

# 交通部中央氣象局

## 委託研究計畫期末成果報告

自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)

計畫類別：氣象      海象

計畫編號：MOTC-CWB-99-O-03

執行期間：99年1月29日至99年12月31日

計畫主持人：蔡政翰

執行機構：國立臺灣海洋大學

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

- 赴國外出差或研習心得報告1份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告1份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各1份

中華民國 99 年 12 月 16 日

**政府研究計畫期末報告摘要資料表**

計畫中文名稱	自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)		
計畫編號	MOTC-CWB-99-O-03		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺灣海洋大學		
年度	99	執行期間	99年1月29日至99年12月31日
本期經費	897千元(總經費30%須於期末報告審查通過後才得撥款動支)		
執行進度	預定(%)	實際(%)	比較(%)
	70	70	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率(%)
	627	627	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	蔡政翰	黃世任	周于洋
		董東璟	
報告頁數	140頁	使用語言	中文
中英文關鍵詞	立體攝影、直接線性轉換法、極線幾何、影像匹配、標準化互相關法		
研究目的	<p>本研究在氣象局的支持下，著手進行立體海況攝影研究。</p> <p>研究目的在於根據國外先進理論建立觀測系統，探討觀測準確性與適用條件。完成後，可將國內海象觀測技術由單點數據形式升級為三維立體影像資訊，提升國家整體海象觀測技術。</p>		
研究成果	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.立體波浪板影像分析結果之改進</li> <li>2.地面控制法之導入與應用</li> <li>3.確認校正版與待測物(即海面)距離相機之位置應相當</li> <li>4.200米距離之波浪觀測與立體影像重建</li> <li>5.由立體影像測量波浪水位及其波譜</li> </ol>		
具體落實應用情形	<p>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。</p>		
計畫變更說明	無		
落後原因	無		
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	無		

## 摘要

前兩年工作已掌握立體海象影像觀測的關鍵技術，包含內部與外部校正技術、以及影像匹配技術。然而在現場的測試中，我們也確實遭遇了部分困難，這包含了系統水平問題、影像同步問題以及光影差的問題，本年度計畫分別提出了改善方案，轉動造成儀器水平偏移問題採用兩個方法加以改善，一是強化支架，二是不讓系統轉動，也就是將外部校正板置放在立體影像觀測範圍內，這就是地面控制點法的概念；影像同步問題以降低取樣頻率至1-5 fps (frames per second) 解決；至於影像上不均勻光影問題在改觀測遠處海況後自然地改善了，此正符合中央氣象局的任務需求。

本年度計畫重點在基隆長潭里海域與台南安平海域進行現場動態測試，採用的都是地面控制點的方法，該法就是將外部校正板置放於立體攝影機監測範圍內，長潭里試驗是把現場防波堤作為外部校正板，測試結果證實了，立體影像分析的水位變化與頻譜與實際海面接近，但也發現了，當外部校正板和待測海區之間的距離較遠時，影像匹配結果愈不理想。台南海域的測試則採用更新的外部校正方法，把外部校正板擺放在影像中多個位置，藉此提昇外部校正板與立體影像系統間所建立之空間幾何關係的正確性，此法確實大幅提高了現場開放性海域的匹配成果，驗證結果顯示波高變化與波譜都與當地海域的實測資料接近。

現場試驗的驗證結果證實了本研究所開發的立體攝影系統確實可以合理量測近海海況。對於未來應用於靜態的海灘變化或動態的海象量測都能有所助益，未來繼續的更深層的研究將能夠更掌握相關技術，並提升整個觀測系統的觀測準確性。

# 目 錄

摘要.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	x
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 立體海況攝影基本理論.....	4
2-1 圖像投影幾何 .....	4
2-2 直接線性轉換法 .....	11
2-3 立體影像重建 .....	15
2-4 內部校正原理 .....	16
2-5 外部校正原理 .....	20
2-6 影像匹配 .....	21
2-6-1 極線幾何原理 .....	21
2-6-2 標準化互相關係法 .....	23
2-6-3 影像匹配步驟 .....	24
第三章 三維立體影像系統之開發.....	27
3-1 硬體 .....	27
3-2 軟體 .....	34
3-3 系統整合 .....	35
第四章 影像校正與靜態驗證結果.....	36
4-1 內部校正成果 .....	36
4-1-1 內部校正程序 .....	38
4-1-2 內部校正結果 .....	41
4-2 外部校正成果 .....	44
4-2-1 外部校正程序 .....	45
4-2-2 校正點數多寡對校正結果之影響 .....	48
4-2-3 攝影機姿態與重疊範圍關係 .....	51
4-3 立體影像重建與靜態驗證 .....	62
4-3-1 立體影像重建 .....	62
4-3-2 平面模擬波場之靜態驗證 .....	63
4-3-3 空間模擬波場之靜態驗證 .....	66
4-4 校正板與待測目標距離對分析結果之影響 .....	71
第五章 立體影像動態測試與驗證.....	82

5-1 八斗子現場動態驗證 .....	82
5-1-1 試驗佈置與進行方法 .....	82
5-1-2 地面控制點法之導入 .....	84
5-1-3 分析結果 .....	87
5-2 台南海岸現場動態驗證結果 .....	93
5-2-1 試驗佈置與進行方法 .....	93
5-2-2 外部校正方法的改進 .....	95
5-2-3 分析結果 .....	97
第六章 關鍵問題與改善處理 .....	104
6-1 儀器水平問題 .....	104
6-2 時間同步取樣問題 .....	111
6-3 影像光線均勻問題 .....	115
6-4 影像分析波浪技術歸納與未來提升需求 .....	122
第七章 結論與建議 .....	124
參考文獻 .....	126
附錄一：期初評選會議紀錄 .....	附 1
附錄二：期中審查會議紀錄與回覆 .....	附 3
附錄三：期末審查會議紀錄 .....	附 5
附錄四：政府科技計畫成果效益報告 .....	附 7

## 圖目錄

圖 1 影像座標系統示意圖 .....	9
圖 2 影像座標與相片座標示意圖(a)影像座標(b)相片座標 .....	9
圖 3 三維相片座標系統示意圖 .....	10
圖 4 物體空間座標系統示意圖 .....	10
圖 5 圖像投影三種座標系統與內、外方位轉換之關係 .....	10
圖 6 光束法中控制點與相片之示意圖 .....	11
圖 7 座標系統示意圖 .....	11
圖 8 實物空間與相機空間之關係 .....	15
圖 9 立體影像從事表面海況監測示意圖(Wanek and Wu, 2006) .....	16
圖 10 本計畫所製作的攝影機內部校正用板 .....	19
圖 11 徑向扭曲大小分佈示意圖(箭號長度代表扭曲的量值) .....	19
圖 12 徑向扭曲量值與徑向距離的回歸關係 (Holland et al., 1997) .....	20
圖 13 本計畫製作之立體校正網格板 .....	21
圖 14 極線幾何示意圖 .....	22
圖 15 影像匹配 NCC 法示意圖 .....	24
圖 16 影像匹配對應之極線及匹配點 .....	25
圖 17 各相機之影像匹配點 .....	26
圖 18 自動化海氣象水文觀測系統組成 .....	27
圖 19 立體攝影系統架構 .....	28
圖 20 立體海況影像觀測系統 .....	28
圖 21 Basler scA1390-17gm 高速攝影機外觀 .....	31
圖 22 GW Insteek 之外部觸發器 (trigger) .....	32
圖 23 本計畫所使用之 11.5-69mm 可調焦距式 CCTV 鏡頭 .....	33
圖 24 本計畫所使用之 16、25、35mm 定焦距 CCTV 鏡頭 .....	33
圖 25 (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) .....	34
圖 26 StreamPix 4 軟體介面 .....	35
圖 27 本計畫使用之各元件組裝整合圖 .....	35
圖 28 本計畫進行內部校正所設計之五種校正板 .....	38
圖 29 輸入隔點之間距 .....	38
圖 30 輸入垂直點數 .....	39
圖 31 輸入水平點數 .....	39
圖 32 選取左上、右上、右下、左下，4 個較正點 .....	40
圖 33 程式自動完成隔點之點選 .....	40
圖 34 為相片扭曲分布圖 .....	43

圖 35 為扭曲分布與徑向距離關係.....	43
圖 36 可變焦距鏡頭於不同焦距時之扭曲分布與徑向距離關係.....	43
圖 37 焦距 6mm 鏡頭拍攝之校正前影像 .....	44
圖 38 焦距 6mm 鏡頭拍攝經校正後影像 .....	44
圖 39 本計畫進行系統外部校正之過程.....	45
圖 40 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。.....	46
圖 41 選取上方影像之計算點位.....	47
圖 42 輸入選取點位之實際座標.....	47
圖 43 選取(a)左側相機及(b)右側相機中相對同應之點位。 .....	47
圖 44 外部校正過程中，三影像選取之外部校正點位。 .....	48
圖 45 外部校正結果與校正點數多寡之關係。 .....	50
圖 46 三台相機重疊範圍(條件 1).....	60
圖 47 三台相機重疊範圍(條件 2).....	60
圖 48 三台相機重疊範圍(條件 3).....	61
圖 49 三台相機重疊範圍(條件 4).....	62
圖 50 立體影像從事表面海況監測示意圖.....	62
圖 51 平面模擬波場佈置示意圖 .....	63
圖 52 外部校正之校正板影像.....	64
圖 53 拍攝之磁磚影像.....	64
圖 54 磁磚影像之匹配情形.....	64
圖 55 不同拍攝距離與高度之偏移量.....	65
圖 56 波浪板模型 .....	66
圖 57 立體影像技術之求解結果.....	67
圖 58 波浪板剖面與立體重建結果比較.....	68
圖 59 攝影高度 1.8 公尺拍攝之波浪板影像.....	69
圖 60 不同攝影高度下之高度誤差圖.....	70
圖 61 不同基線長度與高度誤差圖 .....	70
圖 62 三相機位置定義.....	72
圖 63 實驗佈置示意圖.....	72
圖 64 實驗現場佈置情形.....	73
圖 65 Obj1 之待測點.....	73
圖 66 Obj1 試次校正板位置與平均誤差關係圖.....	74
圖 67 Obj2 之待測點.....	74
圖 68 Obj2 試次校正板位置與平均誤差關係圖.....	75
圖 69 Obj3 之待測點.....	75
圖 70 Obj3 試次校正板位置與平均誤差關係圖.....	76
圖 71 匹配誤差與校正版-待測物間距離之關係 .....	77
圖 72 校正板放太遠選點易產生誤差(左圖為 C1 案例、右圖為 C7).....	77

圖 73 非標準化校正板之實驗現場佈置.....	78
圖 74 待測目標物及選取點.....	78
圖 75 替代校正板之籃子與校正點位.....	79
圖 76 Obj1 試次校正板位置與平均誤差關係圖.....	81
圖 77 Obj3 試次校正物與待測物匹配情形.....	81
圖 78 將外部校正板與海面同時納入攝影之範圍.....	82
圖 79 外部校正板在影像上的範圍過小且位置與海面距離過遠，使得影像匹配之結果較不理想。(a)為影像匹配的範圍，(b)為匹配成功的座標，(c)(d)為右側及左側攝影機影像所匹配之座標。.....	83
圖 80 基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤.....	84
圖 81 拍攝基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤之工作情形.....	84
圖 82 基隆潮境公園拍攝的遠處堤面影像.....	85
圖 83 將遠處堤面進行匹配動作.....	85
圖 84 綠色區域為測試匹配範圍.....	86
圖 85 以地面控制法匹配後之結果.....	86
圖 86 為推算範圍之三維水面變化圖.....	87
圖 87 圖藍線框為推算水面範圍.....	87
圖 88 原始範圍邊界點水位時序資料及其移動平均.....	88
圖 89 範圍邊界點水位時序資料.....	88
圖 90 外堤水尺完工圖.....	89
圖 91 白色部分為不同灰階值所涵蓋之像素範圍。.....	89
圖 92 不同灰階值計算之實際水面時序變化.....	90
圖 94 不同灰階值所推算之示性波高.....	90
圖 95 使用灰階值得出實際水面變化時序（藍線）與匹配所得出水面變化時序比較圖（綠線）.....	91
圖 96 實際水面時序變化之頻譜圖比較.....	91
圖 97 將距離水堤不同長度之取樣位置.....	92
圖 98 實際水位變化頻譜與各取點頻譜之比較.....	92
圖 99 台南海岸現場測試作業情形(使用立體校正板).....	93
圖 100 台南現場試驗。在校正板附近匹配結果良好之案例.....	94
圖 101 台南現場試驗。距離校正板遠端匹配結果不佳之案例.....	94
圖 102 台南海岸現場測試作業情形(使用平面校正板).....	96
圖 103 新版外部校正程式作業情形一例.....	97
圖 104 經外部校正之相機與校正板相關位置圖.....	98
圖 105 使用新版外部校正程式獲得小範圍影像匹配成功案例.....	99
圖 106 使用新版外部校正程式獲得大範圍影像匹配成功案例 1 (成功率 97.4%)	99
圖 107 使用新版外部校正程式獲得大範圍影像匹配成功案例 2 (成功率 98.1%)	
.....	100

圖 108 立體影像重建結果.....	101
圖 109 立體影像重建結果.....	101
圖 110 立體影像重建結果.....	102
圖 111 匹配成功點在空間上分佈之一例 .....	102
圖 112 從重建所得之立體影像時序列中取出任意三點的水位變化時序列.....	103
圖 113 從重建所得之立體影像時序列中取出任意三點的水位變化時序列.....	103
圖 114 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.....	108
圖 115 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.....	108
圖 116 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.....	109
圖 117 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.....	109
圖 118 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.....	110
圖 119 原攝影機腳架.....	110
圖 120 改進後攝影機腳架.....	111
圖 121 (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。.....	112
圖 122 時間差較大之立體影像匹配，結果與實際海面狀況差異大.....	113
圖 123 (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。.....	113
圖 124 時間差較小之立體影像匹配，結果與實際海面狀況較接近.....	114
圖 125 2009/11/5 實驗時海面狀況 .....	114
圖 126 (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 ....	116
圖 127 光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想.....	116
圖 128 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。.....	117
圖 129 (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 .....	118
圖 130 立體影像匹配結果.....	118
圖 131 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。 .....	119
圖 132 立體影像匹配結果.....	119
圖 133 水位變化不明顯，海面上並無明顯波紋，故匹配結果不理想。 .....	120
圖 134 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。 .....	121
圖 135 光源與攝影機位置幾何示意圖(曾, 1988).....	121

## 表目錄

表 1 本計畫組裝之立體海況影像觀測系統各子單元內容.....	29
表 2 本計畫立體海況影像觀測系統耗電計算.....	30
表 3 Basler scA1390-17gm 攝影機規格.....	32
表 4 本計畫所使用之鏡頭規格.....	33
表 5 本計畫所使用工業電腦詳細規格.....	34
表 6 不同校正點進行內部校正之結果.....	41
表 7 不同校正距離執行校正誤差表.....	42
表 8 可變焦距鏡頭於不同焦距時之校正結果，k <sub>3</sub> 與 k <sub>1</sub> 為(2.4.7)之係數.....	42
表 9 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 10 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 11 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C1)。.....	54
表 12 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C2)。.....	54
表 13 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C3)。.....	54
表 14 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C4)。.....	55
表 15 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 16 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C5)。.....	56
表 17 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C6)。.....	56
表 18 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C7)。.....	56
表 19 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 20 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C8)。.....	57
表 21 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C9)。.....	57
表 22 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C10)。.....	57
表 23 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 24 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C11)。.....	58
表 25 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C12)。.....	58
表 26 中央相機不同水平俯角(C_angle)與攝影範圍(攝影參數 C13)。.....	59
表 27 不同攝影高度下測距與偏移量之分析表.....	65
表 28 立體影像重建結果.....	67
表 29 不同攝影高度下高度誤差分析表.....	69
表 30 不同基線與高度誤差之分析表.....	70
表 31 實驗時三台相機姿態.....	71
表 32 Obj1 試次各待測點之計算結果.....	73
表 33 Obj2 試次各待測點之計算結果.....	74
表 34 Obj3 試次各待測點之計算結果.....	75
表 35 實驗時三台相機姿態.....	77

表 36 Obj1 試次各待測點之計算結果.....	79
表 37 Obj2 試次各待測點之計算結果.....	80
表 38 Obj3 試次各待測點之計算結果.....	80
表 39 模式結果與實測結果誤差統計表.....	107

# 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

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，並開始將觀測系統移至現場，進行現場測試作業，已具體地完成立體海況觀測系統之開發。計畫第三年度(2010) 將探討前一年度現場測試與驗證時所遭遇問題的解決之道，包含引進新的分析技巧 - 地面控制點(GCP) 方法。

## 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。2010年將分析立體波浪影像結果與改進，包括儀器水平問題、時間差與光影差對影像匹配造成之影響，並導入地面控制點法利用測量方法取得所設置實際控制點的座標以代替前述外部校正工作。第一年度(2008) 與第二年度(2009)已完成之工作如下：

### 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)：【已完成】

- (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。

第三年(2010)：

- (1) 立體波浪影像分析結果之改進。
- (2) 校正板位置與分析結果誤差關係。
- (3) 地面控制點法之導入與應用。
- (4) 於現場進行海況之實際測試與驗證。
- (5) 光學影像分析波浪技術之歸納。

## 第二章 立體海況攝影基本理論

### 2-1 圖像投影幾何

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1，點a的影像座標為( ua, va )。

#### 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3所示，此時相主點的像空間座標則為 ( x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, -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Pi，在空間之位置可由三維直角座標(Xi, Yi, Zi)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<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, -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  $\omega$ 、 $\phi$  及  $\kappa$ ，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  $\omega=0$ 、 $\phi=0$  及  $\kappa=0$ 。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

$X_0, Y_0, Z_0$ 、 $\omega, \phi, \kappa$  : 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  $\omega$  表示 Roll， $\phi$  表示 Pitch， $\kappa$  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： $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ ，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 $\omega$  角，然後繞 y 軸旋轉 $\phi$  角，最後繞 z 軸旋轉 $\kappa$  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)：

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

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

(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( $x_i + vxi$ ,  $y_i + vyi$ )，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。

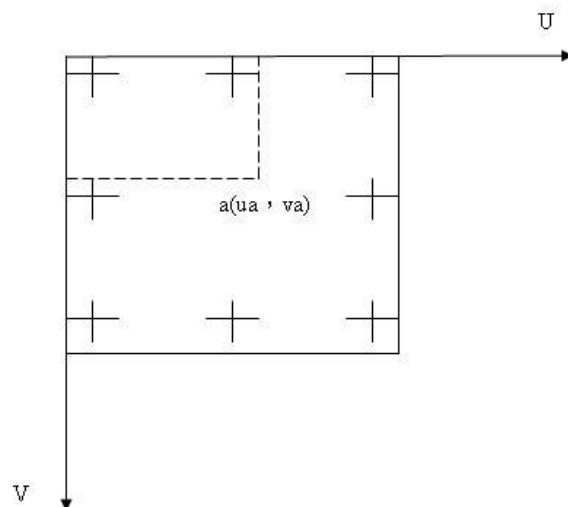


圖1 影像座標系統示意圖

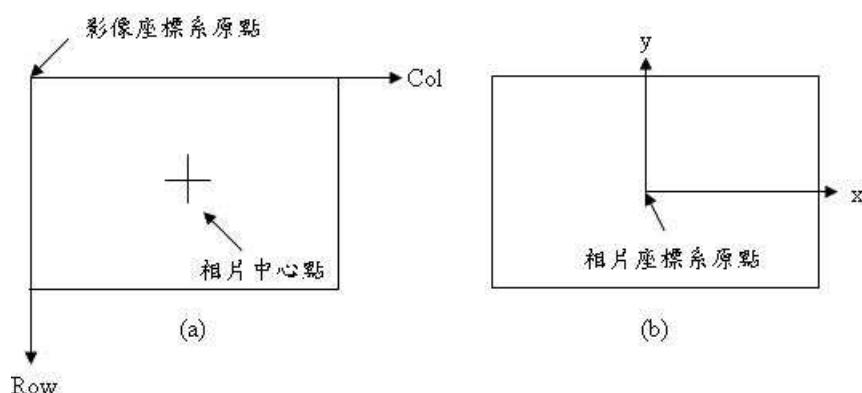


圖2 影像座標與相片座標示意圖(a)影像座標(b)相片座標

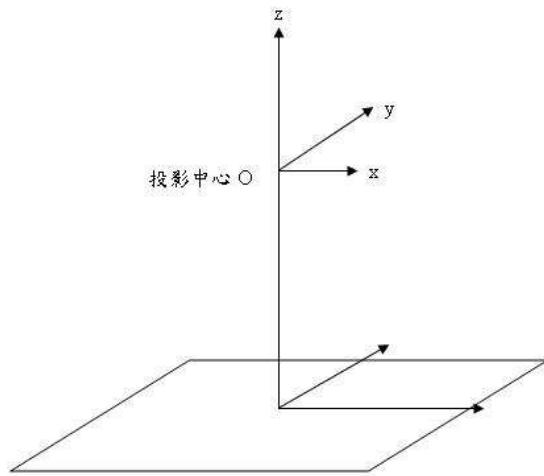


圖3 三維相片座標系統示意圖

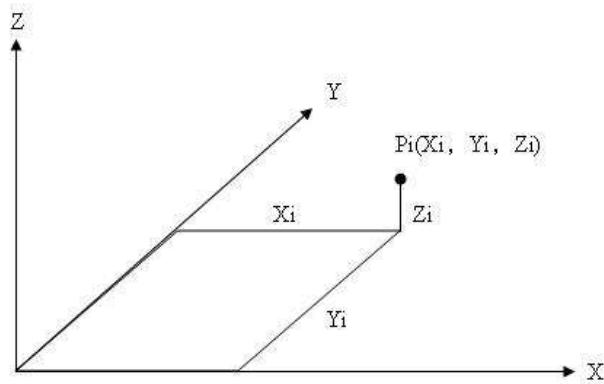


圖4 物體空間座標系統示意圖

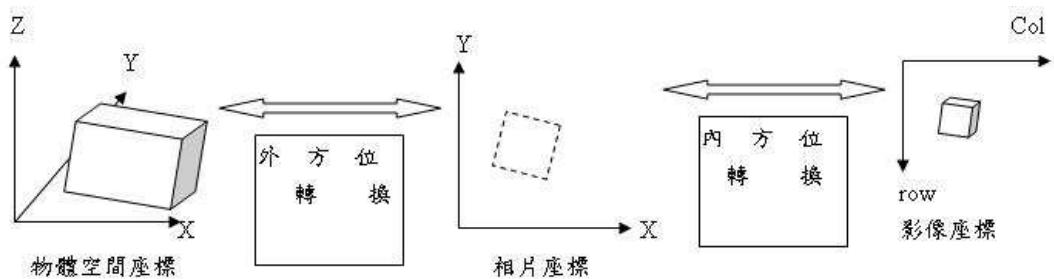


圖5 圖像投影三種座標系統與內、外方位轉換之關係

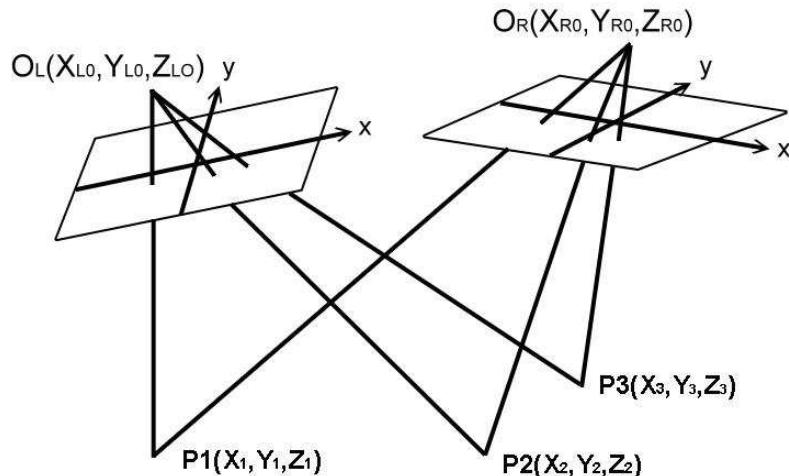


圖6 光束法中控制點與相片之示意圖

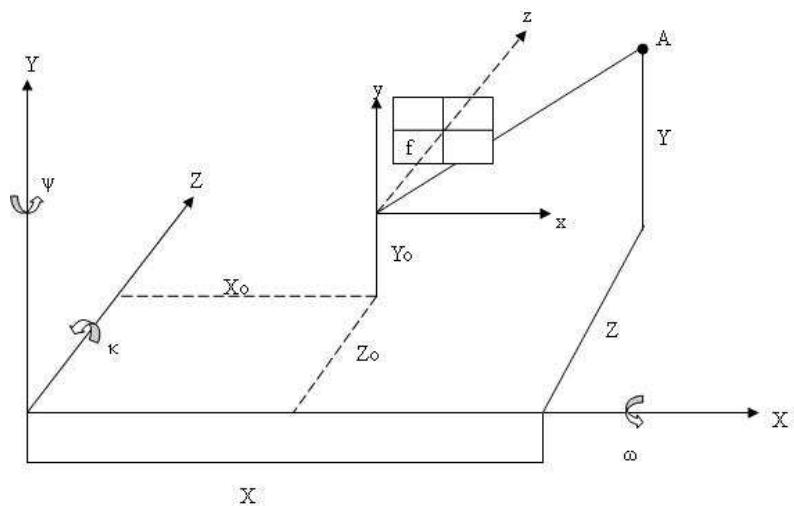


圖7 座標系統示意圖

## 2-2 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8可知，攝影測量共線條件式為：

$$B^{(I)} = cA^{(I)} \quad (2.2.1)$$

其中，c為尺度參數（scale factor）。將式子改寫為下：

$$A^{(I)} = R \bullet A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \bullet A \quad (2.2.2)$$

$$B = cRA \quad (2.2.3)$$

$$\begin{bmatrix} u_w - u_{w0} \\ v_w - v_{w0} \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (2.2.4)$$

