



交通部中央氣象局

自動化三維立體影像岸基
海象觀測技術開發(2/3)
期末報告

承辦單位： 國立台灣海洋大學
海洋環境資訊系

中華民國 98 年 12 月

摘 要

本計畫目的為研究以三台攝影機從事海況觀測之技術。本年度為計畫第二年度，在第一年度工作中，主要完成立體攝影系統之組裝與測試，以及相機內部校正工作。本年度主要係從事系統外部校正(exterior calibration)以及影像匹配(image matching)和重建(reconstruction)工作，是整體研究工作之核心。

本計畫年度工作已全部完成，開發了本系統主要的分析程式，包含有外部校正、影像匹配與重建等功能。其中立體影像系統的外部校正結果(11個 DLT 參數)是求解直接線性轉換(DLT)方程組得來；影像匹配則是利用了極線幾何 (Epipolar Geometry)原理和標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)來進行，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。

本研究設計實驗室靜態試驗來驗證分析結果的正確性，研究結果顯示，系統重建的立體影像，其平面量測誤差約為 0.06cm (0.15%)，高度的量測誤差約為 1cm 左右(待測物體高程 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，與系統和待測物之間的距離有關。另外，本研究團隊也將立體影像系統架設在實際海邊進行現場動態海況試驗，本年度研究時程中，進行了很多次的現場試驗，取其中資料品質良好的影像序列進行分析，結果顯示本系統可以合理重建出立體影像，分析所得之波動狀況也與實際海面接近。唯根據研究團隊所累積的經驗得知，現場立體海況試驗與分析結果受到當時的環境(如風、雨、雲和光線等)等影響甚大，戶外儀器的架設也有影響，未來要獲得更精確的結果必須解決這些干擾，或者採用其它的分析手段，如對波峰線的追蹤等。

目 錄

摘要.....	i
目 錄.....	ii
圖目錄.....	iv
表目錄.....	vii
第一章 計畫背景與目的.....	1
1-1 計畫背景.....	1
1-2 研究目的.....	2
1-3 工作項目.....	2
第二章 第一年計畫階段性成果.....	4
2-1 立體攝影原理與直接線性轉換法.....	4
2-1-1 圖像投影幾何理論.....	4
2-1-2 直接線性轉換法.....	12
2-1-3 立體影像重建.....	17
2-2 三維立體影像岸基系統組成.....	18
2-3 國內外相關研究.....	28
2-4 內部校正.....	32
第三章 外部校正.....	43
3-1 外部校正原理.....	43
3-2 外部校正佈置與設定.....	44
3-3 外部校正結果.....	45
3-3-1 外部校正過程.....	45
3-3-2 校正點數多寡對校正結果之影響.....	48
3-4 攝影機姿態與重疊範圍關係.....	51
第四章 立體影像匹配.....	61
4-1 極線幾何原理.....	61
4-2 標準化互相關係法.....	64
4-3 影像匹配結果與討論.....	65

4-3-1 影像匹配步驟	65
4-3-2 相機數目之影響	67
第五章 立體影像重建與靜態驗證	70
5-1 立體影像重建	70
5-2 靜態驗證	71
5-2-1 平面模擬波場之驗證	71
5-2-2 空間模擬波場之驗證	74
第六章 現場系統動態測試與初步驗證	79
6-1 現場試驗	79
6-1-1 試驗佈置	79
6-1-2 試驗過程	81
6-2 波浪分析方法	83
6-3 分析結果與討論	84
6-3-1 分析結果	84
6-3-2 儀器水平問題	88
6-3-3 時間差對影像匹配造成之影響	95
6-3-4 光影差對影像匹配造成之影響	99
第七章 結論與未來研究	105
參考文獻	107

附錄一：期初評選會議紀錄

附錄二：期中審查會議紀錄

附錄三：期末審查會議紀錄

附錄四：政府科技計畫成果效益報告

附錄五：政府部門科技計畫期末摘要報告

圖目錄

圖 2-1 影像座標系統示意圖	10
圖 2-2 影像座標與相片座標示意圖(a)影像座標(b)相片座標	10
圖 2-3 三維相片座標系統示意圖	11
圖 2-4 物體空間座標系統示意圖	11
圖 2-5 圖像投影三種座標系統與內、外方位轉換之關係	11
圖 2-6 光束法中控制點與相片之示意圖	12
圖 2-7 座標系統示意圖	12
圖 2-8 實物空間與相機空間之關係 (?).....	16
圖 2-9 立體影像從事表面海況監測示意圖 (Wanek and Wu, 2006).....	18
圖 2-10 自動化海氣象水文觀測系統組成	19
圖 2-11 立體攝影系統架構	20
圖 2-12 立體海況影像觀測系統	20
圖 2-13 Basler scA1390-17gm高速攝影機外觀	23
圖 2-14 GW Instek之外部觸發器 (trigger)	24
圖 2-15 本計畫所使用之 11.5-69mm 可調焦距式CCTV鏡頭	25
圖 2-16 本計畫所使用之 16、25、35mm 定焦距CCTV鏡頭	25
圖 2-17 (1)本計畫所使用工業電腦之正面圖 (2)背面圖(3 組Gigabit Ethernet 網路界面與網路線各連接到一台Basler scA1390-17gm高速攝影機)	26
圖 2-18 StreamPix 4 軟體介面.....	27
圖 2-19 本計畫使用之各元件組裝整合圖	28
圖 2-20 本計畫所製作的攝影機內部校正用板	35
圖 2-21 徑向扭曲大小分佈示意圖(箭號長度代表扭曲的量值)	35
圖 2-22 徑向扭曲量值與徑向距離的回歸關係 (Holland et al., 1997).....	36
圖 2-23 本計畫進行內部校正所設計之五種校正板	38
圖 2-24 為相片扭曲分布圖	41
圖 2-25 為扭曲分布與徑向距離關係	41
圖 2-26 可變焦距鏡頭於不同焦距時之扭曲分布與徑向距離關係	41
圖 2-27 焦距 6mm鏡頭拍攝之校正前影像	42
圖 2-28 焦距 6mm鏡頭拍攝經校正後影像	42
圖 3-1 本計畫製作之立體校正網格板	44
圖 3-2 本計畫進行系統外部校正之過程	45
圖 3-3 外部校正過程中，三台相機拍攝外部校正板所得之三張影像。(a)上 方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。	46

圖 3-4 選取上方影像之計算點位	47
圖 3-5 輸入選取點位之實際座標	47
圖 3-6 選取(a)左側相機及(b)右側相機中相對對應之點位。	47
圖 3-7 外部校正過程中，三影像選取之外部校正點位。(a)上方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。	48
圖 3-8 外部校正結果與校正點數多寡之關係。(a)L1 參數值；(b) L2 參數值；(c) L3 參數值；(d) L4 參數值；(e) L5 參數值；(f) L6 參數值；(g) L7 參數值；(h) L8 參數值；(i) L9 參數值；(j) L10 參數值；(k) L11 參數值。	50
圖 3-9 三台相機重疊範圍(條件 1).....	59
圖 3-10 三台相機重疊範圍(條件 2).....	59
圖 3-11 三台相機重疊範圍(條件 3).....	60
圖 3-12 三台相機重疊範圍(條件 4).....	60
圖 4-1 極線幾何示意圖	62
圖 4-2 影像匹配NCC法示意圖	64
圖 4-3 影像匹配對應之極線及匹配點	66
圖 4-4 各相機之影像匹配點	66
圖 4-6 三台攝影機波浪板匹配情形	69
圖 5-1 立體影像從事表面海況監測示意圖	70
圖 5-3 外部校正之校正板影像	72
圖 5-4 拍攝之磁磚影像	72
圖 5-5 磁磚影像之匹配情形	72
圖 5-7 波浪板模型	74
圖 5-8 立體影像技術之求解結果	75
圖 5-9 波浪板剖面與立體重建結果比較	76
圖 5-10 攝影高度 1.8 公尺拍攝之波浪板影像	77
圖 5-11 不同攝影高度下之高度誤差圖	78
圖 5-12 不同基線長度與高度誤差圖	78
圖 6-1 民國 98 年 4 月 27 日於台南安平港海邊現場測試之佈置	80
圖 6-2 實驗室人工推動波浪板模擬動態海況之試驗佈置	81
圖 6-3 人工選定實際海面影像點位計畫匹配用之基礎矩陣	82
圖 6-4 現場影像匹配結果。吾人發現匹配結果大致量號，部分點位匹配不佳需予以捨棄	82
圖 6-5 實驗室動態波浪模擬的匹配結果	83
圖 6-6 零上切波浪分析法示意圖	83
圖 6-7 現場試驗常出現顯著錯誤的匹配點	85
圖 6-8 去除掉匹配錯誤點位後的結果	86
圖 6-9 現場立體海況重建結果	86

圖 6-10 擷取三台相機上同一條測線探討其水位波動變化	87
圖 6-11 前圖所擷取的剖面線的水位變化圖	87
圖 6-12 攝影參數：水平俯角 30 度，水平旋轉角 0 度(左)原相片，(右)幾何校正後影像	93
圖 6-13 攝影參數：水平俯角 35 度，水平旋轉角 0 度(左)原相片，(右)幾何校正後影像	93
圖 6-14 攝影參數：水平俯角 35 度，右側相機水平旋轉角 10 度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像.....	94
圖 6-15 攝影參數：水平俯角 25 度，右側相機水平旋轉角 3 度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像.....	94
圖 6-16 攝影參數：水平俯角 25 度，右側相機水平旋轉角 1 度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像.....	95
圖 6-17 (a)(b)(c) 依序是三台高速攝影機(某一 case 中第 820 張)上方、左側、與右側所拍攝的海面即時影像匹配結果。	97
圖 6-18 時間差較大之立體影像匹配，結果與實際海面狀況差異大	97
圖 6-19 (a)(b)(c) 依序是三台高速攝影機上方所拍攝的影像(圖 6-12)往後取一張 frame (第 821 張)、左側(第 820 張)、與右側(第 820 張)所拍攝的海面即時影像之匹配結果	98
圖 6-20 時間差較小之立體影像匹配，結果與實際海面狀況較接近	98
圖 6-21 2009/11/5 實驗時海面狀況	99
圖 6-22 (b)圖左側與右下區塊的光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判	100
圖 6-23 光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想	100
圖 6-24 波峰位置明顯，匹配結果良好；圖中下塊區域水位變化不明顯，上塊區域光影變化相異，造成匹配結果不準確。	101
圖 6-25 (b)圖左側及下塊區域光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判	102
圖 6-26 立體影像匹配結果	102
圖 6-27 時間差小且海面波紋明顯，匹配結果準確且匹配成功點數多	103
圖 6-28 立體影像匹配結果	103
圖 6-29 水位變化不明顯，海面上並無明顯波紋，故匹配結果不理想	104
圖 6-30 立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為 50 cm，與當日實際海面狀況不符，推測是因為匹配成功點數過少	104

表目錄

表 2-1 本計畫組裝之立體海況影像觀測系統各子單元內容	21
表 2-2 本計畫立體海況影像觀測系統耗電計算	22
表 2-3 Basler scA1390-17gm攝影機規格	24
表 2-4 本計畫所使用之鏡頭規格	25
表 2-5 本計畫所使用工業電腦詳細規格	26
表 2-6 不同校正點進行內部校正之結果	40
表 2-7 不同校正距離執行校正誤差表	40
表 2-8 可變焦距鏡頭於不同焦距時之校正結果， k_3 與 k_1 為係數	40
表 3-1 相同條件下，選取校正點數多寡所得之 11 個外部校正參數	49
表 3-2 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H1)	53
表 3-3 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C1)	54
表 3-4 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C2)	54
表 3-5 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C3)	54
表 3-6 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C4)	54
表 3-7 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H2)	55
表 3-8 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C5)	56
表 3-9 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C6)	56
表 3-10 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C7)	56
表 3-11 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H3)	57
表 3-12 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C8)	57
表 3-13 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C9)	57
表 3-14 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C10)	57
表 3-15 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H4)	58
表 3-16 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C11)	58
表 3-17 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C12)	58
表 3-18 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C13)	58
表 5-1 不同攝影高度下測距與偏移量之分析表	73
表 5-2 立體影像重建結果	75
表 5-3 不同攝影高度下高度誤差分析表	77
表 5-4 不同基線與高度誤差之分析表	78
表 6-1 現場觀測試驗攜帶物品與用途	79
表 6-2 模式結果與實測結果誤差統計表	92

第一章 計畫背景與目的

1-1 計畫背景

臺灣地理環境特殊，地狹人稠，但是四面環海，拓展海洋資源、發展海洋已是未來的趨勢，政府近年來鼓吹海洋立國，持續展現永續發展海洋之決心，海洋環境監測為國家推動海洋事務的基礎。中央氣象局海象測報中心已經初步完成全國海象觀測基礎建設，考慮未來海洋事務活動的增加，現有海洋觀測技術逐漸無法滿足未來之需求，氣象局必須不斷的提升及研發先進的海象觀測技術。

傳統上海面風浪觀測是在一個定點上，利用浮標、電纜式波浪儀、水下音波測計等連續取得20分鐘波譜樣本，計算出代表那個時間的波浪資料，但是許多重要的物理過程諸如碎波、群波、異常大浪（freak or rogue waves）等短暫現象都無法辨識。海面風浪其實是一個三維現象無法使用一維的定點觀測來描述。最近Wanek and Wu(2006)發展一個自動3維立體影像系統(ATSIS, Automated Trinocular Stereo Image System)，利用先進的數位相機及計算技術可以連續觀測3維海面風浪。此系統同時使用3具安置在調整式支撐架上的IEEE-1394數位相機，每秒可拍攝100個畫面，解析度在640x480畫素以上。經由完全自動化的影像處理後波高觀測解析度可達1mm，該設備也較其他觀測設施便宜，只要外海一個固定平台上便可架設。此為一種新穎的海況觀測方法，值得針對此方法進行研究測試。

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，也不易受到暴風雨和海浪的侵襲而損

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。

因此，若能研究三維海況影像觀測技術，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，應可提昇臺灣近海波浪觀測能力，對於有災害性之天氣系統侵襲臺灣時，能迅速將觀測影像傳送至氣象局，除了可做為防災決策參考外，也可做為未來類似之災害性天氣預警機制。另外，透過此研發計畫，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。

1-2 研究目的

本計畫為三年期計畫。計畫第一年度(2008)工作重點在於完成立體海況攝影系統之整合，以及攝影機內部校正工作，並進行現場測試地點之踏勘。計畫第二年度(2009)之計畫目標為完成觀測系統外部校正與影像匹配等核心技術，並於下半年開始將觀測系統移至現場，進行現場測試作業。計畫第二年度之工作完成後，可以說是已經具體地完成立體海況觀測系統之開發，是本計畫最重要的工作部分。

1-3 工作項目

本計畫工作期限為三年(2008~2010年)，2008年進行相關設備組裝與測試及影像數位化、影像重建及攝影機初步率定等工作；2009年進行立體影像外部校正以及影像匹配以重建立體海況等工作，並開始進行現場觀測試驗。第一年度(2008)已完成之工作與第二年度(2009)之工作如下：

第一年(2008)：【已完成】

- (1) 組裝與測試「三維海況影像觀測系統」相關設備及儀器。
- (2) 研發影像數位化處理相關程式。
- (3) 進行實驗室影像內部校正。

- (4) 進行現場觀測位置踏勘

第二年(2009)：

- (1) 進行立體海況觀測系統外部校正工作。
- (2) 進行立體影像匹配工作。
- (3) 於現場架設系統原型開始觀測。
- (4) 建立波浪分析程式。
- (5) 現場觀測影像/資料蒐集與初步分析。

第二章 第一年計畫階段性成果

2-1 立體攝影原理與直接線性轉換法

2-1-1 圖像投影幾何理論

拍攝是一種物體投影的過程。為了要將拍攝相片上的點還原至物體空間，必須先了解投影理論中有關方位的定義以及座標系統間的轉換關係。影像投影係在相片與物體空間中所進行，這過程中必須認識三個座標系統，它們分別是影像座標系統、相片座標系統和物體空間座標系統。說明如下：

1. 影像座標系統

影像座標系統是指紀錄數值影像資訊所用的座標參考系統，影像是由行與列上的灰度值數值矩陣所組成的，這個灰度值矩陣所存在的座標系統就是所謂的影像座標系統。其座標原點定義在影像的左上角，為左旋直角座標系統，若以行方向為 u 軸，列方向為 v 軸，任一影像點可由 u 軸與 v 軸兩座標量來表示之，如圖2-1，點 a 的影像座標為 (u_a, v_a) 。

2. 相片座標系統

相機的相片座標系統是以四個邊角框標連線交點做為座標參考基準，而一般數位相機雖無框標，但是其感應面(CCD Array)由CCD規則排列而成，每個CCD均位於感應面上位置、大小均固定，經由相機設定的結果定義該相機的相片座標系統。數位相機其設定方式是拍攝特製的設定板，先量測設定板上控制點之間的距離，並以8個預設方位拍攝設定板，再拍攝固定在牆上已知大小的矩形平板，並量測拍攝時相機與矩形平板的垂直距離，經計算處理後可得相機之焦距、相片尺寸、長寬的像素、相片中心位置以及透鏡畸變參數。

影像座標之原點位於影像之左上角，令相片中心為相片座標的原點，令橫軸往右的方向為相片座標的 x 軸，縱軸往上的方向為相片座標的 y 軸，並將尺度單位由pixel轉換成mm，即可定義數位相機的相片座標系

統，如圖2-2所示。而相片是經由中心透視投影用二維的平面來記錄，因此，相點位置可採用相平面上之二維座標系來表示，即由框標所定義的x 軸與y 軸兩座標量來表示，此座標系稱為相片座標系。座標原點為透視中心對相平面所做之垂直交點，相片座標系如圖 2-3 所示。然而一般在討論相片之幾何性質時，依然採用三維之直角座標系，像空間之x、y 軸如相片座標系所定義，而z 軸則定義為向上為正並符合右手定則，而將透視投影的中心定義為座標原點，如圖2-3 所示，此時相主點的像空間座標則為 $(x_0, y_0, -f)$ 。

3. 物體空間座標系統

物體空間座標系一般是以右手定則來決定其物體空間三維座標系統的X、Y、Z 三軸，而其座標原點可以自定，如圖 2-4 所示，稱之為地面座標系或物體空間座標系。因此在物體空間座標系上任一物點 P_i ，在空間之位置可由三維直角座標 (X_i, Y_i, Z_i) 來表示。物點之空間位置尚可由其他之三維座標系來表示，但以三維直角座標最容易瞭解其與相片座標系之間的關係，如圖 2-4所示。

圖像投影還原的重點在於座標系統之間的轉換，將量測相片所得之座標轉到物體空間座標，此稱為「方位轉換」，其主要是為了還原攝影時相機投影中心位置以及相片的姿態，過程分為內方位(Interior Orientation)轉換與外方位(Exterior Orientation)轉換兩個過程。內方位轉換是由相機的基本資料如相機的焦距、透鏡畸變等相關參數計算，求得攝影時的投影中心與相對關係而得出的相機本身的內方位元素；而相片外方位轉換，主要目的在求解攝影時相片座標系統與物體空間座標系統的轉換關係，一般也稱之為相片的外方位元素。前段所說明的三個座標系統與內方位、外方位之間的轉換關係如圖2-5所示，以下就內、外方位轉換做逐一說明：

1. 內方位轉換(Interior Orientation Transformation)

相片之內方位乃是決定由投影中心到物體空間點位之光束的形態，投影中心在相片座標系之座標就可表示內方位之幾何元素，即內方位之幾何元素為 $(x_0, y_0, -f)$ ，但是對於相平面座標系而言內方位之幾何元素為 (x, y) 。

所謂內方位的轉換，就是將量測得知的影像座標系，轉換到相片座標系。相片座標系統乃根據相機框標來確定，一般相機框標設計都是以成對的形式，因此必須注意框標點號的對應，以避免搞混。而數位相機雖無框

標但是其影像感應面CCD 是固定於相機內的，可利用CCD 相素尺寸與影像大小來求解其內方位參數。

譬如以一台數位相機所攝得的相片為例說明，若根據數位相機的設定資料得知相幅長為19.90 mm，寬為26.94 mm，又相機在縱軸方向的像素為1200 pixel，橫軸方向的像素為1600 pixel，則利用相幅尺寸除以影像大小可以算出每個像素的尺寸如下，

$$x \text{ 方向每個像素的尺寸 } 26.94/1600=0.016838 \text{ mm}$$

$$y \text{ 方向每個像素的尺寸 } 19.90/1200=0.016583 \text{ mm}$$

如前說明，欲將影像座標轉換到相片座標，必須先將單位由pixel 換算成mm，再將縱軸方向由朝下的row 軸改成朝上的y 軸，最後將原點平移至相片中心位置，相片中心之設定座標為(13.4698 , 9.9495) mm，設定成果之座標系統原點在左上角，則影像座標(c, r)轉換到相片座標(x, y)即可以下式表示：

$$x=c \times 0.016838 - 13.4698(\text{mm})$$

$$y= (1200-r) \times 0.016583 - 9.9495 (\text{mm})$$

2. 外方位轉換(Exterior Orientation Transformation)

外方位是指相片在物體空間座標內之位置與方位，相片投射至物體空間之位置可由投影中心之空間位置 (X_0, Y_0, Z_0) 來決定，而相片之方位乃表示攝影瞬間攝影機之狀況，即表示物體空間座標系與相片座標系間之關係。攝影測量常使用的相機姿態參數為 ω 、 ϕ 及 κ ，分別是繞X、Y 及Z 軸的旋轉角，而且以逆鐘向旋轉為正向。

若攝影當時投影中心座標及相機姿態角為已知，則可將任意點的相平面座標轉換成物體空間座標向量。近景攝影時，若攝影軸與地面平行呈水平攝影，而相片座標z 軸與地面座標Z 軸近似平行，則 $\omega \doteq 0$ 、 $\phi \doteq 0$ 及 $\kappa \doteq 0$ 。物體空間座標系統與相空間座標系統之間關係的建立，直接影響到外方位的定義和解算，在程式設計及應用上亦與外方位元素起始值之求解息息相關。為了求解上的方便，本研究所採用，則是維持地面座標系統不變，相平面座標系統為x、y軸，而攝影軸為z 軸。

一般數位攝影測量，均使用共線式轉換來求解相片座標系統與物體空間座標系統之間的轉換關係，如下式。

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.1.1a)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.1.1b)$$

式中

f : 相機焦距

x, y : 量測點的相片座標

X, Y, Z : 量測點的物理空間座標

$m_{11}, m_{12}, \dots, m_{33}$: 由相片的三個角度組成的正交旋轉矩陣

$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$: 前三者為相機投影中心的物理空間座標，後三者為相機姿態參數，此六個參數合稱相機的外方位元素。

當相片座標與物體空間座標重合時，二座標系之間存在相片的三個旋轉角：Roll、Pitch、Yaw 等所組成的姿態參數，令 ω 表示Roll， φ 表示Pitch， κ 表示Yaw。相片投影中心的外方位元素為已知的條件下，即可利用共線式，式(2.1.1)則可將相片座標上任一點轉換成物體空間座標，或是將物體空間座標中的點轉換成相片座標。

實際上在尚未進行方位轉換計算之前，相片投影中心的外方位元素為未知；因此，必須先利用已知的物體空間座標及其所對應相片座標先求解出相片投影中心的外方位元素後再帶入式 (2.1.1)，方能求得所需的物體空間座標，或是相片座標。

在物體空間可以有不同的控制方式來求解上式，譬如以”點”為控制或以”線”為控制的方式。以”點”的方式作為控制，在攝影測量中可說是最基本的量測單元；點可以組成線段、平面、或是曲面，甚至進一步組成立體的

結構，最後聚合而成複雜的模型以還原出真實的形狀。由此可知不論是線、面或更複雜的結構，基本上都是由基本的”點”所構成，因此在求解外方位的計算中，最先被使用的就是”控制點”的概念。使用控制點來求解相片外方位，有兩個先決條件：

(1) 必須有物體空間中已知的控制點資訊 (即控制點的物體空間座標)

(2) 在影像中包含足夠數量還原且影像清晰、分佈良好的控制點

一般最常採用控制點的方式進行還原，而由於尚未進行方位轉換計算，相片外方位元素仍是未知，仍無法利用式(2.1.1)進行還原計算，所以必須先利用已知的物體空間座標及相片座標先求解相片的外方位。

求解相片外方位最基本的原理，是運用共線式的數學模式(非線性)來描述控制點在相片空間與物體空間點的關係，在計算的時候必須將此非線性函式予以線性化，且需要外方位元素的起始值，再利用迭代計算的方式解得外方位元素最後的收斂值。

一般常用所謂的光束法(The Bundle Method)來求解，光束法就是利用多張照片將重疊的點做還原，稱為光束平差法，此時除了求解各張相片的外方位元素之外，還需同時求解連結點的物體空間座標，加入其他的觀測量，如物體空間控制點、內方位元素、物體空間距離、物體空間角度等。

圖 2-6 說明光束法中兩張相片與物體空間控制點的關係， O_L 點為左側攝影時的投影中心，其物體空間座標為 (X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}) ， O_R 點為右側攝影時的投影中心，其物體空間座標為 (X_{R0}, Y_{R0}, Z_{R0}) ，已知三個控制點的物體空間座標，經量測後分別可得到控制點在兩張相片上的相片座標。

未知數為兩張相片各六個相片外方位元素： X_0 、 Y_0 、 Z_0 、 ω 、 ϕ 、 κ ，共是12 個未知數。在這個例子中每個控制點可以列出四個觀測方程式(X_{Ri} , Y_{Ri} 以及 X_{Li} , Y_{Li})，列出所有控制點的觀測方程式後，經過平差計算可求解兩張相片的外方位元素。求解方法與單相後方交會法相同，都必須先將透過函式線式化，再將相片外方位元素的起始值帶入，以迭代計算的方式來求解相片外方位元素最後的收斂值。

若所採用的座標系是維持地面系統不變，而相空間座標系的各軸與地面座標系各個對應軸為互相平行的且方向相同，如圖 2-7 所示。

依據尤拉旋轉座標，選定各軸的旋轉角旋轉順序依次為先轉相片座標主軸x 軸旋轉 ω 角，然後繞 y 軸旋轉 φ 角，最後繞 z 軸旋轉 κ 角。因此，當相片座標與物體空間座標重合時，所組成旋轉矩陣可表示成下列各式：

$$m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa \quad (2.1.2a)$$

$$m_{12} = -\cos \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa \quad (2.1.2b)$$

$$m_{13} = \sin \varphi \quad (2.1.2c)$$

$$m_{21} = \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa \quad (2.1.2d)$$

$$m_{22} = -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \quad (2.1.2e)$$

$$m_{23} = -\sin \omega \cos \varphi \quad (2.1.2f)$$

$$m_{31} = -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \quad (2.1.2g)$$

$$m_{32} = \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \quad (2.1.2h)$$

$$m_{33} = \cos \omega \cos \varphi \quad (2.1.2i)$$

而共線式(2.1.1)為兩個非線性的觀測方程式，因此將經由相片量測後所得知控制點的相片座標(x_i, y_i)、焦距 f 、以及控制點物體空間座標(X_i, Y_i, Z_i)視為已知，將相片外方位元素($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$)視為未知數，則將共線式可表示成外方位元素的函式，如式(2.1.3)：

$$x_i = F_x(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad (2.1.3a)$$

$$y_i = F_y(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad (2.1.3b)$$

由於式 (2.1.3) 為非線性函數，所以仍須以相片(x_i, y_i)座標做為觀測量，以泰勒級數一階展開式將式 (2.1.3)予以線性化，可得到式 (2.1.4)：

$$x_i + v_{xi} = \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial X_0} \right]_0 \Delta X_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial Y_0} \right]_0 \Delta Y_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial Z_0} \right]_0 \Delta Z_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \omega} \right]_0 \Delta \omega + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \varphi} \right]_0 \Delta \varphi + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \kappa} \right]_0 \Delta \kappa + F_{xi}^0 \quad (2.1.4a)$$

$$y_i + v_{yi} = \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial X_0} \right]_0 \Delta X_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial Y_0} \right]_0 \Delta Y_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial Z_0} \right]_0 \Delta Z_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \omega} \right]_0 \Delta \omega + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \varphi} \right]_0 \Delta \varphi + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \kappa} \right]_0 \Delta \kappa + F_{yi}^0 \quad (2.1.4b)$$

由式 (2.1.4)得知，每個控制點可列出二個觀測方程式(x_i+v_{xi}, y_i+v_{yi})，若要求解六個外方位元素($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ 等六個未知數)，則至少必須要有三個控制點才能求解。因此，本研究應用光束法投影方式，利用二張照片投影將所有控制點的觀測方程式列出，輸入相片外方位元素的起始值，經由平差計算後，再以逐次迭代的方式求出外方位元素的收斂值。

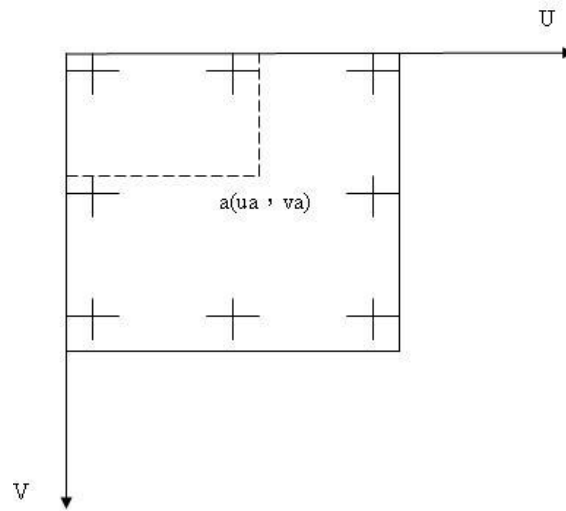


圖2-1影像座標系統示意圖

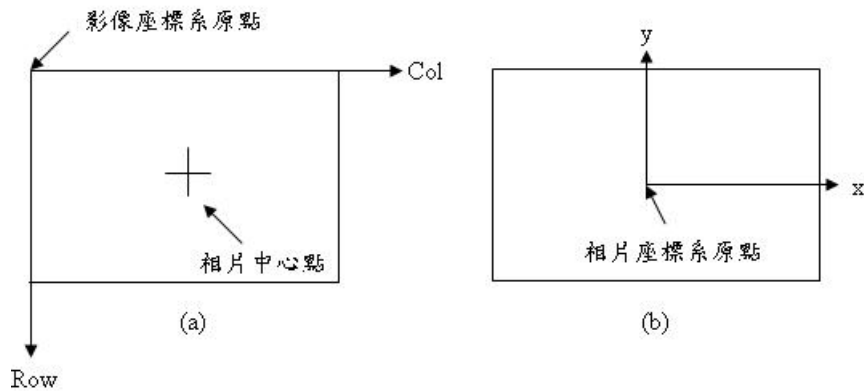


圖 2-2 影像座標與相片座標示意圖(a)影像座標(b)相片座標

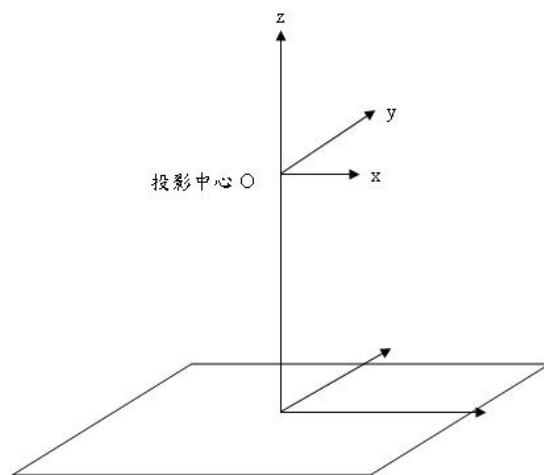


圖 2-3 三維相片座標系統示意圖

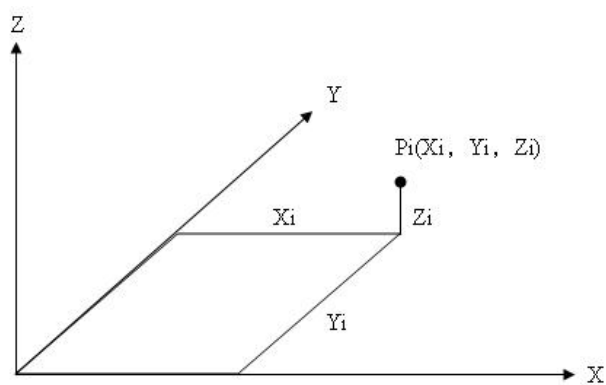


圖2-4 物體空間座標系統示意圖

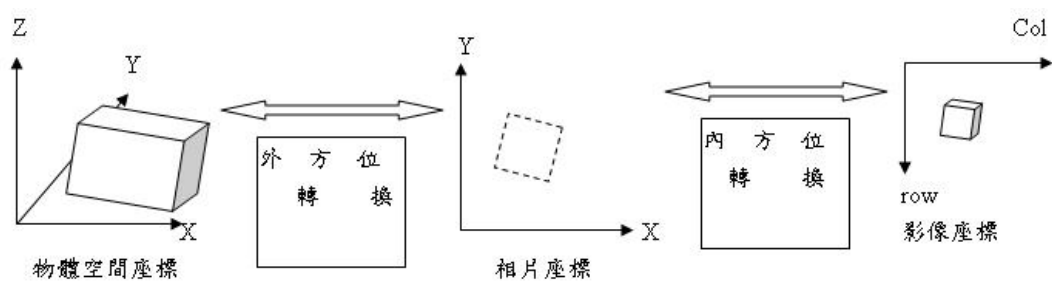


圖2-5 圖像投影三種座標系統與內、外方位轉換之關係

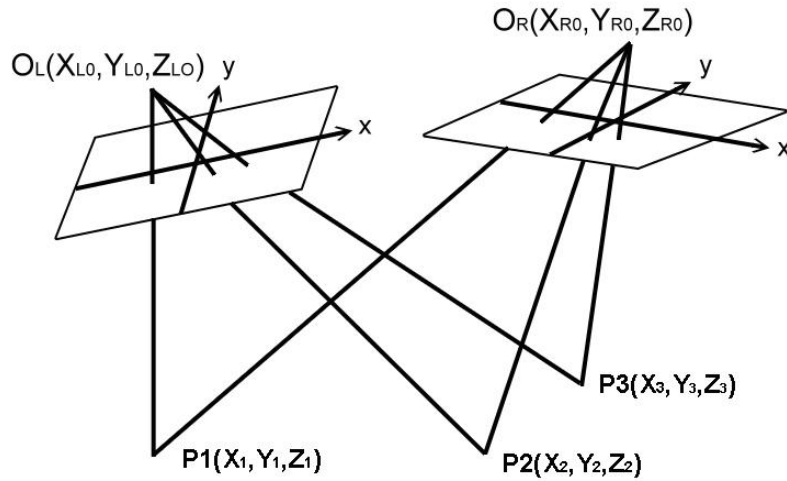


圖 2-6 光束法中控制點與相片之示意圖

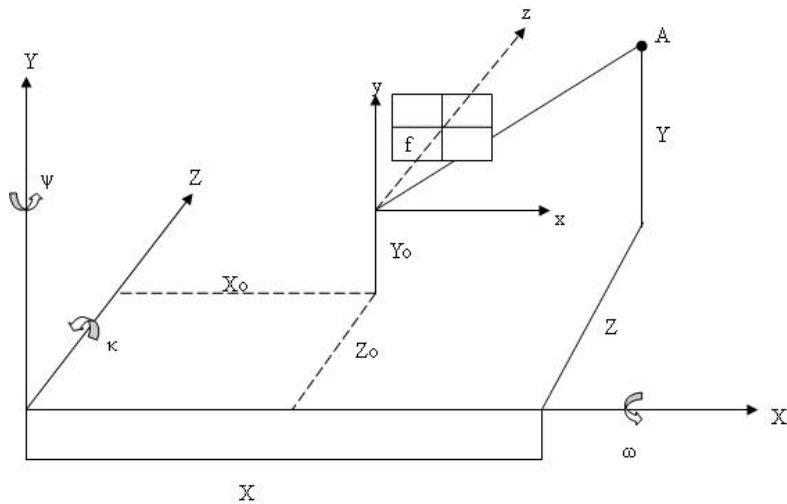


圖 2-7 座標系統示意圖

2-1-2 直接線性轉換法

Abdel-Aziz and Karara (1971)提出了一個所謂的直接線性轉換法 (Direct Linear Transformation)，簡稱DLT，用來從事求解圖像投影座標間的轉換關係。該法可以直接將觀測物體從影像座標系統直接轉換成物體空間座標系統，不必先將影像座標轉換成相片座標，然後由相片座標再轉成物體空間座標，這對於圖像還原技術提供了非常便利的方法。直接線性轉換實際上並不求解方位元素，而是解出參數，然而方位元素則隱含於各個轉換參數中。有了這些參數，則可建立影像座標系與物體空間座標系之線

