

# 無人載具對於水下設施巡查技術探討

洪維屏<sup>1</sup> 許師瑜<sup>2</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

<sup>2</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

## 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，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無人載具等相關技術，輔助進行水下設施巡查工作，有效降低潛水人員作業風險。112 年研究已彙整目前港區碼頭及防波堤水下設施巡查項目與劣化度判定標準，並回顧國內外文獻，蒐集目前水下無人載具應用案例，針對水下遙控載具(ROV)不同機型進行分析比較，並於試驗室初步測試其水下定位情形，後續將於港區進行實地測試，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，評估未來替代潛水員進行水下巡查之可行性。

## 一、前言

水下無人載具(Unmanned Underwater Vehicle; UUV)於 20 世紀中開始發展，伴隨海洋開發與保護進程加速，此設備逐漸受到重視，其依操控方式可區分為水下遙控載具(Remotely Operated Vehicle; ROV) 與自主式水下載具(Autonomous Underwater Vehicle; AUV)。ROV 主要以一條內含銅線與光纖的繫纜與水面上的工作母船連結，提供載具所需的電力、傳遞控制命令和水下即時資訊，源於 1970 年代起因遭逢石油危機所帶動的海底探油開採需求，加裝機械手臂來執行水底樣本採集、水下電焊接管施工、水下打撈、水雷清除等工作；AUV 則靠著自身內建電池與自主導航程式，即可於水下進行作業，不受纜線長度限制且不需仰賴水面上母船供電，在廣域的工作環境較佔優勢，但成本亦較 ROV 昂貴。本研究為探討目前港區水下巡查項目及劣化度判定標準，分析不同類型之水下無人載具，並蒐集國內外水下無人載具實用案例之相關文獻，以利後續進行相關測試。

## 二、港區水下巡查項目探討

港務公司港區水下巡查項目之檢測方式，主要以潛水員進行水下目視或配合儀器進行輔助量測判定，本研究蒐集基隆港、臺中港、高雄港及花蓮港等之港灣構造物維護管理手冊，彙整港區碼頭及防波堤等設施之水下巡查項目、檢測方法及劣化度判定標準(如表 1、2)，做為探討水下巡查技術參考。

表 1 港區碼頭設施水下構件劣化度判定標準

設施	巡查項目	檢測方法	劣化度判定標準	
沉箱式碼頭	沉箱(側壁的劣化、損傷)	目視 · 裂紋，剝離、損傷 · 鋼筋露出 · 裂化的預兆	4	<input type="checkbox"/> 有使內填料流出的破洞、裂紋和缺損 <input type="checkbox"/> 大範圍鋼筋露出
			3	<input type="checkbox"/> 在多個方向有 3mm 程度的裂紋
			2	<input type="checkbox"/> 在一個方向有 3mm 的裂紋 <input type="checkbox"/> 局部有鋼筋露出
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	海底地基(沖刷、淤積)	潛水調查 · 海底面的起伏 · 沖刷、淤積	4	<input type="checkbox"/> 岸壁前有深1m以上的沖刷 <input type="checkbox"/> 伴隨沖刷，對基礎及岸壁本體有影響
			3	<input type="checkbox"/> 在岸壁前有0.5~1.0m之沖刷深度
			2	<input type="checkbox"/> 有深度/高度小於0.5m的沖刷或淤積
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
鋼板樁式碼頭	鋼板樁(鋼材的腐蝕、龜裂、損傷)	目視(含潛水) · 破洞的有無 · 表面損傷的狀況	4	<input type="checkbox"/> 由於腐蝕引起的穿孔和變形，還有其他明顯的損傷
			3	-----
			2	-----
			1	<input type="checkbox"/> 沒有由腐蝕引起的穿孔和變形
	被覆防蝕工(水中硬化型被覆)	目視 · 被覆的劣化	4	<input type="checkbox"/> 水中硬化型被覆劣化顯著，鋼材呈腐蝕狀態
			3	<input type="checkbox"/> 部分鋼材發生被覆的變化，且有鋼材的腐蝕
			2	<input type="checkbox"/> 鋼材沒問題，但被覆的損傷很多
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	陰極防蝕工(犧牲陽極)	潛水調查 · 現況的確認(全數)	4	<input type="checkbox"/> 陽極塊脫落或全部消耗 <input type="checkbox"/> 陽極塊連接狀況不佳(搖晃下降)
			3	-----
			2	-----
			1	<input type="checkbox"/> 沒有脫落的異常