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

$\lambda$  : 尺度比例因子

$r_{ij}$  : 轉換矩陣元素 (即2.1.2式的m<sub>ij</sub>)

$x, y, z$  : 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( $uw_0, vw_0, d$ )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(2.2.4)式，改寫為下式：

$$c = \frac{-d}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (2.2.5)$$

$$u_w - u_{w0} = -d \frac{[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (2.2.6)$$

$$v_w - v_{w0} = -d \frac{[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (2.2.7)$$

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：

$$u_w - u_{w0} = \lambda_u(u - u_0) \quad (2.2.8)$$

$$v_w - v_{w0} = \lambda_v(v - v_0) \quad (2.2.9)$$

將(2.2.8)、(2.2.9)式代回(2.2.5)~(2.2.7)式中，並改寫為：

$$u = \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (2.2.10)$$

$$v = \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \quad (2.2.11)$$

其中，

$$L_1 = \frac{u_0r_{31} - d_u r_{11}}{D} \quad (2.2.12a)$$

$$L_2 = \frac{u_0r_{32} - d_u r_{12}}{D} \quad (2.2.12b)$$

$$L_3 = \frac{u_0r_{33} - d_u r_{13}}{D} \quad (2.2.12c)$$

$$L_4 = \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \quad (2.2.12d)$$

$$L_5 = \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \quad (2.2.12e)$$

$$L_6 = \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \quad (2.2.12f)$$

$$L_7 = \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \quad (2.2.12g)$$

$$L_8 = \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \quad (2.2.12h)$$

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D} \quad (2.2.12i)$$

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \quad (2.2.12j)$$

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \quad (2.2.12k)$$

$$d_u = \frac{d}{\lambda_u} \quad (2.2.12l)$$

$$d_v = \frac{d}{\lambda_v} \quad (2.2.12m)$$

$$D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \quad (2.2.12n)$$

$L_1 \sim L_{11}$ 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，(2.2.10)、(2.2.11)式則可以改寫為：

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ M \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.2.13)$$

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(2.2.10)、(2.2.11)式再度改寫為：

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_9 & L_2 - uL_{10} & L_3 - uL_{11} \\ L_5 - vL_9 & L_6 - vL_{10} & L_7 - vL_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - L_4 \\ v - L_8 \end{bmatrix} \quad (2.2.14)$$

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 $(x_0, y_0, z_0)$ 。

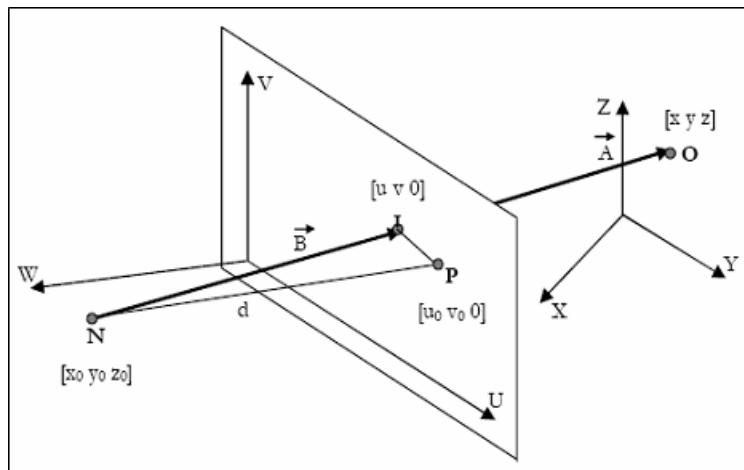


圖8 實物空間與相機空間之關係

### 2-3 立體影像重建

假設(2.2.14)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，

$$\begin{bmatrix} L_1^L - L_9^L x_{iL} & L_2^L - L_{10}^L x_{iL} & L_3^L - L_{11}^L x_{iL} \\ L_5^L - L_9^L y_{iL} & L_6^L - L_{10}^L y_{iL} & L_4^L - L_{11}^L y_{iL} \\ L_1^C - L_9^C x_{iC} & L_2^C - L_{10}^C x_{iC} & L_3^C - L_{11}^C x_{iC} \\ L_5^C - L_9^C y_{iC} & L_6^C - L_{10}^C y_{iC} & L_4^C - L_{11}^C y_{iC} \\ L_1^R - L_9^R x_{iR} & L_2^R - L_{10}^R x_{iR} & L_3^R - L_{11}^R x_{iR} \\ L_5^R - L_9^R y_{iR} & L_6^R - L_{10}^R y_{iR} & L_4^R - L_{11}^R y_{iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{iL} - L_4^L \\ y_{iL} - L_8^L \\ x_{iC} - L_4^C \\ y_{iC} - L_8^C \\ x_{iR} - L_4^R \\ y_{iR} - L_8^R \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

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的影像灰度值，以建構成完整的三維影像。

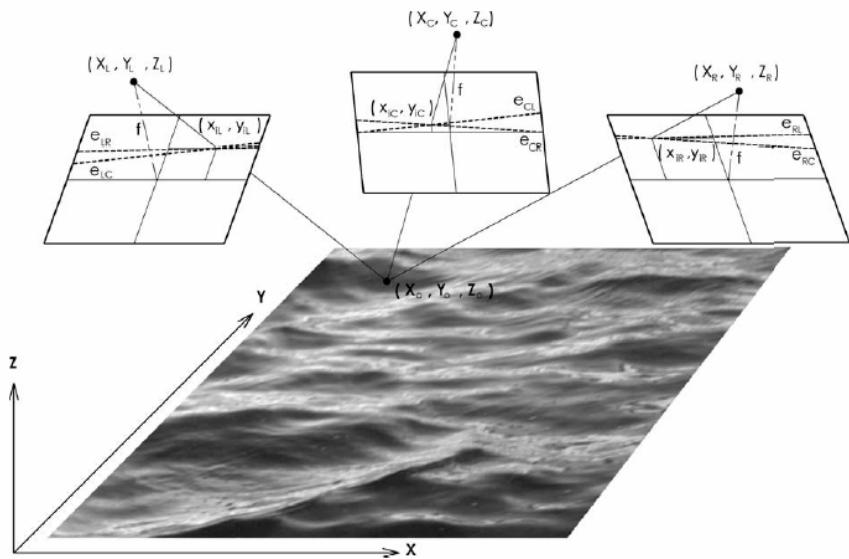


圖9 立體影像從事表面海況監測示意圖(Wanek and Wu, 2006)

## 2-4 內部校正原理

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(Abdel-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  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}$  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10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11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12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。

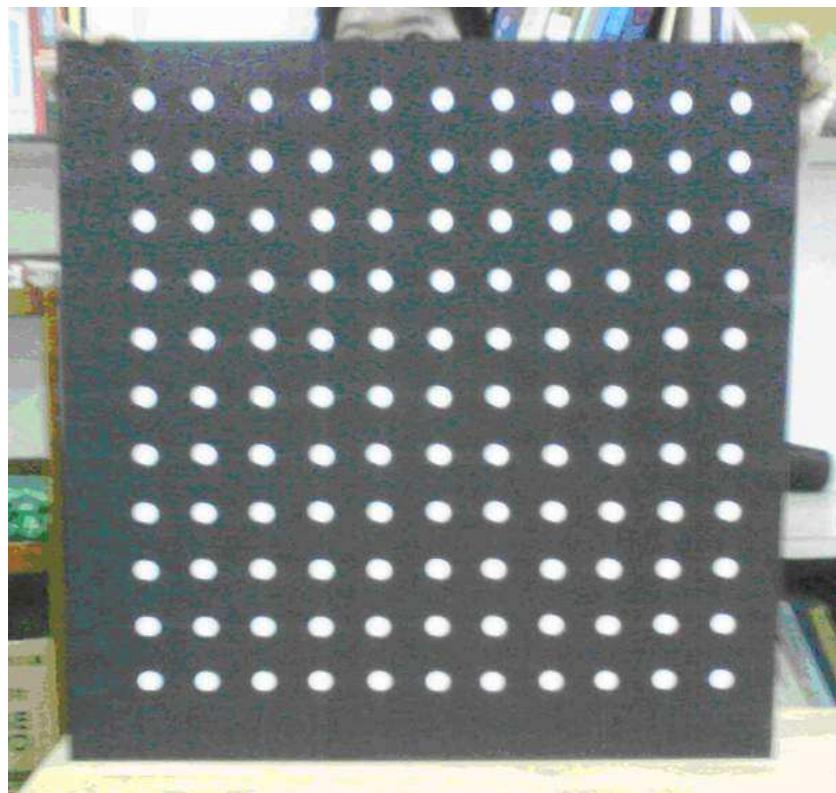


圖10 本計畫所製作的攝影機內部校正用板

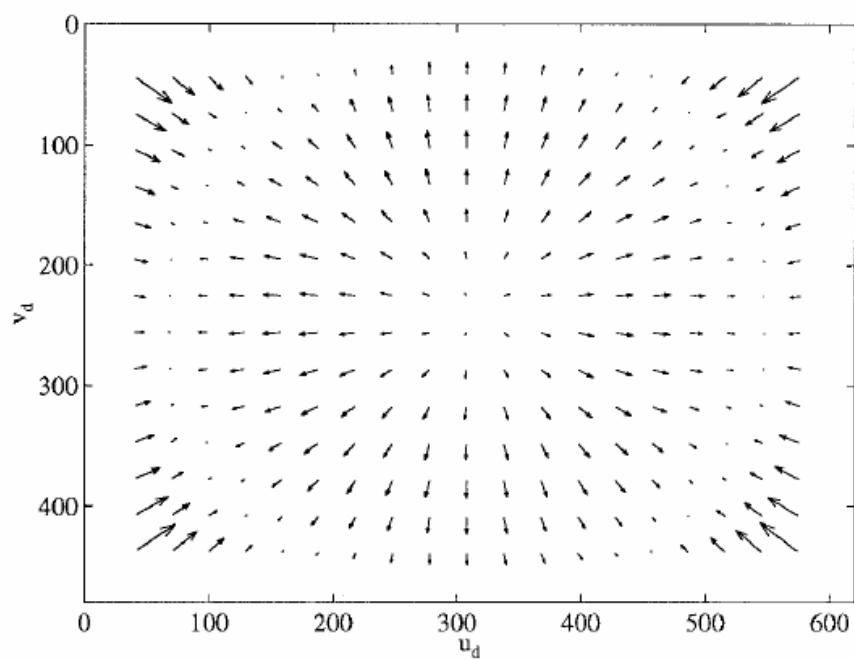


圖11 經向扭曲大小分佈示意圖(箭號長度代表扭曲的量值)

(Holland et al., 1997)

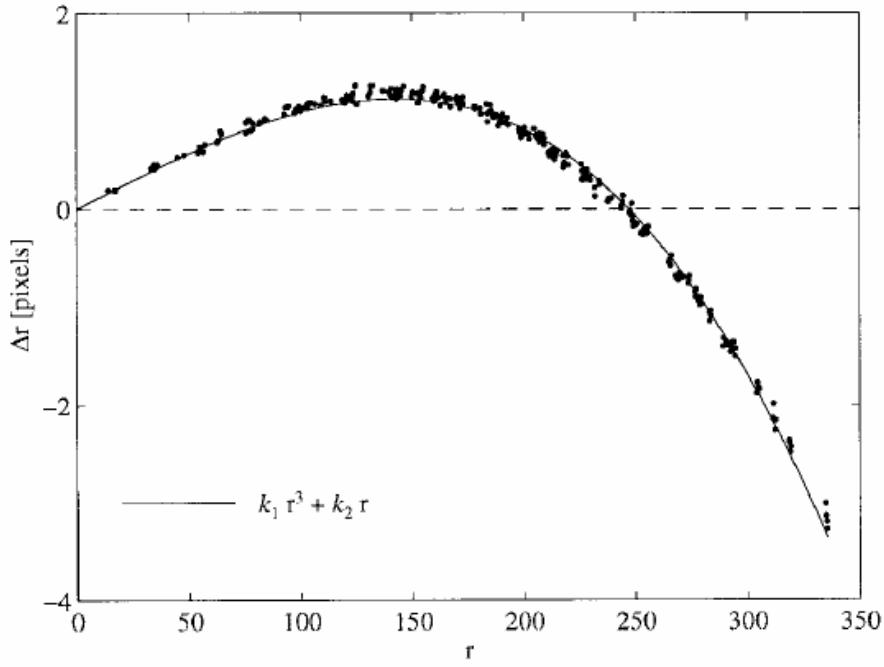


圖12 經向扭曲量值與徑向距離的回歸關係 (Holland et al., 1997)

## 2-5 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)方法一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13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(2.2.10)與式(2.2.11)展開得下式：

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -u_2y_2 & -u_2z_2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -v_2x_2 & -v_2y_2 & -v_2z_2 \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ M \\ L_1 \\ L_2 \\ M \\ v_1 \\ v_2 \\ M \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2.5.1)$$

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。

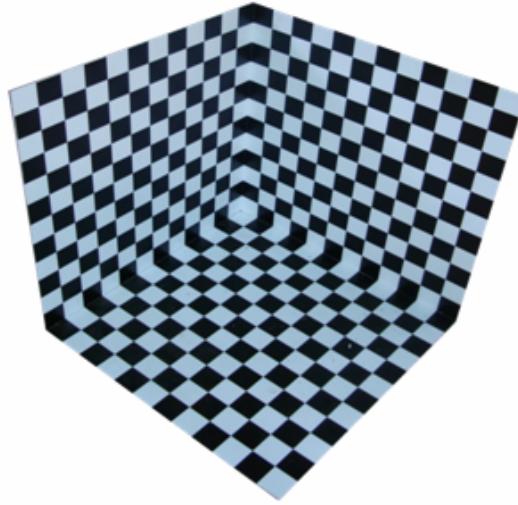


圖13 本計畫製作之立體校正網格板

## 2-6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。

### 2-6-1 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14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。

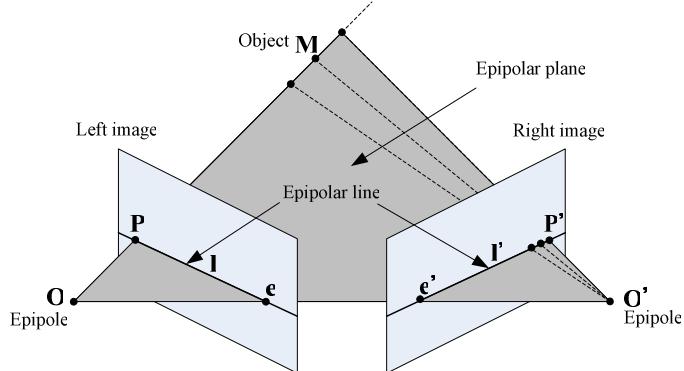


圖 14 極線幾何示意圖

依照圖上的關係，主要有六個公式：

$$l = FP' \quad (2.6.1)$$

$$l' = F^T P \quad (2.6.2)$$

$$F^T e = 0 \quad (2.6.3)$$

$$Fe' = 0 \quad (2.6.4)$$

$$P^T F P' = 0 \quad (2.6.5)$$

$$P'^T F^T P = 0 \quad (2.6.6)$$

其中  $F$  為  $3 \times 3$  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，(2.6.5)式可以寫成：

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.6.7)$$

並令  $F_{33} = 1$  並展開(2.6.6)式可得：

$$\begin{bmatrix} u_1 u'_1 & u_1 v'_1 & u_1 & u'_1 v_1 & v_1 v'_1 & v_1 & u'_1 & v'_1 \\ u_2 u'_2 & u_2 v'_2 & u_2 & u'_2 v_2 & v_2 v'_2 & v_2 & u'_2 & v'_2 \\ \dots & \dots \\ u_n u'_n & u_n v'_n & u_n & u'_n v_n & v_n v'_n & v_n & u'_n & v'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \dots \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.6.8)$$

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

## 2-6-2 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15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(2.6.9)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。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_t(i,j) - \bar{G}_t)(G_s(i,j) - \bar{G}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_t(i,j) - \bar{G}_t)^2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (G_s(i,j) - \bar{G}_s)^2} \quad (2.6.9)$$

*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

$\bar{G}_t(i,j), \bar{G}_s(i,j)$ ：目標視窗、搜尋視窗內像元的灰度平均值

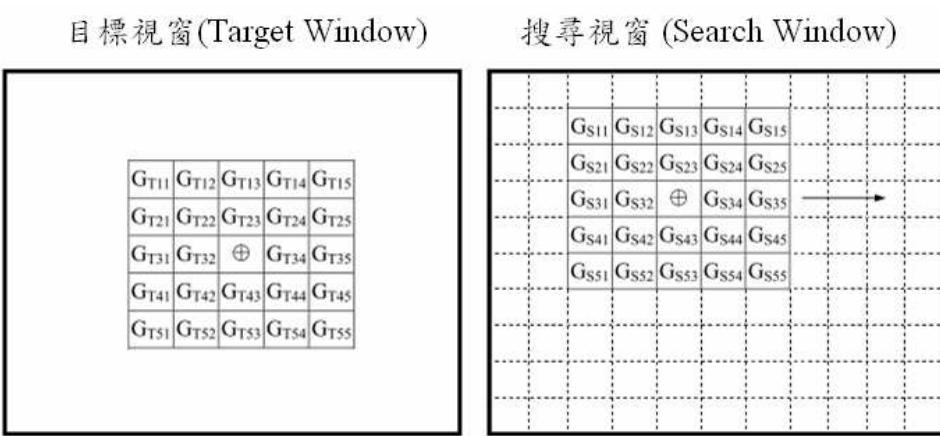


圖15 影像匹配NCC法示意圖

### 2-6-3 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。
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16、圖17) —

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)。

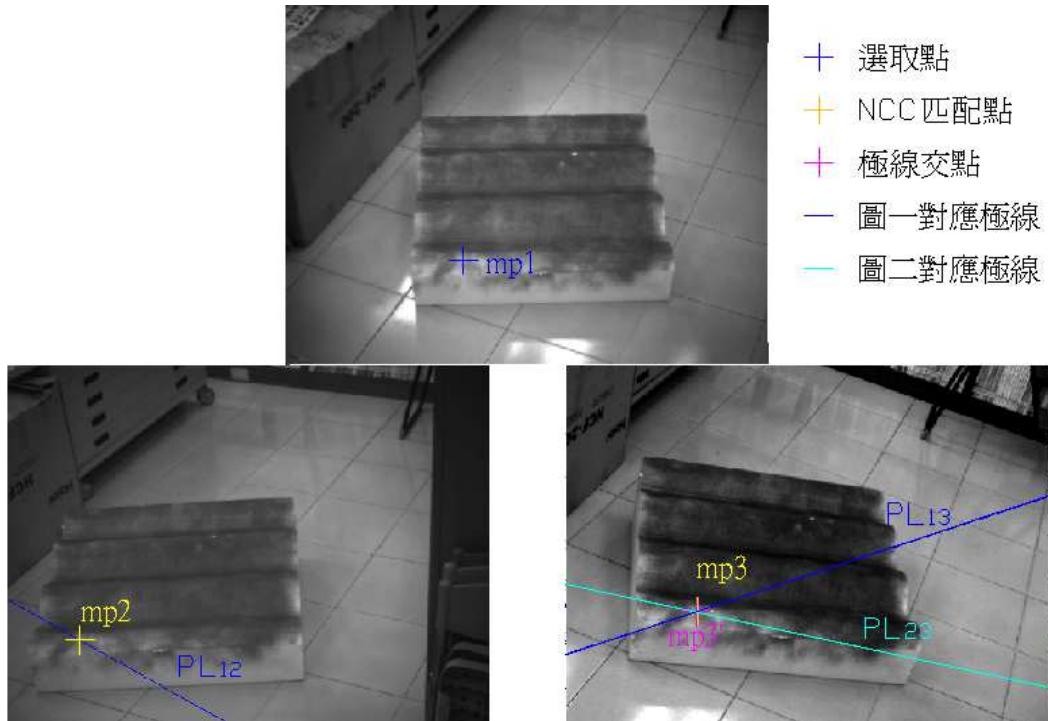


圖16 影像匹配對應之極線及匹配點

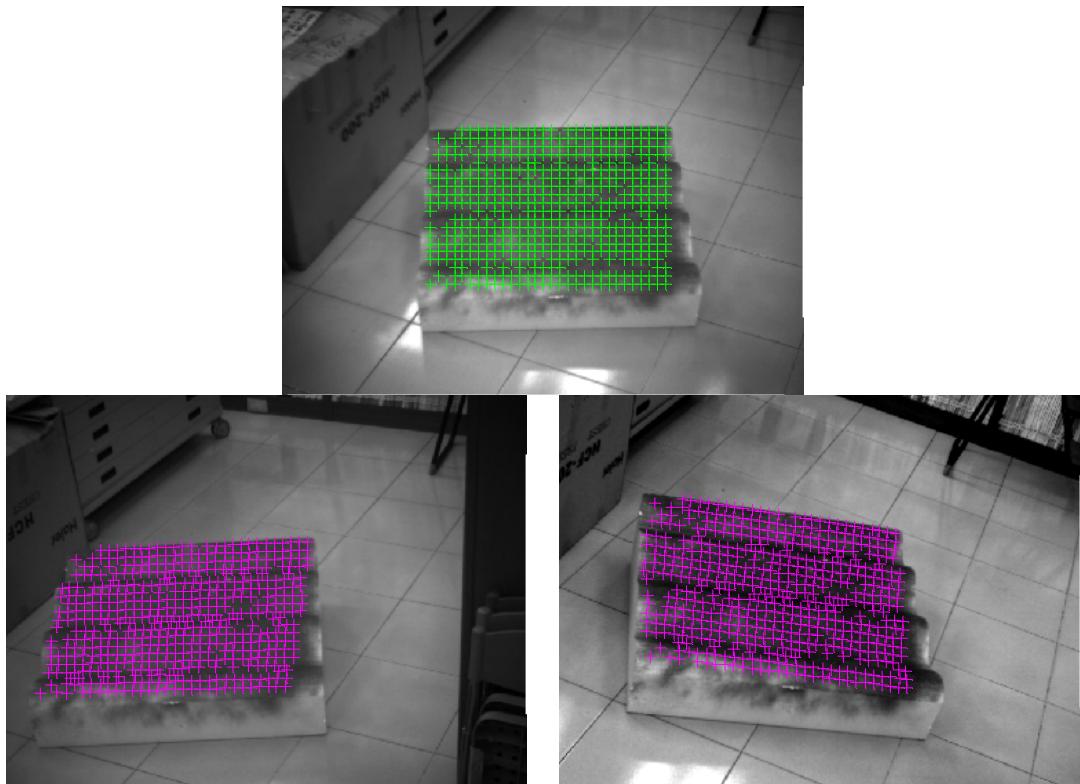


圖17 各相機之影像匹配點

## 第三章 三維立體影像系統之開發

### 3-1 硬體

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18所示。

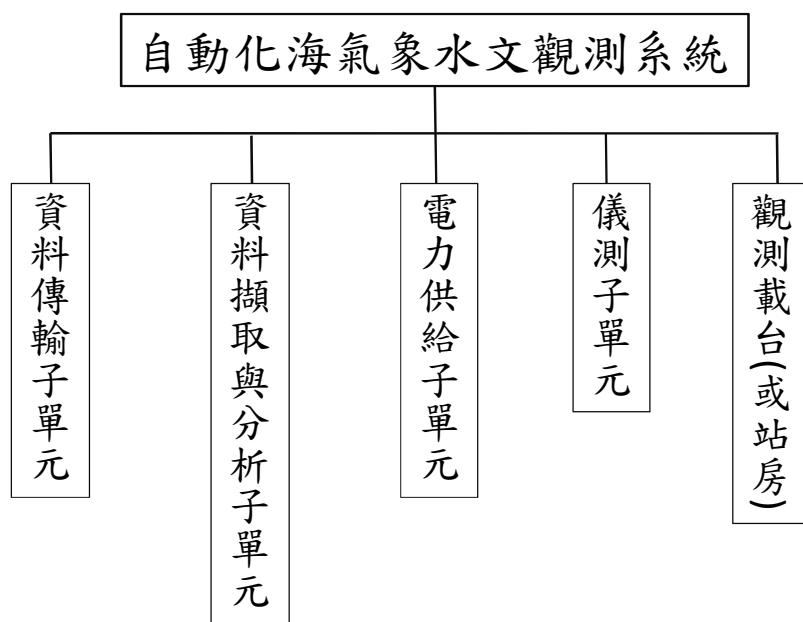


圖18 自動化海氣象水文觀測系統

在前 的自動化海氣象水文觀測系統 下，計畫所 研發的立體海 影 像觀測系統之 如圖19所示， 中的儀測子單元是三台 位 影 ， 系統 的電力供給 用 內 定供電， 因研發 ，不 多 力 在 系統的硬體 ， ， 系統設 電力 ， 測 研 使用， 計畫觀測系統 幾 電 ， 必要的電力供 電 系統 以使用 而資料擷取與分析子單元是由一台 業 電 (IPC)或 電 (NB)與資料擷取與分析 式 ，而 計畫的研 點 是在 依 ，開發資料擷取與分析的 式 資料傳輸子系統 定 電 ， 如 或電 提供的 (如ADSL) 觀測影像與 傳 中央 氣象局。 體而言，由 計畫之立體海 影像觀測系統 計 設 在 ，減少 在電力供給與資料傳輸 所 能 的 ， 計畫 以 研 能量 中在分析 的 。圖20是 自Wanek and Wu(2006) 文的立 體海 影像觀測系統， 是 計畫研 在 立體海 影像觀測系統 的 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。

