

水下遙控載具於港區測試研究

洪維屏¹ 柯拓宇²

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理

摘要

港灣設施維護為臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司) 重點工作，目前港區水下設施巡查，主要僱具經驗的潛水員進行巡查，但由於水下環境複雜及海象條件不佳，加上水下作業容易受船舶經過航跡波影響，造成其作業不易且有安全疑慮，隨著時代變遷與科技躍進，國際上已陸續使用水下遙控載具等相關技術，輔助進行水下設施巡查工作，有效降低潛水作業風險。本研究將目前水下遙控載具(ROV)進行硬體分析及使用條件評估，且於臺北港北 1 碼頭進行相關測試，內容包含碼頭岸壁水下巡查及定位測試，瞭解其現地作業情形及拍攝影像是否因濁度影響，而無法進行分析等問題。

一、前言

水下無人載具分為兩大類：水下遙控載具(Remotely Operated Vehicle, ROV)與自主式水下載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)，前者主要以一條內含銅線與光纖之繫纜與水面上的船舶或岸上控制站連接，以提供載具所需之電力、傳遞控制命令及水下即時資訊，其依作業類型可搭載高解析鏡頭、水下光源及機械手臂等，近年來已逐漸取代潛水員進行各式水下作業，相當於一部水下機器人。

國際海事承包商協會(International Marine Contractors Association, IMCA)將 ROV 進行 5 項分類，包含等級 1 觀測級 ROV、等級 2 具備附載能力的觀測級 ROV、等級 3 工作級 ROV、等級 4 拖曳式和海底爬行式 ROV 及等級 5 原型機和開發中 ROV，本研究考量作業型態為港區碼頭水下岸壁巡查，故選用等級 2 具備附載能力的觀測級 ROV 進行測試，搭載高解析攝影機及採用雙攝像鏡頭，預先規劃水下作業路線，以影片記錄檢測過程，並加掛水下定位設備進行定位測試，以探討其定位方式、精度及影像解析度，評估 ROV 應用於港區碼頭水下構造物巡查之適用性。

二、水下遙控載具硬體分析及使用限制評估

ROV 為一種遠程操控的水下載具，可配備不同儀器及感測器執行各種任務，如海床地形探勘、管道檢查及水下考古等，典型 ROV 備有一個堅固框架和提供浮力的浮筒單元、多個推進器

以實現在三個維度的機動性，以及連接到控制站的纜線。根據框架大小、操作需求，配置各種感測器、儀器及工具，最基本配置會攜帶一個或多個鏡頭，將實時數據傳送給操作人員，另可配備 1~2 個機械手臂，這些機械手臂具有不同功能，且擁有一個儲存裝置，用於存取樣本或工具。等級更高之配置，系統可整合其他感測器或設備，包括光學感應器、扇形掃描聲納和多波束測深探測儀。

2.1 ROV 硬體分析

ROV 之結構設計多樣化，根據用途和工作環境不同，常見的幾何外形包括魚雷形、球形、矩形和立方體形，以滿足不同水下任務需求。而外殼設計主要分為開放式和封閉式，部分 ROV 則仿生於水下生物的外形和運動方式，以提升其作業性能。

2.1.1 魚雷形設計

此設計使用流體力學概念，行進過程具有較低的水流阻力，能在水平運動中達到更高速度，適合高速之水平移動作業。然而，其垂直移動作業能力相對較弱，需額外設計垂直推進器或尾鰭以改善垂直方向之機動性。因此，魚雷形 ROV 在需要頻繁垂直移動的作業中，使用限制較大。

2.1.2 外殼設計

ROV 之外殼設計分為開放式和封閉式兩種。開放式設計為部分零件暴露在外環境，此構造相對簡單，製造和維護成本較低，但防護性較弱，不適合深水或高壓環境下操作，因此較適合淺水作業。而封閉式設計則將所有電子機械零件，封裝於耐壓外殼內，具備優異的防水和耐壓性能，適合於深水作業。惟封閉式設計之結構複雜，製造維護成本較高，且重量及體積增加，故適合於需長時間且深入操作之境。

2.1.3 仿生結構

此類 ROV 模仿海洋生物的形態和運動方式，如海豚、鯊魚或水母。仿生設計的優點在於其高效的推進效率和良好的機動性。例如，模仿海豚的 ROV，能夠以更少的能量達到更高的推進速度，並具備更靈活的操作性能，適應複雜的水下環境。這類 ROV 可在需高度靈活性和精確操作的任務中，展現其優越的效能。