	海底地基(冲刷, 淤積)	潛水調查 · 海底面的起伏	4	<input type="checkbox"/> 岸壁前面深度1m以上的冲刷 <input type="checkbox"/> 伴隨冲刷, 可見對基礎和岸壁本體的影響
			3	<input type="checkbox"/> 岸壁前面深度0.5m至1m的冲刷
			2	<input type="checkbox"/> 深度/高度小於0.5m的冲刷或淤積
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
RC板樁式碼頭	海底地基	參考鋼板樁式碼頭檢測方法及劣化度判定標準		
棧橋式碼頭	鋼管樁	參考鋼板樁式碼頭檢測方法及劣化度判定標準		
	被覆防蝕工			
	陰極防蝕工			
浮動碼頭	被覆防蝕工	參考鋼板樁式碼頭檢測方法及劣化度判定標準		
	陰極防蝕工			
	鋼製浮箱、固定樁、連絡橋等鋼構材(鋼材的腐蝕、龜裂、損傷)	潛水調查 · 破孔的有無 · 表面損傷狀況	4	<input type="checkbox"/> 因腐蝕而引起的破孔和變形, 且有其他顯著損傷
			3	-----
			2	-----
1			<input type="checkbox"/> 無因腐蝕而引起的破孔和變形	
方塊式碼頭	參考沉箱式碼頭的檢測診斷			

資料來源：參考基隆港、臺中港及花蓮港之港灣構造物維護管理手冊，本研究整理。

表 2 港區防波堤設施水下構件劣化度判定標準

設施	巡查項目	檢測方法	劣化度判定標準	
沉箱合成式防波堤	沉箱(混凝土的劣化、損傷)	潛水調查 · 裂紋、剝離、損傷, 缺損 · 鋼筋露出 · 劣化的預兆等	4	<input type="checkbox"/> 有使內填料流出的破洞, 裂紋缺損 <input type="checkbox"/> 有大範圍的鋼筋露出
			3	<input type="checkbox"/> 多方向有 3mm 程度的裂紋
			2	<input type="checkbox"/> 1方向有 3mm 程度的裂紋 <input type="checkbox"/> 局部有鋼筋露出
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	護面工(移動、散亂、下陷)	潛水調查 · 平面、肩部、斜面等的變形 · 拋石和被覆塊石的移動和散亂狀況	4	<input type="checkbox"/> 有受災率5%以上的移動、散亂、下陷
			3	<input type="checkbox"/> 有受災率1至5%的移動、散亂、下陷
			2	<input type="checkbox"/> 有受災率 1%以下的移動、散亂、下陷
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	護基工(移動、散亂、下陷)	潛水調查 · 平面、肩部、底部等的變形	4	<input type="checkbox"/> 在檢測單位長內, 有50%以上大範圍的移動、散亂、下陷

		<ul style="list-style-type: none"> <li>護基塊的移動和散亂</li> </ul>	3	<input type="checkbox"/> 在檢測單位長度內，有10到50%的範圍的移動、散亂
			2	<input type="checkbox"/> 在檢測單位長度內，有少於10%的移動、散亂
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	消波工(移動、散亂、下陷)	潛水調查 <ul style="list-style-type: none"> <li>平面、肩部、底部等的變形</li> <li>消波塊的移動和散亂狀況</li> </ul>	4	<input type="checkbox"/> 在檢測單位長度內，消波工斷面消波塊減少1層以上
			3	<input type="checkbox"/> 在檢測單位長內，消波工斷面在減少中
			2	<input type="checkbox"/> 消波塊部分出現移動(散亂，下陷)
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	海底地基(沖刷、淤積)	潛水調查 <ul style="list-style-type: none"> <li>海底面的起伏</li> </ul>	4	<input type="checkbox"/> 在護基塊法線前拋石，有1m以上的沖刷 <input type="checkbox"/> 因沖刷可看出對拋石基礎和堤體沉箱的影響 <input type="checkbox"/> 沖刷防止襯墊在損傷中，或受影響的狀態
			3	<input type="checkbox"/> 在護基方塊前拋石有深0.5m至1m的沖刷 <input type="checkbox"/> 沖刷防止襯墊有50%損傷
			2	<input type="checkbox"/> 有深度/高度小於0.5m的沖刷或淤積 <input type="checkbox"/> 沖刷防止襯墊有10%的損傷
			1	<input type="checkbox"/> 沒有變化
	方塊式防波堤	參考沉箱合成式防波堤的檢測診斷		
斜坡堤	參考沉箱合成式防波堤的檢測診斷			

