

立體海況攝影技術研究與開發

蔡政翰¹ 董東環¹ 黃世任¹ 周于洋¹ 白儀芬¹ 楊一中¹ 高家俊² 藤春慈³
 國立台灣海洋大學¹ 國立成功大學² 中央氣象局海象中心³

摘要

本研究開發一套以三台攝影機建構而成的立體海況觀測系統，並開發以極線幾何(Epipolar Geometry)原理和標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)為基礎之程式來進行影像匹配和重建工作，分析影像匹配方法並設計試驗來驗證所獲得之立體影像的正確性。結果證實以三台相機從事影像匹配結果優於兩台相機之結果。平面驗證的結果顯示平面座標的量測誤差約為 0.06cm (0.15%)，除此，本文設計靜態波浪板進行高度驗證，分析結果顯示高度的量測誤差約為 1cm (當待側物體高程 40cm 時)；而此誤差跟系統的高度以及三攝影機之相對距離無關，與系統和待側物之間的距離有關。此系統應用於現場海面觀測時發現不同攝影機因拍攝角度不同造成的光影差，使得影像匹配還有須克服的問題。但使用地面控制點較容易有匹配成功的機會。

關鍵字：極線幾何、影像匹配、標準化互相關法

一、前言

量測波場特性時，通常是在定點設置波高計或資料浮標(Data Buoy)等儀器來進行觀測，這樣的量測結果有很高的準確性。在波場符合均一性(homogeneous)及遍歷性(ergodic)的假設下，可以用這些測點的量測結果代表一個區域的波場特性。然而，如果在地形、地物變化較大的波場附近進行量測，因為該區波場特性已不符合前提假設，如果依舊以這樣的方式進行推演，則會產生較大的誤差。遙測技術(remote sensing technology)是以儀器不接觸水面的方式，對波場的特性進行量測。由於遙測儀器可以簡便地搭載於航空器上或是於岸上裝設，並不需要限定在特定點上設置，所以並不會阻礙漁事工作和船隻航行，也不易受到海浪的侵襲而損害，在儀器的維護方面較為方便。此外提供大範圍的資料擷取，也是其優點之一。在一次的觀測步驟內，同時量測一個區塊內波場的特性，經過計算後所得的波浪資料即具有『面』的意義，也就較具有代表性。最近，國外三維海況影像觀測技術研究興起[5]，本研究在氣象局的支持下，著手進行立體海況攝影研究。研究目的在於根據國外先進理論建立觀測系統，探討觀測準確性與適用條件。完成後，可將國內海象觀測技術由單點數據形式升級為三維立體影像資訊，提升國家整體海象觀測技術。

二、影像匹配理論綜述

本研究以三台攝影機拍攝現地海面之影像，先後完成了攝影機之內部校正以及攝影系統之外部校正[1]。內部校正主要針對因攝影機鏡頭所造成之扭曲進行調校，外部校正為使用立體校正網格板找出各攝影機與目標物之間的相對位置，以上利用線性轉換理論[2]建立相片座標系統與實物座標系統之間的關係，最後進行影像匹配與影像重建等工作。研究內容中，影

像匹配是最重要的關鍵技術之一，利用極線幾何原理和標準化互相關法進行影像匹配。找出三台攝影機從不同角度拍攝同一個物體的影像上同一個目標點，作為立體影像重建的數據，以獲得理想的匹配結果。

2-1 直接線性轉換法(Direct Linear Transformation)

根據直接線性轉換理論[2,3]，利用攝影機的對各軸的旋轉角、焦距(focal length)以及光學中心(optical center of camera)等攝影機參數，將三維實體海面上空間物理座標投影至二維相機影像座標，建立相片座標系統與實物座標系統之間的關係。

2-2 極線幾何(Epipolar Geometry)

極線幾何關係是指當兩台相機觀看同一物體 X 時，如圖 1，若物體 X 在相機 Π 上的投影為 x 點，在相機 Π' 上的投影為 x' 點，則 X-x-o-o'-x'-X 必定共平面，其中 o 與 o' 分別為兩相機的主軸點。利用極線幾何關係，我們可以得知影像 Π 上 ex 線上某一點，必定對應出現在影像 Π' 上的 e'x' 線上。找出正確相對應點的這個過程，稱為影像匹配(matching)。極線幾何法可將比對搜尋的範圍從二維平面降階成一維線段上。