2.2 現行 ROV 使用限制評估

目前 ROV 的應用受到多種限制，這些限制主要來自於技術、環境條件和操作需求。以下將對主要限制進行分析：

2.2.1 纜繩長度限制

受限水下無線電訊號傳輸效果不佳，無線 ROV 之活動範圍(尤其在深海作業時)受到顯著限制，長時間作業電力供給也備受挑戰。因此，目前操作 ROV 多數藉由纜繩，其主要以一條內含銅線與光纖之繫纜與水面上船舶或岸上控制站連接，再由人員進行操作，這些纜繩將 ROV 與操作人員或電源設備連接一起，雖然此種模式可提供穩定可靠之電力與通訊，然而卻限制 ROV 的活動範圍和機動性(Singh et al., 2022)。

2.2.2 電池續航力限制

部分 ROV 使用電池供電，然而其電池容量有限，這將影響作業時間和活動範圍，尤其需長時間或大範圍執行任務時，電池續航力成為一大瓶頸。為延長其作業時間，常需增加電池容量或採用更高效的能源管理系統，因而增加其體積和重量，影響 ROV 的操作性能。

2.2.3 水下環境限制

(1) 能見度：水下能見度為影響 ROV 光學導航系統效能之關鍵因素。ROV 的相機和視覺傳感器在清澈水域中表現較好，但於混濁水域中，影像數據品質會大幅降低，進而影響 ROV 的導航和操作精度。因此，ROV 於視野受限環境中作業時，需依賴聲納等其他導航技術來彌補視覺數據不足(He et al., 2020)。

(2) 壓力：隨著深度增加，ROV 所需承受之壓力越大，尤其在深海作業時，其抗壓能力為能否成功執行任務之關鍵。因此，ROV 的結構和外殼設計必須能應對高壓環境，但此設計將增加結構複雜性及提高製造成本(Aguirre-Castr et al., 2019)。

(3) 洋流：ROV 的操作穩定性和推進系統會受洋流影響，強勁的洋流會導致其偏離預定路徑，甚至失去控制。為此，需要高效的推進系統來維持 ROV 於洋流中之穩定性，並需要精密的控制演算方法，使其自動調整位置和方向，因應不斷變化之海流條件(He et al., 2020)。

2.2.4 操作複雜性限制

ROV 之操作不僅需要專業技術人員，還需定期對儀器進行維護保養和故障排除。由於其配備各種複雜的傳感器和設備，數據分析及故障檢測也需具備專業知識和經驗人員處理。此外，ROV 於不同作業環境也需針對任務需求進行調整，增加操作之複雜度。

2.2.5 成本限制

雖然 ROV 在多數情境相較 AUV 更具成本效益，但功能齊全之 ROV 在開發和配備購置依舊非常昂貴(Dalhatu et al., 2023)。尤其深海作業需配備先進的感測器、接發器以及複雜的控制系統，這些都會增加成本，且後續之維護和操作也需專業技術人員進行。

2.2.6 其他

(1) 通訊延遲：深海環境中，ROV 與操作員之間的通訊可能出現延遲，此會對遠程操作之即時性產生影響，特別是操作需高精度時，通訊延遲可能導致 ROV 對環境變化的反應不夠迅速，從而影響任務之成功率。

(2) 傳感器數據的準確性和可靠性：ROV 作業依賴其傳感器提供之環境數據，而這些傳感器數據在實際作業中可能受到噪音、漂移或硬件故障之影響，進而降低數據的準確性和可靠性。因此，ROV 設計需考慮這些潛在問題，並配備有效的故障檢測和自動校正系統。

三、水下遙控載具於港區測試分析

本研究以 ROV 搭載高解析鏡頭，進行港區碼頭岸壁水下構造物巡查測試，探討儀器於港內水下定位情形，且拍攝影像記錄巡查過程，並針對蒐集之影像評估其清晰度，是否足以檢測構造物毀損情形。

3.1 水下定位與導航

水下無人載具的傳統定位方法為使用航位推算(Dead-Reckoning, DR)與慣性導航系統(Inertial Navigation Systems, INS)(Ren et al., 2008)，此方法依賴對於水流速度、載具速度與加速度的測量，具一定程度之優勢，其不需從外部系統發送或接收訊號，缺點為誤差將隨著時間推移而增加。現行之聲學定位方法為主要替代方案之一(Fallon et al., 2011)，聲學定位系統可使用固定站聲學感測器實現定位，以絕對或相對座標定位水下無人載具，惟佈署聲學感測器之成本昂貴，程序也較複雜。因此，近年來研究人員正探索新的水下無人載具定位與導航方案，光學技術於陸地或空中可展現高精度之定位能力，但於水下環境將面臨嚴峻挑戰(Bosch et al., 2016)，惟當水下條件足夠清澈可使光傳播時，光學定位技術可提高足夠的精度，且較聲學定位系統精準。多種定位技術之融合研究與演算法都將助於導航系統之發展，融合不同系統以克服單一系統之弱點(González-García et al., 2020)，例如，融合 INS 與聲學定位，可以降低 INS 的精度飄移，且在短距離內具有高定位精度，圖 1 顯示不同定位方法與其對應之感測器。