資料來源：參考基隆港、臺中港及花蓮港之港灣構造物維護管理手冊，本研究整理。

表 1 及表 2 顯示水下構件劣化度判斷在裂紋最小劣化程度達公釐(mm)尺度，因此，若以水下無人載具進行相關檢測，則其加載設備或影像判識成果所需精度，亦需達公釐尺度。水下無人載具常見之巡查加載設備包含都卜勒聲納系統、USBL(Ultra Short Baseline)超短基線定位系統、高解析度攝影機、機械手臂以及電流檢測器等，其中機械手臂與電流檢測器為接觸式檢測設備，較不受精度規範，而高解析度攝影機如以現今主流攝影鏡頭模組提高影像重疊率，亦可達公釐尺度，目前市面上 USBL 系統主要精度為 1 公尺；而都卜勒聲納系統採用都卜勒效應的雙頻雷射干涉儀，能在數十公尺範圍內達到 0.01 $\mu$ m 的計量精度。因此，如結合都卜勒聲納與 USBL 超短基線定位系統，搭配高精度攝影機可滿足精度需求，但仍需克服水下定位及濁度問題。

### 三、水下無人載具應用分析

水下無人載具近年來快速且蓬勃發展，依照操控方式可區分為水下遙控載具(ROV) 與自主式水下載具(AUV)，詳細敘述如下，另本研究將先針對有纜繩連接之水下遙控載具(ROV)進行初步定位測試。

#### 3.1 水下遙控載具

水下遙控載具(ROV)主要靠一條內含銅線與光纖的繫纜與水面上之工作母船連結，提供載具所需電力，並傳遞控制指令與即時水下資訊，其可搭載機械手臂、水下光源、照相機及攝影機等裝備，並由操作人員在船隻、浮動平台或陸地進行操作。典型 ROV 備有堅固框架、提供浮力的浮筒單元、多個推進器及將系統連接工作母船的纜線。




本研究引用 R Singh 等人(2022)發表內容，並彙整不同類型之 ROV 機型及其相關資訊，表 3 顯示不同型號 ROV 之尺寸、重量相差甚大，主體結構亦不相同，尺寸較大之機型可承受之水下壓力也較大，故可依工作項目及水下環境條件，挑選合適之機型進行作業。

表 3 水下遙控載具(ROV)機型分析彙整

型號	尺寸	重量	動力	壓力	主體	成本
BabyROV(2014) 	34.8× 34.8× 24.9 cm	8.5 kg	100-240 VAC (伏 特交流 電)	60 msw (公制 壓力)	配有相機 IP CMOS 深度可達 20m	1,564 美 元
Blue-ROV2 (2016) 	45.7 × 33.8 × 25.4 cm	11 kg	續航時 間： 4hr(空 機)、 1hr(負載 物件)	300 msw	機身兩側各設 1 支 LED 燈， 另可增加至 4 支；水下拍攝 視角為 110 度；纜線標準長 度為 100m，可加長至 300m	3,213 美 元
Falcon 	100×50 × 60 cm	60kg	110-230 VAC	300 msw	具備 5 個推進器、2 個 LED 燈、高辨識彩度攝影機及自 動深度航向導航系統	10 萬 8,000 美 元
Installer 	3×1.5× 1.9 m	3,100 kg	3kV	2,500 msw	具備數位相機(HDV)、高度 計、深度傳感器、10×250W 可 調燈光	