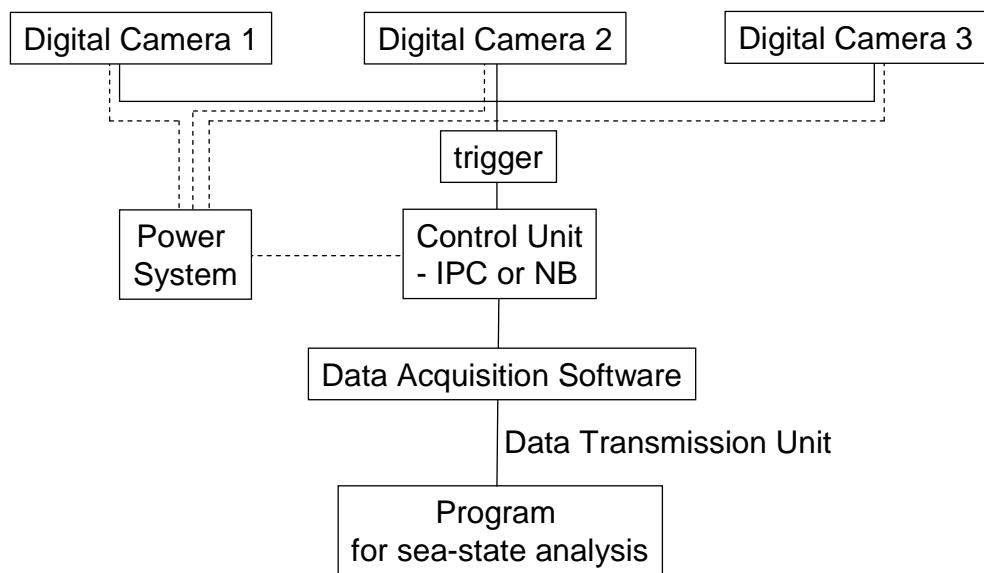


圖19 立體攝影系統架構

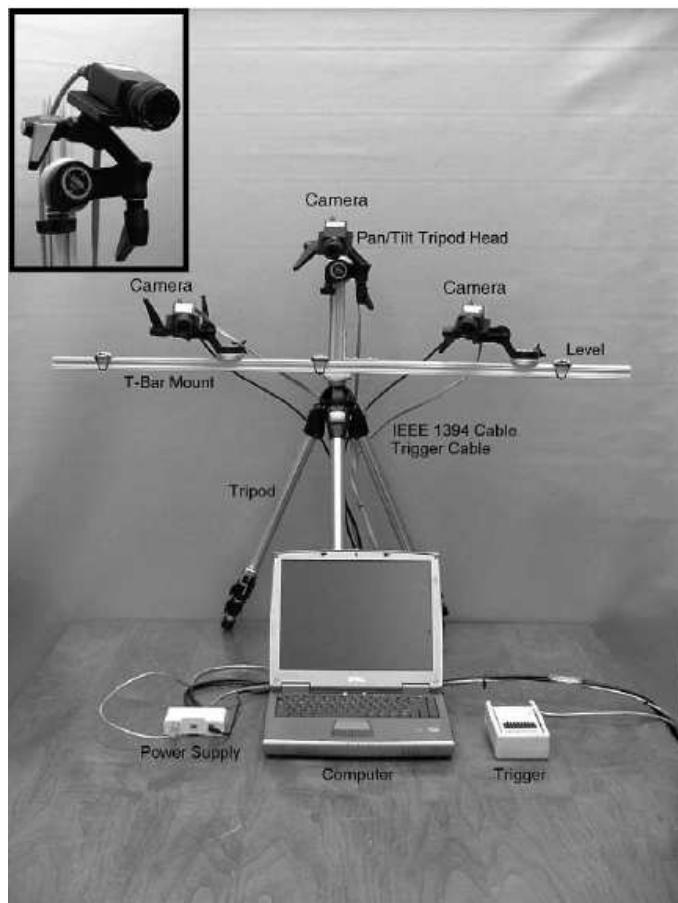


圖20 立體海況影像觀測系統

(節錄自 Wanek 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 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 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 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： 100AH*4=400AH 總耗電：7.75AH 備載時數： 400÷7.75=51.6 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21)。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 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 $4.65\mu\text{m} \times 4.65\mu\text{m}$ ，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22)。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 4為本計畫所使用之鏡頭規格，圖23為11.5mm-69mm可調焦距式CCTV鏡頭，圖24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、資料儲存量大之電子計算機，本計畫所使用之工業電腦規格如表 5。圖25為本計畫所使用

之工業級電腦，圖25(2)為電腦背面，其顯示電腦共有3組Gigabit Ethernet網路界面與網路線，可各連接到一台Basler scA1390-17gm高速攝影機。



圖21 Basler scA1390-17gm高速攝影機外觀

表 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 單色循序式掃瞄 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22 GW Instek之外部觸發器 (trigger)

表 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23 本計畫所使用之 11.5-69mm 可調焦距式CCTV鏡頭



圖24 本計畫所使用之16、25、35mm 定焦距CCTV鏡頭

表 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

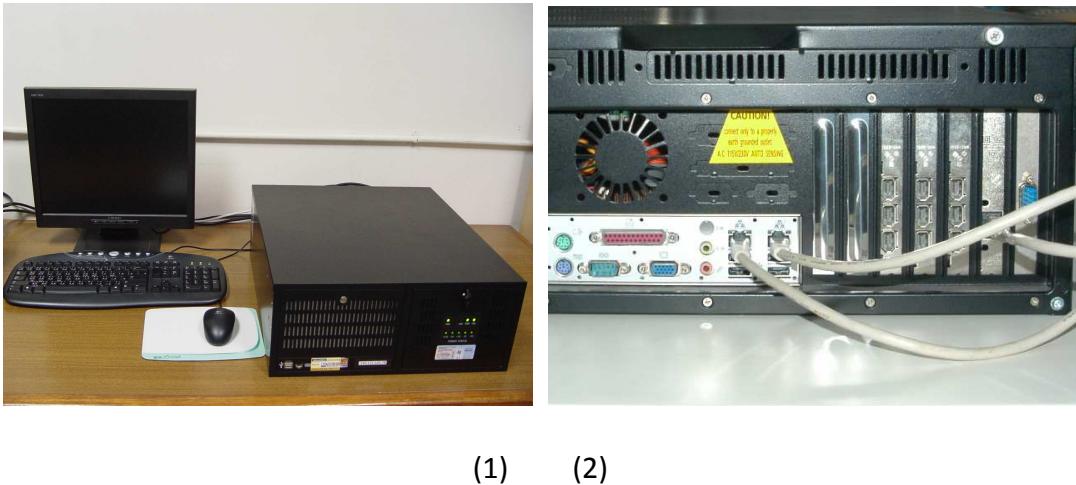


圖25 (1)本計畫所使用工業電腦之正面圖(2)背面圖(3組Gigabit Ethernet網路界面與網路線各連接到一台Basler scA1390-17gm高速攝影機)

### 3-2 軟體

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26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。

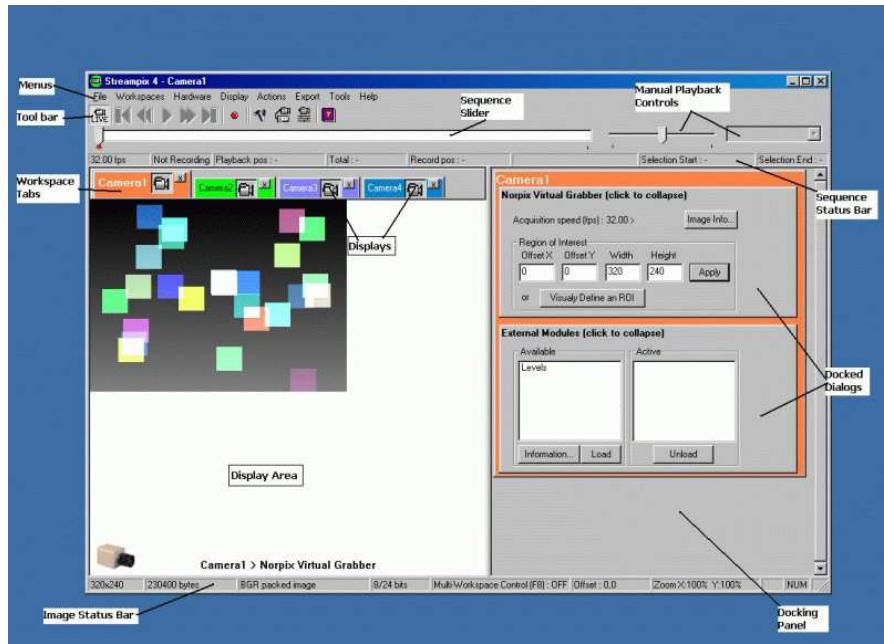


圖26 StreamPix 4軟體介面

### 3-3 系統整合

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27，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27 本計畫使用之各元件組裝整合圖

## 第四章 影像校正與靜態驗證結果

### 4-1 內部校正成果

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 28 所示，其規格如下：

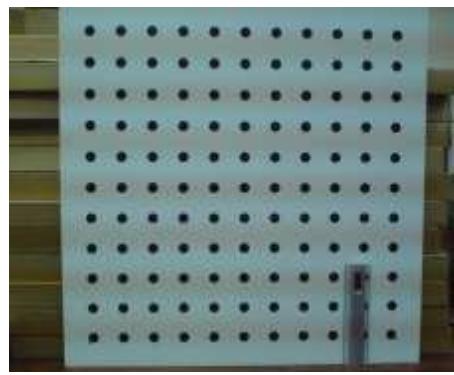
校正板【A】：直徑 2 公分之圓形校正點，校正點間距 6 公分，校正板大小 72x72 公分。(校正點合計 121 點)

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 72x72 公分。(校正點合計 121 點)

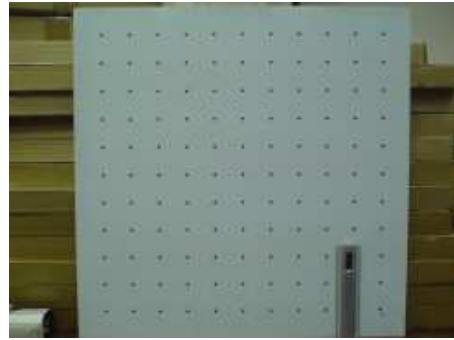
校正板【C】：棋盤式校正板，棋盤間距 6 公分，校正板大小 72x72 公分。  
(校正點合計 121 點)

校正板【D】：棋盤式校正板，棋盤間距 3 公分，校正板大小 72x72 公分。  
(校正點合計 529 點)

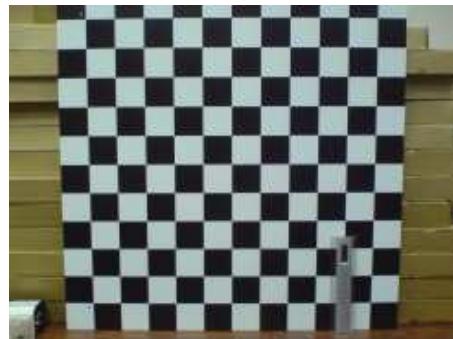
校正板【E】：棋盤式校正板，棋盤間距 1.5 公分，校正板大小 72x72 公分。  
(校正點合計 2209 點)



【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28本計畫進行內部校正所設計之五種校正板

#### 4-1-1 內部校正程序

內部校正執行步驟列點如下：

Step1：攝影機拍攝棋盤式校正板，校正板板面須與相機感光測器(如 CCD)平行。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：開啟內部校正程式，並選取上一步驟所拍攝之影像。接著輸入校正版棋盤隔點之間距(單位為 mm)(圖 29)。

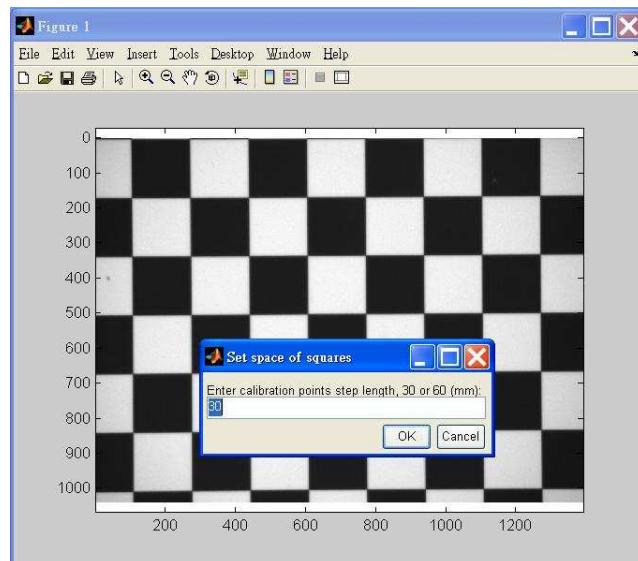


圖29 輸入隔點之間距

Step3：輸入校正版之垂直隔點數(圖 30)。

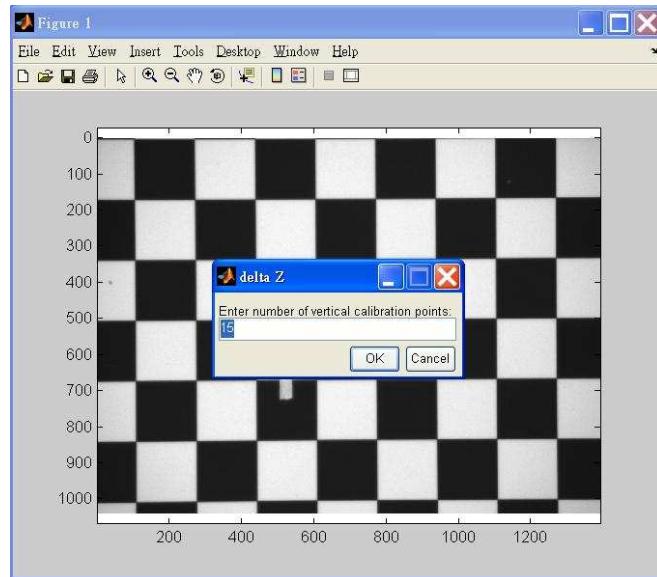


圖30 輸入垂直點數

Step4: 輸入校正版之水平隔點數(圖 31)。

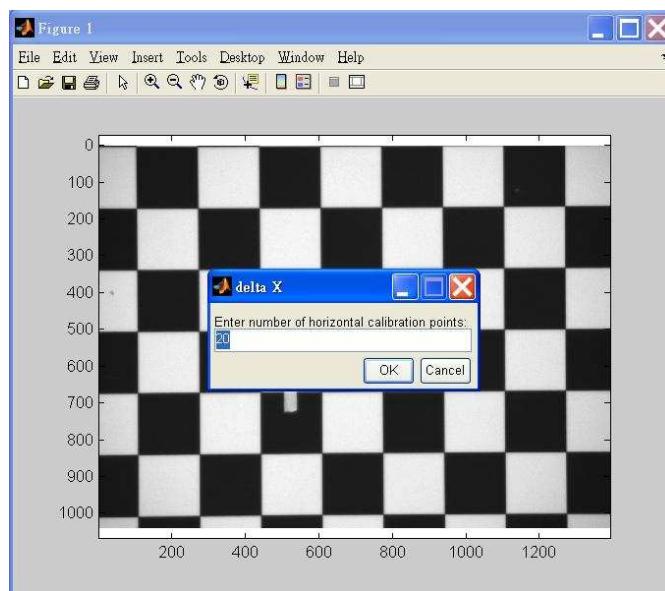


圖31 輸入水平點數

Step5: 選取 4 個校正點，分別在影像上依序選取左上、右上、右下、左下(必須符合 Step3 與 Step4 所間距之隔點數)(如圖 32)。

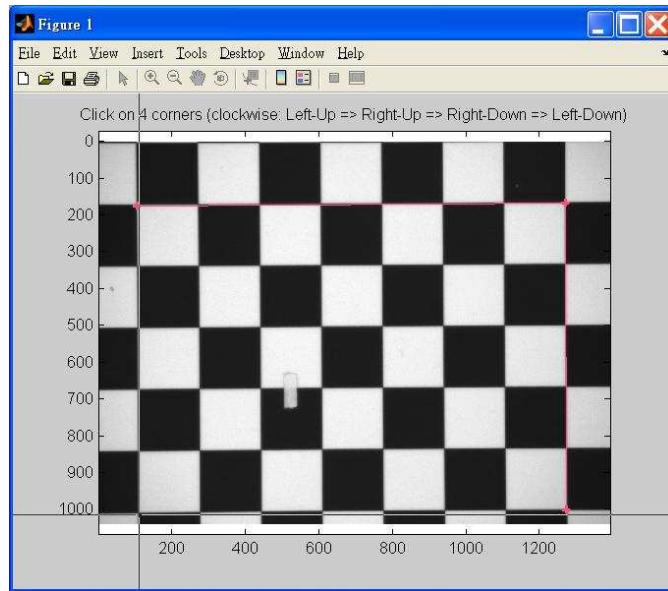


圖32 選取左上、右上、右下、左下，4個較正點

Step6：選取完成後，程式會自動在所選取的範圍內，依照所輸入的垂直與水平點數及所輸入的格點間距離，自動點選出較正點，並且詢問是否需要手動調整(圖 38)。

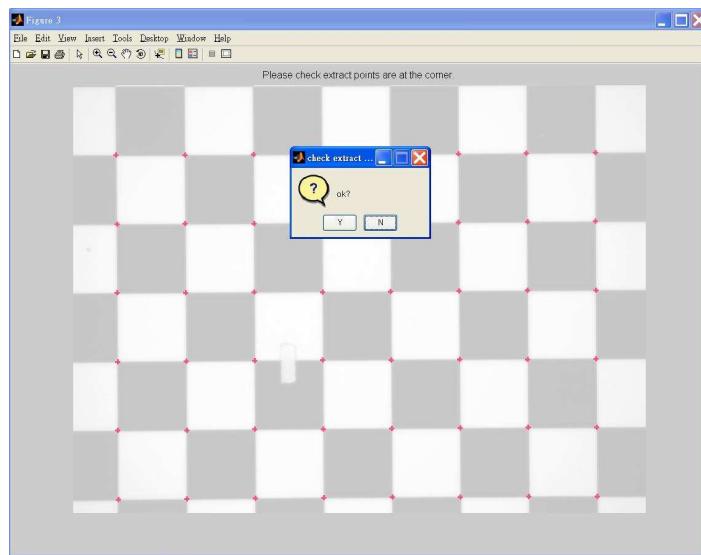


圖33 程式自動完成隔點之點選

Step7：接著利用 (2.4.3)、(2.4.4)式求解八個 DLT 參數( $L_1, L_3, L_4, L_5, L_7, L_8, L_9, L_{11}$ )。

Step8：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。

Step9：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  $\Delta r$  (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  $\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r$  (2.4.7)  $\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r$ 。由於計算  $\Delta r$  時需要知道主軸點  $(x_0, y_0)$  的位置，因此(2.4.8)可以疊代方式求解，令最小誤差平方和最小，求解出(2.4.8)之 $(x_0, y_0)$ 以及方程式係數  $k_3$ 、 $k_1$ 。

Step10：當(2.4.7)式已知時，給定不同的  $r$  可以獲得該位置的扭曲量  $\Delta r$ 。

Step11：利用 $(x_d, y_d)$ 、 $(x_p, y_p)$ 繪製扭曲分佈向量圖。

Step12：由 Step 10 之  $\Delta r$ ，可將原始影像之扭曲量校正。

#### 4-1-2 內部校正結果

以不同校正板試驗，我們得到下列結果(表 6)。表內顯示以棋盤式校正板扭曲量最小。圖34為相片扭曲分布圖，圖35為扭曲分布與徑向距離關係。表 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35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36顯示扭曲曲線在焦距大於25mm時由下彎轉為上彎。由表 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 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	最大扭曲	主軸點 $(x_0, y_0)$
----	-----	------	------	------------------

		(pixel)	(pixel)	
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 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 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)

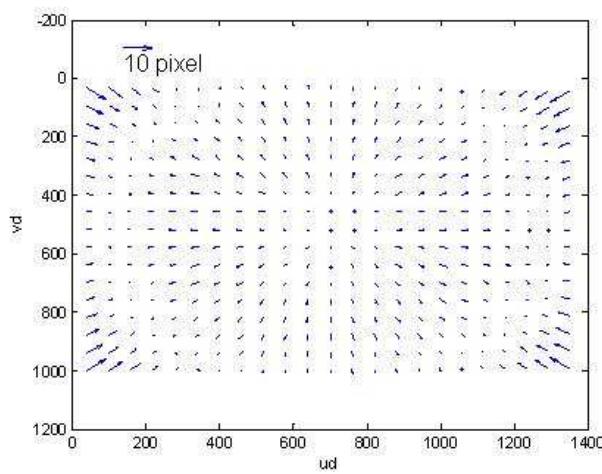


圖34 為相片扭曲分布圖

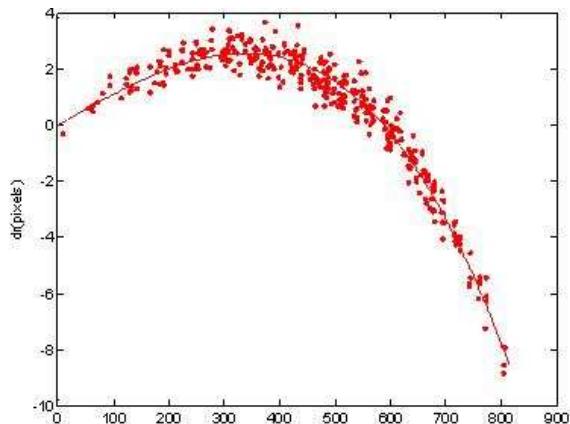


圖35 為扭曲分布與徑向距離關係

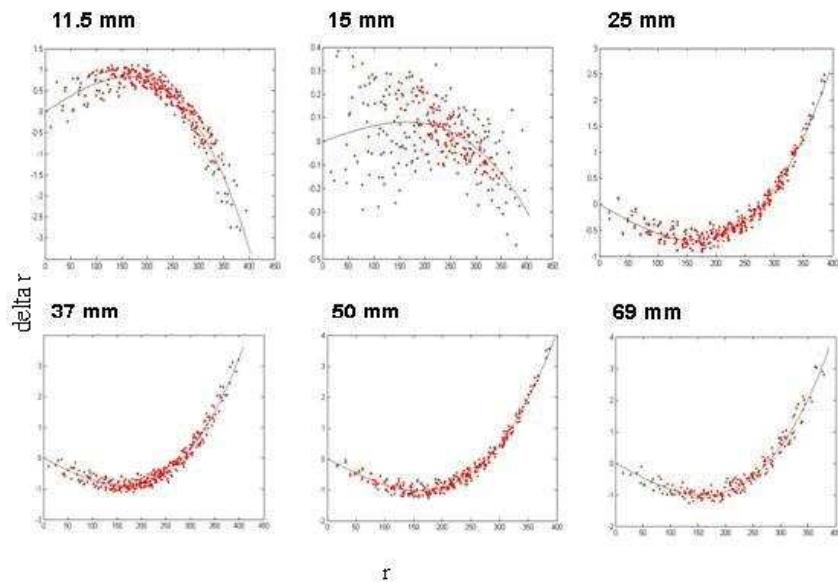


圖36 可變焦距鏡頭於不同焦距時之扭曲分布與徑向距離關係

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37與為圖38為校正前後之影像。



圖37 焦距6mm鏡頭拍攝之校正前影像

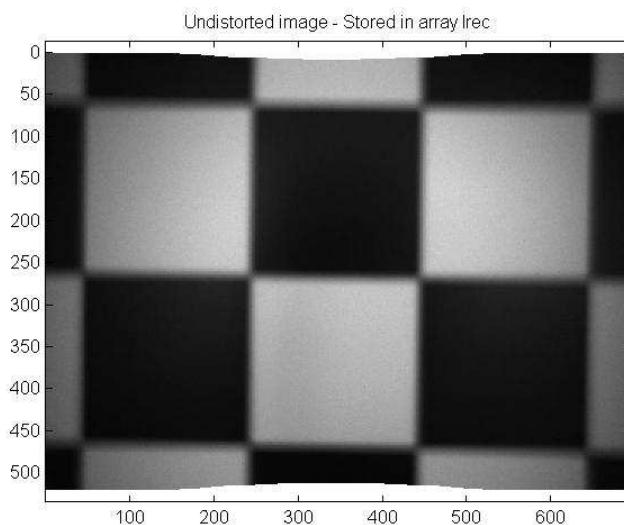


圖38 焦距6mm鏡頭拍攝經校正後影像

## 4-2外部校正成果

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 面與海平面平行。(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39 本計畫進行系統外部校正之過程

