

# ROV 應用於港區碼頭岸壁巡查之影像處理分析

洪維屏<sup>1</sup> 柯拓宇<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

## 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作業，但由於水下環境複雜或海象條件不佳，可能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輔助進行水下設施巡查作業，另水下影像處理技術近年也大幅提升，可有效增強影像品質，以利辨識結構劣化情形。本研究以水下遙控載具(Remotely Operated Vehicles, ROV)針對港區碼頭岸壁水下巡查實際測試，另就不同影像增強技術進行探討，且將拍攝影像分別進行影像增強處理，深度學習模型整體表現較傳統方法優異，其不僅提升視覺品質，亦兼具色彩與對比的增強平衡，為未來水下影像處理領域的重要發展方向。

## 一、前言

近年海洋探索與水下作業日益頻繁，水下遙控載具扮演不可或缺之角色，其獲得之影像資料對於環境監測、資源探勘與結構檢測等任務具關鍵性價值。然而，水下環境複雜，對水下遙控載具定位及拍攝影像品質皆有顯著影響。

此外，水下遙控載具的移動與水流引起的動態模糊，複雜多變的水下光照條件，以及因介質折射帶來的幾何扭曲問題，皆使影像品質下降。這些綜合因素，導致水下影像普遍存在色彩失真、低對比度、高雜訊與模糊等問題，對後續分析與應用造成顯著限制。因此，本研究以水下遙控載具針對港區碼頭岸壁巡查進行測試作業，並分析水下影像增強處理技術，以提升影像品質，強化水下結構辨識的準確性。

## 二、港區碼頭岸壁水下巡查探討

本研究蒐集港務公司碼頭岸壁水下巡查方式及相關檢測資料，分析目前多由潛水員針對構造物劣化情形進行拍攝，抑或使用多音束測深儀進行全面檢測，兩種方式皆有優劣，潛水員進行水下巡查雖可近距離檢視但風險高，多音束測量可快速進行大範圍檢測，惟僅可針對尺寸較大之劣化部分進行辨識。近年水下遙控載具快速且蓬勃發展，操作者可即時查看拍攝影像且進

行遠端遙控，將儀器搭載高解析鏡頭，進行港區碼頭岸壁水下巡查測試，探討儀器水下定位情形，並將拍攝影像進行增強處理及後續品質評估。

## 2.1 既有勘查資料蒐集

港區碼頭岸壁水下巡查作業目前多由潛水員針對構造物劣化情形以相機進行拍攝，惟水下作業條件複雜、範圍廣，人力無法快速且全面進行巡查。多音束技術可快速進行全面大範圍測量，但受限其精度，僅尺寸較大之劣化情形，可藉由點雲資料判讀。以下蒐集港務公司相關檢測資料案例，如圖 1、2 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	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	11BL	12BL	13BL		
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 1 碼頭檢測劣化度評估(潛水員影像拍攝)

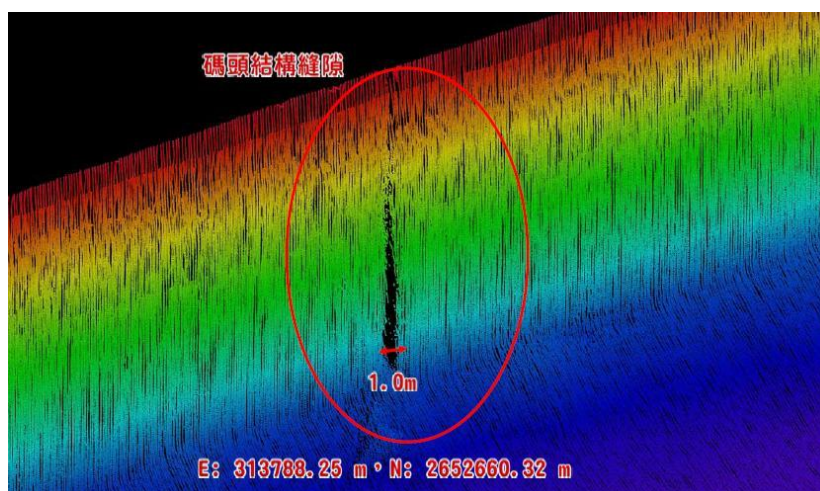


圖 2 碼頭檢測劣化度評估(多音束技術測量)

## 2.2 應用 ROV 於碼頭岸壁巡查測試

本研究於臺北港北 1 碼頭以 ROV 進行水下岸壁巡查測試，搭配超短基線定位系統(ultra short baseline, USBL)輔助巡查，探討整體作業流程、影像增強方式及影像品質評估，測試範圍如圖 3 所示。