<p>Kaiko ROV(2012)日本 海洋科技中心 (JAMSTEC)</p> 	7.6×5.1 ×6.6 m	10600 kg	3.6 / 3.7 / 3.8 / 3.85 V	3,000 msw	包含 11 組水下攝影機與 1 組相機、導航設備推進器、障礙物探測聲納、高度計、慣性導航系統、都卜勒聲納、深度計、單色後視相機、電纜監控相機、深海尋標聲納；最大潛水深度 4,500m，可在水下載重 250kg	5,000 萬 美元
<p>Kaxan ROV (2014)</p> 	110× 64.8× 89.9 cm	90 kg		120 msw	包含深度傳感器、陀螺儀、側斜儀、指南針、水底燈、前置相機和 4 個推進器	
<p>Mohawk</p> 	93×77× 62 cm	165 kg	440 VAC	1,000 msw	具備 1 個 CCD 彩色相機、三角定位聲納和 5 個推進器	4,250 美 元
<p>Mohican</p> 	1.15× 0.77×0. 8 m	290 kg	320 VDC (伏特直 流電)	2,000 msw	具備相機、聲納、自動深度及航向控制傳感器、調光器等	
<p>Mojave</p> 	1.75× 1.06× 1.22 m	85 kg	110-230 VAC	1,500 msw	具備 1 個基本相機、LED 燈光、深度傳感器等	
<p>Panther Plus</p> 	1.75× 1.06× 1.22 m	500 kg	440 VAC	1,000 msw	具備 1 台彩色 CCD 相機、1 台低感光黑白相機、陀螺方向儀、深度及高度聲納傳感器	
<p>Panther-XT</p> 	175×10 6×122 cm	500 kg	440 VAC	1,500 msw	具備 1 台彩色 CCD 相機、1 台低照度黑白相機、陀螺方向儀、深度及高度聲納傳感器	

Proteus(2014) 	71.1× 41×33 cm	31.8 kg	480 瓦， 可運行 時間 68hr	500 msw	具有 2 個推進器及控制系統	11 萬 609 美元
TRENCHOVER 110 	20 ×16 ×20 cm	4.2 kg	鎳氫電 池、鋰 電池	5-30 msw	有線和無線配置，電纜長度 30m	1,030- 1,301 美 元
Triton XI 	3.2×1.6 ×1.98 m	3700 kg	440 VAC	2,000 msw	具備 8 個燈(7 個 DSPL 和 1 個 HID)、1 台彩色 CCD 相 機、1 台次要相機、雙頻掃 描聲納	
Seabotix vLBV300 	62.5 × 39.1 × 39.1 cm	10.1kg	120-240 VAC	300- 1,000 msw	高密度聚乙烯主體，包含已 安裝好的相機、燈、磁力針 及壓力傳感器；拴著主體並 額定 1000 英尺距離	8 萬 8,000 美 元
SeaDrone Inspector 2.0 	30.6× 30.6 27 cm	6.5kg	18-30 V	125 msw	具備相機 1080P 拍攝及錄製、 LED 照明、250m 繫繩、自動 深度航向偵測系統	19 萬 7,140 美 元
Seaowl MKIV 	1.35× 0.56× 0.8 m	100 kg	440 VAC	500 msw	具備 7 個推進器、自動航向 及深度控制傳感器、陀螺儀	1 萬 1,500 美 元
Superior Survey ROV 	5.56× 2.5×1.3 m	4,950 kg	220 hp	3,000 msw	具備聲納感測器、LED 燈、3 台 DSPL 超廣角鏡頭和 3 台 Imenco Silvertip 相機	

 Surveyor Plus	1.45× 0.82× 0.92 m	250 kg	380-440 VAC	600 msw	具備 1 台彩色 CCD、1 台高解析度低照度黑白相機、燈光、自動航向及深度控制傳感器	
 Video Ray Explorer X3	30.5 × 22.9 × 21.6 cm	3.6 kg	最大 48 VDC	250 msw	包含相機、鹵素燈、航向方位及深度傳感器，拴著主體並額定 250ft 距離	1 萬 4,500 美 元
 Chasing M2 Pro	48× 26.7× 16.5 cm	5.7 kg	續航時 間 4hr		操控手把、300Wh 電池、128G 記憶卡、專屬拉桿箱、200 公尺纜線、繞線盤	5,667 美 元

