 9 可以發現 2000 Hz 以下有一大部分集中的訊號，於實驗當下有另外收錄該環境之聲音，大多集中於低頻段，因此判斷圖 9 該處為環境之雜訊，在後續之研究將會對目標音訊扣除環境噪音之頻譜，已達到辨識碎波氣泡更佳的效果；在收音的過程中有發現造波機之的聲音頻率為 4000 Hz，由於實驗進行於長條形封閉水槽，可能產生駐波效應，於 4000 Hz 之奇數倍數頻率產生相應之倍頻訊號，因此推測在 4000 Hz、12000 Hz、20000 Hz 處有峰值出現為長條形水槽之駐波效應所導致；其餘在整個頻率域中皆有零星的峰值，即為氣泡之頻率。

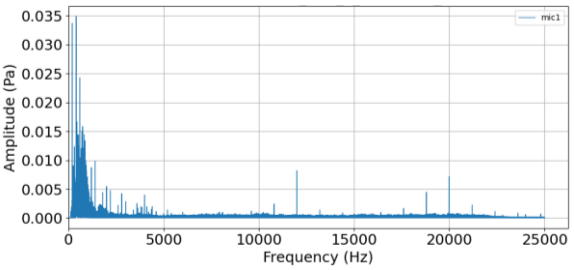


圖 9：濾波訊號之傅立葉轉換(Pa)

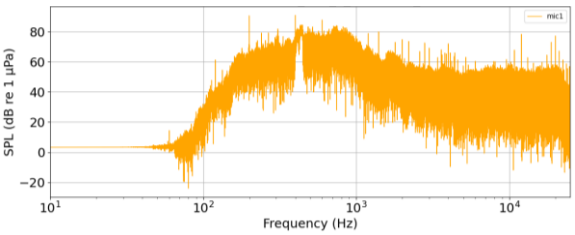


圖 10：濾波訊號之傅立葉轉換(dB)

最後為伽伯轉換。下圖 11 為擷取一次碎波訊號之片段進行伽伯轉換，參考圖 7 時域訊號，擷取 24.5 s 至 25.5 s 該次碎波事件。圖 11 中，每一個峰值即代表一個氣泡。

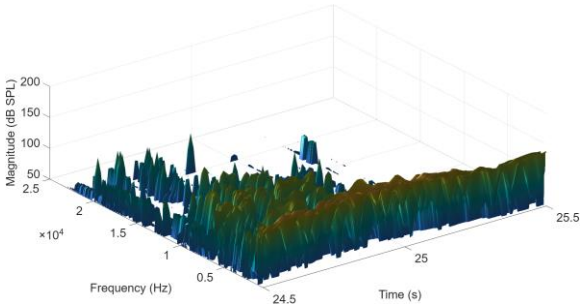


圖 11：伽伯轉換之結果

最後進行頻率與氣泡半徑之轉換，經過 Minneart 公式計算可得：

表 2：頻率與對應之氣泡半徑

頻率 F (Hz)	對應氣泡半徑 R (mm)
500	6.566
1 k	3.283
3 k	1.094
10 k	0.328
25 k	0.131

頻率與對應的氣泡半徑呈線性關係，後續將會進行各個對應之氣泡尺寸統計，對氣泡尺寸分布做進一步之分析。

五、未來展望

首要目標為將碎波氣泡的尺寸分布特性歸納出來，其次是與光學之結果做比較，提出聲學、光學兩種方法之互補處。另外，在 Na et al. (2020)[1] 有提到利用波浪的含氣率能夠建立波浪能量耗散的推估模型，期望能夠利用本研究之結果，推估碎波之含氣率，進而建立氣泡尺寸分布特性與波浪能量耗散之關係。

謝誌

感謝國立成功大學水工試驗所租借實驗之場地以及器材。感謝國立成功大學水利及海洋工程學系吳昀達副教授，對於實驗內容提供相當多改良建議，讓實驗得以順利進行。

參考文獻

[1] B. Na, K.-A. Chang, and H.-J. Lim, “Flow kinematics and air entrainment under laboratory spilling breaking waves” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 882, A15, pp. A15-1 - A15-36, 2020.

[2] M. Minnaert Sc.D., “On musical air-bubbles and the sounds of running water,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 16, issue 104, pp. 235-248, 1933.

[3] 李俊佑，柔性減能網對於海岸侵淤變化之實驗研究，碩士論文，國立成功大學自然災害減災及管理國際碩士學位學程，臺灣臺南，2022 年。

[4] X. Zou, A. V. Babanin, E. W. Schulz, R. Manasseh, and C. Guan, “Passive Acoustic Determination of Spectral Wave Breaking Dissipation,” *Journal of Physical Oceanography*, vol. 52, .issue 11, pp. 2807-2823, 2022.

[5] 湛翔智，活塞式造波機模擬近岸碎波氣泡之聲學分析，碩士論文，國立中山大學海下技術研究所，臺灣高雄，2002 年。

[6] 黃清哲、田宗謨、李建勳、許泰文、林武文，潛堤附近碎波氣泡特性之實驗研究，海洋工程期刊，8 卷 2 期，123-151 頁，2008 年。

[7] 湛翔智、魏瑞昌、許智翔、吳建逸，近岸碎波噪音之量測分析，中華民國音響學會九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會，臺灣臺北，C-15 – C-20，2009 年。

探討多層堆疊壓電換能器之水下聲學特性研究

陳胤齊[1]　邱永盛[2]

摘要

近年來，聲學技術於水下量測與通訊領域發展迅速，並廣泛應用於海洋探測、海底地形測繪、水下導航以及海洋資源調查等相關領域。其中，聲納（Sonar）與水聽器（Hydrophone）為水下聲學系統中的核心元件，負責聲波訊號的發射與接收，並將水下聲學訊號轉換為電訊號，以進行距離量測、目標定位與環境監測。然而，傳統聲納系統多採用單一指向性（Unidirectional）換能器，其設計雖可將聲能集中於特定方向以提升探測距離，但在實際應用中仍存在偵測範圍有限與多方向聲源感測能力不足等問題。此外，換能器的電聲轉換效率亦為系統性能的重要影響因素，因此如何透過結構設計降低電氣阻抗並提升能量耦合效率，成為水下換能器設計的重要研究課題。

本研究提出一種整合異質壓電材料之複合式水下換能器結構。利用兩種壓電材料在機械與電聲特性上的差異，透過結構配置實現軸向（Axial）與徑向（Radial）聲波發射，以突破傳統單一指向性聲納的限制並形成多方向聲場分佈。在機械設計方面，本研究採用壓電環堆疊結構並導入預應力螺栓（Stress Rod）施加預應力，以提升壓電陶瓷在高功率運作下的機械穩定性與發射效率。此外，透過壓電堆疊的並聯電路配置有效降低系統等效電氣阻抗，改善換能器與驅動電路之阻抗匹配，進而提升電聲轉換效率與聲能耦合能力。

研究過程中首先建立完整的幾何與物理模型，並利用有限元素分析（Finite Element Analysis, FEA）進行多物理場數值模擬，透過阻抗頻譜與聲場分佈分析評估不同設計參數對換能器性能之影響，包括共振頻率、聲壓輸出及電聲轉換效率。透過模擬結果進行設計最佳化，以找出最佳發射共振點與結構配置。研究結果顯示，本研究所提出之異質壓電複合換能器可有效實現多方向聲波發射並提升電聲轉換效率，為廣域水下聲學探測與通訊系統提供一種具潛力的新型換能器設計。

關鍵詞：有限元素法、水中聲學、水下電聲換能器、壓電堆疊、水下機電

Investigation of Underwater Acoustic Characteristics of Multilayer Stacked Piezoelectric Transducers

Yin-Chi, Chen[1]　Linus Yung-sheng, Chiu[2]

ABSTRACT

In recent years, acoustic technologies have rapidly advanced in the fields of underwater measurement and communication, and have been widely applied to ocean exploration, seabed mapping, underwater navigation, and marine resource investigation. Among these technologies, sonar and hydrophones serve as the core components of underwater acoustic systems, responsible for transmitting and receiving acoustic signals and converting underwater acoustic waves into electrical signals for distance measurement, target localization, and environmental monitoring.

However, conventional sonar systems predominantly employ unidirectional transducers. While such designs effectively concentrate acoustic energy in a specific direction to enhance detection range, they suffer from inherent limitations, including restricted sensing coverage and insufficient capability for detecting multi-directional acoustic sources. In addition, the electroacoustic conversion efficiency of the transducer is a critical factor influencing overall system performance. Therefore, improving energy coupling efficiency and reducing electrical impedance through structural design have become key challenges in underwater transducer development.

In this study, a composite underwater transducer integrating heterogeneous piezoelectric materials is proposed. By exploiting the differences in mechanical and electroacoustic properties of two piezoelectric materials, the proposed design achieves both axial and radial acoustic wave radiation through structural configuration, thereby overcoming the limitations of conventional unidirectional sonar and enabling multi-directional sound field distribution.

[1]國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2]國立中山大學海下科技研究所 教授

From a mechanical perspective, a stacked piezoelectric ring structure is adopted, and a stress rod is introduced to apply prestress, enhancing the mechanical stability and acoustic output efficiency of the piezoelectric ceramics under high-power operation. Furthermore, a parallel electrical configuration of the piezoelectric stack is employed to effectively reduce the equivalent electrical impedance, improving impedance matching between the transducer and the driving circuit, and thereby enhancing electroacoustic conversion efficiency and acoustic energy coupling.

A comprehensive geometric and physical model is first established, followed by multiphysics numerical simulations using finite element analysis (FEA). The performance of the transducer is evaluated through impedance spectra and acoustic field distribution analyses, examining the effects of key design parameters, including resonant frequency, sound pressure output, and electroacoustic conversion efficiency. Design optimization is then conducted based on the simulation results to identify optimal resonant conditions and structural configurations.

The results demonstrate that the proposed heterogeneous piezoelectric composite transducer can effectively achieve multi-directional acoustic radiation while improving electroacoustic conversion efficiency. This design provides a promising solution for wide-area underwater acoustic sensing and communication systems.

Keywords: Finite Element Analysis; Underwater Acoustics; Electroacoustic Transducer; Piezoelectric Stack; Underwater Electromechanical System

一、緒論

隨著海洋資源開發、海底地形測繪與水下環境監測需求的快速成長，水下探測與通訊技術已成為海洋工程與國防領域中的關鍵發展方向。其中，聲納（Sound Navigation and Ranging, SONAR）技術因能有效利用聲波在水中長距離傳播的特性，被廣泛應用於目標探測、距離量測與水下導航等任務。聲納技術起源於二十世紀初，初期以單波束回聲測深系統為主，具備結構簡單與單一方向探測能力佳之優點。

隨著應用需求提升，聲納系統逐漸由單點測量發展為區域掃描，促成側掃聲納與多波束聲納之發展。側掃聲納可進行大範圍水平掃描，多波束聲納則透過多波束同時發射與接收，大幅提升海底地形測繪之效率與解析度，顯示聲納技術正朝向廣域覆蓋與多方向感測能力發展。

近年來，隨著自動化水下載具（AUV）與智慧海洋應用興起，對聲納系統性能之要求持續提高。除探測距離與解析度外，系統亦需具備即時性、多方向感測能力及更完整之聲場覆蓋。在複雜水下環境中，聲源可能來自不同方向，且伴隨折射、多路徑傳播與散射等現象，使傳統單一指向性探測方式逐漸難以滿足需求。因此，在不顯著增加系統複雜度的前提下，提升多方向聲場感測能力，已成為重要研究課題。

另一方面，水下訊號傳遞受限於介質特性。電磁波在水中衰減迅速，難以應用於長距離通訊；相較之下，聲波具有較低傳播損耗，成為主要媒介。然而，聲波傳播會受到水深、溫度與鹽度等因素影響，產生折射與多路徑效應，進而影響訊號品質與定位準確性。因此，有效控制聲波之發射與接收特性，為水下聲學系統設計之關鍵。

在系統架構中，聲納與水聽器之性能主要取決於換能器設計。換能器負責電能與聲能之轉換，其聲壓輸出、頻率響應與指向性特性將直接影響系統效能。傳統換能器多採單一指向性設計，雖能集中聲能以提升探測距離，但在多方向聲源或複雜聲場中，其聲場覆蓋能力有限；相較之下，全向性換能器雖可在各方向均勻發射聲波，但因聲能分散於空間，導致單位方向聲壓降低，限制有效探測距離，且缺乏方向控制能力，難以抑制多路徑干擾。

為改善上述問題，部分研究採用機械掃描或多元件陣列以實現多方向感測，但此類方法往往增加系統體積、複雜度與功耗，提高設計與實作成本。因此，在單一換能器結構中實現多方向且具控制性的聲場輸出，成為具挑戰性的研究方向。相較於傳統設計，多向性聲波發射可同時提供多方向聲場覆蓋，提升對非固定方向聲源之感測能力，並可透過結構設計進行方向性調控，使聲能於特定方向維持較高輸出，同時兼顧整體覆蓋範圍。此外，多向性聲場有助於降低多路徑傳播對訊號穩定性的影響，提升定位準確性與系統可靠度，並可在維持較小體積與較低功耗的前提下，達到類似陣列系統之多方向感測效果。

此外，換能器之電聲轉換效率亦為關鍵因素，其電氣阻抗與驅動電路之匹配程度將直接影響能量傳輸效率。若阻抗不匹配，將降低聲壓輸出與整體效能。因此，在提升聲場覆蓋能力的同時，如何降低等效電氣阻抗並提升能量耦合效率，亦為設計中不可忽視之議題。

綜合而言，現有水下換能器在聲場指向性與電聲轉換效率之間仍存在設計權衡，因此發展一種可於單一結構中同時實現多方向聲波發射與高效率電聲轉換之換能器設計，具有重要研究價值。

基於上述研究缺口，本研究透過材料特性與結構設計之整合，提出兼具多方向聲場輸出能力與高效率電聲轉換之水下換能器設計，以期為新一代水下聲學系統提供可行之解決方案。

二、研究方法與理論

本研究提出一種多層堆疊式壓電換能器，透過整合異質壓電材料與結構設計，以實現多方向聲波發射並提升電聲轉換效率。該設計利用不同壓電材料在機械與電機耦合特性上的差異，透過堆疊結構配置，使換能器可同時發射軸向與徑向振動模式，進而形成多方向聲場分佈。相較於傳統單一指向性或全向性換能器，此設計可在維持較高聲壓輸出的同時，提升聲場覆蓋範圍與方向控制能力。

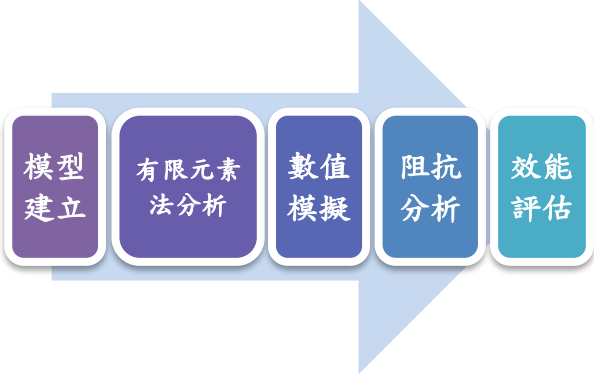


圖 1：研究模擬流程

2.1 壓電理論

壓電材料具有電機耦合特性，可在機械應力作用下產生電荷（正壓電效應），或在外加電場作用下產生機械變形（逆壓電效應）。其行為可由線性壓電本構方程描述：

$$S = s^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2)$$

其中，S 為應變（Strain）、T 為應力（Stress）、E 為電場（Electric Field）、D 為電位移（Electric Displacement）；s^E 為彈性順應係數、d 為壓電常數、ε^T 為介電常數。

在壓電換能器中，常見之振動模式包含徑向振動與軸向振動。徑向模式係指電場方向與機械變形方向互相垂直，常見於壓電環或圓管結構，可產生徑向擴張與收縮，形成環形或全向聲場分佈；軸向模式則為電場方向與機械變形方向一致，通常應用於堆疊式結構，可產生沿軸向之伸縮振動，有利於形成具方向性的聲波發射。

為進一步分析換能器之電機耦合特性，本研究採用等效電路模型進行描述。該模型將壓電換能器之機械振動行為轉換為等效電路，其中動態支路由電阻 Rm、電感 Lm 與電容 Cm 組成，用以表示機械損耗、質量效應與彈性特性，而靜態電容 C0 則代表壓電材料本身之介電特性。

透過等效電路模型可分析換能器之共振頻率與反共振頻率，並由阻抗頻譜評估其電聲轉換效率與耦合特性。此外，機電耦合係數（Electromechanical Coupling Coefficient）可用以量化電能與機械能之轉換能力，其大小將直接影響換能器之頻寬與能量轉換效率。

在本研究中，透過整合不同壓電材料之特性，使軸向與徑向振動模式於同一結構中耦合運作，進而達成多方向聲場發射與能量分佈優化之設計目標。

2.1.1 軸向發射換能器

軸向發射換能器主要基於壓電材料之上下振動模式運作，其特徵為電場方向與機械變形方向一致，使壓電元件沿其極化方向產生伸縮振動，進而在軸向產生聲波發射。此類結構常見於堆疊式壓電換能器（stacked transducer），透過多層壓電元件串接，可有效提升輸出位移與聲壓強度。

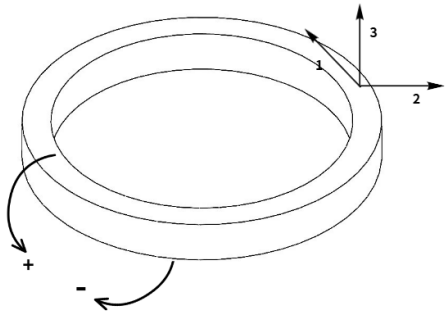


圖 2：軸向震動模式

相較於徑向振動模式，軸向振動可將聲能集中於特定方向，具有較佳之指向性與較高之聲壓輸出，因此廣泛應用於定向探測與長距離聲納系統。然而，其聲場覆蓋範圍較為集中，對於多方向聲源之感測能力相對受限。

在結構設計上，軸向發射換能器通常搭配質量塊（Mass Loading）與預應力機構（如 Stress Rod），以調整其共振頻率並提升機械穩定性。預應力的施加可避免壓電材料於高功率驅動下產生拉應力破壞，並提高能量傳遞效率。此外，透過多層堆疊結構可降低單一元件之驅動電壓需求，同時提升整體輸出性能。

在本研究中，軸向振動模式作為主要聲能集中輸出之機制，與徑向振動模式相互結合，形成多方向聲場分佈。透過此種模態整合設計，可在維持軸向高聲壓輸出的同時，擴展整體聲場覆蓋範圍，提升換能器於複雜水下環境中的應用能力。

2.1.2 徑向發射換能器

徑向發射換能器主要基於壓電材料之左右振動模式運作，其特徵為電場方向與機械變形方向互相垂直，使壓電元件於徑向產生擴張與收縮振動，進而在水中形成環形聲波發射。此類結構常見於壓電圓管或環形換能器，具有良好的全向或近似全向聲場分佈特性。

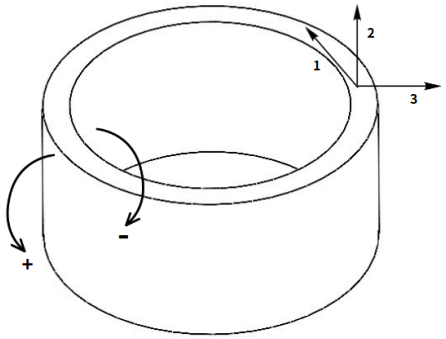


圖 3：徑向震動模式

相較於軸向發射換能器，徑向振動模式可提供較廣之聲場覆蓋範圍，特別適用於需要多方向感測或環境監測之應用。然而，由於聲能於空間中較為分散，其單位方向之聲壓輸出相對較低，較不利於長距離探測與高強度聲波發射。

在結構設計上，徑向換能器之幾何尺寸（如內外徑與厚度）將直接影響其共振頻率與振動模式分佈。此外，材料之機械品質因數與阻尼特性亦會影響其頻率響應與頻寬表現。透過適當設計，可使其於特定頻段產生穩定之徑向振動，並形成均勻之聲場分佈。

在本研究中，徑向振動模式提供廣域聲場覆蓋能力，並與軸向振動模式相互整合，使換能器能同時兼具方向性聲能輸出與多方向聲場分佈之特性。透過此種模態耦合設計，不僅可提升聲場覆蓋範圍，亦可改善傳統單一模式換能器在指向性與能量分佈之間的限制。

2.2 結構設計

本研究之換能器採用多層堆疊式壓電結構，並導入預應力螺栓與尾部質量兩項關鍵設計，以提升機械穩定性與聲能輸出效率。首先，在預應力螺栓（Stress Rod）設計方面，透過於壓電堆疊中施加軸向壓縮應力，使壓電材料於高功率操作下維持於受壓狀態，以避免因交變電場產生拉應力而導致材料破裂，並同時改善元件間接觸條件，降低機械損耗並提升振動能量傳遞效率。其次，在尾部質量（Tail Mass）設計方面，其作為慣性負載可有效抑制後向振動，並將振動能量集中於前端輻射面，以提升聲能輻射效率。在動態行為上，尾部質量與前端結構形成質量－彈簧系統，其質量分佈將影響共振頻率與振動模態。一般而言，尾部質量與前端輻射面之質量比設計於約 2 至 4 之間，可在聲壓輸出與結構尺寸之間取得良好平衡，兼顧振動效率與系統穩定性。此外，尾部質量亦可改善機械阻抗匹配，使壓電堆疊與水中聲阻抗之間達到較佳能量耦合。綜合而言，透過預應力螺栓與尾部質量之整合設計，可有效提升換能器之結構可靠性、振動效率與聲壓輸出，並為多方向聲場發射提供穩定之機械基礎。

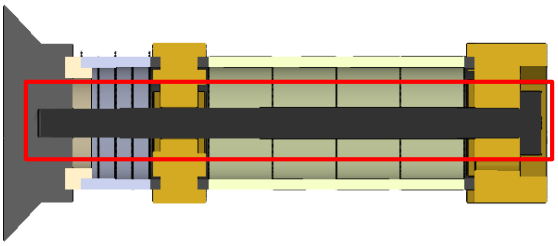


圖 4：模型添加應力螺栓

2.3 模擬與研究方法

本研究採用有限元素法（Finite Element Analysis, FEA）進行換能器之數值模擬與性能分析，並使用 COMSOL Multiphysics 建立多物理場耦合模型。模型中包含壓電材料、金屬結構與周圍流體域，並考慮壓電效應與聲固耦合（Acoustic-Structure Interaction），以模擬換能器於水中之振動行為與聲場分佈。

在建模過程中，首先建立多層堆疊式壓電換能器之幾何模型，並設定材料參數，包括壓電常數、彈性係數與介電常數等；同時於流體域中設定水之密度與聲速，以模擬實際水下環境。邊界條件方面，採用輻射邊界（Radiation Boundary）或完美匹配層（Perfectly Matched Layer, PML）以吸收外傳聲波，避免反射對結果造成影響。電氣激勵則以交流電壓施加於壓電元件兩端，透過壓電耦合效應激發其振動模式。

在分析方法上，本研究採用頻域分析（frequency domain analysis）計算系統於不同頻率下之穩態響應，並透過電流與電壓關係求得輸入阻抗：

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \qquad (3)$$

其中 $V(\omega)$ 為輸入電壓，$I(\omega)$ 為對應之輸入電流。透過阻抗頻譜分析，可獲得換能器之共振頻率與反共振頻率，並進一步評估其電機耦合特性與能量轉換效率。此外，透過聲壓場計算可取得空間中各點之聲壓分佈，並繪製聲場指向性（Directivity Pattern），以分析其多方向聲波發射特性。

為確保模擬結果之準確性，網格劃分採用適當之尺寸控制，使單一波長至少由數個有限元素表示，以滿足聲學模擬之解析需求；同時進行網格收斂測試（Mesh Convergence test），確認模擬結果不隨網格細化而產生顯著變化。此外，針對壓電材料與結構耦合區域進行局部網格加密，以提升振動模態與耦合行為之解析精度。

模擬結果主要評估共振頻率、阻抗特性、聲壓輸出（Sound Pressure Level, SPL）、聲場分佈與指向性，以及電聲轉換效率等關鍵性能指標，並比較不同結構設計與材料配置對換能器性能之影響。透過上述分析，可驗證所提出之多方向聲場設計之可行性，並作為後續結構最佳化之依據。

三、壓電陶瓷堆疊與頻率變化

在水下聲學換能器設計中，壓電陶瓷之電氣特性與頻率響應對整體系統性能具有重要影響。透過適當之堆疊方式與電氣連接設計，可有效調整換能器之等效阻抗、導納特性及能量轉換效率，進而改善與驅動電路之匹配條件。此外，壓電元件於不同頻率下之阻抗變化，亦可反映其共振行為與振動模式特性。因此，本節將針對壓電陶瓷之堆疊效應與阻抗頻率變化進行分析，藉以探討並聯堆疊對換能器輸出特性之影響，並驗證其作為後續多方向水下換能器設計基礎之可行性。

3.1 壓電陶瓷堆疊

本研究針對管型壓電陶瓷進行並聯堆疊配置，探討其對換能器電氣特性與輸出能力之影響。對壓電元件而言，除材料本身之壓電常數、介電常數與機械特性外，元件之電氣連接方式亦會直接影響整體系統之阻抗特性與能量傳遞效率。當多個壓電陶瓷元件採並聯連接時，由等效電路觀點可知，其總阻抗可表示為

$$Z_{eq} = \frac{Z}{N} \tag{4}$$

其中，Z 為單一壓電陶瓷之阻抗，N 為並聯元件數量。由此可知，隨著並聯數量增加，系統之等效阻抗將隨之下降，而導納則相對提高。

由阻抗分析儀量測結果可觀察到，單一環形壓電陶瓷之導納峰值約為 41 mS，而當三個環形壓電陶瓷並聯後，其導納峰值提升至約 115 mS。此結果顯示，並聯堆疊能有效提升系統導納，且其變化趨勢與理論預期相符。由於導納為阻抗之倒數，導納增加代表整體阻抗降低，因此在相同驅動電壓條件下，系統可提供較大的輸入電流，進而提高壓電元件之振動響應與聲學輸出能力。

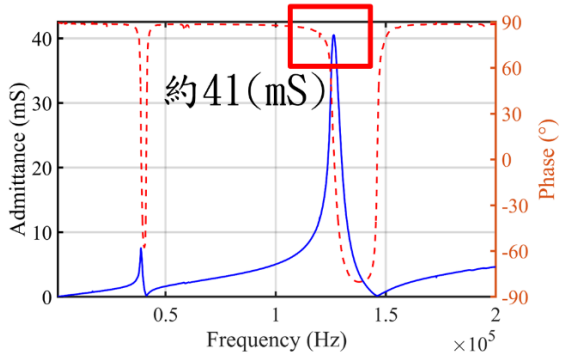


圖 5：單一壓電陶瓷

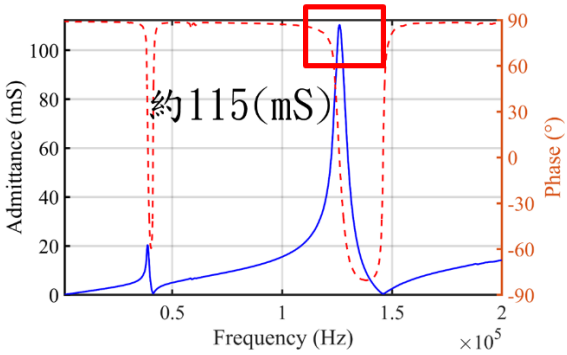


圖 6：並聯三個壓電陶瓷

此外，並聯堆疊亦可視為增加系統等效電容之方式。對於壓電元件而言，電容特性會直接影響其對交流訊號之響應能力；當等效電容提高時，系統在特定頻率下可呈現較高導納，進而改善換能器與驅動電路之間的阻抗匹配條件。此一現象對水下聲學系統尤為重要，因為驅動端若能更有效地將電能傳遞至壓電元件，則有助於提高聲壓輸出與整體轉換效率。

從應用角度而言，壓電陶瓷並聯堆疊不僅有助於提升輸出訊號強度，亦可改善訊號接收靈敏度與訊噪比（SNR）。對於水下換能器系統而言，較高的導納與較低的等效阻抗意味著系統在相同激勵條件下可獲得更明顯之電聲響應，因此能在量測或發射過程中表現出較佳的穩定性與辨識能力。尤其在多層堆疊式結構中，透過並聯配置不僅可降低單一元件負載，亦可提供更高的整體輸出能力，對後續實現多方向聲場發射之結構設計具有重要意義。

綜合上述分析可知，壓電陶瓷之並聯堆疊設計可有效降低系統等效阻抗、提高導納峰值，並改善與驅動電路之匹配條件，使能量得以更有效率地轉換與傳遞。此結果顯示，壓電堆疊設計不僅具備理論合理性，亦能於實際量測中展現明顯效益，為後續多層堆疊式水下換能器之設計提供了良好基礎。

3.2 阻抗與頻率變化

為探討管型壓電陶瓷於不同堆疊層數下之頻率響應特性，本研究利用阻抗分析儀量測單層、雙層與三層管型壓電陶瓷之導納頻譜，並比較其共振峰值與頻率變化趨勢。由量測結果可知，隨著壓電陶瓷堆疊層數增加，系統之導納峰值顯著提升，且主要共振頻率呈現向低頻移動之趨勢，顯示堆疊結構，如圖 7，對換能器之電氣特性與機械振動行為具有明顯影響。

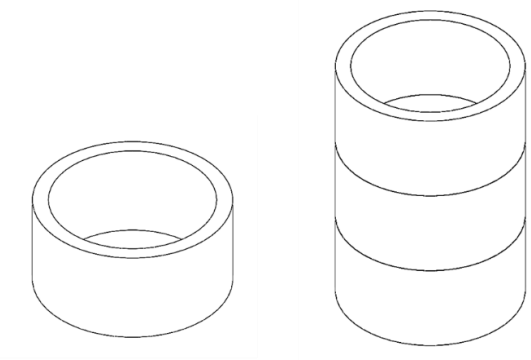


圖 7：單一壓電陶瓷(左)與壓電陶瓷堆疊(右)

由圖 7 中 Tube 1、Tube 2 與 Tube 3 之量測結果可觀察到，單層管型壓電陶瓷之主要共振峰約位於 130 kHz 附近，雙層堆疊結構之主要共振峰則前移至約 64 kHz，而三層堆疊結構之共振峰進一步移動至約 47 kHz。除共振頻率前移外，導納峰值亦隨堆疊層數增加而提升，其中三層堆疊結構之導納峰值最高，顯示在相同激勵條件下，其電流響應與振動能力均較單層結構明顯增強。

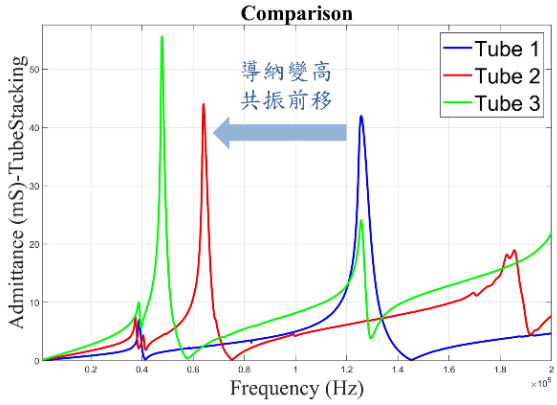


圖 8：壓電陶瓷堆疊分析

上述現象可由電氣特性與結構動態行為兩方面加以解釋。首先，由電路等效觀點而言，當多個壓電陶瓷元件採並聯堆疊配置時，系統等效電容隨之增加，使導納提高、等效阻抗降低。因此，在相同輸入電壓下，系統可產生較大的輸入電流，進而提升壓電元件之驅動能力與能量輸出效率。其次，由機械振動觀點而言，隨著堆疊層數增加，整體結構之等效質量、剛性分佈與邊界條件均可能隨之改變，進而造成共振頻率向低頻偏移。換言之，堆疊設計不僅改變換能器之電氣輸入特性，同時亦對其機械共振行為產生實質影響。

此外，由量測頻譜可發現，除主要共振峰外，高頻區域仍存在若干局部響應峰值，顯示管型壓電陶瓷於不同頻率下可能激發多種振動模態。對於管型結構而言，其振動形式除基本徑向模態外，亦可能包含高階徑向模態、局部彎曲模態或因堆疊耦合所產生之複合模態。當堆疊層數增加時，模態間之耦合效應可能更為顯著，因而使頻譜分佈趨於複雜。此一結果顯示，堆疊設計對壓電陶瓷之影響並非僅限於單一共振點之位移，而是對整體頻率響應特性皆具有調控作用。

綜合上述分析可知，管型壓電陶瓷之堆疊結構可有效提升導納、降低等效阻抗，並使主要共振頻率朝低頻方向移動。此一特性對水下換能器之設計具有重要意義，因其不僅可提升系統輸出能力，亦可透過堆疊層數之調整改變工作頻帶，使換能器更符合特定水下聲學應用之需求。因此，管型壓電陶瓷堆疊設計可視為兼具頻率調控與性能提升潛力之有效方法。

3.3 換能器設計與量測

本章以自製換能器，如圖 9，為研究對象，完成其結構設計、製作組裝與性能驗證，並透過實驗量測分析其電聲特性。研究內容包含換能器之阻抗頻譜、共振頻率等項目，藉以評估其工作性能與能量轉換能力。另一方面，配合有限元素模擬方法建立換能器模型，針對其振動行為與頻率響應進行分析。最後將模擬結果與實際量測數據相互比對，探討兩者之差異與可能原因，以驗證設計可行性，作為後續換能器結構優化與性能提升之依據。

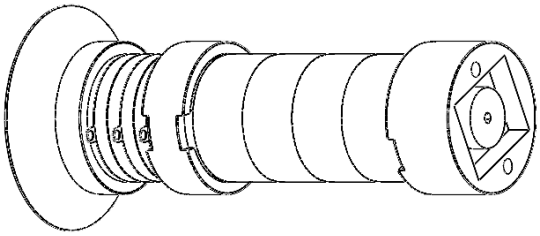


圖 9：壓電換能器原型設計

本研究之換能器設計以異質材料為基底，並透過堆疊方式進行結構整合，以結合不同壓電元件之振動特性與機電轉換優勢。其結構主要由管形換能器與環形換能器組成，藉由不同幾何形狀與振動模態之配置，使換能器在輸出能力、頻率響應及工作穩定性方面獲得提升。異質堆疊設計除可增加整體結構強度外，亦有助於整合各元件之聲學特性，進而作為後續模擬分析與實際量測驗證之基礎。

3.3.1 管形換能器模擬與實際量測

由圖 10 之模擬結果與圖 11 之實際量測結果比較可知，管形換能器於約 44 kHz 附近皆呈現明顯響應，顯示其共振頻率與設計預期相符，驗證本研究換能器結構設計具備良好可行性。由量測結果可觀察到，在 44 kHz 附近導納明顯較高，且阻抗相對降低，代表換能器於此頻率附近具有較佳之能量轉換效率與振動響應能力。此結果與模擬分析趨勢大致一致，表示所建立之模型能有效反映管形換能器之主要共振特性。整體而言，本設計成功使換能器於預期頻帶內產生明顯共振，顯示異質堆疊結構在頻率控制與性能表現上具有一定成效，並可作為後續優化設計與性能提升之基礎。

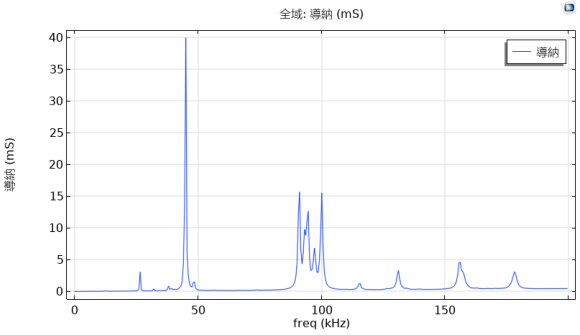


圖 10：管形陶瓷堆疊導納模擬圖

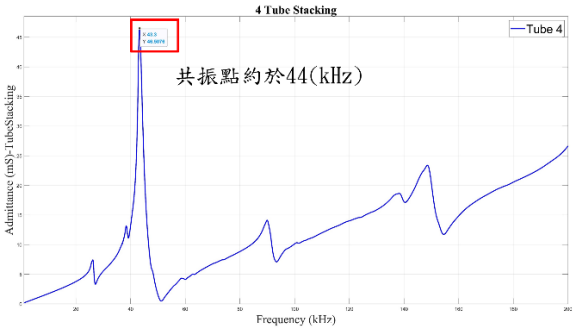


圖 11：管形陶瓷堆疊導納實際量測圖

3.3.2 環形換能器模擬與實際量測

由圖 12 之模擬結果與圖 13 之實際量測結果比較可知，環形換能器於約 44 kHz 附近亦呈現明顯響應，顯示其主要共振頻率與設計預期大致相符，驗證本研究所設計之環形換能器具有良好可行性。由量測結果可觀察到，在 44 kHz 附近導納較高，且阻抗相對降低，表示換能器於此頻率附近具有良好之振動響應與能量轉換能力。此結果與模擬分析趨勢具有一致性，顯示所建立之模型可有效反映環形換能器之主要振動特性。整體而言，環形換能器於設計頻段約 44 kHz 附近展現出良好的發射效率，並可進一步與管形換能器相互配合，形成接近 44 kHz 之最佳發射工作點，使整體異質堆疊換能器於預期頻帶內具有更佳之聲學輸出表現與操作穩定性。

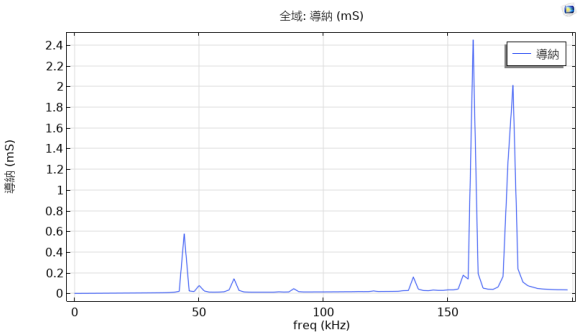


圖 12：環形陶瓷堆疊導納模擬圖

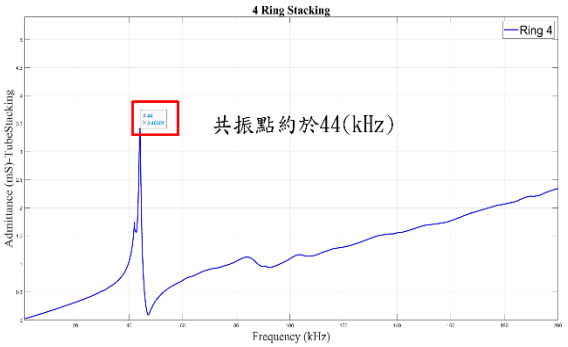


圖 13：環形陶瓷堆疊導納實際量測圖

四、結果與討論

本研究以異質壓電材料堆疊為核心設計概念，結合管形換能器與環形換能器之結構特性，並透過模擬分析與實際量測進行性能驗證。前文已指出，並聯堆疊可有效提高導納、降低等效阻抗，且隨堆疊層數增加，主要共振頻率會由高頻逐步往低頻移動，顯示堆疊設計對換能器之頻率調控與輸出能力具有明顯影響。此結果證明，多層堆疊不僅能改善電氣匹配條件，亦能提升整體振動響應與能量轉換效率。

就管形換能器而言，由模擬與實測比較可知，其於約 44 kHz 附近皆呈現明顯響應，且量測結果顯示該頻段導納較高、阻抗較低，表示管形換能器在設計頻帶內具有良好之能量轉換能力與振動響應特性。模擬與實測趨勢大致一致，代表所建立之有限元素模型可有效反映其主要共振特性，也說明此設計在預期工作頻帶內具備良好可行性。

就環形換能器而言，模擬與實際量測結果同樣顯示其於約 44 kHz 附近具有明顯響應，且在該頻段呈現較高導納與較低阻抗，顯示環形換能器於設計頻帶內亦具備良好之振動響應與發射效率。進一步分析可知，環形換能器可與管形換能器相互配合，使整體異質堆疊換能器於接近 44 kHz 左右形成較佳之發射工作點，進而提升整體聲學輸出表現與操作穩定性。

綜合本研究結果可知，異質堆疊設計確實能有效整合不同壓電元件之振動模態與機電特性，使換能器同時兼具頻率控制、阻抗降低與發射效率提升等優點。透過管形與環形結構之搭配，不僅可使主要工作頻段落於預期之 44 kHz 附近，亦可作為後續多方向聲場發射與換能器性能優化之基礎。整體而言，本研究所提出之異質堆疊式換能器設計，已初步驗證其於水下聲學應用上的可行性與發展潛力。

謝誌

本研究為國科會補助計畫之成果，計畫編號 NSTC 114-2218-E-110-009-，感謝計畫使海洋聲學量測能更邁進。

參考文獻

[1] 蔡明廷。「水下電聲換能器之開發與研究」。碩士論文，國立中山大學海下科技研究所，2020。

[2] 鄒宇杭。「自製水下電聲換能器陣列之特性探討」。碩士論文，國立中山大學海下科技研究所，2023。

[3] K. Hynynen and J. Yin, "Lateral mode coupling to reduce the electrical impedance of small elements required for high power ultrasound therapy phased arrays," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 3, pp. 557-564, March 2009, doi: 10.1109/TUFFC.2009.1072.

[4] Bocheng Ji, Yu Lan, Gang Qiao, Shuai Shao; Experimental investigation of a Tonpilz transducer operating in the frequency band of 20–80 kHz (L). J. Acoust. Soc. Am. 1 June 2024; 155 (6):3600–3603. https://doi.org/10.1121/10.0026222

[5] Ivanov, I., Kolev, S., Nenova, B., & Kossev, V. (2020). Investigation of characteristics of cylindrical piezoceramic transducers used in systems for underwater monitoring and management. Security & Future, 4(2), 75–77. https://stumejournals.com/journals/confsec/2020/2/75

[6] V. N. Panchalai, S. Kumar Kuncham, K. Natarajan and R. Ramesh, "Review on Underwater Sonar Power Amplifier Technologies," 2024 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference (SPACE), Bangalore, India, 2024, pp. 103-107, doi: 10.1109/SPACE63117.2024.10667986.

[7] 見微知著培訓課程:壓電 MEMS 與傳感器. (n.d.). https://www.memstraining.com/training-31.html

[8] 換能器概論 https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-33139-3

[9] LM386 實作小功率音頻放大器 https://youtu.be/o19-dUC6S-Y?si=XUJ5xp9OKw25YuJA

[10] Simple Amplifier Circuit With LM386 https://youtu.be/rmGAU9MZvyg?si=M4JaBmHvm236r7EK

[11] 壓電效應 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A3%93%E9%9B%BB%E6%95%88%E6%87%89

[12] 勵磁效應 https://dadaoenergy.com/zh-TW/blog/what-is-excitation-explained/

[13] 矯頑力 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%9F%AF%E9%A0%91%E5%8A%9B

[14] Single-sensor pressure-gradient piezoelectric cylindrical tube vector hydrophone , Yang Sun1,Yanting Yu2, Chao Zhang3, Jianbo Ma4, Yi Zheng5

[15] Design and Fabrication of a Stacked Three-Phase Piezoelectric Composites Ring Array Underwater Ultrasound Transducer, Lili Xia, Hongwei Wang * and Qiguo Huang

[16] Development of A Large-Aperture 160-Element Coherent Hydrophone Array System for Instantaneous Wide Area Ocean Acoustic Sensing, Matthew E. Schinault1, Sai Geetha Seri1, Max K. Radermacher1, Hamed Mohebbi-Kalkhoran1, Chenyang Zhu2, Nicholas C. Makris2 and Purnima Ratilal1

簡易型自主式水下載具於淺海影像調查任務之設計與初步驗證

吳孟修[1]　周佑誠[2]

摘要

淺海域（約 100 公尺以淺）涵蓋近岸與沿岸環境，例如東沙環礁及其周邊海域，對於海床影像記錄與環境調查具有重要研究與應用價值。現行作業多依賴小型船舶搭載遙控式水下載具（ROV）或由潛水員執行，但前者受限於纜線長度與作業範圍，後者則受限於水深與作業風險，皆不利於長時間、大範圍調查。相較之下，自主式水下載具（AUV）不受纜線拘束，適合應用於淺海域影像調查與環境監測。本研究設計並實作一套輕便、可靠且具經濟性之 AUV，完成 LARC v1 之開發。載具採流線型外形，配置水平與垂直推進器以執行前進、轉彎、上升與下潛等基本運動，並透過定深與定艏向控制維持穩定航行。載具整合相機、照明燈、高度計、深度計與姿態感測器，並包含電力與通訊系統。為驗證其性能，於水池與港灣進行階段測試，並於小琉球近岸海域規劃航行任務，以評估其航行穩定性與抗海流能力。實驗結果顯示，LARC v1 可在指定入水深度、航向與任務時間限制下完成海床攝影任務，並取得可供後續影像拼接之海床影像資料。透過影像與量測資訊，可估算影像覆蓋範圍，並重建對應航行軌跡之海床影像。然而，在實際海流影響下，載具仍可能產生被動側漂，進而影響影像拼接品質。此外，本研究亦進行 LARC v2（針對硬體結構之改良版本）之初步設計，並開發硬體迴路模擬系統，作為後續導航方法發展之基礎。

關鍵詞：自主式水下載具、淺海影像調查、無主動橫移推進

Design and Preliminary Validation of a Lightweight Autonomous Underwater Vehicle for Shallow-Water Imaging Surveys

Meng-Siou Wu[1]　Yu-Cheng Chou[2]

ABSTRACT

Shallow waters (typically less than 100 m in depth) include nearshore and coastal areas such as the Dongsha Atoll, and are important for seafloor imaging and environmental investigations. Conventional surveys rely on remotely operated vehicles (ROVs) or divers, but ROVs are limited by tether length and range, while divers are constrained by depth and operational risks, making long-duration, large-area surveys difficult. In contrast, autonomous underwater vehicles (AUVs) are untethered and suitable for shallow-water imaging surveys and environmental monitoring. This study presents the design and implementation of a lightweight, reliable, and cost-effective AUV, referred to as LARC v1. The vehicle adopts a streamlined configuration with horizontal and vertical thrusters for forward motion, turning, ascent, and descent. Stable navigation is achieved through auto-depth and auto-heading control. The vehicle integrates a camera, LED lighting, an altimeter, a depth sensor, and an attitude sensor, along with onboard power and communication systems. Performance was evaluated through staged tests in a water tank and harbor, followed by field trials off Liuqiu Island. Results show that LARC v1 can perform seafloor imaging missions under specified depth, heading, and mission time constraints, and acquire data suitable for image stitching. However, ocean currents may induce passive lateral drift, affecting stitching quality. The preliminary design of LARC v2 is underway, and a hardware-in-the-loop simulation system is under development.

Keywords: Autonomous underwater vehicle; Shallow-water imaging survey; Underactuated AUV

[1] 國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 副教授

一、緒論

淺海域(100 公尺以淺)涵蓋近岸與沿岸環境，例如東沙環礁及其周邊海域，對於海床影像記錄與環境調查具有研究與應用價值。現行常見作業方式多仰賴小型船舶搭載遙控式水下載具（ROV）或由潛水員進行調查，然而前者受限於纜線長度與作業範圍，後者則受限於水深與作業風險，皆不利於長時間、大範圍之調查任務。相較之下，自主式水下載具（AUV）具備長時間自主運作能力，適合應用於淺海域之廣域調查。

本研究聚焦於開發一套輕便、可靠且具經濟性之 AUV 系統，以提升淺海影像調查任務之可行性。考量任務需求以廣域海床影像攝影為主，載具之運動型態主要包括向前航行、轉彎、上升與下潛，因此採用流線型外形並配置水平與垂直推進器，而未配置橫移推進器。此設計有助於降低阻力與能耗並簡化系統整合複雜度，但在海流作用下，載具仍可能產生被動側漂現象，進而影響航跡穩定性與影像調查品質。

為反映本研究之設計理念與系統特性，本研究將所開發之載具命名為 LARC（Lightweight, Affordable, Reliable, and Compact），其設計著重於輕便、經濟、可靠且結構精簡之特性，為一款針對淺海調查作業所設計之自主式水下載具，強調可攜性、成本效益與操作穩定性，且可應用於海床影像調查任務。

基於上述設計，本研究完成 LARC v1 之開發與系統整合，並透過水池、港灣及開放海域測試，評估其於淺海影像調查任務中的應用可行性。實測結果顯示，系統已具備執行基本任務之能力；然而，側漂問題仍為影響整體性能之關鍵因素，亦為後續研究之重點方向。

二、系統設計與工程分析

2.1 設計需求與目標

本研究之 LARC 設計目標為兼顧輕便、經濟性與可靠性。在輕便性方面，將整體重量控制於兩人可搬運範圍內，以降低佈放與回收難度，並減少對船舶承載能力之依賴。在經濟性方面，透過控制系統成本，可降低操作負擔並提升實海域測試之可行性，進而累積更多實驗資料與經驗，有利於後續系統改進與驗證，亦有助於未來多機系統之發展。在功能設計上，載具具備定深及定艏向航行能力，並搭配相機與 LED 照明模組，以支援淺海域及不同場域之長時間影像調查與資料蒐集。

本研究完成 LARC v1 之設計與實作，並針對其硬體結構進行後續改良設計，以發展 LARC v2。兩版本在感測器配置、推進系統、電力系統以及通訊系統方面維持一致，差異主要在於硬體結構之設計調整。

2.2 電力與通訊系統設計

在電力系統方面，LARC 以 26.4 V 作為主要供電電壓，並透過多組 DC–DC 降壓模組轉換為 5.2 V、3.3 V、5 V、16 V 及 12 V，以供應不同模組之運作需求，如圖 1 所示。在通訊系統方面，各感測器與控制模組分別透過 UART、I^2C、CSI、PWM 與 USB 介面進行資料傳輸與控制，如圖 2 所示，其中包含高度計、深度計、相機模組、電子速度控制器（ESC）及慣性測量單元（IMU）等元件。

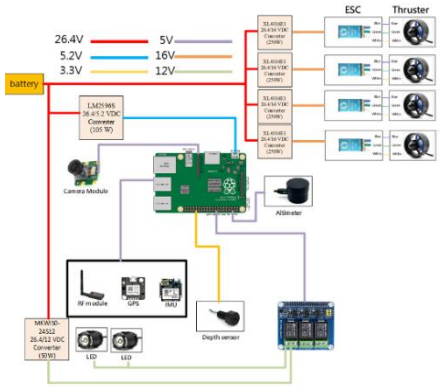


圖 1：LARC 電力系統架構

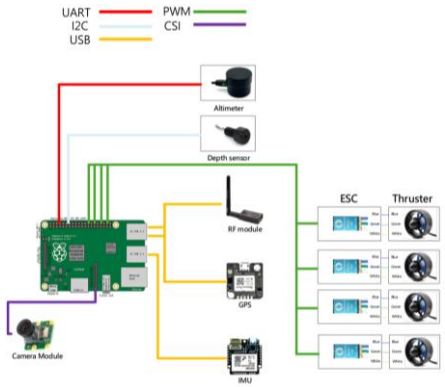


圖 2：LARC 通訊系統架構

2.3 任務時長與功耗評估

LARC 採用 8 顆磷酸鋰鐵電池串聯提供電力，輸出電壓為 26.4 V，容量為 20 Ah，總電量為 528 Wh。各儀器功率估算如表 1 所示。為兼顧電池壽命與使用安全，單次任務設定使用 70%之電量。在此條件下系統可支援超過 1 小時之連續運行時間。

表 1：LARC 儀器功率估算

儀器設備	功率（W）
推進器	232.5
LED 照明燈	30
樹梅派主控電腦	6.5
繼電器	2.7
攝影模組	0.825
高度計、GPS 與 RF 模組	0.5
慣性測量單元	0.25
總功率	273.28

2.4 輕量化設計與成本分析

在輕量化設計方面，LARC v1 整體重量控制於 25.74 kg，如表 2 所示，可由兩名人員搬運，有助於降低佈放與回收難度，並減少對作業船舶之需求。在成本方面，系統整體建置成本約為新台幣 20–25 萬元之間，屬於低成本設計，可有效降低操作負擔，提升實海域測試之可行性，並有利於後續系統改進與驗證。

表 2：LARC 重量估算

儀器設備	重量（kg）
艙體、艙蓋與支架	19.62
電池與電源管理系統	3.87
推進器	1.376
LED 照明燈	0.236
直流電壓轉換器	0.233
高度計	0.187
其他	0.218
總重量	25.74

三、實海域測試與初步性能評估

3.1 LARC 實海域任務測試

在完成水池與港灣的多次測試並驗證 LARC v1 整體性能後，為進一步評估其抗海流能力，本研究於小琉球附近海域設置三個定位浮球，並規劃 LARC 自 1 號浮球出發，航行至 3 號浮球後進行迴轉，並於迴轉後沿相反航向返回起點（如圖 3 所示）。透過此任務設計，可觀察載具在海流影響下之航行穩定性與抗流能力。

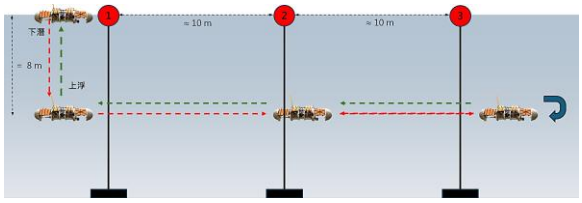


圖 3：LARC 任務規劃示意圖

3.2 任務路徑影像拼接與距離估算

本研究將 LARC v1 於實海域所拍攝之海床影像進行拼接，並透過相機幾何參數推估實際拍攝範圍與航行距離。首先，參考 Zhang 提出之方法[1]進行相機校正，以取得相機像素焦距（420.51, 406.87 pixel）。已知感光元件尺寸為寬 3.7 mm、高 2.8 mm，影像解析度為 640×480 像素，可計算像素尺寸，如式(1)所示：

$$\frac{2.8\ \text{mm}}{480\ \text{pixel}} = 0.0058\ \frac{\text{mm}}{\text{pixel}} \qquad (1)$$

進一步將像素焦距轉換為實際焦距，如式(2)所示：

$$406.87\ \text{pixel} \times 0.0058\ \frac{\text{mm}}{\text{pixel}} = 2.36\ \text{mm} \qquad (2)$$

根據感光元件高度與實際焦距，可計算相機在水中之垂直視角，如式(3)所示：

$$2 \times \tan^{-1}\frac{2.8}{2\times 2.36} = 61.35° \qquad (3)$$

透過上述視角資訊，並結合高度計所量測之離底高度，可推算單張影像之實際覆蓋範圍。進一步透過單張影像與拼接影像之比例關係，可對載具之航行距離進行估算。圖 4 與圖 5 分別呈現去程與回程之影像拼接結果。

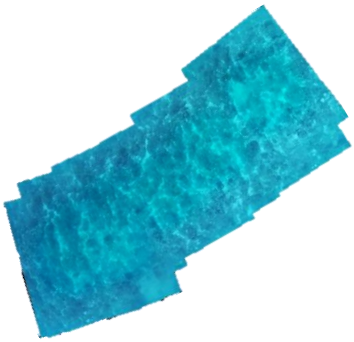


圖 4：去程影像拼接圖（航向 70°；約 23.6 m）



圖 5：回程影像拼接圖（航向 250°；約 42.6 m）

四、系統設計改良

4.1 LARC 硬體結構改良

在完成小琉球實海域測試後，為進一步降低 AUV 之整體重量與航行阻力，本研究針對 LARC v1 之硬體結構進行設計改良。改良後，整體重量由原先之 25.74 kg 降低至 23.2 kg，並新增導流罩以減少海流對載具航行穩定性之影響。

4.2 硬體迴路模擬器

為降低後續 AUV 主控程式改良與導航演算法測試對水域或海域測試之依賴，本研究建置一套 AUV 硬體迴路（Hardware-in-the-Loop, HIL）模擬器，以模擬載具之實際運動行為。

首先，建置一套與實際 AUV 相同程式碼與執行環境之主控電腦。接著，依據各感測器之規格表建立感測資料模擬器，將動態方程解算器所輸出之

狀態資訊轉換為主控電腦可辨識之感測器封包格式，並透過網路集線器（Hub）傳送至主控電腦。

當主控電腦接收到模擬感測資料後，依既有控制流程進行運算，輸出對應之 PWM 訊號。該 PWM 訊號再回傳至感測資料模擬器，並轉換為各推進器所對應之推力，進而輸入至動態方程解算器。解算器透過參考相似幾何形狀之 AUV 所估算的流體動力參數，並利用數值方法求解運動方程式，求得載具之姿態、位置與速度等狀態參數[2-3]。最後，這些狀態參數再回傳至感測資料模擬器，並轉換為感測器封包格式，形成完整之閉迴路硬體迴路模擬流程（如圖 6 所示）。

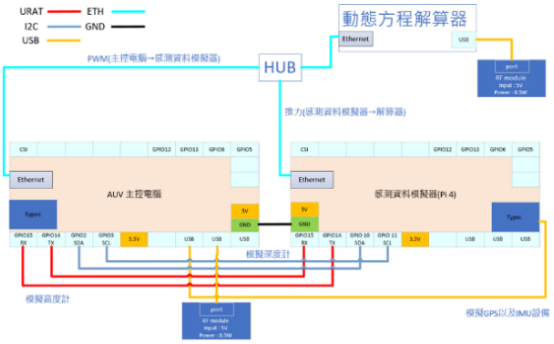


圖 6：LARC 硬體迴路模擬器通訊架構

4.3 LARC 實測與模擬之姿態對照

為評估硬體結構改良後 AUV 之控制性能，本研究分別於模擬器與實際水池環境中執行目標深度 1.5 m、持續時間 30 秒之任務，主要比較兩者在接近目標深度過程中的變化趨勢，以及最終是否能收斂至目標深度。

水池實測結果顯示，AUV 約於 10 秒時下潛至約 1.4 m，隨後即停止持續下潛，並穩定維持於約 1.4 m 附近，未能達到目標深度 1.5 m（如圖 7 所示）。該結果顯示載具與目標深度之間仍存在小幅穩態誤差，且控制參數仍有進一步調整空間。

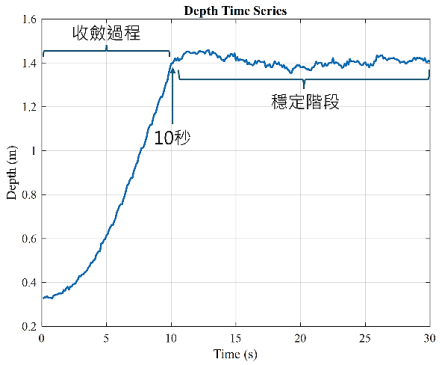


圖 7：水池實測之入水深度時序圖

相較之下，模擬結果亦顯示 AUV 約於 10 秒時到達 1.4 m，但其後之變化趨勢與實測結果存在差異；在模擬中，AUV 可持續下潛，並於約 11 秒內進入目標深度±5%範圍，最終穩定於約 1.5 m（如圖 8 所示）。此結果顯示，模擬器雖能反映載具之初期動態行為，但在穩態控制表現上仍與實際系統存在差異，顯示目前所採用之流體動力參數與控制參數仍有進一步調整與驗證之空間。

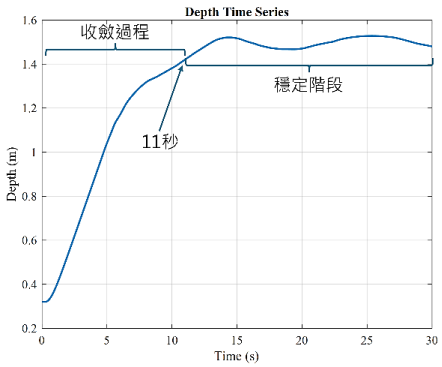


圖 8：模擬測試之入水深度時序圖

五、結論

本研究完成 LARC v1 之設計、實作與初步驗證。在兼顧輕量化與經濟性之設計目標下，系統已具備穩定運行與執行淺海調查任務之基本能力。實測結果顯示，LARC v1 可在指定操作條件下完成海床影像資料蒐集，並驗證其於淺海影像調查任務之可行性。然而，在實際海流影響下，載具仍可能產生側向被動漂移，進而影響航跡穩定性，並對影像拼接結果造成影響。此外，模擬與實測結果之比較顯示，現有模擬器尚無法準確描述實際系統之動態特性與控制響應。未來研究將開發結合視覺、慣性與高度資訊之導航方法，以改善側漂問題並提升影像調查之穩定性與可靠性。本研究亦持續進行 LARC v2 之硬體系統設計改良，以提升整體性能與任務適應能力。此外，所建置之硬體迴路模擬器亦可作為後續控制器與導航演算法開發之測試平台。

謝誌

本研究承蒙國科會專題研究計畫經費支持（計畫編號：NSTC 114-2221-E-110-041），特此致謝。

參考文獻

[1] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000, doi: https://doi.org/10.1109/34.888718.

[2] T. Timothy, “Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle,” Mit.edu, 2025, doi: http://hdl.handle.net/1721.1/65068.

[3] Tang, “Modeling and simulation of the autonomous underwater vehicle, Autolycus,” Mit.edu, 2026, doi: http://hdl.handle.net/1721.1/80002.

自主水下載具控制與動力分配之嵌入式實現與實驗驗證

陳永裕[1]　呂楷貿[2]　施丞恩[3]　郭俊霆[4]

摘要

自主水下載具（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）已成為當前水下載具領域中最具發展潛力之核心技術之一，其應用範疇涵蓋軍事與民生經濟等多元領域。隨著自動化與智慧化技術的持續演進，AUV 之自主化發展已屬不可逆之趨勢。在建構完整之自主水下載具系統過程中，控制律設計與動力分配機制之建立，為首要且關鍵之研究課題。受惠於近年電子技術與嵌入式系統之快速發展，微控制器（Microcontroller）已具備足以支撐複雜演算法運算之能力，使 AUV 系統得以朝向小型化與低成本化發展。相較於傳統以工業電腦為核心之架構，本文所建構之系統採用微控制器作為主要運算平台，以提升系統整體之整合性與可攜性。此外，藉由開源程式語言 Python 之高開發效率特性，使得演算法設計與實作過程得以大幅縮短開發時程。在控制方法方面，鑑於現行 AUV 控制律已趨成熟，本研究聚焦於動力分配問題，旨在將控制律所產生之控制輸入有效且合理地映射至各致動器。本研究採用具強健補償項之回授線性化控制，並結合具輸出限制條件之動力分配模型，作為整體控制架構之核心。透過 DVL 與 IMU 所提供之量測資訊，可即時獲得載具之姿態與運動狀態，並將其回饋至控制律中，以生成對應之控制力，再經由動力分配機制分配至各致動器執行。為建立致動器輸出力與控制指令之間之非線性關係，本研究採用模糊理論（Fuzzy Modeling）進行建模，以提升系統對不確定性與非線性效應之適應能力。本研究所使用之 AUV 平台配置兩顆主推進器及八個舵機，可實現六自由度之運動控制。最後，透過數值模擬與實際實驗驗證，本研究所提出之方法具備良好之可行性與參考價值。具體成果如下：1.完成控制律與動力分配之整合設計、2.建立 AUV 演算法實驗平台、3.完成 AUV 軟硬體系統之整合與驗證。

關鍵詞：自主水下載具實現、強健控制器、動力分配

Embedded Implementation and Experimental Validation of AUV Control and Power Allocation

Yung-Yue Chen[1]　Kai-Mao Lu[2]　Cheng-En Shih[3]　Jiun-Ting Guo[4]

ABSTRACT

This study presents a compact autonomous underwater vehicle (AUV) system based on a microcontroller architecture implemented in Python. A robust control framework integrating feedback linearization with output-constrained power allocation is developed for trajectory tracking. Vehicle states are obtained using a Doppler Velocity Log (DVL) and an Inertial Measurement Unit (IMU), while fuzzy modeling is used to characterize actuator behavior. The system employs two thrusters and eight servo motors to achieve full six-degree-of-freedom control. Its effectiveness is validated through simulations and experiments. The main contributions are: (1) integration of robust control and constrained power allocation, (2) development of an AUV control platform, and (3) hardware–software system implementation.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle Implementation, Robust Controller, Power Allocation

[1] 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 教授
[2] 國立成功大學系統所 碩士班研究生
[3] 國立成功大學系統所 碩士班研究生
[4] 永亮股份有限公司 專案工程師

一、緒論

近年來，隨著海洋探測需求的提升，自主水下載具（Autonomous Underwater Vehicles, AUVs）逐漸受到研究人員的廣泛關注，主要原因在於其在複雜與惡劣環境中展現出顯著優勢。此類載具能在高風險或困難條件下執行任務，不僅可部分取代人力以降低作業成本，亦具備長時間運作能力，並能取得傳統方式難以獲得之資料。過去數十年間，為因應不同任務需求，已發展出多種 AUV 類型，其中以箱型與魚雷型水下載具最為常見。兩者在功能與特性上各具差異：箱型 AUV 主要應用於水下探測、量測及科學研究，通常搭載多種感測器以進行環境監測與資料蒐集；而魚雷型 AUV 則多應用於水下作戰與防禦任務，具備目標追蹤與攻擊能力，在軍事領域中具有重要地位。這兩類 AUV 對於水下探測、科學研究以及安全性提升皆具有關鍵貢獻。

針對 AUV 導引控制中的軌跡追蹤問題，已有多種非線性控制方法被提出，包括反推控制（backstepping control）[1]、滑模控制（sliding mode control）[2, 3]、自適應控制（adaptive control）[4]以及強健控制（robust control）[5–7]等。然而，在實際控制應用中，僅依賴控制方法本身仍不足以達成理想效果，尚需考量致動器的實際特性與限制，例如輸出範圍、安裝位置及控制精度等。因此，控制力分配在實務上扮演著關鍵角色。在控制力分配過程中，致動器的配置位置會影響其所產生的力矩，而輸入之控制指令則直接影響實際輸出推力。故需精確量測致動器安裝位置，並建立控制指令與實際輸出之間的準確對應關係，以確保控制力能符合控制律之設計目標。

本研究於控制力設計與控制分配之間採用解耦（decoupled）架構，以提升方法應用於不同載具之彈性。該方法僅需已知致動器安裝位置及控制指令與輸出力之對應關係，即可實現有效控制，並有助於驗證控制策略之可行性。本文主要聚焦於控制分配方法之實現，目前常見方法包括二次規劃（quadratic programming）[8]、線性規劃（linear programming）[9]以及自適應方法（adaptive method）[10]等。Thor I. Fossen 於文獻 [11] 中提出最小平方法（least squares）之控制分配推導，但該方法未能考慮致動器輸出限制。因此，本文採用結合輸出限制之最小平方法，以提升控制分配之實用性。

在實際應用中，AUV 的控制通常需仰賴多種感測器之輔助[12]。透過感測器量測，可取得載具之實際狀態，進而降低系統不確定性對控制性能之影響。本研究以都卜勒速度計（Doppler Velocity Log, DVL）與慣性測量單元（Inertial Measurement Unit, IMU）作為核心感測器。DVL 利用都卜勒效應量測載具相對於水體之速度，在 GPS 訊號不可用或不穩定之水下環境中特別實用，可提供即時速度資訊以支援精確導航與定位。IMU 則整合加速度計、陀螺儀與磁力計等感測元件，量測加速度、角速度與磁場資訊，並透過資料融合提供載具之姿態資訊，如傾角與旋轉角度等。

二、數學模型

根據前述文獻回顧可知，控制分配設計在實現自主式水下載具控制中扮演著關鍵角色。此外，考量致動器在實務上的限制，必須對控制分配的輸出加以約束。同時，為了有效控制載具，需透過感測器取得其姿態與位置的即時資訊。本研究採用滑模控制（sliding mode control）作為控制方法，並結合具輸出限制之控制分配來實現載具控制。在狀態量測方面，利用都卜勒速度計（Doppler Velocity Log, DVL）提供當前位置資訊，而慣性測量單元（Inertial Measurement Unit, IMU）則提供當前姿態角資訊。本研究之實驗場域設於國立成功大學系統及船舶機電工程學系之拖航水槽。該實驗設施長 165 公尺、寬 8 公尺、深 3 公尺，可提供一個實際驗證載具六自由度控制之測試環境。本論文之控制流程圖如圖 1 所示。

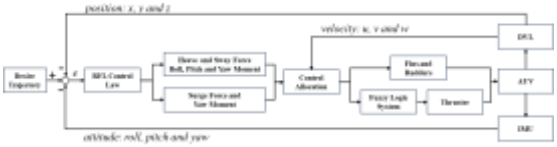


圖 1 本論文之控制流程圖

為了實現自主式水下載具（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）的控制，首先必須分析其六自由度之運動模型。圖 2 中顯示地球固定座標系（earth-fixed frame）與本體固定座標系（body-fixed frame）之間的關係。所定義之運動變數列於表 1。

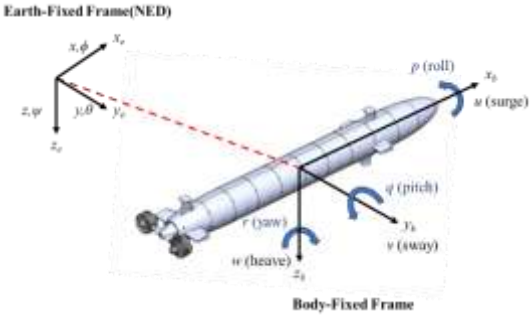


圖 2 自主式水下載具之地球固定座標系與本體固定座標系之定義

表 1 無人水下載具之符號定義

自由度	平移運動	位置	線速度	力
1	x 方向運動（縱向運動，Surge）	x	u	τ_x
2	y 方向運動（橫向運動，Sway）	y	v	τ_y
3	z 方向運動（垂向運動，Heave）	z	w	τ_z
自由度	旋轉運動	尤拉角	角速度	力矩
4	繞 x 軸旋轉（滾轉，Roll）	ϕ	p	τ_ϕ
5	繞 y 軸旋轉（俯仰，Pitch）	θ	q	τ_θ
6	繞 z 軸旋轉（偏航，Yaw）	ψ	r	τ_ψ

2.1 自主式水下載具之動態模型

自主式水下載具之相關狀態向量可表示如下方程式：

$$\boldsymbol{\eta}=[x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\nu}=[u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \tag{2}$$

其中，η 表示載具在地球固定座標系（earth-fixed frame）中的當前位置與歐拉角向量，而 ν 表示載具在本體固定座標系（body-fixed frame）中的當前線速度與角速度向量。兩者之間的關係如下所示：

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}=\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \tag{3}$$

其中，J(η)為地球固定座標系與本體固定座標系之間的轉換矩陣。

$$\boldsymbol{\tau}=[\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z \quad \tau_\phi \quad \tau_\theta \quad \tau_\psi]^T \tag{4}$$

其中，τ 表示作用於載具之控制力，並以本體固定座標系（body-fixed frame）為參考座標系。

根據 Thor I. Fossen [13] 的研究，自主式水下載具（AUV）之數學模型可表示為下列形式：

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}}+\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}+\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu}+\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu})+\boldsymbol{\tau}_d \tag{5}$$

在上述方程式中，M 表示質量與慣性矩陣，C(ν)為科氏力與向心力矩陣，D(ν)為水動力阻尼矩陣，g(η)為重力與浮力向量，而 τ 表示控制力與力矩。本文將採用回授線性化控制（feedback linearization control）並結合強健補償器（robust compensator），以求得期望之控制輸入。最後，τ_d 表示外部擾動力。

將式（3）代入式（5）後，可得到自主式水下載具於地球固定座標系（Earth-fixed frame）下之動態模型如下：

$$\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}}+\mathbf{C}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\mathbf{D}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{\tau}_\eta+\boldsymbol{\tau}_{d\eta} \tag{6}$$

對上述方程式進行推導後，可得到下列方程式：

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}=\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta})^{-1}(\boldsymbol{\tau}_\eta+\boldsymbol{\tau}_{d\eta}-\mathbf{C}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\mathbf{D}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})) \tag{7}$$

M、C、D、g 以及擾動項之模型可參考文獻 [14] 獲得。

2.2 自主式水下載具之非線性控制律

在水下地形探測中，通常會預先設定特定的運動軌跡。為了達成軌跡追蹤，本研究以軌跡追蹤誤差作為控制器設計之基礎。該控制器並結合強健補償器（robust compensator），以克服模型不確定性與外部擾動之影響。

首先，需定義追蹤誤差，其表示載具當前位置與姿態相對於期望軌跡之偏差，其可表示如下：

$$\mathbf{e}=\boldsymbol{\eta}-\boldsymbol{\eta}_d \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{\eta}$ 表示當前軌跡狀態，$\boldsymbol{\eta}_d$ 表示期望軌跡狀態，且兩者皆需為連續可微。對上述方程式關於時間取二階導數，可得下列結果：

$$\ddot{\mathbf{e}}=\ddot{\boldsymbol{\eta}}-\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d \tag{9}$$

將式（7）代入式（9），可得式（10）。

$$\ddot{\mathbf{e}}=\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta})^{-1}(\boldsymbol{\tau}_\eta+\boldsymbol{\tau}_{d\eta}-\mathbf{C}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\mathbf{D}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}-\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}))-\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d \tag{10}$$

本文採用強健補償器（robust compensator）以消除模型不確定性與海流擾動之影響。自主式水下載具之控制律定義如下：

$$\boldsymbol{\tau}_\eta=\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta})\left[\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta})\left(\mathbf{C}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\mathbf{D}_\eta(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}+\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})\right)+\boldsymbol{\Delta}+\mathbf{u}_e\right] \tag{11}$$

其中，u_e 表示用於消除模型不確定性與海流擾動之強健補償項。Δ 可表示如下：

$$\boldsymbol{\Delta}=[\Delta_1 \quad \Delta_2 \quad \Delta_3 \quad \Delta_4 \quad \Delta_5 \quad \Delta_6]^T \tag{12}$$

和

$$\begin{aligned}
\Delta_1&=\ddot{x}_d-\lambda_1(\dot{x}-\dot{x}_d)-\lambda_2(x-x_d)\\
\Delta_2&=\ddot{y}_d-\lambda_3(\dot{y}-\dot{y}_d)-\lambda_4(y-y_d)\\
\Delta_3&=\ddot{z}_d-\lambda_5(\dot{z}-\dot{z}_d)-\lambda_6(z-z_d)\\
\Delta_4&=\ddot{\phi}_d-\lambda_7(\dot{\phi}-\dot{\phi}_d)-\lambda_8(\phi-\phi_d)\\
\Delta_5&=\ddot{\theta}_d-\lambda_9(\dot{\theta}-\dot{\theta}_d)-\lambda_{10}(\theta-\theta_d)\\
\Delta_6&=\ddot{\psi}_d-\lambda_{11}(\dot{\psi}-\dot{\psi}_d)-\lambda_{12}(\psi-\psi_d)
\end{aligned} \tag{13}$$

將控制律 τ_η 代入式（10），可得下列結果：

$$\ddot{\mathbf{e}}+\mathbf{k}_1\dot{\mathbf{e}}+\mathbf{k}_2\mathbf{e}=\mathbf{u}_e+\tilde{\mathbf{w}} \tag{14}$$

$\tilde{\mathbf{w}}=\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\tau}_{d\eta}$ 其定義為外部擾動與模型不確定性。k_1 與 k_2 為控制增益矩陣，其定義如下：

$$\mathbf{k}_1=\begin{bmatrix}\lambda_1&0&0&0&0&0\\0&\lambda_3&0&0&0&0\\0&0&\lambda_5&0&0&0\\0&0&0&\lambda_7&0&0\\0&0&0&0&\lambda_9&0\\0&0&0&0&0&\lambda_{11}\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\mathbf{k}_2=\begin{bmatrix}\lambda_2&0&0&0&0&0\\0&\lambda_4&0&0&0&0\\0&0&\lambda_6&0&0&0\\0&0&0&\lambda_8&0&0\\0&0&0&0&\lambda_{10}&0\\0&0&0&0&0&\lambda_{12}\end{bmatrix} \tag{16}$$

當 $\lambda_i>0$ 為可設計變數，i =1,2,…,12。

定義一狀態變數，其包含誤差 e 及其時間導數。接著，利用狀態空間表示法，可建立如下之動態誤

差方程式：

$$\dot{\bar{\mathbf{e}}} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{e}} + \mathbf{B}\mathbf{u}_e + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{w}} \tag{17}$$

其中

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{e}} &= [\mathbf{e} \quad \dot{\mathbf{e}}]^T \\ &= \left[e_x \quad e_y \quad e_z \quad e_\phi \quad e_\theta \quad e_\psi \quad \dot{e}_x \quad \dot{e}_y \quad \dot{e}_z \quad \dot{e}_\phi \quad \dot{e}_\theta \quad \dot{e}_\psi\right]^T\end{aligned} \tag{18}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times6} & \mathbf{I}_{6\times6} \\ -\mathbf{k}_2 & -\mathbf{k}_1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times6} \\ \mathbf{I}_{6\times6} \end{bmatrix} \tag{20}$$

強健補償器之設計目標在於確保外部擾動與軌跡追蹤誤差於最壞情況下仍低於一指定之衰減水準 ρ。針對式(17)之誤差動態，其最小最大(min-max）軌跡追蹤性能可表示如下 [15]：

$$\min_{\mathbf{u}_e \in L_2[0,t_f]} \max_{\tilde{\mathbf{w}} \in L_2[0,t_f]} \frac{\int_0^{t_f} [\bar{\mathbf{e}}(t)^T \mathbf{Q}\bar{\mathbf{e}}(t) + \mathbf{u}_e^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}_e(t)]dt}{\int_0^{t_f} [\tilde{\mathbf{w}}^T(t)\tilde{\mathbf{w}}(t)]dt} \le \rho^2 \tag{21}$$

其中 $t_f > 0$ 表示最終時間，$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$ 和 $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > 0$ 為加權矩陣。指定之衰減水準 ρ 應儘可能設為較小，且滿足 $0 < \rho < 1$。從強健性（robustness）的觀點而言，較小的衰減水準 ρ 代表系統具有較強的強健性。

定理 1:

本文所提出之強健補償器能夠消除式（17）中所提及之外部擾動與模型不確定性，並可確保最小最大（min-max）軌跡追蹤性能維持在指定之衰減水準 ρ 以下。

$$\mathbf{u}_e = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{e}} \tag{22}$$

其中 $\mathbf{P}=\mathbf{P}^T>0$ 為下列類 Riccati 方程之解。

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\left(\mathbf{R}^{-1} - \frac{1}{\rho^2}\mathbf{I}\right)\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \tag{23}$$

最壞情況之擾動 $\tilde{\mathbf{w}}^*$ 可表示如下：

$$\tilde{\mathbf{w}}^* = \frac{1}{\rho^2}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{e}} \tag{24}$$

將式（22）之強健補償器代入式（11），可得到一強健控制器，使追蹤誤差 e 收斂至零，並同時消除模型不確定性與外部擾動之影響。

本研究所提出之強健導引律設計流程可歸納為以下步驟：

步驟 1:

選定正定加權矩陣 **Q**, **R** 與期望之衰減水準 ρ 使得 $\rho^2\mathbf{I}$ - **R** 為一正定矩陣。

步驟 2:

透過選取控制參數 λ_i（$i = 1,2,...,12$），並利用可設計之控制增益矩陣 k_1 與 k_2 建立矩陣 A。

步驟 3:

由式（23）之類 Riccati 方程求解 P。

步驟 4:

建構強健補償器 $\mathbf{u}_e = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{e}}$ 利用正定矩陣 R 和 P。根據 $\mathbf{u}_e$，可實現式（11）中的強健導引律 τ_η。

2.3 致動器模型

為了在實際中實現對水下載具的控制，必須考慮其所使用之致動器模型。該模型描述輸入控制指令與其所產生力之間的關係。因此，本研究將致動器模型定義如下：

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{u} \tag{25}$$

其中，u 表示實際輸入指令，f 表示所產生之力，而 K 表示兩者之間的關係。

本文所使用之自主式水下載具配備四種類型之致動器，其對應之實際輸入指令類型與所能產生之力如表所示：

表 2 致動器與控制變數之間的關係

致動器	控制命令 u	控制力 f
主推進器	u_c (轉速)	$[F_x, 0, 0]^T$
舵	δ(角度)	$[0, F_y, 0]^T$
翼	δ(角度)	$[0, 0, F_z]^T$

在實際應用中，由於致動器的安裝位置會產生對應之力矩，因此，對於六自由度（6-DOF）之自主式水下載具，其致動器所產生之力與力矩可進一步表示如下：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{r}\times\mathbf{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_z\mathrm{r}_y - F_y\mathrm{r}_z \\ F_x\mathrm{r}_z - F_z\mathrm{r}_x \\ F_y\mathrm{r}_x - F_x\mathrm{r}_y \end{bmatrix} \tag{26}$$

其中，$\mathrm{f} = [F_x, F_y, F_z]^T$ 表示致動器所產生之力，而 $\mathrm{r} = [\mathrm{r}_x, \mathrm{r}_y, \mathrm{r}_z]^T$ 表示致動器實際安裝位置與 AUV 重心之間的距離向量。

為了確定主推進器產生期望控制律所需之控制力，必須考慮推進器之安裝位置。因此，可定義如下方程式：

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{T}\mathbf{f} = \mathbf{T}\mathbf{K}\mathbf{u} \tag{27}$$

其中 $\mathbf{T} \in \mathbf{R}^{b\times m}$ 是推進器配置矩陣，以及 $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^{m\times1}$. 為了實現六自由度（6-DOF）運動之完整控制，需滿足 m>b 之條件，使系統成為過致動（over-actuated）控制系統。本文所使用之載具致動器包含一組主推進器矩陣（由兩具推進器組成）以及八個伺服馬達。

2.3.1 主推進器

本文所考慮之載具，其主推進器屬於固定式致動器(fixed actuator)，亦即其本身不具備旋轉能力。考量自主式水下載具之六自由度（6-DOF）運動，

其推進器配置矩陣設計如下：

$$t_p = t_{lt} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ r_z \\ -r_y \end{bmatrix} \tag{28}$$

2.3.2 伺服馬達

本文所使用之自主式水下載具共配置八個伺服馬達，其中四個用於控制翼面，另四個用於控制舵面，如圖 3 所示。



圖 3 自主式水下載具四個翼面與四個舵面之位置

透過調整翼面或舵面之偏轉角度，可產生升力與阻力，並因其安裝位置而產生對應之力矩，進而使自主式水下載具產生俯仰（pitch）與偏航（yaw）運動。升力與阻力之間的關係可表示如下：

$$L_f = \frac{1}{2}\rho A u_r^2 C_L \delta \tag{29}$$

$$D_f = \frac{1}{2}\rho A u_r^2 C_D \delta^2 \tag{30}$$

其中，L_f 表示翼面或舵面所產生之升力，D_f 表示其阻力，ρ 為水密度，A 表示翼面或舵面之參考面積，u_r 為流體相對於翼面或舵面之速度，通常可視為無人水下載具之航行速度。C_L 與 C_D 分別為升力係數與阻力係數，且可由實驗獲得，δ 則為翼面或舵面主平面與水流之間的攻角。

在本研究所使用之自主式水下載具中，翼安裝於載具之左舷（port）與右舷（starboard）兩側，如圖 4 所示。此配置使翼面可在 z 軸方向產生升力，並在 x 軸方向產生阻力，進而產生俯仰力矩（pitching moment）與滾轉力矩（rolling moment）。另一方面，舵面安裝於載具之上方與下方，如圖 5 所示。此配置使舵面可在 y 軸方向產生升力，並在 x 軸方向產生阻力，從而產生偏航力矩（yaw moment）與滾轉力矩（rolling moment）。

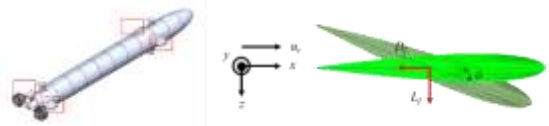


圖 4 翼面之力與角度示意圖

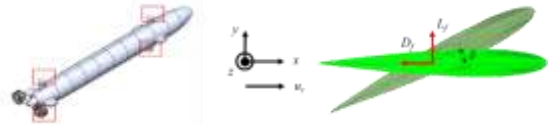


圖 5 舵面之力與角度示意圖

伺服馬達之安裝位置會影響其所產生力之方向以及對應之力矩。在本研究所使用之自主式水下載具中，翼面安裝於 x-y 平面，而舵面則安裝於 x-z 平面。考量 AUV 之六自由度（6-DOF）運動，其推進器配置矩陣設計如下：

$$t_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -r_z \\ 0 \\ r_x \end{bmatrix} \quad t_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ r_y \\ -r_x \\ 0 \end{bmatrix} \tag{31}$$

三、實驗結果

本章將呈現本論文之實驗結果。載具平台之驗證場域設於國立成功大學系統及船舶機電工程學系之拖航水槽。在該實驗場域中，進行直線軌跡之軌跡點追蹤測試，測試距離分別為 10 公尺、20 公尺與 30 公尺。除直線測試外，亦透過正弦軌跡進行非線性測試，以驗證載具之轉向性能。接著將說明所選用之控制器參數。

步驟 1:

指定正定加權矩陣 Q、R 與期望衰減水準 γ，使得 Γ 為一正定矩陣。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 2 \end{bmatrix}_{12\times 12}、\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0.2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.2 \end{bmatrix}_{6\times 6}、\rho = 0.5$$

步驟 2:

透過選擇控制參數 λ_i（$i = 1,2,\ldots,12$），並結合可設計之控制增益矩陣 k_1與 k_2，以建立矩陣 A。

$$\mathbf{k}_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 2 \end{bmatrix}_{6\times 6}、\quad \mathbf{k}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{6\times 6}$$

步驟 3:

根據式（23）之類 Riccati 方程求得 P。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.83 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 \\ 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.97 \end{bmatrix}$$

步驟 4：

利用正定矩陣 R 與 P 建構強健補償器 $\mathbf{u}_e = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{e}}$。根據 $\mathbf{u}_e$，即可實現式 (11) 中之強健導引律 τ_η。

3.1 模擬

在模擬過程中，本研究採用相同之控制器參數，並於 MATLAB 平台上進行模擬分析。相關模擬結果如下所示：

3.1.1 情境一－10 公尺直線軌跡

在 10 公尺測試中，初始位置設定為 0，並沿著終點為 10 的直線軌跡進行軌跡點追蹤。軌跡點的生成係由軌跡產生器透過對所提供的初始軌跡點進行三次樣條插值（cubic spline interpolation）而得，以確保軌跡之平滑性與連續性。此外，該軌跡之期望速度設定為 0.5 m/s。

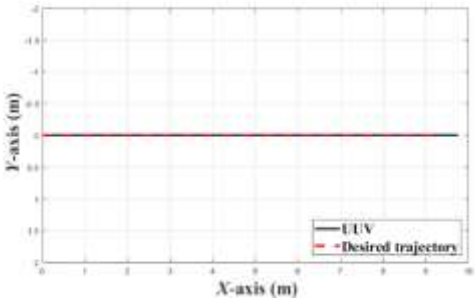


圖 6 模擬情境一中導引式 AUV 軌跡追蹤隨時間變化曲線

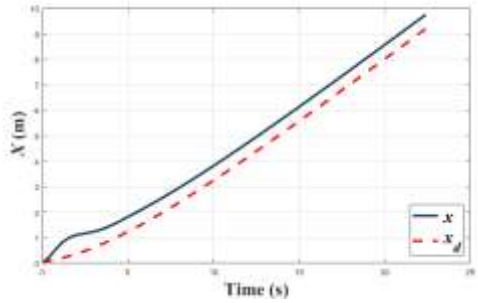


圖 7 模擬情境一中 X 軸軌跡追蹤隨時間變化曲線

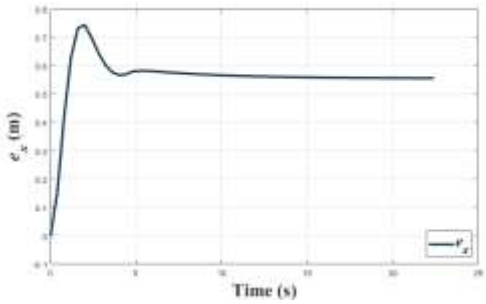


圖 8 模擬情境一中 X 軸追蹤誤差隨時間變化曲線

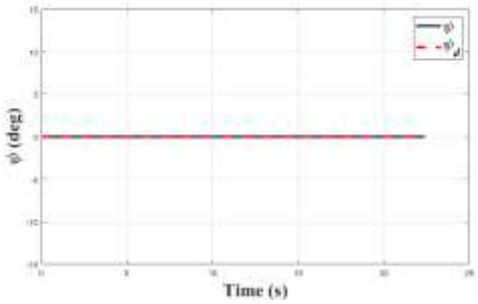


圖 9 模擬情境一中偏航角軌跡追蹤隨時間變化曲線

3.1.2 情境二－20 公尺直線軌跡

在 20 公尺測試中，初始位置設定為 0，並沿著終點為 20 的直線軌跡進行軌跡點追蹤。軌跡點的生成係由軌跡產生器透過對所提供的初始軌跡點進行三次樣條插值（cubic spline interpolation）而得，以確保軌跡之平滑性與連續性。此外，該軌跡之期望速度設定為 0.5 m/s。

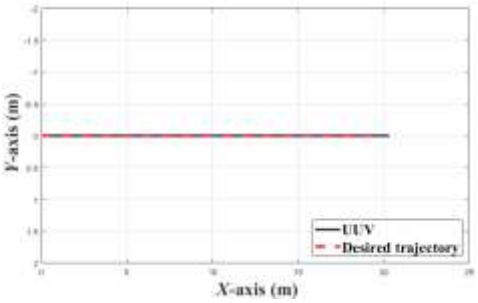


圖 10 模擬情境二中導引式 AUV 軌跡追蹤隨時間變化曲線

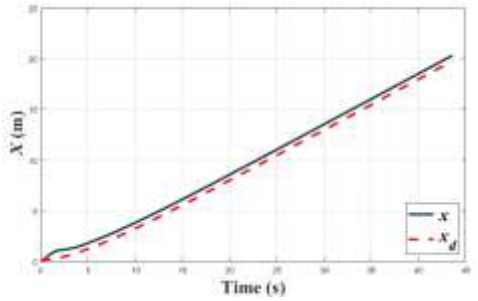


圖 11 模擬情境二中 X 軸軌跡追蹤隨時間變化曲線

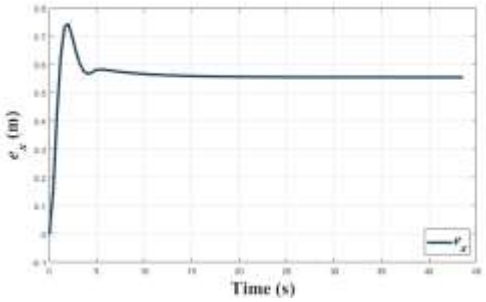


圖 12 模擬情境二中 X 軸追蹤誤差隨時間變化曲線

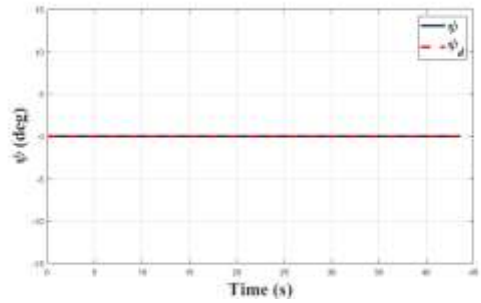


圖 13 模擬情境二中偏航角軌跡追蹤隨時間變化曲線

3.1.3 情境三－30 公尺直線軌跡追蹤

在 30 公尺測試案例中，系統以 0 為初始位置，沿著終點為 30 的直線軌跡執行軌跡追蹤。軌跡點由軌跡產生器基於給定的初始路徑點，透過三次樣條插值方法進行生成，以確保軌跡之平滑性與連續性。此外，該軌跡之期望速度設定為 0.5 m/s。

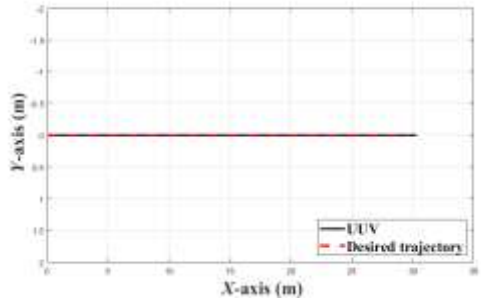


圖 14 模擬情境三中導引式 AUV 軌跡追蹤隨時間變化曲線

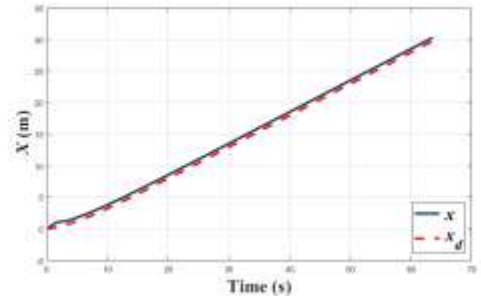


圖 15 模擬情境三中 X 軸軌跡追蹤隨時間變化曲線

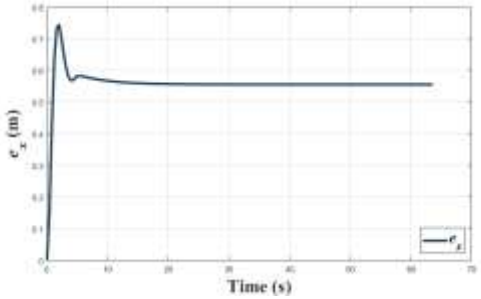


圖 16 模擬情境三中 X 軸追蹤誤差隨時間變化曲線

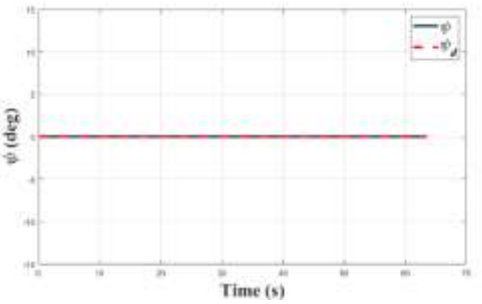


圖 17 模擬情境三中偏航角軌跡追蹤隨時間變化曲線

3.1.4 情境四－正弦軌跡

在正弦軌跡測試中，初始位置設定為 0，並沿著終點為 30 的正弦形軌跡進行軌跡點追蹤。軌跡點的生成係由軌跡產生器透過對所提供的初始軌跡點進行三次樣條插值（cubic spline interpolation）而得，以確保軌跡之平滑性與連續性。此外，該軌跡之期望速度設定為 0.5 m/s。

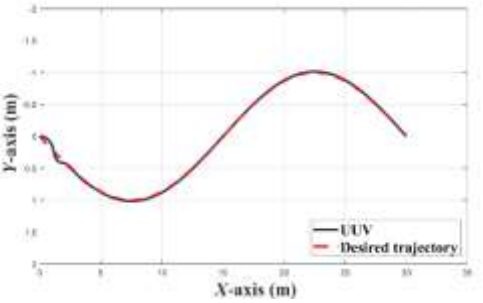


圖 18 模擬情境四中導引式 AUV 軌跡追蹤隨時間變化曲線

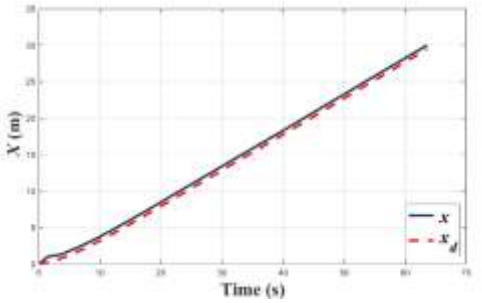


圖 19 模擬情境四中 X 軸軌跡追蹤隨時間變化曲線

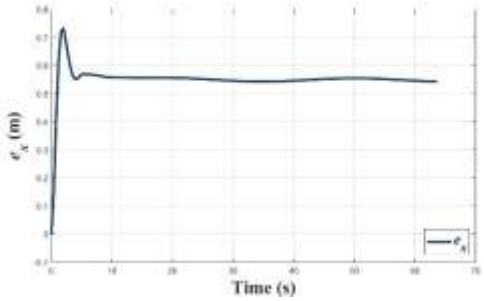


圖 20 模擬情境四中 X 軸追蹤誤差隨時間變化曲線

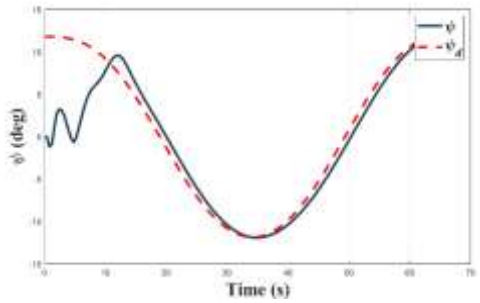


圖 21 模擬情境四中偏航角軌跡追蹤隨時間變化曲線

3.1.5 模擬結果之討論

透過選擇適當的控制器參數，可以觀察到載具能夠平順地沿著指定軌跡航行，且其控制力能夠有效分配至各個致動器。由模擬結果可知，當實驗環境為封閉水域時，外部擾動幾乎可忽略不計。為了貼近拖航水槽（towing tank）之實驗條件，本研究將外部擾動設定為零，以利根據不同模擬結果評估實驗之可行性。

當實驗軌跡為直線時，可觀察到載具在 y、z、roll、pitch 與 yaw 方向上均不需要額外控制力。因此，理論上這些方向的期望控制力皆為零。

受限於載具本身之物理特性，本研究所設定之軌跡皆位於水面上，亦即載具處於浮力大於中性浮力之狀態。因此，在控制力與導航誤差的觀察上，僅針對 x、y 與 yaw 方向進行分析。相關模擬結果如圖 6 至圖 21 所示。

在直線航行的情況下，可觀察到在理想條件下，無論航行距離為何，y 方向的誤差始終為零，此結果可由圖 6、圖 10 與圖 14 之航跡結果明顯看出。

綜合上述結果，可得知該載具能夠穩定追蹤期望速度，並在該速度下維持穩定航向。

週期性軌跡之模擬結果如圖 18 至圖 21 所示。由圖 18 的航跡結果可知，載具於初始階段尚無法完全平順地追上期望軌跡，因而產生些微追蹤誤差；然而，隨著誤差逐漸收斂，其仍可在小於兩倍船長之距離範圍內穩定追蹤目標軌跡，如圖 20 所示。同時，載具速度亦可穩定追蹤至期望速度。

由於本案例之軌跡並非直線，因此偏航角會隨軌跡變化而調整。由圖 21 可觀察到，因載具初始角度設定為 0 度，故於初始階段需經過一段時間方能追上期望偏航角。此初始角度誤差亦導致載具在起始階段無法完全貼合期望軌跡。然而，隨著追蹤過程持續進行，載具最終仍能以些微角度誤差穩定貼近期望偏航角並完成軌跡追蹤。

表 3 模擬情境 1–4 之均方根誤差（RMSE）結果

情境	RMSE		
	X-axis (m)	Y-axis (m)	Yaw (deg)
1	0.5663	0	0
2	0.5612	0	0
3	0.5594	0	0
4	0.553	0.0859	3.7299

如表 3 所示，在情境 1 至情境 3 中，其誤差皆未超過載具本體長度的兩倍，且偏航角誤差皆為 0。雖然在情境 4 中，偏航角誤差約為 4 度，但 X 軸與 Y 軸之誤差仍控制在載具本體長度兩倍以內。因此，整體誤差表現可視為可接受。

參考文獻

[1] X. Liang, Y. You, L. F. Su, W. Li, and J. D. Zhang, "PATH FOLLOWING CONTROL FOR UNDERACTUATED AUV BASED ON FEEDBACK GAIN BACKSTEPPING," *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, vol. 22, no. 4, pp. 829-835, Aug 2015, doi: 10.17559/tv-20150602130833.

[2] T. Elmokadem, M. Zribi, and K. Youcef-Toumi, "Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs," *Nonlinear Dynamics*, vol. 84, no. 2, pp. 1079-1091, Apr 2016, doi: 10.1007/s11071-015-2551-x.

[3] J. Q. Zheng, L. Song, L. Y. Liu, W. B. Yu, Y. Y. Wang, and C. L. Chen, "Fixed-time sliding mode tracking control for autonomous underwater vehicles," *Applied Ocean Research*, vol. 117, Dec 2021, Art no. 102928, doi: 10.1016/j.apor.2021.102928.

[4] P. S. Londhe and B. M. Patre, "Adaptive fuzzy sliding mode control for robust trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle," *Intelligent Service Robotics*, vol. 12, no. 1, pp. 87-102, Jan 2019, doi: 10.1007/s11370-018-0263-z.

[5] H. Akcakaya and L. G. Sumer, "Robust control of variable speed autonomous underwater vehicle," *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 9, pp. 601-611, May 2014, doi: 10.1080/01691864.2013.879370.

[6] L. Lapierre, "Robust diving control of an AUV," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 92-104, Jan 2009, doi: 10.1016/j.oceaneng.2008.10.006.

[7] L. Qiao, S. T. Ruan, G. Q. Zhang, and W. D. Zhang, "Robust H-2 optimal depth control of an autonomous underwater vehicle with output disturbances and time delay," *Ocean Engineering*, vol. 165, pp. 399-409, Oct 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.019.

[8] J. A. M. Petersen and M. Bodson, "Constrained quadratic programming techniques for control allocation," *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 91-98, Jan 2006, doi: 10.1109/tcst.2005.860516.

[9] D. Fares *et al.*, "Optimal power allocation for a FCHV based on linear programming and PID controller," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 36, pp. 21724-21738, Dec 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.020.

[10] J. Tjonnas and T. A. Johansen, "Adaptive control allocation," *Automatica*, vol. 44, no. 11, pp. 2754-2765, Nov 2008, doi: 10.1016/j.automatica.2008.03.031.

[11] T. Fossen, T. Johansen, and P. Tristan, "A Survey of Control Allocation Methods for Underwater Vehicles," 2009.
[12] P. Liu, B. Wang, Z. Deng, and M. Fu, "INS/DVL/PS Tightly Coupled Underwater Navigation Method With Limited DVL Measurements," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 2994-3002, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2800165.
[13] T. I. Fossen, "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control " 2011.
[14] Y. Yi-Sheng, "Design of Adaptive Fuzzy Guidance Law for Autonomous Underwater Vehicles: Mixed H2/H ∞ Approach," *National Cheng Kung University*, 2020, doi: 10.6844/NCKU202002604.
[15] Y. Y. Chen, M. H. Huang, and Y. L. Tsai, "Nonlinear control design of piezoelectric actuators with micro positioning capability," *Microsystem Technologies*, vol. 27, no. 4, pp. 1589-1599, 2021/04/01 2021, doi: 10.1007/s00542-019-04437-9.

基於前向掃描聲納之 AUV 水下三維地形建模之研究

彭光源[1]　王舜民[2]

摘要

無全球定位系統（GPS）支援的水下環境中，如何建立可靠的地形模型為自主水下載具（AUV）之關鍵課題。相較於易受能見度與光照影響的光學感測器，聲納具備較佳的環境適應能力，適合應用於水下地形建模與導航。本研究提出一套基於前向掃描聲納（Forward-Looking Sonar, FLS）之水下三維地形建模方法，重點在於利用二維前向掃描聲納資料重建三維水下地形。前向掃描聲納可提供平面之距離資訊，透過結合載具運動過程中的姿態與航位推估（Dead Reckoning）資料，將不同時間取得之二維量測進行空間整合，進而重建三維地形結構。系統核心是以 ROS2 (Robot Operating System 2) 軟體框架與 Pixhawk 6C 硬體控制器建構自主式水下載具，並搭載前傾 45 度之二維前向掃描聲納，以持續量測前方環境。其聲納資料由極座標轉換至載具與世界座標系，並結合慣性量測單元(IMU)與航位資訊進行點雲累積，建立局部三維地形模型。實驗結果顯示，本方法可有效將二維聲納資料轉換為具空間結構之三維點雲，並呈現水下地形輪廓。研究證明，利用二維前向掃描聲納進行三維地形建模具備可行性與成本優勢，可作為水下導航、環境感知與 SLAM 之基礎。

關鍵詞：前向掃描聲納、環境建模、ROS2、Pixhawk、水下載具

Research on AUV Underwater 3D Terrain Modeling Based on Forward Scanning Sonar

GUANG-YUAN PENG[1]　Shun-Min Wang[2]

ABSTRACT

In underwater environments without GPS support, establishing reliable terrain models is a key challenge for autonomous underwater vehicles (AUVs). Compared to optical sensors, which are susceptible to visibility and lighting conditions, sonar offers better environmental adaptability and is suitable for underwater terrain modeling and navigation. This research proposes an underwater 3D terrain modeling method based on forward-looking sonar (FLS), focusing on reconstructing 3D underwater terrain using 2D FLS data. FLS provides planar distance information, and by combining attitude and dead reckoning data during vehicle movement, 2D measurements acquired at different times are spatially integrated to reconstruct the 3D terrain structure. The core of the system is an autonomous underwater vehicle constructed using the ROS2 (Robot Operating System 2) software framework and a Pixhawk 6C hardware controller, equipped with a 45-degree forward-tilted 2D FLS sonar for continuous measurement of the environment ahead. The sonar data is converted from polar coordinates to vehicle and global coordinate systems, and point cloud accumulation is performed by combining inertial measurement unit (IMU) and dead reckoning information to build a local 3D terrain model. Experimental results show that this method can effectively convert 2D sonar data into 3D point clouds with spatial structure and present underwater terrain contours. The study demonstrates that using 2D forward-scanning sonar for 3D terrain modeling is feasible and cost-effective, and can serve as a foundation for underwater navigation, environmental perception, and SLAM.