圖 3 臺北港北 1 碼頭測試範圍

### 2.2.1 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 4 所示。

主體		耐壓深度	500 m
長	457 mm	<b>電池</b>	
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	<b>相機</b>	
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		
<b>性能</b>			
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 - 4 Vertical		
前進推力(45 度)	9 kgf		
垂直推力	14 kgf		
側向推力(45 度)	9 kgf		



圖 4 STROV 儀器規格

### 2.2.2 巡查路徑規劃

此次測試將依圖 5 規劃之路徑進行影像拍攝，ROV 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，以此路徑進行作業。

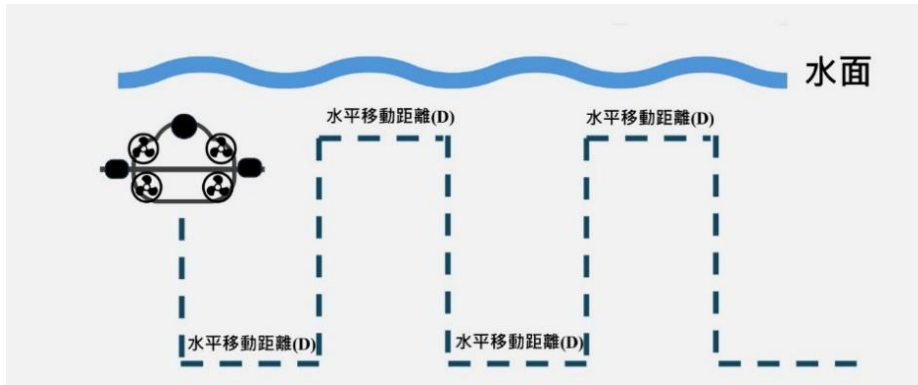


圖 5 ROV 作業路徑規劃

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 6 所示。

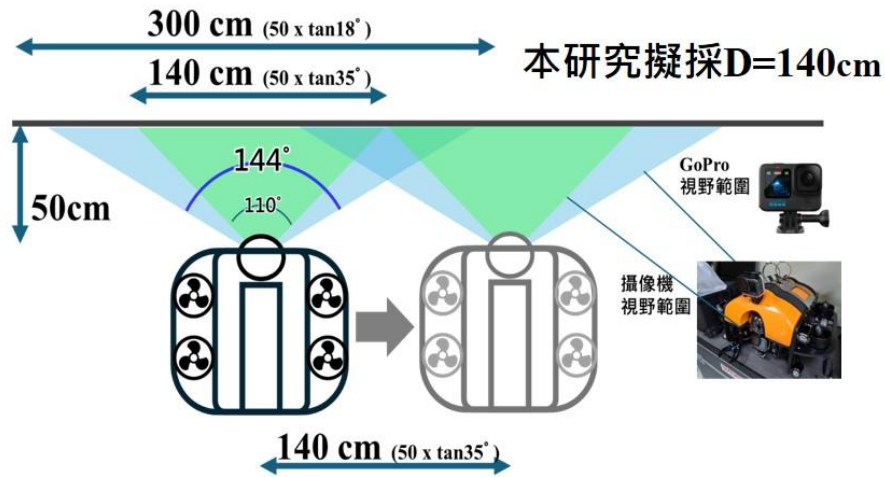


圖 6 水平移動距離 D 計算方式

### 2.2.3 測試成果

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，且分析水下定位成果，後續並將拍攝之影像進行增強處理及品質評估。

本次定位測試設定 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 7)，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進行拍攝，現場雖水面靜止但 ROV 於水下受複雜環境及海象條件影響，無法正確依循預定路徑作業，且儀器緊靠岸壁，定位過程易出現干擾雜訊，影響座標定位之準確性。



圖 7 USBL 定位成果展繪並套疊通用版正射影像

### 三、水下影像處理分析

完成上述測試後，則針對水下影像增強技術相關文獻進行蒐集探討，並將拍攝之影像依據不同方式進行處理，後續再進行影像品質評估。水下影像處理技術發展，不僅可提升水下影像品質，也對強化水下任務準確性與可靠性具重要意義。

#### 3.1 影像增強技術探討

本研究系統性探討近年水下影像增強技術的發展，包括色彩校正、雜訊消除、去模糊處理、對比度與清晰度增強，以及基於深度學習與生成模型之方法。水下影像通常受到光線吸收、散射、低對比度及色彩失真等問題影響，需先進的處理技術提升影像品質，以達任務需求。

##### 3.1.1 色彩校正方法

由於水中光線的波長依吸收速率而異，紅光波長被快速吸收，導致水下影像普遍出現色偏現象，特別是缺乏紅色通道。現代的色彩校正方法多著重於適應性白平衡與多通道補償，以對抗此類波長衰減現象。