資料來源：參考 Ravendra Singh(2022)、DEEPOCEAN 公司與其他載具規格資料，本研究整理。

### 3.2 自主式水下載具

自主式水下載具(AUV)之特點為無纜繩連接載具，而是藉由內建電池與事先設定之航線使 AUV 於水下運作，任務完成後，也可自行返回起始位置，其不受纜繩限制且不需仰賴水面母船供電，但技術可靠度仍待檢驗，尤其在防波堤等結構較為複雜之水下檢測應用上，AUV 更受限於其推進力及精準定位能力，成本亦較 ROV 昂貴。AUV 在複雜水下環境作業時，導航系統將受水流方向及強度等影響；除外力因素，其也受自身體積、載重、電量與水下通訊情形所限制。為抵抗水流阻力，通常 AUV 設計會以水滴型、魚雷型等低阻造型。

### 3.3 文獻應用案例分析

隨著水下無人載具發展，現今搭載各式感測器，配合導航規劃與推進器運行，接近結構物並獲取高解析度之照片進行分析，以替代潛水員進行水下作業，值得深入研究，以下就水下無人載具應用案例，蒐集相關文獻進行探討。

水下無人載具執行任務過程，通常包含水下定位、影像蒐集和辨識等步驟。Jasinski 等人(1995) 透過水下無人載具協助空間定位，完成近港地區的考古作業；Reed, Wood & Haworth (2010)發表英國以水下無人載具結合聲納，辨識港口地區並建構 3D 船體模型；Jasni 等人(2012) 以生物啟發的概念，設計並開發一個擁有前置鏡頭的水下無人載具，用於捕獲和記錄水下資訊；Thornton 等人（2013）利用水下無人載具搭載聲學和視覺儀器，對錳結殼的體積分佈進行高解析度調查；Shin 等人(2014)發表韓國利用聲納定位和水下攝影，對港口水下結構物進行破壞檢測，如圖 1 所示；O'Byrne 等人（2015）設計一種用於水下結構檢查的水下立體成像系統，在愛



爾蘭科克港的實際結構上進行了測試；Xu 等人(2022)發表中國在水下結構物的裂縫巡檢中，採用雙眼視覺的概念，搭載兩組鏡頭模組於無人載具上，以取得裂縫深度、位置等，再利用影像處理和機器學習進行分析，計算其寬度，如圖 2 所示；Alladi 等人(2022)發表印度利用水下無人載具搭載超聲波陣列、聲納和電極探測棒等，對水下混凝土結構物進行無損巡檢，以觀察結構物在水下的受損情形，如圖 3 所示；張道光 and 黃宇謙(2023)報告指出日本利用 ROV 進行港灣構造物的檢測(含棧橋上部結構)，而港務公司並嘗試以 ROV 檢測水下碼頭壁體及調查陽極塊消耗情形。



圖 1 碼頭設施巡檢及聲納定位(Shin et al., 2014)

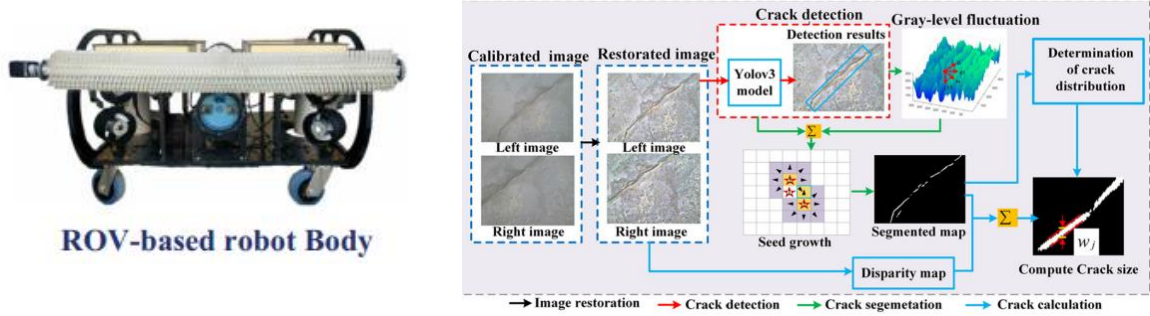


圖 2 雙鏡頭式 ROV 及裂縫影像處理過程 (Xu et al., 2022)



