

應用海岸攝影機進行立體海況觀測之研發

蔡政翰^{1*} 高家俊² 董東璟¹ 黃世任¹ 蘇嘉平² 陳聖學² 陳立偉¹

國立台灣海洋大學海洋環境資訊系¹ 國立成功大學近海水文中心²

摘要

現場的海象觀測資料可以提供模式驗證與同化應用，有助於提昇波浪預報準確度。目前的海象觀測技術包含設置資料浮標、浮球、波高計等現場儀器的方式，以及從衛星、雷達等遙測影像進行分析的技術，本研究開發以三台岸邊攝影機從事波浪觀測研究。三台攝影機可呈現立體海況，其過程包含影像內部校正、外部校正、影像匹配與立體化過程。在中央氣象局的支持之下，本研究已研發出一套立體海況觀測的原型，並已經完成內部、外部校正以及影像匹配等工作，已確實能將觀測對象立體化，本研究模擬靜態波浪版進行驗證，結果顯示量測誤差很小，達到可以接受的程度。

關鍵詞：立體攝影、波浪觀測

一、前言

量測波場特性時，通常是在定點(in-situ)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)是儀器以不接觸水面的方式，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，其可以在一次的步驟內，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(Wanek and Wu, 2006)，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、立體攝影理論綜述

2-1 直接線性轉換法

直接線性轉換法(Direct Linear Transform, DLT)是用來從事求解圖像投影座標間的轉換關係(Abdel-Aziz

and Karara, 1971)。攝影機與空間中物體之相對關係與座標定義如圖 1 所示。根據 DLT 理論，實物空間中任一點座標(x, y, z)與投影到相機上的座標(u, v)關係如下：

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (1)$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (2)$$

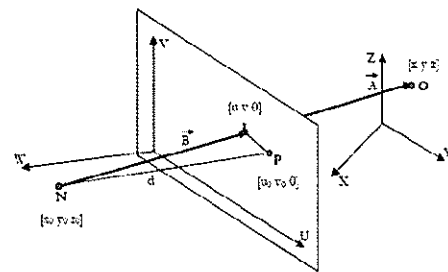


圖 1 實物與影像座標系統之關係

DLT藉由 $L_1 \sim L_{11}$ 參數來將坐標量測儀系統與實物空間坐標系統建立關係，此參數包含了三個內方位元素，六個外方位元素與座標量測儀和相片坐標系轉換的兩個線性比例常數。假設選定影像平面六個以上之控制點，(1)、(2)式則可以改寫為：

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ M \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用最小平方法(Least Square Method)解出 $L_1 \sim L_{11}$ 。將(3)式再度改寫為：

$$\begin{bmatrix} L_1 - L_9 u & L_2 - L_{10} u & L_3 - L_{11} u \\ L_5 - L_9 v & L_6 - L_{10} v & L_7 - L_{11} v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2-2 內部與外部校正

2-2-1 內部校正

本研究使用數位相機拍攝現地海面之影像，都存在著影像扭曲的現象，故須校正回未扭曲之影像。為了進行影像扭曲校正，故製作平面校正板，進行內部校正過程中，將平面校正版和相機(CCD平面)擺設至平行的狀態，因此(1)式與(2)式中可假設 $Y_0 = 0$ ，故方程式簡化為下式：

$$XL_1 + ZL_3 + L_4 - u_d XL_9 - u_d ZL_{11} = u_d \quad (5)$$

$$XL_5 + ZL_7 + L_8 - v_d XL_9 - v_d ZL_{11} = v_d \quad (6)$$

式中 (u_d, v_d) 為實際觀測所得之扭曲像素點座標， (X, Z) 為實際物空間座標， $L_1, L_3, L_4, L_5, L_7, L_8, L_9, L_{11}$ 則是影像內部校正參數，當假設已知 (u_d, v_d) 以及 (X, Z) 時，則可求得校正之參數，故投影在相機裡未扭曲的座標 (u_p, v_p) 則可由上式(5)和(6)式預測得知。

因相機拍攝後之影像具有輻射對稱的特性，所以假設鏡頭造成之畸變存在著主軸點與輻射方向的距離成某種比例且為對稱的關係，影像上某點的位置與透過前述校正所得影像上同一點位置的距離差稱之為徑向扭曲(radial distortion)，根據Holland et al. (1997)回歸出徑向扭曲量值與徑向距離的關係，其最佳的回歸方程式為一個奇次方多項式(odd-order polynomial)，如下式：

$$\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r \quad (7)$$

r 為影像中心 (u_0, v_0) 到影像上某點 (u_d, v_d) 的距離，因此可得徑向扭曲量值由下式表示：

$$\Delta r = \sqrt{(u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2} - \sqrt{(u_p - u_0)^2 + (v_p - v_0)^2} \quad (8)$$