A 傳統方法：Retinex 理論為基礎的演算法已逐漸進化，以處理水下非均勻照明問題。Li 等人<sup>[1]</sup>提出將白平衡程序嵌入色彩空間的反射與照明分離步驟之前，此設計能有效降低綠色主導現象，在混濁水域條件下，色偏抑制效果較傳統 RGB 空間處理法高出 40%<sup>[5,7]</sup>。此外，改良版的多尺度 Retinex 結合色彩復原 (MSRCR) 亦導入可學習的尺度參數，在增強細節與抑制光暈效應間達成平衡，適用於低對比的海床影像<sup>[5,7]</sup>。另一重要方法為改良灰世界 (Grey World) 演算法與暗通道先驗的結合，在水下影像色彩校正上展現顯著改善<sup>[2]</sup>。

B 深度學習方法：USLN 模型中的雙統計白平衡模組結合平均與最大像素值，進行像素層級的色彩復原，相較傳統 CNN 架構，其運算負載降低達 98%，且仍維持具競爭力的 PSNR 表現<sup>[8]</sup>。多尺度融合方法則將改良白平衡、CLAHE (對比限制自適應直方圖均衡) 與權重圖結合，以保留自然色彩漸層，同時加強生物監測應用中關鍵的紅色通道訊息<sup>[2,16]</sup>。例如 Fan 等人<sup>[17]</sup>提出金字塔式多尺度融合技術，可提升藻類影像的 UCIQE 指標達 23%，相較於單尺度方法更具效果。Li 等人亦提出一基於小波轉換的多尺度融合模型，以應對水下色偏問題。此模型將影像分解為不同頻率帶，在低頻帶進行色彩校正與對比強化，在高頻帶則進行細節強化處理<sup>[18]</sup>。針對極深水域場景，UieAnything 採用零樣本增強 (zero-shot enhancement) 策略，結合深度估測與物理光傳輸模型，有效實現水中不同密度下的色彩一致性<sup>[19]</sup>。

### 3.1.2 降雜訊與去模糊

水下影像常受到散射與逆散射所造成的雜訊干擾，同時因懸浮粒子與 ROV 移動導致影像呈現模糊情況。

A 傳統濾波方法：混合濾波策略結合中值濾波與非局部均值 (NL-Means) 方法，在處理混濁水域中物件的邊緣保留效果顯著<sup>[6]</sup>。此外，改良後總變差 (Total Variation, TV) 模型亦被用來修補影像空洞，並有效減少水下場景中動態干擾與雜訊<sup>[2]</sup>。

B 深度學習方法：YOLOv5s 架構引入 Ghost 卷積模組，透過學習空間濾波器，有效降低高頻雜訊達 18%，同時維持目標偵測精度<sup>[16]</sup>。WaterNeRF 則運用神經輻射場 (Neural Radiance Fields) 模擬光與粒子間互動，於 SLAM 任務中可將動態模糊現象減少 32%，優於傳統光流法<sup>[12]</sup>。人工水下數據集提供帶有光學濾鏡所拍攝之配對影像，支援 GAN 架構之去雜訊器訓練，進一步實現從合成資料轉移至實際應用的能力<sup>[9]</sup>。另一方法則導入語意先驗與對抗式學習，以場景理解輔助去模糊程序，有效處理水混濁與移動導致的模糊問題<sup>[14]</sup>。

### 3.1.3 對比度與清晰度增強

水下影像普遍存在對比度低與銳利度不足等問題，嚴重影響細節辨識與目標偵測效果。

- A 基於直方圖方法：自適應直方圖調整方法依然為對比增強的核心技術，其中限制對比度自適應直方圖均衡化(CLAHE)透過動態調整區塊大小與限幅參數，以回應區域紋理複雜度，展現卓越的增強效果<sup>[2,16]</sup>。
- B 進階增強技術：近期銳利度增強的發展聚焦於高頻訊號的重建與融合。文獻<sup>[17]</sup>所提出的金字塔融合框架結合拉普拉斯金字塔分解與自適應增益控制，可回復珊瑚礁監測影像中微米級的紋理細節。針對即時處理需求，YOLOv5 架構中導入之輕量級注意力模組 EMA (Efficient Multi-Scale Attention)，可有效優化特徵重組過程<sup>[16]</sup>。

## 3.2 ROV 影像擷取方法與感測器技術

ROV 因其安全性、高效率且可於水中長時間工作，而成為水下作業重要工具，本研究蒐集歷年文獻探討 ROV 常用影像擷取方法及可搭載之感測器，相關說明如下。

### 3.2.1 影像擷取方法與感測器種類

近年來，ROV 與 AUV (自主式水下載具) 廣泛採用高解析度數位相機進行影像擷取，包括 DSLR、工業級 CMOS/CCD 相機等，並強調專業攝影技術與科學應用的結合<sup>[4][11]</sup>。在相機系統的配置上，多鏡頭陣列如 6 鏡頭 Speedy Sea Scanner 可大幅提升覆蓋範圍與三維建模精度，而單鏡頭系統則常見於小型 ROV 應用<sup>[3][4]</sup>。