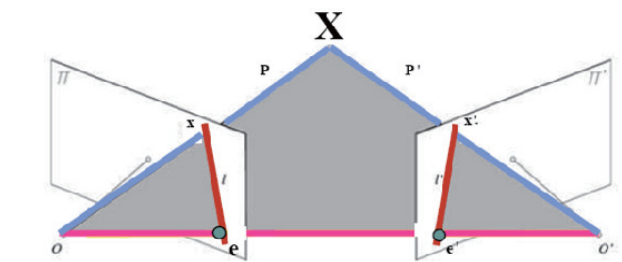


圖1 極線幾何示意圖

2-3 標準化互相關法(Normalized Cross Correlation,NCC)

標準化互相關法的步驟是先於目標影像中設定一個區域為目標視窗，並在待匹配的影像中經由起始值找出一塊可能的匹配區域，此區域稱為搜尋視窗[4]。一般來說，搜尋視窗都比目標視窗要大上數倍。接著將目標視窗置於搜尋視窗內左右上下逐一移動，移動時將目標視窗與搜尋視窗中之對應視窗灰度值進行比對，當目標視窗與搜尋視窗中相重疊區域之互相關係數值 r 最大者為最佳匹配位置， r 值定義如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i,j) - \overline{G_t})(G_s(i,j) - \overline{G_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i,j) - \overline{G_t})^2 \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_s(i,j) - \overline{G_s})^2}}$$

式中 $[i, j]$ 為視窗內像元所在的行、列值、 $G_t(i, j)$ 為目標視窗的像元灰度值、 $G_s(i, j)$ 為搜尋視窗的像元灰度值、 $\overline{G_t}$ 為目標視窗內像元的灰度平均值、 $\overline{G_s}$ 為搜尋視窗內像元的灰度平均值。

三、立體影像匹配實驗室驗證

本研究所使用的立體影像攝影系統，由三架數位攝影機、控制電腦以及觸發器所組成，該系統已能成功同步擷取數位影像。為了瞭解系統的觀測結果，進行平面驗證和模擬波浪版驗證兩個部分實驗。

3-1 平面驗證

平面驗證為利用實驗室矩形磁磚作為立體攝影機的觀測對象，並計算影像上磁磚的平面座標，進而比較與磁磚實際邊長之誤差，探討立體攝影系統在平面(x,y)上的準確性。實驗步驟在不同儀器架設高度(H=110公分、H=140公分、H=180公分)及兩相機間相同基線距離(D=80公分)的試驗條件下，以磁磚作為量測基準。其四個邊的實際邊長皆為40公分，當測距為3.1公尺處，立體影像技術量測到的磁磚之相對距離為39.94公分，誤差為0.06公分；測距為5.5公尺處，其相對距離為39.20公分，誤差為0.8公分，經由三組實驗之結果可發現，當攝影機與待測物越接近，則影像量測誤差越小，反之則誤差越大，證實立體影像量測誤差隨著目標物距離攝影機越遠而變大，其結果如圖2所示。

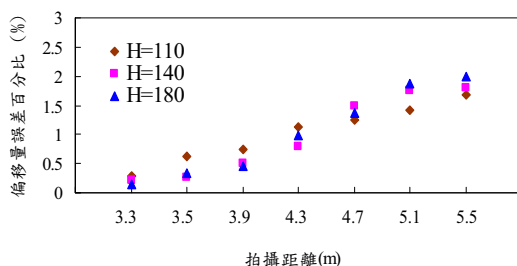


圖2 不同拍攝距離下之平面驗證誤差

3-2 模擬波浪驗證

平面模擬波場獲取良好之驗證後，茲進一步探討垂直軸方向的影像重建，在此採用一固定波長之正弦波波板，如圖3作為待測目標物，主要目的在於驗證高度上的量測誤差。

重建之立體影像如圖4所示，圖中剖面之波浪曲線如圖5。該線上之波高由發展之立體攝影技術量測出其為3.09公分，與實際波浪板量測之波高3公分，兩者誤差為0.09公分，波高誤差百分比為3%。立體攝影技術量測兩波峰之相對距離約為21.03公分，與實際量測之波長21公分，兩者誤差為0.03公分，波長誤差百分比為0.142%，而立體化後有匹配點落於實際曲面外，研判是波谷被波峰擋住造成立體成像的盲區。上述的量測誤差結果顯示所研發的立體海況攝影系統準確性足以信賴。