3.1.1 航位推算及慣性導航

將水下無人載具之速度進行時間積分，通常需使用指南針與流速感測器工具協助，海流、洋流或陀螺儀所造成的誤差，將給載具增加未知的速度分量(Woodman, 2007)，使定位精度造成誤差。

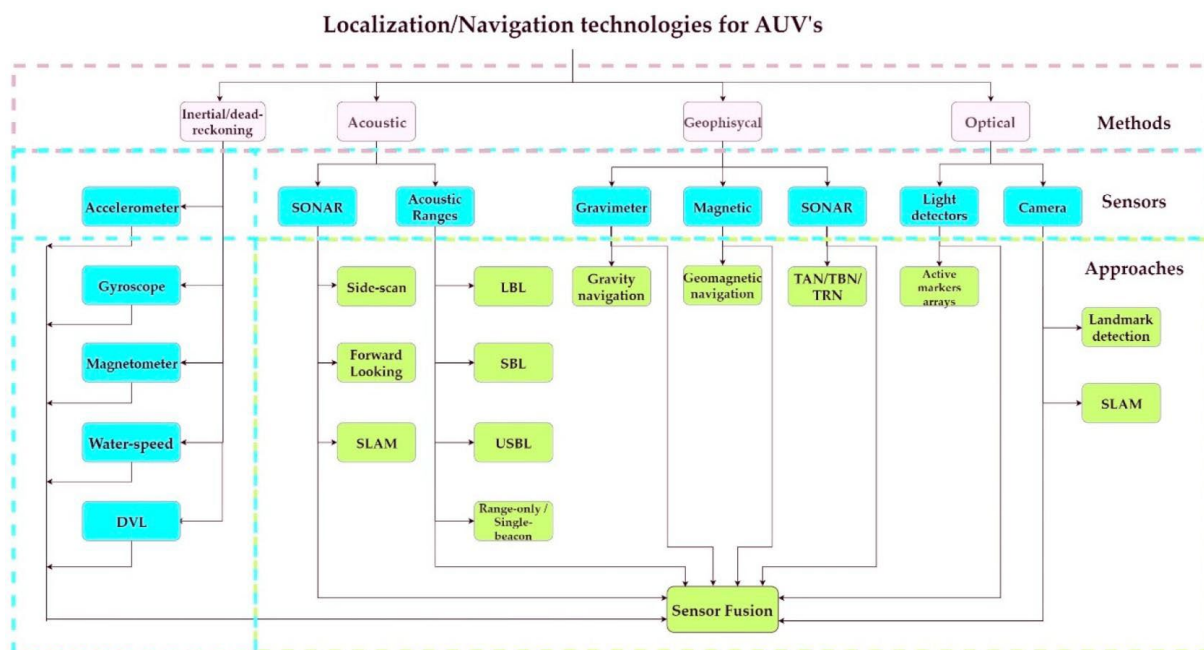


圖 1 自主式水下載具之定位與導航技術(González-García et al., 2020)

3.1.2 聲學導航

與無線電波比較，聲學訊號於水中傳播穩定，且距離更遠，因此成為目前最適合水下無人載具導航之技術。於開闊水域中，聲學定位是一項穩定、可靠之技術，惟水下環境複雜對聲波傳輸面臨較高挑戰(Wu et al., 2019)，圖 2 為聲學定位技術之示意圖。聲學定位模式主要分為長基線定位系統(long baseline, LBL)、短基線定位系統(short baseline, SBL)及超短基線定位系統(ultra short baseline, USBL)三種，其中超短基線為目前較常使用之定位方式，組成包括安裝於船隻下方的收發器及 ROV 上之應答器，藉由來回發送聲學訊號，計算出 ROV 相對於收發器的距離和方位角，而長基線則需於現場部署複雜的基線網絡，校準也相對複雜和耗時。

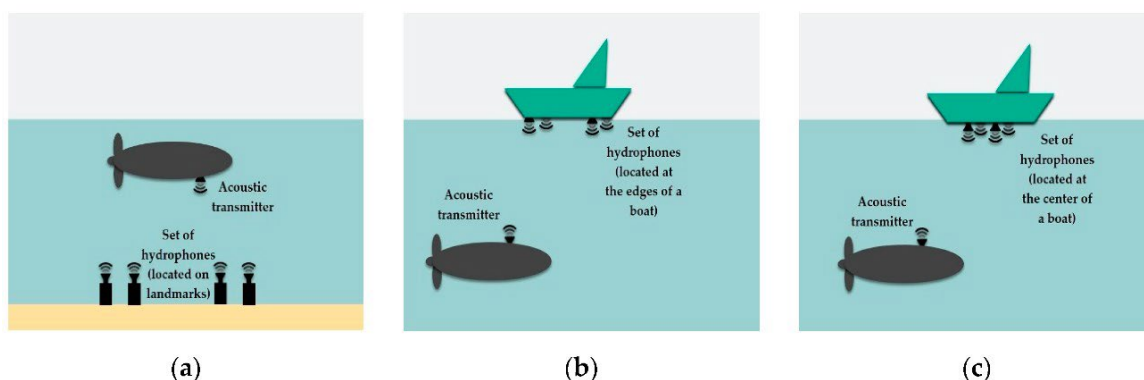


圖 2 聲學定位技術(a)長基線(b)短基線(c)超短基線(González-García et al., 2020)