為提升定位與感知能力，ROV 常結合多種感測器進行感測器融合，包括光學感測器 (高解析度相機)<sup>[20]</sup>、多波束聲納 (multi-beam sonar)<sup>[15]</sup>、壓力感測器 (深度計)<sup>[20][15][13]</sup>、慣性測量單元 (IMU)<sup>[13]</sup>，以及水下聲學定位系統 (如 USB-LBL 等)<sup>[20]</sup>。近期研究也強調光學、聲學、壓力等多模態感測器融合，可顯著提升定位與目標檢測的準確性<sup>[20]</sup>。

### 3.2.2 相機解析度對影像品質之影響

在解析度與品質關聯方面，研究顯示影像解析度下降將直接影響品質評估準確度及細節辨識能力。解析度對檢測與重建精度具有重要影響，高解析度影像 (如 1.5 mm/pixel) 能顯著提升三維建模與物件分割精度，對於珊瑚覆蓋率估算、海床結構重建等應用尤為重要<sup>[3][4]</sup>。若解析度不足，將影響目標邊界判斷與小型物體檢測，進而降低深度學習模型的檢測準確率<sup>[16]</sup>。

在像素精度方面，影像幾何校正、相機陣列幾何設計、嚴謹的誤差建模對於實現高像素精度與可量測性至關重要<sup>[4]</sup>。多鏡頭系統或多視角融合可減少單一鏡頭變形與量測誤差，提升多時序變化檢測的統計顯著性<sup>[4]</sup>。

## 3.3 影像測試資料分析

本研究進行港區碼頭岸壁水下巡查測試，以 ROV 進行岸壁攝影，再將影像進行增強處理，以利對構造物毀損部分進行辨識。

### 3.3.1 處理流程概述

首先將 ROV 拍攝之水下影片進行影像擷取，接著進行影像增強處理以改善其視覺品質。此外，本研究分別採用傳統影像處理與深度學習方法進行影像優化，並對其進行品質評估，以選擇較佳之還原影像，處理流程如圖 8 所示。

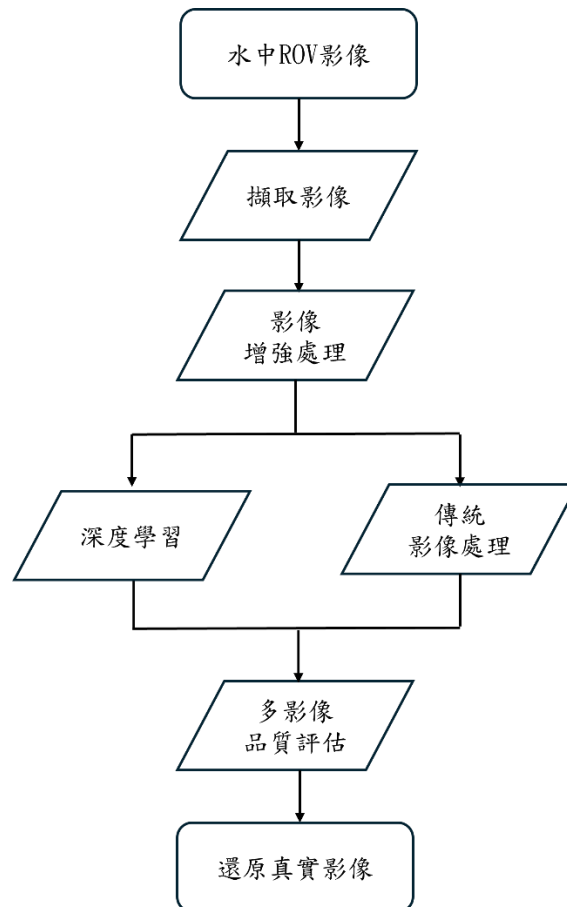


圖 8 影像處理流程圖

### 3.3.2 影像擷取與分類

水下影像分析的首要步驟為擷取具有代表性且品質穩定的原始影像資料。本研究使用 ROV 搭載高解析度攝影機，於北 1 碼頭進行水下岸壁錄影作業，拍攝過程同步使用輔助光源，以減輕環境光不足問題。

為避免處理冗餘資訊並提高計算效率，從原始影片中進行幀擷取處理，設定擷取頻率為每秒 1 幀。此頻率足以捕捉水下環境的動態變化，同時降低重複畫面造成的資料冗餘。經由幀擷取後影像如圖 9 所示。所有影像將統一轉換為固定尺寸與格式，並依照拍攝環境條件進行標記與分組，以利後續影像增強、深度學習處理與品質評估分析。



