

應用 K-means 分群法於公路越波影像判釋- 以人定勝天路段為例

陳鈞彥¹ 林雅雯² 吳漢倫³ 陳彥龍³

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研究員兼科長

³國立成功大學水利及海洋工程學系博士後研究員

摘要

為減少海岸公路因浪襲造成的災害，交通部運輸研究所於台 11 線人定勝天路段設置光學及熱成像攝影機，蒐集道路海岸影像資料，本研究應用非學習型之 K-means 分群法分析溯升與越波情況，發展影像判釋越波技術，經分析不同天氣情境，影像判釋越波技術能夠正確判釋水線位置以及波浪造成的越波和溯升情況。

一、研究目的

颱風長浪對臺灣東部海岸衝擊影響重大，而海岸公路為東部重要交通幹道，當受到颱風長浪侵襲時，除對用路人行車安全造成威脅外，更讓管理單位現場人員在有災害風險情況下執行管制措施，交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)民國 106 至 110 年已分別建置臺東及花蓮海岸公路浪襲預警系統，提供浪襲預警資訊，惟越波與浪襲仍無現場觀測數據或影像等直接資訊進行驗證。近年因影像判釋技術已趨成熟且獲廣泛應用，亦有相關研究透過影像判釋技術，進行異常波、沿岸流、溯升、地形變遷等觀測，爰此，本研究於花蓮縣豐濱鄉台 11 線人定勝天路段架設網路攝影機，應用非學習型之 K-means 分群法為核心，發展影像判釋越波技術，並與人為判釋及溯升計感測資料驗證。

二、研究方法

本研究於花蓮縣豐濱鄉台 11 線人定勝天路段架設光學及熱成像攝影機，蒐集公路海岸影像，並於道路海岸(下邊坡)消波塊處選定 3 處斷面，設置波浪溯升計，溯升計採接觸式量測，可在颱風事件或顯著越波事件發生時持續進行量測，不受雨滴或夜間能見度低的影響，做為影像判釋成果的驗證，人定勝天路段海堤斷面現況及本研究設置攝影機、波浪溯升計，如圖 1、圖 2 所示，圖 2 中數字為設置 7 個波浪溯升計之編號，由北往南，各斷面由高往低依序編號為 501 至 507。



圖 1 台 11 線人定勝天路段海岸斷面現況



圖 2 台 11 線人定勝天路段溯升計設置圖

2.1 光學影像判釋方法

本研究對公路海岸影像資料，進行分析、統計及處理，研發自動判釋海岸線的技術，判釋流程依序為預處理、第一次影像判釋，以及第二次影像判釋等 3 個階段(如圖 3)，預處理階段以濾波器去除影像雜訊及增進同性質區塊之色彩均勻度，第一次影像判釋將預處理後的影像選擇感興趣區域，使用 K-means 分群法進行影像分割以決定水體分群，經二值化及後處理判釋水線位置，第二次影像判釋階段將第一次影像判釋之海岸線，於影像中涵蓋的範圍進一步劃分子區域後，重複第一次影像判釋之流程，判釋得到更精確之水線位置，但並非所有影像皆會進入第二次影像判釋，流程中各階段影像處理方法說明如後。

2.1.1 預處理

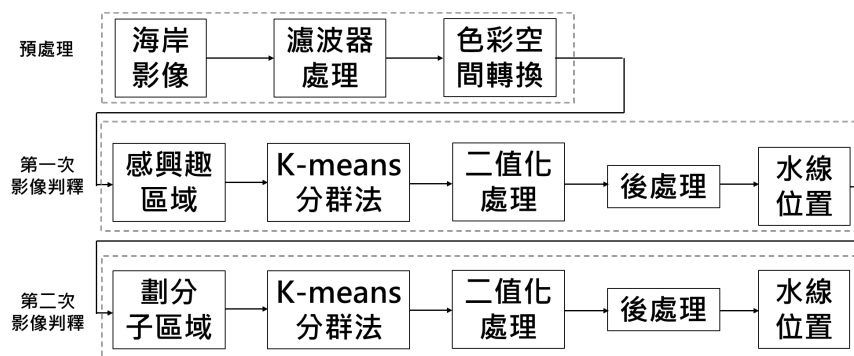


圖 3 越波影像判釋流程圖

在數位影像的擷取和傳輸過程中，存在著各種因素可能導致影像中出現不規則的錯誤資訊，又稱雜訊，例如，感光元件噪點、環境光源變化、壓縮損失或攝影設備電路異常等，這些雜訊對於影像處理及分析造成影響，為了解決此問題，須先改善影像品質，使影像更適合後續分析，此改善影像品質的過程即為影像預處理，本研究影像預處理採用包含高斯濾波器 (Gaussian filter)、非等向性擴散濾波器 (anisotropic diffusion filter) 及色彩空間轉換 (color space transformation)。

濾波器(亦稱遮罩)，在影像處理領域中常用於消除或降低影像中的雜訊，其主要原理是透過特定的數學運算修改影像中的像素值，不同的濾波器具有不同的特性與其獨特的運算規則。一般而言，濾波器是一個具有權重、且邊長為奇數的方形矩陣，其主要概念係將濾波器覆蓋到指定影像的每個像素上進行計算，隨著濾波器覆蓋的中心點，將所覆蓋影像中的每一個像素由左至右、由上至下依序移動計算，計算所得結果將會取代當下濾波器中心點對應的像素值，當處理位於影像邊界的像素，部分濾波器會超出影像範圍，則將影像邊界進行鏡射處理，濾波器運算規則及鏡射處理，如圖 4 所示。