3.1.3 地球物理導航

地球物理導航將慣性導航所測得的值與地圖中的水深、磁場和重力等地球物理參數進行匹配，可以連續校正慣性導航的誤差，保持定位精度，無需外部感測器搭配。其主要限制是在執行任務前需先輸入地圖資訊，以及在地圖和感測器之間的複雜運算(Meduna, 2011)。

3.1.4 光學導航

圖 3 為光學導航示意圖，其為提供水下無人載具周遭環境資訊而進行導航，需搭載光學感測器或相機。但水下環境複雜，通常使成像能力受限(Nootz et al., 2016)。

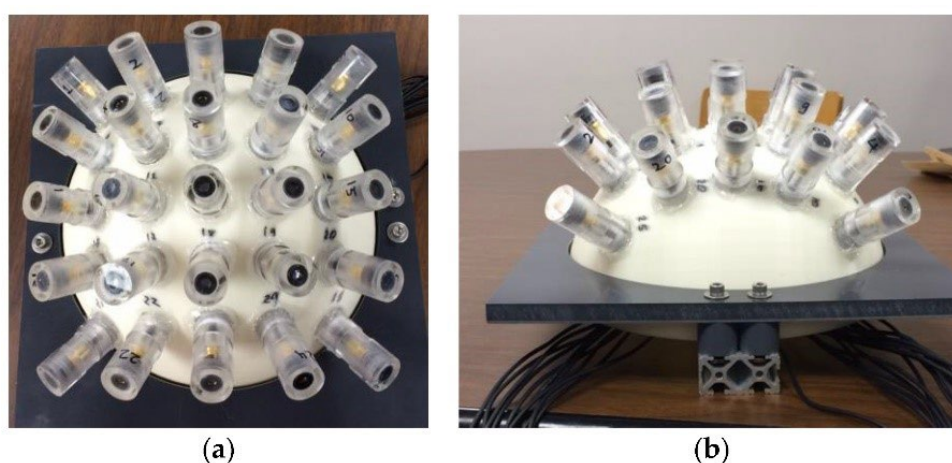


圖 3 光學感測器原型示意圖(a)俯視圖(b)側視圖(Eren et al., 2017)

3.1.5 同時定位與地圖構建

同時定位與地圖構建技術(Simultaneous localization and mapping, SLAM)是指載具從未知地點出發，在移動過程通過重複觀測的地圖特徵以定位自身位置，再根據自身位置構建周遭之地圖，從而達到同時定位和地圖構建的目的(Bailey and Durrant, 2006)。水下 SLAM 可以基於聲學技術或光學技術而進行。

3.2 水下測試作業

本研究於臺北港北 1 碼頭進行 ROV 水下巡查定位測試，且搭配超短基線定位系統(ultra short baseline, USBL)輔助巡查，測試範圍如圖 4 所示。



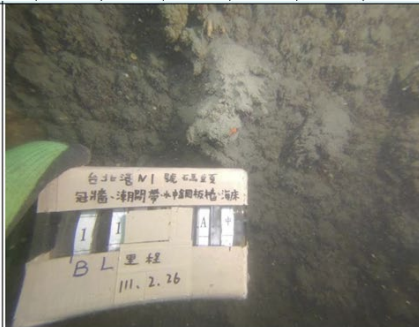
圖 4 臺北港北 1 碼頭測試範圍

3.2.1 既有勘查資料蒐集

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司辦理「111 年度臺北港既有碼頭結構安全性分析及補強評估工作委託技術服務」，派遣具經驗潛水人員針對臺北港碼頭現況及安全進行水下巡查評估，其中將北 1 碼頭全長 405 公尺劃分 13 區段，每一個區段長度以 31 公尺為原則，惟第 13 區段長 33 公尺，評估項目包含鋼板樁、混凝土及陰極防蝕，結果顯示區段 2、3、4、5、6、9、10、12 皆含目視可檢測之劣化現象，如圖 5~圖 7 所示。

設施		分類		檢測診斷項目		檢測方法		劣化度判定標準						
鋼板樁碼頭	I	鋼板樁	鋼材之銹蝕、龜裂、損傷	目視(潛水) • 破洞有無 • 表面損傷狀況	4	由於銹蝕引起之穿孔、變形，其他明顯損傷								
					3	-----								
					2	-----								
					1	沒有變化								
1BL	2BL	3BL	4BL	5BL	6BL	7BL	8BL	9BL	10BL	11BL	12BL	13BL		
1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1		