#### 4-2-1 外部校正程序

本計畫自行開發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：

Step1: 使用三台攝影機拍攝外部校正板影像。如圖40(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。

Step2: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41）。

Step3: 以校正板三平面交點為原點輸入所選點位之實際三維座標 $(x_n, y_n, z_n)$ （單位為cm或mm），並透過手動判讀其點位對應至影像之像素點座標 $(u_n, v_n)$ 單位為pixel（圖42）。

Step4:於左側及右側影像上，選取其相同對應之點位，並透過電腦自動判讀其點位對應至影像之像素點座標 $(u_n, v_n)$ （圖43）。

Step5:重複步驟1~3，選取外部校正計算點位至少六點以上（如圖44）。

Step6:將三台攝影機之實際三維座標 $(x_n, y_n, z_n)$ 與對應至影像之像素點座標 $(u_n, v_n)$ 代入前述之式(2.5.1)，求得各相機之11個外部參數(L1i、L2i、L3i)，由此11個參數將平面的影像資料轉換為三維之立體座標。

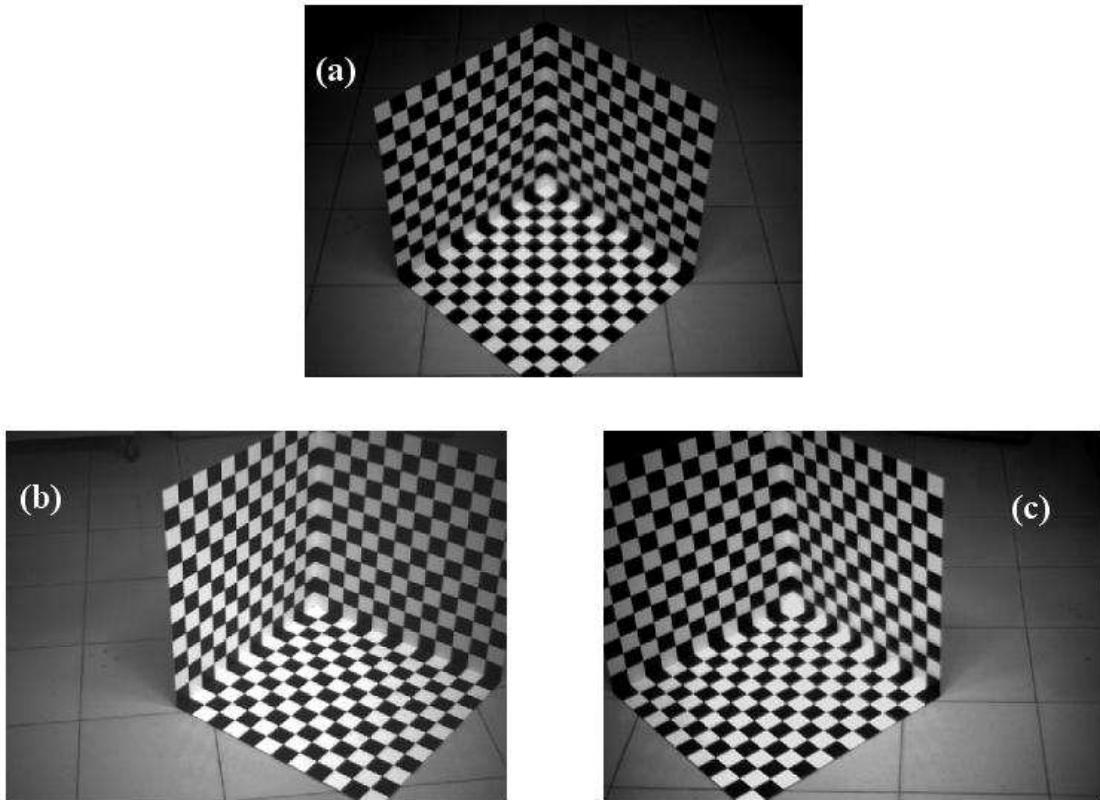


圖40 外部校正過程中，三台相機拍攝外部校正板所得之三張影像。

(a)上方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。

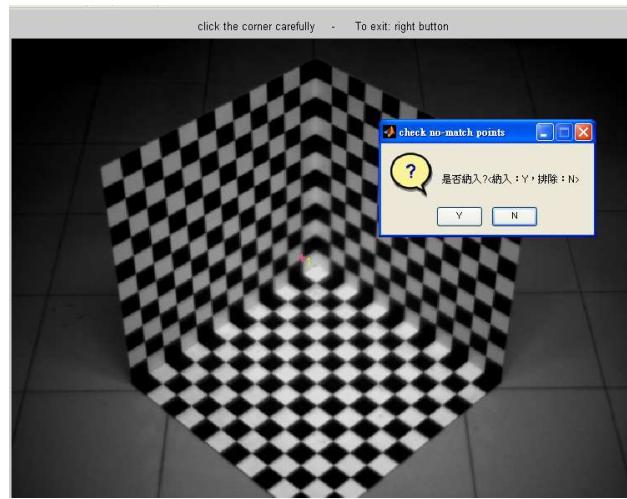


圖41 選取上方影像之計算點位

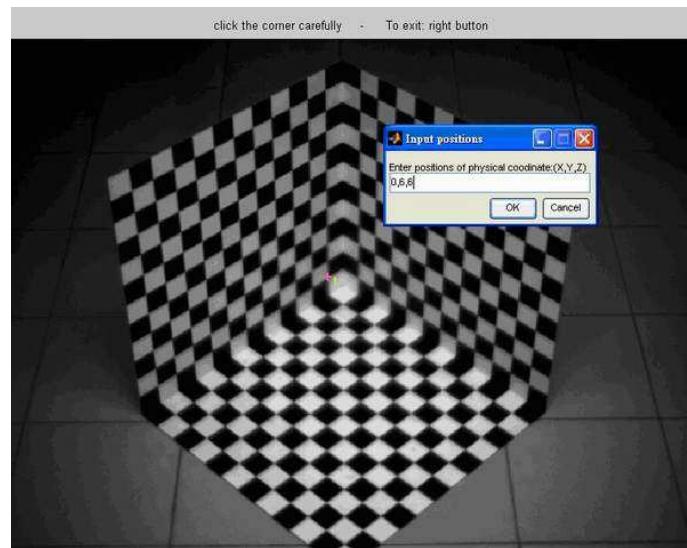


圖42 輸入選取點位之實際座標

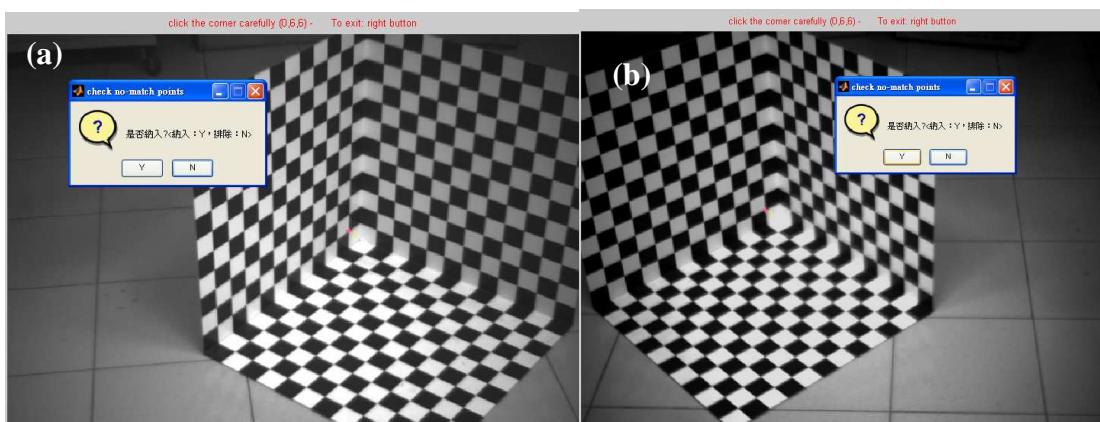


圖43 選取(a)左側相機及(b)右側相機中相對同應之點位。

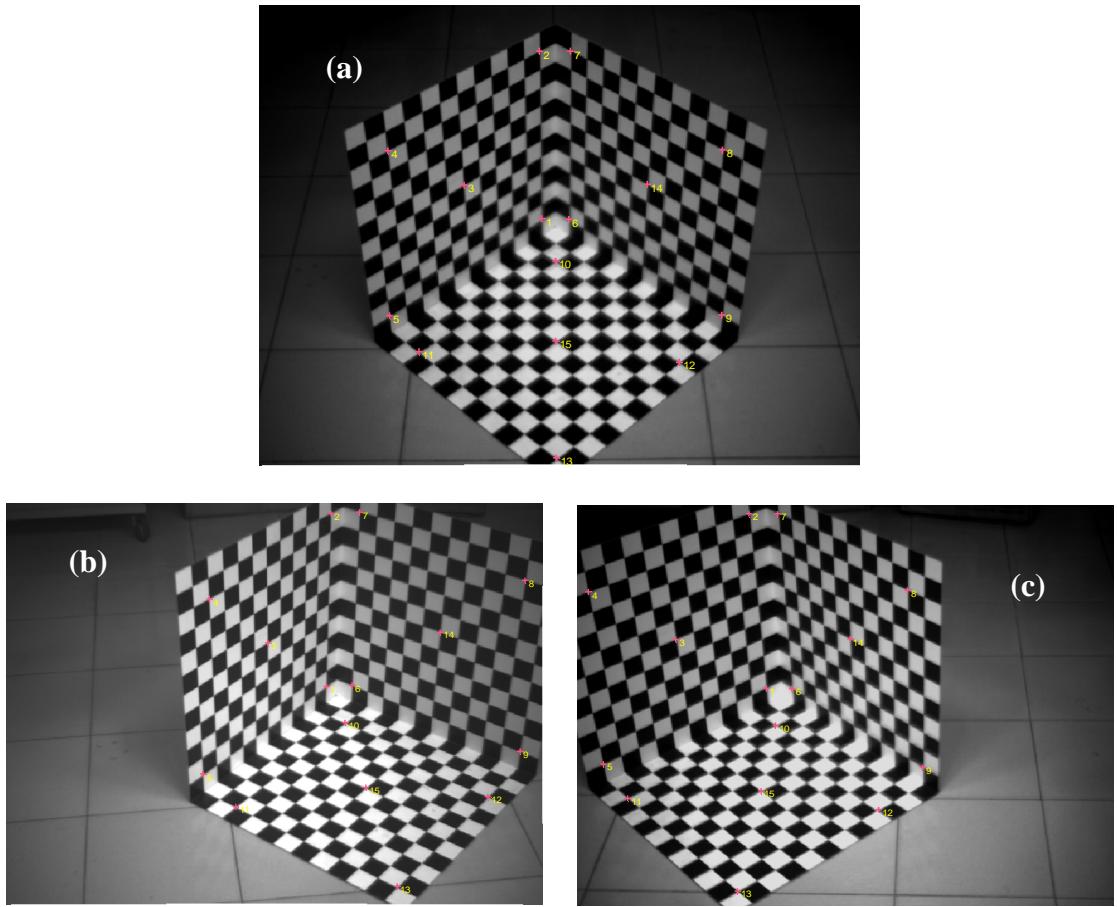


圖44 外部校正過程中，三影像選取之外部校正點位。

(a)上方相機；(b)左側相機；(c)右側相機所攝得之影像。

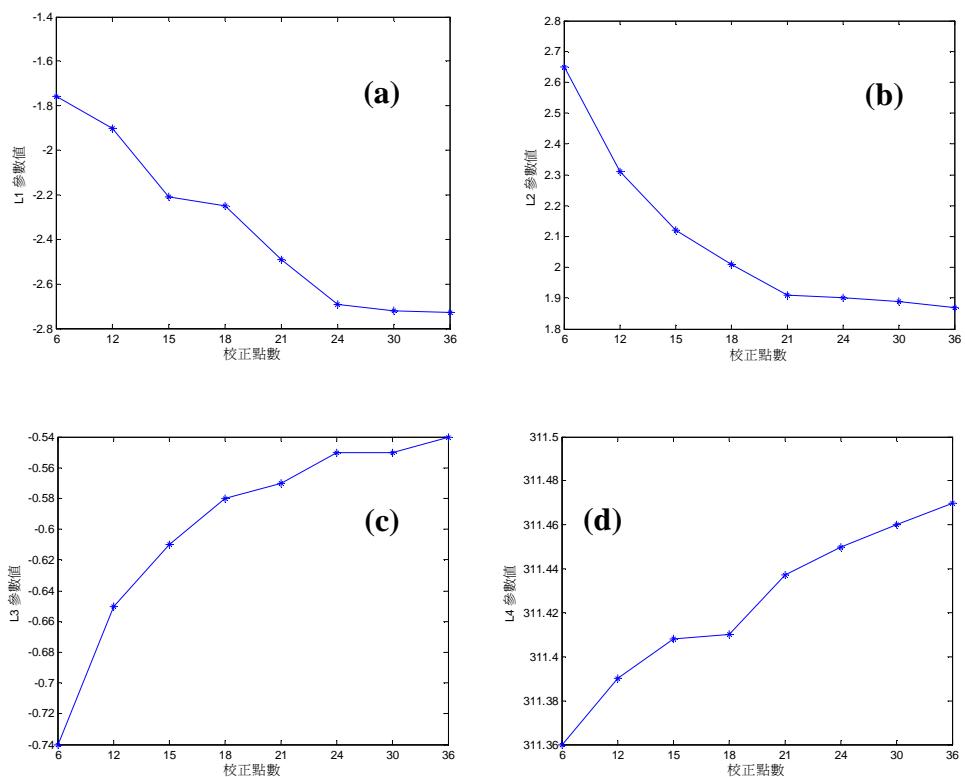
完成外部校正後，可得到立體攝影系統各相機之相對位置與角度，在DLT方法則表現在11個外部參數上，由此11個參數可將平面的影像資料轉換為三維之立體座標。

#### 4-2-2 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 9，11個直接線性轉換參數與校正點數之關係如圖45。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 9 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



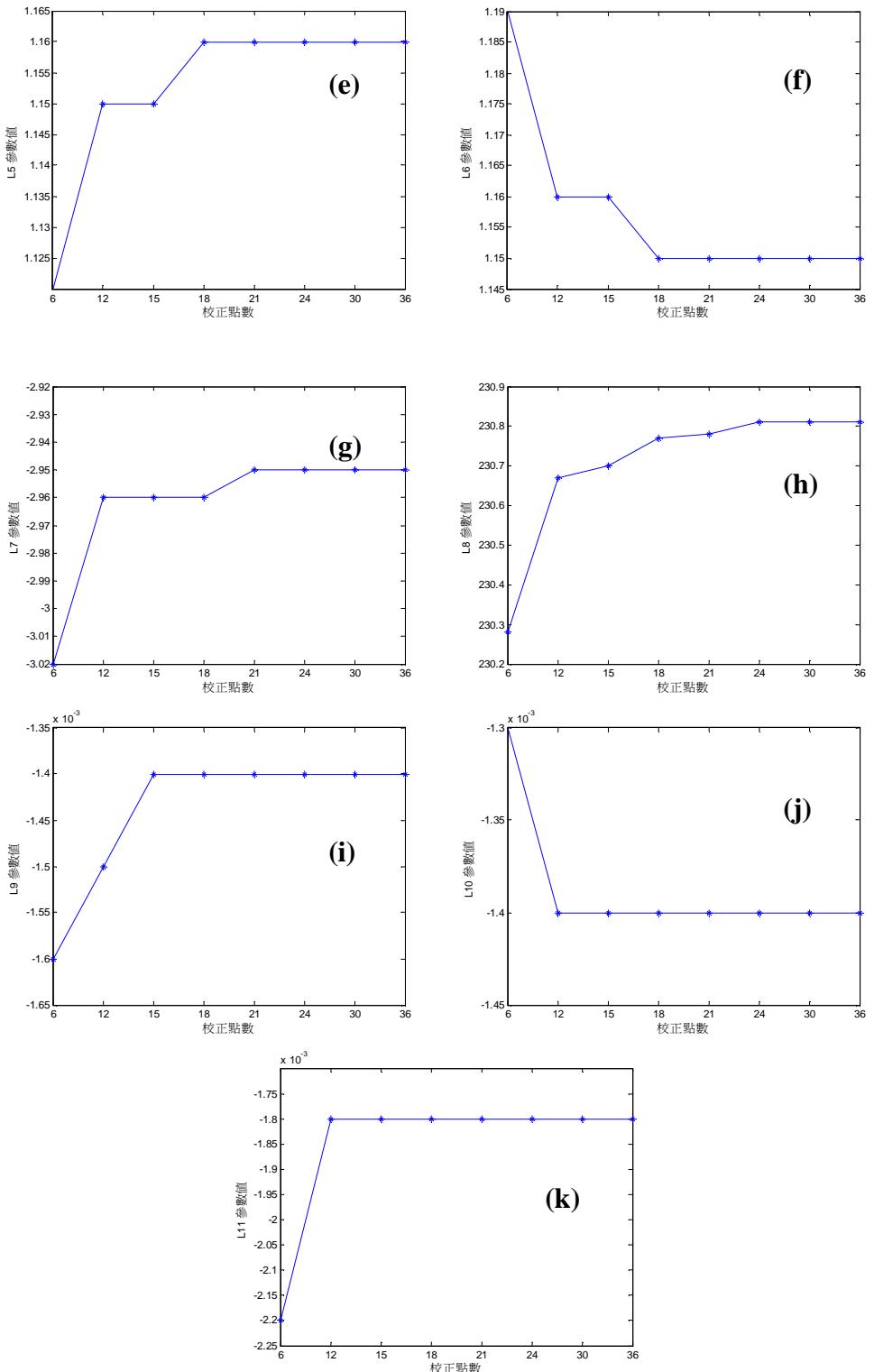


圖45 外部校正結果與校正點數多寡之關係。

(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。

### 4-2-3 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 20)。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。

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 10)。表 10 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 12)。表 12 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 13 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 46 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 14)。

表 15 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 16 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 17)，圖 47 中的紅色區域為三台相機的範圍。表 18 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 19 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 20 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 21)。圖 48 中紅色區域為這三台相機的重疊觀測範圍。表 22 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 23 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 24 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 25 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 14 攝影參數條件，但左右相機的水平旋轉角為 7 度，表 26 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 49 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 10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 11 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 12 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 13 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 14 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 15 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 16 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 17 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 18 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 19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 20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 21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 22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 23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 24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 25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 26 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

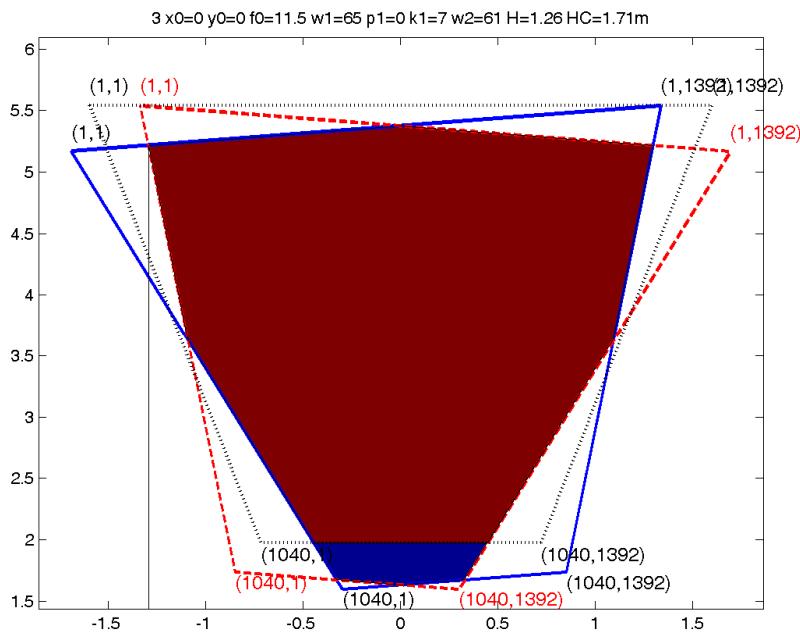


圖46三台相機重疊範圍(條件1)

(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)

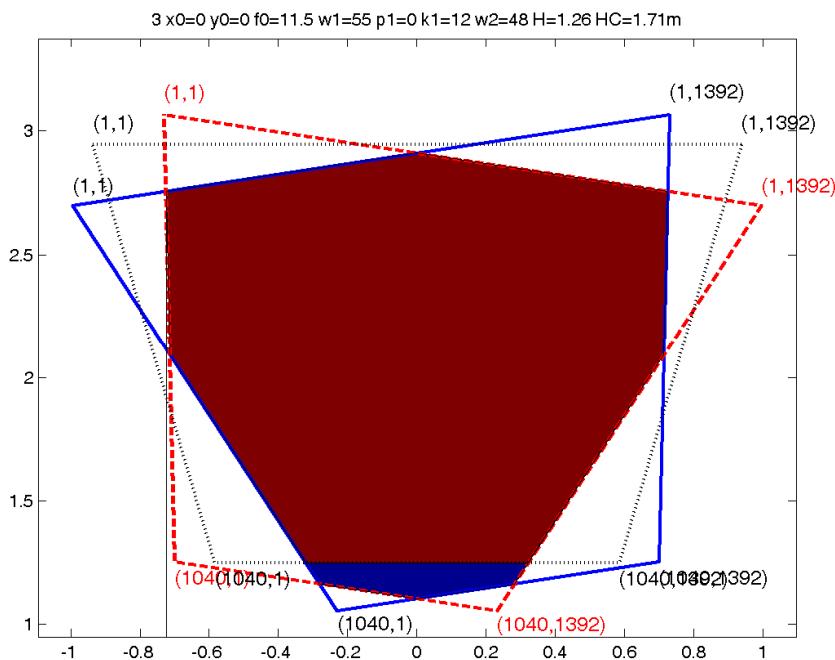


圖47三台相機重疊範圍(條件2)

(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)

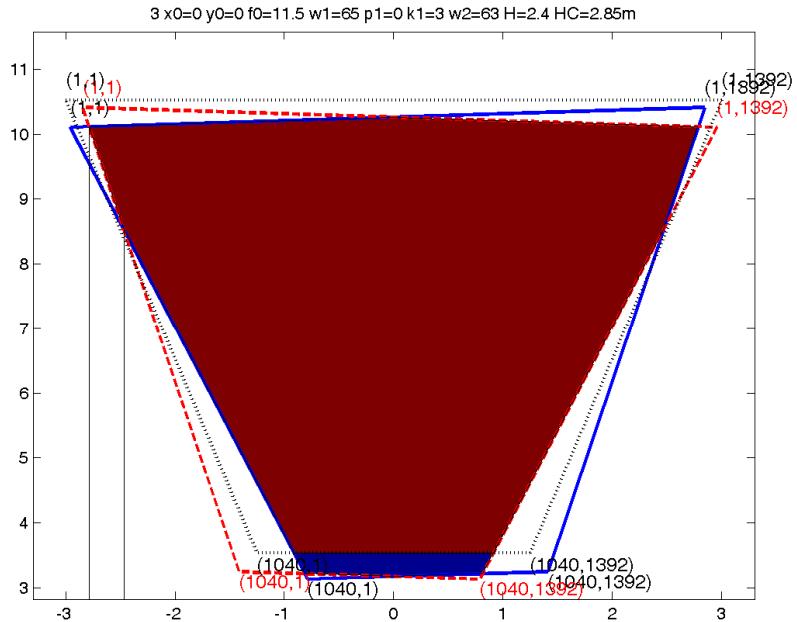


圖48三台相機重疊範圍(條件3)

(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)

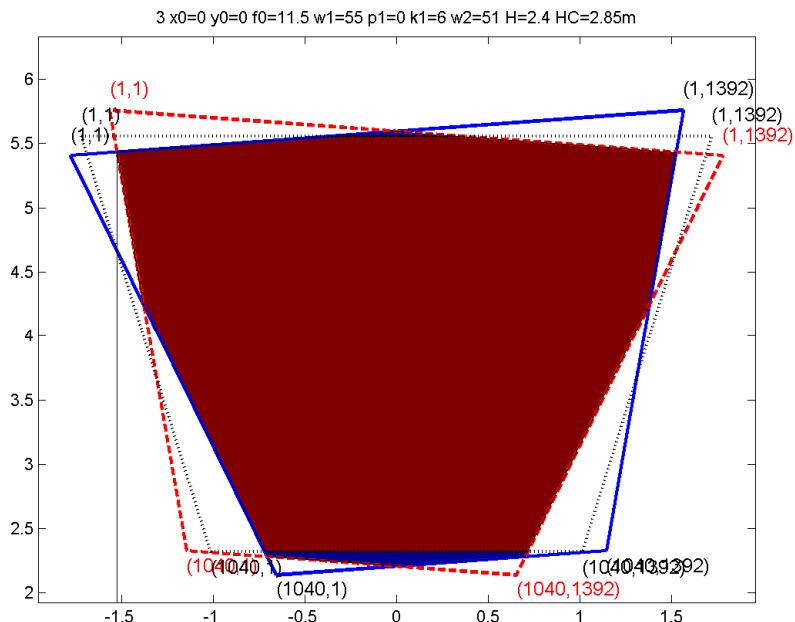


圖49三台相機重疊範圍(條件4)