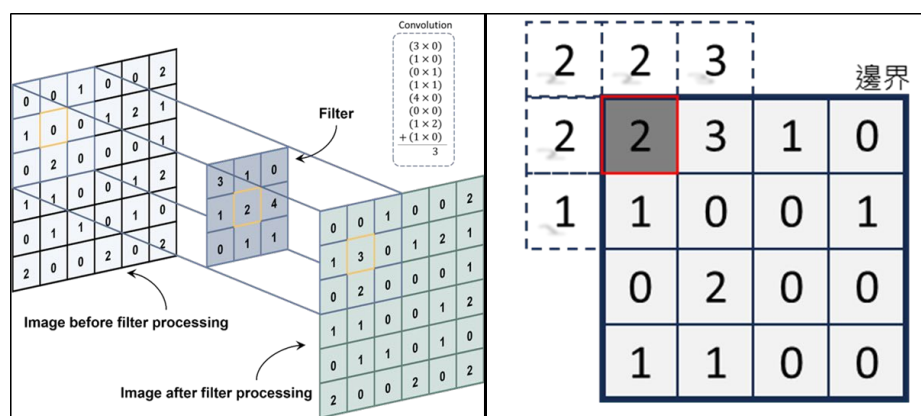


圖 4 濾波器運算規則(左)、影像邊界鏡射示意(右)

首先用高斯濾波器進行雜訊處理，屬低通濾波器(low pass filter)，可有效濾除影像中的高頻像素值，同時減少低頻像素值的干擾，與均值濾波器(mean filter)將濾波器的權重設為定值不同，高斯濾波器之權重將隨著與濾波器中心點的距離增加而減少，因其考量到周圍像素值對中心點像素值的影響，可有效降低雜訊並保留大部分的邊緣特徵。本研究高斯濾波器邊長設為 3 且標準差設為 0.5，權重值如圖 5 所示。原始影像在經過高斯濾波後像素值會有些許改變，但不明顯，為了發現較為明顯的差異，須檢視最終的水線判釋結果，經高斯濾波前後差異如圖 6 為例，波浪溯升較高時，高斯濾波後影像之水線較靠近公路，判釋結果較為保守。

0.0113	0.0838	0.0113
0.0838	0.6193	0.0838
0.0113	0.0838	0.0113

圖 5 高斯濾波器



圖 6 使用高斯濾波器前、後之水線判釋結果

高斯濾波器雖能降低影像中的高頻雜訊，但會將海岸線等邊緣特徵模糊化，且僅憑高斯濾波器還不足以於影像分割階段得到良好的分群結果，參考 Paravolidakis et al.(2018)對空拍影像的預處理過程，利用 Perona and Malik (1990)提出的非等向性擴散濾波器，處理經高斯濾波器之影像，非等向性擴散濾波器能強化海岸線等主要邊緣，同時抑制水體和其他區塊內的弱邊緣及雜訊，使相同區塊內的色彩均勻度提高，此特性有利於影像分割作業，經非等向性擴散濾波前後之影像差異如圖 7 所示。



圖 7 使用非等向擴散濾波器前、後之影像

經非等向性擴散濾波後之影像，進行色彩空間轉換，本研究將影像原始 sRGB 色彩空間轉換至 $L^*a^*b^*$ 色彩空間，國際照明委員會(International Commission on Illumination, CIE) 於 1976 年建立 $L^*a^*b^*$ 色彩空間，3 分量分別為代表光線明亮程度的 L^* (lightness)，及 1 組代表色彩的 a^* 與 b^* ， L^* 的值域為[0, 100]，數值越大代表亮度越亮、 a^* 與 b^* 的值域皆為[-128, 127]， a^* 由小到大的為綠色至紅色， b^* 則為藍色至黃色。此色彩空間與 sRGB 色彩空間最大的不同在於，sRGB 色彩空間記錄的數值包含了亮度資訊及色彩資訊， $L^*a^*b^*$ 色彩空間則將亮度資訊儲存在 L^* 分量，色彩資訊儲存在 a^* 及 b^* 分量，且 $L^*a^*b^*$ 色彩空間的設計是為了達成感知均勻性(perceptually uniformity)，意思是若任意兩組於人眼感知上具有相同色差的色彩，於 $L^*a^*b^*$ 色彩空間中將具有相同的直線距離，於 sRGB 色彩空間中將會不相等，這些特性利於後續的影像分割，為將 sRGB 色彩空間轉至 $L^*a^*b^*$ 色彩空間，需藉由不同的轉換函數，轉換流程如圖 8 所示。其中，將 sRGB 色彩空間轉換至線性光 RGB 色彩空間的轉換函數如(1)式：

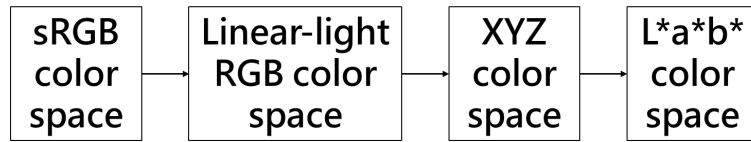


圖 8 色彩空間轉換流程圖

$$T = \begin{cases} \frac{1}{12.92} V_{sRGB} & \text{if } 0 \leq V_{sRGB} \leq 0.0031308 \\ \left(\frac{V_{sRGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} & \text{if } V_{sRGB} \geq 0.0031308 \end{cases} \quad (1)$$

(1)式中， T 為三刺激值，此處代表線性之 RGB，值域為[0, 1]、 V_{sRGB} 則代表影像編碼值，值域亦為[0, 1]，線性光 RGB 色彩空間與 XYZ 色彩空間之轉換函數如(2)式：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

XYZ 色彩空間與 $L^*a^*b^*$ 色彩空間之轉換函數如(3)至(7)式：

$$L^* = \begin{cases} \left(\left(\frac{116}{12} \right)^3 \frac{Y}{Y_N} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{if } \frac{Y}{Y_N} \leq \left(\frac{24}{116} \right)^3 \\ 116 \left(\frac{Y}{Y_N} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{if } \left(\frac{24}{116} \right)^3 < \frac{Y}{Y_N} \end{cases} \quad (3)$$

$$a^* = \frac{125}{29} \left[L^* \left(\frac{X}{X_N} \right) - L^* \left(\frac{Y}{Y_N} \right) \right] \quad (4)$$

$$b^* = \frac{50}{29} \left[L^* \left(\frac{Y}{Y_N} \right) - L^* \left(\frac{Z}{Z_N} \right) \right] \quad (5)$$

$$X = \frac{x}{y} Y \quad (6)$$

$$Z = \frac{1-x-y}{y} Y \quad (7)$$

其中 x 、 y 為投影像素座標， X 、 Y 、 Z 為對應於紅色、綠色和藍色之刺激值， X_N 、 Y_N 及 Z_N 是白點於 XYZ 色彩空間的數值，下標 N 表示正規化，藉由 sRGB 色彩空間定義的白點並由(6)式及(7)式可得出 X_N 為 0.9505、 Y_N 為 1.000、 Z_N 為 1.0888。