圖 9 水下影像擷取展示

由於 ROV 在水下作業時經常受到水流擾動、操作角度變化等因素影響，鏡頭可能產生轉向偏移，導致部分擷取影像中缺乏明確物件或辨識目標等情形。若無進行前期篩選，將會降低後續分析效率並影響深度模型訓練品質。因此，本研究針對擷取之影像資料，進一步透過深度學習模型進行初步分類與篩選，以區分是否含有具分析價值之物件，過濾無效影像，提升整體流程效率與資料有效性。

本次建立之影像分類模型，選用 YOLOv11 模型作為主要分類架構(如圖 10 所示)，為區分影像中是否含巡查測試之岸壁構造物物件，分類目標為：「有物件 (Object)」與「無物件 (No Object)」兩類，作為後續處理與分析之依據。YOLO (You Only Look Once) 為一種即時目標檢測演算法，具備高速與高準確率之特性，適合應用於大量水下影像自動分類作業，而 YOLOv11 為該系列之進階版本，可提升模型在低對比與高雜訊影像條件下之辨識能力，尤其適用於水下環境。

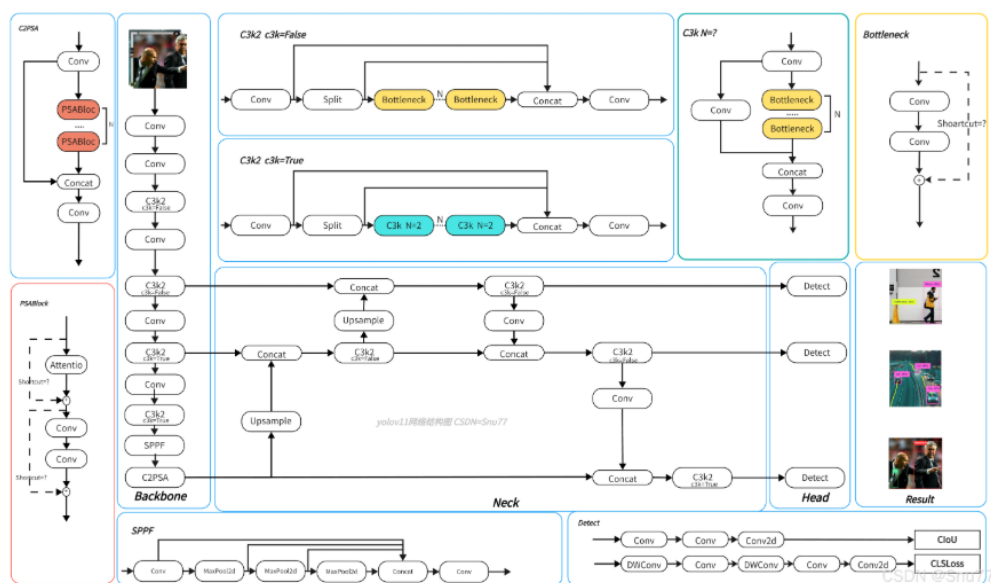


圖 10 YOLOv11 模型架構圖

本次建立之影像分類模型，選用 YOLOv11 模型作為主要分類架構(如圖 10 所示)，為區分影像中是否含巡查測試之岸壁構造物，分類目標為：「有物件(Object)」與「無物件(No Object)」兩類，作為後續處理與分析之依據。YOLO (You Only Look Once) 為一種即時目標檢測演算法，具備高速與高準確率之特性，適合應用於大量水下影像自動分類作業，而 YOLOv11 為該系列之進階版本，可提升模型在低對比與高雜訊影像條件下之辨識能力，尤其適用於水下環境。

### 3.3.3 影像增強處理

完成水下影像擷取與初步分類，保留具分析價值之內容，且針對目前影像增強方法進行說明，再將分類後之影像進行處理，以奠定穩固資料基礎。

- (1) 直方圖均衡化 (Histogram Equalization, HE)：透過重新分配像素強度來提升影像對比度，操作簡單且不依賴影像退化的先驗知識，能有效改善整體對比效果。
- (2) 暗通道先驗去霧 (Dark Channel Prior, DCP)：暗通道先驗基於自然影像的透射率特性，用於估計水下影像中的霧霾成分，並改善模糊問題。
- (3) 對比度受限自適應直方圖均衡化 (CLAHE)：透過將影像分塊並限制局部對比度來增強影像，同時抑制噪聲。
- (4) 多尺度融合技術(MSRRCR)：多尺度融合方法結合影像恢復與增強流程，通常會針對飽和度、對比度等特徵設定加權策略，以保留原始影像的細節與自然感。
- (5) 深度學習影像增強處理(DUIE-Net 及 PUIE-Net)：透過多任務分解與融合策略，有效針對不同類型的影像退化進行處理，提升增強結果的穩定性與整體視覺品質；進一步引入機率推理架構，針對標註不確定性與多樣化增強需求，提供更具彈性的解決方案。