性關係式，轉換參數之求得，則需仰賴於足夠的控制點。直接線性轉換法有下列特點：

- 1、因為是線性關係的直接轉換，故不需要參數的概略值，也不必求觀測方程式中的各個偏導數，當然也不必漸進求解。
- 2、電腦程式設計容易，所需儲存空間亦小，執行演算所需時間短而快，故極適用於個人電腦作業。
- 3、因不必將影像座標轉換成相片座標系統，所以因此不需要相機的框標。

直接線性轉換法主要是利用光束三點共線之理論予以化簡，從影像座標系統透過轉換參數直接計算物體空間座標系統。由圖2-8可知，攝影測量共線條件式為：

$$B^{(I)} = cA^{(I)} \quad (2.1.5)$$

其中，c為尺度參數（scale factor）。將式子改寫為下：

$$A^{(I)} = R \bullet A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \bullet A \quad (2.1.6)$$

$$B = cRA \quad (2.1.7)$$

$$\begin{bmatrix} u_w - u_{w0} \\ v_w - v_{w0} \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

其中，

- u_w, v_w : 像點之影像座標
- u_{w0}, v_{w0} : 主點(principal point)之影像座標
- d : 相機焦距
- λ : 尺度比例因子

r_{ij} : 轉換矩陣元素 (即2.1.2式的 m_{ij})

x, y, z : 實物空間中之某點座標

x_0, y_0, z_0 : 相機之物體空間座標

若已知內方位元素(u_{w0}, v_{w0}, d)與外方位元素(x_0, y_0, z_0)與旋轉角所決定的轉換矩陣元素 m_{ij} ，即可求解，而共線式並非線性，需利用泰勒展開式展開成線性式方可求解，DLT是將前二式連接成一虛擬的線性式。根據(2.1.8)式，改寫為下式：

$$c = \frac{-d}{[r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}(z-z_0)]} \quad (2.1.9)$$

$$u_w - u_{w0} = -d \frac{[r_{11}(x-x_0)+r_{12}(y-y_0)+r_{13}(z-z_0)]}{[r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}(z-z_0)]} \quad (2.1.10)$$

$$v_w - v_{w0} = -d \frac{[r_{21}(x-x_0)+r_{22}(y-y_0)+r_{23}(z-z_0)]}{[r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}(z-z_0)]} \quad (2.1.11)$$

因為真實空間中的度量單位通常為公制單位，而影像上是以像素為單位，因此兩者之間存在一轉換關係：

$$u_w - u_{w0} = \lambda_u (u - u_0) \quad (2.1.12)$$

$$v_w - v_{w0} = \lambda_v (v - v_0) \quad (2.1.13)$$

將(2.1.12)、(2.1.13)式代回(2.1.9)~(2.1.11)式中，並改寫為：

$$u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (2.1.14)$$

$$v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (2.1.15)$$

其中，

$$L_1 = \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \quad (2.1.16a)$$

$$L_2 = \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \quad (2.1.16b)$$

$$L_3 = \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \quad (2.1.16c)$$

$$L_4 = \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \quad (2.1.16d)$$

$$L_5 = \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \quad (2.1.16e)$$

$$L_6 = \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \quad (2.1.16f)$$

$$L_7 = \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \quad (2.1.16g)$$

$$L_8 = \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \quad (2.1.16h)$$

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D} \quad (2.1.16i)$$

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \quad (2.1.16j)$$

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \quad (2.1.16k)$$

$$d_u = \frac{d}{\lambda_u} \quad (2.1.16l)$$

$$d_v = \frac{d}{\lambda_v} \quad (2.1.16m)$$

$$D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \quad (2.1.16n)$$

$L_1 \sim L_{11}$ 即是所謂的DLT參數。若DLT應用在相機校正時，假設選定影像平面六個以上之控制點，(2.1.14)、(2.1.15)式則可以改寫為：

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.1.17)$$

然後利用最小平方法（Least Square Method）解出 $L_1 \sim L_{11}$ 。經過上述得到11個DLT參數之後，將(2.1.14)、(2.1.15)式再度改寫為：

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_9 & L_2 - uL_{10} & L_3 - uL_{11} \\ L_5 - vL_9 & L_6 - vL_{10} & L_7 - vL_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix} \quad (2.1.18)$$

同樣利用最小平方法，可解出對應點之物體空間座標。

DLT是利用 $L_1 \sim L_{11}$ 之11個參數來將影像座標系統與物體空間系統建立關係，此參數包含了三個內方位元素，六個外方位元素與影像座標和相片座標系轉換的兩個線性比例常數。在實用上，我們多使用方位元素值，故尚需求出參數與方位元素間的關係。至於相機之空間座標亦無法直接簡易求得，此需利用空間後交會理論，將已有之內方位元素，轉換矩陣元素對至少兩個控制點的實物空間和儀器座標，代入共線式中平差計算出 (x_0, y_0, z_0) 。

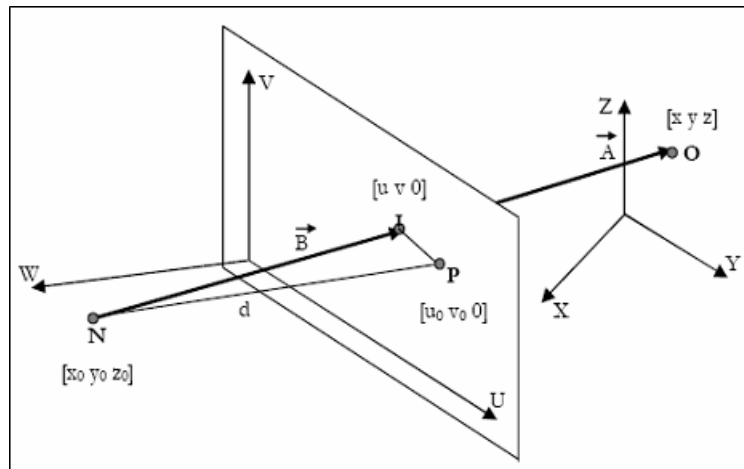


圖2-8 實物空間與相機空間之關係

2-1-3 立體影像重建

假設(2.1.18)式中 $L_1 \sim L_{11}$ 之11個參數為已知，當只有一台相機時，該式有兩個方程式，卻有三個未知數(x, y, z)，我們無法將二維影像重建回三維立體影像；必須有兩台以上相機時，才可以獲得三維影像，取得(x, y, z)資料。圖2-9是利用立體影像攝影機拍攝海面之示意圖，利用前述Abdel-Aziz and Karara (1971)所提出的DLT方法，我們可以找出海面上任一點(X_0, Y_0, Z_0)分別與三台相機上對應點的關係式，以矩陣的形式表示，如下式，

$$\begin{bmatrix} L_1^L - L_9^L x_{iL} & L_2^L - L_{10}^L x_{iL} & L_3^L - L_{11}^L x_{iL} \\ L_5^L - L_9^L y_{iL} & L_6^L - L_{10}^L y_{iL} & L_4^L - L_{11}^L y_{iL} \\ L_1^C - L_9^C x_{iC} & L_2^C - L_{10}^C x_{iC} & L_3^C - L_{11}^C x_{iC} \\ L_5^C - L_9^C y_{iC} & L_6^C - L_{10}^C y_{iC} & L_4^C - L_{11}^C y_{iC} \\ L_1^R - L_9^R x_{iR} & L_2^R - L_{10}^R x_{iR} & L_3^R - L_{11}^R x_{iR} \\ L_5^R - L_9^R y_{iR} & L_6^R - L_{10}^R y_{iR} & L_4^R - L_{11}^R y_{iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{iL} - L_4^L \\ y_{iL} - L_8^L \\ x_{iC} - L_4^C \\ y_{iC} - L_8^C \\ x_{iR} - L_4^R \\ y_{iR} - L_8^R \end{bmatrix} \quad (2.1.19)$$

式中L、C、R的上下標代表左側、中間與右側的相機，(x_i, y_i)代表在上述相機中的影像點位，上式可透過最小二乘法解出任意點位的影像灰度值，以建構成完整的三維影像。

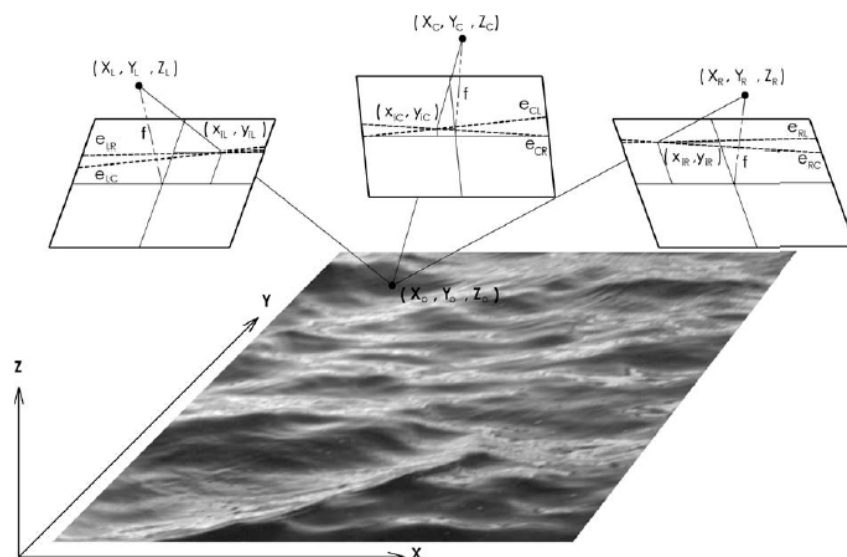


圖2-9 立體影像從事表面海況監測示意圖 (Wanek and Wu, 2006)

2-2 三維立體影像岸基系統組成

海洋觀測儀器在考量安裝地點、量測內容、使用環境等因素下，往往必須要做特殊之設計，一般商業化制式的產品並不一定能符合需求，目前中央氣象局的環島波浪觀測與潮位觀測站大多是由國內廠商提供規畫設計，研發適合的設備，減少對外國廠商的依賴。一般而言，一個自動化的海氣象水文觀測系統均包含以下幾個部分：(1)觀測載台(或站房)，(2)儀測子單元，(3)電力供給子單元，(4)資料擷取與分析子單元以及(5)資料傳輸子單元，如圖2-10所示。

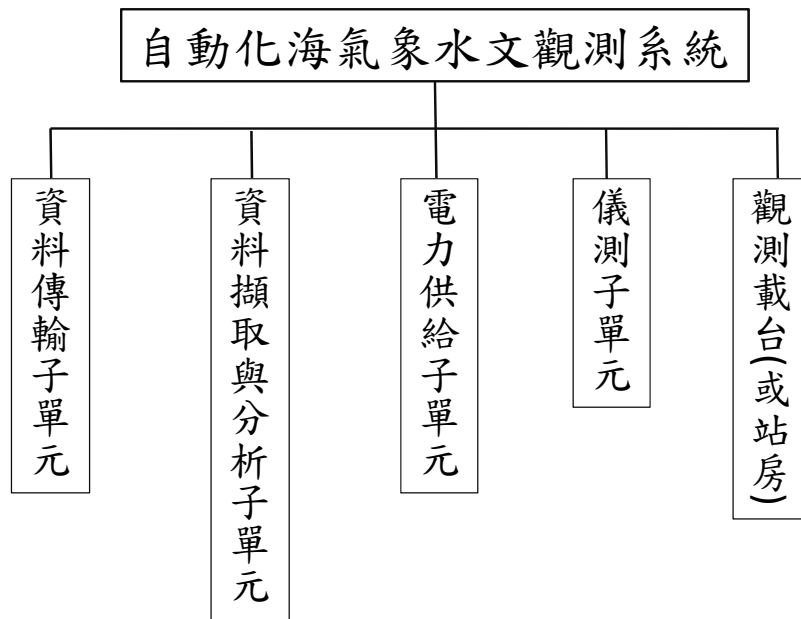


圖2-10 自動化海氣象水文觀測系統組成

在前述的自動化海氣象水文觀測系統框架下，本計畫所欲研發的立體海況影像觀測系統之架構繪如圖2-11所示，其中的儀測子單元是三台數位攝影機，此系統的電力供給直接採用室內固定供電，此乃因研發階段，不希望把太多精力花費在系統的硬體上，當此方法證實可行後，未來系統設置時再解決電力問題，為了測試研究使用，本計畫觀測系統購置了幾顆蓄電池，儲存必要的電力供緊急情形斷電時系統可以使用；而資料擷取與分析子單元是由一台工業級電腦(IPC)或筆記型電腦(NB)與資料擷取與分析程式組成，而本計畫的研究工作重點就是在於透過學理依據，開發資料擷取與分析的程式；至於資料傳輸子系統則透過固定光纖電路，如學術網路或電信公司提供的專線網路(如ADSL)將觀測影像與結果回傳至中央氣象局。整體而言，由於本計畫之立體海況影像觀測系統預計將設置在岸邊現場建築物上，減少了在電力供給與資料傳輸上所可能遭遇的困難，讓此計畫可以將研究能量集中在分析方法的探究上。圖2-12是節錄自 Wanek and Wu(2006)論文的立體海況影像觀測系統，也是本計畫研究在建置立體海況影像觀測系統時的參考對象，但本計畫預計將此系統應用到海邊現場觀測，因此整體設計將有所改良。

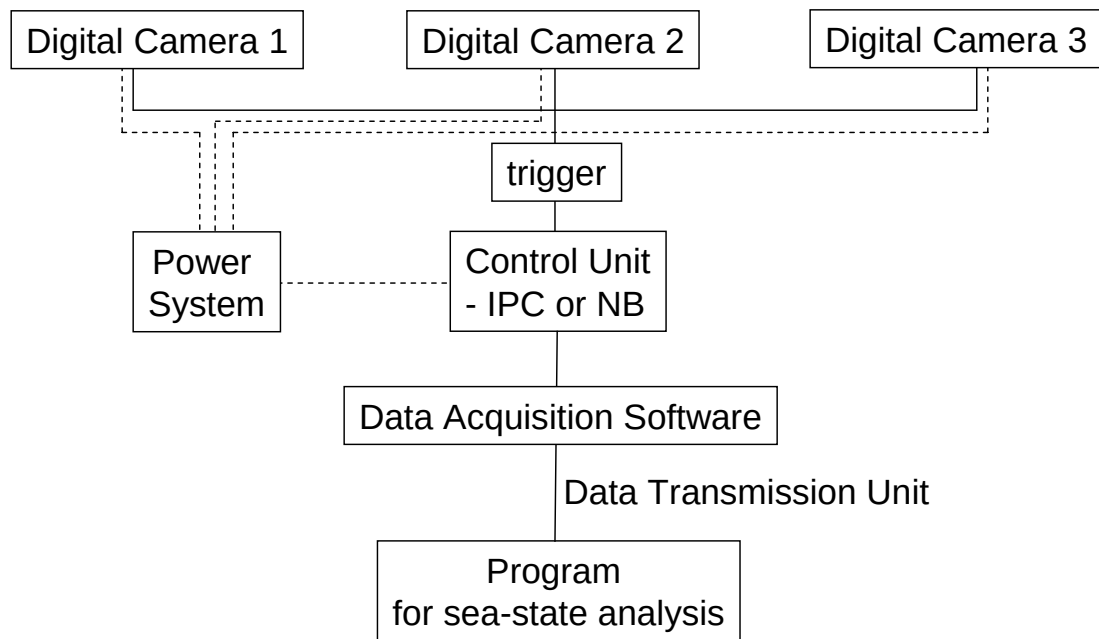


圖2-11 立體攝影系統架構

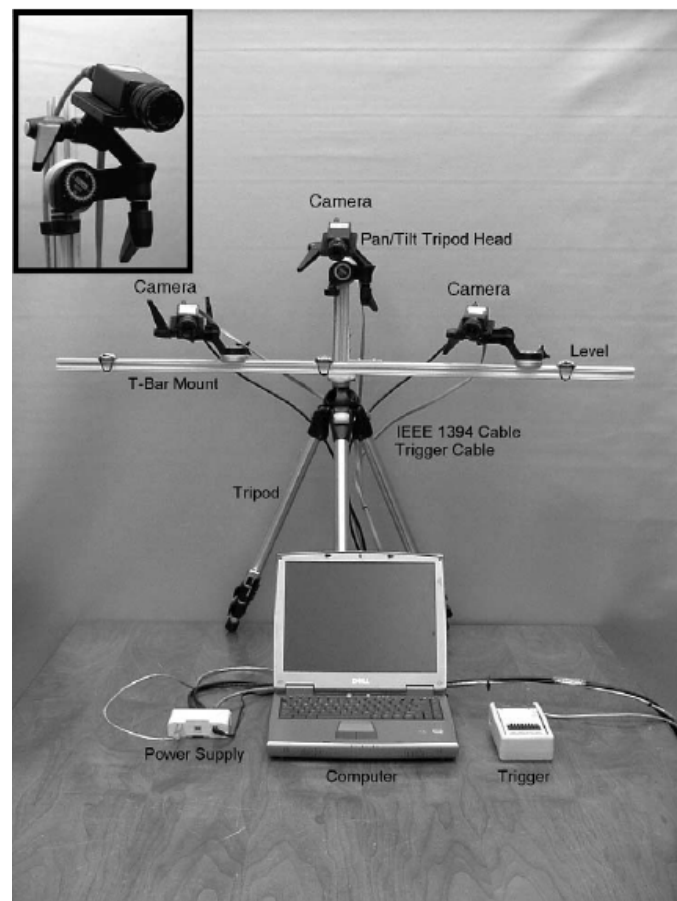


圖2-12 立體海況影像觀測系統

(節錄自 Waneke and Wu, 2006，為本計畫系統設計之參考對象)

由於本計畫之研究目的主要在於建立立體海況影像分析方法，探討其觀測正確性，因此雖然在本計畫期間將會設置一座觀測系統，但它將是屬於短時間、研究屬性的觀測站，在本計畫結束後有可能會進行拆除，計畫期間也可能因為研究上的需要而時常拆裝，因此，為了節省研究經費與研究上的便利考量，本計畫設計了一套簡便的立體海況影像觀測系統，提供本研究的室內校正與戶外測試研究需要。表2-1則列出本計畫組裝之立體海況影像觀測系統的各部分組成。表2-2為本系統之電力計算，搭配四顆蓄電池，備用電力可以使用51小時，超過2天。

表2-1 本計畫組裝之立體海況影像觀測系統各子單元內容

	內容	功能	數量	主要規格	備註
觀測載台 (或站房)	十字形鋁支架	固定觀測系統	2 座	寬 1~2m 高 1.5~2m 室內支架可收合	研究測試使用簡易支架，非長期站塔。
儀測子單元	高速數位攝影機	主要觀測元件	3 台	拍攝速率每秒 10 張 (10fps, full resolution) 數位解析度 12bit	
電力供給子單元	由交換式直流充電設備 (SMR)與蓄電池組成	轉換室內電力供系統使用、停電時供備用電力	1 組 SMR 4 顆蓄電池	SMR 直流電輸出電壓 $24V \pm 10\%$ ，電流 0-30A。 每顆蓄電池容量 12V 120AH	
資料擷取子單元	工業級電腦與影像擷取軟體	控制系統運作並進行分析	1 台	Intel Core 2 CPU 6700 2.66GHz HD 300G 具有 IEEE 輸入介面	
資料傳輸子單元	學術網路、網路控管終端機	可傳回影像並可遠端遙控	1 組	固定 IP	學術網路由海洋大學提供

表2-2 本計畫立體海況影像觀測系統耗電計算

設備名稱	負載消耗功率(W)	消耗電力(AH)	備載時數計算
三台攝影機	24	2	電力供給： $100\text{AH} \times 4 = 400\text{AH}$ 總耗電：7.75AH 備載時數： $400 \div 7.75 = 51.6 \text{ hr}$
網管系統終端機	21	1.75	
自我偵測主機	6	0.5	
控制與錄影主機(IPC)	42	3.5	
合計	93	7.75	

立體海況影像監視系統中最重要的元件就是高速數位攝影機(high-speed digital camera)，一般的數位相機拍攝速度不夠快且無數位輸出，只能判釋影像進行定性分析，本計畫原採用的攝影機為加拿大QImaging公司出廠的QICAM高速攝影機，但因此攝影機使用外部觸發必須另外供電，目前國內外還沒有合適之觸發器開發出來，本計畫改用3台德國Basler Vision Technologies公司之Scout series 攝影機: scA1390-17gm (圖2-13)。其取樣速度最高達到每秒17張(17fps)影像，可以解析變化速度非常快的波浪現象，由於是快速的影像拍攝，傳輸方式採用Gigabit Ethernet網路傳輸介面，資料傳輸速度達每秒Gigabit，而且資料傳輸距離可至100公尺，遠比IEEE1394介面之4.5公尺長。此100公尺傳輸距離意味著兩台網路傳輸介面攝影機可相距200公尺不必加信號強波器(signal booster)，方便運用於遠距立體影像拍攝。但是用網路傳輸介面的攝影機必須另外獨立供電，而IEEE1394介面之攝影機則可由6-pin介面直接供電。此Basler數位攝影機已內建有數位輸出，數位解析度為8或12bit，代表對拍攝物體的反應可以用0表示到4095來表示。Basler scA1390-17gm攝影機之規格如表2-3。此攝影機是採用SONY公司的單色循序式掃瞄CCD，其垂直與水平掃瞄線達1392×1040條，每個像素大小為4.65μm×4.65μm，在全解析度(full resolution)狀況下，每秒可拍攝17畫面。多台相機之同步攝影可由內IEEE1394、外部觸發(triggering)、自動(free run)等方式來控制。為確實達到多台攝影機能同步攝影，本計畫採用GW Instek之外部觸發器(圖2-14)。此觸發器之觸發頻率可達2MHz。本計畫使用約10Hz之正方形波(square wave)，即每部攝影機

每秒同步拍攝約10 張影像。

本計畫所使用之鏡頭為CCTV (Closed Circuit Television) 鏡頭。CCTV 鏡頭是為了在寬廣範圍中確認影像而開發，所有型號的光圈及焦點均可利用附設的鎖緊螺絲，隨使用者的意向而調校。表2-4為本計畫所使用之鏡頭規格，圖2-15為11.5mm-69mm可調焦距式CCTV鏡頭，圖2-16分別為16mm、25mm、35mm CCTV鏡頭。

高速數位攝影機(high-speed digital camera)所錄製下的畫面經由網路介面傳輸至工業電腦，為了計算龐大且複雜的數據資料量，需使用運算效能高、資料儲存量之電子計算機，本計畫所使用之工業電腦規格如表2-5。圖2-17為本計畫所使用之工業級電腦，圖2-17(2)為電腦背面，其顯示電腦共有3組 Gigabit Ethernet網路介面與網路線，可各連接到一台 Basler scA1390-17gm高速攝影機。



圖2-13 Basler scA1390-17gm高速攝影機外觀

表2-3 Basler scA1390-17gm攝影機規格

型號	scA1390-17gm
CCD 感應器	
感光像素	1392×1040 (140 萬像素)
Binning	2x2, 4x4, 8x8
感應器型式	SONY 單色循序式掃描 CCD ICX267 (Progressive scan, 1/2")
像素大小	4.65μm×4.65μm
數位解析度	8、12bits
取樣速度	達 17fps
輸出界面	Gigabit Ethernet (GigE Vision compatible)
資料速度	Gigabit/s
同步方式	IEEE1394、外部觸發(triggering)、自動(free run)
電力需求	12-24 V, 3.5W at 12V
重量	110 gm



圖2-14 GW Instek之外部觸發器 (trigger)

表2-4 本計畫所使用之鏡頭規格

型號	S6X11	ML-1614	ML-2514	ML-3519
焦距	11.5~69mm	16mm	25mm	35mm
光圈	F1.4~Close	F1.4~Close	F1.4~Close	F1.9~Close
相對孔徑	F=1:1.4	F=1:1.4	F=1:1.4	F=1:1.9
視角	31.1° x 23.6° at 11.5mm 5.30° x 4.00° at 69mm	30.8° x 23.3°	28.5° x 21.6°	14.4° x 10.8°
操作方式	對焦:手動調整 變焦:手動調整 光圈:手動調整	變焦:手動調整 光圈:手動調整	變焦:手動調整 光圈:手動調整	變焦:手動調整 光圈:手動調整
Mount	C-mount	C-mount	C-mount	C-mount
直徑 x 鏡長	Ø 58 x 109 mm	Ø 30 x 30.0mm	Ø 30 x 30.1mm	Ø 30 x 33.1mm
重量	約 395 克	約 40 克	約 40 克	約 77 克



圖2-15 本計畫所使用之 11.5-69mm 可調焦距式CCTV鏡頭



圖2-16 本計畫所使用之16、25、35mm 定焦距CCTV鏡頭

表2-5 本計畫所使用工業電腦詳細規格

核心處理器	Intel Core 2 CPU 6700 2.66GHz
記憶體	1 GB
硬碟容量	300GB
顯示卡	Intel Q965/q963 Express Chipset Family
系統	Microsoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack3
傳輸介面	IEEE1394 與 Gigabit Ethernet



(1) (2)

圖2-17 (1)本計畫所使用工業電腦之正面圖 (2)背面圖(3組Gigabit Ethernet 網路界面與網路線各連接到一台Basler scA1390-17gm高速攝影機)

本計畫所使用之影像擷取軟體為NorPix公司所研發之StreamPix 4，StreamPix軟體是專為數位高速度圖像擷取所設計，它可以將攝影機所攝取之畫面完整的存入儲存裝置內，並且支援同時多部攝影機之影像拍攝及多影像的擷取，影像輸出可儲存BMP、JPEG、TIFF、PNG、AVI格式，支援IEEE 1394、Color RGB、NTSC、RS170、USB、CameraLink, GigE傳輸方式，此外其人性化介面使操作更為簡易。圖2-18為StreamPix軟體操作介面。由於StreamPix為付費授權之軟體，安裝好StreamPix後，使用前必須先

插入USB Key 於工作電腦的USB插孔中解鎖，才可讓該軟體抓取攝影機之影像。

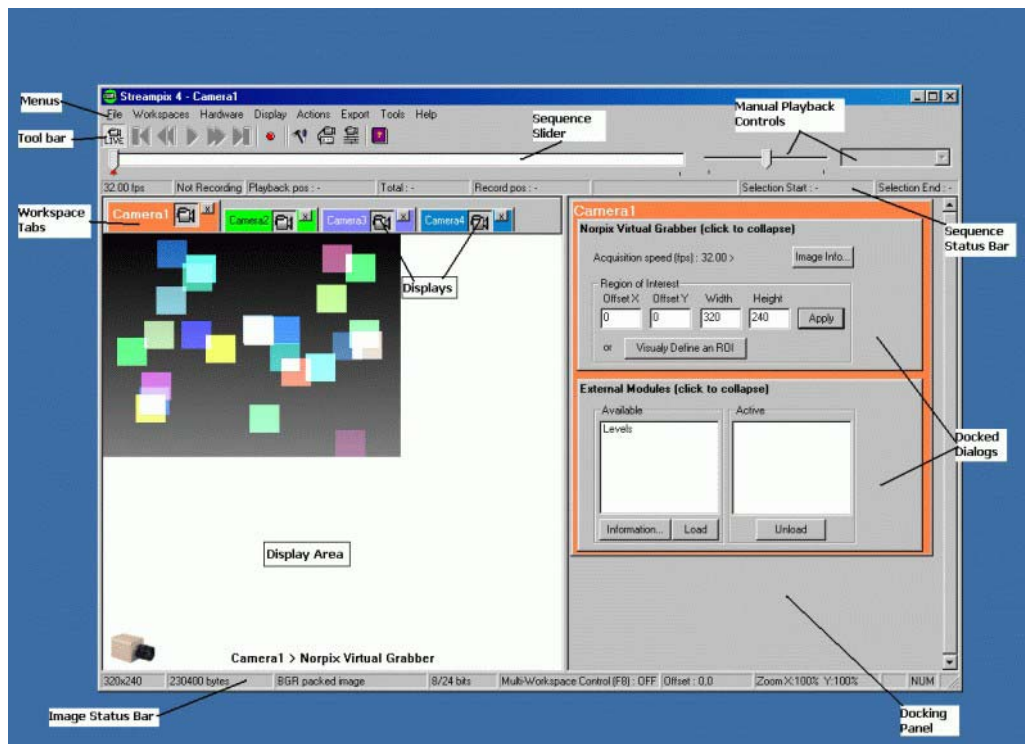


圖2-18 StreamPix 4軟體介面

將以上各元件整合後即為本計畫用以測試之海象觀測系統。本計畫測試所使用之各元件之組裝整合圖如圖2-19，首先將數位攝影機固定於支架上三端點。再將支架與三腳架結合，接著將攝影機與工業電腦以網路線相連，使攝影機所攝取之影像得以在電腦螢幕上顯示，並可經由StreamPix軟體將影像擷取，最後儲存於工業電腦硬碟內。



圖2-19 本計畫使用之各元件組裝整合圖

2-3 國內外相關研究

利用攝影機影像從事海洋物理觀測研究最常見到應用於海灘剖面 (beach profile) 變形監測之研究，如 Holman et al. (1991)、Plant and Holman (1997) 等人，Plant and Holman (1997) 利用碎波在灘線會有光線強度最大值之特性，與因在一潮汐週期內此灘線會隨潮汐移動，他們利用一潮汐週期內不同時間得到的影像繪出潮間帶海灘等高線圖，該研究僅使用單一攝影機，每張影像為10分鐘平均，每0.5小時1張影像，獲得合理的研究成果。Kroon et al. (2007) 用類似於前文之方法從10分鐘平均的影像得到特定高度區間內之灘線等高線圖，潮間帶海灘體積，瞬間灘線位置，這些海岸參數可用於海岸管理。

Santel et al. (2004) 在德國北海一島嶼之海岸用3維立體影像法量測碎波帶之波浪，其目的為將立體數位影像序列 (stereoscopic image sequences) 經影像匹配 (image matching) 後重建出數位水面模式 (digital surface model, DSM)，該文使用電腦軟體 LISA (Linder, 2003) 進行影像匹配，此軟體從立體數位影像中先對預定之種子點 (seed points) 以交相關係數 (cross correlation) 作逐點匹配 (point-wise matching)，該程式進一步可產生之立體影像雲點

(three-dimensional point cloud)，將這些雲點內差就可得到數位水面模式。

應用攝影機在水利海洋的研究一開始大都是在室內實驗室進行，實驗室中的環境比較能夠掌控，但如果將攝影機拿到戶外現場從事觀測研究，會遭遇到許多現實的問題，譬如環境的衝擊，如風造成震動、雨或霧對觀測的遮蔽、觀測距離的限制、光線角度的變化等，另外，在現場，觀測物理現象的尺度和實驗室比起來相距甚多，實驗室的波高、波長是公分等級，現場的波浪則以公尺甚至上百公尺等級，觀測物體的距離動輒上百公尺，這些條件和攝影機在實驗室的觀測有非常大的差別。近十年來，利用攝影機從事現場的海洋觀測研究先驅首推美國海軍實驗室(Naval Research Lab)的K. Todd Holland等人，Holland et al. (1997)發表一篇利用攝影機在近岸海洋實務應用的學術論文引起後續很多的仿效與研究，Holland et al. (1997)研究最大的貢獻在於將傳統攝影學中座標轉換的觀念應用到實際現場的問題上，並提出兩階段相機率定的方法，在他的論文中，包含的率定過程的敘述與學理的介紹以及現場實務的應用。他指出利用攝影技巧從事現場物理量的定量(quantify)觀測，最重要的過程就是將該物理量在真實世界的三維(3D)座標轉換到影像平面上的二維(2D)座標。這個轉換過程包含兩個部分的參數必須取得，第一是在定義座標系統中，攝影機位置與方位的幾何描述，我們把描述這些幾何位置與方位的參數稱之為外部參數(extrinsic parameters)；第二個部分是指描述鏡頭、相機與影像擷取系統特性等參數，這部分稱之為內部參數(intrinsic parameters)，這樣子的過程就是所謂的相機率定(camera calibration)。過去有很多相機率定方法被提出，這些方法不外乎都需要輸入一個地面控制點(ground control points, GCP)在實物空間中的座標與相片平面上的座標以求解，Holland et al. (1997)提出一個兩階段的率定方法解決需要尋找地面控制點的問題，他們並把率定後的攝影機應用到現場觀測研究上。

陳等(2006)用動態輪廓模式來偵測、追蹤連續影像上的邊緣特徵，配合影像座標轉換與現場測量，來分析旗津海岸公園在夏季季風以及珍珠颱風期間之海岸波浪影像，因其可得實際影像尺寸，可追蹤波浪淺化時波峰線之變化以及波浪之週期、波長、波速、碎波位置等相關數據。該研究將Sony DCR-TRV40 DV與所使用Pentax PCS-335之光波測距經緯儀架設於旗津旗

後砲台，攝影鏡頭與水平線夾角6度，DV影像有155萬畫素。此研究之影像座標之轉換成實體座標亦使用Holland et al. (1997)建議之直接線性轉換(Direct linear transformation)法，另在影像範圍內設置兩地面控制點，用光波測距經緯儀測出控制點間之距離，以還原影像點間之實體距離。

陳等(2006)認為在影像範圍內盡量不要有非常明顯之凸起物，因座標轉換過程中我們假定所觀測區域內的景物皆在同一水平面上，因此如有凸起物，便會造成嚴重錯誤。還有座標轉換後的影像在遠處的解析度會大幅下降，使分析上產生誤差。解決的方式為提高攝影機所取得的影像解析度，解析度越高，轉換後影像也相當越細緻。不過陳等(2006)與本計畫較大差別是他們用一部攝影機，其主要目的為發展邊緣偵測法，因此未作立體影像。