2.1.2 第一次影像判釋

經預處理後的影像，於第一次影像判釋階段中，將本研究所關注易受越波、浪襲影響通行安全的道路海岸區域劃為「感興趣區域」，此步驟排除不需分析之區域，有助於程式運作效率，如圖 9 所示。



圖 9 感興趣區域於影像中之相對位置(黃框處)

將感興趣區域使用 K-means 分群法依照色彩特徵將此區域分為數個分群，K-means 分群法 (Lloyd, 1982) 為機器學習中非監督式學習的一種，依據空間中資料間的距離大小，將整個資料集劃分為 K 個分群，根據指定之 K 值，能自動識別資料中隱藏的特徵及相似度並分類，達到群集間相似度(inter-cluster similarity)低且群集內相似度(intra-cluster similarity)高的特性，即群集內資料與其群心的組內平方和(Within-Cluster Sum of Squares)達到最小，K-means 分群法普遍用於解決分群問題，其算法簡單、收斂速度快，且能有效處理龐大資料，應用領域廣泛。

首先由人為設定的 K 值並隨機選 K 個點做為群心，計算所有資料對 K 個群心距離，並將這些資料分配給最近的群心，形成 K 個分群，再針對 K 個分群重新計算群心(座標分量之平均值)，做為新的群心，若新群心與舊群心的距離差距過大，則重複分群步驟，直到距離低於設定的門檻值或超過指定的迭代次數，即為完成分群，其步驟如(8)至(13)式，當有一組數量為 n 且維度為 d 的資料如(8)式：

$$x_i \in R^d, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

將此資料集分為 K 群 $\{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ ，使用(9)式計算分群內資料與群心的距離平方和，使其盡可能小：

$$\arg \min_{\mu} \sum_{c=1}^K \sum_{i=1}^{n_c} \|x_i - \mu_c\|^2 \Big|_{x_i \in S_c} \quad (9)$$

其中， μ_c 為群心位置， $\|x_i - \mu_c\|$ 為距離，演算法先隨機設定 K 個群心，如(10)式，之後計算分群到每一群體的樣本，如(11)式， (t) 為第 t 次運算、 μ_{c*} 為其他群心位置、 n_c 為群心數量：

$$\mu_c^{(0)} \in R^d, c = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

$$S_c^{(t)} = x_i: \|x_i - \mu_c^{(t)}\| \leq \|x_i - \mu_{c*}^{(t)}\|, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

更新群心位置 μ_c^{t+1} ，如(12)式：

$$\mu_c^{t+1} = \frac{\text{sum}(S_c^{(t)})}{n_c} = \sum_{i=1}^{n_c} x_i \Big|_{x_i \in S_c^{(t)}} \quad (12)$$

重複(11)、(12)式至群心位置 μ_c 收斂：

$$S_c^{(t+1)} = S_c^{(t)}, \forall c = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

群心收斂後輸出(13)式之分群 $S = S_1, S_2, \dots, S_K$ ，分析集中各種不同的 K 值分群結果後，本研究將第一次影像判釋之 K 值設定為 6，分群後結果如圖 10，各顏色及對應編號代表不同分群。

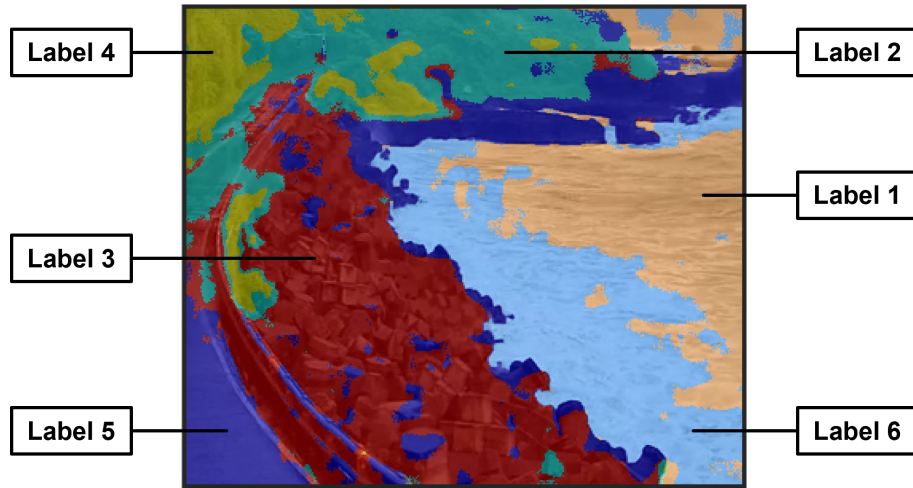


圖 10 感興趣區域之影像分群結果

將感興趣區域影像分割結果，進一步對各分群之群心值(即該分群內所有像素於 $L^*a^*b^*$ 色彩空間各分量平均值)統計分析如圖 11 所示， L^* 分量以水體分群數值較大，並高於整體平均值， a^* 分量數值則接近零，各分群差異小， b^* 分量以水體分群數值則小於零，亦小於整體平均值，因此，本研究以此特性做為判別，決定水體分群，不符合判別式則判定為非水體，判別式如(14)式。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{分群群心 } L^* > 60 \\ \text{or} \\ \text{分群群心 } L^* > \text{感興趣範圍 } \bar{L}^* \text{ and 分群群心 } b^* < \text{感興趣範圍 } \bar{b}^* \end{array} \right. \quad (14)$$

決定水體及非水體分群後進行影像二值化，將水體分群像素值設為白色，非水體分群像素值設為即黑色，二值化影像如圖 12 所示，將二值化影像進行包括形態學運算及區塊填充之後處理步驟，形態學運算利用結構元素以及選定的運算規則對二值影像邊界進行處理，可去除細微的毛邊以呈現平順邊界，且不影響整體結構，本研究設定一 5*5 矩陣，如圖 13(左)所示，進行圖 13(右)之形態學運算後，將大區塊內的小區塊進行填補，使二值化影像上呈現唯一邊界，如圖 12(右)所示，將後處理完後之二值化影像，提取白色區域邊界之影像座標，繪於原始影像上即可得到第一次影像判釋水線位置，如圖 14 中之藍線。