(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)

## 4-3 立體影像重建與靜態驗證

### 4-3-1 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50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，

$$\begin{bmatrix} L_1^L - L_9^L x_{iL} & L_2^L - L_{10}^L x_{iL} & L_3^L - L_{11}^L x_{iL} \\ L_5^L - L_9^L y_{iL} & L_6^L - L_{10}^L y_{iL} & L_4^L - L_{11}^L y_{iL} \\ L_1^C - L_9^C x_{iC} & L_2^C - L_{10}^C x_{iC} & L_3^C - L_{11}^C x_{iC} \\ L_5^C - L_9^C y_{iC} & L_6^C - L_{10}^C y_{iC} & L_4^C - L_{11}^C y_{iC} \\ L_1^R - L_9^R x_{iR} & L_2^R - L_{10}^R x_{iR} & L_3^R - L_{11}^R x_{iR} \\ L_5^R - L_9^R y_{iR} & L_6^R - L_{10}^R y_{iR} & L_4^R - L_{11}^R y_{iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{iL} - L_4^L \\ y_{iL} - L_8^L \\ x_{iC} - L_4^C \\ y_{iC} - L_8^C \\ x_{iR} - L_4^R \\ y_{iR} - L_8^R \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

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  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ，以建構成完整的三維影像。

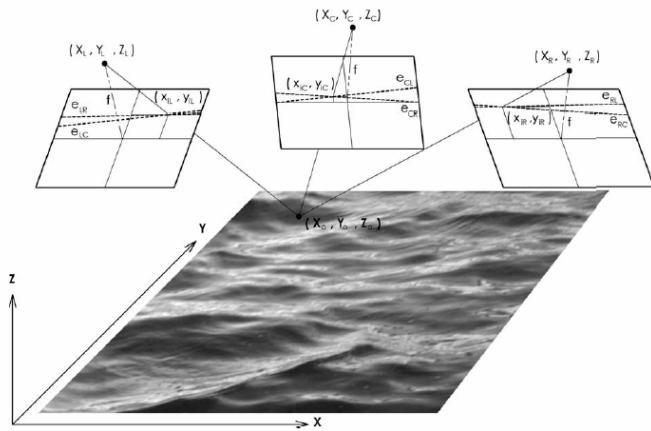


圖50 立體影像從事表面海況監測示意圖

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。

#### 4-3-2 平面模擬波場之靜態驗證

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53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51所示。

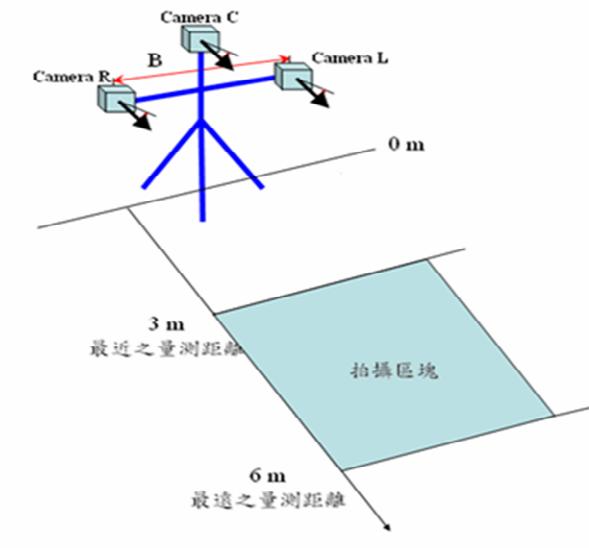


圖51 平面模擬波場佈置示意圖

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52，經由直接線性轉換求得各攝影機之11個外部校正參數。同步攝影標的物(地板磁磚)，如圖53，選擇各影像上之匹配點，進行影像匹配，匹配結果如圖54所示

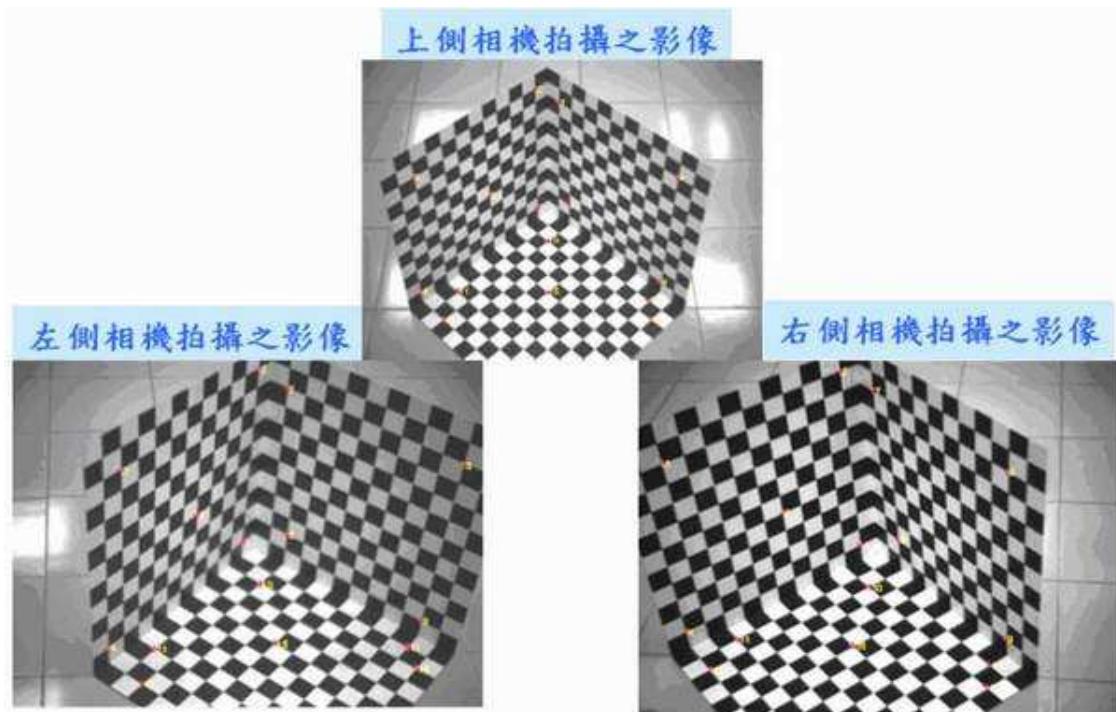


圖52 外部校正之校正板影像



圖53 拍攝之磁磚影像

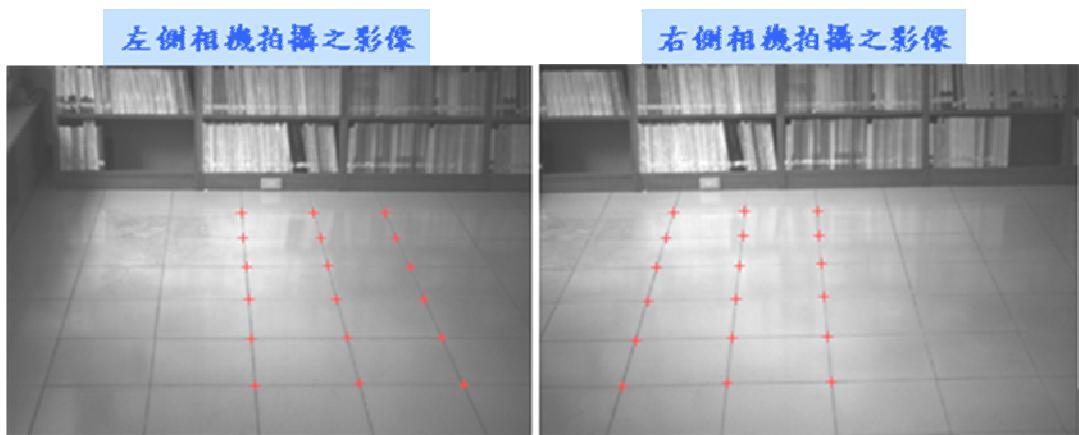


圖54 磁磚影像之匹配情形

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 27。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55)。

表 27 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

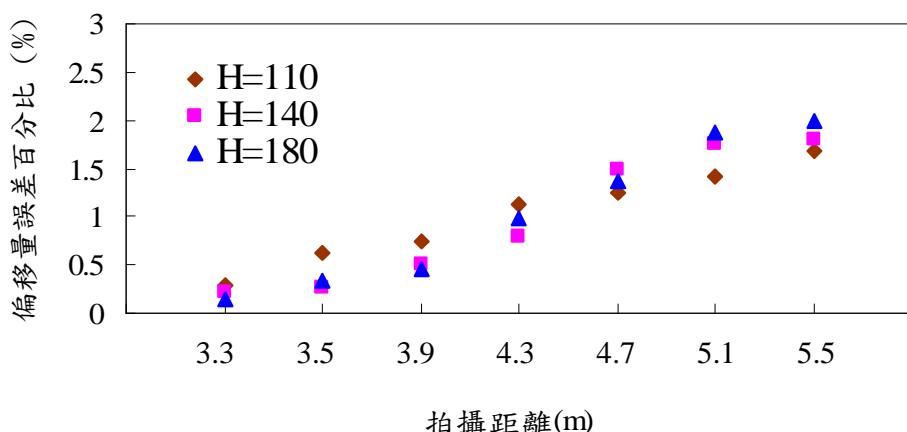


圖55 不同拍攝距離與高度之偏移量

### 4-3-3 空間模擬波場之靜態驗證

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56)作為待測標的物，位置其實驗配置與前小節相同如圖51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 $30^\circ$ 。試驗結果詳細內容分述如下：



圖56 波浪板模型

重建之立體影像如圖 57 所示，於圖中沿著 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。

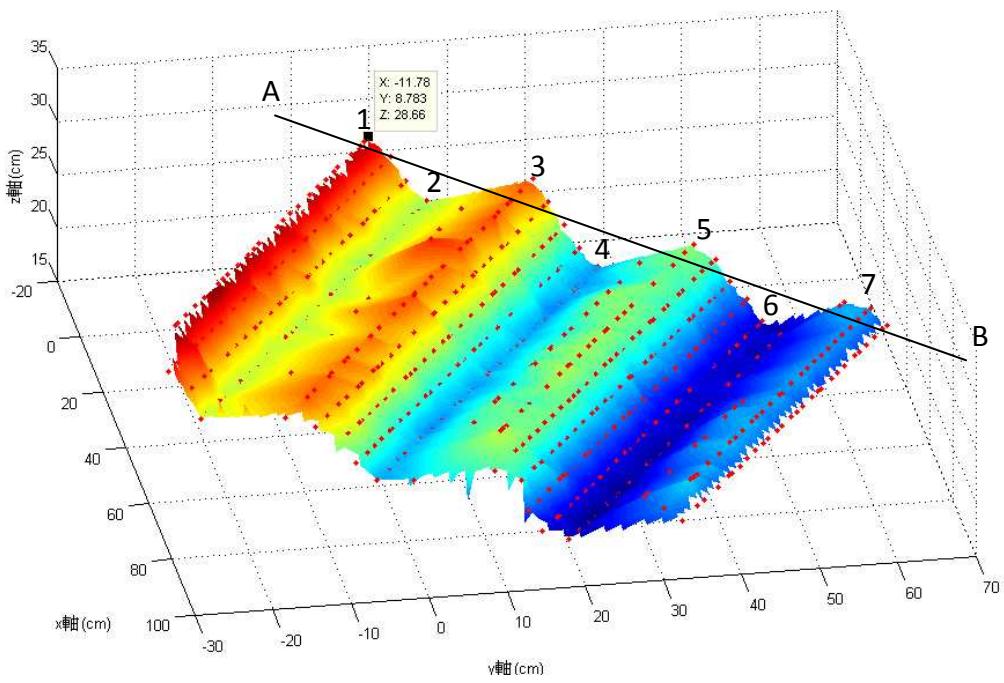
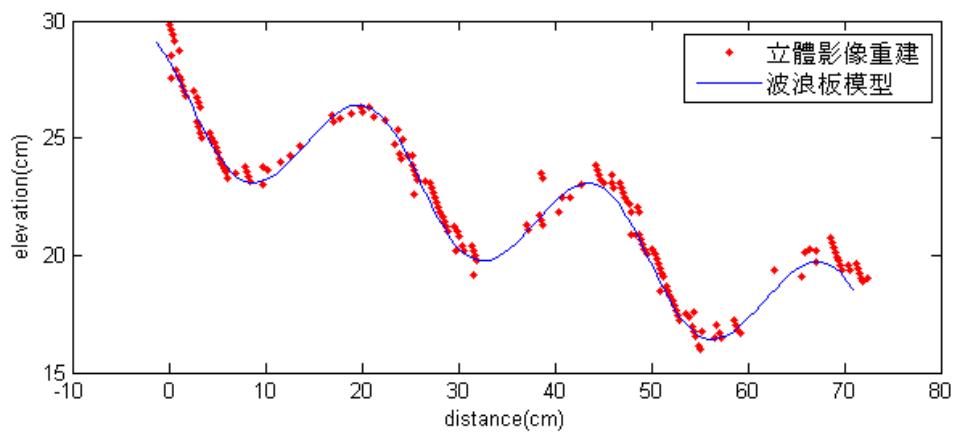


圖57 立體影像技術之求解結果

表 28 立體影像重建結果

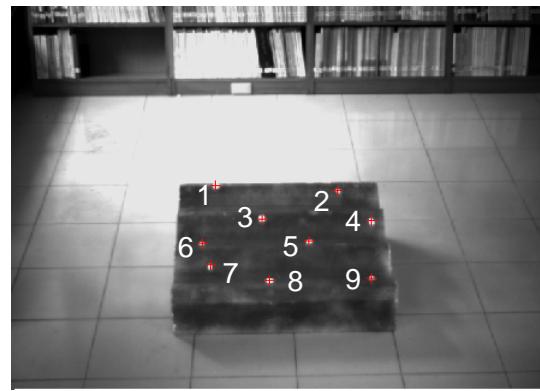
編號	x(cm)	y(cm)	z(cm)	實際高程(cm)
1	-11.78	8.78	28.66	29.1
2	-7.52	15.52	23.36	23.1
3	1.39	27.86	27.07	26.5
4	5.96	35.48	19.51	19.8
5	13.94	46.53	23.12	23.0
6	18.91	54.55	16.77	16.5
7	27.86	67.14	19.63	19.8



### 圖58 波浪板剖面與立體重建結果比較

如前所述，4-3-2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59a)，並量測其實際高度，與立體影像量測結果比較其結果如表4-3，圖60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61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

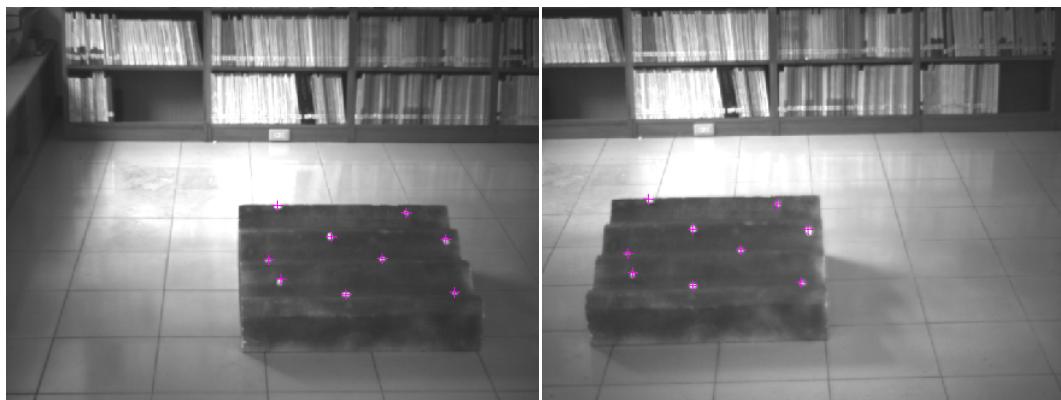


圖59 攝影高度1.8公尺拍攝之波浪板影像

表 29 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 30 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

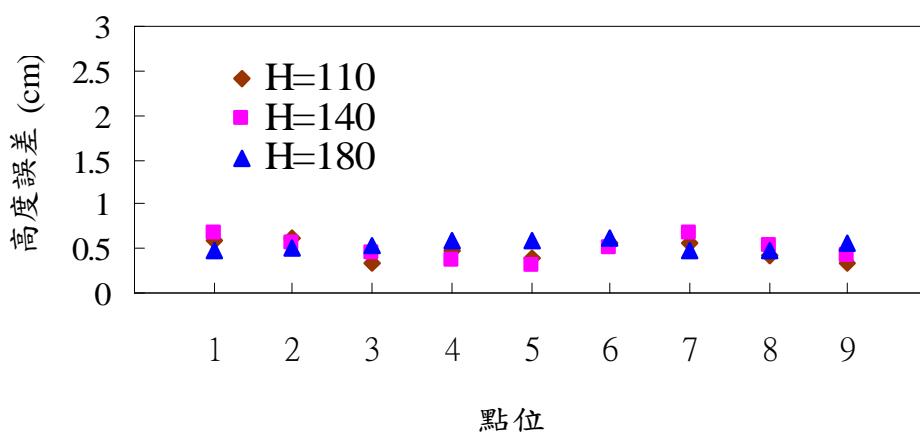


圖60 不同攝影高度下之高度誤差圖

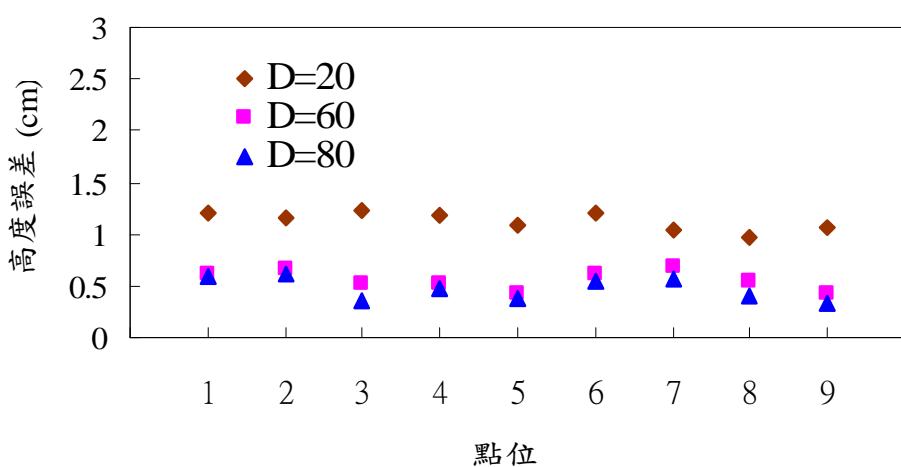


圖61 不同基線長度與高度誤差圖

## 4-4 校正板與待測目標距離對分析結果之影響

本研究從幾次室內與戶外的測試研究中發現，校正板放置位置與待側物之間的距離對於匹配結果有顯著的影響。通常在校正版附近的物體特徵匹配結果良好，而距離校正板較遠處，其匹配情形往往不理想。本節試圖在條件較容易控制的實驗室中，探討校正板位置對分析結果的影響，希望藉由實驗室的分析結果瞭解此問題並尋求解決之道。

本實驗目的係為檢驗校正板位置對計算結果之敏感度測試，因此需控制校正板位置外所有的軟硬體設定均相同。實驗布置首先於一空曠場所設置三相機，三相機之相關姿態如表 31，此三相機設置完成後直到實驗結束均不可移動，其相對位置如圖62。相機內部相關參數設定如下

**鏡頭**：焦距 12mm、對焦距離∞、光圈 4

**軟體微調**：Shutter 30、Gain 80、Brightness 200

**取樣速率**：3.75 FPS (640×480 pixel)

表 31 實驗時三台相機姿態

相機	1	2	3
高度(cm)	168	104	104
俯角(°)	10°	5°	5°

立體攝影系統架設完成後，從三台攝影機重疊的視窗範圍可知，最近可測距離為4.5m (三台相機可同時取樣點與立體系統之距離)，最遠為17m。本試驗將待測物放置於Obj1 (5m)、Obj2 (11m)、Obj3 (17m)等三處位置，其中括弧中之位置表代測物距離立體攝影系統的距離。待測物為數個紙箱疊成之不規格物體，因其高度可容易量測，取得實驗需驗證的真值。本實驗設定校正板位置分別位於C1 (5m)、C2 (7m)、C3 (9m)、C4 (11m)、C5 (13m)、C6 (15m)、C7 (17m)處，本實驗佈置之示意圖如圖63所示。實驗過程照片如圖64所示。

實驗方法為：立體攝影系統不動，移動校正板位置(七種距離)與待測物位置(三種位置)，合計 $7 \times 3 = 21$ 次試驗。每次試驗均分析待測點高程與實測高程(可量測)之誤差，藉此試驗探討校正板遠近對分析結果之影響。



圖62 三相機位置定義

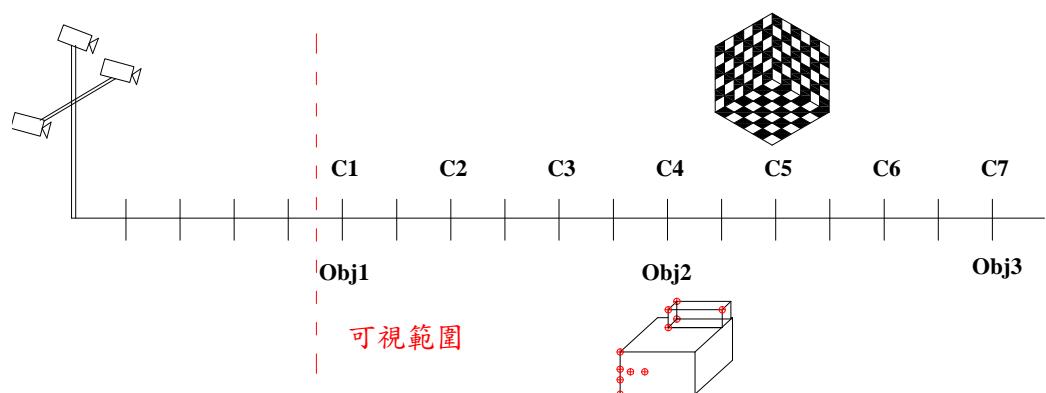


圖63 實驗佈置示意圖



圖64 實驗現場佈置情形

**EXP1**：待測物位於Obj1位置(距離相機5m)，移動校正板分別計算待測物上目標點(圖65)之高程，計算結果如表 32與圖66。

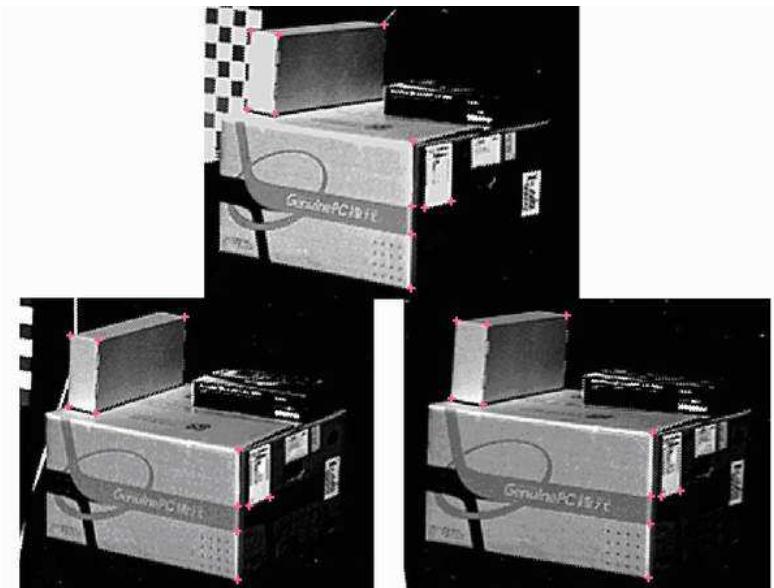


圖65 Obj1之待測點

表 32 Obj1試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	0.0	14.3	21.1	36.8	20.4	20.4	36.8	36.8	58.1	58.1	58.1
C1	3.6	16.5	23.2	38.4	22.9	23.3	37.8	38.2	58.4	58.0	58.3
C2	3.0	16.1	22.8	38.0	22.5	22.6	37.8	38.2	57.8	57.4	57.3
C3	4.7	18.6	25.7	41.4	25.3	25.4	40.6	40.8	60.5	60.3	60.4