5BL劣化度『4』鋼板樁開裂	11BL劣化度『1』無明顯變化
----------------	-----------------

圖 5 碼頭檢測劣化度評估-鋼板樁

設施	分類	檢測診斷項目		檢測方法	劣化度判定標準									
鋼板樁碼頭	II	混凝土	混凝土損傷、劣化	目視 • 裂紋、剝離、損傷 • 鋼筋腐蝕 • 劣化預兆	4	有弱化碼頭性能之損傷								
					3	有幅度 3mm 以上裂紋 大範圍鋼筋外露								
						2	幅度小於 3mm 裂紋 局部鋼筋外露							
					1		沒有變化							
					1BL	2BL	3BL	4BL	5BL	6BL	7BL	8BL	9BL	10BL
1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	1		
														
4BL劣化度『2』局部鋼筋外露					9BL劣化度『2』局部鋼筋外露									

圖 6 碼頭檢測劣化度評估-混凝土

設施	分類	檢測診斷項目		檢測方法	劣化度判定標準									
鋼板樁碼頭	II	陰極防蝕	鋁陽極塊本體及連接之確認	潛水調查 • 現況之確認	4	陽極塊脫落或全部消耗								
						陽極塊連接狀況不佳								
					3	-----								
					2	非完整固定或有輕微鬆脫								
					1	沒有脫落異常								
1BL	2BL	3BL	4BL	5BL	6BL	7BL	8BL	9BL	10BL	11BL	12BL	13BL		
1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1		
														
4BL劣化度『1』沒有脫落異常						6BL劣化度『2』支架脫落								

圖 7 碼頭檢測劣化度評估-陰極防蝕

3.2.2 測試儀器介紹

本研究選用 ST-ROV-01 進行相關測試，相關儀器規格如圖 8 所示。

主體		耐壓深度	500 m
長	457 mm	電池	
寬	575 mm	種類	鋰電池
高	254 mm	規格	18Ah / 14.8V battery /266Wh
空氣中重量(含承載)	11-12 kg	電池連接器	XT90
空氣中重量(不含承載)	9-10 kg	電池續航時間	2 ~ 4 hr
淨浮力(含承載)	1.2 kg	相機	
淨浮力(不含承載)	1.4 kg	相機	1080p digital
防水外殼內徑	102 mm	感光度	0.01 lux
防水外殼內部長度	298 mm	可視角度	110 degrees horizontally
電纜貫穿孔	18 x M10 孔	傾斜範圍感應器	± 90 degree camera tilt (180 total range)
結構	HDPE 架構		
主管(電子外殼)	6061-T6 Aluminum(鋁)		
電池管	6061-T6 Aluminum(鋁)		
浮力泡棉	R-3318 PU(聚氨酯)		
承載重量	9 x 200g 配重塊		
性能			
最大深度	300 m		
最大前進速度	1.5 m/s		
推進器	T200		
ESC	30A ESC		
推進器配置	8 thrusters - 4 Vectored - 4Vertical		
前進推力(45 度)	9 kgf		
垂直推力	14 kgf		
側向推力(45 度)	9 kgf		



圖 8 STROV 儀器規格

3.2.3 任務規劃

ROV 預計從北 1 碼頭第 1 區段為起始點開始作業，路徑規劃如圖 9 所示，至起始點隨即下沉至水底，並沿碼頭水平移動固定距離 D，再向上浮起，直到接近水面後朝相同方向水平移動固定距離 D 再下沉，以此路徑進行實地測試。

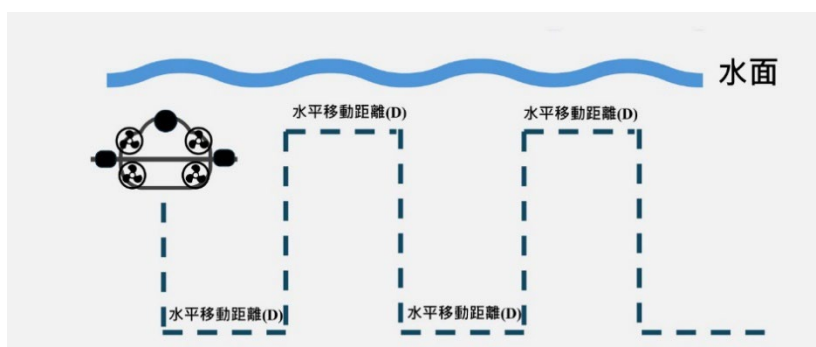


圖 9 ROV 作業路徑規劃

為防止儀器於拍攝過程撞擊岸壁，且考量水下影像可視程度，取離岸壁 50cm 進行巡查測試，另配合 STROV 所搭載之感測器 GoPro，其視野角度範圍為 144 度，經計算水平移動距離 D 為 140cm，相關示意畫面如圖 10 所示。