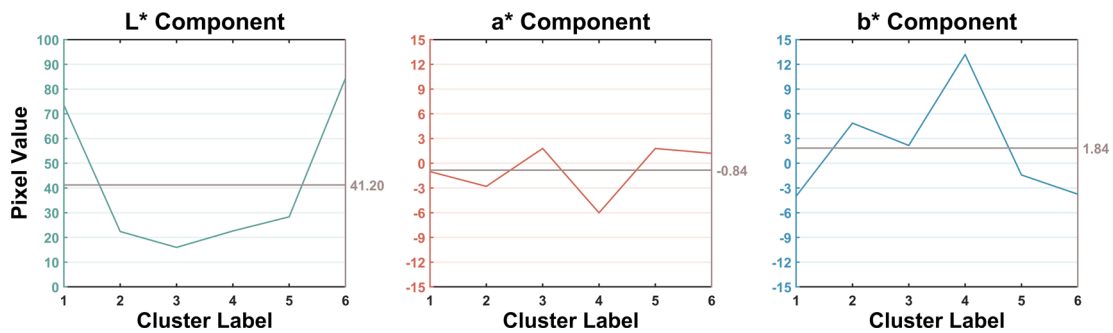


圖 11 分群群心數值統計圖

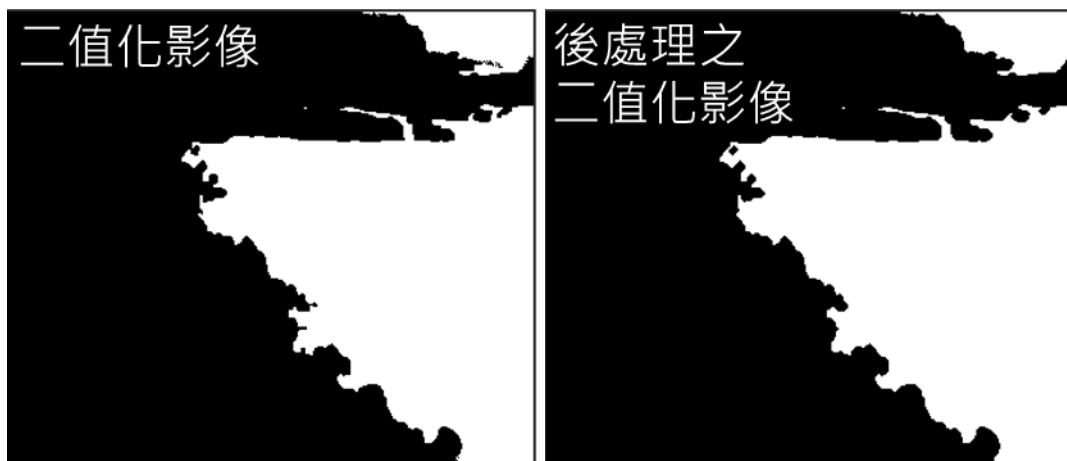


圖 12 二值化影像(左)及後處理之二值化影像(右)