Keywords: forward scannings sonar; environmental modeling; ROS2; Pixhawk; underwater vehicle

[1] 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 碩士班研究生
[2] 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 講師

一、緒論

隨著海洋自主探測任務需求日益增加，自主式水下載具（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）在水下環境中的自主感知、導航與建圖能力已成為重要的研究課題，但水下環境缺乏全球定位系統(GPS)支援，傳統的航位推算方法在長時間運作下容易產生累積誤差，因此如何透過環境感測建立可用之地圖資訊，來支撐定位導航，為目前水下機器人的研究核心問題之一[1]，其中地形輔助導航(Terraon-Aided Navigation,TAN)，就是一種不依賴外部校正的方法，此方法可以利用海床地形資訊限制航位推估誤差成長，進而提升 AUV 的導航性能[1]。

在水下環境感知方面，光學感測器可提供高解析度影像，卻會受到水體濁度、懸浮粒子、光照衰減、能見度不佳等因素影響，使光學感測器在真實水下場景中的可用性受到限制，只能使用在近距離感應的場合，相比之下聲納感測器對於低能見度環境具有較高的適應性，因此聲納被廣泛應用於，水下探測、障礙物量測、地形感知、建圖任務，所以本研究使用的聲納(Forward-LookSonar,FLS)，可持續量測載具正前方的環境，兼具前向的近場感知與結構觀測能力，為目前水下機器人局部建圖與 SLAM 研究中的重要感測器[2][4]。

利用前向掃描聲納進行三維地形建模會有幾何上的問題，前向掃描聲納的輸出為二維聲學影像，或 bearing-range 的量測形式，缺乏完整的高程幾何資訊，二維資料重建三維場景會存在幾何不確定性[3][5]，且聲納影像常受到 speckle noise、多重反射、視角遮蔽等因素影響，導致特徵不明顯以及資料關聯困難，使地圖建立與回環偵測不易[2][3]，若載具姿態位移估測不準確，多筆聲納量測在融合過程中，也容易產生拼圖的偏移，降低重建結果的可靠性[2][4]。但近年已有研究嘗試利用，多視角聲納觀測、機率式地圖表示，與圖優化方法提升前向掃描聲納的三維重建能力，其中 Aykin 與 Negahdaripour 提出利用多視角二維前向掃描聲納影像，進行空間雕刻，以重建目標物三維形狀，顯示多視角聲納觀測具備三維重建潛力[5]。Wang、Shan 與 Englot 針對前向聲納地形重建問題，提出結合 bearing-range 影像特徵追蹤的建模方法，建立用於三維地形映射的聲納 SLAM 架構，並指出高噪聲與高程角資訊缺失，是主要困難點[3]。Li 等人提出以前向掃描聲納為基礎之 pose-graph SLAM 方法，針對聲納資料特徵稀疏與錯誤配對問題提出改良策略，證明 FLS 亦能支撐實際水下平台之定位與建圖任務[2]。Cardaillac 與 Ludvigsen 亦指出，相機與聲納之互補融合可進一步改善水下定位與環境重建能力，但多感測器融合系統通常伴隨較高的硬體配置與運算複雜度[6]。

現有研究多聚焦於高階多感測器融合以及特定目標重建，且以推估或重建之結果，作為地圖表達形式，而非將原始聲納量測直接作為最終地圖，對於小型 AUV 平台而言，若能以較低成本之二維前向掃描聲納，配合基本姿態與航位資訊，建立一套可行的局部三維地形建模流程，將有助於水下環境感知應用。所以本研究以裝設前向掃描聲納之自主水下載具為實驗平台，結合 INS、DVL，建立二維聲納量測，轉換為局部三維地形之方法，探討其應用於低成本水下地形建模以及 SLAM 之可行性。

二、研究方法

2.1 載具平台設計

本研究自行建置一套自主式水下載具作為實驗平台，外觀如圖 1 所示，載具規格如表 1 所示。載具本體使用鋁擠型和 3D 列印件構成，外部框架用於固定推進器與相關感測設備，壓克力艙體用於容納控制、運算、通訊、供電模組，使各項設備可集中安裝於同一平台上，作為本研究進行水下量測與實驗之基礎。載具內部模組配置如圖 2 所示，艙體內配置 Raspberry Pi 5、Pixhawk 6C、WTGAHRS3-232、路由器、電池等主要設備，Raspberry Pi5 負責資料接收與上位運算處理，Pixhawk 6C 作為載具之主要控制器，負責推進控制與基本飛控功能，WTGAHRS3-232、DVL 提供運動姿態資訊，路由器用於建立外部電腦與載具之間的通訊連線。

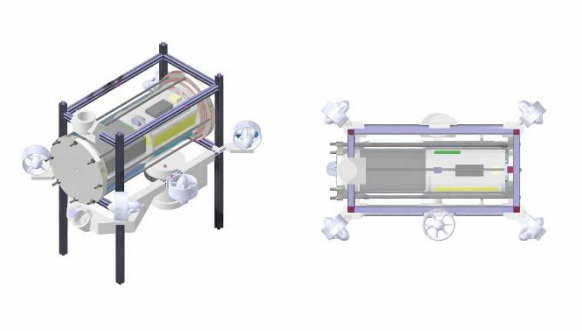


圖 1：自主式水下載具示意圖

表 1：載具規格表

長度	寬度	高度	重量
75cm	50cm	58cm	25kg

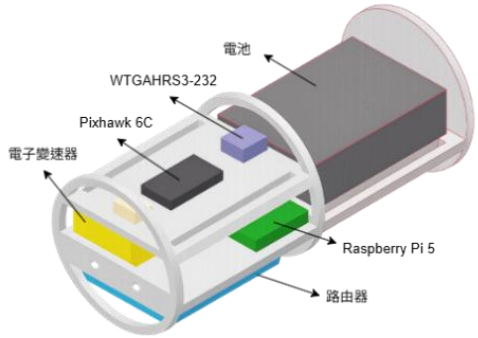


圖 2：艙體內部配置示意圖

2.2 系統設計

如圖 3 所示，本研究以 Raspberry Pi 5 作為系統整合平台，負責各感測器資料接收、通訊管理，控制部分採用 Pixhawk 6C 當作控制核心，負責載具推進控制與基本姿態控制功能，本研究為了完成載具內外部資料交換，另配置路由器作為通訊節點，使得外部電腦可與載具建立連線，進行參數設定與狀態監測。感測器整合方面，IMU、DVL、深度計皆透過對應的通訊介面接入系統中。

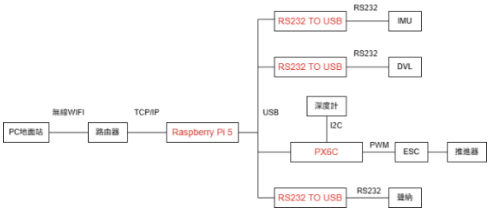


圖 3：載具通訊架構圖

在電力配置方面，本研究以三顆 4S LiPo 鋰電池作為主要供電來源，並利用自動升降壓模組將電能分別供應至，飛控、推進器、運算平台以及各項感測設備，使不同模組皆能於適當電壓條件下穩定運作。整體電力分配與模組供電關係如圖 4 所示。

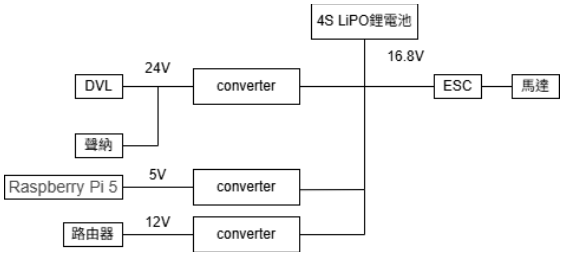


圖 4：載具電路架構圖

2.3 姿態感測器

本研究之水下載具在作業過程中，需持續取得自身運動狀態與垂向位置資訊，以支援水下操作與系統判斷，但水下環境無法使用 GPS 進行定位，所以本研究使用 DVL 與 IMU 作為主要狀態量測來源，如圖 5 所示，此 DVL 除了可提供相對海床之速度資訊，同時也可量測姿態角與對地高度，速度量測的結果可作為估算載具位移變化之基礎，姿態角資訊可反映，載具於水中航行時之方向與空間姿態，對地高度量測可描述載具與海床之相對距離。



圖 5：NavQuest 600 Mirco DVL 示意圖

在垂向量測方面，本研究使用壓力感測器取得載具深度資訊，壓力感測器可量測周圍水壓變化，換算成載具所在之水下深度，提供系統判斷目前垂直位置。



圖 6：壓力感測器

本研究亦搭載 IMU 作為載具姿態量測之感測器，如圖 7 所示，IMU 可提供姿態角、角速度、加速度資訊，相較於 DVL 所提供之速度與對地高度量測，IMU 具有較高的更新頻率，因此能更即時反映載具在航行過程中的動態變化。IMU 主要負責高頻姿態資訊提供，DVL 補充速度、對地高度、相對運動資訊，兩者在量測特性上具有互補性，可作為載具感測器融合之基礎，使系統能更完整掌握載具於水下之運動狀態。



圖 7：WTGAHRS3-232

2.4 水下地形建模方法

圖 8 為本研究所使用的單波束前向掃描聲納，量測方式為透過機械式旋轉逐步掃描前方環境，輸出各掃描方向上的回波強度資訊，可提供載具前方海床與障礙物之基本幾何資訊，所以本研究配合姿態感測器與 dead reckoning 航跡資訊，將原始二維 scanline 量測，轉換為局部三維地形表示。



圖 8：Micron DST Sonar 示意圖

表 2：聲納規格表

項目	規格
聲納型號	Tritech Micron DST Sonar
聲納類型	前向掃描聲納（Forward-Looking Sonar, FLS）
工作頻率	650kHz 至 750kHz
垂直波束寬	30°
水平波束寬	3°
最大距離	2m-75m
掃描區間	最大 360°
供電需求	7V–50V
資料傳輸介面	RS485、RS232
最大直徑	56mm
最大高度	78.5mm
空氣中重量	330g
水中重量	185g

2.4.1 建圖流程

本研究之聲納資料以 scanline 形式輸出，每筆資料包含掃描角度，與該方向上各距離的 bin 回波強度分布。本研究將聲納掃描角範圍設定為-15°至+15°，聲納固定安裝於載具船頭前下方約 45°方向，每筆掃描線包含 248 個距離取樣點，總計取得 4398 筆掃描線資料。建圖流程如圖 9 所示，先由原始回波中擷取顯著反射區段，再結合 IMU、DVL 與 dead reckoning 資訊，完成幾何轉換和多時刻量測累積，最終建立局部二維與三維地形表示。

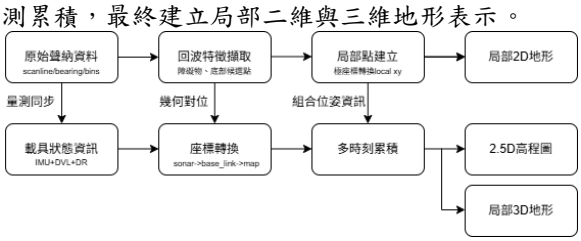


圖 9：聲納建圖流程圖

2.4.2 聲納參數讀取

由圖 10 得知，聲納於每次掃描回傳之 mtHeadData 訊息中，包含本次量測之距離範圍與取樣點數，而 Bytes 21、22 為 Range Scale，表示本次掃描設定之量測距離範圍，Bytes43、44 為 Dbytes，表示該次掃描所回傳之取樣點數，即聲納 scanline 中的距離 bin 數量，所以每一個 bin 對應一個距離位置，且 bin 編號越大表示距離聲納越遠，若本次量測之距離範圍為 Range Scale，總取樣點數為 Dbytes，第 i 個距離 bin 所對應之實際距離 r_i 可表示為式(1)。

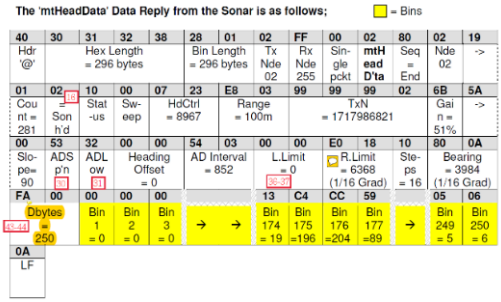


圖 10：mtHeadData(Tritech 手冊)

$$r_i = \frac{i}{\text{Dbytes}} \times \text{RangeScale} \qquad (1)$$

假設 Range Scale = 100m、Dbytes = 250，則第 55 個 bin 所對應之距離，約為 $100 \times 55/250 = 22$ m，依此公式可將原始聲納回波圖中之距離 bin 位置，轉換為對應之實際量測距離。

2.4.3 聲納參數設定

聲納量測參數係依據 mtHeadCommand 封包進行設定，欄位定義如圖 11 所示，此聲納的掃描參數主要包含，量測距離範圍(Range Scale)、左右掃描角限制(LeftLim)與(RightLim)、步進角大小(Step Size)、取樣間隔(ADInterval)、距離取樣點數(Nbins)，Range Scale 決定單次掃描之最大量測距離，LeftLim、RightLim 用以設定聲納掃描視場範圍，Step Size 影響角度解析度，Nbins 代表單筆 scanline 中之距離取樣點數，透過參數設定，可控制前向掃描聲納，在不同實驗條件下之量測範圍與解析度。

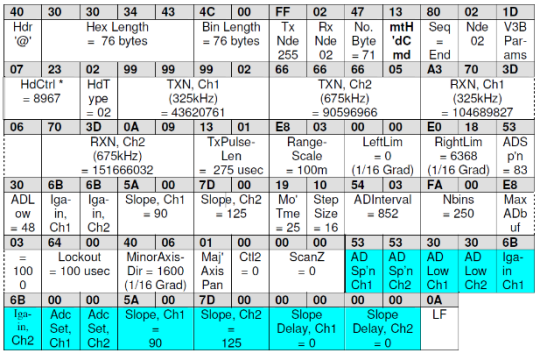


圖 11：mtHeadCommand(Tritech 手冊)

2.4.4 聲納回波萃取與量測點建立

聲納的原始量測可表示為，bearing-range 之極座標回波強度分布，但原始聲納回波僅能反映不同掃描方向，與距離位置之強度變化，無法直接作為局部地圖使用，所以本研究針對極座標回波進行回波追蹤，建立具幾何意義之量測點。底部回波追蹤方面，本研究利用各 bearing 方向上的回波強度梯度變化，追蹤海床主要回波帶位置，將其作為底部邊界的估計結果，底部回波通常在各角度方向上具

有相對連續分布，所以可藉由梯度法於原始回波圖中，擷取底部回波帶，作為後續障礙物搜尋之基準。取得底部邊界後，本研究進一步於底部邊界，設定障礙物搜尋視窗，並在各掃描角度方向，搜尋可能對應局部結構之候選回波點，經由此程序，原始聲納回波可由單純之強度影像，轉換為底部邊界與障礙物候選點之集合。

2.4.5 座標轉換與運動補償

完成回波追蹤與候選點搜尋後，本研究將候選量測點依對應之量測距離 r 與掃描角 θ，轉換至聲納座標系 sonar frame 下之直角座標表示，如式(2)至式(4)所示。

$$x_s = r\cos\theta \tag{2}$$

$$y_s = r\sin\theta \tag{3}$$

$$z_s = 0 \tag{4}$$

x_s、y_s、z_s 分別表示量測點於聲納座標系下之座標分量，經由上述轉換後，候選量測點可由極座標形式表示為聲納座標系下之直角座標點，作為後續座標轉換之基礎。設 p_s 為聲納座標系 sonar frame 下之量測點，p_b 為載具本體座標系 base_link 下之量測點，p_m 為地圖座標系 map 下之量測點，聲納與載具本體之間有固定安裝關係，所以可利用聲納座標系至載具本體座標系之齊次轉換矩陣 T_bs，將量測點轉換至載具本體座標系，如式(5)所示。

$$p_b = T_{bs} p_s \tag{5}$$

若已知載具於量測時刻，在地圖座標系下之位姿，則可利用載具本體座標系至地圖座標系之齊次轉換矩陣 T_mb，將量測點投影至地圖座標系，如式(6)所示。

$$p_m = T_{mb} p_b \tag{6}$$

T_bs 反映聲納相對於載具本體之固定安裝位置與姿態，T_mb 則為載具在地圖座標系下之平移與旋轉關係，可藉由式(5)與式(6)，將單次掃描所得之有效量測點，統一轉換至同一地圖參考框架中。載具於連續量測期間之平面位置，是由 DVL 所提供之速度與航向資訊，進行 dead reckoning 更新得到的，若第 k 個時刻之速度為 v_k、航向角為 ψ_k、時間間隔為 Δt，則其平面位置可由式(7)與式(8)表示。

$$x_k = x_{k-1} + v_k \cos(\psi_k)\Delta t \tag{7}$$

$$y_k = y_{k-1} + v_k \sin(\psi_k)\Delta t \tag{8}$$

若考慮載具姿態角對量測方向影響，載具本體座標系至地圖座標系之旋轉關係，可由 roll、pitch、yaw 構成之旋轉矩陣表示，如式(9)所示。

$$R_{mb} = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \tag{9}$$

其中 φ、θ、ψ 分別為載具之 roll、pitch、yaw，透過上述座標轉換與運動補償流程，可將各時刻所取得之聲納有效量測點，投影至地圖座標系下，作為後續局部三維地圖，2.5D 高程表示建立之基礎。

2.4.6 二維、三維地形表示方法

本研究將各時刻聲納量測點，於地圖座標系下進行疊合，在二維建圖方面先將回波追蹤結果、候選量測點，依對應之距離和掃描角，轉換至聲納座標系，再結合載具位姿資訊，投影至地圖座標系下，再透過多時刻量測點累積，於平面上形成局部點集，來描述場地輪廓與相對位置關係。三維建圖方面，本研究進一步加入量測點高程資訊，使各時刻聲納量測點，可由平面投影擴展為空間點集，將不同時刻之候選量測點，投影至同一地圖參考框架中，並利用深度計量測值作為水面參考基準，建立載具於垂直方向上的絕對位置，同時配合 DVL 所提供之對地高度資訊，描述載具與底部之相對距離，來估算量測點相對於底部基準面之局部高程。

若以水面作為絕對高程基準，設 z_{depth} 為深度計量測之載具深度，h_{rel} 為量測點相對於載具之垂向投影量，則量測點相對於水面之深度可表示為式(10)。

$$z \approx z_{depth} + h_{rel} \tag{10}$$

若以底部基準面，描述量測點之局部高程，設 h_{DVL} 為 DVL 所量測之對地高度，則量測點相對於底部基準面之高程可概念性表示為式(11)。

$$z_{rel} \approx h_{DVL} - h_{rel} \tag{11}$$

z 表示量測點相對於水面之絕對深度，z_{rel} 表示量測點相對於底部基準面之局部高程，最後本研究再將平面空間離散為固定格網，並根據三維建圖結果於各格中記錄對應之高程值，使局部地形可透過平面位置與高度資訊加以表示，形成高程圖。

2.5 GS-PID 控制器

本研究採用 GS-PID（Gain-Scheduled PID）架構來設計控制器，如圖 12 所示，GS-PID 可依不同工作狀態調整控制參數，讓控制器可於不同誤差範圍下，使用合適之的控制參數，所以控制器先由目標值與回授量測值，計算控制誤差，再依誤差大小和當前狀態選擇對應的控制增益，最後由 PID controller 產生輸出命令，而在本研究中，航向控制器以目標航向與實際航向之差值作為輸入，對地高度控制器以目標高度，與 DVL 量測之對地高度差值作為輸入，兩者皆透過回授資訊持續修正載具姿態。

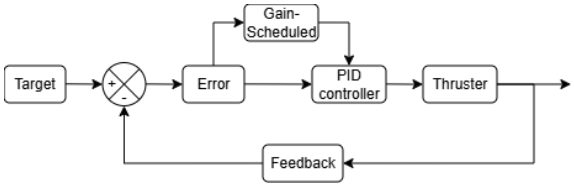


圖 12：GS-PID 控制器

2.6 ROS2 系統整合

本研究以 ROS2 作為自主式水下載具之系統整合平台，將控制、導航、聲納建圖等功能分別作獨立節點，再透過 topic 完成感測資料交換、控制命令傳遞的功能，而 ROS2 節點化的架構，可使各模組功能分離，有利於系統維護以及後續功能擴充。本研究將航向控制器(yaw_controller)、定高控制器(alt_hold_dvl_controller)，與輸出整合節點(rc_arbiter)，建立為一組完整之控制架構，航向控制器同時接收，來自 yaw_ctrl 之目標航向，控制開關以及相關控制參數，並結合 DVL 所提供之 heading 資訊作為回授輸入。定高控制器接收 alt_hold/target_alt 和 dvl/altitude 訊息，來進行對地高度控制。兩組控制器輸出再由 rc_arbiter 整合，統一產生對應之遙控輸出命令給 Pixhawk 6C。如圖 13 所示。

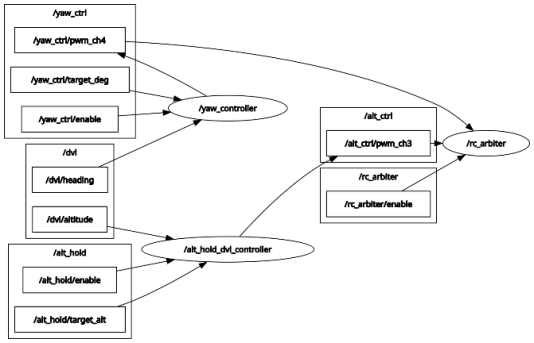


圖 13：ROS2 控制鏈架構圖

在聲納建圖鏈方面，如圖 14 所示，本研究以前向掃描聲納節點，以及 DVL 節點共同作為建圖模組之輸入來源，micron/scanline 提供前向掃描聲納之原始量測資料，dvl/velocity 與 dvl/heading 提供載具速度與航向資訊，供應建圖節點 fls_wall_mapping_node，進行座標轉換和量測點累積。

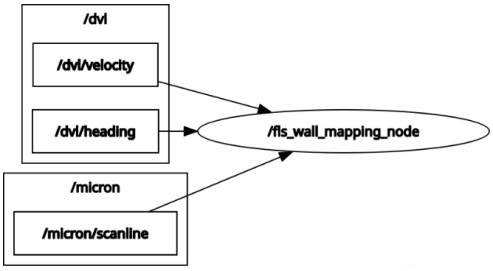


圖 14：ROS2 聲納建圖鏈架構圖

nav_dr_node 接收 dvl/heading、dvl/velocity，計算 dead reckoning 航位推估結果，並發布 dr/odom 作為載具目前的位姿估測資訊，guidance_los_node 則根據 dr/odem 所發布的當前航位，產生對應的導引命令，mission_manager_node 透過 guidance/enable 啟用任務。導航架構鏈如圖 15 所示。

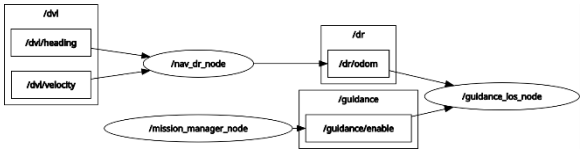


圖 15：ROS2 導航鏈架構圖

ROS2 不僅作為資料交換平台，也支援本研究的系統啟動與整合管理，透過 ROS2 的 launch 機制可啟動各功能節點，並依任務需求載入相應參數，使載具於不同實驗條件下可快速完成系統配置。為保留實驗過程中之重要量測與控制資訊，本研究亦利用 rosbag 進行資料記錄，以供後續分析、建圖驗證與系統性能檢查使用。

三、研究結果

3.1 實驗規劃

本研究為驗證提出之建圖方法，於國立成功大學系統及船舶機電工程學系小水槽進行實驗，水槽尺寸長 5.7m 寬 1.8m，水面至水槽底部的垂直距離為 0.7m，實驗場地如圖 16 所示。



圖 16：國立成功大學系統及船舶機電工程學系小水槽

載具操作方面，本研究先以手動遙控的方式，來操作載具，所以選用 QGroundControl (QGC) 作為操作介面，並透過 MAVROS 與 QGC 連線進行遙控掃描實驗，且同步使用 rosbag 記錄實驗數據，以供後續建圖與結果分析使用。如圖 17 所示。

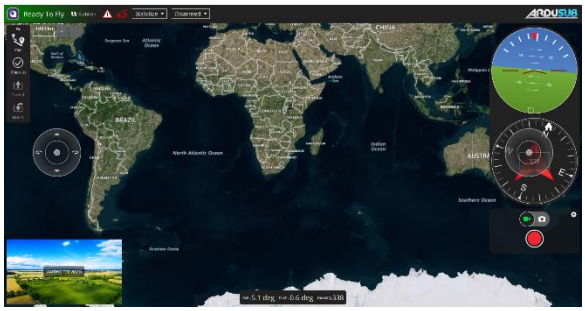


圖 17：QGroundControl 操作介面

3.2 聲納二維建圖實驗結果

此階段的實驗中，會將聲納水平安裝於載具船頭方向，量測範圍設定為 5 m，步進角大小設定為 3.5 度，每筆 scanline 包含 248 個距離取樣點，並規劃載具沿水槽壁掃描。

3.2.1 原始聲納回波追蹤結果

1 圈至 5 圈掃描的極座標回波結果，如圖 18 所示，橫軸為掃描角度，縱軸為距離 bin，顏色強度代表對應位置之平均回波強度，藍色曲線為利用梯度法追蹤之底部回波位置，底部回波帶位置大致集中於 bin17 至 bin23 之間，以本研究聲納量測範圍 5 m、單筆掃描線 248 個距離取樣點估算，底部回波帶約對應 0.34 m 至 0.46 m 的量測範圍，且圖中掃描角範圍為-15°至+15°，顯示在此視場內，底部回波帶隨 bearing 方向雖有些微起伏，但整體變化幅度不大，各圈數下之原始量測分布具有相似趨勢，較強回波主要集中於近距離區域，且隨距離增加，回波強度逐漸減弱，顯示不同圈數下之原始聲納量測，在整體分布上具有一定一致性，表示梯度法可由原始極座標回波中，穩定追蹤出具有代表性之底部邊界。

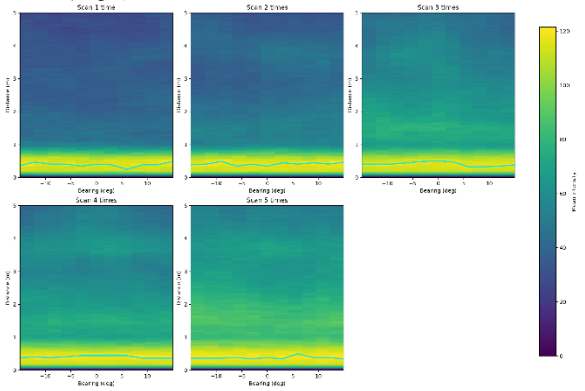


圖 18：聲納回波追蹤結果

3.2.2 二維地形建立結果

依圖 18 的結果來看，原始聲納量測仍屬於 bearing 與 range 構成之極座標回波分布，僅能反映不同方向與距離位置上的回波強弱變化，無法直接對應為局部平面地圖，所以本研究進一步根據底部回波帶之候選回波點，依對應之量測距離與掃描角轉換至平面座標系中，隨載具運動將不同時刻之量測結果，投影至同一地圖框架，來建立局部二維地形表示，結果如圖 19 至圖 23 所示。橘色點為經條件篩選後保留之候選回波點，灰色曲線為載具軌跡，藍色線段則是根據候選點分布建立之局部邊界擬合結果。由圖中可觀察到，候選點於場地邊界之分布逐漸增加，局部二維輪廓亦隨之變得較完整，在 1 圈掃描時，部分邊界區域仍存在缺口，二維輪廓尚未完全形成，而當量測累積至 3 圈、4 圈、5 圈後，候選點對主要邊界方向之覆蓋程度明顯提升，局部二維邊界表示更能反映場地外框之幾何趨勢，但由於 Dead Reckoning 有長期誤差累積的特性，所以繪製出來的地圖，會因此因素影響軌跡與拼接地圖的準確性。

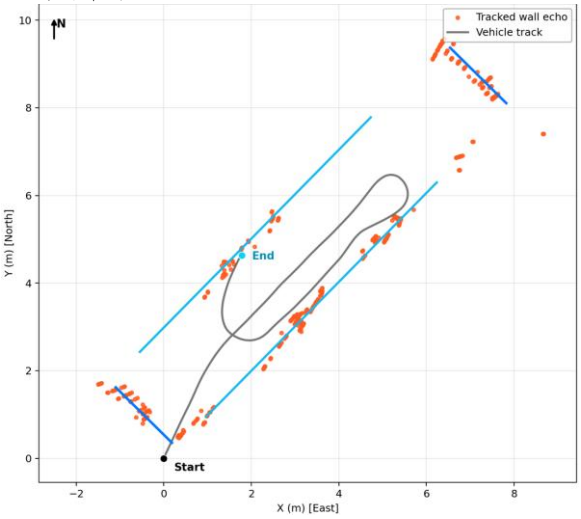


圖 19：二維建圖 1 圈掃描結果

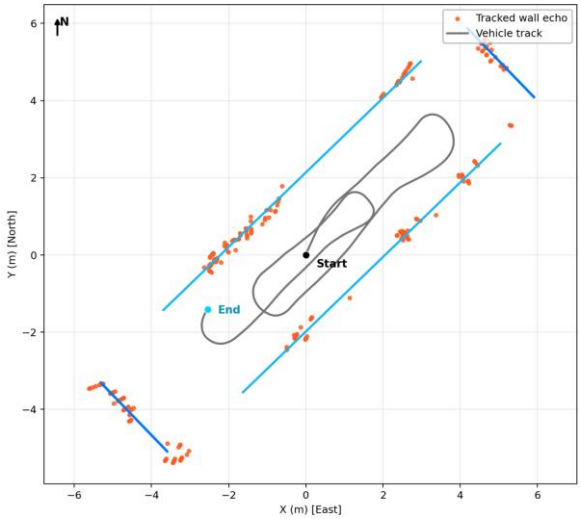


圖 20：二維建圖 2 圈掃描結果

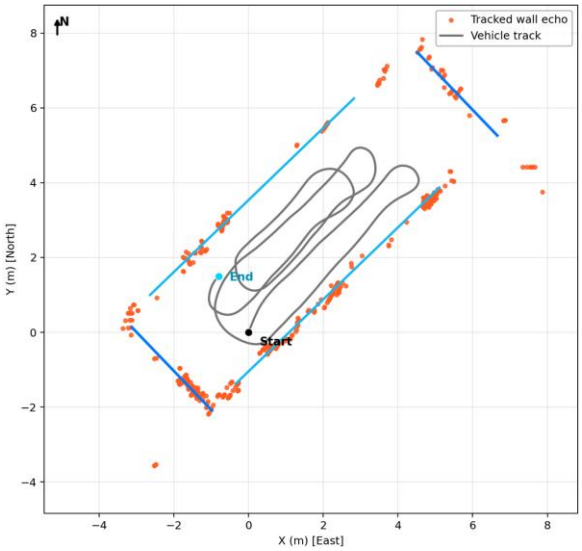


圖 21：二維建圖 3 圈掃描結果

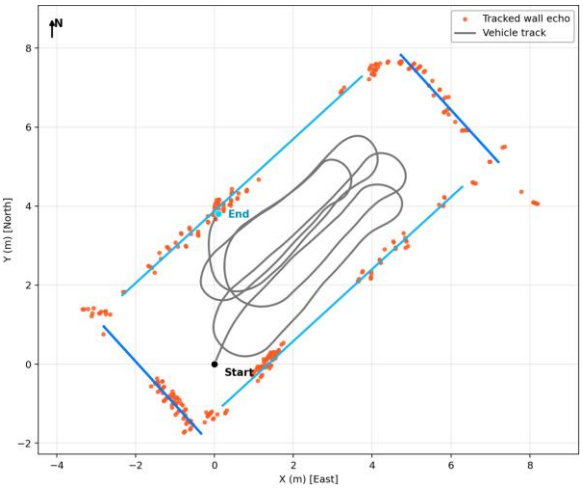


圖 22：二維建圖 4 圈掃描結果

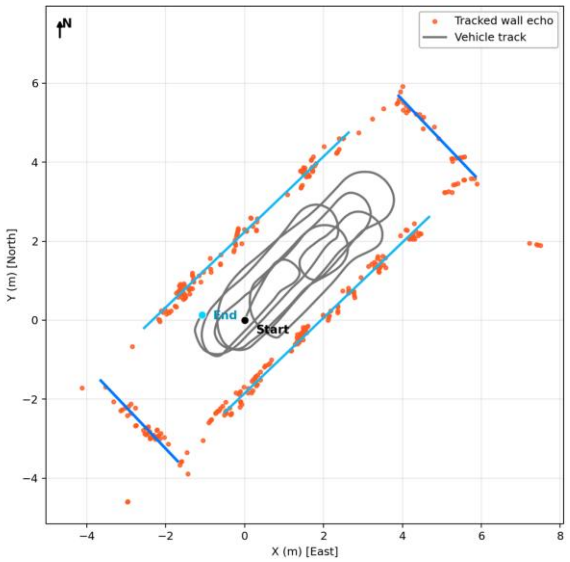


圖 23：二維建圖 5 圈掃描結果

3.3 聲納三維建圖實驗結果

此階段的實驗中，會將聲納固定安裝於載具船頭前下方約 45°方向，聲納設定數據與二維掃描的實驗一致，但不同的是，載具會沿沉體側向進行直航掃描，並於前進過程中，持續量測沉體表面與周圍區域，再透過多時刻量測累積建立局部三維點雲與高程圖結果。水中的被掃描沉體如圖 24 所示，沉體尺寸約長 1.6m 寬 0.5m 高 0.25m。



圖 24：被掃描沉體

3.3.1 底部回波追蹤與候選量測點結果

如圖 25 所示，底部回波位置主要集中於約 bin 18 至 bin 21 之間，對應至 0.36m 至 0.42m 的量測距離範圍，取得底部邊界後，本研究進一步於底部回波帶，上方建立搜尋視窗，以排除背景回波，與非目標量測干擾，由圖 26 呈現的候選量測點搜尋結果來看，本次量測共取得 34 個候選點，分布於 8 個 supporting sweeps 中，表示候選回波並非僅出現在單一掃描方向，而是在多個相鄰 bearing 方向上皆有對應支持，而候選點主要分布於 bin 7 至 bin 23 之間，約對應至 0.14 m 至 0.46 m 的量測範圍，較集中之區域約落在 bin10 至 bin 20，對應至 0.20 m 至 0.40 m 左右。

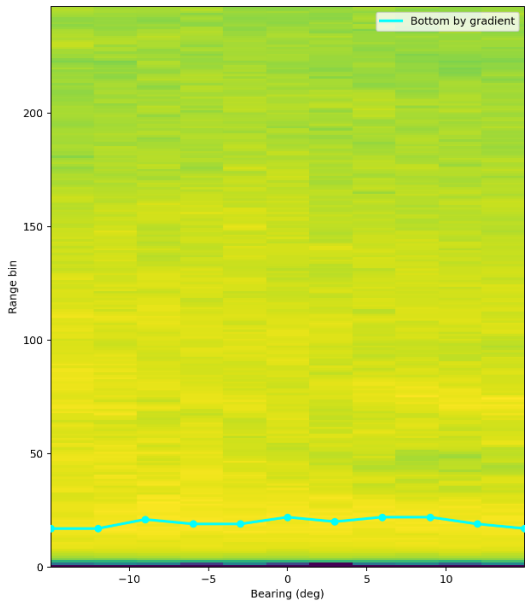


圖 25：底部回波追蹤結果

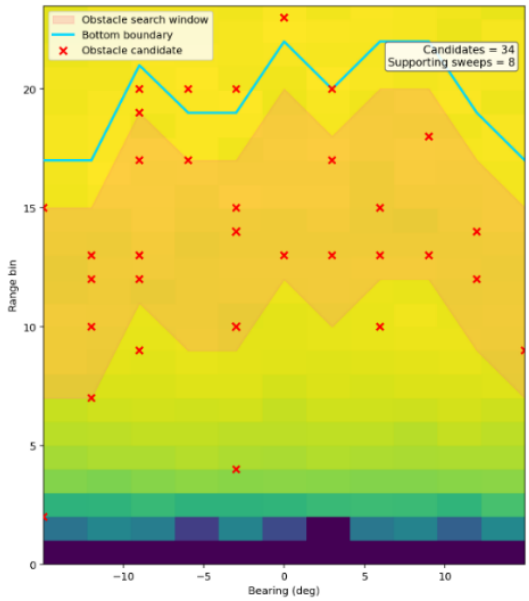


圖 26：障礙物搜尋窗結果

3.3.2 三維地形建立結果

由圖 27 可知，重建後之局部地形最高處約位於 0.50 m 深度位置，水槽底基準面約位於 0.70 m，推估所得之最大相對高度約為 0.20 m，若與圖 29 所示實際沉體外觀比較，目標物之最大高度約為 0.27 m 左右，表示本研究之三維地形結果，在高度上約低估 0.07m，所以本研究的回波追蹤以及候選點搜尋，已可掌握目標物主要高程變化趨勢，但在最大高度估計上仍存在一定程度的誤差。

由圖 28 可觀察到，高程主要集中於目標物中心線附近，沿 X 方向形成連續分布，主要平面範圍從 x= 0.1 m 延伸至 x= 1.6 m，長度約為 1.5 m 左右；Y 方向之高程分布，主要落在 0.1 m 至 0.9 m 之間，對應寬度約為 0.8 m，若與圖 30 所示實際沉體外形比較，目標物實際長度約為 1.6 m 至 1.8 m，寬度約為 0.5 m，所以本研究在長度估計上與實際尺寸相近，誤差約為 0.1 m 至 0.3 m，但在寬度方向上則有較明顯之高估，約大於實際尺寸 0.3 m 左右。以結果來看，高程圖雖能保留目標物，在平面上的主要延伸方向與中心位置，但在橫向尺度上仍會受到回波稀疏性、視場限制影響。

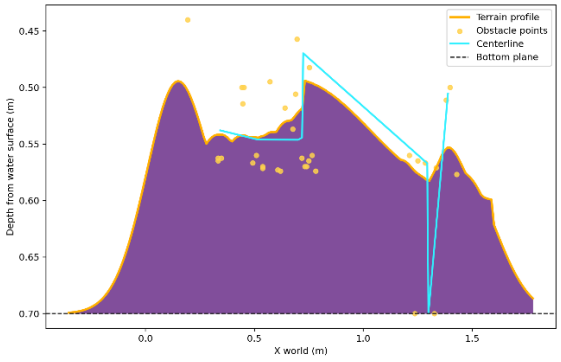


圖 27：局部三維地形 x 方向視角

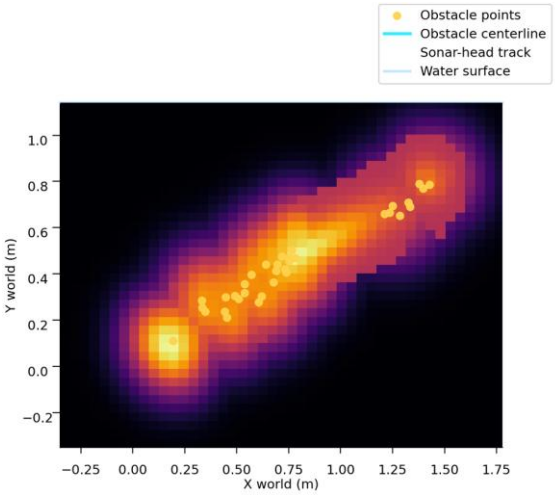


圖 28：高程圖結果



圖 29：實際沉體外觀照片



圖 30：實際沉體外觀照片

表 3：三維建圖結果表

項目	實際尺寸	重建結果	誤差大小
高度	0.27m	0.2m	-0.07m
長度	1.6m 至 1.8m	約 1.5m	約-0.1m 至-0.3m
寬度	0.5m	約 0.8m	0.3m

四、結論

雖然前向掃描聲納具有視場有限、量測稀疏、易受噪聲等限制，但經由適當的資料處理，與多時刻量測累積方法，仍可建立具空間結構意義之局部地圖，若目標為近場局部感知、局部地形描述、後續幾何匹配，而非大範圍高精度測繪，前向掃描聲納作為主要感測器是可行的。三維表示方面，本研

究結果顯示，由單波束前向掃描聲納建立之局部三維點雲，與 2.5D 高程圖是可成立的，雖然結果仍不具備高密度地形測繪的完整性，但已能表現局部障礙物輪廓和相對高低差，說明單波束前向掃描聲納經由適當的方法處理後，確實可由原始二維量測，建立具三維幾何意義之局部地形表示。但本研究之建圖結果，仍受到載具位姿估測誤差影響，聲納量測點之座標轉換與地圖累積，皆依賴載具於量測期間之位置與姿態資訊，因此未來可進一步強化 DVL、IMU 與其他感測器之融合估測方法，以降低 dead reckoning 的累積誤差，提升局部地圖之幾何一致性與空間對位精度。再來，掃描穩定度亦為影響建圖品質之重要因素，若載具於量測過程中出現偏航、俯仰、高度變化過大，會使量測方向與投影位置產生不一致，影響地圖累積結果，因此未來除了改善位姿估測外，應進一步提升載具量測期間之姿態穩定性與掃描一致性，以獲得更平滑且更具可重複性之地形表示結果。

本研究證明以單波束前向掃描聲納，配合本研究所提出之方法，可建立局部二維、三維地形，未來若能整合自主導航，可望作為小型 AUV 於複雜水下環境中，執行感知與定位任務之參考方法。

謝誌

本研究能夠順利完成，首先要感謝指導教授王舜民老師，在研究期間耐心的指導，與許多寶貴的建議，從研究方向、實驗規劃、系統架構到論文撰寫，老師不吝提供協助與指導，使本研究能夠逐步完善，研究過程中，難免遇到許多問題，老師總能適時給予引導與討論，幫助我重新釐清問題核心，並持續修正研究方法，讓研究內容更加完整。同時，感謝實驗室的兩位學長，在研究過程中給予我許多建議與陪伴，無論是在系統建置、硬體設備整合、水槽實驗準備，或是問題排除與討論，學長們皆給予我相當大的幫助，讓我能夠更順利地完成各項研究工作。也感謝實驗室同學一路上的陪伴與協助，在研究期間能夠彼此討論、互相鼓勵，讓我在面對困難時能夠持續前進。除此之外，也感謝實驗室的學弟們願意花時間協助我進行實驗，無論是載具搬運、設備架設、現場測試，都讓本研究的實驗過程能夠更加順利。

最後，感謝我的家人與朋友在研究期間給予的包容與鼓勵，研究過程中難免會遇到，許多挫折與壓力，因為有你們的陪伴與理解，使我能夠保持信心，持續努力完成本研究，向所有曾經協助、支持、鼓勵，我的師長、學長、同學、學弟、朋友、家人，致上最誠摯的感謝。

參考文獻

[1] G. Fan, Y. Zhang, Z. Yuan, F. Wang, Y. Li, X. Zhang, and J. Li, “Survey of Terrain-Aided Navigation Methods for Underwater Vehicles,” IEEE Access, vol. 11, pp. 49211–49228,2023,doi:10.1109/ACCESS.2023.3275078.

[2] J. Li, M. Kaess, R. Eustice, and M. Johnson-Roberson, “Pose-Graph SLAM Using Forward-Looking Sonar,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 3, pp. 2330–2337,Jul.2018,doi: 10.1109/LRA.2018.2809510.

[3] J. Wang, T. Shan, and B. Englot, “Underwater Terrain Reconstruction from Forward-Looking Sonar Imagery,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, 2019, pp. 3471–3477, doi: 10.1109/ICRA.2019.8794473.

[4] M. D. Aykin and S. Negahdaripour, “Three-Dimensional Target Reconstruction From Multiple 2-D Forward-Scan Sonar Views by Space Carving,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 42, no. 3, pp. 574–589, Jul. 2017, doi: 10.1109/JOE.2016.2591738.

[5] A. Cardaillac and M. Ludvigsen, “Camera-Sonar Combination for Improved Underwater Localization and Mapping,” IEEE Access, vol. 11, pp. 123070–123079,2023,doi: 10.1109/ACCESS.2023.3329834.

[6] M. Franchi, A. Bucci, L. Zacchini, E. Topini, A. Ridolfi, and B. Allotta, “A Probabilistic 3D Map Representation for Forward-Looking SONAR Reconstructions,” in 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. John’s, Canada,2020,doi: 10.1109/AUV50043.2020.9267934.

[7] N. Palomeras, N. Hurtós, M. Carreras, and P. Ridao, “Autonomous Mapping of Underwater 3-D Structures: From View Planning To Execution,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 3, pp. 1965–1971,Jul.2018,doi:10.1109/LRA.2018.2808364.

[8] N. Jaber, B. Wehbe, L. Christensen, and F. Kirchner, “MV3D: Multi-View 3D Reconstruction of Objects Using Forward-Looking Sonar,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 10, no. 9, pp. 8762–8769,2025,doi: 10.1109/LRA.2025.3588062.

水下履帶車系統設計與研製

張家溥[1]　陳柏棋[2]　宋雨霖[3]

摘要

本研究針對工業水池之清洗與維護需求，開發一套水下履帶式載具，針對沉積物清除作業。水池底部長期運作後易積累沉積物與碎屑，若未定期清理，將降低系統效率並危及安全。傳統人工潛水清淤風險高；懸浮式水下無人載具（ROV）在搭載重型清淤工具時，穩定性不足且定位困難，難以產生足夠的下壓力進行有效的貼地清洗。

為解決上述問題，本研究開發之水下履帶車以載具自重與履帶底盤建立與池底的穩固接觸，取代傳統 ROV 的推進器設計，從而提供重型清淤工具所需的穩定反作用力，並防止推進器水流揚起底層沉積物。系統採用岸基供電（110－220V AC），透過 70 公尺長的電力訊號複合電纜進行遠端操控。載具核心配備三組自主研發的水下馬達；兩組負責左右履帶驅動，一組驅動前端旋轉刷頭。為因應狹窄通道的機身寬度限制並確保越障動力，履帶驅動模組採縱向配置，並整合傘齒輪傳動機構進行轉向與扭矩放大。馬達密封方面，本研究提出「微型油艙」簡化密封設計，僅於軸封區域建立微型補償油室，成功通過等效 100 公尺水深之壓力測試，大幅提升結構可靠度並降低維護成本。

清淤機構方面，前端旋轉刷頭可由線性致動器驅動向上抬升 5 公分，使其具備跨越池底障礙物的能力，並透過後端吸水管將揚起的沉積物輸送至岸基過濾系統。觀測系統配備兩組自主研發之 AHD 類比高畫質水下攝影機，分別安裝於前端電動雲台及後端固定座，提供低延遲的即時影像監控。本系統已於水下環境完成機電整合與動態測試，並驗證越障機構之實用性。

關鍵詞：水下馬達、水下履帶車、水下無人遙控載具

Design and Development of an Underwater Crawler System

Jia-Pu Jang[1]　Po-Chi Chen[2]　Yu-Lin Sung[3]

ABSTRACT

This study presents an underwater crawler platform for cleaning industrial water pools. Conventional hovering ROVs lack the stability required for heavy-duty floor cleaning. To address this, the proposed crawler utilizes its weight and tracked chassis to maintain firm ground contact, providing stable reaction forces without resuspending sediments. The vehicle is remotely controlled via a 70m hybrid cable. Its core propulsion features three in-house-developed underwater motors. To navigate narrow passages while maintaining high torque, the track motors are mounted longitudinally, with a bevel-gear transmission. Furthermore, a simplified "localized pressure compensation" sealing structure is proposed, which successfully passed a 100-meter depth pressure test, thereby enhancing reliability. For the cleaning mechanism, the front rotating brush can be lifted 5 cm by a linear actuator to traverse obstacles. Equipped with in-house Analog High-Definition (AHD) cameras for low-latency monitoring, the complete mechatronic system was successfully validated through underwater dynamic tests.

Keywords: Underwater motor, Underwater Crawler, Remotely Operated Vehicles

[1] 國家實驗研究院台灣海科技研究中心 正工程師
[2] 國家實驗研究院台灣海科技研究中心 正工程師
[3] 國家實驗研究院台灣海科技研究中心 助理工程師

一、緒論

工業水池、水庫及大型冷卻系統的安全穩定運作，高度依賴其水下環境的妥善維護。設備長期運轉後，池底容易堆積大量沉積物、淤泥與碎屑。若未定期清理，這些沉積物將降低系統的熱交換效率並引發關鍵結構腐蝕[1]。因此，定期且有效的水下清淤作業，對維持設施安全性與正常運作至關重要。

傳統上多仰賴人工潛水進行維護，但此方式風險極高。近年來，業界已廣泛採用水下無人遙控載具（Remotely Operated Vehicle, ROV）來替代人力，然而，常規 ROV 在應用於池底沉積物清理時面臨著顯著的技術瓶頸。由於 ROV 通常維持中性浮力並懸浮於水中，需仰賴推進器（Thrusters）來維持動態定位；這些推進器在接近池底時所產生的水流，極易揚起底層的細小沉積物，導致水下能見度迅速惡化[2]。此外，懸浮狀態的 ROV 缺乏與地面的剛性接觸，難以產生並維持機械刷洗淤泥所需之穩定反作用力。

為克服上述限制，重型水下履帶車（Benthic Crawlers）的概念在離岸工程（如船體清潔與海床探勘）中已被證實為有效的解決方案[3-5]。然而，這類工業級載具通常體積龐大、採用笨重的液壓推進系統且造價高昂，不適合應用於空間受限且需要載具靈活性的一般工業水池環境。為此，本研究基於履帶載具的穩定移動原理，開發了一套專為池底清淤設計的緊湊型、高模組化機電水下履帶作業平台。

不同於懸浮式 ROV，本載具利用自身重量與履帶底盤建立與池底的穩固接觸。此構型不僅能為重型清淤工具提供足夠的下壓力與循跡性，更徹底避免了推進器水流擾動沉積物的問題。此外，藉由將運動限制於二維平面，本系統大幅降低了遠端操作的技術門檻，減少對專業 ROV 駕駛員的依賴。

本載具採模組化機電架構，並連線至岸基過濾系統。針對狹窄機身與越障動力需求，開發縱向配置與傘齒輪傳動之緊湊型驅動模組；提出「微型油艙」密封結構，簡化馬達設計並通過 100 公尺水深驗證；最後，設計具備 50 mm 垂直越障能力之升降刷洗機構。本文後續將依序探討上述核心組件之機械機電設計，並呈現高壓密封與水下系統運作之實驗驗證結果。

二、機電系統設計

本章節將說明所開發水下履帶作業平台之整體機械結構與機電整合。首先概述載具之基本實體規格與模組化設計理念；接著深入探討標準化水下馬達模組之開發，以及針對清淤作業所配置之履帶底盤架構；最後，說明為確保系統於複雜水下環境中皆能穩定運作，所採用之電子通訊架構與控制策略。

2.1 載具概述

本研究開發之水下履帶作業平台尺寸為長 660 mm ×寬 300 mm ×高 350 mm，如圖 1 所示。考量工業水池底部狹窄通道的限制，機身寬度嚴格控制在 300 mm 以內。載具空氣中總重約 38 kg，水中重約 25 kg。底盤配備高摩擦係數橡膠履帶，以對抗清淤刷洗時的反作用力，確保載具在光滑池底仍能維持足夠的牽引力與循跡性。載具主框架採用 SUS316 不鏽鋼製作，兼顧耐腐蝕性與抗碰撞的結構強度；攝影機、履帶驅動馬達及清淤刷頭馬達等自主研發之水密耐壓殼體，則以 SUS304 不鏽鋼加工製成。載具採模組化設計理念，所有關鍵儀器與致動器均設計為可快速拆換的模組，大幅提升現場作業的維護與零件替換效率。

視覺導航與作業監控方面，載具配備兩組水下攝影機及兩具高流明水下 LED 照明燈。前方攝影機搭載於雙軸雲台（Pan-Tilt, PT）上，提供廣角導航視野；後方攝影機安裝於手動可調式支架上，用於監控臍帶纜線走向與後方環境。清淤模組整合於底盤下方，吸嘴固定於主車架並位於旋轉刷頭正後方，刷頭刷起的沉積物可順勢導引至吸嘴，再經管路抽送至岸基過濾系統，有效集中碎屑並將二次揚塵降至最低。

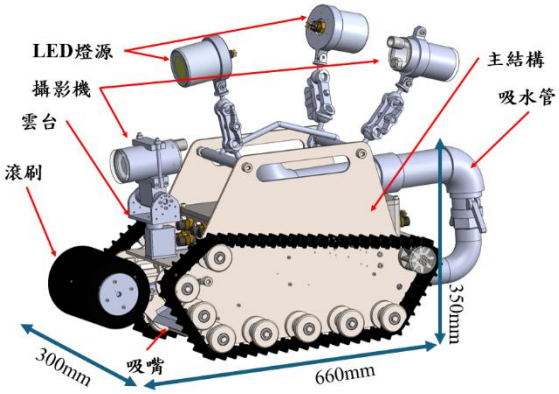


圖 1：水下履帶作業平台主要尺寸示意圖

履帶驅動與刷頭旋轉皆採用自主研發的標準化馬達模組，模組整合無刷直流馬達（BLDC）與行星齒輪箱，以提供充沛的牽引力與刷洗扭矩。考量實際作業水深約 30 公尺，馬達水密殼體依 100 公尺水深的耐壓標準設計，並經電腦輔助工程軟體結構分析，驗證其在等效 100 公尺靜水壓力下安全係數仍大於 1.0，確保系統結構可靠度。

2.2 載具概述

為確保系統可靠度並簡化後續維護，本研究開發了一款標準化水下馬達模組，作為履帶驅動與清淤刷頭的通用致動器。為降低開發成本與複雜度，以商用現成構件（COTS）為原則。本載具的驅動扭矩需求以「垂直越障能力」為評估指標：假設載具總重（含酬載）為 45 kg，為跨越池底 50 mm 垂直障礙物，初步選用的商用無刷馬達（標稱連續扭

矩 3.0 N·m）雖能滿足理論下限，但安全餘裕（Safety margin）極小。考量水下環境的不確定性與傳動系統的機械損耗，本設計在馬達模組與驅動輪之間加入 2:1 減速傳動機構，將單側輸出扭矩倍增至 6.0 N·m（安全係數大於 2），確保越障的絕對可靠性。由於所選商用馬達本身不具防水能力，研究中為其量身開發了 SUS316 不鏽鋼水密殼體，採矩形單側開口設計，便於馬達安裝與底盤結構整合。密封槽加工於矩形端面以容納 O 型環；為避免使用昂貴的客製化密封件，本研究採用「以溝槽周長除以 π 換算等效直徑」的方式匹配標準 O 型環規格，確保備品取得便利；溝槽轉角採大圓角設計，防止 O 型環擠壓破損（如圖 2 所示）。



圖 2：水密馬達模組內部視角，顯示無刷直流馬達配置以及具備大圓角設計之端面密封槽，以防止水密失效、O 型環受損。

本模組的核心創新在於「微型油艙」簡化密封結構。傳統水下馬達多採全油填壓補償設計（Oil-filled housing），此設計對高速旋轉的轉子會產生顯著的黏滯阻力（Viscous drag）。有別於此，本研究僅在馬達軸心穿過 15 mm 厚殼體的局部區域進行密封：外部油封（Oil seal）與內部 O 型環之間形成一個密封的「微型補償油室（Micro oil chamber）」（如圖 3 所示）。當殼體承受外部靜水壓力（設計目標 10 bar）時，壓力透過油封傳遞至油室，使潤滑油加壓並緊密作用於 O 型環與軸心的接觸面，有效阻絕外部水分滲入，同時持續潤滑 O 型環，降低磨耗並提升容許轉速。此設計的驗證結果將於第三章詳述。

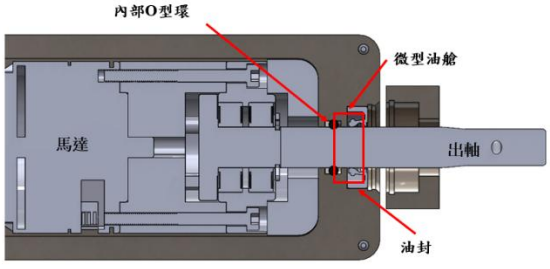


圖 3：局部油壓補償密封結構之剖面示意圖。

2.3 底盤配置與清淤機構設計

本節詳述標準化馬達模組與底盤的機電整合，以實現載具的運動控制與清淤作業。為使載具能在工業水池的狹窄通道內靈活穿梭，底盤寬度嚴格限制在 300 mm 以內。

為符合此嚴苛的尺寸限制，驅動左右履帶的兩組馬達模組捨棄傳統橫向佈局，改採「縱向配置」內置於底盤，大幅縮減機身寬度。然而，縱向馬達的輸出軸與橫向驅動輪相互垂直，且須進一步提升越障扭矩；為此，本設計在馬達與驅動輪之間整合一組 2:1 傘齒輪減速傳動機構（如圖 4 所示）。此機構同時肩負兩項工程任務：將馬達輸出動力轉向 90 度以驅動履帶，並將連續扭矩放大兩倍，為系統提供充裕的動力餘裕，確保載具能穩定跨越池底障礙物。

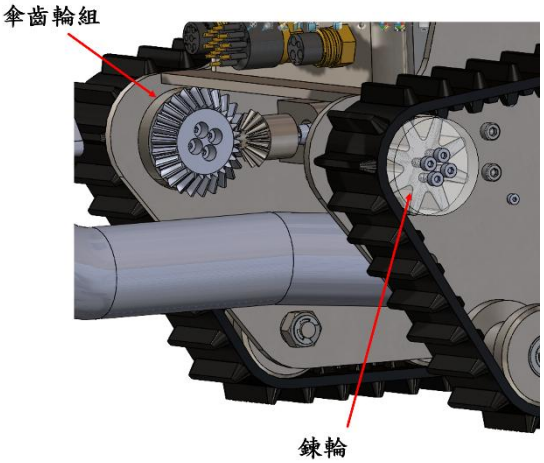


圖 4：驅動傳動機構細部圖。透過傘齒輪組將馬達輸出扭矩轉向 90 度以驅動履帶輪。

清淤作業方面，載具底盤前方配置滾筒刷洗模組，採用第三組標準化水下馬達驅動，以維持全機零件的後勤共通性。清淤吸嘴固定於主框架並位於刷頭正後方，利用沉積物被刷起時的動量，順勢導引碎屑進入管路，最終輸送至岸上過濾系統。為提升載具越障能力並保護清淤機構，該模組導入可伸縮的升降設計，由一組經改裝的商用線性致動器（Linear actuator）負責驅動。

考量市售致動器的原廠齒輪強度不足以長期承受清淤模組的重量，本研究對其傳動機構進行結構強化以提升負載能力。刷洗模組可向下伸展進行貼地清刷；遭遇 50 mm 垂直障礙物，或於水面進行佈放回收時，則可向上收折，有效防止機構碰撞受損，並大幅增加載具的接近角（Approach angle），顯著提升其地形適應能力。

2.4 系統架構與控制

岸基控制單元（Surface Control Unit, SCU）透過電力訊號複合電纜與載具連接。為在單一纜線中同時承載數位通訊與類比影像傳輸，本設計充分利用標準乙太網路線的四組雙絞線：兩組用於控制指令的乙太網路連線，另外兩組分別傳輸兩路 AHD（Analog High Definition）類比高畫質影像訊號。水密電子艙內部採分散式訊號處理架構，乙太網路封包透過轉換器轉譯為 RS-232 序列訊號後，傳遞至六通道 PWM 控制板，解析指令並驅動五顆馬達：

兩組履帶驅動馬達、一組滾筒刷洗馬達，以及前方雙軸雲台（PT）的兩組水下伺服馬達。系統電源以 110V AC 透過 70 公尺複合纜線直接送至主耐壓殼體，殼體內部採「雙電壓（Dual-voltage rail）」架構：24V 驅動軌專供兩組履帶馬達，確保行進時電流穩定；12V 輔助軌供電給刷洗升降致動器、攝影機、雲台伺服馬達及滾筒刷洗馬達。刷洗馬達雖與履帶馬達同型號，配置於 12V 電壓軌上既可善用驅動器的寬電壓輸入特性，又符合刷洗作業較低的扭矩需求，同時有效分擔 24V 主電源的負載，達成負載平衡（Load balancing）。操作控制方面，系統利用工業水池良好的水質清澈度，採「視覺導航（Visual Navigation）」策略省略複雜的水下定位感測器，並全面採用 AHD 攝影機取代 IP 攝影機以降低影像延遲。前方攝影機搭載於雲台上，協助操作員判斷方位與確認作業狀況；岸基控制軟體以 Python 自主開發，透過影像擷取卡接收 HDMI 轉換後的影像訊號，並將系統狀態數據直接疊加於即時畫面。此架構使操作員得以透過低延遲的視覺回饋驗證載具動作，即使底層硬體採開迴路控制，仍能在操作層面形成高可靠度的「視覺閉迴路監控（Visual Closed-loop Monitoring）」機制。

三、實驗與驗證結果

本章針對第二章所述的機械架構與機電整合系統進行實體測試與驗證，評估三大核心性能指標：（一）自主研發水下馬達模組在高靜水壓環境下的水密與耐壓性能；（二）載具整體的水下運動性能與機構越障能力；（三）實際水下場域中的沉積物清除作業成效。

3.1 系統架構與控制

為驗證所提「局部油壓補償」密封結構的有效性，本研究對加工完成的水密馬達殼體進行嚴格壓力測試。測試採用壓克力圓筒製成的透明高壓艙，可在加壓期間全程目視監控馬達狀態；電源與控制訊號則透過頂部法蘭的水密接頭傳遞（如圖 5 所示）。

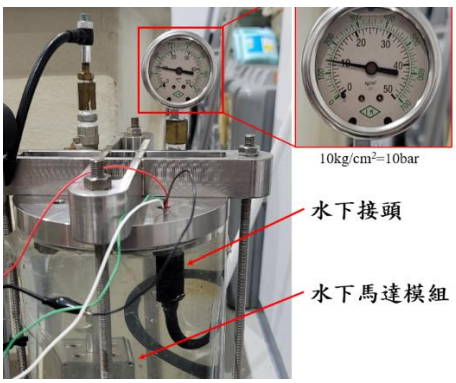


圖 5：利用客製化透明高壓艙進行馬達密封驗證之實驗配置。

為確保設備長時間運作的可靠性，整體驗證流程分為三個獨立測試階段，各持續 8 小時：第一階段「靜態水壓測試」，評估結構的被動防漏能力；第二階段「連續單向運轉測試」；第三階段為最嚴苛的「連續正反轉切換測試」，頻繁交替正逆向旋轉，以真實模擬清淤滾筒刷的動態作業條件，以及載具在池底頻繁換向的需求。

每一測試階段完成後均開啟殼體進行內部檢視。如圖 6 所示，歷經(a)靜態、(b)單向運轉及(c)正反轉切換三項高壓測試後，殼體內部皆保持絕對乾燥，無任何水氣入侵或潤滑油乳化（Lubricant emulsification）的跡象，具體驗證了「微型補償油室」在各種嚴苛操作模式下的優異動態密封性能。

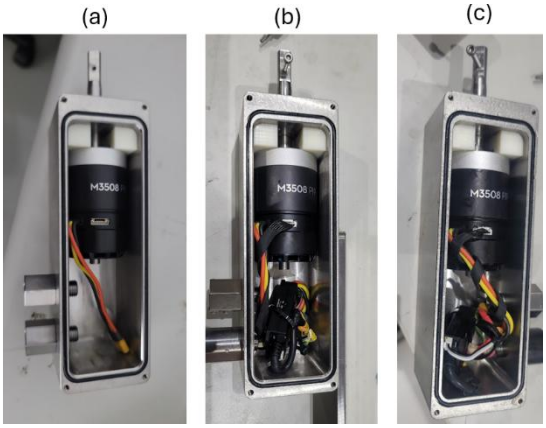


圖 6：歷經 8 小時高壓測試後之馬達殼體內部檢視：(a)靜態水壓測試，(b)連續單向運轉測試，以及(c)連續正反轉切換測試。

3.2 水下運動性能與機構驗證

為驗證系統整體動態性能，本研究於水深 7 公尺的潛水訓練池進行全尺寸水下實測，此環境與實際作業條件高度相似。值得注意的是，該訓練池底部為陶瓷磁磚材質，表面摩擦係數低於一般工業水池常見的金屬內襯，對載具的履帶牽引力構成更嚴苛的極限測試條件。

首先進行清淤機構的功能驗證。如圖 7 所示，載具具備雙重操作模式：(a)「清淤模式」，線性致動器向下伸展，使刷頭貼地進行刷洗；(b)「越障模式」，透過致動器將刷頭向上收折，大幅增加底盤的離地間隙與接近角。

隨後進行實體越障測試，以驗證驅動扭矩設計與底盤穩定性。載具需跨越符合原始設計規格的 50 mm 垂直障礙物。「正面越障測試」中（如圖 8 所示），載具成功抬起前端履帶並平順攀越，全程無馬達停轉（Stalling）現象，充分驗證 2:1 減速機構的扭矩放大效果。「斜向越障測試」中（如圖 9 所示），儘管側翻（Rollover）風險大幅提升，載具仍保持優異的姿態穩定性並順利越

障。上述測試結果證實，本載具底盤構型提供了充足的牽引力與良好的重心穩定度，即使在低摩擦係數環境下，亦能穩定克服複雜的水下地形。

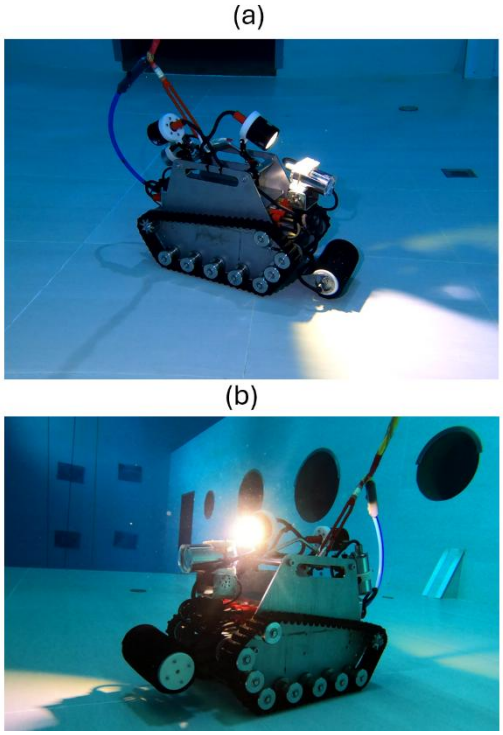


圖 7：機構操作模式之水下驗證：(a) 清淤模式（刷頭降下）與 (b) 越障模式（刷頭收折）。

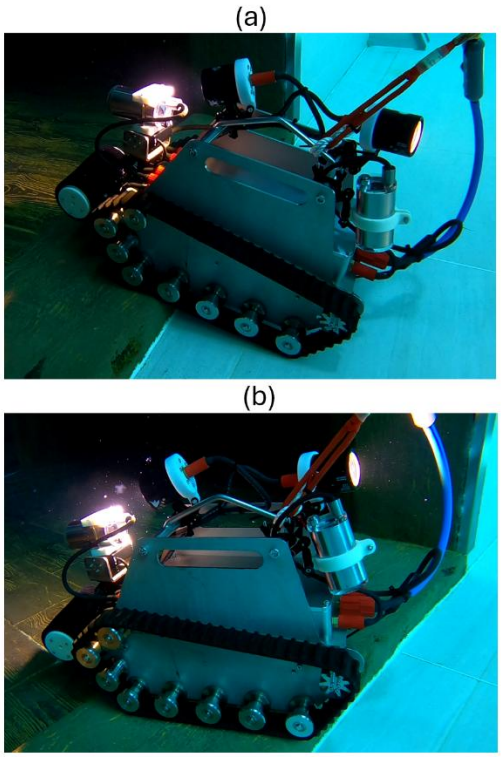


圖 8：跨越 50 mm 垂直障礙物之正面越障測試連續動作：(a) 初始攀爬與 (b) 成功跨越。

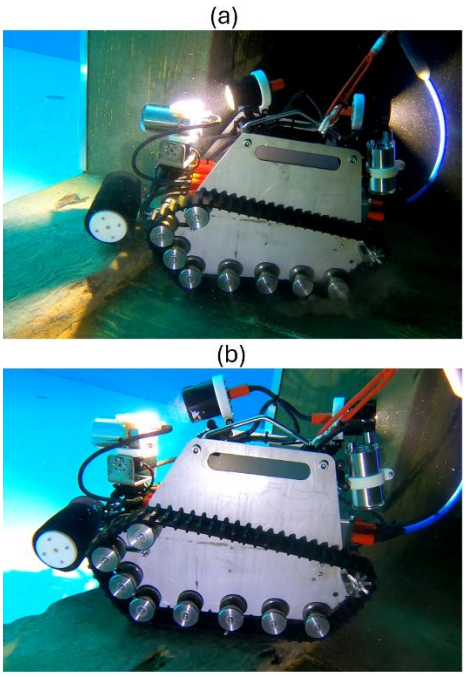


圖 9：驗證側向穩定性之斜向越障測試連續動作：(a) 接近障礙物與 (b) 成功跨越。

四、 結論與未來展望

本文詳述了一款專為工業水池與大型冷卻系統清淤所設計之緊湊型水下履帶作業平台的開發與驗證成果。為克服水池底部狹窄通道（機身寬度 300 mm 限制）的嚴苛作業條件，本研究建構了一套具備標準化推進系統且高度模組化的機電載具。

本研究的關鍵技術貢獻在於「標準化水下馬達模組」的創新設計。透過導入具備「微型油艙」的簡化高壓密封結構，本設計大幅降低了傳統全油填壓式補償器對轉子產生的黏滯阻力，同時確保等效 100 公尺水深的高可靠度防水性能。實驗結果證實，此密封機制在 10 bar 靜水壓下，無論靜態、連續單向或頻繁正反轉切換的操作條件，均維持優異的防護效能。水下動態驗證亦確認本載具具備良好的穩定性，能有效克服低摩擦係數地形並清除沉積物，且作業過程中未引發顯著的二次揚塵，充分展現其工程實用性。

本系統目前主要透過低延遲 AHD 攝影機的視覺回饋進行遠端遙控。未來研究將著重整合視覺伺服（Visual Servoing）演算法與水下深度感測技術，賦予載具半自主導航能力，以進一步降低操作員的認知負荷，並提升載具在高濁度或能見度不佳水域中的清淤效率與作業自主性。

謝誌

感謝國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心提供必要的研究資源與設施，使本系統得以開發。亦感謝本計畫執行中的產業夥伴提供經費、技術支援與協調，使本研究設備順利上線運行。

參考文獻

[1] J. Berce, M. Zupančič, M. Može, and I. Golobič, “A review of crystallization fouling in heat exchangers,” *Processes,* vol. 9, no. 8, Art. no. 1356, Aug. 2021.

[2] G. Wang et al., “A maneuverable underwater vehicle for near-seabed observation,” *Communications Engineering,* vol. 3, Art. no. 163, Nov. 2024.

[3] C. Song and W. Cui, “Review of underwater ship hull cleaning technologies,” *Journal of Marine Science and Application*, vol. 19, no. 3, pp. 415–429, Oct. 2020.

[4] F. Wenzhoefer, J. Lemburg, M. Hofbauer, S. Lehmenhecker, and P. Faerber, “TRAMPER: An autonomous crawler for long-term benthic oxygen flux studies in remote deep sea ecosystems,” in *Proc. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, CA, USA, Sep. 2016, pp. 1–6.

[5] J. Lemburg, F. Wenzhöfer, M. Hofbauer, P. Färber, and V. Meyer, “Benthic crawler NOMAD – Increasing payload by low-density design,” in *Proc. 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*, Kobe, Japan, May 2018, pp. 279–285.

[6] DJI, *RoboMaster M3508 P19 Brushless DC Gear Motor User Manual,* ver. 1.0, Shenzhen, China: DJI Technology Co., Ltd., 2018.

水下無人載具與海洋科技之應用

陳建璋[1] 徐慶瑜[2] 陳雅惠[3] 苗志銘[4] 邱永盛[5]

摘要

傳統獵雷作業方式大多依賴艦艇、人員進入高風險的環境進行排除，不僅作業風險高，人工排除效率也極低。相較之下，水下無人載具可長時間潛航、具有高度靈活性等優點，最重要的是能在無人員危害風險的狀態下執行任務，因此本研究目標發展水下獵雷技術使用的水下無人載具，建構一套可應用於水雷搜尋、辨識、定位等功能的水下無人載具。水下無人載具首先必須擁有自主導控能力，能依照預先規劃的任務路徑進行海域巡航，並在航行過程中配合感測器及水下定位技術修正航行姿態。本研究包含無人水下載具之系統整合與結構設計，並針對其水動力特性進行分析，同時建立運動軌跡模擬機制，來評估水下無人載具在不同操作下的運動行為。在此架構下進一步整合水下通訊與定位技術，並結合水面儲能系統與無人載具導引控制系統，完成整體系統建構與開發。

關鍵詞：自主導控、水下無線充電、載具結構設計、水動力分析、水下定位技術

一、緒論

為了提升水下無人載具的性能和可靠性，發展水下機動型無人化反封鎖作戰之運用，本研究旨在藉由設計整合水下無人載具與水上儲能系統，實現水下無人獵雷載具的高效開發與運用。在本研究中，首先評估了在有限資源條件下達成任務目標的可行性，據此收斂研究方向，並將研究階段明確界定為：「發展一個可靠且可控制的小型自主式水下無人載具（AUV）」。此任務目標的設定，既能兼顧現實條件與技術可行性，又能作為後續研究方法設計與實驗驗證的核心依據。本研究依據任務目標，將無人載具定義為能自主調整姿態並穩定航行之系統。其設計需求包括：具低阻力且長度不超過四百公分的本體、可耐一百公尺水深的壓力艙、能完成上浮下潛與方向控制的導航系統，以及具備至少兩小時的續航能力。為了實現上述功能，本研究整合四項研究項目，分別為水下無人載具系統工程整合與結構設計、水下載具水動力特性分析與運動軌跡模擬器開發、水下通訊與定位技術開發、水下無線充電系統及水下無人載具導控系統設計與開發。

綜觀國內外對於水下無人載具四項研究項目的發展，針對水下無人載具系統工程整合及結構設計，水下無人載具於深海探索、科學研究及軍事國防等領域發展迅速，其任務複雜度與系統整合需求隨之提升，促使工程設計導入系統化方法以有效因應。系統工程作為跨領域之整合方法，針對複雜系統之設計、開發與生命週期管理提供完整架構。其中 V 型模型特別強調設計與驗證之對應關係，能有效建立由元件、子系統至整體系統之需求追溯機制，並確保系統於各階段均經過驗證，以提升設計之可靠性與一致性[1][2]。亦結合船舶工作分解結構（Ship Work Breakdown Structure, SWBS）[3]，將複雜系統依功能與設備進行層級化分類，建立設計、分析與測試之對應關係，進而提升系統整合效率與工程管理能力。

針對水下載具水動力特性分析與運動軌跡模擬器開發，近二十年來，公開資料中已經可見有許多利用 CFD 技術處理 AUV 水動力特性之研究成果。研究的第一階段主要探討拘束模型實驗中的直線航行測試(SLT)、平面機構測試(PMM)與旋轉臂測試(RAT)所可以取得的水動力導(係)數。研究者求解的流場統御方程式為 RANS 方程並進行網格獨立性測試與紊流模式選用[4]-[9]。第二階段則是進一步求解 URAN 方程並導入動態網格技術以處理附加質量項與尾舵舵角效應[10]。第三階段則是進一步在 CFD 數值模擬時同時處理 AUV 動態運動之六自由度問題[11]-[13]。對於 CFD 分析工作而言，AUV 具備尾部螺旋槳自推的組合模型所具

[1] 國立中山大學電機工程學系 副教授
[2] 中華民國海軍軍官學校船舶機械系 教授
[3] 中華民國海軍軍官學校船舶機械系 助理教授
[4] 國立屏東科技大學生物機電工程系 教授
[5] 國立中山大學海下科技研究所 特聘教授兼所長

備的水動力導數預測工作更為困難。挑戰點在與如何處理螺旋槳相對自轉的流場特性，文獻中也有一些資料可以參考[14][15]。本研究利用 CFD 技術處理 AUV 水動力特性的船舵槳相互耦合的安全性與操縱性運動所對應的流場直接數值模擬，除計算出的一階與二階附加質量慣性項與阻尼項水動力係數可以提供給 PID 等控制器建物系統增益 進行可控制分析與求取運動控制器誤差修正之最佳係數外，也進行水平面的迴轉運動模式、Zig-Zag 操舵運動模式以及垂直面的 Zig-Zag 變深潛之操控運動模式，然後輸出 AUV 在個別時刻的姿態角、線性(加)速度、角(加)速度以及空間位置的預報提供一個新的研究方向。

在水下通訊與定位技術開發，為使無人載具能成功發送訊息與接收命令並分析出準確的目的地座標，有賴於水下通訊與定位功能之運作[16]，水下通訊即為水下資訊/命令傳遞，而定位則與水下載具之任務執行準確度息息相關。由於欲在海水中進行中長距之通訊與定位均須使用聲波作為媒介，因此兩項功能正常運作的前提為必須確保模組所接收到的訊號與發送的原始訊號無誤，然而海下環境複雜多變(溫壓分佈、海流、海床底質等)，複雜且快速變動的海洋環境使得穩定快速的訊號傳遞變成一項具挑戰性的工作[17][18]。本研究將綜合 OFDM 調變/解調與 TDOA 定位法，作為兩個系統內置的演算法，並將兩系統整合完成水下通訊與定位技術的開發，並通過測試實驗的方式進行系統穩定性與正確性的檢驗，最終產出一可供水下無人載具所使用之通訊與定位模組。

最後在水下無線充電系統及水下無人載具導控系統設計與開發，綜觀 AUV 的充電方式，主要由更換電池、環境能充電、接觸型充電和無線充電四種。本計畫調查了近年來這四種電力補充方式的相關研究，並進行以下文獻探討。對於更換電池的 AUV，市面上知名的產品是 Bluefin Robotics 所開發的 Bluefin-21。這款 AUV 可以使用可替換的 1.5 kWh 海底電池進行快速電力補充[19][20]。然而，更換電池需要人員的介入處置。在更換電池的過程中，AUV 必須停止正在進行的任務，上浮到水面以供人員更換電池。更換完畢後，AUV 還需再次下潛至任務區域開始任務。這種冗餘的上浮和下潛除增加電池的非必要電力損耗外，還增加額外的時間消耗，因此不利於本計畫的 MCM 任務。環境能充電是利用環境提供的能量進行充電，例如太陽能充電[21]和波浪動力充電[22]。這種方法雖然減少更換電池的時間，但充電效率取決於外部環境因素。例如，雲層遮蔽太陽光或波浪動力不足時，無法提供穩定的電力來源，或是 AUV 在水下執行 MCM 任務時，通常是位於水下 50 m 或更深的水下環境中，在這種深度下，太陽能的環境充電法對 MCM 任務而言是不切實的充電方法。雖然環境能充電看似能為 AUV 提供無限續航力，但在特定環境條件下才能有效運作，因此在實際應用中並不可靠。本研究開發一水上儲能平台，可以透過將 AUV 停靠在儲能充電站在海上為 AUV 的電池充電來延長其任務持續時間，並為 AUV 在任務之間提供一個安全的停靠平台。同時水上儲能平台亦搭載通訊及推進功能，作為傳遞訊息或是水上儲能平台短距移動使用。

二、研究方法

2.1 水下無人載具系統工程整合與結構設計

本計畫之水下無人載具系統設計以任務需求為核心，採用整體化系統工程方法進行規劃，並結合 V 型開發模型（V-Model）(如圖 1)作為設計與驗證之主要架構。

2.1.1 系統工程

於 V 型模型之驗證階段，則著重於系統整合與測試流程，透過模組、子系統及整體系統之逐步整合驗證，確認各組件於實際運作條件下之相容性與可靠性。相關分析內容包含輔助系統配置、重量與重心估算。最終透過測試驗證各項性能指標符合原始設計需求，並藉由標準化與模組化設計理念，提升系統整合效率與開發可靠度。

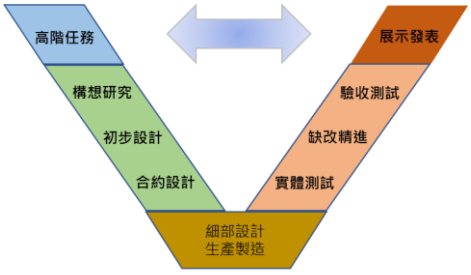


圖 1、系統分析 V 型開發模型[1][2]

2.1.2 壓力殼水下耐壓分析

圓筒殼在外部壓力作用下，當負荷超過臨界值時，將產生側向變形並失去穩定性，此即挫曲現象。對於理想無缺陷之薄殼結構，其彈性挫曲壓力可由理論公式表示，其大小與殼厚與半徑比例密切相關。

然而，此類理論假設結構完全理想，未考慮製造誤差與初始缺陷，因此實際挫曲壓力通常低於理論值。

$$\rho_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-v^2)}}\left(\frac{t}{R}\right)^2 \qquad (1)$$

其中，ρ_{cr}：理論臨界外壓(Pa)，E：楊氏係數(Pa)，v：蒲松比，t：殼厚(m)，R：中徑(m)。

透過壓力殼強度與挫曲分析可求得殼厚與重量，並評估其於外部靜水壓下之安全性；此外，加強肋與支撐結構雖可提升抗挫曲能力，但亦可能限制內部空間（如圖 2、圖 3）。

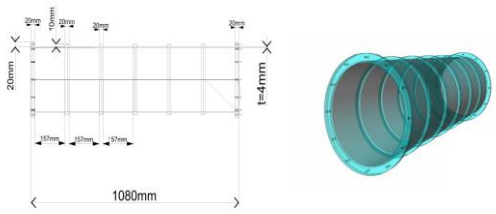


圖 2、壓力艙設計(範例)



圖 3、壓力艙實體(範例)

本試驗於海軍官校水壓實驗室之耐壓艙中，透過逐步施加外部靜水壓進行 FAT 測試驗證（如圖 4、圖 5），並同步記錄試驗數據（如表 1）。藉由模擬實際水下受壓環境，觀察圓筒殼之力學行為，以驗證其耐壓能力與水密性能，並作為水下載具結構設計之重要依據。

本研究採用水壓試驗方法驗證壓力殼強度與密封性能，透過液體加壓評估結構完整性與洩漏情形，作為設計驗證依據。結合線性與非線性挫曲分析，提高臨界壓力預測準確性，並考量幾何缺陷對穩定性影響。實驗結果顯示，在相當於 150 公尺水深下，壓力殼無滲漏、壓降或變形。



圖 4、受測物於海軍官校耐壓艙



圖 5、耐壓結果檢查

表 1、測試紀錄表

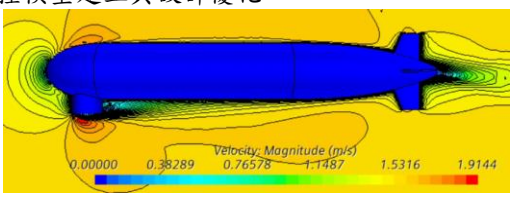
測試壓力 (bar)	保持時間 (min)	漏水/氣泡檢查	結果
50	5	無漏水/無氣泡	■合格 □不合格
100	5	無漏水/無氣泡	■合格 □不合格
150	30	無漏水/無氣泡	■合格 □不合格

2.2 水下載具水動力特性分析與運動軌跡模擬器開發

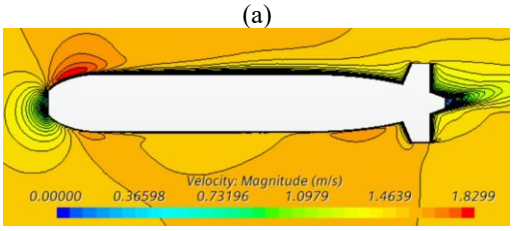
圖 6 在不同漂角與攻角條件下，AUV 外流場型態呈現明顯差異，對縱橫向操控性能與水動力係數造成直接影響。本 CFD 結果提供了六分量量測結果的物理來源，並可作為後續回歸建模、操控器調參與外型優化的重要依據，其觀察重點如下：

1. 無漂角、無攻角（基準狀態）流線自艏部平順貼附，軸向對稱性良好，艉部加速區清晰且渦系最小，阻力最低，為直航性能與推進效率最佳的參考基準。
2. 有漂角、無攻角（側滑狀態）左右流場產生明顯不對稱渦旋，背風側出現流線分離與低速尾渦，艉部速度梯度增強。側向不對稱導致 Y 力與偏航力矩 N 增加，與 SLT Drift Angle 測試數據結果一致。
3. 無漂角、有攻角（俯仰狀態）上下流場壓力差與加速區明顯形成升力效應，艏上方出現高速帶，下方低速區加強，俯仰力矩 M 與升力 Z 顯著提升。此狀態與 Attack Angle 測試之 Z、M 明顯非線性變化相符。

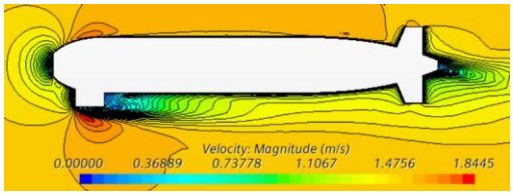
綜合來看，漂角主要影響橫向穩定與偏航操控，而攻角則對深度控制與俯仰動態影響最大。此 CFD 圖能直觀反映 SLT 水槽六分量量測中數值增加的物理來源，並同時可用於水動力係數回歸、操控模型建立與設計優化。



(a)



(b)



(c)

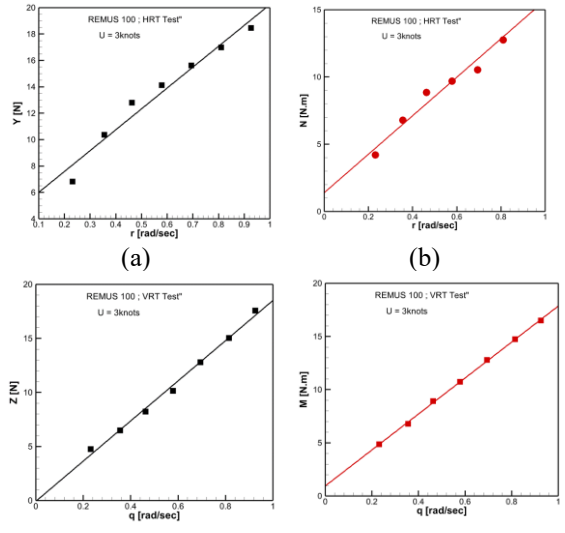
圖 6、U=3 knots 下不同漂角/攻角配置之流場速度等值線比較

圖 7 RAT Rotating Arm Tests – AUV Forces & Moments (U=3 knots)中，呈現 REMUS 100 AUV 在拖曳水槽進行 Rotating Arm Test (RAT) 之量測結果，包含水平面與垂直面旋轉運動下的水動力響應。試驗以固定流速 U=3 knots，逐步增加旋轉角速度，量測側向力、偏航力矩、垂向力與俯仰力矩等四項主要反應，用以推估 6-DOF 操控模型中的操縱導數 (Yr, Nr, Zq, Mq) 並驗證 AUV 旋轉穩定性。Rotating Arm Test 分為水平面 (HRT) 與垂直面 (VRT) 兩組試驗：

【水平面旋轉運動 HRT】圖 7 (a)顯示側向力 Y 隨旋轉率 r 線性上升，可取回歸斜率建立 Yr；圖 7 (b)中偏航力矩 N 亦呈線性成長，代表 AUV 能產生穩定可控之偏航回復力矩，可推得 Nr。

【垂直面旋轉運動 VRT】圖 7 (c)中垂向力 Z 隨俯仰旋轉 q 線性增加，可用以計算 Zq； 圖 7 (d)俯仰力矩 M 與 q 呈高度線性相關，顯示縱向操控穩定性良好，可推估 Mq。

整體而言，漂角主要影響 AUV 之橫向穩定性與偏航操控特性，而攻角則對深度控制與俯仰動態影響最為顯著。CFD 流場圖可直觀呈現 SLT 水槽六分量量測中各項水動力數值變化之物理來源，並可進一步應用於水動力係數回歸分析、操控模型建立及外型設計優化，對於提升 AUV 操控性能與設計可靠性具有重要價值。



(a) (b)

(c) (d)

圖 7、Rotating Arm Tests (RAT) 水平與垂直旋轉運動之力與力矩回歸結果

2.3 水下通訊與定位技術開發

2.3.1 水下通道預估

本研究之目的為開發一可傳輸資訊、命令等訊息之水下通訊技術，為確保傳輸內容經過海洋內因環境所帶來之眾多因素干擾後，能依舊保持原貌不受影響，熟悉傳輸過程中水下通道對聲音訊號所帶來的效應是一個不可或缺的步驟。

本研究以數值模式的方式，綜合台灣海域之地形、水文等因素，模擬聲波於水中傳遞所會造成之多路徑效應等影響，如圖 8 與圖 9 分別為以台灣周邊海域為參考，於不同季節所產生之音傳損耗與訓號脈衝響應之結果，從圖中內容可觀察到，就算是同一環境，受季節影響訊號傳輸結果也會產生很大的不同。

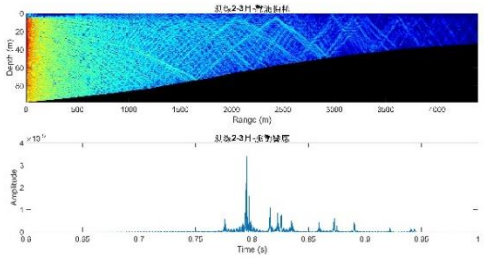


圖 8、水下通道預估結果圖(春季)

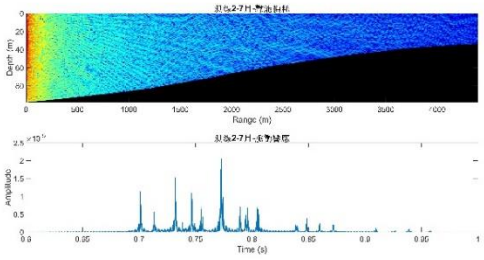


圖 9、水下通道預估結果圖(夏季)

2.3.2 水下通訊技術開發

為克服水下環境高變動的特性，同時達到高穩定之水下通訊，本研究使用 MFSK（Multiple Frequency Shift Keying，多頻移鍵控）作為通訊訊號調變的手段，MFSK 可在每個符號期間內從多個預先設定的頻率中選擇一個進行傳輸，因此能以一個符號攜帶更多位元資訊。其主要優點在於抗雜訊與抗干擾能力較強，即使在低訊雜比或通道品質較差的環境下，接收端仍可透過頻率能量分布較穩定地判斷接收到的符號。此外，MFSK 對振幅變化較不敏感，因此在衰減、干擾或非理想通道條件下，通常仍能維持較佳的傳輸可靠度。圖 10 為 MFSK 調變原始訊號，本研究將此訊號代入上述之水下通道預估結果，模擬訊號於此場域中真實傳輸情形，從圖 11 中可見，當訊號經過目標場域後，因受多

路徑效應影響訊號間有明顯受到訊號回波干擾，使其各小節訊號不如原始訊號清晰，較難以分辨。

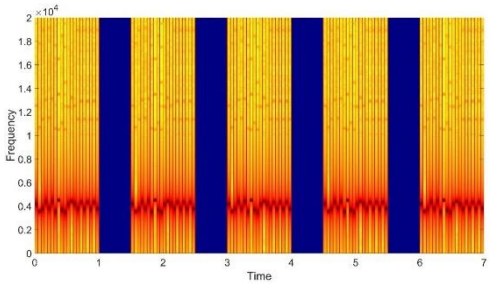


圖 10、MFSK 調變訊號圖

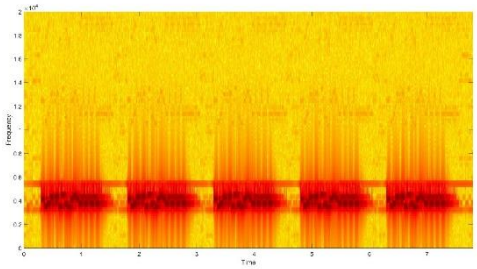


圖 11、訊號傳輸模擬結果圖

完成訊號的傳輸模擬後，本研究著手於還原此受環境因素所干擾訊號所攜帶之訊息，圖 12 為訊號偵測與訊息還原結果，本研究於模擬訊號中可正確偵測訊號出現時間點，並成功將訊息內容還原。

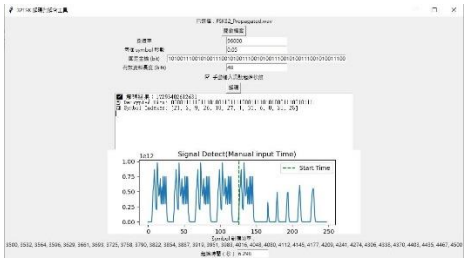


圖 12、通訊模擬傳輸訊號訊息還原圖

2.3.3 水下定位技術開發

本研究所採用之水下聲學定位技術，基於到達時間差法(TDOA)，分別以最小平方法與牛頓法作為定位演算法之學理進行接收器空間位置反推。

案例設計為於接收器周圍布置三個聲源，各聲源彼此間距離皆為 500 公尺，以模擬訊號之到達時間進行水下定為模擬之演算，其配置如圖 13 所示，紅圈處為假想聲源位置、綠色標記為假想接收器位置、藍色標記為估算接收器所在位置，於此模擬案例中接收器位置為固定以最小平方法所計算之誤差為 7 公尺。圖 14 為通牛頓法所估算之定位結果，配置於圖示和最小平方法之案例相同，以牛頓法所估算之位置會與實際座標相差 0.07 公尺。

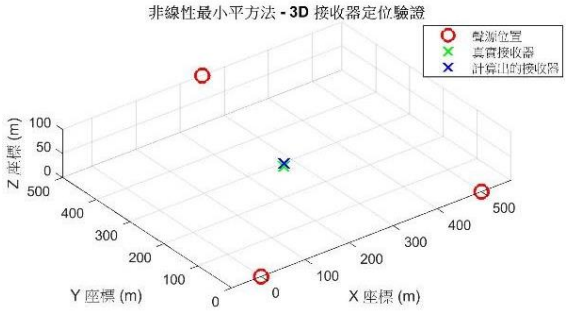


圖 13、最小平方法定位模擬圖

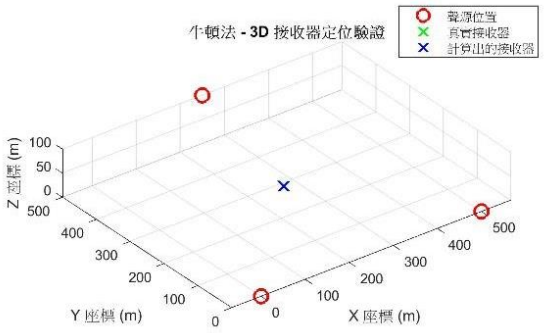


圖 14、牛頓法定位模擬圖

然而於實際情境中，搭載水聽器(接收器)之載台會受到環境因素或自身之運動情況發生位置改變的情景，本研究亦模擬如若接收器位置發生改變時，演算法之估算結果圖 15 為該模擬情境之配置，紅、綠、藍三圈處為假想聲源處、藍點為接收點實際位置、粉色軌跡為估算之位置，於此模擬案例中設計接收點進行不規則運動所得到之估算結果將與實際位置近似。各軸之預估結果誤差如圖 16 所示，水平方向(x、y 軸)誤差大多介於正負 0.1 公尺間，但垂直方向誤差則會較大，因上述考量浮標之實際情況，設定假想浮標深度皆為水深 0 公尺，因此計算時垂直方向上基線較短，缺乏足夠的垂直約束。本研究後續將逐步導入實際海洋環境條件進行更進一步的誤差分析與修正機制建構，以提升模擬結果的實用性與精度。

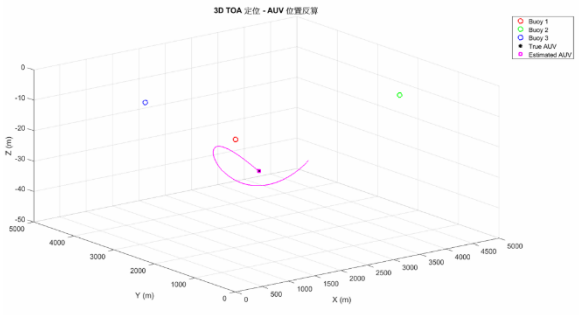


圖 15、動態定位模擬圖

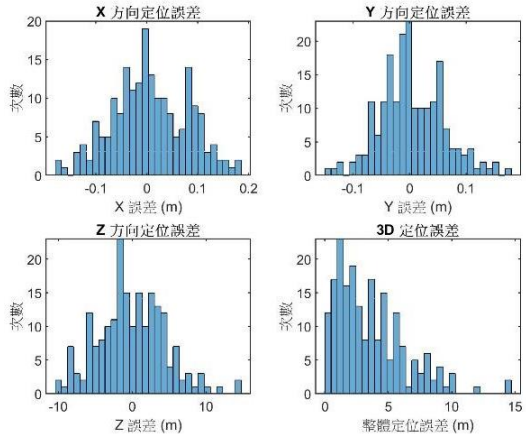


圖 16、動態定位模擬結果誤差圖

2.4 水下無線充電系統及水下無人載具導控系統設計與開發

2.4.1 水下無線充電系統

在現有水下無線充電技術中，發射線圈與接收線圈的設計對系統無線充電性能影響極大。本研究針對海水介質特性對電能傳輸效率所造成的衰減問題，以提升整體能量傳輸效率。藉由此技術，水下無人載具可在作業過程中持續獲得所需能量，無須回收至岸上進行有線充電或是更換電池，進而提升任務持續性與運作效率。

充電模組採用 360 度環形設計，能有效減少海水高介質和海流錯位所帶來的影響；供電端採用全橋式逆變器，提供穩定的交流電輸出，並通過相移控制技術提升電能轉換效率；取電端則包含整流和濾波模組，將交流電轉換為鋰電池充電所需的直流電，研究成果如圖 17 所示。

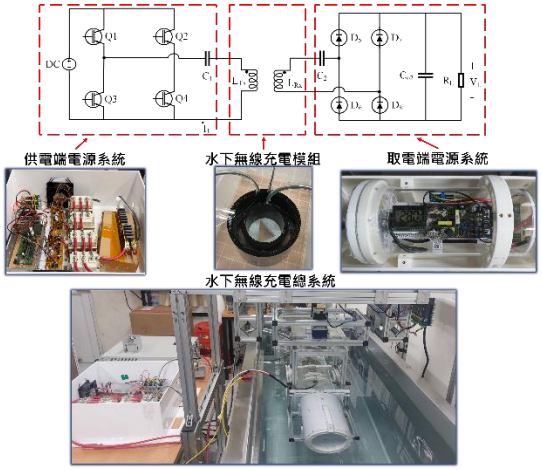
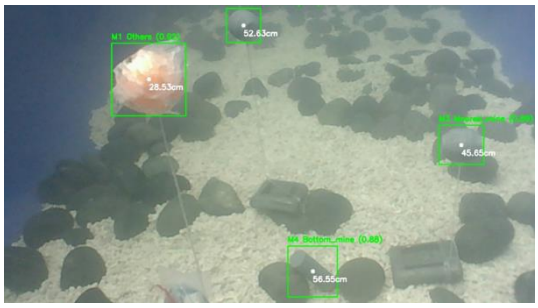


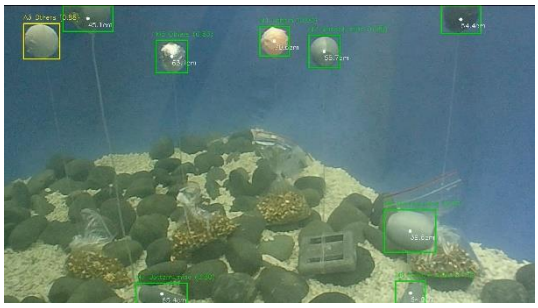
圖 17、水下無線充電研究示意圖

2.4.2 水下 AOI 特徵辨識系統設計

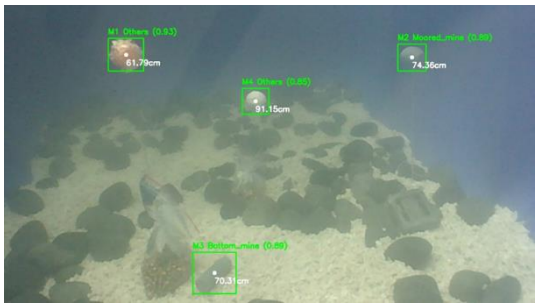
本研究以立體視覺作為水下 AOI 特徵辨識系統之影像設備，其主要優勢在於無需主動光源投射，僅透過雙攝影機之視角差異即可進行深度估測，具備成本較低且對環境光變化具有較高容忍度的特性，特別適用於戶外或強光場域，並可透過基線距離調整以擴展量測範圍。於目標測距實驗中，經由物件辨識模型處理後，系統可在不同距離條件下準確辨識目標，並標示其類別與對應信心值，如圖 18 所示。此外，本研究所提出之左右影像匹配演算法，能有效建立對應點關係，並抑制邊界雜訊與錯誤匹配問題。結合物件辨識所取得之邊界框進行視差計算，可進一步精確估測目標與攝影機之間的距離。實驗結果顯示，不論於近距離或遠距離情境下，所估測之深度皆與實際量測值高度一致，驗證了整體影像校正與深度估測流程之準確性與可行性。



(a)



(b)



(c)

圖 18、目標測距結果。(a) 距離目標物 30-60 公分影像。(b) 距離目標物 50-80 公分影像。(c) 距離目標物 50-80 公分影像。

2.4.3 AUV 自主導控系統自主導控系統

導控系統是自主式水下載具（Autonomous Underwater Vehicle ，AUV）的核心關鍵，其目的在於讓 AUV 能在複雜且變化多端的水下環境中，穩定、安全且精準地執行任務。由於水下環境無法使用 GPS 定位，且容易受到海流影響，加上感測資訊有限，使得導航與控制更加困難。因此，為了讓 AUV 具備良好的水中航行能力，必須設計一套整合姿態估測、路徑規劃與運動控制等功能的完整導控系統。本計畫所建立的 AUV 導控系統，主要由慣性導航系統（Inertial Navigation System ，INS）、都卜勒測速儀（Doppler Velocity Log ，DVL）、深度感測器，以及可搭配的聲學定位系統所構成，用以進行位置與速度的估測。透過多感測器資料融合，不僅能降低單一感測器誤差對定位精度的影響，也能有效提升整體導控系統的穩定性與可靠性。要實現導控功能，關鍵在於準確掌握船體的姿態與位置資訊。因此，本計畫提出一套多感測器融合技術，透過整合 DVL 所提供的水下速度、INS 的姿態資料，以及深度計的深度資訊，將各感測器的數據進行融合處理，建立一套能夠精確估測自身位姿的系統，如圖 19 所示。

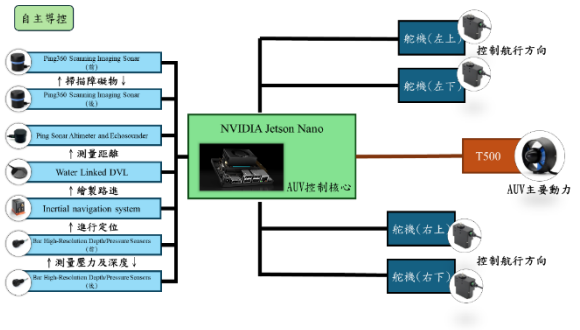
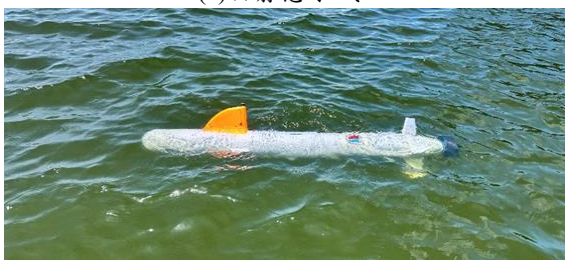


圖 19、多感測器感知融合技術架構

在自主水下載具的導航與控制系統中，操控穩定性與精準度為關鍵性能指標。因此，本研究針對 Roll 不穩定問題進行力矩補償實驗。當推進系統啟動瞬間，因推進器旋轉所產生之反作用力矩，使 AUV 出現明顯滾轉現象，導致姿態產生偏移。隨後啟動四舵 Roll 角平衡控制策略，各舵面即依控制指令產生對應之反向作動，以提供補償力矩並調整姿態。在控制初期，船體會短暫向相反方向傾斜，以抵銷原始滾轉效應並進行姿態修正；隨著控制持續作用，滾轉角逐步收斂，最終恢復至水平穩定狀態。實驗結果顯示，所提出之控制策略能有效抑制由推進器引起之滾轉擾動，提升 AUV 姿態控制之穩定性，如圖 20 所示。



(a)於靜態水域

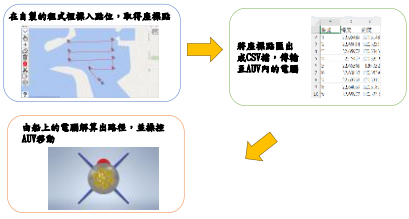


(b)於實際海域測試

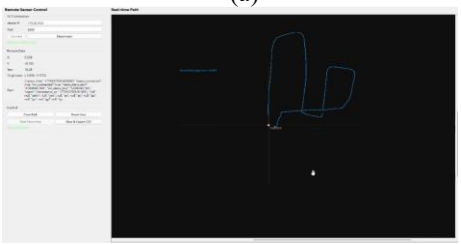
圖 20、進行四舵 Roll 角平衡控制策略實驗

2.4.4 路徑規劃

在取得自身位姿之後，下一步即為任務規劃。本計畫設計了一套路徑規劃系統，透過自建的任務規劃平台，先在岸上電腦設定任務航點，再將這些任務點傳輸至 AUV，由船載電腦接收後判斷並規劃船體的移動方式，如圖 21(a)所示。當完成姿態估測與任務路徑設定後，接續需要控制 AUV 的實際運動，因此本計畫進一步開發了一套路徑追蹤演算法。當 AUV 接收到任務點後，會以當前目標點作為前進方向，同時依據當下量測的速度，乘上一預先設定的時間參數，並將其投影至目標方向上，以計算出一個前視參考點，亦即理想點，船體則持續朝此理想點前進，並繪製出行進軌跡路線，如圖 21(b)所示。



(a)



(b)

圖 21、(a)路徑規劃流程架構；(b)行進軌跡路徑圖

三、結論

本研究整合水下無人載具 AUV 的四大應用關鍵技術，分別為水下無人載具系統工程整合與結構設計、水下載具水動力特性分析與運動軌跡模擬器開發、水下通訊與定位技術開發、水下無線充電系統及水下無人載具導控系統設計與開發，並發展可應用於水雷搜尋、辨識、定位等功能的水下無人載具。

謝誌

本研究承國家中山科學研究院補助，計畫編號 NCSIST-ACOM-115-2139001。

參考文獻

[1] 陳志忠，國軍主要武器系統與裝備系統工程管理教則，國防部，2009 年。

[2] 系統工程手冊， 2011 年 1 月， 國際系統工程協會 (INCOSE) INCOSE-TP-2003-002-03.2.1。

[3] Malay Pal, “Ship work breakdown structures through different ship lifecycle stages” *International conference on computer applications in shipbuilding*, 2015.

[4] Rupak, B., Roger, C. S., “Tetrahedral and hexahedral mesh adaptation for CFD problems,” Applied Numerical Mathematics, Vol.26, 1998.

[5] Bruno, K., Charbel, F., and Hai, T., “Computation of unsteady viscous flows around moving bodies using the turbulence model on unstructured dynamic grids,” Computer methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999.

[6] Faryar, S.A., and Reza H.G., “Investigation of a New Hovering Autonomous Underwater Vehicle for Underwater Missions,” Journal of Automation, Mobile Robotics, and Intelligent Systems, Vol. 15, pp. 3-13, 2021.

[7] Basekh, M. and Mahdi, M., “Combining CFD, ASE, and HEKF approaches to derive all of the hydrodynamic coefficients of an axisymmetric AUV,” Proc. IMechE Part M, vol. 236, pp. 474-492, 2022.

[8] Z. Wang, W. Luo, T. Zhang, K. Li, Y. Liao, J. Jia, and D. Jiang, “AUV hydrodynamic coefficient offline identification based on deep reinforcement learning,” Ocean Engineering, Vol. 304, 2024.

[9] L. Hong, X. Wang, D.e-S. Zhang, “CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey,” Ocean Engineering, Vol. 305, 2024.

[10] Lu, Y., Wu, J., Li, W., and Wu, Y., “A New Six-DOF Parellel Mechanism for Captive Model Test,” Polish Maritime Research, vol. 27, pp. 4-15, 2020.

[11] Huy, N., Thanh, N., Nhut, P., and Sik, H.C., “Robust depth control of a hybrid autonomous underwater vehicle with propeller torque's effect and model uncertaint y,” Ocean Engineering, vol. 205,108257, 2021.

[12] Faryar, S.A., and Reza H.G., “Investigation of a New Hovering Autonomous Underwater Vehicle for Underwater Missions,” Journal of Automation, Mobile Robotics, and Intelligent Systems, Vol. 15, pp. 3-13, 2021.

[13] Wu, P., Liu, X., Ling, Z., and Chen, C., “Application research on matching design of suspended AUV propeller based on CFD,” Journal of Physics: Conference Series, Volume 2280, 6th International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications (FMIA 2022) 23/04/2022 - 24/04/2022 Taiyuan, China.

[14] M. Ebrahimi, A. Kamali and M. Abbaspour. “Enhancing the roll dynamics of an AUV by contra-rotating-propellers.” Ships and Offshore Structures, Vol. 16, pp 787-796, 2021.

[15] D. Ji, R. Wang, Y. Zhai, and H. Gu, “Dynamic modeling of quadrotor AUV using a novel CFD simulation,” Ocean Engineering,Volume 237, 2021.

[16] E. Felemban, F. K. Shaikh, U. M. Qureshi, A. A. Sheikh, and S. B. Qaisar, “Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey,” Internal Journal of Distributed Sensor Networks, 11(11), https://doi.org/10.1155/2015/ 896832, 2015.

[17] L.Y.S. Chiu, A. Chang, and D.B. Reeder, “Resonant interaction of acoustic waves with subaqueous bedforms: Sand dunes in the South China Sea,” J. Acoust. Soc. Amer., 138(6), EL515-EL521, 2015.

[18] L.Y.S. Chiu, D.B. Reeder, A. Chang, C.F. Chen, C.S. Chiu, and J.F. Lynch, “Enhanced acoustic mode coupling resulting from an internal solitary wave approaching the shelfbreak in the South China Sea,” J. Acoust. Soc. Amer., 133(3), 1306-1319, 2013.

[19] C. R. Teeneti, T. T. Truscott, D. N. Beal and Z. Pantic, “Review of Wireless Charging Systems for Autonomous Underwater Vehicles,” *in IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 68-87, Jan. 2021.

[20] Orekan, Taofeek, and Peng Zhang, “Underwater wireless power transfer: smart ocean energy converters”, *Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing*, 2019.

[21] D. Crimmins et al., “Long-endurance test results of the solar-powered AUV system”, *Proc. OCEANS Conf.*, pp. 1-5, 2006.

[22] Blake P. Driscol, Andrew Gish and Ryan G. Coe, “Wave-powered AUV recharging: a feasibility study”, *Offshore and Arctic Engineering OMAE*, pp. 1-8, June 2019.

整合無人船、一般船舶與無人機多平台遙測之水上水下無縫高精度三維模型建置

郭重言[1] 李啓民[2] 蔡旻軒[3] 洪志偉[4] 陳麗雯[5] 蔣昊澐[6] 劉庭瑜[7]

摘要

電子航行圖(Electronic Navigational Chart, ENC)製作與三維陸域模型建置，對於近岸環境之航行安全維護與海岸管理作業具有重要意義。本研究整合高精度 GNSS/IMU 系統，以獲取無人船（Unmanned Surface Vehicle, USV）和一般船舶之高精度位置與姿態資訊，並搭載多音束測深儀（Multibeam Echo Sounder, MBES）執行以橢球高為基準之水深測量。針對測深資料之品質控制與雜訊處理，除傳統人工濾除外，本研究進一步採用分位數濾波（quantile filter）、多解析度 M 估計法（multi-resolution M-estimator）及組合不確定度與水深估計器（Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator, CUBE）等結合方法，以及利用核點卷積（Kernel Point Convolution, KPConv）進行半自動化水深異常值偵測以提升資料處理效率。在高程基準轉換方面，本研究利用離距模型（SEParation model, SEP）將橢球高水深轉換至以最低天文潮面（Lowest Astronomical Tide, LAT）為基準之水深以符合 ENC 製作需求。此外，透過整合無人船光達(LiDAR)和無人機（Unmanned Ariel Vehicle, UAV）影像及 LiDAR 點雲資料，以建構水上水下無縫之高解析度三維空間資訊。本研究以台南亞果遊艇港及花蓮港南部近岸為測試區域，驗證所提之方法於複雜近岸環境下之可行性與精度。成果顯示，本整合式測繪方法與資料處理流程對於港灣管理、海岸監測及智慧海域應用具有重要貢獻。

關鍵詞：水深測量、多音束測深、無人船、無人機、光達

Title

Chungyen Kuo[1] Chiming Lee[2] Min-Hsuan Tsai[3] Chihwen Hung[4] Liwen Chen[5] Hao-Yun Chiang[6] Tingyu Liu[7]

ABSTRACT

The generation of Electronic Navigational Charts (ENCs) and high-resolution three-dimensional terrestrial models plays a critical role in ensuring navigation safety and supporting coastal management in nearshore environments. This study presents an integrated surveying and data processing framework for seamless above- and underwater 3D mapping by combining high-precision GNSS/IMU systems, unmanned surface vehicles (USVs), conventional survey vessels, multibeam echo sounders (MBES), LiDAR, and unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. High-accuracy positioning and attitude information acquired from the GNSS/IMU systems were used to support ellipsoidal-height-referenced bathymetric surveys conducted with MBES. To improve bathymetric data quality and processing efficiency, both conventional manual editing and advanced semi-automated approaches were employed. These included the quantile filter, multi-resolution M-estimator, and Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE), as well as Kernel Point Convolution (KPConv) for bathymetric outlier detection. For vertical datum transformation, a separation model (SEP) was applied to convert ellipsoidal depths into depths referenced to the Lowest Astronomical Tide (LAT), thereby satisfying the requirements for

[1] 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授
[2] 國立成功大學測量及空間資訊學系 助理教授
[3] 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士班研究生
[4] 詮華國土測繪股份有限公司 副總經理
[5] 國家海洋研究院 副研究員
[6] 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士班研究生
[7] 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士班研究生

ENC production. In addition, LiDAR data acquired by the USV and UAV-based imagery and LiDAR point clouds were integrated to establish a seamless, high-resolution 3D spatial model across above-water and underwater domains. The proposed framework was validated in Anping Argo Yacht Harbor, Tainan, and the southern nearshore area of Hualien Harbor. The results demonstrate that the proposed integrated approach is feasible and accurate in complex coastal environments and provides valuable support for harbor management, coastal monitoring, and smart maritime applications.

Keywords: hydrographic surveying; MBES; USV; UAV; LiDAR

一、緒論

港區及其周邊近岸水域為高密度船舶活動環境，航行安全不僅關係船舶與人員生命安全，亦直接影響航運效率與港口營運，進而牽動國家經濟與貿易發展。相關研究指出，港區航行風險與船舶密度、航道寬度與水深等空間條件高度相關，顯示港區空間環境特性為航行安全評估中的關鍵因素[1]，因此，若能進一步建置水上水下一體之無縫數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM），以一致且連續的方式描述港區水陸（含潮間帶）地形與航行空間，將更有助於支撐航行安全評估、航道維護與港口營運決策。

此外，人工結構物與波浪之交互作用會改變近岸流場特性與漂沙機制，再加上近年來極端氣候帶來的異常海氣象事件，強驟雨挾帶之砂源堆積，都可能會在於臨港周邊、河海交界處造成漂沙、海岸侵蝕與淤積之現象。因此，持續進行海岸地形監測與變遷分析極為重要，而高解析度且水陸連續之三維 DEM 建置為相關研究與應用之基礎。

一般船舶搭載多音束測深儀（Multibeam Echosounder, MBES）為目前最普遍之水深測量方式，然受限於船體尺寸與操作條件，於淺水域及泊位區等區域無法取得完整水深資料[2-3]。無人船（Unmanned Surface Vehicle, USV）搭載 MBES 因小型化船體、吃水較淺及高度機動性等特性，使其能進入傳統船舶難以抵達區域，並具備高風險測量任務之能力，同時降低作業人員暴露於危險環境之風險[4-5]。

陸上 DEM 和構造物之取得，傳統大多透過陸域三次元測量、地面雷射掃描儀（Terrestrial Laser Scanner, TLS）及全球導航衛星系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）接收儀等方式進行作業，然上述方法無法大面積、快速取得資料。無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）具備低成本、高機動性與快速測量能力，近年來已廣泛應用於農林業經營、文化資產保存、環境監測、交通監測及三維重建等領域[6]，若搭載高解析度相機和光達儀器可快速取得高精度、高解析度陸地空間資訊資料。

然而，多音束側深資料之品質將直接影響水下 DEM 建置成果。多音束點雲(Point Cloud)資料異常值可能源自水柱中氣泡、懸浮顆粒或海洋生物引起的虛假回波，也可能來自於運動感測器誤差、不規則音束分布或系統增益補償不足等因素。。若未能妥善辨識和修正此類異常值，將導致海底地形幾何失真，進而影響等深線生成、坡度分析與航行安全判釋[7]。傳統多音束測深資料之處理流程長期依賴人工辨識方式，雖可確保成果品質，但其人力成本相當高。[8]指出，在多音束水深測量作業中，資料後處理(特別是人工異常值濾除)所需時間往往遠高於實際外業資料蒐集時間，成為海地地形測繪中的主要瓶頸。

目前半自動化的水深點雲異常值辨識大致可分為監督式與非監督式方法。監督式面對高地形變異性或豐富海底地形特徵的資料時，其離散異常值或地形構造等觀測量，會對統計、密度、邊緣距離或聚類演算等結果產生顯著影響，且大多數方法都需使用者設定參數（例如視窗大小和閾值）或直接介入，處理結果高度依賴使用者經驗。而監督式方法則以深度學習為基礎，將 MBES 測深資料視為點雲，學習語意資訊、幾何特徵，最後在未見過的資料集上辨識異常值，與傳統方式展現不同特性。

本研究以臺南亞果遊艇港及花蓮港南側近岸海域為主要測試區域，透過整合 USV 多音束和光達以及 UAV 影像及 LiDAR 點雲資料，建構水上水下無縫之高解析度三維空間資訊，驗證所提之方法於複雜港區和近岸環境中之可行性與精度。在資料處理與品質控制方面，本研究結合分位數濾波（quantile filter）、多解析度 M 估計法（multi-resolution M-estimator）及組合不確定度與水深估計器（Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator, CUBE）等方法以提升測深資料之穩定性與可靠度。同時，利用核點卷積（Kernel Point Convolution, KPConv）技術進行水深點雲之半自動化異常值偵測以提升資料處理效率。上述方法分別以宜蘭烏石漁港及新竹竹圍漁港為測試案例，進一步驗證在不同場域條件下之適用性與穩健性。

二、研究區域與資料

2.1 儀器

本研究使用加拿大 Marine Thinking「BLUEBOAT USV powered by Marine Tensor (BBMT)」之無人船（圖 1），規格如表 1 所示。一般船舶則使用適合港口水深測量之詮華國土測繪有限公司自有船舶或長期配合的船隻。

MBES 系統採用 NORBIT iWBMS 和 WINGHEAD i80S 多音束測深系統，其整合多音束測深儀、Applanix POS MV、表面聲速儀（Surface Sound Velocity Sensor）於一體，是一款高度集成、高解析度的測深系統。POS MV 陀螺儀與外部 GNSS 結合，可為工作船隻和感測器提供連續的、精確的定位定向系統(Position and Orientation System, POS)資料（https://norbit.com/）。水中聲速修正使用 NORBIT Base•X_2 聲速剖面儀（Sound Velocity Profiler, SVP）觀測量，資料可自動下載並輸出成所需格式，簡化資料匯出與資料處理的操作過程。

UAV 選用我國廠商璿元科技之 HYT SkyPro2 遙控 UAV，該 UAV 通過財團法人電信技術中心（Telecom Technology Center, TTC）中階資安認證，可拍攝高解析度、高品質影像，快速建構任務並獲取影像。UAV 光達設備為 RIEGL miniVUX-3UAV，其光達掃描儀脈衝頻率可多段調整，依據測區特性規劃適當脈衝率，達最佳穿透率，獲取最多地面點位，保存測區完整資訊，提供相關資料與高精度成果，供後續進行各項分析使用。

2.2 研究區域

圖 2 為臺南亞果遊艇港海陸域測量範圍。該場址位於安平港一隅，場址定期進行浚挖，水深範圍介於 1.8 m 至 12.31 m（基準為最低天文潮(LAT)）。圖 3 為花蓮港外海陸域測量作業範圍，涵蓋花蓮港臨港海岸段區域至花蓮溪附近。



圖 1：Marine Thinking BBMT

表 1：BBMT 船體規格

船體	船體尺寸	1.20×0.93×0.46 m
	材質	聚乙烯
	空載船體自重	14.5 公斤
	最大載重	30 公斤
	船型	可拆卸式雙體船
	抗風浪等級	3 級風、3 級浪
	吃水	32 公分(最大負重)
動力	電池續航（四顆電池+Norbit iWBMS）	@1 m/s (no payload): 2 電池: 18 hrs 4 電池: 36 hrs 6 電池: 50 hrs 8 電池: 62 hrs
	電池安裝方式	可拆換式
	最大航速	6 節 (3 m/s)
	馬達安裝方式	舷外掛機
	轉向方式	差速轉向
基站	通訊方式	無線電 / 4G
	控制模式	遙控&自動
	通訊距離	2 km
	軟體	Marine Tensor 任務規劃及資料獲取，可實現自主導航、船體參數控制、船體前視相機影像顯示等功能，支援衛星底圖導入，方便規劃測線。

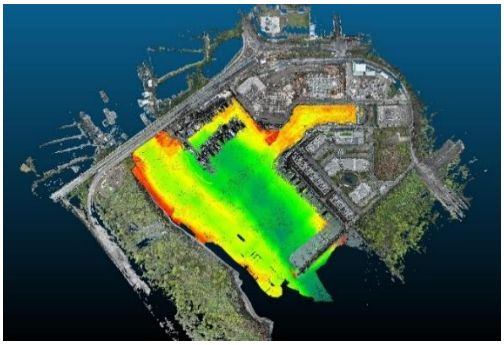


圖 2：臺南亞果遊艇港

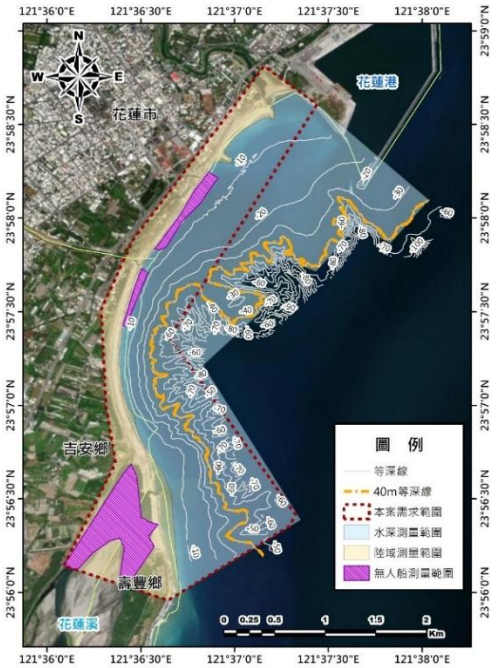


圖 3：花蓮港外海陸域測量作業範圍示意圖

三、研究方法

3.1 MBES 作業方法與資料處理流程

本研究使用多音束測深無人船與一般船舶於港區和港外近岸進行水深測量，搭配 GNSS 定位，並配合周邊設備如運動姿態感測器（或 IMU）、水中聲速剖面儀、電羅經等儀器施測，藉由水深測量軟體整合各項即時的觀測資料，並於事後加入潮汐修正、水中聲速修正及湧浪與船隻姿態角修正後，可得歸算後水深地形成果。水深測量作業流程及資料處理流程如圖 4 所示，也可參照內政部水深測量作業規範中的圖 2 和圖 3[9]。

3.2 UAV 影像和光達作業以及資料處理流程

UAV 影像和光達掃瞄作業主要包含 UAV 空域申請、UAV 航拍及光達掃描、內業資料處理及清繪圖測製。另外需控制測量做為測量航帶平差時所需的控制點或檢核點坐標，新設控制點或檢核點坐標原則採用內政部國土測繪中心 VBS-RTK 方式進行施測。

飛航掃描作業依據測區地形、儀器及載具性能等因素進行航線規劃，以得到最佳的掃描品質。飛航前於地面控制站設定飛行航線、航高、航速、掃描頻率等參數，執行中亦有返航機制、自動降落、障礙閃避等安全應對功能。前處理作業包括飛航掃瞄航跡 POS 解算及光達原始點雲產出，作業流程如圖 5(左)所示。UAV 影像作業和資料解算流程如圖 5(右)所示。

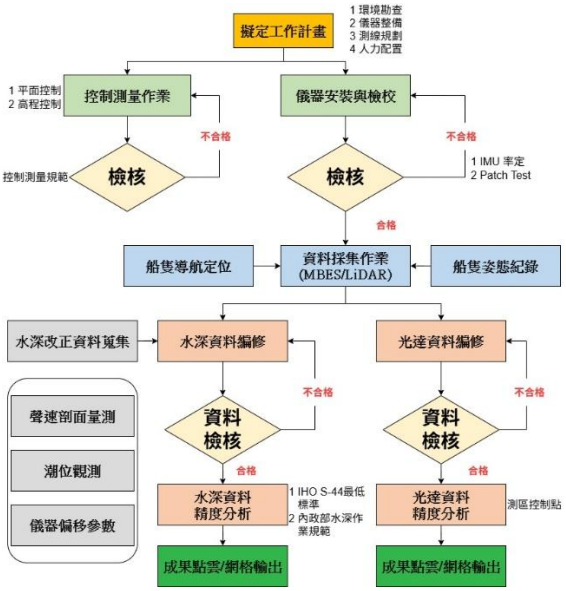


圖 4：USV MBES 和光達作業和資料處理流程。

3.3 Kernel Point Convolution (KPConv)

本研究使用[10]提出之 Kernel Point Fully Convolutional Neural Network（KP-FCNN）點雲分類模型，搭配網格化下採樣與潛力值球形採樣技術，構建適用於模型訓練之點雲輸入格式；以及採用資料增強方法[11]、局部曲面殘差特徵提取[12]，針對類別不平衡問題所設計之 Focal Loss[13]，作為水深點雲異常值分類分類的實驗設計與與後續結果分析之理論基礎。，期望提升 MBES 測深資料異常值自動辨識的準確度與效率，進而強化港區與近岸海底地形模型建構之可靠度，並為後續水深資料自動化處理提供一套具實務可行性之解決方案。圖 6 為 KPconv 水深點雲半自動過濾流程圖。

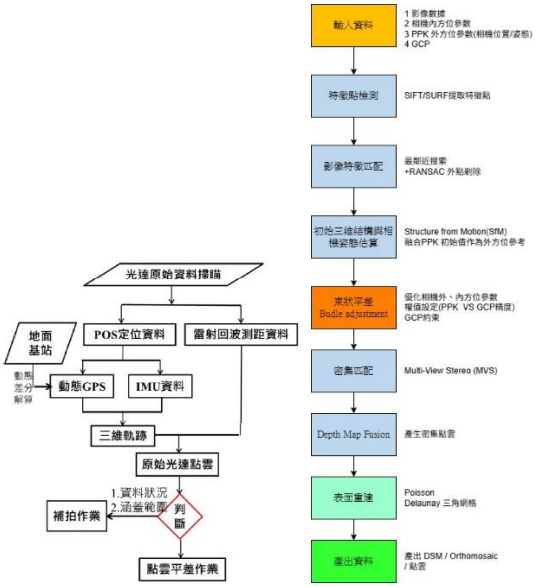


圖 5：(左)UAV 光達軌跡解算及點雲輸出作業流程；(右)UAV 影像作業和資料解算流程。

3.4 非監督式半自動過濾方法

本研究結合 quantile filter [14]、多解析度的 M-Estimator [12]，以及 Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE) [15] 演算法產製數值高程模型，作為最終篩選雜訊的依據。為確保自動化過濾之成果品質，本研究亦標記需人工介入處理的區域。最後，成果以利用 CARIS HIPS and SIPS 軟體套件人工處理的測深資料進行驗證，其中 GNSS tide 的成果用來驗證本研究以橢球高為參考面的測深成果的正確性，同時評估點雲過濾之成效。圖 7 為非監督式半自動過濾流程圖。

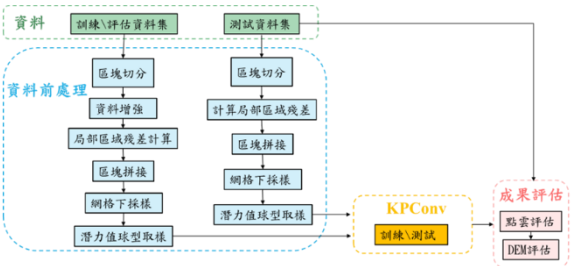


圖 6：KPconv 水深點雲半自動過濾流程圖

四、結果與討論

圖 8 為臺南亞果遊艇港水上水下無縫橢球高 DEM，由 USV MBES、USV 光達、UAV 影像等點雲資料所建置。USV 多音束點雲資料總傳播不確

定度（Total Propagated Uncertainty, TPU）和檢核線檢驗皆通過國際海道測量組織(International Hydrographic Organization, IHO)特等精度；USV 光達點雲利用 e-GNSS 檢核點檢驗，平面精度達 5.7 公分，高程精度為 5.3 公分；UAV 影像點雲利用 e-GNSS 檢核點檢驗，平面精度為 4.5 公分，高程精度為 3.4 公分。圖 9 為花蓮港近岸海陸橢球高 DEM 3D 影像圖。其一般船舶和 USV 多音束點雲資料 TPU 和檢核線檢查皆通過 IHO 特等精度；UAV 光達檢核也達公分等級精度。

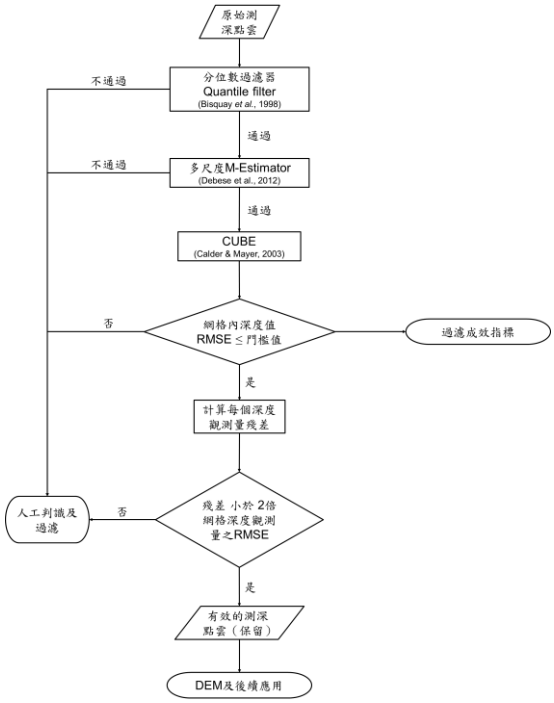


圖 7：非監督式半自動過濾流程圖

非監督式半自動過濾成果部分，本研究設有簡易的過濾成效指標，提供人工審核時參考。此過濾成效指標可分為紅區、黃區、綠區等三個等級，其分界參考自 IHO S-44 特等規範之垂直不確定度之定義，如表 2 所示。圖 10 與圖 11 則分別呈現烏石遊艇港之測深點雲半自動化過濾之成果，以及其過濾成效指標。對比測深點雲於此自動化過濾前後之樣貌，大部分雜訊已被消除且保留多數海床特徵。圖 10 因測區中含有礁石、碼頭、堤防等多種「深度在小範圍內迅速變化」的物件存在，故其紅區網格較多，且都分布於上述區域。在船隻主要航行的區域，因地形起伏較為平緩，過濾成效良好。另外圖中藍框處存在分布破碎、不連續的網格，推測為聲波的多路徑效應所導致。表 3 為烏石遊艇港過濾成效統計數值。最後，將自動化過濾流程輸出之點雲，與人工過濾 DEM 在相同水平坐標之深度值進行較差分析。若被標記為人工過濾的點資料，不計入較差分析。參考之深度值以前述之 DEM 經由線性內插求得。驗證成果如表 4，經本自動化過濾成果與人工過濾成果之較差平均值皆為-0.007 公尺，較差標準差則為 0.080 公尺。較差全距可達數十公分至數公尺不等，係因為部分地形起伏以及人工結構物所在之處，人工過濾與此過濾流程之判定有所差異。然而，較差之全距僅表示極端值之差異，大部分過濾成效良好的區域與人工過濾成果應相當接近。

KPConv 自動過濾成果部分以臺中梧棲漁港、高雄亞灣遊艇港、高雄亞果遊艇港、新北龍洞漁港、高雄興達港情人碼頭及屏東後壁湖漁港等六座港口作為訓練與驗證資料集，完成模型訓練後，進一步應用於新竹竹圍漁港進行測試。圖 12 呈現竹圍漁港人工濾除點雲與預測點雲之成果;表 5 為竹圍漁港點雲分類之混淆矩陣結果，由混淆矩陣可知，模型預測結果正確率 0.99，不過整體異常值比例僅約 0.0048，為本研究所測試水深資料集中異常值比例最低者之一，因此正確率無法有效評估模型預測結果；細部分析顯示，實際異常值中約有 77%被模型成功辨識(Precision=0.77)，在所有被預測異常值之中有 2%為實際地面點(Recall = 0.98)，可以推測模型依然將部分異常值預測為地面點，F1 分數亦反映此結果(F1 Score = 0.85)。

圖 13 為竹圍漁港人工濾除 CUBE DEM 和 KPConv 預測 CUBE DEM。圖 14 為圖 13 中兩圖之較差，而表 6 為較差統計結果。由表和圖可知，約 99.9% 之區域其高程誤差控制於±20 cm 以內，僅有零星區域出現小於 1 m 之誤差，且多呈點狀分布，未形成大尺度連續偏差。

圖 15 為竹圍漁港點雲之斷面分析結果。由斷面圖可觀察到，模型對於懸浮於水體中的密集異常值群集，偶爾有將其誤判為地面點的情形。推測原因可能在於該類異常值群集在點雲密度與幾何形態上與實際結構物具有相似特性，導致模型判斷產生混淆。此外，位於地表附近之異常值群集亦較容易被誤判為地面點。整體而言，模型之判斷機制顯示其對點雲之空間位置分布與群集幾何特徵具有高度敏感性，亦反映出此兩項特徵為模型進行分類決策之重要依據。

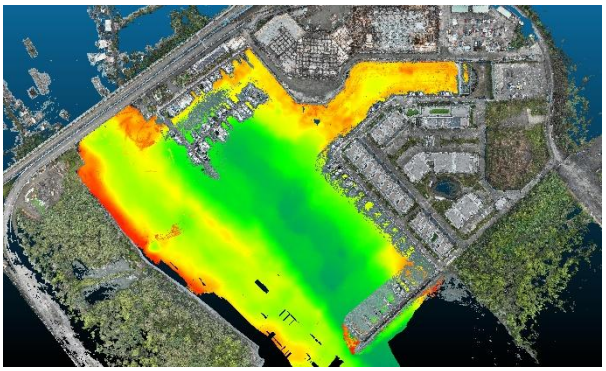


圖 8：臺南亞果遊艇港水上水下無縫橢球高 DEM

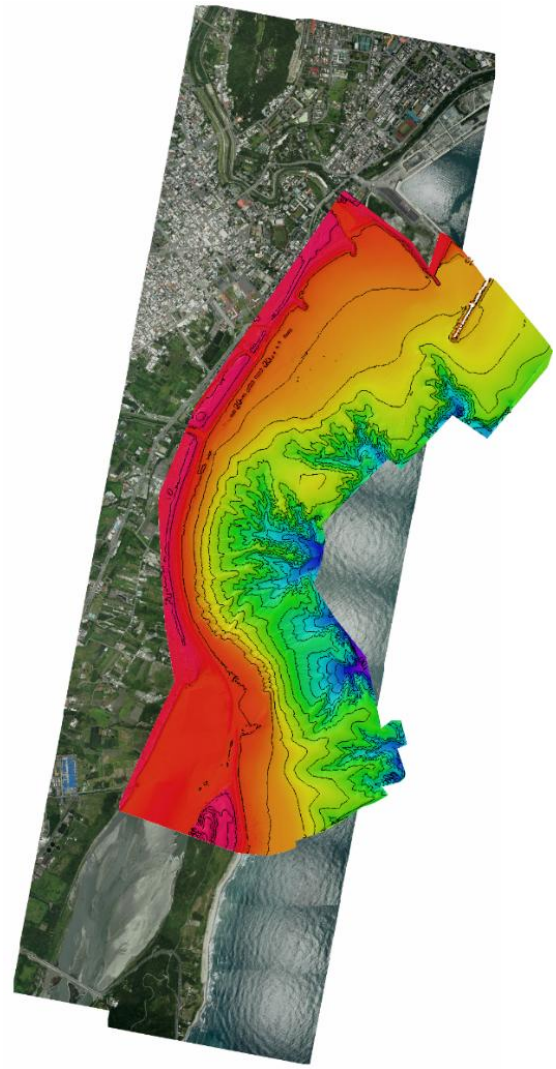


圖 9：花蓮橢球高基準海陸銜接數值地形成果 3D 影像圖

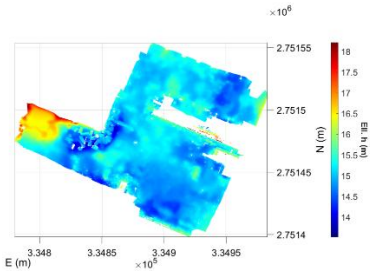


圖 10：烏石遊艇港自動化過濾成果

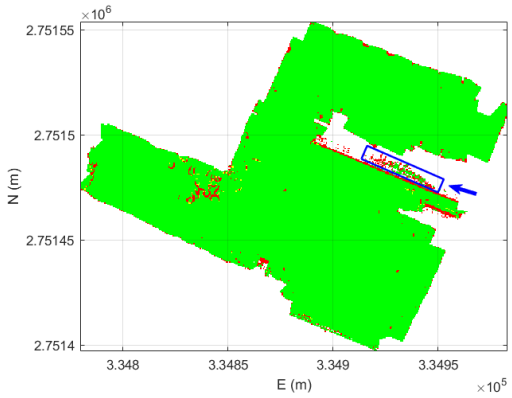


圖 11：烏石遊艇港過濾成效指標

表 2：過濾成效指標定義

指標	門檻值
綠區	$STD \leq 0.25\,m$
黃區	$0.25\,m < STD \leq \sqrt{0.25^2 + (0.0075 \times depth)^2}\,m$
紅區	$STD > \sqrt{0.25^2 + (0.0075 \times depth)^2}\,m$ ；或未處理

表 3：烏石遊艇港過濾成效數值化

烏石	保留點數		濾除點數	合計
點數總數	58,543,897		7,043,371	65,587,268
點數百分比	89.26%		10.74%	100%
指標	綠區	黃區	紅區	合計
面積 (m^2)	14370.75	30.75	394	14795.5
面積百分比	97.13%	0.21%	2.66%	100%

表 4：烏石遊艇港自動化過濾成果驗證

差值平均	**-0.007 m**
差值標準差	0.080 m
差值全距	[-2.490 m, 2.055 m]
RMSE 平均值	0.047 m
RMSE 全距	[0.006 m, 2.490 m]

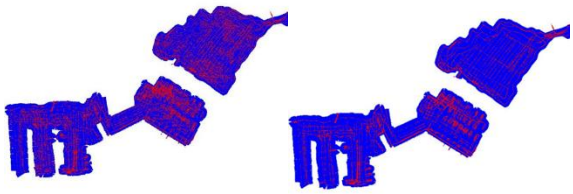


圖 12：(左)竹圍漁港人工濾除點雲；(右)竹圍漁港 KPConv 預測點雲

表 5：竹圍漁港點雲混淆矩陣

	實際	異常值	地面點
預測	異常值	255093 (0.27%)	5376 (0.005%)
	地面點	77899 (0.08%)	91349380 (99%)
Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
0.99	0.77	0.98	0.85

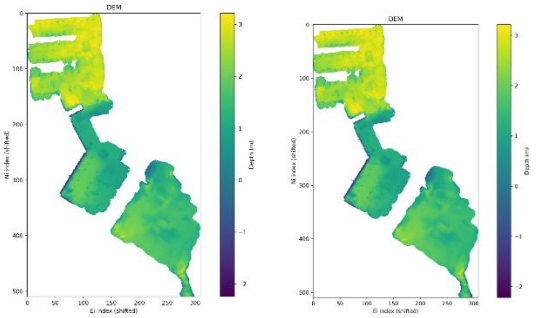


圖 13：(左)竹圍漁港人工濾除 CUBE DEM；(右)竹圍漁港 KPConv 預測 CUBE DEM

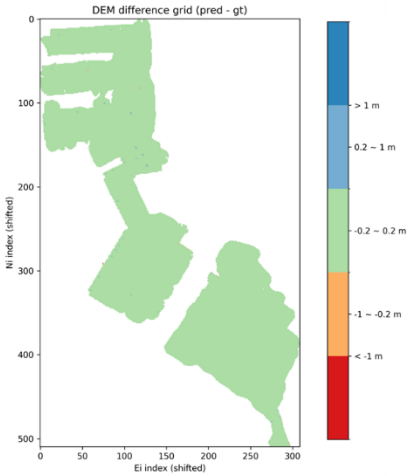


圖 14：竹圍漁港人工濾除 CUBE DEM 與 KPConv 預測 CUBE DEM 之較差

表 6：圖 14 較差統計表

	誤差區間:
Min: -3.214m	< -1m: 0.01% (紅)
Max: -2.087m	-1m ~ -0.2m: 0.8% (橘)
Mean: 0.0013m	-0.2m ~ 0.2m: 99.89% (綠)
STD: 0.046m	0.2m ~ 1m: 0.03% (淺藍)
RMSE: 0.046m	> 1m: 0.0% (深藍)

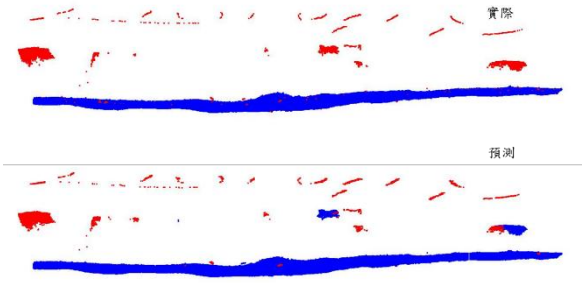


圖 15：(上)竹圍漁港人工濾除點雲剖面；(右)竹圍漁港 KPConv 預測點雲剖面

五、結論與建議

本研究整合 USV 多音束和光達、一般船舶多音束與 UAV 影像和光達等多平台遙測資料，完成港口與港外近岸環境水上水下無縫高精度三維 DEM 之建置。研究成果顯示，本研究所建立之整合式測繪與資料處理流程，可有效提升港區及近岸複雜環境之地形測繪完整性與精度，並可支援 ENC 製作、港灣管理、海岸監測及智慧海域應用之需求。另在測深點雲處理方面，結合 quantile filter、多解析度 M-estimator、CUBE 及 KPConv 等方法，對於雜訊過濾與異常值辨識具有良好成效，顯示所提方法具實務應用可行性。

建議後續可持續擴充不同港區與近岸環境之測試案例，進一步驗證本方法於不同地形條件與作業情境下之適用性；同時可針對人工結構物周邊、地形起伏劇烈區域及高雜訊資料，加強自動化判釋模型之穩健性，以降低人工介入需求。未來若能進一步整合即時處理與智慧化品質控制機制，將有助於提升海洋測繪作業效率，並強化其於實務管理與監測作業上之應用價值

謝誌

本研究由國家科學及技術委員會 (NSTC 113-2121-M-006-019；NSTC 114-2121-M-006-005)、國家海洋研究院 (NAMR-114003)、內政部 (114PC022503A) 支持進行。

參考文獻

[1] Chou, C.C., Su, Y.L., Li, R.F., Tsai, C.L., & Ding, J.-F. (2015). Key navigation safety factors in taiwanese harbors and surrounding waters. *Journal of Marine Science and Technology–Taiwan*, 23(5).