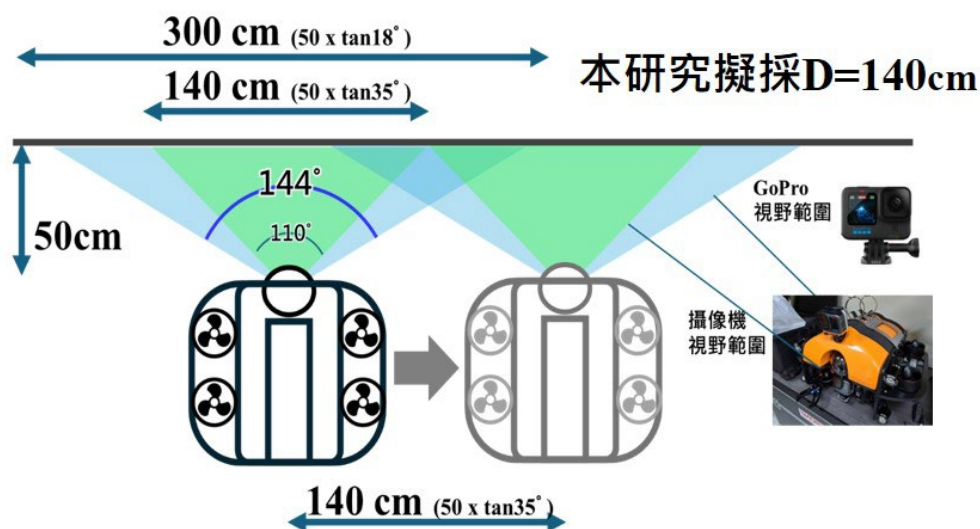


圖 10 水平移動距離 D 計算方式

3.3 測試成果分析

測試當日晴天，港內波高約 0.1m，潮位約 1.2m，以 ROV 進行水下攝影，記錄本次巡查測試過程，且進行水下定位測試及拍攝影像分析，相關內容敘述如下。

3.3.1 定位測試成果

本次作業以 USBL 進行水下定位，其為一種水下聲學定位技術，主要用於精確定位水下設備（如 ROV）或潛水器之位置。它透過聲波信號進行定位，廣泛應用於海洋工程、海底探測和水下巡檢，原理為藉由數個音鼓以某種陣列組合，由不同位置的音鼓記錄時差，則可判斷障礙物之方向。意旨透過水下聲波幾何原理測量訊號到達方位和距離，並藉由計算定位點與接收基站陣列間的訊號走時與相位差來推算定位結果，經常應用於海底地形勘探、水下航行載具的控制和水下遙控作業等應用領域（馬玉芳，2016）。圖 11 說明如何藉由 USBL 收發器及應答器記錄溝通時間，並結合全球導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)測量船隻定位，計算出瞬時的水下無人載具絕對位置。

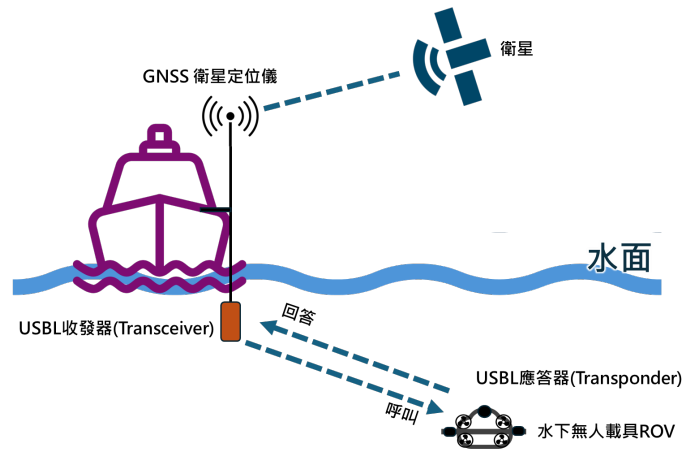


圖 11 USBL 水下定位作業原理

定位測試作業設定 GNSS 為現行 TWD97 坐標系統，經 USBL 即時解算與記錄後，得到 ROV 絕對坐標值，並使用 GIS 軟體展繪，依據作業時間分色套疊於內政部國土測繪中心發布之通用版正射影像(詳圖 12)，圖例為測得之筆數。此次作業由圖中左上方開始依循前述規劃路徑，沿著北 1 碼頭岸壁進行測試，現場雖水面靜止但 ROV 於水中無法完全依循預定路徑作業，可能原因為受水下流況影響，且儀器緊靠岸壁拍攝，定位過程易出現干擾雜訊，影響座標位置之正確性，後續將針對定位問題進行探討，以精進其定位系統。