C4	2.4	15.3	22.0	37.1	21.7	22.0	37.0	37.4	57.0	56.6	56.7
C5	-12.2	8.1	17.9	39.1	17.5	17.9	38.2	38.3	61.8	62.0	63.5
C6	-14.8	3.3	12.3	32.0	11.2	10.3	39.8	41.7	63.2	61.8	58.5
C7	-60.4	-37.1	-25.7	-1.2	-27.4	-28.7	14.8	18.5	43.0	40.2	34.1

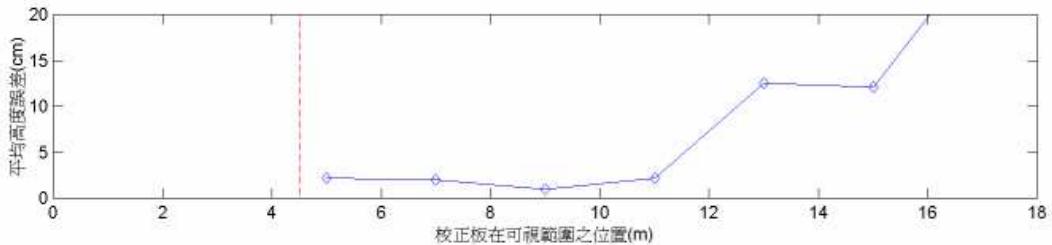


圖66 Obj1試次校正板位置與平均誤差關係圖

**EXP2：**待測物位於 Obj2 位置(距離相機 11m)，移動校正板分別計算待測物上目標點(圖 67)之高程，分析結果如表表 33 與圖 68。

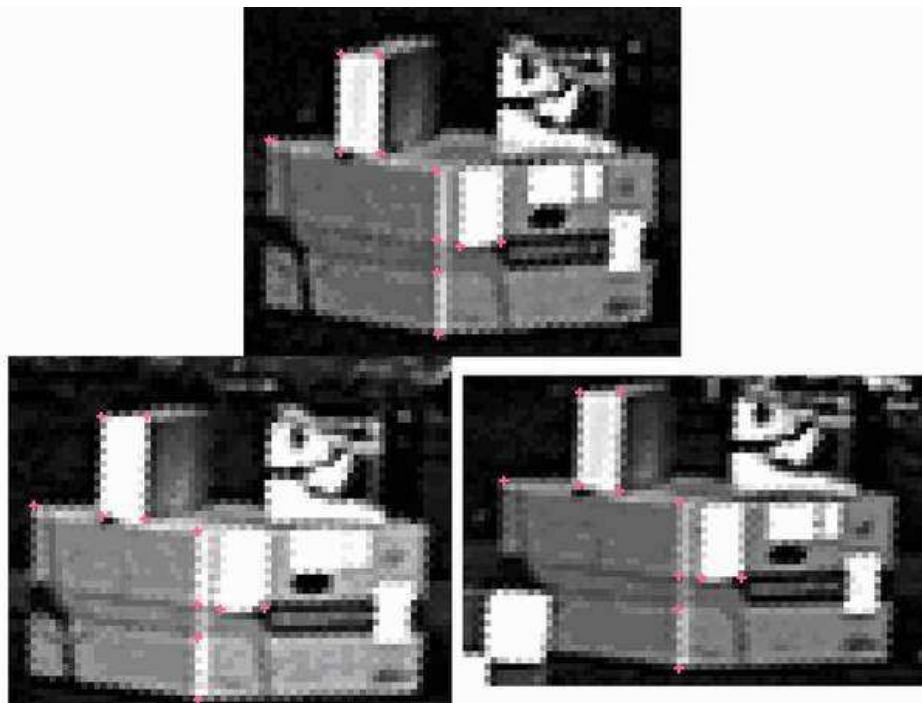


圖67 Obj2之待測點

表 33 Obj2試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	0.0	14.3	21.1	36.8	20.4	20.4	36.8	36.8	58.1	58.1	58.1

C1	-7.3	7.3	15.0	31.4	13.7	13.4	31.5	31.4	54.0	54.0	53.9
C2	-3.6	10.8	18.5	34.8	17.3	17.2	35.1	34.9	57.5	57.6	58.0
C3	6.0	19.0	25.9	40.7	25.0	25.5	41.4	41.1	61.5	61.7	63.1
C4	-2.0	11.8	19.0	34.5	17.7	17.1	34.9	35.0	56.0	56.0	55.9
C5	9.6	21.4	27.7	41.2	26.9	27.0	40.7	40.2	59.0	59.2	59.6
C6	-15.2	-0.6	7.0	23.0	5.0	3.3	25.0	25.9	46.8	46.2	45.3
C7	-14.4	1.6	9.7	26.6	7.6	5.3	27.8	29.0	50.2	49.3	46.4

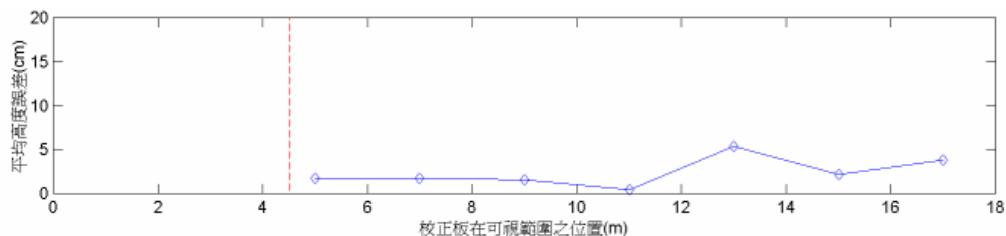


圖68 Obj2試次校正板位置與平均誤差關係圖

**EXP3：**待測物位於 Obj3 位置(距離相機 17m)，移動校正板分別計算待測物上目標點(圖 69)之高程，分析結果如表 34 及圖 70。

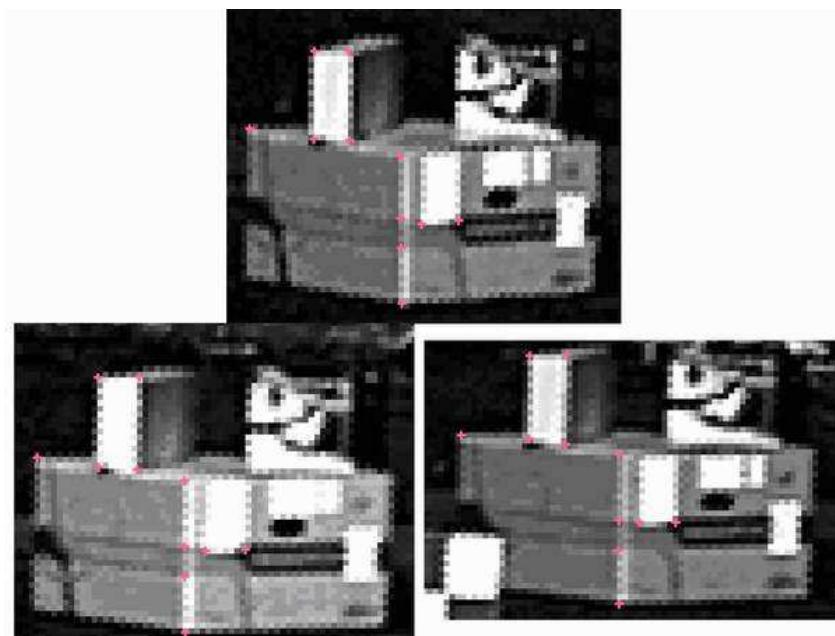


圖69 Obj3之待測點

表 34 Obj3試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	0.0	14.3	21.1	36.8	20.4	20.4	36.8	36.8	58.1	58.1	36.8
C1	-11.8	8.0	19.0	41.8	17.8	17.8	43.9	45.2	75.9	75.7	45.7
C2	-1.0	15.7	25.2	45.0	24.3	24.2	46.7	47.7	74.0	74.1	48.3
C3	3.3	17.9	26.2	43.6	25.8	26.1	44.6	45.3	68.6	68.7	44.9
C4	2.2	16.2	24.1	40.8	23.6	23.8	41.9	42.6	65.4	65.4	42.5
C5	7.0	20.0	27.2	42.7	26.8	27.2	43.6	44.2	65.1	65.3	44.0
C6	-2.6	10.1	18.0	34.1	17.9	17.1	34.2	35.6	56.0	56.1	34.5
C7	-3.9	9.3	16.9	32.7	16.1	15.9	34.4	35.3	55.8	56.1	35.9

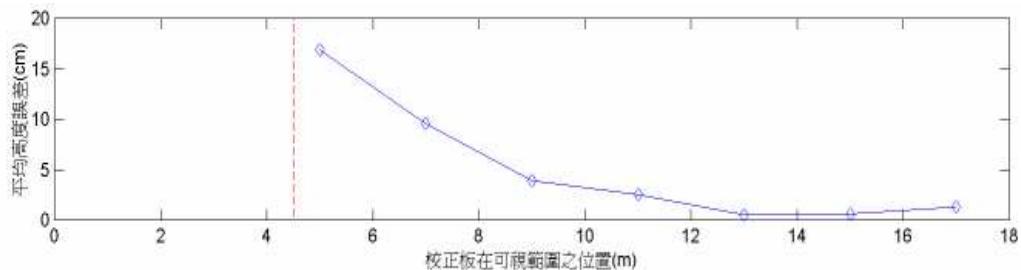


圖70 Obj3試次校正板位置與平均誤差關係圖

上述圖表展示出個別試驗的結果，綜合結果可以見圖71，其中縱軸為無因次化的匹配誤差。從該圖中可以清楚地發現，當校正板與待測物距離較遠時，計算之待測點與實際高程之誤差較大，且不論待測物之距離，此結論均成立。定量的分析結果顯示，當待測物件和校正版相距11m以內時，匹配影像所得之高度誤差在10%以內，由於本測試比對點之平均高度約30cm，也就是說，在實體海域中，校正版與待測海域之距離必須位於~36倍有義波高範圍內，如海上波高約1m時，該距離應小於36m。換句話說，若該距離達36m，則1m以下的波浪海況將很難匹配成功，1m左右的波浪量測誤差約10%。

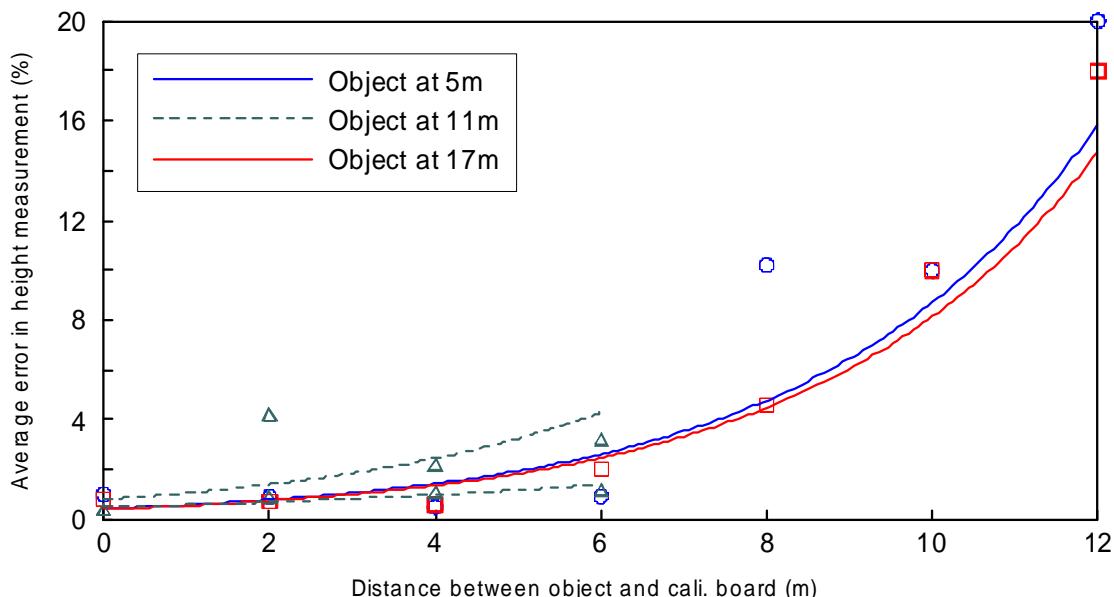


圖71 匹配誤差與校正版-待測物間距離之關係

而由本項實驗亦發現當校正板或待測物距離較遠時，校正板與待測物均會因距離過遠而影像變小，造成無法準確選點(如圖72)，以本項實驗採用之校正板(網格為6×6公分)，拍攝目標距離以在15公尺內為宜。若要觀測較遠之目標，應適當加大網格間距，以提升準確性。

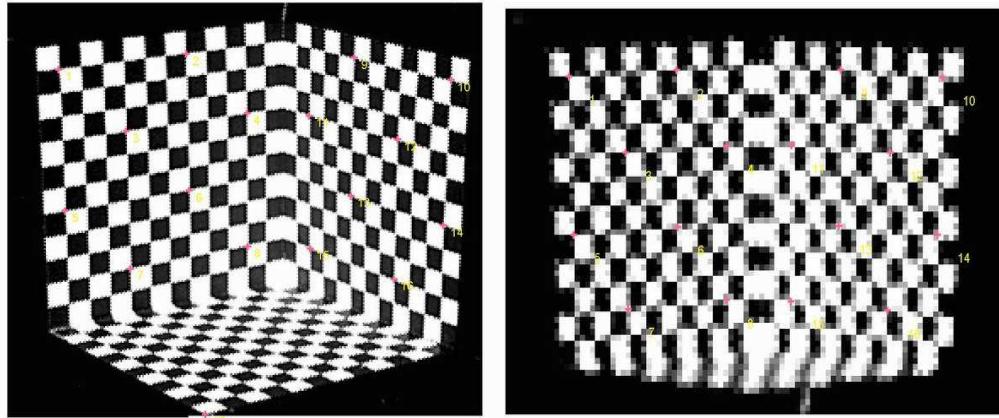


圖72 校正板放太遠選點易產生誤差(左圖為C1案例、右圖為C7)

除了利用標準外部校正板探討校正板與待測物間關係對分析結果的影響外，本研究並採用隨手取得之物品作為校正板，探討前述關係，若能獲得良好結果，則未來在外地進行此項作業則不需要製作外部校正板。實驗布置與前小節相同，三相機之相關姿態如表 35，此三相機設置完成後直到實驗結束均不可移動，其相對位置如圖73。相機內部相關參數設定如下

**鏡頭**：焦距 12mm、對焦距離∞、光圈 4

**軟體微調**：Shutter 70、Gain 80、Brightness 450

**取樣速率**：1.00 FPS (640×480 pixel)

表 35 實驗時三台相機姿態

相機	1	2	3
高度(cm)	140	75	75
俯角(°)	5°	0°	0°

立體攝影系統架設完成後，從三台攝影機重疊的視窗範圍可知，最近可測距離約為5m (三台相機可同時取樣點與立體系統之距離)。如同前節試驗將待測物放置於Obj1 (5m)、Obj2 (11m)、Obj3 (17m)等三處位置，其中括弧中之位置表代測物距離立體攝影系統的距離。待測物為三個紙箱疊成之不規格物體(如圖74)，因其高度可容易量測，取得實驗需驗證的真值。本實驗設定校正物為實驗場隨手取得之籃子(如圖75)，分別放置於C1 (5m)、C2 (7m)、C3 (9m)、C4 (11m)、C5 (13m)、C6 (15m)、C7 (17m)處。

實驗方法為：立體攝影系統不動，移動校正物位置(七種距離)與待測物位置(三種位置)，合計 $7 \times 3 = 21$ 次試驗。每次試驗均分析待測點高程與實測高程(可量測)之誤差，藉此試驗探討校正板遠近對分析結果之影響。



圖73 非標準化校正板之實驗現場佈置



圖74 待測目標物及選取點



圖75 替代校正板之籃子與校正點位

**EXP1：**待測物位於Obj1位置(距離相機5m)，移動校正物體分別計算待測物上目標點之高程，計算結果如表 36。

**EXP2：**待測物位於Obj2位置(距離相機11m)，移動校正板分別計算待測物上目標點之高程，分析結果如表表 37。

**EXP3：**待測物位於Obj3位置(距離相機17m)，移動校正板分別計算待測物上目標點之高程，分析結果如表表 38。

表 36 Obj1試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	20.8	35.6	20.2	20.2	35.6	28.5	28.5	12.8	24.2	45.7	54.0
C1	19.2	23.7	15.0	4.7	12.3	0.1	-13.1	-24.8	-23.0	-13.3	-12.8
C2	40.6	165.4	69.5	144.5	238.4	240.1	309.8	251.3	325.8	462.9	547.8
C3	16.8	46.1	28.8	51.7	72.4	78.8	105.0	97.8	114.4	145.7	166.0
C4	15.6	19.3	16.6	17.4	20.4	19.8	21.0	18.5	21.0	24.1	24.0
C5	-6.0	-52.1	-9.5	-12.1	-53.3	-32.4	-26.7	14.4	-10.4	-60.3	-72.8
C6	18.3	32.8	21.4	26.0	38.9	35.8	39.3	32.1	38.6	56.0	64.6
C7	12.9	9.1	12.0	9.9	6.9	6.8	4.8	6.3	4.3	0.5	-1.6

表 37 Obj2試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	20.8	35.6	20.2	20.2	35.6	28.5	28.5	12.8	24.2	45.7	54.0
C1	12.9	7.7	11.1	7.5	4.2	3.3	-0.2	0.5	-1.9	-5.5	-7.8
C2	36.4	116.1	41.9	56.9	125.7	98.1	109.1	49.9	93.5	189.1	227.2
C3	23.7	48.9	25.2	27.5	49.8	39.9	41.0	21.9	36.0	64.8	76.9
C4	14.7	13.5	13.9	11.8	11.4	10.3	8.3	7.4	7.2	6.6	6.4
C5	12.8	16.8	16.9	26.0	26.1	32.4	42.4	50.3	50.0	47.1	48.7
C6	16.2	24.1	17.6	21.4	27.9	26.9	30.6	27.3	31.7	39.0	42.5
C7	13.3	11.2	13.0	12.2	10.4	10.8	10.1	11.3	10.0	7.8	6.8

表 38 Obj3試次各待測點之計算結果

目標點	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
實測值	20.8	35.6	20.2	20.2	35.6	28.5	28.5	12.8	24.2	45.7	54.0
C1	13.0	9.9	12.6	10.5	7.7	8.0	5.8	6.9	5.0	2.2	0.5
C2	34.1	86.7	36.7	43.7	88.8	65.1	70.3	32.3	64.4	124.4	149.4
C3	19.8	32.7	18.1	17.7	31.3	23.2	21.1	7.3	17.2	35.2	42.4
C4	13.4	11.6	12.7	10.9	9.6	9.1	6.8	6.7	6.2	4.6	3.9
C5	15.1	20.3	17.3	24.0	27.3	29.3	37.1	39.7	41.7	42.7	45.1
C6	16.1	21.5	17.0	20.2	25.0	24.8	28.3	26.2	29.2	34.6	36.8
C7	13.5	12.1	13.4	12.8	11.5	11.8	11.3	12.0	11.2	9.7	9.0

將各試次之高度誤差整理繪圖如圖 76，很明顯地，此實驗誤差遠大於使用標準校正板之試次，且物體放得越近誤差越大，分析其原因包括：此次試驗均採人工匹配(如圖 77)，在選點方面不若校正板上的格點容易取得較準確之點位，當校正點選點與目標選點均稍有誤差極可能使得誤差變為巨大。而當物體或校正板放較遠處時，相片中的一個像素(pixel)，可能代表 10 公分甚或更大，相對選點的誤差就變小了，才會產生物體越遠，準確性反而略為提升之情況。根據此試驗結果顯示，使用標準製作的外部校正板所獲得之正確性仍遠大於使用現地物品。

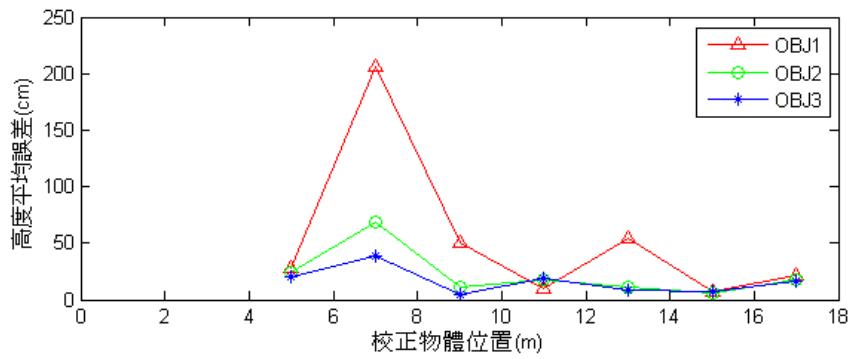


圖 76 Obj1 試次校正板位置與平均誤差關係圖

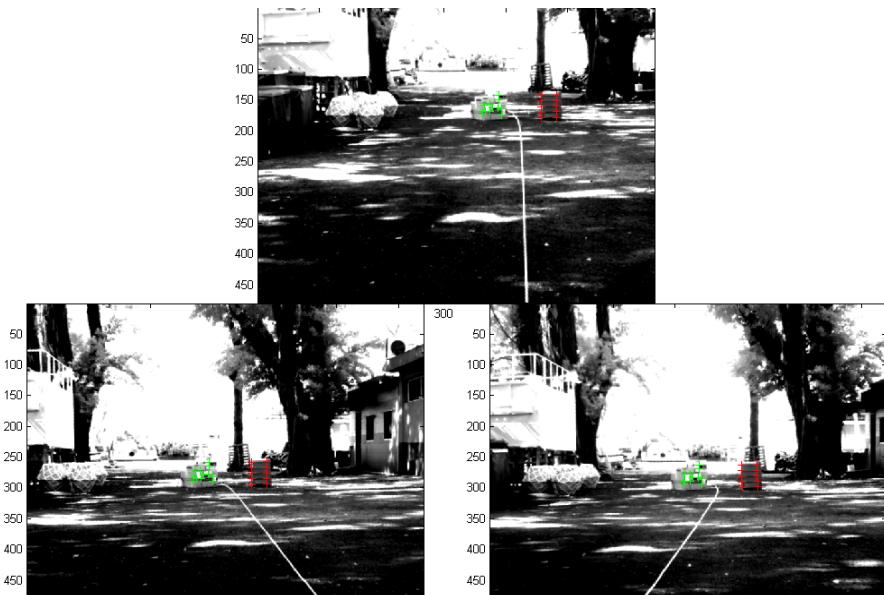


圖 77 Obj3 試次校正物與待測物匹配情形

## 第五章 立體影像動態測試與驗證

### 5-1 八斗子現場動態驗證

#### 5-1-1 試驗佈置與進行方法

本計畫於基隆長潭漁港潮境公園海域進行現場動態測試與驗證，將外部校正板與海面同時納入攝影之範圍如圖78。但拍攝距離過遠使得外部校正板在影像上的範圍過小，且外部校正板位置和海面距離過遠，使得影像匹配之結果(圖79)較不理想。



圖78 將外部校正板與海面同時納入攝影之範圍

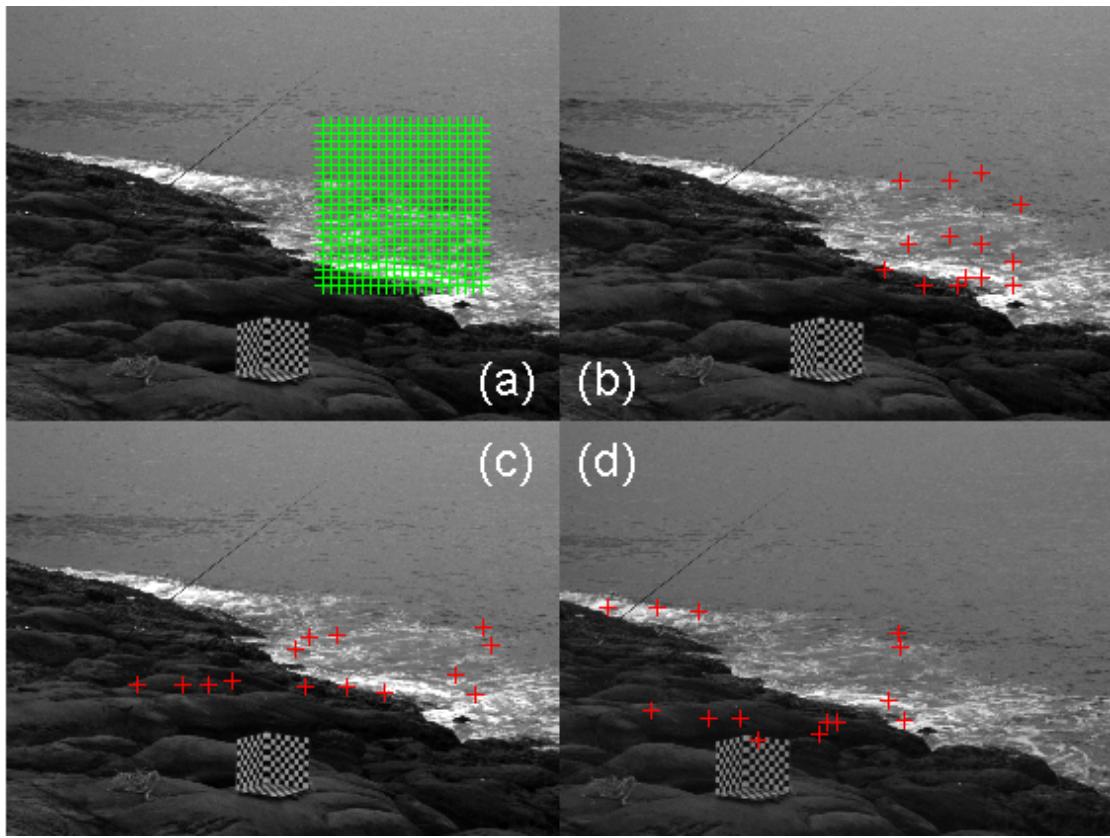


圖79 外部校正板在影像上的範圍過小且位置與海面距離過遠，使得影像匹配之結果較不理想。(a)為影像匹配的範圍，(b)為匹配成功的座標，(c)(d)為右側及左側攝影機影像所匹配之座標。