## 3.4 影像品質評估

為客觀評估水下影像增強處理效果，常使用影像品質評估指標，針對影像的色彩真實性與對比度等視覺特徵進行量化，有助於從非主觀角度比較各種影像增強方法之差異。

### 3.4.1 評估指標說明

本研究採用 2 種常見且具代表性之品質評估指標，UICM (Underwater Image Colourfulness Measure) 為圖像清晰度評估指標，目的可量化衡量圖像的視覺清晰程度，以反映影像整體視覺品質；UCIQE (Underwater Color Image Quality Evaluation) 為圖像質量評估指標，綜合 3 項統計特徵(色調分佈標準差、亮度對比度及飽和度平均值)，以線性組合方式進行評估。為客觀比較不同水下影像增強方法之品質表現，本研究以實拍影像為基礎的評估實驗，並結合影像分類結果與上述品質指標進行量化分析。其中選取 2530 張影像，套用多種影像增強方法進行處理，並計

算每種方法在完整資料集上的兩項品質指標。這些指標能分別反映影像的色彩分布、對比與視覺鮮明程度。

### 3.4.2 處理前後影像品質比較

為進一步呈現各影像增強方法在視覺效果與品質評估上的差異，本次隨機挑選 1 組典型影像進行指標量化，評估結果如圖 11、12 所示，對比各方法的影像外觀與對應之 UICM、UCIQE 值。

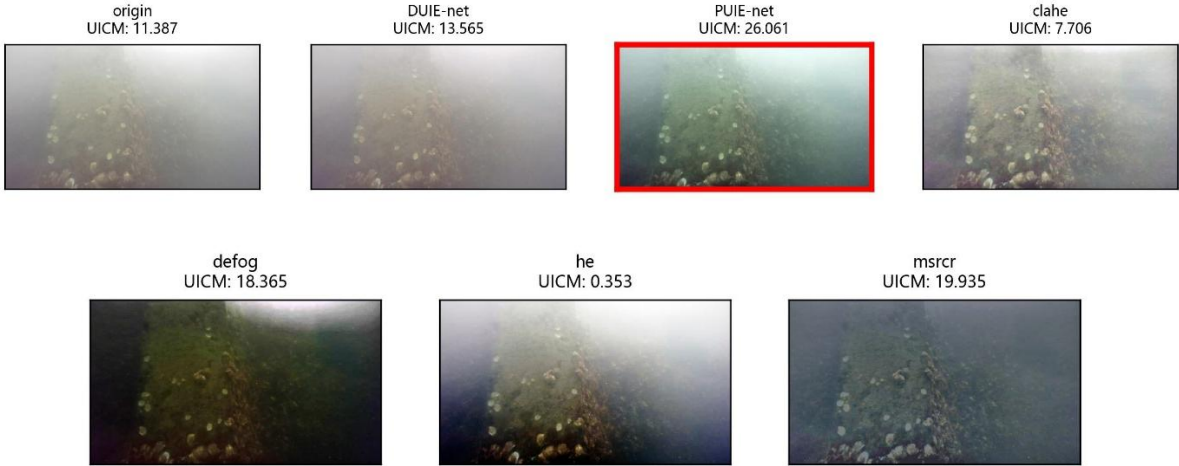


圖 11 UICM 評估指標量化結果



圖 12 UCIQE 評估指標量化結果

本次 2530 張實拍影像評估結果,PUIE-Net 於兩項指標中皆取得良好平衡(UCIQE:50.1249, UICM:25.0462),呈現穩定且自然的影像品質,為整體效果最均衡者。其他方法如直方圖均衡與多尺度融合,則在特定面向上有較好表現。本研究透過結合視覺展示與質量評分,顯示深度學習方法(PUIE-Net)在進行水下影像增強中,具備高度潛力與實用性,能在提升對比同時保留足夠的色彩資訊,優化良好的視覺品質。圖 13 為 ROV 拍攝之水下影像經各種增強方法處理後,針對劣化部分進行辨識,其中 PUIE-Net 處理結果,在視覺上可更清楚呈現劣化程度。