蕭等(2008a)應用一台具有上下左右轉向功能之攝影機拍攝不同方位之影像以取代多台拍攝不同方向之攝影機。他們將發展的系統置於西子灣作長期海岸監測，拍得之影像經座標轉換、邊緣偵測等影像處理後，可觀測得海岸變遷的過程。另蕭等(2008b)描述於西子灣利用近岸影像觀測系統作波浪分析之步驟。

簡與郭(2008)於台東香蘭海岸設置標尺觀測基樁與影像監視系統進行水位與灘面變化監測。該研究利用數位影像辨識方法萃取各影像中樁尺水位與灘面高程。經與臨近波浪測站資料比對發現萃取水位之波高週期尚屬合理。灘面高程與動態衛星定位系統所檢測之高程值亦接近。

港灣出入口航道的波浪可能會影響到進出船舶航行的安全，港口航管單位有必要知道航道的波浪特性，用影像測量法的好處是在交通頻繁的航道很難用傳統的測波儀。MacHutchon et al. (2008)敘述他們在南非開普敦港之航管大樓屋頂架設數位影像系統，該系統僅錄未校正之數位影像(即CCTV，閉路影像系統)，由影像之光強度可看來波峰位置。

Piepmeier and Waters (2004)在波浪實驗室的光學遙測波浪系統，其觀測幅角為 50° ，在水槽中可用的波浪觀測面積為 $0.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 。他們利用Point Grey研究團隊在Matlab環境下所發展的Digiclops軟體，處理成三維波浪影像。在這研究中，所反演出的規則波的波高與波長，和現場的波高計測量結果十分接近。Piepmeier and Waters (2004)在實驗過程中也發現，在實驗水

槽中利用光學遙測波浪時，因為天花板、水槽底板等結構物的影響，使得水面波紋不易辨識。由於拍攝影像可用幅寬的限制，使得短波長波浪的估算的準確度較好。

拍攝波場變化時，是將立體的三維水面變化(平面座標的橫軸、縱軸以及波浪高程)投射至平面的二維(平面座標的橫軸和縱軸)相片上，波高的資訊會因此而失去。然而，由於水面變化會造成光輝度(luminance)的變化，這些不同強度的光透過照相機鏡頭後，投射至底片曝光會產生不同色澤的陰影。而遙測則可以透過分析這些陰影來還原波高資訊，以達到觀測波場變化的目的。Stilwell and Pilon(1974)指出，水面變化所顯現光的輝度與波浪頻譜能量成正比，因此，可以藉由分析底片上的陰影強度，還原水面變化高程的變化。由上述可知，光源對影像遙測分析結果的影響相當大。

Keller and Gotwols(1983)利用CCD攝影系統觀測實驗室裡水槽波場的變化，實驗的照明設備設置於拍攝範圍內的水底，採用一長列的螢光燈組排列於半透明的矽膠盤邊緣，形成發散均勻的燈源；攝影機採垂直向下的方式進行錄像，由於螢光燈源排成列狀，因此，畫面裡波浪顯現的輝度會隨著與燈源的距離增加而成指數形式下降，若未進行任何的調整修正，畫面裡光強度的統計分佈，並不會呈現常態分佈的形式，為了減少光源對計算結果的影響，該研究在攝影機鏡頭前加裝楔形的減光鏡片，使整張拍攝畫面受光的情形趨向於一致，結果發現在加裝減光鏡片後，畫面裡波浪顯現的輝度分佈則接近於常態分佈。

Klinke(1996)除了在實驗室進行上述相同的實驗外，同時設計新的量測方式，分別在實驗室以及現場量測裡應用，在實驗室進行的實驗裡，以透明的薄片彎曲成不同曲度的正弦波，圍繞放置於拍攝範圍邊，藉由這些已知斜率的人造波來率定實際的波浪斜率。另外，燈源的部分則改採用LED燈組，均勻的排列於整個拍攝範圍內，使得整張畫面裡波浪顯現的輝度保持均一。在現場拍攝時，攝影機則架設於浮球的正上方，盤狀的燈源則沒入水中，同時觀察風波的成長、消散和海氣交互作用的機制。

Gotwols and Irani(1980)利用CCD攝影系統觀測現場波浪，並計算重力波的相位速度，攝影機架設於量測平台上，斜向拍攝水面，由於並未設置其它輔助燈源，水面輝度直接受到自然光照度的影響，所以量測時，需要

同時以另外一部攝影機拍攝天空的照度以方便比對，由於拍攝過程是在一定的擷取速率下錄製畫面，所以可以計算波場在時間域裡的變化。Lubard et al. (1980)也利用數位攝影機觀測現場波浪，發現水面反射光射至鏡頭的機制與兩個角度有較大的相關性，一是波浪斜率的法線與攝影機的夾角，二是波浪斜率的法線與水平面的夾角，如將這兩個角度加以考量時，則可以推導出波浪表面斜率與波高二維波數譜間的關係式。Senet et al. (2000)以CCD攝影機在實驗室平面水池裡遙測波場，照明設備採用投射燈向上投射至水面上大帆布後成為發散的光源。另外並提到，雖然拍攝影像範圍是方形的，但是實際攝入的波場範圍隨著與攝影機的距離增加而更為寬廣，若是沒有進行任何修正的話，在計算二維波數譜時，則會產生極大的誤差。

除此之外，Hilsenstein (2005)、Piepmeier and Waters (2004)均利用兩台的數位攝影機在實驗室中紀錄水槽中的波動，Benetazzo(2006)使用雙眼望遠鏡頭(binocular)來從事波浪觀測研究。

本計畫則擬應用Wanek and Wu(2006)所提出來的的方法，利用三台數位相機，觀測近岸水位進行立體映射(stereo imaging)，數位化的海面動態資料可以用來重建波場。

2-4 內部校正

攝影機校正(calibration)是立體海況影像觀測的技術關鍵(Wanek and Wu, 2006)。攝影機校正包含兩個部分，第一是內部校正(Interior calibration)，第二是外部校正(Exterior calibration)。內部校正的目的有兩個，第一的目的是求取主軸點(Principle Point)；第二個目的則是在校正因透鏡誤差所造成之影像扭曲變形的現象。

參考圖2-9，圖中海面上任一點(X_0, Y_0, Z_0)投影到左側相機上的點為(x_{iL}, y_{iL})，根據直接線性轉換理論(Abel-Aziz and Karara, 1971)，這兩點之間的關係可以寫成下式，

$$x_{il} = \frac{L_1^L X_0 + L_2^L Y_0 + L_3^L Z_0 + L_4^L}{L_9^L X_0 + L_{10}^L Y_0 + L_{11}^L Z_0 + 1} \quad (2.4.1)$$

$$y_{il} = \frac{L_5^L X_0 + L_6^L Y_0 + L_7^L Z_0 + L_8^L}{L_9^L X_0 + L_{10}^L Y_0 + L_{11}^L Z_0 + 1} \quad (2.4.2)$$

式中 $L_1, L_2, L_3 \dots L_{11}$ 為攝影機參數的函數，這些攝影機的參數包含了攝影機的姿態(對各軸的旋轉角)、焦距(focal length)以及光學中心(optical center of camera)等。當這些攝影機的參數為已知時，直接線性轉換法就可以透過上述方程式將三維的空間物理座標轉換為二維的影像座標。

為了進行內部校正，本計畫製作了一塊校正板，如圖2-20所示，校正板的大小為75公分x75公分，板上佈滿等間距的校正點，校正點為直徑2公分大小的圓，兩校正點之間的距離為6公分。進行內部校正時，將校正板和相機(CCD平面)擺設至平行的狀態，因此式(2.4.1)與式(2.4.2)中的 Y_0 為零，方程式簡化為下式，

$$XL_1 + ZL_3 + L_4 - x_d XL_9 - x_d ZL_{11} = x_d \quad (2.4.3)$$

$$XL_5 + ZL_7 + L_8 - y_d XL_9 - y_d ZL_{11} = y_d \quad (2.4.4)$$

式中 (x_d, y_d) 為校正點在相片座標上的座標，是未校正時受扭曲的座標(distorted coordinate)，而 (X, Z) 則為校正板上某校正點的座標。實際進行校正作業時，需至少選取校正板上任意四個點，根據這四個點在校正板上的座標以及在影像上的座標代入(2.4.3)式與(2.4.4)式求解式中的係數 L_i ，完成校正後，未來只要知道物體空間上任一點的座標 (X, Z) ，它投影在相機裡未扭曲的座標 (x_p, y_p) 則可由(2.4.5)和(2.4.6)式預測得知，此預測式係在相機投影幕與觀測物體平面平行的條件下所得。

$$x_p = \frac{XL_1 + ZL_3 + L_4}{XL_9 + ZL_{11} + 1} \quad (2.4.5)$$

$$y_p = \frac{XL_5 + ZL_7 + L_8}{XL_9 + ZL_{11} + 1} \quad (2.4.6)$$

內部校正的第二個目的是在求主軸點的位置。相機拍照後因為透鏡的像差造成成像的扭曲，拍攝後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)，它與距離主軸點的徑向距離有關，如圖4-21所示，愈接近主軸點，徑向扭曲愈小。Holland et al. (1997)回歸出徑向扭曲量值與徑向距離的關係，如圖4-22所示，其最佳的回歸方程式為一個奇次方多項式(odd-order polynomial)，如下式，

$$\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r \quad (2.4.7)$$

式 r 為影像中心 (x_0, y_0) 到影像上某點 (x_d, y_d) 的距離，因此可得徑向扭曲量值由下式表示

$$\Delta r = \sqrt{(x_d - x_0)^2 + (y_d - y_0)^2} - \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2} \quad (2.4.8)$$

如同前述， (x_p, y_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 (x_0, y_0) 代入(2.4.7)和(2.4.8)，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。

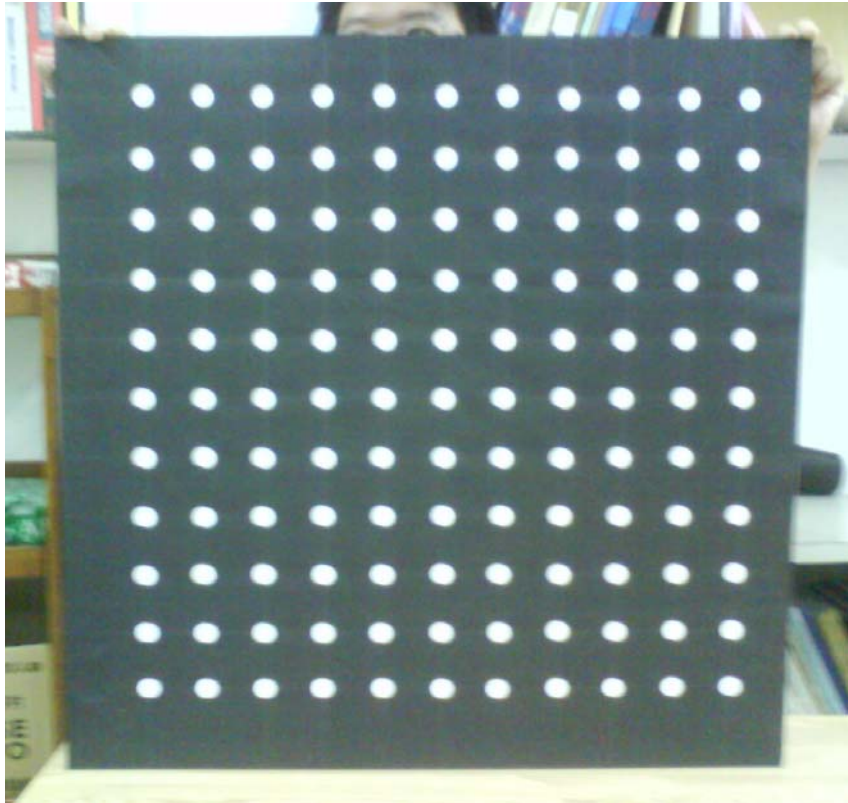


圖2-20 本計畫所製作的攝影機內部校正用板

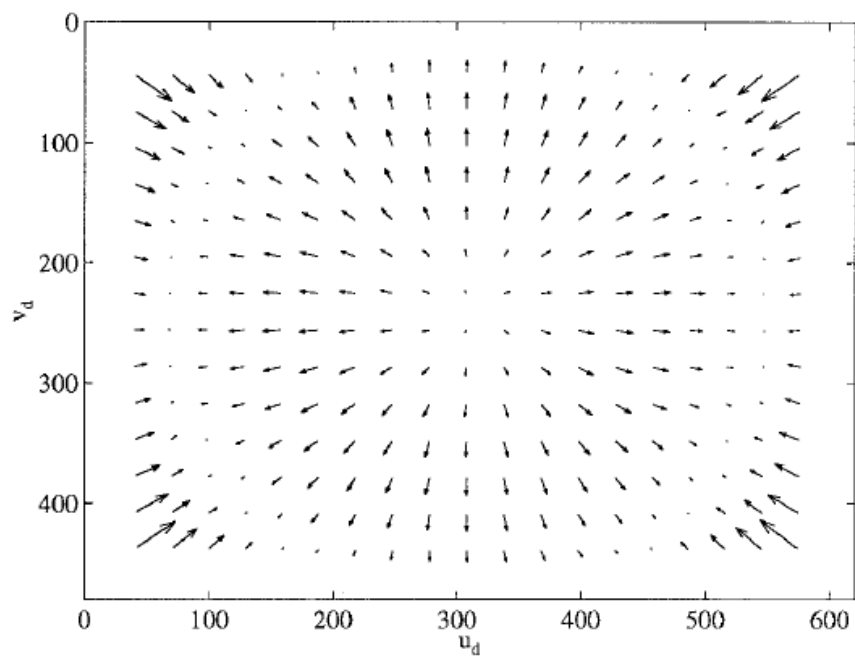


圖2-21 徑向扭曲大小分佈示意圖(箭號長度代表扭曲的量值)
(Holland et al., 1997)

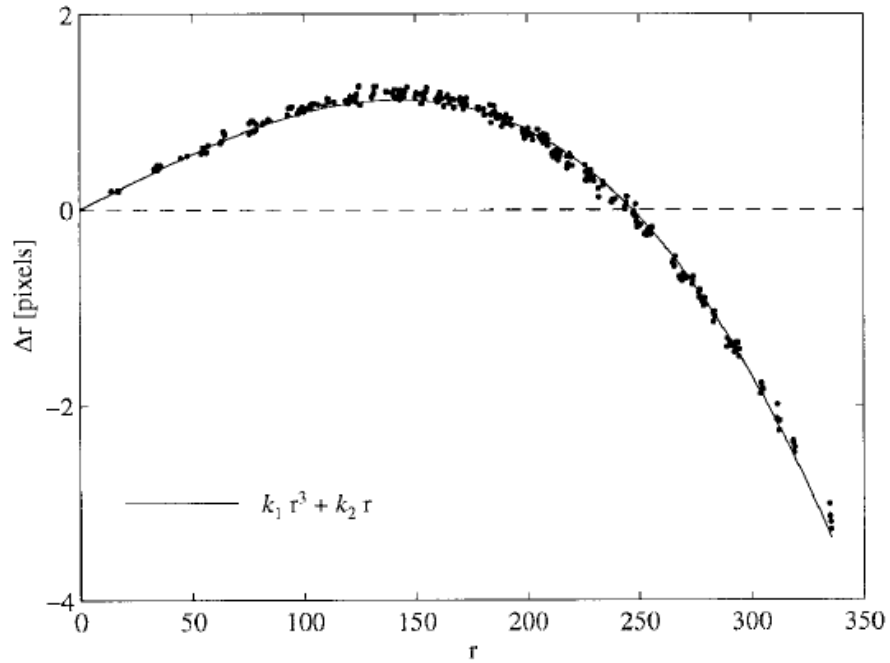


圖2-22 徑向扭曲量值與徑向距離的回歸關係 (Holland et al., 1997)

攝影機的校正成效攸關重建之立體影像的正確性，因此在佈置時必須謹慎。為了驗證可能對校正結果造成影響的因素，本計畫設計了一系列的敏感度測試，希望由此避免人為試驗誤差造成的影響。考量因素包括：

- 校正點的大小是否影響校正結果？
- 校正的距離是否對校正結果有影響？
- 相機鏡頭焦距是否對校正結果有影響？
- 校正佈置(平行與否)對校正結果影響之敏感度為何？

因此，為從事內部校正試驗，本計畫製作五片校正板，如圖 5-23 所示，其規格如下：

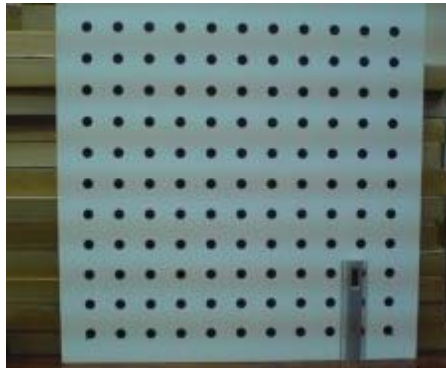
校正板【A】：直徑 2 公分之圓形校正點，校正點間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 121 點)

校正板【B】：直徑 0.6 公分之圓形校正點，校正點間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 121 點)

校正板【C】：棋盤式校正板，棋盤間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 121 點)

校正板【D】：棋盤式校正板，棋盤間距 3 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 529 點)

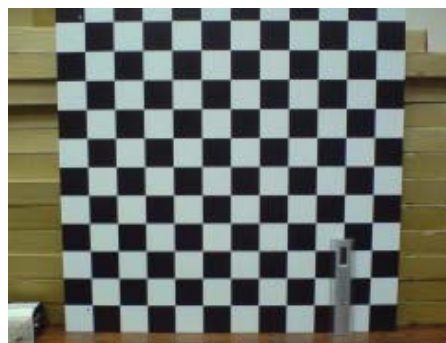
校正板【E】：棋盤式校正板，棋盤間距 1.5 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 2209 點)



【A】圓點，直徑2公分



【B】圓點，直徑0.6公分



【C】棋盤格點，間距6公分



【D】棋盤格點，間距3公分



【E】棋盤格點，間距1.5公分

圖2-23 本計畫進行內部校正所設計之五種校正板

內部校正執行步驟列點如下：

Step1: 攝影機拍攝校正板。取得校正點實物空間座標(X, Y) (單位為 cm 或 mm)，以及扭曲影像上的座標(distorted image coordinate) (x_d, y_d)，單位為 pixel。

Step2: 選取多個校正點，利用 (2.4.3)、(2.4.4)式求解八個 DLT 參數($L_1, L_3, L_4, L_5, L_7, L_8, L_9, L_{11}$)。

Step3: 根據所得之八個 L 參數，(2.4.5)、(2.4.6)式求解預測的未扭曲座標(predicted undistorted image coordinates) (x_p, y_p)，單位為 pixel，這也就是校正後的座標。

Step4: 因為扭曲影像上各點座標(x_d, y_d)與影像校正後各點座標(x_p, y_p)間的距離差異 Δr (即扭曲量)，與該點距離主軸點(principal point)的徑向距離(radial distance)有關係。Holland et al. (1997)提出其關係為 $\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r$ 。由於計算 Δr 時需要知道主軸點(x_0, y_0)的位置，因此可以疊代方式求解，令最小誤差平方和最小，求解出(x_0, y_0)以及方程式係數 k_3 、 k_1 。

Step5: 方程式已知時，給定不同的 r 可以獲得該位置的扭曲量 Δr 。

Step6: 利用(x_d, y_d)、(x_p, y_p)繪製扭曲分佈向量圖。

Step7: 由 Step4 回歸之方程式，計算其在影像上之位置(x_d', y_d')，並由此計算投影之誤差。

以不同校正板試驗，我們得到下列結果(表2-6)。表內顯示以棋盤式校正板扭曲量最小。圖2-24為相片扭曲分布圖，圖2-25為扭曲分布與徑向距離關係。表2-7顯示校正板距離對誤差量與主軸點影響不大。鏡頭造成之扭曲本來就隨焦距而變。圖2-25顯示可變焦距鏡頭於不同焦距時之扭曲分布與徑向距離關係。圖2-26顯示扭曲曲線在焦距大於25mm時由下彎轉為上彎。由表2-8可看出於焦距大於25mm時(2.4.7)式之 k_3 由負變正，而 k_1 由正變負。

表2-6 不同校正點進行內部校正之結果

(鏡頭焦距:13mm, 影像畫數:1392 x 1040)

編號	校正板	平均扭曲 (pixel)	最大扭曲 (pixel)	主軸點(x_0, y_0)
Exp 1	A	7.6826	21.1442	(600.3203, 769.4922)
Exp 2	B	0.4643	4.6559	(693.5098, 519.5547)
Exp 3	C	0.5522	1.6382	(694.3398, 517.3809)
Exp 4	D	0.6424	1.9660	(693.5098, 517.3809)
Exp 5	E	0.5975	2.4305	(696.3984, 510.4922)

表2-7不同校正距離執行校正誤差表

(鏡頭焦距:12mm, 影像畫數: 640 x 480)

編號	校正距離	平均誤差(pixel)	最大誤差(pixel)	主軸點(x_0, y_0)
Exp 11	0.5m	0.1718	0.4361	(319.3594, 237.0430)
Exp 12	1.0m	0.1354	0.4239	(319.9219, 237.0430)
Exp 13	1.5m	0.1514	0.4649	(319.3594, 237.0430)

表2-8 可變焦距鏡頭於不同焦距時之校正結果，k3與k1為(2.4.7)之係數

(影像畫數: 640 x 480)

鏡頭焦距 (mm)	平均誤差 (pixel)	最大誤差 (pixel)	k3	k1	主軸點(x_0, y_0)
11.5	0.1718	0.4361	-9.89E-08	0.0077	(339.3203, 251.4922)
15	0.1354	0.4239	-9.33E-09	7.49E-04	(351.4766, 251.4922)
25	0.1514	0.4649	8.27E-08	-0.0064	(348.7578, 257.3809)
37	0.2464	0.8916	1.02E-07	-0.0082	(339.3203, 257.3809)
50	0.2275	0.856	1.24E-07	-0.0096	(346.6796, 259.5547)
69	0.259	0.8148	1.25E-07	-0.0095	(339.3203, 257.3809)

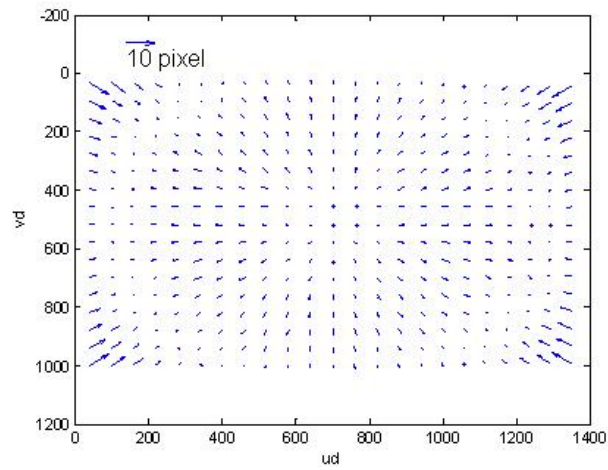


圖2-24為相片扭曲分布圖

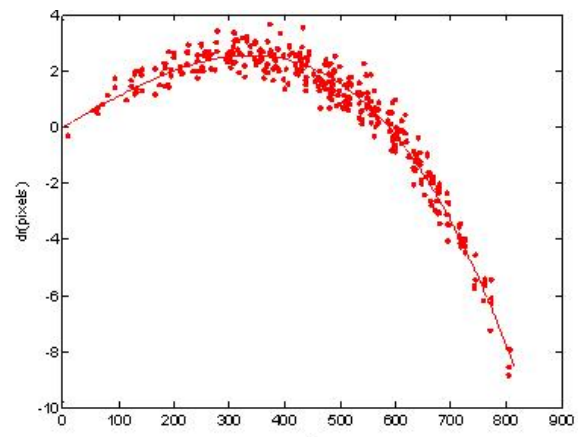


圖2-25為扭曲分布與徑向距離關係

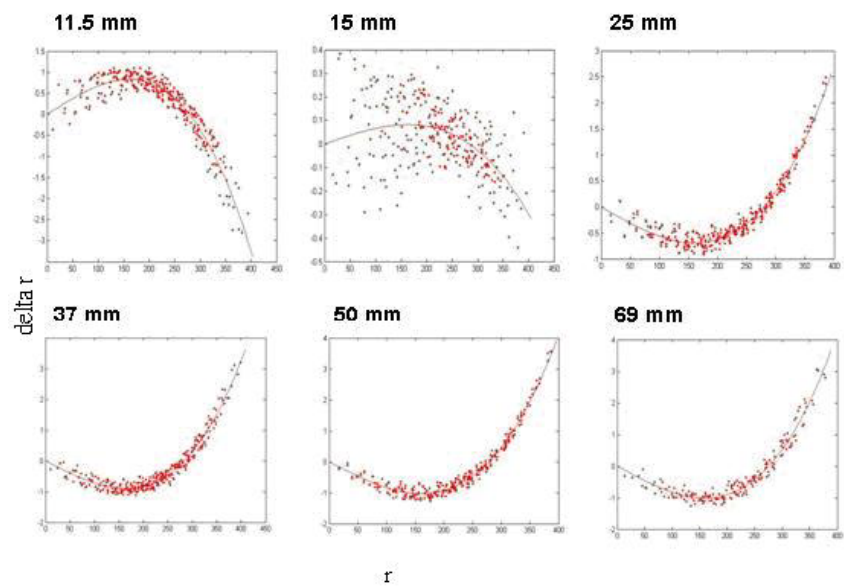


圖2-26 可變焦距鏡頭於不同焦距時之扭曲分布與徑向距離關係

綜合實驗結果有下列結論:

1. 進行內部校正時，棋盤式校正板比圓點型校正板適合。
2. 校正板距離並不會影響內部校正的結果。
3. 相機屏幕與校正板平行與否亦影響到校正校之主軸點計算結果。

為了顯現內部校正的效果，我們選擇扭曲較大之鏡頭(焦距6mm)拍攝之相片經內部校正後之結果。圖2-27與為圖2-28為校正前後之影像。

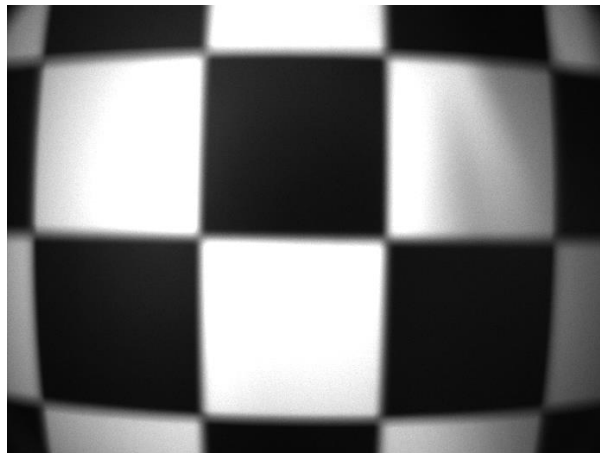


圖2-27 焦距6mm鏡頭拍攝之校正前影像

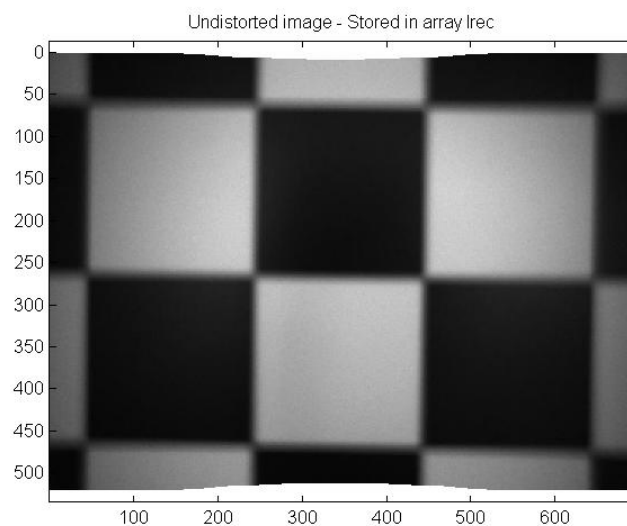


圖2-28 焦距6mm鏡頭拍攝經校正後影像

第三章 外部校正

3-1 外部校正原理

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)，依本計畫所採用之直接線性轉換法(DLT)，外部校正即為求得11個DLT外部參數。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，該校正板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，如圖3-1所示。

要解出影像二維像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(DLT)公式，將前述之式(2.1.14)與式(2.1.15)展開得下式：

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -u_2y_2 & -u_2z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -v_2x_2 & -v_2y_2 & -v_2z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

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) ，一般說來必須在外部校正板上選取至少6個以上之控制點以解出11個 L_i 未知數，這6個所選取來求解方程式的點位若能平均分佈在不同板面上最佳。求出11個DLT參數後，代表著建立了相片座標系統與實物座標系統之間的關係，未來拍攝海洋特徵即可以透過此關係求解絕對量值。

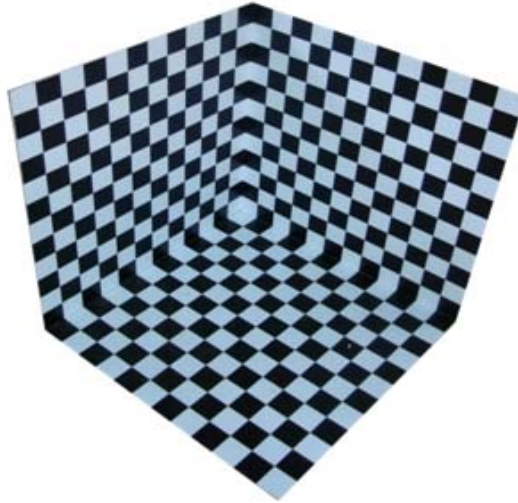


圖3-1 本計畫製作之立體校正網格板

3-2 外部校正佈置與設定

根據Wanek and Wu (2006)的建議，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所進行之，由於搬動立體攝影系統難免會有所碰撞，本研究提出另一個作法，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。(此步驟在進行現場海況拍攝時即應進行之)
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 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。詳如後文說明。



圖3-2 本計畫進行系統外部校正之過程

3-3 外部校正結果

完成外部校正後，可得到立體攝影系統各相機之相對位置與角度，在DLT方法則表現在11個外部參數上，由此11個參數可將平面的影像資料轉換為三維之立體座標。本節詳細說明外部校正之分析過程以及選取校正點數之多寡對結果的影響。

3-3-1 外部校正過程

本計畫自行開發了一個程式來從事立體攝影機外部校正工作，此程式之輸出為11個DLT參數，此程式之輸入則為(1)三台攝影機從不同角度拍攝外部校正板之三張影像，(2)校正板網格點的間距，以及(3)三台攝影機之內部校正參數(詳如第二章說明)。以下以實例說明外部校正過程：

圖3-3為某一外部校正過程中，由三台攝影機拍攝之外部校正板的影像，圖3-3(a)(b)(c)依序是上方、左側與右側三台相機所拍攝者，透過內部校正將不同位置拍攝之影像校正回未扭曲之影像。

1. 選取外部校正之計算點位。任選於上方影像中校正板上之點位（如圖3-4）。
2. 輸入該點位之實際三維座標(以校正板三平面交點為原點)，並透過電腦自動判讀其點位之像素位置（圖3-5）
3. 於左側及右側影像上，選取其相同對應之點位（圖3-6），並透過電腦自動判讀其點位之像素位置。
4. 重複步驟1~3，選取外部校正計算點位至少六點以上（如圖3-7）。
5. 求得各相機之11個外部參數($L1_i$ 、 $L2_i$ 、 $L3_i$)。

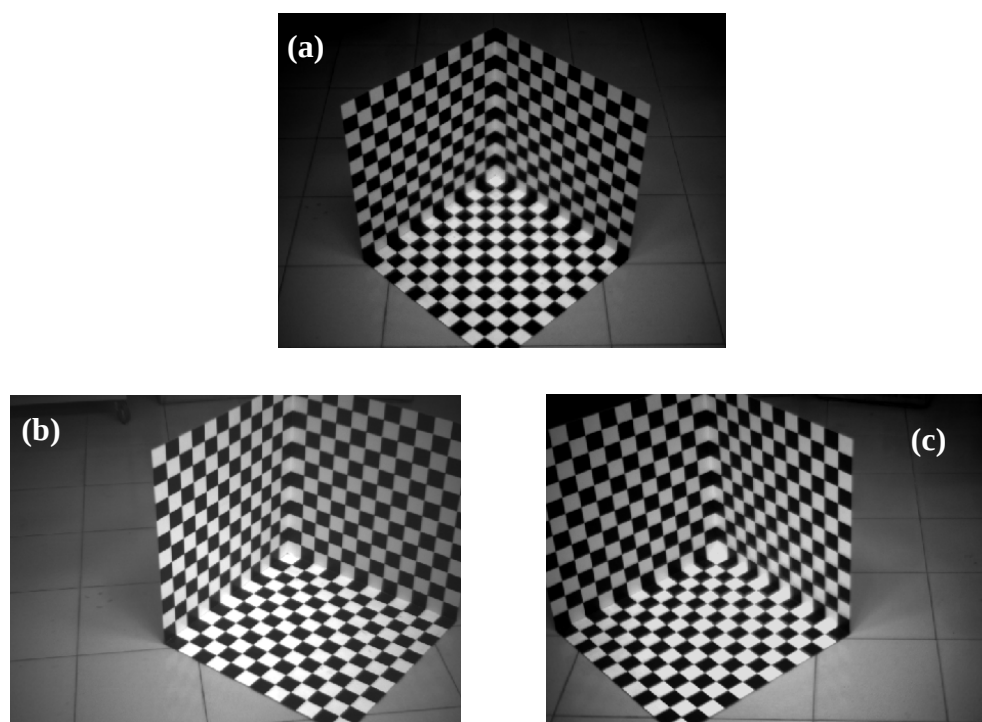


圖3-3 外部校正過程中，三台相機拍攝外部校正板所得之三張影像。(a)上方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。