圖 12 USBL 定位成果展繪並套疊通用版正射影像

3.3.2 影片拍攝成果

ROV 於北 1 碼頭進行水下岸壁巡查測試，依規劃路徑拍攝影片，惟前述 3.2.1 小節蒐集之結構物既有劣化位置無明確座標標示，且本次定位測試受雜訊干擾影響座標準確度，故無法進行比較，僅可就本次拍攝影像進行分析，圖 13 為針對結構物疑似劣化毀損情形進行擷取並標

註，影像尚未經過清晰處理，相較潛水員拍攝之影像，同樣可清楚辨識結構物現況，後續會再將影片進行處理，以利辨識更多細節。

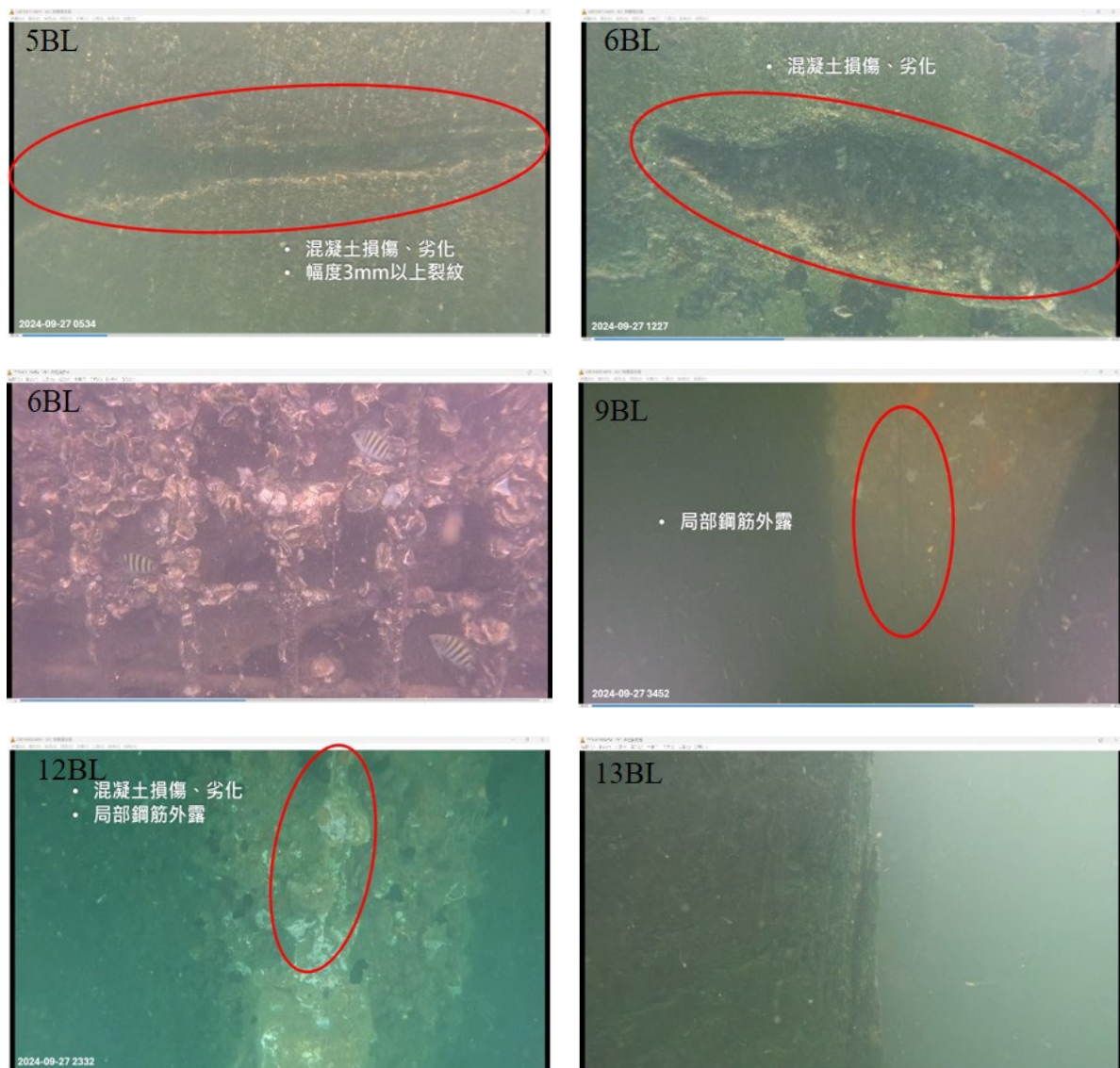


圖 13 ROV 水下拍攝影片

四、結論與建議

1. 本研究執行 STROV 水下影片拍攝時，港內水面浪高約 0.1 公尺，然而於淺水區域，仍然產生許多不可抗力之晃動，使得操作員需努力使 ROV 於水中回穩，容易錯漏 USBL 反饋之座標位置。
2. 當天測試水域因濁度高，水中可視範圍淺，操作執行過程需緊靠岸壁拍攝，惟靠近水面區域容易受海象條件影響，儀器多次撞到岸壁，容易迷航且無法完全依原規劃路徑作業。