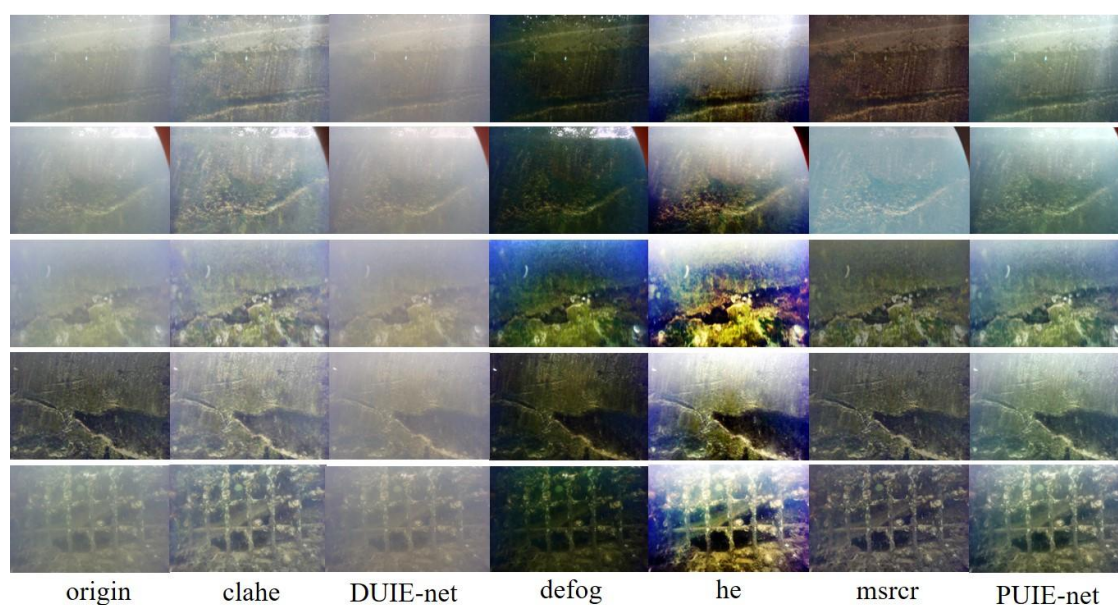


圖 13 岸壁構造物劣化呈現

各類評估指標量化標準不同,且無參考現場景象,較適用於單純的水下場景,故無法全面反映人眼對影像品質的主觀感受,另各影像增強方法對影像的處理傾向不同,部分演算法雖能有效提升指標分數,但常伴隨不自然的亮度與對比,導致色偏嚴重,而部分處理方法雖評估指標分數較低,卻能提供更平衡的視覺觀感,使用者可依其目的需求,選擇合適的評估指標。

#### 四、結論與建議

1. 本次以 ROV 進行港區碼頭岸壁水下巡查測試,儀器沿著原設定之路徑拍攝影像,過程受海象條件影響無法精確定位,且儀器有時會漂離設定路徑,但拍攝之影像經後續處理後,其精度已可辨識構造物劣化情形,未來若可解決 ROV 水下定位問題,則可取代潛水員水下巡查作業。
2. 本研究以 ROV 拍攝之影片進行影像擷取及增強處理後,可清楚辨識構造物劣化現象,惟 ROV 因水下雜訊干擾無法正確定位,設施之劣化尺寸未能比對計算,後續可嘗試從影像中挑選確定實際尺寸之物件,以此推算劣化程度。

3. 本研究透過客觀指標 (UCIM 與 UCIQE) 對不同影像增強方法進行評估, 並結合大量實務資料進行實驗計算, 具備一定之代表性與有效性, 傳統方法如直方圖均衡化 (HE) 在對比增強方面效果明顯, 卻可能導致色彩嚴重失真; 而深度學習方法 PUIE-Net 則在 2 項指標上均取得穩定且優異的表現, 顯示其具備兼顧亮度與色彩自然度的增強潛力。但這些指標仍無法全面反映人眼對影像品質之主觀感受, 由於水下環境中難以取得對應的「真值影像」(即無失真、無散射、無色偏的理想畫面), 本研究僅能依賴無參考指標 (UCIM、UCIQE) 進行評估, 無法使用具體之全參考品質指標 (如 PSNR、SSIM、FSIM 等) 量化各方法的真實還原度。若欲進行更精確的量化分析, 需同時取得失真影像與其對應之真值影像 (Degraded - Reference Pair), 以便比較不同方法對細節與色彩的恢復程度。其次, 影像應包含具已知尺寸或幾何特徵的真值物件, 作為量化參考基準, 使得影像中可推算實際比例與空間精度。此外, 影像解析度亦必須足夠, 以保留細部紋理與邊界資訊, 避免因像素不足造成量測誤差或真值比對失準。
4. 綜整以上資料蒐集及測試分析, 碼頭岸壁水下檢測評估, 可先以多音速測深儀進行快速且大範圍檢測, 惟受限其精度, 僅大範圍之劣化現象可藉由點雲資料判斷; 劣化較小部分, 則可採用 ROV 進行輔助測量。
5. 未來研究可朝向將 ROV 拍攝之影像結合 AI 自動辨識技術, 即可自動偵測結構物劣化情形, 提供港區即時判斷之依據。