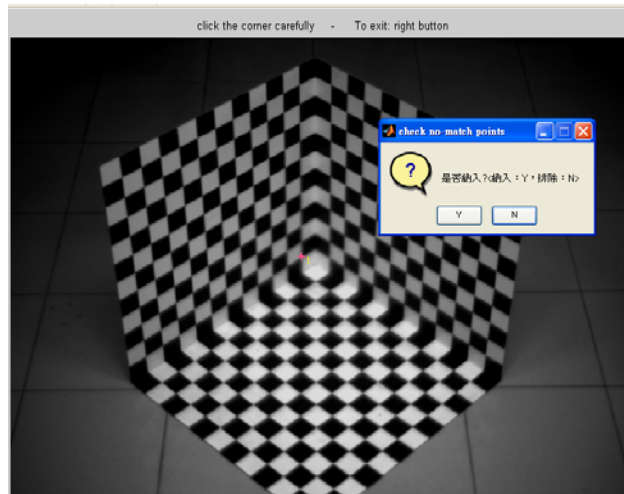


圖3-4 選取上方影像之計算點位

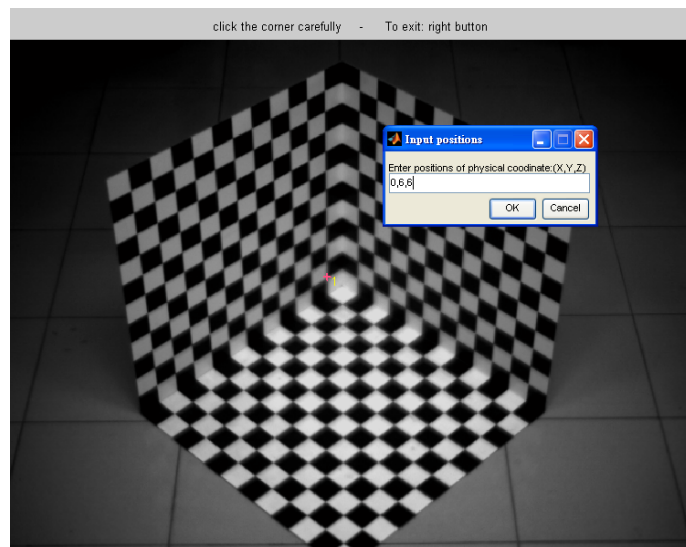


圖3-5 輸入選取點位之實際座標

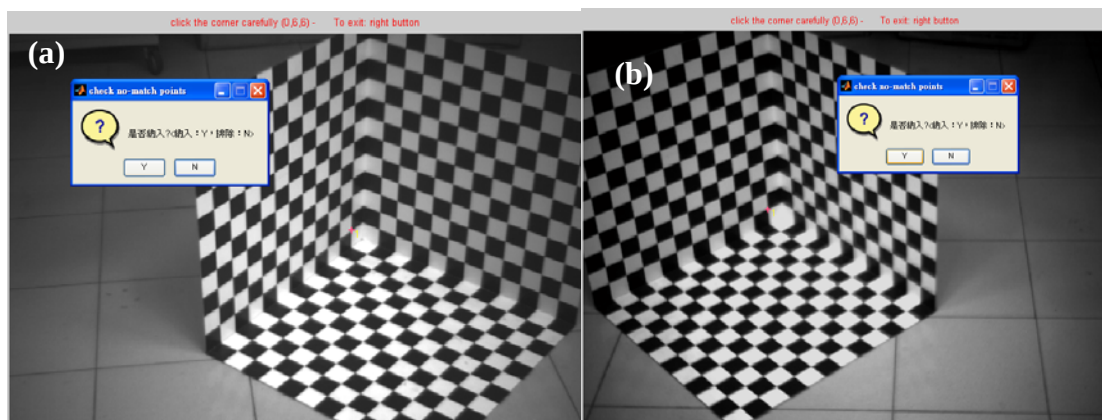


圖3-6 選取(a)左側相機及(b)右側相機中相對對應之點位。

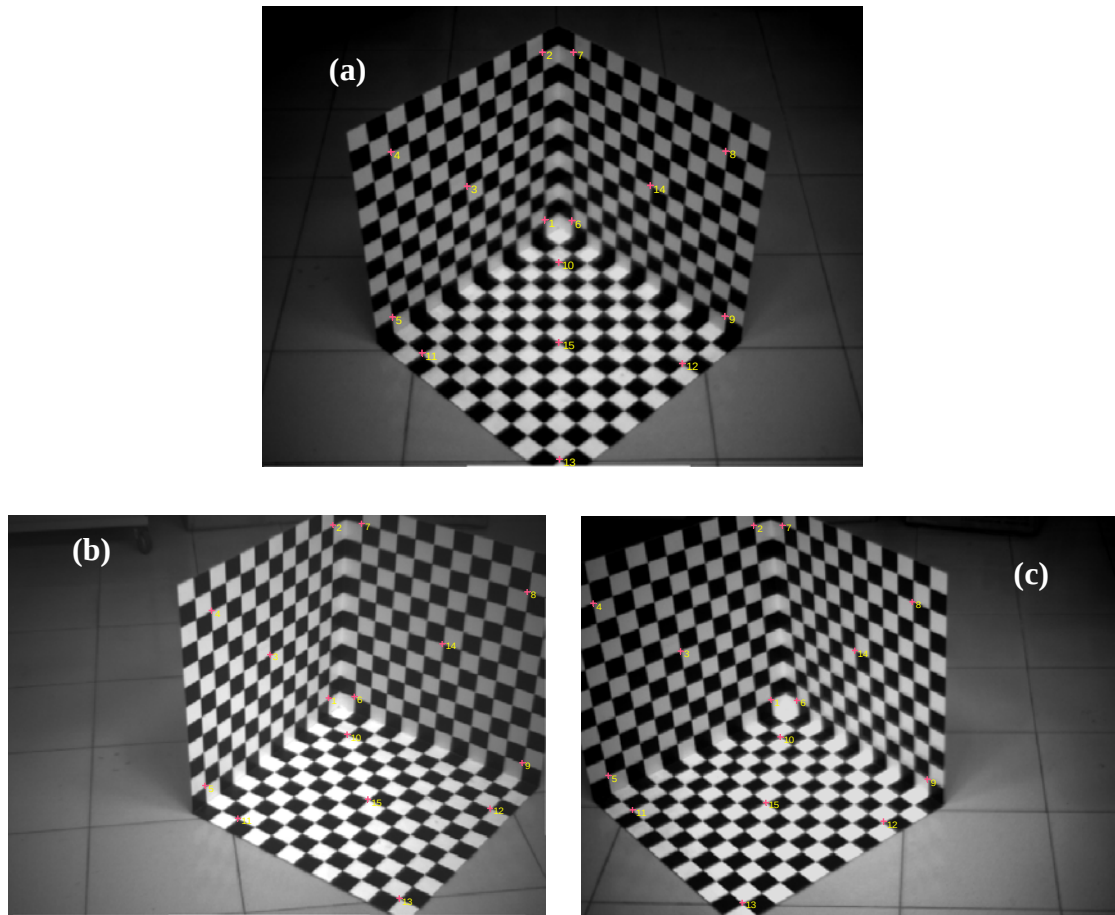


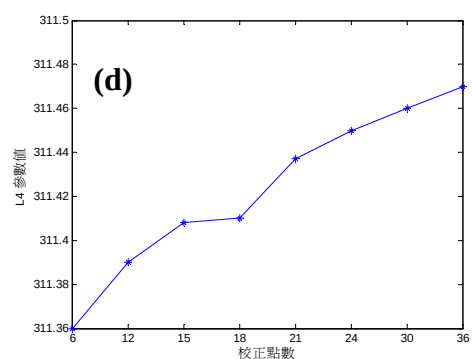
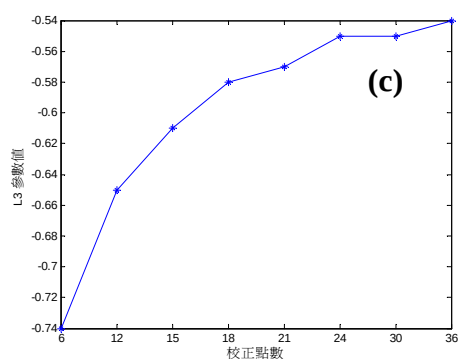
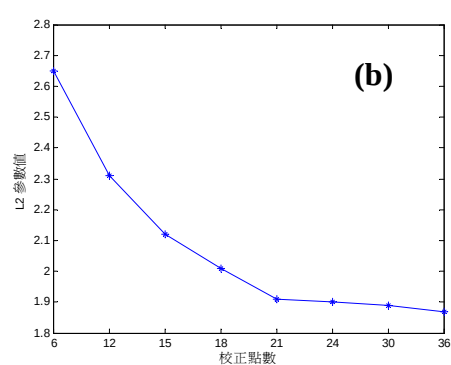
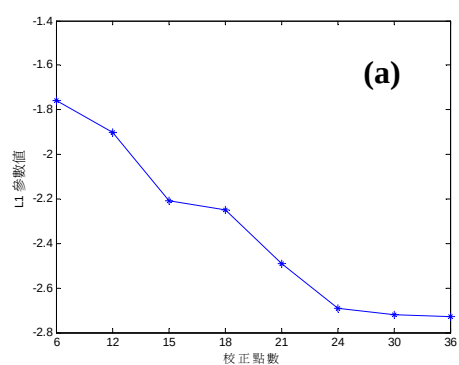
圖3-7 外部校正過程中，三影像選取之外部校正點位。
(a)上方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。

3-3-2 校正點數多寡對校正結果之影響

進行外部校正時，乃是由已知實際位置的校正點，與影像上之二維對應點，利用最小二乘法求得其相關關係。因此當選取的點數越多時，理論上其誤差會因樣本數增加而變小。經實際驗證，分別以選取6、12、15、18、21、24、30、36點(因為點數是平均分配到校正板的三個平面上，所以都是3的倍數)，各案例經外部校正其結果如表3-1，11個直接線性轉換參數與校正點數之關係如圖3-8。當選取的校正點數越多、選取區域越大，則校正結果越好，經實驗測試，點數在21點以上為佳。

表3-1 相同條件下，選取校正點數多寡所得之11個外部校正參數

校正點數 DLT 參數	6 點	12 點	15 點	18 點	21 點	24 點	30 點	36 點	mean	std	COV (%)
L1	-1.76	-1.9	-2.21	-2.25	-2.49	-2.69	-2.72	-2.73	-2.3438	0.3529	-0.1506
L2	2.65	2.31	2.12	2.01	1.91	1.9	1.89	1.87	2.0825	0.2564	0.1231
L3	-0.74	-0.65	-0.61	-0.58	-0.57	-0.55	-0.55	-0.54	-0.5988	0.0633	-0.1058
L4	311.36	311.39	311.408	311.41	311.437	311.45	311.46	311.47	311.4231	0.0353	0.0001
L5	1.12	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.1525	0.0130	0.0113
L6	1.19	1.16	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.1575	0.0130	0.0112
L7	-3.02	-2.96	-2.96	-2.96	-2.95	-2.95	-2.95	-2.95	-2.9625	0.0222	-0.0075
L8	230.28	230.67	230.7	230.77	230.78	230.81	230.81	230.81	230.7037	0.1676	0.0007
L9	-0.0016	-0.0015	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	0.0001	-0.0484
L10	-0.0013	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0014	0.00003	-0.0238
L11	-0.0022	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	-0.0018	0.0001	-0.0715



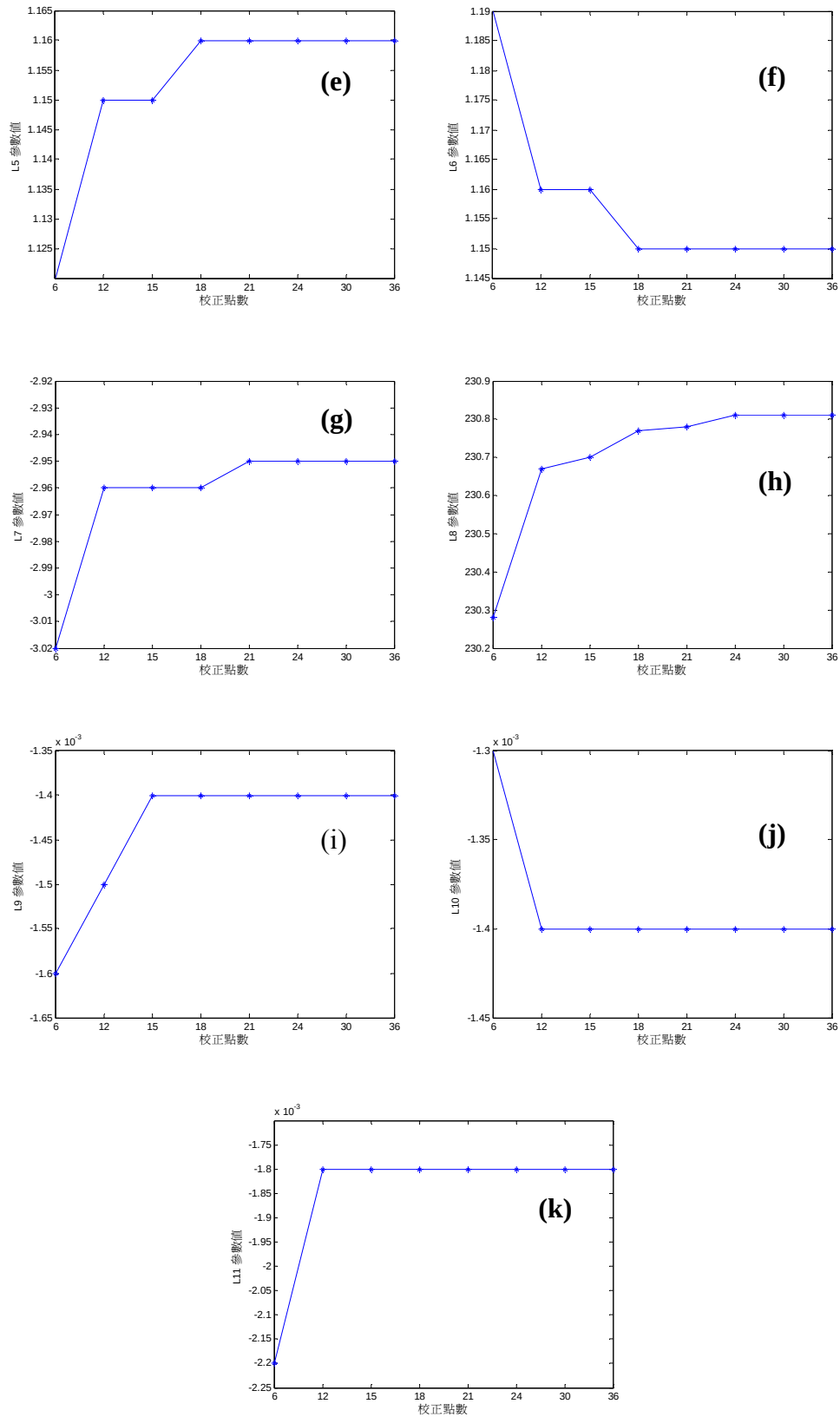


圖3-8 外部校正結果與校正點數多寡之關係。(a)L1參數值；(b) L2參數值；(c) L3參數值；(d) L4參數值；(e) L5參數值；(f) L6參數值；(g) L7參數值；(h) L8參數值；(i) L9參數值；(j) L10參數值；(k) L11參數值。

3-4 攝影機姿態與重疊範圍關係

本研究利用三台攝影機(分別在左側、右側及中央)觀測海面，在觀測架上，這三台攝影機安裝於同一觀測平面上，而左右兩台攝影機位於相同高度，距離中央攝影機 45cm，中央攝影機則高出 45cm(如圖 2-19)。在觀測過程，觀測架必須調成水平狀態。因此，本研究假設相片中心投影在物體空間標的位置為 (X_0, Y_0, Z_0) ，相片起始位置之座標軸與地面空間座標軸完全平行。為了與相機現場操作相同，相機在此三座標軸的旋轉角分別以水平俯角、水平旋轉角、及左右旋轉角表示，為相機姿態參數。再利用共線式(2.1.1a-1b)將相片座標系統轉換為物體空間之座標系統(如圖 2-8)。

現場操作中將觀測架調整水平後，僅調整水平俯角和水平旋轉角。因此在攝影機姿態模擬中將左右旋轉角設定為 0，探討在不同的左右相機水平俯角，與不同的水平旋轉角條件下，其觀測範圍的重疊面積的變化，以瞭解不同攝影參數下的最大重疊面積，提供現場觀測時的攝影參數設定參考。

本研究中以現有的觀測架條件和現場的觀測高度進行模擬，當左右相機高度為 1.26m 時，相機水平俯角為 25 度時，左右相機的個別觀測範圍為 7.808m^2 (如表 3-2)。表 3-2 顯示，當水平旋轉角(H Angle)從 0 開始增加時，左右相機的重疊範圍逐漸增大，而以水平旋轉角在 7 度時，重疊範圍為 6.78m^2 為最大值，然後再隨水平旋轉角增加，而重疊範圍逐漸減少。為了瞭解中央相機不同的水平俯角的三台相機重疊範圍的影響，在左右相機高度為 1.26m 時，相機水平俯角為 25 度時，左右相機最大重疊範圍的水平旋轉角在 5 度下，中央相機的水平俯角為 29 度時，這三台相機的重疊範圍最大為 6.315m^2 (如表 3-3)。表 3-4 為 6 度下，中央相機的水平俯角為 29 度時的重疊範圍最大為 6.536m^2 。表 3-5 左右相機水平旋轉角為 7 度，而其他條件相同下，中央相機俯角為 29 度時出現最大重疊範圍，面積為 6.533m^2 ，其重疊範圍如圖 3-9 所示。當中央相機的水平俯角為 29 度時，左右相機的水平旋轉角為 8 度時的三台相機出現最大重疊範圍 6.393m^2 (如表 3-6)。

表 3-7 為相同的相機高度下，左右相機的水平俯角為 35 度時，不同的左右相機水平旋轉角下，相機的個別拍攝範圍均為 2.398m^2 。而以水平旋轉角 12 度時的左右相機重疊範圍最大，為 2.006m^2 。表 3-8 為左右相機水平俯角 35 度，水平旋轉角為 11 度時，中央相機的水平俯角在 42 度時，呈現

三台相機的最大重疊範圍，面積為 1.924m^2 。其他條件相同下，當左右相機的水平旋轉角為 12 度時，三台相機的最大重疊面積為 1.939m^2 為最大(如表 3-9)，圖 3-10 中的紅色區域為三台相機的範圍。表 3-10 顯示水平旋轉角為 13 度時，三台相機的最大重疊範圍(19.27m^2)出現在中央相的水平俯角為 42 度條件下。

表 3-11 為左右相機高度為 2.4m，水平俯角為 25 度時，不同的左右相機水平旋轉角與左右相機重疊範圍。表中顯示相機個別拍攝範圍為 28.331m^2 。當水平旋轉角為 3 度時，其重疊範圍最大，為 26.719m^2 ，其次為水平旋轉角為 4 度的 26.056m^2 及 2 度的 24.826m^2 。表 3-12 為左右相機水平旋轉角 2 度時，中央相機的水平俯角為 27 度，中央相機的高度為 2.85m 條件下，出現三台相機重疊範圍最大，為 24.291m^2 。當左右相機的水平旋轉角為 3 度時，三台相機的最大重疊範圍出現在中央相機的水平俯角為 27 度下，面積 25.604m^2 (如表 3-13)。圖 3-11 中紅色區域為這三台相機的重疊觀測範圍。表 3-14 為相似條件下，左右相機水平旋轉角為 4 度時，三台相機的最大重疊範圍也是出現在中央相機的水平俯角為 27 度下，其面積為 325.444m^2 。

表 3-15 為左右相機高為 2.4m，水平俯角為 35 度，不同水平旋轉角左右相機的個別觀測範圍為 8.701m^2 ，而以水平旋轉角為 6 度時，左右相機的重疊範圍最大，面積為 7.832m^2 。其次為水平旋轉角 7 度和 5 度。當中央相機高度為 2.85m 時，左右相機以表 3-16 的攝影參數，但左右相機的水平旋轉角為 5 度時，三台相機的最大重疊範圍，出現在中央相機的水平俯角為 37 度，其面積為 7.656m^2 。表 3-17 為其他攝影參數不變，但左右相機的水平旋轉角為 6 度時，中央相機的水平俯角在 39 度時，出現三台相機最大重疊範圍(7.719m^2)。如表 3-16 攝影參數條件，但左右相機的水平旋轉角為 7 度，表 3-18 顯示，當中央相機的水平俯角為 39 度時，這三台相機的重疊範圍最大，其面積為 7.642m^2 。圖 3-12 為左右相機高為 2.4m，水平俯角為 35 度，中央相機高度為 2.85m 的攝影參數下，三台相機出現最大的重疊範圍(紅色)，其左右相機的水平旋轉角為 6 度，中央相機的水平俯角為 39 度。

從上述討論顯示，當攝影機高度愈高時，其拍攝範圍愈大。而相機的水平俯角愈小時，其拍攝範圍也愈大。隨著相機的水平俯角愈大，出現最

大重疊範圍所需的左右相機的水平旋轉角也愈大，中央相機與左右相機的水平俯角差也愈大。其他攝影參數不變時，相機高度愈高，出現最大重疊範圍所需的水平旋轉角愈小，而中央相機與左右相機的水平俯角差愈小。

表 3-2 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H1)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度)

H Angle	Left Cam.	Right Cam.	LR area
0	7.808	7.808	4.243
1	7.808	7.808	4.700
2	7.808	7.808	5.156
3	7.808	7.808	5.611
4	7.808	7.808	6.065
5	7.808	7.808	6.514
6	7.808	7.808	6.759
7	7.808	7.808	6.780
8	7.808	7.808	6.664
9	7.808	7.808	6.458
10	7.808	7.808	6.189

表 3-3 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C1)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 5 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
25	7.808	7.808	14.382	6.514	6.061
26	7.808	7.808	12.343	6.514	6.135
27	7.808	7.808	10.701	6.514	6.202
28	7.808	7.808	9.362	6.514	6.262
29	7.808	7.808	8.256	6.514	6.315
30	7.808	7.808	7.333	6.514	6.096
31	7.808	7.808	6.555	6.514	5.293

表 3-4 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C2)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 6 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
27	7.808	7.808	10.701	6.759	6.410
28	7.808	7.808	9.362	6.759	6.476
29	7.808	7.808	8.256	6.759	6.536
30	7.808	7.808	7.333	6.759	6.357
31	7.808	7.808	6.555	6.759	5.244

表 3-5 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C3)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 7 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
27	7.808	7.808	10.701	6.780	6.395
28	7.808	7.808	9.362	6.780	6.467
29	7.808	7.808	8.256	6.780	6.533
30	7.808	7.808	7.333	6.780	6.387
31	7.808	7.808	6.555	6.780	5.695

表 3-6 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C4)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 8 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
27	7.808	7.808	10.701	6.664	6.243
28	7.808	7.808	9.362	6.664	6.322
29	7.808	7.808	8.256	6.664	6.393
30	7.808	7.808	7.333	6.664	6.270
31	7.808	7.808	6.555	6.664	5.636

表 3-7 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H2)。

(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 35 度)

H Angle	Left Cam.	Right Cam.	LR area
0	2.398	2.398	0.701
1	2.398	2.398	0.829
2	2.398	2.398	0.955
3	2.398	2.398	1.081
4	2.398	2.398	1.206
5	2.398	2.398	1.331
6	2.398	2.398	1.456
7	2.398	2.398	1.579
8	2.398	2.398	1.702
9	2.398	2.398	1.825
10	2.398	2.398	1.928
11	2.398	2.398	1.985
12	2.398	2.398	2.006
13	2.398	2.398	2.000
14	2.398	2.398	1.971

表 3-8 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C5)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 11 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
40	2.398	2.398	2.958	1.985	1.865
41	2.398	2.398	2.757	1.985	1.896
42	2.398	2.398	2.577	1.985	1.924
43	2.398	2.398	2.415	1.985	1.916

表 3-9 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C6)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 12 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
40	2.398	2.398	2.958	2.006	1.875
41	2.398	2.398	2.757	2.006	1.9088
42	2.398	2.398	2.577	2.006	1.939
43	2.398	2.398	2.415	2.006	1.936

表 3-10 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C7)。
(攝影參數：左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 13 度；中央相機高度 1.71m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
40	2.398	2.398	2.958	2.000	1.858
41	2.398	2.398	2.757	2.000	1.894
42	2.398	2.398	2.577	2.000	1.9277
43	2.398	2.398	2.415	2.000	1.9272

表 3-11 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H3)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 25 度)

H Angle	Left Cam.	Right Cam.	LR area
0	28.331	28.331	21.54
1	28.331	28.331	23.186
2	28.331	28.331	24.826
3	28.331	28.331	26.179
4	28.331	28.331	26.056
5	28.331	28.331	25.153

表 3-12 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C8)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 2 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
26	28.331	28.331	34.286	24.826	24.069
27	28.331	28.331	29.726	24.826	24.291
28	28.331	28.331	26.006	24.826	22.455
29	28.331	28.331	22.935	24.826	19.491

表 3-13 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C9)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 3 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
26	28.331	28.331	34.286	26.179	25.364
27	28.331	28.331	29.726	26.179	25.604
28	28.331	28.331	26.006	26.179	23.906
29	28.331	28.331	22.935	26.179	20.872

表 3-14 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C10)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 4 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
26	28.331	28.331	34.286	26.056	25.185
27	28.331	28.331	29.726	26.056	25.444
28	28.331	28.331	26.006	26.056	23.9692
29	28.331	28.331	22.935	26.056	21.161

表 3-15 左右相機不同水平旋轉角(H Angle)與攝影範圍(攝影參數 H4)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 35 度)

H Angle	Left Cam.	Right Cam.	LR area
0	8.701	8.701	5.470
1	8.701	8.701	5.924
2	8.701	8.701	6.374
3	8.701	8.701	6.820
4	8.701	8.701	7.263
5	8.701	8.701	7.682
6	8.701	8.701	7.832
7	8.701	8.701	7.755

表 3-16 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C11)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 5 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
36	8.701	8.701	11.243	7.682	7.215
37	8.701	8.701	10.342	7.682	7.656
38	8.701	8.701	9.548	7.682	7.469
39	8.701	8.701	8.844	7.682	7.569
40	8.701	8.701	8.218	7.682	7.0450

表 3-17 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C12)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 6 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
36	8.701	8.701	11.243	7.832	7.337
37	8.701	8.701	10.342	7.832	7.478
38	8.701	8.701	9.548	7.832	7.609
39	8.701	8.701	8.844	7.832	7.719
40	8.701	8.701	8.218	7.832	7.256

表 3-18 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C13)。
(攝影參數：左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 7 度；中央相機高度 2.85m，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

C_ Angle	Left Cam.	Right Cam.	Center Cam	LR area	LRC area
36	8.701	8.701	11.243	7.755	7.234
37	8.701	8.701	10.342	7.755	7.384
38	8.701	8.701	9.548	7.755	7.524
39	8.701	8.701	8.844	7.755	7.642
40	8.701	8.701	8.218	7.755	7.227

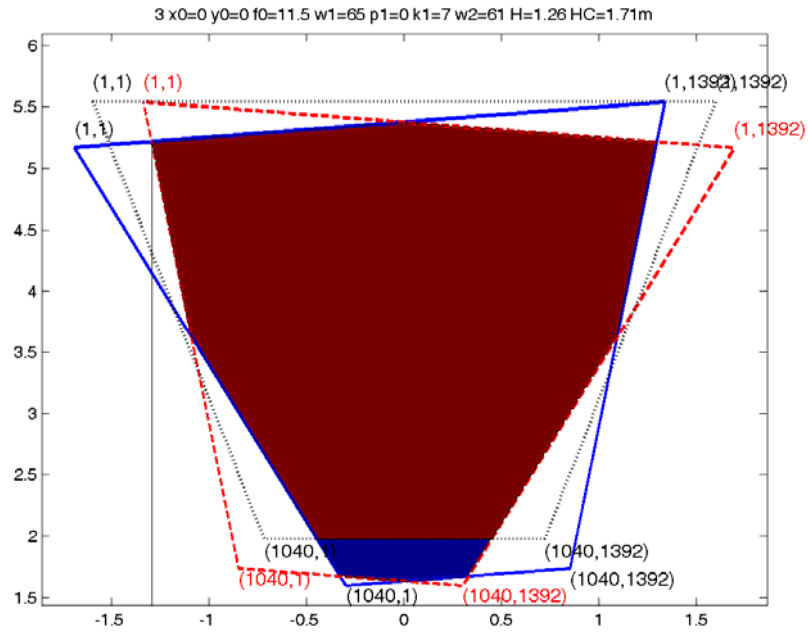


圖 3-9 三台相機重疊範圍(條件 1)

(左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 7 度；中央相機高度 1.71m，水平俯角 29 度，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

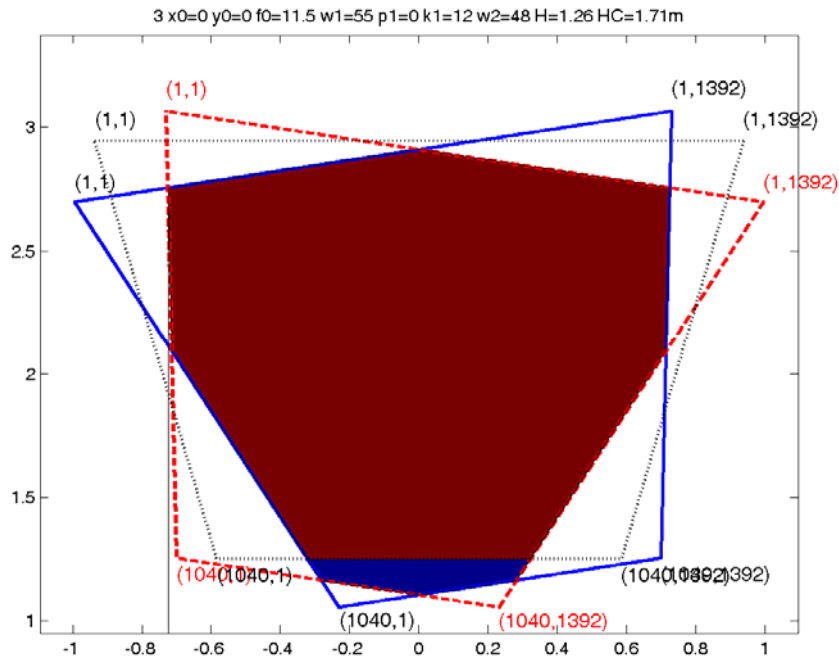


圖 3-10 三台相機重疊範圍(條件 2)

(左右相機高度 1.26m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 7 度；中央相機高度 1.71m，水平俯角 42 度，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

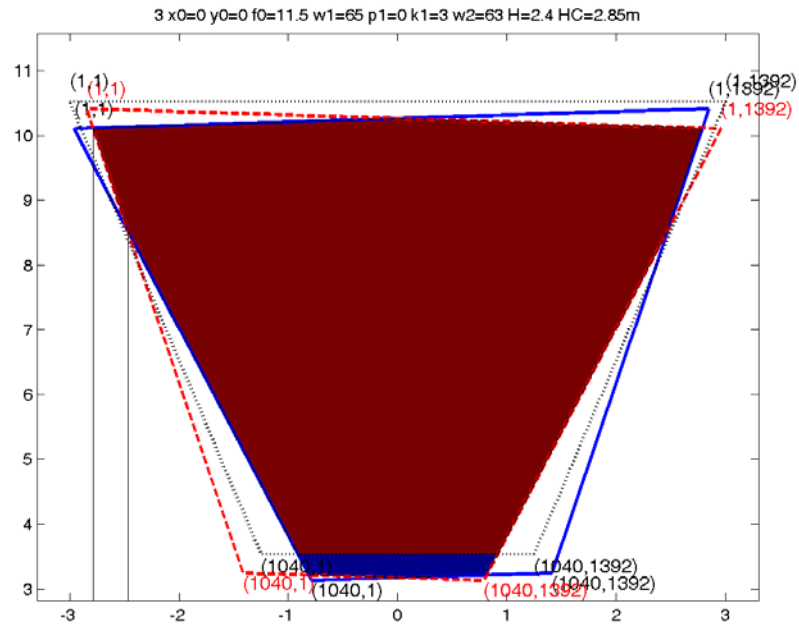


圖 3-11 三台相機重疊範圍(條件 3)

(左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 25 度，左右相機水平旋轉角為 3 度；中央相機高度 2.85m，水平俯角 27 度，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

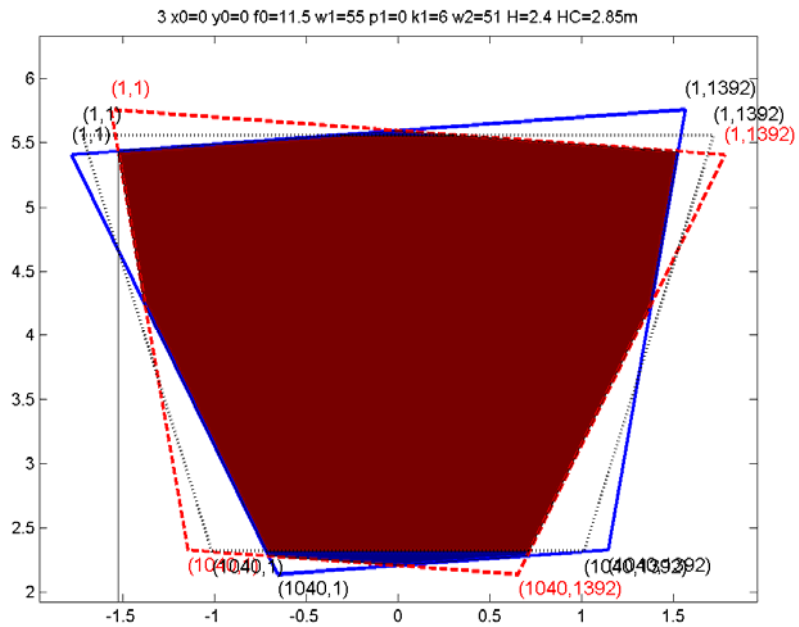


圖 3-12 三台相機重疊範圍(條件 4)

(左右相機高度 2.4m，相機水平俯角 35 度，左右相機水平旋轉角為 6 度；中央相機高度 2.85m，水平俯角 39 度，水平旋轉角 0 度，左右旋轉角 0 度)

第四章 立體影像匹配

影像匹配技術為攝影測量邁入自動化的關鍵步驟，這個技術涵蓋了電腦視覺、人工智慧及攝影學等學門，影像匹配的主要目的是要找出共軛影像以取代人工對點，以達到自動化的目標；影像匹配的方法有許多種，而影響匹配成果的因素也很多如遮蔽、阻擋、像片的幾何及輻射誤差、移位及尺度差異等，需視實際應用的需要選擇適合者進行。

4-1 極線幾何原理

在兩台相對位置固定的CCD 攝影機，對三維空間影像有其相互關係，對空間中的某一定點所分別拍攝到之影像，二張影像內部的投影幾何關係可以由「極線幾何」(Epipolar Geometry)來描述，其與物體的大小、顏色或形狀均無關，主要的影響來自於兩部 CCD 攝影機的內部參數與相對位置，而基礎矩陣 (Fundamental Matrix)則是用來描述兩張影像間的幾何關係。

極線幾何係指三維空間的座標與二維影像平面之間的一種可以相互轉換的空間幾何對應關係。以圖4-1為例，左右攝影機投影中心 O 與 O' 之間的連線稱為基線(baseline)，且同時可攝取到三維場景中的 M ，故 M 、 O 及 O' 三點構成了外極面 (epipolar plane)。此外極面與左右影像相交於兩條直線，分別為 I 與 I' ，此二直線稱為極線 (epipolar line)。基線與左右兩影像平面分別交會於 e 與 e' ，又稱極點 (epipoles)。

假設 P 與 P' 分別為場景中的 M 投影到左影像與右影像平面的位置，射線 OM 代表左影像中 P 點所有可能的三維位置 M ，投影到右影像平面則成為對應的極線 I 。顯然的，左影像投影點 P 在右影像的對應點 P' 即落在 I' 上，此幾何關係將原本二維的對應點搜尋平面區域降為一維的搜尋線段區間。