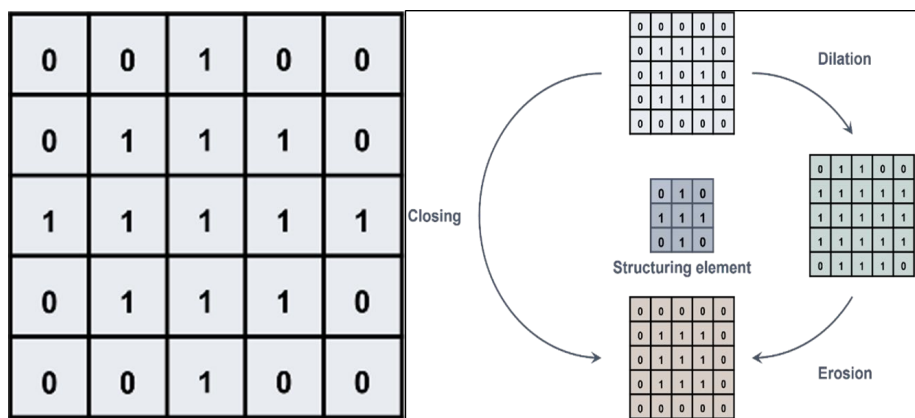


圖 13 形態學運算之結構元素(左)及形態學運算流程(右)圖

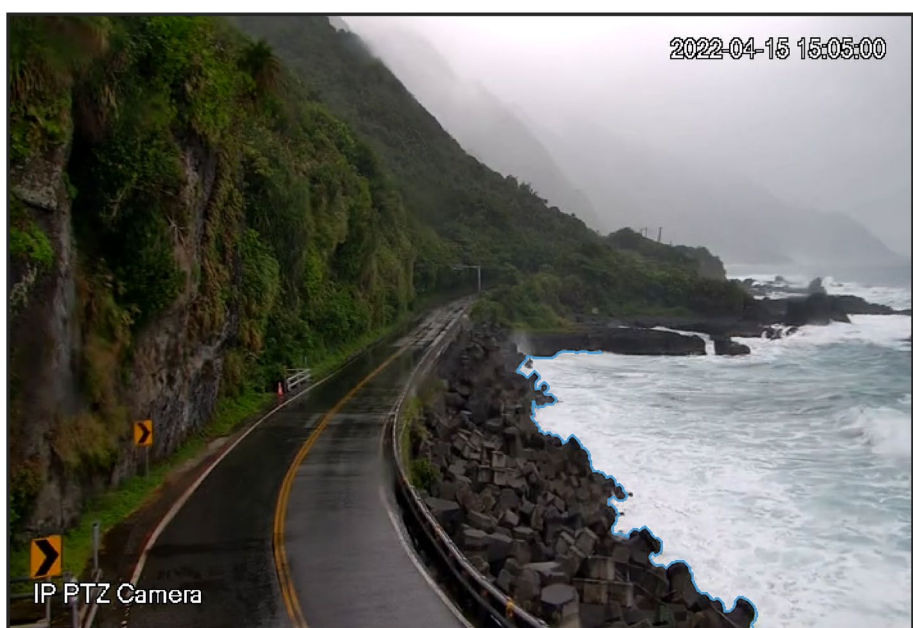


圖 14 第一次影像判釋水線結果

2.1.3 第二次影像判釋

第二次影像辨識主要針對第一次結果之不足進行修正，以圖 15 之陰天情境影像為例，第一次影像判釋之水線有部分明顯偏離實際的水線位置，其原因為靠近消波塊之水體顏色與路面相似，使 K-means 分群法將其歸類為相同分群所致，為了降低此類誤差，本研究以第一次影像分割結果設定參數指標，水體群心之 L^* 分量最大值 ≥ 75 ，或感興趣區域之 L^* 分量平均值 ≥ 45 ，則認定此影像具高對比度，經一次影像判釋即可獲得良好的結果，反之則須進入第二次影像判釋修正判釋結果，第二次影像判釋之步驟包含劃分子區域、K-means 分群法、決定水體分群、二值影像以及後處理，除第一個步驟外，其餘步驟大致與第一次影像判釋之流程相同，本節不再重複敘述。



圖 15 第一次影像判釋水線結果(陰天情境)

影像中靠近消波塊底部之水體因水深較淺，呈現與公路相同之色彩，被認定為同性質區塊，此種情況常見於波浪溯降(run-down)發生時，易使影像判釋誤差，為降低誤差，參考第一次影像判釋結果，縮小影像分析區域，因應不規則海岸線形狀，將涵蓋公路海岸區域劃分為四個子區域，如圖 16 所示，將 4 個子區域分別進行 K-means 分群，以水線須修正之第 2 子區域(順序由上至下)分群結果為例(如圖 17)，可看出 K-means 將第 2 子區域分成 9 群，分群數較第一次影像判釋增加，並可將接近消波塊之水體區隔分群，各分群群心統計圖表明水體群心之 L^* 分量依舊大於非水體，且高於整體平均值， a^* 分量則出現較高的數值，且 b^* 分量有高於零的情況發生，故以前述統計結果修改水體分群判別式，如(15)式，以符合實際結果。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{分群群心 } L^* > 60 \\ \text{or} \\ \text{分群群心 } L^* > 50 \text{ and 分群群心 } a^* < 3 \\ \text{or} \\ \text{分群群心 } L^* > 40 \text{ and 分群群心 } a^* < 3 \text{ and 分群群心 } b^* < 1 \end{array} \right. \quad (15)$$

繼續進行與第一次影像辨識相同步驟，可得第二子區域之二值影像，如圖 18(上)所示，經後處理如圖 18(下)所示，最後再將經後處理所得之 4 個子區域二值影像邊界座標繪製於圖 15 上，得到第二次影像判釋水線位置，如圖 19 所示，與圖 16 比對後可看出，第 2、3 子區域之水線判釋正確率提升，成功減少影像判釋誤差。