如同前述， (u_p, v_p) 為上述點經校正後未扭曲的位置， k_1, k_3 為回歸係數。獲得上述資料後，主軸點的決定可假設不同的 (u_0, v_0) 代入(7)式和(8)式，再利用疊代的技巧計算，直到徑向扭曲回歸誤差最小為止。當主軸點和扭曲係數決定後，整個影像上的徑向扭曲則可以被校正。

2-2-2 外部校正

外部校正的目的係為找出各攝影機與目標物之間

的相對位置(包括位置與旋轉角度)，一般可用地面控制點(ground control point)方法—由已知實際座標的數個控制點求得，然而本計畫觀測的目標是動態的水面，不容易在海面上找到固定的控制點，故本計畫參考Wanek and Wu (2006)提出之方法，使用一立體校正網格板以取代地面控制點，該校正版由三個相互正交之平面組成，其上繪有網格，可以很明確的得知各網格交點之座標。外部校正過程即是在計算直接線性轉換法的11個參數。

要解出影像二維相素座標與三維空間座標轉換之關係就必須應用到完整的直接線性轉換公式，將前述之式(1)與式(2)展開得下式：

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -u_1 y_1 & -u_1 z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 x_2 & -u_2 y_2 & -u_2 z_2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_n & -u_n y_n & -u_n z_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1 x_1 & -v_1 y_1 & -v_1 z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -v_2 x_2 & -v_2 y_2 & -v_2 z_2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_n x_n & -v_n y_n & -v_n z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ u_n \\ v_1 \\ v_2 \\ L_{11} \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_n \\ v_1 \\ v_2 \\ M \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 (x_n, y_n, z_n) 為已知之實際座標，且其對應至影像之像素點座標 (u_n, v_n) ，一般說來必須選至少6個分佈在不同板面之控制點以解出11個 L_i 未知數。當求出11個DLT參數後，影像上之位置與板面控制點之位置的關係就可以建立。然而使用單台之相機無法求得三維座標，故須使用兩台以上之相機於不同角度及位置拍攝物體，才可獲得立體影像。

2-3 影像匹配

2-3-1 極線幾何 (Epipolar Geometry)

如圖2，極線幾何(Epipolar Geometry)關係是指當兩台相機觀看同一物體 X 時，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。找出正確的點的這個過程，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。

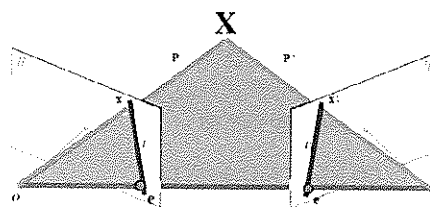


圖2 極線幾何示意圖

2-4-2 標準化互相關法

標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)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。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代入(10)式以計算其相關係數 r ，當目標視窗與搜尋視窗中相重疊區域之灰度值互相關係數最大者為最佳匹配位置。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_t(i, j) - \bar{G}_t)(G_s(i, j) - \bar{G}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_t(i, j) - \bar{G}_t)^2 \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_s(i, j) - \bar{G}_s)^2}} \quad (10)$$

式中 r ：相關係數值； i, j ：視窗內像元所在的行、列值； $G_t(i, j), G_s(i, j)$ ：目標視窗、搜尋視窗的像元灰度值； \bar{G}_t, \bar{G}_s ：目標視窗、搜尋視窗內像元的灰度平均值。

三、內部校正結果

內部校正主要目的在於校正因透鏡誤差所造成之影像扭曲變形的現象，本文利用攝影機拍攝一棋盤式平面校正板(如圖 3)進行內部校正，棋盤間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。校正板上有長寬為已知間距之校正格點。圖 4 為內部校正結果，我們發現愈接近主軸點，徑向扭曲愈小，我們還找到了徑向扭曲量值與徑向距離的關係，如圖 5，此結果與 Holland et al. (1997)研究結果相近。圖 6、圖 7 顯示一個內部校正前後的影像，可以看出內部校正後將原先邊緣扭曲的影像做了修正改善。