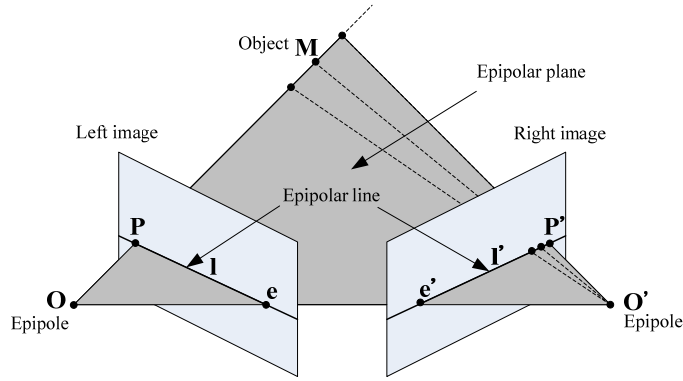


圖4-1 極線幾何示意圖

依照圖上的關係，主要有六個公式：

$$l = FP' \quad (4.1)$$

$$l' = F^T P \quad (4.2)$$

$$F^T e = 0 \quad (4.3)$$

$$Fe' = 0 \quad (4.4)$$

$$P^T FP' = 0 \quad (4.5)$$

$$P'^T F^T P = 0 \quad (4.6)$$

其中 F 為3x3基礎矩陣 (*Fundamental matrix*)，矩陣的秩必須為2。在上述公式中，基礎矩陣是必須求得的重要參數，而八點估算法是最容易估算基礎矩陣係數的方法，(4.5)式可以寫成：

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

並令 $F_{33} = 1$ 並展開(4.6)式可得：

$$\begin{bmatrix} u_1 u'_1 & u_1 v'_1 & u_1 & u'_1 v_1 & v_1 v'_1 & v_1 & u'_1 & v'_1 \\ u_2 u'_2 & u_2 v'_2 & u_2 & u'_2 v_2 & v_2 v'_2 & v_2 & u'_2 & v'_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_n u'_n & u_n v'_n & u_n & u'_n v_n & v_n v'_n & v_n & u'_n & v'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \dots \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

基本上 $n=8$ 即可求其解，但是如果超過8點則可以用最小平方法求解。另外由於必須限制基礎矩陣的秩為2，所以經過最小平方法求解得到的基礎矩陣需要經過奇異值分解法 (Singular Value Decomposition) 拆成兩正交矩陣及一對角矩陣，再將對角矩陣中最小的值設為0，保證其秩為2。

應用極線幾何理論求解影像上之極線時，除了前述提到的方法外(又稱八點法)，依Zhang (1996)之分類尚有其他數種方法，可視需要選擇適用的方法進行之：

1. Exact solution with 7point matches 七點法：
2. Analytic method with 8 or more point matches
3. Analytic method with rank-2 constraint
4. Nonlinear method minimizing distances of points to epipolar lines
5. Gradient-based technique
6. Nonlinear method minimizing distances between observation and reprojection
7. Robust methods
8. Characterizing the uncertainty of fundamental matrix
9. Other techniques

4-2 標準化互相關係法

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，如圖4-2所示，移動時將目標視窗與搜尋視窗中之對應視窗灰度值代入(4.9)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。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i, j) - \overline{G_t})(G_s(i, j) - \overline{G_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i, j) - \overline{G_t})^2 \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_s(i, j) - \overline{G_s})^2}} \quad (4.9)$$

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

$\overline{G_t(i, j)}, \overline{G_s(i, j)}$ ：目標視窗、搜尋視窗內像元的灰度平均值

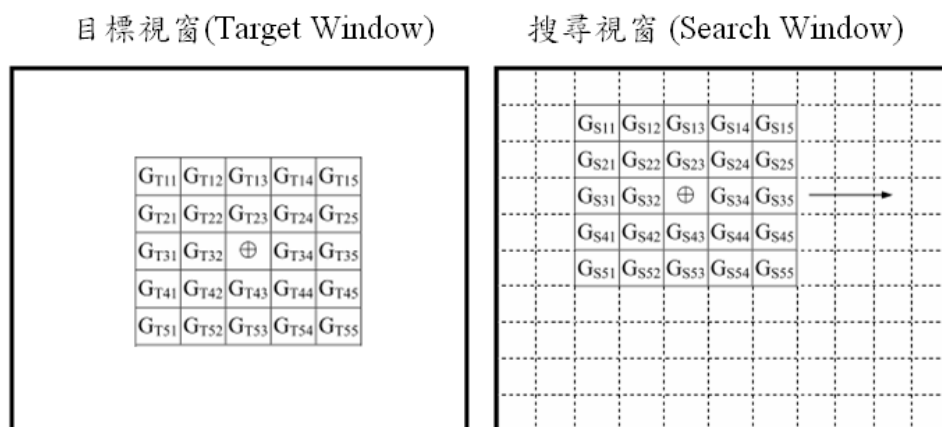


圖4-2 影像匹配NCC法示意圖

4-3 影像匹配結果與討論

4-3-1 影像匹配步驟

影像匹配步驟如下：

1. 選取3D校正網格板之隔點：影像點 (u,v) （至少八個點），並輸入已知的實體點 (X,Y,Z) 位置(請參閱前小節圖3-4~圖3-6)
2. 因為各相機所選之點為同一點，所以可由選取點求基礎矩陣 F_{12}, F_{13}, F_{23} 。
3. 同步拍攝實物及影像處理(內部校正、明暗度修正、濾波)，其目的為取得同一時間之影像，並修正影像的輻射扭曲、及增加影像的鑑別率。
4. 影像匹配(圖4-3、圖4-4)－

①點選圖一上之點 $mp1$

②由前述步驟2求得之 F_{12}, F_{13} 分別求得圖一選取點在圖二與圖三上

所對應之極線 PL_{12}, PL_{13} 。

③利用標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)，以適當大小之搜索視窗，求得極線上之匹配點 $mp2, mp3$ 。

④由步驟③求得之圖二匹配點 mp_2 ，求其在圖三上對應之極線 PL_{23}

⑤求得圖三上兩條極線 PL_{13}, PL_{23} 之交點 $mp3'$

⑥驗證 $mp3$ 與 $mp3'$ 是否為同一點(容許誤差：1.5pixel)。

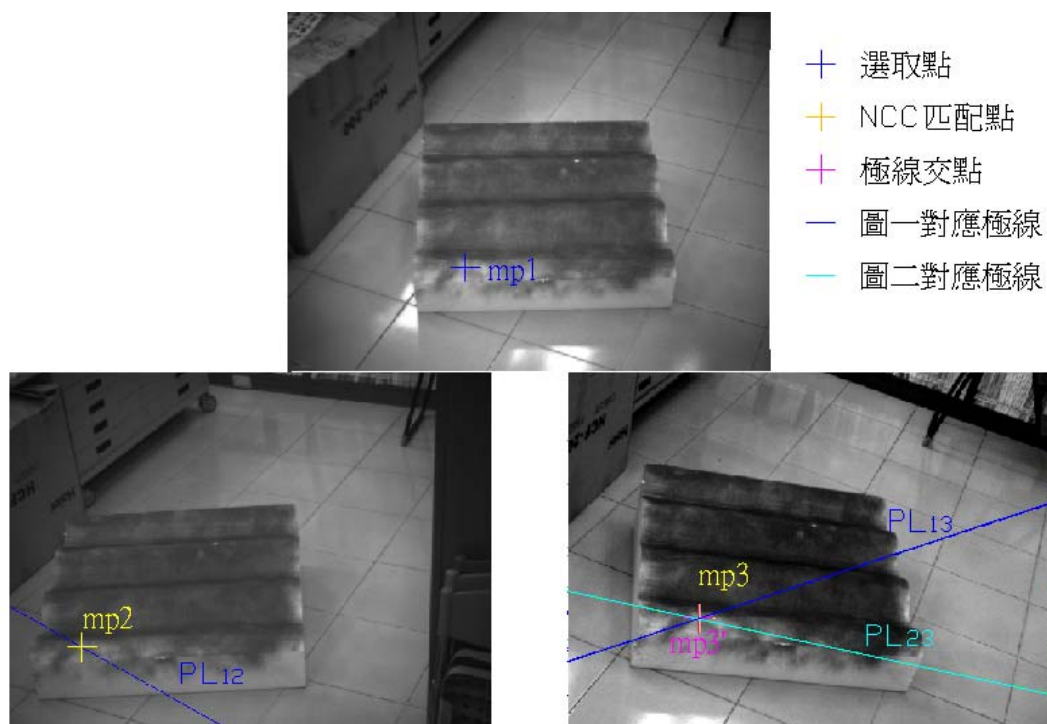


圖4-3 影像匹配對應之極線及匹配點

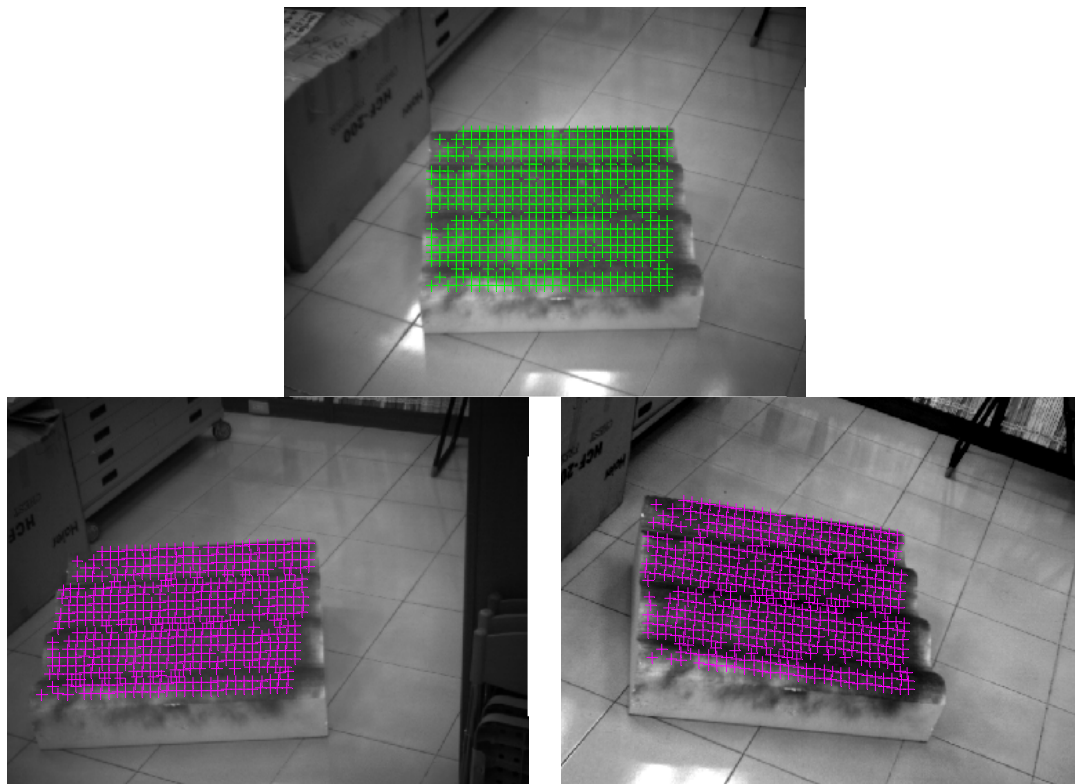


圖4-4 各相機之影像匹配點

4-3-2 相機數目之影響

進行立體影像重建時，求解的未知變數為實際的座標(X 、 Y 、 Z)共有三個，而一台相機可提供一個平面座標值(u,v)，因此僅需二台相機即可進行立體影像的重建，本節則將探討二相機與三相機進行影像匹配時所造成的影響。

當僅採用兩影像之匹配，其流程如下：

1. 於左側及右側攝影機同步拍攝一物體 P ，分別可獲取左側影像及右側影像。
2. 假定欲求得 P 點於左右影像上之相互對應的像素位置，根據極線理論可求得，左影像 P 點在右影像所對應之極線 I_R^L ，並沿著極線 I_R^L 上經 NCC 法以 $23\text{ pixel} \times 23\text{ pixel}$ 之視窗尺寸，求取於極線上其灰度相似度最大之點位 P_R 。
3. 經由人工檢定 P_L 與 P_R 點位是否為相同對應點。

本研究以波浪板以模擬波浪之特性進行試驗。經由左側及右側攝影機攝取之波浪板影像中，在波浪板影像上選定一匹配區塊，以 1 pixel 之間隔為一匹配點位，共 8904 個點位，進行左右兩影像之匹配動作，其匹配結果如圖 4-5 所示，於左影像上欲搜尋之點位匹配得到右影像上之相互對應點應為 8904 個點位，而後經人工比對兩影像間匹配之像素位置，發現有 87 個匹配點落置於匹配之區塊外，是很明確的匹配失敗，這些點須仰賴人工逐點排出，將耗費大量人力與時間；此外，即使落在匹配區塊內，也有可能與實際位置相差數十個像素，若非逐點檢核亦無法發現而導致匹配失敗。

由上述之結果顯示，當利用兩影像重建三維座標時，有可能會發生匹配誤判的情況，然而這也是有必要去解決的課題，因此改善影像匹配搜尋的效率及檢核匹配之準確度，是目前極需克服的課題。而在三台攝影機架構下，第三台攝影機之影像正可作為檢核匹配點是否正確之用。當三台攝影機同步攝取一待測物 P 點，可分別獲取於左側、右側及上側之影像(如圖 4-6)，於三相異之影像上必定可找到 P 點其投影於三影像上之像素位置，基

於此特點可利用於三影像間選定左、上兩影像及左、右兩影像共兩影像匹配組，根據4-1節所述之兩影像間的影像匹配的基礎上，以進行匹配動作，其匹配結果於左、上兩影像匹配之對應點的三維座標及左、右兩影像匹配之對應點的三維座標，勢必要一致，其即為影像匹配成功，反之則為失敗。試驗結果(如圖4-6)說明應匹配點8904點，匹配成功為8529點，匹配成功率約92%，且每一個匹配成功點之誤差均控制在1.5個像素之內。對後續之影像重建步驟，提供較高的準確性依據。

兩台攝影機拍攝波浪板模型之試驗，以探討採用兩台以及三台攝影機經過影像匹配步驟其準確性。可明顯看出右圖橘色圓圈部分發現其發生找尋錯誤之影像匹配點，故本計畫採用三台攝影機進行拍攝，以提高匹配之準確性。

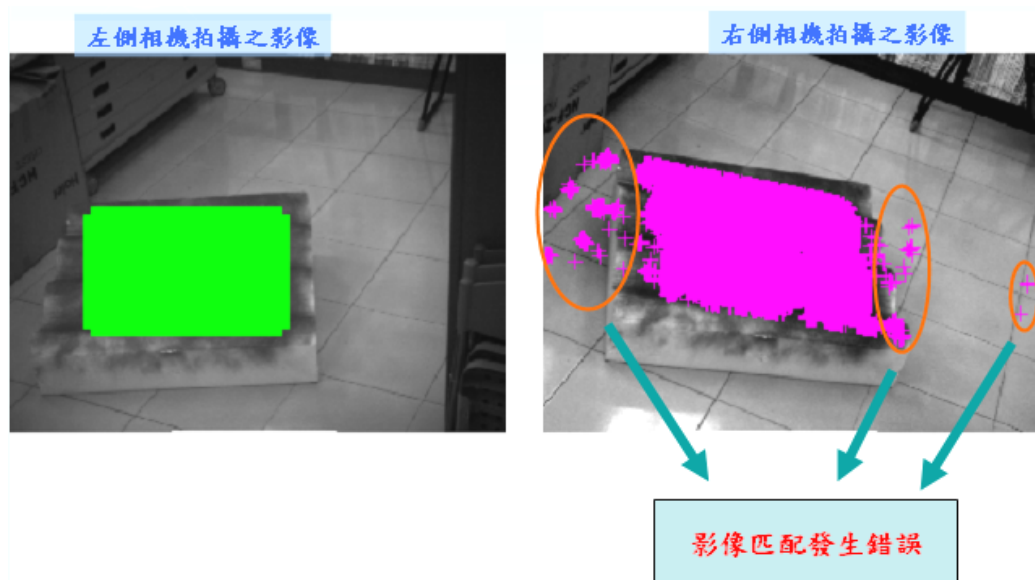


圖4-5 兩台攝影機進行匹配時容易發生錯誤

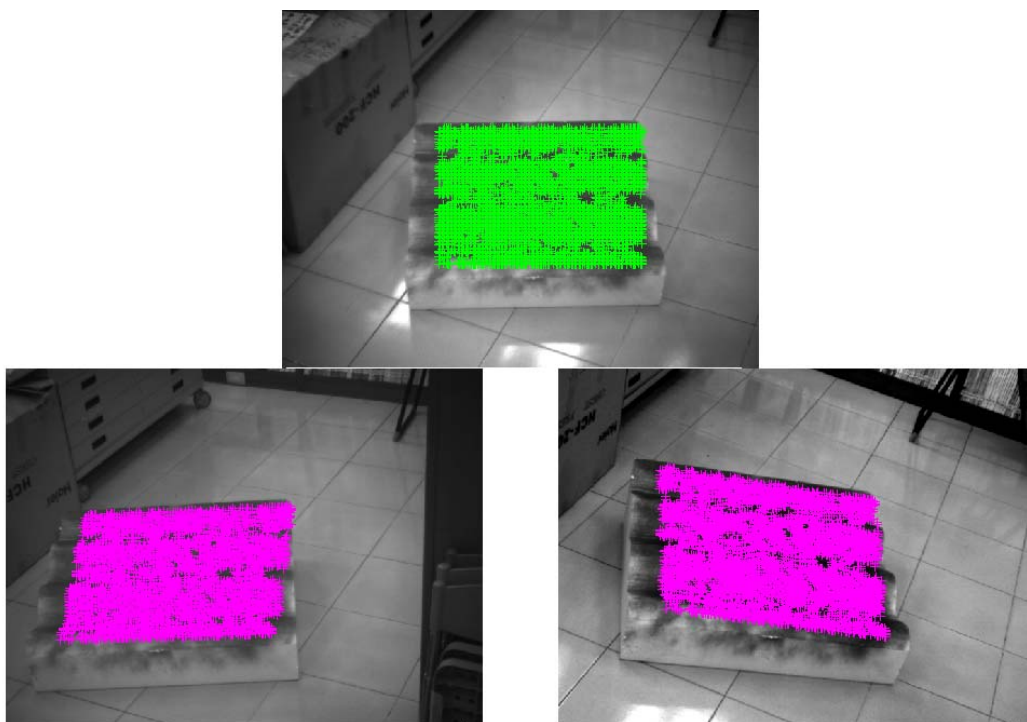


圖4-6 三台攝影機波浪板匹配情形

第五章 立體影像重建與靜態驗證

5-1 立體影像重建

當只有一台相機時，我們無法將二維影像重建回三維立體影像，所得數據為(x, y)；當有兩台相機時，可以獲得三維影像，取得(x, y, z)資料；但當採用三台相機時，我們則可以取得連續動作的立體影像，即(x, y, z, t)數據。圖3-8是利用立體影像攝影機拍攝海面之示意圖，由前述之外部校正求得之11個外部參數($L_1, L_2, \dots, L_{11}$)，再使用影像匹配的方法，我們可以找出影像上任一點(X_0, Y_0, Z_0)分別在三台相機上影像對應點的位置 $mp1(x_{iC}, y_{iC})$ 、 $mp2(x_{iL}, y_{iL})$ 、 $mp3(x_{iR}, y_{iR})$ 及其相關的線性關係式，以矩陣的形式表示，如下式，

$$\begin{bmatrix} L_1^L - L_9^L x_{iL} & L_2^L - L_{10}^L x_{iL} & L_3^L - L_{11}^L x_{iL} \\ L_5^L - L_9^L y_{iL} & L_6^L - L_{10}^L y_{iL} & L_4^L - L_{11}^L y_{iL} \\ L_1^C - L_1^C x_{iC} & L_2^C - L_{10}^C x_{iC} & L_3^C - L_{11}^C x_{iC} \\ L_5^C - L_9^C y_{iC} & L_6^C - L_{10}^C y_{iC} & L_4^C - L_{11}^C y_{iC} \\ L_1^R - L_9^R x_{iR} & L_2^R - L_{10}^R x_{iR} & L_3^R - L_{11}^R x_{iR} \\ L_5^R - L_9^R y_{iR} & L_6^R - L_{10}^R y_{iR} & L_4^R - L_{11}^R y_{iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{iL} - L_4^L \\ y_{iL} - L_8^L \\ x_{iC} - L_4^C \\ y_{iC} - L_8^C \\ x_{iR} - L_4^R \\ y_{iR} - L_8^R \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

式中L、C、R的上下標代表左側、中間與右側的相機，(x_i, y_i)代表在上述相機中的影像點位，上式可透過最小二乘法解出任意點位在三度空間的座標值(X_0, Y_0, Z_0)，以建構完整的三維影像(圖5-1)。

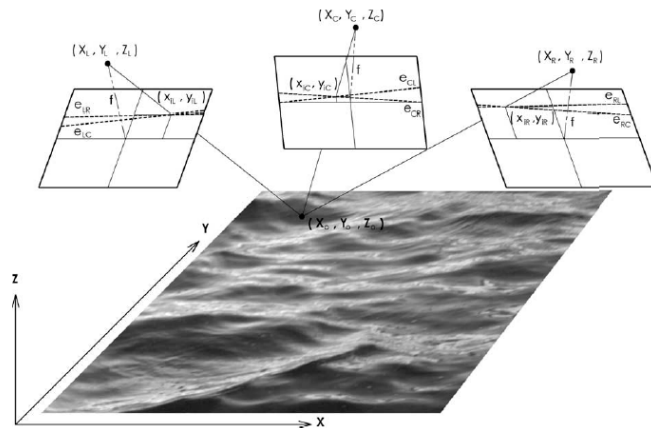


圖5-1 立體影像從事表面海況監測示意圖

5-2 靜態驗證

為了先了解立體攝影遙測波浪之適用性，本節先進行靜態物體之拍攝，包括拍攝已知大小尺寸之地板磁磚，並製作靜態波浪板以模擬海面之波浪特性，透過實驗測試進行實證研究，以探討立體影像應用於量測實物之精確度。

5-2-1 平面模擬波場之驗證

在重建出三維世界座標之後，首先要確認立體影像量測的精確度，可藉由量測一已知長度的物體，來判定計算解果的成功與否。此已知長度物體最好為方形，因為方形的頂點是量測點的最佳選擇，本實驗使用磁磚(如圖5-4所示)當作量測基準之待測物，其另一個好處就是選錯點的機會比較小，接著便可以利用三影像的對應點得到量測點的三維世界座標，並比較與瓷磚實際邊長之誤差，其佈置如圖5-2所示。

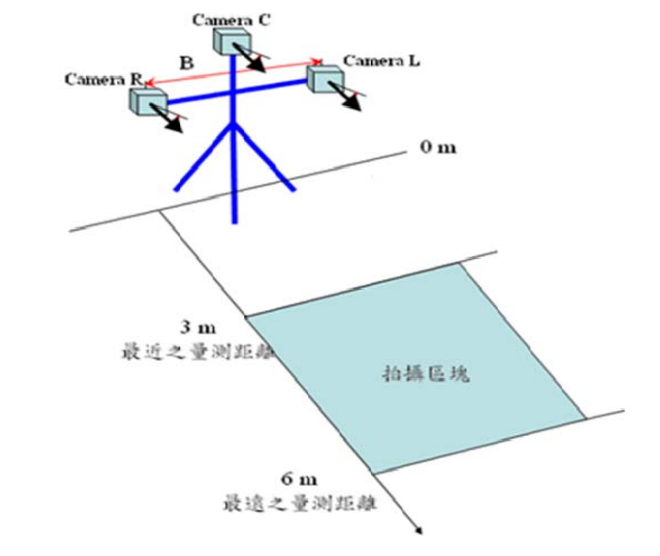


圖5-2 平面模擬波場佈置示意圖

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板，如圖5-3，經由直接線性轉換求得各攝影機之11個個外部校正參數。同步攝影標的物(地板磁磚)，如圖5-4，選擇各影像上之匹配點，進行影像匹配，匹配結果如圖5-5所示

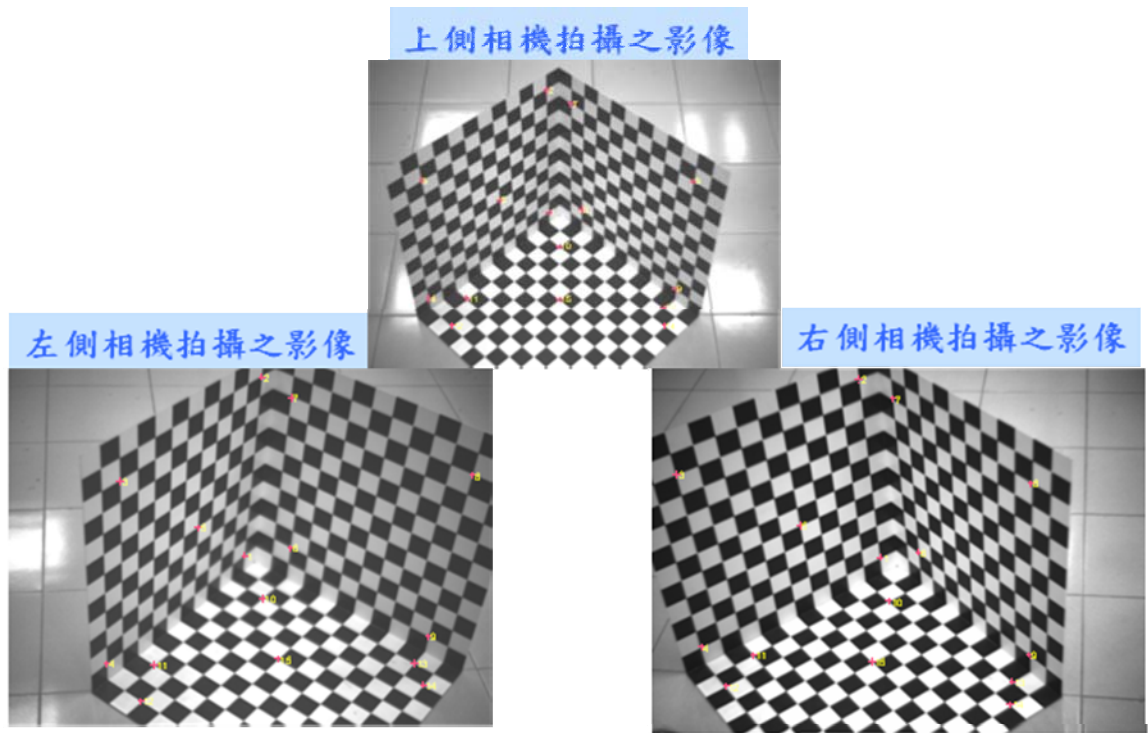


圖5-3 外部校正之校正板影像

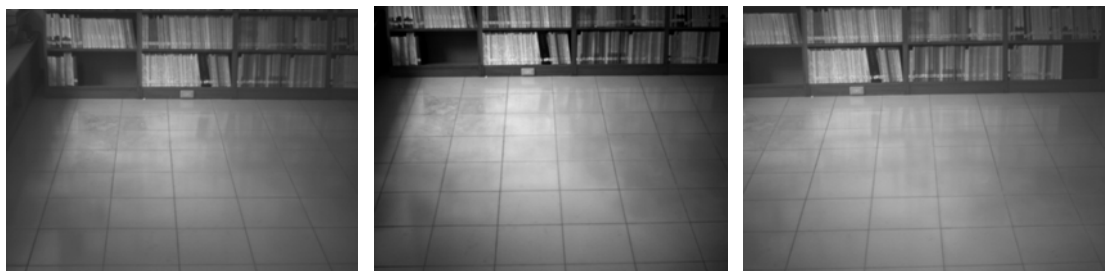


圖5-4 拍攝之磁磚影像

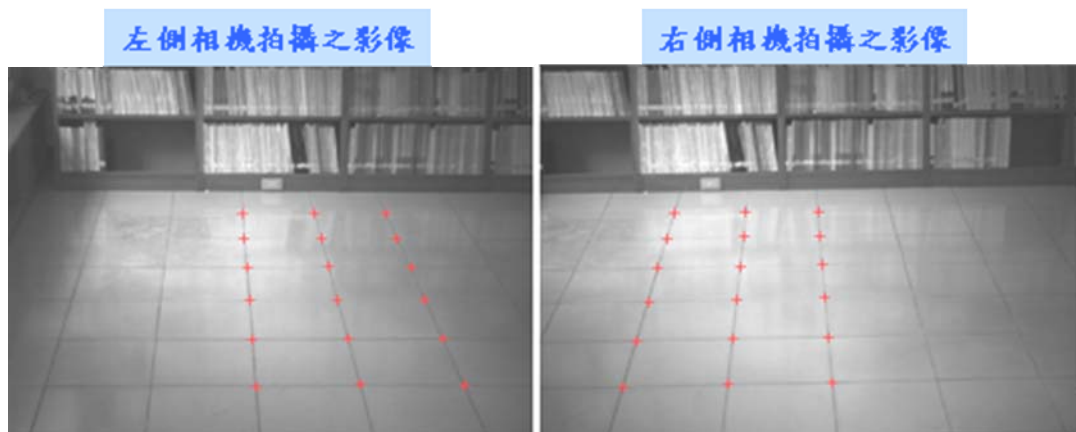


圖5-5 磁磚影像之匹配情形

經立體影像重建後，求得各點的三維座標值，經與實際地磚邊長40公分比較，平均誤差0.06公分(約0.15%誤差率)，尚稱精準。為尋求增加量測之精確性，茲進一步討論在不同儀器架設高度與測距時，誤差之改進情形。

考量不同儀器架設高度(H=110公分、H=140公分、H=180公分)及相同基線(D=80公分)的試驗條件中，其拍攝場景為3公尺至6公尺，分析結果如表5-1。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：若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，故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5-6)。

表5-1 不同攝影高度下測距與偏移量之分析表

拍攝距離(m)	量測結果(cm)			待測長度(cm)	偏移量(cm)			偏移量誤差百分比(%)		
	H=110 cm	H=140 cm	H=180 cm		H=110 cm	H=140 cm	H=180 cm	H=110 cm	H=140 cm	H=180 cm
3.1	40.12	39.91	39.94	40	0.12	0.09	0.06	0.3	0.225	0.15
3.5	39.75	39.89	39.87	40	0.25	0.11	0.13	0.625	0.275	0.325
3.9	39.70	39.80	39.82	40	0.30	0.2	0.18	0.735	0.5	0.45
4.3	39.55	39.68	39.61	40	0.45	0.32	0.39	1.125	0.8	0.975
4.7	39.50	39.40	39.45	40	0.50	0.60	0.55	1.25	1.5	1.375
5.1	39.43	39.30	39.25	40	0.57	0.70	0.75	1.425	1.75	1.875
5.5	39.33	39.28	39.20	40	0.67	0.72	0.80	1.675	1.8	1.9875

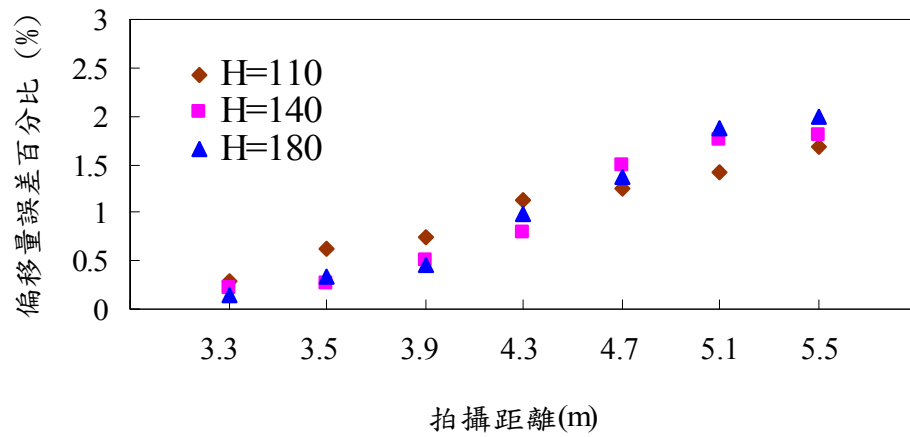


圖5-6 不同拍攝距離與高度之偏移量

5-2-2 空間模擬波場之驗證

平面模擬波場或良好之驗證後，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5-7)作為待測標的物，位置其實驗配置與前小節相同如圖5-2所示，且攝影條件固定為：鏡頭焦距12mm，位於左側、右側及上側攝影機以光軸平行的攝影姿態，其攝影機下傾角度分別 30° 。試驗結果詳細內容分述如下：

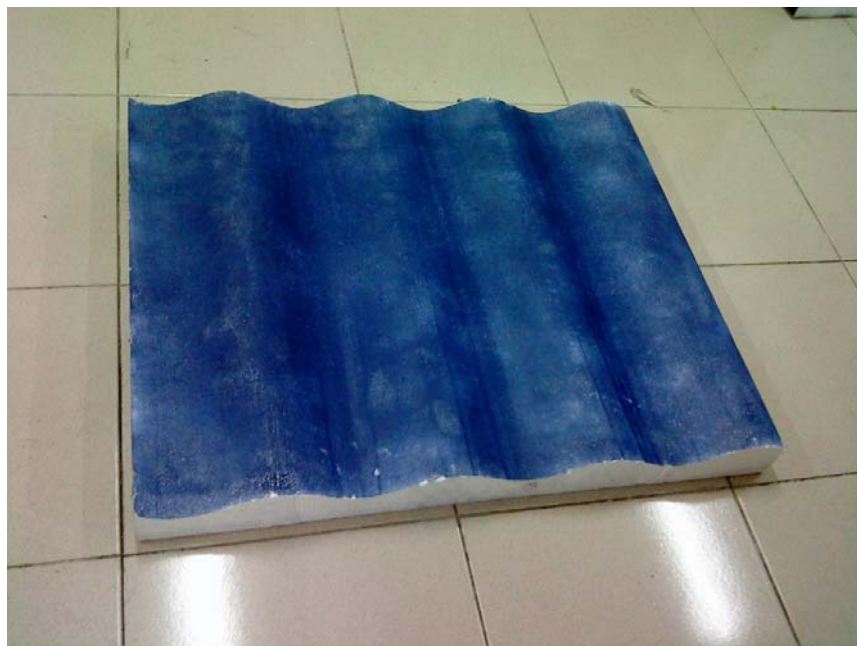


圖5-7 波浪板模型

重建之立體影像如圖5-8所示，於圖4-10中沿著AB剖面線之波峰處，透過本文發展之立體攝影技術量測出其波高為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%。綜合上述各試驗可知，立體攝影技術可提供一準確量測波浪之方法，可被應用於觀測較大範圍的三維波場資訊。