### 5-1-2 地面控制點法之導入

為了避免校正板呈現於影像上的範圍過小，與欲量測海面距離過遠，因此本計畫使用地面控制點(Ground Control Point, GCP)的方法，在量測現場決定數個實際控制點，利用測量方法取得其座標，代替前述外部校正工作降低匹配時的誤差，同時亦可解決攝影系統轉向拍攝立體校正板所造成之儀器水平問題。

本計畫拍攝基隆長潭漁港潮境公園外海波浪時，發現距離攝影系統約200公尺之遠處外堤可作為適宜的地面控制點(圖80)，而外堤之長寬高可經由實際量測得知，實際拍攝工作情形如圖81。



圖80 基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤

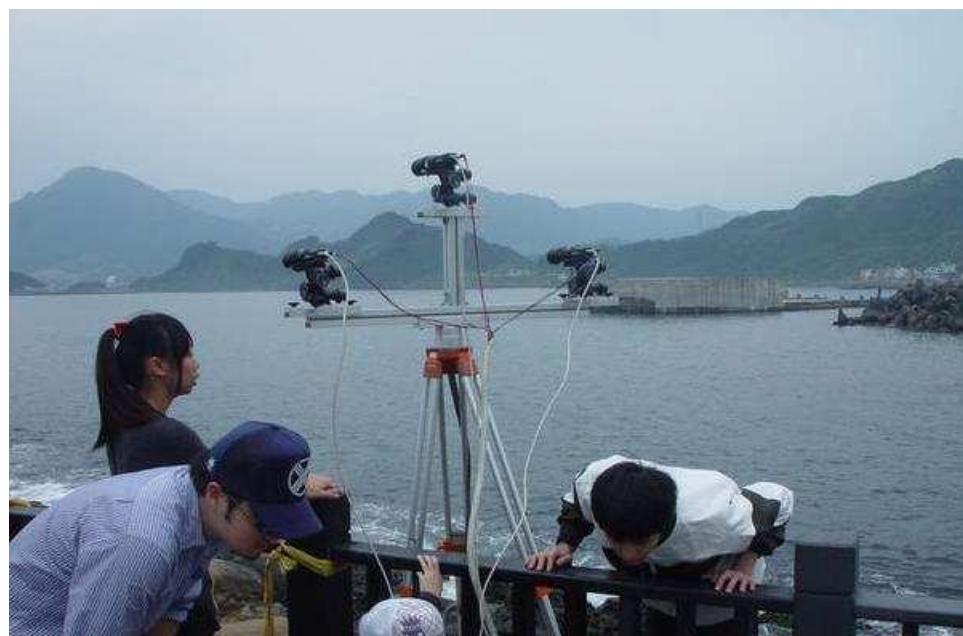


圖81 拍攝基隆長潭漁港潮境公園遠處外堤之工作情形

圖82為利用三台攝影機以69mm望遠鏡頭拍攝外堤所呈現之影像，由圖可發現使用望遠鏡頭可更清晰辨識外堤及附近之水面變化。外堤明顯之邊界可視為良好的地面控制點，利用邊界及其交點可計算外堤兩側之座標，如圖83。



圖82 基隆潮境公園拍攝的遠處堤面影像

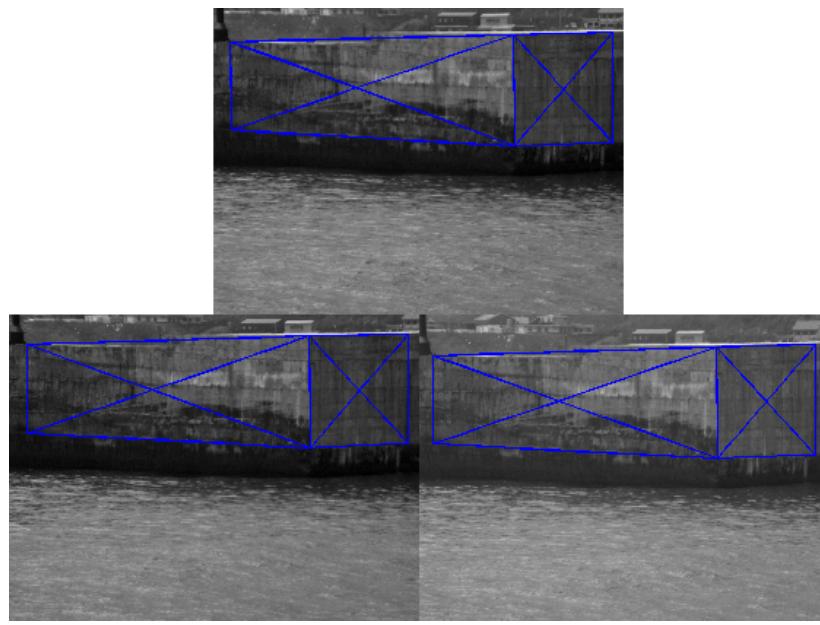


圖83 將遠處堤面進行匹配動作

由外部校正得知，若匹配範圍離外部校正板距離越遠，其誤差會隨著匹配範圍與校正板之距離而變大。故在現場實測使用之匹配範圍靠近外堤處較佳，本計畫使用之匹配範圍如圖84，其匹配範圍皆為靠近外堤處，以降低外堤與匹配範圍

距離所造成之誤差，並且提供了水面波鋒線變化時之對照尺度，利於現場觀測時粗略估計水面變化之大小。

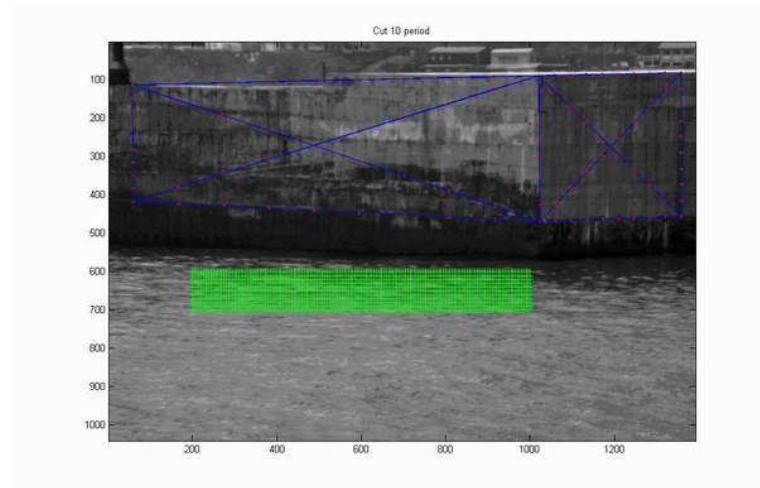


圖84 綠色區域為測試匹配範圍

使用靠近外堤匹配範圍之結果如圖85，由匹配結果可發現使用地面控制點的方式雖有些微的誤差，因地面控制點的存在較易量測匹配範圍，故對於匹配錯誤之區域同樣較易去除。

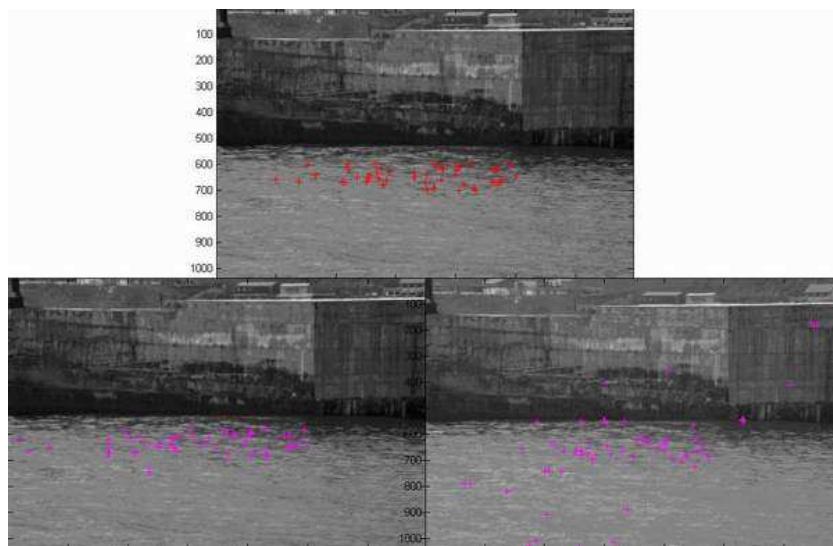


圖85 以地面控制法匹配後之結果

### 5-1-3 分析結果

本計畫將匹配之結果計算為三維水面時間序列資料，圖86為單一時間內三維水面變化圖，由於不同時間點水位會有漲落起伏之差異，藍線框內即為推算不同時間於相同區域之水面高程之變化，如圖87。

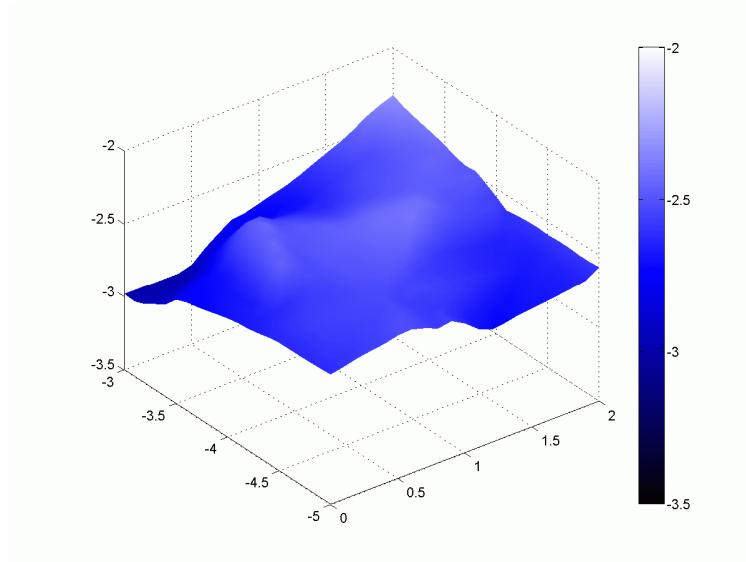


圖86 為推算範圍之三維水面變化圖



圖87 圖藍線框為推算水面範圍

將計算結果定點之水面時序變化繪出，如圖88，淺藍色為原始計算結果，其資料取樣頻率為每秒5張(取樣頻率5Hz)，深藍線為使用1秒移動平均之結果，可清楚看出水面高度變化之情形，並計算波高與周期。圖86水面變化範圍之四個角落座標之時間序列變化如圖89，可看出四個水位變化資料趨勢大致相符。

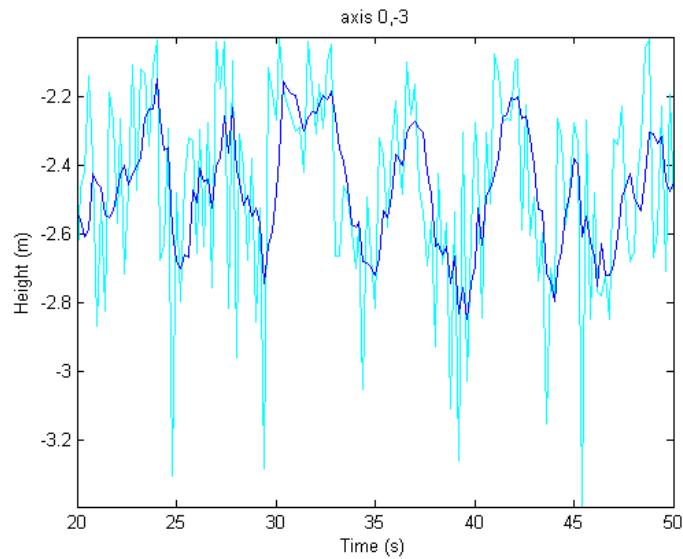


圖88 原始範圍邊界點水位時序資料及其移動平均

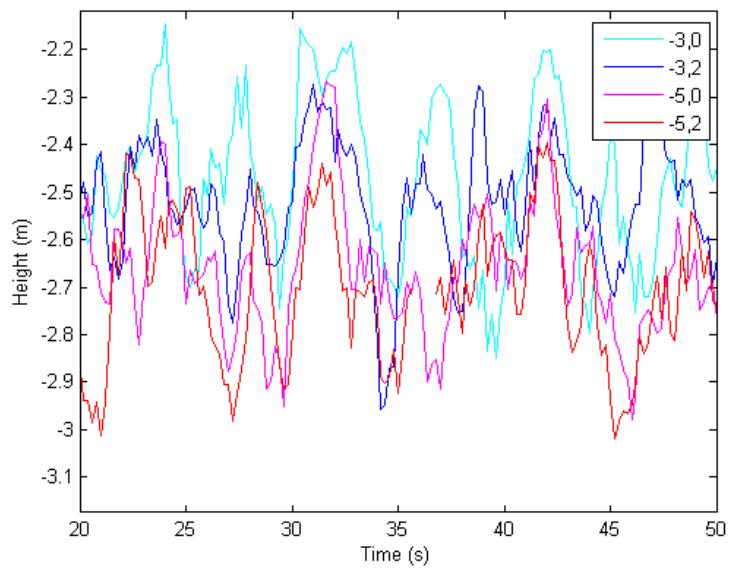


圖89 範圍邊界點水位時序資料

為了將利用立體影像推算之波浪水位與實測波浪比對，我們在離岸防波堤上設置水尺(圖90)，波浪水位可經觀察其在水尺的位置決定。本計畫使用影像之灰階值來計算實際水面變化情形，界定水尺與海平面交界區域後(如圖)，計算區域內高於固定灰階值之像素總個數，將其總值除上由分析判定水尺之寬度，得出水面變化之像素個數。由於水尺是以50公分為單位的黑白網格，經由網格比例推算圖形像素之實際高度，即可推算水面實際變化程度。



圖90 外堤水尺完工圖

以不同的灰階值所計算之水位變化亦有所不同，本計畫使用灰階值100至150為範圍，計算實際水面變化。如圖91為不同灰階值的分布範圍，可看出灰階值過大會造成判定像素總數過小，反之灰階值過小會造成判定之總數過大。最佳判定之灰階值會因為光源強度及角度有所變化，本次外堤實驗判定灰階值為125時較佳。

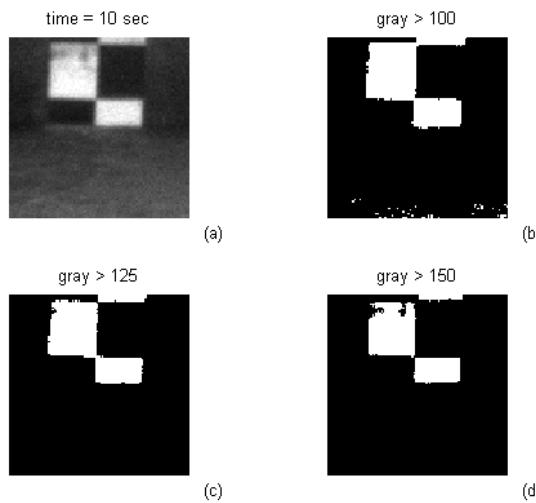


圖911 白色部分為不同灰階值所涵蓋之像素範圍。

(a)原始影像、(b)灰階值大於100、(c)灰階值大於125、(d)灰階值大於150

不同灰階值計算之實際水面時序變化如圖，因為水位時序變化之均值會受到判定像素之總數影響，故利用不同灰階值會造成水位時序變化之均值之差異，但水位時序變化趨勢相當接近。

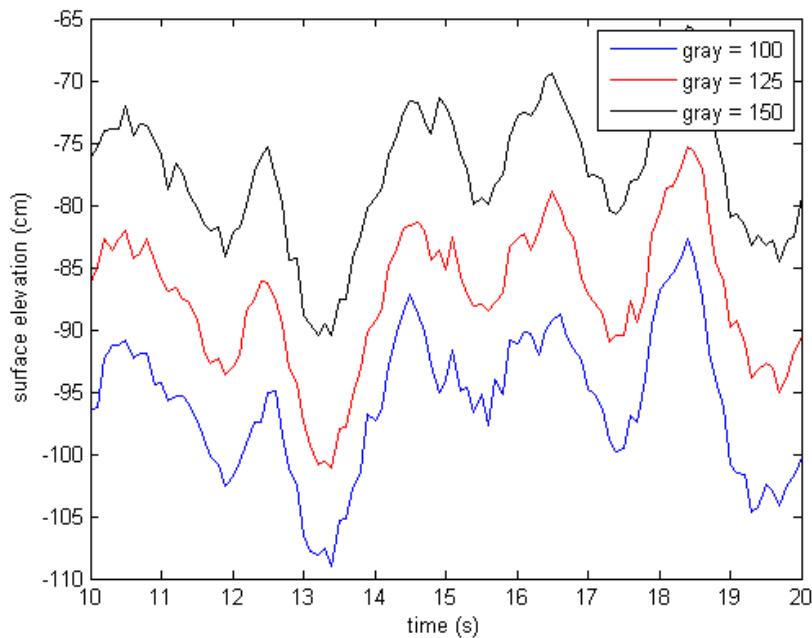


圖92 不同灰階值計算之實際水面時序變化

圖92為利用不同灰階值所推算之示性波高，可看出不同灰階值所推算之示性波高相當接近，其值約為 $22.6 \pm 0.5$  cm。

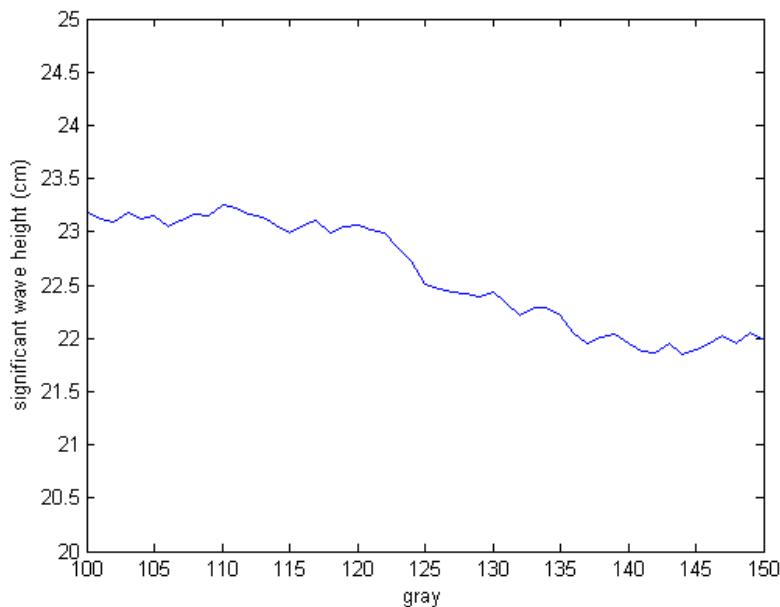


圖92 不同灰階值所推算之示性波高

使用灰階值所推算出實際水面變化時序與三維影像匹配所得出水面變化時序比較如圖93，可看出兩者水面變化相當接近。因水尺與影像取點之差異，故存在相當量之時間差值（約1秒）。

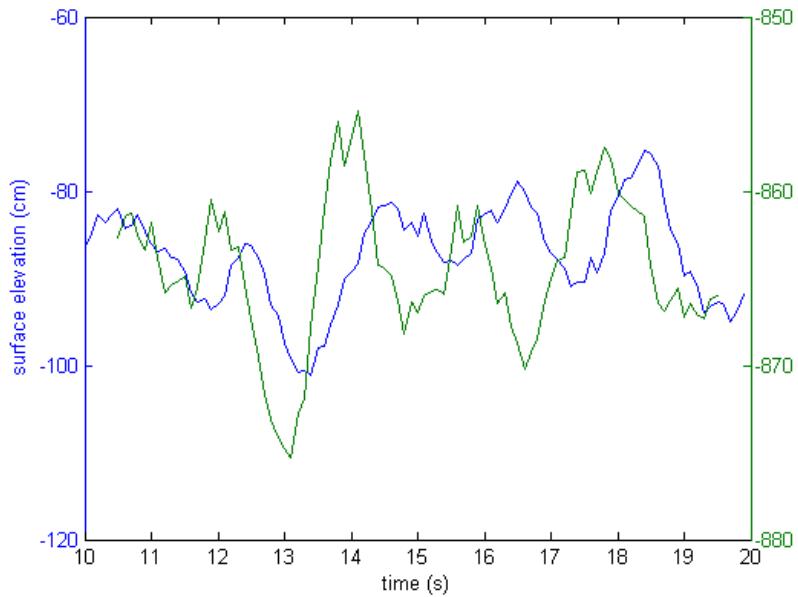


圖93 使用灰階值得出實際水面變化時序（藍線）與匹配所得出水面變化時序比較圖（綠線）

時間差之因素可使用水位之頻譜比較來濾除，圖94為使用灰階值所推算出實際水位頻譜與三維影像匹配所得出水位頻譜，可明顯觀察出頻譜上主能量所在頻率位置相當接近。

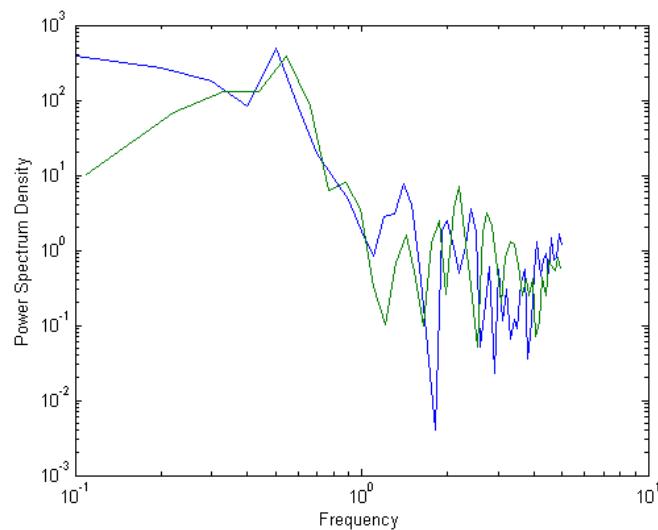


圖94 實際水面時序變化之頻譜圖比較

為進一步了解三維影像所推算出水位與實際水位之關係，將與水尺不同距離之水點如圖95，比較不同位置水位之頻譜，其結果如圖96，可看出靠近水堤之水位頻譜與實際水位頻譜較為接近，若遠離水堤則頻譜相差較大。

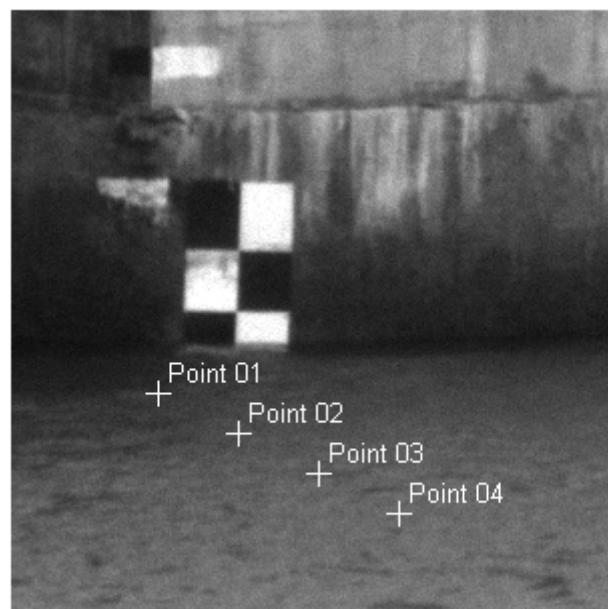


圖95 將距離水堤不同長度之取樣位置

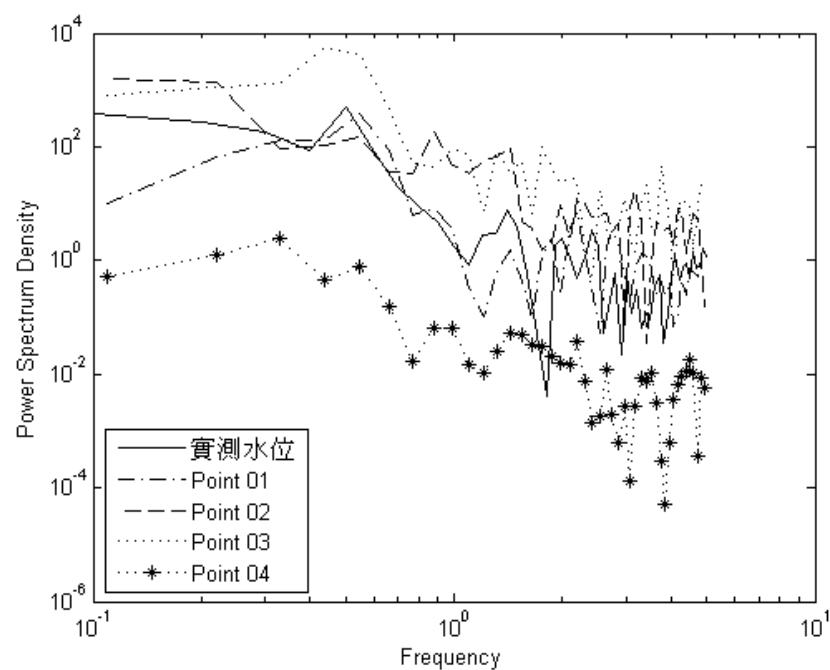


圖96 實際水位變化頻譜與各取點頻譜之比較

## 5-2 台南海岸現場動態驗證結果

### 5-2-1 試驗佈置與進行方法

為瞭解立體攝影系統在海岸現場拍攝的結果，本計畫將一座機動式系統裝設於台南海岸進行觀測試驗，現場電力我們採用預先充滿的行動電源(使用現有設備約可使用3小時)，影像擷取與分析系統則安置在汽車內。調整三台相機之拍攝角度，使得立體校正板與海面都有入鏡，並調整光圈至適當範圍。攝影以1Fps之取樣頻率進行三相機同步攝影、受攝影系統記憶體容量限制共取得43張影像。現場作業情形如圖97所示。