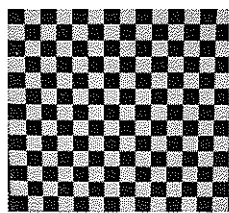


圖3 棋盤式內部校正板

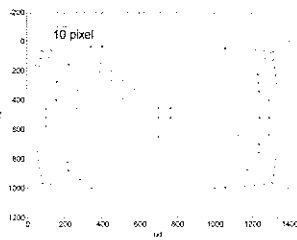


圖4 影像扭曲分布圖

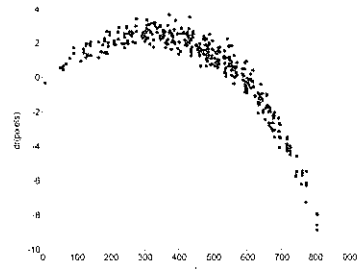


圖5 扭曲分布與徑向距離關係

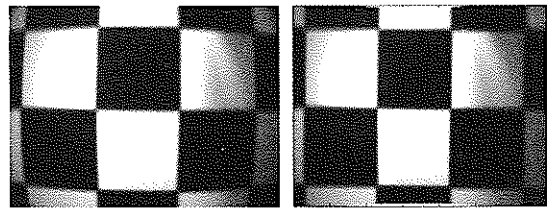


圖6 校正前原始影像 圖7 內部校正後未扭曲影像

四、外部校正結果

根據Wanek and Wu (2006)的作法，外部校正是在立體攝影系統拍攝完現場影像後，在不變動各攝影機相對方向與位置之情況下，小心地將立體攝影系統移回實驗室，以一個外部校正版(如圖8)進行校正。由於搬動立體攝影系統難免會有所碰撞，本研究則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，隨後在現場進行外部校正，此方式可以有效改善立體攝影系統搬運過程之不小心碰撞，減少因為外部校正造成之誤差。進行外部校正時，應進行以下佈置與設定工作：

1. 透過氣泡水平儀將立體攝影系統之 T 架調成水平，此步驟目的是在於確定系統之 X-Y 面與海水面平行。
2. 利用手持式羅盤量出 T 架之法線方向，其目的為座標轉換時可求得絕對座標。
3. 調整外部校正板，使在各相機拍攝畫面中均可以拍得清晰之校正影像，必要時得調整光圈，但攝影機角度以及相機焦距均需保持一定。
4. 利用本計畫購買之 StreamPix 軟體，分別自三台相機畫面擷取外部校正板影像。
5. 透過本計畫自行開發之外部校正程式進行校正。

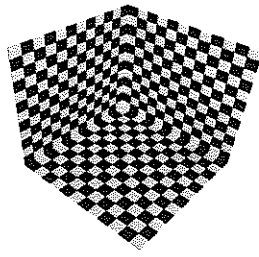


圖8 本研究設計之外部校正版

五、立體影像匹配實驗室驗證

本計畫已成功組裝了一架立體影像攝影系統，如圖9，它是由三架數位攝影機、控制電腦、觸發器所組成，該系統已能成功同步擷取數位影像。為了瞭解此系統的觀測結果，本節設計實驗室實驗進行驗證。包含平面驗證和模擬波浪版驗證兩個部分。

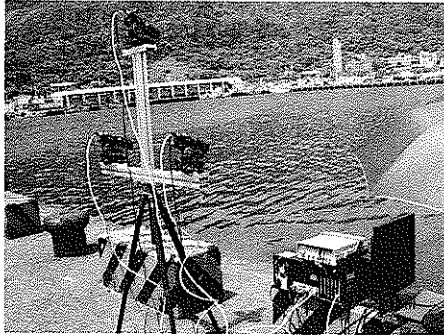


圖9 本計畫研發組裝之立體海況攝影系統

5-2-1 平面驗證

本實驗使用實驗室地板上的磁磚作為立體攝影機的觀測對象，利用本研究所研發的分析程式計算影像上磁磚的平面座標，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。

實驗步驟依循前述之外部校正、影像匹配與立體影像重建進行，首先以三台攝影機同步拍攝校正版，經由直接線性轉換求得各攝影機之11個外部校正參數。同步攝影標的物(地板磁磚)的影像如圖10，選擇各影像上磁磚之交點當作匹配點以經過DLT轉換計算獲取其三維座標。

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，實驗中以地面上磁磚來當作量測基準，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，如圖11所示。

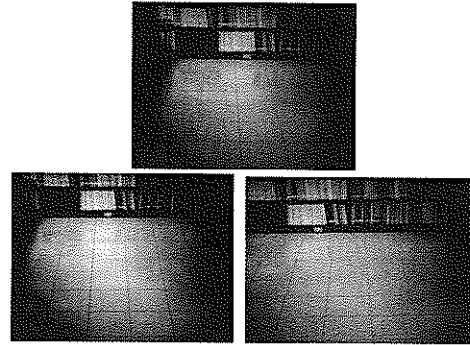


圖10 拍攝之磁磚影像(分別是上方, 左側與右側相機拍攝的影像)