## 參考文獻

1. Li, C., Guo, J., Wang, B., Cong, R., Zhang, Y., & Wang, J. (2016). Single underwater image enhancement based on color cast removal and visibility restoration. *Journal of Electronic Imaging*, 25(3), 33012.
2. Cai, C., Zhang, Y., & Liu, T. (2019, June). Underwater image processing system for image enhancement and restoration. In 2019 IEEE 11th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), 381-387.
3. Mizuno, K., Terayama, K., Tabeta, S., Sakamoto, S., Matsumoto, Y., Sugimoto, Y., ... & Kawakubo, A. (2019). Development of an efficient coral-coverage estimation method using a towed optical camera array system [Speedy Sea Scanner (SSS)] and deep-learning-based segmentation: a sea trial at the Kujuku-Shima islands. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(4), 1386-1395.
4. Nocerino, E., Menna, F., Gruen, A., Troyer, M., Capra, A., Castagnetti, C., ... & Holbrook, S. J. (2020). Coral reef monitoring by scuba divers using underwater photogrammetry and geodetic surveying. *Remote Sensing*, 12(18), 3036.
5. Song, W., Wang, Y., Huang, D., Liotta, A., & Perra, C. (2020). Enhancement of underwater images with statistical model of background light and optimization of transmission map. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 66(1), 153-169.
6. Chen, X., Zhang, P., Quan, L., Yi, C., & Lu, C. (2021). Underwater image enhancement based on

- deep learning and image formation model. arXiv preprint arXiv:2101.00991.
7. Mishra, A. K., Choudhry, M. S., & Kumar, M. (2022, December). Underwater image restoration using white balance and retinex algorithm. In 2022 IEEE Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI) , 1-5.
  8. Xiao, Z., Han, Y., Rahardja, S., & Ma, Y. (2022). Usln: A statistically guided lightweight network for underwater image enhancement via dual-statistic white balance and multi-color space stretch. arXiv preprint arXiv:2209.02221.
  9. Xu, H., Long, X., Yu, Y., & Zhu, D. (2022). Toward underwater image enhancement: new dataset and white balance priors-based fusion network. *Journal of Electronic Imaging*, 31(6), 063017.
  10. Jiang, X., Yu, H., Zhang, Y., Pan, M., Li, Z., Liu, J., & Lv, S. (2023). An underwater image enhancement method for a preprocessing framework based on generative adversarial network. *Sensors*, 23(13), 5774.
  11. Monterroso Muñoz, A., Moron-Fernández, M. J., Cascado-Caballero, D., Diaz-del-Rio, F., & Real, P. (2023). Autonomous underwater vehicles: Identifying critical issues and future perspectives in image acquisition. *Sensors*, 23(10), 4986.
  12. Sethuraman, A. V., Ramanagopal, M. S., & Skinner, K. A. (2023, September). Waternerf: Neural radiance fields for underwater scenes. In *OCEANS 2023-MTS/IEEE US Gulf Coast* (pp. 1-7). IEEE.
  13. Alinei-Poiană, T., Rețe, D., Martinovici, D., Maer, V. M., & Bușoni, L. (2024). A BlueROV2-based platform for underwater mapping experiments. *IFAC-PapersOnLine*, 58(20), 470-475.
  14. Ghosh, T. (2024). Separated Attention: An Improved Cycle GAN Based Under Water Image Enhancement Method. arXiv preprint arXiv:2404.07649.
  15. Lennox, B., & Groves, K. (2024). Collaborative Aquatic Positioning System Utilising Multi-beam Sonar and Depth Sensors. arXiv preprint arXiv:2403.10397.
  16. Mi, Y., Chi, M., Zhang, Q., & Liu, P. (2024). Research on multi-scale fusion image enhancement and improved YOLOv5s lightweight ROV underwater target detection method. *Scientific Reports*, 14(1), 28280.
  17. Fan, Y. N., Wu, G. K., Han, J. Z., Zhang, B. P., & Xu, J. (2025). Innovative underwater image enhancement algorithm: Combined application of adaptive white balance color compensation and pyramid image fusion to submarine algal microscopy. *Image and Vision Computing*, 156, 105466.
  18. Kishan Babu, K., Tabassum, A., Navaneeth, B., Jahnavi, T., & Akshaya, Y. (2025). Underwater image enhancement using generative adversarial networks: a survey. *International Journal of Computers and Applications*, 47(4), 356-372.
  19. Shao, J., Zhang, H., & Miao, J. (2025). Uieanything: zero-shot underwater image enhancement via advanced depth estimation, white balance models, and improved sea-thru. *Pattern Analysis and Applications*, 28(2), 1-25.
  20. Yang, M., Sha, Z., & Zhang, F. (2025). Learning-Based Leader Localization for Underwater Vehicles With Optical-Acoustic-Pressure Sensor Fusion. arXiv preprint arXiv:2502.20817.
  21. 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。