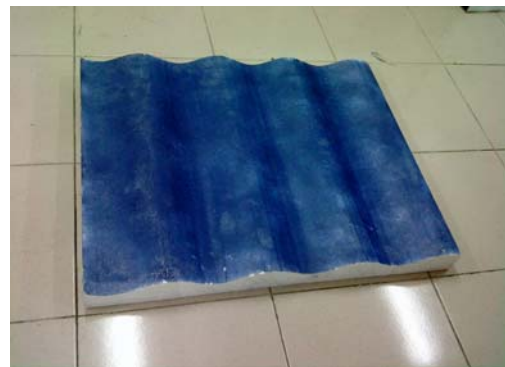


圖3 設計之波浪板模型

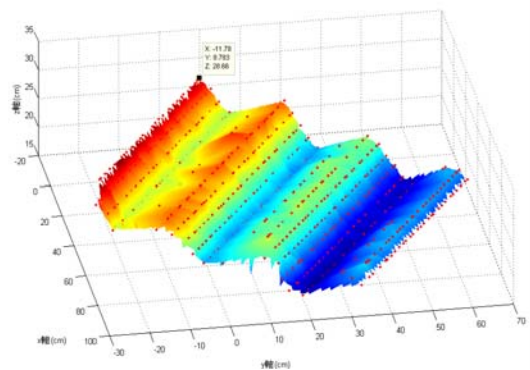


圖4 模擬波浪版立體化結果

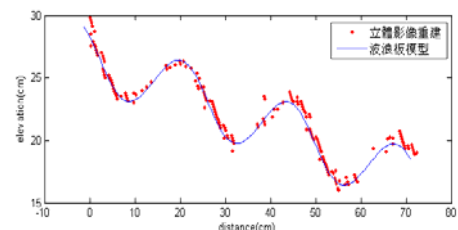


圖5 波浪版曲面實際值與立體化後結果一致

四、現場分析結果

4-1 分析結果

現場海面觀測的困難度與不確定性遠超過實驗室測試，主要是必須克服環境上的干擾，如風、雨、光線、同步取樣等問題。本研究在海邊從事多次現場觀測試驗，僅有少數獲得令人可以接受的立體影像重建結果，本文以 98 年 4 月 27 日在台南安平海域所做的試驗進行說明。藉由所開發的程式進行自動匹配時，發生顯著誤判的情形導致匹配點錯誤，如圖 6。這些錯誤的匹配結果造成了最後立體影像重建座標計算上的錯誤，因此必須將這些錯誤匹配點去除。藉由加入邏輯判斷的方法，程式可自行去除這些顯著的匹配失誤點。圖 7 是去掉掉錯誤匹配點後的匹配結果。

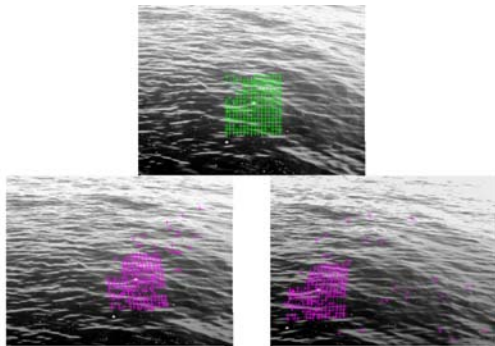


圖6 現場試驗常出現顯著錯誤的匹配點

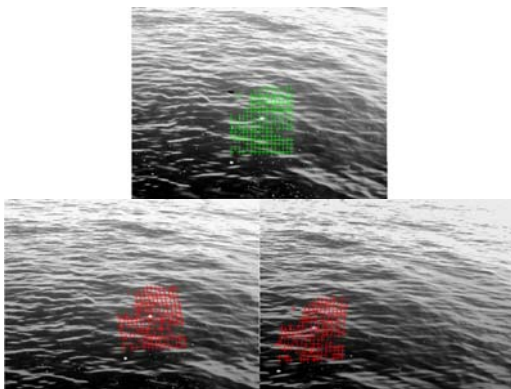


圖7 去掉掉匹配錯誤點位後的結果

修正後之影像匹配結果，經直接線性轉換後，可以計算出各點位的三維座標，也就是重建了立體海況，如圖 8 所示。其結果仍有部分奇異突起的數據點，經研討發現同樣是匹配失誤所引起的結果，但那些錯誤的匹配點位是落在影像重疊的觀測範圍內者，有別於前述顯著錯誤的匹配點，這些影像範圍內的錯誤匹配點位相當不容易予以剷除，因此可能會造成立體影像重建結果的偏差，甚至錯誤。