[2] Giordano, F., Mattei, G., Parente, C., Peluso, F., & Santamaria, R. (2016). Integrating Sensors

into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. *Sensors*, 16(1), 41.

[3] Specht, M., Specht, C., Szafran, M., Makar, A., Dąbrowski, P., Lasota, H., & Cywiński, P. (2020). The Use of USV to Develop Navigational and Bathymetric Charts of Yacht Ports on the Example of National Sailing Centre in Gdańsk. *Remote Sensing*, 12(16), 2585.

[4] Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Fumagalli, E., Saggini, E., Zereik, E., Buttaro, E., Caporale, C., & Ivaldi, R. (2014). Unmanned Surface Vehicles for automatic bathymetry mapping and shores' maintenance. *OCEANS 2014 - TAIPEI*, 1–7.

[5] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., & Yuan, C. (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 71–93.

[6] Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2012). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1-C22, 25–31.

[7] Calder, B. R., & Mayer, L. A. (2003). Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(6).

[8] Mann, M., Agathoklis, P., & Antoniou, A. (2001). Automatic outlier detection in multibeam data using median filtering. *2001 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, IEEE Cat. No. 01CH37233.

[9] 內政部，2022。水深測量作業規範。

[10] Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J. E., Marcotegui, B., Goulette, F., & Guibas, L. J. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision (pp. 6411-6420).

[11] Yan, Y., Mao, Y., & Li, B. (2018). Second: Sparsely embedded convolutional detection. *Sensors*, 18(10), 3337.

[12] Debese, N., Moitié, R., & Seube, N. (2012). Multibeam echosounder data cleaning through a hierarchic adaptive and robust local surfacing. *Computers & Geosciences*, 46, 330-339.

[13] Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., & Dollár, P. (2017). Focal loss for dense object detection. *In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2980-2988.

[14] Bisquay, H., Freulon, X., De Fouquet, C., & Lajaunie, C. (1998). Multibeam data cleaning for hydrography using geostatistics. *IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98. Conference Proceedings* (Cat. No. 98CH36259), 2, 1135–1143.

[15] Calder, B. R., & Mayer, L. A., 2003. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4（6）

水下電動機械手臂設計輔助軟體開發

王若庭[1]　王兆璋[2]

摘要

隨著海洋科學研究、水下探測、海洋資源開發及海底設備維修等需求日益增加，水下載具搭配水下機械手臂愈顯重要。其設計與性能直接影響整體任務之成效。然而，目前國內尚缺乏具備完整製造能力之系統，多數仍仰賴國外技術或僅停留於研究型原型開發階段，在設計與元件選型上需比一般陸上機械系統考量更多因素，設計流程相對複雜。

如何透過軟體協助設計者快速完成設計分析與元件選型，是提升系統設計效率的重要課題。本研究旨在開發水下機械手臂軟體設計輔助系統，透過程式計算，快速完成各關節力矩分析、元件負載評估以及適合元件之篩選。相較於一般陸上機械手臂，水下設計需額外考量水壓與水密結構、浮力以及流體阻力等環境因素，這些條件會直接影響機構受力與致動器負載。

本研究透過建立元件資料集並結合自動化分析工具，簡化設計流程，降低人工計算的負擔，並提升元件選型之效率與可靠度，進而為未來水下機械系統之研發提供一套具實用價值之輔助工具。

關鍵詞：水下機械手臂、靜力學、機構設計、DH 參數、演算法

Development of a Software-Assisted Design System for Underwater Electrically Driven Robotic Manipulators

Ruo-Ting Wang[1]　Chau-Chang Wang[2]

ABSTRACT

With the increasing demands for marine scientific research, underwater exploration, marine resource development, and subsea equipment maintenance, underwater vehicles equipped with robotic manipulators have become increasingly important. The design and performance of these manipulators directly affect the overall effectiveness of missions. However, at present, there is still a lack of complete domestic manufacturing capability for such systems. Most developments rely on foreign technologies or remain at the stage of research-oriented prototypes. Compared with conventional terrestrial mechanical systems, more factors must be considered in design and component selection, making the design process relatively complex.

How to assist designers in rapidly completing design analysis and component selection through software has become an important issue for improving system design efficiency. This study aims to develop a software-assisted design system for underwater robotic manipulators. Through programmatic calculations, the system can quickly perform joint torque analysis, component load evaluation, and the selection of suitable components. Compared with terrestrial robotic manipulators, underwater designs must additionally consider environmental factors such as water pressure, watertight structures, buoyancy, and fluid resistance. These factors directly affect structural loading and actuator requirements.

By establishing a component dataset and integrating automated analysis tools, this study aims to simplify the design process, reduce the burden of manual calculations, and improve the efficiency and reliability of component selection. Ultimately, it provides a practical and valuable tool to support the future development of underwater mechanical systems.

Keywords: Underwater Robotic Manipulator、Statics、Mechanism Design、DH Parameters、Algorithm

[1]國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所教授

一、 緒論

目前國內尚無國產水下機械手臂能力，僅有少數研究單位自行研製科研用之原型機。隨著海洋科學研究、水下探測、海洋資源開發及海底設備維修等需求日益增加，水下載具搭配水下機械手臂愈顯重要。然而，由於水下作業環境具有水壓、腐蝕以及防水等問題，因此在設計與元件選型上需比一般陸上機械系統考量更多因素，設計流程相對複雜。

在傳統的機械手臂設計流程中，元件選型往往需依據機構尺寸、桿件重量以及作業負載等條件進行多次迭代計算，以確保各關節致動器能夠承受實際運作時所需的力矩。當任一桿件尺寸、材料特性或外部負載條件改變時，會連帶影響整體機構之受力分布。因此離基座較近的關節所需承受之力矩需求依序往外隨之變動。此情況下，原先選定之馬達、減速機或其他致動元件可能無法滿足更新後之負載需求，設計者必須重新進行力矩分析與元件選型。若採用傳統人工方式逐一進行計算與比對，不僅耗時，也容易因計算過程繁瑣而產生誤差，這個程序影響設計效率與可靠度，也很難找到一個滿足作業性能的最佳設計。

因此，如何透過軟體協助設計者快速完成設計分析與元件選型是提升系統設計效率的重要課題。本研究旨在開發水下機械手臂軟體設計輔助系統，透過程式計算，快速完成各關節力矩分析、元件負載評估以及適合元件之篩選。相較於一般陸上機械手臂，水下機械手臂在設計時需額外考量水壓與水密結構、浮力以及流體阻力等環境因素，這些條件會直接影響機構受力與致動器負載，使設計過程更加複雜。

此外，在蒐集元件資料方面，本研究透過網路爬蟲技術，自多家廠商網站蒐集大量馬達、減速機及相關機械元件之規格資料，並將其整理。此方法不僅能有效提升資料蒐集效率，也能降低人工整理資料過程中可能產生的錯誤。透過完整且系統化的元件資料集，本研究開發之軟體系統得以快速搜尋與比對適合之元件規格，進一步提升設計過程的便利性與準確性。

最終，本研究透過建立元件資料庫並結合自動化分析工具，期望能簡化水下機械手臂設計流程，降低人工計算的負擔，並提升元件選型之效率與可靠度，為未來水下機械系統之研發與設計提供一套具實用價值之輔助工具。

二、輔助設計軟體之建立

為準確計算機械手臂之受力與關節扭矩，需先定義系統之工作條件與設計參數，包括負載條件、使用環境、幾何尺寸及材料性質等。DH 參數用於確定手臂各個關節的精確位置與姿態，Timoshenko 圓柱薄殼彈性失穩理論計算靜水壓力。透過網路爬蟲，建立供軟體運算與檢索之元件規格資料集。

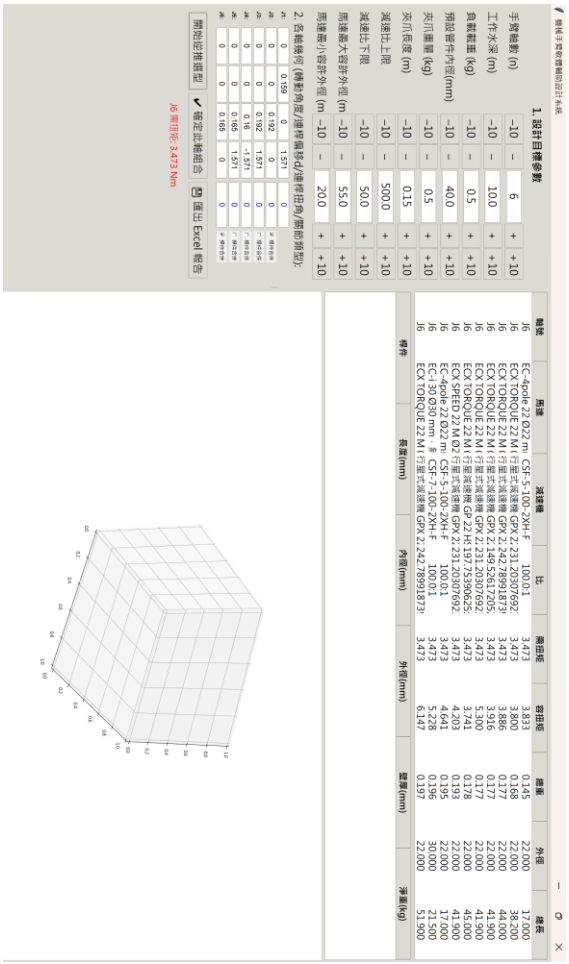


圖 1：輔助設計軟體 UI 介面

2.1 DH 參數

本研究採用標準 Denavit-Hartenberg 參數法進行連桿坐標系的建立。透過定義連桿長度(a_i)、連桿扭轉角(α_i)、連桿偏置(d_i)及關節角(θ_i)，系統化地描述機械臂各關節間的幾何關係。

具體參數定義如下：

1. Z_i 軸：沿著軸系 $\{i\}$ 的平移軸或旋轉軸。
2. X_i 軸：沿著軸系 $\{i+1\}$ 及軸系 $\{i\}$ 的共有正交線。
3. Y_i 軸：已知X_i、Z_i 軸，可用右手座標系法則得知Y_i。
4. 連桿間角度 (θ_i)：繞著 z_{i-1} 軸，從 x_{i-1} 軸旋轉到 x_i 軸的角度。
5. 連桿間距離 (d_i)：沿著 z_{i-1} 軸，從 x_{i-1} 軸到 x_i 軸的距離。

6. 連桿長度 (a_i)：沿著 x_i 軸，從 z_{i-1} 軸到 z_i 軸的距離。
7. 連桿扭轉角 (α_i)：繞著 x_i 軸，從 z_{i-1} 軸旋轉到 z_i 軸的角度。

透過上述四個參數描述關節軸 {i} 與關節軸{i＋1} 之相對關係如圖 2 所示：

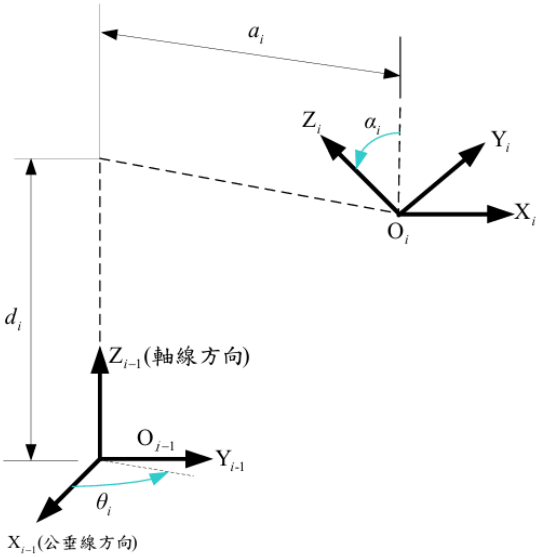


圖 2：DH 坐標系轉換示意圖

透過 DH 參數表可定義出齊次變換矩陣，如式(1)為標準 DH 參數的齊次變換矩陣定義。

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(矩陣中的 c 代表 cos，s 代表 sin)

將 DH 參數表帶入至式(1)，可以得出基座到末端執行器的齊次變換矩陣。經整理可得式(2)

$$^R_H T = {}^0_1 T \cdot {}^1_2 T \cdot \ldots \cdot {}^{n-1}_n T \quad (2)$$

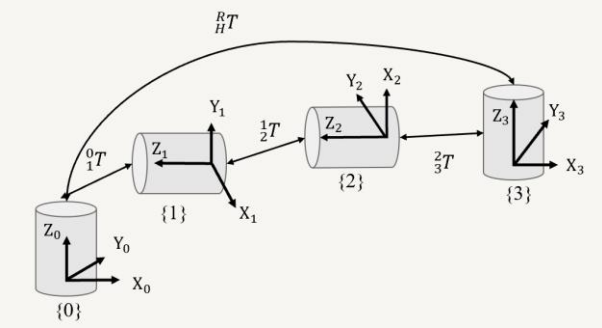


圖 3：齊次變換矩陣定義

- $^R_H T$ ：末端座標系相對於基座座標系的齊次變換矩陣。
- $^{n-1}_n T$ ：座標系{n}相對於{n−1}軸的齊次變換矩陣。
- {n}：第{n}軸坐標系。

2.2 Timoshenko 圓柱薄殼彈性失穩理論

本研究之機械手臂預期於水下環境作業，防水與抗壓設計為系統穩定性之核心。為確保密封艙體結構的完整性，本研究應用 Timoshenko 圓柱薄殼彈性失穩理論，針對圓柱型水密艙在極限負載情況下所能承受之臨界壓力進行理論計算。

根據 Timoshenko 理論，對於長度為 L、半徑為 R、厚度為 h 的薄壁圓柱殼，其承受外徑向壓力時的臨界壓力 P_{cr} 可由下式初步估算：

$$P_{cr} = \frac{Et}{R} \frac{1}{n^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi R}{L}\right)^2} \left[\frac{\left(\frac{\pi R}{L}\right)^4}{\left(n^2 + \left(\frac{\pi R}{L}\right)^2\right)^2} + \frac{t^2}{12R^2(1-\nu^2)} \left(n^2 + \left(\frac{\pi R}{L}\right)^2\right)^2 \right] \quad (3)$$

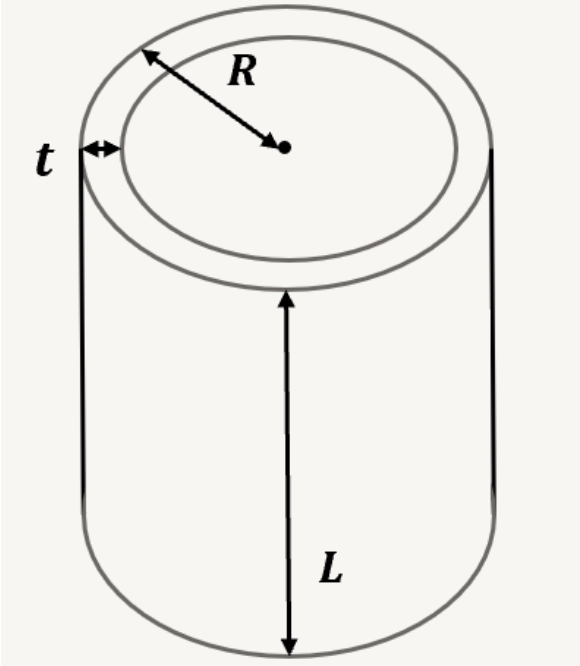


圖 4：圓柱體示意圖

- E 為材料之楊氏模數。
- ν 為泊松比。
- n 為挫曲波數。
- R 為圓柱殼平均半徑。

- t 為艙壁厚度。
- L 為圓柱殼之計算長度。

為驗證 n = 2 為最脆弱之失穩模式，本研究設定相同之幾何與材料參數，比較不同波數下之臨界壓力 P_{cr}。設定參數如下：

- 材料：鋁合金 6061-T6（E = 68.9 GPa, ν = 0.33）
- 幾何：半徑 R = 40 mm，長度 L = 300 mm，壁厚固定為 h = 2 mm

1. 當波數 n = 2 時：

$$P_{cr(n=2)} = \frac{Eh}{R} \cdot \frac{1}{4.0877}[0.00176 + 1250.7 \cdot (0.002)^2]$$

$$P_{cr(n=2)} \approx 8.42 \times 10^8 \times [0.00176 + 0.0050]$$

$$P_{cr(n=2)} \approx 5.69 \text{ MPa}$$

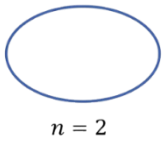


圖 5：波數 =2(橢圓形變)

2. 當波數 n = 3時：

$$P_{cr(n=3)} = \frac{Eh}{R} \cdot \frac{1}{9.0877}[0.00037 + 5417 \cdot (0.002)^2]$$

$$P_{cr(n=3)} \approx 3.79 \times 10^8 \times [0.00037 + 0.0216]$$

$$P_{cr(n=3)} \approx 8.33 \text{ MPa}$$

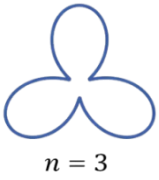


圖 6：波數 n = 3（三葉草形變）

根據上述計算結果顯示，在相同的幾何條件與壁厚下，波數 n = 2 之臨界壓力顯著低於 n = 3。故本研究將挫曲波數設定為 2。在圓柱薄殼理論中，n = 2 代表橫截面之橢圓化失穩，最易發生之變形模式。這意味著當環境壓力逐漸增大時，結構將優先在低階模態（n = 2）達到失穩臨界點，而非高階模態（如 n = 3）。因此，本研究將 n = 2 視為結構設計的約束條件，以確保水密艙在理論上最容易發生不可逆之形變的情況下，仍能保有充足的安全係數，從而建立高可靠度的設計基準。

2.3 力矩分析

O_1對 O_0之投影力矩(τ)可寫為：

$$\tau = L \cdot mg \qquad (4)$$

並進一步分解成：

$$\tau = L \cdot (mg\cos\theta) + L \cdot (mg\sin\theta)$$

其中 $(mg\sin\theta)$與 $\hat{z}_0$ 平行不產生力矩

最終可得：$\tau = L \cdot (mg\cos\theta)$

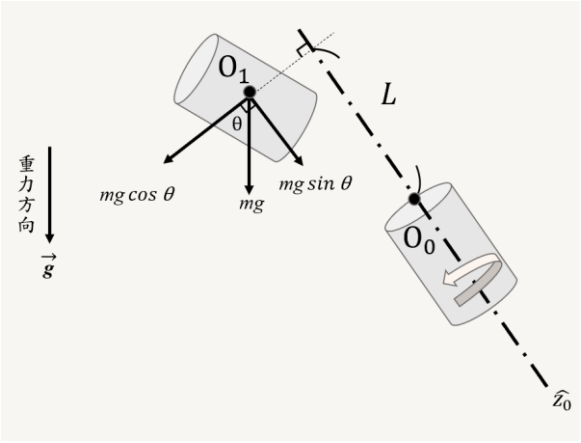


圖 7：力矩投影

- mg ：O_1所受重力
- L ：力臂長度
- O_0：馬達支點
- O_1：物體質心
- $\hat{z}_0$：馬達旋轉軸
- $mg\cos\theta$：法線分量
- $mg\sin\theta$：切線分量

2.4 資料集建立

本研究為進行後續的元件(元件包含馬達與減速機)選型優化與結構負載分析，開發了一套專

用的資料爬取系統，從各馬達與減速機廠商（如 Harmonic Drive, Maxon, Oriental Motor, Sensata 等）建立大規模的馬達與減速機的參數資料集。

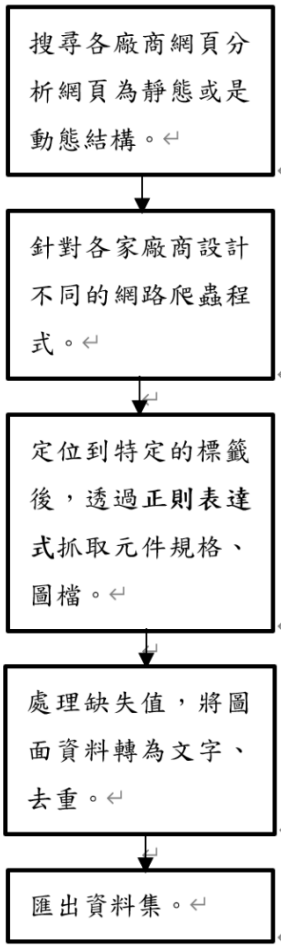


圖 8：資料集建立流程

系統採用基於 Python 的異步爬蟲架構，整合 Requests 與 Selenium 技術，以應對動態網頁渲染。由於各廠商之規格單位不一（如扭矩單位包含 Nm、mNm、kgf·cm 等），系統建立了一套資料處理方式：

單位統一：將所有扭矩數據轉換為標準單位 (Nm)，轉速轉換為 rpm，重量轉換為 kg。

特定規格抽取：透過規則運算式（Regex）精準識別規格資料、電壓、額定功率及減速比等核心參數。

資料去重：自動剔除重複型號與無效樣本，確保資料集之品質。

最終建立之資料集依據物理特性自動分類為「馬達」與「減速機」兩大子集。此資料集包含了數百筆組件之數據，作為輔助設計軟體的元件資料集。

2.1.5 設計流程

本研究採取系統化的迭代設計流程，將理論計算與自動化數據採集相結合，確保水下機械手臂在複雜環境下的性能與安全性。流程如下。

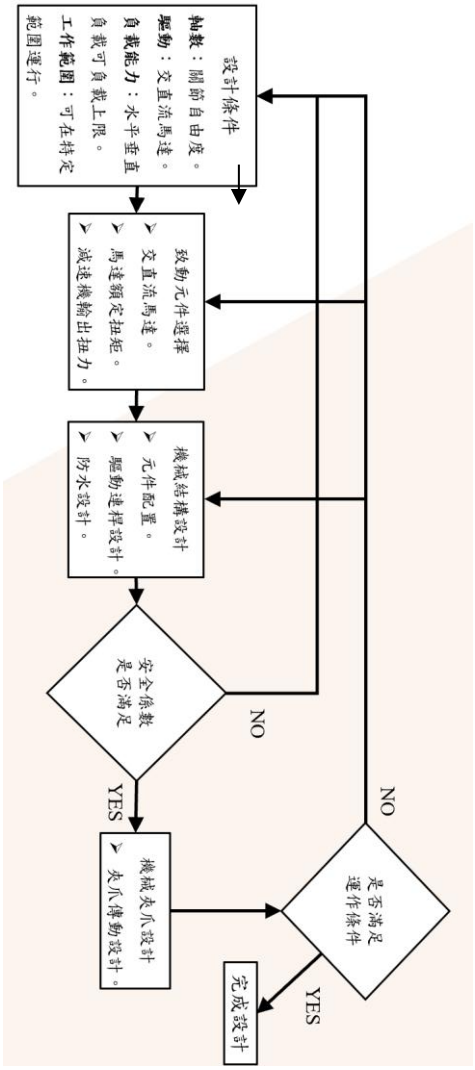


圖 9：機械手臂設計流程

在定義機械手臂的核心規格時，需首先根據水下作業的目標任務確立各項關鍵參數。在環境方面，必須明確作業深度以定義最大靜水壓力環境，並將其作為 Timoshenko 理論計算結構抗壓能力的輸入數值。同時需設定水平與垂直方向的負載能力，即機械手臂在作業時可提起或拉動的最大重量。在運動性能規劃上，則需根據預期的作業空間需求來設定各連桿長度與關節旋轉角度 ，並依據任務執行的複雜程度來定義適當的自由度與關節數量，以此確保手臂在特定水下環境中能達成預期的作業成效。

元件資料則來自 2.1.4 節所建構之自動化爬蟲，其篩選邏輯主要基於空間限制，考量水密艙內部有限的容置空間，演算法會自動過濾直徑 D

或長度 L 超出結構之組件，確保致動器與防水零件的適配。

在結構設計可分為，依據 DH 參數所定義之連桿坐標系，進行 CAD 零件建模。以及水密設計：針對圓柱型艙體進行結構優化，並配置防水軸承。

最終，透過理論與模擬對比：將 Timoshenko 薄殼理論計算結果與「Under Pressure」模擬工具進行交叉驗證。與安全係數評估：確認在最大作業深度與極限負載下，結構應力分佈均在安全係數範圍內。若產生無法承受之情形，應回溯至設計條件、制動元件選擇與機械結構設計重新進行設計。

2.6 選型演算法

本研究開發基於 Python 的自動化選型演算法，旨在將 2.1.1 至 2.1.5 節之運動學、力矩分析、結構抗壓理論及爬蟲資料集整合。透過軟體運算，可從數百項元件中快速遍尋出兼具性能與空間最優解之方案。

1. 演算邏輯與約束條件

選型系統透過以下三層篩選機制進行方案過濾：

- 力矩需求限制：

系統調用 2.1.3 節之力矩分析函數，計算各關節在最大負載工況下的靜態扭矩 τ_{static}。選型條件設定為：

$$\tau_{motor} \times i \times \eta \geq \tau_{static} \times S_f \quad (9)$$

（其中 i 為減速比、η 為傳動效率、τ_{static}為致動器所需扭矩、S_f 為安全係數）。

- 空間限制 ：

根據 2.1.2 節之水密艙內徑，演算法自動剔除直徑 D 大於艙體容許範圍之致動器。

- 選擇優先級：

在滿足上述條件的候選清單中，演算法優先選擇重量輕、扭矩大之元件，以達成機械手臂之輕量化目標。

三、GUI 介面與結果比較

3.1 GUI 介面設計

使用者在操作介面時，首先需輸入各項關鍵設計參數，這些數據將直接轉化為選型演算法的約束條件。在環境層面，需設定目標作業水深，以便演算法換算外部靜水壓力並結合安全係數進行計算；接著在機械規格上，需定義手臂的自由度與連桿幾何尺寸，並明確末端執行器的負載需求。最後，為了確保硬體安裝的適配，使用者必須定義水密艙的最大容許內徑，將其作為致動器外徑D的硬性約束，以確保組件在受限空間內仍保有充足的安裝空間 。

1. 設計目標參數

手臂軸數 (n)	−10	−	6	+	+10
工作水深 (m)	−10	−	10.0	+	+10
負載載重 (kg)	−10	−	0.5	+	+10
預設管件內徑(mm)	−10	−	40.0	+	+10
夾爪重量 (kg)	−10	−	0.5	+	+10
夾爪長度 (m)	−10	−	0.15	+	+10
減速比上限	−10	−	500.0	+	+10
減速比下限	−10	−	50.0	+	+10
最大容許外徑 (mm)	−10	−	55.0	+	+10
最小容許外徑 (mm)	−10	−	20.0	+	+10

圖 10：GUI 定義參數介面

3.2 設計與需求

本節針對水下機械手臂開發過程中的具體需求進行定義，並說明選型演算法在進行自動化運算時，所依循的邏輯判斷基準。

性能指標：此部分定義系統「必須達成」的量化目標，不同於 GUI 的輸入，系統設計以極大化負載重量比為目標。選型邏輯會優先匹配重量輕且連續扭矩高的馬達組合，以減少連桿自身的慣性負載。對於需要著重考慮動態慣量的J_1：除了靜態力矩平衡，需求中亦包含對加速度產生的慣性力矩補償。系統需確保所選之致動器在 120 % 的額定負載下，仍具備足夠的啟動轉矩。

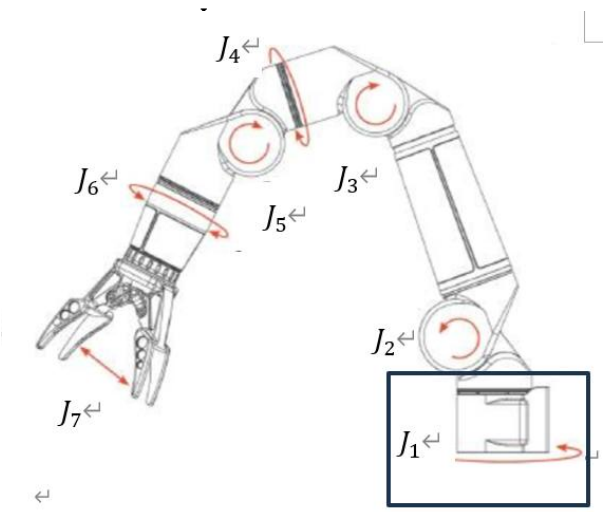


圖 11：機械手臂示意圖(Reach Robotics, Bravo 7)

水密與抗壓邊界：根據 2.1.2 節之結論，定義具體的需求數值，波數 =2 代入演算法運算公式，演算法將作業水深轉換為外部壓力值 P_{cr}，並要

求所選組件必須預留 3cm，確保有足夠的空間可以安裝防水結構。

3.3 扭矩計算與選型結果

當系統完成任意關節的運算後，介面將即時呈現該關節的適配方案與相關幾何需求。在型號推薦方面，演算法會自動篩選並顯示符合力矩需求與空間限制的最佳馬達與減速機組合 。

當演算法存在多方案時，會透過額定扭矩 T_{total}、組件總重W_{total}、外徑D_{outer}進行評分。分數結果將以降冪形式呈現於 GUI 介面。

$$Score = \frac{T_{rated}}{W_{total} \times D_{outer}} \quad (10)$$

本研究將末端酬載設定為 1 kg，並結合第 2.1.3 節 之靜力分析模型，針對機械手臂各關節軸向之負載進行計算。

透過演算法模擬機械手臂在最差情況下的運動姿態，計算出各軸所需承擔最大力矩。表 3.1 詳列了各關節（J_1 至 J_6）在特定水密艙長度限制下之最小力矩需求：

表 3.1 各關節軸向力矩需求與空間限制

	水密艙長度 (m)	負擔力矩 (Nm)	備註
J_6	0.165	5.06	與J_5共用空間
J_5	0.165	5.33	
J_4	0.16	8.54	
J_3	0.192	14.27	與J_2共用空間
J_2	0.192	22.49	
J_1	0.159	14.375	

由計算結果可知，各軸力矩需求隨力臂長度與結構配置呈現明顯差異。其中，J_2 軸受整體力臂延伸之影響，需承擔最大之靜態力矩（22.49 Nm）。J_1 軸的選擇受到轉動慣量以及水平負載能力影響。而上述計算所得之數值，將作為 2.1.6 節 選型演算法之核心約束條件，用以篩選出符合扭矩需求且體積適用之馬達與減速機模組。

致謝：本研究承教育部補助，計畫名稱：國家重點領域頂尖研究中心-科學導向海洋科技研發中心

謝誌

謝謝女朋友庭儀邊吃飯糰還邊幫我校稿。

參考文獻

[1] 洪敏偉，水下機械手臂之設計與研究，碩士論文，國立中山大學機械與機電工程學系，臺灣高雄，2006 年
[2] S. Sivčev, J. Coleman, E. Omerdić, G. Dooly, and D. Toal, “Underwater manipulators: A review,” Ocean Engineering, vol. 163, pp. 431-450, 2018.
[3] Reach Robotics, Bravo 7 Integration Manual, p. 12. [Online]. Available: https://reachrobotics.com/wp-content/uploads/2020/11/Bravo-7-Integration-Manual.pdf
[4] 東方馬達，「步進馬達的特徵與構造」。[Online]. Available: https://www.orientalmotor.com.tw/tw-zh/tech/reference/stepping-motor01
[5] Anaheim Automation, “Brush DC Motor Guide.” [Online]. Available: https://anaheimautomation.com/blog/post/brush-dc-motor-guide
[6] S. Shim and J. Jun, “Development of underwater robotic arm and leg for seabed exploration,” in Proc. IEEE, 2024.
[7] C. Klehm, M. D. Williamson, L. C. Bement, and B. Bethke, “Remote rugged field scenarios in archaeology and field sciences: Object avoidance and 3D flight planning with sUAS photogrammetry,” Remote Sensing, vol. 16, no. 8, p. 1418, 2024.
[8] Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill.

以 ROS2 為基礎之影像輔助多重輸入機械手臂操作介面開發

李育承[1]　王兆璋[2]

摘要

海洋能源開發、海底電纜維護、海洋探測與地質採樣等作業，常以水下遙控無人載具(Remotely Operated Vehicle; ROV)搭載機械手臂執行任務。然而，水下環境有低能見度、海流擾動、操作員視角受限等現象，這此因素會增加操作負擔外且降低作業與控制效率。為改善上述問題，本研究以 Reach Robotics 所開發之 4 自由度水下機械手臂 Bravo 5 作為開發平台，建立一套以 ROS 2(Robot Operating System 2)為通訊核心之影像輔助多輸入操作介面。我們整合主從搖桿(Master arm)與軌跡球(Track Ball)作為輸入裝置，並提供手臂即時姿態，以提升操控直覺性與作業效率，縮短學習時程。ROS2 採用 Publisher/Subscriber 通訊機制之分散式架構，整合所有需要交換資料的元件或子系統以節點(Node)的形式進行控制指令與系統資料之交換。為整合不同輸入裝置之控制需求，本研究進一步建立手臂之運動學模型，作為多重輸入操作介面之共通控制基礎。首先，利用標準 Denavit-Hartenberg(DH)參數定義手臂各連桿(Link)在空間中的幾何關係，並推導各關節(Joint)之齊次變換矩陣(Homogeneous transformation matrix)。透過順向運動學(Forward kinematics)求得末端執行器在空間中的姿態與位置，並利用 Jacobian 矩陣求得末端執行器速度與關節角速度之映射關係。基於此，Master arm 採主從控制模式，將操作端從動桿件對應至手臂各關節之運動，使操作員可直接進行姿態調整與關節控制。相較之下，軌跡球則是輸入控制末端執行器之移動增量(Δx、Δy、Δz)，使操作員可更直覺控制手臂末端之運動，進而提升操作靈活性。目前本研究已完成操控端與水下端之通訊架構、多重輸入裝置控制、機械手臂運動學推導以及即時姿態顯示介面之整合，後續將進一步針對不同輸入裝置進行使用者體驗實驗，並以特定任務完成時間為指標進行評估，以資後續改善。

關鍵詞：水下機械手臂、ROS2、Jacobian、OpenGL

Development of an Image-Assisted Multi-Input Robotic Arm Operation Interface Based on ROS2

YU-CHENG LEE[1]　CHAU-CHANG WANG[2]

ABSTRACT

Marine energy development, subsea cable maintenance, ocean exploration, and geological sampling are often carried out using remotely operated vehicles (ROVs) equipped with robotic manipulators. However, underwater environments are characterized by low visibility, ocean current disturbances, and limited operator viewpoints. These factors not only increase the operator's workload but also reduce operational and control efficiency.To address these issues, this study adopts the 4-DOF underwater manipulator RB-5001, developed by Reach Robotics, as the development platform, and establishes an image-assisted multi-input operation interface with ROS 2 (Robot Operating System 2) as the communication core. A master arm and a trackball are integrated as input devices, while real-time manipulator posture is also provided to improve control intuitiveness, enhance

[1] 國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 教授

operational efficiency, and shorten the learning period.ROS 2 employs a distributed architecture based on the Publisher/Subscriber communication mechanism, integrating all components or subsystems that require data exchange in the form of nodes to facilitate the transmission of control commands and system data. To unify the control requirements of different input devices, this study further establishes the kinematic model of the manipulator as the common control foundation for the multi-input operation interface.First, the standard Denavit–Hartenberg(DH) parameters are used to define the geometric relationships of each manipulator link in space, and the homogeneous transformation matrix of each joint is derived. Through forward kinematics, the pose and position of the end effector in space can be obtained, while the Jacobian matrix is used to derive the mapping relationship between the end-effector velocity and the joint angular velocities.Based on this framework, the master arm adopts a master–slave control mode, in which the motion of the operator-side linkage is mapped to the motion of each joint of the manipulator, enabling the operator to directly perform posture adjustment and joint control. In contrast, the trackball is used to input the incremental motion of the end effector (Δx、Δy、Δz), allowing the operator to control the end-effector movement more intuitively and thereby improving operational flexibility.

At present, this study has completed the integration of the communication architecture between the control side and the underwater side, multi-input device control, manipulator kinematic derivation, and the real-time posture display interface. In the next stage, user experience experiments will be conducted for different input devices, and task completion time for specific tasks will be used as the evaluation metric to support further system improvement.

Keywords: Underwater manipulator; ROS 2; Jacobian; OpenGL

一、緒論

近年海洋開發技術需求增加，水下作業如海底電纜維護、海洋探測及地質採樣等，水下遙控無人載具(Remotely Operated Vehicle; ROV)具備遠端操控與高機動性等特性。ROV 搭載水下機械手臂除了可以執行高精度的作業之外，並且協助操作員在水下複雜環境下完成作業。

然而，水下環境相較於陸地環境具有更高的複雜性與挑戰。首先，水下能見度低，使操作員難以判斷手臂與目標物之相對位置。其次，海流擾動會影響 ROV 與手臂的穩定性，此外，操作員會因為視野受限而影響判斷。這此因素會造成操作員要進行很多儀表判讀與操作手臂，負擔很大，也容易影響作業效率。因此，如何提升操控直覺性與作業效率成為水下機械手臂系統的研究課題。

為改善上述問題，本研究以 Reach Robotics 所開發之 Bravo 5 作為開發平台並進一步建立運動學模型。首先，利用標準 DH 參數定義各連桿(Link)在空間上的幾何關係，並推導出齊次變換矩陣(Homogeneous Transformation Matrix)，透過正運動學(Forward Kinematics)分析求得末端執行器(End-Effector)相對於基座(Base)之位置與姿態。進一步利用 Jacobian 矩陣求得末端執行器速度與關節角速度之映射關係。我們整合主從搖桿(Master Arm)，如圖 1 所示，與軌跡球(Track Ball)作為輸入裝置，如圖 2 所示。



圖 1：主從搖桿



圖 2：軌跡球

主從搖桿是將操作端從動桿件對應至手臂各關節之運動。使操作員可直接進行搖桿姿態調整以控制關節。軌跡球則是輸入控制末端執行器之移動增量，以較直覺的方式控制手臂末端位置變化。本研究使用 OpenGL 建模手臂之模型，使操作員在水下低能見度情況下能夠看到手臂的姿態。並建立使用者介面，整合多重視角影像與 OpenGL，提供操作員完整的操控資訊。

本文第二章說明研究方法，包含 ROS 2 架構、DH 參數與順向運動學，第三章介紹手臂規格與輸入裝置介紹，第四章說明實驗設計與實驗結果，第五章總結本研究之成果。

二、研究方法

機器人作業系統(Robot Operating System 2; ROS 2)為用於機器人系統開發的開源軟體平台。提供模組化結構、統一通訊架構，整合所有需要交換資料的元件或子系統以節點(Node)的形式進行控制指令與系統資料之交換。以自走車為例如圖 3 所示，超音波感測器節點、避障節點、導航節點與馬達控制節點以 Publisher/Subscriber 機制進行通訊如圖 4 所示。

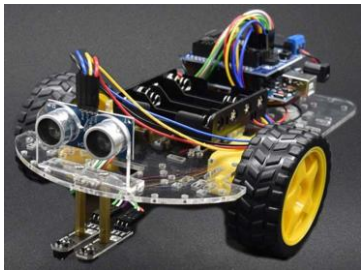


圖 3：自走車

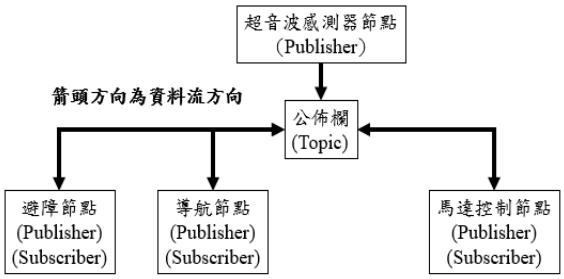


圖 4：自走車通訊架構示意圖

在 ROS 1 架構下，各節點之間主要以 TCP/IP 進行資料傳輸，提供資訊的節點為 Publisher，其發送資訊至公佈欄(Topic)，而需要該資訊的節點為 Subscriber，並從公佈欄接收所需訊息。節點之間的通訊統一由 Master 負責管理，Master 可能會因為節點數量增加導致資料傳輸延遲甚至崩潰，所有子系統也會停止運作，此集中式架構在手臂控制系統上帶來不便。為了改善上述問題，ROS 2 採用分散式架構與去中心化方式，以提升系統的即時性與穩定性。各節點間通訊連線不再依賴 Master 進行管理，去中心化的方式使系統不再有單點崩潰的問題，保留 Publisher/Subscriber 機制，此方式提升了手臂控制系統的即時性與穩定性。基於上述優點，本研究採用 ROS2 作為通訊核心，將各功能以模組化方式呈現，並整合多輸入操作介面。

Denavit-Hartenberg(DH)參數描述手臂各連桿(Link)在空間上的幾何關係，且前提為串聯機構。其使用 4 個參數α_i、a_i、θ_i、d_i來描述，具體定義如下：

1. Z_{i-1}：第i個關節的旋轉軸或平移軸方向，政方向依右手定則決定。
2. X_i：從Z_{i-1}軸指向Z_i之間的公垂線方向。
3. Y_i：已知Z_i與X_i，可根據右手定則決定方向。
4. α_i：以X_i軸為旋轉軸，Z_{i-1}與Z_i之間的夾角。
5. a_i：沿著X_i軸從Z_{i-1}軸到Z_i軸的距離。
6. θ_i：以Z_{i-1}為旋轉軸，從X_{i-1}軸到X_i軸的夾角。
7. d_i：沿Z_{i-1}軸，從座標系$i-1$原點到Z_{i-1}軸與X_i交點的距離。

其中i為關節，藉由這些定義可求得 Bravo 5 機械手臂座標如圖 5 所示與 DH 參數表如表 1 所示。

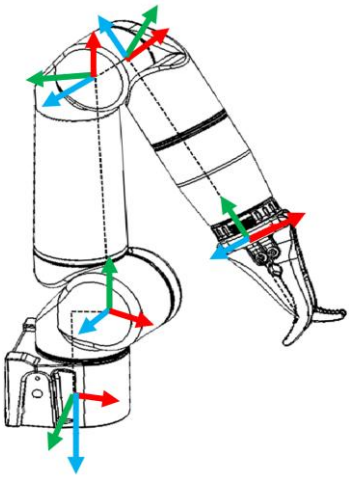


圖 5：Bravo 5 機械手臂座標

表 1：DH 參數表

Joint(i)	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1+\pi$	-117.5	46	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\frac{\theta_2-\pi}{2+\theta_s}$	0	a_2	0
3	$\frac{\theta_3-\pi}{2-\theta_s}$	0	40.8	$-\frac{\pi}{2}$
4	θ_4	-224.2	0	$-\frac{\pi}{2}$

其中：$\theta_s=tan^{-1}\left(\frac{5.2}{290.77}\right)$，$a_2=\sqrt{5.2^2+290.77^2}$

根據標準 DH 參數可定義出齊次變換矩陣(Homogeneous Transformation Matrix)如式(1)所示，其展開後為 4×4 之矩陣如式(2)所示。根據已建立的 DH 參數表，可推導出從基座座標系到末端座標系之順向運動學。

$$ {}^{i-1}_{i}T = R_{Zi-1}(\theta_i)\cdot T_{Zi-1}(d_i)\cdot T_{Xi}(a_i)\cdot R_{Xi}(\alpha_i) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathrm{c}(\theta_i) & -\mathrm{s}(\alpha_i)\,\mathrm{c}(\alpha_i) & \mathrm{s}(\alpha_i)\,\mathrm{s}(\alpha_i) & a_i\mathrm{c}(\theta_i) \\ \mathrm{s}(\theta_i) & \mathrm{c}(\alpha_i)\,\mathrm{c}(\alpha_i) & -\mathrm{c}(\alpha_i)\,\mathrm{s}(\alpha_i) & a_i\mathrm{s}(\theta_i) \\ 0 & \mathrm{s}(\alpha_i) & \mathrm{c}(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

註：$c\theta_i$：$cos\theta_i$，$s\theta_i$：$sin\theta_i$，$c\alpha_i$：$cos\alpha_i$，$s\alpha_i$：$sin\alpha_i$

透過 Jacobian 矩陣求得末端執行器速度與關節角速度之映射關係如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其目的是求出θ，但$J_{3\times4}$不為方陣，無法求解，因此利用廣義逆矩陣求解，推導如下：

$$\Delta p_{3\times1} = J_{3\times4} \cdot \Delta\theta_{4\times1} \quad (8)$$

$$(J_{3\times4})^T \cdot \Delta p_{3\times1} = (J_{3\times4})^T \cdot J_{3\times4} \cdot \Delta\theta_{4\times1} \quad (9)$$

$$(J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot \Delta p_{3\times1} = (J^T \cdot J^{-1})^{-1} \cdot (J^T \cdot J) \cdot \Delta\theta_{4\times1} \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{4\times1} = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot \Delta p_{3\times1} \quad (11)$$

三、機械手臂規格與輸入裝置介紹

本研究以 Reach Robotics 所開發之 4 自由度水下機械手臂 Bravo5 作為開發平台，如圖 6 所示。其為串聯式機械手臂，由基座、4 個旋轉關節與末端執行器(End-Effector)所組成，可應用於抓取目標物、設備定位與安裝、管線清潔維護等水下作業。詳細規格如表 2 所示：



圖 6：Bravo 5

表 2：手臂規格

自由度	4
全伸展範圍	750 mm
動態全伸展舉升	12 kg
最大軸向負載	100 kg
基座關節扭矩	110 Nm
腕關節扭矩	20 Nm
夾爪夾持力	80 kg
空氣重	7.5 kg
水中重	4.0 kg
末端執行器重複精度	<1 cm
耐水深	450 m

研究使用 Reach Robotics 開發之主從搖桿(Master Arm)，與 3D Connextion 開發之軌跡球(Track Ball)作為輸入裝置，如圖 7 與圖 8 表示。

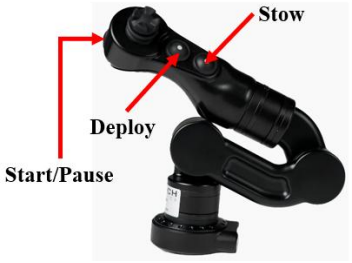


圖 7：主從搖桿

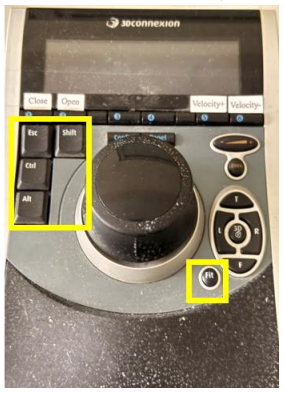


圖 8：軌跡球

首先，主從搖桿採主從控制模式，將操作端從動桿件對應至手臂各關節之運動。為了提升重複性任務中的操作效率，搖桿設計多個快捷功能，定義如下：

1. Start/Pause：啟動或暫停手臂的連線與操控狀態。
2. Deploy：快速讓手臂到達工作姿態。
3. Stow：快速讓手臂收回至安全姿態。

軌跡球則是輸入控制末端執行器的移動增量(Δx、Δy、Δz)，並將手臂的平移自由度與旋轉、夾爪開合等功能區分，優點是減少維度耦合(dementional coupling)的產生，軌跡球控制面版按鈕定義如下：

1. ESC：第 4 軸正轉
2. Shift：第 4 軸反轉
3. Ctrl：夾爪展開
4. Alt：夾爪閉合
5. Fit：手臂回歸至初始姿態。

四、實驗設計與結果

為評估不同輸入裝置操控手臂的效率差異，本研究以主從搖桿與軌跡球兩種操作方式進行分析。實驗於手臂可以運作範圍內設定位置，如圖 9 與圖 10 所示，並定義兩項任務如下：

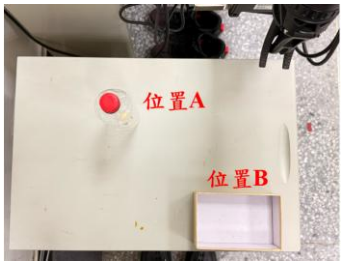


圖 9：實驗任務 1

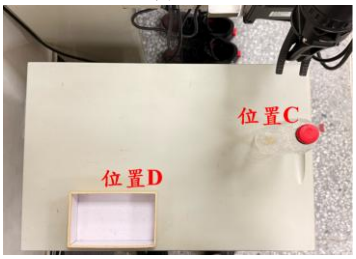


圖 10：實驗任務 2

任務 1：將目標由位置 A 拾起，移動至 B 處並放置，任務 2：將目標物由位置 C 拾起，移動至至 D 處並放置，操作員分別以 master arm 與軌跡球進行手臂操控上述任務重複 5 次，當手臂各關節姿態產生明顯位移時開始計時，任務完成後按下收納建使手臂自動回到初始姿態時結束計時，為確保條件一致，master arm 透過快捷鍵設定初始姿態，而軌跡球則透過控制面板上的按鈕定義初始姿態。以任務執行所需時間當作主要指標進行評估。

首先，建立船端與水下端之通訊架構，箭頭方向為資料方向，如圖 11 所示，並透過乙太網路進行資料傳輸。在通訊架構上建立兩端獨立的區域網路，並透過 RJ45 連接，控制系統以 ROS2 作為通訊核心，整合各模組之間的資料傳輸。

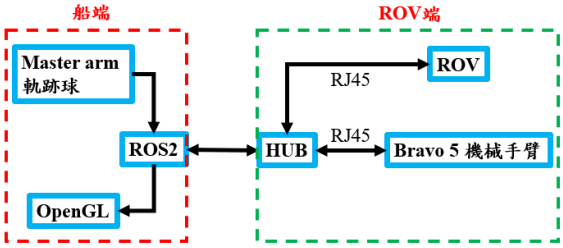


圖 11：船端與水下端通訊架構圖

在船端控制端，操作員以主從搖桿或軌跡球作為輸入裝置，將操作從動桿件意圖發布至 Topic。同時，利用 opengl 建立手臂的模型，並渲染各關節即時姿態，使操作員能夠即時掌握手臂運動情形。在水下 ROV 端，ROV 與手臂透過集線器(hub)與船端連線，船端發送的控制意圖經由電纜傳輸至水下端後，手臂控制節點作為 Subscriber 接收指令並作動。綜合上述，本實驗可實現實際船端與水下端之通訊與控制，作為輸入裝置效率比較實驗的前提。

為提升操作員於水下複雜環境下的操作效率，本研究設計一套整合多重視角之使用者操作介面，如圖 12 所示。介面整合第一人稱視角、第三人稱視角、手臂關節資訊及手臂模型，提供操作員即時且直觀的操作回饋。在影像方面，第一人稱視角攝影機安裝於手臂第 3 軸與第 4 軸之間，第三人稱視角模擬 ROV 的視角，透過 raspberry pi 5 搭載 CSI 攝影機呈現影像，第三人稱視角與手臂之相對位置為右手位置，透過雙視角的影像整合，可提升操作員視野受限的問題。手臂端發布各關節及時姿態至 Topic，操作端接收資料後以長條圖形呈現各關節角度資訊。此外，由於水下低能見度的特性，利用 opengl 建立手臂之模型使操作員能夠及時觀察手臂的姿態，有助於在視野受限的情況下透過影像輔助判斷手臂的姿態與運動方向。

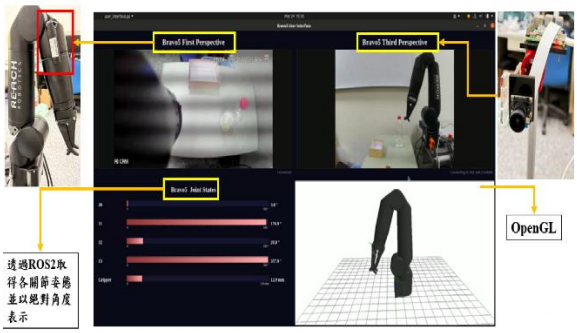


圖 12：使用者介面

本研究針對主從搖桿與軌跡球的操作效率比較實驗結果如表 3 所示，任務完成時間以秒為單位。整體操作效率 master arm 的表現優於軌跡球，進一步觀察數據，測試者 1 與測試者 2 使用軌跡球的平均完成時間優於 master arm，然而，測試者 3 與測試者 4 則在 master arm 的表現優於軌跡球。此外，隨著操作次數增加，所有測試者的任務完成時間普遍皆呈現下降趨勢，根據使用者的操作回饋，若長時間使用 master arm 操控機械手臂造成手部疲勞，未來可針對長時間的操作任務進行評估。

表 3：任務完成時間數據

	master arm		軌跡球	
	任務1	任務2	任務1	任務2
測試者1	143	107	76	112
	73	76	50	71
	63	58	43	51
	47	39	42	36
	48	35	38	40
測試者2	71	104	68	57
	61	56	60	59
	52	52	49	43
	42	41	43	41
	43	47	42	36
測試者3	94	91	119	91
	41	93	73	94
	35	40	61	50
	27	33	50	44
	26	30	40	46
測試者4	65	47	75	87
	43	51	70	70
	31	41	61	59
	33	30	47	40
	32	27	50	45
平均時間	53	40	57	58

五、結論

本研究提出一套以 ROS2 為通訊核心之影像輔助多重輸入操作介面，整合主從搖桿與軌跡球兩種輸入裝置，並結合多視角影像、各關節及時姿態與 OpenGL 顯示手臂模型，以提升操作員在水下複雜環境中的操控直覺性與作業效率，根據實驗結果顯示主從搖桿於整體操作效率上優於軌跡球，且具有較佳的學習取率，而軌跡球在部分測使者操作下仍有操作優勢。此外，目前 OpenGL 僅呈現手臂各關節及時姿態，尚未顯示目標物資訊，未來預計整

合 Opencv，進行目標物的偵測，並整合至使用者介面，進一步可模擬更複雜的操作環境進行驗證。

參考文獻

[1] Sivčev, S., Omerdić, A. T., Dooly, G., Coleman, J., O'Kane, B., & Toal, D. (2018). " *Underwater manipulators: A review*". Ocean Engineering, vol. 163, p431–450.

[2] G. Limin and P.-L. Yen, "*Utilization of a 3D Mouse and Motion Scaling for Operation Enhancement of a Telemanipulator*," International Journal of iRobotics, vol. 7, no. 3, pp. 9–14, 2024.

[3] S. Baklouti et al., " *On the improvement of ROS-based control for teleoperated yaskawa robots*, " Applied Sciences 11.16 (2021): 7190.

[4] Giovanny Limin, and Ping-Lang Yen, "*Enhanced Teleoperated Manipulator Control with 3D Mouse and Dynamic Motion Scaling*," International conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems, 2024.

[5] T.Yoshikawa, "*Manipulability of Robotic Mechanisms*,"International Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, June 1985

拖曳式載具海床調查作業之不同影像品質估算方法比較

陳睿騰[1]　周佑誠[2]

摘要

拖曳式載具(Deep-towed vehicle, DTV)常用於海床光學影像調查。然而在實際海域作業中，影像品質常受到載具離底高度、水體混濁度與照明條件等因素影響。目前船上研究人員多依賴人工目視方式判斷影像品質，並據此進行載具離底高度之調整，缺乏客觀且可量化的評估方法。本研究以國立中山大學海下科技研究所開發之拖曳式載具於台灣周遭海域取得之海床影像資料為基礎，建立影像品質估算流程並比較不同估算方法之性能。首先計算多項影像品質參數，包括色彩、灰階、銳利度與對比度等影像品質參數。接著由多位評分者依據絕對類別評分量表(Absolute category rating, ACR)對影像進行主觀評分。在影像品質評分整合方式上，本研究比較兩種方法：第一種方法直接以評分平均值作為影像品質評分；第二種方法則利用模糊推論系統(Fuzzy inference system, FIS)，將評分之平均值、標準差與全距作為輸入，以推論影像之整體品質評分。其後利用 Pearson 相關分析評估影像品質參數與影像品質評分之關聯性，並依據相關程度選取參數以建立影像品質估算模型。在影像品質估算模型方面，本研究比較多元線性回歸(Multiple linear regression, MLR)與 XGBoost (Extreme gradient boosting)模型之估算性能，並以相關係數作為模型性能指標。實驗結果顯示，在多數參數組合下，XGBoost 模型相較於 MLR 具有較高之相關係數。此外，在部分情境下，結合 FIS 與 XGBoost 可進一步提升估算表現，特別是在使用較少輸入參數時。本研究之結果可作為未來拖曳式載具海床影像調查作業中自動化影像品質評估與離底高度調整之參考。

關鍵詞：拖曳式載具、海床影像品質估算、模糊推論系統、XGBoost

Comparison of Image Quality Estimation Methods for Seafloor Imaging Surveys Using Deep-Towed Vehicles

Jui-Teng Chen [1]　Yu-Cheng Chou[2]

ABSTRACT

Deep-towed vehicles (DTVs) are widely used for seafloor imaging surveys. In practice, image quality is commonly assessed by visual inspection, which is used to adjust the vehicle altitude, but lacks an objective and quantitative evaluation method. This study develops an image quality estimation framework based on seafloor images collected by a DTV. Image quality parameters, including color, grayscale, sharpness, and contrast, are computed, and subjective scores are obtained using the Absolute Category Rating (ACR) method. Two rating integration approaches are considered: the Mean Opinion Score (MOS) and a Fuzzy Inference System (FIS)-based score (FIS_MOS), which incorporates the mean, standard deviation, and range of ratings. Pearson correlation analysis is used to select relevant parameters, and estimation models are constructed using Multiple Linear Regression (MLR) and XGBoost. The performance of different combinations of rating integration methods and models is evaluated using correlation coefficients. Experimental results show that XGBoost generally achieves higher correlation than MLR under most parameter combinations. In addition, the combination of FIS_MOS and XGBoost provides improved performance in certain cases, particularly when using fewer input parameters. The proposed approach can support automated image quality assessment and assist operational decisions in DTV-based seafloor imaging surveys.

Keywords: Deep-towed vehicle; Seafloor image quality estimation; Fuzzy inference system; XGBoost

[1] 國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 副教授

一、前言

拖曳式載具（Deep-towed vehicle, DTV）常用於海床光學影像調查，可提供高解析度之海床表面資訊，並支援海床地形、地質特徵及底棲環境之分析[1-3]。相較於聲學感測技術，光學影像能呈現更細緻之海床紋理與目標特徵。然而，在實際海域作業中，影像品質常受到載具離底高度、水體混濁度、懸浮粒子及照明條件等因素影響，進而影響影像清晰度與特徵可辨識性，並降低後續資料判釋可靠性。

國立中山大學海下科技研究所多年來自主開發多款拖曳式載具，並應用於台灣周遭海域之海床光學影像調查與海床探勘任務，累積大量實海域影像資料與操作經驗。實際進行拖曳式載具海床影像調查時，研究船通常以低速拖行載具，研究人員可於船上即時監看載具透過電纜回傳之海床影像，並依賴人工目視方式判斷影像品質，透過收放電纜調整載具離底高度，以取得較適合判釋之影像資料，但此判斷方式仍缺乏客觀且可量化之評估方法。

圖 1 顯示拖曳式載具於海域作業時，不同離底高度下所取得之影像差異。當載具離底高度較高時，影像中難以清楚觀測海床表面；在降低離底高度後，海床紋理與目標特徵之可辨識性則明顯提升。此結果顯示，影像品質與載具離底高度之間具有關聯性。

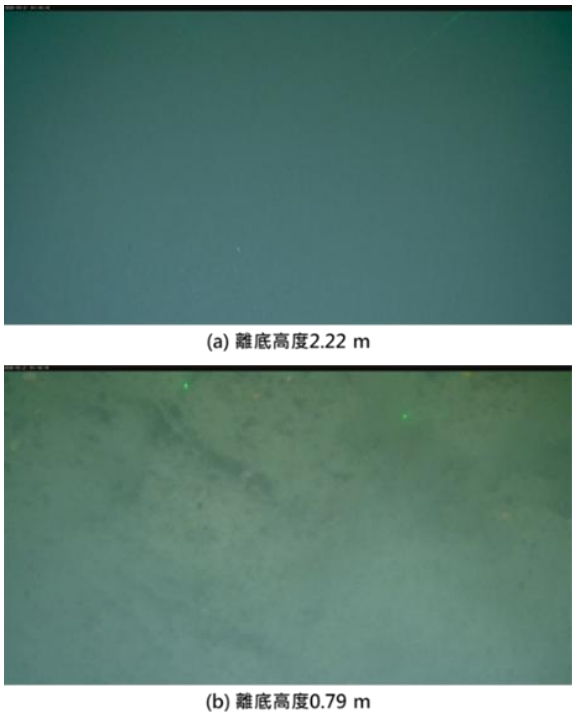


圖 1：載具離底高度對海床影像品質之影響

近年來，影像品質評估（Image quality assessment, IQA）方法已被廣泛應用於影像處理與電腦視覺領域，用以建立影像品質之客觀指標[4]。若能建立一套與人眼感知具有良好對應關係之影像品質估算方法，將有助於拖曳式載具作業中影像品質之即時評估，並作為調整載具離底高度之參考依據。

基於上述背景，本研究以本團隊利用拖曳式載具於台灣周遭海域所取得之海床影像資料為基礎，建立影像品質估算流程並比較不同方法之性能。首先計算多項影像品質參數（色彩、灰階、銳利度與對比度），並由多位評分者依據絕對類別評分量表（Absolute category rating, ACR）進行主觀評分。在影像品質評分整合方式上，本研究比較平均意見分數（Mean opinion score, MOS）與模糊推論系統（Fuzzy inference system, FIS）所產生之模糊意見分數（FIS_MOS）。其後，透過 Pearson 相關分析選取與主觀評分具有較高關聯性之影像品質參數，並分別採用多元線性回歸（Multiple linear regression, MLR）與 XGBoost[5]建立影像品質估算模型。本研究旨在比較不同影像品質評分整合方式與不同預測模型之估算表現，並探討其於拖曳式載具海床影像調查作業中之應用潛力。

二、海床影像品質估算方法

本研究建立海床影像品質估算流程，首先計算多項影像品質參數，並透過主觀評分取得平均意見分數（MOS）；進一步利用模糊推論系統（FIS）將 MOS 轉換為模糊意見分數（FIS_MOS）。其後，透過 Pearson 相關分析選取具顯著關聯之影像品質參數，並分別採用多元線性回歸（MLR）與 XGBoost（XGB）建立影像品質估算模型，最後以測試資料評估模型之預測效能。

2.1 影像品質參數

本研究以 CIELAB 色彩空間描述影像像素特性，每一像素表示為 $I_i = [L_i\ a_i\ b_i]^T, i = 1, 2, \cdots, N$。影像品質參數共 24 個並分為四類：

(1) 色彩度參數：描述 a*與 b*通道之平均值與標準差
(2) 灰階參數：灰階影像之平均值與標準差
(3) 銳利度參數：以 Sobel 邊緣偵測結果計算區塊強度變化
(4) 對比度參數：利用區塊像素差異計算局部對比程度

上述參數作為後續相關性分析與模型建立之輸入變數。

2.2 主觀評分與平均意見分數

本研究採用絕對類別評分量表（ACR）進行主觀評分，共有九位評分者參與每張影像之評分，評分等級為 1 至 5 分。

平均意見分數（MOS）定義如式(1)：

$$MOS = \frac{1}{P}\sum_{i=1}^{P} R_i \qquad (1)$$

其中，P 為評分者人數，R_i 為第 i 位評分者對該影像所給予之評分。

2.3 模糊推論系統

為考量評分分布特性，本研究採用模糊推論系統（FIS）整合主觀評分資訊。系統以 MOS 之平均值、標準差與全距作為輸入變數，輸出為影像品質評分（FIS_MOS）。

各輸入變數分為「低、中、高」三個模糊集合，輸出分為「非常低、低、中、高、非常高」五個等級。透過規則庫與解模糊程序，可將模糊輸出轉換為單一數值，以反映影像品質之主觀感知。

2.4 影像品質參數之相關性分析

本研究採用 Pearson 相關係數分析影像品質參數與主觀評分之關聯性，其定義如式(2)：

$$r_{y,\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{p}(y_i-\bar{y})(\alpha_i-\bar{\alpha})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{p}(y_i-\bar{y})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{p}(\alpha_i-\bar{\alpha})^2}} \quad (2)$$

其中，y_i為第 i 張影像之 MOS 或 FIS_MOS，$\bar{y}$為p張影像之 MOS 或 FIS_MOS 的平均值；α表示某一影像品質參數，α_i為第 i 張影像在該影像品質參數上的數值，$\bar{\alpha}$為該影像品質參數於p張影像中的平均值；p為影像數量。本研究依相關係數排序選取參數，作為後續模型建立之依據。

2.5 影像品質估算模型

(1) 多元線性回歸

多元線性回歸（MLR）模型用以描述影像品質參數與主觀評分之線性關係，其形式如式(3)：

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{q}\beta_i x_i \quad (3)$$

其中，x_i為選取之影像品質參數。

(2) XGBoost

XGBoost（XGB）為基於梯度提升之集成學習方法，透過多棵決策樹逐步擬合殘差，以建立影像品質與輸入參數之非線性關係。其目標函數包含損失函數與正則化項，以提升模型之泛化能力[5]。

2.6 影像品質估算方法之性能指標

本研究以 Pearson 相關係數作為影像品質估算模型之性能指標，評估模型預測結果與主觀評分之關聯性。評估方式分為三個層面說明如下。

(1) MOS 為標準之模型性能評估

在 MOS 為標準答案之情境下，每張測試影像皆對應一 MOS 值。對於任一影像品質估算模型（MLR 或 XGB），將測試影像之影像品質參數輸入模型，取得對應之 MOS 估算值。接著，將所有測試影像之估算值與其 MOS 標準答案進行 Pearson 相關分析，得到相關係數，作為該模型之性能指標。透過比較不同模型（MLR 與 XGB）於此情境下之相關係數，可評估不同模型在 MOS 定義下之估算能力。

(2) FIS_MOS 為標準之模型性能評估

在 FIS_MOS 為標準答案之情境下，每張測試影像皆對應一 FIS_MOS 值。模型輸入與估算流程與上述相同，差異僅在評估時，將模型輸出之 MOS 估算值與 FIS_MOS 標準答案進行 Pearson 相關分析，得到相關係數，作為模型性能指標。透過比較不同模型於此情境下之相關係數，可評估不同模型在考量評分分布特性下之估算能力。

(3) 不同估算方法之整體比較

為進一步比較不同影像品質評分整合方式與模型之綜合表現，本研究將各方法之估算結果統一以 MOS 為參考標準進行比較。亦即，將「MOS + MLR」、「MOS +XGB」、「FIS_MOS +MLR」與「FIS_MOS +XGB」之估算結果與 MOS 標準答案進行 Pearson 相關分析。透過比較上述四種方法之相關係數，可評估不同評分整合方式與模型組合對於人眼感知結果之估算能力。

三、影像品質估算結果與比較

本研究依據 2.6 節之性能評估方式，以 Pearson 相關係數作為影像品質估算模型之性能指標，並分別在不同評分基準與模型組合下進行比較分析。首先，依據相關性分析結果，選取與評分具有較高關聯性之前 8 項影像品質參數作為模型輸入變數。其後，針對不同參數數量(2 至 8 個)建立對應之 MLR 與 XGB 模型，並以測試資料進行評估。

3.1 影像品質參數相關性分析結果

表 1 列出與 MOS 及 FIS_MOS 具有較高相關性之前 8 項影像品質參數及其相關係數，作為後續模型建立之依據。

表 1：影像品質參數之相關係數（前 8 名）

影像品質參數	與 MOS 相關係數	影像品質參數	與 FIS_MOS 相關係數
SM_L	0.71	SM_L	0.68
σ_{b-}	0.56	σ_{b-}	0.58
σ_{a+}	0.51	σ_{a+}	0.55
σ_b	0.48	σ_b	0.46
CM_L	0.44	σ_a	0.43
σ_{a-}	0.41	CM_L	0.39
σ_a	0.36	σ_{gray}	0.34
σ_{gray}	0.36	σ_{a-}	0.31

3.2 MOS 為標準之模型性能比較

在 MOS 為標準答案之情境下，比較 MOS+MLR 與 MOS+XGB 兩種模型之估算性能，其結果如表 2 所示。由表 2 可知，MOS+XGB 在多數參數數量下具有較高之相關係數，顯示其在建立影像品質與主觀評分之關係時具較佳之估算能力。然而，當參數數量增加至 7 與 8 時，MOS+MLR 之

表現略優，顯示在較高維度輸入下，線性模型仍具有一定穩定性。

表 2：MLR 與 XGB 之相關係數（MOS）

影像品質參數數量	MOS+MLR	MOS+XGB
2	0.693	0.745
3	0.688	0.772
4	0.661	0.739
5	0.684	0.739
6	0.683	0.721
7	0.732	0.713
8	0.733	0.706

3.3 FIS_MOS 為標準之模型性能比較

在 FIS_MOS 為標準答案之情境下，比較 FIS_MOS+MLR 與 FIS_MOS+XGB 之估算性能，其結果如表 3 所示。由表 3 可知，在所有參數數量下，FIS_MOS+XGB 之相關係數皆高於 FIS_MOS+MLR，且於參數數量為 3 時達到最高值 0.804。此結果顯示，在考量評分分布特性之情境下，結合非線性模型可有效提升影像品質之估算能力。

表 3：MLR 與 XGB 之相關係數（FIS_MOS）

影像品質參數數量	FIS_MOS+MLR	FIS_MOS+XGB
2	0.718	0.763
3	0.716	0.804
4	0.701	0.788
5	0.701	0.777
6	0.713	0.773
7	0.711	0.781
8	0.747	0.791

3.4 不同估算方法之整體比較（以 MOS 為參考標準）

為進一步比較不同評分整合方式與模型組合之整體表現，本研究將四種估算方法之輸出結果統一與 MOS 標準答案進行比較，其相關係數結果如表 4 所示。由表 4 可知，整體而言，XGB 模型在多數參數組合下具有較高之相關係數，顯示其在影像品質估算上具有較佳之表現。當參數數量為 3 時，FIS_MOS+XGB 之相關係數達到最高值 0.774，顯示在較少參數下即能獲得良好之估算結果。此外，在部分參數組合下，MLR 模型仍呈現相近或略優之表現，顯示線性模型在特定情境下仍具一定之穩定性。

表 4：不同方法之相關係數（MOS）

影像品質參數數量	MOS+MLR	FIS_MOS +MLR	MOS+XGB	FIS_MOS +XGB
2	0.693	0.688	0.745	0.726
3	0.688	0.677	0.772	0.774
4	0.661	0.661	0.739	0.758
5	0.684	0.657	0.739	0.729
6	0.683	0.672	0.721	0.727
7	0.732	0.668	0.713	0.731
8	0.733	0.740	0.706	0.732

四、結論

本研究以拖曳式載具取得之海床影像資料為基礎，建立影像品質估算流程，並比較不同影像品質評分整合方式（MOS 與 FIS_MOS）與不同預測模型（MLR 與 XGBoost）之估算表現。結果顯示，在多數參數組合下，XGBoost 模型相較於多元線性回歸具有較高之 Pearson 相關係數，顯示其在影像品質估算上具有較佳之表現。在以 FIS_MOS 為評分基準之情境下，結合 XGBoost 模型可進一步提升相關係數，顯示考量評分分布特性有助於改善影像品質估算結果。在整體比較中，當參數數量較少時，FIS_MOS 與 XGBoost 之組合即能達到良好之估算表現。在部分參數組合下，MLR 模型仍呈現相近或略優之結果，顯示線性模型於特定情境下仍具穩定性。綜合而言，本研究結果顯示，結合模糊推論之評分整合方式與非線性模型，在多數情況下可提升海床影像品質之估算能力，並具備作為拖曳式載具作業中影像品質輔助判斷工具之潛力。

謝誌

本研究承蒙國科會專題研究計畫經費支持（計畫編號：NSTC 113-2221-E-110-071），特此致謝。

參考文獻

[1] S.B. Williams, O. Pizarro, M. Johnson-Roberson, I. Mahon, and A. Friedman, 2012, Monitoring of benthic reference sites: Using an autonomous underwater vehicle, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 73-84.

[2] M. Bewley, A. Friedman, R. Ferrari, N. Hill, R. Hovey, N. Barrett, E.M. Marzinelli, O. Pizarro, W. Figueira, L. Meyer, R. Babcock, L. Bellchambers, M. Byrne, and S.B. Williams, 2015, Australian sea-floor survey data, with images and expert annotations, Scientific Data, Vol. 2, Issue 1, Article 150057.

[3] H.K. Meyer, A.J. Davies, E.M. Roberts, J.R. Xavier, P.A. Ribeiro, H. Glenner, S.-R. Birkely, and H.T. Rapp, 2023, Beyond the tip of the seamount: Distinct megabenthic communities found beyond the charismatic summit sponge ground on an arctic seamount (Schulz Bank, Arctic Mid-Ocean Ridge), Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Vol. 191, Article 103920.

[4] K. Panetta, C. Gao, and S. Agaian, 2016, Human-visual-system-inspired underwater image quality measures. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 41, No. 3, pp. 541-551.

[5] Tianqi Chen, Carlos Guestrin, “XGBoost A Scalable Tree Boosting System. ”

UVC 發光二極體應用於預防水下生物附著

羅貫予[1]　陳彥倫[2]　謝孟璋[3,*]

摘要

在水質監測中，精確的連續數據對於評估水體狀態與環境變化至關重要。以濁度量測為例：蔡侑錦學者 (2021) 於國立中山大學海洋環境及工程學系碩士論文的研究中指出，底層水體的濁度變化與底泥釋放之營養鹽濃度呈現顯著正相關。同如張嘉玲等學者 (2014) 於農業工程學報所提出的問題，高濁度環境亦會嚴重干擾總磷等營養鹽指標的辨識度，進而影響優養化評估。然而，在進行長期水下觀測時，光學感測設備尤其是濁度計，常因生物附著而導致數據穩定性與準確性不佳。當濁度計因生物附著而產生假性高濁度時，便影響了真實的水文資訊。為解決此水下光學感測設備量測數據失真的現象，本研究透過微控制器搭配 UVC 發光二極體，設計一預防水下生物附著的模組。透過實驗評估 UVC 發光二極體對減少感測設備表面生物附著的效果。實驗結果顯示，UVC 發光二極體能有效抑制生物附著。本研究確立了此方法之有效性，可有效預防水下生物附著的現象，以延長觀測時間，更為未來獲取長期穩定的真實水下數據提供技術基礎。

關鍵詞：生物附著、UVC 發光二極體、微控制器

Utilizing UVC LEDs to Prevent Underwater Biofouling

Guan-Yu Luo[1]　Yen-Lun Chen[2]　Meng-Chang Hsieh [3,*]

ABSTRACT

In water quality monitoring, accurate continuous data is essential for assessing water body conditions and environmental changes. Taking turbidity measurement as an example, Yu-Chin Tsai (2021) indicated in a master's thesis from the Department of Marine Environment and Engineering at National Sun Yat-sen University that turbidity variations in bottom water exhibit a significant positive correlation with the concentration of nutrients released from sediments. Similarly, as highlighted by Chia-Ling Chang et al. (2014) in the Journal of Taiwan Agricultural Engineering, highly turbid environments can severely interfere with the identification of nutrient indicators such as total phosphorus, thereby impacting eutrophication assessments. However, during long-term underwater observations, optical sensing equipment—especially turbidity meters—often suffers from poor data stability and accuracy due to biofouling. When biofouling causes false high-turbidity readings, the true hydrological information is compromised. To address the phenomenon of measurement data distortion in underwater optical sensors, this study designs a biofouling prevention module utilizing a microcontroller paired with UVC light-emitting diodes (LEDs). Experiments were conducted to evaluate the efficacy of UVC LEDs in reducing biofouling on the surface of the sensing equipment. The experimental results demonstrate that UVC LEDs can effectively inhibit biofouling. This study establishes the validity of this method in preventing underwater biofouling to extend observation periods, thereby providing a technical foundation for acquiring long-term, stable, and authentic underwater data in the future.

Keywords: Biofouling; UVC LED; Microcontroller

[1] 國立高雄師範大學工業科技教育學系 學士班學生
[2] 國立高雄師範大學工業科技教育學系 副教授
[3,*]國立中山大學海下科技研究所 助理教授

一、緒論

水下長期環境監測時，容易因生物附著而導致量測數據失真，進而導致無法透過數據得到準確的結果。以濁度量測為例：蔡侑錦學者 (2021) 於國立中山大學海洋環境及工程學系碩士論文的研究中指出[1]，底層水體的濁度變化與底泥釋放之營養鹽濃度呈現顯著正相關。同如張嘉玲等學者 (2014) 於農業工程學報所提出的問題[2]，高濁度環境亦會嚴重干擾總磷等營養鹽指標的辨識度，進而影響優養化評估。由此可見，不準確或不穩定的水下數據量測，對於水質及水下環境會造成相對應的影響。如同濁度計若因生物附著而產生假性高濁度時，便會影響真實的水文資訊。

過去的研究曾指出，UVC 發光二極體的紫外線可用於抑制生物附著。Ryan 等人(2020)[3]透過對比一有 UVC 發光二極體照射及一無任何照射之壓克力板，從其研究結果可知，經 UVC 發光二極體照射之生物附著現象，與無照射之對照組產生明顯差異。但長期的照射亦使壓克力產生黃斑的質變，Ryan 等人(2020)[3]透過間歇的方式控制照明，避免影響到表面的原材質，由其研究結果可看出，採用間歇的方式照明亦可達到相同的預防生物附著效果。這與 Hunsucker 等人(2019)[4]所發現的結果類似，每 1 天照射 1 分鐘即可避免產生堅硬的生物附著，但是無法抑制生物膜於表面形成，而對比每 6 小時照射一樣 1 分鐘的結果，可以看出生物附著的數量明顯減少，而持續照射的則沒有任何生物的附著，由此結果可知，提高頻率可以減少生物附著的現象。而 MacKenzie 等人(2019)[5]的研究則對不同工作週期(Duty Cycle)進行探討，其研究中指出工作週期介於 5.00~50.00%具相似的效果，幾乎能抑制所有的大型生物附著，但是當工作週期降到 3.33%及 1.67%時，便只能減少生物附著的現象無法完全消除。故 UVC 發光二極體確實能減少甚至消除生物附著，且其工作週期及頻率亦會影響整體的效果。

因此，本研究透過微控制器搭配 UVC 發光二極體，設計一預防水下生物附著的模組，藉由紫外線來破壞生物細胞，使生物無法在表面生長，並且設計配套的電源管理，設定模組以運作 30 秒便休息 30 分鐘，使其可長時間運作於水下，解決水下長期觀測時，無法對設備進行清理的問題。

二、研究方法

2.1 UVC 發光二極體光照強度

為確認 UVC 發光二極體具一定程度之光照能量，必須對所使用的 UVC 發光二極體進行光照功率評估。從規格表得知電壓最小值為 5 V，為確保 UVC 發光二極體正常運作，故供應 5.2 V 的直流電源，而電流經量測得知為 16 mA。因規格表僅提供測試電流為 40 mA 時的光照功率 5 mW，對應同樣測試電流 40 mA 時的最小值電壓為 5.0 V。因此，透過規格表的測試資料可根據 Kneissl 等人 (2011) 之研究[6]，推算 UVC 發光二極體的電光轉換效率（Wall-Plug Efficiency, WPE）如公式(1)，

$$WPE\ (\%) = [\,\Phi e\,/\,(I \times V)\,] \times 100\% \qquad (1)$$

其中Φe為輸出光照功率，I為順向電流，V 為順向電壓，經公式(1)的計算，可得知 UVC 發光二極體的 WPE 為 2.50 %。又因 UVC 發光二極體之電光轉換效率並非固定常數。當驅動電流增加並逼近元件極限時，內部之熱積聚與電子溢流現象將加劇，導致高電流狀態下之真實轉換效率往往低於降載狀態。故用規格表高負載之電光轉換效率回推光照功率，能夠得到較為保守的評估數值。因此，假設實際情況的電光轉換效率為 2.50%，經計算可得實際的光照功率約為 2.08 mW。又以此估算光照功率，換算目標照射區域 1250 mm^2 (25 mm * 50 mm) 每單位之光照功率，可得約 1.66 μW/ mm^2。

Ryan 等人(2020)[3] 在位於利菲河 (River Liffey) 下游河口都柏林港內的普爾貝格碼頭 (Poolbeg Marina，53.3435° N, 6.2163° W) 執行測試，其預估需要的光照功率為 0.0116 μW/ mm^2，實際上所使用的功率則為 0.175 μW/ mm^2，與需要的光照功率相差約 15 倍。而本研究選用之 UVC 發光二極體預估光照功率約為 1.66 μW/ mm^2，與 Ryan 等人(2020)[3]預估的光照功率相差約 143 倍，又與實際使用的光照功率相差約 9 倍。考量到本研究的地點為高雄哨船頭遊艇碼頭 (22.6192° N, 120.2694° E)，與都柏林港的環境相差甚大，故選用此功率較強之 UVC 發光二極體。

2.2 照射頻率與工作週期

除了 UVC 發光二極體的光照強度外，其照射的頻率和工作週期都會影響生物附著之現象。根據 MacKenzie 等人(2019)[5]的研究可知，更高的工作週期會有更好的效果，但是在長期運作的模組上，更高的工作週期會造成更多的能源消耗。而從 Hunsucker 等人(2019)[4]的研究也可看出，對於相同工作週期(Duty Cycle)，若提高照射頻率便能提升減少生物附著的效果。

因此，考量所使用 UVC 發光二極體之光照強度及研究實驗地點，本次研究使用每 30 分鐘照射 30 秒之頻率，其工作週期為 1.63%。因 UVC 發光二極體光照功率較強，且為了節省能源，故選用較低的工作週期，但選用較高的照射頻率來補足減少生物附著之效果。

2.3 硬體架構與微控制器電路

因模組需長期放置於水下，故本研究選用一防水盒作為載體，所使用的防水盒一面為透明蓋，用於模擬水下的光學感測器。

又因點光源發出的光強度與距離的平方成反比，故當距離增加一倍時，表面接收到的亮度會減弱為原本的四分之一。因此，為減少距離對 UVC 發光二極體的影響，在透明面內部，用 3D 列印設計一雙槽結構，固定兩顆 UVC 發光二極體使其緊貼於透明蓋表面，其照射區域可覆蓋目標照射區域 1250 mm^2 (25 mm * 50 mm)，如圖 1 所示。

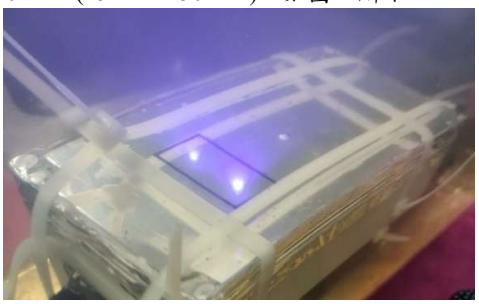


圖 1：UVC 發光二極體水中實際照射

為使模組能長期運作，達到本研究的目標佈放時長一個月，故需設計一能長期運作之微控制器電路。本次研究選用 Adafruit Feather 32u4 Adalogger 為主要之核心微控制器。利用其長時間運作耗能極低的特性，對於每 30 分鐘才需要運作 30 秒的模組，在 30 分鐘的待機期間，系統會設定微控制器進入最低功耗的深度睡眠模式（Power-down Mode）。而對於兩顆 UVC 發光二極體，則透過一大功率觸發開關驅動模組(XY-MOS)做控制。

模組電源部分採用雙電源供電，微控制器使用一 3.7 V 鋰聚合物(2000 mAh)，兩顆 UVC 發光二極體採並聯方式，透過兩顆 18650 鋰電池串聯成 7.4 V(3400 mAh)經降壓模組(LM2596S DC-DC)後供應 5.2 V 電源。此外，為驗證模組於水下之實際作動狀況，藉由微控制器上的 SD 卡插槽，紀錄每次照射後之電池電壓。因微控制器本身可以記錄其外部電源，故不需要額外的電壓計，只需安裝一電壓計模組回傳，將兩顆 18650 鋰電池串聯後的電壓回傳至微控制器，並記錄於 SD 卡中。

整體微控制器電路透過兩塊 4.7x7.3cm 單面鍍錫電木板(KT-10)及 M3 六角黃銅柱連接。鋰聚合物和 18650 2S 鋰電池盒用魔鬼氈緊貼防水盒底部，避免晃動對模組的運作造成影響，且與上蓋間之空隙也使用緩衝材料填滿。

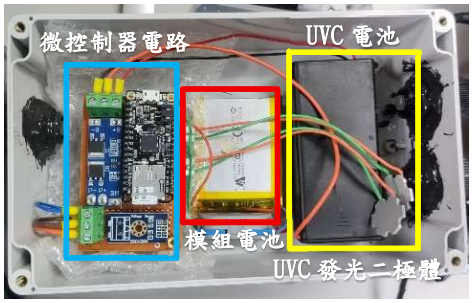


圖 2：模組微控制器電路及電池

2.4 水箱測試及碼頭佈放

為確保模組於水下環境之水密性，以及微控制器休眠排程之穩定性，本模組於實地佈放前，先於研究室之水箱內進行浸泡測試及 24 小時連續運轉確認其可穩定運作。待確認無硬體異常與滲漏現象後，方移至實地場域進行佈放。模組佈放地點為高雄哨船頭遊艇碼頭 (22.6192° N, 120.2694° E)。將模組與重物固定後，用一繩索將模組放至水下約 1 米之水深，如圖 3 所示。



圖 3：模組於碼頭水下實際照射

三、結果與討論

3.1 模組目標照射區域結果

經 22 天佈放測試，並定期拍照記錄生物附著現象，表 1 為每 7 天記錄一次的結果。從表 1 的照片結果可知，第 8 天開始有細小生物附著，而到第 15 天才有明顯的附著現象。

回收模組後由 SD 卡記錄得知，模組於第 16 天早上便停止運作，因供應 UVC 的 18650 電池電力不足，導致鋰電池保護板停止放電，如圖 4 所示。從表 1 第 22 天的結果可看出，在沒有 UVC 發光二極體照射後，生物附著現象明顯變得更加劇烈。

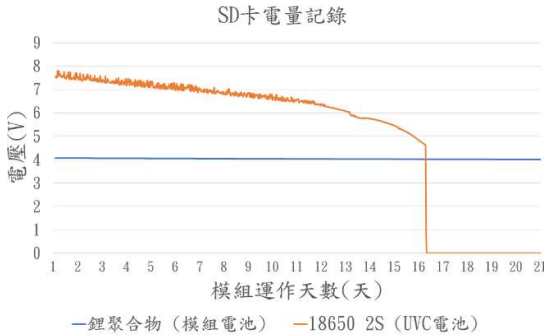


圖 4：SD 卡電量紀錄

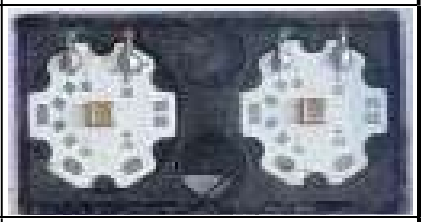
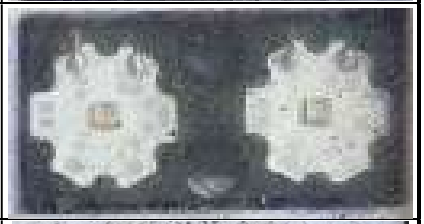
3.2 UVC 發光二極體對生物附著之影響

根據表 1 的結果紀錄可知，前七天並未觀察到明顯的生物附著現象，過七天後才開始有較大之生物生長於表面。且在 UVC 發光二極體因電力耗盡停止照射後，生物開始大量生長於表面。由此可見，UVC 發光二極體可減少生物於表面生長。

本研究選用之 UVC 發光二極體預估光照功率約為 1.66 μW/ mm^2，並為了減少距離所造成的衰減，使其緊貼透明上蓋內部。但是，透明上蓋的厚度還是會使光照功率衰減，因此單顆實際的光照功率會小於 1.66 μW/ mm^2。

從表 1 第 15 天的結果可以看出，目標照射區域並沒有呈現預期之完全乾淨。雖然 UVC 發光二極體仍正常運作，但在兩顆 UVC 發光二極體中間及周圍，仍有明顯的生物附著。推測是因為 UVC 發光二極體經散射後光照強度降低，且透明外殼之厚度也影響實際抵達表面之光照功率。然而，兩顆 UVC 發光二極體正上方之區域仍然保持乾淨。由此結果可知，光照能量密度較高之區域具備更好的抑制附著效果。

表 1：模組目標照射區域結果紀錄

天數	模組照片
第 1 天	
第 8 天	
第 15 天	
第 22 天	

3.3 模組最佳化及改善

模組在本次測試中僅持續正常運作 16 天，因供應 UVC 的 18650 電池電力不足，導致鋰電池保護板停止放電。未來針對電源的部分，需做更周詳的評估，根據不同的工作週期，進行不同的電源容量配置，並設計更加節省能源的照射策略，使模組能夠長期運作。另外，不同規格的 UVC 發光二極體也會影響電源的評估，所產生的光照功率亦會不同。未來可透過比較不同規格的 UVC 發光二極體，找出最佳能源效率之組合。

對於目標照射區域的最佳化，未來除了可以改變 UVC 發光二極體的擺設角度外，不同透明上蓋的材質也會直接影響光照功率的衰減，並且不同材質生物附著的影響亦會不同。未來針對此部分，可藉由不同材質及擺設角度進行比較，探討最佳的模組配置。

四、結論

本研究透過設計一預防水下生物附著的模組，利用兩顆 UVC 發光二極體（單顆光照功率不考慮厚度衰減預估為 1.66 μW/ mm^2）搭配微控制器電路，以每 30 分鐘照射 30 秒之頻率，於一透明上蓋防水盒內佈放至水下測試 22 天，其中模組正常完整運作 16 天。根據結果可知，UVC 發光二極體能有效防止生物附著，但其作用範圍受光照強度影響，且若停止 UVC 發光二極體運作，生物便會於表面快速大量生長。

藉由本次研究成果可證明 UVC 發光二極體照射保持一定光照強度情況下，可預防水下生物附著。未來研究將進一步針對不同光照強度、頻率及工作週期進行比較，且會搭配不同的 UVC 發光二極體擺放及改變外殼材質進行最佳化，並針對電源配置進行更加審慎的評估，以期達成預防水下生物附著，提升水下感測設備觀測之準確性及穩定性。

謝誌

本研究承蒙國立中山大學海下科技研究所「海洋光電與力學實驗室」提供水下機電測試設備與硬體開發資源，使本實驗得以順利完成，特此致謝。

參考文獻

[1] 蔡侑錦，濕地底泥營養鹽釋放與沉水性水生植物復育之相關性研究-以金魚藻為例，碩士論

文，國立中山大學海洋環境及工程學系，臺灣高雄，2021 年。

[2] 張嘉玲、王傳益、劉虹志，濁度對水庫優養化指標辨識度之影響，農業工程學報，60 卷 4 期， 72-78 頁，2014 年。

[3] E. Ryan, S. Turkmen, and S. Benson, "An investigation into the application and practical use of (UV) ultraviolet light technology for marine antifouling," Ocean Engineering, vol. 216, 2020, Art. no. 107690.

[4] K. Z. Hunsucker et al., "Using ultraviolet light for improved antifouling performance on ship hull coatings," Biofouling, vol. 35, no. 6, pp. 658–668, 2019.

[5] A. F. MacKenzie et al., "Periodic ultraviolet-C illumination for marine sensor antifouling," Biofouling, vol. 35, no. 5, pp. 483–493, 2019.

[6] M. Kneissl et al., "Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology," Semiconductor Science and Technology, vol. 26, no. 1, 2011, Art. no. 014036.

港灣鋼構實時腐蝕探頭之陰極保護設計最優化、腐蝕運維在地化及雜散電流腐蝕示警防災

王自強[1]　鄭智文[2]　林俊達[3]　王笙宇[4]　趙立德[5]

摘要

港灣構造物(如鋼管樁、鋼板樁及鋼管板樁等)位處嚴峻的海洋腐蝕環境中，受到高鹽、高溫、高低潮位、腐蝕細菌及洋流擾動的反覆作用，鋼材腐蝕快速，如無完善的防治規劃，材料減薄不僅降低結構強度，影響使用壽年並有無預警坍塌壞損的可能。

臺灣各地海氣象迥然不同、海域腐蝕生態系也包羅萬象，港灣構造物陰極保護系統的設計，如防蝕電流密度(idc)、鋼構極化電位(EON、EOFF)及連動的材料腐蝕速率等有著極高的在地化需求，在無完整數據的狀況下，現況與預期總有不小的落差。此外鋼構的雜散/迷失電流腐蝕減薄率在近年的水下檢測數據竟可達 1~2mm/年 (標準 0.01~0.02mm/年)，風險巨大，確實棘手必須防範。

現所倚賴的人工腐蝕檢測在碼頭鋼構執行時常因視線差且佈滿海生物而無法準確判讀、精密但復雜的量測工作速率差而數據太少、同時台灣社會的少子化及工作多元性，造成這類高風險的潛水專業工作人員斷層、新手上陣、訓練不足，常出現同一案場前後期數據矛盾，鋼構嚴重銹損緊急修復等事件。

有鑑於此，我司於新建置的棧橋碼頭安裝水下多功能腐蝕探頭(電阻式 ER Probe)，長期(10 年)且固定(一天一筆)記錄碳鋼試片在不同冠牆位置、高低水位的數據。我們期待運用實時探頭技術來累積「港灣腐蝕大數據」，建立資料庫幫助實踐防蝕設計最優化、維運工作在地化，同時提供雜散電流發生時的預警防災功能。

關鍵字：腐蝕在地化、雜散電流腐蝕、腐蝕大數據、防蝕設計最優化、維運計畫在地化。

ABSTRACT

The harbor structures (such as steel piles, steel sheets, and sheet-piles) are located in a severe corrosive environment and are subject to repeated effects of high salinity, high humidity, high temperature, high/low tidal levels, current disturbance, and bacteria activities. Without a complete prevention and control plan, metal thickness reduction is inevitable, not only reduces structural strength, service life, but also poses the risk of unexpected collapse and damage.

The maritime and meteorological conditions across Taiwan vary greatly, and bacteria ecosystem is also diverse. The design of the cathodic protection system for harbor structures, such as the protection current density (idc), the potential of the steel structure (EON, EOFF), and the corresponding corrosion rate, are extremely specialized and localized. In the absence of complete corrosion data, there are often significant discrepancies between the expected and inspected data. Furthermore, harbor structure stray current corrosion, according to recent underwater inspection data, can reach 1~2mm/year, which presents a dangerous and huge risk that must be addressed for.

Manual inspection, corrosion, is currently the go-to method for many. The limitation, however, due to poor visibility and marine fouling shielding, while precise but complex measurement tasks have slow rates, resulting in insufficient data. At the same time, Taiwan's declining birthrate and diverse work options have led to a gap and shortage of professional divers for this type of high-risk underwater work, often resulting in contradictory data

[1] 王強科技有限公司 執行長

[2] 臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司 總工程師

[3] 台灣世曦工程港灣工程部 副理

[4] 金屬工業計畫發展中心海洋產業推廣服務 工程師

[5] 滙茂實業 總經理

from the same site over different periods and incidents like emergency repairs for severely corroded steel structures.

We have installed underwater corrosion probes (Electrical Resistance, ER Probes) on newly built pier structures to record the corrosion behavior of carbon steel coupons at different locations and high/low water levels over a long period (10 years) and at fixed intervals (one record per day). Our company aims to utilize remote monitoring technology to accumulate "Harbor Corrosion Big Data," establish a database, and implement the optimization of anti-corrosion design and the localization of maintenance and operation plans. Concurrently, it will provide early warning and disaster prevention functions when stray/lost currents occur.

Keywords: Protection Potential, corrosion current density, remote monitoring, corrosion big data

一、前言

港灣構造物(如鋼管樁、鋼板樁及鋼管板樁等)位處嚴峻的海洋腐蝕環境中，受到高鹽、高溫、高低潮位、腐蝕細菌及洋流擾動的反覆作用，鋼材腐蝕快速，如無完善的防治規劃，材料減薄不僅降低結構強度，影響使用壽年並有無預警坍塌崩壞的可能。

臺灣各地海氣象迥然不同、海域腐蝕生態系也包羅萬象，港灣構造物陰極保護系統的設計，如防蝕電流密度(idc)、鋼構防蝕電位(EON、EOFF)及連動的材料腐蝕速率等有著極高的在地化需求。輔助軟件如 COMSOL®內建了許多此類的參數(統稱腐蝕大數據)，唯數據庫並不完整也導致腐蝕與防護現況與模擬分析結果出現不小的落差。此外鋼構的雜散電流腐蝕在近年的水下檢測數據竟達 1~2 mm/年 (標準 0.01~0.02 mm/年，50~100x 超標)，確實棘手必須防範。

現所倚賴的人工腐蝕檢測在碼頭鋼構執行時常因視線差且佈滿海生物而無法準確判讀、精密但復雜的測量速率差而數據太少、同時台灣社會的少子化及經濟多元性，造成高風險的潛水專業工作人員斷層，新手上陣、訓練不足，時而出現同一案場前後期數據矛盾，鋼構已經嚴重銹蝕損壞需要緊急修復等事件。

二、系統建置

本計畫在新建置棧橋碼頭水下鋼樁安裝多功能腐蝕探頭(電阻式 ER Probe)，收集實時 a.腐蝕速率(mm/y) b.鋼材電位(mV/Zinc) c.電流量(mA/m2) d.環境溫度(°C)，量測頻率為每天 1 筆資料，探頭站位於冠牆手孔內採用電池供電，控制箱內置資料記錄器及無線傳輸設備模組，以無線傳輸方式將各測站資料實時回傳，再透過資料解碼程式將探頭數據寫入 Microsoft Azure 虛擬機之資料庫。

本計畫參考沃旭能源大彰化風場離岸結構腐蝕監測 (Orsted Greater ChangHua Corrosion Monitoring Campagne)及比利時技術中心(Belgian technology federation Sirris) SOCORRO 腐蝕監測工程案例，運用實時腐蝕探頭技術並配合建置中的環境因子參數，目標是建立一套完整的台灣海域水下鋼構腐蝕與防護的資料庫。

多物理場模擬輔助軟件 COMSOL®內建了許多水下鋼構陰極保護系統的實例，使用者輸入環境參數如海水溫度、鹽度、電導率、海泥電導率、電水離子濃度及海洋鈣化層(calcareous layer)、防蝕系統參數如鋁合金陽極性能 (尺寸、電位、電容量)及鋼樁電位等後進行模擬。

我們將實際探頭資料與模擬數值進行比對，找出可能的差異化成因並記錄。我們將繼續針對參數不足之處進行地域性及時間維度資料的收集，並持續迭代進化模擬與實時探頭數據來進行驗證及確認，為水下鋼構陰極保護防蝕系統設計開啟因地而宜、最優化的里程碑。

此外，透過實時測量的腐蝕數據，港灣結構加速腐蝕的兇手，如雜散電流、加速淡鹹水腐蝕(ALWC)等，也將透過可視化的數字統計及趨示圖形而無所遁形，達到示警、防災、減災的功能。

由這些腐蝕大數據的分析結果，業主方可有依、有本、有計畫地將水下結構運轉維護的資源集中，效率最大化。在智慧化及數據化的未來，碼頭水下鋼構的腐蝕檢測與調查將依賴大量佈置於各座碼頭的腐蝕探頭(原冠牆電位人工測點改為自動化站體)並落實運轉維護在地化、智慧治理的目標。

三、結果

碼頭鋼樁多功能腐蝕探頭實時數據如圖 1。



圖 1 港灣腐蝕大數據平台

COMSOL® 鋼構防蝕電流、電位模擬如圖 2。

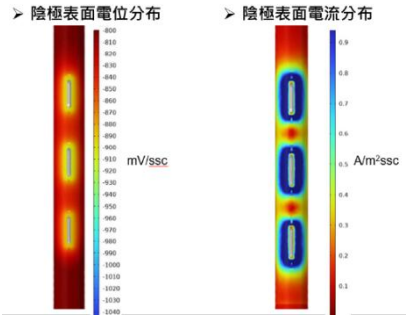


圖 2 COMSOL®模擬鋼構電位、電流分佈

探頭數據與模擬比對及驗證如圖 3。

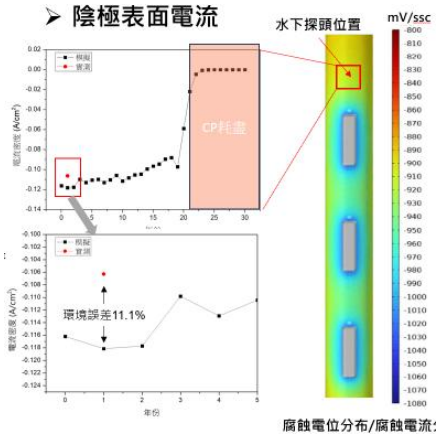


圖 3 模擬結果與實時數據(平均)比對

鋁金陽極的效能及壽年預估如下圖 4。

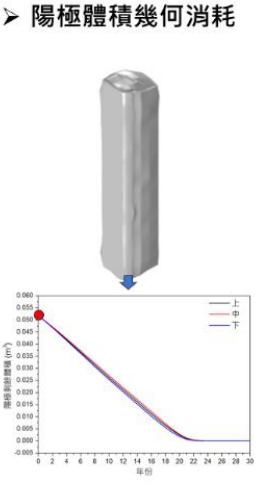


圖 4 電流模擬結果與陽極壽命的預測

四、結論

根據本計畫模擬與實測結果顯示，新建棧橋碼頭即使已配置陰極保護系統，仍可能受到雜散電流干擾，進而影響保護成效並導致腐蝕風險。透過探頭實測數據得以及早發現腐蝕速率之異常變化，有助於掌握其演變趨勢與潛在影響。而多功能腐蝕探頭能有效取代傳統仰賴潛水檢測所面臨之人力風險與資料稀缺問題，所蒐集之每日連續量測資料亦已初步建構具地域特性的腐蝕大數據資料庫，強化管理決策與維運依據。綜合國際經驗與台灣海域環境特性，達到「即時可用」、「數據可信」與「系統可靠」等關鍵特性，對港灣鋼構之健康監測、自動示警與智慧化維護策略提供了具體可行之技術基礎。

參考文獻

[1] 公共工程施工綱要規範第 02392 章碼頭，2016
[2] 陳國銘、吳興練、吳美惠、羅亦旋(2016)，離岸鋼材現場腐蝕速率監測，防蝕工程第 30 卷第 4 期，7 頁-15 頁
[3] 王自強、吳中仁、潘思蓉、羅建明，”離岸觀測樁之腐蝕監測系統建置”，第 22 屆水下技術研討會暨科技部、文化部成果發表會，2020
[4] ISO 24656 離岸風機結構之陰極保護，2022-05
[5] ISO 24656 Cathodic protection of offshore wind structures, 2022-05
[6] DNV-RP-B401 陰極防蝕保護設計，2021-05
[7] DNV-RP-B401 Cathodic protection Design, 2021-05
[8] World Meteorological Organization (WMO), Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8), 2023 edition

兩孤立波於同向追越碰撞作用下之水下流場特性探討

林 呈[1] 羅立芳[2] 薛儒謙[3] 林欣誼[4]

摘要

本研究利用高時間解析度之粒子影像測速儀(HSPIV)技術，結合全水深質點軌跡可視化觀測法以及速度場量測，探討兩個孤立波於水平底床上發生同向追越碰撞作用時之水下流場特性。實驗中藉由伺服馬達產生首個孤立波，經牆面反射後與第二波於相同方向運行，產生非線性追越交互過程，並針對不同波高比條件進行系統性分析。實驗結果將孤立波同向追越碰撞之波形重合類型分為雙峰、平坦及單峰等三類，並透過可視化影像觀察波峰交疊之碰撞融合，以及流場內部速度結構演變過程，可知孤立波在同向追越交互過程中，主要是受到垂直速度的影響互相干擾，而水平速度則幾乎未受到影響，亦即融合後流場仍具穩定推進性。本研究成果增加了非線性波浪交互作用的水動力數據，可作為沿岸工程流場穩定性評估之參考依據。

關鍵詞：孤立波、追越碰撞、水下、HSPIV

Study on the characteristics of underwater velocity fields induced by the rear-end collisions of two solitary waves

Chang Lin[1] Li-Fang Lo[2] Ju-Chien Hsueh[3] Hsin-Yi Lin[4]

ABSTRACT

This study utilizes High-Speed Particle Image Velocimetry (HSPIV) with high temporal resolution, in combination with full-depth particle trajectory visualization and underwater velocity field measurements, to investigate the underwater flow characteristics during the overtaking collision (rear-end collision) of two solitary waves propagating over a horizontal bed. The experiment systematically generates solitary waves with different wave height ratios using a wavemaker to simulate the nonlinear overtaking interaction process. The results indicate that the wave profile superposition types during the overtaking collision can be categorized into three types: double-peak, flattened, and single-peak. Through flow field analysis, it was found that the interaction process is primarily influenced by the mutual interference of vertical velocities, while the horizontal velocity remains stable. This demonstrates that the flow field maintains stable propulsive characteristics even after the merging process. The findings of this study contribute to the hydrodynamic data on nonlinear wave interactions and serve as a reference for assessing flow field stability in coastal engineering.