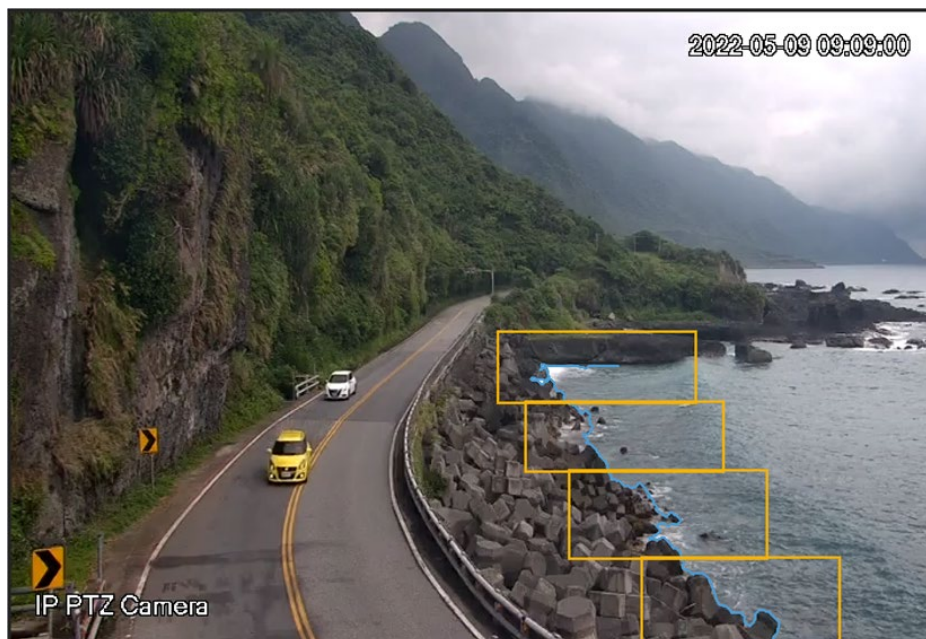


圖 16 第一次影像判釋後劃分子區域

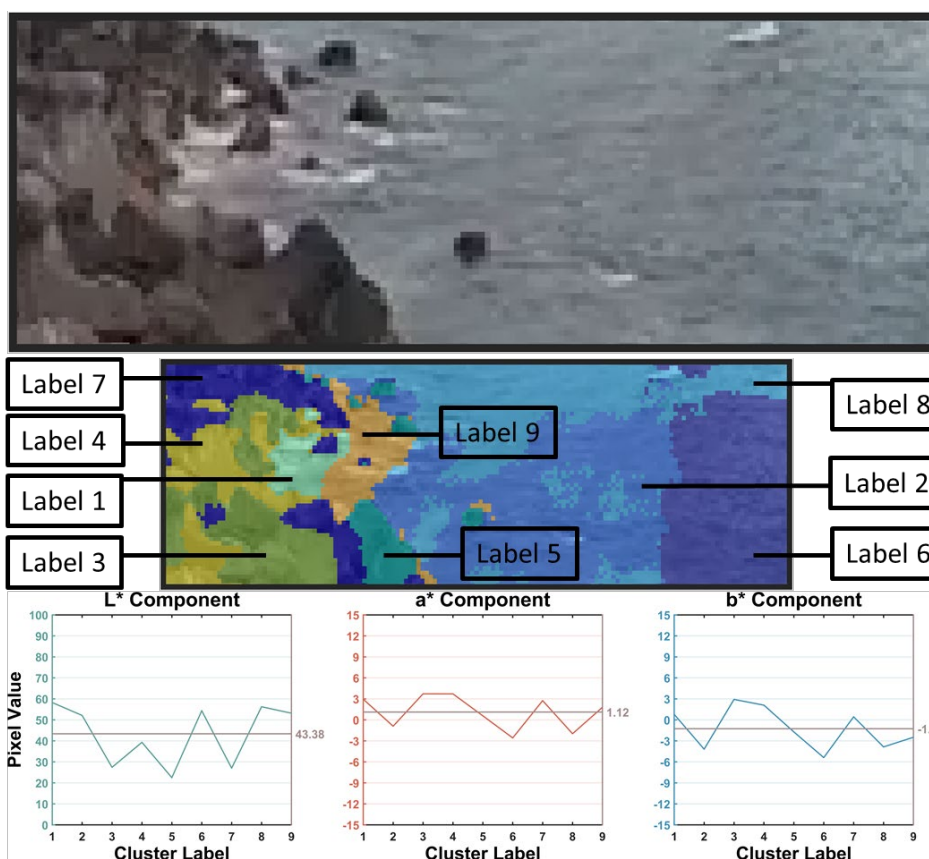


圖 17 第 2 子區域(上)、分群結果(中)及群心數值統計圖(下)

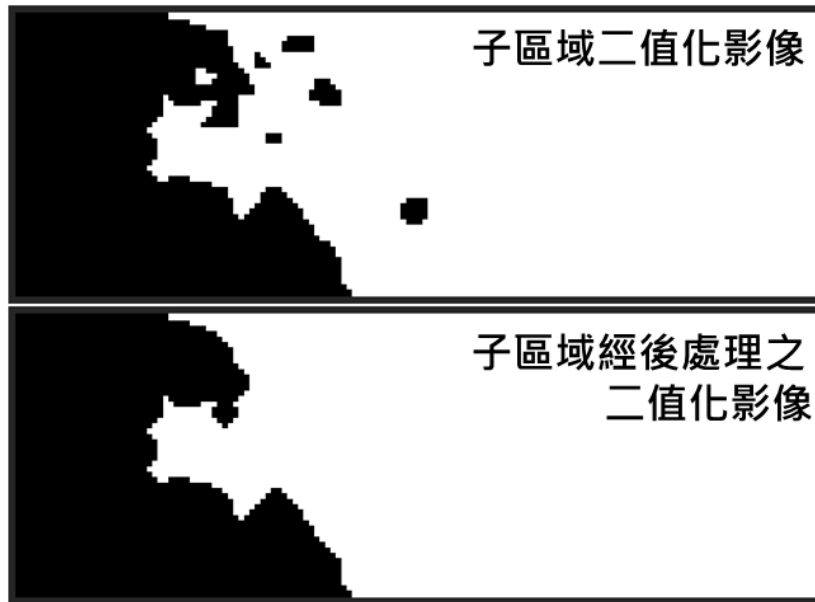


圖 18 第二子區域二值化影像(上)及後處理之二值化影像(下)



圖 19 第二次影像判釋水線結果(陰天情境)

2.2 熱成像影像判釋方法

熱成像因缺乏色彩資訊，在影像分類上屬於灰階影像(gray-scale image)，影像只有亮度資訊(及灰階值)，故處理方式與前述的色彩影像略有不同，判釋流程只經過一次影像判釋階段，提取水體分群原理為利用水體分群於空間上面積較大且緊密連接的特性，與光學影像之水體分群之特性不同。

以圖 20 為例，將熱成像原始影像進行 K-means 分群後，選取紅框內連續面積大於門檻值的分群做為水體分群後，將分群後影像進行二值化及後處理步驟，判釋交界面之影像座標並繪於原始影像上，即可得水線位置之判釋結果。

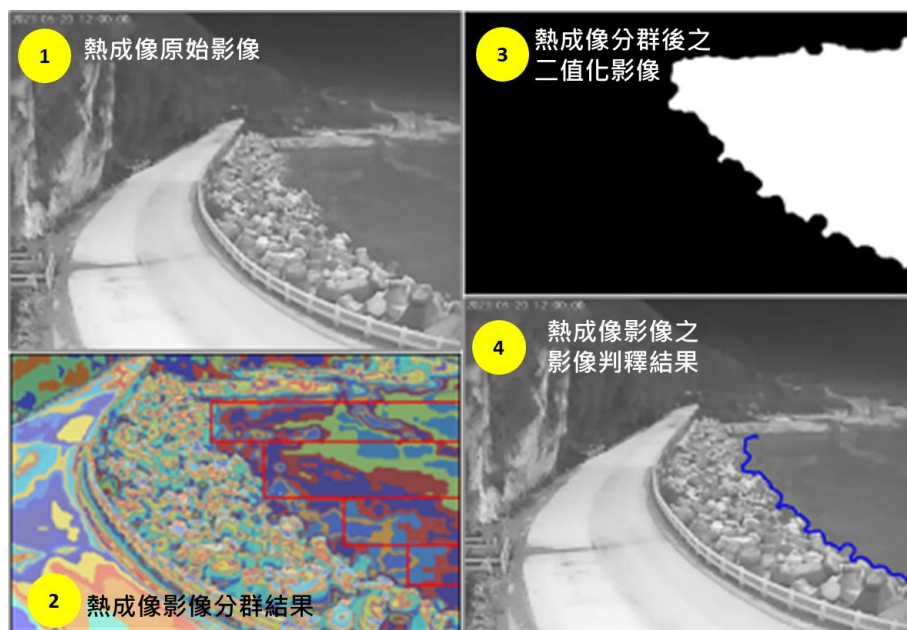


圖 20 熱成像影像之判釋流程及結果

三、結果與討論

根據前述建立之光學及熱成像影像判釋方法，將人定勝天路段之道路海岸影像之水線判釋結果分析驗證，本研究透過「人為判釋」與「溯升計」資料進行檢核，以確認影像判釋技術之可靠性。