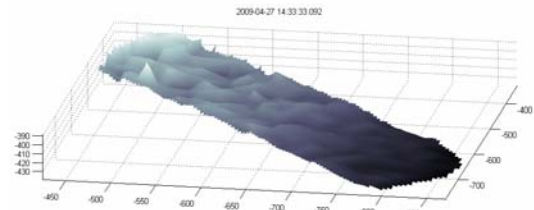


圖8 現場立體海況重建結果

擷取攝影機所攝得影像之影像座標(360,300)之點，分析該次攝影所得之 110 張影像(取樣頻率 7Hz，攝影時間約 16 秒)，並排除明顯匹配錯誤之匹配點後，該觀測點之水位變化之時間序列如圖 9，由圖算出波浪週期大致約 2~3 秒、波高 8~12 公分，與當時海況相近。初步的結果已可證實此系統與相關的分析程式在取得品質好的現場海況影像時，確實可以合理地分析出海面波浪變化。

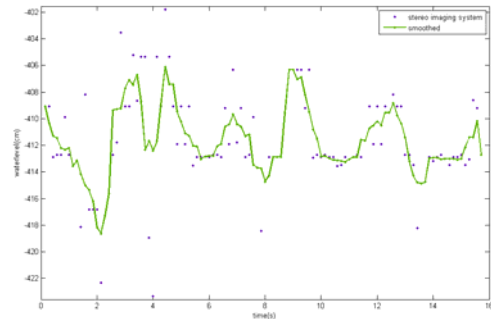


圖9 前圖所擷取的剖面線的水位變化圖

4-2 時間差對影像匹配造成之影響

波浪為動態影像，因此三台攝影機拍攝速度是否同步甚為重要，此外資料傳輸至儲存設備中的寫入速度也會影響到三台攝影機的影像配合。本研究使用 3 台德國 Basler Vision Technologies 公司之 Scout series 攝影機：scA1390-17gm，其讀取速度最高可達到每秒 17 張(17 fps) 影像；而傳輸方式採用 Gigabit Ethernet 網路傳輸介面，資料傳輸速度達每秒 Gigabit。此外為確實達到多台攝影機能同步攝影，我們採用 GW Instek 之外部觸發器(trigger)，使用約 10Hz 之方形波(Square wave)，使三台攝影機同部拍攝約每秒 10 張(10 fps)影像；儲存裝置使用 ACARD Technology 公司之 ANS-9010 RAM Disk，ACARD RAM 磁碟是一款固態磁碟，經由 DRAM 記憶體模組所構成，執行速度較傳統硬碟及快閃硬碟更快，且經由 RAID0 磁碟陣列功能，可將資料傳輸率提高為兩倍，有效縮減三台攝影機影像同時寫入儲存裝置時因硬碟機械轉速問題所造成的寫入速度延遲。

圖 10 為三台高速攝影機利用外部觸發器(trigger)以每秒約 10 張(10 fps)於 2009/11/5 所拍攝的八斗子漁港內海面實際影像，經由 StreamPix 軟體擷取影像並輸出後，於影像右下角標示拍攝當時的日期及時間。利用程式分析結果可看出在圖 10 (a)中點選波浪的波

峰位置，匹配結果於(b)(c)圖中的波峰位置為鄰近，但並不是在正確的位置上。若觀察圖 10 之拍攝時間，(a)時間為 11 點 39 分 11.748 秒，(b)圖時間為 11 點 39 分 11.833 秒，(c)圖時間為 11 點 39 分 11.833 秒，可發現(b)圖與(c)圖時間相同，但(a)圖與(b)(c)圖則相差了 0.085 秒，此問題推測是因為時間差的影響導致影像匹配的落點位置雖在鄰近點，但不完全正確匹配的原因。