圖 3 印度水下無人載具巡檢(Alladi et al., 2022)

### 3.4 水下遙控載具定位試驗

固定航線或定點作業之水下無人載具，較難於水中精準定位，因海象條件、巡檢物件類別及水下環境，都將影響定位準確度，故需進行相關試驗，以利校正儀器。本研究 112 年考量港內作業條件，選用表 4 之型號 CHASING M2 PRO 水下遙控載具於試驗水槽(長 30 公尺、寬 1 公尺及深 1.2 公尺)進行相關測試，評估在不同流速下，可穩定進行作業之最小運行速度(指儀器於水槽中移動之最低速度)，113 年將至港區進行實地測試。

本研究分別以 0.094、0.10 與 0.15m/s 之流速進行操作，惟水槽中之水流方向受限，故改以調整儀器之朝向，以模擬不同方向之水流，如儀器之朝向(正面指向之方向)與水流方向相同，則定義為 0 度，反之則為 180 度，並記錄儀器前進固定距離所耗費之時間，以推算儀器之抗流速度(指儀器於水槽內之臨界速度，計算公式：抗流速度=前進距離所花時間)。

試驗結果顯示(圖 4~圖 6)，水流以 90 度流向儀器(即水流方向垂直儀器移動之方向)，對儀器產生阻力最大，當流速 0.094m/s，動力大小 25%，儀器抗流速度僅 0.1m/s；流速 0.15m/s，動力大小 25%，儀器抗流速度下降至 0.03m/s。在不同流速與動力模式下，流向 45 度與 135 度之抗流速度較為接近，且相較流向 90 度時為大。除流向外，流速大小也影響儀器之抗流速度，比較不同流速與抗流速度可推斷當流速越高，抗流速度普遍越小，兩者間約成正相關。

表 4 CHASING M2 PRO 機型規格

尺寸	480 * 267 * 165 mm
重量	5.7 kg
最大潛水深度	150 m
作業續行時間	≤4 小時
作業溫度	-10°C~45°C
最大航行速度	≤2m/s
供電來源	302.4Wh 可拆卸式電池