3.1 人為判釋驗證

本研究為確認影像判釋所得水線位置之誤差，採用人為水線判釋，人為判釋方式為透過肉眼判斷水線位置，並擷取其影像座標，為瞭解影像分析水線於不同情境下的誤差變化，本節以 4 種天氣情境方式探討影像分析特性，包含無雨(小浪)、下雨(小浪)、無雨(大浪)與下雨(大浪)等 4 種情境，圖 21 至圖 28 分別為 4 種情境之水線誤差分析成果，各情境分析結果分述如下。

於無雨(小浪)情境中(圖 21)，均誤差皆小於 1 個像素(圖 22)，最大誤差大部分小於 10 個像素，誤差來源主要為消波塊後方水體顏色較暗，K-means 分群法歸類為非水體。於下雨(小浪)情境中(圖 23)，受雨滴附著於鏡頭表面之影響，平均誤差及最大誤差(圖 24)皆高於無雨(小浪)情境，且誤差會隨雨勢增大造成雨滴影響範圍增加而增加。於無雨(大浪)情境中(圖 25)，波浪碎波之白色部分與深色消波塊形成明顯對比，利於影像判釋，平均誤差及最大誤差(圖 26)皆低於下雨(小浪)情境，若波浪溯升高度較低時，受到下方(靠近攝影機處)消波塊阻擋產生分群誤差，此誤差可經由後處理填補。於下雨(大浪)情境中(圖 27)，平均誤差(圖 28)略高於無雨(大浪)之情境，此情境之影像判釋水線結果好壞與雨勢大小有關，波浪溯升時，影像中水體範圍覆蓋消波塊，可精準判釋出水線位置。由此 4 種情境分析結果可知，有明顯波浪溯升現象時，水線判釋結果良好，當天氣為下雨時，雨勢大小亦會影響判釋結果，雨勢越大時判釋之水線位置誤差越大。



圖 21 人為與影像判釋水線於無雨(小浪)情境之分析結果

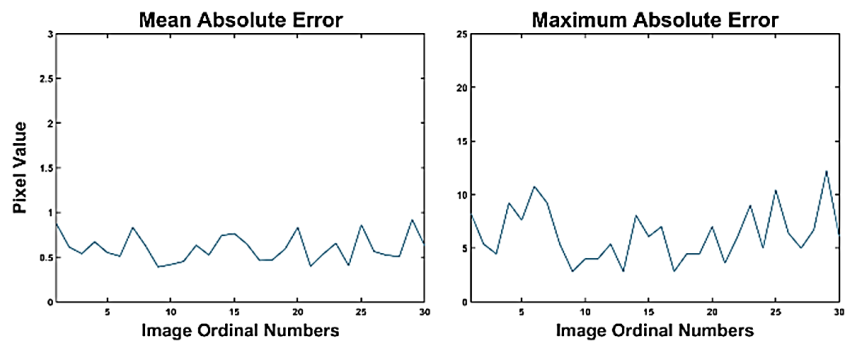


圖 22 無雨(小浪)情境之影像水線判釋之平均及最大誤差圖



圖 23 人為與影像判釋水線於下雨(小浪)情境之分析結果

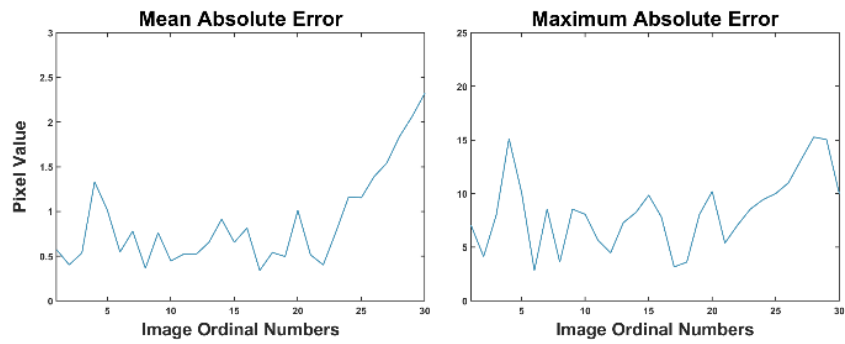


圖 24 下雨(小浪)情境之影像水線判釋之平均及最大誤差圖



圖 25 人為與影像判釋水線於無雨(大浪)情境之分析結果

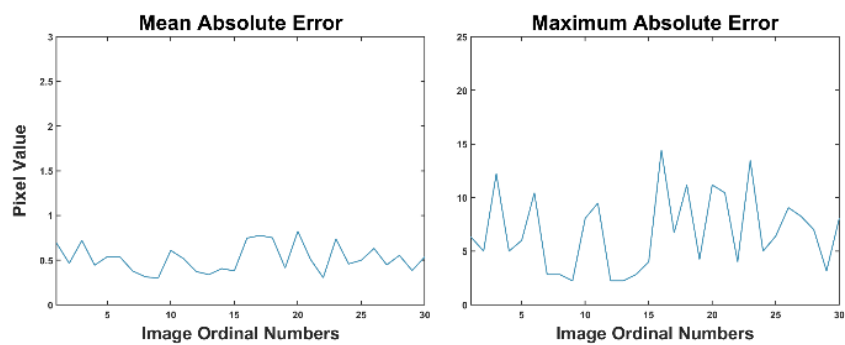


圖 26 無雨(大浪)情境之影像水線判釋之平均及最大誤差圖



圖 27 人為與影像判釋水線於下雨(大浪)情境之分析結果

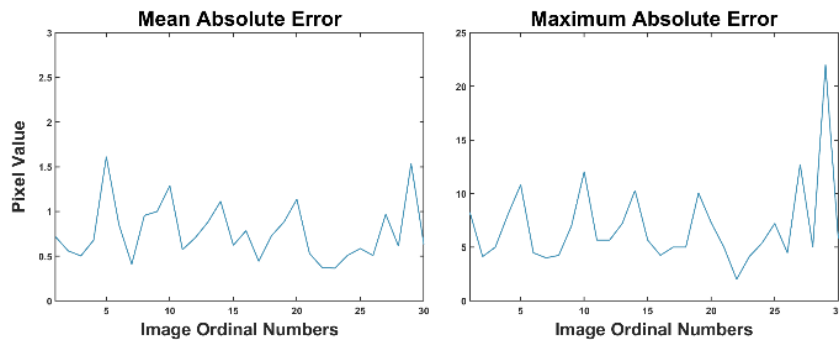


圖 28 下雨(大浪)情境之影像水線判釋之平均及最大誤差圖

3.2 與溯升計比對驗證

為驗證影像判釋結果，本節以波浪溯升計回傳資料，確認同一時段影像判釋之水線進行比對，因一般天氣情境下波浪難以觸碰溯升計，本研究採用 2023 年 9 月的蘇拉颱風期間，颱風雖未登陸臺灣本島，但外圍環流影響有造成人定勝天路段發生越波事件。