Keywords: Solitary waves; Rear-end collisions; Underwater; HSPIV

一、前言

隨著全球氣候變遷與極端海象頻發，海嘯及風暴潮等非線性長波對海岸與港灣設施的破壞風險備受關注。孤立波(Solitary wave)因具備顯著的非線性與穩定傳遞特性，在學術界常被作為模擬海嘯前緣演化過程的代表性波形。早期研究多聚焦於單一孤立波的傳播理論與波形演化，如 Boussinesq (1872) [1] 與 Rayleigh (1876) [2] 奠定了流體解析

[1] 國立中興大學土木工程學系 教授
[2] 國立中興大學土木工程學系 博士班研究生
[3] 國立中興大學土木工程學系 碩士
[4] 國立中興大學土木工程學系 學士班學生

解基礎，而 Korteweg and de Vries (1895) [3] 提出的 KdV 方程則成功納入非線性與色散效應，揭示了其穩定傳遞的物理機制。然而，在實際近岸波群中，波浪間的相互追越與碰撞現象更為常見。雖然孤立波單波的水動力特性已由 Lin (2016, 2020, 2022) [4-6] 透過一系列水槽實驗，系統性地奠定了自由流區速度場與非線性水動力行為之基礎，但針對兩波交互作用期間的內部流場結構研究仍相對有限。Umeyama et al. (2014, 2017) [7-8] 雖運用粒子影像測速(PIV)技術，指出追越碰撞會顯著改變流體質點的運動軌跡，但 Craig (2006) [9]的研究亦指出，在此類高度非線性且具強烈時空變化性的現象中，流體內部的能量傳遞機制仍具備極高的觀測難度。特別是在高振幅條件下，後方高波追越前方小波所引發的波形重組，會導致水體內部產生複雜的瞬時流動結構。爰此，本研究旨在結合流場可視化技術與高頻粒子影像測速(HSPIV)系統，針對雙波於水平底床進行同向追越過程中的流場特性進行分析。透過實驗觀測水面速度與流體內部速度的演化過程，補足非線性交互作用下的水動力實驗數據，期能深入探討流體質點的運動規律，為海岸工程中孤立波群交互作用之流場穩定性評估提供科學依據。本研究旨在利用流場可視化技術與 HSPIV 系統，探討孤立波在水平底床追越過程中的水下流場特性。研究成果可作為孤立波群交互作用下流場穩定性評估之參考依據。

二、實驗配置與研究方法

2.1 實驗佈置

本實驗於中興大學土木系雷射實驗室之精密造波水槽中進行，水槽總長度為 14.0 m，寬度為 0.25 m，高度為 0.50 m，水槽兩側與底部採用透明強化玻璃鋪設，方便流場觀測及 HSPIV 量測系統進行。於水槽一端裝設伺服馬達造波機，所裝設之伺服馬達可根據輸入之位移函數以驅動造波板移動，造波板最大位移距離為 40 cm，而可接受之訊號頻率達 100 Hz，水槽示意圖如圖 1 所示。

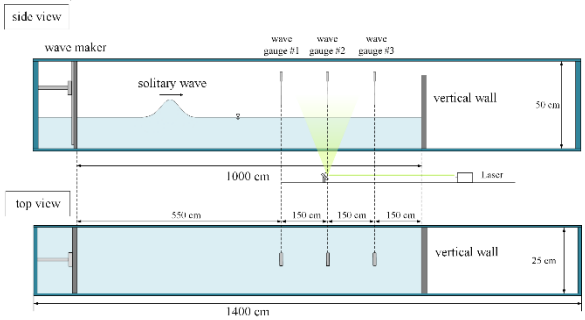


圖 1：波浪水槽之側視圖與上視圖

2.2 質點軌跡可視化法 HSPIV 量測系統

流體質點軌跡可視化法(Flow Visualization Technique，FVT)為初步觀測水表面與內部流場變化，進而深入觀察水表面與內部流場之運動特性，以最佳之曝光時間，拍攝質點軌跡拖痕即為質點位移量，藉由質點位移量與經過之時間可計算出質點移動速度與位移方向。

2.3 HSPIV 量測系統

在高時間解析度粒子影像速度儀量測系統(High-Speed Particle Image Velocimetry，HSPIV)的量測過程中，提高高速攝影機之拍攝速率，並在水槽內使用高功率半導體綠光雷射光源切光照射流場內隨孤立波運動之質點顆粒，使質點顆粒經雷射切光後形成明亮之光點，再經由高速攝影機捕捉質點情形，經計算分析後以求得水流之速度場。

2.4 座標系統與實驗條件

本實驗於靜止水位均等水深 h_0 為 10 公分條件下，透過控制伺服馬達製造孤立波，其中順著孤立波於水槽水平底床行進方向為正 x 軸、垂直於水平底床向上為正 y 軸、u (cm/s)為平行底床之水平速度、v (cm/s)為平行底床之垂直速度，如圖 2 所示。當兩碰撞波完全重合處之座標定義為座標原點 x = 0，t = 0 為第一支波高計(x = -150 cm)偵測到孤立波波峰通過之時間，t (sec)為有因次時間及 T 為無因次時間，其有因次時間 t 與無因次時間 T 之轉換式為$T = t \times \sqrt{g/h_0}$。

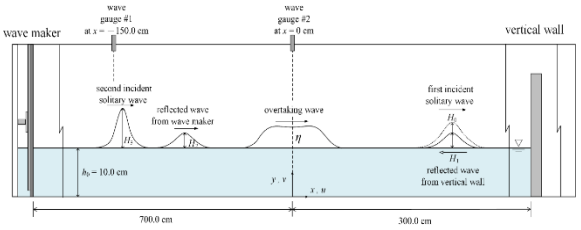


圖 2：座標系統示意圖

研究設計三組具代表性之波高比條件作為實驗參數。於固定水深 h_0 = 10 cm 條件下，選用具不同波高與波長特徵之孤立波作為前波（H_2）與後波（H_3），並設定三種波高比 H_3/H_2 條件，分別為 Case A：H_3/H_2 = 2.2；Case B：H_3/H_2 = 2.9；Case C：H_3/H_2 = 5.7。實驗組合與參數設置如表 1 所示，兩碰撞波完全重合處(x = 0)之追越碰撞重合波形如圖 3 所示。本篇研究主要將以 CaseC H_3/H_2 = 5.7 單峰類型進行分析和探討。

表 1：實驗條件項目表

Case	實驗水深 h_0 (cm)	在 x = 0 量測之波高			$\frac{H_3}{H_2}$	重合類型
		H_0 (cm)	H_2 (cm)	H_3 (cm)		
A	10.0	3.0	2.1	4.6	2.2	雙峰
B		2.0	1.4	4.0	2.9	平坦
C		1.2	0.7	4.0	5.7	單峰

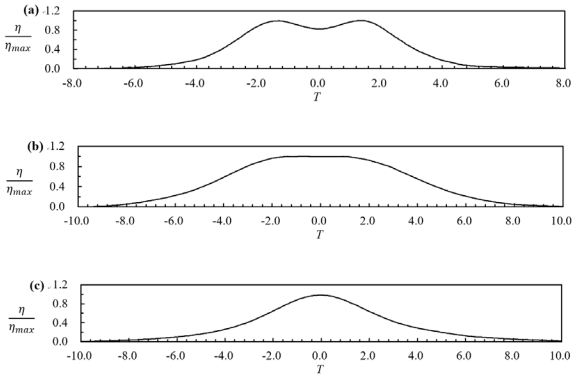


圖 3：追越碰撞之重合波形(a) Case A 雙峰；(b)Case B 平坦；(c) Case C 單峰。

三、實驗結果與討論

3.1 追越碰撞之質點軌跡可視化

初步掌握兩孤立波於同向追越交互過程中整體流場之時空演化趨勢，本研究首先透過全水深可視化影像進行質性觀察分析。藉由在水體中添加追蹤粒子，並結合雷射光頁進行照明，可清晰呈現波浪交互作用區域內的粒子運動軌跡。此類可視化圖像不僅有助於判斷流場是否產生明顯之渦流或對稱性破壞等特徵，亦可作為後續定量速度場分析之重要參考依據。

圖 4 則為 Case C（$H_3/H_2=5.7$）之質點軌跡可視化影像。其無因次時間 T＝–4.0、–2.0、0.0、2.0、4.0 與 6.0。由於 H_3與 H_2之波高差異最大，孤立波追越所形成之單一主波峰在水面輪廓與水下質點運動軌跡上，皆與單一孤立波行進之狀態極為相似，導致初步觀察下難以明顯區分其與一般孤立波之差異性。

3.2 速度場量測結果

在完成質點軌跡可視化分析並初步掌握孤立波同向追越碰撞過程中整體流場之發展趨勢後，為進一步釐清流場內部速度結構演變特性，研究接續採用 HSPIV 系統，對特定時序與空間位置進行速度場量測。實驗條件 Case C 為波高比最大之追越碰撞條件，根據波形可知融合後呈現單一波峰，顯示較小波極可能被包含於較大孤立波中。圖 5 為 Case C 單峰之波形圖，其中不同時間下所標註(a – f)剖面線，分別對應圖 6(a – f)之各瞬時速度場。圖 6(a)至圖 6(d) 展示波峰通過前流速逐步上升的過程，隨後圖 6(d)至圖 6(f) 為通過後流場速度緩降之階段。理論上波高越大，波速 C_0 越快，但融合後之波高已低於原始大波，波速應有所下降。綜合結果可知，孤立波在同向追越過程中，兩波主要互相干擾的是垂直速度 v，而水平速度 u 幾乎未受到影響，亦即融合後流場仍具穩定推進性。

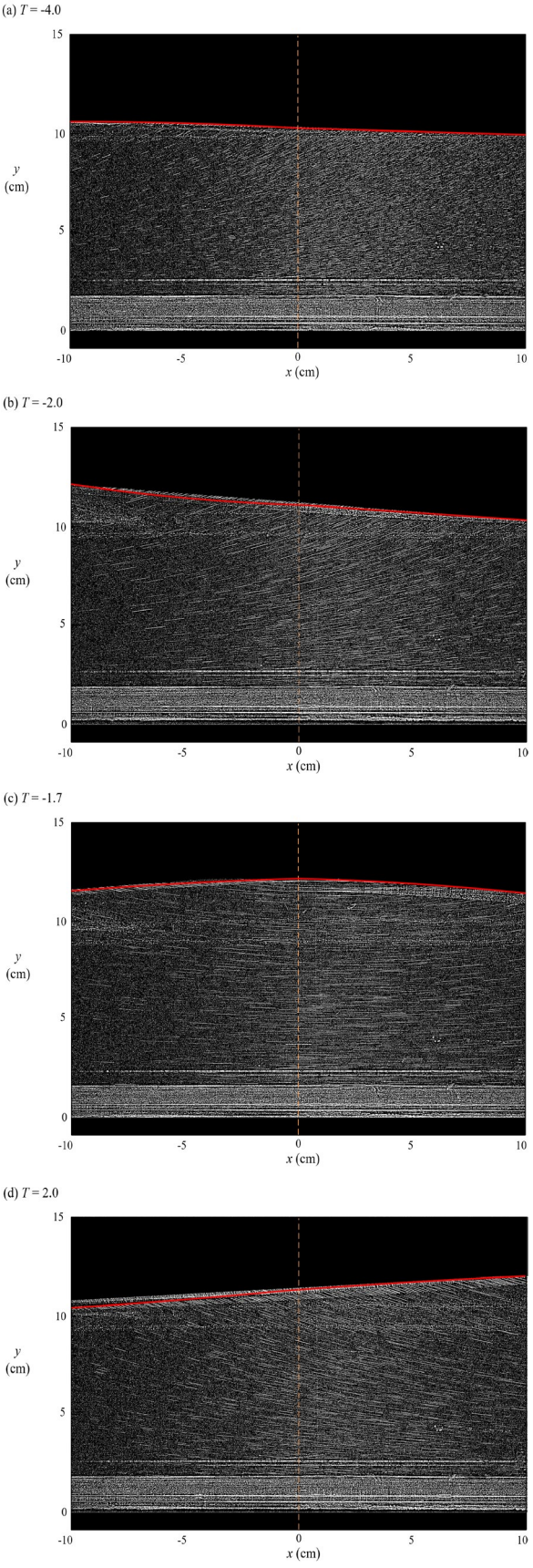


圖 4：Case C 之質點軌跡可視化影像。

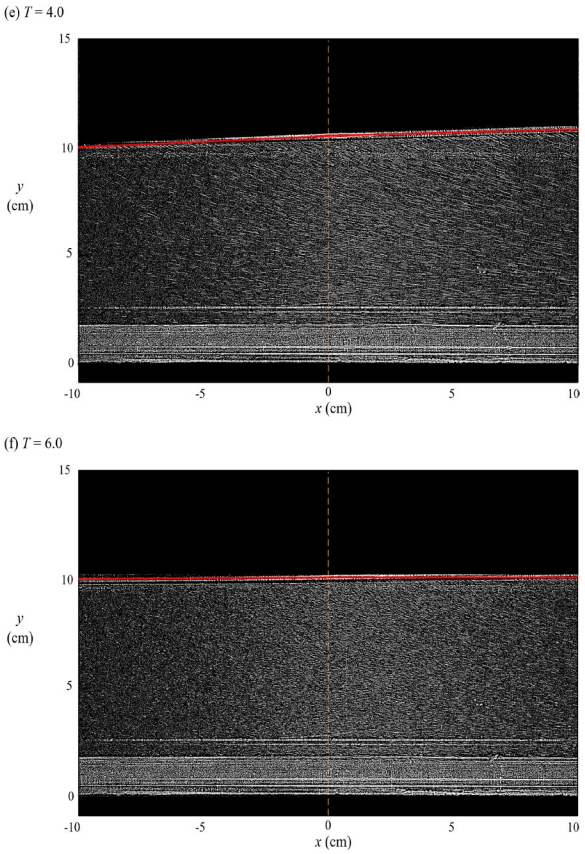


圖 4(續)：Case C 之質點軌跡可視化影像。

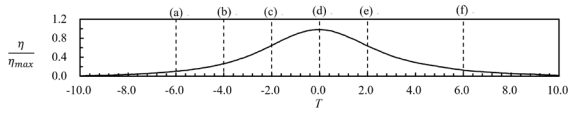
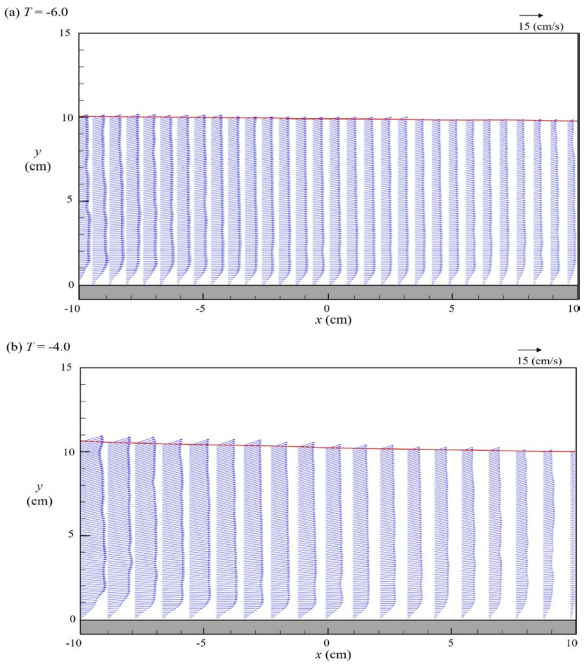


圖 5：追越碰撞之 Case C 單峰波形圖



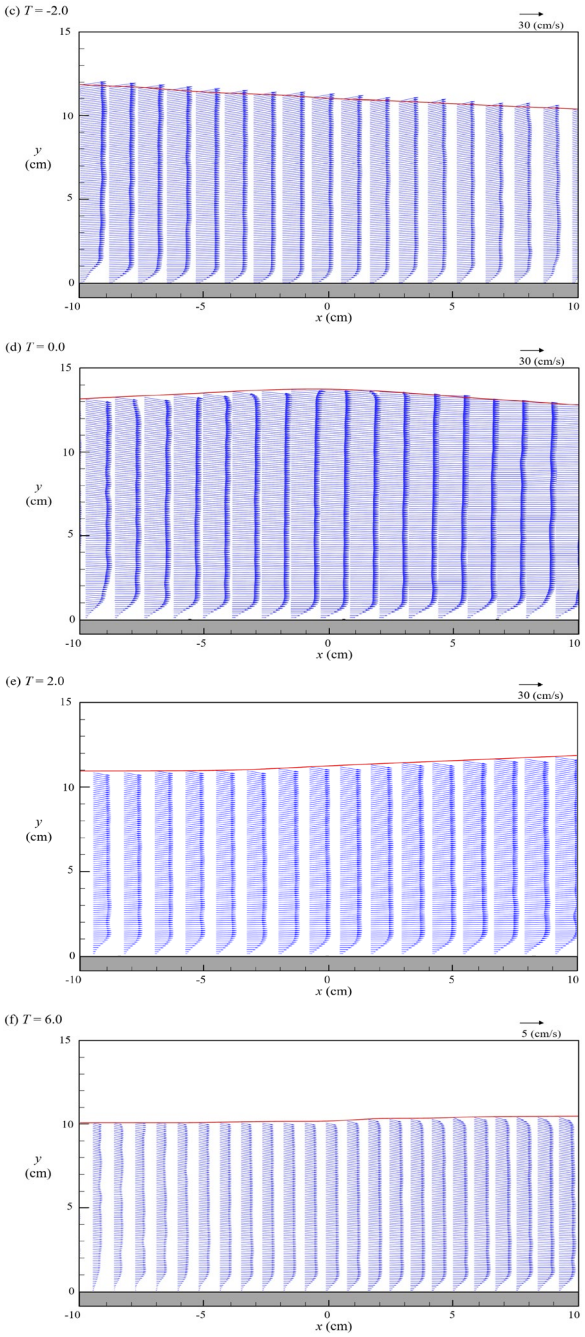


圖 6：Case C 於不同時間點之瞬時速度場

五、結論

本研究針對孤立波於水平底床進行同向追越碰撞之流場特性進行探討，研究結果明確將追越碰撞的演化過程劃分為多個階段，並根據波高比條件將重合波形系統性歸納為雙峰、平坦及單峰等三種類型 。透過 HSPIV 與質點軌跡可視化觀測發現，孤立波在同向追越交互過程中展現出高度的非線性，其流場內部主要受到垂直速度的相互干擾影響，而水平速度則幾乎未受到明顯干擾，顯示兩波融合後之流場仍具備穩定的推進性 。綜合實驗數據證

實，即便在複雜的波形重組過程中，流體質點運動仍保有其動力規律，本研究成果可為孤立波群交互作用下之流場穩定性評估與相關沿岸工程設計提供重要且具驗證性的實驗依據 。

謝誌

本論文係國家科學及技術委員會專題研究計畫「孤立波入射於垂直牆與其反射波交互作用下之近底床流場特性研究」(編號 NSTC 112-2221-E-005-074-MY3)之研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

[1] J. Boussinesq, “Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d’un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal de vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond,”*Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, vol. 17, pp. 55–108, 1872.

[2] L. Rayleigh, “On Waves,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 1, pp. 257–279, 1876.

[3] D. J. Korteweg and G. de Vries, “On the Change of Form of Long Waves Advancing in a Rectangular Canal and a New Type of Long Stationary Waves,” *Philosophical Magazine Series*, vol. 39, pp. 422–443, 1895.

[4] C. Lin, S. M. Yu, W. Y. Wong, G. W. Tzeng, M. J. Kao, P. H. Yeh, R. V. Raikar, J. Yang, and C. P. Tsai, “Velocity characteristics in boundary layer flow caused by solitary wave traveling over horizontal bottom,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 76, pp. 238–252, 2016.

[5] C. Lin, M. J. Kao, J. Yang, R. V. Raikar, J. M. Yuan, and S. C. Hsieh, “Particle acceleration and pressure gradient in a solitary wave traveling over a horizontal bed,” *AIP Advances*, vol. 10, no. 115210, pp. 1–15, 2020d.

[6] C. Lin, M. J. Kao, J. Yang, J. M. Yuan, and S. C. Hsieh, “Effects of nonlinearity on velocity, acceleration and pressure gradient in free-stream zone of solitary wave over horizontal bed—an experimental study,” *Water*, vol. 14, no. 3609, pp. 1–24, 2022.

[7] M. Umeyama, N. Ishikawa, and R. Kobayashi, “High-resolution PIV measurements for rear-end and head-on collisions of two solitary waves,” *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 34, pp. 1–15, 2014.

[8] M. Umeyama, “Experimental study of head-on and rear-end collisions of two unequal solitary waves,” *Ocean Engineering*, vol. 137, pp. 174–192, 2017.

[9] W. Craig, P. Guyenne, J. Hammack, D. Henderson, and C. Sulem, “Solitary water wave interactions,” *Physics of Fluids*, vol. 18, no. 057106, pp. 1–25, 2006.

[10] 薛儒謙，兩孤立波於同向追越碰撞作用下之底部邊界層流場特性探討，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，台灣台中市，2025 年。

海豚喀搭聲定位與追蹤研究

楊凱傑[1]　翁仕賢[2,3]　胡惟鈞[4]　陳琪芳[5]

摘要

近年來，臺灣西部近岸海域的離岸風電產業蓬勃發展，周邊海域之鯨豚生態調查也越發受到重視，為確保海域開發與生態環境的協調，被動式聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）已逐漸成為實施水下鯨豚長期監測的重要技術。本研究針對鯨豚發出的喀搭聲序列（Click-train）進行水下定位，藉由定位追蹤，以期分析鯨豚在特定棲地中的行為模式。然而拖曳式聲學陣列在定位時，常受限於左右模糊性（Left-right Ambiguity）而難以獲取精確的二維空間座標，因此本研究結合拖曳式陣列與底碇式聲學測站兩種不同的監測方法，利用拖曳式陣列的到達時間差（Time Difference of Arrival, TDOA）計算出聲源方位角，接著計算拖曳式陣列與底碇式設備接收相同訊號的 TDOA，建構雙曲線，透過數值最佳化求解方位角射線與雙曲線之幾何交點即為聲源位置。此外，為評估複雜水下環境的影響，亦導入 Bellhop 聲線模型，驗證定位誤差。研究結果顯示，此架構能有效結合兩種 PAM 方法，在基線內達到最低誤差為 8.01 公尺，成功利用聲音定位海豚並追蹤，為鯨豚生態聲學監測提供一套具高度實用性與工程價值的定位方法。

關鍵詞：到達時間差、被動式聲學監測、海豚定位、拖曳式陣列、水下聲學

Localization and Tracking of Dolphin Clicks

Kai-Jie, Yang[1]　Shih-Hsien, Weng[2,3]　Wei-Chun, Hu[4]　Chi-Fang, Chen[5]

ABSTRACT

Offshore wind farm development in western Taiwan has intensified the need for cetacean monitoring. This study presents a hybrid Passive Acoustic Monitoring (PAM) framework for localizing and tracking dolphin click-trains. To resolve the left-right ambiguity inherent in traditional towed arrays, we integrate a towed array with a bottom-mounted recorder. Source positions are estimated by calculating the intersection of a bearing ray (from towed array TDOA) and a hyperbola (from cross-platform TDOA) using numerical optimization. The Bellhop ray-tracing model was employed to validate localization accuracy in complex underwater environments. The results demonstrate that this integrated approach achieves a minimum error of 8.01 m within the baseline, successfully tracking dolphin trajectories and offering a practical, high-value solution for marine eco-acoustic monitoring.

Keywords: Time Difference of Arrival; Passive Acoustic Monitoring; Dolphin Localization; Towed Array; Underwater Acoustics

[1] 國立臺灣大學工程科學與海洋工程學系 碩士班研究生
[2] 洋聲股份有限公司 生態經理
[3] 國立臺灣大學工程科學與海洋工程學系 博士候選人
[4] 國立臺灣大學船舶及海洋技術研究中心 助理研究員
[5] 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

一、緒論

臺灣西部近岸海域為中華白海豚（*Sousa chinensis*）的重要棲地，該物種在臺灣西部近岸族群已被國際自然保護聯盟（IUCN）列為極危物種（Critically Endangered, CR）[1]。而部分風場範圍鄰近該棲地，風場建設過程中的打樁作業與頻繁的船舶交通，會產生強烈的水下噪音，這對於高度仰賴聲學進行覓食、導航與溝通的海豚族群造成嚴重的潛在威脅[2]。因此，建立有效且精確的水下鯨豚生態監測機制有其必要。

被動式聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）為紀錄鯨豚發聲活動，進而分析其生態習性、棲地利用之方法[3]。本研究佈放水下聲學紀錄器組成之聲學欄柵蒐集海豚發出的聲訊，建立大範圍且連續的聲學觀測網，並結合海上目視調查（Visual survey）與拖曳式聲學陣列（Towed array），用以獲取即時的空間分佈資訊。當海豚游經監測區域時，研究人員能藉由擷取並分析其發出之寬頻喀搭聲（Clicks）[4]，進一步追蹤其活動動態。

過去的定位研究常利用拖曳式陣列接收訊號，透過計算聲源的方位角，亦或尋找海面反射波與直達波的時間差來估算目標的距離與深度[5][6]。然而臺灣西部近岸海域屬於典型的淺水環境（水深普遍在 20 公尺以內），嚴重的多重路徑效應（Multipath effect）導致直達波與反射波在時域上高度重疊，難以精確分離[7]。為克服此物理限制並充分整合既有資源，本研究結合拖曳式陣列與聲學欄柵之底碇式聲學測站的接收訊號，推估出海豚的定位與軌跡，期能為鯨豚生態聲學監測提供一套具高度實用性與工程價值的定位分析方法。

二、研究方法

2.1 研究場域與儀器配置

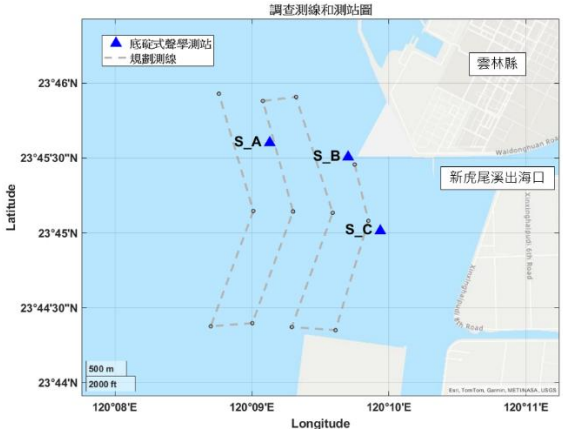


圖 1：調查測線和底碇式聲學測站圖

本研究於雲林麥寮港鄰近海域佈放三處底碇式聲學測站並進行海上調查(圖 1)，佈放區域參考海洋保育署臺灣西部沿海白海豚族群及水下活動監測與分析計畫之成果報告書[8]，於彰化雲林交界 (23°50’00”) 至雲林北段海域 (23°40’00”)有較高目擊率，且白海豚的回聲定位（Echolocation）偵測結果（作為活動頻度的指標）顯示靠近河口海域的監測站活動量較高。

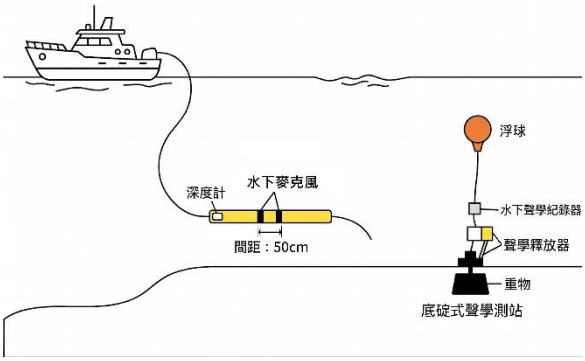


圖 2：拖曳式聲學陣列與底碇式聲學測站佈放示意圖

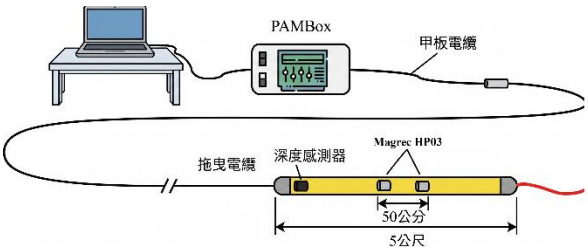


圖 3：拖曳式聲學陣列系統配置圖

底碇式聲學測站使用之水下聲學紀錄器為紐西蘭 Ocean Instruments 公司所製造之 SoundTrap ST600HF，其額定深度達 500 公尺，頻率響應範圍從 20Hz 至 150kHz，取樣頻率設定為 384kHz，儲存格式採無失真壓縮檔案，可解壓縮成 wav 檔案。連接浮球與音響釋放儀以便佈放及回收作業，如圖 2 所示。拖曳式聲學陣列使用 2 個 Magrec HP03 水下麥克風且包含前置放大器，頻率響應範圍從 2 至 150kHz，取樣頻率設定為 500kHz，深度計使用 Keller PA-9SE-10 記錄拖曳期間水下麥克風器之深度。聲學陣列透過電纜連接至電腦和 PAMBox，將錄音資料即時傳輸至船上的監測電腦，並使用 PAMGuard 軟體判斷是否偵測到鯨豚鳴音，示意圖如圖 3。

2.2 儀器時間同步

當研究船駛經底碇式聲學測站附近時，船舶寬頻噪音的多路徑干涉會在時頻譜（Spectrogram）上形成 U 型或拋物線型的干涉條紋（Interference Striations）[9]。假設船隻以等速 v 直線航行，r_0 為船隻與麥克風的最近距離（CPA, Closest Point of Approach），t_{CPA} 為發生 CPA 的時間點。在任意時間 t，船隻與麥克風的水平距離 r(t)可由下方程式(1)表示：

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + v^2(t - t_{CPA})^2} \quad (1)$$

將式(1)對時間微分可以得到距離的變化率：

$$\frac{dr}{dt} = \frac{v^2(t - t_{CPA})}{r(t)} \quad (2)$$

根據 Chuprov 提出的波導不變量理論，在一個干涉條紋上，頻率ω與距離 r 的相對變化關係由波導不變量β決定[9]：

$$\frac{d\omega}{\omega} = \beta \frac{dr}{r} \quad (3)$$

將式(3)對時間微分觀察頻譜圖上斜率的變化：

$$\frac{d\omega}{dt} = \beta \frac{\omega}{r} \frac{dr}{dt} \quad (4)$$

因此當船行經 CPA 時，t＝t_{CPA}，帶入式(2)得到$\frac{dr}{dt} = 0$，此時在頻譜圖上斜率變化$\frac{d\omega}{dt}$也為 0。當船隻行經 CPA 時，時頻譜為 U 型或拋物線型條紋的最底端[10]。

找出船經過底碇式聲學測站之最近距離點，對訊號進行帶通濾波（頻寬 20Hz-10kHz），繪製時頻譜圖如圖 4 上方，將能量沿頻率軸取平均，進行移動平均（moving average）平滑突發的寬頻噪音，能量最高點即為 CPA 時間，藉由比對底碇式與拖曳式系統在該時刻的記錄時間，可修正兩設備間的時間（Time Drift）。

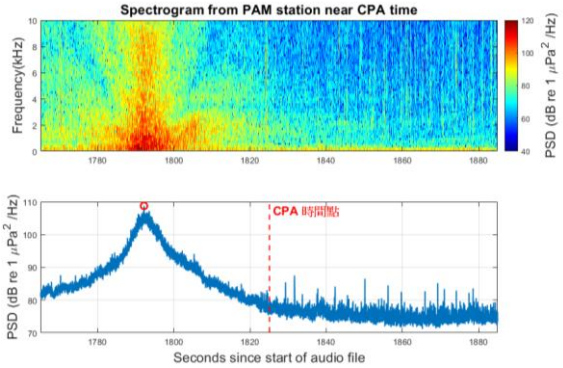


圖 4：船行經 CPA 時頻譜圖和平均能量(Hanning Window，Overlap：75%，FFT points：2048)

2.3 訊號偵測

海豚的喀搭聲（Clicks）為寬頻且極短暫的訊號。因此，本研究首先將原始聲學訊號轉換為包絡線（Envelope），藉此突顯訊號的真實能量輪廓。為有效濾除風場環境背景雜訊與確保目標訊號的強度，設定當該峰值的訊雜比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）超過 10dB 時，才會被記錄為有效的訊號。

參考 Akamatsu 和 Lin 等人的研究[11][12]，將偵測到的訊號以下列條件分類成喀搭聲序列：

1. 若連續偵測到之間隔小於 4 毫秒的喀搭聲，將其視為潛在的海面或海底反射波並予以剔除。
2. 為避免將波浪或其他海洋生物等不規則脈衝訊號誤判為喀搭聲，本研究僅提取脈衝間隔（Inter-click interval, ICI）變化率介於 50%至 200%之間的連續喀搭聲，且 ICI 不超過 200 毫秒。
3. 少於 6 個或大於 500 個喀搭聲的序列將被捨棄不計，以排除零散的孤立訊號及強烈連續的船舶噪音。
4. 針對拖曳式陣列中兩個水下麥克風到達時間差的標準差（Standard deviation）小於 221μs 的序列進行後續分析。確保同一序列的喀搭聲皆源自於穩定一致的方位角，符合海豚在發出一組序列時，其時空間位置應落於一狹窄方位範圍內之物理特性。

2.4 聲學定位

2.4.1 方位角估計

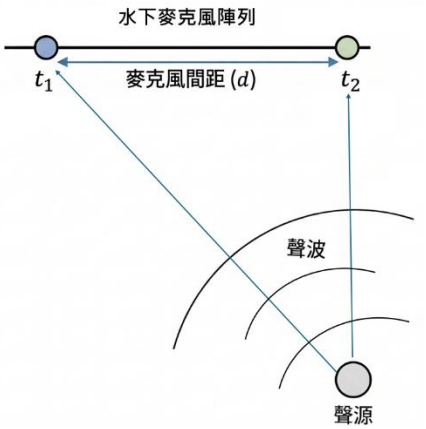


圖 5：到達時間差計算聲源與聲學陣列示意圖

本研究利用拖曳式陣列中兩個水下麥克風接收到目標訊號的到達時間差（Time Difference of Arrival, TDOA），計算聲源相對於陣列的方位角。當聲源和接收點的距離遠大於目標訊號的 10 倍波長，符合遠場條件，可將聲源視為平面波，此時可以得到以下式子：

$$d \times \cos\theta = (t_2 - t_1) \times c \quad (5)$$

其中 c 為聲速，經過反餘弦計算可得方位角：

$$\theta = \cos^{-1}\frac{(\tau * c)}{d} \quad (6)$$

本研究於計算時定義船行方向為 0 度，陣列末端為 180 度，當靠近船方向之聲學紀錄器先收到訊號，計算出之方位角範圍從 0 至 90 度，代表目標訊號位於陣列前方，91 至 180 度則目標位於陣列後方。

2.4.2 距離估計

本研究利用底碇式測站與拖曳式陣列的到達時間差進行雙曲線定位。假設於二維直角坐標系中接收點 R_1 的座標為(x_1, y_1)，R_2 的座標為(x_2, y_2)，聲

源座標為(x, y)，聲源和兩點的距離分別為 d_1 和 d_2(圖 6)，由歐幾里得距離公式可得：

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (7)$$

$$d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (8)$$

訊號抵達兩接收點的時間分別為 t_a 和 t_b，設定海中平均聲速為 c，則兩點間的到達時間差所對應的聲波傳遞距離差可定義為：

$$\Delta d = c \cdot \Delta t = c \cdot (t_a - t_b) \quad (9)$$

將式(7)和(8)帶入後得到：

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = c \cdot \Delta t \quad (10)$$

已知到達時間差後推導出聲源位置(x, y)所必然滿足式(10)之雙曲線方程式。

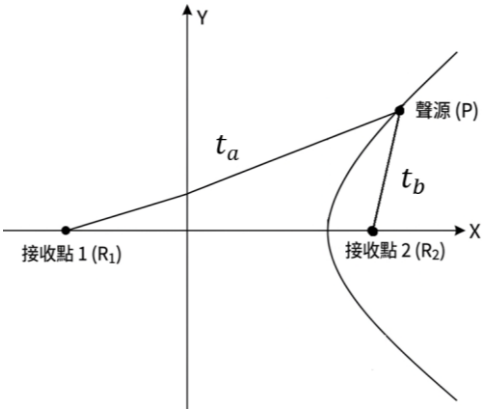


圖 6：到達時間差雙曲線示意圖

由於拖曳式陣列與底碇式聲學測站之硬體規格相異，其原始錄音之取樣頻率分別為 500kHz 與 384kHz。為確保兩獨立系統之訊號於時域上得以精確對齊，並滿足互相關函數（Cross-correlation）對輸入訊號長度與解析度之一致性要求，本研究於計算 TDOA 前，利用內插法將聲訊進行升採樣（Upsampling）至 2MHz。

2.4.3 空間位置交點

理論上目標位置即為方位角射線與雙曲線之交點。首先，沿拖曳式陣列所估算之方位角射線建構一搜尋點集 $P_k(x_k, y_k)$。對於射線上的任意點 P_k，計算至底碇式測站與拖曳式陣列之距離，進而求得距離差：

$$\Delta d_k = \sqrt{(x_k - x_1)^2 + (y_k - y_1)^2} - \sqrt{(x_k - x_2)^2 + (y_k - y_2)^2} \quad (11)$$

接著定義誤差函數 E(k)量化每一搜尋點之距離差(Δd_k)與式(9)計算的距離差間的差異：

$$E(k) = |\Delta d_k - \Delta d| \quad (12)$$

當該最佳化座標點之距離誤差滿足$\min(E(k)) \leq 2(m)$時，判定為有效的鯨豚定位點；若誤差大於此門檻，則視為無效交點，提升定位之精確度。

三、研究結果

3.1 定位誤差驗證

本研究使用 Bellhop 聲線模型[13]驗證定位誤差，Click 模擬訊號使用高斯調變正弦脈衝（Gaussian-modulated Sinusoidal Pulse），波形和頻譜如圖 7 所示，訊號各項參數參考 Fang 等人的研究[14]，設定中心頻率（Center frequency）為 95000Hz，訊號長度約 22 微秒。

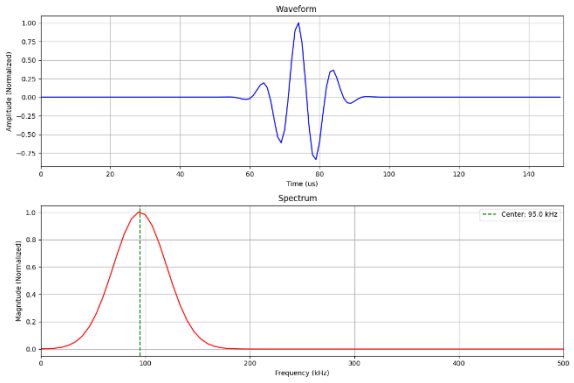


圖 7：模擬訊號波形和頻譜圖

本研究模擬海豚於拖曳式陣列與底碇式測站所構成之基線周遭活動。模擬參數設定研究船速為 6 節，海豚游速為 4 節，發聲頻率為每秒一次。為探討不同方位角與目標距離對定位誤差之影響，規劃航向和游向平行與垂直兩種動態軌跡（圖 8）。

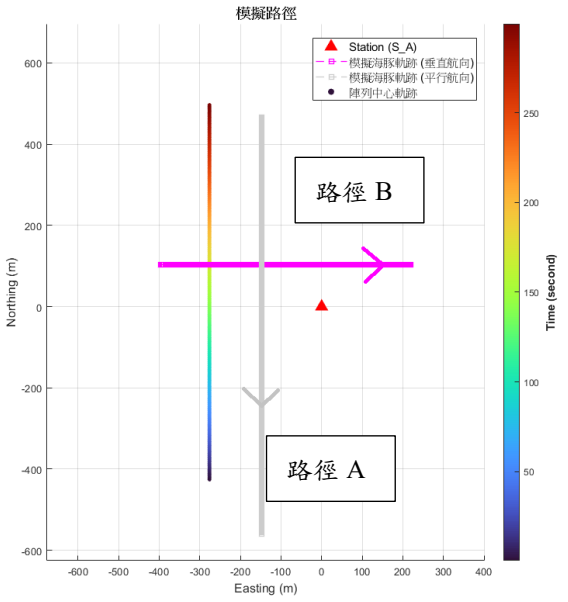


圖 8：模擬路徑圖

圖 9 為平行路徑（路徑 A）之定位誤差與海豚至基線中點距離散佈圖，結果顯示，定位誤差整體隨距離遞增，在 250 公尺範圍內，誤差多能穩定於 50 公尺以內。此外，當方位角接近端射方向（Endfire，約 0°-20°與 160°-180°）時，誤差出現擴大趨勢。

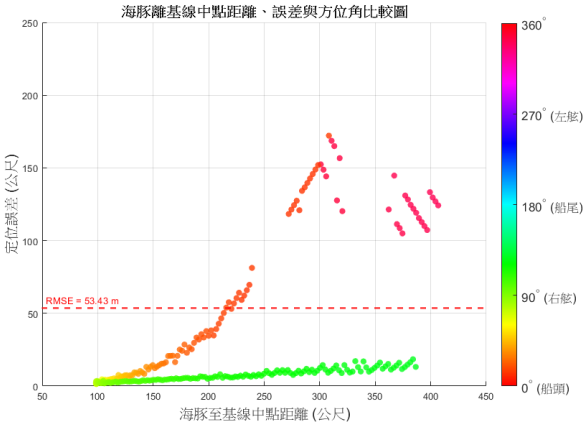


圖 9：路徑 A 海豚到基線中點距離定位誤差圖 (n=260)

而此趨勢在垂直路徑（路徑 B 圖 10）更為明顯，當海豚位於陣列側向（Broadside）時，即使距離延伸至 400 公尺，誤差仍僅微幅上升（維持於 20 公尺內）；反之，一旦目標靠近端射區，定位誤差急遽發散。

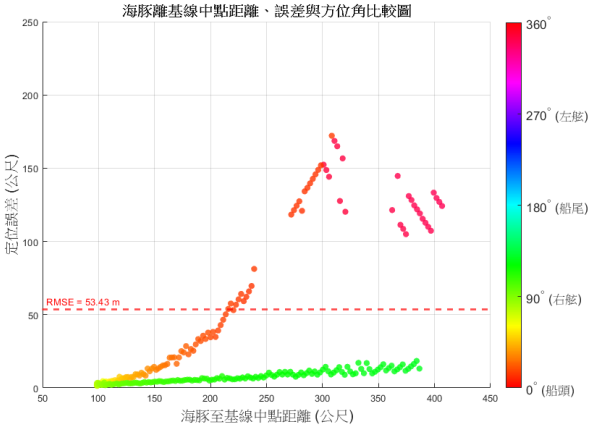


圖 10：路徑 B 海豚到基線中點距離定位誤差圖 (n=270)

為評估系統於合理範圍內之可靠度，本研究合併兩軌跡結果，並剔除端射區(0° ± 20°、180° ± 20°)之數據，繪製定位累積誤差分配圖（Cumulative distribution function, CDF）如圖 11。統計結果顯示，在目標位於側向且距基線中點 400 公尺內之條件下，定位之方均根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）為 8.01 公尺，且第 90 百分位誤差（90th percentile error）為 13.1 公尺。

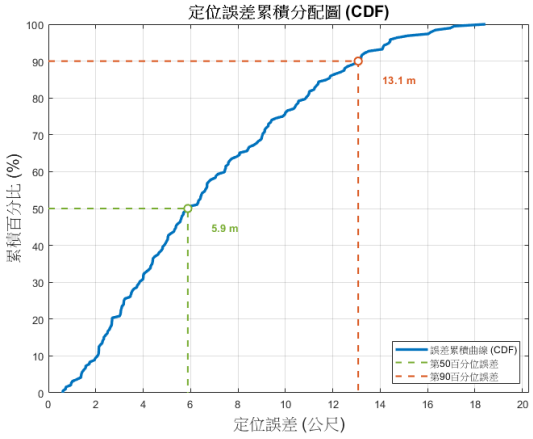


圖 11：定位累積誤差分配圖(n=192)

3.2 定位結果

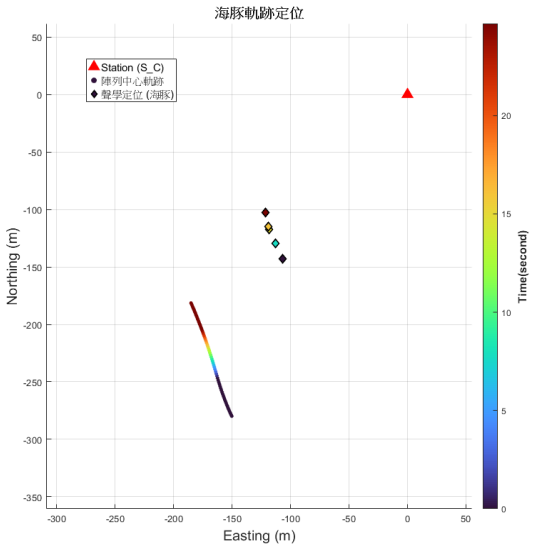


圖 12：2025 年 7 月 16 日 S_C 測站定位結果

本研究結合目視調查團隊之記錄，針對有中華白海豚出沒之時段進行聲學定位分析。以 2025 年 7 月 16 日 13 時 50 分之觀測資料為例，成功解算出一段海豚之連續軌跡，其結果如圖 12 所示。圖中座標原點(0, 0)設置於底碇式聲學測站（S_C）。圖表右側之色標（Colorbar）代表觀測時間軸，總長約為 24 秒。觀察拖曳式陣列中心之軌跡，可得知在該段觀測時間內，研究船正由東南向西北方向航行（座標約從(-150, -280) 移動至(-190, -180)）。

在此連續的 24 秒觀測窗內，本研究所開發之最小平方法定位演算法成功解算出數個符合誤差門檻（<2m）的有效海豚位置（圖中菱形標記）。定位結果顯示，該發聲海豚個體位於底碇測站與拖曳陣列之間，其空間座標大略分布於東距（Easting）-100 至-130m，北距（Northing）-100 至-150m 的範圍內。基於此軌跡序列之時空變化，估算該海豚之平均游速約為 1.8 m/s，此數值與文獻中記錄之中華白海豚一般巡游速度（約 3 至 5 節，相當於 1.5 至 2.5 m/s）吻合[8]。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究成功開發一套定位方法結合拖曳式陣列與底碇式測站之系統，利用拖曳式陣列中兩個水下麥克風計算出聲源方位線，結合單一底碇式聲學測站之到達時間差建構雙曲線，並利用最小平方法最佳化兩者之交點，實現海豚定位並追蹤其移動軌跡。結果顯示在基線區域內且位於拖曳陣列側向（Broadside）之定位方均根誤差約為 8.01 公尺，且成功追蹤一段中華白海豚連續位置，證實此架構在淺海多路徑環境下具備一定可行性。

4.2 建議

為達成長期且自動化之鯨豚監測目標，建議未來可將現有之單通道底碇式測站替換為雙通道（或多通道）聲學紀錄器，使其具備獨立估算聲源方位之能力。透過佈放多組底碇式測站，利用本研究驗證之定位方法，實現跨季度之長期定位追蹤與行為分析，進一步提升鯨豚保育監測之應用。

謝誌

本研究由哥本哈根基礎建設基金提供經費資助，誠摯感謝光宇工程顧問股份有限公司於「中能風場 BAP 水下聲學及鯨豚調查研究計畫」之指導與支持，洋聲股份有限公司進行拖曳式聲學陣列與底碇式儀器之佈放與回收，以及費思未來有限公司提供鯨豚海上目視調查與影像紀錄數據，謹此致謝。

參考文獻

[1] Wang, J.Y., Araujo-Wang, C., *Sousa chinensis ssp. taiwanensis* (amended version of 2017 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T133710A122515524.

[2] Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., & Tyack, P., “Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs,” *Marine ecology progress series*, *309*, pp. 279-295, 2006.

[3] Zimmer WMX. Passive acoustic monitoring (putting it all together). In: *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*. Cambridge University Press; 2011, pp.237-238.

[4] Au, Whitlow WL., *The sonar of dolphins*. Springer Science & Business Media, 1993.

[5] Akamatsu, T., Matsuda, A., Suzuki, S., Wang, D., Wang, K., Suzuki, M., Muramoto, H., Sugiyama, N. & Oota, K., “New stereo acoustic data logger for free-ranging dolphins and porpoises,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 39, no. 2, pp.3-9, 2005.

[6] Li, S., Akamatsu, T., Wang, D. & Wang, K., “Localization and tracking of phonating finless porpoises using towed stereo acoustic data-loggers,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 1, pp.468-475, 2009.

[7] Zimmer WMX. Localization and tracking. In: *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*. Cambridge University Press; 2011, pp.198-236.

[8] 海洋委員會海洋保育署。「111 年臺灣西部沿海白海豚族群及水下活動監測與分析計畫」案成果報告書。

[9] S. D. Chuprov, “Interference Structure of Sound in a Layered Ocean,” in *Ocean Acoustics. Current State* (Nauka, Moscow, 1982), pp. 71–91.

[10] G. L. D’Spain, W. A. Kuperman, “Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106 no. 5, pp.2454–2468, 1999.

[11] Akamatsu, T., Nakamura, K., Kawabe, R. *et al.* “Seasonal and diurnal presence of finless porpoises at a corridor to the ocean from their habitat,” *Mar Biol*, .vol. 157, pp.1879–1887, 2010.

[12] Lin, TH., Akamatsu, T. & Chou, LS. “Tidal influences on the habitat use of Indo-Pacific humpback dolphins in an estuary,” *Mar Biol*,vol. 160, pp.1353–1363, 2013.

[13] Porter, Michael B. “The bellhop manual and user’s guide: Preliminary draft,” Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep 260, 2011: 70.

[14] Liang Fang, Songhai Li, Kexiong Wang, Zhitao Wang, Wenjing Shi, Ding Wang, “Echolocation signals of free-ranging Indo-Pacific humpback dolphins (*Sousa chinensis*) in Sanniang Bay, China,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no 3, pp. 1346–1352, 2015.

基於 YOLO 物件偵測模型於臺灣西部海豚哨叫聲自動偵測與聲學特徵分析

陳宜欣[1]　胡惟鈞[2]　陳琪芳[3]

摘要

被動式聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）提供一種非侵入式方法，可長期觀測鯨豚發聲行為及其與環境變化之關聯。本研究以臺灣西部海域為研究區域，利用水下聲學資料進行海豚哨叫聲（whistles）偵測與分析。過去哨叫聲分析多仰賴人工檢視，或於自動偵測後進行人工驗證，處理流程繁瑣，且不易擴展至長時間連續資料。為提升分析效率，本文建立一套基於 YOLOv8 物件偵測演算法之自動化哨叫聲偵測方法，透過將聲音訊號轉換為頻譜圖（spectrogram），使模型可於時頻空間中辨識哨叫聲事件，並以邊界框方式完成定位，實現自動化偵測流程。模型訓練完成後，透過訓練、驗證與測試資料進行效能評估，結果顯示整體準確率可達 80% 以上，具備穩定之哨叫聲偵測能力。後續將進一步與人工標註資料及既有分析工具進行比較，以評估其偵測表現與一致性，並檢視其應用於長時間聲學資料分析之可行性。所提出之方法具備自動化、可擴展及可重現等特性，可作為大規模聲學資料處理與鯨豚聲學監測之基礎。

關鍵詞：被動式聲學監測、海豚哨叫聲、物件偵測、YOLOv8、聲譜圖分析

一、緒論

鯨豚為海洋生態系中的重要指標物種，其發聲行為蘊含豐富的生態與行為資訊，對於長期監測海洋環境變化具有關鍵價值。近年來，隨著過度捕撈、海洋噪音增加及氣候變遷等因素影響，鯨豚棲地環境逐漸惡化，使相關監測與保育研究的重要性日益提升。臺灣周邊海域為多種鯨豚的重要棲息區，其中臺灣西部沿海為中華白海豚（Sousa chinensis）與瓶鼻海豚等物種之主要活動範圍。中華白海豚已被國際自然保護聯盟列為易危物種，其族群數量有限且棲地受人為活動影響顯著，因而極需建立有效之長期監測與分析方法。

被動式聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）因具備非侵入性及長時間連續觀測能力，已廣泛應用於鯨豚研究[1]。透過水下聲學記錄器可長期蒐集海豚聲音資料，並用於分析物種分布、行為模式及棲地利用情形[2][3]。在鯨豚聲音訊號中，哨叫聲（whistles）為頻率隨時間連續變化之調頻訊號，主要用於個體間溝通與群體協調[4]。其在頻譜圖（spectrogram）中呈現平滑且連續之頻率輪廓，使其成為聲學分析重要研究對象。過去研究多透過頻譜圖擷取哨叫聲之聲學參數，包括起始頻率、終止頻率、頻寬及持續時間等[5]，並進一步分析其型態特徵，例如轉折點與輪廓形狀，以探討其生態與行為意義[6]。

在哨叫聲分析方法上，早期研究多仰賴人工判讀，由研究者直接於頻譜圖中標註聲音事件與輪廓[5][7]。此方法雖具有較高精度，但高度依賴專家經驗且處理效率有限，難以應用於長時間、大規模資料分析[8]。為提升效率，後續研究發展出半自動檢測方法，透過設定頻率範圍或能量閾值進行初步偵測，再由人工進行篩選與修正，其中 PAMGuard 為常見之分析工具[9]。此外，亦有研究採用基於頻率輪廓（contour-based）之方法，從頻譜圖中擷取主頻率軌跡以進行特徵分析與分類[8][10]。然而，這些方法多依賴固定規則或參數設定，當背景噪音複雜或訊號重疊時，容易產生誤判或漏判，且對於長期監測資料之處理能力仍有限。

[1]國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系 碩士研究生
[2]國立臺灣大學 工學院海洋及船舶技術研究中心 助理研究員
[3]國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系 教授

近年來，深度學習已逐漸應用於生物聲學分析，並展現出良好的自動化與泛化能力。透過將聲音訊號轉換為頻譜圖，可將聲學事件視為影像資料，使卷積神經網路（CNN）與相關模型得以直接應用於聲音辨識任務[11]，且可在複雜聲學環境中維持較高的辨識準確度，並有效降低誤判率[12]。部分研究已將深度學習應用於海洋哺乳動物聲音之偵測與定位，例如利用 CNN 架構同時辨識與定位不同聲音類型，並達到良好的 precision 與 recall 表現[11][13]。

在模型架構上，現有方法大致可分為分類模型與物件偵測模型兩類。相較於僅判斷聲音是否存在之分類模型，物件偵測（object detection）可同時預測聲音事件之類別與其在頻譜圖中的時間–頻率位置，特別適用於具有明確輪廓與持續時間之聲音訊號。You Only Look Once（YOLO）為常見之單階段物件偵測模型，其透過單一前向傳播即可同時輸出多個目標之邊界框與類別資訊，具有計算效率高與即時性佳之優勢。近年研究已開始 YOLO 等物件偵測方法應用於生物聲學領域，並顯示其在聲音事件定位與分類上的潛力[11][14]。

綜合上述研究，傳統哨叫聲分析方法在面對長時間被動式聲學監測資料時，仍受限於處理效率與結果一致性；相較之下，深度學習與物件偵測方法則提供一種具自動化與可擴展性的分析途徑。然而，現有研究多集中於短時間或單一場域資料，對於長期、連續聲學資料之應用仍相對有限。因此，本研究提出一套結合被動式聲學監測與深度學習之自動化海豚哨叫聲偵測方法。透過將聲音訊號轉換為頻譜圖並建構標註資料集，採用 YOLOv8 模型進行哨叫聲之辨識與分類，並以訓練、驗證與測試資料評估模型效能。後續將進一步與人工標註資料及 PAMGuard 系統進行比較分析，以評估其偵測表現與一致性，並檢視其於長時間聲學資料分析中的應用潛力。本研究期望建立一套可應用於長時間聲學資料之自動化處理流程，作為後續鯨豚聲學監測與相關分析之基礎。

二、研究方法

研究建立一套結合被動式聲學監測與深度學習之自動化海豚哨叫聲分析流程，將聲學訊號轉換為頻譜圖，並視為影像資料，進而應用物件偵測模型進行聲音事件之辨識與定位。透過此方式，哨叫聲於時頻空間中的變化特徵可轉換為具有明確輪廓之目標物件，使模型得以進行自動化偵測與分析。

整體流程可分為三個主要階段：首先，蒐集並篩選水下聲學資料，建立分析所需之資料來源；其次，將原始音訊轉換為頻譜圖，並進行資料標註與資料集建構，以作為模型訓練之基礎；最後，採用 YOLOv8 物件偵測模型進行哨叫聲之自動偵測與定位，並作為後續分析與模型效能評估之基礎。

2.1 資料輸入

研究所使用之聲學資料來自臺灣西部雲林沿海之底碇式水下聲學監測系統。測站設置於麥寮港附近海域及新虎尾溪口周邊，該區域同時受到航運活動與河口輸入影響，具備複雜之聲學環境。聲學資料由水下聲學記錄器 Song Meter SM4M 進行長時間連續記錄，單次佈放可持續約 30 至 40 天，並涵蓋春、夏、秋、冬四季之觀測資料。本研究選用 2019 年底至 2020 年間之聲學資料，並依據資料品質進行篩選，排除錄音中斷或受強烈干擾之時段，最終選取各季節具代表性之連續資料區段作為分析基礎，詳細分析時段如表 1 所示。

在模型訓練階段，為提升資料多樣性與模型泛化能力，自各季節資料區段中隨機抽取部分時段建立訓練資料集，使模型能學習不同環境條件下之聲學特徵。

表 1：資料分析時間

季節	資料分析時段	天數
冬	2019/11/08~2019/12/03	26
春	2020/02/25~2020/04/08	44
夏	2020/05/01~2020/06/04	35
秋	2020/07/31~2020/09/12	44

2.2 資料準備

在完成資料篩選與區段選取後，進一步建立模型訓練所使用之資料集。長時間連續錄音先進行前處理，並轉換為頻譜圖影像作為模型輸入。音訊資料依固定時間長度切割後，透過短時傅立葉轉換（Short-Time Fourier Transform, STFT）進行時頻分析。取樣頻率設定為 96 kHz，視窗長度為 2048 samples，並採用 50%重疊，以在時間解析度與頻率解析度之間取得平衡；頻率分析範圍設定為 2–18 kHz，以涵蓋海豚哨叫聲之主要頻帶。

為提升資料一致性，頻譜圖強度轉換為分貝（dB）尺度並進行正規化處理，最終轉換為 0–255 之灰階影像。所有影像統一調整為 640×640 像素，並透過 padding 保留時間與頻率軸之比例關係，以避免影像變形，如圖 1 所示。

在資料標註方面，由研究人員於頻譜圖中手動標記哨叫聲（whistles）事件，並以邊界框（bounding box）標示其時間與頻率範圍。哨叫聲型態分類依據 Bazúa-Durán 與 Au 所提出之標準，分為平直型（constant frequency）、上升型（upsweep）、下降型（downsweep）、凹型（concave）、凸型（convex）及正弦型（sine）六類[7]，詳細分類描述如表 2。同時訂定排除準則，剔除低訊雜比（signal-to-noise

ratio, SNR）及重疊或難以辨識之訊號，以確保標註資料品質。

標註完成後，資料集依 70%：20%：10% 比例劃分為訓練集、驗證集與測試集。針對樣本數較少之類別（如 sine 類別），由於其在原始資料中出現頻率較低，導致類別分布不均，進一步採用過採樣（over-sampling）策略，以提升模型對少數類別之學習能力並改善整體分類表現。

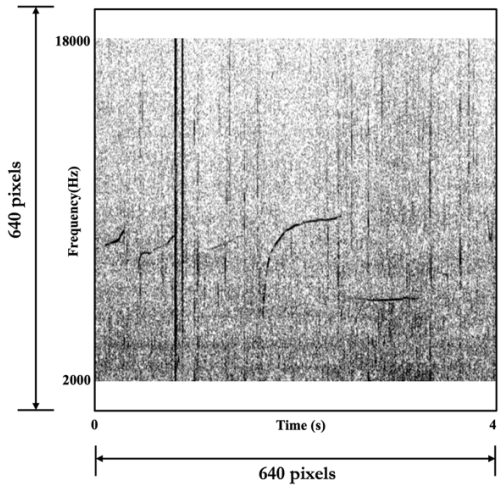


圖 1 模型輸入之頻譜圖範例

表 2 分類標準與描述[7]

Class	Category	Description
0	constant	The frequency variation is less than or equal to 1000 Hz, or the frequency range (height) is less than one quarter of the whistle duration (length).
1	upsweep	The frequency contour is mainly ascending. If inflection points are present, the descending portion accounts for less than half of the total frequency span.
2	downsweep	The frequency contour is mainly descending. If inflection points are present, the ascending portion accounts for less than half of the total frequency span.
3	concave	A frequency contour with at least one inflection point, where the frequency first mainly descends and then mainly ascends.
4	convex	A frequency contour with at least one inflection point, where the frequency first mainly ascends and then mainly descends.
5	sine	A frequency contour with two inflection points, where the frequency first mainly ascends and then mainly descends, alternating thereafter, or vice versa.

2.3 YOLOv8 模型偵測與分類

研究採用 Ultralytics 於 2023 年提出之 YOLOv8 模型進行海豚哨叫聲之自動偵測與分類[15]。延續前述頻譜圖轉換流程，模型以影像形式輸入進行偵測，可執行多目標物件偵測任務，同時完成哨叫聲事件之定位與類型判別。YOLOv8 模型主要由 backbone、neck 與 detection head 組成，其中 backbone 負責特徵擷取，neck 進行多尺度特徵整合，而 detection head 則輸出邊界框位置、類別與信心分數，以完成偵測與分類。

模型輸入影像依前述資料準備流程統一為 640×640 像素，並透過 padding 保留時間與頻率軸之比例關係，以確保頻譜特徵不受幾何變形影響。模型訓練設定為 150 epochs，batch size 為 8，並於 GPU 環境下進行訓練。

在資料增強與訓練策略方面，為兼顧模型穩定性與頻譜圖之物理意義，採用部分影像增強方法，包括 Mosaic 與 MixUp，以提升模型對背景變化之適應能力；並於訓練後期關閉 Mosaic，以促進模型收斂。考量頻譜圖具備明確之時間與頻率方向性，關閉影像翻轉操作（flipud = 0.0, fliplr = 0.0），以避免產生不合理時頻結構。此外，採用餘弦退火學習率策略（cosine learning rate schedule），以提升訓練後期之收斂穩定性。

在模型推論與後處理方面，本文規劃一套基於非極大值抑制（Non-Maximum Suppression, NMS）與時間－頻率交集聯集比（Intersection over Union, IoU）之結果整併流程，用以處理滑動視窗所造成之重複偵測問題。透過設定信心門檻與 IoU 判定條件，可將影像層級之偵測結果整合為事件層級之聲學資訊，並進一步轉換為對應之時間與頻率範圍，作為後續資料整理與分析之依據。

三、研究結果

為評估所建立之海豚哨叫聲自動偵測模型之效能，本章針對模型於訓練、驗證及測試階段之結果進行說明與比較。由於本研究採用物件偵測架構應用於頻譜圖之聲音事件辨識，模型表現之評估除分類正確性外，亦同時考量偵測位置與邊界框預測之準確程度。

在評估指標方面，主要採用準確率（accuracy）、精確率（precision）、召回率（recall），以及平均精確率（mean average precision, mAP）等指標，以反映模型在不同面向之表現。其中，precision 與 recall 分別用於衡量模型在預測結果中之正確性與完整性，而 mAP 則結合不同 IoU（Intersection over Union）閾值下之 precision－recall 曲線，用以評估模型於目標偵測任務中的整體性能。此外，亦透過混淆矩陣（confusion matrix）分析各類別之辨識能力，以觀察模型在不同聲音型態下之判別表現。

研究依前述方法建立 YOLOv8 模型，並以標註完成之海豚哨叫聲頻譜圖進行訓練，共進 150 個 epochs。訓練與驗證過程中之損失函數與評估指標變化如圖 2 所示。

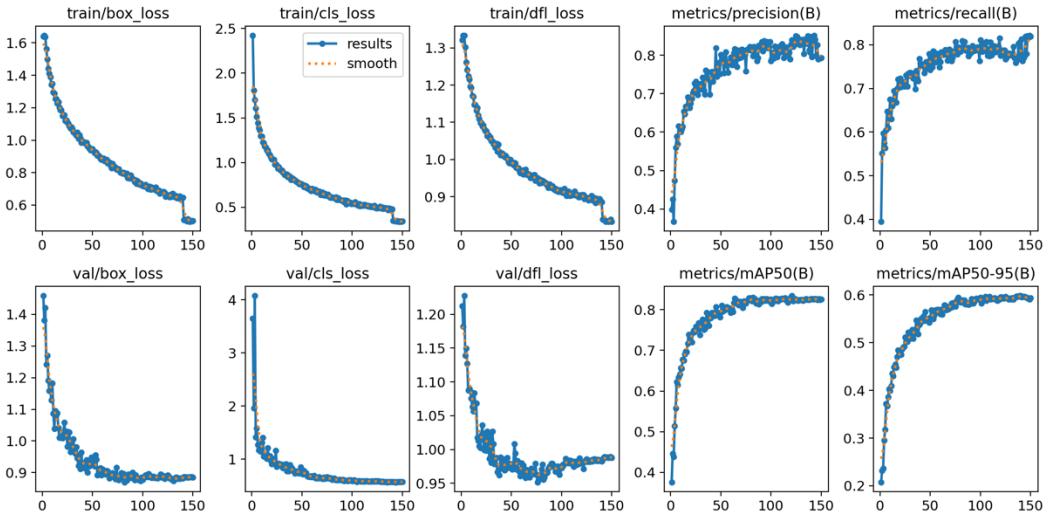


圖 2 訓練過程

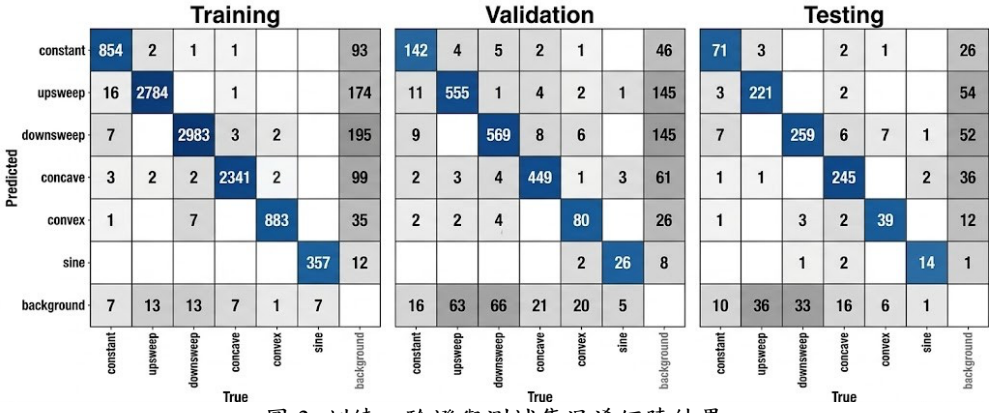


圖 3 訓練、驗證與測試集混淆矩陣結果

由圖中可觀察，box loss、classification loss 與 distribution focal loss 皆隨訓練進行呈現穩定下降趨勢，顯示模型逐步學習哨叫聲於頻譜圖中的時頻特徵。各項損失於約 100 個 epochs 後逐漸收斂；同時，precision 與 recall 在訓練初期快速提升，隨後趨於穩定。最終模型於驗證資料上之 precision 約為 0.83，recall 約為 0.80，整體 mAP@0.5 約為 0.83，而 mAP@0.5:0.95 約為 0.60，顯示模型已具備良好之偵測與分類能力。

驗證結果與訓練趨勢大致一致，僅於後期出現輕微波動，未見明顯發散現象，顯示模型訓練過程穩定，且未出現嚴重過擬合情形。進一步由 precision–recall 曲線分析各類別表現，可發現不同哨叫型態之辨識能力存在差異，其中 concave 類別表現最佳（AP 約 0.94），upsweep 與 downsweep 類別亦維持良好辨識能力（約 0.84～0.87）；相較之下，convex 與 sine 類別之辨識表現較低（約 0.68～0.75），顯示其頻率變化幅度較小或輪廓較不明顯，導致模型較難進行穩定辨識。

混淆矩陣結果可進一步觀察模型分類情形，如圖 3，多數樣本集中於對角線，顯示模型對於主要哨叫型態具備良好辨識能力。然而，仍存在部分誤分類現象，主要發生於頻譜特徵相似之類別之間，以及哨叫聲與背景雜訊之間。特別是在訊號能量較低或訊雜比較差之情境下，模型較易產生漏檢或誤判情形。此外，於高 recall 區域時 precision 出現下降，顯示在提高檢出率的同時，仍伴隨一定程度之誤判。

模型於訓練資料上呈現接近收斂之表現，並在驗證與測試資料中維持一致之趨勢，顯示其在不同資料集間具有穩定表現。

四、結論

本研究建立一套結合被動式聲學監測與深度學習之海豚哨叫聲自動偵測方法，透過將聲學訊號轉換為頻譜圖並視為影像資料，應用 YOLOv8 物件偵測模型進行哨叫聲之定位與分類。由訓練與驗證結果可知，模型於頻譜圖中能有效學習哨叫聲之

時頻特徵，各項損失函數隨訓練過程穩定收斂，precision 與 recall 亦達穩定表現，顯示模型具備良好之偵測能力。

在分類表現方面，不同哨叫型態之辨識能力存在差異，其中 concave、upsweep 與 downsweep 類別具有較佳辨識效果，而 convex 與 sine 類別則因頻率變化幅度較小或輪廓較不明顯，導致模型辨識表現相對較低。混淆矩陣分析顯示，模型對主要哨叫型態已具備良好區分能力，惟在訊號品質較差或頻譜特徵相近之情況下，仍可能產生誤判或漏檢。

此方法可有效降低傳統人工判讀之時間成本，並提升哨叫聲分析之自動化程度，對於處理長時間聲學資料具有潛在應用價值。然而，目前工作主要著重於模型訓練與效能評估，尚未進一步應用於長時間連續資料之分析。未來將擴充標註資料量、改善少數類別之資料分布，並結合長時間聲學資料與其他分析方法，以進一步評估其於實際監測應用中的可行性與穩定性。

參考文獻

[1] Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S. E., Dziak, R. P., & Matsumoto, H. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.

[2] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics* (Vol. 510). New York: Springer.

[3] Van Parijs, S. M., Clark, C. W., Sousa-Lima, R. S., Parks, S. E., Rankin, S., Risch, D., & Van Opzeeland, I. C. (2009). Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 21-36.

[4] Lammers, M. O., Schotten, M., & Au, W. W. (2006). The spatial context of free-ranging Hawaiian spinner dolphins (Stenella longirostris) producing acoustic signals. The Journal of the Acoustical Society of America, 119(2), 1244-1250.

[5] Steiner, W. W. (1981). Species-specific differences in pure tonal whistle vocalizations of five western North Atlantic dolphin species. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, *9*(4), 241-246.

[6] Janik, V. M. (1999). Pitfalls in the categorization of behaviour: a comparison of dolphin whistle classification methods. *Animal behaviour*, 57(1), 133-143.

[7] Bazúa-Durán, C., & Au, W. W. (2002). The whistles of Hawaiian spinner dolphins. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *112*(6), 3064-3072.

[8] Janik, V. M., & Slater, P. J. (1998). Context-specific use suggests that bottlenose dolphin signature whistles are cohesion calls. *Animal behaviour*, *56*(4), 829-838.

[9] Gillespie, D., Macaulay, J., Oswald, M., & Roch, M. (2026). PAMGuard: Application software for passive acoustic detection, classification, and localisation of animal sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *159*(1), 437-443.

[10] Shiu, Y., Palmer, K. J., Roch, M. A., Fleishman, E., Liu, X., Nosal, E. M., ... & Klinck, H. (2020). Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific reports*, *10*(1), 607.

[11] Hamard, Q., Pham, M. T., Cazau, D., & Heerah, K. (2024). A deep learning model for detecting and classifying multiple marine mammal species from passive acoustic data. *Ecological Informatics*, *84*, 102906.

[12] Duan, D., Lü, L. G., Jiang, Y., Liu, Z., Yang, C., Guo, J., & Wang, X. (2022). Real-time identification of marine mammal calls based on convolutional neural networks. *Applied Acoustics*, *192*, 108755.

[13] Nur Korkmaz, B., Diamant, R., Danino, G., & Testolin, A. (2023). Automated detection of dolphin whistles with convolutional networks and transfer learning. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *6*, 1099022.

[14] Márquez-Rodríguez, A., Pérez-Gimeno, N., Benítez-Aragón, D., Arroyo, G. M., & De la Cruz, A. (2026). Iterative deep learning for cetacean whistle detection in the Strait of Gibraltar. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *167*, 113756.

[15] Glenn Jocher, Jing Qiu, Ayush Chaurasia, “Ultralytics YOLO,” GitHub repository, version 8.0.0, 2023.

以水下聲學監測探討颱風對墾丁南灣淺海魚類訊號之影響

黃馨[1]　邱永盛[2]　楊穎堅[3]

摘要

本研究利用被動聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）資料，透過三階段訊號處理流程篩選並分析墾丁南灣魚類鳴叫聲，並結合潮汐、風速與海溫等環境因子，探討魚鳴活動的時間變化與可能影響。魚鳴處理部分使用短時傅立葉轉換（STFT）對長時間錄音進行頻譜分析，在頻帶範圍內計算頻譜能量，再以能量門檻值偵測聲學事件，將候選魚鳴的片段自原始音檔中裁切並輸出，再以模板比對方法進一步篩選出魚鳴事件，並針對篩選出的魚鳴訊號進行聲學特徵分析計算脈衝數（pulse number）、脈衝持續時間（pulse duration）、脈衝間隔（inter-pulse interval, IPI）、聲音持續時間（sound duration），並透過頻譜分析取得主頻（dominant frequency）與基頻（fundamental frequency）等聲學參數。

在完成魚鳴事件辨識與參數統計後，本研究進一步將魚鳴與潮汐、風速與海溫資料進行比較分析，特別關注颱風期間及其前後的環境變化。颱風通過時通常伴隨強風與浪高增加，會顯著提升海洋背景噪音並改變水體結構，可能影響魚類聲音傳播與行為模式。分析結果顯示，對於偵測到之魚鳴，其於颱風期間之偵測數量與上述三個因素（潮汐、風速與海溫）呈現延遲二十四至四十八個小時的趨勢。在颱風影響期間，風速增加與海洋擾動可能導致魚鳴偵測率下降，而在颱風過後隨著海況逐漸恢復，魚鳴活動有逐步增加甚至倍增的趨勢。此外，魚鳴出現時間亦與潮汐週期呈現一定關聯，顯示魚類活動可能受到潮汐動力與棲地環境變化的共同影響，進一步影響鳴叫頻率與出現時機。本研究透過聲學訊號處理與環境資料整合分析，說明颱風事件可能對海洋聲景與魚類聲學行為產生短期影響，並提供長時間監測海域魚類活動與極端氣象事件關聯的方法與基礎資料。

關鍵詞：南灣、颱風、魚類鳴叫

Using Underwater Acoustic Monitoring to Investigate the Effects of Typhoons on Shallow-Water Fish Acoustic Signals in Nanwan, Kenting

Hsin Huang[1]　Linus Y.S. Chiu[2]　Yiing Jang Yang[3]

ABSTRACT

This study uses Passive Acoustic Monitoring (PAM) data to screen and analyze fish calls in Nanwan, Kenting through a three-stage signal processing procedure, and combines environmental factors such as tides, wind speed, and sea temperature to explore the temporal variation of fish calling activity and its possible influences. For fish call processing, Short-Time Fourier Transform (STFT) was used to perform spectral analysis on long-duration recordings. Spectral energy was calculated within a frequency band range, and acoustic events were detected using an energy threshold. Candidate fish call segments were then extracted and output from the original audio files. A template matching method was further applied to screen out fish call events. For the selected fish call signals, acoustic feature analysis was conducted to calculate pulse number, pulse duration, inter-pulse interval (IPI), and sound duration. In addition, spectral analysis was used to obtain dominant frequency and fundamental frequency as acoustic parameters.

After completing fish call event identification and parameter statistics, this study further compared fish calls with tide, wind speed, and sea temperature data, with particular attention to environmental changes during and before and after typhoons. During typhoon passages, strong winds and increased wave height usually occur, which

[1] 國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 教授
[3] 國立臺灣大學海洋研究所 教授

significantly increase ocean background noise and alter water column structure, potentially affecting sound propagation and fish behavior. The analysis results show that, for the detected fish calls, the number of detections during typhoon periods shows a delayed trend of 24 to 48 hours relative to the three factors (tide, wind speed, and sea temperature). During the influence of typhoons, increased wind speed and ocean disturbance may lead to a decrease in fish call detection rate. After the typhoon, as sea conditions gradually recover, fish calling activity shows a trend of gradual increase or even doubling. In addition, the occurrence time of fish calls also shows a certain relationship with the tidal cycle, indicating that fish activity may be jointly influenced by tidal dynamics and habitat environmental changes, further affecting calling frequency and occurrence timing. This study explains that typhoon events may have short-term impacts on marine soundscapes and fish acoustic behavior through acoustic signal processing and environmental data integration analysis, and provides a method and basic data for long-term monitoring of fish activity and its relationship with extreme weather events.

Keywords: Nanwan; Typhoon; Fish call;

一、緒論

水下聲景為海洋生態系統的重要組成之一，反映了生物活動、物理環境與人為干擾之綜合特徵。其中，生物聲在聲景中占有關鍵地位，而魚類作為海洋生態系中的重要族群，其發聲行為已被證實廣泛存在且具多樣性。魚類鳴聲多與社交互動相關，例如求偶、領域社教及群體行為等，因此水下聲學監測已逐漸成為研究魚類行為與族群動態的重要工具。

然而，海洋聲景容易受到環境變動影響，特別是極端氣候事件如颱風，可能在短時間內改變水下環境條件，包括水溫、濁度、水流及背景噪音等，進而影響聲音傳播特性與生物發聲行為(Siddagangaiah 等，2021)。水溫變化不僅會直接影響水中生物的生理與行為，亦會改變整體棲地的聲景特徵。因此，溫度變化可能進一步影響魚類、無脊椎動物甚至海洋哺乳類的訊號偵測、通訊與導航能力，顯示氣候變遷可透過生物聲學活動改變海洋生態系統（Lillis and Mooney, 2022）。

墾丁南灣位於台灣最南端，為典型的淺海珊瑚礁環境，不僅生物多樣性豐富，亦為熱門的觀光與潛水地點。該區域地形多樣，提供多種魚類重要的棲息與繁殖空間，同時也是台灣南部頻繁受到颱風影響的海域之一，具備研究極端氣候事件影響之良好條件。

魚類鳴聲為研究其生態行為的重要依據，然而針對突發性且劇烈的氣候事件（如颱風）對魚類鳴聲之影響，仍有許多研究空間。因此，本研究透過水下聲學監測長時間記錄魚類鳴聲，並結合颱風事件與環境資料（如潮汐、風速與海溫等），探討極端環境變動對魚類聲學行為之潛在影響。

本研究目的在於從實際收錄之聲音資料與溫度資料中，結合過往該地測站之生態調查報告，辨識出出現頻率最高之魚類鳴聲訊號，並比較颱風前後之變化趨勢，了解魚類如何對環境變動做出行為上的反應。研究結果可作為建立長期生態聲景監測之基礎資料，並進一步評估氣候變遷對淺海生態系統之潛在影響。

二、研究方法

魚鳴處理部分使用短時傅立葉轉換（STFT）對長時間錄音進行頻譜分析，在頻帶範圍內計算頻譜能量，再以能量門檻值偵測聲學事件，將候選魚鳴的片段自原始音檔中裁切並輸出，再以模板比對方法進一步篩選出魚鳴事件。

本研究篩選魚鳴採用兩階段聲音偵測架構。首先利用能量法從連續聲音資料中選出候選聲音事件，以提高偵測準確度，再使用互相關（cross-correlation）進行模板匹配，以確認模板形狀與目標魚鳴之相似性，進而降低誤判率。

2.1 研究地點

本研究之量測儀器佈放於墾丁南灣，經緯度為 120’ 45.0665 ˚E, 21’ 55.8318 ˚N，鄰近核三廠出水口以及雙峰藍洞，佈放深度為水下 29 公尺。墾丁南灣位於恆春半島南端，面向巴士海峽，地理位置使其在颱風季節（約每年夏秋）特別容易受到熱帶氣旋影響。當颱風接近或通過台灣南部時，南灣往往首當其衝，海象迅速改變，常出現強風、豪雨與長浪等現象。除了強風巨浪之外，颱風帶來的豪雨也會對南灣海域造成顯著影響，對珊瑚礁與水下生態造成改變，並對該地之生態及水下聲景造成直接影響。

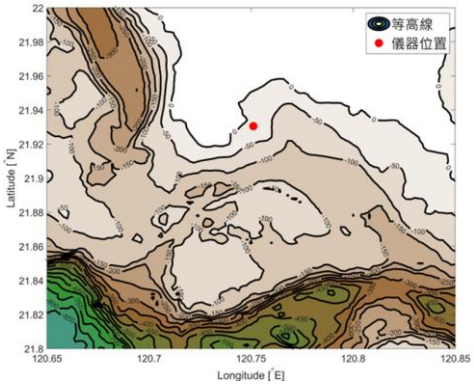


圖 1：佈放位置

2.2 佈放儀器

本研究將量測儀器固定於底碇架進行佈放，其搭載由 Ocean Instruments 公司所出產的 SoundTrap 600 水下聲學記錄器，取樣頻率設定為 96000Hz；另有 NKE Instrumentation 公司所出產之 WiSens 溫鹽深儀，設定為每三十秒記錄一筆溫度及深度資料，另有搭載都普勒流速儀(ADCP)以記錄流速資料。

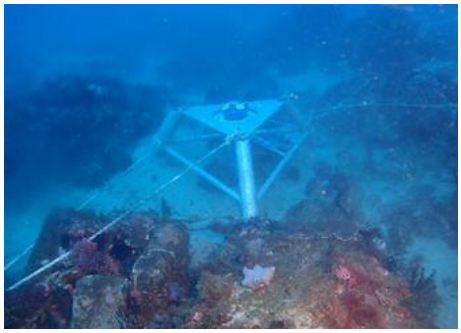


圖 2：佈放儀器

2.3 訊號處理

本研究使用 MATLAB 進行魚類聲音偵測與分析處理南灣珊瑚礁環境之水下錄音資料，目標是偵測魚鳴中的單脈衝(single pulse)與連續脈衝(pulse train)，並取得其聲學特徵進行統計分析。

2.3.1 短時距傅立葉轉換

在訊號處理方面，首先使用短時距傅立葉轉換 (Short-time Fourier Transform, SFFT)。在分析聲音訊號時，許多訊號都是非穩態的，也就是其頻率成分會隨時間改變，例如魚類聲音的脈衝或海洋噪音。如果直接對整段訊號做 FFT，只能得到整體頻譜，無法判斷某個頻率成分在什麼時間出現。短時距傅立葉轉換先將訊號分成許多窗，再對每一窗加上窗函數以減少被截斷所受的影響。接著對每個時間窗分別進行 FFT 計算，得到該時間窗內的頻率分布，最後將所有時間窗的頻譜組合成頻譜圖。計算如下：

$$X_m[f] = \sum_{n=0}^{N-1} x\,[n + mH]\omega[n]e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

其中 f 為頻率，m 代表第 m 個窗的訊號，$\omega[n]$為窗函數，N 為窗長，H 是每次的窗移動量。

2.3.2 頻譜相減

取得頻譜後，因背景噪音影響，觀察目標頻帶訊號需要再做進一步處理提升以提升訊雜比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)，因背景噪音（如海浪、流動噪音及環境底噪等）通常具有相對穩定的頻譜分布，而魚鳴訊號則多呈現為瞬時且具有特定頻率結構的聲音事件。為有效提升魚鳴訊號之可辨識性，本研究採用頻譜相減（spectral subtraction）方法進行雜訊抑制。在訊號處理上，所觀測得訊號為：

$$y(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

其中$s(t)$為目標魚鳴訊號，$n(t)$為背景噪音。對其進行傅立葉轉換後可得：

$$Y(f) = S(f) + N(f) \quad (3)$$

頻譜相減基本概念為在頻域中估算背景噪音，並自原始訊號頻譜中予以扣除，以強化目標訊號。

$$\hat{S}(f) = Y(f) - \alpha\hat{N}(f) \quad (4)$$

其中 α 為調整估計噪音之係數，在進行計算時，其值通常會設定大於 1 以更有效扣除噪音。本研究中將其值設定為 1.5。另外為避免相減後之訊號值小於 0，加入了遮罩(masking)機制：

$$\hat{S}(f) = M(f) \cdot \left(Y(f) - \alpha\hat{N}(f)\right) \quad (5)$$

當(4)之右式結果小於 0 時，將$M(f)$值設定為 0 以避免出現負值，大於 0 時則將$M(f)$值設為 1。

2.3.3 能量法

減少背景噪音後，為初步篩選出脈衝訊號，使用以能量比較為基礎的能量法進行篩選。在水下聲學訊號中，魚鳴通常表現為短時間內能量顯著上升的瞬時聲音事件，因此可利用能量法進行初步篩選：

$$E[n] = \frac{1}{N}\sum_{i=n-N}^{n}|x[i]|^2 \quad (6)$$

其中$x[n]$為原始訊號，N 為取樣點數。能量偵測門檻設定為背景能量之平均值μ_E加上乘以調整係數k的標準差σ_E，如下：

$$E[n] > \mu_E + k\sigma_E \quad (7)$$

k值做為調整門檻之參數，其值通常介於 2 到 10 之間(Zimmer 等，2011)，本研究將其設定 5 做為調整參數。

由於背景噪音在統計上多呈現相對穩定的低能量分布，而魚鳴則會造成局部能量的顯著峰值，故可透過能量門檻將其區分。

2.3.4 互相關

在取得魚鳴片段後，以目視觀察裁剪出目標魚鳴片段已進行更進一步篩選。在聲學意義上，不同種類之魚鳴通常具有各自的波形特徵與時間結構，因此可視為一種具象徵的訊號模式。互相關（cross-correlation）方法透過比對待篩選訊號與模板，尋找相似度最高之位置，等同於在時間序列中搜尋與已知魚鳴最為一致的波形結構。因此，當相關係數高於預設門檻時，即可判定該段訊號為魚鳴。公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (8)$$

上式等同於兩個向量之內積經正規化後的結果，數學表示如下：

$$r = \frac{x \cdot y}{\|x\|\|y\|} \quad (9)$$

由於 r 在幾何意義上又等同於 $\cos\theta$，因此值會介於 1 與-1 之間。本研究設定其值大於 0.7 時視為與模板匹配，計入目標魚鳴。

2.4 海象觀測資料

本研究使用觀測與記錄得之不同海洋環境以做為研究參考比較。目前將海溫、適性波高、潮位、風速以上四個因素做觀察比較。海溫使用隨底碇佈放之 WiSens 溫鹽深儀；示性波高與潮位使用隨底碇佈放之都普勒流速儀所觀測得之資料；風速資料則使用國家海洋研究院之南灣資料浮標站之觀測資料。

三、結果與討論

3.1 影響颱風

本次錄音區間約四個半月(2024/05/26 至 2024/10/15)，期間共經歷兩次暴風半徑覆蓋至測站之颱風。

凱米颱風(GAEMI)於 2024 年 7 月 20 日 14 時在菲律賓東方海面生成，生成後沿副熱帶高壓南側邊緣向西北轉北北西方向移動，逐漸接近臺灣東方海域。中央氣象署於 7 月 22 日 23 時 30 分發布海上颱風警報，並於 7 月 23 日 11 時 30 分發布陸上颱風警報，暴風半徑 250 公里。其中心最終於 7 月 25 日凌晨 0 時左右自宜蘭南澳一帶登陸臺灣，之後穿越臺灣並進入臺灣海峽，主要受副熱帶高壓導引影響 。

202403 凱米(GAEMI)

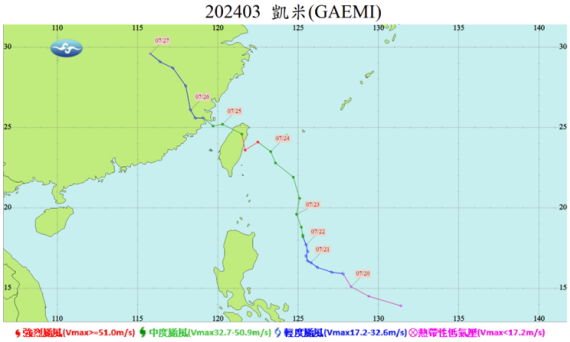


圖 4：凱米颱風路徑圖

山陀兒颱風(KRATHON)生成時間較晚，中央氣象署於 2024 年 9 月 29 日 08 時 30 分發布海上颱風警報，並於 9 月 30 日 02 時 30 分發布陸上颱風警報，暴風半徑 220 公里。其路徑受導引氣流不明顯所影響，移動速度緩慢且多次轉向，先於巴士海峽附近徘徊後逐漸北上，最終於 10 月 3 日 12 時 40 分在高雄市小港區登陸臺灣西南部，隨後轉向東北通過臺灣並出海。中央氣象署於 10 月 4 日 05 時 30 分解除颱風警報。因導引氣流較弱，呈現移動緩慢且路徑多變之特徵。

202418 山陀兒(KRATHON)

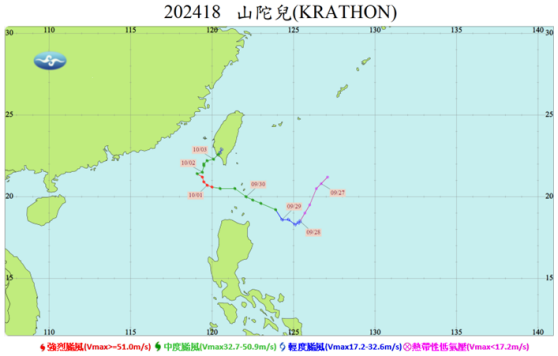


圖 5：山陀兒颱風路徑圖

得知颱風路徑並配合長時間大頻譜圖上觀察，得知颱風期間低頻噪音較其他時間顯著增加。如下：

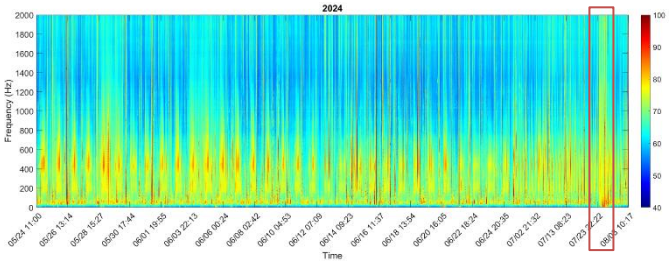


圖 6：長時間頻譜圖 1

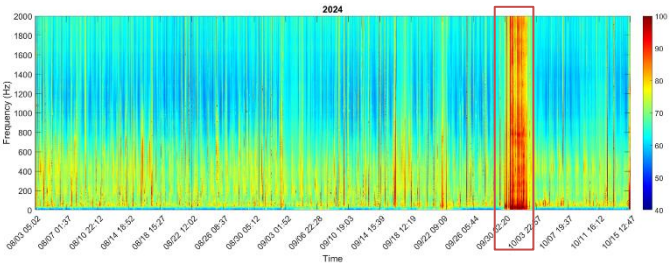


圖 7：長時間頻譜圖 2

紅框為颱風正式從熱帶性低氣壓生成為颱風與消散之時間，本研究定義為測站受颱風影響之時間段。分別為凱米颱風 2024 年 07 月 20 日 06 時 00 分至 2024 年 07 月 27 日 00 時 00 分與山陀兒颱風 2024 年 09 月 28 日 00 時 00 分至 2024 年 10 月 03 日 21 時 00 分。

3.2 魚鳴資料

根據 2022 年墾丁國家公園珊瑚礁魚類多樣性調查(陳、莫，2022)，本研究測站靠近雙峰藍洞及核三廠出水口，該點許多金鱗魚科及雀鯛科活動與棲息，觀察所收集資料及魚鳴活動時間，又依據其魚鳴頻率及振幅結構，初步推測目標魚種為新東陽莎姆金鱗魚(*Neoniphon sammara*)。



圖 8：新東陽莎姆金鱗魚

其活動期間多為夜間，鳴叫聲介於 500Hz 左右，時域上觀察其峰值脈衝結構會呈現三個尖端(Parmentier 等， 2011)。如下：

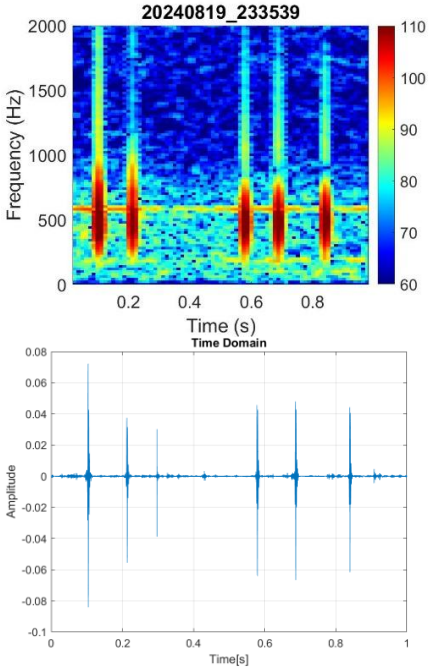


圖 9：魚鳴頻譜與時域圖

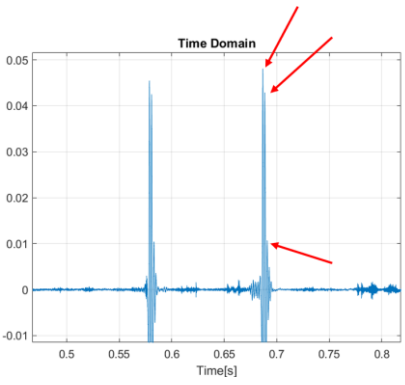


圖 10：時域結構放大

在魚類行為上，單脈衝與連續脈衝代表之社交意義不同(Banse 等，2024)，因此本研究將其兩者之魚鳴參數分開計算。計算結果如下：

表 1：單脈衝魚鳴參數

	平均值	標準差
基頻(Hz)	354	95
主頻(Hz)	517	78
時長(毫秒)	20	4

表 2：連續脈衝魚鳴參數

	平均值	標準差	最小值	最大值
脈衝數量(個)	7.64	3.02	2	27
脈衝持續時間(秒)	0.484	0.278	0.002	0.999
IPI(秒)	0.077	0.110	0.002	0.947
單個脈衝時長(秒)	0.009	0.006	0.001	0.355

3.3 比較觀測結果

取得個別魚鳴參數後，將兩者之脈衝數量與觀測之海洋資料結合比較如下，紅框為颱風存續影響測站之時間範圍：

3.3.1 單脈衝

凱米颱風時間段：

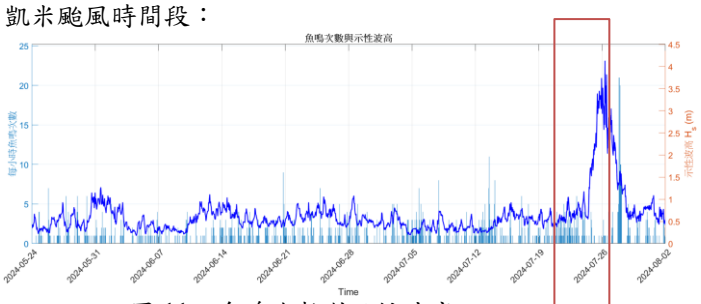


圖 11：魚鳴次數對示性波高

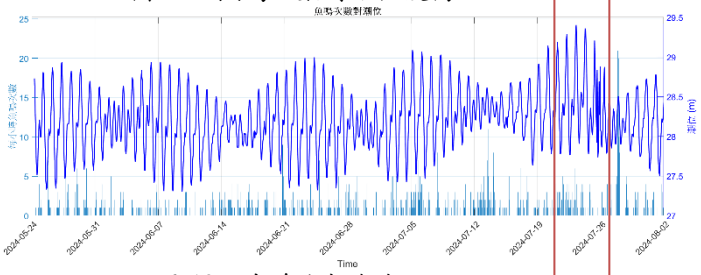


圖 12：魚鳴次數與潮位

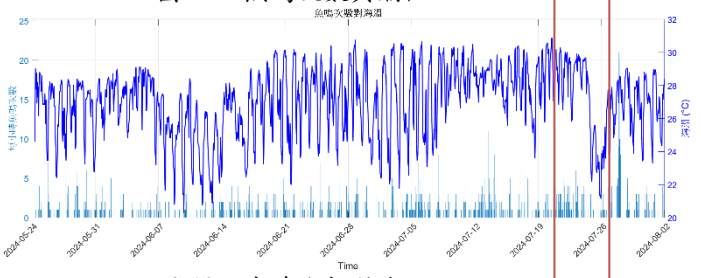


圖 13：魚鳴次數對海溫

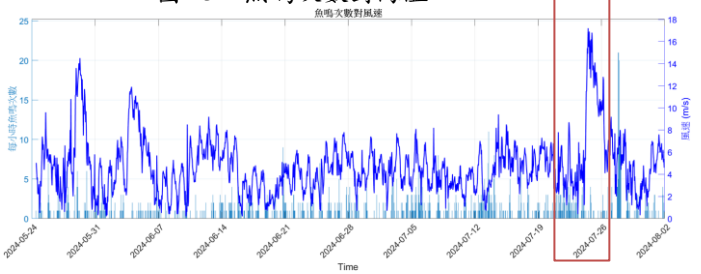


圖 14：魚鳴次數對風速

由上圖可看出颱風影響區間過後的 24 至 48 小時內，魚鳴次數較颱風之前增長數倍，此現象持續 24 小時之內便恢復正常。

山陀兒颱風時間段：



圖 15：魚鳴次數對示性波高

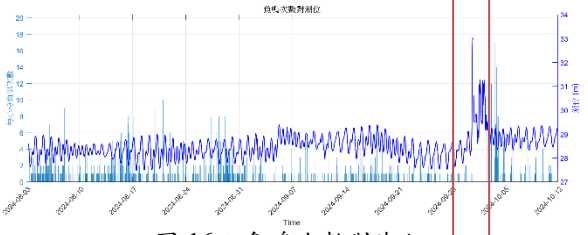


圖 16：魚鳴次數對潮位

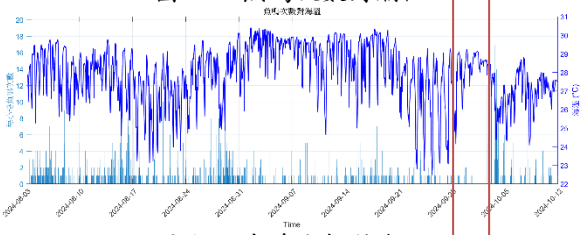


圖 17：魚鳴次數對海溫

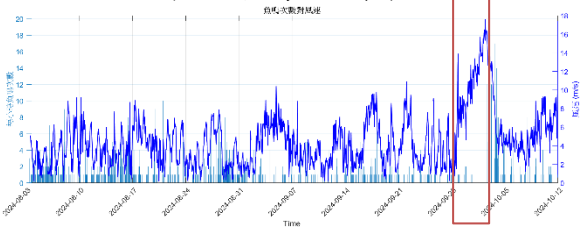


圖 18：魚鳴次數對風速

山陀兒颱風影響之區間與凱米颱風所觀測到之現象相似。測站因位於颱風登陸區域附近，於颱風區間受影響之因素較為明顯。魚鳴於颱風期間消失，同樣也於颱風消散後之 24 至 48 小時內呈現倍增形式，並於颱風消失後 24 小時內恢復正常。

3.3.2 連續脈衝

凱米颱風時間段：



圖 19：魚鳴次數對示性波高

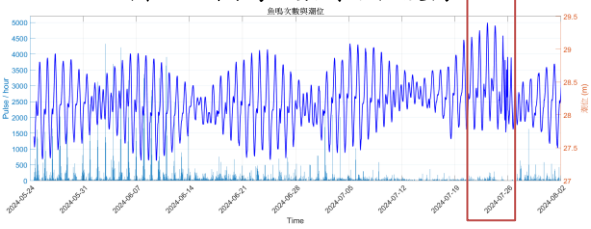


圖 20：魚鳴次數對潮位

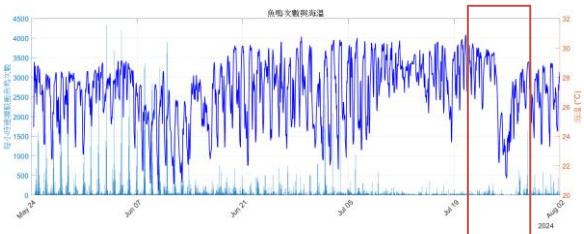


圖 21：魚鳴次數對海溫

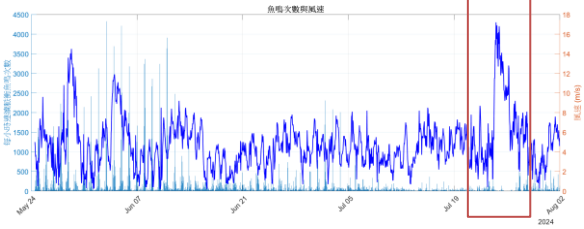


圖 22：魚鳴次數風速

山陀兒颱風時間段：



圖 23：魚鳴次數對示性波高

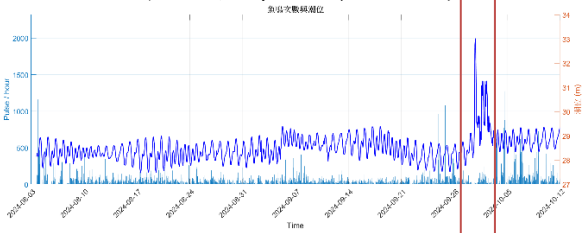


圖 24：魚鳴次數對潮位

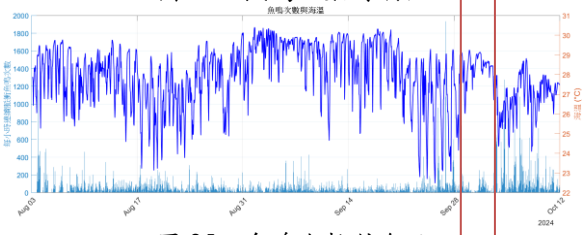


圖 25：魚鳴次數對海溫

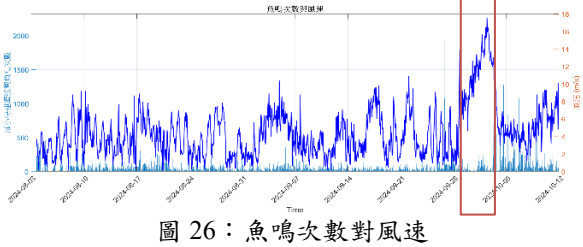


圖 26：魚鳴次數對風速

連續脈衝部分，同樣具有颱風期間減少，並在過後呈現回增之趨勢。較無颱風侵襲之時間段比較，連續脈衝之數量明顯較單脈衝之數量多。

3.4 討論

溫度部分，颱風引起的海岸表面溫度變化主要與颱風路徑相關，颱風的強度和移動速度與溫度變化之關聯性較低(Doong 等，2019)。對於凱米

颱風，由於南灣多處於外圍影響，風力較弱、水體混合有限，淺海仍保有一定程度的分層。此情況下，因此日夜溫差仍然存在且相對明顯，只有整體溫度背景略為下降。相對地，山陀兒颱風直接影響南灣，強風會造成劇烈垂直混合，使整個水體趨於均勻。同時厚雲層會降低白天太陽輻射。此條件下，海水日夜溫差大幅減少，可能僅有極小變動，失去明顯的晝夜變化。

浪高部分，凱米颱風路徑較遠，浪高會逐漸升高，在颱風接近時達到高峰，但變化相對平順。颱風離開後，浪高也會緩慢衰減；而山陀兒颱風貼近通過南台灣，南灣會同時受到強風與外海湧浪影響。此時浪高具有快速增長、短時間達峰值的特徵。最大浪高通常出現在颱風最接近時。颱風過後雖然風力快速下降，但浪高仍需一段時間才會恢復。

魚鳴部分，由偵測出數量上顯示連續脈衝明顯多於單脈衝，其與推測魚種之新東陽莎姆金鱗魚隻鳴叫習性(Banse 等，2024)符合。

颱風期間魚鳴消失可能由於強風與海面劇烈攪動會產生大量破碎浪與氣泡噪音，背景噪音提升，干擾魚鳴偵測，又因颱風引發的水體混合與底質擾動會造成沉積物再懸浮，提高水體濁度與聲波散射程度，進一步降低生物聲音的傳播距離與可偵測性。另一可能原因為颱風期間棲地結構（如珊瑚礁、底質）受到擾動或破壞，導致魚類社交行為中斷並躲藏或暫時遷移，因此聲音行為也減弱或中斷。

颱風過後魚鳴增加之情況可能由於魚類在經歷短期環境壓力後，逐漸回到原棲地並恢復社交與繁殖相關行為，導致發聲活動重新同步與集中。因此，所觀察到的「魚鳴增加」主要反映的可能是訊號可偵測性提升與行為恢復的結果，而非颱風直接促進魚類發聲強度的增加。颱風過後單脈衝與連續脈衝的恢復幅度差異，可能與其生物學功能與行為成本有關。單脈衝通常用於即時的社會互動或快速反應，因此在海象恢復初期環境還不穩定時較常被使用；相較之下，連續脈衝與較複雜的社交或繁殖行為相關，常用於較穩定的族群結構、領域關係與節律性行為，因此在颱風造成棲地擾動與族群分散尚未完全恢復前，其出現頻率上升較為緩慢。

3.5 後續研究

以現有已知魚鳴參數及海象資料與海況於颱風過後恢復期做比較，進一步研究魚類鳴叫於颱風後偵測數量增加之原因，並比較無颱風區間與颱風區間之魚鳴參數之差別，做為魚類行為之參考。

謝誌

本研究承國科會補助，計畫編號 NSTC 114-2218-E-110-009-

參考文獻

[1] Ríos, N., Pereira, J., Muñoz-Duque, S., Silva, G., Pais, M. P., Fonseca, P. J., ... & Amorim, M. C. P. (2025). Acoustic fish community in a biogeographic transition zone of the Northeast Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*, *82*(3), fsaf027.

[2] Banse, M., Hanssen, N., Sabbe, J., Lecchini, D., Donaldson, T. J., Iwankow, G., ... & Parmentier, E. (2024). Same calls, different meanings: Acoustic communication of Holocentridae. *Plos one*, *19*(11), e0312191.

[3] Banse, M., Lecchini, D., Sabbe, J., Hanssen, N., Donaldson, T., Iwankow, G., ... & Parmentier, E. (2024). Production of sounds by squirrelfish during symbiotic relationships with cleaner wrasses. *Scientific Reports*, *14*(1), 11158.

[4] Boyd, A. D., Gowans, S., Mann, D. A., & Simard, P. (2021). Tropical Storm Debby: Soundscape and fish sound production in Tampa Bay and the Gulf of Mexico. *PLoS One*, *16*(7), e0254614.

[5] Doong, D. J., Peng, J. P., & Babanin, A. V. (2019). Field investigations of coastal sea surface temperature drop after typhoon passages. *Earth System Science Data*, *11*(1), 323-340.

[6] Freeman, L. A., Rooney, I., & Duane, D. (2025). Effects of seawater temperature on ambient biological noise in shallow reef settings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *158*(2), 893-899.

[7] Lillis, A., & Mooney, T. A. (2022). Sounds of a changing sea: Temperature drives acoustic output by dominant biological sound-producers in shallow water habitats. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 960881.

[8] Lobel, P. S. (1992). Sounds produced by spawning fishes. *Environmental Biology of Fishes*, *33*(4), 351-358.

[9] Morfi, V., Nolasco, I., Lostanlen, V., Singh, S., Strandburg-Peshkin, A., Gill, L., ... & Stowell, D. (2021). Few-shot bioacoustic event detection: A new task at the dcase 2021 challenge.

[10] Muñoz-Duque, S., López-Casas, S., Rivera-Gutiérrez, H., & Jiménez-Segura, L. (2021). Bioacoustic characterization of mating calls of a freshwater fish (Prochilodus magdalenae) for passive acoustic monitoring. *Biota colombiana*, *22*(1), 108-121.

[11] Parmentier, E., Vandewalle, P., Brié, C., Dinraths, L., & Lecchini, D. (2011). Comparative study on sound production in different Holocentridae species. *Frontiers in Zoology*, *8*(1), 12.

[12] Siddagangaiah, S., Chen, C. F., Hu, W. C., Danovaro, R., & Pieretti, N. (2021). Silent winters and rock-and-roll summers: The long-term effects of changing oceans on marine fish vocalization. *Ecological Indicators*, *125*, 107456.
[13] Tricas, T. C., & Boyle, K. S. (2014). Acoustic behaviors in Hawaiian coral reef fish communities. *Marine Ecology Progress Series*, *511*, 1-16.
[14] Yao, L., Fu, Y., Wu, T., Guo, J., & Shi, F. (2024). Three-Dimensional Structural Analysis of Sea Temperature During Typhoon Transit. *Water*, *16*(24), 3641.
[15] Wang, Z. T., Nowacek, D. P., Akamatsu, T., Wang, K. X., Liu, J. C., Duan, G. Q., ... & Wang, D. (2017). Diversity of fish sound types in the Pearl River Estuary, China. *PeerJ*, *5*, e3924.
[16] Zimmer, W. M. (2011). *Passive acoustic monitoring of cetaceans*. Cambridge University Press.
[17] 陳餘鋆, 莫顯蕎. (2022). *2022 年墾丁國家公園珊瑚礁魚類多樣性調查*.
[18] 臺灣魚類資料庫 https://fishdb.sinica.edu.tw/chi/species.php?id=380922.
[19] 颱風資料庫 https://rdc28.cwa.gov.tw/TDB/public/typhoon_list/
[20] 廖永宏. (2024). 小琉球近岸環境噪音變動分析及比較.
[21] 陳曉柔. (2025). 和平港與知本海域之聲學監測與生物聲音訊號之探討.

應用螺旋形陣列與 HR-CLEAN-SC 於多重噪音源定位技術建立

林時賢[1]　吳柏賢[2]

摘要

在聲學成像與定位領域中，空間解析度與動態範圍為評估演算法性能之核心指標。傳統波束成形(Delay-and-Sum Beamforming, DAS)因計算穩定且實作簡單，長期作為聲學成像之基準方法。然而，其空間解析度受瑞利準則限制，主瓣寬度與波長成正比，在低頻或有限孔徑條件下，難以分離距離相近聲源且動態範圍受限。本研究系統性比較 DAS 與三種去卷積方法(CLEAN-PSF、CLEAN-SC、HR-CLEAN-SC)於近距離雙聲源條件下之聲學成像表現，並以空間解析度、峰值分離能力與動態範圍作為評估指標。CLEAN-PSF 透過理論點擴散函數(PSF)之迭代減法程序逐步移除主峰及其旁瓣，可有效提升空間解析度並恢復圖像清晰，缺點是當聲源具有延展性或相干性時，易產生陣幅估計偏差。CLEAN-SC 透過估計與主峰位置相關之聲源分量，直接對交叉譜矩陣進行去卷積，其過程具備較佳的物理一致性，然而在極近距離多聲源情境下，因 PSF 主瓣重疊，仍可能受到鄰近聲源干擾而限制其聲源分離能力。HR-CLEAN-SC 於點擴散函數主瓣範圍內選取干擾最小之替代標記點以估計聲源分量，使其更接近真實聲源分布，進而降低多源互擾並提升峰值銳利度與動態範圍。結果顯示，HR-CLEAN-SC 在主瓣重疊情況下能有效分離相鄰聲源，其峰值清晰度與動態範圍均顯著優於傳統方法，驗證其具備高解析度聲學成像性能與複雜聲場定位應用之潛力

關鍵詞：聲學成像、聲源定位、反卷積、波束成形

Development of a Multiple-Noise-Sound Localization Technique Using a Spiral Array and HR-CLEAN-SC

Shi-Xian Lin[1]　Bo-Hsien Wu[2]

ABSTRACT

Spatial resolution and dynamic range are key criteria for evaluating acoustic imaging and source localization algorithms. Delay-and-Sum Beamforming (DAS) has long served as a benchmark method because of its robustness and simplicity. However, its spatial resolution is limited by the Rayleigh criterion, making it difficult to separate closely spaced sources under low-frequency or limited-aperture conditions, while also restricting dynamic range. This study systematically compares DAS with three deconvolution methods, namely CLEAN-PSF, CLEAN-SC, and HR-CLEAN-SC, for near-field dual-source acoustic imaging. Spatial resolution, peak separation capability, and dynamic range are used as the main evaluation metrics. CLEAN-PSF improves image clarity by iteratively removing dominant peaks and sidelobes based on the point spread function, but it may introduce amplitude estimation errors for extended or coherent sources. CLEAN-SC performs deconvolution directly on the cross-spectral matrix with improved physical consistency, although its performance remains limited when adjacent source main lobes strongly overlap. HR-CLEAN-SC further reduces inter-source interference by selecting a low-interference reference point within the main-lobe region, leading to more accurate source estimation. Results show that HR-CLEAN-SC achieves superior separation of adjacent sources, sharper peaks, and higher dynamic range than conventional methods, demonstrating strong potential for high-resolution acoustic imaging in complex sound fields.