3. 本研究採用之 USBL 儀器 (Link Quest Track Link 1500)於作業時為清楚拍攝岸壁結構物現況，故需緊靠結構物移動，容易形成多層聲波混亂，導致定位成果受到影響，使得許多定位資料受雜訊干擾無法確認其精度，後續將再針對定位問題進行探討，重新檢視適用之 USBL。
4. 本研究以 STROV 搭配 USBL 進行水下巡查測試，以儀器針對碼頭岸壁進行初步檢視，疑似毀損地方可再請潛水員進行確認，未來若此方法評估可行，優點為可獲得全面且擁有定位資訊之高解析錄影成果，且可避免人身安全風險之全面勘查。
5. 目前巡查方式主要由潛水員進行水下作業，其巡檢過程發現狀況皆由潛水員之既有知識做判定，容易有認知落差問題，惟 ROV 水下巡查可針對標的物進行全面攝影，後續再由專業人員就影像進行辨識，更全面精準完成檢測。
6. 未來若以 ROV 進行初步且全面巡查，建議以區塊劃分方式執行，每區塊完成後浮至水面，同步紀錄時間間隔與位置，以做為區域驗證。

參考文獻

1. Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE robotics & automation magazine*, 13(3), 108-117.
2. Woodman, O. J. (2007). An introduction to inertial navigation (No. UCAM-CL-TR-696). University of Cambridge, Computer Laboratory.
3. Ren, Z.; Chen, L.; Zhang, H.; Wu, M. (2008). Research on geomagnetic-matching localization algorithm for unmanned underwater vehicles. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Information and Automation*, 1025-1029.
4. Meduna, D. K. (2011). Terrain relative navigation for sensor-limited systems with application to underwater vehicles. Stanford University.
5. Fallon, M. F., Kaess, M., Johannsson, H., & Leonard, J. J. (2011). Efficient AUV navigation fusing acoustic ranging and side-scan sonar. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2398-2405.
6. Chu, W.-S., Lee, K.-T., Song, S.-H. et al. (2012), Review of biomimetic underwater robots using smart actuators, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*.
7. Nootz, G., Jarosz, E., Dalgleish, F. R., & Hou, W. (2016). Quantification of optical turbulence in the ocean and its effects on beam propagation. *Applied optics*, 55(31), 8813-8820.
8. Bosch, J.; Gracias, N.; Ridao, P.; Istenič, K.; Ribas, D. (2016). Close-range tracking of underwater vehicles using light beacons.
9. Eren, F., Pe'eri, S., Thein, M. W., Rzhannov, Y., Celikkol, B., & Swift, M. R. (2017). Position, orientation and velocity detection of unmanned underwater vehicles (UUVs) using an optical detector array. *Sensors*, 17(8), 1741.
10. Aguirre-Castro, O. A., Inzunza-González, E., García-Guerrero, E. E., Tlelo-Cuautle, E., López-Bonilla, O. R., Olguín-Tiznado, J. E., & Cárdenas-Valdez, J. R. (2019). Design and construction of

- an ROV for underwater exploration. *Sensors*, 19(24), 5387.
11. Wu, Y., Ta, X., Xiao, R., Wei, Y., An, D., & Li, D. (2019). Survey of underwater robot positioning navigation. *Applied Ocean Research*, 90, 101845.
 12. He, Y., Wang, D. B., & Ali, Z. A. (2020). A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. *Measurement and Control*, 53(9-10), 1561-1570.
 13. González-García, J., Gómez-Espinosa, A., Cuan-Urquizo, E., García-Valdovinos, L. G., Salgado-Jiménez, T., & Cabello, J. A. E. (2020). Autonomous underwater vehicles: Localization, navigation, and communication for collaborative missions. *Applied sciences*, 10(4), 1256.
 14. Singh, R., Sarkar, P., Goswami, V., & Yadav, R. (2022). Review of low cost micro remotely operated underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 266, 112796.
 15. Dalhatu, A. A., Sa,ad, A. M., Cabral de Azevedo, R., & De Tomi, G. (2023). Remotely operated vehicle taxonomy and emerging methods of inspection, maintenance, and repair operations: An overview and outlook. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 145(2), 020801.
 16. 馬玉芳(2016)，水下定位的應用,國立臺灣大學理學院貴儀中心-海洋探勘阻。
 17. 臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司(2022)，111 年度臺北港既有碼頭結構安全性分析及補強評估工作委託技術服務-臺北港碼頭現況及安全評估報告。