編號 501 波浪溯升計於 2023 年 9 月 2 日 6:33 及 19:10 感測到波浪溯升紀錄，分別檢視對應時間點之光學影像及熱成像判釋結果，如圖 29 所示，光學影像及熱成像判釋之水線確實已越過包含溯升計 ID 501，且從影像中推算波浪溯升高程分別為 9.11m 及 7.12m(此處道路路面高程為 8.7m)，皆大於編號 501 溯升計安裝之高程 6.92m，蘇拉颱風驗證結果比對彙整如表 1，進一步檢視光學影像判釋結果，判釋之水線明顯位於水陸交界面，而熱成像影像雖缺乏色彩特徵使人眼較難直接判斷，但位於影像中央處，溫度較低而呈現深色的水體參雜於溫度較高而呈現淺色的路面，可看出發生越波，由此可知此判釋方法可信且具有正確性。

表 1 蘇拉颱風期間波浪溯升計與影像判釋比對表

溯升計紀錄時間	影像判釋所得高程(m)	波浪溯升計感測溯升高程(m)	可信度
2023/09/02 06:33:18	9.11	6.92	可信
2023/09/02 19:10:48	7.12	6.92	可信

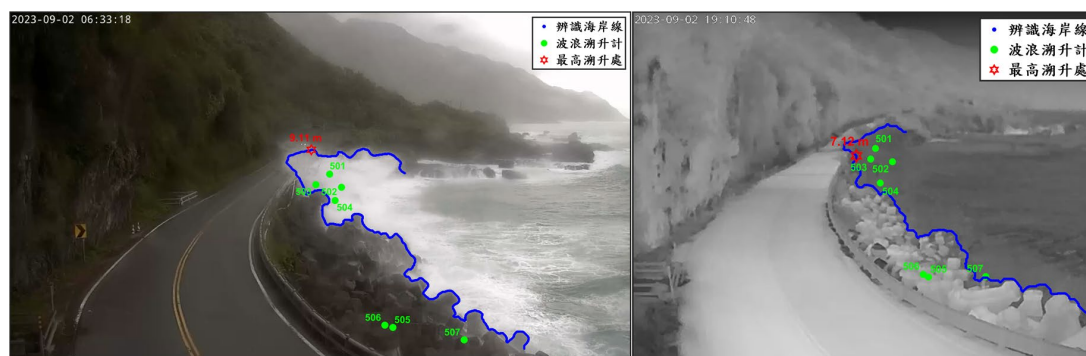


圖 29 光學(左)及熱成像(右)影像之溯升計驗證

四、結論與建議

本研究透過網路攝影機蒐集花蓮縣台 11 線人定勝天路段之日間與夜間海岸影像資料，分別針對光學及夜間影像，以 K-means 分群法為核心，建立影像判釋流程，完成發展影像判釋越波技術，可正確判釋水線位置，並以 4 個不同天氣情境，分別與人為判釋結果及颱風期間之波浪溯升計感測資料驗證判釋結果誤差，平均誤差可於 1.5 個像素以內，最大誤差可於 15 個像素以內，受雨勢影響鏡頭情況下平均誤差在 2.5 個像素以下，最大誤差於 25 個像素以下；以 2023 年 9 月蘇拉颱風期間之波浪溯升計感測資料驗證，在高程 6.92m 之波浪溯升計於 2023 年 9 月 2 日 6:33 及 19:10 感測到波浪溯升紀錄，同時間影像判釋之波浪溯升高程為 9.11m 及 7.12m，與波浪溯升計感測資料相符，此研究成果可提供運研所建立越波(浪襲)自動化影像判釋流程，並整合至「花蓮海岸公路浪襲預警系統」，提供公路越波示警資訊，研究成果可提供公路局東區養護工程分局花蓮工務段，做為浪襲及越波防災、減災之規劃參考應用。

建議持續蒐集影像及判釋結果資料，並持續與波浪溯升計結果比對驗證，以提升日、夜間影像判釋之正確性，未來可結合運研所發展之機器學習溯升模型，應用人定勝天海域之海象預測資料，提供越波(浪襲)預警資訊。

參考文獻

1. 許泰文、廖建明、陳亞嵐、李怡婷(2005)，數值海浪預報之精進及應用，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
2. 國災災害防救科技中心(2019)，「山區洪水偵測方法」(專利發明第 I 650529 號)應用於全台

土石流觀測站之測試。

3. 吳昀達、陳鈞彥、林雅雯、蕭士俊、吳漢倫、陳彥龍(2023)，應用影像智慧化技術判釋海岸公路及防波堤越波研究(1/4)-夜間越波判釋，交通部運輸研究所。
4. 吳昀達、陳鈞彥、林雅雯、蕭士俊、吳漢倫、陳彥龍(2024)，應用影像智慧化技術判釋海岸公路及防波堤越波研究(2/4)-夜間越波判釋，交通部運輸研究所。
5. Molfetta, M., Valentini, N., & Damiani, L. (2014). Coastal Video Monitoring system: results and perspectives. In 1 Workshop sullo stato dell'arte delle ricerche nel Politecnico di Bari—1st Workshop on the state of the art and challenges of research efforts at POLIBA. GANGEMI EDITORE Spa, Bari.
6. Liu, Y., & Wu, C. H. (2019). Lifeguarding Operational Camera Kiosk System (LOCKS) for flash rip warning: Development and application. *Coastal engineering*, 152, 103537.
7. Andriolo, U. (2019). Nearshore wave transformation domains from video imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 186.
8. Maryan, C., Hoque, M. T., Michael, C., Ioup, E., & Abdelguerfi, M. (2019). Machine learning applications in detecting rip channels from images. *Applied Soft Computing*, 78, 84-93.