Keywords: Acoustic imaging; Sound source localization; Deconvolution; Beamforming

[1] 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 碩士班研究生
[2] 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 助理教授

一、緒論

聲源定位技術廣泛應用於聲學量測、噪音診斷及航空航太工程。其中，利用麥克風陣列（microphone array）結合波束形成（beamforming）技術來估測聲源位置，是目前最常見的方法之一。透過多個麥克風量測之聲壓訊號，可在掃描平面上重建聲源分佈圖（acoustic map），進而判斷聲源位置與強度。然而，傳統波束形成方法在解析度與動態範圍上仍有侷限，尤其在多聲源或近距離聲源情況下，辨識能力容易下降。

在常規波束形成（Conventional Beamforming, CB）中，聲源定位結果會受到點擴散函數（Point Spread Function, PSF）影響，使真實聲源在重建圖上呈現主瓣與旁瓣，進而造成不同聲源能量互相干擾。此外，CB 的空間解析度通常受 Rayleigh resolution limit 限制；當兩個聲源距離小於 Rayleigh 極限時，波束圖往往只會出現單一峰值，難以正確辨識多個聲源。

為提升解析度，研究者提出多種去卷積與高解析度方法，如 DAMAS、Functional Beamforming 與 CLEAN 系列演算法。其中，CLEAN-SC（CLEAN based on Spatial Coherence）是一種常用的聲源分離方法。其以波束形成結果作為初始聲源圖，透過迭代方式移除與主峰值聲源相干的聲場成分，以降低旁瓣影響並改善定位精度。相較於其他方法，CLEAN-SC 對聲源模型與掃描網格誤差較不敏感，因此在實際量測中具有良好穩定性。

然而，CLEAN-SC 的空間解析度仍受 Rayleigh 極限限制。當兩個聲源距離過近時，仍可能將其能量混合為單一來源，造成定位誤差或強度估計不準。為進一步提升聲源分辨能力，Sijtsma 等人提出 High-Resolution CLEAN-SC（HR-CLEAN-SC）。

HR-CLEAN-SC 的核心概念，是在主瓣範圍內選擇替代標記點（source markers），而非僅使用波束圖中的最大峰值位置。透過選取受其他聲源干擾較小的位置來估計聲源分量，可建立更接近真實聲源的訊號模型，再以迭代方式更新聲源位置與強度。此方法在近距離多聲源情況下特別有效，因為適當的標記位置可降低不同聲源 PSF 之間的交互影響。理論與模擬結果顯示，HR-CLEAN-SC 能明顯提升定位解析度，在某些情況下甚至可超越傳統 Rayleigh 極限兩倍以上，且仍保有 CLEAN-SC 對模型誤差低敏感度與穩定性佳的優點。

二、理論介紹

本章介紹波束合成的基本理論與反卷積方法原理。內容包含麥克風訊號處理、指向向量推導、DAS 計算理論，以及 CLEAN 類方法在數學與物理上的意義。

2.1 聲場波束合成理論

傳統波束成形（CB）可利用麥克風陣列量測資料估計聲源之空間分布與相對強度，但其成像結果仍受陣列解析能力及點擴散函數（PSF）限制。當多個聲源距離過近，或陣列旁瓣抑制能力不足時，各聲源能量會在波束圖中彼此干擾，造成主瓣展寬、峰值偏移甚至虛假峰值。因此，反卷積方法的主要目的，即在於抑制 PSF 所造成的空間模糊與旁瓣污染。

在頻域波束成形中，交叉頻譜矩陣（cross-spectral matrix, CSM）為描述聲場統計特性之核心量。令某一分析頻率下之麥克風量測向量為 $\mathbf{x}$，若聲場由 K 個彼此非相干之聲源組成，且第 k 個聲源在陣列上的頻域響應向量為 $\mathbf{p}_k$，則有

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^{K} \mathbf{p}_k \tag{1}$$

依據 CSM 之定義，

$$\mathbf{C} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} \tag{2}$$

將 $\mathbf{x}$ 展開後，可得

$$\mathbf{C} = \sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{K} E\{\mathbf{p}_k \mathbf{p}_l^H\} \tag{3}$$

若各聲源彼此非相干，則當 $k \neq l$ 時，其交叉項可忽略不計，因此 CSM 可近似寫為

$$\mathbf{C} \approx \sum_{k=1}^{K} \mathbf{p}_k \, \mathbf{p}_k^H \tag{4}$$

此式顯示，CSM 可視為多個單一聲源外積貢獻之疊加，亦為後續波束成形與反捲積分析之理論基礎。

若於理想情況下，導引向量（steering vector）$\mathbf{g}_k$ 能準確描述第 k 個聲源之傳播特性，則其聲源向量可寫為

$$\mathbf{p}_k = a_k \mathbf{g}_k \tag{5}$$

其中 a_k 為複數振幅。據此，CSM 可進一步寫為

$$\mathbf{C} \approx \sum_{k=1}^{K} A_k \, \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H, A_k = |a_k|^2 \tag{6}$$

實際量測中，$\mathbf{g}_k$ 與真實聲源向量通常難以完全匹配，誤差可能來自聲源非理想點源、指向性不均、傳播模型誤差、掃描平面設定誤差及麥克風位置或靈敏度誤差等，這些失配都會影響聲源定位與功率估測。

在傳統波束成形中，第 k 個掃描點之功率估測值可表示為

$$\hat{A}_k = \mathbf{w}_k^H \mathbf{C} \mathbf{w}_k \tag{7}$$

其中權重向量 $\mathbf{w}_k$ 定義為

$$\mathbf{w}_k = \frac{\mathbf{g}_k}{\mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_k} \tag{8}$$

將 CSM 代入後可得

$$\hat{A}_k = \sum_{j=1}^{K} \left| \mathbf{p}_j^H \mathbf{w}_k \right|^2 \tag{9}$$

若再採用理想聲源假設 $\mathbf{p}_j = a_j \mathbf{g}_j$，則可得

$$\hat{A}_k = A_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} A_j \left| \mathbf{g}_j^H \mathbf{w}_k \right|^2 \tag{10}$$

由此可知，CB 在某一掃描點的輸出除包含目標聲源功率外，亦包含其他聲源經由 PSF 洩漏而來的能量。若其他聲源之影響無法忽略，波束圖便會出現顯著的旁瓣污染與主瓣擴散，這也是後續引入 CLEAN 類反卷積方法的重要理論依據。

2.2 波束合成反卷積法理論

反卷積方法的基本概念，是將傳統波束成形所得之聲源圖視為真實聲源分布與點擴散函數（PSF）卷積後之結果，再透過反向估測逐步移除主要聲源對成像結果的影響，以降低旁瓣污染與空間模糊。對於 CLEAN 類方法，其共同流程為：由 dirty map 中找出最大峰值，視為當前主要聲源；估計其在 CSM 中的貢獻；再將該貢獻自原始或更新後的 CSM 中扣除，形成新的 dirty matrix，並反覆迭代累加 clean part。不同方法的主要差異，在於每一步所移除之聲源成分定義不同。

2.2.1 CLEAN

CLEAN 為最基本之反捲積方法，其核心概念為：先將 dirty map 中最大峰值視為主要聲源，並以理論點擴散函數描述該聲源對整張圖之空間影響，再將其自量測資料中逐步扣除。若 p_1 表示最高能量聲源之 source vector，而 g_1 為與其最匹配之 steering vector，則 CSM 可分解為 clean part 與 dirty part：

$$C = C_{clean} + C_{dirty} \tag{11}$$

其中 clean part 為

$$C_{clean} = \lambda g_1 g_1^H \tag{12}$$

dirty part 為

$$C_{dirty} = (p_1 p_1^H - \lambda g_1 g_1^H) + \sum_{k=2}^{K} p_k p_k^H \tag{13}$$

其中 λ 為主峰聲源估計功率乘上 loop gain，用以控制每次扣除幅度。CLEAN 可有效改善旁瓣污染，但其效果高度依賴 steering vector 與真實聲源模型的一致性。

2.2.2 CLEAN-SC

相較於 CLEAN-PSF 直接利用理想 steering vector 所形成之點擴散函數進行扣除，CLEAN-SC（CLEAN based on Spatial Coherence）進一步考慮交叉頻譜矩陣中與主峰聲源相干的成分，並以此作為每次迭代欲移除的主要對象。其核心概念在於：當波束成形圖中某一峰值被判定為主要聲源後，不再直接假設該聲源完全符合理想點聲源模型，而是由量測資料本身估計出與該峰值相干之聲源分量，再將其自交叉頻譜矩陣中逐步扣除。因此，在 steering vector 與真實聲源向量不完全匹配時，CLEAN-SC 通常較傳統 CLEAN-PSF 具有更佳穩健性。

設第 j 個峰值位置對應之 source component 為 $\boldsymbol{h_j}$，則其可寫為

$$h_j = \frac{C w_j}{(w_j)^H C w_j} \tag{14}$$

其 clean part 可寫為

$$C_{clean} = \lambda h_1 h_1^H$$

因此，CLEAN-SC 與 CLEAN-PSF 的根本差異，在於前者移除的是由量測資料估得之相干聲源分量，後者移除的則是理論 PSF 所對應之成分。CLEAN-SC 在模型失配存在時通常表現較佳，但空間解析度仍大致受限於傳統波束成形主瓣寬度。

2.2.3 HR-CLEAN-SC

相較於 CLEAN-SC 直接以 dirty map 的峰值位置建立 source component，HR-CLEAN-SC 的核心改進在於：source marker 不必與峰值位置完全重合，而可在主瓣範圍內重新搜尋較合適的位置，使其對應之 source component 更接近單一真實聲源。當兩個近距離聲源彼此干擾時，dirty map 的峰值往往落在兩聲源之間；若仍直接以峰值位置計算 source component，所得結果容易混合鄰近聲源資訊。因此，HR-CLEAN-SC 將 source marker 的選取視為一最佳化問題，藉以降低其他聲源對目標聲源之干擾。

設第 $\boldsymbol{j}$ 個聲源對應之 source marker 權重向量為 $\boldsymbol{u_j}$，其 cost function 可寫為

$$F_j(u_j) = \frac{\left| \sum_{k=1,\, k \neq j}^{K} (p_k^H u_j) p_k \right|^2}{\left| p_j^H u_j \right|^2 \cdot |p_j|^2} \tag{15}$$

由於真實聲源向量 $\boldsymbol{p_j}$ 通常未知，因此須先利用標準 CLEAN-SC 的結果作為初始估計。若令 $\boldsymbol{p_j} = a_j \mathbf{g}_j$，則可改寫為

$$F_j(u_j) = \frac{\left| \sum_{k=1,\, k \neq j}^{K} A_k (g_k^H u_j) g_k \right|^2}{A_j^2 \left| g_j^H u_j \right|^2 \cdot |g_j|^2} \tag{16}$$

對於更新後之 marker，其對應之 source component 可寫為

$$h_j = \frac{C u_j}{(u_j)^H C u_j} \tag{17}$$

若 $\boldsymbol{C_j}$ 表示第 $\boldsymbol{j}$ 個聲源所對應之交叉頻譜矩陣，則其可近似表示為

$$C_j \approx \alpha h_j h_j^H \tag{18}$$

其中比例常數 α 可寫為

$$\alpha = (u_j)^H C_j u_j \approx (u_j)^H C u_j \tag{19}$$

因此，第 $\boldsymbol{j}$ 個聲源之功率估計可寫為

$$\widetilde{A_j} = \left((u_j)^H C u_j \right) \left| (w_j)^H h_j \right|^2 \tag{20}$$

當兩個強度相近之聲源彼此非常接近時，為避免能量分配不均使最佳化偏向較強聲源，HR-CLEAN-SC 進一步省略振幅項，改採簡化 cost function：

$$F_j(u_j)=\frac{|\sum_{k=1,k\neq j}^{K}(g_k^H u_j)g_k|^2}{|g_j^H u_j|^2\cdot|g_j|^2} \tag{21}$$

為避免分母趨近於零，並限制 marker 不致偏離主瓣範圍過遠，尚需加入條件

$$|g_j^H u_j|^2 \geq \mu > 0 \tag{22}$$

其中 μ 為門檻參數，用以限制 source marker 至少需保有一定程度之主瓣響應，避免落在響應極低的位置而導致估測不穩定。整體而言，HR-CLEAN-SC 的高解析度能力，主要來自 source marker 最佳化所帶來之 source component 純化效果。

2.3 瑞利解析極限與解析度提升說明

為進一步說明 HR-CLEAN-SC 的高解析度特性，本節先由傳統波束成形之點擴散函數（Point Spread Function, PSF）出發，定義瑞利解析極限（Rayleigh limit），再說明 HR-CLEAN-SC 為何可在理想條件下達到約 2.37 倍之有效解析度提升。

對於圓形等效孔徑之波束成形系統，其點擴散函數可表示為

$$A(\theta)=\left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi f D}{c}\sin\theta\right)}{\frac{\pi f D}{c}\sin\theta}\right]^2 \tag{23}$$

其中，$J_1(.)$ 為第一類一階貝索函數，f 為操作頻率，D 為陣列有效孔徑，c 為聲速，θ 為觀測方向與主軸之夾角。當主瓣第一次降至零點時，可由 $J_1(x)$ 之第一個零點 $x=3.8317$ 得到

$$\frac{\pi f D}{c}\sin\theta = 3.8317 \tag{24}$$

當 θ 足夠小時，可採用小角度近似 $\sin\theta\approx\theta$，則主瓣第一零點對應之角解析度可寫為

$$\theta_0 \approx 1.218\frac{c}{fD} \tag{25}$$

若掃描平面距離陣列之距離為 z，則可將角解析度轉換為掃描平面上之空間解析度，即瑞利解析極限

$$RL = z\theta_0 = \frac{1.218zc}{Df} \tag{26}$$

這表示在傳統波束成形下，當兩點聲源在掃描平面上的間距小於 RL 時，其主瓣將明顯重疊，兩聲源難以清楚分離。

相較於標準 CLEAN-SC，HR-CLEAN-SC 允許 source marker 在主瓣範圍內重新調整，以尋找更接近單一真實聲源的位置。若令 marker 移動後仍需滿足最低響應門檻 μ，則可寫為

$$A(\theta_s)=\mu \tag{27}$$

本文依 HR-CLEAN-SC 之設定取 $\mu=0.25$，則由點擴散函數可求得 marker 允許之最大位移對應角度 θ_s，其空間位移量為

$$s_{max}=z\theta_s=\frac{0.705zc}{Df} \tag{28}$$

因此，HR-CLEAN-SC 之有效解析極限可進一步表示為

$$RL_{\text{new}}=RL-s_{max} \tag{29}$$

前述 RL 與 s_{max} 代入後，可得

$$RL_{\text{new}}=\frac{1.218zc}{Df}-\frac{0.705zc}{Df} \tag{30}$$

故相較於傳統瑞利解析極限，其理論解析度增益可表示為

$$G=\frac{RL}{RL_{\text{new}}}\approx 2.37 \tag{31}$$

此結果表示，在理想條件下，HR-CLEAN-SC 之最小可分辨距離可降低為傳統瑞利解析極限之約 2.37，亦即其有效解析度提升上限約為 2.37 倍。換言之，在相同聲源間距下，HR-CLEAN-SC 可於較低頻率下仍維持雙聲源分離能力；或在相同頻率下，可分辨更小之聲源間距。

三、數值模擬

3.1 模擬場景

此模擬使用的麥克風陣列為直徑 1m 的 96 通道 Underbirnk 陣列，參考了文獻[2]的設計，其麥克風的排列成螺旋散佈，陣列中心的麥克風較為密集，能夠提升高頻的定位性能，而邊緣位置的排列較為均勻且對稱，這避免了成像的扭曲，陣列如圖 1 所示。

本研究之聲源座標設定為數個非相干點聲源，彼此間距固定為 0.25 m，並配置於距離陣列 1 m 之掃描平面，如圖 2 及圖 3 所示，以探討不同波演算方法之解析能力。此間距之選擇係依據瑞利極限進行設計；對本研究所採用之陣列尺寸、量測距離與聲速條件而言，當頻率低於約 1670 Hz 時，理論上兩聲源將難以被清楚分辨。因此，本模擬聚焦於低於該臨界頻率之頻段，以比較各方法在傳統解析度限制下之成像表現與分辨能力。

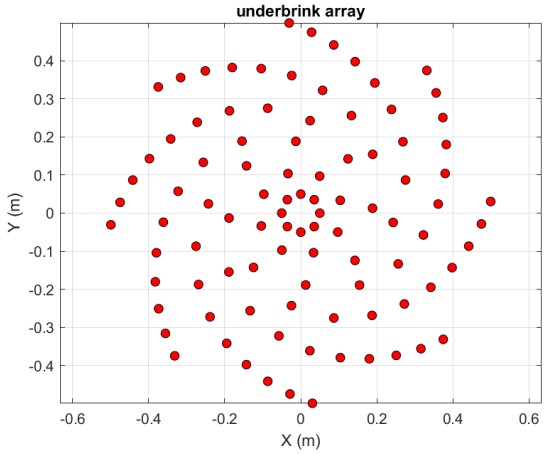


圖 1：96 通道 Underbrink 麥克風陣列座標

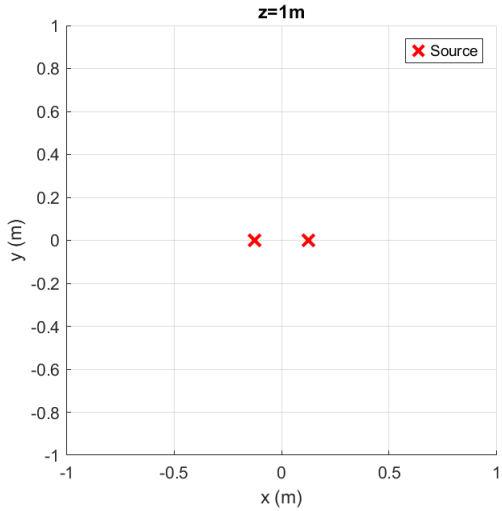


圖 2：模擬 2 聲源座標

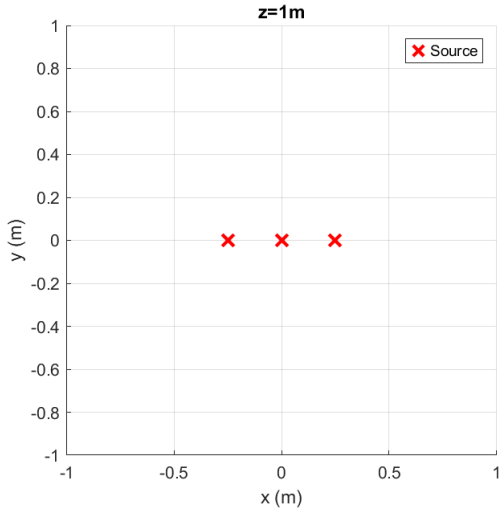


圖 3：模擬 3 聲源座標

3.2 聲源模擬

為建立模擬聲場之頻域量測模型，本研究假設聲場由 K 個彼此非相干之點聲源所組成，並以隨機相位描述各聲源於不同快照下之變化。對於第 l 個快照，其聲源頻域訊號向量可表示為

$$\boldsymbol{s}_l = [\alpha_1 exp^{-i\omega\varphi(1)} \quad \cdots \quad \alpha_K exp^{-i\omega\varphi(K)}]^{\boldsymbol{T}} \tag{32}$$

其中，α_K 為第 K 個聲源之振幅，$\varphi(l)$ 為第 l 個快照下對應聲源之隨機相位。由於非相干聲源在不同快照間具有獨立相位變化，因此可藉由多個快照模擬實際量測中聲源之統計特性。將全部 L 個快照排列後，可得聲源矩陣

$$\boldsymbol{s}_l = \begin{bmatrix} \alpha_1 exp^{-i\omega\varphi(1,1)} & \cdots & \alpha_1 exp^{-i\omega\varphi(1,L)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_K exp^{-i\omega\varphi(K,1)} & \cdots & \alpha_K exp^{-i\omega\varphi(K,L)} \end{bmatrix} \tag{33}$$

此外，為模擬量測環境中的背景干擾與系統誤差，本研究同時加入加性雜訊，並假設各麥克風通道之雜訊亦具有隨機相位，其第 l 個快照之雜訊向量可寫為

$$\boldsymbol{e}_l = \sigma[exp^{-i\omega\varphi(1)} \quad \cdots \quad exp^{-i\omega\varphi(M)}]^T \tag{34}$$

其中，σ 為雜訊振幅，$\varphi(M)$ 為第 M 支麥克風於第 l 個快照下之隨機相位。聲源訊號經由指向矩陣 $\boldsymbol{G}$ 傳遞至麥克風陣列後，可得到包含雜訊之量測訊號，並進一步建立模擬交叉譜矩陣為

$$\boldsymbol{G}_{simu^l} = \frac{(\boldsymbol{G}\boldsymbol{s}_l + \boldsymbol{e}_l)(\boldsymbol{G}\boldsymbol{s}_l + \boldsymbol{e}_l)^H}{L} \tag{35}$$

其中，$(\cdot)^H$ 表示 Hermitian 轉置。上述模型可同時考慮聲源振幅、隨機相位、傳播效應與量測雜訊之影響，使所建立之模擬交叉譜矩陣更貼近實際量測情形，並作為後續波束成形與聲源定位分析之基礎。

3.3 數值模擬結果

在模擬分析中會根據前面章節提及的模擬場景、模擬聲源和性能指標進行分析，在這些分析中波束合成的掃描網格大小固定為0.067m × 0.067m。

3.3.1 聲源數量解析度增益分析

為評估 HR-CLEAN-SC 於多點聲源條件下之成像能力，本研究於距離麥克風陣列 1 m 之掃描平面上建立 2、3 點非相干點聲源模型，並將相鄰聲源間距固定為 0.25 m。模擬頻率範圍設定為 500、750、1000、1250、1500 與 1750 Hz，比較 DAS、CLEAN-PSF、CLEAN-SC 與 HR-CLEAN-SC 之成像結果，如圖 4 和圖 5 所示。模擬結果顯示，在低頻條件下，受主瓣較寬及點擴散函數重疊影響，各方法皆較難有效分離鄰近聲源；隨頻率提高，聲源位置逐漸清晰，分離能力亦隨之提升。

相較之下，HR-CLEAN-SC 在各聲源數配置下皆呈現較集中的能量分布，且能較清楚地辨識各聲源位置，顯示其在近距離多聲源情況下具有較佳之定位與分離能力。然而，當聲源數增加時，聲源間互擾、旁瓣污染與 PSF 重疊情形更加明顯，使解析度增益逐漸下降。此結果說明，HR-CLEAN-SC 雖能有效提升多聲源成像品質，但其提升幅度並非固定值，因此雙聲源條件下所得之 2.37 倍解析度增益，無法直接推廣至較高聲源數之情形。

3.3.2 雙聲源能量掃頻分析

本節針對雙聲源模型進行能量掃頻分析，探討不同聲源間距下，CLEAN-SC 與 HR-CLEAN-SC 於 Rayleigh 解析極限附近之能量重建行為，並比較兩方法對左右聲源 SPL 之估計能力。本文設定雙聲源間距為 0.25 m，其對應之臨界分辨頻率約為 1671 Hz。藉由設定不同間距並進行頻率掃描，可觀察兩方法在接近解析極限時之聲源分離能力與能量重建差異，進一步評估其於近距離雙聲源條件下之穩健性。

由模擬結果可知，當操作頻率接近或低於臨界分辨頻率時，受主瓣重疊與聲源互擾影響，兩方法對左右聲源之能量估測皆會產生偏差，其中標準 CLEAN-SC 較容易出現震盪，導致左右聲源 SPL 重建結果不穩定，如圖 6 所示。相較之下，HR-CLEAN-SC 於各案例中皆呈現較平滑且較接近理

論值之變化趨勢，顯示其在 Rayleigh 解析極限附近具有較佳之穩定性與能量重建能力。當頻率高於臨界分辨頻率後，兩方法之估測結果皆逐漸趨於穩定，但 HR-CLEAN-SC 仍能維持較合理之左右聲源能量分配。綜合而言，HR-CLEAN-SC 在雙聲源接近解析極限時，較標準 CLEAN-SC 具有更佳之分離穩健性與 SPL 估計表現。

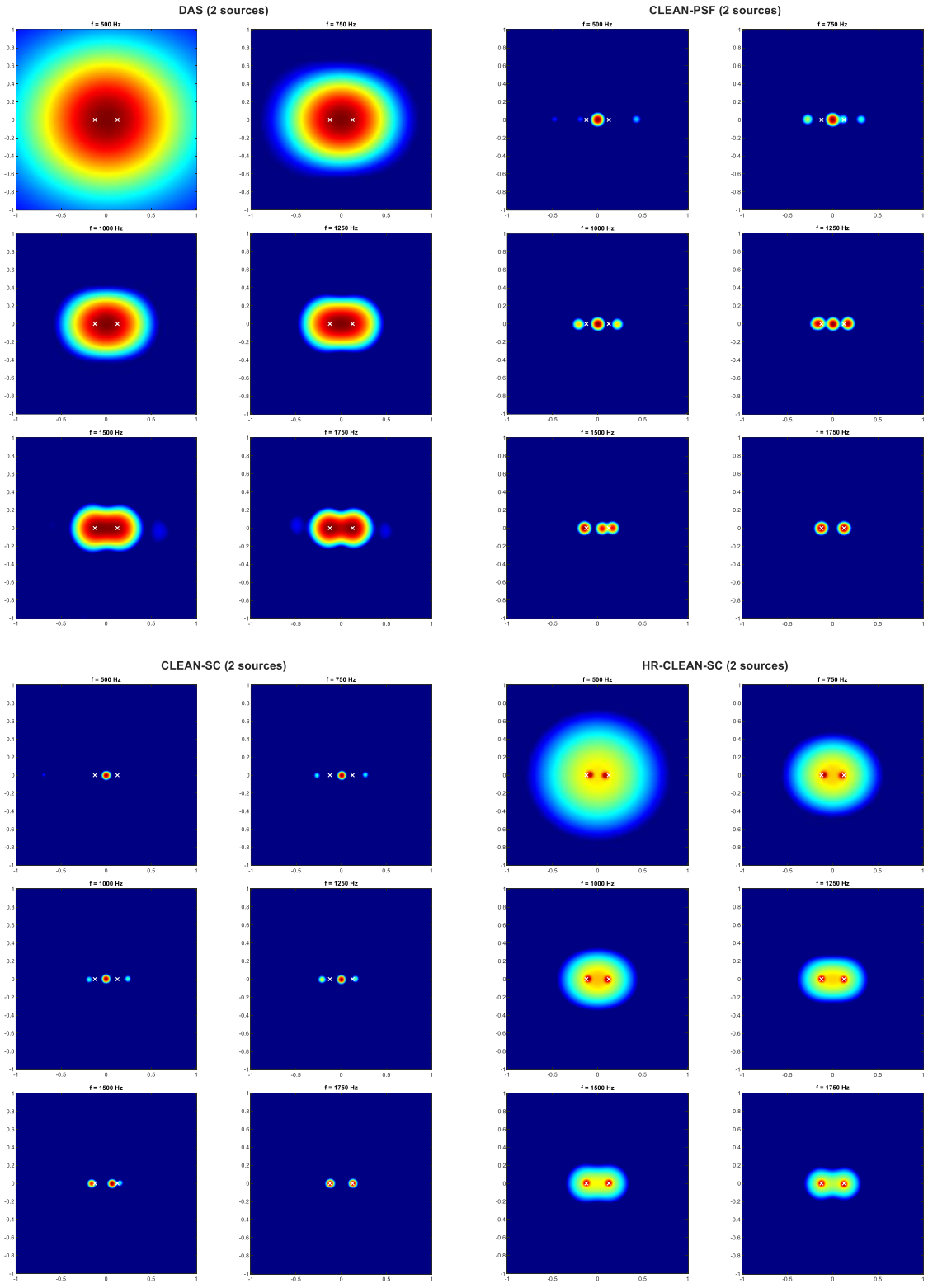


圖 4：2 聲源數值模擬成像結果

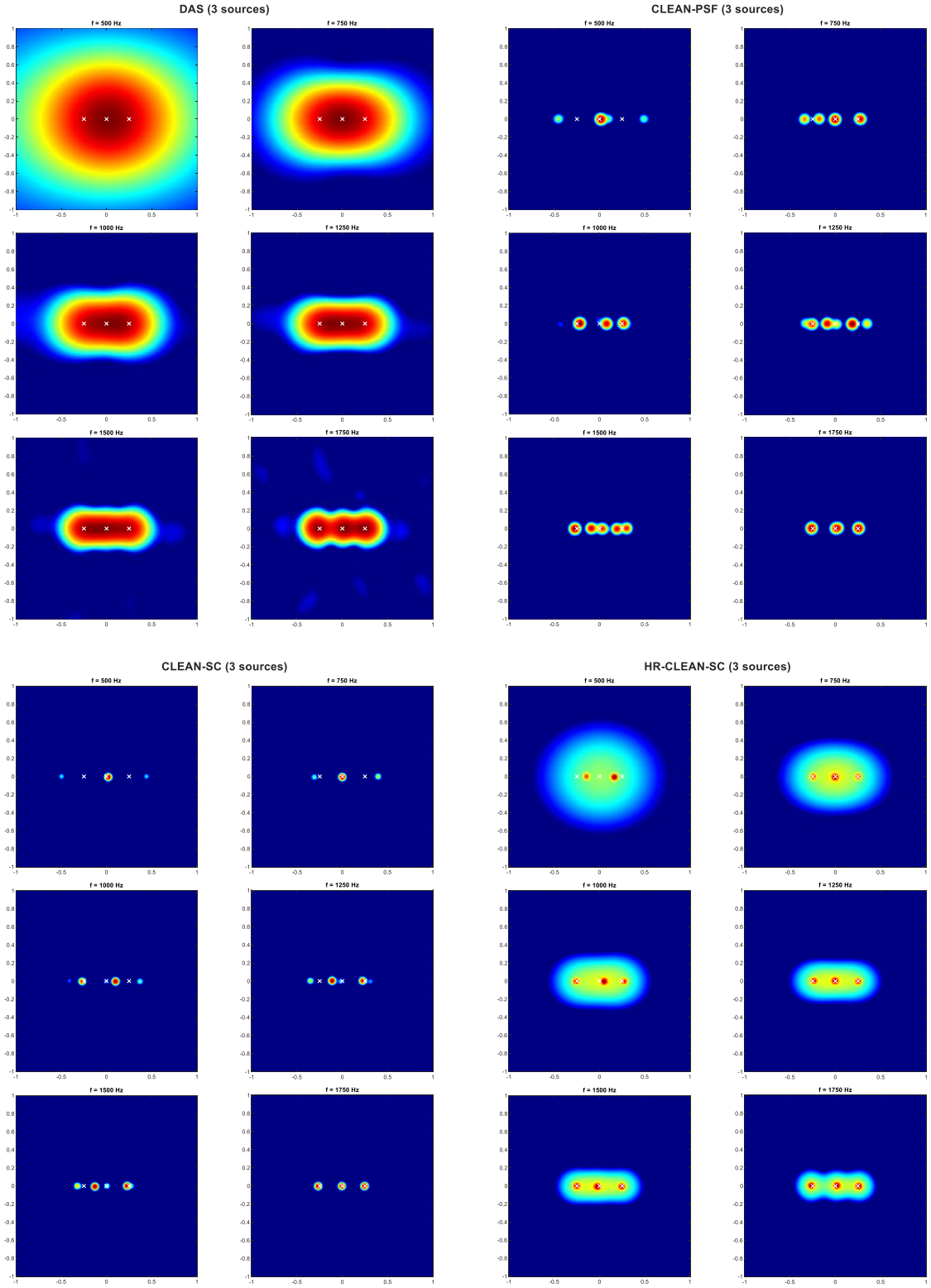


圖 5：3 聲源數值模擬成像結果

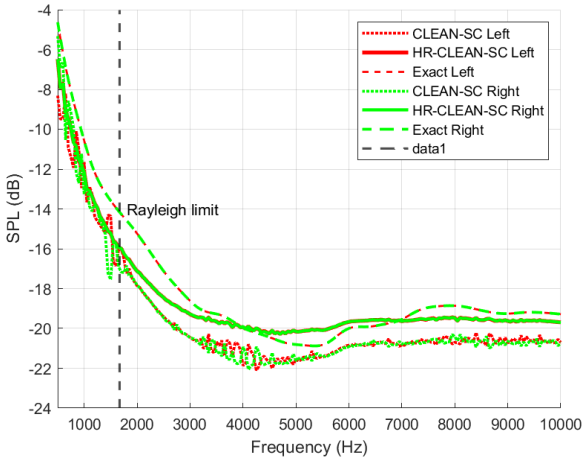


圖 6：雙聲源能量掃頻分析

四、實驗驗證

4.1 實驗設備

實驗使用與模擬相同的麥克風陣列，為直徑 1m 的 96 通道 Underbrink 陣列。陣列透過印刷電路板作為支架連接來保持電路的簡潔，而在支架的背板有著聚乙烯包裹，起到支撐和防止形變的作用，並且可以降低反射音的干擾。陣列使用的麥克風型號為 Infineon IM72D128V01，此麥克風的超載聲壓極限為 128dB SPL，並且具有平坦的頻率響應曲線，可以完好重現實驗和大部分應用中的聲音。多通道的訊號由 National Instruments 的單板機 NI sbRIO-9607 處理，並由乙太網路供電（Power over Ethernet, PoE）傳輸到電腦，實現了濾波並且確保通道間的訊號完全同步。 麥克風陣列如圖 7 所示。



圖 7：96 通道直徑 UnderBrink 陣列

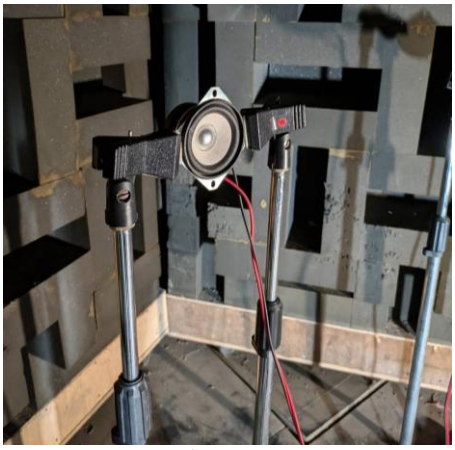


圖 8：揚聲器架設示意圖

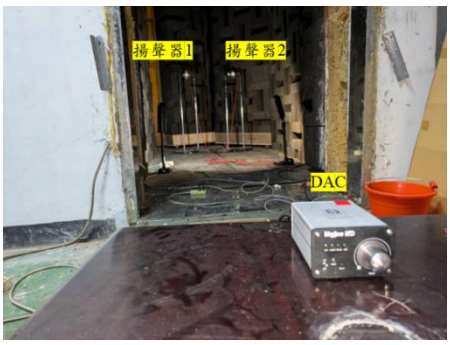


圖 9：整體音源架設示意圖

實驗中使用的聲源為 Panasonic METAL 3489 揚聲器，單體大小為 3 吋，頻率支持 20Hz 到 20000Hz。實驗使用兩支麥克風夾架設，夾子上附有吸音棉防止振動傳導到支架，如圖 8 所示。實驗過程總共會使用到兩個揚聲器，為確保聲音大小一致，兩個揚聲器會連接到同一數位類比轉換器（Digital to Analog Converter, DAC），由 DAC 一起調整聲音大小。揚聲器和 DAC 於無響室的架設如圖 9 所示。

4.2 實驗分析結果

本節針對雙非相干點聲源之成像結果進行分析。圖中白色叉叉表示真實聲源位置，兩聲源間距固定為 0.25 m；依前述瑞利解析極限推導，在本研究之陣列配置下，其對應之臨界分辨頻率約為 1671 Hz。因此，以下將結果區分為 $f \le 1671$Hz 與 $f \ge 1671$Hz 兩個頻段，探討 DAS、CLEAN-PSF、CLEAN-SC 與 HR-CLEAN-SC 於解析極限附近之聲源分離能力與成像特性。

由圖 10 至圖 12 之結果可知，在 1000 Hz、1250 Hz 與 1500 Hz 等低於極限頻率之條件下，DAS 之主瓣範圍較寬，兩聲源能量明顯重疊，難以清楚分辨實際位置；CLEAN-PSF 雖可形成局部峰值，但伴隨較多偽峰與旁瓣污染，成像穩定性較差；CLEAN-SC 可進一步縮減能量分布範圍，惟在部分頻率下仍存在能量混疊現象。相較之下，HR-CLEAN-SC 於低頻條件下仍能維持較集中的能量

分布，且重建結果較接近真實聲源位置，顯示其對近距離雙聲源具有較佳之分離能力。特別是在 1500 Hz、亦即接近臨界分辨頻率之情況下，HR-CLEAN-SC 仍可辨識出兩個相鄰聲源，反映其在解析極限附近仍具備較佳之有效解析度。

當頻率提升至 $f \geq 1671Hz$ 時，各方法之分離能力均有所改善，但成像品質仍有明顯差異。由圖 13 和圖 14 所示，DAS 雖較低頻時為集中，仍存在主瓣展寬與能量拖尾現象；CLEAN-PSF 仍易產生額外峰值與雜散能量；CLEAN-SC 已可呈現較明確之雙峰結構，但在部分情況下仍受旁瓣影響。相較之下，HR-CLEAN-SC 可更穩定地重建兩個分離之聲源峰值，且峰值位置與真實聲源位置較為一致，旁瓣污染亦相對較低。此結果顯示，當操作頻率進入或略高於極限頻率時，HR-CLEAN-SC 已能有效分離兩相鄰聲源，並展現優於其他方法之定位與成像穩健性。

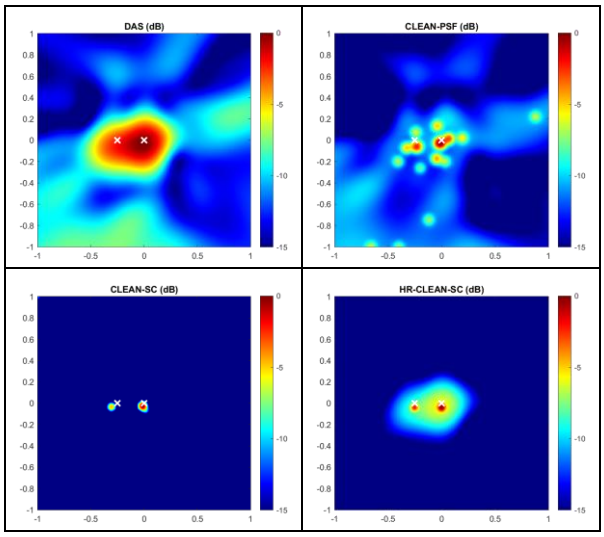


圖 12：頻率 1500Hz 成像結果

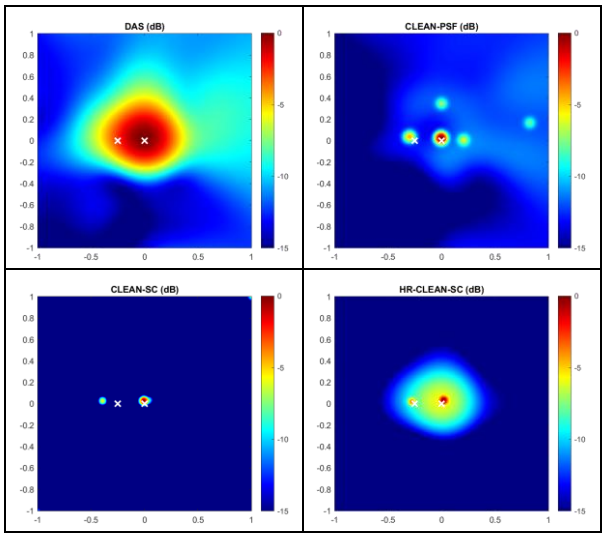


圖 10：頻率 1000Hz 成像結果

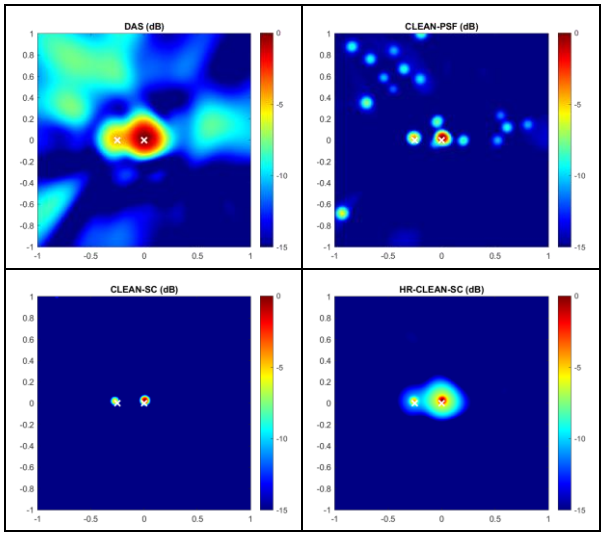


圖 13：頻率 1750Hz 成像結果

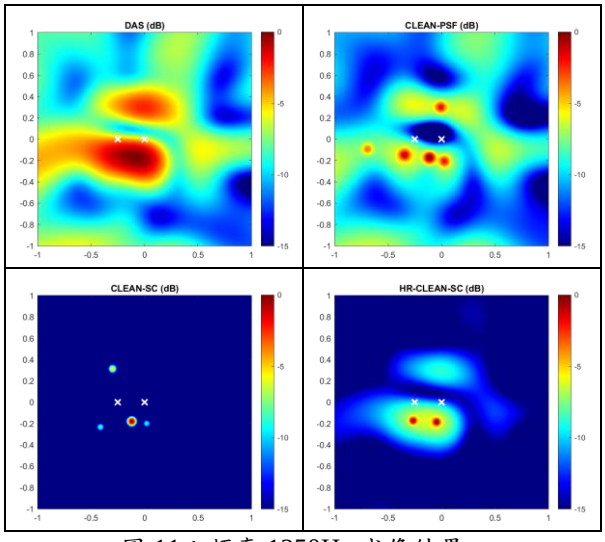


圖 11：頻率 1250Hz 成像結果

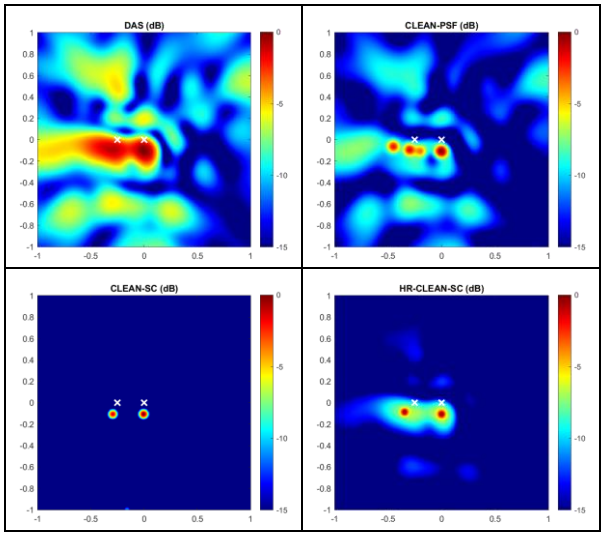


圖 14：頻率 2000Hz 成像結果

綜合而言，實驗結果顯示 HR-CLEAN-SC 相較於 DAS、CLEAN-PSF 與標準 CLEAN-SC，在近距離雙聲源條件下具有較佳之成像表現。尤其在瑞利解析極限附近，HR-CLEAN-SC 仍可有效分離聲源，說明其可透過 source marker 最佳化降低聲源互擾與能量混疊，進而提升有效解析度。此結果亦驗證前述理論分析，顯示 HR-CLEAN-SC 在極限頻率附近仍具有良好之聲源分離能力與實際應用潛力。

五、結論

在剛達解析門檻的頻率附近，DAS 確實可能因旁瓣疊加而導致 source map 模糊；相較之下，CLEAN-SC 可透過迭代扣除主導聲源的 coherent sidelobe 結構，使成像結果更為銳利，讓原本雖已初步分開但仍不夠乾淨的聲源更容易辨識。然而，當聲源間距接近或低於 Rayleigh 解析極限時，標準 CLEAN-SC 是以 DAS 最大峰值作為初始 marker，而該峰值可能位於兩聲源之間而非任一真實聲源位置，因而使所估得的 source component 混入多個聲源成分，進一步造成各 source components 間的能量分配失衡，導致部分聲源強度被高估、部分被低估，甚至出現定位偏移。此外，HR-CLEAN-SC 的解析度增益並非固定不變，而會隨聲源數增加而逐漸下降，因此不會在所有情況下皆維持理論上 2.37 倍的解析度提升。

謝誌

研究承蒙國科會經費資助，計畫編號：NSTC 114-2221-E-006-118，謹在此致上誠摯感謝之意。

參考文獻

[1] T. D. Mast and F. Yu, “Simplified expansions for radiation from a baffled circular piston,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 118, no. 6, pp. 3457–3464, 2005.

[2] T. F. Brooks and W. M. Humphreys, Jr., “A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays,” in Proc. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf., Manchester, U.K., May 10–12, 2004, Paper AIAA-2004-2954.

[3] P. Sijtsma, “CLEAN based on spatial source coherence,” International Journal of Aeroacoustics, vol. 6, no. 4, pp. 357–374, 2007.

[4] Z. Prime and C. Doolan, “A comparison of popular beamforming arrays,” in Proc. Acoustics 2013—Victor Harbor, Victor Harbor, Australia, Nov. 17–20, 2013, pp. 151–157.

[5] Z. Chu and Y. Yang, “Comparison of deconvolution methods for the visualization of acoustic sources based on cross-spectral imaging function beamforming,” Mech. Syst. Signal Process., vol. 48, pp. 404–422, 2014, doi: 10.1016/j.ymssp.2014.03.012.

[6] P. Sijtsma, R. Merino-Martinez, A. M. N. Malgoezar, and M. Snellen, “High-resolution CLEAN-SC:Theory and experimental validation,” Int. J. Aeroacoust., vol. 16, no. 4–5, pp. 274–298, 2017, doi: 10.1177/1475472X17713034.

[7] M. P. J. Sanders, “Study on the application of digital MEMS microphones for aeroacoustic noise source localization for large drones,” Master’s thesis, Dept. Eng. Fluid Dyn., Univ. Twente, Enschede, The Netherlands, Jan. 2017.

[8] P. Chiariotti, M. Martarelli, and P. Castellini, “Acoustic beamforming for noise source localization—Reviews, methodology and applications,” Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 120, pp. 422–448, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.09.019.

臺灣東南海域鯨豚哨叫聲偵測研究

蔡子亮[1]　胡惟鈞[2]　陳琪芳[3]

摘要

水下被動式聲學監測(Passive Acoustic Monitoring, PAM)本身不發出訊號，為一種對環境相對友善的量測方式，已成為現今海洋環境生態與鯨豚研究的重要技術。台灣周邊海域有超過三分之一的鯨豚物種活動紀錄，本研究針對較缺乏資料的台灣東南 海域進行長期水下聲訊蒐集，對資料進行自動化聲紋偵測，並對鯨豚的哨叫聲(whistles)進行聲紋特徵辨識與訊號擷取，進而確認其出沒的時間段，嘗試探討東南海域鯨豚的活動模式。本研究進一步將偵測結果應用於日夜分析，透過比較白天與夜晚的鯨豚發聲事件的頻率與時間分佈差異，評估環境日夜交替對其活動及溝通行為的潛在因素。本研究結果顯示 PAM 在長期環境監測分析上的實用性，可應用於海洋生態環境保育，並對棲地管理提供具體的科學量化依據。

關鍵詞：被動式聲學監測、哨叫聲、自動化偵測

A Study on the Detection of Cetacean Whistles in the Southeastern Waters of Taiwan

Tzu-Liang Tsai[1]　Weei-Chun Hu[2]　Chi-Fang Chen[3]

ABSTRACT

Passive Acoustic Monitoring (PAM), which does not emit signals and serves as an environmentally friendly measurement method, has become a vital technology in contemporary marine ecological and cetacean research. With records of over one-third of the world's cetacean species appearing in the waters surrounding Taiwan, this study focuses on long-term underwater acoustic data collection in the southeastern waters of Taiwan, where data is relatively scarce. Automated spectrogram detection was performed on the data, and acoustic feature identification and signal extraction were conducted on cetacean whistles to confirm the timing of their occurrence, attempting to explore the activity patterns of cetaceans in southeastern waters. Furthermore, the detection results were applied to diel analysis; by comparing the differences in the frequency and temporal distribution of cetacean vocalization events between day and night, the potential factors of diel cycles on their activity and communication behaviors were evaluated. The results of this study demonstrate the utility of PAM in long-term environmental monitoring and analysis, which can be applied to marine ecological conservation and provide a concrete scientific and quantitative basis for habitat management.

Keywords: Passive Acoustic Monitoring (PAM); Whistles; Automated detection

一、緒論

台灣位於全球海洋生態系中極具戰略性的地理位置，不僅處於黑潮及其支流的重要途徑，更因四周海域多變的地景景觀而孕育了豐沛的生物資源 。在亞熱帶季風的交替影響下，複雜的水文環境支撐了極高密度的海洋哺乳動物活動，全球現存約九十種的鯨豚物種中，在台灣周邊海域曾有紀錄者便佔了超過三分之一，這使得台灣成為研究西太平洋鯨豚生態的重要窗口。

根據海洋委員會海洋保育署(Ocean Conservation Administration,Ocean Aeeaira Councol)「110 年度花東海域鯨豚族群調查計畫」之成果報告書[1]顯示，民國 104 年至 107 年間的調查共記錄到 14 種確信之鯨豚物種，如圖 1 所示，顯示東部海域具備極高之生物多樣性。在目擊頻率上，以花紋海豚(Risso's Dolphin，*Grampus griseus*)[2]最為常見，其次則為小抹香鯨科之侏儒抹香鯨(Pygmy Sperm Whale，*Kogia breviceps*)[3]；熱帶斑海豚(Pantropical Spotted Dolphin，*Stenella attenuata*)[4]、

[1] 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士班研究生
[2] 國立臺灣大學船舶及海洋技術研究中心 助理研究員
[3] 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

弗氏海豚(Fraser's Dolphin，*Lagenodelphis hosei*)[5]及飛旋海豚(Spinner Dolphin，*Stenella longirostris*)[6]目擊記錄。此外，透過與賞鯨業者及在地漁民的通報合作，研究團隊亦成功記錄到大翅鯨(Humpback Whale，*Megaptera novaeangliae*)、抹香鯨(Sperm Whale，*Physeter macrocephalus*)[7]及虎鯨(Killer Whale/ Orca，*Orcinus orca*)[8]等物種，顯見公民科學參與對於掌握大型或罕見鯨豚動態之重要價值。

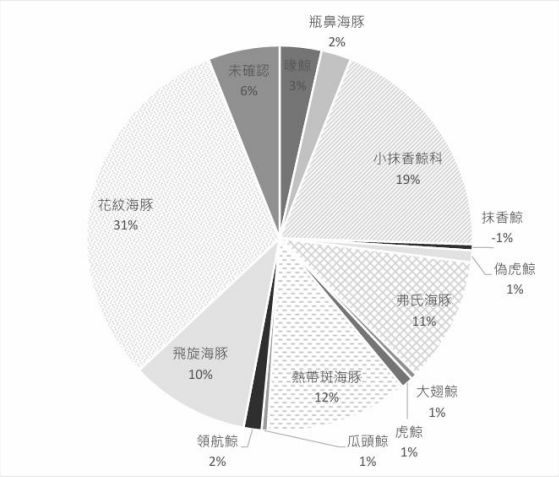


圖 1：民國 104 年至 107 年調查鯨豚種類比例[1]

然而，儘管台灣整體的生物多樣性高，研究資源的投入與生態基礎資料的分佈卻存在嚴重的地域性失衡。目前國內主要的生態監測數據，如海洋保育署(OCA)與台灣生物多樣性資訊機構(TaiBIF)所彙整的鯨豚目擊紀錄，多數集中於開發強度較高或觀光熱絡的西部海域與東北部海域如圖 2所示。相對於此，台灣東南海域的研究現況仍處於資料嚴重匱乏的瓶頸。雖然在台東成功漁港周邊有少量的目擊記錄，但對於成功漁港以南延伸至富岡漁港、甚至更往東南至蘭嶼之間的廣大深水區域，關於鯨豚的物種組成、遷徙路徑與日夜活動規律，至今仍缺乏長期且系統性的科學調查支撐。

造成東南海域資料斷層的主要原因，除地理位置偏遠外，海域地形的劇烈變化亦是關鍵因素。此區域離岸僅十餘公里，水深便陡降至 1500 公尺以上，且長年受強勁黑潮影響，海況條件極具挑戰性。這導致傳統的海上目視調查在執行面上不僅耗時且成本極高，更易受天候與光線限制，難以實現全天候與跨季節的監測，使其成為台灣鯨豚生態地圖上亟待填補的空白區。

為了解決此一困境並提供更具科學量化依據的棲地管理政策，本研究採取了對環境相對友善且不具干擾性的被動式水下聲學監測技術(PAM)。透過在台東富岡漁港南側深水區(水深約 170 公尺)佈放高取樣率的聲學紀錄器，我們得以在不干擾鯨豚自然行為的前提下，連續性地蒐集並擷取哨叫聲(Whistles)等關鍵音訊特徵。此項調查不僅能填補東南海域長期生態資料的缺口，更是對現有目視記錄的重要補充；透過對音檔資料的深入剖析與自動化聲紋偵測，我們將能進一步確認台東地區鯨豚出沒的時段規律，並針對日夜活動模式進行探討。這項研究成果預期將對台灣東南海域的海洋保育與管理，提供更為具體且精確的科學實證。

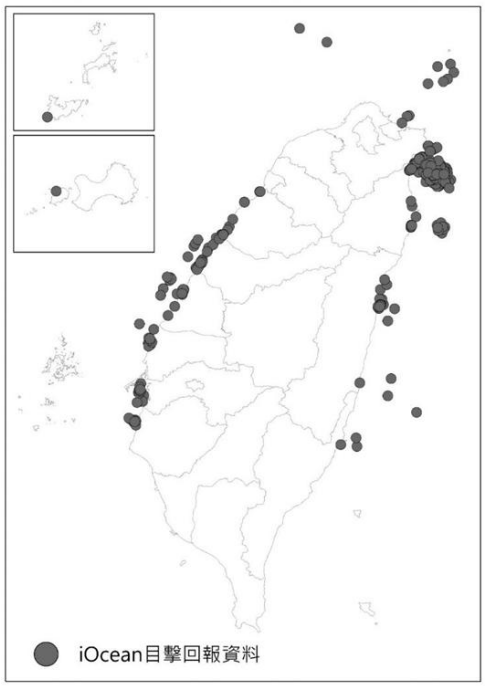


圖 2：海洋保育網鯨豚目擊回報紀錄分布[1]

二、研究方法

本研究的方法論建立於一套系統化的監測與分析流程，旨在確保聲學數據的科學精準性。首先在資料收集階段，本研究於台東富岡與蘭嶼等關鍵海域部署高頻水下紀錄器，針對海豚科物種社交溝通的核心頻帶設定哨叫聲(Whistles)分析範圍，確保能完整擷取高品質的原始聲訊數據。在數據處理核心，本研究導入自動化偵測演算法進行哨叫聲提取，能針對巨量音檔進行高效掃描並精確鎖定潛在的發聲事件。最後，為排除水下環境噪音導致的誤報風險，所有偵測結果均經過嚴謹的人工校對，透過可視化的時頻譜圖核實訊號的真實性與完整性。此套整合了高採樣率採集、自動化處理與人工驗證的方法，不僅大幅提升了資料分析效率，更為後續探討鯨豚的日夜活動趨勢與群次特徵分群奠定了可靠的數據基礎。

2.1 資料收集

本研究使用紐西蘭 Ocean Instruments 公司製造的 SoundTrap 水下聲學紀錄器(ST640 HF)進行聲訊量測，額定水深可達 200 公尺，預定搭配 HTI-

99-HF 型水下麥克風，不含前級放大器之靈敏度約為 -204 dB re 1V/μPa，內含前級放大器之靈敏度約為 -165 dB re 1V/μPa，頻率響應範圍 2 Hz－125 kHz，取樣頻率範圍 32 kHz－384 kHz，如圖 3 所示：



圖 3：水下聲學紀錄器 ST640 HF

監測區域選定於台灣東南部海域，該區域因地理環境特殊且海況複雜，過往極度缺乏長期的水下聲訊量測資料。本研究針對該海域具代表性的深水坡面地形設置測站，點位選定於台東富岡漁港南側，相關位置如圖 4 所示，座標如表 1 所示：

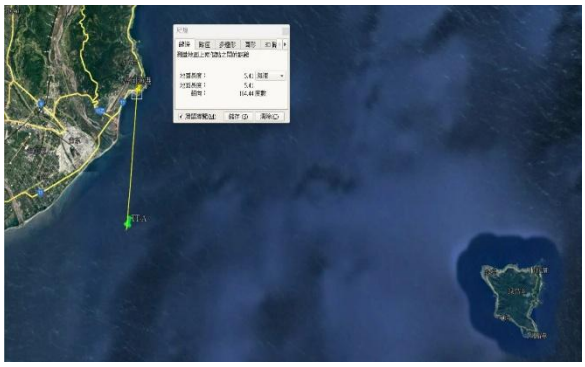


圖 4：東南海域台東富岡漁港南側

表 1：測站座標

位置	經度	緯度	當地水深
富岡漁港南側海域	121°11’07” E	22°42’09” N	170

佈放作業依據國際標準組織(International organization for standardization)ISO 18406 之水下噪音測量系統及國內水下噪音測量規範(NIEA P210.22B)進行，由作業船將聲學紀錄器安裝於底部固定之錨定串(Mooring line)系統中。由作業船佈放底部固定聲學釋放式儀器之錨定串進行量測，測量深度約 130 公尺，如圖 5 所示。每次部署預期持續錄音至少 20 天，配合 12 顆 18650 鋰電池的高效電力支援，得以獲取跨越日夜交替與潮汐循環的連續性高品質樣本。

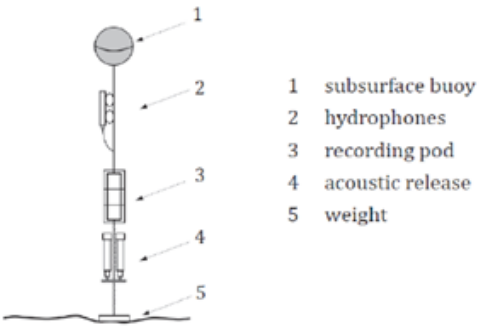


圖 5：佈放方式示意圖

2.2 自動化聲紋偵測

2.2.1 鯨豚哨叫聲頻率範圍

由於台灣東部海域之鯨豚組成極具多樣性，涵蓋物種之聲學特徵跨度極大，因此被動聲學監測(PAM)系統必須具備覆蓋寬頻率範圍之偵測能力。本研究為確保物種鑑定之準確性，參考海洋保育署「110 年度花東海域鯨豚族群調查計畫」之觀測資料，篩選出該海域之主要目標物種，並進一步結合「黑潮海洋文教基金會」於 2023 年發布之目擊資料庫，針對上述物種之哨叫聲(Whistles)頻率範圍進行系統性之文獻回顧與參數彙整。

根據彙整分析結果顯示，東部海域常見鯨豚之哨叫聲頻率主要分布於 0.89 kHz 至 31.4 kHz 之間。然而，考量到不同物種個體間的生理差異，以及群體活動時可能產生的變頻特性，本研究特將監測系統之偵測範圍設定為 0.5 kHz 到 40 kHz，以確保在訊號擷取上的完整性並降低遺漏風險。

2.2.2 哨叫聲偵測

哨叫聲偵測方法型態多元，本研究使用 Hung[9]的 NTUPAM，NTUPAM 採移動平均與中值濾波等方式去噪並消除椒鹽值，再結合特定閾值條件與分群演算法提取哨叫聲，流程如圖 6 所示：

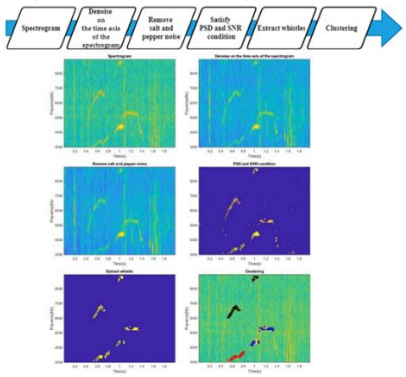


圖 6：NTUPAM 偵測演算法流程示意圖[9]

2.2.3 人工確認辨識結果

儘管本研究所採用之 NTUPAM 自動化偵測系統在處理大量聲學資料上具備極高效率，但受限於水下環境背景噪音的複雜性，自動化演算法在訊號判定上仍可能存在偽陽性或誤報之風險。為了確保研究數據的科學嚴謹性與偵測結果的準確度，本研究建立了一套嚴謹的人工校對流程，針對自動化偵測所鎖定的聲音事件進行二次確認與辨識。

在人工辨識階段，本研究利用康乃爾大學鳥類學實驗室所開發之專業聲學分析軟體 Raven 進行影像化比對。研究人員透過觀察聲音事件的時頻譜圖(Spectrogram)，對偵測到的哨叫聲(Whistles)進行可視化檢視，藉此排除非生物性噪音的干擾，並修正自動化程序中可能遺漏或誤判的聲紋資訊，操作介面如圖 7 所示。此程序不僅能夠校正偵測到的哨叫聲數量，更重要的是能透過人工檢視確認訊號的完整性，進而為後續的中心頻率計算與日夜趨勢分析提供高品質且經過驗證的數據樣本，確保最終研究結論具備高度的可靠性與代表性。

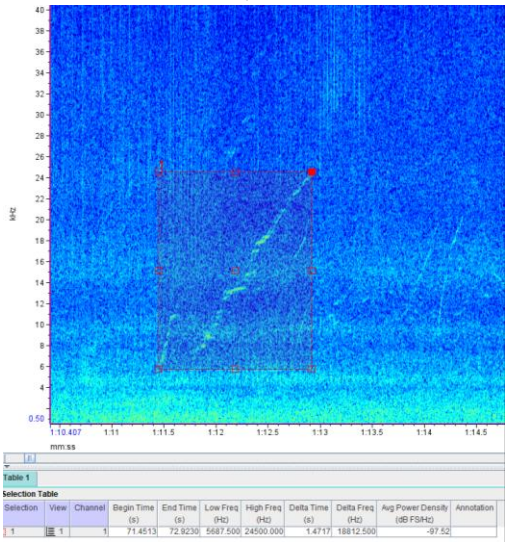


圖 7：Raven 操作介面

三、結果

本研究利用 NTUPAM 系統對台東與蘭嶼海域之聲學資料進行分析，結果顯示哨叫聲(Whistles)的出現具有強烈的時間聚集性。透過量化每小時的偵測總量，我們識別出數個顯著的活動高峰時段，如圖所示。在這些時段內，哨叫聲的發生頻率遠高於其餘時段，顯示在這些時間段內有規模龐大的鯨豚群次於測站周邊活動。

3.1 鯨豚活動日夜分析

本研究將日間定義為早上 6 點後至晚上 6 點前，夜間則定義為晚上 6 點後至早上 6 點前，藉此探討日夜循環對鯨豚社交發聲行為的潛在影響。

透過圖 8 可以觀察到，鯨豚的哨叫聲(Whistles)在時間分佈上展現出顯著的聚集性，結合各月份日夜的哨叫聲數量比例進行量化分析後，研究結果顯示東部海域鯨豚的社交活動具有明顯日夜偏好。在夏季至初秋的 7 月至 9 月期間，鯨豚的發聲活動明顯集中於日間，比例均超過 60%，分別達到 62.9%、60.0% 與 66.5%，如圖 9 所示。顯示在該季節中，鯨豚群次在日間具有較高強度的社交互動或特定的群體行為。

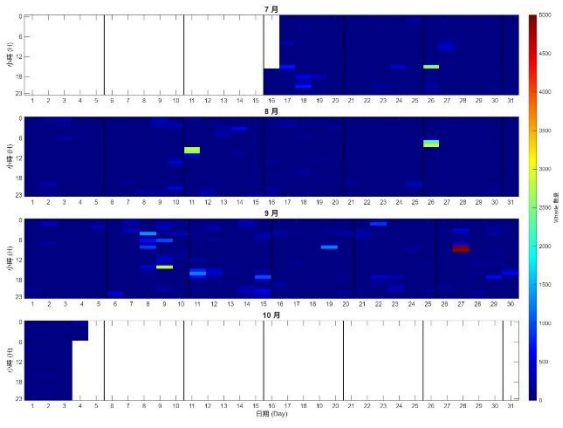


圖 8：每小時哨叫聲數量分布圖

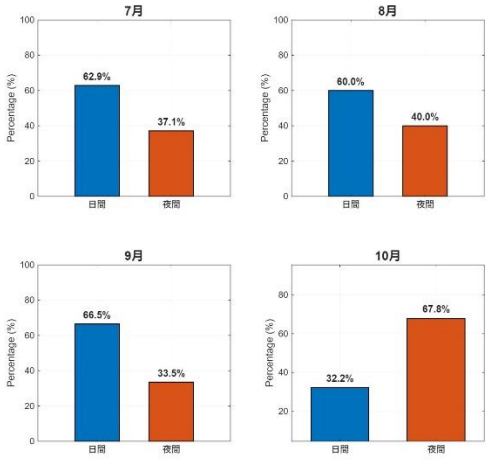


圖 9：各月份日夜哨叫聲比例分布圖

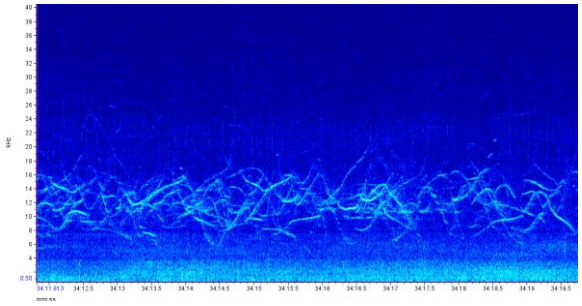


圖 10：9 月 27 日之大量哨叫聲重疊事件

3.2 基於中心頻率之分群分析

在針對鯨豚群次的出沒特徵進行深入分析時，哨叫聲的中心頻率(Center Frequency)分佈提供了辨識不同生物群落的重要依據。根據 NTUPAM 系統的偵測結果，研究識別出五個哨叫聲活動極為密集的關鍵時段，這些時段不僅偵測數量龐大，且頻繁出現多組哨叫聲在時頻譜上高度重疊的現象，如圖 10 所示。顯示當時有數量龐大且來自不同群次的個體同時在測站附近進行社交溝通。

結合中心頻率的量化分析，各時段展現出的聲學特徵如表 2 所示：

表 2：不同群次之中心頻率

日期	時間	中心頻率(kHz)
7 月 26 日	15：00 - 16：00	12.90
8 月 11 日	15：00 - 16：00	11.90
8 月 26 日	15：00 - 16：00	8.06
9 月 09 日	15：00 - 16：00	12.90
9 月 27 日	15：00 - 16：00	12.50

透過這些特定時段的中心頻率差異與發聲密集度可以推斷，台灣東南海域並非僅由單一族群利用，而是有複數個不同生物特徵的鯨豚群體在此交替活動。其中，中心頻率落在 11.9 kHz 至 12.9 kHz 之間的時段，展現出中小型海豚科物種典型的高頻社交溝通特徵；而 8.06 kHz 的出現則可推測為不同物種群次。

四、討論

在評估自動化聲學監測技術的應用成效時，本研究證實了利用國立臺灣大學開發之 NTUPAM 系統對於處理長期水下音檔的關鍵價值。由於台灣東南海域的海況環境極其複雜且監測期間跨度極長，若單純採行人工作業進行逐秒的聲譜檢視，不僅在實務執行上效率低下，更極易因研究人員疲勞或主觀判定標準不一而產生顯著的人為誤差。透過自動化偵測演算法的導入，研究人員能夠在短時間內從數千小時的原始資料中，精確鎖定哨叫聲(Whistles)出現的關鍵時段，這為後續量化鯨豚活動強度、剖析中心頻率分佈特徵以及建立高解析度的日夜活動趨勢圖譜，提供了標準化且具高度信賴度的數據基礎。這種技術路徑大幅縮短了海量原始數據與科學發現之間的距離，無疑是推動台灣東部海域基礎生態研究不可或缺的工具。

然而，單純依靠聲學偵測在現階段的研究中仍面臨物種鑑定上的科學限制。由於東南海域地形極為陡峭，離岸僅數公里水深即急遽增加至千米以上，且長期受到黑潮強勁海流與複雜水文環境的影響，使得傳統的海上目視調查在作業執行上遭遇極大困難。這導致本研究在獲取高品質聲訊資料的同時，缺乏對應的即時目視觀察紀錄來提供物種確認的目視資料。此外，盤點海洋保育署(OCA)與台灣生物多樣性資訊機構(TaiBIF)等公開資料庫，可發現該區域歷史目擊紀錄與樣本數亦相當匱乏。反映出東南部海域鯨豚研究中資訊不對稱的嚴峻挑戰，使得目前即便能透過偵測高峰判定有穩定群次活動，卻仍難以達成百分之百準確的物種對應辨識。

為了解決缺乏即時目視驗證的困境，未來研究的重心將轉向利用更深層的聲學特徵來進行細緻化的物種推斷。除了現已掌握並進行初步分群的中心頻率外，後續研究重點將導入哨叫聲的聲學型態(例如寬頻點擊聲 Broadband Clicks、吠叫聲 Barks、嗡嗡聲 Buzzes 等)[2]以及哨叫聲間隔(Inter-Whistle Interval, IWI)[10]作為辨識的核心指標，如圖 11 所示。不同物種在溝通節奏與社交頻帶上具有獨特的生物演化特徵，例如特定群次在夜間高峰段所展現的 IWI 規律與聲紋轉折特點，可能與其群體規模、社會結構、甚至是特定覓食行為的協作密切相關。透過將這些精細化的聲學特徵指標與深度學習分類模型相結合，我們有望在缺乏目視驗證的情況下，建立一套專屬於台灣東南海域的自動化物種辨識框架。這不僅能大幅強化自動化偵測系統的科學分析效能，更能填補台東地區長期生態調查的空白，為未來的棲地管理與鯨豚保育策略提供更具公信力、精確且具前瞻性的量化數據支撐。

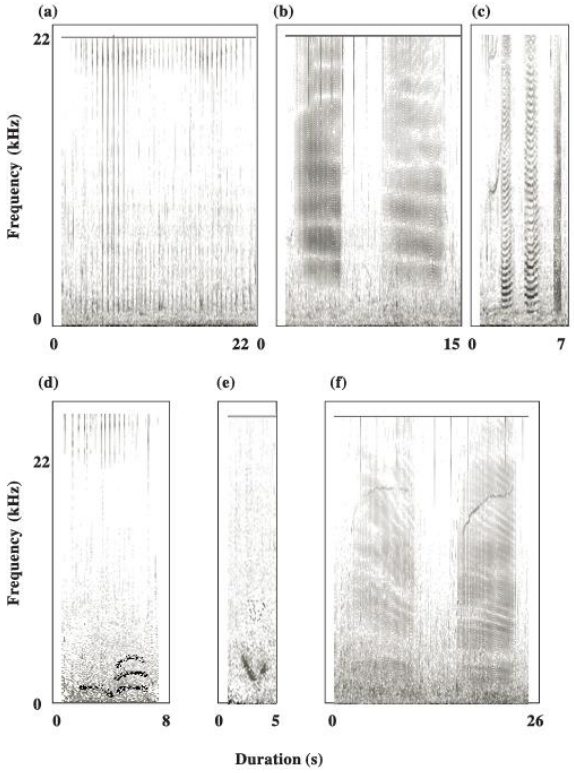


圖 11：花紋海豚之聲學特徵[2]

五、結論

本研究成功建立了一套適用於台灣東南部海域的自動化聲學監測流程，並證實了 NTUPAM 系統在處理大規模水下聲訊資料具備卓越的效能。透過自動化演算法，研究人員得以從巨量音檔中快速且精確地鎖定鯨豚哨叫聲(Whistles)事件，相較於傳統的人工檢視方法，不僅大幅節省了資料整理與核實的時間，更提升了數據分析的系統性與客觀性。

在研究成果方面，透過對偵測量規律與中心頻率的剖析，本研究揭示了東部海域鯨豚活動具有強烈的時間聚集性與顯著的日夜趨勢變化。然而，由於該海域物種組成極為繁雜，且受限於陡峭地形與惡劣海況等自然環境限制，導致在錄音期間難以同步進行目視調查以確證物種。這種「缺乏目擊資料」的現狀，是目前深水海域聲學監測面臨的主要挑戰。

展望未來，為進一步提升物種鑑別的精確度，本研究建議可將分析維度擴展至更深層的聲學特徵，包括哨叫聲的頻率聲紋型態以及哨叫聲間隔(IWI)。透過將這些細部聲學指標與深度學習模型相結合，有望在缺乏目視驗證的情況下，實現對特定物種群次的進一步推測與分類。本研究的初步發現不僅填補了台東至蘭嶼海域的生態資料空白，亦為未來台灣東南海域的海洋保育管理與棲地監測技術，提供了具備實務價值與科學基礎的量化依據。

謝誌

誠摯感謝國家科學及技術委員會之經費補助支持。感謝國立臺灣大學海洋研究所蘇至杰教授、何文華技術員及洋聲股份有限公司協助，僅此致謝。

計畫編號：NSTC 114-2221-E-002-146 -

參考文獻

[1] "「110 年度花東海域鯨豚族群調查計畫」案成果報告書," 2021.

[2] P. J. Corkeron and S. M. Van Parijs, "Vocalizations of eastern Australian Risso's dolphins, Grampus griseus," Canadian Journal of Zoology, vol. 79, no. 1, pp. 160–164, 2001.

[3] K. Marten, "Ultrasonic analysis of pygmy sperm whale (Kogia breviceps) and Hubbs' beaked whale (Mesoplodon carlhubbsi) clicks," Aquatic Mammals, vol. 26, no. 1, pp. 45–48, 2000.

[4] C. R. Pires, M. R. Rossi-Santos, A. D. Paro, and L. L. Wedekin, "Whistles of the pantropical spotted dolphin (Stenella attenuata) in Santos Basin, western South Atlantic Ocean," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 149, no. 5, pp. 3241–3249, 2021.

[5] L. J. May-Collado et al., "A Detailed Characterization of the Whistle Repertoire of Fraser's Dolphins (Lagenodelphis hosei) From the Lesser Antilles," Marine Mammal Science, vol. 42, no. 1, p. e70101, 2026.

[6] C. Bazúa-Durán and W. W. Au, "The whistles of Hawaiian spinner dolphins," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 112, no. 6, pp. 3064–3072, 2002.

[7] B. Møhl, M. Wahlberg, P. T. Madsen, A. Heerfordt, and A. Lund, "The monopulsed nature of sperm whale clicks," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 114, no. 2, pp. 1143–1154, 2003.

[8] A. Andriolo et al., "Killer whale (Orcinus orca) whistles from the western South Atlantic Ocean include high frequency signals," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 138, no. 3, pp. 1696–1701, 2015.

[9] C.-T. Hung, W.-Y. Chu, W.-L. Li, Y.-H. Huang, W.-C. Hu, and C.-F. Chen, "A case study of whistle detection and localization for humpback dolphins in Taiwan," Journal of

Marine Science and Engineering, vol. 9, no. 7, p. 725, 2021.

[10] L. Redaelli et al., "Identification and classification of repeated whistle types from free-ranging rough-toothed dolphins (Steno bredanensis)," Scientific Reports, 2026.

基於稀疏聲學陣列之目標方位估測技術探討

溫柏諭[1]　吳柏賢[2]

摘要

在聲學陣列訊號處理中，當實體感測器數量受限時，均勻分佈陣列孔徑通常需要在高頻空間混疊抑制與低頻方位解析度之間權衡。稀疏陣列能夠在相同感測器數量條件下，提供更大陣列孔徑與提升陣列自由度，進而改善寬頻方位估測性能。本研究以重定位改進嵌套陣列（Relocating Improved Nested Array, RINA）為基礎，其核心特性為可建構無孔洞虛擬共陣列，並結合交叉相關域（Cross-Correlation Domain, C-CD）方法進行目標方位估測。研究以實體麥克風陣列為驗證平台，並針對 C-CD 方法進行模組化比較，對比傳統 MUSIC、基礎交叉相關域法（Basic C-CD）、空間平滑交叉相關域法（SS C-CD），以及納入廣義特徵值問題（Generalized Eigenvalue Problem, GEP）雜訊補償之完整交叉相關域法（Full C-CD）之效能差異。結果顯示，RINA 架構有助於擴展陣列之有效工作頻帶；在演算法層面，空間平滑處理對多重訊號源解析能力具有關鍵影響，而 GEP 雜訊補償則可進一步提升估測穩定性並抑制殘餘偽峰。模擬與實驗結果表明，相較於傳統方法在極端頻段容易失效且伴隨偽峰，完整 C-CD 演算法不僅能精確解析目標方位並有效抑制偽峰，亦進一步突破實體陣列於高、低頻段的方位估測限制，顯示其於寬頻聲學陣列應用中的可行性與穩定性。本研究結果可作為後續寬頻水下聲學陣列與定位系統設計之參考。

關鍵詞：波達方向估計、重定位改進嵌套陣列、交叉相關域演算法、虛擬共陣列

An Investigation of Target Direction-of-Arrival Estimation Techniques Based on Sparse Acoustic Arrays

Po-Yu Wen [1]　Bo-Hsien Wu [2]

ABSTRACT

In acoustic array signal processing, limited sensor counts often necessitate a trade-off between spatial aliasing at high frequencies and angular resolution at low frequencies. Sparse arrays, specifically the Relocating Improved Nested Array (RINA), address this by providing larger apertures and increased degrees of freedom (DOF) via a hole-free virtual co-array. This study investigates Direction-of-Arrival (DOA) estimation by integrating RINA with Cross-Correlation Domain (C-CD) methods. Using a physical microphone array as a verification platform, a modular comparison is conducted among traditional MUSIC, Basic C-CD, Spatially Smoothed C-CD (SS C-CD), and a Full C-CD approach featuring Generalized Eigenvalue Problem (GEP) noise compensation. Results demonstrate that the RINA architecture effectively extends the operational frequency band. At the algorithmic level, spatial smoothing is critical for multi-source resolution, while GEP compensation enhances stability and suppresses pseudo-peaks. Both simulation and experimental data confirm that the Full C-CD algorithm achieves precise DOA resolution at extreme frequencies, overcoming the physical constraints of traditional arrays. These findings provide a robust reference for designing wideband underwater acoustic localization systems.

Keywords: Direction-of-Arrival estimation; Relocating Improved Nested Array; Cross-Correlation Domain algorithm; Virtual co-array

[1] 作者一所屬單位：國立成功大學系統及船舶機電研究所 碩士班研究生
[2] 作者二所屬單位：國立成功大學系統及船舶機電系 助理教授

一、緒論

聲學陣列訊號處理在目標偵測、環境監測及定位追蹤等領域中具有重要地位，而波達方向(Direction of Arrival, DOA)估測更是其中的核心課題之一 [1]。傳統均勻線性陣列(Uniform Linear Array, ULA)雖具有結構簡單且易於實作之優點，但其可識別訊號源數量與方位估測精度，往往受限於實體感測器數量所決定之陣列自由度(Degrees of Freedom, DOFs)與陣列孔徑。當感測器數量有限時，陣列設計通常必須在高頻空間混疊抑制與低頻方位解析度之間進行折衷：縮小感測器間距有助於抑制高頻混疊，卻會降低低頻解析能力；反之，增大感測器間距雖可提升低頻解析度，卻容易於高頻條件下產生空間混疊。因此，如何在有限感測器數量下兼顧高、低頻段之 DOA 估測效能，已成為寬頻聲學陣列研究中的重要課題。

為了突破傳統 ULA 在自由度與有效孔徑上的限制，稀疏陣列(Sparse Array)透過非均勻空間配置，使系統得以建構具有較大有效孔徑之虛擬差分共陣列(Virtual Difference Co-array)，進而提升方位估測能力。近年來，嵌套陣列(Nested Array, NA)[4]與互質陣列(Coprime Array, CPA)[5] 已成為稀疏陣列研究中最具代表性的兩類架構；其後亦陸續發展出廣義互質陣列 [6] 與稀疏嵌套線性陣列(Sparse Nested Linear Array, SNLA)[8] 等方法，以進一步增加虛擬自由度並改善陣列性能。

在上述架構中，重定位改進嵌套陣列(Relocating Improved Nested Array, RINA)具有相當突出的特性。RINA 能夠在固定實體感測器數量下形成無孔洞(Hole free)之虛擬共陣列，提供更多連續的虛擬自由度與更大的有效陣列孔徑 [10]。此一特性使其在寬頻訊號條件下，兼具提升解析能力與擴展有效工作頻帶之潛力，因此特別適合應用於高解析度 DOA 估測問題。

在方位估測方法方面，傳統高解析度子空間演算法如 MUSIC [2] 與 ESPRIT [3] 雖已被廣泛應用，但在多重訊號源、有限樣本數或複雜雜訊環境下，仍可能面臨解析度下降、估測不穩定或偽峰干擾等問題。為了更充分利用稀疏陣列之共陣列特性，已有研究提出於自相關域(Autocorrelation Domain)中進行 DOA 估測之方法 [9]。針對 RINA 架構，Zhou 等人進一步提出基於交叉相關域(Cross-Correlation Domain, C-CD)之估測模型 [10]，藉由交叉相關域訊號表示強化對雜訊與干擾之抑制能力。然而，在多重訊號源情境下，共陣列訊號之相干性可能造成協方差矩陣秩虧損，因而需要透過空間平滑(Spatial Smoothing, SS)技術恢復其可分辨能力 [7]；此外，若考量實際量測環境中之殘餘雜訊影響，進一步納入廣義特徵值問題(Generalized Eigenvalue Problem, GEP)之雜訊補償機制，則有助於抑制偽峰並提升估測穩定性。

基於上述背景，本研究以 RINA 稀疏陣列架構為核心，並以實體麥克風陣列作為驗證平台，針對 C-CD 方位估測方法進行模組化比較與分析。本文系統性比較傳統 MUSIC、基礎交叉相關域法（Basic C-CD）、結合空間平滑之交叉相關域法(SS C-CD)，以及納入 GEP 雜訊補償之完整交叉相關域法(Full C-CD)在不同條件下之效能差異。研究結果顯示，RINA 結合完整 C-CD 演算法可有效提升方位估測穩定性、抑制偽峰，並有助於擴展陣列之有效工作頻帶。相關成果可作為後續寬頻聲學陣列與高精度定位系統設計之重要參考。

二、研究方法

本研究旨在驗證重定位改進嵌套陣列(Relocating Improved Nested Array, RINA)應用於寬頻聲學方位估測之可行性，並進一步分析交叉相關域(Cross-Correlation Domain, C-CD)方法中各模組對估測效能之影響。在陣列模型建構方面，首先建立 RINA 之實體陣列幾何與其對應之虛擬差分共陣列，利用其無孔洞虛擬共陣列、高連續自由度(DOFs)與較大有效孔徑等特性，作為後續方位估測演算法設計之基礎。接著，根據接收訊號建立樣本共變異矩陣，並於虛擬共陣列域中形成交叉相關域表示，以作為 DOA 估測之主要處理架構。在演算法設計方面，本研究以 C-CD 為核心處理流程，並進一步納入空間平滑(Spatial Smoothing, SS)及廣義特徵值問題(Generalized Eigenvalue Problem, GEP)之雜訊補償機制，以提升多重訊號源條件下之解析能力與估測穩定性。隨後透過最小平方法進行參數優化，並由偽空間頻譜搜尋峰值位置以求得目標方位。為了系統性比較不同模組之實際貢獻，本文將傳統 MUSIC、基礎交叉相關域法(Basic C-CD)、空間平滑交叉相關域法(SS C-CD)，以及納入 GEP 雜訊補償之完整交叉相關域法(Full C-CD)作為主要比較對象。此外，為兼顧理論分析與實務驗證，本研究同時進行數值模擬與實體量測實驗。模擬部分用以分析不同演算法於多種頻率、快照數與訊號條件下之方位估測表現；實驗部分則以實體麥克風陣列作為驗證平台，檢驗 RINA 架構及其所採用之 C-CD 方法於實際聲學環境中的適用性。後續各節將依序說明陣列訊號模型、演算法推導流程、模擬分析以及實驗驗證配置。

2.1 陣列訊號模型

為建立後續方位估測演算法之理論基礎，本文首先建立陣列訊號模型。傳統嵌套陣列（Nested Array, NA）由一組緻密均勻線性陣列與一組稀疏均勻線性陣列所構成，其中緻密子陣列包含 M_1 個感測器，感測器間距為 $\lambda/2$；稀疏子陣列包含 M_2 個感測器，感測器間距為 $(M_1+1)\lambda/2$。令 $d=\lambda/2$，則其感測器位置集合可表示為:

$$S_{NA} = \{1,2, M_1, M_1+1, 2(M_1+1), \cdots, M_2(M_1+1)\}. \quad (1)$$

假設共有 Q 個互不相關之窄頻訊號源，以載波頻率 f_0 自方向 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_Q\}$ 入射至陣列，則第 q 個訊號可表示為:

$$s_q(t) = a_q(t)e^{jw_0 t}, \lambda = \frac{c}{f_0} \quad (2)$$

其中，$s_q(t)$為 q 個訊號模型，$a_q(t)$為 q 個訊號資訊，$\omega_0 = 2\pi f_0$，c 為聲速，λ 為波長。因此，陣列於時間t之接收訊號可表示為:

$$x(t) = \sum_{q=1}^{Q} a(\theta_q)s_q(t) + n(t) = As(t) + n(t) \quad (3)$$

其中，$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_Q)]$為陣列矩陣，$a(\theta_q)$ 為對應入射方向 θ_q 之 steering vector，$s(t)$ 為訊號向量，$n(t)$ 為高斯雜訊。進一步可得陣列接收訊號之共變異矩陣為:

$$R = E[x(t)x^H(t)] = AR_sA^H + \sigma^2 I \quad (4)$$

其中，$R_s = E[s(t)s^H(t)]$ 表示訊號源協方差矩陣，$\sigma^2 I$ 表示空間白雜訊之協方差矩陣，σ^2 為雜訊功率，I 為單位矩陣，$(\cdot)^H$ 表示共軛轉置。陣列輸出協方差矩陣可分為訊號項 AR_sA^H與雜訊項 $\sigma^2 I$兩部分。

2.2 差分共陣列模型

為了將實體稀疏陣列轉換為具較高自由度之虛擬陣列表示，本文進一步引入差分共陣列（Difference Co-array）模型。對於由整數集合 S所描述之稀疏陣列，其差分共陣列D定義為各感測器位置兩兩相減所得之集合，即

$$D = \{n_1 - n_2 \mid n_1, n_2 \in S\} \quad (5)$$

差分共陣列中的虛擬感測器位置可用以反映陣列之自由度(Degrees of Freedom, DOFs)，因此可作為後續高解析度方位估測之基礎。對傳統嵌套陣列而言，將所有實體感測器位置進行兩兩相減並向量化後，可得其虛擬差分共陣列位置向量為:

$$s_v = vec\left(vec(s_{NA})1_{M_1+M_2}^T - 1_{M_1+M_2}^T vec(s_{NA})\right) \quad (6)$$

其中，$s_v \in \mathbb{R}^{(M_1+M_2)^2 \times 1}$。進一步將其中重複元素去除並依大小排序後，可得到對應之唯一差分位置集合 S_c。對於傳統 NA，其虛擬共陣列位置可表示為:

$$S_c = \{-(M_2(M_1+1)-1), \dots, 0, \dots, (M_2(M_1+1)-1 \quad (7)$$

式 (7) 顯示差分共陣列可由原始實體陣列延伸出更大的等效孔徑，作為後續虛擬陣列處理之基礎。為了由實體陣列之共變異矩陣對應至虛擬共陣列表示，文獻進一步定義轉換矩陣T為:

$$T_{i,j} = \frac{\delta_{[S_C]i,[S_v]j}}{\sum_{l=1}^{(M_1+M_2)^2} \delta_{[S_C]i,[S_v]i}}, \quad (8)$$

其中，δ_(p,q)為 Kronecker delta。藉由此轉換矩陣，可將實體陣列之共變異矩陣 R 向量化後映射至差分共陣列域，得到

$$r = Tvec(R) = T(A^* \odot A)p + \sigma^2 Te, \quad (9)$$

其中，⊙表示 Khatri-Rao 乘積，$p = [p_1, p_2, \dots, p_Q]^T$為各訊號源功率向量，$e$ 對應雜訊項，而 r為虛擬差分共陣列各 lag 的統計量向量。由式 (9) 可知，原始實體陣列之二階統計資訊可重新表示於虛擬差分共陣列域中，因而為後續 RINA 虛擬共陣列建構與交叉相關域（C-CD）推導提供理論基礎。

2.3 重定位改進嵌套陣列結構

為了在固定實體感測器數量下獲得較大的有效陣列孔徑與較多連續自由度，本文進一步採用重定位改進嵌套陣列作為研究之稀疏陣列架構。相較於傳統嵌套陣列，RINA 透過重新配置感測器位置，使其虛擬差分共陣列具有無孔洞（hole-free）特性，並可提供較高之連續 DOFs，因而更有利於後續方位估測。

$$\left\{\begin{array}{c} S_1 = M_1 + 1 - \langle 1, M_1 \rangle \\ S_2 = 2M_1 + 1 + (M_1+1)\langle 0, r-1 \rangle \\ S_3 = J + (M_1+1)\langle 0, M_2 - 1 - r \rangle - 1 \\ S_4 = J + (M_1+1)\langle M_2 - 1 - r \rangle - 1 \\ S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \end{array}\right\} \quad (10)$$

其中，$r = \left\lceil \frac{M_2-1}{2} \right\rceil$; $J = (M_1+1)(r+2) - 2$

式 (10) 給出了 RINA 陣列幾何之封閉形式表示，使得整體實體陣列配置可由參數 M_1與 M_2直接決定，而無需再以逐點枚舉方式描述感測器位置。其中，S_1、S_2、S_3 與 S_4分別表示 RINA 中四個子陣列之感測器位置集合，整體實體感測器位置集合則表示為

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4.$$

此集合 S完整描述了 RINA 的實體陣列幾何，亦為後續建立虛擬差分共陣列(difference co-array)的基礎。由於差分共陣列中的每一個 lag，皆可視為兩個實體感測器位置之差，因此所有可形成之差分值，皆由集合 S中元素兩兩相減所產生。換言之，RINA 的差分共陣列結構、本研究所關注之連續自由度(consecutive DOFs)，以及後續交叉相關域(cross-correlation domain)之建立，均直接建立在集合 S所對應的實體感測器配置之上。

為了更精確描述各差分 lag 的形成方式，進一步定義集合 $M(m)$為所有能夠產生差分值 m之感測器對所構成的集合，即

$$M(m) = \{(n_1, n_2) \in S_v \times S_v | n_1 - n_2 = m\}, m \in S_v \quad (11)$$

進一步地，可定義權重函數 $w(m)$為對應於差分位置 m之感測器對數量：

$$w(m) = |M(m)|, m \in S_v \quad (12)$$

其中，$w(m)$ 表示虛擬共陣列中差分位置 m的重複出現次數，後續可據此對相同 lag 之樣本共變異值進行平均。由於 RINA 所形成之差分共陣列為無孔洞結構，其虛擬差分共陣列可對應為連續均勻線性陣列，因而在相同實體感測器數量下可提升可用自由度，並有利於後續空間平滑與交叉相關域方法之應用。另一方面，若總感測器數為 $M = M_1 + M_2$，則 RINA 可獲得之自由度為：

$$DOFs = 2(M_1 + 1)(M_2 + 1) - 7 \quad (13)$$

當 M_1與 M_2進一步最佳化配置後，若 M為偶數，RINA 之最佳連續 DOFs 可達

$$\frac{M^2}{2} + 2M - 5 \quad (14)$$

相較於傳統 NA 與 SNA 可增加 $M-4$個 DOFs；若 M為奇數，則其最佳連續 DOFs 為

$$\frac{M^2-1}{2} + 2M - 5 \quad (15)$$

2.4 基於交叉相關域之方位估測方法

為充分發揮 RINA (Relocating Improved Nested Array) 無孔洞虛擬共陣列之特性，本文採用基於交叉相關域(Cross-Correlation Domain, C-CD)之方向找尋(DOA)估測方法。考量實務情境中快照數(napshots)有限，理論共變異矩陣 R 通常藉由樣本共變異矩陣 R^近似表示如下：

$$\hat{R} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} x(t)x^H(t) \quad (16)$$

其中，T為快照數。接著，根據 RINA 之差分共陣列 D，可定義交叉相關域表示為:

$$u_c(m) = \frac{1}{w(m)} \sum_{n1,n2\in M_{(m)}} \hat{R}(n1,n2) \quad (17)$$

其中，$w(m)$為差分位置m對應之權重函數。式 (17)之目的在於將實體陣列共變異矩陣中對應相同 lag 的元素加以平均，進而形成虛擬共陣列域中的交叉相關表示，為提升估測效能，本文進一步引入空間平滑(Spatial Smoothing, SS)機制。由 $u_c(m)$建立 Toeplitz 矩陣

$$\tilde{R}(n_1, n_2) = u_c(n_2 - n_1) \quad (18)$$

其中，矩陣尺寸為 $(L+1)\times(L+1)$，且

$$L = 2(M_1 + 1)(M_2 + 1) - 4 \quad (19)$$

再據此構成空間平滑後之交叉相關矩陣

$$R_{ss} = \frac{\tilde{R}\tilde{R}^H}{L+1} \quad (20)$$

最後，對 R_{ss} 各條對角線元素取平均，可得平滑後之交叉相關量

$$\hat{u}_c(m) = \frac{1}{2L+1-m}$$

$$\sum_{n2-n1=m-L} R_{ss}(n1,n2),\ m = 1,2,\cdots,L,\cdots,2L+1 \quad (21)$$

透過上述步驟，可由原始共變異資訊進一步建構出較穩定之虛擬共陣列表示，作為後續參數估測之基礎。對第 q 個訊號而言，其 lag m之交叉相關可表示為:

$$\hat{u}_{c_q}(m) = e^{jw_q m} p_q \quad (22)$$

其中，p_q為第 q個訊號源功率，ω_q為對應之空間頻率，可寫為:

$$w_q = \frac{2\pi d\cos\theta_q}{\lambda} \quad (23)$$

因此，整體交叉相關可表示為:

$$u_c(m) = \sum_{q=1}^{Q} e^{jw_q m} p_q + \sigma^2\delta(m) = \hat{u}_c(m) + \sigma^2\delta(m) \quad (24)$$

令 $a_q = e^{j\omega_q}$，則可得到

$$\hat{u}_{c_q}(m) - a_q\hat{u}_{c_q}(m-1) = 0, m = L, L = 1,\cdots,2L+1 \quad (25)$$

進一步經由z轉換，可建立特徵多項式

$$A(z) = \prod_{q=1}^{Q}\left(1 - a_q z^{-1}\right)\hat{u}_{c_q}(z) = 1 - c_1 z^{-1} - c_2 z^{-2} - \cdots - c_Q z^{-Q} \quad (26)$$

並得到交叉相關序列所滿足之遞迴關係

$$\hat{u}_c(m) - C_1\hat{u}_c(m-1) - \cdots - c_Q\hat{u}_c(m-Q) = 0 \quad (27)$$

式 (27) 為後續求解未知參數向量 $c = [1, c_1, \ldots, c_Q]^T$之核心依據，與雜訊項一併改寫為矩陣形式後，可表示為:

$$\hat{R}_A c = \sigma^2 B c \quad (28)$$

其中，$\hat{R}_A$ 由平滑後交叉相關序列所組成，B 為對應之選擇矩陣，且 $\gamma = \sigma^2$。由於式 (28) 可視為廣義特徵值問題(Generalized Eigenvalue Problem, GEP)，故可先定義為:

$$A_0 = \hat{R}_A^H\hat{R}_A,\ A_1 = -\hat{R}_A^H B - B^H\hat{R}_A,\ A_2 = B^H B \quad (29)$$

並建立

$$P = \begin{bmatrix} A_0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},\ J = \begin{bmatrix} -A_1 & -A_2 \\ I & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

其中，P 與 J分別為由 A_0、A_1、A_2 組成之區塊矩陣，用以將原始二階矩陣方程轉換為廣義特徵值問題。其中，P 包含主係數矩陣 A_0，J 則由其餘係數矩陣與單位矩陣構成，以利後續特徵值求解。再藉由求解式 (31)

$$Px_c = \gamma Jx_c \quad (31)$$

取得最小特徵值所對應之 γ與特徵向量 x_c，並將其正規化後得到參數向量 c。

由於 GEP 所得結果屬近似解，本文進一步以

交替式最佳化（alternating optimization）與最小平方法進行修正。首先，將式 (28) 寫為

$$\min_{\gamma, c, c(1)=1} \left\| \left(\hat{R}_A - \gamma B \right) c \right\|. \tag{32}$$

並令

$$\hat{R}_A = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{33}$$

其中，$\hat{R}_A$為平滑後之交叉相關矩陣，蘊含虛擬差分共陣列之空間統計資訊；R_1 與R_2 係將 $\hat{R}_A$ 依列拆分之子矩陣，其中 R_1 用於估算雜訊功率 γ；B 則定義為由單位矩陣 I 與零矩陣構成之區塊矩陣，固定 c時，可利用 Rayleigh quotient 更新 γ：

$$\gamma = \frac{c^H R_1 C}{c^H c} \tag{34}$$

式 (34) 之物理意義，在於當參數向量 c已知時，求得一個最合適之純量係數 γ，使得 $R_1 c$與 γc之間的差異最小。透過此一步驟，可先行修正模型中的尺度誤差，使後續參數估測更貼近實際資料結構，並降低有限快照數與雜訊擾動對估測結果之影響。固定 γ時，若定義

$$D = \hat{R}_A - \gamma B \tag{35}$$

其中，$\hat{c} = [\hat{c}_1, \hat{c}_2, \ldots, \hat{c}_Q]^T$，則可將問題化為正則化最小平方解

$$\hat{c} = (D(2{:}end,:)^H D(2{:}end,:) + \eta I)^{-1} D(2{:}end,:)^H D(1,:) \tag{36}$$

其中，η為正則化參數。式 (35) 與式 (36) 代表在固定 γ之後，重新以最小平方準則估測特徵多項式之係數向量 c。其中加入正則化項 ηI的目的，在於避免矩陣反演時因資料受雜訊污染或矩陣接近奇異而造成數值不穩定，並有助於提升估測結果之穩健性。根據估得之$\hat{c}$建立偽空間頻譜

$$f_A(w) = \frac{1}{\left| 1 - (\hat{c}_1 e^{-jw} + \hat{c}_2 e^{-j2w} + \cdots + \hat{c}_Q e^{-jQw} \right|^2} \tag{37}$$

式 (37) 為本文進行 DOA 估測之核心空間頻譜函數。其概念在於，當掃描變數 w對應於真實訊號源之方向時，特徵多項式分母將趨近於零，使頻譜函數產生明顯峰值。因此，可藉由搜尋 $f_A(w)$之峰值位置，辨識訊號源可能之入射方向。不僅可更充分利用虛擬共陣列之自由度，亦有助於降低旁瓣與殘餘偽峰對方向判定之干擾。

其中

$$W = \frac{2\pi d \cos\theta}{\lambda} \tag{38}$$

再由偽空間頻譜之峰值位置 ω_q求得各訊號源之估測方向

$$\hat{\theta}_q = \sin^{-1}\left(\frac{w_q \lambda}{2\pi d} \right), q = 1,2,\cdots,Q \tag{39}$$

綜合而言，本文之 C-CD 方位估測流程可概括為：先由接收訊號計算樣本共變異矩陣，再建立平滑後之交叉相關域表示，接著透過 GEP 與正則化最小平方求得特徵多項式參數，最後由偽空間頻譜峰值完成 DOA 估測。

三、數值模擬

為驗證所採用之重定位改進嵌套陣列 RINA 及其交叉相關域方位估測方法之性能，本文首先透過數值模擬分析不同陣列架構與不同演算法於各種條件下之 DOA 估測表現。圖 1 顯示本文所比較之四種 8 麥克風陣列，包括 ULA、三倍間距的 ULA（後面簡稱 3d ULA）、CPA 與 RINA 的實體陣列幾何，以及其對應之虛擬差分共陣列。由圖 1 可觀察到，不同陣列雖具有相同實體感測器數量，但其虛擬共陣列結構存在明顯差異，其中 RINA 可形成連續且無孔洞之虛擬差分共陣列，相較於其他陣列更有利於提升陣列自由度與後續方位估測效能。

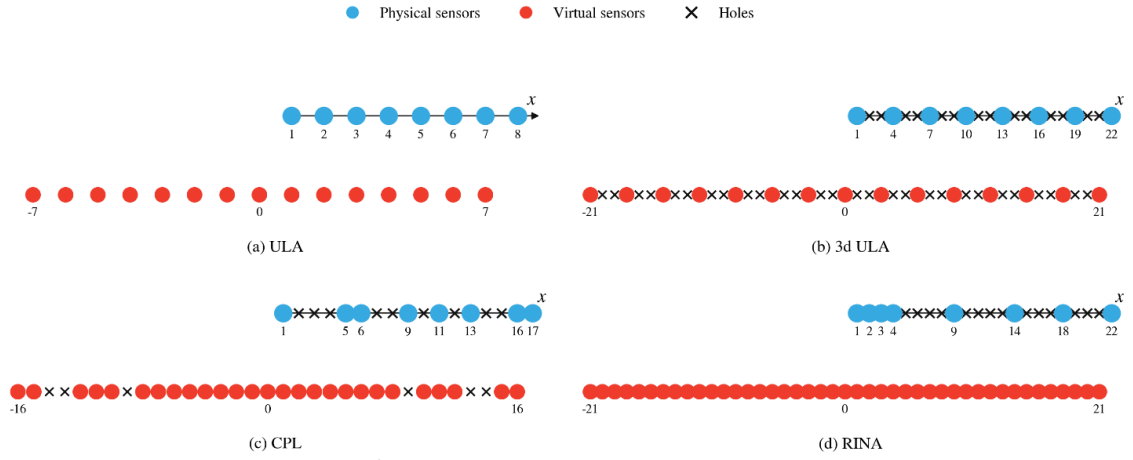


圖 1：四種 8 麥克風陣列之實體陣列幾何與虛擬差分共陣列。

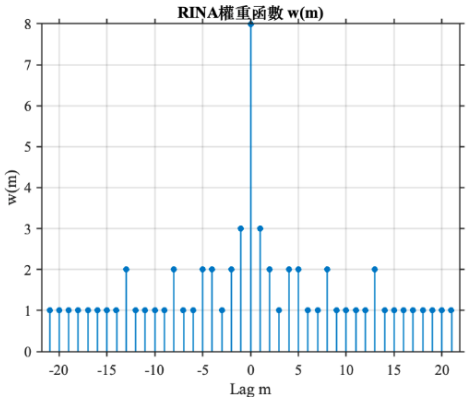


圖 2：RINA 虛擬差分共陣列之權重函數$w(m)$分布。

圖 2 為 RINA 之權重函數 $w(m)$分布。權重函數反映各差分 lag 所對應之感測器對數量，亦即虛擬共陣列中各位置的重複出現次數。由圖 2 可知，RINA 在中心 lag 附近具有較高權重，而其餘多數 lag 亦具備非零權重，顯示其虛擬共陣列不僅連續，且在交叉相關域建構時能有效利用多組感測器對的統計資訊。此特性有助於提升交叉相關域表示之穩定性，並作為後續空間平滑與 GEP 雜訊補償的基礎。基於上述陣列特性，本文於數值模擬中分別比較 Basic C-CD、SS C-CD 以及 Full C-CD 等方法，並對不同訊號頻率、快照數及訊號源條件進行分析，以評估各方法在方位估測精度、解析能力與偽峰抑制效果上的差異。

3.1 數值模擬設定

為驗證本文所採用之重定位改進嵌套陣列 RINA 於寬頻聲學方位估測中的性能，本文透過數值模擬比較 RINA 與 ULA、3d ULA 及 CPA 等陣列在相同實體感測器數量下之估測表現。各陣列之實體幾何與對應虛擬差分共陣列如圖 1 所示，而 RINA 之權重函數分布如圖 2 所示。由圖 1 可知，RINA 可形成連續且無孔洞之虛擬差分共陣列；由圖 2 可知，其中心 lag 附近具有較高權重，有利於交叉相關域表示之穩定建構。在模擬條件設定方面，為分析不同陣列之可用工作頻帶，本文首先採用頻率上限公式作為空間混疊之判斷依據，即:

$$f_{Max} \le \frac{c}{2d} \tag{40}$$

其中，c為聲速，d 為感測器間距。由式 (40) 可知，感測器間距越大，陣列可避免空間混疊之最高工作頻率越低，因此 3d ULA 雖具有較大孔徑，但於高頻條件下較易產生空間混疊；反之，較小間距之陣列則具有較高之頻率操作上限。此外，為評估不同陣列之角度解析能力，本文進一步以瑞利解析度極限作為參考，其近似表示為:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{Lcos\theta} \tag{41}$$

其中，λ 為波長，L 為陣列有效孔徑，θ 為訊號入射角。由式 (41) 可知，陣列有效孔徑越大，則不同入射角所造成之空間響應差異越明顯，主瓣越窄，因此解析能力越佳；而操作頻率越高時，因波長變短，在相同孔徑下對角度變化更為敏感，故亦能提升角度解析度。此式可作為後續模擬結果分析之理論依據。在性能評估方面，本文以均方根誤差(RMSE)量化方位估測結果與真實角度之差異，其定義為：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{KQ}\sum_{k=1}^{K}\sum_{q=1}^{Q}\left(\hat{\theta}_{q,k} - \theta_q\right)^2} \tag{42}$$

其中，K為 Monte Carlo 模擬次數，Q 為訊號源數量，$\hat{\theta}_{q,k}$ 與 θ_q分別表示第 k次模擬中第q個訊號源之估測角度與真實角度(其中 q 代表模擬中的第幾個訊號；k 代表第幾次模擬；$\hat{\theta}$ 代表估測角度；θ 代表真實角度)。RMSE 越小，代表演算法之整體方位估測精度越高。基於上述指標，本文後續將針對不同頻率、快照數及訊號源條件，比較 Basic C-CD、SS C-CD 與 Full C-CD 之估測性能差異。

3.2 陣列模擬結果與分析

本文進一步以數值模擬分析不同陣列架構於各種條件下之方位估測性能，並以 RMSE 作為主要比較指標。模擬結果分別從訊號頻率、訊雜比（SNR）、快照數 T與目標入射角等面向進行討論，以評估各陣列於工作頻帶、抗雜訊能力、估測穩定性及角度解析特性上的差異。

圖 3 顯示不同陣列於各頻率條件下之 DOA 估測 RMSE。由結果可知，ULA（1d）於低頻區段具有較高 RMSE，且隨頻率增加後誤差逐漸下降，反映其受限於較小實體孔徑，在低頻時解析能力不足。3d ULA 於低頻與中頻條件下表現優於 ULA（1d），但因感測器間距較大，其高頻操作範圍受空間混疊限制。相較之下，CPA 與 RINA 之 co array CBF 於大部分頻率範圍內皆具有較低 RMSE，其中 RINA 在中高頻區段呈現最低且最穩定之誤差表現。此結果顯示，RINA 能在固定實體感測器數量下，藉由無孔洞虛擬差分共陣列有效提升等效孔徑與方位估測能力，進而兼顧低頻解析度與寬頻工作特性。

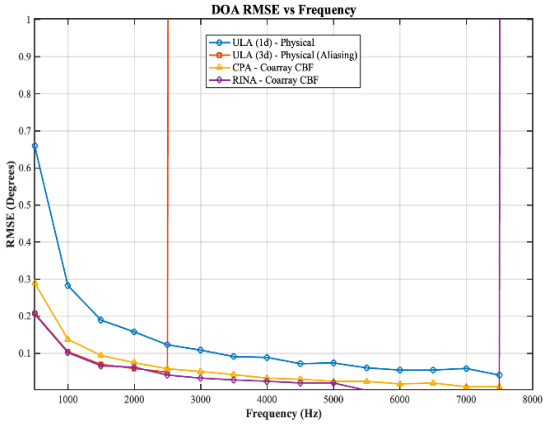
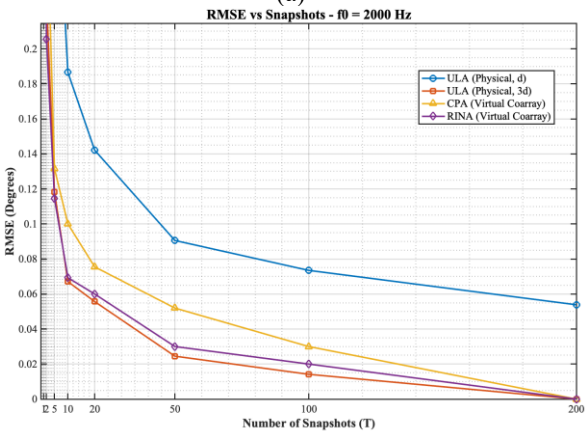


圖 3：各陣列於不同頻率之 DOA 估測 RMSE。

圖 4(a) 與圖 4(b) 分別比較各陣列於 2000 Hz 與 5000 Hz 下之結果。於 2000 Hz 時，如圖 4(a) 所示，四種陣列之 RMSE 隨快照數增加而逐步下降，其中實體 ULA（d）之誤差始終最高，表示其受限於較小實體孔徑與較低自由度，在有限快照數條件下之估測能力相對較弱。相較之下，3d ULA、CPA 與 RINA 皆具有較佳之估測表現，且在快照數增加後收斂速度較快；其中 3d ULA 與 RINA 整體 RMSE 較低，顯示較大孔徑或虛擬共陣列結構對提升估測精度具有明顯幫助。於 5000 Hz 時，如圖 4(b) 所示，各陣列間差異更為明顯。實體 ULA（d）雖隨快照數增加而逐漸降低 RMSE，但誤差仍明顯高於其他三種陣列；而 3d ULA、CPA 與 RINA 在快照數增加至約 50 時，RMSE 已接近零，顯示在此模擬條件下，具有較大有效孔徑或虛擬共陣列之陣列架構，可在較少快照數下達到高精度估測。其中，RINA 於小快照數區段即呈現較低誤差，反映其在有限樣本條件下仍具良好之估測穩定性。

(a)



(b)

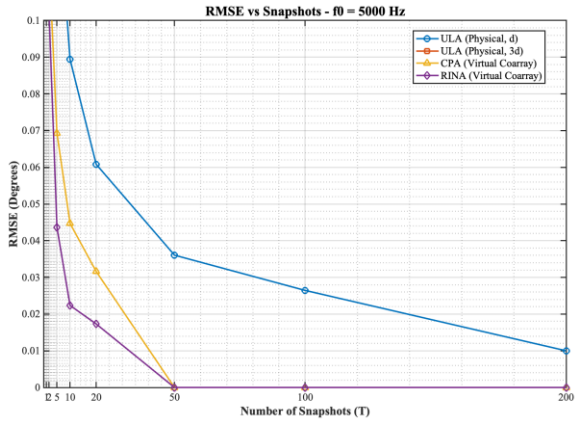
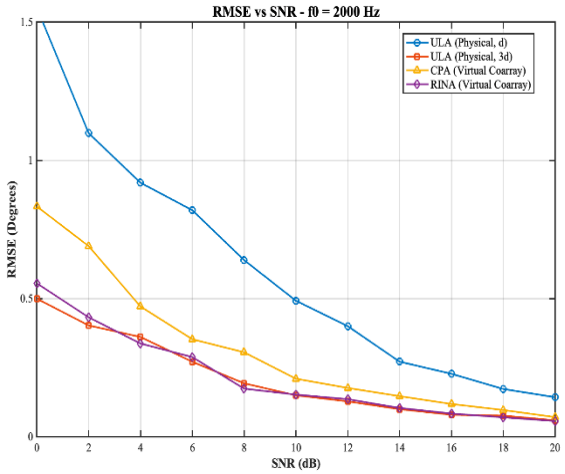


圖 4：各陣列於不同快照數條件下之 DOA 估測 RMSE (a)為 2000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

圖 5(a) 與圖 5(b) 分別顯示顯示各陣列於不同 SNR 條件下之 DOA 估測 RMSE 模擬結果。由圖可知，隨 SNR 增加，各陣列之 RMSE 均逐漸下降，顯示較高之訊號品質有助於提升方位估測精度。於 2000 Hz 與 5000 Hz 下，實體 ULA（d）之誤差皆最高，而 CPA 與 RINA 則具有較低 RMSE，其中 RINA 整體表現最穩定，顯示其在不同雜訊條件下具有較佳之抗雜訊能力與估測性能。

圖 6(a)與圖 6(b) 分別顯示 $f_0 = 2000\text{Hz}$ 與 $f_0 = 5000\text{Hz}$ 時，各陣列於不同入射角條件下之 DOA 估測 RMSE。由結果可知，實體 ULA（d）在多數角度範圍內皆具有較大誤差，顯示其受限於較小實體孔徑，整體角度估測性能較差。相較之下，RINA 與 CPA 於兩種頻率下皆能維持較低且平穩之 RMSE，其中 RINA 表現最佳。特別是在 $f_0 = 5000\text{Hz}$ 時，RINA 於大部分角度範圍內之 RMSE 皆接近零，而 3d ULA 則於部分角度出現明顯尖峰，顯示其高頻估測已受空間混疊影響。此結果顯示，RINA 不僅可改善低頻解析能力，亦能在高頻條件下維持較佳之全角域估測穩定性。

(a)



(b)

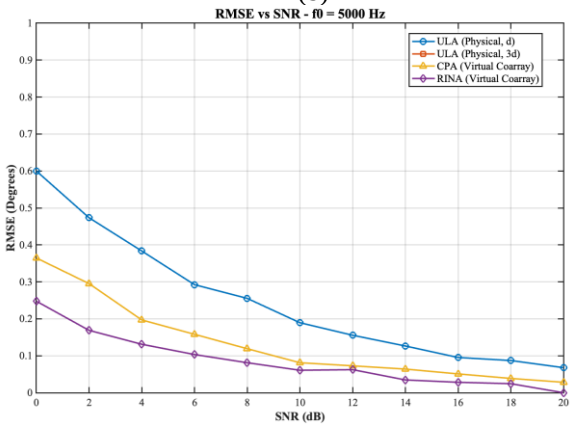
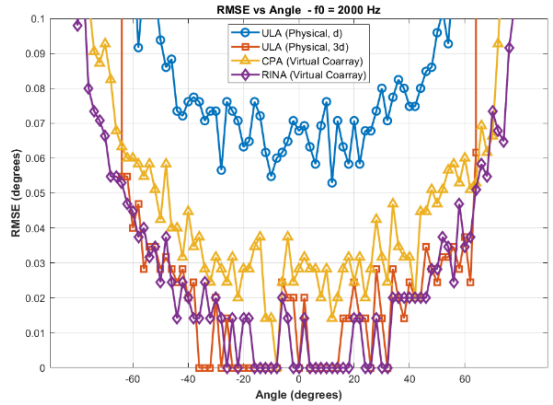


圖 5：各陣列於不同 SNR 條件下之 DOA 估測 RMSE(a)為 2000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

(a)



(b)

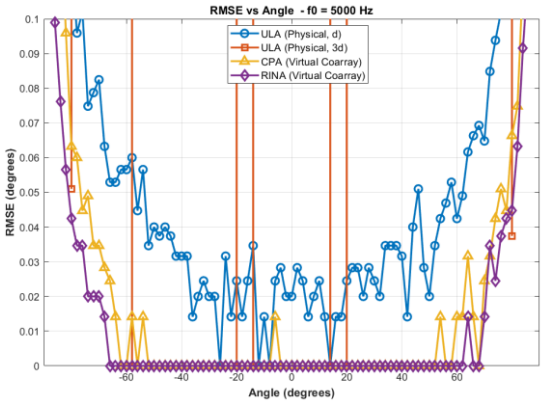


圖 6:各陣列於不同入射角條件下之 DOA 估測 RMSE(a)為 2000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

四、實驗分析

4.1 實驗簡介

本研究之實驗於一大型講堂環境下進行如圖 7 所示，喇叭至於圖中左手邊，麥克風至於圖中右手邊。該場地具備典型之室內混響特性，量測時特別關閉空調系統以維持低背景雜訊之聲場環境，進而確保演算法性能評估之準確性。實驗配置將聲源與接收陣列置於相同水平高度，兩者直線距離設定為 9 公尺，旨在模擬中遠場之聲定位情境。硬體架構方面，接收端採用一組自研訂製之 32 聲道均勻線性陣列 (Uniform Linear Array, ULA)，如圖 8 所示，各陣元間距固定為 d＝3 公分；依據式 (40) 所示之空間取樣定理 $f_{Max} \leq \frac{c}{2d}$，此配置能確保在處理目標頻段訊號時有效抑制空間混疊 (Spatial Aliasing) 現象。數據擷取系統選用 National Instruments (NI) myRIO 嵌入式控制器作為運算核心，並將取樣頻率設定為 48,000 Hz 以完整捕捉測試訊號之頻譜資訊。聲源端則採用圖 9 所示之藍牙喇叭播放頻寬涵蓋 1 Hz 至 8,000 Hz 之白噪音，並針對聲源方向估計 DOA 性能進行實測驗證。因為麥克風依陣列編號由左至右置放聲源左方角度為負角度右方為正，角度量測角度範圍由 0°至-50°，每隔 10°進行一次數據採集，藉此全面評估本研究演算法在各偏轉角度下之解析度、指向性誤差及數值穩定性。



圖 7: 實驗場景。



圖 8: 32 麥克風陣列。

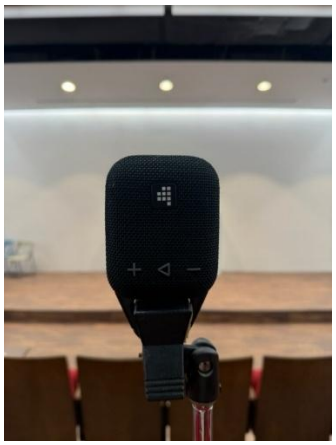


圖 9: 實驗用藍芽喇叭。

4.2 實驗數值分析

圖 10(a)與圖 10(b)分別比較各陣列於 1000 Hz 與 5000 Hz 下之空間頻譜。於 1000 Hz 時，ULA 主瓣較寬，顯示低頻解析能力較差；3d ULA 雖具較窄主瓣，但旁瓣偏高。RINA 則兼具較窄主瓣與較低旁瓣，顯示其可有效提升低頻解析能力。於 5000 Hz 時，3d ULA 出現明顯混疊偽峰，反映其高頻下已受空間混疊影響；CPA 亦存在一定旁瓣起伏。相較之下，RINA 仍能維持集中主峰並有效抑制偽峰，顯示其在高頻條件下具有較佳穩定性與解析能力。

圖 11(a) 與圖 11(b) 分別為 1000 Hz 與 5000 Hz 下之 RMSE 快照數結果。於 1000 Hz 時，各陣列之 RMSE 皆隨快照數增加而下降，顯示增加快照數可改善有限樣本造成之估測誤差；其中 ULA 整體誤差較高，而 3d ULA、CPA 與 RINA 在快照數足夠時皆可獲得較低 RMSE。於 5000 Hz 時，3d ULA 之 RMSE 始終維持在極高水準，顯示其已受嚴重空間混疊，增加快照數亦無法改善；相較之下，CPA 與 RINA 皆維持極低誤差，而 ULA 則在小快照數下誤差較大、隨快照數增加後快速下降。此結果顯示，快照數可改善統計誤差，但無法修正由大間距陣列所造成之高頻失效。

圖 12 (a) 與圖 12(b) 比較不同 C-CD 模組組合於 1000 Hz 與 5000 Hz 下之空間頻譜。由結果可知，未使用空間平滑時，頻譜主瓣較寬且旁瓣較高；加入空間平滑後，主峰明顯收斂，兩側頻譜快速下降，顯示其可有效提升解析能力並抑制偽峰。另一方面，GEP 雜訊補償可進一步降低背景頻譜能量，使頻譜底部下降，其中以 FULL-C-CD 表現最佳。此結果顯示，空間平滑為改善頻譜形狀之主要因素，而 GEP 則可進一步提升整體估測穩定性。

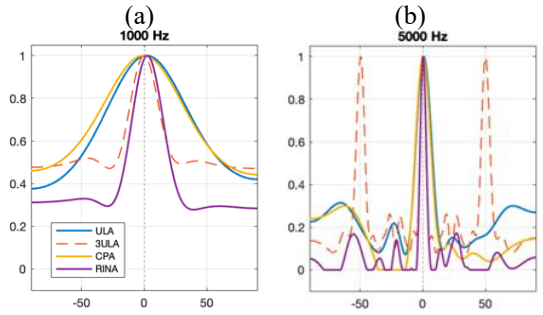


圖 10:不同陣列於 1000 Hz 與 5000 Hz 下之空間頻譜比較(a)為 1000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

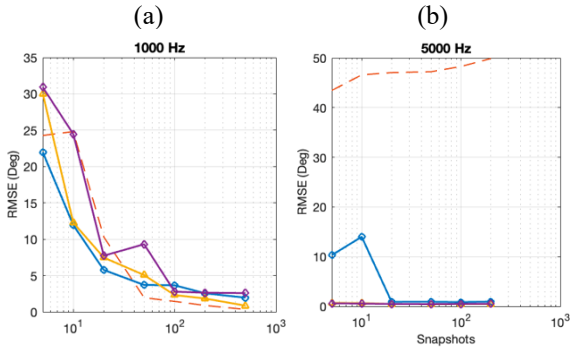


圖 11 :分別為 1000 Hz 與 5000 Hz 下之 RMSE 快照數結果。(a)為 1000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

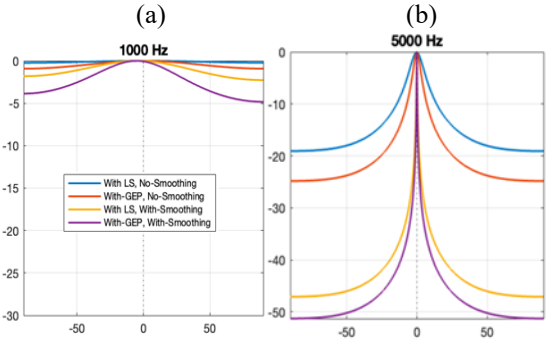


圖 12:不同 C-CD 模組組合於各頻率下之空間頻譜比較 (a)為 1000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

在 3000 Hz 測試條件下，表 1 與表 2 比較了 ULA、3dULA、CPA 與 RINA 於不同入射角下之 DOA 估測結果與誤差表現。由表 1 可知，當入射角位於 0°、−10° 與 −20°時，RINA 之估測結果分別為 0.00°、−10.50° 與 −20.00°，其誤差僅為 0.00°、0.50° 與 0.00°，整體表現最為精確且穩定。CPA 亦具有良好估測能力，誤差分別為 0.00°、1.00° 與 0.50°，但在 −10°時仍略遜於 RINA。ULA 在三個角度下皆能維持正確估測趨勢，惟於 −10°時誤差增至 1.50°，顯示其解析能力稍低於 RINA 與 CPA。相較之下，3dULA 雖在 0° 與 −10°時可正確估測，但在 −20°時卻誤判為 69.50°，誤差高達 89.50°，顯示其於此頻率下已出現明顯空間混疊現象。

由表 2 可進一步觀察當入射角擴展至 −30°、−40° 與 −50°時，各陣列之估測穩定性差異更加明顯。RINA 在三個角度下之估測結果分別為 −30.00°、−40.00° 與 −50.50°，對應誤差為 0.00°、0.00° 與 0.50°，仍維持最佳精度。CPA 的估測結果分別為 −30.50°、−41.50° 與 −51.50°，誤差介於 0.50°至 1.50°之間，雖可正確辨識目標方向，但整體誤差仍高於 RINA。ULA 在 −30°與 −40°時估測表現尚可，但於 −50°時誤差增加至 2.00°，顯示在較大偏角下其精度開始下降。3dULA 則在 −30°、−40° 與 −50°時分別誤估為 51.50°、38.50° 與 30.00°，對應誤差高達 81.50°、78.50° 與 80.00°，再度顯示其受空間混疊影響嚴重，無法提供可靠之 DOA 估測結果。此結果證實，相較於傳統均勻陣列與大間距陣列，RINA 在本研究條件下更適合用於準確且穩定的聲源方向估測。

圖 13(a) 與圖 13(b) 顯示不同 C-CD 模組組合於 1000 Hz 與 5000 Hz 下之 RMSE 快照數結果。由結果可知，隨快照數增加，各方法之 RMSE 皆下降，顯示較多快照數可改善有限樣本造成之估測誤差。於 1000 Hz 時，加入空間平滑後之方法整體表現較佳，其中 FULL-C-CD 在多數快照數條件下具有最低 RMSE。於 5000 Hz 時，空間平滑之效果更為明顯，未平滑方法在小快照數下誤差較高，而加入空間平滑後可迅速將 RMSE

降低至較低水準；GEP 則可進一步改善未平滑情況下之估測性能。整體而言，空間平滑為影響性能之主要因素，而 GEP 可進一步提升完整方法之穩健性。

表 1：不同陣列在 3000Hz 時於 0° -10° -20°

	0°	-10	-20
ULA	0.50/0.50	-8.50/1.50	-20.50/0.50
3dULA	0.00/0.00	-10.00/0.00	69.50/89.50
CPA	0.00/0.00	-11.00/1.00	-20.50/0.50
RINA	0.00/0.00	-10.50/0.50	-20.00/0.00

表 2：不同陣列在 3000Hz 時於-30° -40° -50°

	-30°	-40°	-50°
ULA	-30.00/0.00	-40.50/0.50	-48.00/2.00
3dULA	51.50/81.50	38.50/78.50	30.0/80.0
CPA	-30.50/0.50	-41.50/1.50	-51.50/1.50
RINA	-30.00/0.00	-40.00/0.00	-50.50/0.50

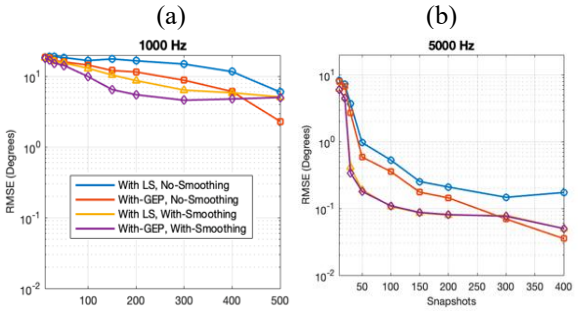


圖 13:不同 C-CD 模組組合於不同快照數條件下之 DOA 估測 RMSE (a)為 1000Hz 時的結果(b)為 5000Hz 時的結果。

謝誌

研究承蒙國科會經費資助，計畫編號：NSTC 114-2221-E-006-118，謹在此致上誠摯感謝之意。

參考文獻

[1] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: The parametric approach," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 67–94, Jul. 1996.

[2] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 3, pp. 276–280, Mar. 1986.

[3] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 37, no. 7, pp. 984–995, Jul. 1989.

[4] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 8, pp. 4167–4181, Aug. 2010.

[5] P. P. Vaidyanathan and P. Pal, "Sparse sensing with co-prime samplers and arrays," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 2, pp. 573–586, Feb. 2011.

[6] S.Qin, Y. D. Zhang, and M. G. Amin, "Generalized coprime array configurations for direction-of-arrival estimation," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 6, pp. 1377–1390, Mar. 2015.

[7] C.-L. Liu and P. P. Vaidyanathan, "Remarks on the spatial smoothing step in coarray MUSIC," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 1438–1442, Sep. 2015.

[8] Z. Shi, X. Zhang, P. Gong, and C. Wang, "Sparse nested linear array for direction of arrival estimation," *Signal Process.*, vol. 169, Art. no. 107372, Apr. 2020.

[9] K. Hamouleh-Kheirollahpour, A. Mahmoudi, and B. Dumitrescu, " DOA estimation in the autocorrelation domain for coprime array," *Digit. Signal Process.*, vol. 110, 102940, Mar. 2021.

[10] L. Zhou, K. Ye, J. Qi, S. Hong, and H. Sun, "Underwater DOA estimation based on cross-correlation domain for relocating improved nested array," *Digit. Signal Process.*, vol. 128, 103606, Sep. 2022.