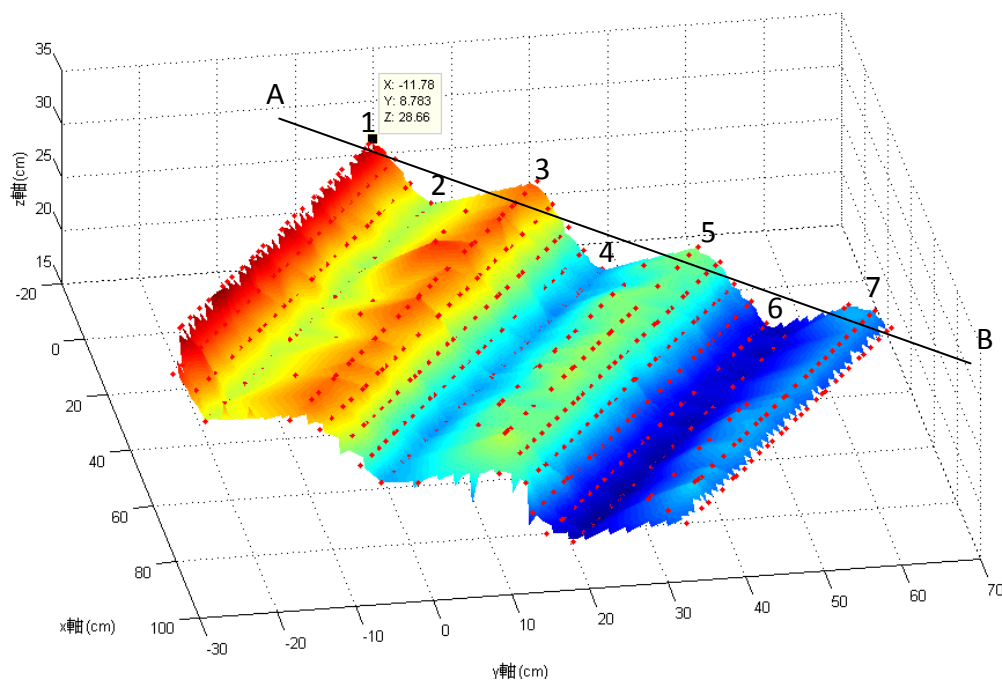


圖5-8 立體影像技術之求解結果

表5-2 立體影像重建結果

編號	x(cm)	y(cm)	z(cm)	實際高程(cm)
1	-11.78	8.78	28.66	29.1
2	-7.52	15.52	23.36	23.1
3	1.39	27.86	27.07	26.5
4	5.96	35.48	19.51	19.8
5	13.94	46.53	23.12	23.0
6	18.91	54.55	16.77	16.5
7	27.86	67.14	19.63	19.8

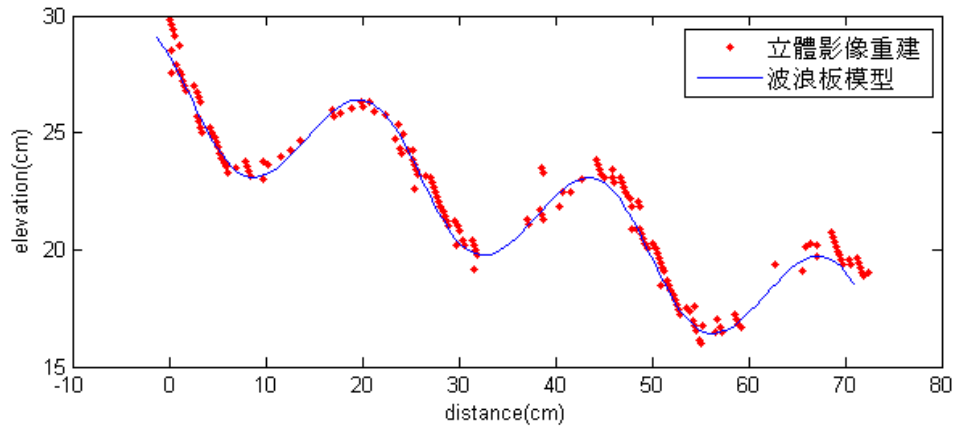
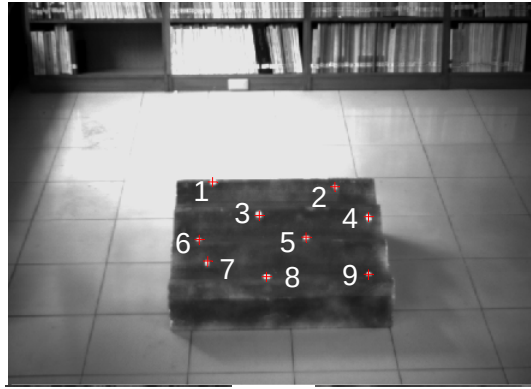


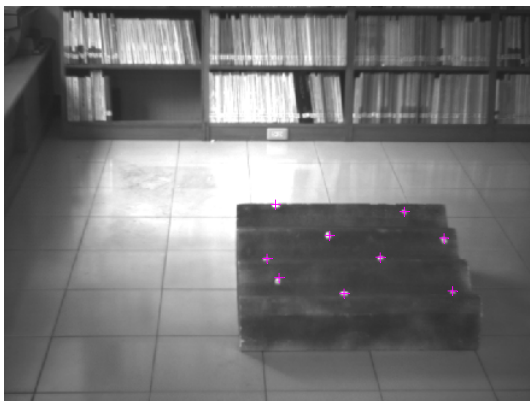
圖5-9 波浪板剖面與立體重建結果比較

如前所述，5-2-1小節探討攝影系統高度與測距對平面測量的誤差情形，本節則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(如圖5-10a)，並量測其實際高度，與立體影像量測結果比較其結果如表5-3，圖5-11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。

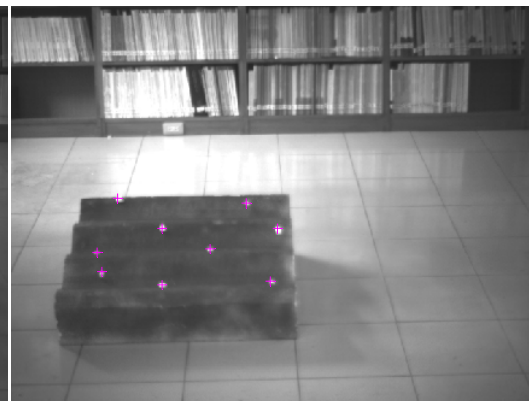
圖5-12為在儀器架設高度180公分及不同的攝影機間之相對距離的攝影條件下，所量測之數據與實測之結果比較圖。在試驗中，當基線為20公分時，其影像量測與實測之高度誤差達到1.23公分，然而隨著基線的增長，當基線為60公分(試驗17)及80公分(試驗18)時，其兩者高度誤差有降低的現象，其高度誤差分別為0.69公分及0.62公分，由此得知，隨著基線的增長，可降低Z軸高度的誤差。



(a) 上側影像



(b) 左側影像



(c) 右側影像

圖5-10 攝影高度1.8公尺拍攝之波浪板影像

表5-3 不同攝影高度下高度誤差分析表

點位	量測結果 (cm)			實際高程 (cm)	高度誤差 (cm)		
	H=110 cm	H=140 cm	H=180 cm		H=110 cm	H=140 cm	H=180 cm
1	31.79	31.88	31.67	31.2	0.59	0.68	0.47
2	28.42	28.37	28.31	27.8	0.62	0.57	0.51
3	26.95	27.05	27.13	26.6	0.35	0.45	0.53
4	26.58	26.46	26.68	26.1	0.48	0.36	0.58
5	22.68	22.61	22.88	22.3	0.38	0.31	0.58
6	21.15	21.1	21.22	20.6	0.55	0.5	0.62
7	20.47	20.57	20.39	19.9	0.57	0.67	0.49
8	19.21	19.34	19.28	18.8	0.41	0.54	0.48
9	19.83	19.93	20.07	19.5	0.33	0.43	0.57

表5-4 不同基線與高度誤差之分析表

點位	量測結果 (cm)			實際高程 (cm)	高度誤差 (cm)		
	D=20 cm	D=60 cm	D=80 cm		D=20 cm	D=60 cm	D=80 cm
1	32.40	31.81	31.79	31.2	1.2	0.61	0.59
2	28.95	28.45	28.42	27.8	1.15	0.65	0.62
3	27.83	27.13	26.95	26.6	1.23	0.53	0.35
4	27.28	26.61	26.58	26.1	1.18	0.51	0.48
5	23.38	22.73	22.68	22.3	1.08	0.43	0.38
6	21.81	21.21	21.15	20.6	1.21	0.61	0.55
7	20.93	20.59	20.47	19.9	1.03	0.69	0.57
8	19.76	19.34	19.21	18.8	0.96	0.54	0.41
9	20.56	19.93	19.83	19.5	1.06	0.43	0.33

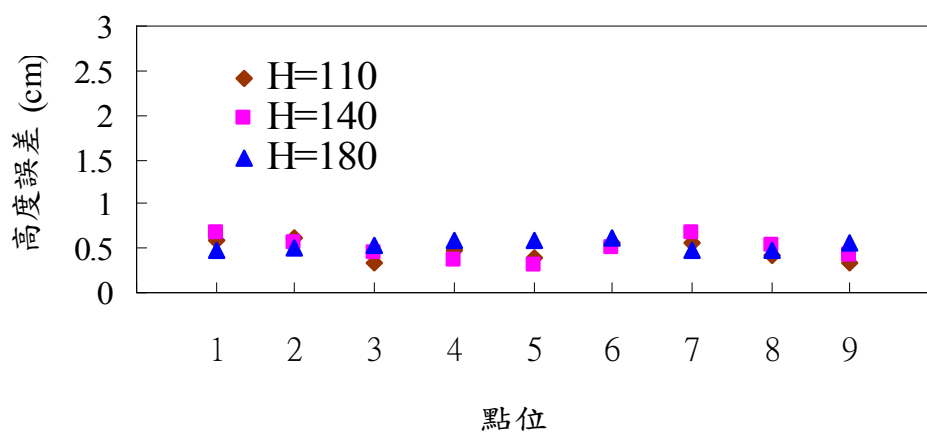


圖5-11 不同攝影高度下之高度誤差圖

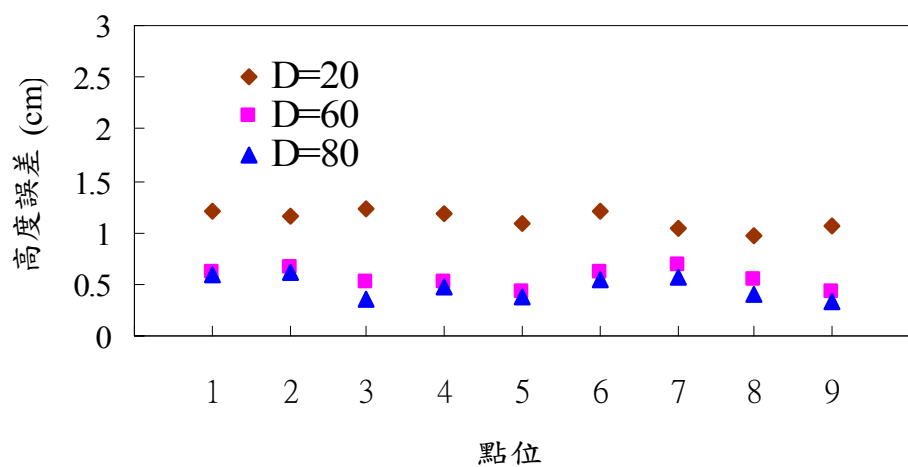


圖5-12 不同基線長度與高度誤差圖

第六章 現場系統動態測試與初步驗證

6-1 現場試驗

6-1-1 試驗佈置

為了驗證本立體攝影系統觀測現場實際動態海況的結果，本計畫執行期間，多次將立體攝影系統架設於現場(包含基隆與台南兩地)，進行觀測試驗，除此之外，為簡化環境干擾，本計畫還在實驗室利用台車與波浪板模擬動態海面進行分析，茲將現場試驗過程說明如下：

一、現場海邊測試

本計畫之主要目的是開發利用攝影機進行觀測海象之技術，因此在完成理論與分析方法建立後，即著手設計現場測試之驗證，除了期中報告建議之測試地點—海洋大學海邊外，本研究團隊還在台南安平港南堤，進行現場觀測試驗。

安平港經擴建後水深達 24 米，本計畫拍攝地點所在處為安平港之南堤中段，水深約有 10 米，可以近距離觀察到較明顯之前進波。測試地點選定後，即須決定拍攝的時間，根據往昔之經驗，拍攝時應盡量避免影像上產生反光，即盡量選定背光方向，本文說明 98 年 4 月 27 日中午之現場試驗狀況，現場試驗所需攜帶之設備與其用途如表 6-1 所示。

為了固定需要，將攝影機連同腳架固定於海堤欄杆上，海堤堤面高度約較海平面高 3~4 公尺，攝影機腳架約高 1.5 公尺，故攝影機位置約為海面上 5~6 公尺。三台攝影機先以一釣魚浮標作標的，瞄準後使該浮標皆位於影像中央位置，並丟擲小石頭，確認漣漪位置均有入鏡。此時攝影機下傾角度分別為(上：50、左：35、右：35)，現場觀測佈置如圖 6-1 所示。

表 6-1 現場觀測試驗攜帶物品與用途

設備名稱	用途	備註
電腦(含錄影軟體)	記錄影像	
攝影機三台(含腳架)、包含 1394 訊號線	拍攝影像	須能被 Trigger 控制同步
訊號觸發器及訊號線	使三台相機取得同步影像	
校正板	外部校正使用	

電力設備	供電	可持續使用 2 小時以上之行動電源
------	----	-------------------



圖 6-1 民國 98 年 4 月 27 日於台南安平港海邊現場測試之佈置

二、實驗室測試

為了加強驗證，除了現場測試之外，本團隊設計另一較簡便之方法，即利用之前所製作之靜態測試用波浪板，以人力推動使之前進，觀測計算其波浪前進情形。因為波浪板之外型尺寸已知，故可快速與計算結果進行驗證比對。

設置地點係借用成功大學近海水文中心場地，其試驗設備與前小節現場試驗相同，但因室內電源容易取得，故不需攜帶行動電源，另須準備波浪板及推進之推車。而為了取得較大之攝影面積，避免波谷被波峰擋住造成立體成像的盲區，故將攝影系統設置於高處，設置高度約 3 公尺(如圖 6-2)，完成佈置後再以自行製作之波浪板定速前進，進行攝影與轉換立體影像。與現場測試不同之處，是現場測試因為海面的位置較難調整，故先拍海面再拍校正板，而於實驗室中，則可先以校正板為中心，拍攝完後再拍攝實物部份。



圖 6-2 實驗室人工推動波浪板模擬動態海況之試驗佈置

6-1-2 試驗過程

依前小節完成試驗佈置後，即開始進行拍攝，首先調整鏡頭上之光圈至適合亮度(配合當時陽光強度，拍攝當時略為陰天故不需調暗太多，若有強烈陽光則需調暗，避免整個影像曝光，造成無法辨識)，並調整對焦距離至影像清晰；接著進行影像微調，利用錄影軟體上之功能鍵，調整影像之亮度(brightness)、曝光(shutter)、增益比(gain)，使三台相機之影像至少在肉眼是清晰可辨的。

為使三相機取得同一時間之影像，故採用 RAM 儲存模式，其優點為訊號儲存速度快減少儲存造成之時間差，但缺點是可儲存資料量較少，本次試驗使用電腦配備 1GB 之記憶體，約能儲存 3000 張影像，若以 10(fps)速率三台拍攝約可拍攝 100 秒。本次試驗採用 7fps 速率拍攝，拍攝約 16 秒之時間。

拍攝完成後，依前述之內部校正、外部校正步驟，由自行撰寫之程式求得 11 個 DLT 參數，接著進行影像匹配，影像匹配係利用極線幾何搭配 NCC 之方法進行，但由於完成拍攝海面時轉向拍攝校正板時，可能有些微晃動，導致匹配結果誤差頗大，經檢查測試流程，發現應修正基礎矩陣。

因此本研究以人工選定明顯的匹配點(如圖 6-3 所示)，經重新計算基礎矩陣後，匹配成功率大幅提升。接著設定影像中一固定區域，將每一時間片段之三攝影機攝得影像進行匹配，匹配結果如圖 6-4 所示，由圖中可發現有部分點位匹配不佳，造成影像重建時的錯誤，本文將其修正以改善立體影像重建結果。實驗室動態波浪模擬的匹配結果則如圖 6-5 所示。

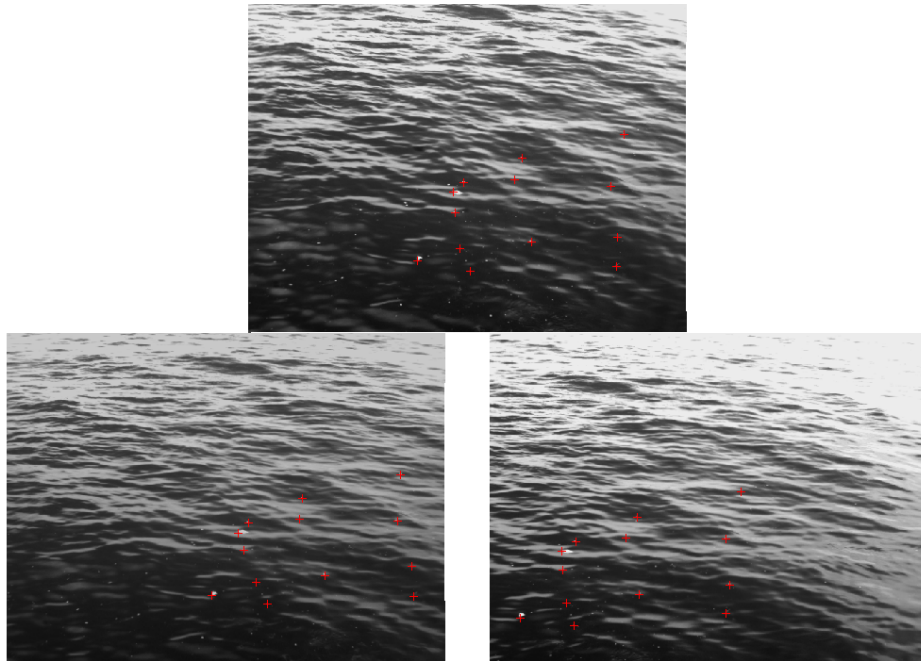


圖 6-3 人工選定實際海面影像點位計畫匹配用之基礎矩陣

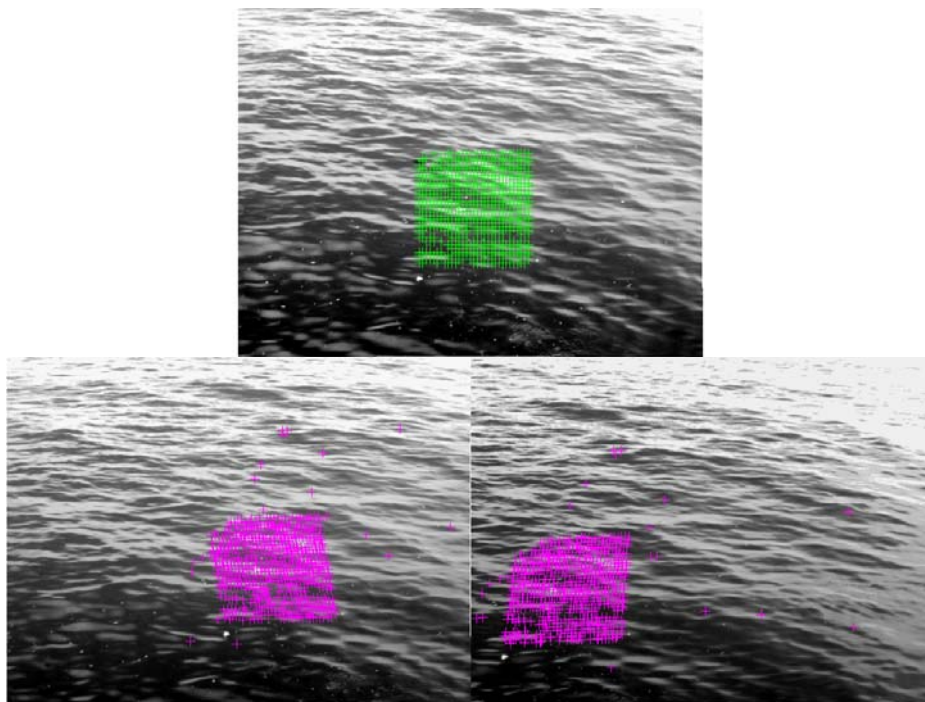


圖 6-4 現場影像匹配結果。吾人發現匹配結果大致良好，部分點位匹配不佳需予以捨棄

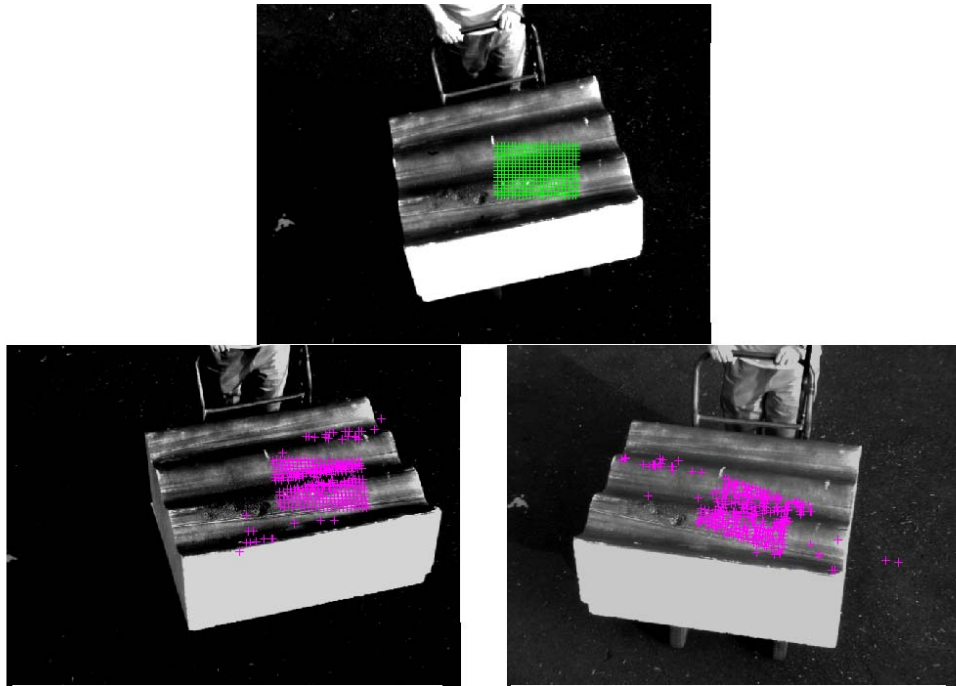


圖 6-5 實驗室動態波浪模擬的匹配結果

6-2 波浪分析方法

波浪分析較常用的方法為零上切(Zero-up cross method)法，即先定出水位變動之平均水位線為零線，然後以波形由負水位(波谷)上升與零線相交之點稱為零上切點(如圖 6-6 中之小圓圈)，波群中取最大之三分之一個波高平均者稱之為三分之一最大波高 $H_{1/3}$ 或示性波高(significant wave height)，其對應之週期，稱為三分之一週期($T_{1/3}$)或示性週期(significant wave period)，一般可以獲得海上某點水面的時間變化序列的觀測方式都使用此方法來分析波浪。

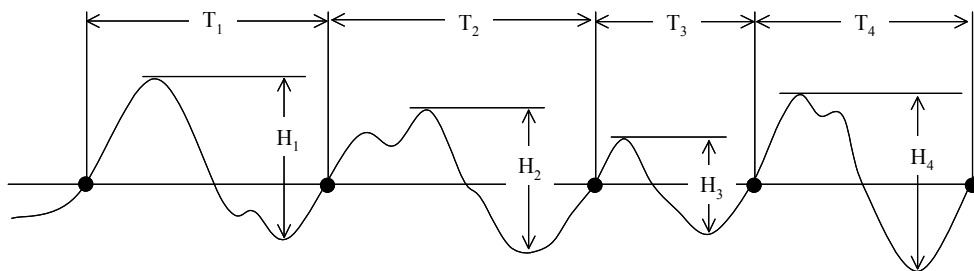


圖6-6 零上切波浪分析法示意圖

除此之外，波浪還可以用波譜法來進行分析，它是經由計算波浪的能譜(energy spectrum)，再透過積分計算來獲得示性波高、平均週期、尖峰週期以及波向等波浪參數，其觀測方法、計算及流程分述如下：

1. 訊號濾波

電子線路組合常產生之雜訊，對於只取平均值之氣象資料影響甚小，但對於波浪譜卻有極大影響，必須做濾波處理，目前採用硬體及軟體相互配合進行濾波。經硬體低通濾波後，雜訊大幅消除，但訊號中仍存在小量雜訊，必須以數據分析方法濾除。

2. 波浪譜計算

透過快速傅利葉轉換分析法(FFT)或小波轉換法(Wavelet transform)等方式計算波浪能譜。

3. 波高、週期與波向計算

波浪示性波高、平均週期與波譜間存在定量關係，依據學理計算示性波高及平均週期，其中 m_0 為波譜總能量， m_2 為波譜二次矩：

$$\text{示性波高 } H_s = 4.004 \times \sqrt{m_0}$$

$$\text{平均週期 } T_z = \sqrt{m_0/m_2}$$

波向則使用方向波譜能量最大之處所對應之方向。

6-3 分析結果與討論

6-3-1 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(前章)，最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(下節說明)。本研究在基隆和高雄從事很多次的現場觀測試驗，但僅有少數的幾次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。藉由本研究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 6-7)，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，因此吾人必須將這些錯誤匹配點去除，本文加入邏輯判斷方法，藉由程式(因為匹配點數太多)自行去除這些顯著的

匹配失誤點，圖 6-8 是去除掉錯誤匹配點後的匹配結果。

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 6-9 所示。吾人發現在圖 6-9 中仍有部分奇異突起的數據點，經研討發現，那也是由於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。至於可能是何原因造成這些錯誤的匹配結果將在下面幾節予以討論。

我們擷取觀察影像上某一點的時序變化，在此選擇上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 6-11，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。雖然現場動態海況的驗證案例不多(很多次的現場試驗，但資料品質可分析者不多)，但這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。

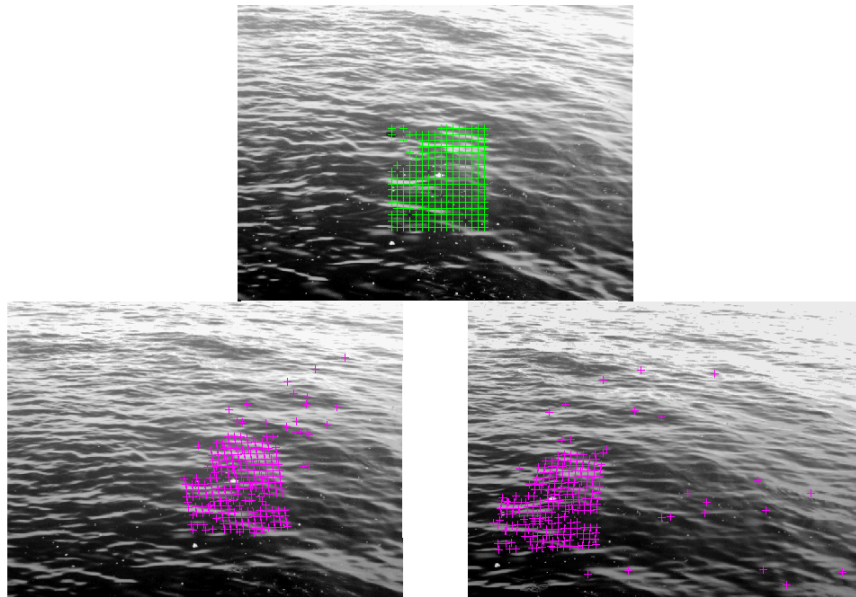


圖6-7 現場試驗常出現顯著錯誤的匹配點

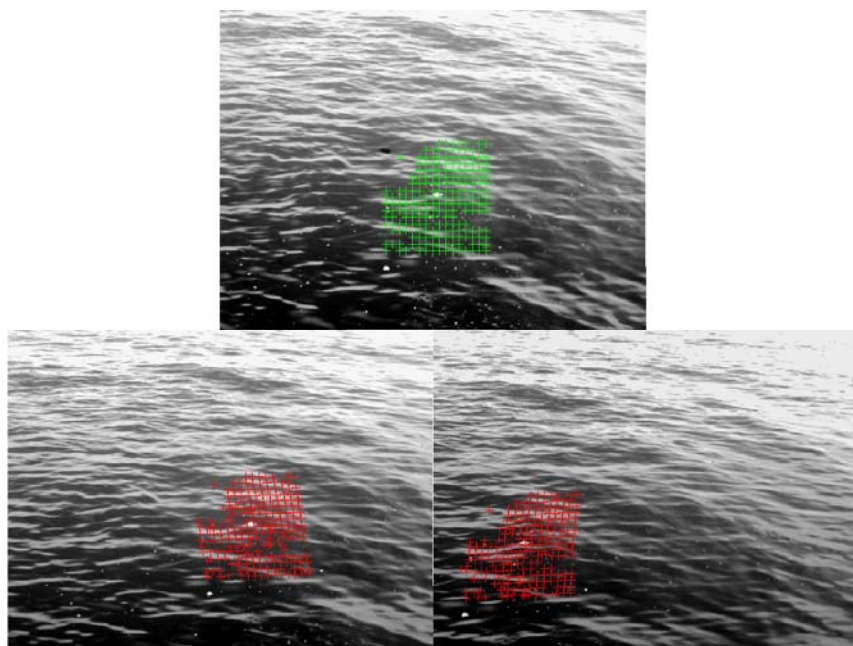


圖6-8 去除掉匹配錯誤點位後的結果

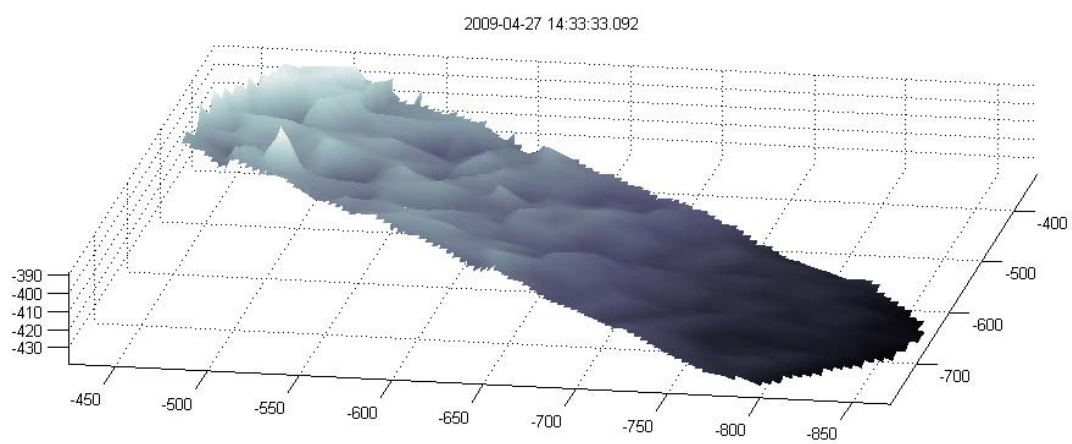


圖 6-9 現場立體海況重建結果

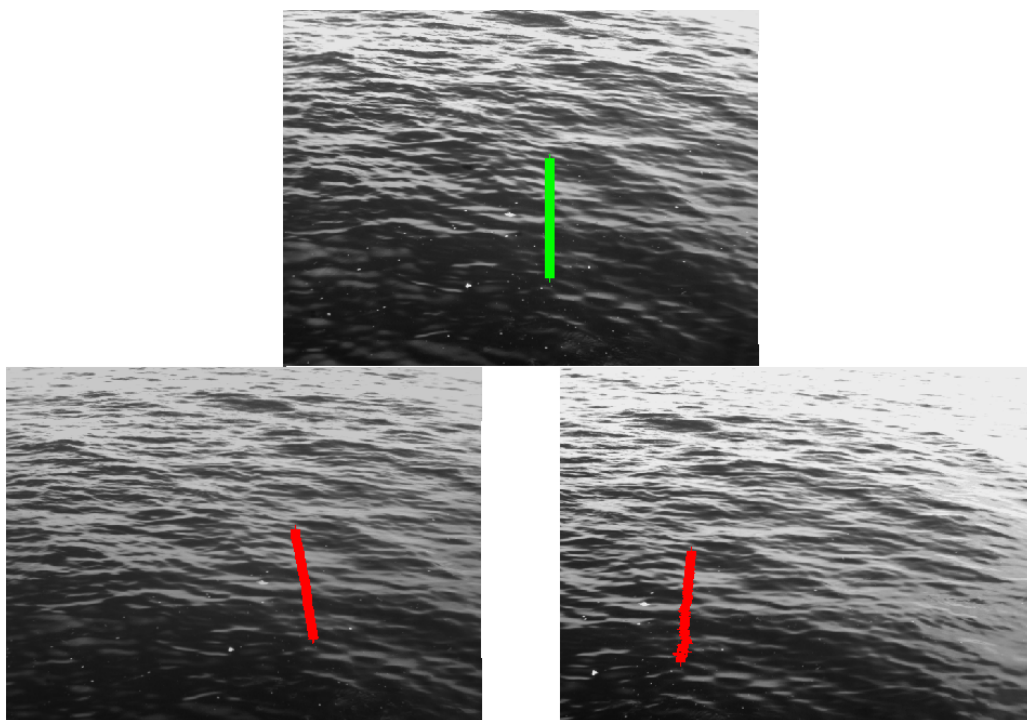


圖6-10 擷取三台相機上同一條測線探討其水位波動變化

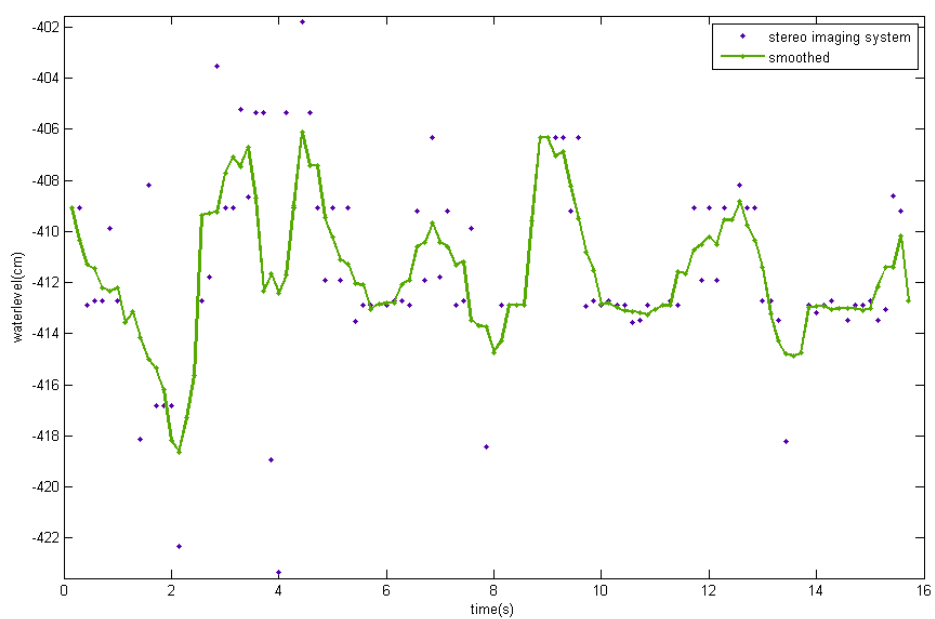


圖6-11 前圖所擷取的剖面線的水位變化圖

6-3-2 儀器水平問題

為了瞭解相機觀測平台的特性，本研究在鋪設磁磚的地板與標示格線的地板為目標進行測試。觀測平台的攝影參數為左右相機高度 1.55m，中央相機高度 2.0m，左右相機與中心距離 0.45m。分別以不同的水平俯角和水平旋轉角進行拍攝，並測量所拍攝相片的 4 個端點與原點(中央相機在地板上的投影點)距離。本研究依每個相片所拍攝的相機高度、相機距離、相機水平俯角、水平旋轉角及左右旋轉角等攝影參數，分別計算每個相片的 4 個端點，並將相片依攝影參數進行幾何校正。再與現場端點量測資料比對，以瞭解觀測平台的觀測方向與水平等特性。