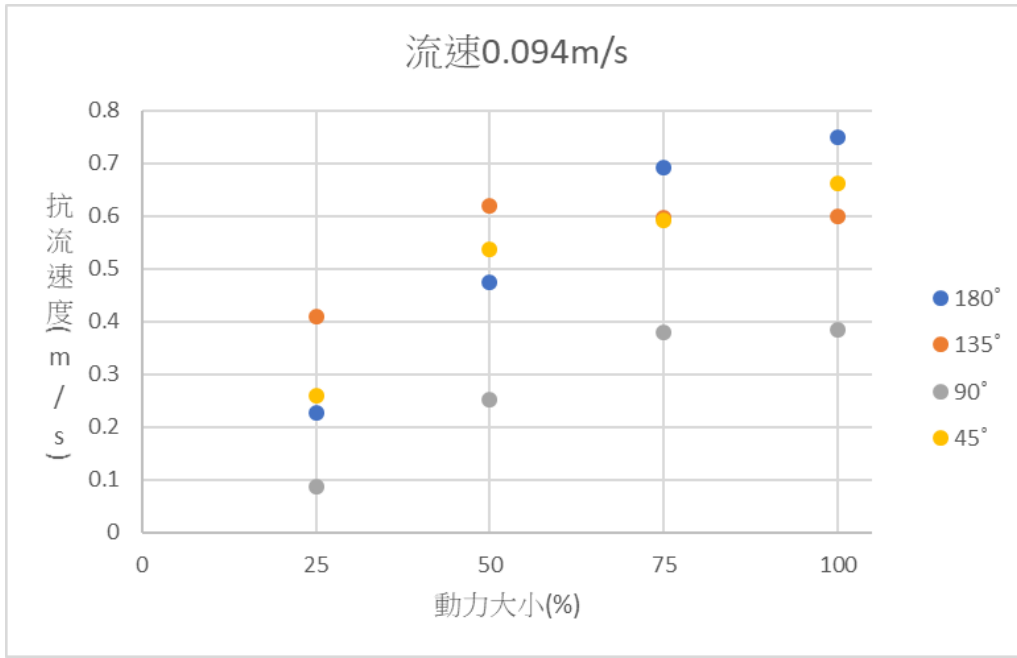


圖 4 流速 0.094 m/s 之各動力抗流速度

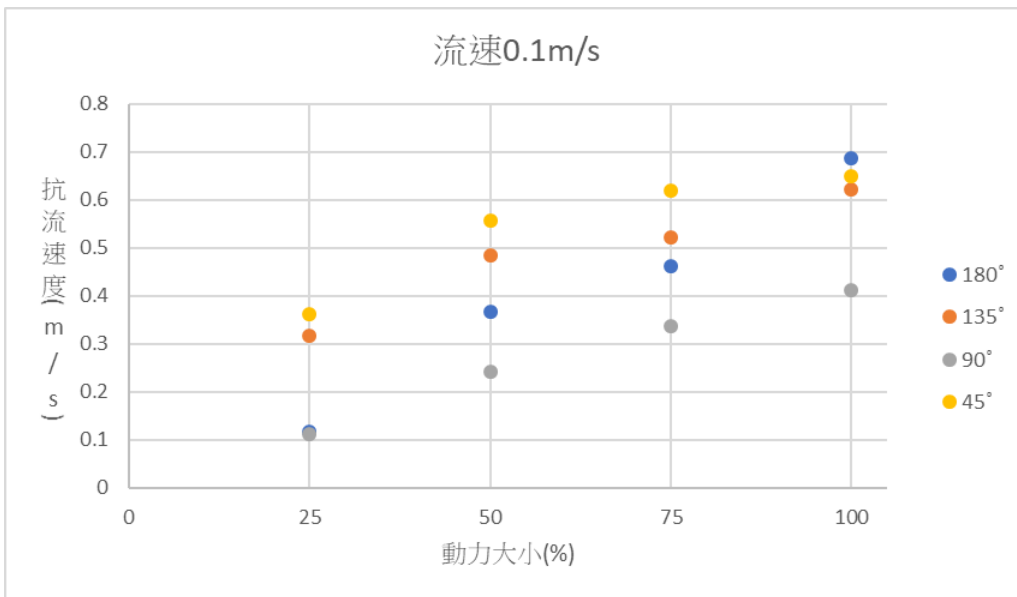


圖 5 流速 0.1 m/s 之各動力抗流速度

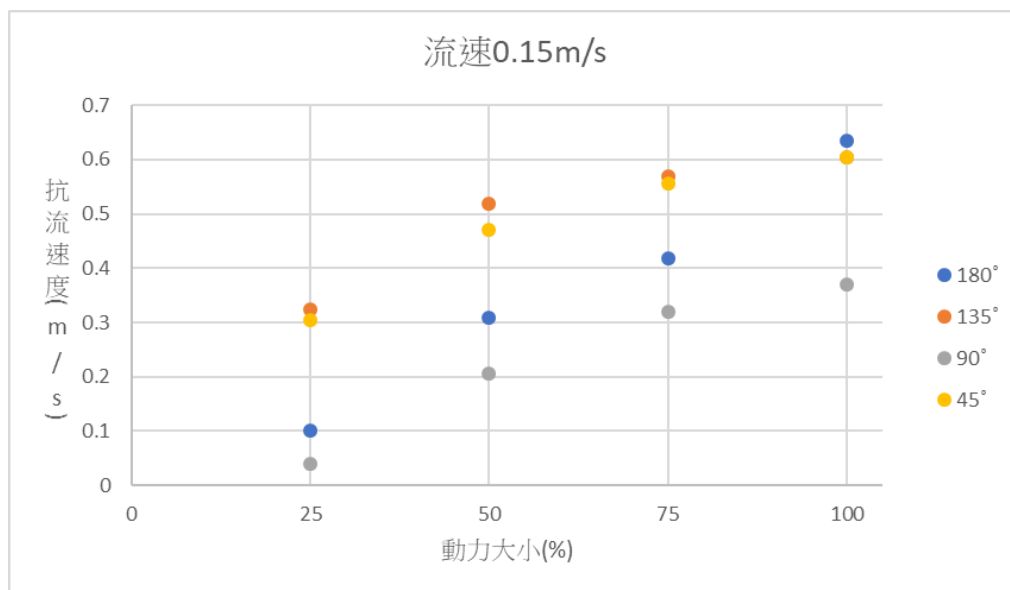


圖 6 流速 0.15 m/s 之各動力抗流速度

#### 四、結論

本研究評估未來以水下遙控載具，替代潛水員進行港區水下設施巡查之可行性，112 年已先針對港區水下巡查項目進行盤點分析，瞭解目前水下巡查著重碼頭及防波堤水下構造部分，蒐集彙整不同類型之水下遙控載具及歷年相關文獻指出，水下遙控載具於國外已可應用於水下考古、地形測量及水下構造物檢測等作業。另儀器初步定位試驗結果，除流向外，流速大小也影響儀器之抗流速度，113 年則預計於港區進行相關實地測試。水下遙控載具進行水下設施巡查，需考量水下作業環境及海象資訊，選擇適宜之載具與最佳作業時間，倘若海流及風速過大，過輕之水下遙控載具將無法進行操作，甚至造成遺失。考量港內水深淺、流速小，且船隻往返眾多，故進行水下設施巡查，建議選擇輕型機動性高之水下遙控載具，若載具機體過大，進行水下作業時，受限於空間限制，則無法移動自如；港外流速及水下作業空間相較於港內大，作業時可選擇動力強之較大型水下遙控載具，進行水下巡查。後續將再針對水下遙控載具蒐集之影像資料進行清晰度處理，若可以此進行設施劣化度判定，未來也可透過影像疊加對構造物進行建模，以利逐年巡查進行比對。

#### 參考文獻

1. R Singh, P Sarkar, V Goswami, R Yadav, (2022). Review of low cost micro remotely operated underwater vehicle, Ocean Engineering.
2. Jasinski et al., (1995). Applications of remotely controlled equipment in Norwegian marine archaeology.

3. Reed, Wood, & Haworth, (2010). The detection and disposal of IED devices within harbor regions using AUVs, smart ROVs and data processing/fusion technology.