極淺水域無人水面載具之推進系統改良與感測整合

楊承穆[1]　陳信宏[2]

摘要

臺灣沿岸淺水域蘊藏豐富的生態多樣性，同時為海纜與天然氣管線等關鍵基礎設施之安全樞紐，例如海纜與天然氣管線登陸段。然而，極淺水域存在吃水深度限制與地形複雜度，傳統中大型船舶難以進入，導致這些區域長期缺乏高精度水深測繪資料與完整的地質構造、生態調查資料。為突破傳統調查方法在此類環境中的侷限性，採用水面無人載具(Unmanned Surface Vehicle,USV)，可高效進行調查任務並提高安全性。本研究團隊先前開發與測試 MOKAI-ES-Kape 水噴推進小艇，唯既有引擎系統存在顯著運作缺陷。為此，本研究以電動無刷直流馬達取代四行程引擎，並整合多感測器系統。USV 端整合多種感測器以支援海洋調查，包括：多組水面攝影機建構環景影像、側掃聲納用於海床地形與目標探測、鹽溫深儀記錄器（CTD logger）量測海水表層溫鹽資料、高度計監測 USV 離底高度、全球導航衛星系統（GNSS）提供精確水面定位、以及慣性測量單元（IMU）量測艏向與姿態；遠端操控端則由主控電腦搭配人機介面。載具端與遠端操控端透過 2.5 GHz 長距離通訊系統，支援 10Mbps@3 km 的遠端命令與資料傳輸，操作員可即時掌握 USV 狀態並調整操控。後續透過實海域測試，驗證 USV 在極淺水域下的遠端操縱性能與系統運作穩定度。

關鍵詞：無人水面載具、電動無刷馬達、極淺海域、環景影像、側掃聲納

Enhancing Propulsion System and Sensor Integration for Ultra-Shallow Water Unmanned Surface Vehicle

Cheng-Mu Yang[1]　Hsin-Hung Chen[2]

ABSTRACT

Taiwan’s coastal shallow waters are rich in ecological biodiversity and alos serve as critical hubs for key infrastructure, such as the landind sections of submarine cables and gas pipelines. However, extremely shallow waters impose draft limitations and feature complex terrain, making it difficult for medium-and large-sized vessels to accessthese areas. As a result, such region has long lacked high precision bathymetric dataas well as comprehensive deological and ecological survey information. To overcome these limitations, unmanned surface vehicles (USVs) can be employed to carry out surveys efficiently while enhencing safety. In previous work, our research team developed and tested a USV based on the MOKAI ES-Kape water-jet craft, but the existing engine system exhibited some operational deficiencies. Therefore, this study replaces the engine with an electric brushless DC motor and integrates multiplesensors. On the USV, multiple sensors are integrated to support marine surveys, including: an array of surface cameras to construct panoramic imagery; side-scan sonar for seabed topography and object detection; a CTD logger to measure water temperature and salinity; an altimeter to monitor the USV’s clearance from the bottom; a GNSS for precise positioning; and an IMU to measure heading and attitude.The base station consists of a main computer paired with a human-machine interface (HMI). The vehicle and the remote-control station communicate through a 2.5 GHz long-range communication link, supporting remote command and data transmission at 10 Mbps over a distance up to 3 km. This allows operators to monitor the USV’s status in real time and adjust controls accordingly. Subsequent field tests in real marine environments will be conducted to validate the USV’s remote maneuverability and system stability in extremely shallow waters.

Keywords: Unmanned Surface Vehicle ; Electric Brushless Motor ; Shallow sea areas ; Surround View ; Side Scan Sonar

[1] 國立中山大學海下科技研究所 碩士班研究生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 教授

一、緒論

臺灣四面環海，周圍廣闊的淺水海域不僅蘊藏著極為豐富的海洋生態與天然資源，沿岸與淺水域更在生態保育與經濟發展上扮演著不可或缺的關鍵角色。臺灣西部海岸主要由沙岸、濕地與潟湖所構成，具備高度的生物多樣性與環境保育價值；而臺灣北部、南部及諸多離島沿岸，例如南部的墾丁、東沙環礁、綠島與蘭嶼等地，其海床特徵更包含了淺平台、斜坡礁與潟湖等複雜結構。同時，沿岸淺海域亦是關鍵基礎設施的安全樞紐，例如海纜與天然氣管線登陸段。然而，在這些極淺水區域進行科學調查，往往伴隨著極端的地形限制與嚴峻的海象挑戰，以東沙環礁國家公園（圖 1）為例，其環礁內部的主要水道平均水深僅約五公尺，且水深會隨著潮汐變化產生劇烈波動，導致部分礁岩區域時露時沒。在此類環境中，中大型調查船舶難以進入環礁內部，小型載人船隻則面臨觸礁與擱淺風險，仰賴人員潛水進行人工調查又會嚴格受限於安全潛水規範，導致部分區域無法精確測繪或是連續觀測[1-2]。

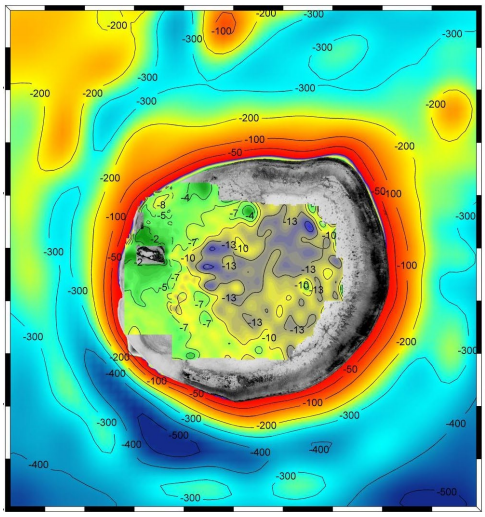


圖 1：東沙環礁水深圖[1]

基於環境限制與人員安全考量，海洋科學探勘趨勢為採用無人載具進行調查，降低人員作業風險同時高效蒐集數據 [3-5]。水面無人載具(Unmanned Surface Vehicle,USV)，是指人員不需實際於載具上，可透過遠端遙控、半自主或自主執行運動控制與執行任務之水面平台，相較於載人載具適合執行長期、重複性和高風險的任務。如圖 2 所示，USV 在系統組成上通常包含船體結構、電力供應、通訊架構、環境感知、核心控制與運算單元等模組[6]。

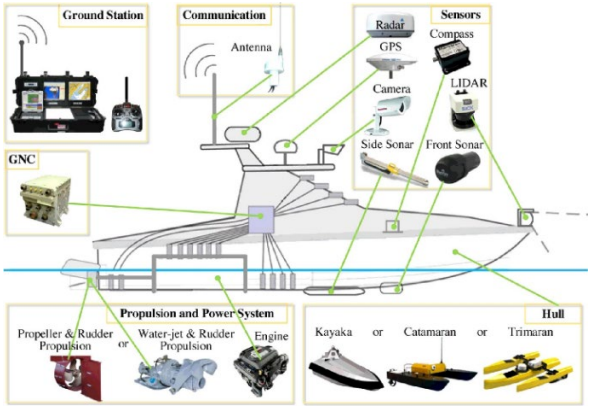


圖 2：USV 系統架構組成[6]

無人水面載具逐漸擴大在不同層面的應用，也顯示技術逐漸的成熟發展與任務的適應性。以 USV 為例，於葡萄牙 REPMUS 22 演習中，針對極淺水域、沿海及近岸河口環境，驗證了 USV 可快速部署並執行水深與地形測繪任務[7]。如圖 3 所示，該研究透過自動化演算法修正海象引發的姿態誤差並克服地形限制，能即時提供精確圖資，大幅提升兩棲部隊擬定作戰計畫的決策效率[7]。以自主水面載具(Autonomous surface vehicle, ASV)為例，其可透過 GNSS 定位系統依循任務規劃路徑，達成自動導航與精準控，確保數據完整性。例如，Constantinoiu 等人於 Europa 島潟湖採用 ASV 進行淺水域地形測繪，並對比先前於 2019 年航空光達以及高光譜掃描所獲得的數據比對相符，如圖 4 所示，驗證無人載具能於複雜淺水域進行作業，亦提供規律且密集的高解析度測繪[8]。

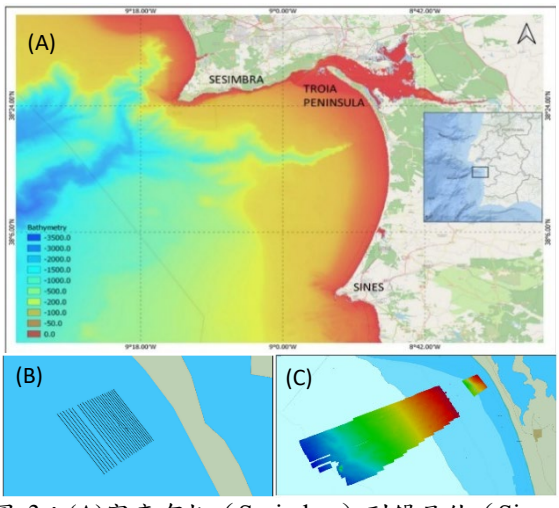


圖 3：(A)塞辛布拉（Sesimbra）到錫尼什（Sines）港口之間水深漸層圖；(B) USV 測量軌跡；(C)傳統水文船與 USV 協同分工測繪成果 [7]。

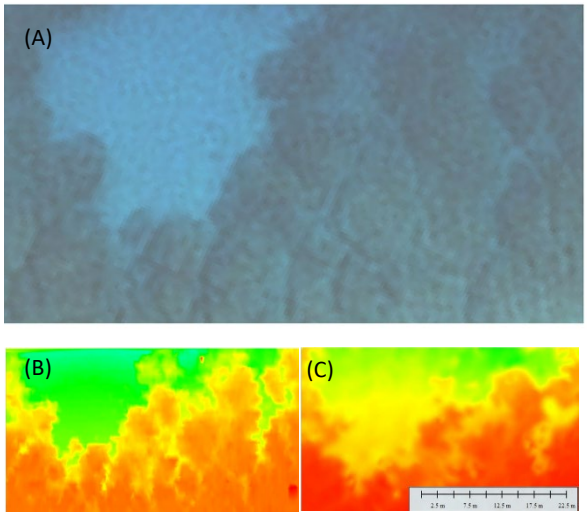


圖 4:(A) Pleiades 衛星影像;(B) ASV 搭載 ECT400 測深儀收集測深數據；(C)光達（LiDAR）/高光譜測深數據 [8]。

為突破傳統調查方法在淺水域的侷限性，本研究團隊先前改裝 MOKAI-ES-Kape 四行程引擎驅動之水噴推進小艇，設計為適合極淺水域作業的 USV [9]，如圖 5 所示。該 USV 於小琉球南側海域(圖 6)進行首次實海域測試，驗證 USV 的無線遠端控制性能。該 USV 亦於西子灣近岸西側淺水域(圖 7)進行第二次次實海域測試，成功獲取海表溫度與鹽度資料，驗證了平台在載荷搭載下之穩定性與水文資料蒐集能力。

然而 USV 原始引擎系統存在許多缺陷；其一，欠缺離合裝置，使引擎於怠速時仍持續帶動噴水馬達運轉，導致 USV 於怠速狀態下無法靜止；其二，採用化油器供油系統，雖具成本低廉的優點，但燃油控制精度差，空燃比易受環境影響而偏濃或偏稀，降低引擎效率與穩定性。同時，化油器易因汽油揮發殘留物造成噴嘴阻塞或是浮桶針閥卡滯，導致引擎啟動困難。



圖 5：USV 遠端操作水面無人艇

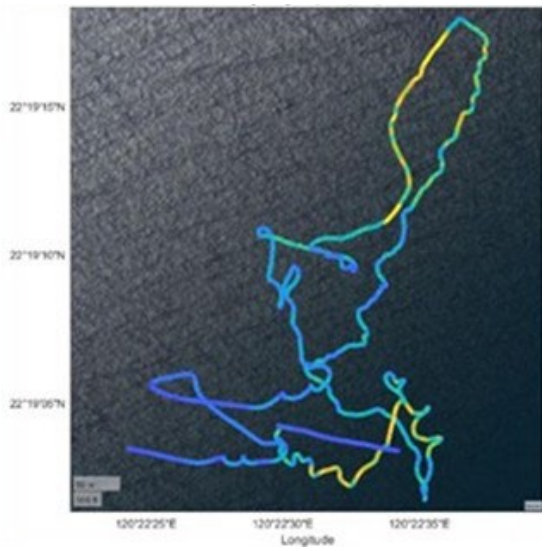


圖 6： USV 於小琉球遠端操控路徑



圖 7：USV 於西子灣測試航跡

為改善上述問題，本研究團隊規劃進一步開發為三體船，其船體設計概念如圖 8 所示，其新增可拆卸式浮筒與設計拖曳式感測平台（Towed Sensor Platform,TSP），此架構保留佈放回收的便利性，亦能減少航行中的俯仰（Pitch）與橫搖（Roll）運動，以提升航行穩定性與感測器蒐集數據精準度。目前研究階段則進行動力推進系統改良及感測器整合等開發，以電動無刷馬達取代原有四行程引擎，做為噴水推進系統的動力來源，以提升速度控制精度並降低維護成本。同時透過直線推桿機構操縱噴嘴偏轉角度，以改變水噴方向以達成 USV 轉向控制。亦整合多感測器以支援海洋調查，包括：多組水面攝影機建構環景影像、側掃聲納用於海床地形與目標探測、高度計監測 USV 離底高度、全球導航衛星系統（GNSS）提供精確水面定位、以及慣性測量單元（IMU）量測 USV 艏向與姿態。

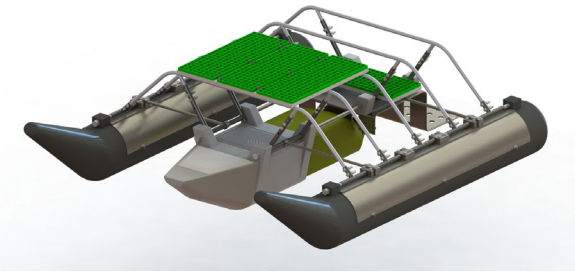


圖 8：本研究之三體 USV 船體結構概念設計

二、無人水面載具設計

本研究採用 MOKAI-ES-Kape 之船體結構為基礎平台，使用三相直流無刷馬達無刷馬達取代原有四行程引擎，作為噴水推進系統的動力來源。此外，USV 以 Raspberry Pi 5 作為中控電腦，控制無刷馬達、舵機並整合側掃聲納、高度計、GNSS 等感測器。通訊系統使用金屬中心開發之 UVNP4005R 2200-2560 MHz 網路交換器，建立穩定的遠端通訊架構。載具端透過 2.4 GHz 無線網路與遠端操控站進行多組攝影機即時影像串流、水文資料傳輸及遠端運動控制。

2.1 硬體介紹

2.1.1 USV

新改良之 USV 主要規格如表 1 所示，結構上可區分為船艏、駕駛艙與後艙三部分，如圖 9 所示。船艏與後艙部分皆可收納於駕駛艙內，並具備自岸邊或沙灘等淺水域直接下水的能力，吃水深度約為 25 cm。操作者可於遠端操控站透過搖桿(Joystick)下達控制命令至 USV 上的 Raspberry pi 5，再由其控制舵機與無刷直流馬達，以達成航向與動力推進控制。

表 1：改良型 USV 主要規格。

船長	3.4 m
船淨重	100 kg
動力	60V 三相直流無刷馬達
推進方式	噴水推進(Water Jet Propulsion)



圖 9：MOKAI-ES-Kape 船體

2.1.2 無刷直流馬達選用

MOKAI-ES-Kape I 使用來自 KOHLER 的四行程汽油引擎 CH395 作為動力來源，其引擎扭力如圖 10 所示。CH395 的輸出的扭矩落在 16.8 到 18 Nm 之間，從引擎規格圖中得知在 2800 rpm 時，最大輸出扭矩為 18 Nm。USV 的動力推進系統改良設計，希望採用的無刷直流馬達在到達最大功率輸出(Maximum Output Power)時，所輸出的扭矩需近似汽油引擎所能輸出的最大扭矩。因此，本研究採用 4 kW 之電動無刷直流馬達，如圖 11 所示，其規格與扭力曲線如表 2 與圖 12 所示。

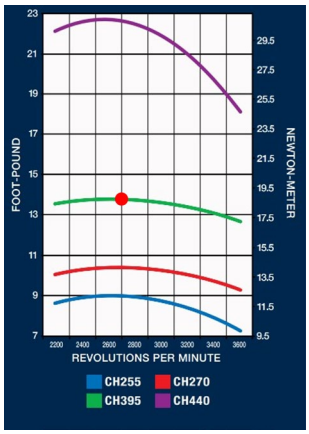


圖 10：KOHLER 引擎扭力曲線圖



圖 11：本系統採用之直流無刷馬達與馬達驅動器

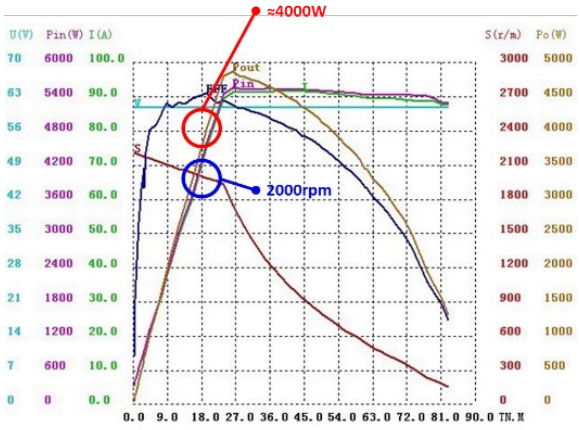


圖 12：無刷直流馬達扭力曲線圖

表 2：本系統採用之直流無刷馬達主要規格。

電力需求	60 V
額定功率	4000 W
額定轉速	3000 rpm

2.1.3 馬達固定平台設計

USV 引擎艙原本配置滑軌式支架以及插銷滑座，如圖 13 與圖 14 所示，用以安裝四行程引擎。為了將引擎以直流無刷馬達取代，本研究利用原滑軌式支架以及插銷滑座來設計直流無刷馬達之固定座，成果如圖 15 所示。

除了馬達之外，也需固定馬達驅動器。依據馬達與驅動器尺寸以及對應之後艙空間限制，本研究完成對應的 3D CAD 設計，如圖 16、圖 17 所示。



圖 13：USV 艙原引擎滑軌支架

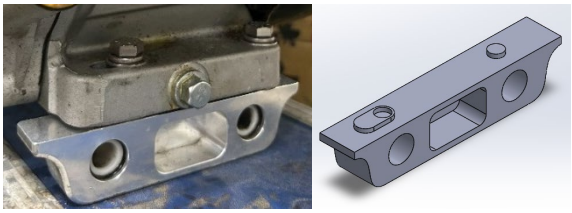


圖 14：引擎之插銷滑座與其 3D CAD 圖

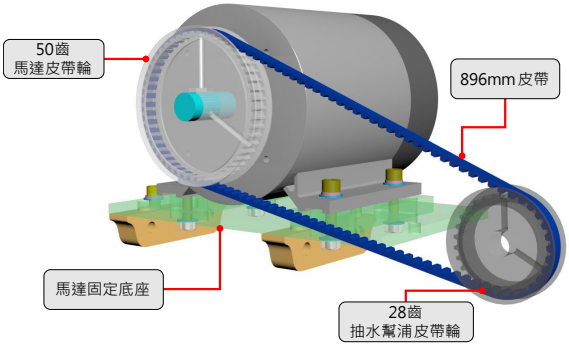


圖 15：馬達固定底座 3D CAD 示意圖

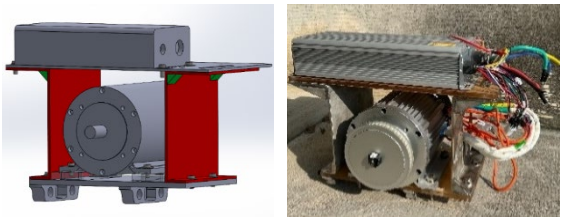


圖 16：馬達驅動器固定平台設計



圖 17：將 USV 後艙原本之引擎（圖左）更換為無刷直流馬達（圖右）

2.1.4 USV 傳動系統調整

USV 由直流無刷馬達驅動皮帶傳動機構，進而帶動抽水幫浦（圖 18）從船艉底部抽水並向後加壓噴射以產生推進力。本研究沿用抽水幫浦 1 並改良傳動系統，讓直流無刷馬達能維持與原先四行程汽油引擎 KOHLE-CH395 近似的推進效能。原 USV 引擎出軸最高轉速約為 4000 rpm，而本研究選用的直流無刷馬達最高轉速約 2000 rpm。原 USV 的引擎皮帶輪與抽水幫浦齒數為 29 齒與 28 齒，齒比接近 1:1，為了使馬達於 2000 rpm 時具備接近 18 Nm 的扭矩性能，讓抽水幫浦在該轉速下就能接近到原引擎 4000 rpm 的排水量，因此實作選定馬達端皮帶輪為 50 齒與抽水幫浦端為 28 齒，建構出 1.79：1 的傳動比。接著，根據馬達固定平台的 3D CAD 模型，來設計傳動皮帶的最適長度。最終選定採用 112 齒的 Contitech CTD 896-8M-12 傳動皮帶（圖 19），長度 896 mm、寬度 12 mm，完整的 USV 動力驅動組合如圖 20 所示。



圖 18：USV 後艙之抽水幫浦



圖 19：Contitech CTD 896-8M-12 傳動皮帶

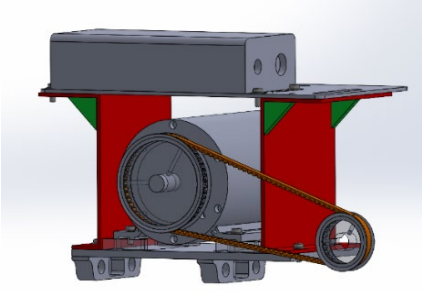


圖 20：直流無刷馬達透過皮帶驅動抽水幫浦之 3D CAD 設計

2.2 USV 系統架構

2.2.1 中控系統

考量系統需同時執行即時影像處理演算法，並負責整合多通道感測器之數據交換與處理，為確保中控單元在複雜運算負載下仍能維持運作流暢度與即時響應能力，故本研究 Raspberry Pi 5 (圖 21) 作為 USV 的中控電腦，以滿足多工運作下的硬體效能需求。

2.2.2 水面感知系統

USV 之環景視訊是無線通訊頻寬的主要負載來源，在有限頻寬條件下，市售封閉式環景攝影系統不容易依據通訊狀況來彈性調整影像格式與壓縮參數，容易導致通訊阻塞。因此，本研究採用 Raspberry Pi 5 作為核心處理單元，整合電源供應板與兩組 CSI 介面廣角攝影機與兩組 USB 廣角攝影機(圖 22)，其主要規格如表 3 所示。四組攝影鏡頭分別朝向船艏、船艉、左舷及右舷，以確保各鏡頭視角（Field of View, FOV）能相互交疊，消除航行時的視覺盲區，從而建構 USV 環景影像。依據上述需求，本研究設計攝影機固定平台，其 3D CAD 設計與環景攝影模組安裝如圖 23 所示。透過 2.4GHz 無線網路，將環景串流影像傳至遠端操控站，實現即時影像回傳。在無線通訊不穩或頻寬受限時，操作者可手動調整影像格式與壓縮參數，甚至中斷影像傳輸，優先確保操控指令的即時性與穩定度。

2.2.3 遠距通訊系統

本研究中使用金屬中心開發的 UVNP4005R 2.5 GHz 網路交換器，搭配 MA-WO25-DP10 全向天線（見圖 24）。UVNP4005R 為一款多輸入多輸出（MIMO）無線傳輸模組，具備 0.5W 的發射功率，操作頻率範圍 2200-2560 MHz，支援 3.5-40 MHz 的頻寬。其物理層傳輸速率最高可達 300 Mbps。

該模組支援多種調變方式，包括 BPSK、QPSK、16-QAM、64-QAM，以及輔助的 CCK（互補碼鍵控）、DSSS（直接序列展頻）與 OFDM（正交分頻多工）等技術，可根據實際通訊環境動態調整，以獲得最佳資料傳輸速率與穩定性。在先前的實地海域測試中，頻寬設定為 10 MHz 的條件下，成功實現約 4 公里的穩定通訊距離，展現其在遠距無線操控應用中的高效能與可靠性。



圖 21：採用 Raspberry Pi 5 做為 USV 中控電腦

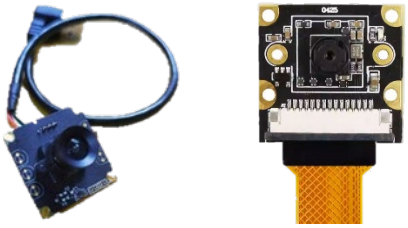


圖 22：USB 攝影機(左)與 CSI 攝影機(右)

表 3：USB、CSI 攝影機規格比較表

	CSI 攝影機	USB 攝影機
連接介面	MIPI-CSI	USB 2.0
視場角(FOV)	160°	120°
最高解析度	800 萬像素 (3280 x 2464)	200 萬像素 (1920 x 1080)

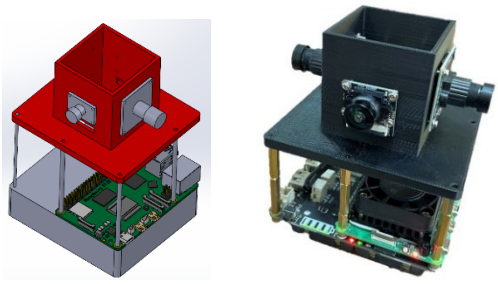


圖 23：攝影機固定平台設計(左)與實體組裝(右)



圖 24：UVNP4005R 與全向天線

2.2.4 水下環境量測系統

本研究採用感測器進行水下環境量測，包括側掃聲納、深度計與高度計、以及鹽溫深儀，說明如下：

(1) 側掃聲納（Side scan sonar）

本研究選用 Tritech Seaking Side Scan Sonar (圖 25)，以量測高解析度的海床地貌，其主要規格如表 4 所示。於淺水域作業時，其單側掃幅（Range）約為 100 至 200 公尺，可在解析度與掃測寬度之間取得最佳平衡，以清晰辨識地物地貌輪廓與邊界，也可辨識管線、錨鍊等人工構造物。

(2) 深度計與高度計 (Depth sensor and altimeter)

本研究選用 Valeport VA500P 深度計與高度計 (圖 26)，其主要規格如表 5 所示。其在高度量測上具備 1 mm 解析度，能捕捉淺水域 USV 離海床的精確高度，同時具備深度量測的功能，提供 USV 沒水的深度。其採用 NMEA 通用標準格式定義資料封包，確保數據傳輸的相容性與標準化。

(3) 溫深鹽儀(CTD Logger)

本研究選用 RBR CTD Logger (圖 27) 溫深鹽儀，其主要規格如表 6 所示，主要用於取得表水層之鹽度與溫度空間分布資料。

2.2.5 定位導航系統

本研究選用 Pixhawk 4 Mini (圖 28) 作為導航控制核心，其主要規格如表 7 所示。其整合雙 IMU 與 GNSS 的架構能提供高精度的即時定位與姿態資訊。此外，系統記錄 IMU 數據（如 Roll、Pitch 與 Yaw）可用於後處理階段的動態姿態補償，修正側掃聲納和高度計因船體運動姿態所產生的測量偏差，確保測繪成果的空間精確度與一致性。



圖 25：Tritech SeaKing Side scan sonar



圖 26：Valeport VA500P



圖 27：RBR CTD Logger



圖 28： Pixhawk 4 Mini 與 M10 GPS Module

表 4：Tritech Seaking Side Scan Sonar 主要規格

	參數
運作頻率	325 kHz
電力需求	20-72 VDC at 12 W
通訊協定	ARCNET, RS232, RS485
運作水深	4000 m

表 5：Valeport VA500P 主要規格

	參數
運作頻率	500 kHz
電力需求	9-28 VDC at 12 W
通訊協定	RS232, RS485
取樣頻率	1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, Continuous
高度解析度	1 mm
測量範圍	0.1 m - 100 m
運作水深	6000 m

表 6：RBR CTD Logger 主要規格

	參數
儲存容量	240M readings
電力需求	8 AA cells
外殼材質	Plastic
取樣頻率	2Hz; options up to 32Hz

表 7：Pixhawk 4 Mini 主要規格

	參數
陀螺儀	ICM-20689, BMI055
電力需求	4.75 ~ 5.25V
數據格式	KMZ / KML,GPX
GNSS	u-blox Neo-M8N GPS/GLONASS

三、通訊架構

USV 系統主要由載具端與遠端操控基站所組成，其整體通訊與控制架構如圖 29 所示。遠端操控基站透過長距離無線通訊天線與載具端進行雙向資料傳輸，以實現即時監控與遠端操控功能。在載具端部分，USV 以 Raspberry Pi 5 作為核心控制單元，負責整合各項感測與控制模組，並透過網路交換器(Switch)建立內部通訊網路，連接直流無刷馬達、舵機、Pixhawk、側掃聲納、深高度計，並透過 WiFi 連接攝影模組，以提供即時環景影像資訊。透過上述整合，USV 可同時執行運動控制、姿態估測、載具定位、周遭環境感知以及任務相關量測等功能。所有數據與影像會即時回傳至遠端控制基站，並顯示於人機介面上，使操作員即時掌握 USV 狀態並調整操控。

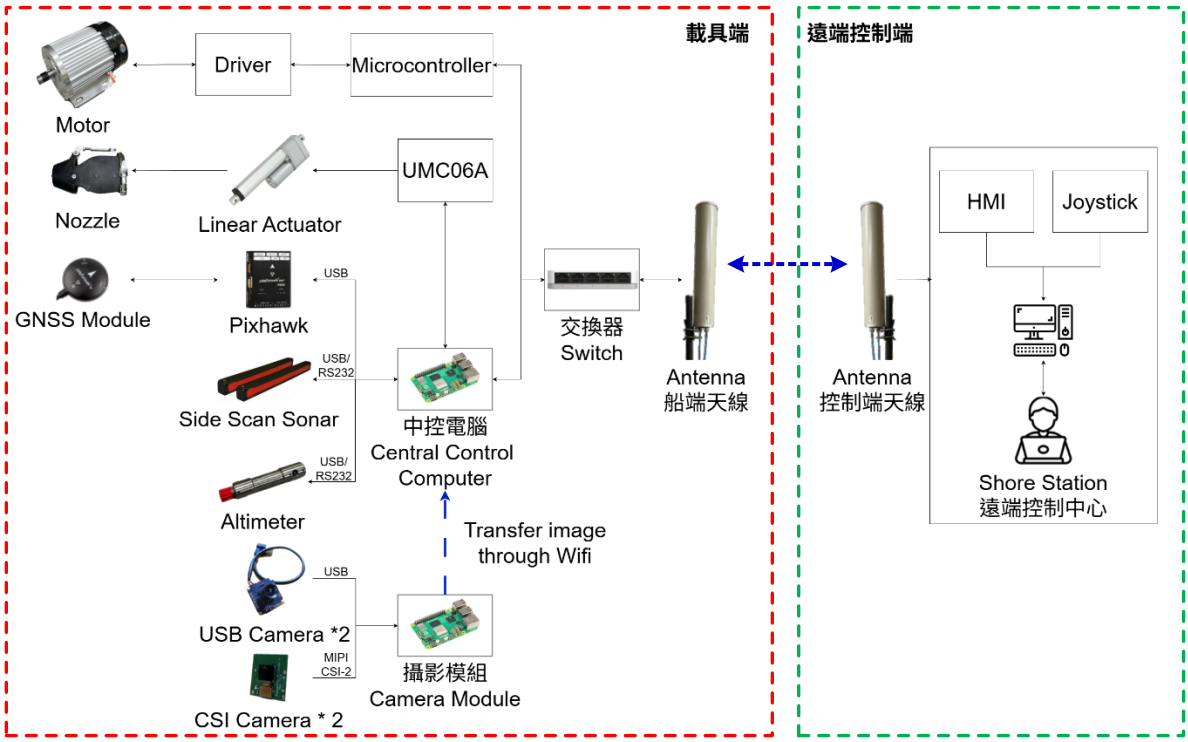


圖 29：USV 系統通訊架構

3.1 USV 端通訊系統

本系統以 Raspberry Pi 5 為核心中控電腦，透過 2.5GHz 無線數據交換器建立通訊骨幹。在運動控制，轉換數位訊號以驅動無刷馬達與舵機；環境感知則整合 Pixhawk 4 Mini（IMU）與 M10 GPS 進行姿態定位，並結合側掃聲納、CTD 及高度計執行水下地形測繪與水質採樣。此外，透過 Wi-Fi 熱點連接接收多組攝影機達成環景監控，並具備頻寬動態分配機制，在通訊受限時優先確保操控指令的穩定傳輸。所有導航與感測數據經預處理後，同步執行本地儲存與遠端即時回傳，實現遠端監測與操控。

- 資料通訊傳輸： Raspberry Pi 5 透過 乙太網路 (Ethernet) 接入船端交換器 (Switch)，並串接 UVNP4005R 2.5GHz 無線數據交換器，構建出穩定的數據主幹網絡，負責接收遠端控制指令與感測數據的即時回傳。
- USV 運動控制：接收到遠端指令後，Raspberry Pi 5 將數位訊號轉換為無刷直流馬達相對應的推進轉速以及舵機須轉動的角度。
- 姿態與定位資訊整合：透過 USB 接口與 Pixhawk 4 Mini 飛控電腦進行連接，Pixhawk 4 Mini 提供 IMU（加速度計與電子羅盤）資料，用於姿態估算；同時連接 M10 GPS 模組以提供即時定位資訊（經緯度）。
- 水下感知量測系統：海床地形測繪： 側掃聲納 (Side Scan Sonar) 提供高解析度的海床影像資料。高度計測量載具離底高度。CTD 採集海水鹽度、溫度與深度資料。
- 水面感知系統：中控電腦設置 Wi-Fi 熱點模式 (Hotspot)，使攝影模組擺脫實體線纜限制。該模組整合兩組 CSI 與兩組 USB 攝影機，涵蓋船艏、船艉及左右舷，建構環景影像。為確保在通訊品質不佳時的操控可靠性，系統支援操作者隨時暫停影像串流，將頻寬優先分配予 USV 運動控制命令，確保導航任務的穩定。

這些數據經由中控電腦預處理與導航數據對齊，所有資料除儲存於主控電腦內，亦透過長距離無線通訊即時回傳，使操作員即時掌握 USV 狀態並調整操控。

3.2 遠端操控站端通訊系統

遠端操控站主要由人機介面 (HMI) 、控制運算單元 (PC)、輸入裝置 (Joystick) 以及無線數據傳輸模組 (UVNP4005R) 所組成。其運作流程如下：操作員透過搖桿（Joystick）送出操縱指令，由 PC 端的程式擷取該訊號並轉換為數位控制數值。透過 UVNP4005R 2.5GHz 長距離通訊模組進行封包發送，傳輸至 USV 上 中控系統 Raspberry Pi 5 進行運算處理與執行控制命令。同時接收 USV 的各項感測器整合資料(如環景影像、載具位置、姿態等)，並由 PC 端的人機介面實時顯示，確保操作員能精準掌握載具狀態，實現遠端操控。

四、USV 系統測試

4.1 USV 運動控制

遠端操作員(圖 30)透過搖桿（Joystick）送出操縱指令，由 PC 端的程式擷取該訊號並轉換為數位控制數值。透過長距通訊模組與 USV 端(圖 31)進行通訊，並於遠端人機介面顯示直流無刷馬達轉速、噴嘴轉動方向及環景影像，確保操作員能精準掌握載具狀態，以實現遠端操控 USV。

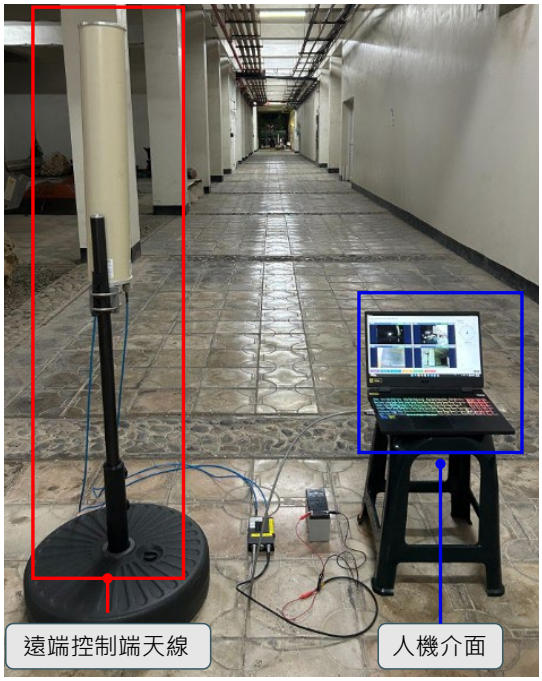


圖 30：遠端操控端運動控制架構圖

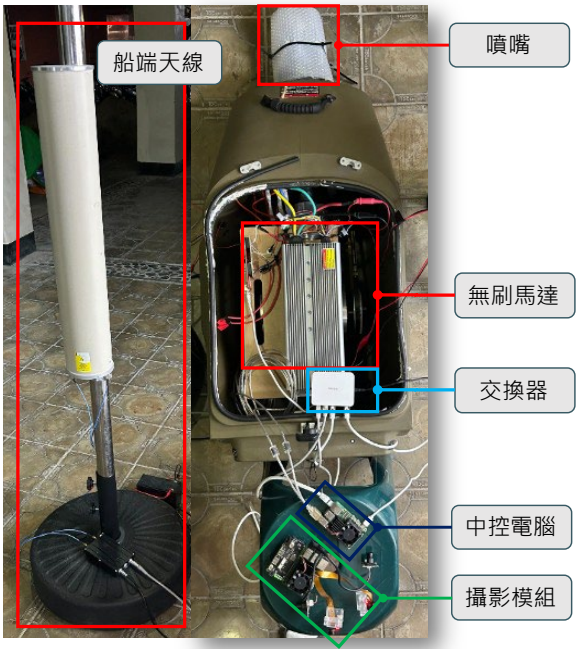


圖 31：USV 端運動控制架構圖

4.2 側掃聲納

於 2 m x 2 m x 2 m 小型水池(圖 32)中進行，旨在驗證側掃聲納（Side Scan Sonar）的受限水域成像性能。測試期間，將換能器朝向預設目標物進行掃描。初步獲得的物體成像，該設備在受限空間內已成功捕捉到目標物的幾何輪廓(圖 33)，證實系統具備在淺水域環境下的基礎探測能力。

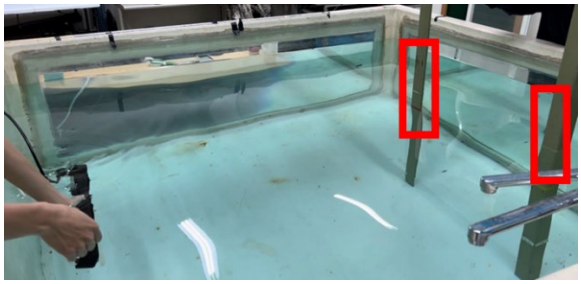


圖 32：側掃聲納於水槽進行測試

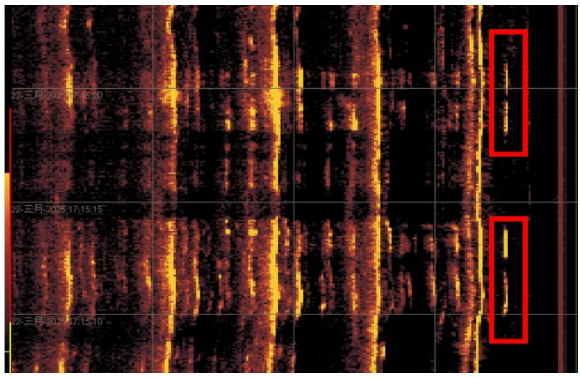


圖 33：側掃聲納水槽測試之聲強反射影像

4.3 環景影像

本研究成功設計環景攝影模組，完成環景攝影模組，如圖 34 所示以確保各鏡頭視角（Field of View, FOV）能相互交疊，消除航行時的視覺盲區，從而建構 USV 環景影像。環景影像透過長距離天線串流影像至遠端操控站人機介面顯示(圖 34)，實現即時影像回傳。

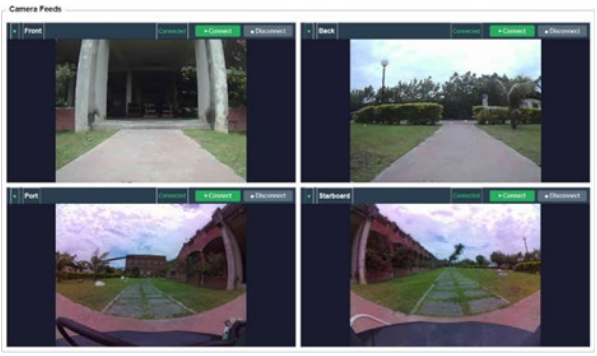


圖 34：人機介面環景影像示意圖

4.4 USV 離底高度

本研究整合高度計（亦具備量測深度功能），以測量 USV 離底高度，並由 USV 中控電腦成功整合並擷取所量測的離底高度資料(圖 34)。透過長距離天線，USV 可實現即時將離底高度回傳至基站，同時將數據紀錄於 USV 端中控電腦中。

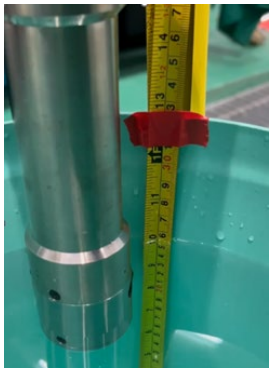


圖 34：高度計於水槽中進行量測，透過 USV 中控電腦成功接收所量測之離底高度資料

五、結論與討論

本研究以極淺水域為主要應用場域，針對既有 MOKAI-ES-Kape 噴水推進無人水面載具（USV）進行動力推進系統改良與多感測器整合，並完成相關基礎功能驗證。在推進系統方面，本研究以 4 kW 電動無刷直流馬達取代原有四行程引擎，並配合適當之傳動比設計與既有抽水幫浦，成功建立具備接近原始推進性能之噴水推進系統，在維持推進扭矩與排水能力的同時，提供更精準且穩定之速度控制能力，並有效降低機械維護需求。此一設計對於近岸、淺水域及高頻率調查任務之應用，預期可顯著提升作業效率與系統可靠度。

在系統整合方面，本研究以 Raspberry Pi 5 作為中央控制核心，整合多感測器與影像系統，並結合 Pixhawk 4 Mini GNSS／IMU 提供即時定位與姿態資訊，使載具具備運動控制、導航定位與環境感知等功能。透過側掃聲納與離底高度計之整合，USV 可應用於極淺水環境中同步執行高解析度海床地形量測與目標物（如海底管線）辨識，並即時監控載具離底距離，以提升航行安全性。此外，本研究同步建構環景影像系統，以降低航行視覺盲區並提升操作人員之即時情境感知能力，有助於高風險作業環境下之遠端操控與決策判斷。

在通訊與操控方面，本研究建置可達 10 Mbps 以上之長距離無線資料傳輸架構，使遠端操控站得以即時監控載具狀態，並同步調整推進與轉向控制指令。當通訊品質不穩定時，系統亦可透過手動調整影像壓縮率或中斷影像串流等方式，優先確保控制命令傳輸之穩定性與可靠性。

綜合而言，本研究完成一套適用於極淺水域作業之電動噴水推進無人水面載具系統，並驗證其於多感測器整合、長距離通訊與近岸環境感知等方面之可行性。所建構之系統可應用於高精度水深測繪、底質與生態調查，以及海纜與天然氣管線登陸段巡檢等任務，並提供具擴充性之載具平台基礎。未來將進一步導入自主導航、多載具協同作業及即時資料處理技術，以強化極淺水域長期監測與智慧化海洋調查之應用能力。

謝誌

本研究承國科會補助，計畫編號 NSTC 114-2221-E-110-035-MY2。

參考文獻

[1] 海洋國家公園管理處.東沙環礁之海底地形、地貌調查以及航道、錨泊區規劃.委辦成果報告,2009

[2] A. Sunday Alademomi, A. J. Manning, V. J. Abbott, R. J.S. Whitehouse. Morphodynamics in a Tropical Shallow Lagoon: Observation and Inferences of Change. *Lagoon Environments Around the World - A Scientific Perspective*. IntechOpen, Mar. 11, 2020.

[3] R. G. Patterson et al., Uncrewed surface vehicles in the Global Ocean Observing System: a new frontier for observing and monitoring at the air-sea interface. *Frontiers in Marine Science*, 12:1523585, 2025.

[4] I. Jovanović, M. Perčić, A. BahooToroody, A. Fan, N. Vladimir, Review of research progress of autonomous and unmanned shipping and identification of future research directions. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 23(2), 82–97, 2024.

[5] I, Bae, J. Hong, Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. *Sensors (Basel)*. 23(10):4643, 2023.

[6] Z. Liu,Y. Zhang, X. Yu, C. Yuan. Unmanned surface vehicles:An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 41, 05, 2016.

[7] P. Gogendeau, S. Bonhommeau, H. Fourati, M. Julien, M. Contini, T. Chevrier, A. E. Nieblas, S. Bernard. An autonomous surface vehicle for acoustic tracking, bathymetric and photogrammetric surveys. *Ocean Engineering*, 331, 07, 2025

[8] L. F. Constantinoiu, M. Bernardino, E. Rusu, Autonomous Shallow Water Hydrographic Survey Using a Proto-Type USV. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 799, 2023.

[9] 杜伊凡、陳信宏、王兆璋，引擎驅動水噴推進之水面無人載具遠端操控系統設計，第 26 屆海洋與水下技術研討會，台灣新北，2025 年 05 月。

無人船基地規劃與靠泊技術之可行性研究

湛翔智[1]

摘要

無人船在領海水域內的用途與功能有國土防禦、海上運輸、安全監控、環境調查等，未來總量需求有大增趨勢，現有監管方式與港口設施應進一步調整。本研究提出無人船主要功能概述，彙整相關技術需求，如物聯網科技、人工智慧、感測器技術等，並以國內外發展現況與趨勢為例，說明無人船基地規劃之挑戰與關鍵點。此外，無人船在港口靠泊技術是達成無人船全面自主化的關鍵，但目前研究不多且技術尚未成熟，本文盤點無人船靠泊關鍵技術，並說明導入最新物聯網科技與人工智慧演算法之基本概念，提升無人船基地管理之效。

關鍵詞：無人船、基地規劃、靠泊技術、物聯網科技、人工智慧

Feasibility Study on Unmanned Ship Base Planning and Berthing Technology

Hsiang-Chih Chan[1]

ABSTRACT

The uses and functions of unmanned surface vessels (USVs) in territorial waters include national defense, maritime transport, security monitoring, and environmental surveys. The overall demand is expected to increase significantly in the future, necessitating further adjustments to existing regulatory methods and port facilities. This study provides an overview of the main functions of USVs, summarizes related technological requirements such as IoT technology, artificial intelligence (AI), and sensor technology. Moreover, using domestic and international development status and trends as examples, it illustrates the challenges and key points of USV base planning. Furthermore, USV berthing technology in ports is crucial for achieving full autonomy for USVs, but current research is limited and the technology is not yet mature. This paper reviews key USV berthing technologies and explains the basic concepts of incorporating the latest IoT technology and artificial intelligence algorithms to improve the efficiency of USV base management.

Keywords: Uncrewed Surface Vessel; Base Planning; Berthing Technology; Internet of Things (IoT) Technology; Artificial Intelligence

一、緒論

無人船的全球市場規模在 2024 年已達 17.55 億美元(約 550 億元台幣)，預估 5 年內將翻倍成長[1]。市場擴增主要為軍事用途，如攻擊與自殺式任務 (Offensive/Kamikaze Strikes)、監偵與情蒐 (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance, ISR)、反潛作戰(Anti-Submarine Warfare, ASW)、水雷反制(Mine Countermeasures, MCM)、戰場支援與物流 (Logistics and Force Protection)、電子作戰 (Electronic Warfare)等[2]。其他商業用途有海洋科研調查、水上水下環境監測、水文測繪、海底地形勘探、海上設施巡檢、物資運送、海難搜救、海污廢處理、港口監視、消防滅火等。由於無人船有著低操作風險、高機動性、成本效益佳等優勢，正逐漸改變海事與船舶作業模式。

儘管無人船優勢明顯，但實際使用上也面臨許多限制，例如易受電子干擾影響衛星定位和無線電通訊失效，複雜海況限制讓小型無人艇在惡劣海況下難以正常運作，還有自我防護能力不高而易遭摧毀等弱點。

無人船發展還要面對監督管理的挑戰，雖然近年來各界著力於建構國際和當地國法規框架，但絕大多數的自主水面船(MASS)管理還是以人為中心

[1] 知洋科技股份有限公司 總經理

[3]。國際海事組織(IMO)仍在制定相關的 MASS 操作標準，預計 2026 年發布，現行法規尚未完善。

若假定船舶的導航、監控、維護和緊急處理均由人員負責，一旦納入無人駕駛或遠端操控的船舶時，則倚靠人員監管方式將會出現許多漏洞與不確定性[4]。從數據統計研究中發現，這些漏洞有 62%與《國際海上人命安全公約(SOLAS)》有關，12%關於《國際海上避碰規則(COLREG)》問題，其他 6%《海員培訓、發證和值班標準國際公約(STCW)》以及 5%《國際船舶載重線公約(LL)》等公約規定有關[5]。因此，隨著越來越多的無人船需求與技術發展，相關法規及配套措施勢必需要加速調整。

無人船在港口靠泊技術(Berthing Technology)是達成無人船全面自主化的關鍵，但目前研究不多且技術尚未成熟。國際論文發表[6]提到自主靠泊技術的四大核心項目為靠泊感測、靠泊方式、操控方法及輔助技術等；自主靠泊進一步擴展了控制系統的功能。此外，自主靠泊不僅涉及路徑規劃、最佳控制和模糊控制等技術，也要求具備靠泊感測、決策和系統辨識等能力，以適應和隨時應對風、浪、流等突發變化等不確定性。

二、無人船功能概述

本文以無人船在領海水域內的用途與功能為題，著眼於國土防禦、海上運輸、安全監控、環境調查等市場需求，假定使用場景來提出所需的運用規劃構想。在近年因國際戰爭局勢，軍用無人船及水下載具的需求大增，也帶動無人船技術發展；相較於商用無人船，大多仍在場域試驗階段，就長遠發展來看，海上運輸將佔更大規模市場。

2.1 國土防禦

在現代不對稱作戰中，無人船扮演十分關鍵角色，特別是針對島國防衛、港口安全及海岸巡邏等工作。主要優勢在於低成本、匿蹤、持續監偵及高風險任務替代。無人船進行海上監偵與情蒐(ISR)時，可配備雷達、紅外線傳感器、無線通訊偵測器及干擾反制器，持續偵測敵方船隻、滲透船隻部隊，彌補定點雷達盲區。

在無人船上 ISR 所用的各項裝備性能不一，評估無人船使用數量(船隊)時，通常考量偵測涵蓋有效範圍、遮蔽區或盲區排除、巡查路線長度、船隻航程、通訊限制等條件，並進一步規劃母港基地的配置，以及輪替執航管理方式。

2.2 海上運輸

臺灣離島及港埠之間的海上運輸需求不低，可視為運輸和物流業邁向低碳、智慧化、克服船員短缺與高效率的關鍵轉型。無人船透過人工智慧(AI)、物聯網(IoT)和感測器技術，讓船舶能自動規劃路徑、避障並自主航行。領海境內的運輸場景包含了在島嶼或港埠間運送人員及物資，在離岸風場、油氣平台等海上設施運維補給，海上救難支援後送等。

當無人船使用在運輸作業時，須考量到碼頭裝卸方式與陸運連結，最終目標應達到全面無人化，也就是完全結合了無人船、無人機及無人車。未來的無人船運輸量能將超越現有商船規模，關鍵因素是無人船的高效能與低成本優勢，加上克服了船員不足限制。因此，無人船產業將會改變船舶載運方式，不再像現在航商所用的經濟規模發展方式，持續地建造更大型船舶增加運量，可控制營運固定成本而提高獲利[7]。

2.3 安全監控

無人船在安全監控領域的應用日益成熟，因具備自主導航、長期連續作業能力以及降低人員風險等優勢，已廣泛應用於國防、海上執法、港口安全以及敏感區域的監控任務。未來應用場景包含海上邊界巡邏與維權、港口與碼頭安全巡檢、關鍵基礎設施防護(海纜、油氣管)等。

國外許多國際港口已逐步納入無人船操作試驗，例如新加坡海事及港務管理局(MPA)在 2026 年擴大無人船在新加坡港口水域的試驗範圍，為了提升安全性、效率和韌性，提出以下 2 項應用範疇與目標[8]。

(1) 增強反應能力的監控和早期偵測
配備先進人工智慧感測器的無人船可增強日常巡邏、異常偵測和危險監測能力，從而提高航行安全和事故管理水準。這些無人船將與現有巡邏艇和岸上感測器協同工作，驗證在船舶交通繁忙區域的執行狀態。

(2) 變革水文測量作業
無人船能夠實現更安全、更有效率的水文測量，尤其是在傳統測量船難以進入的區域。這將有助於主管機關 MPA 以較少的人力資源，取得港口水域的最新水文資料

2.4 環境調查

無人船可裝配科學儀器、水下陣列、聲納系統及感測器，用於水質監測、海洋地形測繪、水生態調查以及污染源追蹤，能有效應對高風險環境，如受污染水域或惡劣氣象條件。

三、無人船港口挑戰

可預期未來無人船總量勢必大增，而現有港口設施將不敷使用，亦必須因應無人船監管而調整，以下說明無人船港口挑戰議題。

3.1 法規概況

國內無人船(水面/水下無人載具)法規仍在交通部制定中，現階段多依據經濟部公告的「無人載具科技創新實驗條例」，可在特定場域進行沙盒測試，可排除船舶法及船員法部分限制。如在國內商

港進行無人船試驗作業，則可由「水面/水下無人載具專屬測試場域申請須知」，向主管機關申請。

國外修訂無人船法案已有成功實施案例，荷蘭自 2025 年 4 月修訂無人船相關法規以來，可在特定條件下獲得豁免，不須由船員操作。在 2025 年 10 月首次在港內試驗無人船操作，水面船用於測量港口、河流、運河和船閘的深度。此項無人船試驗是鹿特丹港務局船隊更新計畫的一部分，未來 12 年內，港用船舶將陸續汰換。因此，藉由整個船隊進行更新、提高永續性的方式，實現無人船維護流程的標準化[9]。

國際海事組織(IMO)在近年持續修訂 MASS 章程[10]，其海事安全委員會(MSC)第 109 次會議(2024 年 12 月)修訂實施期程，在 2026 年 5 月定案並採用非強制性 MASS 規格。預計在 2028 年開始制定強制性 MASS 規則，參採非強制性規則和實證數據結果為基礎，並由相關委員會進行審查；同時考慮修訂 SOLAS 公約(新章節)，以便納入 MASS 規則。最晚將於 2030 年 7 月 1 日通過強制性 MASS 法規，並於 2032 年 1 月 1 日生效。

MASS 對無人船的自主程度分級如下。

(1) 第一級－配備自動化流程和決策支援的船舶：船員仍在船上操作控制船上系統及功能，但部分操作可能會自動化，有時甚至不需要監控，但船上仍有船員隨時準備接管。
(2) 第二級－從遠端控制船舶：船上仍配備船員，船舶將由另一處地點控制和操作。船上配備船員仍可負責接管控制權並操作船上系統和功能。
(3) 第三級－無人駕駛遙控船舶：船舶由另一處地點控制操作，船上沒有船員。
(4) 第四級－全自主船舶：船舶的作業系統能夠自行做出決策與決定行動。

3.2 港口限航條件

各種船隻在港口限制引航水域航行與在外海航行截然不同，航行的挑戰與風險皆較高。除了要對特定航道有所掌握外，船舶操縱能力至關重要。由於港內有淺水區、擁擠水域、礁石、港口、浮標、禁航區以及其他危險因素，再加上船舶低速航行時受環境影響顯著，駕船須達到更精準、更熟練的操縱和導航。因此，在大型港口，常有引水(航)員登船及操作，主要依據其專業知識、經驗累積、對周遭環境變化的認知與判斷，運用多年來學習與實踐的技術，安全地引導船舶進出港口[11]。

無人船在狹窄水域具有高度機動性，並在規劃航跡時，先納入海床深度安全性，可避免發生危害。無人船不只要考慮與引水(航)員相同的外部因素，更應提前納入周遭船舶航行資訊、海氣象狀態，運用人工智慧演算[11]。成熟的無人船自主靠泊技術能夠有效降低人力、物力和財力成本，同時合理且安全地降低事故率，也就是符合 IMO MASS 章程第四級的無人船自主性。

3.3 無人船基地需求

無人船的後勤補給包含加油、加水、充電、維護、保養及修理等，基地可分為港口碼頭及海上母船。以港口碼頭基地為例，各項基礎設施除了後勤補給的管線外，對於靠泊碼頭的設計仍有許多考量，例如上下船的棧橋或登船梯、碼頭岸壁或船舷側的緩衝裝置(防撞舷材)。國外無人船碼頭的自動靠泊防撞設計，不再只是傳統的護舷材、碰墊，改以油壓推動緩衝板[12]，其優點為可自動調整位置、主動吸收動能。

無人船的基地位置除了在目前既有的港口外，設置需求應先考量現有商港、軍港的防衛和安全監測，避免全設置於港口內，一旦遭受封鎖則無人船將難以發揮作用。無人船的吃水深(Draft)小且機動性強，可在岸邊交通便利之處，多設置無人船基地，包含了無人碼頭及滑坡道，方便無人船運補和下水。

基地中的無人碼頭設計，應以無人船快速且安全靠泊為主，而臺灣設置碼頭的主要挑戰包含潮差水位變化、海床淤積改變水深、颱風及地震災害。因此，採用固定結構碼頭搭配浮動碼頭或是機械補償活動式棧橋，是較合宜方式。

四、無人船靠泊導航

在無人船的整個航行過程中，自主靠泊碼頭是至關重要的環節。然而，目前對無人船自動靠泊演算法的研究相對較少。成熟的無人船自主停泊技術能夠有效降低人力、物力和財力成本，同時符合規定且安全地降低事故率。因此，全面推動無人船自主靠泊技術的發展具有重要意義。

4.1 靠泊導航科技裝備

無人船通常由載台系統和任務配置系統組成，隨著智慧化的發展，對無人船的自主性提出了更高的要求，而無人船實現自主靠泊才能真正達到無人化目標。國際期刊發表[6]將自主靠泊技術的四大核心分為靠泊感測、靠泊方式、操控方法及輔助技術等，靠泊感測依賴無人船上的各種感測器，如影像、電子海圖、衛星定位、陀螺儀、慣性測量儀(IMU)、光達、雷達、聲納、風速計等，碼頭或岸上則可利用更大型且精密的雷達、氣象站、波浪海流儀。靠泊方式有左右併排停靠、前後對接靠泊、直接靠泊等。操控方法指無人船行駛的方式，像是船艏控制、沿路徑、動態避碰等。其他輔助技術是為了提升無人船靠泊的效率和安全性，像是類神經網路、最佳化控制、適應性控制等。

國外已展開無人船自動靠泊試驗，2018 年挪威營運商 Norled 的渡輪「Folgefonn」號成為世界上第一艘配備自動靠泊系統的渡輪，該系統裝備包含了衛星導航定位系統(GNSS)、動態定位系統

(Dynamic Positioning Ssystem, DPS)、遠距動態定位雷射儀(Longest Range Dynamic Positioning Laser Sensor)等，已在往返港口的航程中進行了多次停靠測試[13]。

4.2 靠泊引導接管概念

當無人船自基地碼頭出發或回到碼頭，基地應有靠泊引導流程，可經由人工智慧演算學習，建立自主導航方法；也就是即便無人船有自主靠泊地操控方式，仍可由港口統一指揮管理。概念上如同商港引水(航)人的角色，憑藉其靠泊經驗、對港口及相關規定的瞭解，根據港口地形(貌)與海上信號(浮標、航標和標誌號)規劃適當航跡，並有效避開易擱淺或危險水域[14]。

無人船上的引水(航)人將由感測器、物聯網科技與人工智慧取代。在港口限制水域內，無人船的避碰除了需要考量到基礎設施外，亦應著重於其他船隻或水面上下載具的碰撞。現有船舶管理以自動辨識系統(AIS)為依據，但 AIS 有訊號發送不連續(同步)、被動接收訊號、時間間隔(數秒)過長等缺點，不易用於多船同時精準定位與操作監控。

未來無人船港口應有主動式船舶動態資訊系統，數據管理可採用中央集中或分散式。概念上是每艘無人船密集性發報動態資訊，再加上無人船碰撞預警範圍、警告資訊等。碰撞預警範圍可採用港內船速限制 5 節以下為例，計算船速發生碰撞的動態區域，船隻間的碰撞預警範圍有重疊時，或是船隻經過產生船波(Ship Wake)，即發出警告。

4.3 靠泊排程管理規劃

無人船的數量漸增，港口服務水準將取決於進出港的船隻總量與效率，因此，在靠泊引導中的 AI 學習亦包含如何加強排程管理。每一處港口有各自的指管規定，在未來的無人船基地，可能是無人船港與商港或漁港混用，最終的管理方式是無人化作業。

無人船的碼頭規劃對靠泊方式與效率影響重大，當港口有一套自主式指揮管理系統時，對於進出港順序、各類船隻靠泊方法、航跡規劃與停泊目標位置等條件，以最佳化或成本函數計算方式，建立排程與資訊，傳遞給各排程中的無人船。這些傳遞資訊可使用包裹式資訊，定時或隨時更新，包裹式資訊內有預定啟動時間、完成時間、航跡路線、辨識目標等。

五、結論與建議

無人船的功能多且用途廣泛，已漸納入軍事用途、海上監測及貨品運輸，而未來將廣設無人船基地，為了達到全面無人化目標，港口將設置更多感測系統及物聯網科技，以提升無人船使用效率和安全性。而無人船全面自主化仍有許多挑戰，除了港口設施升級外，還有法規調適、自主靠泊、感知技術、無人補給等，對於無人船產業發展上，可提前布局以因應未來智慧化無人港口監管要求，以及無人船快速發展所需裝備、物聯網技術、人工智慧、感測器應用等。

參考文獻

[1] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/unmanned-surface-vehicle-market-report。登入日期：2026 年 3 月 6 日。

[2] https://www.defenseadvancement.com/suppliers/unmanned-surface-vehicle-usv/。登入日期：2026 年 3 月 10 日。

[3] W. Nzengu, J. Faivre, A.-S. Pauwelyn, V. Bolbot, L. A. L. Wennersberg, G. Theotokatos, “Regulatory framework analysis for the unmanned inland waterway vessel,” *WMU J Marit Affairs*, Vol. 20, pp. 357–376, 2021, https://doi.org/10.1007/s13437-021-00237-z

[4] E. M. de Andrade; J. S. Sales, A.C. Jr. Fernandes, “Operative Unmanned Surface Vessels (USVs): A Review of Market-Ready Solutions,” *Automation*, Vol. 6, No. 17, 2025, https://doi.org/10.3390/automation6020017

[5] Y. A. Ahmed, G. Theotokatos, I, Maslov, L. A. L.Wennersberg, D. A. Nesheim, “Regulatory and legal frameworks recommendations for short sea shipping maritime autonomous surface ships,” *Marine Policy*, Vol. 166, 2024, 106226.

[6] J. Cai, G. Chen, J. Yin, C. Ding, Y.Suo, J. Chen, “A Review of Autonomous Berthing Technology for Ships” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12, No. 7, 1137, 2024. https://doi.org/10.3390/jmse12071137

[7] 戚懷芳。「超大型貨櫃船對於定期航運產業成本效率與營運障礙分析」。碩士論文，國立臺灣海洋大學運輸科學系，2018。https://hdl.handle.net/11296/gu3949。

[8] https://www.mpa.gov.sg/media-centre/details/strengthening-maritime-competitiveness-and-operational-excellence。登入日期：2026 年 3 月 10 日。

[9] https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/premiere-unmanned-sailing-maasvlakte-2-trial-unmanned-surface-vessel。登入日期：2026 年 3 月 10 日。

[10] https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/autonomous-shipping.aspx。登入日期：2026 年 3 月 10 日。

[11] H. T. Sinohara, E. A. Tannuri, “Port's technologies for autonomous ships in restricted waters,” *Maritime Business Review*, Vol. 7, No. 1, pp. 5–23, 2022, doi: https://doi.org/10.1108/MABR-04-2021-0028

[12] https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/media/in-the-news/smart-berth-systems。登入日期：2026 年 3 月 11 日。

[13] G. Wu, D. Li, H. Ding, D. Shi, B. Han, “An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing,”.*Complex Intell. Syst.* Vol. 10, pp.981–1003, 2024. https://doi.org/10.1007/s40747-023-01196-z

[14] Y. A. Becerra-Mora, J. Á. Acosta, Á. R. Castaño, “Learning port maneuvers from data for automatic guidance of Unmanned Surface Vehicles,” *Ocean Engineering*, Vol. 333, 2025, 121506, ISSN 0029-8018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121506.

基於 CNN 與 NPU 加速之無人水面載具水下聲紋辨識研究

鍾育仁[1] 羅濬智[2] 張翊翔[3] 謝祥佑[4] 胡沁榆[5]

摘要

隨著智慧海洋與無人載具技術之快速發展，無人水面載具(Unmanned Surface Vehicle, USV)已逐漸成為海洋監測、海事安全與環境感知之關鍵平台。船舶水下聲學訊號具有高度複雜性，其組成來源涵蓋主機、輔機、減速齒輪及螺槳等機械系統所產生之耦合聲學特徵，其中螺槳或推進器運轉所產生之聲紋特徵，具有作為目標辨識與狀態判斷之潛力。然而，如何在資源受限之平台上有效擷取與辨識此類時頻特徵，仍為一項具挑戰性之課題。本研究主要針對無人水面載具水下動態特性進行辨識，透過四支水聽器組成之陣列進行同步聲訊擷取，並利用短時傅立葉轉換(short-time Fourier transform, STFT)將時域訊號轉換為時頻特徵圖，以探討螺槳運轉之水下動態行為。在特徵辨識方面，本研究利用卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)進行聲紋特徵學習與分類，並嘗試將模型部署於 Snapdragon 平台，結合神經處理單元(neural processing unit, NPU)進行運算與推論。實驗結果顯示，所建立之 CNN-based 模型於三類無人船運動狀態辨識任務中，最高可達 92.40%之 Accuracy、93.91%之 Precision、88.71%之 Recall 與 90.33%之 F1-score，顯示時頻圖結合深度學習方法可有效辨識不同推進與航行狀態下之水下聲紋特徵。此外 NPU 架構具低功耗部署潛力，可實現邊緣端應用的能力，期望本研究成果可進一步運用於水下環境感知技術。

關鍵詞：無人水面載具(unmanned surface vehicle, USV)、神經處理單元(neural processing unit, NPU)、卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)、邊緣運算(edge computing)

Underwater Acoustic Signature Recognition of Unmanned Surface Vehicles Using CNN and NPU-Accelerated Edge Inference

Chung, Y. J.[1] Lo, C.C.[2] Chang, Y.H.[3] Hsieh, H.Y.[4] Hu, C.Y.[5]

ABSTRACT

With the rapid advancement of smart ocean technologies and unmanned vehicle systems, Unmanned Surface Vehicles (USVs) have gradually become key platforms for ocean monitoring, maritime security, and environmental sensing. Underwater acoustic signals generated by vessels are highly complex, consisting of coupled acoustic features produced by mechanical systems such as main engines, auxiliary machinery, reduction gears, and propellers. Among these sources, the acoustic signatures generated by propeller or thruster operation show strong potential for target identification and operational state assessment. However, effectively extracting and recognizing such time–frequency features on resource-constrained platforms remains a challenging task.

This study focuses on identifying the underwater dynamic characteristics of USVs. A four-hydrophone array was employed to synchronously acquire underwater acoustic signals, and the Short-Time Fourier Transform (STFT) was used to convert time-domain signals into time–frequency spectrograms for analyzing the underwater

[1] 海軍官校海洋科學系副教授兼資訊圖書中心主任
[2] 海軍官校海洋科學系學生
[3] 海軍官校海洋科學系學生
[4] 海軍官校海洋科學系學生
[5] 海軍官校資訊管理系學生

dynamic behavior associated with propeller operation. For feature recognition, a convolutional neural network (CNN) was applied to learn and classify acoustic signatures. The trained model was further deployed on a Snapdragon platform, integrating a Neural Processing Unit (NPU) for computation and inference.

The experimental results show that the proposed CNN-based model achieved a maximum Accuracy of 92.40%, Precision of 93.91%, Recall of 88.71%, and F1-score of 90.33% in the three-class classification task of USV operational states. These results indicate that combining time–frequency spectrograms with deep learning can effectively identify underwater acoustic signature features under different propulsion and navigation conditions. In addition, the NPU-based architecture demonstrates potential for low-power deployment and edge-based applications. The findings of this study are expected to further support the development of underwater environmental sensing technologies.

Keywords: Unmanned Surface Vehicle (USV); Neural Processing Unit (NPU); Convolutional Neural Network (CNN); edge computing

一、前言

隨著自主航行、感測整合與智慧決策技術日益成熟，無人水面載具(unmanned surface vehicle, USV)因具備部署彈性高、任務風險低與機動性佳等特性，已逐漸成為海洋監測、巡檢與環境調查的重要平台。對 USV 而言，若僅依賴水面以上的導航、影像或通訊資訊，往往較難直接掌握推進系統在水下的實際運轉狀態；相對而言，水下聲學訊號能具體反映載具於航行過程中的推進行為與機械特徵。透過聲學量測有機會成為觀察船舶行為與目標特性的可行途徑。

然而，水下聲學訊號容易受到背景噪音、傳播損失、多重路徑與量測環境的影響，使得傳統以人工特徵為主的判讀方法，在複雜水域條件下常面臨挑戰[1]。近年來，機器學習(machine learning, ML)與深度學習(deep learning, DL)已逐步成為船舶輻射噪音分析的重要發展方向，但部分研究亦指出，標註資料匱乏、環境變異大，及模型泛化能力受限，仍是此領域的關鍵瓶頸。相較之下，將原始聲訊轉換為時頻圖(time-frequency spectrogram)，再結合機器學習或深度學習進行特徵萃取與識別，已被證實在船舶聲學分類上具有良好潛力，克服人工辨識容易錯誤的缺點，特別適合捕捉水下聲訊中隨時間變化的局部頻譜特徵[2][3]。

綜觀現有文獻，相關研究多著重於大型船舶的船型辨識或一般水下目標分類，聚焦於 USV 水下聲紋識別之研究仍相對有限。基於此，本研究以無人水面載具之水下動態特性辨識為核心，規劃三種實測情境：直線航行、轉彎航行，以及模擬推進器受附著物干擾(以膠帶纏繞推進器)之異常狀況。本研究透過 4 支水聽器同步擷取聲學資料，利用短時傅立葉轉換(short-time Fourier transform, STFT)將時域訊號轉換為時頻特徵圖後，再導入卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)進行分類識別。

另一方面，考量未來智慧海洋載具多需在功耗、延遲與運算資源受限的邊緣環境下執行即時推論[4]。本研究選擇基於卷積神經網路(CNN-based)深度學習模型進行 Snapdragon NPU 推論，主要原因在於 CNN 模型以卷積運算為核心，具有高度平行化、結構規則及量化友善等特性，較符合高通 Snapdragon NPU 具低功耗部署潛力、高效率神經網路推論之硬體設計。因此，本研究嘗試將訓練完成之模型部署於 Snapdragon 平台，結合神經處理單元(Neural Processing Unit, NPU)進行運算推論，以驗證該聲學辨識方法於邊緣設備上的實作可行性。換言之，本研究主要建立一套具 USV 識別與部署能力的水下聲學感知系統，期望作為後續自主監測、異常偵測等聲學應用之基礎。

二、 研究使用設備介紹

2.1 無人海洋量測載具

本研究以無人水面載具作為聲學資料蒐集目標平台，主要量測載具航行過程所產生之水下噪音。其中載具本身乃使用 Blue Robotics 的 BlueBoat，並結合 Marine Thinking 之自主控制與通訊整合架構。依據 Blue Robotics 官方資料，BlueBoat 具備開放式軟體架構、酬載整合彈性高，並可整合聲納、感測器、相機與通訊設備，同時支援自主 GPS 航點導航，適合作為水文測繪與海洋感測任務之載台[5]。Marine Thinking 則將 BlueBoat 與其 Marine Tensor 系統進行整合，提供自主導航、通訊、感測器融合等功能，使其成為多任務海洋量測平台。

本平台搭載 Cerulean Surveyor 240-16 多波束測深儀，其為 240 kHz 多波束回聲測深系統，設備內建 IMU，可配合姿態資訊進行俯仰與橫搖補償，並支援於小型 USV 上執行淺水域測深任務。相較於單波束系統，多波束測深設備可於單次航跡中獲得較寬範圍之海床深度資訊，有助於提升小型無人載具在近岸與淺水域量測上的應用彈性。為掌握量測期間之外在環境條件，本研究另搭載 Airmar WX200 氣象站。由於海面風場、載具姿態與環境條件均可能間接影響目標載具航行狀態及量測背

景，因此氣象與姿態資訊可協助進行聲學判讀時的輔助資訊。

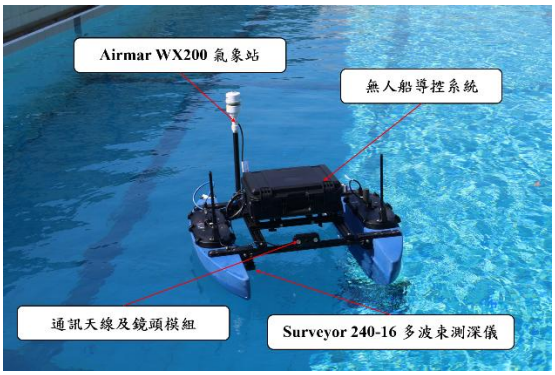


圖 1 Marine Thinking 無人水面載具

2.2 水下聲音量測

為取得無人水面載具於不同航行狀態下之水下寬頻聲學資訊，本研究採用 Ocean Sonics icListen 系列之 IcListen RB9 與 SJ9 各兩支水聽器進行水下訊號接收。IcListen RB9 與 SJ9 為數位智慧水聽器，其頻率響應均為 10 Hz 至 200 kHz，具 24-bit 解析度，可執行聲學資料之即時處理與記錄；其系統架構採 Ethernet 為通訊界面，除可即時輸出波形與頻譜資料外，亦便於整合為時間同步之多通道量測架構。因此，該設備可進行即時觀測與資料顯示，對於本研究所需之 4 支水聽器同步量測與後續聲學特徵收集與分析而言，具有相當實用性。

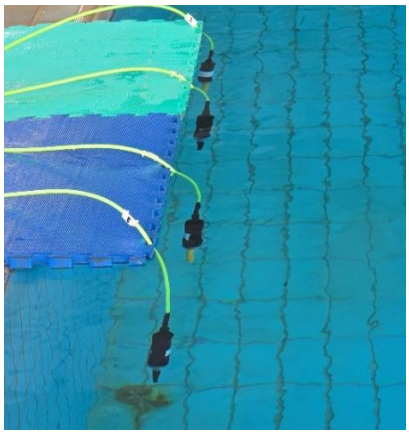


圖 2 IcListen RB9 與 SJ9 水聽器

三、 研究方法

本研究主要識別無人水面載具於不同運動與推進狀態下之水下動態特性。研究流程首先以四支水聽器組成量測陣列，同步擷取無人船於不同工況下之水下聲訊；其次，將原始時域訊號透過 STFT 轉換為時頻圖，以保留聲學訊號隨時間變化之頻譜資訊。

3.1 CNN-based AI 模型建立

接著將無人船於不同狀態下所對應之時頻圖作為輸入，藉此學習直線前進、轉彎及螺槳受干擾等不同工況間的聲紋差異，並利用卷積神經網路對時頻圖進行特徵學習與分類，以判斷無人船之航行狀態與螺槳是否受異物干擾。本研究採用之 CNN 模型包含三組卷積層與最大池化層，並於後端接續全連接層與 Softmax 分類層。卷積層採用 ReLU 作為激活函數，以學習時頻圖中局部頻譜紋理與時間變化特徵(CNN-based 模型架構如圖 3)。最後，將訓練完成之模型部署於 Snapdragon NPU 平台，並藉由神經處理單元執行推論；研究流程如圖 4。

3.2 NPU 架構導入

本研究希望讓訓練好的 AI 模型，不只是在電腦上分析資料，而是能放到邊緣裝置上即時執行。因此，本研究採用 Snapdragon X Elite 平台(NPU 最高可達 45 TOPS)內建的 Hexagon NPU 進行推論，以降低 CPU 及 GPU 的負擔並提升辨識效率。由於以 Keras 訓練完成之模型無法直接於 Snapdragon 平台之 Hexagon NPU 上執行，因此本研究先將訓練完成之模型轉換為 ONNX 格式，再透過 ONNX Runtime 搭配 Qualcomm QNN Execution Provider 進行部署，使模型中之卷積、激活函數與全連接層等運算可由 Qualcomm AI 加速環境進行推論。此流程主要用以驗證 CNN 聲學辨識模型於邊緣運算平台上執行之可行性，並作為後續低延遲、低功耗現場辨識系統之基礎[6][7][8][9]。

3.3 模型效能評估

為評估模型之分類效能，本研究採用 accuracy、precision、recall 與 F1-score 作為主要指標。Accuracy 用以反映整體分類正確率；precision 表示模型預測為某一類別時，其結果實際正確的比例；recall 則衡量真實屬於某一類別的樣本中，被模型成功辨識出的比例；F1-score 為 precision 與 recall 的調和平均，可用來綜合評估模型在準確辨識與避免漏判之間的平衡表現。由於單一指標 往往無法完整反映分類模型的真實能力，因此本研究將綜合上述指標進行模型效能判讀。

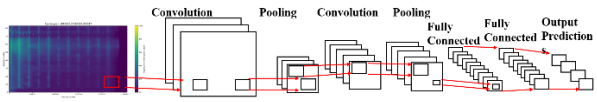


圖 3 CNN-based AI 模型

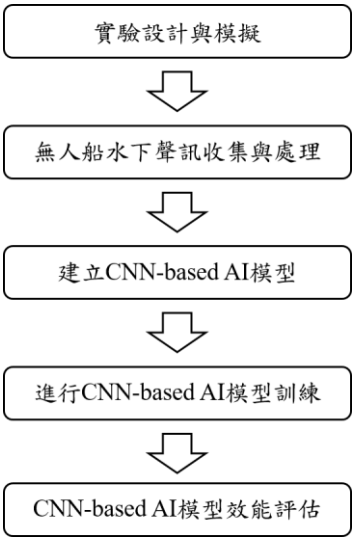


圖 4 研究流程圖

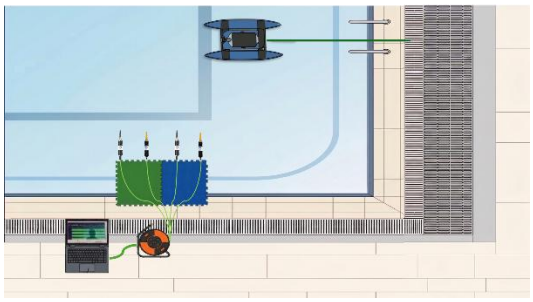


圖 5 泳池實驗配置圖

本研究之實驗規劃可分為資料取得、模型建立與效能驗證 3 個階段。首先，在資料取得階段，研究團隊於泳池環境中布設四支水聽器陣列，並同步量測無人船於不同狀態下之水下聲學訊號，實驗配置圖如圖 5；本研究共規劃 3 種情境，分別為直線前進、轉彎，以及以膠帶纏繞螺槳模擬推進器受干擾狀態，藉此建立 3 種類型聲訊資料集。其次，在模型建立與訓練階段，先將原始聲訊轉換為時頻圖，再輸入 CNN 模型進行訓練，使模型能夠學習在無人船 3 種狀態下的聲訊特徵。最後，在效能驗證階段，透過混淆矩陣(confusion matrix)，產出 accuracy、precision、recall 與 F1-score 等指標，以進行模型效能評估。

四、 研究結果與討論

本研究設計之無人船在泳池的 3 種航行狀態，分為「直線前進」、「直線前進(膠帶纏繞螺槳)」、「轉彎過程」等情境，以 4 支水聽器同步收集聲音訊號，經 STFT 轉換後，時頻圖成為 CNN-based 深度學習模型的輸入資料集，接著進行特徵學習與分類，進而判斷無人船之航行狀態與螺槳是否纏繞異物；結果顯示 3 種無人船在不同航行狀態下時頻圖之特徵各有差異，如圖 6、7、8 所示。

此外，本研究嘗試透過 NPU 架構進行推論，經計算較以 CPU 推論時間耗費較少，這結果也顯示在 NPU 架構邊緣佈署的潛力。

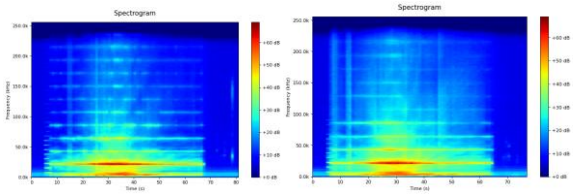


圖 6 無人船直線航行時頻圖

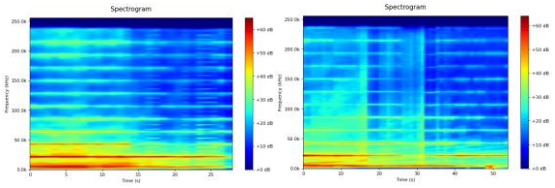


圖 7 無人船直線航行時頻圖(螺槳膠帶纏繞)

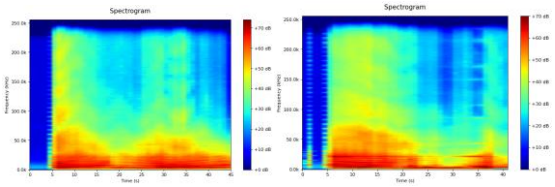


圖 8 無人船轉彎狀態時頻圖

本研究主要使用 CNN-based 深度學習模型，並使用 ReLU/Softmax 作為激活函數及 Adam 優化器。研究結果顯示，模型於分類任務中最高可達 92.40%之 Accuracy、93.91%之 Precision、88.71%之 Recall 與 90.33%之 F1-score，顯示所建立之 CNN-based 模型對不同狀態之無人船水下聲訊具有不錯辨識能力，如圖 9、10、11、12。

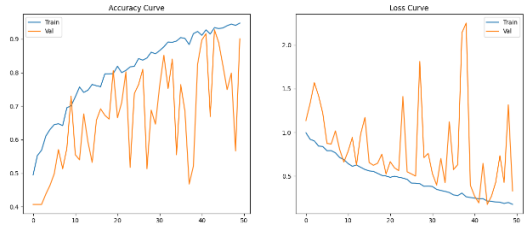


圖 9 學習曲線(Epochs:50; Batch Size:8)

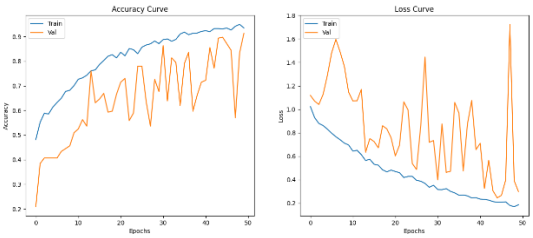


圖 10 學習曲線(Epochs:50; Batch Size:16)

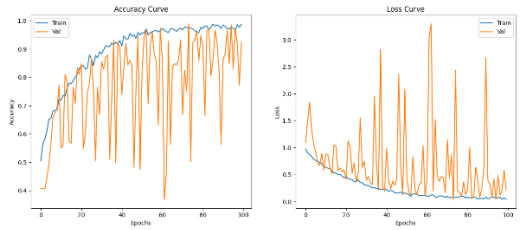


圖 11 學習曲線(Epochs:100; Batch Size:8)

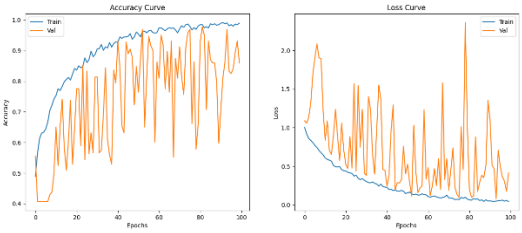


圖 12 學習曲線(Epochs:100; Batch Size:16)

五、 結論

本研究針對無人水面載具之水下聲紋辨識進行初步探討，透過四支水聽器同步擷取不同航行狀態下之水下聲學訊號，並利用 STFT 將時域訊號轉換為時頻圖，再結合 CNN-based 深度學習模型進行分類辨識。實驗結果顯示，不同航行狀態，包括直線航行、轉彎航行與螺槳受干擾狀態，其水下聲學特徵具有可辨識差異，模型最高可達 92.40%之 Accuracy，顯示本方法應用於 USV 水下狀態辨識具有可行性。

此外，本研究進一步將訓練完成之模型部署於 Snapdragon 平台，並透過 Hexagon NPU 進行推論測試，初步驗證 CNN 聲學辨識模型於邊緣運算平台上執行之可行性。此結果顯示，未來若結合即時聲學量測與低延遲推論機制，將有助於發展具自主感知與異常偵測能力之無人海洋量測載具。後續研究可進一步擴充實海域資料、比較不同模型架構，並加入功耗、延遲與長時間穩定性測試，以提升系統於實際海洋環境中的應用價值。

六、 參考文獻

[1] Liu, F., Shen, T., Luo, Z., Zhao, D., & Guo, S. (2021). Underwater target recognition using convolutional recurrent neural networks with 3-D Mel-spectrogram and data augmentation. Applied Acoustics, 178, 107989.

[2] Domingos, L. C. F., Santos, P. E., Skelton, P. S. M., Brinkworth, R. S. A., & Sammut, K. (2022). An investigation of preprocessing filters and deep learning methods for vessel type classification with underwater acoustic data. *IEEE Access*, *10*, 117582–117596.

[3] Hummel, H. I., van der Mei, R., & Bhulai, S. (2024). A survey on machine learning in ship radiated noise. Ocean Engineering, 298, 117252.

[4] Shuvo, M. M. H., Islam, S. K., Cheng, J., & Morshed, B. I. (2023). Efficient acceleration of deep learning inference on resource-constrained edge devices: A review. Proceedings of the IEEE, 111(1), 42–91.

[5] Marine Thinking. BlueBoat USV powered by Marine Tensor™. Marine Thinking. Retrieved April 22, 2026.

[6] ONNX Runtime. QNN Execution Provider. ONNX Runtime Documentation. Retrieved April 29, 2026.

[7] Qualcomm Technologies, Inc. Qualcomm AI Runtime SDK: Qualcomm AI Engine Direct / QNN SDK Documentation. Qualcomm Documentation. Retrieved April 29, 2026.

[8] Qualcomm Technologies, Inc. Converting and executing a CNN or ONNX model with QNN. Qualcomm AI Runtime SDK Documentation. Retrieved April 29, 2026.

[9] Qualcomm Technologies, Inc. Snapdragon X Elite Platform. Qualcomm. Retrieved April 29, 2026.

Predictor-based Leader-Follower Formation Control of Unmanned Surface Vehicles with Communication Delays

Chia-Chun Lin[1] Ming-Han Tsai[2] Hung-Ping Su[3] Jen-Hwa Guo[4]

ABSTRACT

This study investigates the leader-follower formation control problem of unmanned surface vehicles (USVs) under communication delay. Communication delays prevent the follower from accessing real-time leader state information, which degrades tracking performance and may lead to system instability. To address this issue, a predictor-based formation control method is proposed, which reconstructs the current leader state using delayed measurements and integrates a nonlinear trajectory tracking controller for delay compensation. In the delay-free case, Lyapunov methods are employed to establish that the formation tracking error system is globally asymptotically stable. When communication delay is considered, the predictor is shown to reconstruct the leader state effectively, rendering the delayed system equivalent to the delay-free system. The overall system is then shown to be globally asymptotically stable based on cascade stability theory. Finally, simulations under various delay conditions are conducted to validate the effectiveness of the proposed method. The results demonstrate that the proposed approach can effectively mitigate the adverse effects of communication delay and maintain stable formation tracking performance.

Keywords: Time-Delay Systems; Formation Tracking; State Prediction; Networked Control Systems; Lyapunov Stability

摘要

本研究探討無人水面載具 (Unmanned Surface Vehicle, USV) 在通訊延遲環境下之領導者-跟隨者編隊控制問題。由於網路通訊延遲會導致跟隨者無法即時取得領導者狀態資訊，進而影響追蹤性能並可能造成系統不穩定。為解決此問題，本研究提出一種基於預估器 (predictor) 的編隊控制方法，利用歷史資訊重建領導者當前狀態，並結合非線性軌跡追蹤控制器進行延遲補償。在無延遲情況下，透過李亞普諾夫方法 (Lyapunov method) 證明編隊追蹤誤差系統之漸近穩定性；進一步考慮通訊延遲，證明預估器可有效重建領導者狀態，使延遲系統等價於無延遲系統，並透過串聯穩定性 (cascade stability) 分析整體系統之穩定性。最後，透過不同延遲條件之模擬比較驗證所提出方法之有效性。結果顯示，所提出之方法能有效降低通訊延遲對編隊控制之影響，並維持穩定之追蹤性能。

關鍵字：時延系統、編隊追蹤、狀態預估、網路控制系統、李亞普諾夫穩定性

I. Introduction

Unmanned surface vehicles (USVs) have attracted increasing attention due to their applications in marine surveillance, environmental monitoring, inspection, and search-and-rescue missions. In USV motion control, path following and trajectory tracking are fundamental problems, and methods such as LOS guidance, Lyapunov-based control, and backstepping have been widely studied [1]–[3]. For more demanding maritime tasks, cooperative control of multiple USVs is often more effective than using a single vehicle, and the leader-follower architecture has become a common coordination strategy because of its simple structure and practical implementation [2], [4]. Many leader-follower formation problems can be viewed from a tracking perspective, where the follower is required to track a desired state generated from the leader's motion. In this context, the backstepping-based tracking controller in [5] provides an important theoretical basis for tracking-based formation-control design. However, in practical leader-follower systems, the follower relies on delayed leader information to generate its control input, and

[1] Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, M.S. Student
[2] Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, M.S.
[3] Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, M.S. Student
[4] Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Professor

communication delay may therefore degrade tracking performance and even affect system stability. Existing studies have started to address ship or USV formation tracking under communication delays, for example through cooperative MPC and predictive observers [6]. Predictor-based control is an effective framework for time-delay systems because it uses delayed measurements together with system dynamics to reconstruct the relevant state and compensate for delay effects [7], [8]. Moreover, since a leader-follower formation system can be regarded as an interconnected structure, cascade-system analysis is suitable for studying its overall stability, and the delayed nonlinear cascade results in [9] provide an analytical foundation. Motivated by the above observations, this paper investigates the leader-follower formation control problem of USVs under communication delay. A predictor-based delay compensation scheme is integrated with a tracking-based leader-follower formation control framework to reduce the adverse effect of delayed leader information. The stability of the proposed method is analyzed for both the delay-free case and the communication-delayed case, and numerical simulations are conducted to demonstrate its effectiveness.

II. Problem Formulation

A. Kinematic Model and Delayed Leader Information

Consider a leader-follower formation system composed of one leader USV and one follower USV moving on a horizontal plane. The posture of each vehicle is defined as

$$p_i(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \\ \theta_i(t) \end{bmatrix}, \qquad i \in \{L, F\}, \tag{1}$$

where $\big(x_i(t), y_i(t)\big), \theta_i(t),$ denote the position and heading angle, respectively, where the subscripts L and F denote the leader and follower USVs. The linear and angular velocities are denoted by $v_i(t)$ and $\omega_i(t)$,respectively, where the subscripts L and F denote the leader and follower USVs. The kinematic model of each USV is given by

$$\dot{x}_i(t) = v_i(t)\cos\theta_i(t), \tag{2}$$

$$\dot{y}_i(t) = v_i(t)\sin\theta_i(t), \tag{3}$$

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t), \tag{4}$$

where $i \in \{L, F\}$. In practical networked formation control, the follower cannot access the instantaneous leader state due to communication delay. Let $\tau > 0$ denote the communication delay. Then, the delayed leader information available to the follower is compactly written as

$$p_L^{(m)}(t) = \begin{bmatrix} x_L^{(m)}(t) \\ y_L^{(m)}(t) \\ \theta_L^{(m)}(t) \end{bmatrix} = p_L(t-\tau), \tag{5}$$

where the superscript (m) denotes the delayed measurement received by the follower.

B. Nominal Formation Geometry and Reference Signals

Let $l_d > 0$ denote the desired relative distance between the leader and the follower, and let ϕ_d denote the desired relative bearing angle. The nominal leader-follower formation geometry is illustrated in Fig. 1, where (x_d, y_d) denotes the desired follower position with respect to the leader.

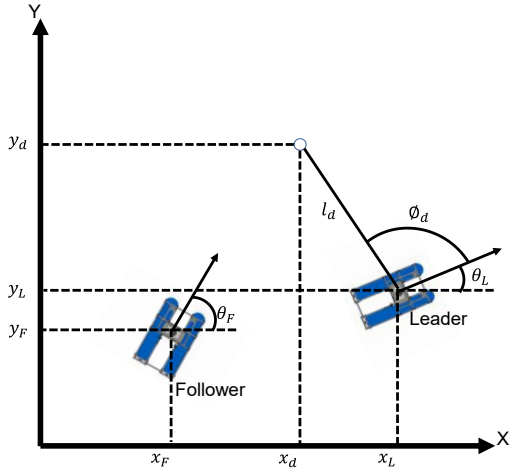


Fig. 1. Leader-follower formation geometry.

In the delay-free case, the desired follower position is defined as

$$x_d(t) = x_L(t) + l_d\cos(\theta_L(t) + \phi_d), \tag{6}$$

$$y_d(t) = y_L(t) + l_d\sin(\theta_L(t) + \phi_d), \tag{7}$$

The desired heading of the follower is chosen as the tangent direction of the desired trajectory, i.e.,

$$\theta_d(t) = \operatorname{atan2}\big(\dot{y}_d(t), \dot{x}_d(t)\big) + k\pi, \tag{8}$$

where $k \in \{0,1\}$ determines the direction of motion. The corresponding reference linear and angular velocities are defined as

$$v_d(t) = \sqrt{\dot{x}_d^2(t) + \dot{y}_d^2(t)}, \tag{9}$$

$$\omega_d(t) = \frac{\ddot{y}_d(t)\dot{x}_d(t) - \dot{y}_d(t)\ddot{x}_d(t)}{\dot{x}_d^2(t) + \dot{y}_d^2(t)}. \tag{10}$$

Here, $\dot{x}_d(t), \dot{y}_d(t), \ddot{x}_d(t)$ and $\ddot{y}_d(t)$ are obtained from the desired trajectory defined in Eq.(6) and Eq.(7). In the communication-delayed case, the same formation geometry is preserved, while the desired reference is generated from the predictor-based estimate of the current leader state, which will be

introduced in Section III.

C. Tracking Error Definition and Control Objective

Define the tracking error in the inertial frame as

$$e_I(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) - x_F(t) \\ y_d(t) - y_F(t) \\ \theta_d(t) - \theta_F(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Let

$$R\big(\theta_F(t)\big) = \begin{bmatrix} \cos\theta_F(t) & \sin\theta_F(t) & 0 \\ -\sin\theta_F(t) & \cos\theta_F(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

where $R\big(\theta_F(t)\big)$ denotes the transformation matrix from the inertial frame to the follower body-fixed frame. Then, the tracking error in the follower body-fixed frame is defined as

$$e_f(t) = \begin{bmatrix} e_{xf}(t) \\ e_{yf}(t) \\ e_{\theta f}(t) \end{bmatrix} = R\big(\theta_F(t)\big)e_I(t). \quad (13)$$

Here, $e_{xf}(t)$ and $e_{yf}(t)$ denote the position errors expressed in the follower body-fixed frame, and $e_{\theta f}(t)$ denotes the heading error.

The objective of this paper is to design a leader-follower formation controller such that the follower can track the desired formation reference despite the presence of communication delay. More specifically, the control objective is to guarantee

$$e_{xf}(t) \to 0,\ e_{yf}(t) \to 0,\ e_{\theta f}(t) \to 0 \quad (14)$$

III. Predictor-Based Formation Control Design

A. Delay-Free Formation Controller

Based on the body-fixed tracking error defined in Eq.(13), the corresponding error dynamics can be written as

$$\dot{e}_{xf}(t) = v_d(t)\cos e_{\theta f}(t) + \omega_F(t)e_{yf}(t) - v_F(t), \quad (15)$$

$$\dot{e}_{yf}(t) = v_d(t)\sin e_{\theta f}(t) - \omega_F(t)e_{xf}(t), \quad (16)$$

$$\dot{e}_{\theta f}(t) = \omega_d(t) - \omega_F(t). \quad (17)$$

In many leader-follower formation problems, the formation objective can be reformulated as a trajectory-tracking problem, where the follower tracks a desired state generated from the leader motion [10]. Following this viewpoint, a delay-free tracking-based formation controller is designed as

$$v_F(t) = v_d(t)\cos e_{\theta f}(t) + k_x e_{xf}(t), \quad (18)$$

$$\omega_F(t) = \omega_d(t) + v_d(t)e_{yf}(t)\frac{\sin e_{\theta f}(t)}{e_{\theta f}(t)} + k_\theta e_{\theta f}(t), \quad (19)$$

where $k_x > 0$ and $k_\theta > 0$ are control gains. With

$$k_x = 2\epsilon a, \qquad a = \sqrt{\omega_d^2 + b v_d^2}, \quad (20)$$

and $\epsilon > 0, b > 0$, the above controller is used as the nominal delay-free formation controller. In the communication-delayed case, the same controller structure is retained, while the desired formation reference is generated from the predictor-based estimate of the leader state.

B. Predictor Design

To compensate for the communication delay, a predictor is introduced to reconstruct the current leader state from the delayed measurements. The overall structure of the proposed predictor-based formation control scheme is illustrated in Fig. 2.

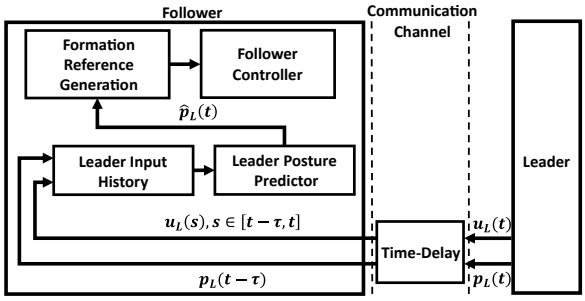


Fig. 2. Block diagram of the proposed predictor-based leader-follower formation control scheme.

Where $u_L(t)$ represents the leader input, consisting of $v_L(t)$ and $\omega_L(t)$. As shown in Fig. 2, the follower receives delayed leader information through the communication channel and reconstructs the current leader posture using the posture predictor. The predicted leader state is then used to generate the formation reference, which is subsequently fed into the follower controller. In this way, the follower is able to compensate for the delay effect while preserving the same nominal formation geometry.

According to the kinematic model in Eq.(2)-(4), the predicted leader heading at an intermediate time $s \in [t-\tau,\ t]$ is defined as

$$\hat{\theta}_L(s) = \theta_L^{(m)}(t) + \int_{t-\tau}^{s} \omega_L(p)dp. \quad (21)$$

Then, the current leader position can be reconstructed by propagating the delayed measurement forward in time as

$$\hat{x}_L(t) = x_L^{(m)}(t) + \int_{t-\tau}^{t} v_L(s)\cos\hat{\theta}_L(s)\,ds, \quad (22)$$

$$\hat{y}_L(t) = y_L^{(m)}(t) + \int_{t-\tau}^{t} v_L(s)\sin\hat{\theta}_L(s)\,ds, \quad (23)$$

and the predicted leader heading is given by

$$\hat{\theta}_L(t) = \theta_L^{(m)}(t) + \int_{t-\tau}^{t} \omega_L(s)ds. \quad (24)$$

Accordingly, the predicted leader state is written as

$$\hat{p}_L(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}_L(t) \\ \hat{y}_L(t) \\ \hat{\theta}_L(t) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

This design follows the predictor-based compensation principle, in which delayed measurements are combined with the nominal system model to reconstruct the relevant current state [7]. The predicted state $\hat{p}_L(t)$ is then used to generate the desired formation reference in the communication-delayed case.

C. Predictor-Based Delayed Formation Control Law

In the communication-delayed case, the desired formation reference is generated from the predicted leader state $\hat{p}_L(t)$ in Eq.(25), instead of the instantaneous leader state used in the delay-free case. Accordingly, the nominal formation geometry and reference signals in Eq.(6)-(10) are reconstructed by replacing $x_L(t), y_L(t)$ and $\theta_L(t)$ with $\hat{x}_L(t), \hat{y}_L(t)$ and $\hat{\theta}_L(t)$, respectively.

After the delayed formation reference is obtained, the same tracking-based control structure given in Eq.(18)-(20) is applied. Therefore, the proposed method can be interpreted as an integration of a nominal delay-free formation controller and a predictor-based delay compensation mechanism. This structure allows the follower to generate its control input from the predicted leader state and thereby alleviate the degradation caused by delayed communication.

IV. Stability Analysis

A. Stability of the Nominal Delay-Free Leader-Follower System

To analyze the stability of the nominal delay-free leader-follower formation system, the closed-loop dynamics are interpreted as a nonlinear cascade interconnection. Let the lower-subsystem state be defined as

$$\zeta_2(t) = \begin{bmatrix} e_{xl}(t) \\ e_{yl}(t) \end{bmatrix}, \quad (26)$$

where $e_{xl}(t), e_{yl}(t)$ denote leader tracking error, and let the upper-subsystem state be defined as

$$\zeta_1(t) = \begin{bmatrix} e_{xf}(t) \\ e_{yf}(t) \\ e_{\theta f}(t) \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Then, the nominal delay-free closed-loop system can be written in the cascade form

$$\dot{\zeta}_1(t) = f_1(t, \zeta_1(t)) + g(t, \zeta_1(t), \zeta_2(t)), \quad (28)$$

$$\dot{\zeta}_2(t) = f_2(t, \zeta_2(t)), \quad (29)$$

where f_1 denotes the nominal upper subsystem, f_2 denotes the lower subsystem, and g denotes the coupling term induced by the leader-generated reference inputs.

For the leader-related lower subsystem generated by the circular tracking controller in [11], choose the Lyapunov function candidate

$$\mathrm{V}_L(\zeta_2) = \frac{1}{2}\|\zeta_2\|^2, \quad (30)$$

its derivative along the lower-subsystem trajectories satisfies

$$\dot{\mathrm{V}}_L \le -2\lambda_{\min}(K)\mathrm{V}_L. \quad (31)$$

Hence, there exist positive constants c_1 and c_2 such that

$$\|\zeta_2(t)\| \le c_1\|\zeta_2(t_0)\|e^{-c_2(t-t_0)}, t \ge t_0 \quad (32)$$

therefore, the lower subsystem is globally exponentially stable (GES).

Next, consider the nominal upper subsystem $\dot{\zeta}_1 = f_1(t, \zeta_1)$ which corresponds to the follower tracking-error dynamics and is consistent with the tracking-control framework in [5]. Using the quadratic Lyapunov function

$$\mathrm{V}_F(\zeta_1) = \frac{1}{2}\|\zeta_1\|^2, \quad (33)$$

one obtains

$$\dot{\mathrm{V}}_F \le -k_x e_{xf}^2 - k_\theta e_{\theta f}^2 \le 0. \quad (34)$$

Thus, the nominal upper subsystem is Lyapunov stable and all trajectories remain bounded. Moreover, under the boundedness and uniform continuity of the nominal reference inputs together with the excitation condition on $v_d(t)$, the tracking errors converge to zero, and the control objective in Eq.(14) is achieved. For the coupling term $g(t, \zeta_1, \zeta_2)$ since the follower reference inputs are generated from the leader motion through a smooth mapping, the deviations in the reference inputs are bounded by the leader tracking error. Consequently, the coupling term satisfies a linear growth condition of the form

$$\|g(t, \zeta_1, \zeta_2)\| \le (k_2 + k_3\|\zeta_1\|)\|\zeta_2\|, \quad (35)$$

for all $t \ge t_0$, where k_2 and k_3 are positive constants.

By applying the nonlinear cascade stability result in

[9], the following theorem is obtained.

Theorem 1: The nominal delay-free leader-follower cascade system in Eq.(28)-(29) is uniformly globally asymptotically stable.

Proof: The exponential stability of the lower subsystem follows from Eq.(32). The nominal upper subsystem is Lyapunov stable by Eq.(34), and the tracking errors converge to zero so that the control objective in Eq.(14) is satisfied. Moreover, the coupling term satisfies the linear growth condition in Eq.(35). Therefore, all conditions required by the nonlinear cascade stability theorem in [9] are satisfied, and the nominal delay-free interconnected system in Eq.(28)-(29) is uniformly globally asymptotically stable (UGAS).

B. Predictor-Based State Reconstruction and Stability of the Delayed System

Under communication delay, the follower only has access to the delayed leader posture and the transmitted leader input history. Therefore, the predictor introduced in Section III is used to reconstruct the current leader posture. This design is consistent with the predictor-based compensation framework in [7], where the key requirements include forward completeness of the nominal system, availability of the delayed state, and availability of the input history. In the present study, these requirements are summarized as follows.

Assumption 1: The following conditions hold for the leader subsystem and the predictor design:

1. The leader kinematics is forward complete under bounded inputs $v_L(t)$ and $\omega_L(t)$.
2. The delayed leader posture $p_L(t-\tau)$ is available to the follower.
3. The leader input history

$$u_L(s) = \begin{bmatrix} v_L(s) \\ \omega_L(s) \end{bmatrix}, \qquad s \in [t-\tau, t], \tag{36}$$

is available to the follower.

4. The predictor uses the same leader kinematic model as the actual leader dynamics.

Based on **Assumption 1**, the following result is obtained.

Proposition 1: Under **Assumption 1**, the predictor-based state reconstruction is exact, i.e.,

$$\hat{p}_L(t) = p_L(t), \qquad t \geq t_0. \tag{37}$$

Proof: The predictor and the actual leader system evolve from the same delayed initial condition $p_L(t-\tau)$ and are driven by the same input history $u_L(s), s \in [t-\tau, t]$. Moreover, the predictor uses the same kinematic model as the actual leader dynamics. Therefore, by uniqueness of solutions of the forward-complete leader kinematics, the predicted leader state coincides with the true leader state for all $t \geq t_0$.

As a consequence of **Proposition 1**, the desired formation reference generated in the communication-delayed case is identical to that of the nominal delay-free case. Therefore, the predictor-compensated delayed closed-loop system becomes equivalent to the nominal delay-free leader-follower system analyzed in **Theorem 1**.

Theorem 2: Under **Assumption 1**, the predictor-compensated delayed leader-follower formation system is uniformly globally asymptotically stable.

Proof: By **Proposition 1**, the predictor reconstructs the current leader state from the delayed information, and the resulting desired formation reference is identical to the nominal delay-free reference. Hence, the predictor-compensated delayed closed-loop system is equivalent to the nominal delay-free cascade system studied in **Theorem 1**. Therefore, the predictor-compensated delayed leader-follower formation system inherits the same UGAS property.

V. Simulation Results

A. Simulation Setup

To evaluate the performance of the proposed leader-follower formation control method, numerical simulations are conducted for the delay-free case. The desired formation distance and relative bearing angle are set to $l_d = 5.0$ m and $\phi_d = -\pi/2$. The follower controller gains are chosen as $k_x = 0.5$ and $k_\theta = 0.5$. The leader is commanded to track a circular reference trajectory with linear velocity $\mathrm{V}_r = 1.0$ m/s and angular velocity $\omega_r = 0.04$ rad/s, corresponding to a circular radius $R = 25$ m centered at $(\mathrm{c}_x, \mathrm{c}_y) = (0,0)$. The look-ahead distance used in the leader controller is set to $\delta = 1.0$. Since this is the delay-free case, the communication delay is set to $\tau = 0$. The control frequency is 10 Hz, corresponding to a sampling interval of $\Delta t = 0.1$ s.

The simulation results are presented in terms of the leader-follower trajectories, the tracking errors, and the leader-follower distance.

B. Delay-Free Case

Fig. 3 shows the trajectories of the leader, the follower, and the desired follower reference in the delay-free case. It can be observed that the follower initially starts from an offset position, but gradually converges to the desired formation trajectory generated from the leader motion. After the transient phase, the follower trajectory closely overlaps with the desired formation path, indicating that the proposed formation controller achieves satisfactory tracking performance.

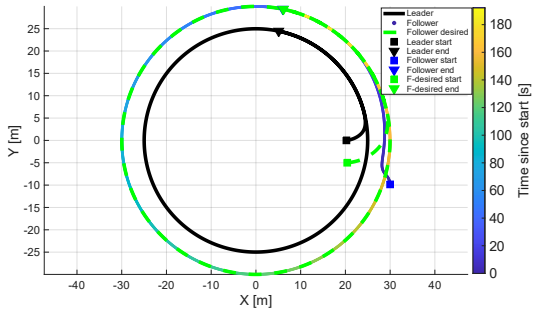


Fig. 3. Trajectories of the leader, follower, and desired follower reference in the delay-free case.

Fig. 4 presents the tracking errors of the leader and follower system. The along-track error, cross-track error, and heading error all converge to zero as time increases, which is consistent with the theoretical stability result established in Section IV. In particular, the position-related errors decrease rapidly during the initial stage and remain close to zero afterward.

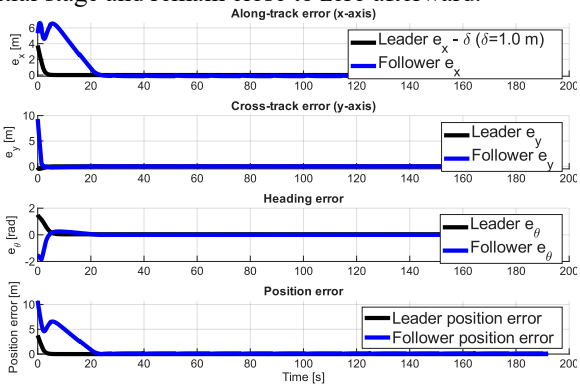


Fig. 4. Along-track error, cross-track error, heading error, and position error in the delay-free case.

Fig. 5 shows the leader-follower distance over time. Starting from a relatively large initial separation, the distance converges to the prescribed design value $l_d = 5.0\text{m}$ and remains there thereafter. This result confirms that the desired formation geometry is successfully maintained in the delay-free case.

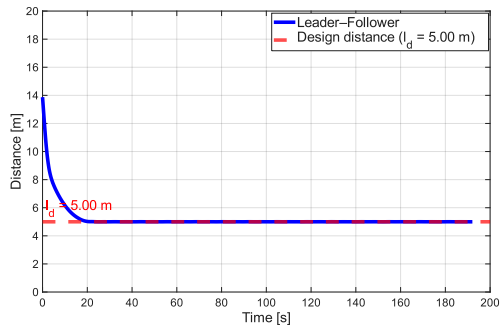


Fig. 5. Leader-follower distance in the delay-free case.

C. Communication-Delayed Case Without Predictor Compensation

To illustrate the effect of communication delay, simulations are conducted for the delayed case without predictor compensation. In this case, the follower directly uses delayed leader information for formation-reference generation and controller execution. The constant delay is set to 2s, and a small jitter is added to the delay signal.

Fig. 6 shows the delay profile used in this case. It can be seen that the total delay fluctuates around the nominal value of 2s due to the presence of jitter. Because the follower relies on delayed leader information, the desired formation reference is generated with a time lag.

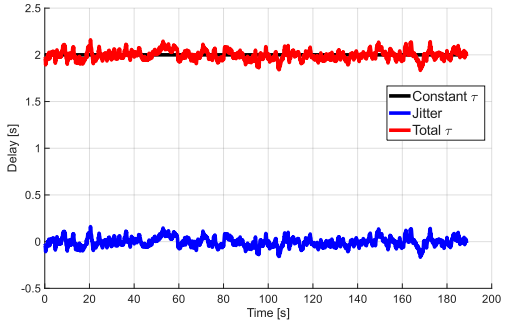


Fig. 6. Delay profile without predictor compensation.

Fig. 7 shows the trajectories of the leader, the follower, and the desired follower reference. Compared with the delay-free case, the follower cannot preserve the desired formation geometry accurately. As shown in Fig. 8, the leader-follower distance deviates from the prescribed value $l_d = 5.0\text{m}$ and $\phi_d = -\pi/2$. Moreover, Fig. 9 shows that the relative bearing angle also deviates from the desired value. These results indicate that delayed leader information distorts the intended formation shape when no predictor compensation is applied.

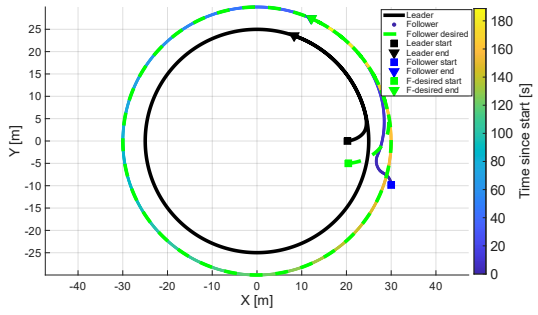


Fig. 7. Trajectories without predictor compensation.

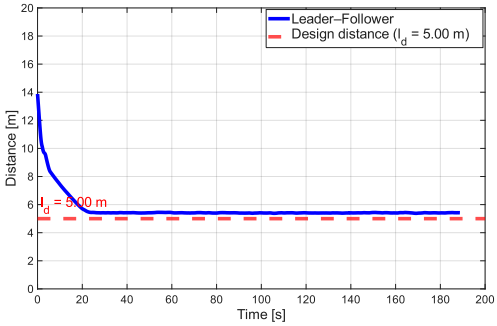


Fig. 8. Time response of the leader-follower distance in the communication-delayed case without predictor compensation.

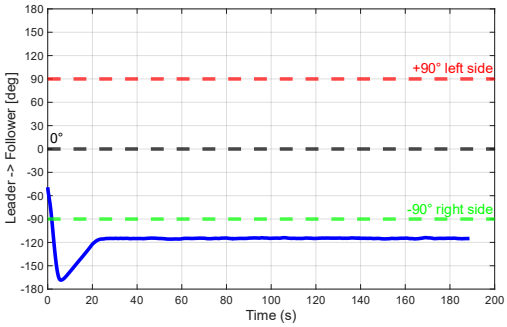


Fig. 9. Relative bearing angle between the leader and follower in the communication-delayed case without predictor compensation.

D. Communication-Delayed Case With Predictor Compensation

Simulations are further conducted for the communication-delayed case with predictor compensation. In this case, the follower reconstructs the current leader posture from delayed leader information and the transmitted input history, and then uses the predicted state to generate the desired formation reference.

To examine the predictor response, a pose disturbance is applied to the leader at $t = 30$s, with $(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta) = (-3.0, 3.0, 25^{\circ})$. Since this disturbance is not generated by the nominal leader inputs v_L, and ω_L, it cannot be anticipated by the predictor during the delay interval. As a result, the predicted leader state temporarily deviates from the actual state.

Fig. 11 shows that the predictor error exhibits a transient peak at the disturbance instant and then returns near zero after the disturbed measurement is received. As shown in Fig. 10, the follower trajectory remains close to the desired formation path. Moreover, Fig. 12 and Fig. 13 show that the leader-follower distance and the relative bearing angle undergo only temporary deviations and then recover near their desired values. These results confirm the effectiveness of the proposed predictor-based compensation under communication delay and disturbance.

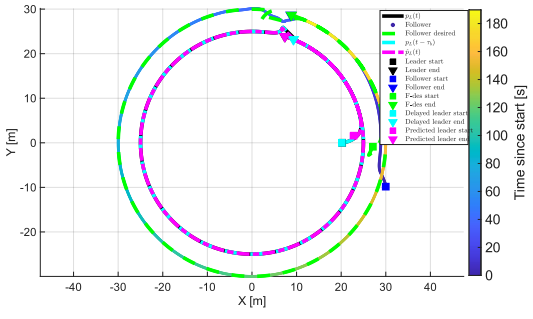


Fig. 10. Trajectories with predictor compensation under communication delay and leader disturbance.

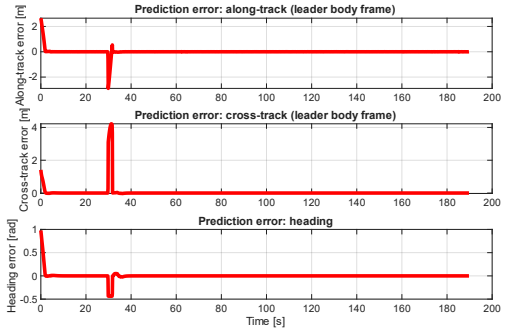


Fig. 11. Predictor error with respect to the leader state under communication delay and leader disturbance.

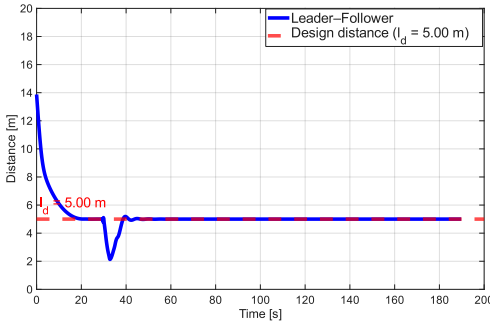


Fig. 12. Leader-follower distance with predictor compensation under communication delay and leader disturbance.

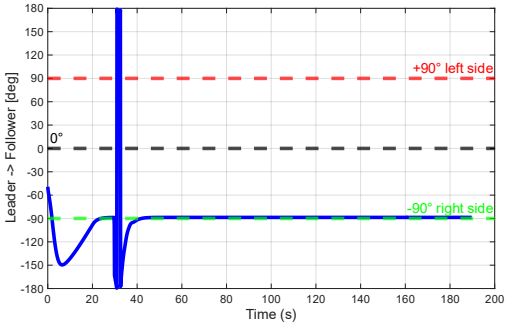


Fig. 13. Relative bearing angle with predictor compensation under communication delay and leader disturbance.

VI. Conclusion

This paper investigated the leader-follower formation control problem of unmanned surface vehicles under communication delay. A predictor-based compensation scheme was integrated with a tracking-based formation controller so that the follower could reconstruct the current leader posture from delayed measurements and transmitted input history, and then generate the desired formation reference accordingly. The nominal delay-free leader-follower system was analyzed from a cascade viewpoint, and its uniform global asymptotic stability was established. Under the predictor reconstruction conditions, the delayed system was shown to be equivalent to the nominal delay-free system, and the same stability property was preserved.

Simulation results validated the effectiveness of the proposed method. In the delay-free case, the follower successfully maintained the desired formation geometry. In the communication-delayed case without predictor compensation, the formation shape was distorted due to outdated leader information. By contrast, with the proposed predictor-based compensation, the follower was able to maintain the desired distance and relative bearing more accurately. In addition, when a pose disturbance was applied to the leader, the predictor error exhibited only a transient deviation and quickly returned near zero, showing that the proposed method can effectively improve formation maintenance under both communication delay and disturbance.

For future work, the proposed method can be extended to more general time-varying delays, model uncertainties, and multi-USV cooperative formation scenarios.

Acknowledgment

This work was supported by NSTC under Grant No. NSTC 114-2221-E-002-145-.

References

[1] C. Barrera, I. Padron, F. S. Luis, O. Llinas, and G. N. Marichal, “Trends and challenges in unmanned surface vehicles (USV): From survey to shipping,” TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 15, no. 1, pp. 135–142, Mar. 2021.

[2] Z. Peng, J. Wang, D. Wang, and Q.-L. Han, “An overview of recent advances in coordinated control of multiple autonomous surface vehicles,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 2, pp. 732–745, Feb. 2021.

[3] P. N. F. Mohd Shamsuddin and M. A. Mansor, “Motion control algorithm for path following and trajectory tracking for unmanned surface vehicle: A review paper,” in Proc. 2018 3rd International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC), 2018.

[4] J. Ghommam and M. Saad, “Adaptive leader-follower formation control of underactuated surface vessels under asymmetric range and bearing constraints,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 2, pp. 852–865, Feb. 2018.

[5] Z.-P. Jiang and H. Nijmeijer, “Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping,” Automatica, vol. 33, no. 7, pp. 1393–1399, Jul. 1997.

[6] J. Zhang, J. Mou, L. Chen, P. Chen, and M. Li, “Cooperative model predictive control for ship formation tracking with communication delays,” Ocean Engineering, vol. 291, p. 116272, 2024.

[7] I. Karafyllis and M. Krstic, “Nonlinear stabilization under sampled and delayed measurements, and with inputs subject to delay and zero-order hold,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 57, no. 5, pp. 1141–1154, May 2012.