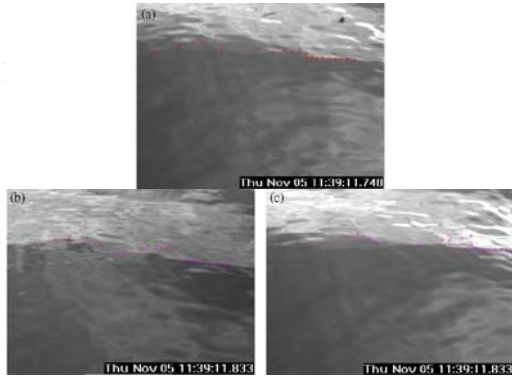


圖10 使用高速攝影機實際海面拍攝影像：(a)上方相機，(b)左側相機，(c)右側相機所拍攝影像

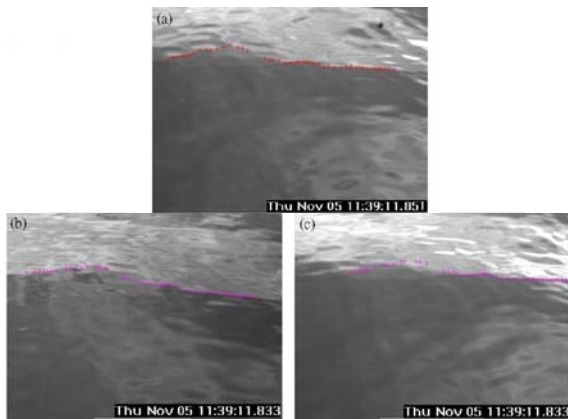


圖11使用高速攝影機實際海面拍攝影像：(a)上方相機延遲單位影像，(b)左側相機，(c)右側相機所拍攝影像

為找出時間差較小之影像，我們將上方攝影機所拍攝的影像往後取一張影像。圖 11(a)時間為 11 點 39 分 11.851 秒，與(b)、(c)圖仍維持 caes 中第 820 張，時間為 11 點 39 分 11.833 秒，則時間差縮減至 0.018 秒，以此匹配則可看出在(a)圖中點選波浪的波峰位置，於(b)(c)圖中的波峰位置十分符合，且匹配點明顯增多。

造成時間延遲的問題，研判主要是因為每秒拍攝 10 張影像(10 fps) 之資料寫入量大，造成硬體儲存上的延遲，若將每秒張數降低至 5 至 2 張，則可以有效提昇影像的同步拍攝與降低資料儲存所造成的延遲，減少時間差使匹配結果較準確。

4-3 光影差對影像匹配造成之影響

根據多次現場試驗經驗歸納及匹配過程中，所遇到的最大問題為海面上光影變化所造成之影響。三台高速攝影機在拍攝海面的同步影像，因攝影機之間的相對位置與相機偏角、俯角不同，即使是同步影像的海面波動光影變化皆不相同。因此無法找出正確的匹配點，此狀況會造成匹配結果失敗。三張同步影像光影變化趨勢若一致，且影像中的對比大(如波峰明顯)則匹配結果良好；若光影變化趨勢相異，且影像對比不明顯，則可能造成匹配結果差，亦無法從中判別出落點是否正確。

圖 12 為海面變化不明顯時所拍攝的影像，時間差僅 0.018 秒。從圖 12(b)中可看出左側與右下角的光影變化與(a)(c)明顯相異，使得標準化互相關法沿著藍色極線搜尋相對應之匹配點時，會造成落點的誤判，例如(a)中的綠點正確位置應落於(b)(c)中的紅色區塊內。光影變化造成影像左側區域與右下塊區域匹配結果差，其餘波紋明顯區域則可成功匹配出相對應點。圖 13 為立體影像匹配結果，因影像光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想。

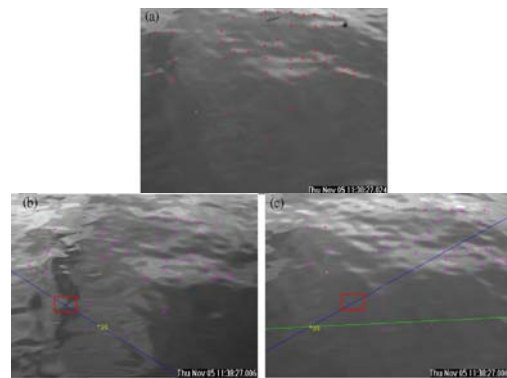


圖12 實際海面拍攝影像：(a)上方相機，(b)左側相機，(c)右側相機所拍攝影像

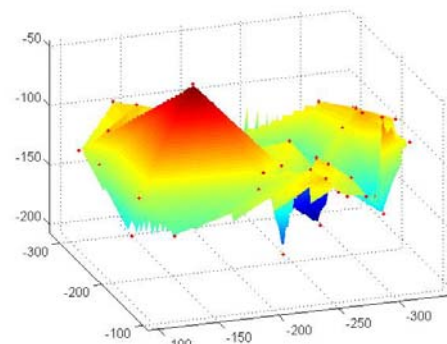


圖13 海面拍攝影像匹配後立體變化結果

圖 14 為海面波紋明顯時所拍攝影像，攝影時間差僅 0.018 秒，另可看出三張影像的光影變化趨勢並無明顯差異，且此時風浪較大，海面上的波紋明顯，因此匹配結果準確且匹配成功點數多。圖中藍色虛線區塊內波谷較暗區域，並無明顯的光影變化，此為無法