表 6-2 為模式結果與實測結果的誤差統計表，表示不同的水平俯角、不同的左右相機水平旋轉角，中央相機的左右旋轉角為 0 度，左右相機高度為 1.55m，中央相機高度為 2.0m 的條件下，相片 4 個端點的現場測量值(meas.)與模式計算值(model)的比較。首先討論 case 1-1，其左右相機的水平俯角為 25 度，中央相機的水平俯角為 30 度，左右相機的水平旋轉角為 3 度時，右相機的 4 個端點的現場測量值與模式計算值的誤差值範圍為 -0.1383 ~ 0.4088m，其平均誤差值為 0.1159m，標準差為 0.1834m，水平最小解析度為 0.27cm，垂直解析度為 0.4cm。左相機 4 個端點的誤差值範圍為 -0.1845 ~ 0.1637m，平均誤差為 -0.0543m，標準差為 0.126m，水平最小解析度為 0.27cm，垂直解析度為 0.44cm。中央相機 4 個端點的誤差範圍為 -0.0640 ~ 0.5383m，平均誤差 0.2089m，標準差 0.2248m，水平最小解析度為 0.27cm，垂直解析度為 0.4cm。

Case 1-2 為左右相機的水平俯角為 35 度，水平旋轉角為 3 度，中央相機的水平俯角為 40 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0792 ~ 0.2252m，平均誤差為 0.161m，標準差為 0.0492，水平最小解析度為 0.16cm，垂直解析度為 0.22cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為 -0.0668 ~ 0.2127m，平均誤差為 0.0820m，標準差為 0.1098m，水平最小解析度為 0.16cm，垂直解析度為 0.22cm。中央相機的誤差範圍為 0.0023 ~ 0.1303m，平均誤差為 0.054m，標準差為 0.0466m，水平最小解析度為 0.17cm，垂直解析度為 0.21cm。

Case 1-3 為左右相機的水平俯角為 45 度，水平旋轉角為 3 度，中央相機的水平俯角為 50 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 -0.0109 ~ 0.1445m，平均誤差為 0.0828m，標準差為 0.0541，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。左相機 4

個端點的誤差範圍為-0.2339 ~ 0.1233m，平均誤差為 0.0217m，標準差為 0.1132m，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。中央相機的誤差範圍為-0.0246 ~ 0.0709m，平均誤差為 0.0309m，標準差為 0.0380m，水平最小解析度為 0.13cm，垂直解析度為 0.14cm。

Case 2-1 為左右相機的水平俯角為 25 度，水平旋轉角為 5 度，中央相機的水平俯角為 30 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為-0.1969 ~ 0.3753m，平均誤差為 0.1007m，標準差為 0.1826m，水平最小解析度為 0.26cm，垂直解析度為 0.42cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為-0.0767 ~ 0.1586m，平均誤差為 0.0353m，標準差為 0.0902m，水平最小解析度為 0.27cm，垂直解析度為 0.45cm。

Case 2-2 為左右相機的水平俯角為 35 度，水平旋轉角為 5 度，中央相機的水平俯角為 40 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0128 ~ 0.1263m，平均誤差為 0.0696m，標準差為 0.0422m，水平最小解析度為 0.16cm，垂直解析度為 0.2cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為-0.0357 ~ 0.1328m，平均誤差為 0.0609m，標準差為 0.0611m，水平最小解析度為 0.16cm，垂直解析度為 0.21cm。

Case 2-3 為左右相機的水平俯角為 45 度，水平旋轉角為 5 度，中央相機的水平俯角為 50 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0352 ~ 0.1491m，平均誤差為 0.0930m，標準差為 0.0341m，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0189 ~ 0.1281m，平均誤差為 0.0756m，標準差為 0.0348m，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。

Case 3-1 為左右相機的水平俯角為 25 度，水平旋轉角為 8 度，中央相機的水平俯角為 30 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為-0.2401 ~ 0.3893m，平均誤差為 0.0830m，標準差為 0.1929m，水平最小解析度為 0.26cm，垂直解析度為 0.4cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為-0.1397 ~ 0.1924m，平均誤差為 0.0600m，標準差為 0.1243m，水平最小解析度為 0.27cm，垂直解析度為 0.45cm。

Case 3-2 為左右相機的水平俯角為 35 度，水平旋轉角為 5 度，中央相機的水平俯角為 40 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0504 ~ 0.1707m，平均誤差為 0.1319m，標準差為 0.0425m，水平最小解析度為 0.15cm，垂直解析度為 0.2cm。左相機 4

個端點的誤差範圍為 0.0411 ~ 0.2689m，平均誤差為 0.1474m，標準差為 0.0655m，水平最小解析度為 0.16cm，垂直解析度為 0.23cm。

Case 3-3 為左右相機的水平俯角為 45 度，水平旋轉角為 5 度，中央相機的水平俯角為 50 度，水平旋轉角為 0 度的攝影參數進行拍攝相片。其右相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0411~ 0.1623m，平均誤差為 0.0870m，標準差為 0.0435m，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。左相機 4 個端點的誤差範圍為 0.0317 ~ 0.1413m，平均誤差為 0.0991m，標準差為 0.0356m，水平最小解析度為 0.11cm，垂直解析度為 0.13cm。

其中誤差大於 0.2m 的結果再依攝影參數修訂後說明如下：Case 1-1 的右相機的水平俯角修訂為 25.3，水平旋轉角修訂為 1 度，其誤差範圍減少為-0.0591 ~ 0.1487，平均誤差為 0.0805，標準差為 0.0758。Case 1-1 的中央相機的水平俯角修訂為 29 度，其誤差範圍減少為-0.0117~ 0.1890，平均誤差為 0.0938，標準差為 0.0747。修訂後的誤差明顯小於原誤差，顯示觀測時右相機和中央相機的角度值讀數需要訂正。

Case 1-2 的右相機的水平俯角修訂為 34，水平旋轉角修訂為 1 度，其誤差範圍減少為-0.0077 ~ 0.1072，平均誤差為 0.0577，標準差為 0.0408。Case 1-2 的左相機的水平俯角修訂為 34，其誤差範圍減少為-0.0601 ~ 0.1176，平均誤差為 0.0204，標準差為 0.0647。Case 1-3 的左相機的水平旋轉角修訂為 2 度，其誤差範圍減少為-0.1931 ~ 0.1314，平均誤差為 0.0358，標準差為 0.1002。

Case 2-1 的右相機的水平俯角修訂為 25.3，水平旋轉角修訂為 2 度，其誤差範圍減少為-0.1642 ~ 0.1826，平均誤差為 0.0225，標準差為 0.1179。Case 3-1 的右相機的水平俯角修訂為 25.5，水平旋轉角修訂為 6 度，其誤差範圍減少為-0.0897 ~ 0.1724，平均誤差為 0.0627，標準差為 0.0896。Case 3-2 的左相機的水平俯角修訂為 34，水平旋轉角修訂為 10 度，其誤差範圍減少為-0.0464 ~ 0.1227，平均誤差為 0.0427，標準差為 0.0582。

從以上各誤差大於 0.2m 的事件修正結果顯示誤差明顯減少，表示這些事件的攝影參數需要修訂，也就是相機的觀測角度需要修正。其原因可能是觀測平台的水平調整需要更精確，或者是相機雲台各個角度的讀取需要更精準。

圖 6-12 為攝影參數水平俯角為 30 度，水平旋轉角為 0 度時所拍攝的影像，經幾何校正後的影像如右圖。圖 6-13 為水平俯角為 35 度時的原始

相片與幾何校正後結果。圖 6-14 為水平俯角為 35 度，右相機水平旋轉角為 10 度時的原始相片及幾何校正後影像。顯示磁磚的水平與垂直線均平行於圖框，表示經幾何校正後的影像可呈現原始形狀。

圖 6-15 為 case 1-1 右相機的原始相片及依原始攝影參數的幾何校正結果影像。而圖 6-16 為這相機的水平俯角與旋轉角修正後，再進行幾何校正。將垂直線和水平線與影像框比較顯示，經修正後幾何校正後的影像有明顯地改善。

從以上討論可發現，水平俯角的修正值約在 1 度以內，而水平旋轉角的修訂量為 1~3 度。而攝影參數會影響從所拍攝相片推算現場位置的結果，而影響現場拍攝時攝影參數的因素可能有觀測平台的水平問題，與相機雲台的角度讀取精確度。

表 6-2 模式結果與實測結果誤差統計表

	相機	修訂前誤差				修訂後誤差			
		平均值	標準差	最大值	最小值	平均值	標準差	最大值	最小值
case 1-1	R	0.1159	0.1834	0.4088	-0.1383	0.0805	0.0758	0.1487	-0.0591
	L	-0.0543	0.1260	0.1637	-0.1845	---	---	---	---
	C	0.2089	0.2248	0.5383	-0.0640	0.0938	0.0747	0.1890	-0.0117
case 1-2	R	0.1610	0.0492	0.2252	0.0792	0.0577	0.0408	0.1072	-0.0077
	L	0.0820	0.1098	0.2127	-0.0668	0.0204	0.0647	0.1176	-0.0601
	C	0.0540	0.0466	0.1303	0.0023	---	---	---	---
case 1-3	R	0.0828	0.0541	0.1445	-0.0109	---	---	---	---
	L	0.0217	0.1132	0.1233	-0.2339	0.0358	0.1002	0.1314	-0.1931
	C	0.0309	0.0380	0.0709	-0.0246	---	---	---	---
case 2-1	R	0.1007	0.1826	0.3753	-0.1969	0.0225	0.1179	0.1826	-0.1642
	L	0.0353	0.0902	0.1586	-0.0767	---	---	---	---
	C								
case 2-2	R	0.0696	0.0422	0.1263	0.0128	---	---	---	---
	L	0.0609	0.0611	0.1328	-0.0357	---	---	---	---
	C								
case 2-3	R	0.0930	0.0341	0.1491	0.0352	---	---	---	---
	L	0.0756	0.0348	0.1281	0.0189	---	---	---	---
	C								
case 3-1	R	0.0830	0.1929	0.3893	-0.2401	0.0627	0.0896	0.1724	-0.08967
	L	0.0600	0.1243	0.1924	-0.1397	---	---	---	---
	C								
case 3-2	R	0.1319	0.0425	0.1707	0.0504	---	---	---	---
	L	0.1474	0.0655	0.2689	0.0463	0.0427	0.0582	0.1227	-0.04644
	C								
case 3-3	R	0.0870	0.0435	0.1623	0.0411	---	---	---	---
	L	0.0991	0.0356	0.1413	0.0317	---	---	---	---
	C								

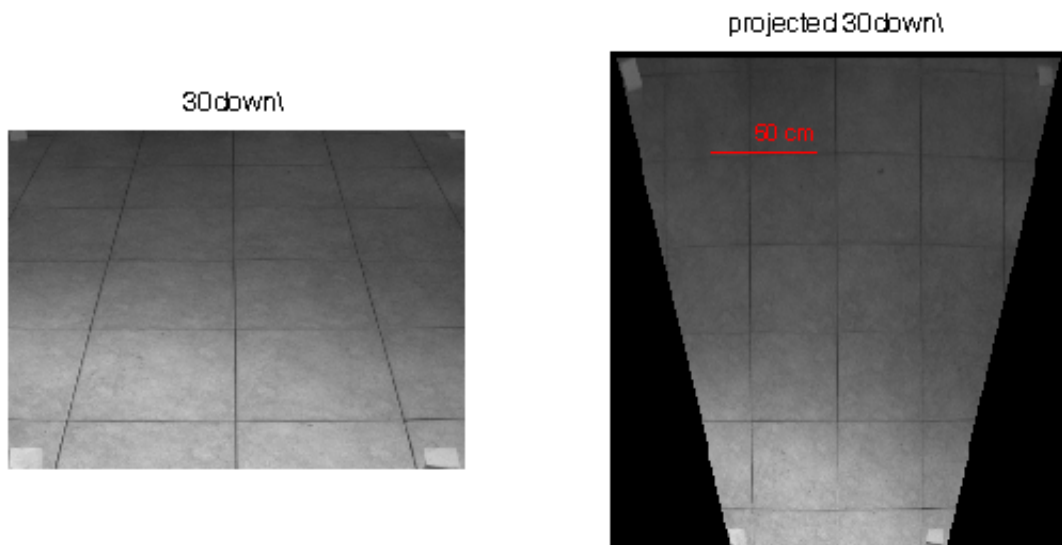


圖 6-12 攝影參數：水平俯角 30 度，水平旋轉角 0 度(左)原相片，(右)幾何校正後影像

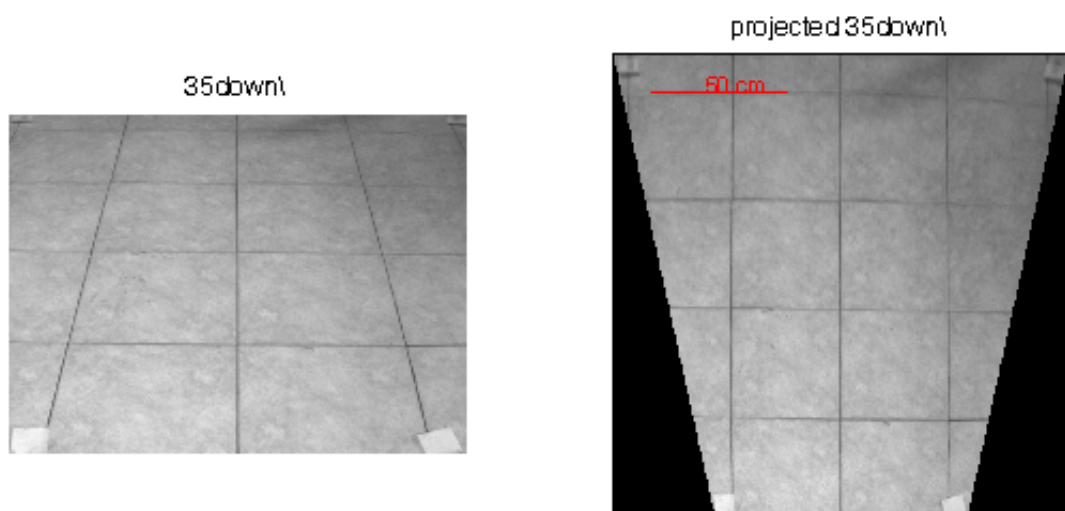


圖 6-13 攝影參數：水平俯角 35 度，水平旋轉角 0 度(左)原相片，(右)幾何校正後影像

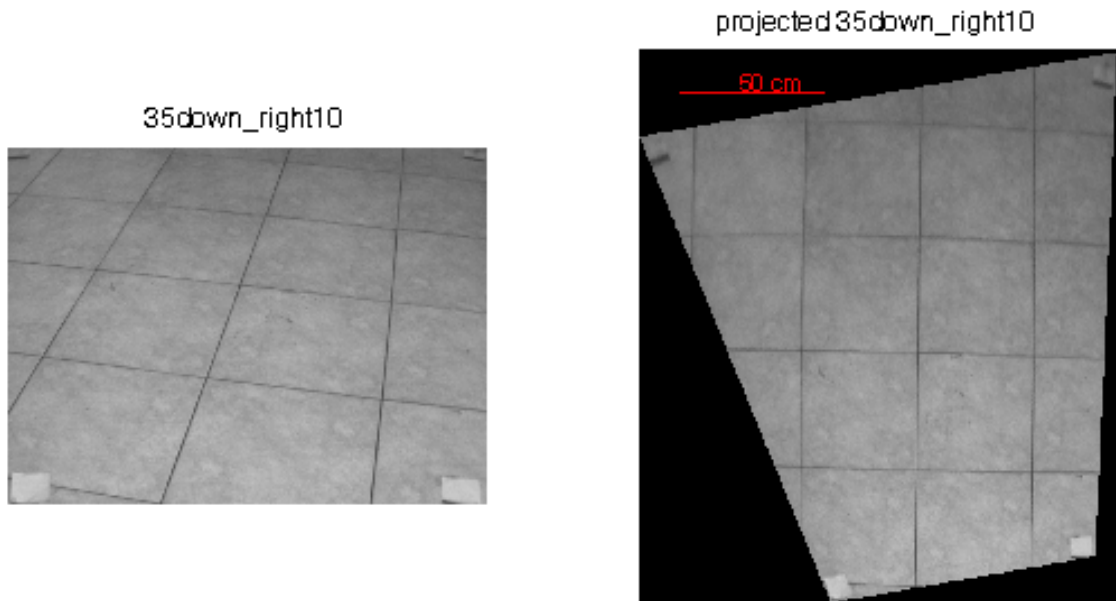


圖 6-14 攝影參數：水平俯角 35 度，右側相機水平旋轉角 10 度 (左)原影像，
(右)幾何校正後影像

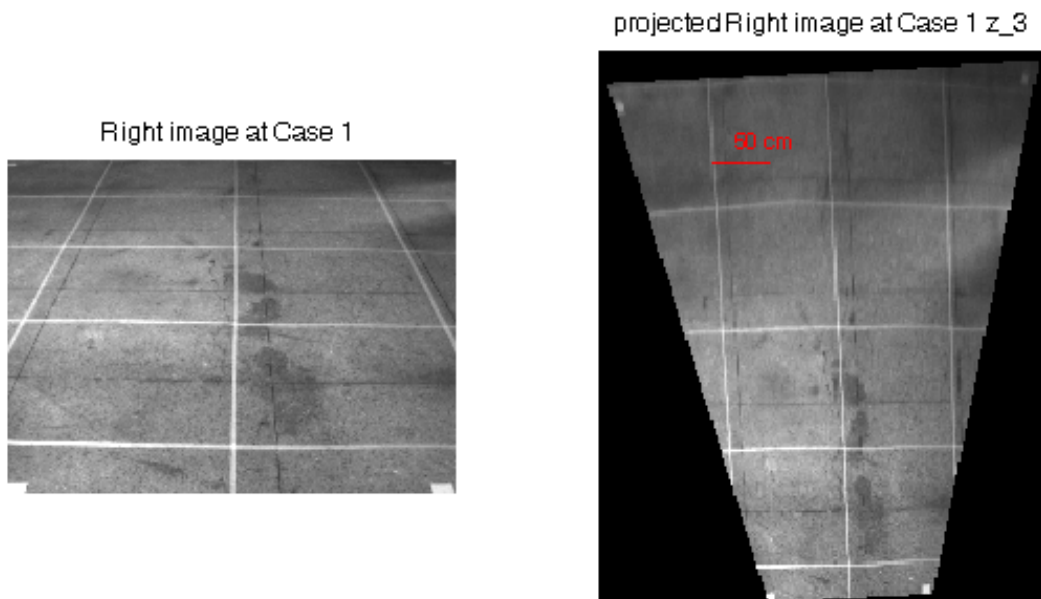


圖 6-15 攝影參數：水平俯角 25 度，右側相機水平旋轉角 3 度 (左)原影像，
(右)幾何校正後影像

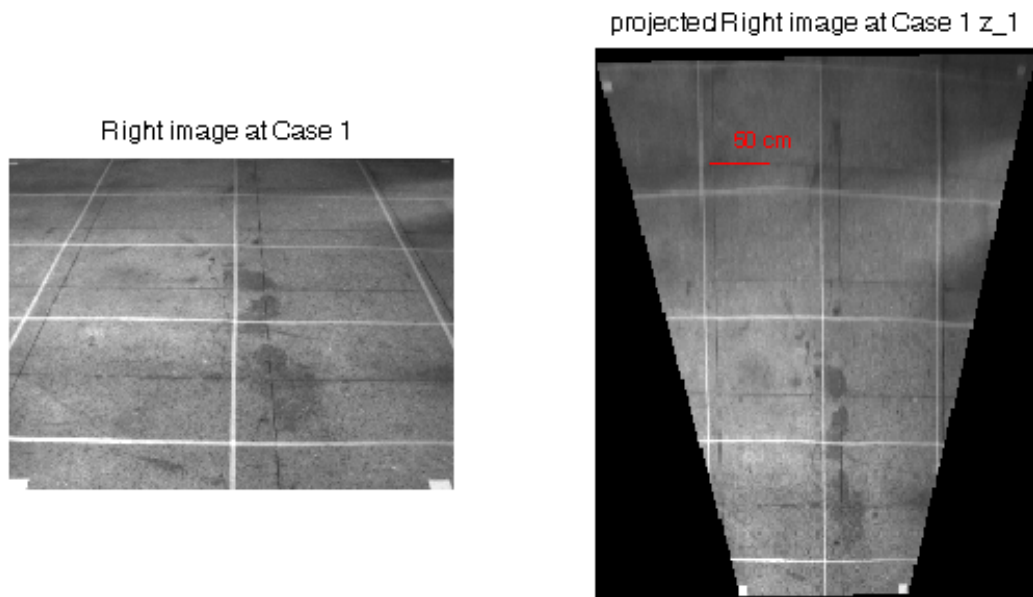


圖6-16 攝影參數：水平俯角25度，右側相機水平旋轉角1度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像

6-3-3 時間差對影像匹配造成之影響

本計畫透過三台高速攝影機同時拍攝海面之同一區域，藉以觀察波浪特性。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。本計畫使用 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 6-17 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，該圖(a)(b)(c)

分別為上方、左側、與右側相機於同一 case 中所拍攝的同一 frame 影像(第 820 張)。利用程式分析結果可看出在(a)圖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，另外也可從圖 6-18 影像匹配結果立體圖中看出 Z 軸所示波峰線高程差約為 100 cm，與當日實際海面狀況不符(當時浪高未達 100 cm)。若觀察 (a)(b)(c) 之拍攝時間，(a)圖時間為 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。

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 frame (即 caes 中第 821 張)，如圖 6-19 中(a)圖時間為 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。圖 6-20 為時間差較小之立體影像匹配結果，可看出所測量波峰線高程差約為 20 cm，與現場實際海面狀況較接近(圖 6-21)。

由以上兩例，將上方拍攝影像往後取一張 frame，時間差從 0.085 秒縮減至 0.018 秒後匹配，結果可看出若時間差太大則會直接影響到影像匹配結果是否成功，若時間差較小，則匹配結果較準確。

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。

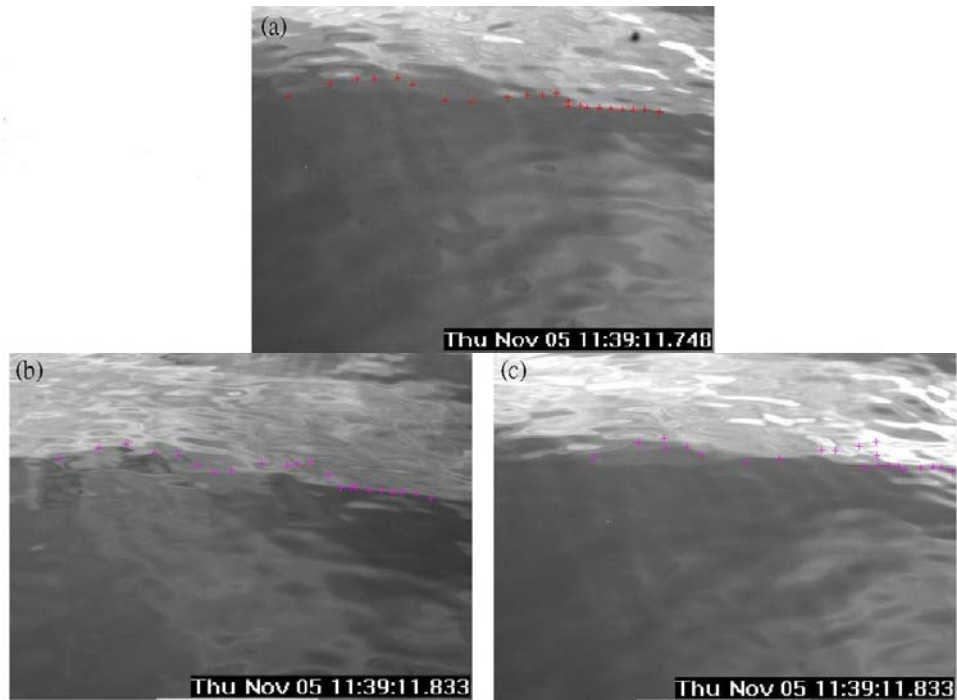


圖 6-17 (a)(b)(c) 依序是三台高速攝影機(某一 case 中第 820 張)上方、左側、與右側所拍攝的海面即時影像匹配結果。

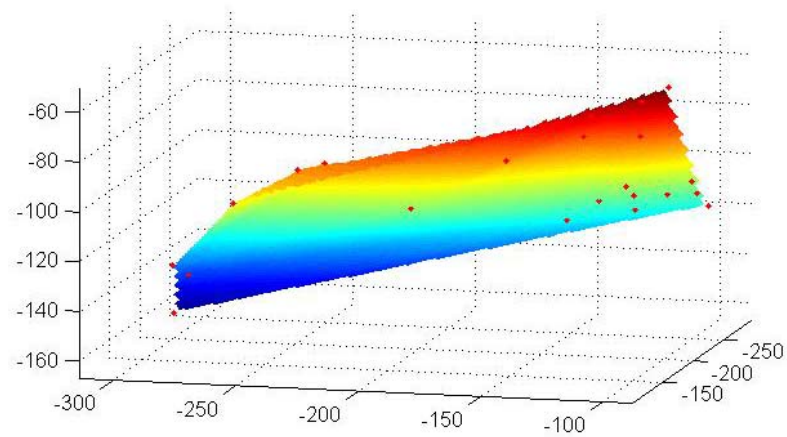


圖 6-18 時間差較大之立體影像匹配，結果與實際海面狀況差異大

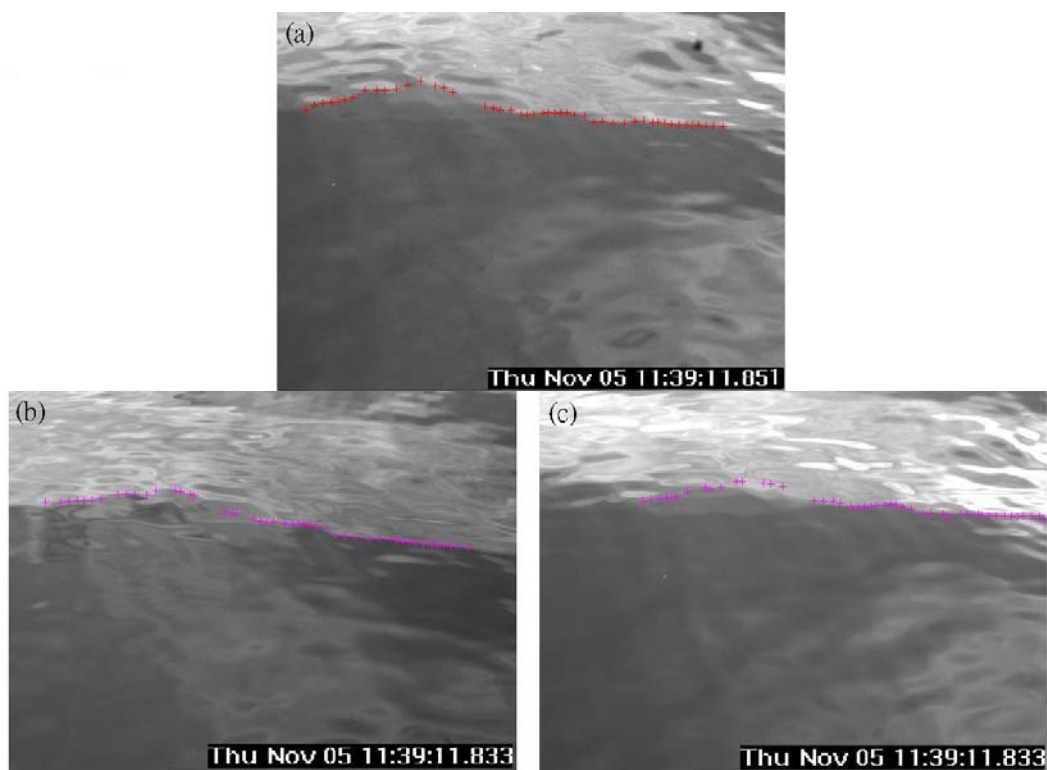


圖 6-19 (a)(b)(c) 依序是三台高速攝影機上方所拍攝的影像(圖 6-12)往後取一張 frame (第 821 張)、左側(第 820 張)、與右側(第 820 張)所拍攝的海面即時影像之匹配結果。

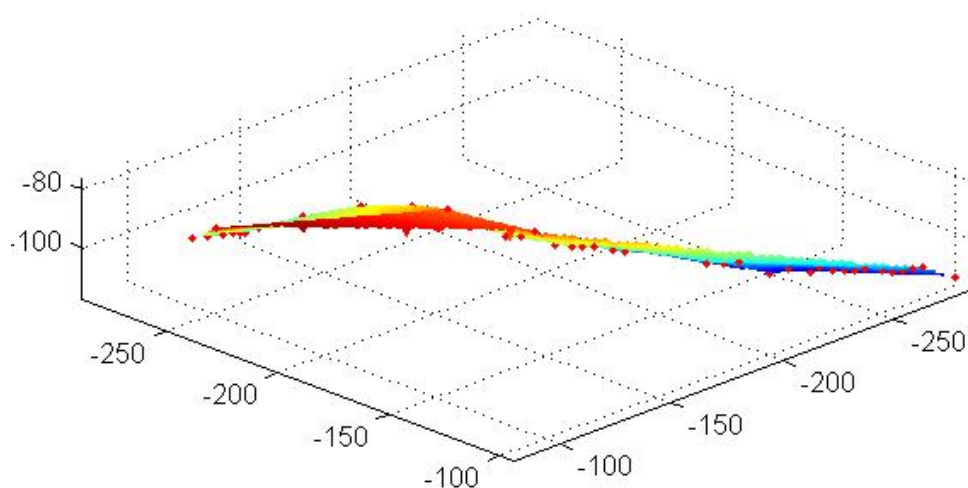


圖 6-20 時間差較小之立體影像匹配，結果與實際海面狀況較接近



圖 6-21 2009/11/5 實驗時海面狀況

6-3-4 光影差對影像匹配造成之影響

根據研究團隊非常多次的現場試驗經驗歸納，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。前節中提到，時間差較小可使匹配結果較準確，以下各例中分別於影像中標示拍攝當時日期與時間，可看出時間差均小，皆於可接受範圍內，故在此忽略時間差問題，假設三台攝影機為同步攝影並擷取瞬間的同步影像，將於本章節中討論光影變化造成匹配工作上的困難。

在無時間差問題下，那麼三台高速攝影機在拍攝海面影像時的同一 frame 之時間影像，其當時的拍攝條件應相同(例如光源方向)，但由於三台攝影機之間的相對位置與相機偏角、俯角不同，故即使是同一時間與同一 frame 所擷取出的影像畫面，其海面上之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。三張影像光影變化趨勢若一致，且同一影像中的對比大，例如波峰明顯，則匹配結果良好；若光影變化趨勢相異，且影像對比不明顯，例如水位變化不明顯的區域，則可能造成匹配結果差，亦無法從中判別出落點是否正確。以下以實例說明之：

※案例一：

圖 6-22 (a)(b)(c)分別為相機上方、左側、與右側所拍攝的影像，時間差

僅 0.018 秒。從圖中可看出(b)圖左側與右下角的光影變化與(a)(c)明顯相異，使得 NCC 方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)圖中的綠點正確位置應落於(b)(c)圖中的紅色區塊內。光影變化造成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 6-23 為立體影像匹配結果，推測原因為影像光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想。

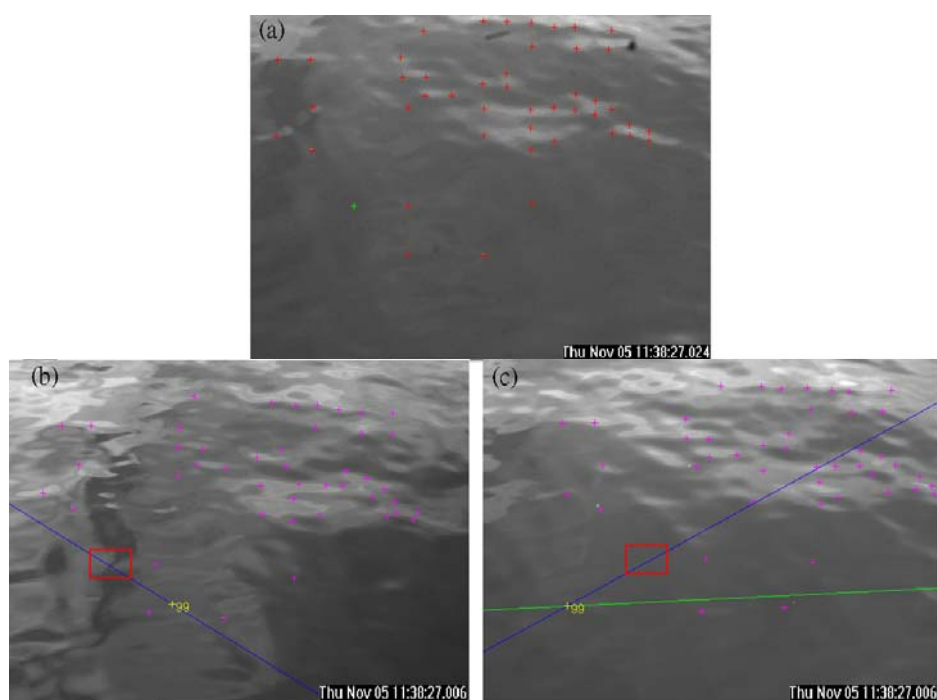


圖 6-22 (b)圖左側與右下區塊的光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判

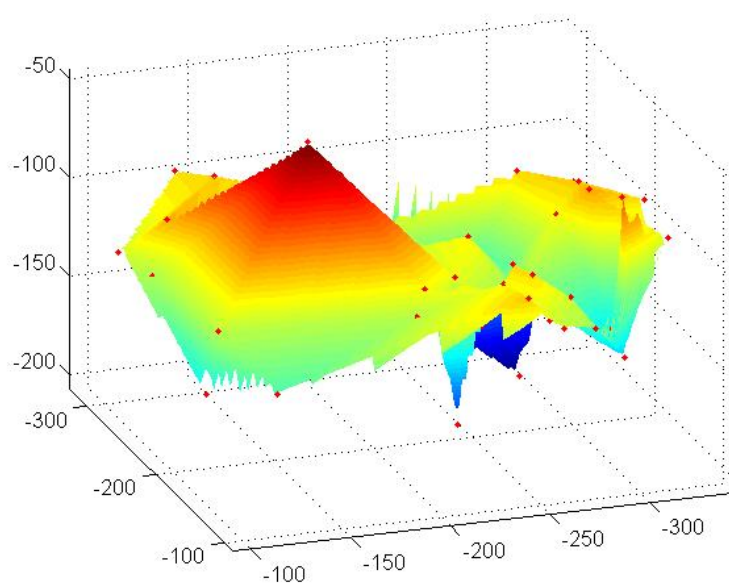


圖 6-23 光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想

※案例二：

圖 6-24 (a)(b)(c)影像中時間差為 0.018 秒，並可明顯看出海面上的波峰位置，即影像的對比度大，因此匹配時容易找到正確的對應點，匹配結果良好。另外，欲找尋(a)圖中的綠點相對應之匹配位置，理應落於(b)(c)圖中的紅色區塊內，但由於(a)(b)(c)圖中的下塊區域水位變化不明顯，造成 NCC 方法沿著藍色極線搜尋匹配點時不易找到正確之落點。再者，探討(a)(b)(c)圖中的上塊區域，其中(c)圖之光影變化與(a) (b)明顯相異，同樣造成匹配結果不準確。