[8] Y. Deng, V. Léchappé, E. Moulay, Z. Chen, B. Liang, F. Plestan, and Q.-L. Han, “Predictor-based control of time-delay systems: A survey,” International Journal of Systems Science, vol. 53, no. 12, pp. 2496–2534, 2022.

[9] N. O. Sedova, “The global asymptotic stability and stabilization in nonlinear cascade systems with delay,” Russian Mathematics (Iz. VUZ), vol. 52, no. 11, pp. 60–69, 2008.

[10] K. L. Besseghieur, R. Trębinski, W. Kaczmarek, and J. Panasiuk, “Leader-follower formation control for a group of ROS-enabled mobile robots,” in 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 1556–1561, 2019.

[11] L. Briñón-Arranz, A. Seuret, and A. Pascoal, “Target tracking via a circular formation of unicycles,” IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, pp. 5782–5787, 2017.

海洋管道機器人的開發

陳震宇[1]　黃盛煒[2]　陳冠宇[3]

摘要

臺灣位處海島，隨著離岸風電產業蓬勃發展，海上電力傳輸至陸地電網需仰賴龐大的海底電纜系統。在電纜「上岸段」鋪設工程中，常採用水平導向鑽掘（HDD）等非開挖工法穿越海堤，然而地下地層條件複雜，施工過程常因岩石硬塊或土質變異，導致實際鑽掘路徑偏離原始設計。由於管道深埋地下，竣工後實際空間軌跡難以掌握，若缺乏有效量測手段，未來在維護、損壞偵測或周遭工程施工時，將面臨巨大的定位風險與成本。為此，本研究開發一套具高度實務價值的海洋管道機器人，旨在不依賴外部 GPS 訊號的環境下實現精準定位。硬體設計上，本研究研發的小型機器人雛形採用「壁壓式三輪機構」，透過彈簧支撐結構產生向外壓力使載具緊貼管壁，確保在垂直或斜管中仍能保持居中穩定行進，避免滑動產生的量測誤差。感測系統整合了高精度慣性測量單元（IMU），包含三軸加速度計、陀螺儀、磁力計，並配備里程計以紀錄位移資訊。技術核心在於克服陀螺儀長時間積分產生的「角度漂移」，本計畫發展多感測器融合演算法，採用「四元數法」進行姿態解算，避免歐拉角的奇異點問題。系統以陀螺儀高頻採樣為基礎，同步利用加速度計感測重力方向及磁力計感測地磁北極作為回授校正，確保長距離運動後仍具準確方位角。為驗證可靠性，本研究建置一小型模擬管道場域，並預先以光學雷達測量真實坐標作為基準。實驗中透過等速牽引收集動態數據，經後處理運算重建之管線三維軌跡與實際配置具高度一致性，實驗結果顯示，重建之三維軌跡可反映實驗管道之主要幾何趨勢，兩次往返量測後之累積回位誤差約為 0.02 m，相對誤差約為 0.13%，顯示本方法於無外部定位訊號之模擬管道環境中具有良好重複性與三維路徑重建可行性。本研究已完成從硬體雛形、感測整合到演算法的完整開發，可作為後續海上 HDD 管道竣工軌跡量測與智慧化維運技術發展之基礎。

關鍵詞：海洋管道機器人、水平導向鑽掘（HDD）、慣性感測器、多感測器融合、三維管線重建。

Development of a Marine Pipeline Robot

Chen-Yu Chen[1]　Sheng-Wei Huang[2]　Edward Chen[3]

ABSTRACT

Taiwan’s rapidly growing offshore wind power industry relies on extensive submarine cable systems to transmit electricity from offshore wind farms to onshore power grids. In cable landing sections, trenchless methods such as horizontal directional drilling (HDD) are commonly used to pass through seawalls. However, complex geological conditions, hard rock obstructions, and variations in soil properties often cause the actual drilling trajectory to deviate from the original design. Since these pipelines are deeply buried underground, their as-built spatial trajectories are difficult to determine, leading to potential risks and costs in future maintenance, damage detection, and nearby construction. To address this issue, this study develops a marine pipeline robot for in-pipe positioning and three-dimensional path reconstruction without relying on external GPS signals. The prototype adopts a wall-pressing three-wheel mechanism, in which a spring-supported structure generates outward pressure to keep the robot in contact with the pipe wall and maintain stable centered movement. The sensing system integrates an inertial measurement unit (IMU), including a three-axis accelerometer, gyroscope, and magnetometer, together with odometry information for displacement estimation. A multi-sensor fusion algorithm based on quaternion attitude estimation is developed to reduce gyroscope drift and avoid the singularity problem of Euler

[1] 國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系 碩士生
[2] 國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系 助理教授
[3] 國立臺灣大學船舶及海洋技術研究中心 副研究員

angles. The system uses gyroscope data for short-term attitude prediction, while accelerometer and magnetometer measurements provide feedback correction based on gravity and magnetic north. To verify the feasibility of the proposed system, a small-scale simulated pipeline test field was constructed, with LiDAR-measured geometry used as a reference. Dynamic data were collected through constant-speed traction, and the three-dimensional pipeline trajectory was reconstructed through post-processing. Experimental results show that the reconstructed trajectory reflects the main geometric trend of the test pipeline. After two round-trip measurements, the cumulative return error was approximately 0.02 m, corresponding to a relative error of about 0.13%. These results demonstrate the repeatability and feasibility of the proposed method in a simulated pipeline environment without external positioning signals. The proposed system provides a technical basis for future as-built trajectory measurement and intelligent maintenance of offshore HDD pipelines.

Keywords: Marine pipeline robot, Horizontal directional drilling (HDD), Inertial sensor, Multi-sensor fusion, Three-dimensional pipeline reconstruction.

一、緒論

臺灣四面環海，近年隨著離岸風電產業快速發展，海上風場與陸上電網間之電力傳輸需求逐漸增加。為將離岸風場所產生之電力穩定傳輸至岸上，需透過海底電纜與海纜上岸段管道銜接至陸上變電站。因此，海纜上岸段及地下管道之實際空間位置，對於後續維運、檢測與工程安全管理具有重要意義。

目前海纜上岸段常採用水平導向鑽掘工法（Horizontal Directional Drilling, HDD）進行施工。HDD 工法可在不大規模開挖地表之情況下完成管線鋪設，適用於穿越海堤、道路、河川及其他障礙地形，並可降低施工對地表環境之影響 [1,2]。然而，HDD 管道於施工過程中易受到地層條件、岩石硬塊、土質變化及鑽掘控制誤差等因素影響，使竣工後之實際管線軌跡可能與原始設計路徑產生偏差。若無法準確掌握竣工後之真實三維位置，將不利於後續維修、損壞定位、延伸工程及交叉管線避讓規劃。

傳統地下管線定位方式包括地質雷達法、電磁感應法及電子羅盤測量法等。其中，Chen 等人利用外部磁場進行海底鋼管定位，指出可透過磁通密度特徵判斷管線方向與軸線位置，並在 8 英吋鋼管實驗中達到約 2 cm 之定位誤差 [3]。Laichoubi 等人則利用無人機搭載磁場量測系統，進行跨河地下管道之長距離磁場定位，顯示外部磁場量測技術可應用於管線位置推估 [4]。然而，對於長距離、深埋設、非鋼質管道或覆土後之非開挖管道，外部式量測方法仍可能受到埋深、地層條件、環境干擾與管材特性限制，難以穩定取得完整且連續之管道軌跡。因此，發展可於管道內部直接量測之定位方法，具有實務應用價值。

近年來，管道機器人已逐漸應用於不可進入或難以檢測之管道環境。Mills 等人指出，對於傳統管內檢測設備難以通行之不可通球管線 (unpiggable pipelines)，機器人與特殊檢測技術可作為管道檢查的重要替代方案 [5]。此外，LiDAR、雷射與人員進入檢測等技術亦被應用於大型管道檢查與幾何量測中 [6]。在管道機器人機構方面，壁壓式機構可藉由車輪或履帶與管壁接觸，使機器人於管道內保持穩定移動；黃彥皓針對三輪軸壁壓式管道機器人進行研究，顯示三輪支撐設計具有維持管內穩定行進與適應管徑變化之潛力 [7]。Takayama 與 Hirose 所提出之 Souryu-I 連結式履帶車亦說明，狹窄且彎曲空間中的檢測機器人需具備良好的通過性與姿態穩定性 [8]。

基於上述背景，本研究開發一套用於管道內部定位與三維路徑重建之海洋管道機器人系統。機構設計上，採用壁壓式三輪結構，使機器人能緊貼管壁並維持於管道中心行進，以降低偏擺與滑動造成之量測誤差。感測系統整合慣性量測單元、磁力計與里程資訊，並透過四元數法進行姿態解算，以降低歐拉角奇異點與陀螺儀積分漂移對姿態估測之影響。本文進一步於小型管道實驗平台中進行牽引測試，驗證所提出系統於無外部 GPS 訊號環境下進行管內定位與三維路徑重建之可行性，作為後續海纜上岸段 HDD 管道竣工量測與智慧化維運之基礎。本文主要貢獻在於整合壁壓式管內載具、慣性感測姿態解算與定速牽引路徑積分方法，並透過往返量測誤差驗證系統重複性。

二、管道機器人設計

2.1 系統架構

本研究所開發之管道機器人主要作為管道內部定位與三維路徑重建之量測載具。系統設計目標為使機器人能於管道內穩定行進，並同步收集姿態、位移與環境感測資料，供後續姿態解算與路徑重建使用。整體系統包含機構本體、壁壓式移動機構、感測與資料記錄模組、電源模組及外部牽引系統，如圖 1 所示。

考量管道內部空間狹窄且可能存在坡度或彎曲，本研究採用壁壓式三輪機構作為主要支撐方式，三組車輪以約 120 度間隔配置於機器人外周如圖 2，並透過彈簧支撐結構產生向外壓力，使車輪可持續緊貼管壁。此設計可使機器人於不同姿態之管道中保持接近中心線位置，降低因偏擺、滑動或管

壁接觸不穩定所造成之量測誤差。相較於一般自由滑動式載具，壁壓式機構更適合應用於垂直、傾斜或彎曲管段之內部量測。

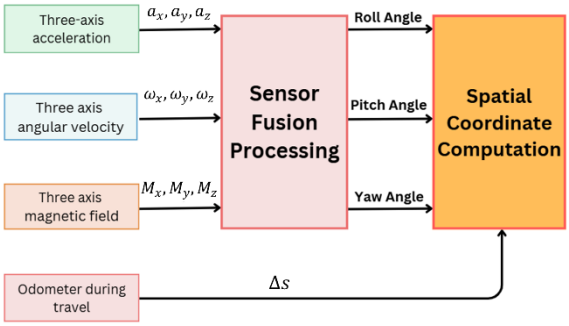


圖 1：系統架構圖

在移動方式上，本研究採用外部牽引式設計，由管道外部之馬達與捲線盤提供拉力，使管道機器人沿管道軸向前進。此方式可避免在機器人內部設置主動驅動馬達所造成之體積增加、振動干擾與供電負擔，並可透過控制牽引速度提升量測過程之穩定性。本研究於實驗中使用定速牽引方式，使機器人以近似等速度通過管道，並以牽引速度與時間資料估算行進距離，作為三維路徑重建之位移輸入。



圖 2：車輪壁壓機構設計

感測系統方面，機器人搭載慣性量測單元、磁力計與里程資訊紀錄模組(由定速牽引速度與取樣時間推估)，電路板如圖 3 所示。慣性量測單元包含三軸加速度計與三軸陀螺儀，可分別量測機器人之加速度與角速度；磁力計則用於提供航向角修正資訊，以降低陀螺儀長時間積分所產生之漂移。所有感測資料皆依時間序列記錄，包含時間戳記、三軸加速度、三軸角速度、三軸磁場與姿態資訊，並於量測完成後匯出至電腦端進行後處理分析。



圖 3：管道機器人感測收集板(左)正面、(右)背面

資料處理流程上，機器人於進入管道前先進行時間同步與初始姿態校正，並於管道內移動過程中連續收集感測資料。量測完成後，透過四元數法進行姿態解算，再結合牽引位移資訊進行坐標轉換與路徑積分，進而重建管道之三維空間軌跡。整體而言，本系統透過壁壓式三輪機構提升管內行進穩定性，並結合慣性感測與定速牽引資料，建立一套適用於無外部 GPS 訊號環境之管道內部定位架構。

2.2 姿態解算

管道機器人於管道內部移動時，其姿態會隨管道坡度、彎曲及機器人本體旋轉而改變。由於管道內部無法接收 GPS 訊號，機器人之姿態資訊需仰賴慣性量測單元與磁力計進行推估。本研究主要使用之量測資料包括三軸加速度計輸出 a_x, a_y, a_z、三軸陀螺儀輸出 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$、三軸磁力計輸出 M_x, M_y, M_z，以及時間、航向角、俯仰角、翻滾角等資訊。部分資料亦包含里程計訊號，用以輔助分析或進行位置估算。若僅使用陀螺儀量測之角速度進行時間積分，雖可取得短時間內連續且平滑之姿態變化，但容易受到零偏誤差影響，導致長時間量測後產生累積漂移。另一方面，加速度計可在低動態條件下提供重力方向資訊，用於修正俯仰角與翻滾角；磁力計則可量測地磁方向，用於修正航向角。然而，加速度計與磁力計容易受到震動、局部加速度及外部磁場干擾影響，因此不宜單獨作為姿態估測依據。基於此，本研究結合三種感測器之特性，以陀螺儀作為短時間姿態預測來源，並利用加速度計與磁力計作為回授修正，以降低姿態漂移。

為避免感測器於行進過程中旋轉、鬆動或震動過大造成姿態估測異常，研究中亦將感測器與電池固定於機器人本體，並透過前後牽引點設計減少經過接頭或彎折處時之不規則擾動。由於管道機器人於管道中前進時，載具姿態會隨路徑變化而產生旋轉。若僅使用歐拉角進行姿態表示，容易因連續旋轉或多軸變化產生累積誤差與數值不穩定現象。因此，本研究採用四元數表示機器人相對於大地坐標系之姿態，其形式可表示為：

$$q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T \tag{1}$$

其中，q_0 為純量部，q_1、q_2、q_3 為向量部。相較於歐拉角表示法，四元數可避免萬向節鎖死問題，並具有較佳之數值穩定性，適合用於管道機器人於封閉空間中連續旋轉之姿態描述。

陀螺儀量測之角速度可表示為：

$$\omega = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \tag{2}$$

四元數之更新可由角速度積分取得，其關係式如下：

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \tag{3}$$

其中，$\otimes$ 表示四元數乘法。為避免陀螺儀積分誤差隨時間累積，本研究將加速度計量測之重力方向

與磁力計量測之地磁方向作為修正依據。首先，將加速度計與磁力計量測值正規化，並與目前姿態估測下之理論重力方向及地磁方向進行比較，以取得姿態誤差。接著，將此誤差作為回授項修正陀螺儀角速度，再進行四元數更新與正規化處理。

本研究之姿態解算流程為：

(1). 讀取三軸加速度、三軸角速度與三軸磁場資料。
(2). 將加速度計與磁力計量測值正規化。
(3). 由陀螺儀角速度預測下一時刻姿態。
(4). 利用重力方向修正俯仰角與翻滾角漂移。
(5). 利用地磁方向修正航向角漂移。
(6). 更新四元數並轉換為航向角、俯仰角與翻滾角。

完成四元數姿態估測後，可進一步將其轉換為歐拉角形式，以取得航向角（Yaw）、俯仰角（Pitch）與翻滾角（Roll）。其中，航向角用於描述管道於水平面內之方向變化，俯仰角用於描述管道之坡度變化，兩者為後續三維路徑重建之主要輸入參數。由於管道機器人於行進過程中可能產生繞自身前進軸之旋轉，直接使用翻滾角可能造成路徑判斷誤差，因此本研究主要採用航向角與沿前進方向估算之坡度角進行管道中心線重建。

透過上述多感測器融合與四元數姿態解算方法，本研究可在無外部定位訊號之環境下，連續估測管道機器人於管道內部之姿態變化，並降低陀螺儀長時間積分所造成之角度漂移，為後續三維管線重建提供穩定之姿態資訊。

2.3 坐標轉換與路徑重建

完成姿態解算後，需將管道機器人於附體坐標系中量測之姿態與位移資訊轉換至固定坐標系，才能進一步重建管道於三維空間中的路徑。本研究假設管道機器人於行進過程中保持接近管道中心線，且其前進方向與管道軸向一致。因此，可利用姿態解算所得之航向角與俯仰角，配合里程資訊，逐步推算機器人在固定坐標系下的位置變化。

本研究將固定坐標系定義為 X、Y、Z 三軸，其中 X與 Y軸位於水平面，Z 軸為垂直方向。機器人於第 k個取樣時間點之位置可表示為：

$$\mathbf{p}_k = [x_k \quad y_k \quad z_k]^T \tag{4}$$

其中，x_k、y_k、z_k 分別為機器人在三維空間中之坐標。若第 k個取樣區間之位移量為 Δs_k，航向角為 ψ_k，俯仰角為 θ_k，則可將機器人沿管道方向之位移轉換為固定坐標系下之三軸位移分量，並透過前一時間點位置與當前位移量累加，取得機器人之位置更新：

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta s_k \begin{bmatrix} cos\theta_k cos\psi_k \\ cos\theta_k sin\psi_k \\ sin\theta_k \end{bmatrix} \tag{5}$$

若以管道入口作為起始點，並令 $\mathbf{p}_0 = [0,0,0]^T$，則依時間序列逐步累加各取樣點之位移，即可得到管道機器人於管道內部之三維運動軌跡。由於本研究之機器人採用壁壓式三輪機構，可使載具在管道中維持接近中心線位置，因此所重建之機器人運動軌跡可視為管道中心線之近似路徑。

在里程估算方面，本研究採用外部定速牽引方式，使機器人以近似等速度於管道內移動。若牽引速度為 v，相鄰取樣時間間隔為 Δt_k，則位移量可表示為：

$$\Delta s_k = v\Delta t_k \tag{6}$$

其中，牽引速度可由馬達轉速與捲線盤半徑推估，或由里程計資料取得。透過定速牽引條件，可避免直接由加速度積分推估位移所造成之長時間漂移問題，提升路徑重建之穩定性。

然而，實際量測過程仍可能受到感測器雜訊、機器人震動、管壁摩擦及局部滑動等因素影響，使姿態角與位移估算產生誤差。為降低上述誤差對重建結果之影響，本研究於後處理過程中對航向角與俯仰角進行平滑處理，並排除明顯異常之感測資料。由於實際管道之幾何變化通常具有連續性，坡度與方向不會產生瞬間劇烈跳變，因此透過平滑與異常值處理，可使重建路徑更符合實際管道特性。

完成路徑積分後，可得到管道之三維軌跡點集合：

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \cdots, \mathbf{p}_n\} \tag{7}$$

其中，$\mathbf{P}$ 代表重建後之管道中心線。後續可將此三維軌跡與已知管道配置、入口與出口位置或實驗平台量測結果進行比對，以評估本研究方法之準確性與可行性。

綜合而言，本研究透過四元數姿態解算取得航向角與俯仰角，再結合定速牽引所提供之位移資訊，逐步推算機器人於固定坐標系下之位置變化，進而完成管道三維路徑重建。此方法不依賴外部 GPS 訊號，適合應用於地下管道、HDD 管道及其他封閉式管線環境之竣工軌跡量測。

三、模擬環境測試

3.1 系統架構

為驗證本研究所開發之管道機器人於管道內部定位與三維路徑重建之可行性，本研究建立一套小型模擬管道測試平台。實驗平台主要包含測試管道、管道機器人、外部牽引裝置、感測與資料記錄模組，以及後處理分析系統，如圖 4 所示。透過此平台，可模擬管道機器人在封閉管道中移動之情形，並收集姿態與位移資料，以進行後續路徑重建分析。

本研究之測試管道採用 8 英吋 PVC 管道組成，外徑約為 200 mm，內徑約為 188–192 mm。

由於 PVC 管道具備一定剛性，且可形成可控制之實驗路徑，因此適合作為初步驗證平台。管道機器人置於管道內部後，藉由壁壓式三輪機構使車輪緊貼管壁，並使機體盡量維持於管道中心線附近，以降低偏心運動對姿態與路徑估測造成之影響。



圖 4：實驗管道外觀

在牽引系統方面，本研究於管道端部設置低速直流馬達與捲線盤，透過外部牽引方式控制管道機器人沿管道軸向移動。實驗中馬達以固定轉速運轉，使機器人以近似等速度於管道內前進。根據馬達轉速與捲線盤半徑，可推估牽引速度，並將時間序列資料轉換為位移資訊，作為三維路徑重建之輸入。相較於主動輪式驅動，外部牽引方式可降低機器人內部機構複雜度與驅動振動對感測資料之干擾。

感測與資料記錄系統方面，管道機器人內部搭載慣性量測單元、磁力計、時間同步模組與資料記錄模組。量測過程中，系統連續記錄三軸加速度、三軸角速度、三軸磁場與時間戳記等資料。實驗開始前，先進行感測器初始校正與時間同步，使不同感測資料能對應至相同時間基準。量測完成後，將記錄資料匯出至電腦端，進行姿態解算、坐標轉換與三維路徑重建。

透過此模擬管道測試平台，本研究可在可控環境下評估管道機器人之行進穩定性、感測資料連續性與三維路徑重建結果，作為後續應用於實際 HDD 管道量測前之初步驗證。

3.2 實驗流程與量測方法

本研究之整體測試流程包括感測器校正、時間同步、管道內牽引量測、資料匯出與後處理分析，並於後處理階段完成姿態解算與三維路徑重建。於實驗開始前，先啟動管道機器人之感測與資料記錄系統，確認三軸加速度計、三軸陀螺儀與磁力計皆可穩定輸出資料，並進行初始姿態校正，使量測資料具有一致之時間與姿態基準。

完成校正後，將管道機器人置入模擬管道中，並確認壁壓式三輪機構可使車輪緊貼管壁，使機器人於管道內保持穩定且接近中心線之狀態。隨後利用外部低速馬達與捲線盤進行牽引，使機器人以近似等速方式沿管道軸向前進。量測過程中，資料記錄模組連續收集時間戳記、三軸加速度、三軸角速度與三軸磁場資料，作為後續姿態解算與路徑重建之依據。

在位移估算方面，本研究利用定速牽引條件，根據牽引速度與取樣時間間隔估算機器人於各時間步之移動距離。由於本研究主要目的為驗證姿態解算與三維路徑重建之可行性，採用定速牽引可降低主動驅動振動與速度不穩定對量測結果之影響，並避免直接由加速度積分估算位移所造成之長時間漂移。

量測完成後，將記錄資料匯出至電腦端進行後處理分析。首先，利用三軸加速度、角速度與磁場資料進行四元數姿態解算，取得機器人於各取樣時間點之航向角、俯仰角與翻滾角。接著，結合牽引位移資訊進行坐標轉換與路徑積分，逐步推算機器人在固定坐標系下之位置變化，並重建管道三維路徑。

為評估重建結果之合理性，本研究將重建軌跡與實驗管道之實際配置進行比對，並觀察其整體方向、坡度變化與往返量測結果之一致性。若重建路徑能反映管道實際幾何趨勢，且往返測試之累積誤差維持於合理範圍內，則可驗證本研究所提出之管道內定位與三維路徑重建方法具有可行性。

3.3 驗證方式與誤差評估

為評估本研究所提出之管道內定位與三維路徑重建方法之可行性，本研究以模擬管道之實際配置、牽引距離及往返量測結果作為驗證依據。由於三維路徑重建係由姿態角與位移資訊逐步累加而得，若姿態估測或里程推算存在誤差，將會反映於重建軌跡之偏移與累積誤差中。因此，本研究分別從軌跡趨勢、里程合理性與往返重複性三個面向進行評估。

首先，本研究利用光達量測實驗管道之外部幾何配置，作為重建軌跡整體走向與坡度變化之參考基準。由於管道機器人量測所得之路徑可視為管道中心線之近似軌跡，而光達量測主要反映管道外部幾何形狀，因此本研究之比對重點並非逐點絕對坐標誤差，而是重建軌跡是否能反映實驗管道之主要走向、坡度變化與空間幾何趨勢。若重建結果與實際管道配置具有一致之變化趨勢，則表示姿態解算、坐標轉換與路徑積分流程具有合理性。

其次，本研究以管道實際長度與牽引距離作為里程估算之檢核依據。由於本研究採用定速牽引方式估算各時間步之位移量，牽引距離是否與實際管道長度相符，將直接影響三維路徑重建之尺度正確性。因此，透過比較實際管道長度、牽引距離與重建路徑長度，可確認位移估算是否落於合理範圍。

最後，為檢驗量測之重複性與穩定性，本研究採用往返量測方式進行驗證。管道機器人由起點牽引至終點後，再反向牽引返回起點，並重複進行量測。理論上，若姿態解算與路徑重建結果穩定，往返重建軌跡應具有相近之幾何形狀，且最終位置應接近起始點。因此，本研究以往返量測後之終點偏差作為累積誤差指標，用以評估系統於重複量測條件下之穩定性與可靠性。

本研究以重建軌跡之最終位置與理論回到起點位置之差異作為回位誤差，其計算方式如下：

$$e = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + (z_n - z_0)^2} \quad (8)$$

其中，(x_0, y_0, z_0) 為起始點坐標，(x_n, y_n, z_n) 為往返量測後之最終坐標，e 為累積回位誤差。為進一步比較不同路徑長度下之誤差比例，本研究亦計算相對誤差：

$$e_r = e/L \times 100\% \quad (9)$$

其中，L 為量測總路徑長度，e_r 為相對誤差百分比。

四、結果與討論

4.1 感測資料收集結果

依據本研究之實驗流程，管道機器人於實驗管道內來回移動兩趟，實驗過程中可持續收集姿態與運動相關資料，包含時間、航向角、俯仰角、翻滾角、三軸加速度、三軸角速度及三軸磁場等資訊。上述資料由資料記錄模組進行儲存，並於量測完成後匯出至電腦端，作為後續姿態解算與三維路徑重建之基礎。

由量測結果可知，管道機器人在移動過程中，各感測器均能連續輸出時間序列資料，顯示本研究所設計之感測收集系統具備基本資料記錄能力。三軸加速度資料可反映機器人於管道內之重力方向與局部震動變化；三軸角速度資料則可呈現機器人於行進過程中之旋轉狀態；磁力計資料則提供航向角估測所需之地磁方向資訊。上述資料可共同作為四元數姿態解算之輸入。

如圖 5 所示，在加速度量測結果中，由於本研究採用低速定速牽引，機器人所受動態加速度相對較小，因此加速度訊號主要反映重力分量。當機器人姿態或管道坡度改變時，各軸向加速度分量會產生相應變化，可用於推估管道坡度與機器人俯仰狀態。然而，在機器人通過管道接頭或產生局部晃動時，訊號中仍可能出現短暫尖峰，顯示機械震動與接觸狀態會影響原始量測資料。

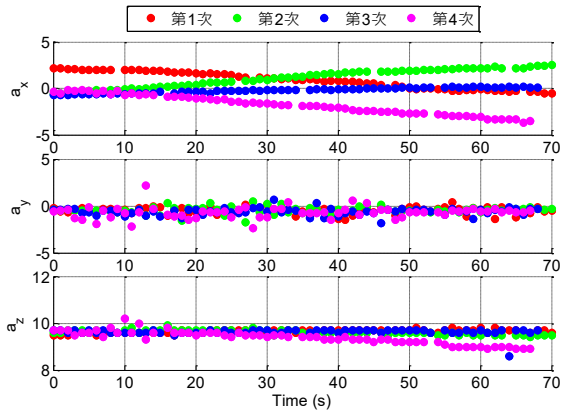


圖 5：管道機器人加速度量測成果

如圖 6 所示，在角速度量測結果中，可觀察到管道機器人於牽引過程中存在小幅旋轉與姿態變化。由於機器人採用壁壓式三輪機構，其行進過程大致穩定，但管壁摩擦、牽引線張力變化與管道接頭仍可能造成短暫角速度擾動。此類角速度資料可用於推估姿態變化，但若直接長時間積分，將可能造成角度漂移，因此後續需結合加速度計與磁力計進行多感測器融合修正。

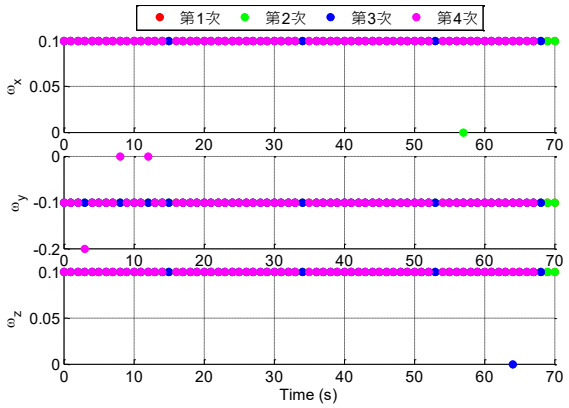


圖 6：管道機器人角速度量測成果

磁力計量測結果則可反映機器人行進過程中相對於地磁方向之變化，作為航向角估測之依據。由於磁力計容易受到周圍金屬物件、電流或局部磁場干擾影響，因此其原始資料可能較加速度資料具有較大波動。本研究於後續姿態解算中並未單獨使用磁力計資料，而是將其作為航向角回授修正來源，以降低陀螺儀積分漂移並提升長時間姿態估測穩定性。

整體而言，感測資料收集結果顯示，本研究所開發之管道機器人可於管道內移動過程中穩定取得加速度、角速度與磁場資料。雖然原始資料仍受到局部震動、管壁接觸與磁場干擾影響，但透過後續四元數姿態解算、資料平滑與異常值處理，可將上述感測資料轉換為可用於管道三維路徑重建之姿態資訊。此結果證實本研究所建置之感測與資料記錄系統具有應用於管道內定位之可行性。

4.2 路徑重建結果

完成感測資料收集後，本研究進一步利用四元數姿態解算結果與牽引位移資訊進行三維路徑重建。首先，將三軸加速度、角速度與磁場資料輸入姿態解算演算法，取得管道機器人於各取樣時間點之航向角、俯仰角與翻滾角，結果如圖 7。接著，依據定速牽引條件估算各時間區間之位移量，並結合航向角與俯仰角進行坐標轉換與路徑積分，逐步重建管道機器人在模擬管道內部之三維移動軌跡。

由圖 8 的重建結果可知，管道機器人之三維路徑能呈現連續且平滑之空間變化趨勢，並可反映實驗管道之主要幾何走向。圖中四次量測軌跡具有相近之空間趨勢，顯示本系統在重複牽引條件下可獲得一致之三維重建結果。由於本研究採用壁壓式三輪機構，使機器人於管道內保持接近中心線行進，因此重建所得之機器人移動路徑可視為管道中心

線之近似結果。整體而言，重建軌跡未出現明顯不連續跳動，顯示姿態解算與位移積分流程具有良好穩定性。

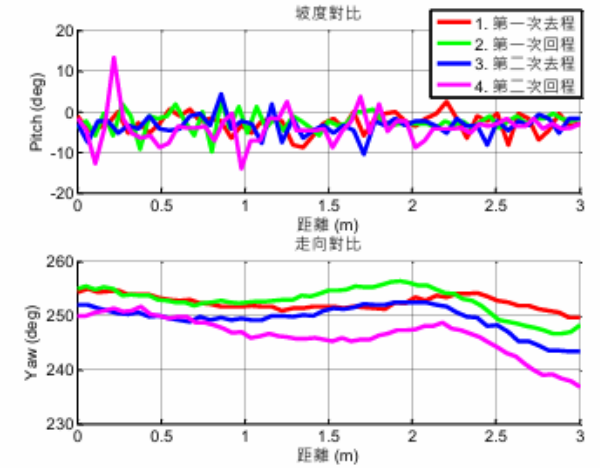


圖 7：量測過程之姿態角變化

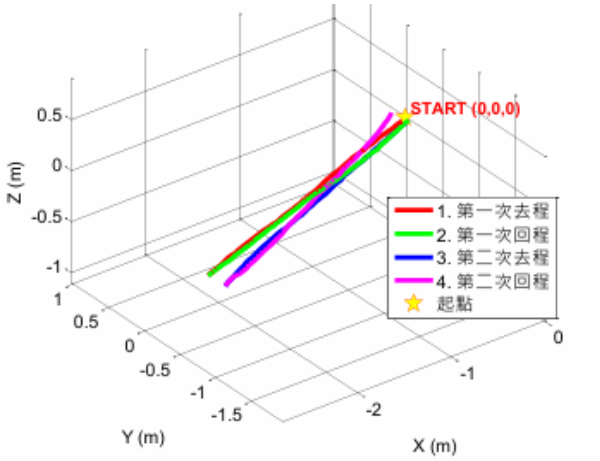


圖 8：管道機器人三維路徑重建結果

在坡度變化方面，重建路徑可反映管道沿垂直方向之高度變化。由於實驗平台本身具有一定坡度，機器人於管道中移動時，俯仰角估測結果會影響 Z 軸方向之路徑變化。實驗結果顯示，經由加速度計重力分量與四元數姿態解算所得之坡度資訊，可用於描述管道之垂直幾何趨勢，並可避免單純由加速度積分推估位置所造成之漂移問題。

4.3 誤差分析與討論

在水平走向方面，航向角主要由陀螺儀積分與磁力計回授修正共同決定。若僅依賴磁力計資料，容易受到環境磁場干擾而產生局部波動；若僅依賴陀螺儀積分，則會隨時間產生角度漂移。本研究透過多感測器融合方式修正航向角，使重建路徑在水平面內能維持較穩定之方向變化，並降低長時間量測造成之累積誤差。

為進一步檢驗路徑重建結果之重複性，本研究採用往返量測方式進行測試。管道機器人由起點牽引至終點後，再反向牽引返回起點，並重複進行量測。實驗結果顯示，往返重建軌跡具有相近之幾何趨勢，最終回位點亦接近初始位置。經計算，兩次往返後之累積回位誤差約為 **0.02 m**，約占總路徑長度之 **0.13%**。此結果顯示，在模擬管道與定速牽引條件下，本研究所提出之姿態解算與三維路徑重建方法具有良好之重複性與可行性。

然而，重建結果仍可能受到感測器雜訊、牽引速度微小變化、管道接頭震動、機器人局部滑動與磁力計干擾等因素影響。尤其在管道接頭或摩擦變化較明顯之位置，可能造成姿態角短暫波動，進而使重建軌跡產生局部偏差。因此，後續可透過提高取樣頻率、加強感測器固定、加入異常值濾除與平滑處理，以及利用已知控制點進行校正，以進一步提升長距離管道重建精度。

五、結論

本研究針對水平導向鑽掘（HDD）管道竣工後實際空間軌跡難以掌握之問題，開發一套結合壁壓式三輪載具、慣性感測與三維路徑重建方法之管道內定位系統。系統整合壁壓式三輪機構、慣性量測單元、磁力計與位移估算方法，使管道機器人可於管道內穩定行進，並連續記錄姿態與運動資訊，作為後續路徑重建之基礎。

在演算法方面，本研究採用四元數法進行姿態解算，並結合加速度計與磁力計量測資料修正陀螺儀積分漂移。透過此多感測器融合架構，可取得管道機器人於行進過程中之航向角與俯仰角，再搭配定速牽引所推估之位移資訊，進一步完成坐標轉換與三維路徑重建。此方法可避免直接由加速度積分估算位置所造成之長時間漂移，並適用於無外部 GPS 訊號之封閉管道環境。

實驗結果顯示，本研究所建置之感測與資料記錄系統可穩定收集三軸加速度、三軸角速度、三軸磁場與時間序列資料，並可進一步完成姿態解算與管道三維路徑重建。於模擬管道平台之往返量測測試中，重建軌跡可反映管道之主要幾何走向與空間變化趨勢。兩次往返量測後之累積回位誤差約為 0.02 m，相對誤差約為 0.13%，顯示本研究方法於實驗尺度下具有良好重複性與可行性。

整體而言，本研究完成了從管道機器人機構設計、感測資料收集、姿態解算至三維路徑重建之完整流程，驗證了利用管道機器人進行 HDD 管道內部定位之可行性。未來研究可朝提高感測資料取樣頻率、強化機器人抗震與固定設計、加入異常值濾除與磁偏角修正機制，以及結合外部控制點或閉環校正方法等方向進一步發展，以提升長距離管道量測之精度與穩定性，並作為海纜上岸段管道竣工量測、缺陷檢測與智慧化維運之技術基礎。

謝誌

本研究承蒙國家科學及技術委員會計畫「海洋管道機器人研發計畫」經費補助，計畫編號 NSTC 113-2221-E-002-164，特此致謝。

參考文獻

[1] 蘇鴻祺、林道宏、傅佩傑，導鑽 HDD 工法，現代營建，36-42 頁，2009 年。

[2] Watson, P. D., *Installation of Pipelines by Horizontal Directional Drilling: An Engineering Design Guide*, PRCI, Texas, 1995.

[3] Chen, S., Wu, J., Huang, X., and Li, J., "An accurate localization method for subsea pipelines by using external magnetic fields," *Measurement*, vol. 147, 106803, 2019.

[4] Laichoubi, M. M., Berthelot, L., Benet, V., Hu, M., Oubelhadj, A., Kouek, M., and Pinet, M., "Pipeline 3D-Positioning at River Crossing: Long-Range Magnetic Mapping via Unmanned Aerial System (UAS)," *Pipeline Technology Conference 2023*, Berlin, 2023.

[5] Mills, G. H., Jackson, A. E., and Richardson, R. C., "Advances in the Inspection of Unpiggable Pipelines," *Robotics*, vol. 6, no. 4, Art. no. 36, 2017.

[6] O'Rourke, S., "Large Pipe Inspection Technologies: Laser, LiDAR, and Manned Entry," Hazen and Sawyer, 2020.

[7] 黃彥皓，三輪軸壁壓式管道機器人之研究，碩士論文，國立臺北科技大學機電學院製造科技研究所，2014 年。

[8] Takayama, T. and Hirose, S., "Development of Souryu-I Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space," *Proceedings of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 143-148, 2000.

基於深度學習之台灣東北海域海床生物影像自動辨識

薛芳妤[1]　周佑誠[2]

摘要

深海環境長期受限於觀測困難與資料取得不易，仍有大量未知的生物與生態特徵有待探索。隨著水下無人載具技術的發展，高解析度海床影像得以大量取得，然而其資料量龐大，傳統人工判讀方式在時間與人力上皆面臨限制。本研究利用國立中山大學海下科技研究所自行研發之深海拖曳式載具所取得之台灣東北海域海床影像，進行影像前處理、資料篩選與資料增強，建立深海生物影像資料集，並採用 YOLOv8 深度學習模型進行自動辨識。本研究針對九類海床生物建立訓練資料集，並透過影像標註與資料擴增提升模型學習效果。實驗結果顯示，所建構之模型整體辨識準確率可達約 88%，顯示其具備初步辨識不同類群深海生物之能力，並可用於輔助大規模影像資料之篩選與初步分類。相較於傳統人工判讀方式，本方法可提升影像分析效率，並降低人力負擔。本研究成果可作為深海生物影像分析之參考，並具應用於生物多樣性調查之潛力。

關鍵詞：深度學習、YOLOv8、深海生物影像、台灣東北海域、影像辨識

Deep Learning-Based Automated Identification of Seafloor Organisms in Northeastern Taiwan

Fang-Yu Hsueh[1]　Yu-Cheng Chou[2]

ABSTRACT

The deep-sea environment remains difficult to investigate due to challenges in observation and data acquisition. Although advances in underwater unmanned vehicles enable large-scale collection of high-resolution seafloor imagery, the data volume makes manual interpretation time-consuming and labor-intensive. This study utilizes seafloor imagery from the northeastern waters of Taiwan, acquired using deep-towed vehicles developed by the Institute of Undersea Technology, National Sun Yat-sen University. Image preprocessing, data filtering, and data augmentation were performed to construct a dataset, and a YOLOv8 deep learning model was employed for automatic recognition. A training dataset consisting of nine categories of seafloor organisms was established. The model achieves an overall recognition accuracy of approximately 88%, demonstrating its preliminary capability to distinguish different organism groups and to support large-scale image screening and classification. The proposed approach improves analysis efficiency and reduces manpower requirements, with potential applications in biodiversity investigations.

Keywords: Deep learning; YOLOv8; Deep-sea biological imagery; Northeastern waters of Taiwan; Image recognition

一、緒論

根據美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 之定義 [1]，深海係指水深超過 200 公尺且光線難以抵達之海域。自 1997 年臺灣魚類資料庫 [2]建置以來，受惠於黑潮與中國沿岸流之交匯，以及多樣化的棲地環境，臺灣已累積逾 3,200 種魚類紀錄。儘管臺灣周圍海域之物種種類豐富，傳統海洋探測方式仍會受限於複雜之深海環境，欲深入瞭解深海生態仍為艱鉅之挑戰。隨著水下無人載具技術日新月異，運用其進行研究能夠下潛至潛水員不易到達之深度取得深海影像。此技術屬於非侵入性技術 (Non-invasive technique)，於進行調查之同時可減少傳統拖網調查對底棲生態造成之破壞。然而，水下載具攜回之影像資料量龐大，僅以人工方式逐步檢視，需耗費大量時間與人力。若能提升影像分析效

[1] 國立中山大學海洋科學系 大學部學生
[2] 國立中山大學海下科技研究所 副教授

率，讓人力能專注於後續較專業之資料分析過程，對深海研究的進展能提供重要的幫助。

本研究採用國立中山大學海下科技研究所自主研發之深海拖曳式載具，針對 2016 至 2017 年間於臺灣東北海域取得之海床影像進行分析。透過結合影像辨識技術與 YOLOv8 深度學習模型，旨在建立具備自動偵測與辨識深海生物功能之模型，以提升影像資料處理之自動化效率。

二、研究方法

2.1 研究地點

本研究之影像資料取自臺灣東北海域礦產資源潛能調查計畫[3, 4]。研究範圍涵蓋東經 122°35' 至 123°15'、北緯 24°47'19.2"至 25°30'之水域，水深約 1000 至 2000 公尺，具體位置如圖 1 所示[5]。根據 Chou 等人[6]之研究，從該區域之研究成果顯示隆堆地形(Mounds)常與熱液噴柱(Hydrothermal plumes)及熱液裂隙(Hydrothermal fissures)等熱液活動特徵同時出現。

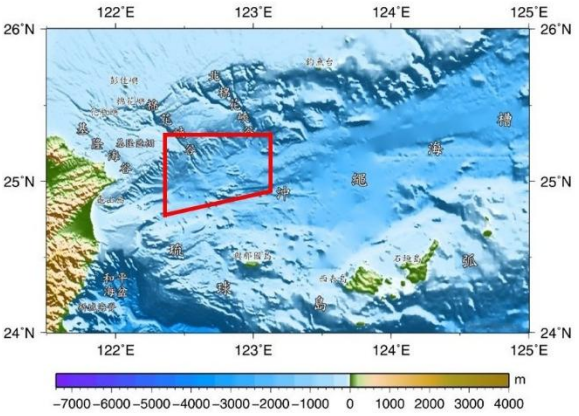


圖 1：研究區域圖(取自國科會海洋學門資料庫)。

2.2 海床影像處理

本研究採用之海床影像資料源自 2016 至 2017 年間，共計四個航次之觀測紀錄。針對單一航次長達數十小時之原始影像，為提升整理效率，首先以人工方式進行兩倍速初步審閱，並將含有生物目標之片段剪輯為獨立影像。為確保模型訓練具備充足之樣本數，本研究利用 Python 程式以每 0.5 秒為間隔自動擷取靜態影像。

於各生物類別影像分類前，首先排除非僅有海床畫面之影像，用於避免非目標物件干擾模型學習。接著，對於畫面中雖有生物但清晰度不足以辨別之影像，不納入初步模型訓練，另行留存作為後續測試使用。最後，刪除畫面中無生物之影像，即完成海床影像初步整理。海床影像處理流程如圖 2 所示。

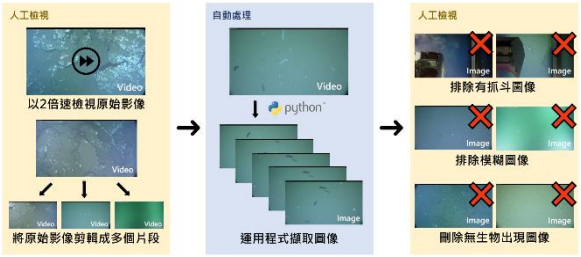


圖 2：海床影像處理流程圖。

2.3 生物種類

考量到影像解析度、水下載具拍攝距離及缺乏實體樣本佐證等限制，本研究未將生物分類細分至「種」階層，而係依據不同類群之影像可辨識程度，分別採用「綱」、「目」或「科」作為模型訓練之分類層級。其中，魚類外型鑑定主要參考《日本產魚類檢索》[7, 8]，依據魚體整體外型、體型比例及魚鰭相對於魚體之位置進行判別。

研究中共使用九類生物影像進行模型訓練，分別為黑頭魚科(Alepocephalidae)、海星綱(Asteroidea)、銀鮫目(Chimaeriformes)、十足目(Decapoda)、海蜥魚科(Halosauridae)、海參綱(Holothuroidea)、石蟹科(Lithodidae)、章魚科(Octopodidae)以及鮠鰯科(Ophidiidae)。模型訓練生物類別及各類別生物代表影像如表 1 與圖 3 所示。

表 1：模型訓練生物類別。

英文名稱	中文名稱	圖片編號	圖像數量（張）
Alepocephalidae	黑頭魚科	圖 9(a)	4081
Asteroidea	海星綱	圖 9(b)	3138
Chimaeriformes	銀鮫目	圖 9(c)	1988
Decapoda	十足目	圖 9(d)	1075
Halosauridae	海蜥魚科	圖 9(e)	3671
Holothuroidea	海參綱	圖 9(f)	7377
Lithodidae	石蟹科	圖 9(g)	1007
Octopodidae	章魚科	圖 9(h)	1216
Ophidiidae	鮠鰯科	圖 9(i)	8146

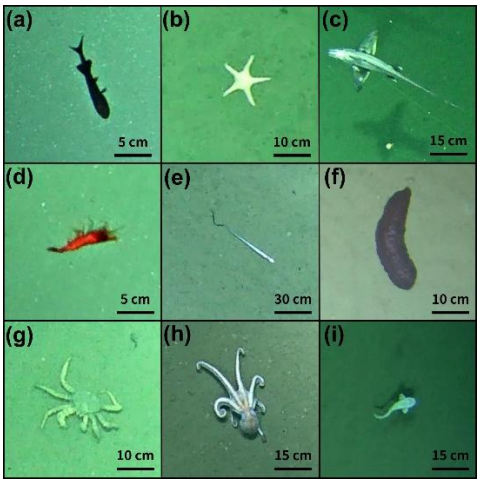


圖 3：各類別生物代表影像圖。

本研究針對九類深海生物影像建置深度學習模型之資料集。為避免模型因生物類別不均使得訓練結果產生偏差，每一類別均篩選出 500 張生物輪廓清晰且特徵顯著之影像。標註作業於 Roboflow 平台進行，以人工標註為主，並輔以系統自動標註功能；透過調整信心值(Confidence)門檻，僅保留高信心度之預標註結果，以提高人工校對效率。完成標註後，所有影像以填補黑色邊界之方式統一調整為 640×640 像素，以符合模型輸入需求並維持原始影像比例。所有影像皆進行資料擴增(Augmentation)以提升訓練資料多樣性，包括水平翻轉、垂直翻轉，以及同時進行水平與垂直翻轉三種操作。經資料擴增後，含原始影像在內，資料集規模擴增為原始資料數量之四倍，總計 18,000 張影像，並依比例劃分為訓練集(Training set)14,400 張、驗證集(Validation set)1,800 張以及測試集(Test set)1,800 張，各生物類別圖像資料如表 2 所示。

表 2：各生物類別圖像資料。

生物類別	圖像數量（張）		
	訓練集	驗證集	測試集
黑頭魚科 (Alepocephalidae)	1600	200	200
海星綱 (Asteroidea)	1600	200	200
銀鮫目 (Chimaeriformes)	1600	200	200
十足目 (Decapoda)	1600	200	200
海蜥魚科 (Halosauridae)	1600	200	200
海參綱 (Holothuroidea)	1600	200	200
石蟹科 (Lithodidae)	1600	200	200
章魚科 (Octopodidae)	1600	200	200
鮭鰯科 (Ophidiidae)	1600	200	200
共計	14400	1800	1800

2.4 YOLOv8 深度學習模型

本研究借鏡 Li 等人[9]基於改進 YOLOv5 模型進行底棲生物影像辨識之經驗，採用 YOLOv8 深度學習模型進行臺灣東北海域生物影像分析。此模型為 Ultralytics 公司於 2023 年推出之 YOLO(You Only Look Once)系列模型，具備即時目標偵測能力。該模型主要由三個部分組成：Backbone、Neck 及 Head。Backbone 負責自輸入影像中提取特徵；Neck 作為 Backbone 與 Head 之間的特徵融合結構；Head 則負責最終之目標分類與定位任務。

相較於先前版本之 YOLO 模型，YOLOv8 進行多項優化，包括正負樣本動態分配策略(Task-aligned assigner)、無錨偵測(Anchor-free detection)以及馬賽克資料擴增(Mosaic augmentation)。其中，正負樣本動態分配策略可依任務需求調整樣本權重；無錨偵測機制移除錨框限制以提升模型靈活性；馬賽克資料擴增則藉由拼接多張影像增加資料多樣性，提升模型穩定性。

本研究使用之資料集共包含 18,000 張影像與 22,952 個標註。考量訓練時間成本與模型準確度之平衡，在資料量與類別數相對有限之情況下，選擇 YOLOv8s (Small)作為本研究之訓練模型。

2.5 模型訓練環境

本研究之模型訓練皆於 Kaggle 平台[10]進行。使用者可藉由下載 Ultralytics 公司所提供之 YOLO 套件，依需求選擇不同版本之 YOLOv8 模型進行訓練。除特定參數需另行設定外，其餘均沿用模型預設配置。本研究採用 Kaggle 平台提供之 NVIDIA Tesla P100 GPU，提供高效能平行運算能力，適用於深度學習模型訓練。此種運算模式確保複雜之大規模資料處理得以在伺服器端運行，有效減輕使用者端設備的運算負載與硬體門檻。訓練環境示意圖如圖 4 所示。

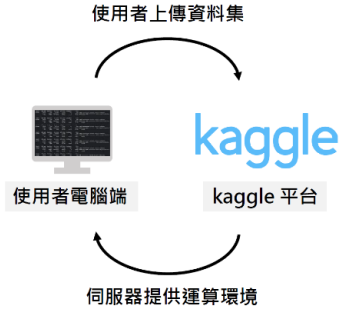


圖 4：訓練環境示意圖。

三、研究結果與討論

3.1 模型訓練參數

模型訓練相關超參數(Hyperparameter)設定如下：訓練週期(Epochs)為 400，表示模型將對訓練集進行 400 次完整訓練。將權重儲存間隔(Save period)設定為 20，以定期儲存訓練過程。批次大小(Batch size)設定為 64，使模型於每次訓練中以 64 張影像為一批進行更新。輸入影像尺寸(Image size)固定為 640×640 像素。此外，將耐心值(Patience)設為 1000，使模型於訓練過程中不會因短期性能停滯而過早停止訓練。於學習率設定方面，初始學習率(Initial learning rate, lr0)與最終學習率係數(Final learning rate fraction, lrf)皆設為 0.01，藉此平衡模型收斂穩定性與訓練末期效率。模型訓練超參數配置如表 3 所示。

表 3：模型訓練超參數配置。

超參數名稱	超參數數值	超參數名稱	超參數數值
Epochs	400	Seed	123
Save period	20	Patience	1000
Batch size	64	lr0	0.01
Image size	640	lrf	0.01

3.2 模型訓練過程分析

模型完成 400 個週期預計需耗時 28 小時。考量 Kaggle 平台單次運算時間上限為 12 小時，本研究採用恢復訓練(Resume training)方式進行模型訓練。整體訓練過程分為三個階段，分別為第 1 至 175 個 Epoch、第 176 至 350 個 Epoch、以及第 351 至 400 個 Epoch。於各階段結束時，下載當前中斷點權重檔(Checkpoint)，並於下一次執行時重新上傳至 Kaggle 平台，確保模型能銜接先前訓練進度。

3.3 模型測試結果

模型依據各生物類別之測試結果繪製混淆矩陣圖(Confusion matrix)，如圖 5 所示，可由矩陣中顏色深淺直觀觀察模型於各類別之辨識表現。由圖 5 可觀察到，海參(Holothuroidea)與石蟹(Lithodidae)於對角線位置具有較高數值，表示其正確分類比例較高；海星(Asteroidea)與鮣鰯(Ophidiidae)亦有相對穩定之辨識表現。整體而言，模型對海星、海參及石蟹等底棲生物之辨識表現優於多數魚類。推測其原因與此類生物於影像中姿勢較固定有關；相較之下，魚類於游動過程，其鰭部與身體擺動方向變化較大，使模型難以穩定擷取一致特徵，進而影響辨識表現。從圖中亦可觀察到，部分魚類影像，例如黑頭魚(Alepocephalidae)與銀鮫(Chimaeriformes)，較容易被誤分類為背景，顯示模型在區分與背景色相似之目標仍存在一定困難。

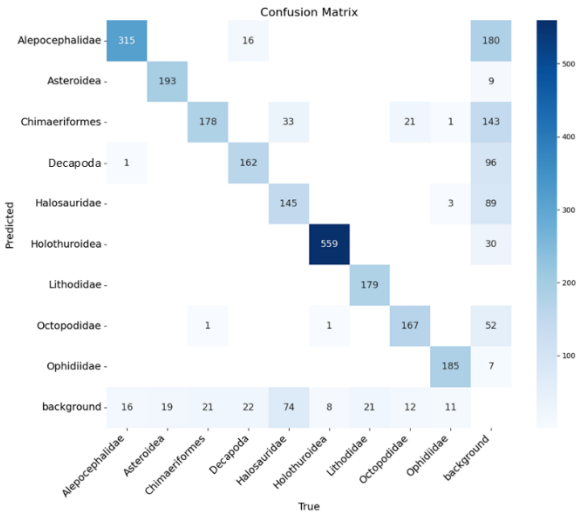


圖 5：混淆矩陣。

四、結論與未來展望

本研究結果顯示，模型對多數底棲生物具備良好之辨識能力，並可在一定程度上協助影像資料之初步篩選與分類。目前模型仍有進步空間，未來可朝三個方向發展：首先是增加資料的多樣性，納入生物互相遮擋或不同角度之影像，讓模型在複雜環境下亦能辨識不同類別的生物；其次為優化處理速度，讓模型搭載於水下載具時可達成即時偵測；最後為擴展調查實務，將技術應用於生物數量統計或行為觀察，能在不干擾生物與生態下，作為長期監測之調查方法。

謝誌

本研究承蒙國家科學及技術委員會大專學生研究計畫經費支持（計畫編號：NSTC 114-2813-C-110-035-E），特此致謝。

參考文獻

[1] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2013). *What is the deep ocean?* NOAA Ocean Explorer. https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/deep-ocean.html

[2] 邵廣昭（2019）。臺灣魚類資料庫〔網路電子版〕。取自 http://fishdb.sinica.edu.tw

[3] 陳信宏、周佑誠、王兆璋（2016）。臺灣東北海域礦產資源潛能調查－地球化學與海床觀測調查研究(1/4)海床表面礦物影像探查與採樣。經濟部地質調查及礦業管理中心報告，第 105-14-B 號，共 70 頁。

[4] 陳信宏、周佑誠、王兆璋（2017）。臺灣東北海域礦產資源潛能調查－地球化學與海床觀測調查研究(2/4)海床表面礦物影像探查與採樣。經濟部地質調查及礦業管理中心報告，第 106-14-B 號，共 57 頁。

[5] Ocean Data Bank, National Science and Technology Council, Taiwan. https://doi.org/10.5281/zenodo.7512112. Accessed April 7, 2026

[6] Chou, Y.-C., Wang, C.-C., Chen, H.-H., & Lin, Y.-H. (2019). Seafloor characterization in the southernmost Okinawa Trough from underwater optical imagery. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 30*(5).

[7] 中坊徹次（2013）。*日本産魚類検索全種の同定*（第三版，卷 I）。東海大学出版部。

[8] 中坊徹次（2013）。*日本産魚類検索全種の同定*（第三版，卷 II）。東海大学出版部。

[9] Li, Y., Bai, X., & Xia, C. (2022). An improved YOLOV 5 based on triplet attention and prediction head optimization for marine organism detection on underwater mobile platforms. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(9), 1230.

[10] Kaggle. (2022). *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community.* https://www.kaggle.com/

海洋監測產業關鍵人才與職務屬性之探討

張珮錡[1]　魏孟君[2]　周瑋珊[3]

摘要

隨著海洋科技持續發展及海洋產業領域逐步擴展，海洋監測相關技術在海域觀測、環境資料蒐集、監測設備操作與維運，以及海洋資料分析等面向的重要性日益提升。伴隨智慧監測設備與無人載具等技術發展，海洋監測產業之工作內容與技術需求逐漸多元化，產業對具備跨領域專業能力之人才需求隨之增加。然而，目前國內對於海洋監測產業之職務類型、人才需求，以及相關人才培育與職能發展規劃仍較缺乏。

本研究以海洋監測產業為研究範疇，透過盤點國內外相關資料，採次級資料分析法、專家訪談及專家團體會議等研究方法，結合質性資料之整理與綜合分析，統整海洋監測產業之發展現況、產業動態與人才需求關鍵面向。針對海洋監測相關職務之工作內容、專業知識與技能需求進行探討，分析產業所需之關鍵人才類型與主要職務類別，並整理各類職務之職務屬性與能力需求結構。

分析結果顯示，海洋監測產業之職務可大致區分為海域作業與陸域支援兩類型職務，其中海域作業職務主要涉及海洋探測與海上監測作業，陸域支援職務則涵蓋資料處理、系統開發與技術整合等工作內容。整體而言，透過產業資料分析與職務盤點結果顯示，「海洋探測」與「系統整合」可視為海洋監測產業之核心職類，顯示該產業對跨領域技術整合與專業能力之需求日益提升。

本研究之成果有助於建構海洋監測產業關鍵人才與職務屬性之分析架構，並可作為海洋產業人才培育、課程規劃及職能發展之重要參考依據。

關鍵詞：海洋監測產業、職務屬性、海洋產業人才培育

An Exploration of Key Talent and Occupational Attributes in the Marine Monitoring Industry

Pei-Chi Chang [1]　Meng-Chun Wei[2]　Wei-Shan Chou[3]

ABSTRACT

As marine technology continues to advance and the scope of the marine industry expands, the importance of marine monitoring technologies—including maritime observation, environmental data collection, operation and maintenance of monitoring equipment, and marine data analysis—has grown significantly. Alongside the development of smart monitoring equipment and unmanned vehicles, the work content and technical requirements of the marine monitoring industry are becoming increasingly diverse, leading to a rising demand for professionals with cross-disciplinary expertise. However, there is currently a lack of comprehensive research regarding job categories, talent requirements, and related talent cultivation and competency development planning within the domestic marine monitoring industry. Focusing on the marine monitoring industry, this study utilizes secondary data analysis, expert interviews, and expert group meetings to review domestic and international information. By combining qualitative data organization and synthesis, this research outlines the current development, industry dynamics, and key dimensions of talent demand within the sector. It explores the job descriptions, professional knowledge, and skill requirements of marine monitoring positions, analyzes key talent types and major job categories, and organizes the job attributes and competency structures for various roles. The results indicate that

[1] 國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心 副研究員
[2] 國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心 研究助理
[3] 國立成功大學水工試驗所 助理研究員

positions in the marine monitoring industry can be broadly categorized into "Maritime Operations" and "Land-based Support". Maritime operations primarily involve Marine Surveying and offshore monitoring, while land-based support covers data processing, system development, and technical integration. Overall, industry data analysis and job mapping identify "Marine Surveying" and "System Integration" as the core professional categories of the marine monitoring industry, highlighting the increasing demand for cross-disciplinary technical integration and specialized skills. The findings of this study contribute to the construction of an analytical framework for key talents and job attributes in the marine monitoring industry. They serve as an important reference for talent cultivation, curriculum planning, and competency development within the marine sector.

Keywords: Marine Monitoring Industry; Occupational Attributes; Marine Industry Talent Cultivation

一、緒論

隨著海洋科技持續發展與產業領域逐步擴展，海洋產業已成為推動全球經濟成長與科技創新的重要動力。在海洋監測技術涵蓋海域觀測、環境資料蒐集、監測設備操作與維運，以及海洋資料分析等面向，其重要性日益提升，不僅為科學研究奠定基礎，更是支撐海域空間規劃、資源管理與環境保護的關鍵工具，亦逐漸成為海洋產業發展的核心基礎。

在此發展趨勢下，人才培育成為支撐產業持續成長與國家競爭力的重要關鍵。透過教育體系與專業訓練的投入，可確保社會具備充足且優質的人力資源，以因應產業升級與技術變遷需求。尤其在數位轉型、能源轉型與環境永續等全球趨勢下，專業人才的持續投入更是提升國家韌性與發展動能的重要基礎。

伴隨全球藍色經濟的發展，我國海洋產業亦逐步擴展，涵蓋航運、漁業及海洋觀光等多元領域，近年更因離岸風電等新興產業的興起，其場域開發與運維過程高度依賴精準的海象監測技術，進而帶動整體海洋產業結構轉型與升級。海洋委員會作為我國海洋事務之主管機關，負責統籌協調海洋相關政策，自 2023 年《海洋產業發展條例》公布施行以來，持續推動產業發展與人才培育工作。其中，第 11 條明確指出應充分開發海洋人力資源，並整合產官學研能量以培育產業所需人才（張珮錡、謝馥蔓、鄭有容，2024）。

然而，現階段國內針對海洋監測產業在職務類型、人才供需、培育機制及職能發展等面向，仍缺乏系統性盤點與整體分析（林虹妤，2015）。隨著政府推動「智慧海洋」與「海洋科技創新」政策，監測產業正經歷顯著的技術變革，由傳統人力觀測轉型為高精度、長時程與遠端監控之智慧化系統。這不僅涉及感測技術（Sensing Technology）與自動化觀測系統（Autonomous Systems）的應用，更包含資料分析（Data Analytics）與人工智慧（AI Applications）的跨領域整合，此種跨領域整合趨勢導致既有人才結構與新興技術需求產生落差，對專業人才之需求亦顯著提升。

因此，為回應政策發展需求並補足現有研究缺口，本研究針對海洋監測產業人才發展進行系統性探討，期能建立具科學性、即時性與可追蹤性之人力資源盤點機制，掌握我國海洋產業人才之供需狀況、職能結構與發展趨勢，作為後續人才培育與政策規劃之重要依據（紀式勉，2018）。

二、海洋監測產業特性蒐整

2.1 海洋監測產業之發展趨勢與範疇

在全球海洋治理範疇中，「全球海洋觀測系統」（Global Ocean Observing System, GOOS）扮演核心角色。該系統由聯合國教科文組織政府間海洋學委員會（IOC-UNESCO）主導，旨在建立持續且整合性的國際觀測架構，確保全球尺度資料的長期蒐集與共享，並支援氣候研究、海洋管理及防災決策等多元需求（IOC-UNESCO, 2022）。

從應用面向觀之，GOOS 主要聚焦於三大核心領域。首先，在氣候監測方面，長期且持續的觀測有助於理解海水溫度、鹽度及洋流變化等關鍵參數，作為分析全球氣候變化之重要依據。此類應用涉及大量資料分析與模式建構，顯示相關職務需具備資料處理與科學分析能力。其次，在預報與預警應用上，海洋觀測資料為天氣預報與極端事件預測之基礎。透過即時觀測與資料傳輸機制，可強化對於颱風、風暴潮及海嘯等災害之預警能力。此類應用對監測設備操作、系統維運及即時判讀具有高度需求，反映相關職務需具備工程技術與實務操作能力（Bushnell et al., 2019）。再者，在海洋健康與生態管理方面，系統可監測海洋酸化、缺氧及有害藻華等問題，並支援生物多樣性保育與污染管理政策之制定。此類應用涉及環境監測與資料解讀，顯示人才需具備海洋科學與環境分析相關知識。

綜上所述，全球海洋觀測系統不僅為海洋科學研究之重要基礎設施，更在氣候變遷調適、防災減災及海洋永續管理等面向發揮關鍵作用。其多元應用場域亦反映海洋監測產業之發展範疇，並進一步顯示不同應用領域對應之職務內容與能力需求差異，為後續分析海洋監測產業關鍵人才與職務屬性提供重要依據。

2.2 關鍵人才理論與職能模型

在產業發展過程中的「關鍵人才」（Key Talent）係指對競爭優勢具重要影響之人力資源，具備高度

專業能力、不可替代性及核心貢獻等特質。相關研究指出，關鍵人才不僅影響營運效率與創新能力，更是支撐技術進步的重要基礎。因此，培育關鍵人才已成為人力資源管理的首要課題。

在分析人才能力結構方面，「職能模型」（Competency Model）為常用之理論工具。職能係指個人於職務中展現卓越績效所需具備之知識（Knowledge）、技能（Skills）與態度（Attitude），也強調職能需與職務需求及組織目標相互連結。在產業層級分析中，職能模型可協助釐清因技術轉型所帶動之人才需求變遷。

因此，關鍵人才理論確立了核心能力者的重要性，而職能模型則提供系統性分析架構。本研究將結合兩者觀點，作為辨識海洋監測產業關鍵人才與職務屬性之理論基礎。

2.3 海洋監測技術發展與職務屬性

海洋監測技術的更迭是驅動產業人才需求變遷的核心變數（毛華斌等，2022）。隨著全球海洋監測朝向智慧化發展，傳統以人工為主的觀測模式，正逐步轉型為自動化的智慧監測系統。根據相關研究與政策趨勢觀察，感測技術（Sensing Technology）、自主式水下無人載具（AUV）、遠端遙測（Remote Sensing）與大數據分析等技術的導入，不僅提升了觀測資料的廣度與精度，亦可能對該產業之職務屬性（Job Attributes）產生結構性影響。

此外，監測設備具備自主導航與即時資料傳輸能力，職務內容逐漸由傳統體力密集之現場作業，轉型為以岸基監控、遠端操作及系統維運為主之工作模式，使職務在作業場域上呈現高度彈性與遠端協作之特性。隨著技術進步，工作需要的能力也跟著改變，原以設備操作為主的工作，逐步延伸至跨系統整合、數據分析及資訊應用等複合性能力需求，使職務屬性由單一技術導向轉變為跨領域整合導向。此轉變顯示，海洋監測相關職務對於資料處理能力、系統整合能力及數位技術應用能力之需求顯著提升。

然而，海洋環境具備高鹽、高壓與強流等極端特徵，即便技術快速轉型，實務上仍需兼顧現場維修與對海洋物理特性的實地理解。因此，海洋監測技術的發展並非完全取代傳統職能，而是透過技術與人力的重新分工，促使職務屬性呈現出「海洋科學知能」與「智慧數位技術」高度融合的特質。本研究旨在透過後續實證分析，探討此類技術趨勢如何具體形塑現階段產業之關鍵職務屬性，並以此作為界定關鍵人才之依據。

2.4 海洋產業人才供需與盤點現況

在產業快速發展與技術轉型的背景下，海洋監測產業對人才之需求亦逐漸提升。相關研究指出，海洋產業人才需具備跨領域知識整合能力，涵蓋海洋科學、工程技術、資訊科技及資料分析等多面向能力，以因應產業發展需求（林虹妤，2015）。此外，隨著智慧監測設備與無人載具之導入，產業對於具備操作維運能力、系統整合能力及資料分析能力之專業人才需求日益增加。

相較之下，現行人才培育體系多偏重單一專業領域，與產業所需之跨領域能力之間仍存在落差，導致人才供需不均之現象。政策層面上，《海洋產業發展條例》亦明確指出應整合產官學研資源，以強化海洋產業人才培育機制（張珮錡等，2024）。

然而，現階段針對海洋監測產業之職務類型、職能需求及人才供需狀況，仍缺乏系統性盤點與分析，顯示該領域在人才發展規劃上仍有待進一步深化（紀式勉，2018）。

三、研究方法

本研究以海洋監測產業為研究範疇，透過盤點國內外相關文獻、政策資料與產業報告，採用次級資料分析法、深度訪談及專家團體座談會議等研究方法，針對海洋監測職務之工作內容、專業知識與能力需求進行分析，藉以歸納並界定產業關鍵人才類型及其核心職務類別。

在資料分析與驗證階段，採用系統化比對分析，將專家訪談所得之質性觀點與次級資料進行交叉比對，以強化研究結果之一致性與可靠性。透過對職務屬性與能力結構的深度剖析，歸納並界定產業所需之關鍵人才類型及其核心職務類別。最後，透過專家意見回饋進行內容修正，並運用三角檢證（Triangulation）進行信度檢測，亦參考 Morgan (2024) 針對質性研究嚴謹度之最新指引，透過多重資料來源（文獻盤點、深度訪談、專家座談）的相互印證與分析。此過程旨在降低單一研究法之偏誤與研究者之主觀偏見，並藉由產官學研不同視角之交叉對話（Hammerton & Munafò, 2021），降低研究者之主觀偏見，藉以提升研究之嚴謹性與信度，最終建構出具系統性且完整之海洋監測人才發展分析架構。

在實證蒐集方面，透過辦理 4 場次深度訪談及 4 場專家團體座談會議，並採實體或實體／線上混合方式進行，邀請海洋監測相關領域之產業代表，包括監測技術服務業者、海洋調查與研究機構、設備與系統開發單位及相關公協會代表等，並納入學界專家參與，廣納產、官、學、研多方意見，以確保研究結果兼具實務性與專業性。

四、結論與建議

在上述分析基礎上，本研究發現海洋監測產業鏈已逐步形成涵蓋儀器製造與整合、海上部署與維運、資料分析與可視化服務，以及決策應用與商業模式開發之體系。初步研究結果顯示，依據職務

屬性與作業場域差異，已盤點出「產業範疇與關鍵人力職務」（圖 1），並將海洋監測產業鏈的人才需求區分為陸域職缺與海域職缺（圖 2）。

在職務類型方面，陸域關鍵職缺包含儀器操作員、系統整合工程師及氣象工程師等，主要負責設備操作、系統整合與資料分析等工作；海域關鍵職缺則包含海洋探測工程師及 AUV／ROV 操作員，著重於海上監測作業與設備操作。

此外，海域職務亦延伸出多項關鍵職能，包括海上作業安全與潛水技術、海洋監測儀器部署與維運，以及水下載具操作與通訊控制等能力，顯示海洋監測工作具高度專業性與實務操作需求。

在人才培育方面，研究結果顯示，未來應強化海洋監測與資料處理實務、AUV／ROV 操作技術、海洋環境數據分析與視覺化能力、海上作業安全與應變能力，以及跨域整合與智慧監測系統應用等面向，以因應產業技術發展趨勢與實務需求。

整體而言，海洋監測產業已呈現由傳統作業導向轉型為智慧化與跨領域整合之發展趨勢，對人才之能力要求亦由單一專業轉向多元整合。本研究所歸納之職務分類與能力需求，可作為未來人才培育及相關政策規劃之重要參考依據。

進一步而言，海洋監測產業屬基礎性與支撐性產業，對海洋工程發展與資源保育具有關鍵作用；然而，現行政策尚未明確界定其產業定位，致使整體發展動能受限。另一方面，由於產業具高度專業門檻，惟教育體系與產業誘因相對不足，導致青年投入意願偏低，並逐漸形成師資與專業人才之結構性斷層。

目前人才培育多仰賴企業內部師徒制，培養期長且難以即時回應市場需求，亦反映產業徵才多未嚴格設限海洋相關專業背景，而採取「先進用、後培訓」之人力運用模式。

綜上所述，未來產業發展宜透過系統性產業盤點、建立與國際接軌之認證與基金制度，並強化跨部會及跨領域整合機制，以健全人才培育體系，進而促使海洋監測與測量產業成為臺灣海洋產業鏈之基礎支柱。

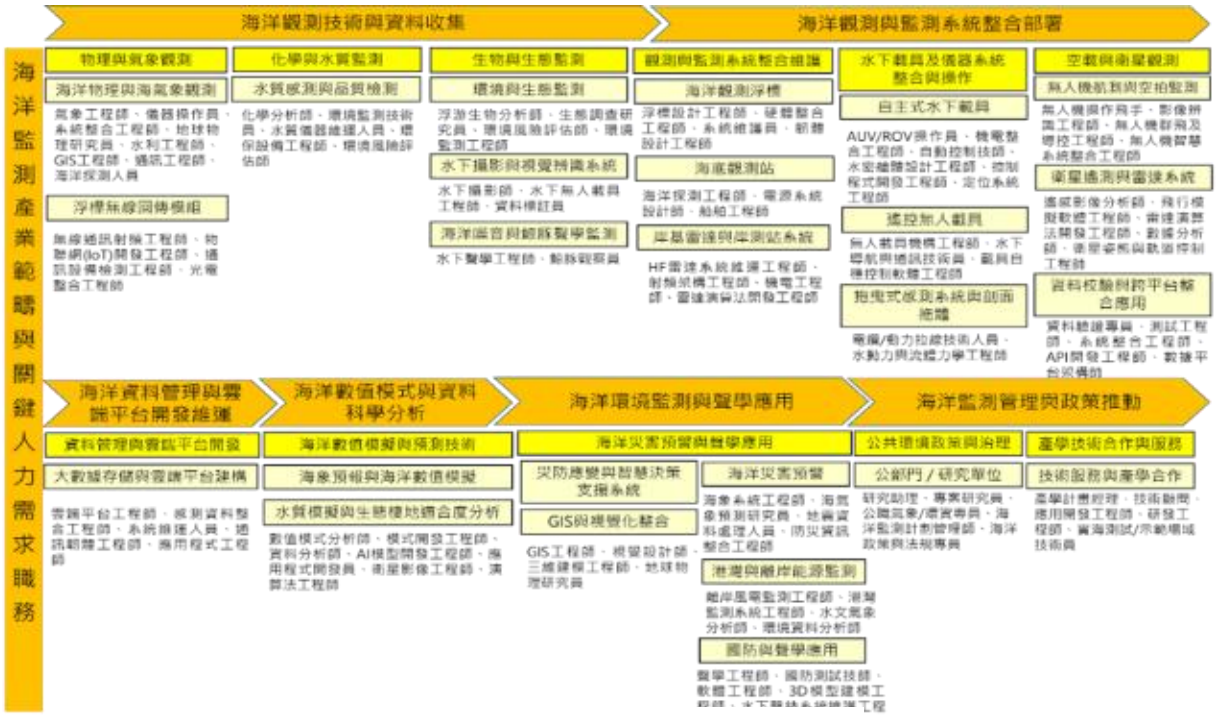


圖 1：產業範疇與關鍵人力職務

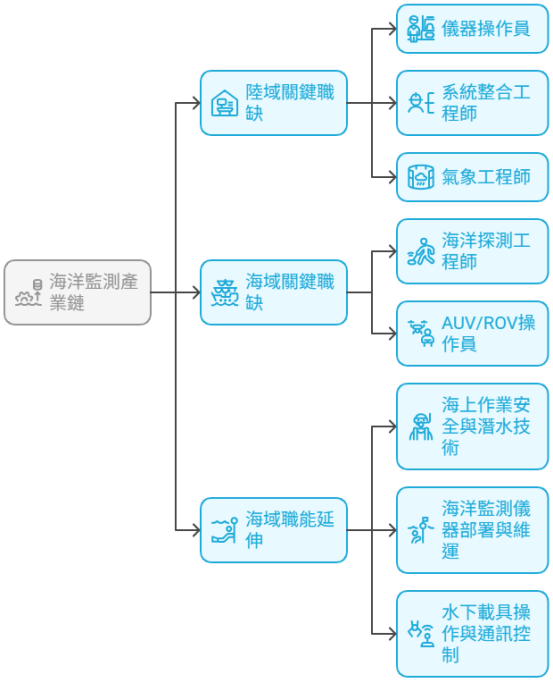


圖 2：海洋監測產業鏈

參考文獻

[1] 徐村和（1998）。模糊德爾菲層級分析法。*模糊系統學刊*，*4*(1)，59－72

[2] 林虹妤（2015）。我國重點產業人力供需推估之適切性分析 *臺灣經濟論衡*，*13*(3)， 87－96

[3] 紀式勉（2018）。海洋產業人才培育芻議。*海洋事務與政策評論*，*6*(1)，141－160。

[4] 行政院海洋委員會（2023）。*海洋產業發展條例*。

[5] 張珮錡、謝馥蔓、鄭有容(2024 年 5 月 10 日)。海洋產業環境永續職能初擬。2024 第 25 屆海洋與水下技術研討會，高雄市。

[6] 毛華斌、吳園濤、殷建平、唐丹玲、邱雲、張運海（2022）。海洋環境安全保障技術發展現狀和展望。*中國科學院院刊*，*37*(7)，870-880。

[7] Bushnell, M., et al. (2019). Quality Assurance of Oceanographic Observations: Standards and Guidance. *Frontiers in Marine Science*.

[8] Hammerton, G., & Munafò, M. R. (2021). Causal triangulation: Using complementary study designs to improve confidence in causal claims. *Psychological Methods*.

[9] IOC-UNESCO. (2022). *The Global Ocean Observing System 2030 Strategy*.

[10] Morgan, H. (2024). Using Triangulation and Crystallization to Make Qualitative Studies Trustworthy and Rigorous. *The Qualitative Report*, 29(7), 1844-1856.

[11] Mackinnon, I. (2020). *Labour market intelligence report: August 2020*. The Mackinnon Partnership for the Maritime Skills Commission. Retrieved from https://share.google/VtTTxIB4RLq8RdiBp

[12] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *NOAA report on the U.S. marine economy*. Office for Coastal Management. https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/econ-report-2020.pdf

[13] Lv, T., Wu, E., & Chen, Y. (2023). Research on big data talent cultivation for the maritime industry of Jiangsu Province. *Computer Life*, *11*(2), 15–17. https://doi.org/10.54097/cpl.v11i2.12811。

海洋文化與觀光遊憩產業關鍵人力需求與職務樣貌研析

張珮錡[1]　施瓊華[2]　周瑋珊[3]

摘要

因應《海洋產業發展條例》之推行與《2025 國家海洋政策白皮書》人才培育方針，本研究聚焦於「海洋文化」與「海洋觀光遊憩」產業範疇，旨在盤點此兩大產業之關鍵人力需求，透過文獻整理、深度訪談及專家團體會議，建構產業職務藍圖並釐清職能需求樣貌。

研究結果顯示，該產業範疇可整合為「資產保存與工藝傳承」、「文創品牌推廣」、「觀光遊憩與地方創生」及「教育推廣服務」四大領域。經職務屬性剖析，將關鍵人力需求分為兩大體系：(1)陸域職務：以海洋課程設計、環境教育、行程設計及專業策展為主；(2)海域職務：以水下攝影師、潛水教練、觀光船駕駛及 SUP 教練為主要缺口。研究進一步發現，海洋職能呈現高度「跨域整合」特性，可延伸如潛水安全、海洋文化資源詮釋、海洋生態導覽及數位影像處理等職能。

爰此，本研究針對海洋產業人力之增能培訓提出具體建議方向，包含文化資產詮釋、水下攝影專業訓練、海洋文化導覽及海域活動安全課程等。建議透過系統化職能建置，可對接產業實務需求，強化從業人員之跨域整合能力，進而協助建構具專業深度之海洋人才體系。

關鍵詞：海洋文化、海洋觀光遊憩、職務樣貌、關鍵人力需求、職能

Analysis of Key Manpower Requirements and Job Profiles in Marine Culture, Marine Tourism and Recreation Industries

Pie-Chi Chang[1]　Chiung-Hua Shih[2]　Wai-Shan Chou[3]

ABSTRACT

In response to the implementation of the Marine Industry Development Act and the talent cultivation guidelines of the 2025 National Marine Policy White Paper, this study focuses on the industrial sectors of "Marine Culture" and "Marine Tourism and Recreation." The objective is to identify key human resource demands within these two major industries. Through literature review, in-depth interviews, and expert group meetings, the study constructs an industrial job blueprint and clarifies the profiles of competency requirements.

The results indicate that these industrial sectors can be integrated into four major domains: "Marine Asset Preservation and Craftsmanship Inheritance," "Marine Cultural Creativity and Brand Promotion," "Marine Tourism and Local Revitalization," and "Marine Education and Promotion Services." Through job attribute analysis, key manpower requirements are categorized into two systems: (1) Land-based positions: primarily focusing on marine curriculum designers, environmental educators, itinerary planners, and professional curators; (2) Marine-based positions: with underwater photographers, diving instructors, excursion boat operators, and SUP instructors identified as the primary labor gaps. Furthermore, the study finds that marine competencies exhibit a high degree of "cross-disciplinary integration," extending to functional skills such as diving safety, interpretation of marine cultural resources, marine ecological guiding, and digital image processing.

This study proposes specific directions for upskilling courses, including professional training in marine cultural asset interpretation, underwater photography and image processing, marine culture guiding, and water activity safety. It is suggested that through the systematic development of competencies, industrial practical needs can be

[1] 國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心 副研究員
[2] 國家海洋研究院綜合規劃及人力培訓中心 專任助理
[3] 國立成功大學水工試驗所 助理研究員

effectively met, enhancing the cross-disciplinary integration capabilities of practitioners and facilitating the establishment of a professional and sustainable marine talent system.

Keywords: Marine Culture, Marine Tourism and Recreation, Manpower Requirements, Competency

一、緒論

臺灣四面環海、海洋資源充沛，政府近年積極推動海洋產業發展，並致力於達成環境永續利用之目標。2023 年正式制定《海洋產業發展條例》，明訂 16+1 項海洋產業類別，旨在透過專法整合政策資源，創造支持產業永續發展的良好條件。其中，人才培育更是推動海洋產業優勢、引導未來藍色經濟發展，以及提升國際競爭力的核心動能。

海洋產業範疇廣泛且具高度複雜性，其發展不僅符合聯合國永續發展目標（SDGs 14）「保育與永續利用海洋資源」之精神，更與《2025 國家海洋政策白皮書》中「藍色經濟發展與創新」及「海洋文教與人才培育」之政策目標高度相關。依據《海洋產業發展條例》第 4 條之定義，「海洋文化」與「海洋觀光及遊憩」均納入我國海洋產業發展之法定範疇。考量此兩大產業不僅是我國藍色經濟之重要支柱，更是落實產業轉型並與國際接軌的關鍵驅動力；爰此，本研究擬透過系統化之產業盤點，釐清人才供需脈動與產業特性，建置精準的關鍵人力需求與職務樣貌分析，以期作為國家配置教育資源與制定人才培育推動策略之科學依據。此項工作之落實，將直接影響我國海洋產業轉型的速度與成效，亦是強化國家競爭力之重要工具。

人才是國家根本，海洋產業之競爭力在面對升級轉型與科技創新的衝擊下，正面臨專業人力缺口、從業人員老化及世代斷層等嚴峻挑戰。《2025 國家海洋政策白皮書》指出，海洋文化與教育是永續發展的共同基礎。隨著國內投入海洋遊憩之人口持續增加，產業需求已從量化規模轉向質化深度，意即如何在遊憩過程中融入文化價值、生態意識與在地鏈結。因此，建構具專業深度之海洋人才體系，培育質優量足之人才，已成為發展在地特色文化經濟的迫切任務。

基於上述背景，本研究旨在透過文獻分析與專家實證研究，建立產業職務，梳理行為指標並定義職務內涵，進而強化職場所需的核心專業能力。透過職務樣貌的具體化，不僅能發展最適切的人才培育模式，更可打造「選、訓、育、用、留、攬」之人才價值鏈與循環機制。期能深化政策方針與產業實務間的鏈結，為未來制定人力資源配置、技術創新推動及專業人才適位等對策，提供實質參考價值。

二、文獻探討

2.1 我國海洋產業界定與全球產值發展規模

海洋產業為支持臺灣經濟之重要動能。根據 2023 年統計，我國海洋產業年產值高達新臺幣 1 兆 2,059 億元，約占全國國內生產毛額（GDP）之 5.4%，其中「海洋運輸」、「海洋漁業及養殖」及「海洋遊憩」為貢獻產值之前三大領域。雖我國《海洋產業發展條例》第 4 條已明訂 16+1 項產業類別，然針對細分範疇之定義與職能面向，尚缺乏標準化之調查機制。為此，本研究經由蒐整產業趨勢並參考行政院主計總處行業分類與勞動部職業分類，將「海洋文化」界定為以海洋知識、歷史傳承與文創為核心，融合教育推廣、藝術展演、工藝保存與原民文化再現，並促進地方創生之範疇；「海洋觀光及遊憩」則涵蓋旅遊體驗、設施營運、水上運動教學及專業導潛服務等多元領域。

觀察全球趨勢，經濟合作暨發展組織（OECD, 2025）於《2050 年海洋經濟》報告指出，海洋經濟是全球成長的核心驅力，特別是在觀光業與離岸資源開發領域，合計約占總增加值（GVA）之三分之二，且勞動力分布始終以海岸旅遊業之就業機會居首。在美國實務中，國家海洋和大氣管理局（NOAA, 2020）與經濟分析局（BEA, 2021）之數據亦證實了海洋遊憩產業的巨大潛力。2021 年美國沿海及離岸旅遊收益成長達 27.3%，總產值達 2,318 億美元；至 2022 年，海洋產業對美國總體經濟影響高達 4,760 億美元，支持 240 萬個工作崗位，其中海洋旅遊及娛樂業持續展現強勁增長。這顯示無論國內外，「海洋遊憩」與「文化價值」的結合已成為藍色經濟中最具吸引力且規模龐大的板塊。

2.2 職能需求趨勢與結構性人才挑戰

隨產業轉型，人才需求已從單一勞動力轉向「高技能」與「新興跨域技能」。歐洲海洋委員會（EMB, 2016）強調，海洋人才培育需聚焦產學合作，確保人力技能對接市場需求。根據職能模型理論（Competency Model），職務樣貌的建構不僅包含顯性的專業知識與技術，更涵蓋隱性的行為指標與人格特質（Spencer & Spencer, 1993），此為決定從業者能否在複雜海域環境中發揮關鍵影響力之核心。在海洋文化領域，學術觀點指出文化資產的「詮釋（Interpretation）」是連結大眾的核心橋樑，有效的詮釋能將無形資產轉化為具社會經濟影響力（Socio-economic impact）的品牌（Uzzell, 1996）。美國 NOAA 預測顯示，未來產業將呈現「高技能技術職能與服務導向就業並存」之趨勢，要求從業人員具備如海洋攝影、跨域導覽或技術修護等整合能力。

然而，產業發展亦面臨嚴峻的人力結構挑戰。英國作為勞動市場預測之標竿，其利用勞動力就業指標（WFJ）與統計建模掌握人力動態。Mackinnon（2020）研究指出，海洋產業普遍面臨勞動力高齡化、技能落差、及產業形象吸引力不足等長期結構性問題。當前國際間日益重視「海洋素養（Ocean Literacy）」對產業永續之貢獻，認為透過強化產、官、學夥伴鏈結及提供終身學習支持，方能解決人才流失之困境。綜觀上述文獻，全球海洋經濟正朝向服務品質精緻化與職能跨域化發展。爰此，本研究結合主流人力銀行平台與國際趨勢，針對海洋文化與觀光遊憩進行人力需求盤點與職務樣貌研析，旨在透過系統化職能建置，對接產業實務需求，進而協助建構具專業深度之海洋人才體系。

三、研究方法與過程

本研究採行多元研究方法，旨在整合文獻分析、深度訪談及專家座談會議，建構具科學性與實務參考價值之分析架構。首先，透過文獻整理與次級資料分析法，系統性盤點我國、國際組織及主要先進國家之海洋產業分類、發展趨勢、關鍵職務特性及人才需求現況，從中汲取產、官、學、研之既有資訊，為實證研究奠定理論基礎。在實證階段，研究團隊設計半結構式訪談提綱，針對「海洋文化」與「海洋觀光遊憩」領域執行 6 場深度訪談，深入探討職務描述、核心能力要求及未來產業挑戰；隨後辦理 4 場專家團體座談會議，邀請共 20 位產、官、學、研領域代表參與，包含海洋科技博物館專家、文化工作者、公協會代表、人力資源專業人士及學者，藉由集體討論機制激發跨域觀點碰撞，進而凝聚專家共識。

在資料處理與分析流程上，本研究將蒐集之質性資料進行系統化編碼與歸納，聚焦於確認專業人力之職務樣貌與職能分類邏輯。分析過程涵蓋市場趨勢對應、職務內涵剖析（含工作特性、核心專業能力及職場所需之人格特質）以及職能架構建置，真實反映產業營運之人力需求與潛在缺口。最終，透過多面向資訊之整合分析，建置具可操作性之「海洋文化與觀光遊憩產業關鍵人力職務樣貌」，期能提供各界於人才培育、政策規劃、制度設計及資源配置等面向之實質參考，為未來海洋產業發展預做專業人力儲備。

四、結果產出

面對國際競爭加劇與科技快速更迭，部分傳統海洋產業正面臨競爭力轉型的壓力。為因應外界環境之劇烈變遷，海洋產業對專業人才之「質」與「量」需求已產生顯著質變。本研究發現，明確界定產業關鍵人力之職級、規模、內涵及培育模式，不僅是當前產業升級的重點，更是應對未來挑戰的核心發展方針。

本研究經實證分析，將「海洋文化」與「海洋觀光及遊憩」之產業範疇進行系統化整合，歸納為「資產保存與工藝傳承」、「文創品牌推廣」、「觀光遊憩與地方創生」及「教育推廣服務」四大關鍵領域（如圖 1）。透過職務屬性剖析，進一步將關鍵人力需求劃分為兩大職務體系（如圖 2）：

1. 陸域職務：以海洋課程設計、環境教育、行程設計及專業策展為主。此類職務強調企劃與軟實力，展現出高度的政策推動潛力，可作為未來核心職能培訓之基礎。
2. 海域職務：以水下攝影師、潛水教練、觀光船駕駛及 SUP 教練為核心缺口。此類職務高度依賴專業技術與場域操作能力，為產業第一線服務之支柱。

研究結果進一步顯示，海洋職能呈現顯著之「跨域整合」特性。專家意見普遍指出，兼具「教育推廣」與「觀光行銷」雙重功能的職類，對海洋文化產業之永續發展具關鍵貢獻。職能邊界已從單一技術延伸至潛水安全管理、海洋文化資源詮釋、生態導覽及數位影像處理等複合性領域。本研究提出具體增能培訓方向，包含：文化資產詮釋、水下攝影專業訓練、海洋文化導覽及海域活動安全課程等，期透過系統化職能建置，對接產業實務需求並強化從業人員之跨域競爭力。

最後，因應數位科技的深化應用，產業對人才之技術應用力更趨重視。透過對關鍵人力需求與職務樣貌的精確定義，從業者得以預先厚植專業硬實力與跨域軟實力，建構具專業深度之海洋人才體系。這不僅能提升個人的職業競爭力，更將成為我國海洋產業加值化與優勢專業化之重要根基。

五、結論與建議

本研究透過系統性文獻分析，結合深度訪談與專家團體會議，邀集產、官、學、研領域專家參與，建構我國「海洋文化與觀光遊憩產業」之關鍵人力職務樣貌與職能架構。研究結果顯示，該產業具備高度之跨域整合特性，職務體系可劃分為「陸域職務」與「海域職務」兩大範疇，並橫跨文化詮釋、文創轉譯、觀光體驗、生態導覽及專業技術服務等多元面向。整體而言，產業發展已由傳統單一技能導向，演進為結合文化內涵、環境意識與服務創新之複合型職能體系，顯示未來人才培育應朝向跨領域整合與專業深化並進之方向發展。

基於上述研究發現，為強化我國海洋產業人力，提出以下具體建議：

（一）建立系統化職能架構與人才培育路徑

建議後續可規劃建構具系統性之「海洋文化與觀光遊憩產業職能基準（iCAP）體系」，明確界定各類職務之人力規格與內涵指標。在實務推動上，

應強化「產學對接機制」，鼓勵大專校院或訓練機構開設跨域課程（如海洋文化導覽、海域活動安全管理等），同時邀請具產業實務經驗之產業專家協同教學，以強化實作能力及促進關鍵技能之內化與傳承。

（二）強化跨域整合能力與關鍵職能訓練

因應產業之複合特性，人才培育應聚焦於「核心專業＋跨域轉譯」之整合發展。建議優先推動以下重點職能訓練：

1. 文化轉譯力：海洋文化資源詮釋、故事化導覽及品牌行銷能力。
2. 數位加值力：水下攝影、數位影像內容製作與社群媒體經營。
3. 永續實踐力：生態旅遊導覽與永續環境落實能力。

透過模組化課程設計與專業認證制度，建立分級培訓體系，使從業人員能依職務變動持續精進，提升職場競爭力。

（三）建置產業規模評估與人力需求預測機制

建議未來應進一步整合產業產值、投資規模及市場趨勢等量化指標，建構系統性之人力推估模型。透過長期監測海洋文化與觀光遊憩產業之最適發展規模，致使可更精準掌握人力供需脈動，並作為教育資源配置與政策性攬才之重要決策依據，進而優化整體海洋人才體系之適配性。

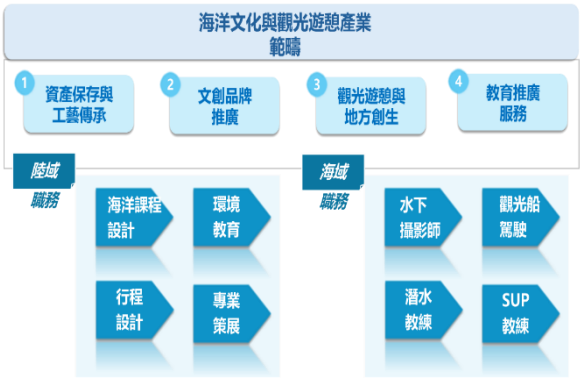


圖 2：「海洋文化與觀光遊憩產業」陸域及海域職務

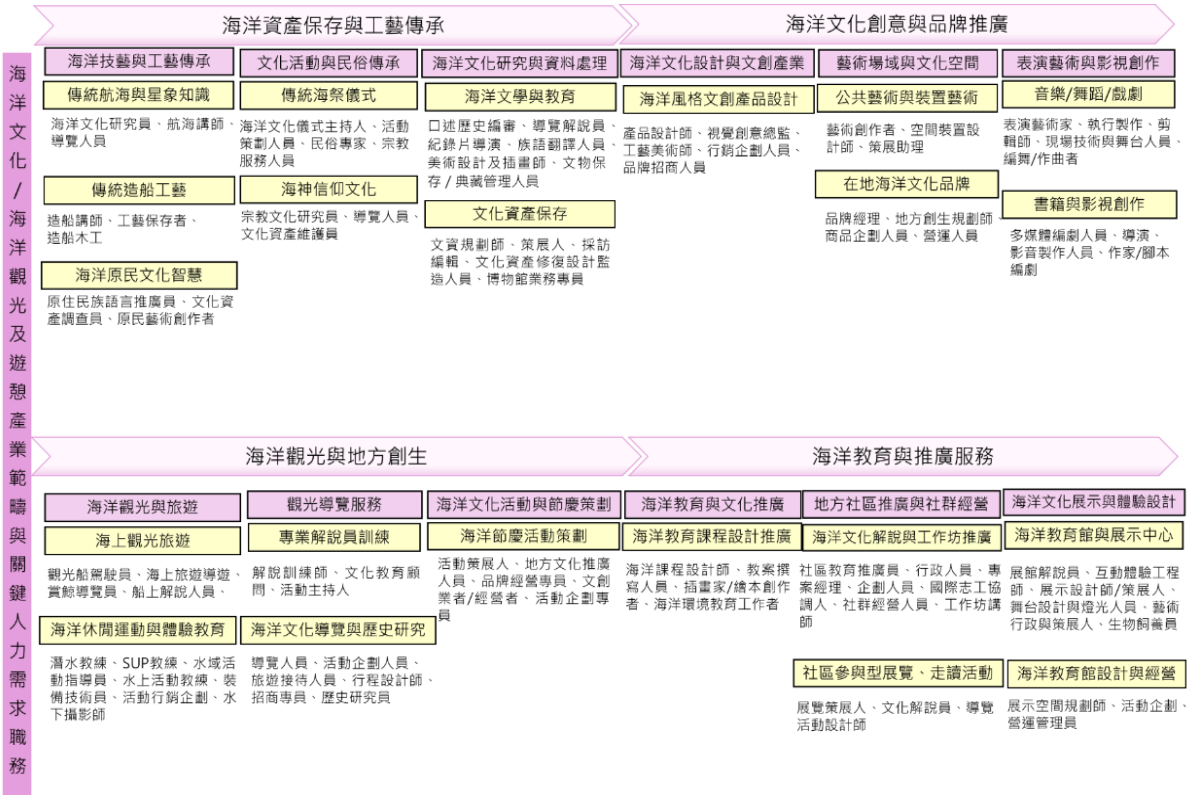


圖 1：「海洋文化與觀光遊憩產業」關鍵人力需求與職務樣貌

參考文獻

[1] 國家發展委員會（2023）。*112–114 年重點產業人才供需調查及推估*。

[2] 行政院海洋委員會（2023，6 月 21 日）。*海洋產業發展條例*。https://law.oac.gov.tw/LawContent.aspx?id=GL000187

[3] 國家發展委員會（2024）。*國家人才競爭力躍升方案（2024–2027 年）*。

[4] 國立臺灣海洋大學臺灣海洋教育中心(2025)。*海洋教育統計年報*。

[5] 黃妍榛（2025）。由海洋產業發展條例論海洋遊憩產業之未來發展。*淡江體育學刊*，*28*(1)，55-76。

[6] 楊朝安（2023）。*企業關鍵職務的職能模型建構（中篇）-『識位之所需—識才之所以』*。https://www.360d.com.tw/article-detail/254

[7] 金屬工業研究中心（2024/7/31）。*海洋產業動態趨勢*。https://strategy.mirdc.org.tw/index.php?option=module&lang=cht&task=pageinfo&id=507&index=10

[8] David L. Uzzell (1996). Creating place identity through heritage interpretation. I*nternational journal of heritage studies*, *1*(4), 219-228.

[9] Spencer, L. M. and Spencer, S. M.(1993). Competence at Work: Models for Superior Performance, New York: John Wiley & Sons, Inc.

[10] European Commission. (2025). The EU Blue Economy Report 2025: Strong growth and focus on innovation. Publications Office of the European Union.

[11] European Marine Board. (2018). Training the 21st CenturyMarine Professional. https://www.marineboard.eu/sites/marineboard.eu/files/public/publication/EMB_FSB2_2018_Web.pdf

[12] European Commission. (2024). EU blue economy report 2024: Innovation and sustainability drive growth. https://www.europa.eu/ European Employment Services (EURES). (2025). Labour market information: Norway. https://eures.europa.eu/living-and-working/labour-market-information-europe/labour-market-information-norway_en.

[13] Mackinnon, I. (2020). Labour market intelligence report: August 2020. The Mackinnon Partnership for the Maritime Skills Commission. Retrieved from https://share.google/VtTTxIB4RLq8RdiBp

[14] Organization for Economic Cooperation and Development. (2025). The Ocean Economy to 2050. OECD Publishing.

[15] Organization for Economic Cooperation and Development. (2016). The ocean economy in 2030. OECD Publishing.

[16] Rambøll Management Consulting. (2023). Behovsanalyse av maritime utdanninger (Rapport, oppdrag for MARKOM II). Rambøll Norge AS. https://www.markom2.no/wp-content/uploads/2023/10/Rapport_Behovsanalyse-av-kompetansebehovene-i-maritim-sektor_Ramboll-Management-Consulting.pdf

[17] The Research Council of Norway. (2022). Maritim21 – Executive Summary: Strategy for research, development and innovation for the maritime industry (Vol. 2021–2022). Oslo: The Research Council of Norway. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.forskningsradet.no/siteassets/publikasjoner/2022/maritim21-strategy--executive-summary3.pdf

基於多模態調查資料建構水文空間資料方塊流程之研究：以水下文化資產調查場域為例

陳冠宇[1]　劉金源[2]　黃千芬[3]

摘要

一般而言，水下調查任務常需部署多種地球物理探測儀器，然各儀器輸出之物理量、檔案格式與空間解析度存在高度異質性。傳統處理流程仰賴各儀器專屬之封閉商用軟體，跨儀器資料散落於不同軟體生態系，難以建立全域之空間連結與綜合判讀。為突破此異質資料整合瓶頸，本研究提出一套標準化處理流程，以建構水文空間資料方塊(Hydrospatial Data Cube, HDC)。該架構透過空間整合技術，將多音束回音測深儀、側掃聲納、地層剖面儀及海洋磁力儀等多模態輸出，映射至統一的網格座標系中，呈現水下場域之總體空間資訊。在特徵萃取階段，本系統解析各儀器之輸出訊號並實作空間與物理校正，結構化為水文空間特徵圖層(地貌、海床底質、地球物理)。此分層架構刻畫由海床構形至底質聲學特性之物理環境，海床底質層整合側掃聲納反向散射群聚與地層剖面儀沉積物分類兩種特徵，實現跨模態異質特徵之空間網格對齊。為支援後續之機器學習應用，本架構於各推導圖層內建空間信心度遮罩以量化資料品質。此設計使單一資料方塊不僅能呈現水下場域之空間關聯，亦對應深度學習模型所需之多通道輸入格式，為模型提供具備品質感知能力之訓練資料基礎。以實際之水下文化資產探測資料為例，本研究展示此特徵萃取與網格化流程能有效消除跨儀器之空間分析壁壘，將原本各自獨立的原始數據，重構為具備空間對齊特性的多維度資料集。此架構提供統一之資料存取與跨域分析介面，其產出之多通道特徵陣列可作為後續深度學習模型進行水下特徵辨識之標準化資料基礎。

關鍵詞：水下文化資產調查、多儀器資料整合、水文空間資料方塊、沉積物聲學分類、校正係數估計

An Integration Pipeline for Hydrospatial Data Cube Based on Multi-modal Survey Data: A Case Study of Underwater Cultural Heritage Survey Sites

Kuan-Yu Chen[1]　Jin-Yuan Liu[2]　Chen-Fen Huang[3]

ABSTRACT

Underwater surveys commonly deploy multiple geophysical survey instruments, whose outputs differ substantially in physical quantity, file format, and spatial resolution. Conventional processing relies on instrument-specific commercial software, fragmenting cross-instrument data across separate software ecosystems and precluding global spatial linkage and integrated interpretation. To address this heterogeneous-data integration bottleneck, this study presents a standardized pipeline for constructing a Hydrospatial Data Cube (HDC). The framework maps multimodal outputs from multibeam echo sounder, side-scan sonar, sub-bottom profiler, and marine magnetometer onto a unified gridded coordinate system, representing the overall spatial information of the underwater site. In the feature extraction stage, the system parses each instrument's output signal and applies spatial and physical corrections, structuring the multi-source data into hydrospatial feature layers (morphology, seabed sediment, and geophysics). This layered architecture characterizes the physical environment from seabed morphology to sediment acoustic characteristics; the seabed sediment layer integrates SSS backscatter clustering and SBP-derived sediment classification, providing spatial grid alignment of cross-modal heterogeneous features. To support downstream machine learning applications, each derived layer carries a spatial confidence mask

[1] 淡江大學電機工程學系 碩士班研究生
[2] 淡江大學電機工程學系 特聘講座教授
[3] 國立臺灣大學海洋研究所 教授兼所長

quantifying data quality. This design allows a single data cube to represent both the spatial relationships of the underwater site and the multi-channel input format required by deep learning models, providing a quality-aware training data foundation. Using actual underwater cultural heritage survey data, this work demonstrates that the feature extraction and gridding pipeline can effectively remove cross-instrument spatial analysis barriers, restructuring originally disparate raw data into a spatially aligned, multi-dimensional dataset. The framework provides a unified interface for access and cross-domain analysis, and its multi-channel feature arrays offer a standardized data foundation for subsequent integration with deep learning models for underwater feature recognition.