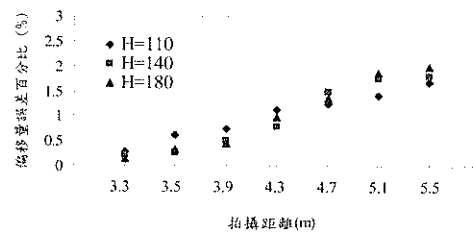


圖11 不同拍攝距離下之平面驗證誤差

5-2 模擬波浪驗證

平面模擬波浪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浪板(如圖12)作為待測標的物，主要目的在於驗證高度上的量測誤差。

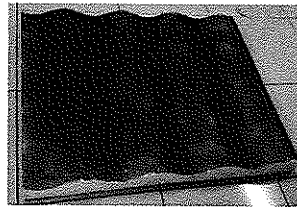


圖12 本計畫所設計之波浪板模型

重建之立體影像如圖13所示，繪出圖13中AB剖面線之波浪曲線如圖14。該線上之波高由本文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(波長)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%。上述的量測誤差結果顯示本計畫所研發之立體海況攝影系統準確性足以信賴。

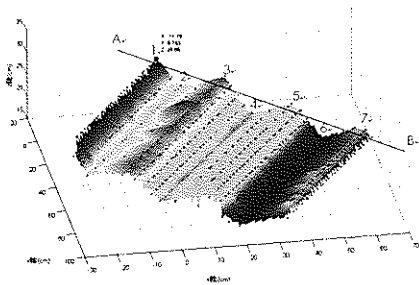


圖13 模擬波浪版立體化結果

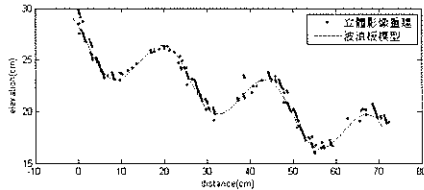


圖14 波浪版曲面實際值與立體化後結果一致

本節利用波浪板探討高度與測距對垂直軸方向(高度)的誤差影響情形，於波浪板上放置9個已知之待測物，並量測其實際高度，與立體影像量測結果比較，圖15為在不同攝影高度條件下(H=110公分、H=140公分、H=180公分)，立體影像量測高度與實測高度之誤差圖，在z軸高程的測量值可發現，本研究使用之方法所算出來的高度誤差皆低於1公分以下。

圖16為在儀器架設高度180公分及不同的攝影機間之相對距離的攝影條件下，所量測之數據與實測之結果比較圖。在試驗中，當基線為20公分時，其影像量測與實測之高度誤差達到1.23公分，然而隨著基線的增長，當基線為60公分(試驗17)及80公分(試驗18)時，其兩者高度誤差有降低的現象，其高度誤差分別為0.69公分及0.62公分，由此得知，隨著基線的增長，可降低Z軸高度的誤差。

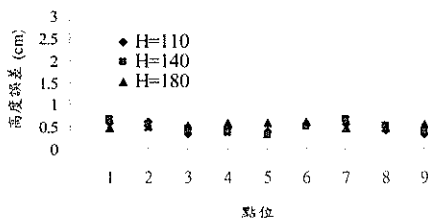


圖15 不同攝影高度下之高度誤差圖

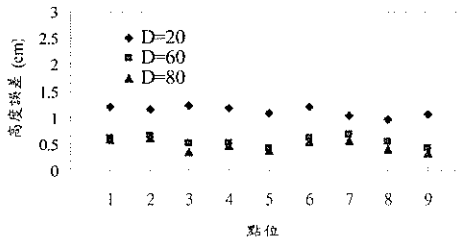


圖16 不同基線長度與高度誤差圖

六、結論

本研究以三台攝影機從事海況觀測技術研究。先後完成了內部校正、外部校正、影像匹配與影像重建等工作，並組裝建置了一套立體海況觀測系統雛形。研究內容中，影像匹配是最重要的關鍵技術之一，本文利用極線幾何原理和標準化互相關法進行影像匹配，獲得理想的匹配結果。本文以立體攝影系統拍攝模擬之靜態海面進行驗證，結果顯示，本計畫所組裝之立體攝影系統在平面位置的量測誤差約為 0.06cm (0.15%)，高度的量測誤差約為 1cm (待側物體高程 40cm)。而這些誤差跟系統的高度以及攝影機之間的基線長度無關，與系統和待側物之間的距離有關。

後續的研究將進行海上動態驗證，該作業將會遭遇現場環境的干擾，包含光線、震動等，是本技術研發較大的挑戰。

致謝

感謝中央氣象局海象測報中心支持並提供研究經費。氣象局本計畫委員預報中心李育棋副主任、科技中心周思運博士等人給予很多的建設性建議，在此一併感謝。

參考文獻

- [1] 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.
- [2] 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*
- [3] 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.