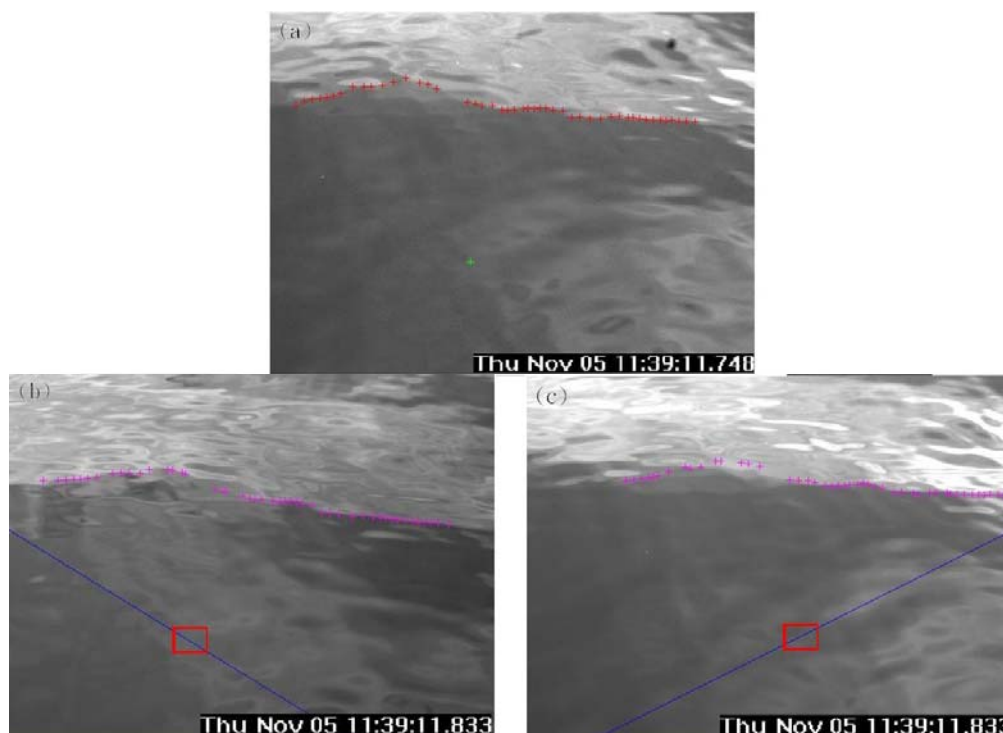


圖 6-24 波峰位置明顯，匹配結果良好；圖中下塊區域水位變化不明顯，上塊區域光影變化相異，造成匹配結果不準確。

※案例三：

此例時間差為 0.018 秒，可從圖 6-25 中看出影像右上區塊波紋明顯，匹配結果良好。(b)圖的左側及下塊區域光影變化與(a)(c)明顯相異，同上例會造成匹配落點的誤判，其(a)圖中的綠點正確位置應落於(b)(c)圖中的紅色區塊內。圖 6-26 為立體影像匹配結果。

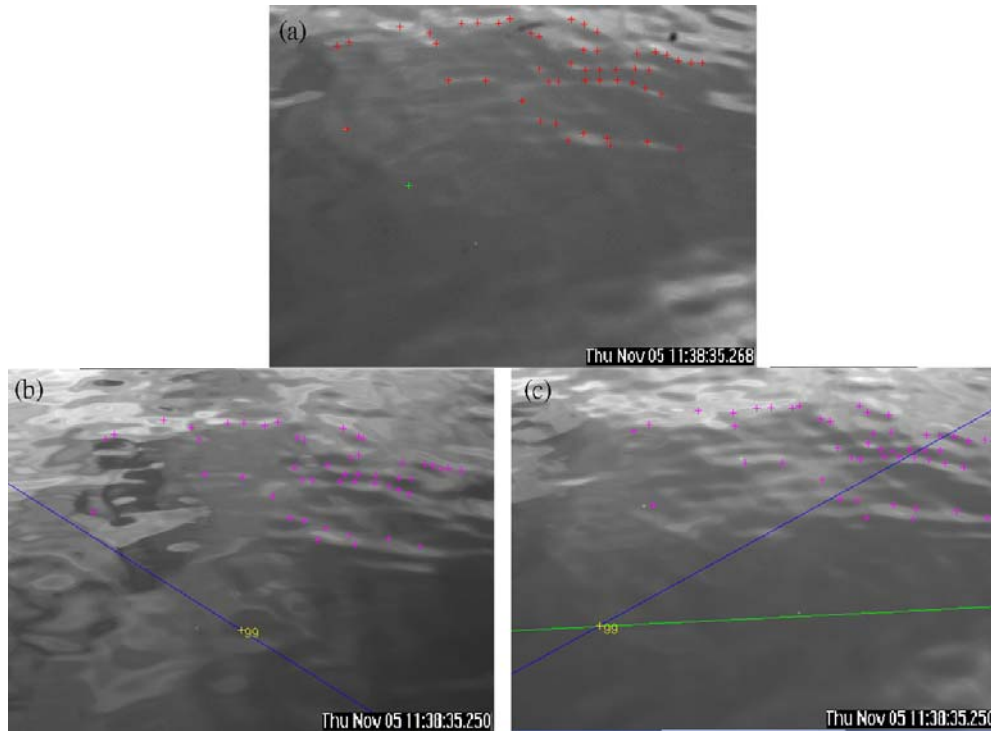


圖 6-25 (b)圖左側及下塊區域光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判

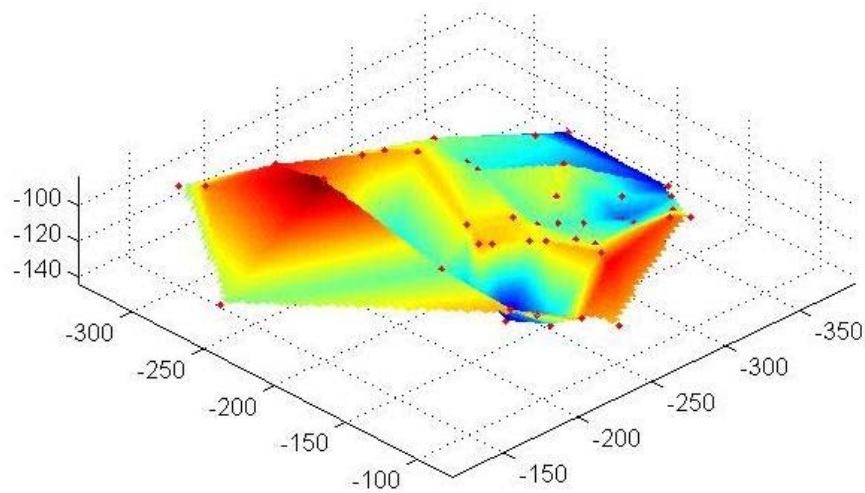


圖 6-26 立體影像匹配結果

※案例四：

圖 6-27(a)(b)(c)中時間差僅 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。探討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 6-28 為立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為 50 cm。

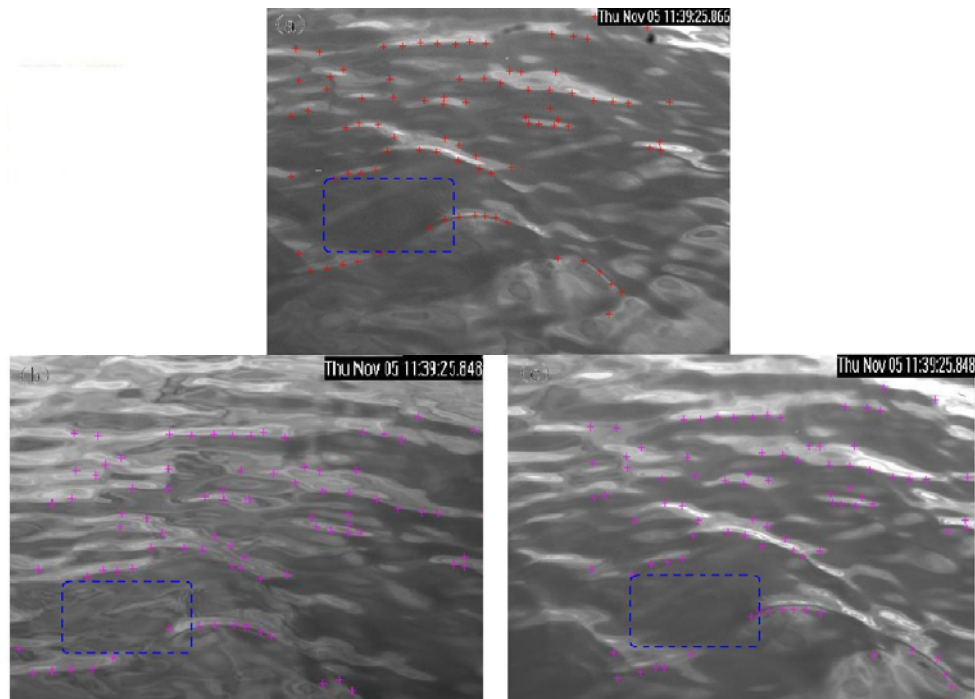


圖 6-27 時間差小且海面波紋明顯，匹配結果準確且匹配成功點數多。

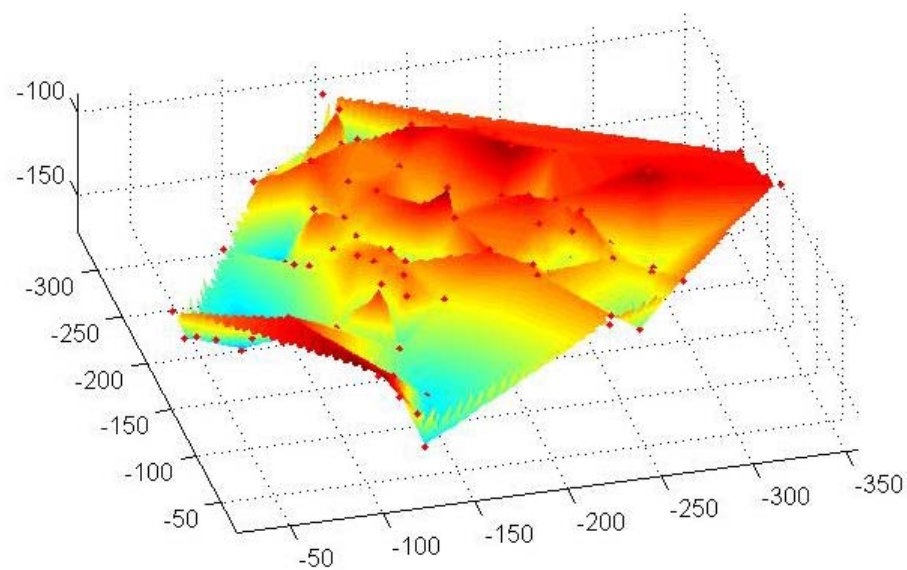


圖 6-28 立體影像匹配結果

※案例五：

為與例四相比較，從拍攝檔案中選取水位變化較不明顯之區域來做匹配，匹配結果如圖 6-29，時間差僅 0.011 秒，但由於水位變化不明顯，海面上並無明顯波紋，故匹配結果不理想。圖 6-30 為立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為 50 cm，推測是因為匹配成功點數少，導致立體影像

匹配結果與當日實際海面狀況不符。

戶外實驗時，外在的環境因素並不穩定，導致所拍攝影像的光影變化不一，造成目前匹配作業上所遇到的最大困難。另影像上因無固定控制點(control points)，亦造成匹配時正確之對應點無法精確確定是否準確，如何解決此問題為目前所積極努力之方向。

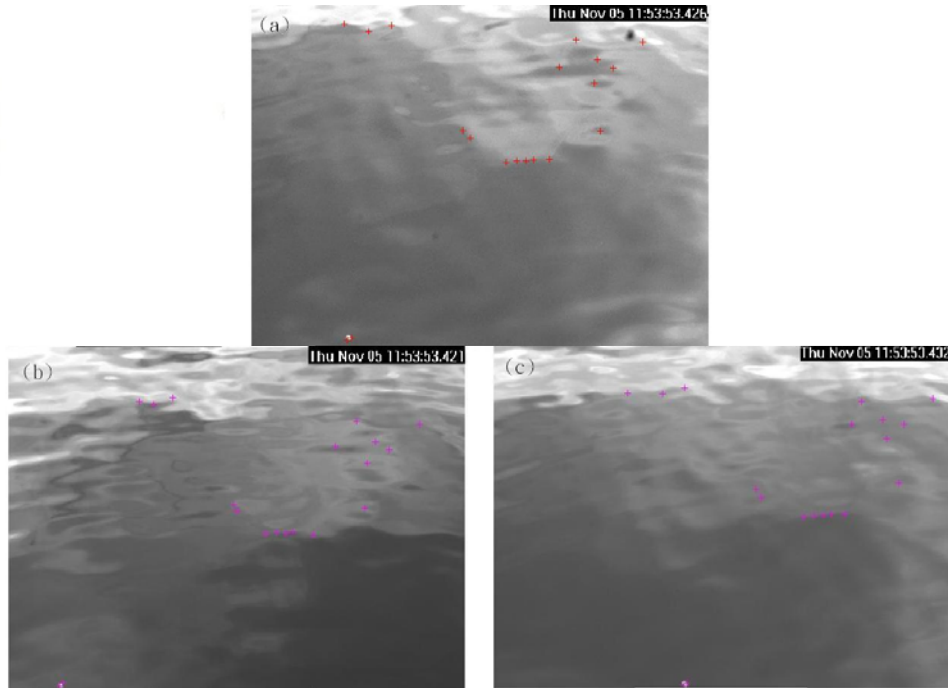


圖 6-29 水位變化不明顯，海面上並無明顯波紋，故匹配結果不理想。

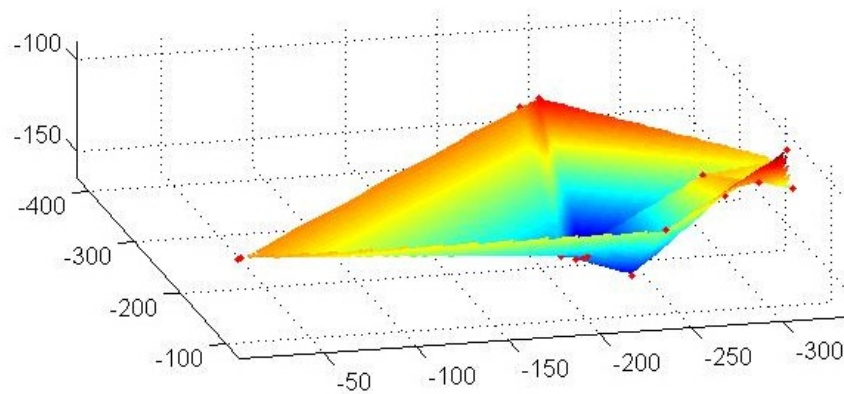


圖 6-30 立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為 50 cm，與當日實際海面狀況不符，推測是因為匹配成功點數過少。

第七章 結論與未來研究

本年度計畫最重要工作是在海邊設站，用立體攝影系統(含三台攝影機)拍攝波浪，然後於各相機相對角度不變下轉向拍攝立體校正板。本計畫經多次之實驗室與海邊實驗已達成以下項目：

1. 撰寫程式使用標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)而進行外部校正、影像匹配與立體海面波浪重建。
2. 撰寫程式計算在任何相機高度與角度之三台攝影機拍攝海面重疊範圍。
3. 立體攝影系統對於靜態物體已可準確重建立體化影像，物體之長寬高也可準確量出。
4. 立體攝影系統對於靜態浪板也可準確量出其波長與波高。
5. 對於動態海面在三台攝影機確實同步(時間差小於 0.02 秒)、外在光線條件良好、波浪足夠大以致於波峰線可清楚分辨時，本計畫的程式可將波峰線位置與高程重建。

本計畫亦發現使用立體攝影系統拍攝波浪須注意下列項目：

1. 立體攝影系統橫支架於拍攝前必須水平。
2. 拍立體校正板時攝影系統橫支架與校正板皆須調水平。
3. 注意系統旁邊是否有物體或船隻會因其光反射而造成三影像某部位亮度差異大而造成影像無法匹配。
4. 現場拍攝時電腦主機必須用 ramdisk 暫存影像，以確定三影像拍攝時間同步，否則影像批配會失敗。
5. 現場拍攝時若使用 ramdisk 及每秒 10 張影像仍可能會有影像缺張的可能，應可使用每秒 2-5 張影像即可。

本計畫認為拍攝波浪的主要問題不在影像匹配的方法，而在影像上波浪是否清晰可分辨，這與外在光線條件和波浪大小有關。另依本計畫的經驗我們認為影像上的波谷因無清晰特徵，很難匹配出來。但波峰線就比較沒問題。我們建議此系統應放置於淺灘地區波浪明顯且也防波堤可當影像

上陸地控制點，如此較有可能用此系統量出波高與週期。另可經由追蹤波峰線而量出波速。

參考文獻

林松柏、陳颿揚、黃明志，動態輪廓模式之波浪影像邊緣偵測處理，27 屆海洋工程研討會，251-258 頁，2005。

陳颿揚、蕭毓宏、黃明志，海岸波浪影像之動態輪廓模式邊緣偵測分析，28 屆海洋工程研討會，217-222 頁，2006。

周宗仁、尹彰、黃偉柏，CCD 影像遙測波浪之研究，海洋工程學刊，第 3 卷，第 1 期，第 53-71 頁，2003。

何維信，航空攝影測量學，國立編譯館，1995。

蕭毓宏、陳雪子、莊舜欽、黃明志，可轉向控制攝影機在海岸影像研究之初步應用，30 屆海洋工程研討會，745-750 頁，2008a。

蕭毓宏、林映辰、莊舜欽、黃明志，西子灣海岸影像觀測系統之資料分析程序，30 屆海洋工程研討會，781-786 頁，2008b。

簡仲和、郭晉安，CCD 影像於近岸水位與灘面變化監測應用，海洋工程學刊，第 8 卷，第 1 期，第 67-92 頁，2008。

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.

Ferreira, R. Costeira, J. P., Silvestre, C. Sousa, I. and Santos, J. A., Using stereo image reconstruction to survey scale models of rubble-mound structures, *Proceedings First Int. Conf. Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, pp. 1-9, 2006.

Gotwols, B. L., and Irani, G. B., Optical determination of the phase velocity of short gravity waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. C7, pp. 3964-3870, 1980.

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.

Keller, K. C., and Gotwols, B. L., Two-dimensional optical measurement, *Applied Optics*, Vol. 22, No. 22, pp. 3476-3478, 1983

Klinke, J., *Optical Measurement of Small-scale Wind-generated Water Surface Waves in the Laboratory and the Field*, Ph.D. dissertation, University of Heidelberg, Heidelberg, pp. 1-50, 1996.

Kroon, A., Davidson, M. A., Aarninkhof, S. G. J., Archetti, R., Armaroli, C., Gonzalez, M., Medri, S., Osorio, A., Aagaard, T., Holman, R. A. and Spanhoff, R., Applications of remote sensing systems to coastline management problems, *Coastal Engineering*, 54, 493-505, 2007.

Linder, W., *Digital Photogrammetry – Theory and Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.

Lubard, S. C., Krimmel, J. E., Thebaud, L. R., Evans, D. D., and Shemdin, O. H., Optical image and laser slope meter intercomparisons of high-frequency waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 85, No. C9, pp. 4996-5002, 1980.

MacHutchon, K. R., Wu, C. H. and Liu, P. C., The remote recording of sea surface displacements in port and harbour entrance channels, COPEDEC VII, Dubai, UAE, paper 026, 2008.

Piepmeyer, J. A. and J. Waters, Analysis of stereo vision-based measurements of laboratory water waves, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. Proceedings*, vol.5, pp3588-3591, 2004.

Plant, N. G. and Holman, R. A., Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140, 1-24, 1997.

Santel, F., Linder, W. and Heiple, C., Stereoscopic 3D-image sequence analysis of sea surfaces, *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, Istanbul, Turkey, pp.708-712, July, 2004.

Stilwell, D. Jr., and Pilon, R. O., Directional spectra of surface waves from photographs, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 79, No. 9, pp. 1277-1284, 1974.

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.

Zhang Z., Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 27, No. 2, pp.161-198, 1998.

交通部中央氣象局 98 年度委託研究計畫
「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(2/3)」
服務建議書審查會議
會議紀錄

壹、時間：民國 97 年 12 月 15 日（星期一）下午 13 時 40 分

貳、地點：本局 205 會議室

參、主席：紀副局長水上
紀錄：陳仁曾

肆、出席委員：本局氣象儀器檢校中心劉文俊主任、海象測報中心徐月娟主任、氣象預報中心李育棋副主任、第四組周思運研究員

伍、請假委員：經濟部水利署第八河川局陳重隆副局長、國立中山大學陳陽益教授

陸、列席人員：海象測報中心相關人員

柒、執行單位：國立台灣海洋大學

捌、主席報告：略

玖、執行單位簡報：略

拾、98 年度委託研究計畫服務建議書審查委員意見及建議事項：

委員意見	執行單位回覆
一、劉文俊主任	
（一）室外近距離觀測系統架設地點現	測試時間每次約數小時，儀器皆有人照

場人員出入較多，是否有可能遭受人員破壞，而影響資料的完整性。	顧。
二、李育棋副主任	
（一）有關影像重整部分，影像同步問題是否已考量？	影像同步必定要作到才能作影像匹配。本計畫已開始著手解決此問題。
（二）此研究包含許多影像處理技術，建議海象中心能與研究單位配合積極參與。	竭誠歡迎海象中心派員至校。
三、周思運研究員	
（一）在校正的過程中，可否請本局人員一起參與技術轉移。	竭誠歡迎海象中心派員至校。

附錄二：期中審查會議紀錄與回覆

交通部中央氣象局 98 年度委託研究計畫

「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(2/3)」

期中報告審查會議

會議紀錄

壹、時間：民國 98 年 7 月 22 日（星期三）上午 11 時 00 分

貳、地點：本局 617 會議室

參、主席：滕春慈主任 紀錄：陳伊秀

肆、出席委員：海象測報中心滕春慈主任、氣象預報中心李育棋副主任、第四組周思運研究員

伍、列席人員：海象測報中心相關人員

陸、執行單位：國立台灣海洋大學蔡政翰教授

柒、主席報告：略

捌、執行單位簡報：略

玖、98 年度委託研究計畫期中報告審查委員意見及建議事項：

委員意見	執行單位回覆
一、周委員思運：	
建議測試 12bits 的影像來做匹配，並和 8bits 的影像做比較。	感謝建議，我們會作
二、李委員育棋：	
無	
三、滕委員春慈：	
無	

拾、審查結果：

期中審查通過。

拾壹、散會：下午 12 時 30 分

附錄三：期末審查會議紀錄與回覆

交通部中央氣象局 98 年度委託研究計畫

「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(2/3)」

期末報告審查會議

會議紀錄

壹、時間：民國 98 年 12 月 17 日（星期四）14 時 30 分

貳、地點：本局 408 會議室

參、主席：程委員家平

紀錄：陳伊秀

肆、出席委員：程委員家平、李委員育棋

(周委員思運書面審查)

伍、列席人員：海象測報中心相關人員

陸、執行單位：國立台灣海洋大學

柒、主席報告：略

捌、執行單位簡報：略

玖、98 年度委託研究計畫期末報告審查委員意見及建議事項：

委員意見	執行單位回覆
一、程委員家平：	
(一) 本案相關觀測技術的開發，相當具有前瞻性，對於規劃工作目標，亦能逐步的處理解決。	謝謝委員意見。
(二) 建議未來可增加預期應用的形式及其成效分析。對整體測量系統的精度及其反應速度也宜配合設備規格提出計算說明。	謝謝委員意見，納入明年度計畫執行內容參考。
二、李委員育棋：	
(一) 有關影像匹配，兩台攝影機取樣成功率為 99% ，三台攝影機取樣成功率為 92% ，是否有不同的意義。	該數值為定義上之差異。三台攝影機的取樣成功率為在匹配範圍內的成功率。
(二) 此研究為第二年計劃，有關第二年所提出的問題，尤其光影問題的解決。	研究團隊第三年工作將對於光影問題加強研究與討論。如委員建議，我們將測試目標距離大(約 50 米)時光影問題是否較不嚴重。
三、周委員思運：	
(一) Stream Pix 是否支援 12bits 的影像輸出?如果支援建議未來測試都使用 12bits 灰階來計算。Stream Pix 是否支援 Linux os ？	有支援 12bits 的影像輸出但不支援 Linux OS. 我們已用 12bits 的影像，但匹配效果並不顯著。我們會繼續測試。
(二) 各相機的截取亮度是否真的一致？建議未來在實驗室檢查 CCD 對固定光源的反應，並將其 normalized。	謝謝委員意見。但是我們用 NCC 方法匹配，corss correlation 只比較相對亮度。

（三）建議未來測試時，使用偏光鏡來改善光源的不穩定。	謝謝委員意見。我們已用 CPL 偏光鏡，但效果有限。
（四）請說明在靜態實驗或野外時影像輸出的解析度；在同樣的條件下，增加解析度是否會改變匹配的結果？	我們有用 640×480 與 1392×1040 不同解析度相機。結果顯示問題應不在解析度。
（五）建議未來寫一組程式，在找到固定的目標後，經由相機姿態的改變來自動計算各相機間的相對位置，否則未來很難在野外作業。	感謝建議，我們已寫此程式用來檢驗相機姿態，如 3-4 與 6-3-2 節所述。
（六）建議未來可以考慮相機電子雜訊的去除，應該可以改善匹配的失敗率。	謝謝委員意見。
（七）RamDisk 的大小及 Disk I/O 速度不足的問題，在真正實作時很容易改善，不會造成太大的問題。	謝謝委員意見。

拾、審查結果：期末審查原則上通過；期末報告需修改部分請海象中心複審。

拾壹、散會：下午 15 時 30 分

參、計畫經費與人力執行情形

一、計畫經費執行情形：(總經費 30%須於期末報告審查通過後才得撥款動支)

會計科目 \ 項目		預算數(執行數)				備註
		主管機關預算(委託、補助)	自籌款	合計		
				金額(元)	占總經費%	
一、經常支出						
1.人事費		352000(192000)		352000(192000)	41(22)	
2.業務費		452800(372875)		452800(372875)	51(44)	
3.差旅費						
4.管理費		48200(24100)		48200(24100)	6(3)	
5.營業稅						
小計		853000(588975)		853000(588975)	100(69)	
二、資本支出						
小計						
合計	金額	853000(588975)		853000(588975)	100(69)	
	占總經費%	100				

請將預算數及執行數並列，以括弧表示執行數

與原計畫規劃差異說明：

二、計畫人力執行情形：

(一)計畫人力：

計畫名稱	執行情形	總人力(人年)	研究員級	副研究員級	助理研究員級	助理
自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(2/3)	原訂		0.9		1.8	1.8
	實際		0.9		1.8	1.8
	差異					
	原訂					
	實際					
	差異					

說明：

研究員級：研究員、教授、主治醫師、簡任技正、若非以上職稱則相當於博士滿三年、或碩士滿六年、或學士滿九年之研究經驗者。

副研究員級：副研究員、副教授、助研究員、助教授、總醫師、薦任技正、若非

以上職稱則相當於博士、碩士滿三年、學士滿六年以上之研究經驗者。

助理研究員級：助理研究員、講師、住院醫師、技士、若非以上職稱則相當於碩士、或學士滿三年以上之研究經驗者。

助理：研究助理、助教、實習醫師、若非以上職稱則相當於學士、或專科滿三年以上之研究經驗者。

(二)主要人力投入情形(副研究員級以上)：

姓名	計畫職稱	投入主要工作及人月數	學、經歷及專長	
蔡政翰	主持人	11	學 歷	博士
			經 歷	海洋大學教授
			專 長	波浪統計、海岸和海洋工程及科學
黃世任	協同主持人	11	學 歷	博士
			經 歷	海洋大學助理教授
			專 長	海洋遙測、大氣遙測、海洋學
董東璟	協同主持人	11	學 歷	博士
			經 歷	海洋大學助理教授
			專 長	海洋環境監測、海洋資訊系統、海洋與海岸災害

與原計畫規劃差異說明：

肆、 計畫已獲得之主要成就與量化成果(output)

(請就主要成就依學術成就(科技基礎研究)、技術創新成就(科技整合創新)、經濟效益(經濟產業促進)、社會影響(社會福祉提升、環保安全)、其它效益(政策管理及其它)方面，擇主要之成就填報。)(如學術成就代表性重要論文、技術轉移經費/項數、技術創新項數、技術服務項數、重大專利及項數、著作權項數等項目，含量化與質化部分，請將本計畫之實際產出重要之績效先勾選表一，再依序填寫已勾選之各項績效成果，填寫說明詳如表二，本作業可至政府研究資訊系統《網址：<http://www.grb.gov.tw>》填報績效表格，選取列印後將產出表貼入)

表一 科技計畫之績效指標(請依計畫性質勾選項目，色塊區為必填)

計畫類別 績效指標	1	2	3	4	5	6	7	8	9	99
	學術 研究	創新 前瞻	技術 發展 (開發)	系統 發展 (開發)	政策、法 規、制 度、規 範、系統 之規劃 (制訂)	研發 環境 建構 (改善)	人才 培育 (訓練)	研究 計畫 管理	研究 調查	其 他
A 論文	✓	x								
B 研究團隊養成						x				
C 博碩士培育	✓									
D 研究報告	✓	✓	✓		x	x	✓	x	✓	
E 辦理學術活動										
F 形成教材						x				
G 專利			x	x						
H 技術報告			x	x						
I 技術活動					x					
J 技術移轉			✓	x						
S 技術服務										
K 規範/標準制訂										
L 促成廠商或產業團體投資										
M 創新產業或模式建立										
N 協助提升我國產業全球地位或產業競爭力										
O 共通/檢測技術服務										
T 促成與學界或產業團體合作研究										
U 促成智財權資金融通										
V 提高能源利用率										
W 提升公共服務										

計畫類別 績效指標	1	2	3	4	5	6	7	8	9	99
	學術 研究	創新 前瞻	技術 發展 (開發)	系統 發展 (開發)	政策、法 規、制 度、規 範、系統 之規劃 (制訂)	研發 環境 建構 (改善)	人才 培育 (訓練)	研究 計畫 管理	研究 調查	其 他
X 提高人民或業者收入										
P 創業育成										
Q 資訊服務										
R 增加就業							x			
Y 資料庫									x	
Z 調查成果									x	
AA 決策依據										

表二 請依上表勾選合適計畫評估之項目填寫初級產出、效益及重大突破(填寫說明如表格內容)

	績效指標	初級產出 量化值	效益說明	重大突破
學術成就(科技基礎研究)	A 研討會論文	3 篇	98 年中央氣象局研討會 1 篇: 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，中央氣象局，2009 年 9 月，440-444 頁。 98 年海洋工程研討會 2 篇 1. 蘇嘉平、蔡政翰、高家俊、董東璟、黃世任，立體海況攝影技術研究與開發 -I. 校正，第 31 屆海洋工程研討會，中興大學，2009 年 11 月，729-734 頁。 2. 蘇嘉平、蔡政翰、高家俊、董東璟、黃世任，立體海況攝影技術研究與開發 -II. 驗證，第 31 屆海洋工程研討會，中興大學，2009 年 11 月，735-740 頁。	
	B 研究團隊養成	1 個團隊	由本系波浪、現場觀測與資料傳送及遙測相關領域老師團隊合作	
	C 博碩士培育	3 位	參與計畫執行之碩士研究生: 蘇嘉平、周于洋、楊一中	
	D 研究報告	2 本	研究報告提供氣象局等政府單位參考: 本計畫期中報告與期末報告	

伍、 評估主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)

(請以學術成就(科技基礎研究)、技術創新成就(科技整合創新)、經濟效益(經濟產業促進)、社會影響(社會福祉提升、環保安全)、其它效益(政策管理及其它)等項目詳述)

一、 學術成就(科技基礎研究)(權重45%)

二、 技術創新(科技整合創新)(權重45%)

三、 經濟效益(經濟產業促進)(權重 0%)

四、 社會影響(社會福祉提升、環保安全)(權重 10%)

五、 其它效益(政策管理及其它)(權重 0%)

陸、 與相關計畫之配合

柒、 後續工作構想之重點

捌、 檢討與展望

填表人：_____ 聯絡電話：_____ 傳真電話：_____

E-mail：_____

主管簽名：_____

附錄五：政府部門科技計畫期末摘要報告

98 年度政府部門科技計畫期末摘要報告

計畫名稱：自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發（2/3）

審議編號：部會署原計畫 MOTC-CWB-97-O-03
編號：
主管機關：交通部中央氣象局 執行單位：國立臺灣海洋大學
計畫主持人：蔡政翰 聯絡人：蔡政翰
電話號碼：(02)24622192-6311 傳真號碼：(02)24621047
期程：98 年 1 月 22 日至 98 年 12 月 31 日
經費：(全程) 2550 仟元 經費(年度) 853 仟元

執行情形：

1.執行進度：

	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
當年	100	100	0
全程	30	30	0

2.經費支用：(總經費 30%須於期末報告審查通過後才得撥款動支)

	預定	實際	支用率 (%)
當年	853,000	588,975	69
全程			

3.主要執行成果：

- (1) 完成立體影像校正。
- (2) 架設「三維海況影像觀測系統」原型於現場開始進行觀測。
- (3) 波浪分析程式建立。
- (4) 校驗及分析觀測資料。

4.計畫變更說明：無

5.落後原因：無

6.主管機關之因應對策（檢討與建議）：