4. Jasni, M.S.M., Samin, R.E., & Ibrahim, B.S.K. (2012). Biological inspired inspection underwater robot (SNAKEY) , *Procedia Engineering*.
5. Thornton, B., Asada, A., Bodenmann, A., Sangekar, M., & Ura, T. (2013). Instruments and methods for acoustic and visual survey of manganese crusts, *IEEE J Oceanic Eng.*
6. Shin, C., Han, S. H., Jang, I. S., Baek, W. D., & Kim, K. (2014). Development of unmanned inspection equipment for gravity type port structures, *Oceans-St. John's*, 1-4.
7. O'Byrne, M., Ghosh, B., Schoefs, F., & Pakrashi, V. (2015). Protocols for image processing based underwater inspection of infrastructure elements, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 628, No. 1, p. 012130.
8. Xu, C., Li, Q., Zhou, Q., Zhang, S., Yu, D., & Ma, Y. (2022). Power line-guided automatic electric transmission line inspection system, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-18.
9. Alladi, T., Chamola, V., Sahu, N., Venkatesh, V., Goyal, A., & Guizani, M. (2022). A comprehensive survey on the applications of blockchain for securing vehicular networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(2), 1212-1239.
10. 張道光, 黃宇謙, (2023) , 港灣構造物巡查檢測作業精進(1/4)-新興科技應用於巡查檢測作業之探討. 交通部運輸研究所