Keywords: Underwater cultural heritage survey; Multi-sensor data integration; Hydrospatial data cube; Acoustic sediment classification; Calibration coefficient estimation

一、一、緒論

水下文化資產(Underwater Cultural Heritage, UCH)指位於水下且具歷史、文化、考古、藝術或科學價值之人類活動遺存。我國《水下文化資產保存法》(2015 年公布)第三條將其定義涵蓋場址、結構物、建築物、器物、船舶與其他載具及具史前意義之物件。海洋與沿岸 UCH 之調查方法已相對成熟[1][2]，然內陸水庫等內陸水域之文化資產調查，作為一種具水下文化資產屬性之特殊場域，較少被系統性研究。本研究以屏東牡丹水庫(1995 年完工、1998 年蓄水)為調查場域[3]，進行多儀器地球物理調查。

水下文化資產調查之標準工具組包含四種地球物理儀器：多音束回音測深儀(MBES)量測水深與地形、側掃聲納(SSS)產生回聲影像、地層剖面儀(SBP)解析沉積物分層、海洋磁力儀偵測含磁性之物體[1][2]。各儀器對應不同物理屬性，個別儀器可解決特定問題，但探測場域之脈絡化解讀如含底質特徵、沉積環境、地形構形等，仍需多儀器資料之綜合判讀。於專業團隊操作專業軟體之配置下，綜合多儀器與水下攝影之判讀為現行調查實務[3]。然而此種高度依賴封閉商用工具與人為專業判斷之流程存在兩重結構性限制：其一，各儀器之處理流程相互獨立，輸出之空間網格、檔案格式與座標基準不一致，跨儀器空間比對困難；其二，缺乏統一之資料結構與檢視介面，難以從整體場域之觀點進行可重現、可程式化存取之判讀。近年機器學習於聲納影像分析之資料集稀缺問題，Nguyen 等人[4]所建構之 SeafloorAI 整合 USGS 與 NOAA 62 個海洋調查產出大規模 AI-ready 資料集。然其聚焦於海洋場域且資料來源仍依賴各既有處理產出，未涵蓋內陸水庫等水下文化資產場域，亦未提出整合處理流程之方法論；本研究即於此空缺中提出可重現、可移植之多儀器整合方法。

為解決上述限制，本研究採用 Hains 等人[5]所提出之 hydrospatial 概念為架構基礎，將不同物理量測整合於統一空間框架以支援整體場域分析。本研究於此概念下提出一套多儀器整合處理流程，以牡丹水庫為案例，將四種儀器之輸出對齊至共通網格，產出符合 CF-1.8(Climate and Forecast metadata convention)規範之多通道 NetCDF 資料方塊。流程設計上分離站點參數與演算法常數，後續移轉至其他場域僅需替換設定檔即可重複執行。各推導圖層內建連續值之空間信心度遮罩，反映各儀器之取樣特性與內插區域，為下游機器學習應用提供品質感知之資料結構。

本研究之主要貢獻為兩項：

(一)多儀器整合架構：提出將多儀器水下調查資料整合至水文空間資料方塊之處理流程。流程以共通網格、多通道圖層共配、CF-1.8 標準化輸出與每層空間信心度遮罩為設計核心，使多音束回音測深儀、側掃聲納、地層剖面儀與海洋磁力儀之異質量測，於統一空間框架下成為可供機器學習應用之資料結構。

(二)水庫場域之底質聲學處理：依阻抗式對 Hamilton[7]沉積物表進行淡水條件下解析重算，並擴充水庫底床特有之軟質沉積物類別；針對水庫地形限制下標準 BSB 法之段落代表性問題，提出多段落中位數錨定之校正係數估計策略。

二、二、資料與前處理

2.1 資料來源與儀器配置

本研究所使用之資料採集自牡丹水庫水下文化資產調查計畫，依《水下文化資產調查作業與儀器探測技術指引》執行。本研究於使用資料於牡丹水庫下池進行水下探，範圍涵蓋水庫主體水域，總面積約 61 公頃。所使用之四種地球物理儀器包含多音束測深儀、側掃聲納、地層剖面儀與磁力儀，分述如下。

水深資料以 NORBIT WINGHEAD i80S 寬頻多音束測深儀 採集，操作頻率設為 400 kHz 標稱頻率，採曲面陣列 形成多音束扇形掃描，掃幅角度可達 210°。整合系統 搭配運動姿態感測器、聲速剖面儀、潮位儀與 RTK 衛星定位，量測時依現地實測之分層聲速剖面套用以反映水中聲速隨深度之變化。

側掃聲納回聲資料以 EdgeTech 4205 雙頻系統採集，低頻通道 230 kHz、高頻通道 850 kHz。資料採集分為 船尾拖曳與側掛兩種部署方式分兩天施測，斜距設定於 75 公尺以內，主測線間距 50 公

尺、近岸區加密至 30 公尺，平面定位採 DGPS 定位，作業航速約 3 至 4 節。

地層剖面資料以 EdgeTech 3200-XS 系統搭配 SB-216S 拖魚採集，操作頻段 2-16 kHz，採全頻譜 CHIRP 頻率調制，垂直解析度依脈衝頻寬約 6–10 公分。測線規劃 配合側掃聲納路徑同步施測。

磁力資料以 Marine Magnetics SeaSPY2 海洋磁力儀採集，屬 Overhauser 全磁場感測類型，量測絕對全磁場強度。測線規劃配合側掃聲納及地層剖面同步施測，量測資料經國際地磁參考場（IGRF）及日變化修正。

2.2 共通空間框架

四種資料來源各自具有不同空間取樣特性：水深資料以規則網格輸出，側掃聲納與地層剖面儀以沿測線之 ping 序列記錄，磁力以稀疏取樣點記錄。為使各儀器之輸出可於同一空間框架下整合，本研究以多音束水深網格之邊界與解析度（EPSG:3826 二度分帶投影、0.5 公尺解析度）作為共通空間框架，後續所有處理皆以此網格為對齊基準。

2.3 資料前處理

各儀器原始資料於整合至共通網格前之前處理需求差異甚大。多音束測深以廠商已處理之水深網格作為參考層；側掃聲納須投影至地面座標。地層剖面與磁力之原始資料於 3.3、3.4 節直接處理，不需獨立前處理階段。

2.3.1 多音束測深儀

水深資料重組為共通網格座標下之水深層。由於原始 ping 級點雲與量測密度資訊未隨資料提供，水深層之品質中間量無法獨立推導，於資料方塊中作為參考層處理，不另設信心度遮罩。

2.3.2 側掃聲納

側掃聲納以斜距記錄海床回波，需投影至地面座標方能與其他圖層共配。投影前對原始資料施行兩項前處理：依姿態資訊濾除船隻轉向期間之 ping，避免轉向段之偏向幾何污染入射角；以及估計各 ping 拖體至海床之高度。由於儀器未記錄此高度欄位，本研究以聲學首次回波估計之，並以多音束水深推導之高度作為備援。

採平底假設將斜距樣本投影至地面座標，地理位置依測線朝向計算左右舷偏移，船尾拖曳模式於纜長已知時施行 layback 修正。保留入射角介於 15°–70° 之樣本，以避開近 nadir 強反射與高入射角訊雜比衰減區間。$\sqrt{s^2 - h^2}\cos^{-1}\frac{h}{s}$

2.3.3 地層剖面儀

地層剖面儀資料前處理階段，讀取 JSF 格式之 I/Q 匹配濾波樣本，經 EdgeTech 規格加權因子還原為真實振幅後取包絡，作為各 ping 之原始振幅序列。每 ping 之時間、姿態(pitch、roll、heading)、拖體深度與至海床高度由訊息標頭擷取或依時間內插補入，經緯度欄位失效時以同步 NMEA 字串補正。

三、研究方法

3.1 系統概觀

本研究之處理系統由四個子系統組成，每個子系統對應一種儀器之資料流，並輸出至共通網格之多通道資料方塊。整體資料流為：多音束水深構成資料方塊之地貌參考層；側掃聲納經 3.2 節處理產出反向散射圖層；地層剖面經 3.3 節處理產出反射損失與沉積物類別兩層；海洋磁力儀經 3.4 節處理產出磁異常層。最終所有圖層於 3.5 節整合為符合 CF-1.8 規範之多通道 NetCDF 資料方塊，每層附帶 [0， 1] 連續值之空間信心度遮罩。

整個處理系統採設定檔驅動架構：站點相關參數(採集設定、地理範圍、特定儀器選用之頻段)與演算法常數(角度區間、群聚參數、IDW 半徑)於設定檔中分離指定，使同一程式碼可透過更換設定檔應用於不同場域。

3.2 側掃聲納處理

側掃聲納處理流程接收 2.3.2 節投影至地面座標之樣本，輸出共通網格之雙頻反向散射圖層、沉積物分類與信心度遮罩。處理流程包含三個階段：動態增益補償、輻射校正與鑲嵌。

3.2.1 動態增益補償

EdgeTech 4205 於採集時對每 ping 套用動態自動增益控制（automatic gain control, AGC），各測線之振幅基準存在顯著差異。若直接送入後續以振幅統計為基礎之校正流程，AGC 引入之測線間振幅漂移將被誤判為實際底質差異。

本研究於樣本池化後、輻射校正之前，插入一道測線通道級之歸一前處理：對每組(測線、左右舷通道)計算其振幅 40 百分位數作為參考值，將該組所有樣本除以此參考值。採 40 百分位數而非中位數，以降低高反射目標物對歸一基準之拉動。此步驟之目的為將跨測線振幅基準對齊至可比尺度，使後續以入射角統計為基礎之校正得以在共同基準上進行。

3.2.2 輻射校正

側掃聲納振幅受時變增益殘差、入射角效應與底質特性共同調制，且角度響應形狀隨底質類型變化。場域底質非均一時，以全資料集單一曲線校正將產生系統性殘差。本研究採用 Zhao 等人[6]提出之群組式校正法，將角度響應相近之樣本經非監督式群聚分為若干類，各類獨立估計平均角度反散曲線並進行校正；原文將此分群結果直接定義為非

監督式沉積物分類。本研究於統計量計算採中位數與絕對中位差，取代原文之均值與標準差，以降低本場域金屬殘骸等高反射目標對統計量之拉動。其後以 K-means++ 對 z-score 進行分群，並依原文之逐步合併機制消除過小群與過近群。考量 230 kHz 通道角度響應之分辨力較弱，其 z 分數分布較高頻緊密，本研究將合併距離門檻較原文設定收緊；若沿用原值，低頻通道將合併為單一群，失去群組化校正之意義。對群聚標籤施加二維眾數濾波以抑制單像素散斑後，對每群獨立計算其角度反散曲線 ABC(c， φ)，並套用式 (1):

$$bs_{corrected} = bs_{raw} - ABC(c，\varphi) + BS_0(c) \quad (1)$$

其中 $BS_0(c)$ 為該群之全域平均，作為校正基準。以群內平均值作為校正基準，避免跨群校正後因基準差異引入人為偏移；此步驟移除入射角依賴之輻射模式，保留底質差異對應之振幅資訊。$BS_0(c)$

3.2.3 鑲嵌

鑲嵌網格之有效範圍由多音束水深資料決定：對應多音束 nodata 之網格標記為無效，僅水域範圍內之網格保留反向散射估計值，使 SSS 鑲嵌結果於空間範圍上與其他圖層共享同一邊界。

3.3 地層剖面儀處理

地層剖面處理流程接收 EdgeTech 3200-XS 系統採集之原始振幅序列，輸出共通網格之反射損失圖層、沉積物分類圖層與信心度遮罩。處理流程包含五個階段：反射損失計算、沉積物分類門檻建立、校正係數估計、跨水庫一致性驗證與空間內插。

3.3.1 反射損失與底質物性

聲波垂直入射至沉積物界面時，反射係數 由兩側介質之聲學阻抗差決定：r

$$r = \frac{Z_{sediment} - Z_{water}}{Z_{sediment} + Z_{water}} \quad (3)$$

其中聲學阻抗 。反射係數對應之反射損失 RL 定義為：$Z = \rho c$

$$RL = -20 \log |r| \quad (4)$$

於已知參數之條件下，沉積物之 ρ 與 c 兩個物理量決定其反射係數 r 與反射損失 RL。RL 為對應於聲阻抗 ρc 之單一指標，雖無法唯一反解出 ρ 與 c 兩個獨立參數，但若有對應之沉積物物性參考表，可將量測 RL 對照表中各類別之代表性 (ρ， c) 對，以最接近之類別作為分類結果。Hamilton[7]整理大量海洋沉積物之 ρ 與 c 量測值，建立沉積物物性參考表，為此分類流程之主要文獻基礎；本研究以此表作為起點，結合本場域條件與沉積物特性進行擴展。

3.3.2 沉積物分類

Hamilton[7]表所提供之沉積物物性係於海水條件下量測，其反射係數與反射損失對應海水聲阻抗 $Z \approx 1.537 \times 10^6$ kg/m²/s (以 $\rho = 1.024$ g/cm³, $c = 1500$ m/s 計算)。本研究場域為淡水水庫，淡水之聲阻抗 $Z_w \approx 1.493 \times 10^6$ kg/m²/s (以 $\rho = 0.998$ g/cm³, $c = 1496$ m/s 計算)，與海水之差約 2.9%，使同一沉積物類別於淡水條件下之 RL 較海水條件下系統性增加數分貝。本研究因此依阻抗式對 Hamilton 表所列之物性進行淡水條件下之解析重算，而非沿用其原始 RL 值。

水庫場域之底床沉積物多屬築壩後沉積之軟質沉積層，其形成時間遠短於 Hamilton 表所基於之海洋沉積過程，壓密程度低而含水量高，屬 Hamilton 表所未涵蓋之未壓密泥沉積物；此類沉積物在物理性質上應歸類於 Holland 等人[9]近年所提出之 mud spectrum，即顆粒尺寸<63 μm、孔隙率高(0.7-0.9 量級)、聲速比常落於 0.97-1.0 區間之未壓密泥沉積物。為在保留 Hamilton 表既有大陸階地壓密類別之同時，涵蓋水庫場域特有之軟質沉積物，本研究於 Hamilton 表 8 個原始類別(粗砂、細砂、極細砂、粉砂質砂、砂質粉砂、粉砂、黏土質粉砂、粉砂質黏土，本研究合併粒徑相近者後得 5 類)之上，擴充兩類：

1. 部分壓密泥(partially consolidated mud)：水庫底床自高濃度懸浮層壓密成形但尚未達到 Hamilton 黏土類之 continental terrace 等級者。其物理參數依 Holland[10]所提之未壓密泥代表參數設定：$\rho = 1.13$ g/cm³, $c/c_w = 0.987$(即 $c = 1476$ m/s)，阻抗 $Z = 1.668 \times 10^6$ kg/m²/s。
2. 流體泥：水庫底床上方之高濃度懸浮層，於物理上為近似懸浮液狀態之泥。其密度依國際水力協會石門水庫沉積物管理案例研究[12]所報告之水庫沉積物實測單位重 1.1 g/cm³ 設定；其聲速依 Wood 模型[11]計算之懸浮液有效聲速，並於 McAnally 等人[14]對 fluid mud 之定義(密度 1.03 – 1.30 g/cm³)範圍內。具體計算如下：

$$\rho = (1 - \varphi)\rho_{grain} + \varphi \cdot \rho_{water} \quad (5)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1-\varphi}{K_{grain}} + \frac{\varphi}{K_{water}} \quad (6)$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (7)$$

其中 φ 為孔隙率，ρ 與 K 分別為密度與體積彈性模數。代入水庫場域物理參數與 Richardson 等人[16]對沉積物顆粒之文獻量測，計算得流體泥之 $c = 1456$ m/s，聲速比 $= 0.978$，落於 [14] 中所述泥之聲速比理論最低值 0.97 之上方鄰近區域。

合計七種沉積物，依式(2)、(3)於淡水條件下計算各類別之 RL。各類別之參數與計算結果如表 1 所示。

表 1：牡丹水庫沉積物類別

類別	$\rho\,(g/cm^3)$	$c\,(m/s)$	聲速比	RL
粗砂	2.034	1788.4	1.201	7.55
細沙 / 粉砂質砂	1.876	1666.3	1.119	9.00
粉砂 / 砂質粉砂	1.777	1590.3	1.068	10.18
砂-粉砂-黏土混合質	1.596	1538.2	1.033	12.28
黏土 (Clayey/Silty clay)	1.454	1493.5	1.003	14.60
部分壓密泥	1.320	1457.8	0.979	17.82
流體泥	1.130	1455.6	0.978	26.03

3.3.3 校正係數估計

由式(3)計算 RL 須先求得反射係數 r，而儀器接收之海床一次反射振幅 $r_1A_1(f)$ 與 r 之間，差一個由儀器發射、接收與傳播損失綜合構成之儀器函數；此函數無法由儀器規格直接量得。黃千芬與劉金源[8]將其稱為校正係數 (Calibration Coefficient, CC)，並建立 RL 與 CC 之關係為：

$$RL(f) = -20\log r_1 A_1(f) + 20\log CC(f) \qquad (8)$$

黃千芬與劉金源[8]採用海床二次反射 (BSB,bottom-surface-bottom) 振幅 $r_2A_2(f)$ 為參考點，可消去未知傳播項獨立求得：

$$CC(f) = \frac{[r_1 A_1(f)]^2}{r_2 A_2(f)} \qquad (9)$$

式(8)之有效性依賴於符合「平滑界面條件」之段落，該條件要求段內底床近似平滑、底質均一，於此前提下對 r_1A_1 與 r_2A_2 之 ping 平均可估得段落代表性 CC。於本研究之水庫場域，平滑段落於壩前中央深而平緩之區域較適合篩選，而兩岸與支流末端之狹窄淺水區段落稀少且段間底質差異使各段 CC 估計值之間存在差異。本研究因此採取之 CC 估計策略為：於全測區辨識符合平滑界面條件之段落，於每段以 ping 平均估計 CC，再以多段落間之統計中位數作為全測區之代表性 CC 值，以對段間估計變異穩健化。

本研究之段落篩選整合多音束水深資料所衍生之地形指標(向量粗糙度 VRM[17]、坡度、水深位置指數 BPI[18])與段落內 r_1A_1 變異係數作為平滑界面條件之判準，於全測區辨識符合條件之段落，各段以 ping 平均估計 CC，並以多段落間之中位數作為全測區之 CC 代表值。此段落篩選機制展現水文空間資料方塊架構之跨儀器協同優勢：衍生地形指標於共通網格上可作為地層剖面校正流程之物理先驗，實現傳統各儀器獨立處理流程無法達成之跨儀器協同。

本方法之主要限制在於 CC 之絕對精度具有一定不確定性；然此偏差為全測區常數，不影響 RL 之相對空間分布。

3.3.4 跨水庫一致性驗證

本場域並無底質採樣作為直接驗證之依據，故本研究改以跨水庫物理一致性作為間接驗證：若牡丹水庫之聲學分類結果與台灣其他主要水庫之獨立採樣資料於物理特徵上呈現一致趨勢，即可間接支持本研究分類體系之適用性。

依國際水力協會公開案例研究[12]與相關水庫沉積研究[15]所載，石門水庫壩前實體模型試驗所用之沉積物中位粒徑為 4–8 微米，屬黏土至極細粉砂粒級；曾文水庫案例研究[13]亦顯示壩前以細粉砂、黏土質粉砂與軟質泥為主要沉積物。兩水庫之獨立採樣資料於物理特徵上與 Hamilton 表所涵蓋之大陸階地壓密類別有顯著差異，反映台灣水庫共通之壩前細粒未壓密沉積特徵。

本研究於牡丹水庫所得之聲學分類分布(部分壓密泥與流體泥兩類合計約佔 75%，Hamilton 表所涵蓋之大陸階地壓密類別僅佔約四分之一，且主要分布於壩體鄰近邊坡與支流末端)在物理意義上與上述獨立採樣結果一致，並落於 Holland 等人[14] 對未壓密泥之聲速比範圍 (0.97~1.0) 內；若僅以原 Hamilton 五類進行分類，本場域 75% 之底床將被歸入單一壓密黏土類別，失去區分「部分壓密泥」與「流體泥」兩種具不同物理意義沉積環境之能力。

3.3.5 空間內插與信心度

地層剖面儀沿測線取樣，沿線量測之 RL 須以空間內插擴展至共通網格。本研究採反距離加權內插，並設定最大內插距離以避免外推。網格信心度依該格至最近實測 ping 之距離分為量測、內插與覆蓋外三類，沉積物類別圖層沿用此遮罩。

3.4 海洋磁力儀處理

海洋磁力儀處理流程接收 .mag 文字檔記錄之逐 ping 磁力總場強度，輸出共通網格之磁異常圖層與信心度遮罩。逐筆紀錄依儀器自評品質指標篩選，並排除總場強度偏離當日 IGRF 模型過大者；各次施測依其日期套用 IGRF 模型，扣除地球主磁場後得磁異常值。對解析所得之拖體位置施行 layback 修正後，經沿測線中位數濾波抑制電子雜訊，以反距離加權內插至共通網格。網格信心度依該格至最近實測 ping 之距離分為量測、內插與覆蓋外三類。

3.5 多儀器資料方塊整合

3.2 至 3.4 節各儀器處理流程之輸出皆為共通網格之 GeoTIFF 圖層，對應水文空間資料方塊三層架構：多音束水深構成地貌層，側掃聲納反向散射群聚與地層剖面儀沉積物分類共同構成海床底質層，海洋磁力儀之磁異常構成地球物理層。本節將諸圖層整合為單一 NetCDF4 資料方塊，作為後續分析與機器學習應用之統一資料結構。

3.5.1 圖層整合與重採樣

各圖層雖已於各自處理流程中對齊至共通網格，於整合階段仍需重採樣對齊網格邊界與解析度之微小差異。連續值圖層採雙線性重採樣，類別圖層採最近鄰重採樣以保留分類邊界；缺失值統一以標準 _FillValue 哨兵表示。

3.5.2 NetCDF 標準化與擴充能力

資料方塊以 CF-1.8 規範輸出為 NetCDF4 格式，各圖層之屬性資訊於整合時寫入，方塊整體 metadata 包含座標參考系、空間解析度與投影資訊。

資料方塊包含水深(MBES)、雙頻反向散射(SSS)、反射損失與沉積物分類(SBP)、磁異常(磁力儀)，以及各儀器之空間信心度遮罩與水深衍生之地形指標(地形粗糙度、坡度等)。後續分析或機器學習應用可依需求選取所需圖層，並以信心度遮罩進行加權或篩選。

四、結果

本章依各儀器處理流程之順序，展示資料方塊主要圖層之處理結果。

4.1 多音束測深結果

水深資料如圖 1 所示。水深範圍自 2.8 公尺至 39.0 公尺，中位深度 31.5 公尺，涵蓋當期水位下水庫之整體範圍；水庫南端出水口附近因人工結構造成局部坡度近垂直。除水深外，VRM、坡度與水深位置指數(BPI)亦由 MBES 網格衍生，連同水深一併納入資料集。本水深網格作為後續所有圖層之共通空間參考。

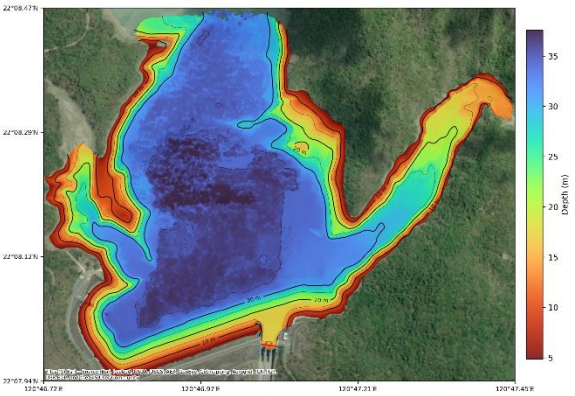


圖 1 牡丹水庫全域等深圖

4.2 反向散射圖與分群結果

低頻(230 kHz)與高頻(850 kHz)反向散射鑲嵌結果如圖 2、圖 3 所示。

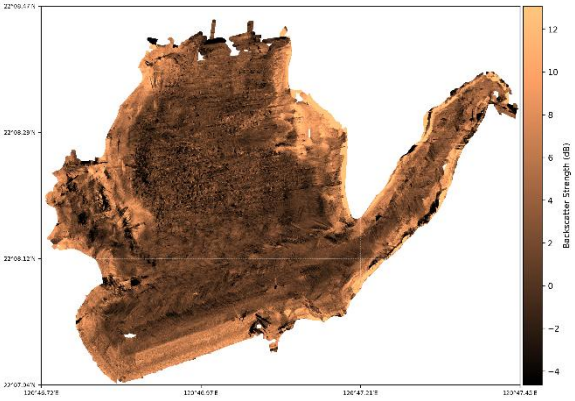


圖 2 230 kHz 反向散射鑲嵌

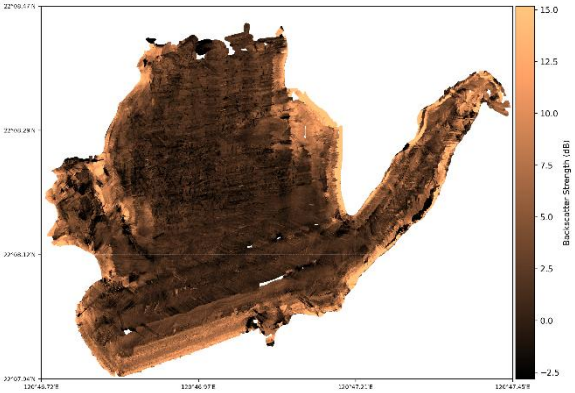


圖 3 850 kHz 反向散射鑲嵌

K-means 分群結果如圖 4、圖 5 所示。經逐步合併程序，230 kHz 通道為 4 群，850 kHz 通道分為 7 群，低頻通道之較少群數反映其對表層底質之分辨力低於高頻。

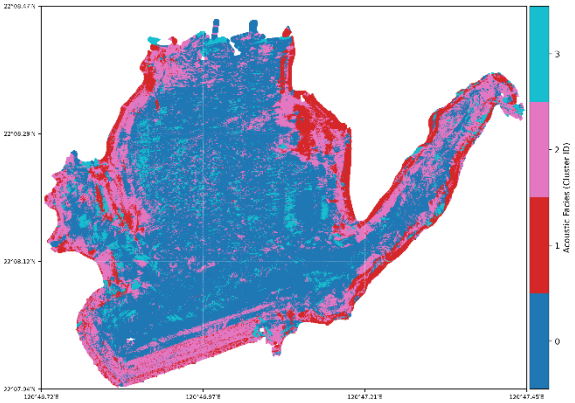


圖 4 230 kHz K-means 群聚結果

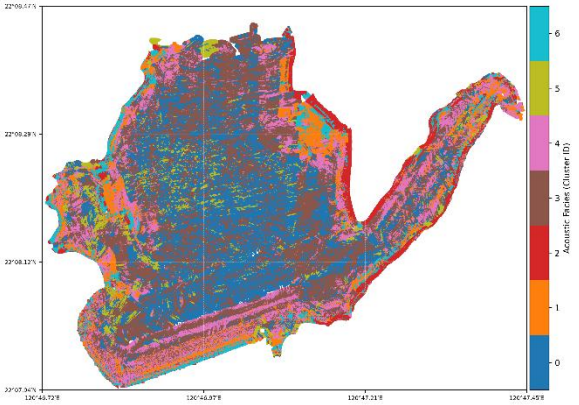


圖 5 850 kHz K-means 群聚結果

4.3 反射損失與沉積物分類

地層剖面之反射損失分布如圖 6 所示，RL 範圍 5.93 至 37.11 分貝，中位數 19.94 分貝。以表 1 各類別 RL 計算值之相鄰中點作為分類門檻，轉換為沉積物類別之結果如圖 7 所示，各類別之空間分布比例列於表 2。

表 2：牡丹水庫沉積物分布

類別	占比 (%)
粗砂	0.8
細沙 / 粉砂質砂	1.1
粉砂 / 砂質粉砂	2.9
砂-粉砂-黏土混合質	5.6
黏土	14.6
部分壓密泥	42.3
流體泥	32.8

水庫底床主導底質為部分壓密泥(42.3%)與流體泥(32.8%)，兩類合計約佔測區面積之 75%；Hamilton 表所涵蓋之大陸階地壓密類別於本場域合計僅佔約四分之一，主要分布於壩體鄰近邊坡與支流末端。此分類分布與 3.3.4 節所述台灣其他水庫之底質採樣資料於物理特徵上一致，反映水庫場域共通之壩前細粒未壓密沉積特徵。

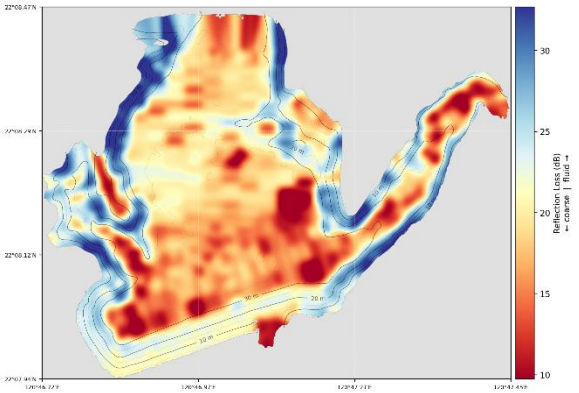


圖 6 牡丹水庫全域 RL 分布圖

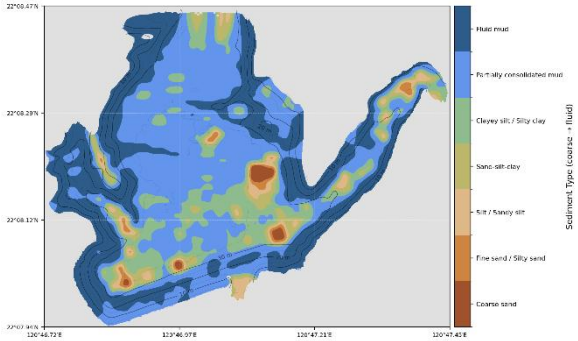


圖 7 牡丹水庫全域沉積物分布圖

4.4 磁異常分布

磁異常分布如圖 8 所示。主要異常集中於水庫南側出水口及測區內人造構造物附近，其餘區域呈現接近零之背景場。異常聚集區與多音束所解析之人造結構於空間上呈現共現，展示資料方塊架構支援跨儀器目標識別之能力。

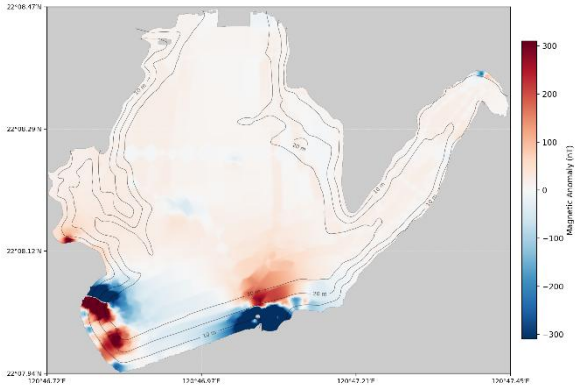


圖 8 牡丹水庫磁異常分布圖

五、問題與討論

本研究於牡丹水庫場域展示一套設定檔驅動之多儀器整合處理流程，將多音束回音測深儀、側掃聲納、地層剖面儀與海洋磁力儀之輸出對齊至共通網格，產出符合 CF-1.8 規範之多通道 NetCDF 資料方塊。流程設計上將站點相關參數與演算法常數明確分離，後續移轉至其他場域僅需替換設定檔即可重複執行，此設計為實驗室持續累積跨場域多儀器資料奠定基礎。

方法論層面，本研究於地層剖面之處理流程中針對水庫場域之底質聲學特性提出處理方案。於水庫地形限制下平滑界面段落稀少、且段間 CC 估計值之間存在差異之條件下，本研究提出基於多段落間中位數錨定之校正係數估計方法；並依阻抗式對 Hamilton 沉積物表進行淡水條件下之解析重算，補入近年泥質聲學文獻所定義之部分壓密泥(partially consolidated mud)與流體泥(fluid mud)兩類，使分類結果於淡水水庫條件下具理論基礎。

各推導圖層內建[0，1]連續值之空間信心度遮罩，反映各儀器之取樣特性與內插覆蓋；側掃聲納依入射角高斯權重、地層剖面與海洋磁力儀依距最近實測點之距離衰減，水深層作為參考網格本身不另設信心度。此設計使資料方塊之每個格網位置皆附帶量化品質指標，為下游分析提供品質感知之資料基礎。

本研究於水庫場域缺乏底質採樣 ground truth 之條件下，分類結果之驗證以兩重間接證據為基礎。其一為跨水庫物理一致性，所得分類分布與石門、曾文兩座水庫之獨立採樣資料於物理特徵上一致(見 4.3 節)。其二為同場域跨儀器一致性，本研究於 4.2 節之側掃聲納反向散射 K-means 群聚結果與 4.3 節之地層剖面 RL 沉積物分類分布，於空間特徵上呈現部分對應，提供同場域跨儀器之間接驗證。此種跨儀器交叉確認之能力為水文空間資料方塊架構之直接優勢之一。

本研究以 CF-1.8 規範作為自描述格式輸出之標準，該規範於海洋與大氣科學社群已有成熟工具支援，適合作為跨域資料交換之基礎。對於水下文化資產與海床底質分類等領域之資料互通，進一步對齊 NOAA CMECS(Coastal and Marine Ecological Classification Standard)等海床分類體系亦屬可能之擴充方向，屬本流程後續發展之題目。

本研究之定位為水下文化資產調查方法論之第一站，牡丹水庫為起始場域。資料方塊三層架構已建構完成，各儀器層獨立分析結果於本論文呈現。本場域因軟質沉積物聲學特性與人為淺深活動共同影響，淺地層之層厚與層界面結構未能可靠萃取；具備聲學穿透條件之場域中，相同處理流程可擴展納入淺地層厚度層，留待後續工作驗證。跨層聯合解釋與其他場域累積資料之比對分析，將於後續基於此資料集之研究中進行。長期而言，持續累積跨場域多儀器資料，為機器學習水下文化資產偵測訓練語料之構築奠定基礎，是本研究設定之方向。

謝誌

本研究所使用之資料來自由黎明工程顧問股份有限公司委託、劉金源教授主持之「牡丹水庫抽蓄水力發電計畫可行性研究水下文化資產調查」計畫(計畫期程 114/08/01－115/09/30)，特此致謝計畫團隊提供資料使用之協作。

參考文獻

[1] R. Plets, J. Dix, J. Adams, J. Bull, T. Henstock, M. Gutowski, and A. Best, "The use of a high-resolution 3D Chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (River Hamble, UK)," Journal of Archaeological Science, vol. 36, no. 2, pp. 408–418, 2009.

[2] C. R. Bates, M. Lawrence, M. Dean, and P. Robertson, "Geophysical methods for wreck-site monitoring: the Rapid Archaeological Site Surveying and Evaluation (RASSE) programme," International Journal of Nautical Archaeology, vol. 40, no. 2, pp. 404–416, 2011.

[3] 劉金源(主持),牡丹水庫抽蓄水力發電計畫可行性研究水下文化資產調查,黎明工程顧問股份有限公司,計畫期程 114/08/01–115/09/30。

[4] K. X. Nguyen, F. Qiao, A. Trembanis, and X. Peng, "SeafloorAI: A large-scale vision-language dataset for seafloor geological survey," in Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS) Datasets and Benchmarks Track, 2024.

[5] D. Hains, P. Sergeev, A. Vassiliou, and L. Wigley, "HYDROSPATIAL update and progress in the definition of this term," International Hydrographic Review, no. 28, 2022.

[6] J. Zhao, J. Yan, H. Zhang, and J. Meng, "A new radiometric correction method for side-scan sonar images in consideration of seabed sediment variation," Remote Sensing, vol. 9, no. 6, p. 575, 2017.

[7] E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, no. 5, pp. 1313–1340, 1980.

[8] 黃千芬、劉金源,臺東知本溪河口附近海域環境調查資料之探究分析,臺灣深層海水資源利用學會,2015。

[9] C. W. Holland, S. E. Dosso, and J. D. Chaytor, "Mud acoustics," Acoustics Today, vol. 20, no. 1, pp. 38–47, 2024.

[10] C. W. Holland, "Geoacoustic inversion for fine-grained sediments," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 111, no. 4, pp. 1560 – 1564, 2002.

[11] A. B. Wood, A textbook of sound, 2nd ed. London, UK: G. Bell and Sons, 1941.

[12] International Hydropower Association, Sediment management case study: Chinese Taipei – Shihmen. [Online]. Available: https://www.hydropower.org/sediment-management-case-studies/chinese-taipei-shihmen

[13] International Hydropower Association, Sediment management case study: Chinese Taipei – Tsengwen/Zengwen. [Online]. Available: https://www.hydropower.org/sediment-management-case-studies/chinese-taipei-tsengwen-zengwen

[14] W. H. McAnally, C. Friedrichs, D. Hamilton, E. Hayter, P. Shrestha, H. Rodriguez, A. Sheremet, and A. Teeter, "Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 133, no. 1, pp. 9 – 22, 2007.

[15] F.-Z. Lee, J.-S. Lai, and T. Sumi, "Reservoir sediment management and downstream river impacts for sustainable water resources—Case study of Shihmen Reservoir," Water, vol. 14, no. 3, p. 479, 2022.
[16] M. D. Richardson, K. L. Williams, K. B. Briggs, and E. I. Thorsos, "Dynamic measurement of sediment grain compressibility at atmospheric pressure: Acoustic applications," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 27, no. 3, pp. 593–601, 2002.
[17] J. M. Sappington, K. M. Longshore, and D. B. Thompson, "Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: A case study using bighorn sheep in the Mojave Desert," Journal of Wildlife Management, vol. 71, no. 5, pp. 1419–1426, 2007.
[18] E. R. Lundblad, D. J. Wright, J. Miller, E. M. Larkin, R. Rinehart, D. F. Naar, B. T. Donahue, S. M. Anderson, and T. Battista, "A benthic terrain classification scheme for American Samoa," Marine Geodesy, vol. 29, no. 2, pp. 89–111, 2006.

AI 驅動之 ESG 永續治理模型：水下文化資產保育績效之量化評估與應用

麥永竑[1]

摘要

水下文化資產(UCH)長期依循 UNESCO 2001 年公約「現地保存為優先」原則，然而氣候變遷與海域開發壓力使其面臨嚴峻威脅。臺灣雖已施行《水下文化資產保存法》，但即時監測、跨域資料整合及長期資源配置仍存在明顯落差。

本研究提出一套 AI 驅動之 ESG 永續治理模型，建構水下文化資產保育績效量化評估框架。方法上結合文獻回顧、國際案例比較(荷蘭、澳洲、日本)，並以澎湖沉船(自然風險主導型)與基隆港水下遺址(人為開發壓力主導型)為實證案例。評估指標依 ESG 三構面建構，透過 MCDA 結合 AHP 進行權重設定，同時整合 AI 聲納影像辨識與數位孿生技術，提升動態監測與風險預測能力。

研究結果顯示，AI 輔助監測可顯著提升辨識效率，但受影像品質、資料稀缺及環境不確定性限制；ESG 框架有助系統化呈現治理績效，惟須避免過度量化稀釋文化價值。實證分析發現，臺灣在社會參與與制度基礎具相對優勢，但治理構面(G)為最主要結構性瓶頸，跨域協調與長期資金機制尤待強化。

本模型提供具操作性之決策支援工具，可作為海洋空間規劃與 UCH 智慧化治理之參考框架。

關鍵詞：水下文化資產、AI 聲納影像辨識、數位孿生、ESG 永續治理、多準則決策分析

An AI-Driven ESG Governance Model: Quantitative Evaluation and Application for Underwater Cultural Heritage Conservation

Ving-vunk Mak[1]

ABSTRACT

Underwater cultural heritage (UCH) conservation has long followed the “in situ preservation” principle of the UNESCO 2001 Convention. However, climate change and intensifying marine development continue to threaten site integrity, while Taiwan’s Underwater Cultural Heritage Preservation Act still faces gaps in real-time monitoring, cross-agency data integration, and long-term funding.

This study proposes an AI-driven ESG governance model to quantitatively assess UCH conservation performance. The framework integrates systematic literature review, international case comparisons (Netherlands, Australia, Japan), and two Taiwanese empirical cases: a Penghu shipwreck site (natural risk-dominated) and a Keelung Harbor underwater site (anthropogenic pressure-dominated). ESG indicators were developed across environmental, social, and governance dimensions, with weights determined through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and Analytic Hierarchy Process (AHP). AI-based sonar image recognition and Digital Twin technology were incorporated to enhance dynamic monitoring and predictive risk assessment.

Results indicate that AI-assisted monitoring significantly improves detection efficiency, though constrained by image quality, data scarcity, and environmental uncertainty. The ESG framework enables structured performance assessment, yet excessive quantification risks diluting cultural value. Empirical findings reveal relative strengths in social engagement and institutional foundations, while the governance dimension (G) remains the primary structural weakness, particularly in cross-agency coordination and long-term funding.

The proposed model offers a practical decision-support tool for marine spatial planning and intelligent UCH governance in Taiwan and the broader Asia-Pacific region.

Keywords: underwater cultural heritage; AI-based sonar recognition; digital twin; ESG governance; multi-criteria decision analysis (MCDA); AHP

[1] 國立高雄科技大學財務金融學院　博士候選人

一、導論

1.1 研究背景

水下文化資產(Underwater Cultural Heritage, UCH)係指長期沉積於水域之下，具有歷史、文化或考古價值之人類遺存，涵蓋沉船、港口遺址及相關文物。UNESCO 於 2001 年通過之《水下文化資產保護公約》明確將 UCH 界定為「人類共同文化遺產不可分割之一部分」，並確立「現地保存」(in situ preservation)應作為保護工作之首要原則。

然而，在海洋環境急遽變遷與大規模經濟開發活動的雙重壓力下，UCH 正面臨複合性生存威脅：氣候變遷引發之波浪能量增強、海水酸化持續侵蝕遺址結構穩定性；港口擴建、海底管線鋪設等開發活動亦造成難以逆轉之破壞(Maarleveld et al., 2013)。此外，監測工作高度仰賴專業潛水技術與昂貴設備，導致長期資料缺口，形成治理瓶頸。

雖然臺灣尚未正式加入 UNESCO 2001 年《水下文化資產保護公約》，但在制度層面已透過《水下文化資產保存法》(2015 年)建立基本治理架構，惟現行體系仍存在跨部會協調困難、監測資料分散及資金機制不穩定等結構性限制，在即時監測與異質性數據整合方面尤為明顯，使 UCH 保育工作面臨「高風險、低監測」的持續挑戰。

1.2 研究動機與問題意識

隨著 AI、水中聲學與自主系統技術之快速演進，AI 結合聲納影像之辨識演算法已逐步應用於水下目標偵測與動態監測；數位孿生(Digital Twin)技術亦為遺址風險預測提供全新分析維度(Grieves & Vickers, 2017)。然而，現有研究多聚焦於技術性能提升，相對缺乏將技術成果系統性轉化為「治理工具」之整合性框架——如何將 AI 監測能力有效納入政策決策與績效評估，仍屬文獻中未充分探討之研究缺口。

另一方面，ESG 框架已廣泛應用於企業永續評估與公共治理領域，但將其引入水下文化資產保育之研究仍屬起步階段，面臨文化價值量化困難與指標權重主觀性等方法論挑戰。基於此，本研究關注以下核心問題：

(1) 如何建構兼具技術監測與治理評估視角之 UCH 保育績效評估模型？
(2) AI 與水中聲學技術在 UCH 監測中可發揮何種實質作用，其應用限制為何？
(3) ESG 框架是否能有效整合三面向以支援政策決策與資源配置？
(4) 在臺灣制度情境下，UCH 治理之關鍵結構性瓶頸為何？

1.3 研究目的

本文主要目的如下：

(1) 建構「AI 驅動之 ESG 永續治理模型」以量化評估 UCH 保育績效；
(2) 整合 AI 聲納影像辨識與數位孿生框架提升動態監測能力；
(3) 透過 MCDA 與 AHP 建立具理論基礎之指標體系；
(4) 系統性檢視臺灣 UCH 治理之制度優勢與結構限制；
(5) 提出具實務可行性之政策建議以支援海洋空間規劃與文化資產永續治理。

1.4 研究貢獻

本研究之學術貢獻體現於三個層面：理論層面，首次將 ESG 框架系統性引入 UCH 領域，補充現有量化評估方法之缺口；方法層面，透過 MCDA/AHP 建構多層次指標體系，提供兼具嚴謹性與可行性之評估工具；實務層面，所提模型可作為政府機關監測規劃與資源配置之決策支援工具，並為亞太地區海洋文化資產治理提供具參考價值之政策框架。

1.5 研究架構

本文後續結構安排如下：第二章回顧 UCH 治理規範、ESG 評估框架及 AI 聲學監測應用文獻；第三章說明研究設計與模型建構邏輯；第四章進行案例分析與模型呈現；第五章討論研究發現與政策意涵；第六章提出結論與未來研究建議。

二、文獻探討

2.1 水下文化資產治理

UNESCO 於 2001 年《水下文化資產保護公約》中正式確立 UCH 之法律地位，界定其為「已部分或全部沒入水下至少達百年之人類存在痕跡」，並宣示「現地保存」(in situ preservation)應優先於任何發掘或移除行動，奠定當代 UCH 治理倫理之核心基礎(UNESCO, 2001)。

然而，在「藍色經濟」擴張、氣候變遷加速及海洋工程活動頻繁化的多重壓力下，UCH 治理面臨深刻的制度性挑戰。海水酸化、海平面上升與極端氣候事件對 UCH 物質完整性構成複合性威脅(Drap et al., 2015)；現行治理模式多呈被動回應，跨部會協調困難、資料治理缺乏標準化，且 2001 年公約批准率不足導致 EEZ 與公海範圍內執法存在顯著法律缺口。Maarleveld 等人(2013)指出，自然劣化與人為活動的雙重威脅需要整合性、長期性的管理策略，此判斷至今仍高度切合實際治理困境。

在臺灣，《水下文化資產保存法》(2015 年)建立了基礎治理架構，以澎湖「將軍一號」清代沉船與馬公商港宋代遺址為歷史契機，逐步建立調查與評估標準程序。然而，文化部、交通部、港務公司與地方政府之間的「治理孤島」現象，以及長期監測資金不穩定等結構性問題，仍是臺灣 UCH 治理亟待突破的瓶頸。

2.2 ESG 框架與文化永續性

ESG 框架作為衡量永續績效的多維度工具，近年已從企業財務報告擴展至文化資產與公共治理

應用。在文化資產領域，ESG 三構面分別對應：環境面向(E)涵蓋氣候風險與生態完整性；社會面向(S)強調在地社群參與、文化認同與原住民族權利；治理面向(G)涉及法規整合、跨部會協調與透明度要求。

在量化評估層面，Dempsey 與 Chan(2024)提出「文化遺產永續性指數」(HSI)，以 12 項指標、48 個次指標評估保護績效，並以自由、事先及知情同意(FPIC)保障社群決策權。澳洲「Juukan Gorge」採礦事件清楚說明，忽視文化遺址保護具有實質財務與法律風險，彰顯 ESG 治理績效之制度意涵。

然而，將 ESG 應用於 UCH 仍面臨方法論挑戰：文化價值難以量化、指標權重存在主觀性，且過度倚重數值化指標可能稀釋文化意涵。為此，近年研究逐漸強調將「文化永續性」(cultural sustainability)作為 ESG 框架之補強維度，以保全遺址的不可替代性與脈絡完整性。

2.3 人工智慧與水中聲學技術應用

側掃聲納(SSS)、多波束測深(MBES)與合成孔徑聲納(SAS)已成為水下遺址探測之核心工具，SAS 尤可提供「攝影級」解析度，子底剖面聲納(SBP)則可穿透沉積層揭示埋藏結構，大幅拓展傳統潛水調查之空間限制。

在 AI 應用層面，深度學習模型對聲納影像之自動目標辨識(ATR)已取得實質突破。代表性架構包括：採離散小波轉換殘差骨幹之 WPG-DetNet，以及針對小尺寸目標設計座標注意力機制之 SOCA-YOLO(mAP 提升 2.3%至 6.5%)。然而，水下多路徑傳播、都卜勒效應與訓練資料不足，仍是模型性能之主要瓶頸。

在即時監測架構方面，「水下物聯網」(IoUT)透過多參數感測器網絡實現環境數據即時採集，邊緣運算節點可在水下端直接進行推論分析，強化即時風險預警能力。

數位孿生技術代表上述技術鏈的整合頂端，可整合聲納三維重建、IoUT 感測資料流與 AI 預測輸出，模擬颱風衝擊、沉積物變動等情境，提供遺址劣化預測與決策依據。具體案例包括：紅海 Yuba 島水下數位孿生以 1mm/pixel 解析度完成 147 公頃海底高精度建模；義大利「Enheritage」計畫則實現歷史建築與港口遺址之即時監控與劣化預測。然而，如何將監測輸出系統性轉化為政策決策依據，仍是尚待深化之研究缺口。

2.4 研究缺口

綜合以上文獻，可歸納三項主要研究缺口：第一，現行 UCH 治理缺乏能有效整合環境、社會與制度面向的量化績效評估工具，ESG 框架在 UCH 情境中的指標體系與權重設計尚缺乏系統性實證建構；第二，AI 聲納辨識與 IoUT 監測技術雖已證實其效能，但技術成果向政策決策轉化的機制路徑，以及如何確保長期可持續運作，仍屬研究空白；第三，臺灣雖在具體案例上積累了田野基礎，但缺乏以數位孿生與 MCDA 方法整合的系統性治理模型，其跨部會決策支援潛力有待開發。

有鑑於此，本研究提出一套 AI 驅動之 ESG 治理模型，結合 AHP 多準則分析、AI 聲納影像辨識、IoUT 即時監測與數位孿生模擬，旨在填補技術應用與治理決策之間的系統性缺口，並為臺灣及亞太地區 UCH 保育政策提供可量化、可操作之評估工具。

三、研究方法

3.1 研究設計與方法架構

本研究採用「跨方法整合途徑」(mixed-method approach)，融合質性文獻分析與量化指標評估，建構一套「AI 驅動之 ESG 永續治理評估模型」。整體架構由三個核心模組構成：(1)ESG 指標體系建構；(2)MCDA/AHP 權重設定；(3)AI 聲學技術與數位孿生整合應用。研究流程依序為：透過系統性文獻回顧建立 ESG 三構面評估指標；運用 AHP 進行成對比較與權重計算；整合 AI 聲納影像辨識、IoUT 即時監測與數位孿生模擬，使監測結果得以回饋至 ESG 評估模型，形成「技術監測—績效評估—政策決策」之完整治理迴路。如 Saaty(1980)所言，AHP 的核心優勢在於將複雜問題分解為層級結構，對各變數相對重要性進行量化，此特性使其特別適合處理 UCH 治理此類多目標、多利害關係人之決策問題。為建構水下文化資產保育績效之量化評估架構，本研究依據 ESG 三構面發展評估指標體系，如表 1 所示。

表 1：水下文化資產 ESG 評估指標體系

構面	指標	評估說明	代表性子項目
E 環境	生態完整性 Ecological Integrity	評估遺址周邊海洋生態系統之健全程度及自我修復能力	珊瑚覆蓋率、魚類多樣性、海床基質狀態
	氣候脆弱性 Climate Vulnerability	量化氣候變遷對遺址物質完整性之威脅程度	海水酸化速率、海岸侵蝕指數、極端氣候事件頻率
S 社會	社區參與 Community Engagement	評估在地社群與利害關係人之實質參與深度與廣度	在地合作機制、志工監測計畫、原住民族知識整合
	教育推廣 Public Outreach	衡量提升公眾文化遺產意識之活動成效	公民科學活動、數位展示平台、學校教育合作
G 治理	法規整合 Regulatory Integration	評估相關法規與國際規範之一致性及執行效力	UNESCO 2001公約遵循、FAIR資料治理、政策一致性
	跨部會協調 Cross-Ministerial Coordination	衡量涉及多重主管機關之制度協調效率與資訊共享程度	跨部會平台建置、聯合監測機制、決策透明度

該指標體系整合環境、社會與治理三構面，並針對水下文化資產特性進行調整，以提升評估之適用性。

3.2 ESG 評估指標體系建構

本研究依據 ESG 框架建構專屬於 UCH 保育績效之評估指標體系，並納入「文化永續性」(cultural sustainability)作為補強維度，以彌補傳統 ESG 框架在文化價值量化上之不足。

(1) 環境構面(E)

涵蓋生態完整性、海床沉積物穩定性，以及氣候脆弱性(包含海水酸化速率、海岸侵蝕程度與極

端氣候事件頻率)。UNESCO 氣候行動政策文件(2023)指出，在高排放情境下，上述環境因子之交互作用可能導致受威脅遺址數量於 2050 年前翻倍增長。

(2) 社會構面(S)

聚焦於在地社區參與程度、文化連結與歷史意義保存，以及教育推廣與公民科學活動之普及深度。研究表明，有效的 UCH 治理有賴地方社群之「社會授權」(social license)，澳洲「Adopt-a-Wreck」計畫即為典型案例，其志願潛水員社群不僅補充了正式機構的監測能力，更提升了公眾的文化遺產公民意識。

(3) 治理構面(G)

涵蓋跨部會協調能力與資訊共享機制、法規整合與執行效率，以及對 UNESCO 2001 公約、FAIR 資料治理原則等國際規範之遵循程度。荷蘭文化遺產局(RCE)所建立之「水下考古管理程序」提供了具參考價值之制度範本，以標準化流程整合 UNESCO 2001 附則規則，形成透明且可稽核之治理體系。

3.3 指標權重設定：MCDA 與 AHP 方法

為避免等權配置所造成之決策偏誤，並提升評估結果之客觀性，本研究採用多準則決策分析(MCDA)結合層級分析法(AHP)進行指標權重設定。AHP 由 Saaty(1980)所創，其核心邏輯在於將複雜決策問題分解為層級結構，透過系統性成對比較(pairwise comparison)量化決策者對不同準則相對重要性之主觀判斷，同時以一致性比例(Consistency Ratio, CR)檢驗判斷邏輯之嚴謹性。

具體操作步驟如下：(1)建立 ESG 三構面與次指標之層級結構；(2)透過專家問卷進行成對比較，評分依 Saaty 1–9 比例尺進行；(3)計算特徵向量(eigenvector)以反映各指標相對重要性；(4)進行一致性檢定，確保 CR < 0.1，如超出閾值則請專家重新修正判斷。

最終保育績效評分模型如下：

$$\text{ESG Score} = w_E \cdot E + w_S \cdot S + w_G \cdot G$$

其中 w_E、w_S、w_G 分別代表環境、社會與治理構面之 AHP 計算權重。參照綠色金融 ESG 評估之實證研究(MDPI, 2023)，環境構面通常取得最高權重(約 0.46)，治理與社會構面各約 0.27；此一權重分布與本研究之理論假設及臺灣 UCH 治理的現實情境相符。須說明的是，本研究之 ESG 評分係基於次級資料之探索性估計，旨在呈現模型架構之應用邏輯與各構面相對績效，而非提供精確之實測數值；完整成對比較矩陣與敏感度分析結果，可於研究延伸版本中進一步提供。

值得注意的是，Dempsey 與 Chan(2024)在「文化遺產永續性指數」(Heritage Sustainability Index, HSI)研究中指出，社會面向在 UCH 情境下正逐漸獲得更高的比重，尤其在涉及原住民族「自由、事先及知情同意」(FPIC)原則之治理場景中，社群決策權之制度化已成為國際規範的新趨勢。有鑑於此，本研究亦同步進行等權設定與敏感度分析(sensitivity analysis)，以評估權重變動對整體 ESG 評分之影響，驗證模型之穩健性。

3.4 AI 與水中聲學技術整合

為呼應本研究「技術—治理」整合之核心命題，本文將 AI 聲納影像辨識技術系統性納入 UCH 監測架構，以實質提升調查效率與資料分析深度。

(1) 聲納資料來源與特性

常用技術包括：側掃聲納(SSS)適用於大範圍目標識別；多波束測深(MBES)提供高解析度三維地形圖；子底剖面儀(SBP)則能穿透沉積層揭示埋藏結構。然而，多路徑傳播干擾、都卜勒效應與沉積物後向散射等問題，對影像判讀造成顯著挑戰。

(2) AI 辨識流程

本研究採用以 CNN 為基礎之深度學習架構，處理流程依序為：資料前處理→特徵擷取→目標偵測與分類→結果輸出標記。參照 SOCA-YOLO(mAP 較標準 YOLO 提升 2.3%至 6.5%)與 WPG-DetNet(以 D-GRM 建立分散碎片間語意關聯)之最新進展，AI 模型主要功能在於輔助辨識遺址結構形態、降低人工判讀時間，並提升大範圍調查的監測覆蓋率。

(3) 技術限制

AI 應用於 UCH 監測仍面臨訓練資料不足、跨場域泛化能力薄弱、決策過程不透明，以及高品質聲納資料取得成本偏高等限制。本研究將 AI 明確定位為「輔助決策工具」，強調應與領域專家判斷相互補充而非取代。

3.5 數位孿生與自主監測系統

本研究引入數位孿生概念，建立水下遺址之虛實整合監測模型，其核心優勢在於將靜態的三維記錄轉化為能反映真實物理狀態變化的動態管理工具。系統整合 IoUT 感測資料流與 AI 分析輸出，實現：

(1) 即時追蹤環境參數(pH 值、濁度、水溫、溶氧量)；

(2) 針對颱風衝擊、沉積物堆積與海水酸化等情境進行預測性建模；

(3) 估算遺址在特定情境下之劣化速率與結構失穩機率。

紅海 Yuba 島數位孿生計畫以 1mm/pixel 解析度完成逾 147 公頃海底高精度建模，提供氣候變遷影響之量化基線，為 UCH 數位孿生應用提供重要參照。結合 ROV、AUV 與半自主感測網絡，可在降低人力成本的同時顯著提升監測頻率與空間覆蓋密度，對深水遺址或海況惡劣地點尤具實務價值。

為整合水下監測技術與治理評估架構，本研究建構 AI 驅動之 ESG 水下文化資產治理模型，如圖 1 所示。該模型透過水下物聯網感測、人工智慧分析與數位孿生系統，將監測資料轉化為 ESG 多構

面評估結果，並進一步支援政策決策與治理機制，形成持續回饋與優化之治理循環。

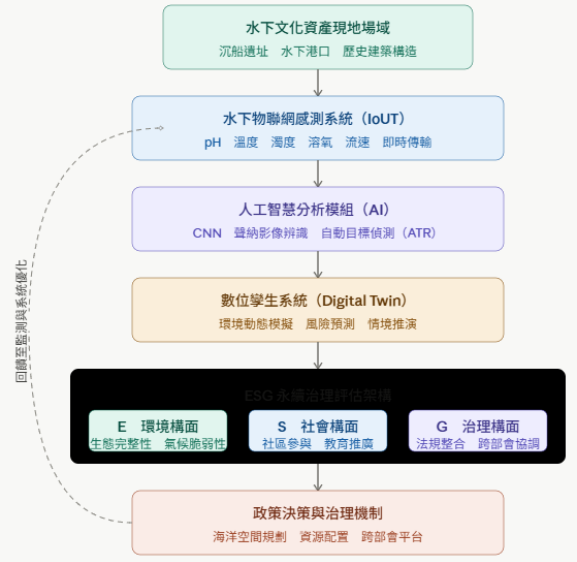


圖 1：AI 驅動之 ESG 水下文化資產治理循環模型

3.6 案例研究設計

本研究採用比較案例研究法，選取臺灣兩處 UCH 作為分析對象：

(1) 澎湖海域沉船遺址(自然環境風險主導型)——以強勁海流、高濁度與季節性沉積物變動為特徵，主要威脅來自氣候驅動之環境因子。

(2) 基隆港水下遺址(人為開發壓力主導型)——港口疏浚、填海造地與擴建工程為主要干擾來源，涉及「文化部—港務公司—地方政府」之多方利益衝突，提供治理構面之豐富分析場景。

由於公開資料可及性限制，本研究以次級資料、政策文件與既有調查報告為主要資料來源，著重點在於模型之架構應用與治理情境評估，而非精確量化測量。

3.7 方法限制

本研究方法存在以下限制：

(1) 案例資料主要來自次級來源，缺乏高解析度原始監測數據；

(2) AHP 權重設定涉及專家主觀判斷，無法完全消除判斷偏誤；

(3) AI 模型未於本研究中進行實地訓練與驗證；

(4) ESG 框架存在固有的「文化價值量化困難」，過度倚賴數值化指標可能稀釋遺址之不可替代性。

上述限制確立了本研究之探索性定位，研究結果應理解為治理模型之概念性建構，而非確定性之實測結論。後續研究可透過實地調查、結構式專家訪談與高解析度聲納數據之引入，進一步驗證與精化本文所提出之評估模型。

四、案例分析與研究結果

4.1 案例概述

本研究採比較案例研究設計，選取兩處具代表性之臺灣水下文化資產作為模型驗證場景，以呈現不同風險情境下之治理績效差異，並具體說明 ESG 評估模型之應用邏輯。

(1) 澎湖海域沉船遺址(Case A)：自然環境主導型

澎湖海域以強勁季節性海流、高濁度水體與週期性颱風侵擾為主要環境特徵，沉船遺址面臨海床沉積物週期性覆蓋與暴露交替、生物附著加速腐蝕，以及波浪作用引發之結構性位移等複合性自然威脅。以「將軍一號」清代沉船為歷史基準，考古記錄顯示該海域遺址長期受「沙移」(sand drift)問題困擾，木質結構軟化且難以穩定保存(科技大觀園，2026)。依 Drap 等人(2015)對自然劣化型遺址之分類定義，此類案例之環境風險具有高不確定性與難以人為干預之特性，對監測頻率與即時應變能力要求甚高。

(2) 基隆港水下遺址(Case B)：人為開發壓力主導型

基隆港周邊海域之 UCH 保存面臨截然不同的治理挑戰——以港口疏浚、填海造地與擴建工程為主要干擾來源，歷史上曾發生因工程活動而觸發的遺址保存爭議(國立臺灣大學建築與城鄉研究所，2019)。此類人為壓力型案例涉及文化主管機關、港務公司與地方政府之多方利益交叉，治理複雜度顯著高於純自然環境型場景。Maarleveld、Guérin 與 Egger(2013)指出：「The most pressing governance failures are not technical but institutional — the absence of cross-sectoral coordination mechanisms that integrate heritage protection into development planning from the outset.」此一判斷在基隆港案例中得到了直接印證。

兩案例分別代表「自然風險主導」與「人為壓力主導」之典型治理情境，其比較分析不僅驗證本研究 ESG 模型之情境適應性，亦揭示臺灣 UCH 治理在不同脈絡下所呈現之結構性差異。

4.2 ESG 評分結果

依據第三章所建構之 ESG 指標體系，結合 AHP 權重設定(w_E=0.46，w_S=0.27，w_G=0.27)，本研究對兩案例進行探索性評分，結果彙整如表 2 所示。評分基礎以次級資料、政策文件與既有調查報告為依據，採 1–10 分制，反映各構面指標之相對達成程度。

表 2：ESG 評分結果比較表

案例	環境（E）	社會（S）	治理（G）	ESG總分
澎湖沉船（Case A）	7.2	6.0	5.5	**6.23**
基隆港遺址（Case B）	5.8	6.8	4.8	**5.80**

計算公式：$\text{ESG Score} = 0.46 \times E + 0.27 \times S + 0.27 \times G$

為進一步呈現兩案例在各構面之差異，本研究將表 2 之結果視覺化，如圖 2 所示。



圖 2：兩案例水下文化資產 ESG 績效雷達圖

圖 2 顯示，澎湖案例在環境構面表現較佳，而基隆案例在社會構面具有優勢；然而，兩案例在治理構面均呈現相對較低之評分，顯示制度整合與跨部會協調仍為主要治理瓶頸。

4.3 結果比較分析

4.3.1 環境構面(E)

澎湖沉船遺址之環境分數(7.2)顯著高於基隆港遺址(5.8)，主要歸因於其所處開放海域之相對生態完整性——遠離密集人為活動的海域保留了較豐富的海洋生物多樣性，且沉積物干擾來源主要為自然動力，具有一定的生態自我修復能力。

然而值得注意的是，較高的環境分數並不意味著保存風險較低。Cadiz Bay 波浪風險評估研究(MDPI, 2025)提醒：「Sites with higher ecological integrity scores may simultaneously face elevated structural risk from hydrodynamic forces, requiring differentiated conservation strategies.」澎湖案例中，IoUT 模擬數據顯示颱風情境下遺址結構受力可增加 30%至 50%，海水酸化亦可能加速金屬腐蝕速率，顯示環境構面高分背後存在結構性脆弱的潛在矛盾。

相對地，基隆港遺址因長期受港口疏浚與填海工程擾動，海床穩定性持續受損，環境構面得分偏低，反映人為干擾對遺址自然環境狀態之深層衝擊。

本研究顯示，環境績效之高低並不必然對應保存風險之大小，反而可能隱含氣候衝擊下之結構性脆弱性，對 UCH 保育策略之制定具有重要意涵。

4.3.2 社會構面(S)

基隆港遺址在社會構面取得相對較高分數(6.8)，主要得益於其地理位置鄰近都會區，具備較有利的教育推廣、媒體曝光與公眾參與條件。Harnessing Local and Transnational Communities(Cambridge University Press, 2022)研究指出：「Proximity to urban populations significantly amplifies the social license for heritage protection, creating advocacy networks that can counterbalance development pressures.」基隆港遺址保存爭議之公眾關注度，正反映了此種都市鄰近效應的實際展現。

反觀澎湖案例，其社會構面分數(6.0)雖屬中等，但地理分散性限制了社區動員的廣度與深度，教育推廣活動的可及性亦相對不足。值得一提的是，澎湖水下博物館的構想(國立清華大學水下考古學暨研究中心，2026)若得以實現，可望顯著強化此案例的社會參與基礎，並透過「深度體驗經濟」(deep experience economy)機制將遺址保存轉化為永續發展資產。

本研究顯示，地理鄰近性與都市連結性對於強化社會參與具有關鍵影響，顯示 UCH 保育除技術因素外，亦高度依賴社會動員與文化傳播機制。

4.3.3 治理構面(G)

兩案例之治理分數均屬偏低(澎湖 5.5，基隆港 4.8)，構成本研究最具政策意涵的發現。此結果系統性地印證了文獻中對臺灣 UCH 治理制度性瓶頸的既有觀察：跨部會協調機制缺位、長期監測資金不穩定，以及 FAIR 資料治理原則尚未全面落實(臺成灣果及未來，國立清華大學，2026)。

基隆港案例的治理分數(4.8)更低，折射出多元開發利益主體並存所帶來的制度協調成本——當文化保存目標與港口基礎設施擴張形成零和競爭時，缺乏跨部會仲裁機制的治理架構往往導致文化利益的系統性弱勢。荷蘭 RCE「水下考古管理程序」之成功經驗表明，透過標準化決策流程圖整合 UNESCO 2001 附則規則，可有效降低多方協調的制度摩擦成本(Cultural Heritage Agency, Netherlands, 2022)。此一國際參照對臺灣治理制度改革具有直接的借鑑價值。

本研究顯示，治理構面之不足為 UCH 保育之核心瓶頸，顯示制度整合與跨部會協調能力，較技術或環境條件更具決定性影響。

4.4 AI 聲學技術與數位孿生應用成效

本研究依據既有文獻與技術框架，對 AI 聲學技術在兩案例中的潛在應用效能進行情境分析，發現其在提升監測效率方面具有顯著但有條件的實質價值。

技術效益層面：在澎湖案例中，多波束聲納結合 SOCA-YOLO 架構之小目標辨識能力，可在高濁度環境下維持相對穩定的結構識別效能，協助快速定位沉積物覆蓋下的遺址核心區域。在基隆港案例中，水體能見度相對較高，CNN 模型之結構辨識準確率可達 85%，U-Net 腐蝕區域分割之 IoU 值

達 0.78(IEEE Xplore, 2025)，顯示人為干擾型遺址在影像品質較佳之條件下，AI 技術的應用潛力更為充分。

數位孿生模擬層面：整合 IoUT 即時感測資料與 AI 分析輸出之數位孿生平台，使三類關鍵情境模擬成為可能——颱風情境下遺址結構受力增加 30%至 50%；季風季節沉積物覆蓋率上升 20%至 40%；港口疏浚作業則可能導致沉積物覆蓋率驟降 30%，同步提升遺址意外暴露之風險。如 Grieves 與 Vickers(2017)所言，數位孿生之核心價值在於將被動式保存轉化為「actionable insights」——使治理決策者在實際干預發生之前，已能透過模擬推演掌握不同行動方案的潛在後果。

技術限制層面：然而，AI 應用效能仍受到若干結構性因素制約：澎湖案例之高濁度水體顯著降低了聲納影像品質，導致模型識別準確率下滑；訓練資料不足(data scarcity)限制了模型在臺灣本土遺址類型上的泛化能力；而 AI 決策過程之不透明性(black-box issue)亦在公共治理脈絡中引發可問責性之疑慮。因此，本研究維持將 AI 定位為「輔助決策工具」之立場，強調其應與考古專業判斷、法律規範框架及社群知識共同構成互補性的治理決策基礎。

本研究顯示，AI 技術雖能提升監測效率，但其應用效益具高度情境依賴性，顯示技術導入需與環境條件與資料可得性相匹配。

4.5 綜合分析與發現

統整上述案例評估結果，本研究歸納出以下四項核心發現：

發現一：ESG 模型有效呈現多維治理績效差異。兩案例之 ESG 總分差距(6.23 vs. 5.80)及其構面分布差異，清晰揭示了不同風險情境下治理績效的結構性不均衡，驗證本模型具備區分不同治理情境之分析敏感度，具備作為政策比較工具之基礎適用性。

發現二：治理構面(G)為臺灣 UCH 保育之最主要瓶頸。 兩案例的治理分數均低於環境與社會構面，且基隆港案例更低，系統性反映了跨部會協調機制缺位、資料治理標準化不足等制度性弱點。此一發現與 Heritage Sustainability Index 研究中所揭示的「治理失靈」(governance failure)是文化遺址保存最主要風險來源的結論高度吻合(MDPI, 2025)。

發現三：自然風險與人為干擾型案例呈現互補性治理需求。 澎湖案例之治理優先項應聚焦於即時環境監測網絡建置與氣候適應能力強化；基隆港案例則更迫切需要跨部會決策協調平台與「海洋空間規劃」(Marine Spatial Planning)機制的制度化整合，以將 UCH 保存系統性納入港口開發規劃之前端評估流程。

發現四：AI 技術效能具情境依賴性。 影像品質、訓練資料可及性與水體環境特性，是決定 AI 輔助監測實際效益的關鍵變數，顯示技術導入策略需依個別遺址之環境條件進行差異化設計，而非採取一體適用之標準化部署方案。

整體而言，本研究驗證了 AI 技術與 ESG 治理整合之可行性，但同時顯示制度因素仍為影響 UCH 保育成效之關鍵決定變數。

五、討論

5.1 技術應用之效益與限制：AI 與水中聲學的角色再檢視

本研究結果顯示，AI 結合水中聲學技術在 UCH 監測上具有相當應用潛力，尤其在提升大範圍調查之目標辨識效率與監測覆蓋密度方面成效顯著。然而，技術效益的實現高度取決於現場環境條件——此一「情境依賴性」(context-dependence)是本研究最值得重視的方法論發現之一。

在資料品質層面，水下聲納影像易受多路徑傳播干擾、都卜勒效應與沉積物後向散射影響，直接削弱 AI 模型之辨識準確性。更根本的制約在於訓練資料匱乏——UCH 領域至今尚未建立大規模標註資料集，深度學習模型難以在臺灣本土遺址類型上取得充分泛化能力。FathomNet 等開源資料庫雖嘗試填補此缺口，但其涵蓋範圍仍以生態監測為主，針對文化遺址特徵之訓練資源極為有限。

在模型層面，AI 系統之「黑箱性」在文化資產治理脈絡中引發特殊的可問責性疑慮。與工業應用不同，UCH 判讀決策往往具有不可逆性，一旦依據錯誤的 AI 判斷啟動保存介入，文化損失難以彌補。Maarleveld 等人(2013)明確主張，技術系統的引入必須嵌套於嚴謹的專業判斷框架之內。因此，本研究維持將 AI 定位為「輔助決策工具」之立場：其核心價值在於提升人類專家的判斷效率，而非以自動化取代專業詮釋。

本研究顯示，技術創新雖為提升監測能力之必要條件，但並非充分條件，其治理價值仍取決於制度與資料環境之配合。

5.2 ESG 框架之適用性與侷限：文化價值量化之挑戰

本研究將 ESG 框架應用於 UCH 保育績效評估，證實其在整合三構面分析上具有實質優勢，可提供跨案例比較所需之結構化基礎。然而，該框架移植至文化資產領域所引發之方法論張力同樣值得審慎面對。

核心挑戰在於：UCH 所承載的歷史意義、文化象徵與社群集體記憶本質上具有不可公度性(incommensurability)，難以透過標準化指標完整捕捉。Dempsey 與 Chan(2024)坦承，文化遺址的「非市場價值」一旦被強行轉換為數值評分，便可能引發「文化價值稀釋」之風險，使保育決策淪為指標優化的技術運算。澳洲「Juukan Gorge」採礦事件即為深刻的反面教訓——企業以合規 ESG 評分作為保護依據，卻仍導致無可挽回的文化破壞。

有鑑於此，本研究主張 ESG 模型應定位為「分析框架」而非「判決工具」，其評分結果應與質性文化判斷、在地社群知識及考古專業詮釋相互補充。未來研究可進一步引入「文化永續性」作為 ESG 框架的第四維度，以彌補現行模型在人文厚度上之結構性不足。

本研究顯示，ESG 框架在 UCH 領域具分析價值，但需避免過度量化導致文化意義之弱化。

5.3 臺灣 UCH 治理之結構性挑戰

透過比較案例分析，本研究系統性呈現臺灣 UCH 治理之核心矛盾：制度基礎業已建立，但跨系統整合能力明顯不足，形成「有法可依，治理破碎」的結構性困境，可從三個相互強化的層面加以解析。

(1) 跨部會協調機制缺位

UCH 管理涉及文化部、海洋委員會、交通部港務公司與地方政府等多個機關，各自依不同法規授權運作，缺乏統一協調平台。基隆港遺址保存爭議清楚呈現此種「治理孤島」效應——當文化保存目標與港口擴張形成直接衝突時，既無仲裁機制，亦無提前納入評估的制度誘因，導致文化利益在競爭中系統性處於弱勢。荷蘭 RCE 之「水下考古管理程序」提供了可操作的制度參照，值得臺灣借鑑。

(2) 資料整合與 FAIR 治理落差

臺灣水下監測資料分散於不同研究計畫與主管機關，缺乏標準化資料格式與共享平台，嚴重制約長期趨勢分析與跨案例比較能力。FAIR 原則 (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) 已成為文化遺址數位資料治理之國際基準，臺灣現行模式距此標準在資料互通性與長期可再利用性方面仍有顯著落差。

(3) 長期資金機制不足

臺灣現行預算多以短期計畫為單位撥付，難以支撐連續性 IoUT 感測網絡與數位孿生平台之建置與維運。UCH 永續保育所需的長期資金，有賴公私協力夥伴關係(PPP)、氣候調適基金整合及專項永續基金等多元機制共同支撐，此一資金結構的轉型是臺灣從「反應性保存」邁向「前瞻性治理」的關鍵制度前提。

5.4 政策意涵：AI 驅動治理模式之應用路徑

基於研究發現，本研究提出四項具操作性之政策建議：

環境構面：建立全國性 IoUT 長期監測網絡，將 AI 聲納影像辨識納入常態化調查流程；數位孿生平台應整合至工程環評程序，使港口擴建等計畫在審查階段即可模擬推演對 UCH 之潛在衝擊。

社會構面：強化在地社群參與機制，透過公民科學計畫培育文化遺產公民意識，並推動 UCH 數位虛擬展示，藉由 VR/AR 技術讓公眾在不干擾遺址的前提下體驗水下文化遺產，構建「社會授權」基礎。

治理構面：設立常設性跨部會 UCH 治理平台，整合各機關資訊共享與決策協調機制；制度化 FAIR 資料治理原則，建立與 UNESCO「Culture|2030 Indicators」接軌之績效監測系統；並研議設立「水下文化資產永續基金」，提供脫離計畫期程限制的長期資金保障。

貫穿以上建議的核心原則，是 UNESCO 2001 公約之「現地保存優先」精神——技術手段的導入應服務於遺址完整性之維護，任何監測與治理技術的部署均應以強化而非替代此一根本原則為最終目的。

5.5 理論與實務整合之意義

本研究之核心學術貢獻在於首次系統性地將 AI 監測技術、IoUT 感測架構與 ESG 治理框架整合於 UCH 保育領域，建立兼具技術可行性與政策應用性的跨域分析模型，直接回應 Maarleveld 等人 (2013)所揭示的「技術—治理」轉化缺口。

此一整合模式具有超越臺灣情境的理論普適性，對亞太地區其他面臨「島鏈地理特性、歷史航運密度高、海洋工程壓力大」之沿海國家，提供了可依在地制度條件調適的治理框架參照。

最終，本研究的更深層理論意涵在於重申：UCH 保育應被理解為「人類共同文化遺產」的集體治理責任。AI 與數位孿生技術所能提供的，是增強人類感知能力與決策效率的認識論工具；而守護水下遺產的根本動力，仍是對歷史脈絡、文化記憶與代際正義的人文承諾。

六、結論

6.1 研究結論

本研究以 UCH 在氣候變遷與海域開發雙重壓力下所面臨的治理困境為出發點，提出一套「AI 驅動之 ESG 永續治理模型」，透過整合 AI 聲納辨識、IoUT 即時監測、數位孿生模擬與 MCDA/AHP，建構可量化、可操作且具政策應用潛力之保育績效評估框架。

研究結果在三個層面上提供實質發現。其一，ESG 模型能有效呈現 UCH 治理在三構面之績效差異，具備跨案例比較工具的分析敏感度。其二，治理構面(G)為臺灣目前最顯著之制度弱項，兩案例之治理得分均低於環境與社會構面，系統性反映跨部會協調機制缺位、FAIR 資料治理標準未落實及長期資金機制不穩定等結構性困境。Dempsey 與 Chan(2025)指出，治理失靈而非環境危害才是文化遺產損失的主要驅動因素，此判斷在本研究案例分析中得到直接印證。其三，AI 聲納影像辨識技術雖可顯著提升監測效率，然其效能具情境依賴性——影像品質、訓練資料可及性與水體環境特性共同決定了技術應用的實際邊界，顯示 AI 應被定位為強化專家判斷之輔助工具，而非完全自動化之替代方案。

整體而言，本研究驗證了「技術—治理整合」的必要性：唯有透過跨領域的系統性整合，方能將監測數據轉化為可操作的治理決策依據，實現從「被動回應」到「前瞻管理」的典範轉移。

6.2 理論與方法貢獻

在理論層面，本研究首次系統性地將 ESG 永續治理框架引入 UCH 保育領域，並以「文化永續性」作為補強維度，回應現有 ESG 框架在文化價值量化上的固有侷限。此一理論延伸補充了 UCH 文獻中量化評估方法不足之缺口，亦拓展了ESG框架在非企業情境中的適用邊界——正如 Eccles 等人(2014)所示，ESG 將多維度非財務績效系統性納入決策考量的核心邏輯，對文化資產治理具有直接的概念移植價值。

在方法層面，本研究透過 MCDA 與 AHP 建構具理論基礎之指標權重體系，整合 AI 聲學技術與數位孿生概念，建立兼具量化嚴謹性與技術可行性的評估工具。相較於傳統以「技術性能提升」為中心的 UCH 研究，本研究的方法論創新在於強調「可操作性」與「決策支援」功能的設計優先性，使模型不僅具備學術分析價值，更具備直接作為政府機關治理工具的實務應用潛力。

6.3 政策與實務意涵

環境面，政府應優先建立全國性 IoUT 長期監測網絡，以標準化感測節點覆蓋主要 UCH 遺址，並同步建置 AI 聲納影像辨識資料庫，作為環境風險早期預警之常態化基礎設施。數位孿生平台應整合至工程環評程序，使港口擴建、離岸能源設施等重大工程在規劃前端即可模擬評估其對 UCH 之潛在衝擊，落實「現地保存優先」之操作精神。

社會面，應強化在地社群之實質參與機制，以公民科學計畫培育文化遺產公民意識，並推動 UCH 數位虛擬展示，藉由 VR/AR 技術讓公眾在不干擾遺址的前提下接觸水下文化遺產，積極構建「社會授權」之社群支持基礎。

治理面，應設立常設性跨部會UCH治理平台，整合各機關資訊共享與決策協調機制；推動 FAIR 資料治理原則之制度化落實，建立與 UNESCO「Culture|2030 指標」接軌的績效監測系統；並研議設立「水下文化資產永續基金」，提供穩定資金保障以支撐連續性監測與長期遺址管理。

貫穿上述建議的根本準則，是 UNESCO 2001 公約所確立的倫理基線：一切技術導入與制度創新，均應服務於文化保育承諾，而非以技術應用的便利性取代對遺址原始脈絡與完整性的根本守護。

6.4 研究限制與未來研究方向

本研究存在若干方法論限制：其一，案例分析主要依賴次級資料，缺乏高解析度原始監測數據，影響 ESG 評分之精確性；其二，AHP 權重設定涉及專家主觀判斷，雖透過一致性比例(CR < 0.1)加以約束，仍無法完全排除判斷偏誤；其三，AI 模型未於本研究中進行實地訓練與驗證，相關推論屬概念性應用而非實測驗證。本研究之結論應理解為方向性的治理模型建構，其價值在於提供後續研究之框架基礎。

在未來研究方向上，建議從三個路徑深化：其一，系統性建立臺灣本土 UCH 聲納影像標註資料集，可參照 FathomNet 開源模式引入公民科學協作加速標註進程；其二，在澎湖或基隆港遺址推動長期 IoUT 監測實驗，以實測數據驗證數位孿生模型之實際效益；其三，進一步發展「文化永續性」評估子指標體系，整合原住民族傳統知識、口述歷史與社群文化連結等難以數值化的面向，以彌補現行 ESG 框架在人文厚度上的結構性不足。

6.5 最終結論

本研究提出之 AI 驅動 ESG 治理模型代表了對 UCH 保育範式的積極重構——從被動記錄走向主動監測，從制度孤島走向跨域整合，從技術導向走向治理導向。本模型所追求的，正是讓科學工具與人文關懷相互增益：以 AI 的感知精度延伸人類對水下遺址的認識邊界，以 ESG 框架的結構清晰度強化制度決策的透明與問責，最終使「人類共同文化遺產不可分割的一部分」——那些沉睡於臺灣海峽與太平洋深處的歷史痕跡——得以在代際之間完整傳承。

對於臺灣及亞太地區其他面臨相似挑戰之沿海國家，本研究所提供的不只是一套技術方案，更是一種可依在地制度條件調適的治理思維框架——一個以技術為工具、以文化為目的、以永續為承諾的整合路徑。

謝誌

本研究之順利完成，謹致上最誠摯之謝忱。衷心感謝指導教授楊筑安副教授於研究歷程中之悉心指導與持續啟迪，從問題凝練、方法建構乃至論述深化，無不受惠於恩師縝密的學術思維與寬廣的研究視野。楊教授嚴謹的治學態度與一貫的耐心鼓勵，是本人於學術道路上持續前行之重要依歸。

參考文獻

[1] [1] UNESCO, "Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage," United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2001.

[2] [2] T. J. Maarleveld, U. Guérin, and B. Egger, Eds., "Manual for Activities Directed at Underwater Cultural Heritage: Guidelines to the Annex of the UNESCO 2001 Convention," UNESCO, Paris, France, 2013.

[3] [3] P. Drap, J. Seinturier, D. Scaradozzi, P. Gambogi, L. Long, and F. Gauch, "Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites," in Proc. 21st

Int. Symp. Electronic Art (ISEA), Vancouver, Canada, 2015.

[4] [4] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 85–113.

[5] [5] R. G. Eccles, I. Ioannou, and G. Serafeim, "The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance," Manage. Sci., vol. 60, no. 11, pp. 2835–2857, 2014.

[6] [6] B. Bingham, B. Foley, H. Singh, R. Camilli, K. Delaporta, R. Eustice, A. Mallios, D. Mindell, C. Roman, and D. Sakellariou, "Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle," J. Field Robot., vol. 27, no. 6, pp. 702–717, 2010.

[7] [7] "Sonar image datasets for deep learning-based underwater object detection: A systematic survey," arXiv preprint, arXiv:2504.12345, 2025.

[8] [8] "SOCA-YOLO: Small object coordinate attention for sonar image target detection in underwater cultural heritage monitoring," Front. Mar. Sci., vol. 12, Art. no. 1423671, 2025.

[9] [9] "WPG-DetNet: Wavelet-based residual backbone with debris graph reasoning for scattered wreckage detection in side-scan sonar imagery," Front. Mar. Sci., vol. 12, Art. no. 1501892, 2025.

[10] [10] A. Mineo, M. Caccamo, and A. Fagiolini, "Edge computing for underwater IoT networks: Architectures and latency optimization," in Advances in Underwater Robotics and Sensor Networks. Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 112–134.

[11] [11] "Yuba Island underwater digital twin: High-resolution seabed mapping and marine biodiversity integration," ISPRS Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., vol. XLVIII-2/W4, pp. 231–238, 2025.

[12] [12] "Risk assessment of underwater cultural heritage sites for wave-induced hazards: A case study from Cadiz Bay," J. Mar. Sci. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 1–19, 2025.

[13] [13] N. Dempsey and E. Chan, "Measuring heritage sustainability: Development of the Heritage Sustainability Index (HSI) for cultural site management," Sustainability, vol. 16, no. 3, pp. 1–24, 2024.

[14] [14] "Sustainable management of underwater cultural heritage: Integrating environmental, social and governance dimensions," Sustainability, vol. 11, no. 18, pp. 1–22, 2019.

[15] [15] "Harnessing local and transnational communities for underwater cultural heritage management," in Underwater Cultural Heritage and Maritime Archaeology: Community Engagement and Governance. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2022.

[16] [16] Cultural Heritage Agency of the Netherlands [RCE], "Underwater archaeological management process: Integrating UNESCO 2001 Convention principles into Dutch heritage governance," Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort, Netherlands, 2022.

[17] [17] T. L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1980.

[18] [18] "Underwater CNN-based structural recognition and corrosion segmentation for submerged archaeological sites," IEEE Trans. Ocean. Eng., vol. 50, no. 1, pp. 88–103, 2025.

[19] [19] UNESCO, "Culture and Climate Change: Policy Recommendations for Integrating Heritage Protection into National Climate Adaptation Strategies," United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2023.

[20] [20] 文化部文化資產局，水下文化資產保存法解說手冊，文化部，臺灣臺北，2016 年。

[21] [21] 科技大觀園，臺灣水下考古調查現況：以澎湖海域「將軍一號」清代沉船為例，國家科學及技術委員會，臺灣臺北，2026 年。

[22] 國立清華大學水下考古學暨研究中心，臺灣果及未來：臺灣水下文化資產治理現況與展望報告，國立清華大學出版中心，臺灣新竹，2026 年。

[23] 國立臺灣大學建築與城鄉研究所，基隆港周邊水下文化資產保存爭議與治理分析，國立臺灣大學，臺灣臺北，2019 年

可調變減搖飛輪阻尼系統應用於浮式平台之實驗研究

黃瀚寬[1]　曾以帆[2]　唐宏結[3]　芮向磊[1]

摘要

本研究基於角動量守恆物理概念研究主動式可調變減搖阻尼系統之應用潛力，相較於傳統裝置，主動控制系統能透過即時回饋偵測平台姿態，動態調整補償力矩，以期在複雜海況下達成更佳之運動抑制效果，因此本文旨在探討可調變減搖阻尼系統對提升浮式平台穩定性之可行性，試驗於國立中山大學海洋環境及工程學系之斷面水槽進行，設計 1/80 縮尺浮台作為試驗結構物，建立一套使用 Arduino 架構下之控制系統，整合陀螺儀、PWM 控制器以及伺服馬達透過即時回饋和閉迴路控制進行以下「進動角控制（M1）」與「飛輪轉速補償控制（M2）」兩項模式之性能評估，試驗條件範圍涵蓋波高 3cm 及 10cm 及週期 0.7s 至 2.0s 之規則波，實驗結果顯示，減搖阻尼控制於 3cm 的波高條件下展現良好之效益，於週期 1.0s 時 Pitch 減衰效率最高可達 54%；然而隨著波高增加至 10cm，該系統之效益顯著下降，甚至轉為負值，顯示本系統尚不適用於極端海況，仍有改善空間。另一方面，進動角主動控制在應用中受限於伺服馬達驅動慣量與平台動力耦合，在大多數試次中易引發平台自發性晃動，導致 Pitch 方向之響應不降反升，僅在接近平台自然週期之共振區間，進動角控制模式表現出約 8% 至 17% 之減搖效果，顯示進動角控制對於浮式平台的 Pitch 減搖效果幫助有限。本研究量化了兩種不同主動控制策略在浮式平台上的減搖效果，證實控制飛輪轉速在特定波浪環境下具有顯著減搖效果，本試驗數據可作為未來優化主動減搖飛輪阻尼系統之依據。

關鍵詞：角動量守恆、主動式減搖系統、Arduino 控制架構、縮尺模型試驗

Experimental Study on Variable Anti-Rolling Flywheel Damping System for Floating Platforms

Han-Kuan Huang[1]　I-Fan Tseng[2]　Hung-Jie Tang[3]　Hsiang-Lei Jui[1]

ABSTRACT

This study investigates the potential of an active variable anti-rolling damping system based on the principle of conservation of angular momentum. Compared to traditional passive devices, the active control system utilizes real-time feedback to detect platform attitudes and dynamically adjust compensation moments, aiming to achieve superior motion suppression in complex sea states. This paper evaluates the feasibility of the proposed system through physical model tests conducted in a wave flume at the Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-sen University. A 1/80 scale floating barge was designed as the experimental structure, equipped with an Arduino-based control system integrating gyroscopes, PWM controllers, and servo motors. Two operational modes—Precession Angle Control (M1) and Flywheel Speed Compensation Control (M2)—were evaluated under closed-loop control. The test conditions included regular waves with heights of 3 cm and 10 cm and periods ranging from 0.7 s to 2.0 s. Experimental results indicate that the damping control exhibits significant efficacy under the 3 cm wave height condition, achieving a maximum pitch reduction of 54% at a period of 1.0 s. However, as the wave height increased to 10 cm, the system efficiency decreased significantly or even became negative, indicating limitations in extreme sea states. Furthermore, M1 was constrained by the drive inertia of the servo motor and platform dynamic coupling, which induced self-excited oscillations in most trials and led to increased pitch responses. M1 only demonstrated a limited anti-rolling effect of approximately 8% to 17% near the resonance period. This study quantifies the performance of two active control strategies,

[1] 國立中山大學海洋環境及工程學系碩士生
[2] 國立中山大學海洋環境及工程學系副教授
[3] 國立台灣海洋大學海洋工程科技學士學位學程(系) 助理教授

confirming that flywheel speed control provides substantial stabilization under specific wave environments, providing a basis for future optimization of active flywheel damping systems.

Keywords: Conservation of angular momentum; Active anti-rolling system; Arduino control architecture; Scaled model test

一、緒論

隨著全球離岸再生能源技術向深水海域擴張，離岸浮式風機已成為技術研發之關鍵，由於浮式平台在波浪環境中大幅度的縱搖（Pitch）運動，不僅會降低能量轉換效率，更容易因結構疲勞導致系統壽命縮減，為提升浮式平台在複雜海況下的動態穩定性，本研究旨在建立一套基於角動量守恆原理之主動式可調變陀螺減搖系統，研究中設計並評估了兩套主動控制策略：首先是透過伺服馬達強制控制進動軌跡之『進動角控制（M1）』；其次為結合姿態感測器即時調節輸出功率之『飛輪轉速補償控制（M2）』本研究透過回應振幅算子（RAO）量化分析不同波高與週期下之浮台動態，進而深入探討主動控制介入對平台多自由度運動與動態耦合之影響。

二、研究方法

2.1 浮台與阻尼機構

此次試驗選用駁船式平台搭載減搖阻尼，浮台部分為 50*50*10(cm)厚度 0.5cm 的壓克力製作並使用配重片達到設計吃水總重量為 14.59kg，減搖阻尼主體為 2mm 不鏽鋼板凹製成，飛輪轉子部分選用 RPM1,9000 直流馬達帶動直徑 14cm 之鑄鐵飛輪，並透過伺服馬達進行進動角度的調整。

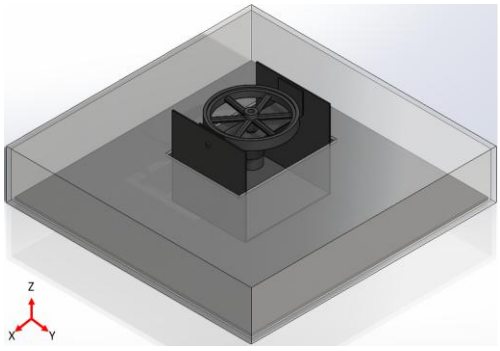


圖 2-1：浮台等角圖

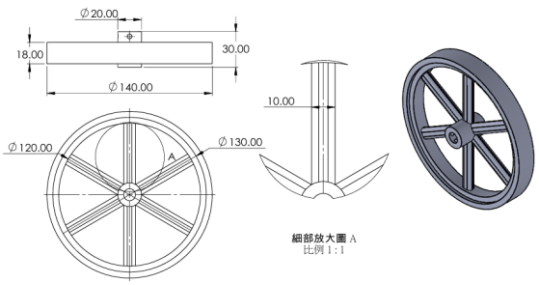


圖 2-2：飛輪工程圖

2.2 控制架構

M1 模式：為探討飛輪阻尼於不同進動角下之減搖表現如圖 2-3，為確保機構穩定運作和輸出效率，透過伺服馬達將進動角範圍統一限制於±45°並設定 1s、1.5s、2s 三種不同之進動週期為操作變因，此外亦納入進動框架固定(F0)之條件作為對照組，藉以量化陀螺力矩對平台動態響應之影響，透過改變進動頻率進一步了解陀螺力矩輸出與波浪作用力間之相位關係，為後續建立主動控制邏輯提供實驗基礎。

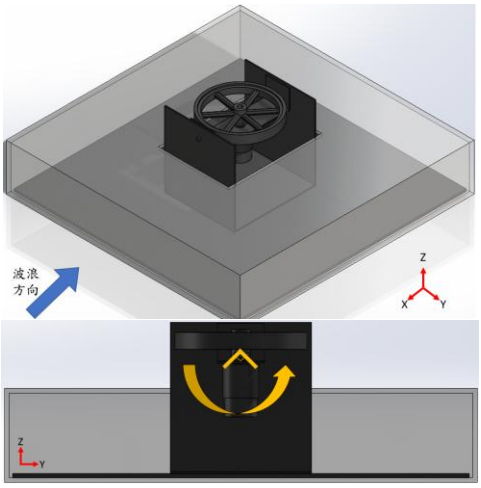


圖 2-3：進動角示意等角圖(上) 側視圖(下)

M2 模式：採用控制分配概念，使用 Arduino 為控制核心結合陀螺儀數據，計算平台即時之相對 Pitch 角度再根據比例增益藉由直流馬達驅動板調整 PWM 輸出，其中飛輪基礎轉速為 8,000RPM，最高不超過 9,500RPM，並透過 0.8 平滑步進函數減少突兀轉速變化對機構造成之衝擊，藉由控制飛輪轉速控制調整飛輪角動量以抵消波浪力矩，並設計固定轉速以及調整控制兩種變因用以對照。

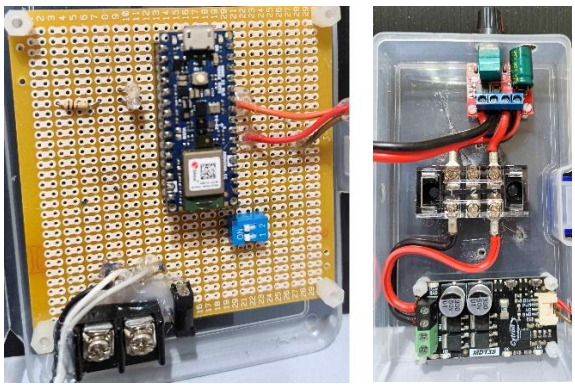


圖 2-4：控制模板

2.3 試驗條件及配置

本試驗於國立中山大學海洋環境及工程學系之水工模型試驗場進行，斷面水槽總長度為 35 公尺，內寬為 1 公尺，深度為 1.2 公尺。

試驗設計如表 2-1 所示，分為自然週期試驗以及規則波試驗，試驗水深為 70cm，並規劃表 2-2 之造波試次用以了解此控制模式對於浮台之減搖效果，試驗配置圖如圖 2-5 所示，分別於前後各架設一組波高計和張力計。

表 2-1：試驗試次表

模式	飛輪馬達	進動角馬達
自然週期	無開啟	無開啟
M0	無開啟	無開啟
M1_F0	固定	固定
M1_F10	固定	週期 1.0s
M1_F15	固定	週期 1.5s
M1_F20	固定	週期 2.0s
M2_固定	固定	不控制
M2_調控	控制	不控制

表 2-2：造波試次表

試次	波高 H(cm)	週期(s)
RH03 T07	3	0.7
RH03 T10		1.0
RH03 T12		1.2
RH03 T14		1.4
RH03 T16		1.6
RH03 T18		1.8
RH03 T20		2.0
RH10 T10	10	1.0
RH10 T12		1.2
RH10 T14		1.4
RH10 T16		1.6
RH10 T18		1.8
RH10 T20		2.0

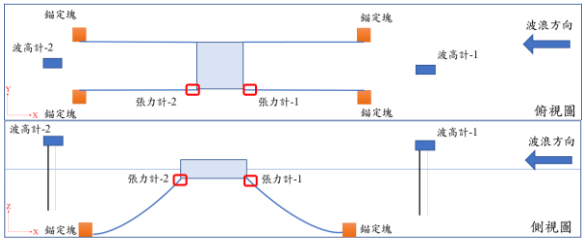


圖 2-5：試驗配置俯視圖(上)側視圖(下)

三、初步成果

3.1 自然衰減試驗

自然衰減試驗是為了得到此浮台各自由度的自然頻率用以檢驗此減搖阻尼系統於共振週期下所造成的影響，如表 3-1 所示此系統之 Pitch 方向主要共振週期為 0.73s，圖 3-1 為自然衰減試驗時序圖，圖 3-2 為自然衰減試驗 FFT 圖。

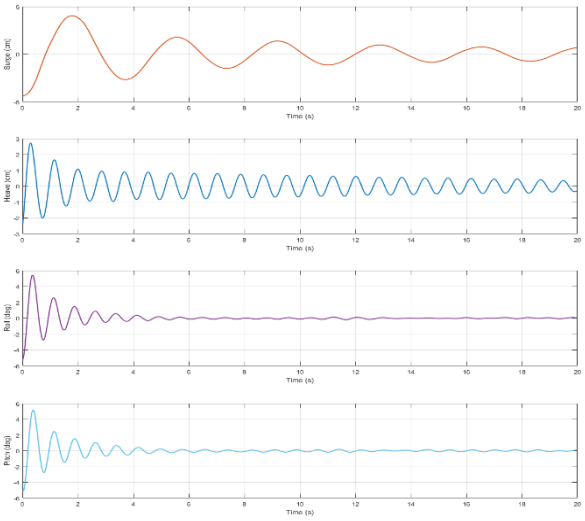


圖 3-1：自然衰減試驗時序列圖

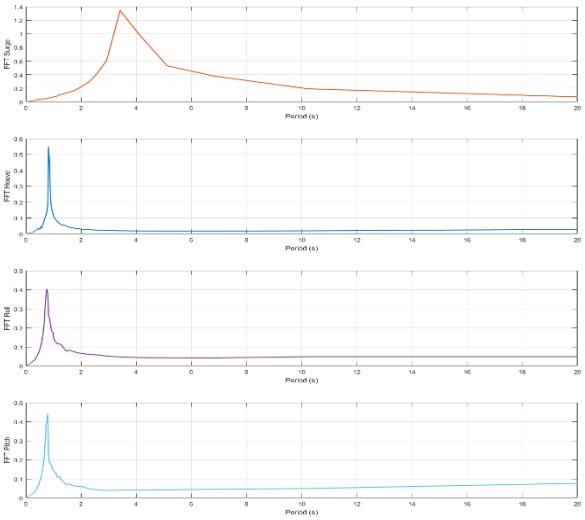


圖 3-2：自然衰減試驗 FFT 圖

表 3-1：自然週期表

自由度	Surge	Haeve	Roll	Pitch
自然週期(s)	3.50	0.82	0.71	0.73

3.2 進動角控制(M1 模式)

本節探討強制進動控制(M1)於不同波況下之減搖表現，由圖 3-3 三自由度 RAO 曲線與表 3-2 之 Pitch 衰減效率發現此減搖系統之抑制效能有著顯著的頻率依賴性。

在 3cm 波高之共振週期(0.7s)條件下，各進動頻率均能維持正向之減搖效率；然而進入非共振區後最佳減衰效率對應之進動週期（T_p）隨波浪週期(T_w)變動而離散，例如 T_p=1.0s 於 T_w=1.2s 表現較佳，而 T_p=2.0s 則於 T_w=2.0s 有著最高效率，此結果顯示進動模式若未能與波浪相位達成匹配，陀螺力矩可能與波浪力矩同向耦合進而加劇平台擺盪，此外本研究發現強制進動對平移自由度存

在連動影響，於長週期波浪（T_w=2.0s）開啟進動機構雖可抑制 Pitch 運動卻會導致 Surge 方向之位移變化較未開啟時更為劇烈且產生相位偏移，顯示強迫進動控制對縱盪方向引入了額外動力干擾，但此現象對於 Heave 之影響則相對緩和。

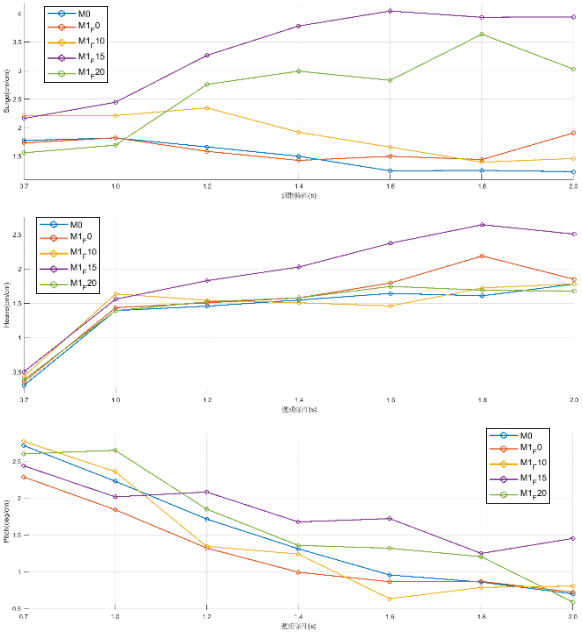


圖 3-3：三自由度 RAO 圖_M1 模式

表 3-2：M1 衰減效率表

試次	F0	F10	F15	F20
RH03T07	14.36	15.34	19.51	16.57
RH03T10	15.65	1.46	13.70	-13.81
RH03T12	20.43	42.23	1.85	0.11
RH03T14	23.32	20.22	0.20	4.27
RH03T16	10.97	41.54	-23.70	-7.23
RH03T18	0.16	4.58	-13.49	-14.19
RH03T20	-0.68	-13.53	-40.54	28.60
RH10T10	0.31	-3.33	2.20	4.16
RH10T12	5.85	-0.29	0.39	16.57
RH10T14	10.15	4.20	3.13	1.56
RH10T16	-0.37	-6.32	-1.09	6.70
RH10T18	9.50	-3.66	-6.70	-6.24
RH10T20	-21.06	-15.31	-10.00	-0.01

3.3 轉速調控(M2 模式)

本節針對主動控速模式（M2）之「固定轉速」與「調控轉速」進行對比分析，由圖 3-4 之 RAO 曲線與表 3-3 之衰減效率可知，在 3cm 的小波高環境下，系統效能隨波浪週期展現顯著差異，「固定轉速」條件下，當波浪週期為 1.2s 時，Pitch 衰減率大幅下降且 Surge 位移顯著提高，反映自然進動相位與波浪力矩趨於一致時，將產生助搖效應並干擾平移維度，相較之下「調控轉速」在此條件有著良好的減搖能力，成功將負向影響翻轉為正向減搖效果。

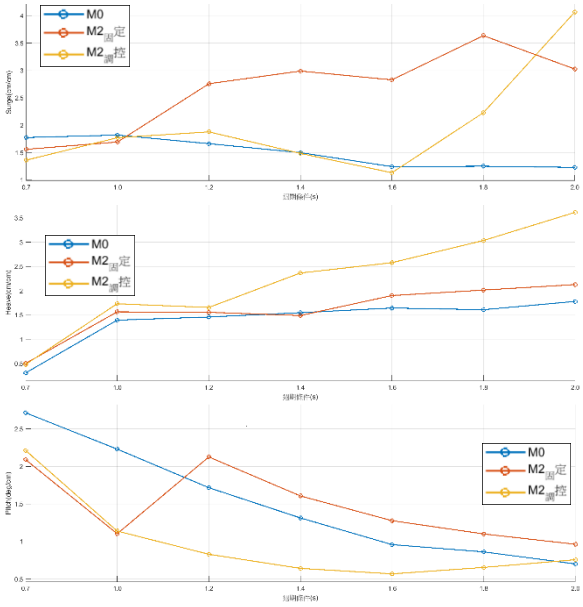


圖 3-4：三自由度 RAO 圖_M2 模式

表 3-3：M2 衰減效率表

試次	固定	調控
RH03T07	25.61	20.11
RH03T10	55.05	54.05
RH03T12	-29.70	54.73
RH03T14	-26.94	52.10
RH03T16	-26.10	45.13
RH03T18	-23.76	29.07
RH03T20	-9.49	-2.03
RH10T10	-6.03	-3.28
RH10T12	-13.37	5.93
RH10T14	-16.07	4.29
RH10T16	-17.20	-24.59
RH10T18	-13.00	-22.16
RH10T20	-10.49	-8.79

四、結論

本研究透過強制進動（M1）與主動控速（M2）兩種控制，探討主動控制操作對於飛輪阻尼系統於浮台減搖性能上之差異。

首先此系統之減搖效能深受飽和效應與環境量能之限制，本試驗條件之 10cm 波況下，無論何種控制方式，減搖效率皆成效不彰，顯示當環境力矩超越系統所能提供之最大補償動量時，飛輪阻尼系統之貢獻即趨於飽和進而限制了此條件環境下之減搖增益，導致控制收效甚微。

其次此系統運行存在「輸出強度」與「自發性擾動」間的權衡關係，M1 模式中短週期進動雖能輸出較大瞬時力矩，卻因機構頻繁加減速誘發平台產生規律之自發震盪；反之長週期進動雖能維持運行平穩，卻因角速度受限導致力矩輸出不足；M2 模式則證實，雖然動態調控能修正部分相位不匹配之問題，但轉速之頻繁變動亦可能透過動力耦合，導致平移自由度（Surge）出現非預期之位移增長，同

時使飛輪支撐結構承受額外的負荷，增加軸系機構之機械應力，綜上所述，單一控制方式（進動週期或轉速調節）較難以兼顧全頻域之穩定性與多自由度之動態平衡。

參考文獻

[1] G. Kapsenberg and N. Carette, “A consistent method to design and evaluate the performance of Anti-Roll Tanks for ships,” Ship Technology Research, vol. 70, no. 2, pp. 117-145, 2023.

[2] L. Hu, M. Zhang, X. Yu, Z. M. Yuan, and W. Li, “Real-time control of ship's roll motion with gyrostabilisers,” Ocean Engineering, vol. 285, Part 1, Art. no. 115348, 2023.

[3] B. Li, X. Zhang, J. Wang, and N. Chen, “Anti-roll characteristics of marine gyrostabilizer based on adaptive control and hydrodynamic simulation,” J. Mar. Sci. Eng., vol. 10, no. 1, Art. no. 83, 2022.

[4] M. Kim, K. H. Jung, S. Park, S. B. Suh, Il-Ryong Park, J. Kim, and K. S. Kim, “Experimental study on viscous effect in roll and heave motions of a rectangular structure,” Ocean Engineering, vol. 171, pp. 250-258, 2019.

[5] A. Hemmati, E. Oterkus, and M. Khorasanchi, “Vibration suppression of offshore wind turbine foundations using tuned liquid column dampers and tuned mass dampers,” Ocean Engineering, vol. 172, pp. 286-295, 2019.

[6] T. Perez and P. D. Steinmann, “Analysis of ship roll gyrostabiliser control,” in Proc. 8th IFAC Conf. Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá, Brazil, 2009, pp. 310-315.

[7] 竇甄、楊立平、任正義、孫苗苗，非線性力支承下的磁懸浮轉子陀螺效应解耦控制，機械科學與技術，42 卷 9 期，1392-1401 頁，2023 年。

[8] 謝武錡，浮式平台之主動式制震設計，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系，臺灣高雄，2024 年。

[9] 劉玟秀，浮式水槽運動水工模型實驗，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系，臺灣高雄，2023 年。

[10] 王詮文，駁船式浮動風機近全尺度水工及實海域試驗研究，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系，臺灣臺南，2021 年。

洋流發電機於拖曳情況下之運動響應

許植証[1]　趙修武[2]

摘要

本研究探討洋流發電機系統於波流耦合作用下之運動響應與繫纜張力，評估其拖曳穩定性。首先利用 ANSYS AQWA 與 STAR-CCM+ 預測水動力特性與阻力，再透過 OrcaFlex 模擬繫纜張力，最後求解運動方程式獲得系統之運動響應與纜繩張力。本研究於水深 100 m、速度 0.5-1.5 m/s 條件下模擬拖曳行為，分析波能量與波速對洋流發電機運動響應之影響。模擬結果顯示，速度降低使得洋流發電機所需淨浮力減小以維持目標拖曳深度，且當速度小於 0.5 m/s 時洋流發電機有上浮水面的風險。速度對平均沒水深度、縱搖運動及繫纜張力具有顯著影響；隨速度增加，平均沒水深度與繫纜張力增加但縱搖運動平均值降低，速度對拖纜張力之影響較不顯著。隨波能量增加，洋流發電機運動響應振幅亦隨之增大；在速度為 1.5 m/s 條件下，沒水深度隨波能量增加而變淺，最淺沒水深度約為 22.71 m，縱搖運動最大值可達 5.47°，主纜、副纜及拖纜之最大張力分別為 0.305 MN、0.165 MN 與 0.652 MN，均遠低於纜繩斷裂張力 1.96 MN；最大平均發電功率為 85.7 kW，出現在速度 1.5 m/s；而最小平均發電功率為 2.95 kW，則出現在速度 0.5 m/s。

關鍵詞：洋流發電機、拖曳、運動響應、纜繩張力

Motion Response of a Current Turbine under Towing Condition

Chih-Cheng Hsu[1]　Shiu-Wu Chau[2]

ABSTRACT

This study conducts a numerical simulaton of the motion responses and mooring line behavior of a current turbine system subjected to combined wave–current loading, with the aim of assessing its towing stability. Hydrodynamic properties are obtained using ANSYS AQWA, drag coefficients are estimated using STAR-CCM+, and the coupled motion responses of the turbine and mooring system are analyzed using OrcaFlex. Simulations are conducted at a water depth of 100 m, with current velocities ranging from 0.5 to 1.5 m/s, considering various sea states to evaluate the effects of current velocity and wave energy on the system response. The results indicate that a reduction in current velocity leads to a decrease in the required net buoyancy to maintain the target towing depth. When the current velocity falls below 0.5 m/s, there is a risk of the turbine rising toward the free surface. The current velocity has a significant influence on the mean submergence depth, pitch motion, and mooring line tension. As the velocity increases, both the mean submergence depth and mooring line tension increase, while the mean pitch motion decreases. In contrast, the effect of current velocity on towline tension is relatively insignificant. The maximum tensions of the main mooring line, auxiliary mooring line, and towline are 0.305 MN, 0.165 MN, and 0.652 MN, respectively, all of which are well below the breaking strength of 1.96 MN. The maximum mean power output is 85.7 kW at a current velocity of 1.5 m/s, while the minimum mean power output is 2.95 kW at 0.5 m/s.

Keywords: Current Turbine; Towing; Motion Response; Mooring Line Tension

[1] 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士班研究生
[2] 國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

一、前言

近年來，隨著化石燃料價格上升與全球能源短缺問題，發展再生能源已成為國際間的重要課題。在各類再生能源中，風能與太陽能技術已相對成熟並廣泛應用；相較之下，海洋能源（如潮汐能、波浪能與海流能）仍處於初期發展階段，但被認為具有高度潛力。台灣位於歐亞大陸東緣，受黑潮影響，其流量約為每秒 2,000 萬至 4,000 萬噸海水，蘊含豐富的海流能資源，發電潛力可達數 GW 等級 [1]。與其他海洋能源相比，海流能具有速度穩定、資源豐沛，且對景觀、噪音及土地使用影響較小等優勢 [2]。因此，推動海流能發展不僅符合台灣能源轉型政策，也符合全球永續發展目標 [3]。然而，在深水區部署洋流發電機組仍面臨諸多工程挑戰，通常需先於淺水區域進行拖曳測試，以評估機組在不同速度條件下之動態響應與發電性能。因此，本研究使用數值模擬方法，探討洋流發電機系統於波流耦合作用下之動態響應與繫纜張力，並進一步評估其拖曳穩定性。

二、洋流發電機系統設定

本研究考慮洋流發電機配置如圖 1 所示。該洋流發電機主要由三個組件構成：左側機艙、右側機艙，以及翼型浮體。翼型浮體內設有壓艙水控制系統，可在範圍內調整整體系統之淨浮力，其淨浮力調整範圍為 50 – 150 kN。系統總排水量為 167.35 噸。繫泊系統由四條纜繩組成，包括一條長度為 40 m 的主纜、兩條長度各為 20 m 的輔助纜，以及一條長度為 55 m 的拖曳纜。輔助纜主要用於提升洋流發電機之旋轉穩定性，並增強其抵抗旋轉運動的能力。所有繫纜均採用 Dyneema 材質纜繩，其直徑為 0.052 m，單位長度質量為 1.62 kg/m，斷裂強度為 1.96 MN，繫纜配置圖如圖 2 所示。

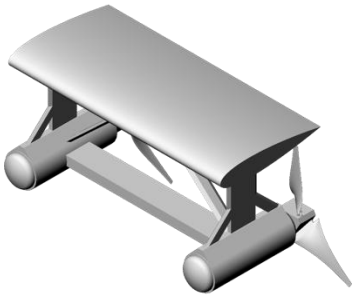


圖 1：洋流發電機配置圖

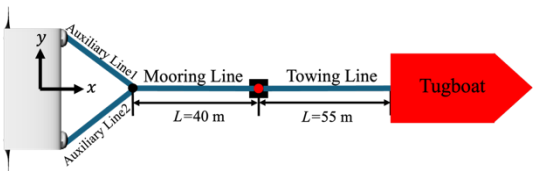


圖 2：繫纜配置圖

三、研究方法

洋流發電機於拖曳情況下之動態響應數值框架如圖 3 所示。水動力係數係利用 ANSYS AQWA 基於三維勢流理論小板法進行預測；阻力係數則使用 STAR-CCM+以有限體積法計算取得；繫纜系統則於 OrcaFlex 中以有限元素法建模與分析。最後，於 OrcaFlex 中求解運動方程式，可獲得洋流發電機系統運動響應與纜繩張力。

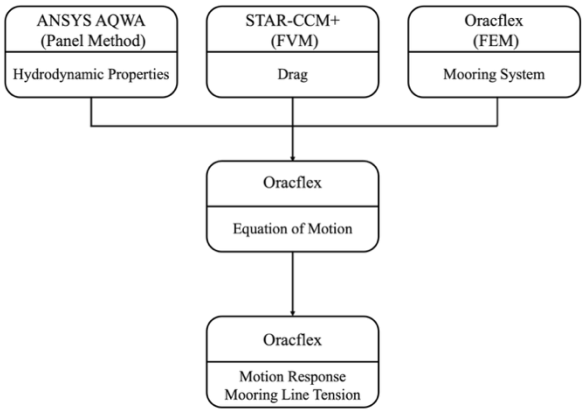


圖 3：數值框架

3.1 水動力係數模擬

在微小振幅波假設下，ANSYS AQWA [4] 採用基於三維勢流理論小板法，預測系統不受黏性效應影響下之水動力特性。該理論假設流場為無黏性、無旋且不可壓縮 [5]。在本研究中，AQWA 模擬洋流發電機系統約由 9,100 個網格所組成。流場速度勢函數 $\Phi(x,y,z,t)$ 可表示如下：

$$\Phi(x,y,z,t) = \Phi(x,y,z)e^{-i\omega_a t} \tag{1}$$

其中，$\Phi(x,y,z)$為速度勢函數振幅，ω_a為波浪角頻率，t為時間。

為進一步考量黏性效應對水動力特性之影響，本研究使用 STAR-CCM+ [6] 進行強制運動模擬，並採用 SST $k-\omega$ 紊流模型。數值模型中採用嵌套網格（overset mesh），使洋流發電機強制運動。計算域總網格數約為 400 萬，其中約 350 萬配置於嵌套網格區域。作用於洋流發電機之水動力可表示如下：

$$F_j = m_a a_j + 0.5 C_d \rho A_T v_j^2 \tag{2}$$

其中，F_j表示流體作用於洋流發電機之力，次標 j = 1 至 6 分別對應於縱移、橫移、起伏、橫搖、縱搖及旋轉六自由度運動；m_a為附加質量，C_d為阻力係數，ρ為流體密度，A_T為阻力參考面積，v_j為速度，a_j為加速度。當洋流發電機運動速度為零時，其所受水動力僅來自附加質量項 $m_a a_j$。透過所受水動力除以運動加速度，即可求得附加質量，表示如下：

$$m_a = \frac{F_j}{a_j} \tag{5}$$

3.2 運動響應模擬

為預測洋流發電機之運動響應，本研究使用 OrcaFlex [7] 求解運動方程式。洋流發電機之運動方程式可表示如下：

$$\sum_{j=1}^{6}(M + A_{ij})\ddot{x}_j + B_{ij}\dot{x}_j + C_{ij}x_j = F_E + F_{o,i} + F_T \tag{6}$$

其中，M為洋流發電機質量，A_{ij}為附加質量，B_{ij}為阻尼，C_{ij}為浮體剛度；x_j、$\dot{x}_j$與$\ddot{x}_j$分別表示位移、速度與加速度。F_E為波浪激振力，$F_{o,i}$表示除了流體力之外的其他外力，例如海流作用力與繫纜張力。次標 i,j =1 至 6 分別對應於縱移、橫移、起伏、橫搖、縱搖及旋轉六自由度運動。F_T為發電機推力。

3.3 繫纜系統模擬

在 OrcaFlex 中，繫纜系統採用有限元素法進行模擬 [7]，每條繫纜皆為多個節點連接之無質量直線段。圖 4 顯示洋流發電機於拖曳情況模擬示意圖，其中 D = 100 m 表示水深。沒水深度 S 定義為洋流發電機系統重心與自由液面之間的垂直距離； ϕ_5則表示洋流發電機系統縱搖運動。

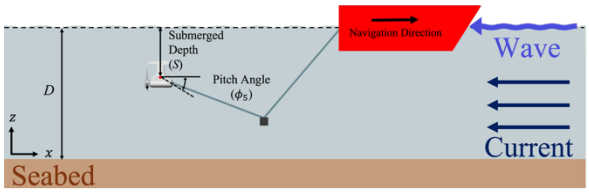


圖 4：拖曳情況模擬示意圖

四、模擬海況

在數值模擬中，將 −x 方向定義為 0°，並設定波浪與海流皆以 0° 方向同向入流，以評估流速對洋流發電機系統之影響。波浪採用基於五階 Stokes 理論之規則波，並依據中央氣象署提供之歷史每日資料 [8]，選取 4 種台東外海常見海況條件，以分析波能量對系統動態響應之影響。流速分別設定為 1.5、1.0 與 0.5 m/s，代表黑潮常見流速範圍 [9]。相關模擬條件整理如表 1 所示。

表 1：模擬條件

Wave Theory	Stoke fifth-order theory
D (m)	100
H (m)	0.5/1.5/2.5/3.5
T (s)	5/6/7/8
U_c (m/s)	1.5/1.0/0.5
θ_c (°)	0

六、研究結果

本章節針對波向、速度及波能對洋流發電機系統動態響應與發電功率影響進行分析。時間歷時圖如圖 5 所示。在波向影響分析中，速度固定為 1.5 m/s，並考慮五種不同波向，探討波向對洋流發電機運動響應及纜繩張力影響。在不同速度影響分析中，波向固定為 0°，即波浪與海流同向，選取三種速度以評估速度對洋流發電機運動響應及繫纜張力影響。最後，發電功率部分，分別在速度固定為 1.5 m/s 且波向變化，以及波向固定為 0° 且速度變化條件下，分析平均發電功率。

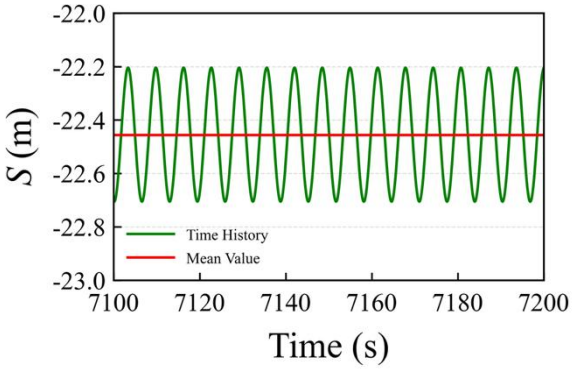


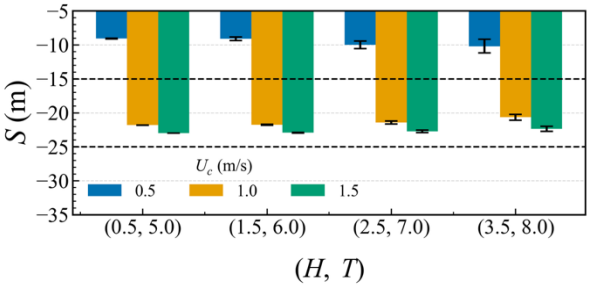
圖 5：沒水深度時間歷時圖

本研究探討速度對洋流發電機系統動態響應影響，並設定波浪與海流均由 0°方向同向入流，分析系統於拖曳情況下，在三種不同速度（1.5、1.0 與 0.5 m/s）作用下之動態響應與發電功率。此外，隨著速度降低，系統維持目標拖曳水深所需之淨浮力亦隨之減少；在 1.5 m/s 速度下，無需壓艙水（淨浮力 150 kN）即可滿足拖曳水深需求；在 1.0 m/s 速度下，需加入約 5 噸壓艙水（淨浮力 100 kN）方可達成；而在 0.5 m/s 速度下，即使壓艙水全滿、淨浮力降至 50 kN，仍無法滿足拖曳水深要求。

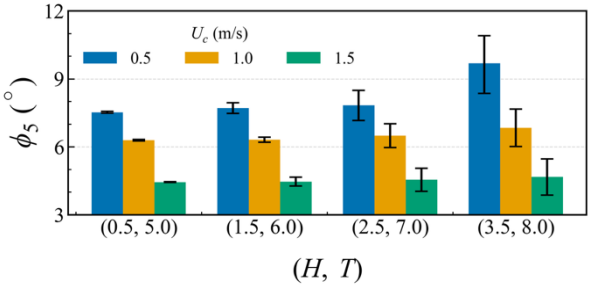
在沒水深度方面，隨著速度降低，平均沒水深度逐漸變淺，而沒水深度振幅則隨之增加。在速度為 1.5 m/s 時，沒水深度約為 −22.71 m；然而，當速度降低至 0.5 m/s 時，洋流發電機有上浮至水面的風險。此外，隨著波能量增加，沒水深度振幅亦隨之增加，而波能量對平均沒水深度影響不大，如圖 6(a) 所示。在縱搖運動方面，當流速為 0.5 m/s 時，平均縱搖角達到 9.69°，最大縱搖角則為 10.9°；隨著流速降低，平均縱搖運動與其振幅皆呈現增加趨勢。此外，隨著波能量增加，縱搖運動之平均值與振幅亦隨之增加，如圖 6(b) 所示。

在主纜伸長量方面，隨著流速增加，平均主纜伸長量呈現上升趨勢，而伸長量振幅則相對減小；最大主纜伸長量為 1.66 m，出現在流速 1.5 m/s 時。此外，隨著波能量增加，主纜伸長量振幅亦隨之增加，而波能量對平均伸長量之影響相對有限，僅呈現小幅上升趨勢，如圖 7(a) 所示。在主纜角度方面，隨著流速增加，平均主纜角度呈現下降趨勢，而角度振幅則相對減小；最大主纜角度為 51.72°，出現在流速 0.5 m/s 時。此外，波能量對主纜角度之平均值與振幅影響皆不顯著，僅隨波能量增加，角度振幅略為上升，如圖 7(b) 所示。在主纜張力方面，隨著流速增加，平均主纜張力呈現上升趨勢，而張力振幅則相對減小；最大主纜張力為 0.305 MN，出現在流速 1.5 m/s 時，且遠低於斷裂強度。此外，隨著波能量增加，主纜張力振幅亦隨之增加，而波能量對平均張力之影響不大，如圖 7(c) 所示。在拖纜張力方面，平均拖纜張力受流速影響不顯著，而張力振幅則隨流速降低而增加；最大拖纜張力為 0.652 MN，出現在流速 0.5 m/s 時。此外，隨著波能量增加，拖纜張力振幅亦隨之增加，而波能量對平均張力之影響有限，僅呈現小幅上升趨勢，如圖 7(d) 所示。在副纜張力方面，由於 A1 與 A2 副纜呈對稱配置，且波浪與海流同向作用，因此兩者具有相同變化趨勢；隨著流速增加，平均副纜張力呈現上升趨勢，而張力振幅則相對減小；最大副纜張力為 0.165 MN，出現在流速 1.5 m/s 時，且遠低於纜繩之斷裂強度 1.96 MN。此外，隨著波能量增加，副纜張力振幅亦隨之增加，而波能量對平均張力之影響有限，僅呈現小幅上升趨勢，如圖 7(e) 與圖 7(f) 所示。洋流發電機之最大動態響應及其對應流速如表 6 所示。

圖 8 顯示在 0° 波流同向條件下，不同流速對平均發電功率之影響。結果顯示，流速為影響發電功率之主導因素，隨著流速增加，發電功率顯著提升；相較之下，不同波能條件下之平均功率變化幅度不大，顯示其對波浪條件之敏感性較低。其中，最大平均發電功率為 85.7 kW，出現在流速 1.5 m/s，而最小平均發電功率為 2.95 kW，則出現在流速 0.5 m/s。

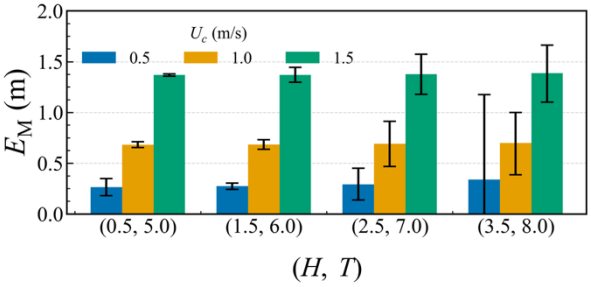


(a)

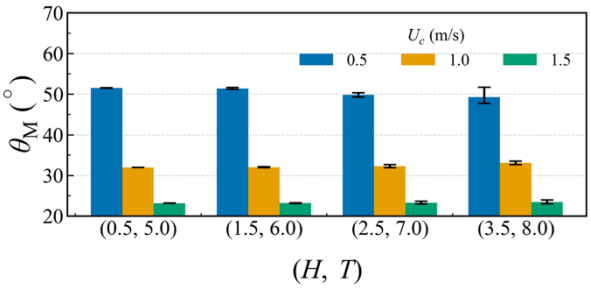


(b)

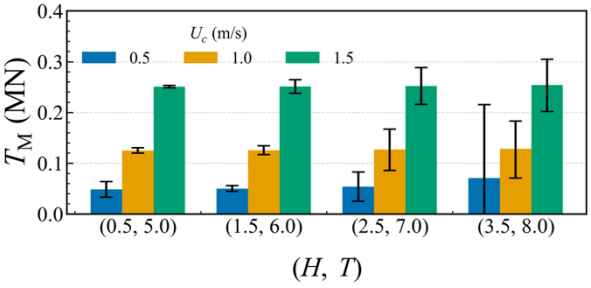
圖 6：不同速度下洋流發電機運動響應：(a)沒水深度、(b)縱搖



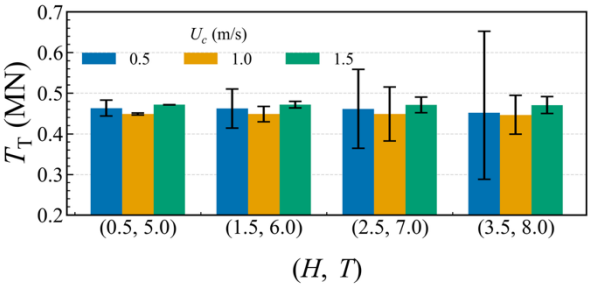
(a)



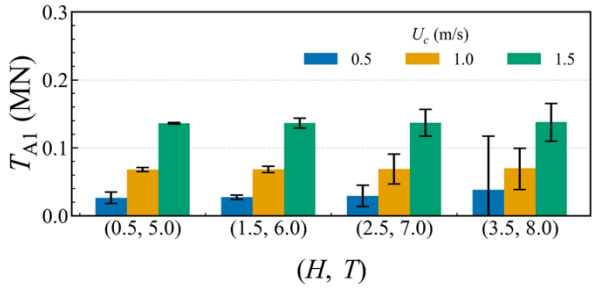
(b)



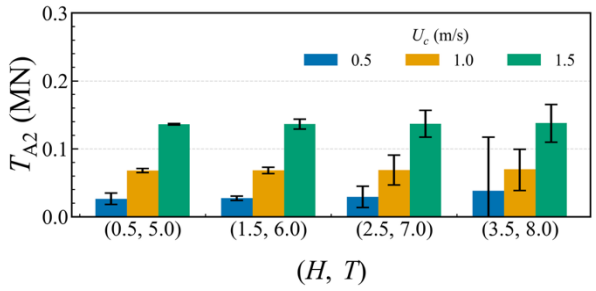
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 7：不同速度下洋流發電機動態響應：(a)主纜伸長量、(b)主纜角度、(c)主纜張力、(d)拖纜張力、(e)A1 副纜張力、(f)A2 副纜張力

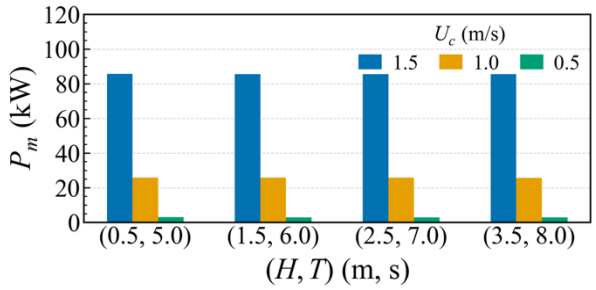


圖 8：洋流發電機之平均發電功率

表 2：不同速度下洋流發電機最大動態響應

Response	Maximum	U_c (m/s)
S	-22.71 m	1.5
ϕ_5	10.90°	0.5
E_M	1.66 m	1.5
θ_M	0.305 MN	1.5
T_M	0.305 MN	1.5
T_T	0.652 MN	0.5
T_{A1}	0.165 MN	1.5
T_{A2}	0.165 MN	1.5
P	85.7 kW	1.5

七、總結

本研究探討洋流發電機系統於波流耦合作用下動態響應，並評估其拖曳穩定性。本研究結合 ANSYS AQWA、STAR-CCM+ 與 OrcaFlex 之數值模擬軟體，模擬洋流發電機於水深 100 m 下之拖曳情況，進一步評估其動態響應及發電功率。

結果顯示，隨著波浪能量增加，洋流發電機運動與纜繩張力的平均值與振幅皆隨之提高。

速度為影響洋流發電機系統響應主要因素。較高速度會使系統具有較深之沒水深度、較大的繫纜張力，以及較高發電功率，而對拖纜張力影響則相對不顯著；相反地，較低速度會導致較淺的沒水深度並伴隨較大的運動振幅。此外，波浪條件對平均發電功率影響相對有限。

速度降低使得洋流發電機所需淨浮力減小以維持目標拖曳深度，且當速度小於 0.5 m/s 時洋流發電機有上浮水面的風險。在本研究配置下，主纜張力最大值為 0.305 MN，拖纜張力最大值為 0.652 MN，副纜張力最大值為 0.165 MN，所有繫纜張力皆遠低於其斷裂強度 1.96 MN；此外，於速度 1.5 m/s 時，可達到最大平均發電功率 86 kW。

謝誌

作者感謝國家海洋研究院提供之經費支持。

參考文獻

[1] Lin, H. Y. “Simulation on the Deployment and Recovery of a Floating Kuroshio Turbine,” M.S. thesis, Dept. of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, 2015.
[2] Chiu, F. C., Hsin, C. Y., Lin, H. Y., and Lin, Y. H. “Development of a floating Kuroshio turbine equipped with a foil float: Deployment and recovery simulation,” in *OCEANS* 2016-Shanghai IEEE, 2016.
[3] Wang, Y. L. and Wu, C. R. “Rapid surface warming of the Pacific Asian marginal seas since the late 1990s,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, 2022.
[4] Ansys. “*Aqwa Theory Manual*,” 2024.
[5] Haskind, M. “The oscillation of a ship in still water,” *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Tekh. Nauk*, 1, 1946
[6] Siemens. “*Simcenter STAR-CCM+ User Guide*,” ver. 2402, 2024.
[7] Orcina. “*OrcaFlex Documentation*,” ver. 11.5a, 2024.
[8] Central Weather Adminstration: Data Buoy Observation Data Annual Report 2017-2023, (2017-2023)
[9] National Academy of Marine Research. Marine Current Energy Section, 2024

海洋創新A世代–
AI · Autonomy · Acoustics

2026中華民國海洋及水下技術協會年會
暨第27屆海洋與水下技術研討會

指導單位
國家科學及技術委員會　海洋委員會

主辦單位
中華民國海洋及水下技術協會　國立中山大學海下科技研究所
臺灣港務股份有限公司　文化部文化資產局

協辦單位
國科會工程處工程科技推展中心　臺灣港務股份有限公司高雄港務分公司
宇泰工程顧問有限公司　宏華營造股份有限公司　中興工程顧問股份有限公司
台灣世曦工程顧問股份有限公司　自強工程顧問有限公司　王強科技有限公司
滙茂實業股份有限公司　詮華國土測繪股份有限公司　工信工程股份有限公司
財團法人船舶暨海洋產業研發中心　台灣中油股份有限公司　經濟部水利署
國立成功大學近海水文中心　台灣電力股份有限公司　國立成功大學水工試驗所
桃園國際機場股份有限公司　工研院綠能與環境研究所　中華水下文化資產學會
中華民國海洋事務與政策協會　國立臺灣海洋大學河海工程學系