順利匹配出正確對應點之原因。圖 15 為立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為 50 cm。

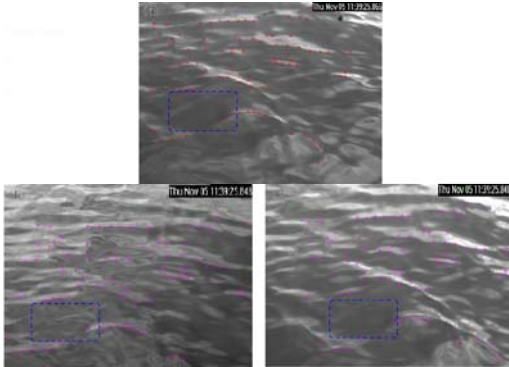


圖14 海面波紋明顯時所拍攝影像：(a)上方相機，(b)左側相機，(c)右側相機所拍攝影像

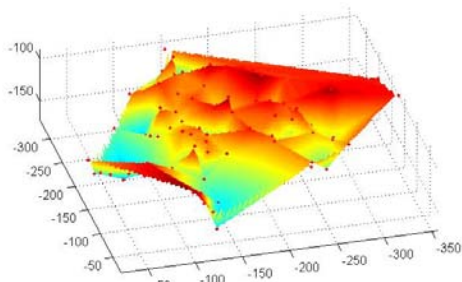


圖15 立體影像匹配結果

根據光學原理，觀看近處海面，小幅波動(水面坡度不同)即會造成光反射分布差異大。目前嘗試測試長距離觀測試驗，初步測試結果，未遭遇近距離觀測之光反射變化大之情形。

4-4 儀器水平問題

現場量測時，需將外部校正板搬運至試驗現場，立體攝影系統完成海況拍攝後，隨後將攝影系統轉向拍攝立體校正板進行外部校正，但轉向時可能會改變相機之各種參數(相機水平俯角、水平旋轉角及左右旋轉角)，造成影像匹配上的誤差。

為了避免轉向所造成的角度改變，須強化系統支架與雲台，讓系統在轉動時更加穩定。採取加大轉動軸截面積，減少轉動時橫桿之不穩定晃動，或採用測量專用腳架提高穩定度。

五、地面控制點法之導入與應用

本研究根據現場量測的結果，除了光影差、時間差及儀器水平問題對影像匹配造成之影響外，外部校正版位置和海面距離過遠也會影響到影像之匹配。因此使用地面控制點(Ground Control Point, GCP)法，在量測現場決定幾個實際的控制點。利用測量方法取得其座標，代替前述外部校正工作降低匹配時的誤差，同時可解決攝影系統轉向拍攝立體校正板所造成之儀

器水平問題。

圖 16 為基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤，其與攝影系統約 200 米之距離，因堤面之長寬高已知，堤面上可設為地面控制點。圖 17 為以堤面為地面控制點並用焦距 69mm 望遠鏡頭進行影像匹配之結果。經過匹配後可以發現使用地面控制點匹配結果雖仍有誤差但較易量測出匹配範圍，進而推算實際水面變化。圖 18 為使用地面控制點所計算出來水表面高度變化圖，其一角水位高度變化時序圖如圖 19，圖中影像是以每秒 5 張(取樣頻率 5Hz)拍攝，深藍色線為使用一秒做為移動平均之結果，可清楚的看出水面高度變化之情形。



圖16 基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤

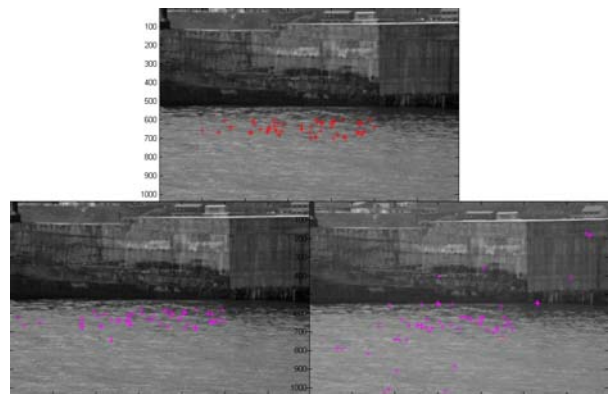


圖17 經由地面控制點匹配過後之結果

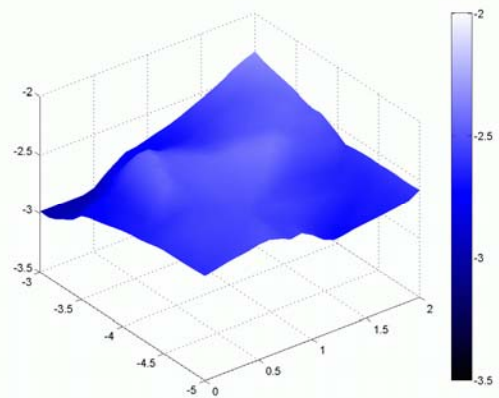


圖18 使用地面控制點所計算出來水表面高度變化圖

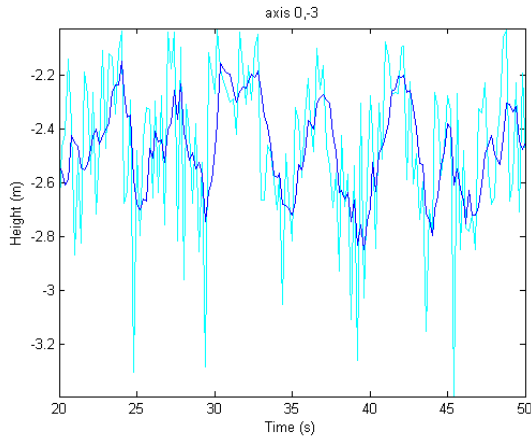


圖19 應用地面控制點法推算之水位高度變化及其移動平均時序圖

六、結論

本研究開發一套以三台攝影機建構而成的立體海況觀測系統，並開發以極線幾何原理和標準化互相關法為基礎之程式來進行影像匹配和重建工作；最後得出海表面實際立體影像的重建。本研究結論與建議如下：

1. 經平面驗證與模擬波浪驗證，平面驗證的結果顯示平面座標的量測誤差約為 0.15%，靜態波浪板進行高度驗證，分析結果顯示長度的量測誤差約為 0.142%，其誤差跟系統的高度以及攝影機之間距離無關，與系統和待側物之間的距離有關。
2. 現場攝影近處海面，由於小幅波動造成光反射，造成匹配分布差異較大；若海面波紋明顯則匹配結果較好。初步測試長距離觀測試驗之結果，則未遭遇近距離觀測之光反射變化大之情形；同樣可有較好的匹配結果。
3. 因受儀器硬體上限制，若每秒拍攝 10 張影像，使得資料寫入量大造成硬體儲存上的延遲，若將每秒張數降低至 5 至 2 張，則可避免此情況。
4. 由於外部校正板位置和海面間距離太遠會影響到影像之匹配，本研究導入了地面控制點，以地面控制點取代外部校正板，此方式有效降低匹配的誤差以及避免因攝影系統轉向所引起之水平問題。因此使用地面控制點較容易計算出水表面高度變化。

致謝

感謝中央氣象局海象測報中心支持並提供研究經費(MOTC-CWB-98-O-03)。氣象局預報中心李育棋副主任、科技中心周思運博士與程家平主任等人給予很多的建設性建議，在此一併感謝。

參考文獻

- [1] 蔡政翰、高家俊、董東璟、黃世任、蘇嘉平、陳

聖學、陳立偉，應用海岸攝影機進行立體海況觀測之研發，天氣分析與預報研討會，440-444 頁，2009

- [2] Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M., Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry, Proceedings of the ASP/UI Symposium. Close-Range Photogrammetry, Urbana, IL, pp. 1-18, 1971.
- [3] Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., Stanley, J. and Plant, N., Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 81-92, 1997.
- [4] Linder, W., Digital Photogrammetry – Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [5] Wanek, J.M. and Wu, C.H., Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements, Ocean Engineering, Vol. 33, No.5-6, pp.723-747, 2006.