外部校正係將立體校正板置放在沙灘上或潮間帶的消波塊上進行，並利用前述已開發的匹配方法進行分析，如同預期地，我們發現在校正板放置點附近的匹配結果良好(如圖98，而距離校正板較遠處(即我們的觀測目標區-海浪)，其匹配情形並不理想(如圖99)，難以分析出海浪參數。



圖97 台南海岸現場測試作業情形(使用立體校正板)

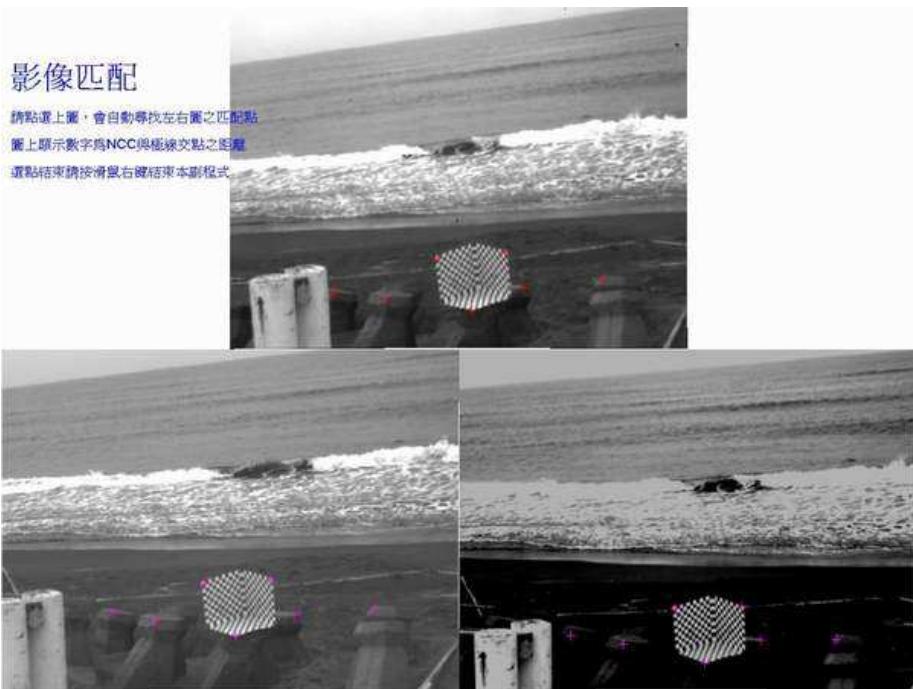


圖98 台南現場試驗。在校正板附近匹配結果良好之案例

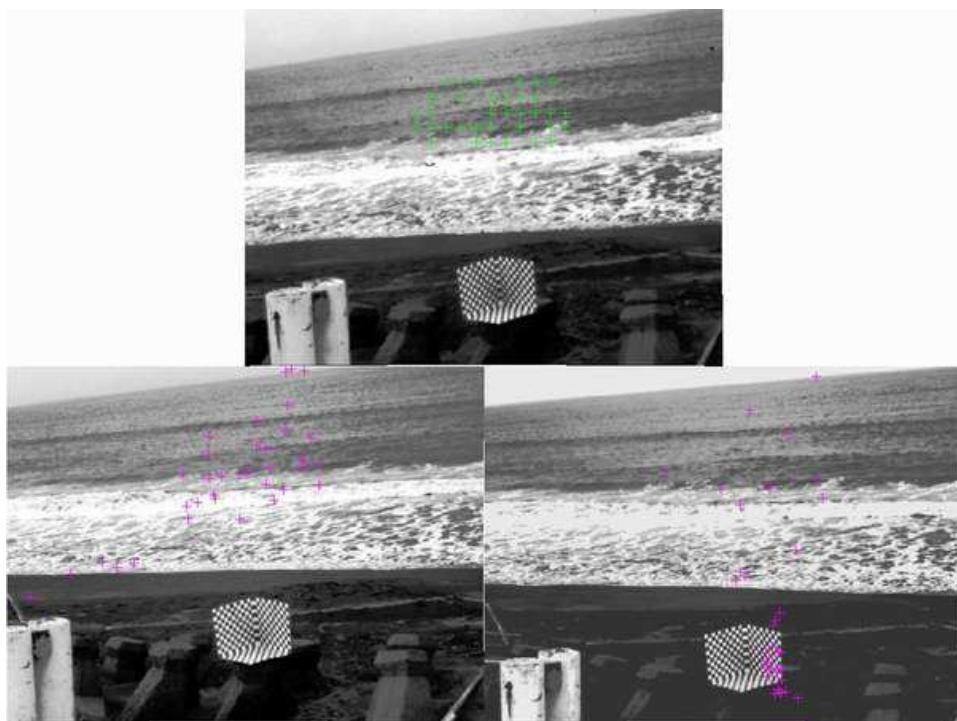


圖99 台南現場試驗。距離校正板遠端匹配結果不佳之案例

## 5-2-2 外部校正方法的改進

前節的結果再度證實了，要獲得良好的匹配結果，校正版必須與待測物的距離要能接近。換另一種思維來講，先前的研究中我們所採用的方法都是將校正版放在空間某處，拍攝後取得校正參數用來匹配也位於校正版附近的待測物，以往的待測物可能是一個模擬的波浪板或紙箱。但當此方法應用到現場時，現場的海況影像涵蓋的實際範圍往往大到上百公尺的長與寬，若僅使用一塊一公尺見方左右的校正版，所建造出來的相機和校正版之間的關係要擴展到廣大海域影像上，從學理上應該可以猜測到匹配結果難以完美，在校正版附近海域可以匹配合理，如 5-1 節在八斗子防波堤前的驗證，但對於遠處的廣大海域恐怕就難以獲得良好的匹配結果了，如 5-2-1 節圖 99 所示。

對此，本研究想到一個改進的方法，即是把校正版儘量均勻分布地放置在待測物空間中來進行外部校正，這種想法就是擴大校正版與相機中所建立的幾何關係，在陸地上，它理應可以包含住待測物，但在海上，包含觀測海區難以實現(因校正版無法至放到遠處的海上)，然而，如果能在三台攝影機可視的岸邊沙灘上多設置幾個校正版，所建立校正版和相機之間的幾何關係仍會比單一校正版所建立者為佳，對於改善實際海況影像的匹配應能有所改善。

實際放置多片校正版於現場海灘上進行作業有其困難，以往單一校正版時，把三正交的校正版相接處視為座標圓點，但遍佈沙灘的校正版難以設定基準圓點，無法定義出各校正版上校正點的座標。本研究蒐集資料，採用了一個開放碼的外部校正程式，可以分析多個校正版取得校正參數，且不需手動定義座標，滿足本研究的需要，其原理與校正方法說明如下。

如前所述，在進行影像匹配時，只在立體校正版附近獲得良好的匹配結果，研判係因立體校正版只放置在一固定點，導致計算極線之基礎矩陣缺少景深資料，因此採用改進之影像匹配方法，其方法說明如下：

1. 本計畫進行影像匹配時，係採用標準化互相關係法(NCC)，找到影像內 NCC 數值最高之點，並輔以極線雙重確認。當極線計算有誤差時，匹配的成功率也較低，因此要提高匹配成功率，要先提高極線之準確性。
2. 計算極線需先求兩相機之基礎矩陣，基礎矩陣之求法如前所述，有許多種方法，本計畫係採用 8 點法，在計算時需先代入對應同一物理點於兩相機之投影影像座標。
3. 原來的作法係採用外部校正時選取之點，但因立體校正版只有三面(一般只有兩面可用)，且位置固定，在景深方面的資料較少，因此距離校正版較遠處，極線之計算會產生誤差。

4. 為改進前述誤差，改用一平面校正板，隨意前進後退翻轉，在三相機同步的基礎下，可取得在空間中較多的對應點，由此計算之極線則可將誤差減至最小。

為簡化操作步驟，既然已取得三相機之同步平面校正板影像，故直接引用 Bouguet(2010)之方法進行相機校正，取得內部校正參數(焦距、主軸點、偏斜係數、扭曲係數)與外部校正參數(相機相對於地球座標之旋轉與移動參數)，由前述匹配結果進行立體影像重建。

確定計算方法後，本計畫團隊再次前往黃金海岸進行拍攝作業，依前節所述相同之布置方法，進行儀器安裝與拍攝，惟本次拍攝所得之影像重建結果，其座標軸係以相機為原點，不同於之前以立體校正板為原點，因此需以水準氣泡確認左右攝影機為水平，現場作業情形如圖 100 所示。攝影以 1Fps 之取樣頻率進行三相機同步攝影，先由工作人員在相機前，來回左右擺放平面校正板如圖 101 所示，取得校正板影像後，即開始拍攝海面，受攝影系統記憶體容量限制共取得 49 張影像。取得影像後即進入分析程式開始計算。



圖100 台南海岸現場測試作業情形(使用平面校正板)

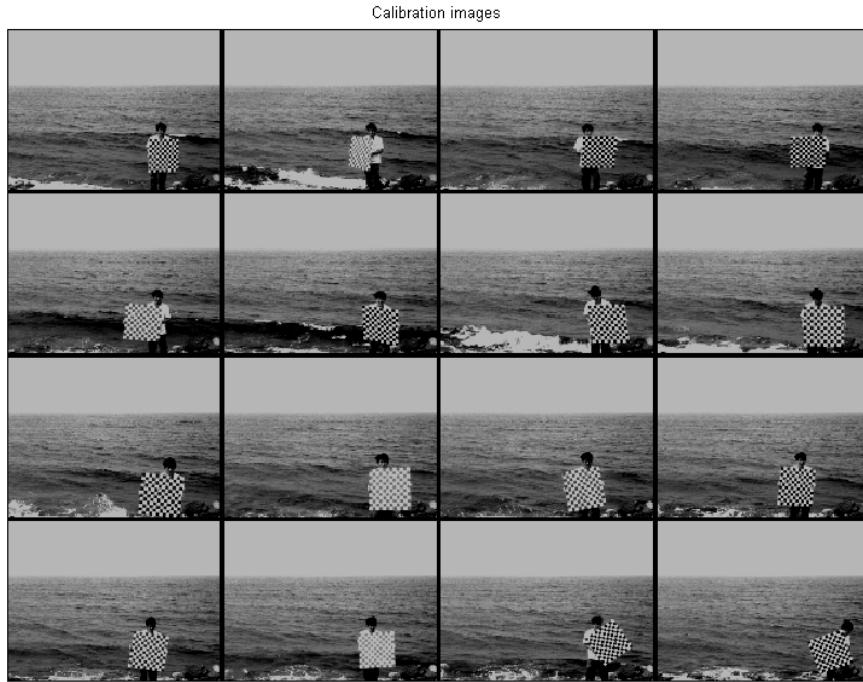


圖101 新版外部校正程式作業情形一例

### 5-2-3 分析結果

本節說明採用新版外部校正程式，在台南海岸分析實際廣大海面影像的結果。由前小節取得之校正板影像，經內部校正計算程序，求得三相機之內部參數依序(Top、Left、Right)分別為

Focal Length:	$fc = [ 1283.57759 \quad 1284.07188 ] \pm [ 47.22777 \quad 48.02692 ]$
Principal point:	$cc = [ 323.20812 \quad 222.74477 ] \pm [ 42.84241 \quad 43.75257 ]$
Skew:	$\alpha_c = [ 0.00 ] \pm [ 0.00 ] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90.0 \pm 0.0 \text{ degrees}$
Distortion:	$kc = [-0.029 \quad -0.348 \quad -0.007 \quad 0.001 \quad 0.000] \pm [ 0.139 \quad 0.911 \quad 0.011 \quad 0.008 \quad 0.000 ]$
Focal Length:	$fc = [ 1251.62956 \quad 1250.04619 ] \pm [ 26.36888 \quad 26.73478 ]$
Principal point:	$cc = [ 354.29335 \quad 244.85434 ] \pm [ 21.69796 \quad 24.58809 ]$
Skew:	$\alpha_c = [ 0.00 ] \pm [ 0.00 ] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90.0 \pm 0.0 \text{ degrees}$
Distortion:	$kc = [-0.007 \quad -0.979 \quad -0.008 \quad 0.003 \quad 0.000] \pm [ 0.111 \quad 1.567 \quad 0.008 \quad 0.004 \quad 0.000 ]$
Focal Length:	$fc = [ 1272.09915 \quad 1270.09735 ] \pm [ 43.27868 \quad 43.34597 ]$
Principal point:	$cc = [ 329.12223 \quad 261.96004 ] \pm [ 41.63239 \quad 41.27203 ]$
Skew:	$\alpha_c = [ 0.00 ] \pm [ 0.00 ] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90.0 \pm 0.0 \text{ degrees}$

Distortion:  $\text{kc} = [-0.121 \quad 0.103 \quad -0.002 \quad 0.006 \quad 0.000] \pm [0.132 \quad 1.161 \quad 0.010 \quad 0.007 \quad 0.000]$

由各相機對應到校正板的實際點位，可計算出相機的相對位置與旋轉角，經由外部參數計算之校正板在空間中的位置如圖圖 102。

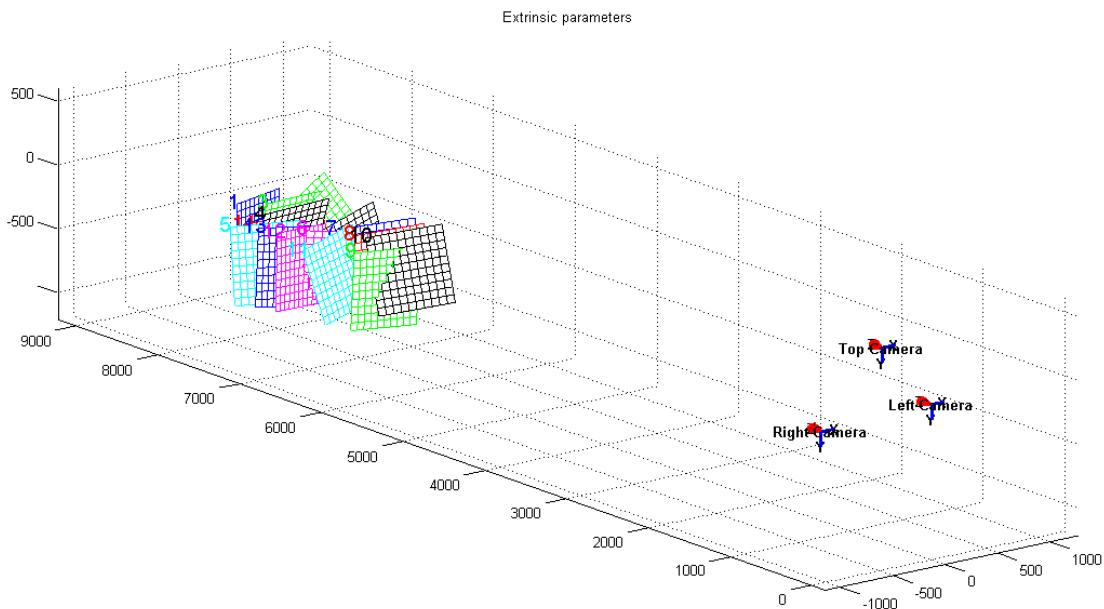


圖 102 經外部校正之相機與校正板相關位置圖

完成相機的內部與外部率定後，即進行最關鍵的影像匹配步驟，匹配的分析結果圖中，上方影像中的紅色標記是預設的欲匹配點，下方兩圖中的綠色標記則是匹配成功點。

圖 103 是一個成功匹配的案例，它是小範圍的實際海況匹配成功的案例。比較此圖與圖 99 即可知，修正後的外部校正方法與程式大幅地改善了實際海況影像的匹配結果。圖 104 則是大範圍的實際海況匹配成功案例，此案例在水平方向兩個匹配點間的間距為 10 pixels，垂直方向為 5 pixels，共計有 552 個匹配點，其匹配成功率達 97.4%，計算時間花費 174 秒。圖 105 是另外一個成功匹配的案例，它是設定以較細解析度來進行匹配的，其水平方向兩匹配點間距是 2 pixels，垂直方向間距僅有 1 pixels，共計有 13800 個匹配點，計算時間耗費了 2947 秒（約 50 分鐘），匹配成功率更高達 98%。案例 2 的總匹配計算點是案例 1 的 25 倍，而電腦所花費的計算時間則為 17 倍。案例 2 的匹配範圍對應到實際的海域約為  $160\text{ m}^2$ （橫向  $16\text{ m} \times$  縱向  $10\text{ m}$ ），根據前述計算時間估算，假使要擴展到匹配範圍  $100 \times 100\text{ m}$ ，在同樣地匹配間距和計算機規格下，計算時間應會增加到 52 小時。

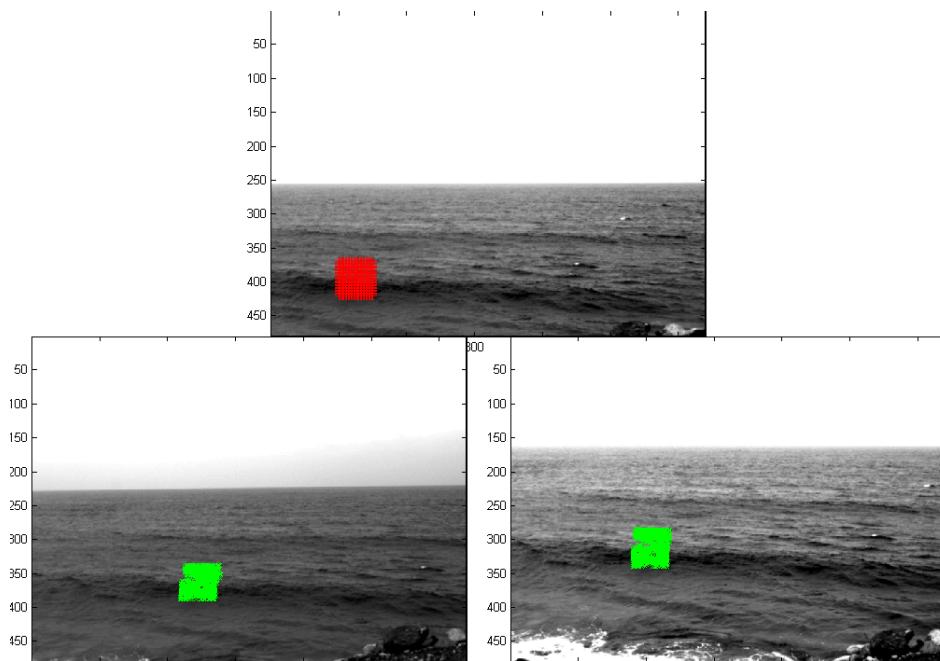


圖103 使用新版外部校正程式獲得小範圍影像匹配成功案例

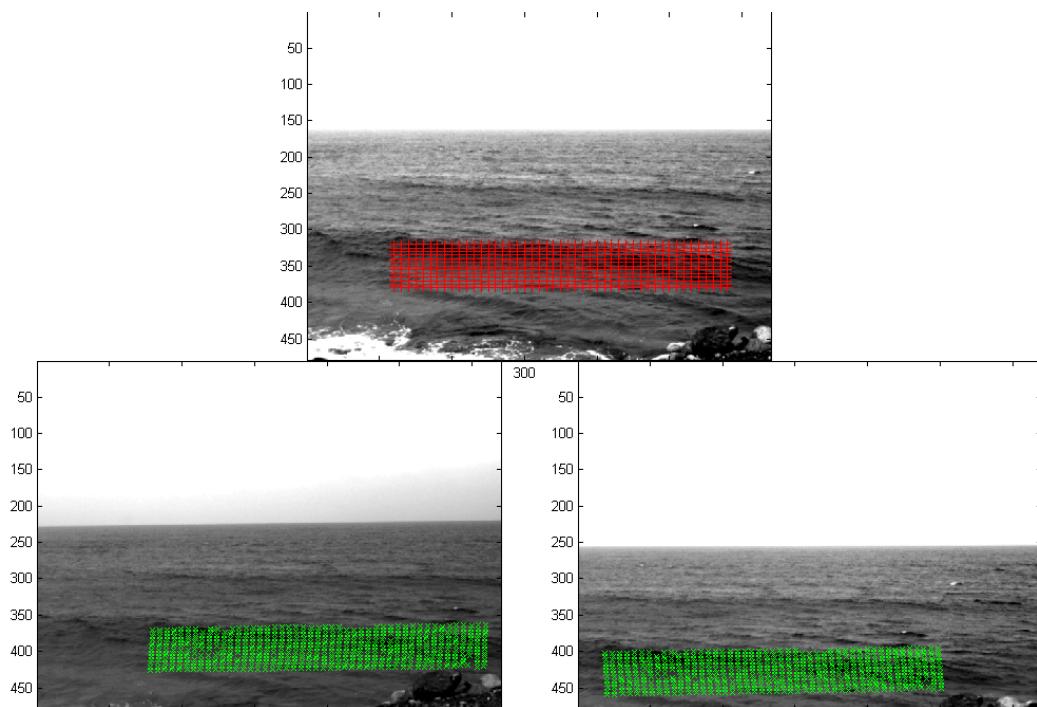


圖104 使用新版外部校正程式獲得大範圍影像匹配成功案例1 (成功率97.4%)

(水平方向兩匹配點間距10 pixels，垂直方向間距5 pixels，共552匹配點計算時間

174秒)

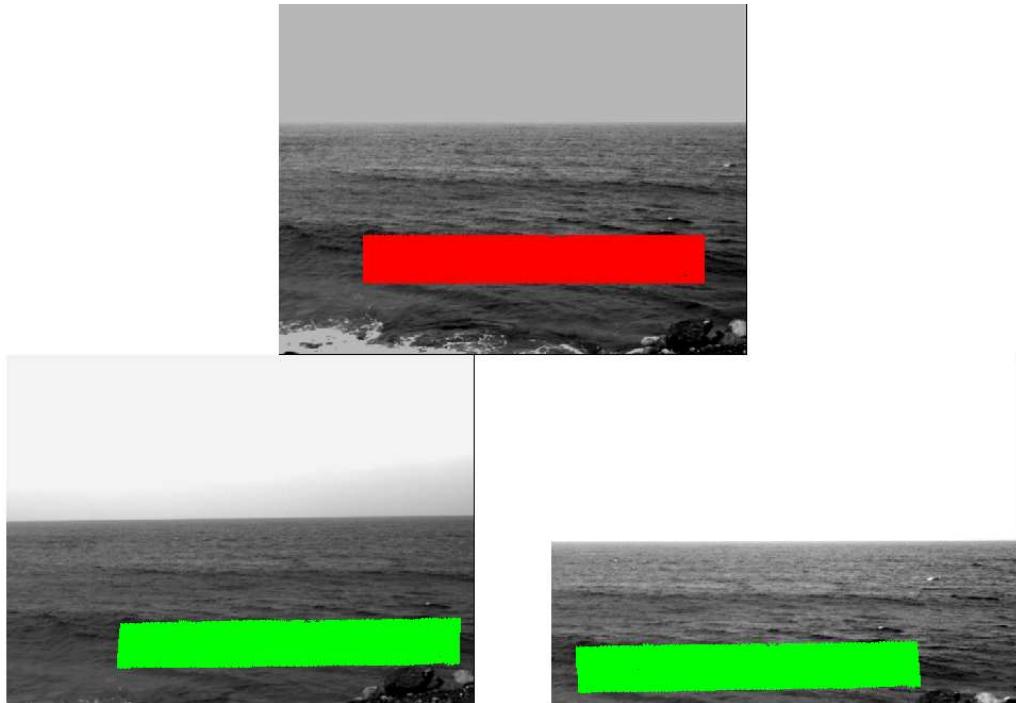


圖105 使用新版外部校正程式獲得大範圍影像匹配成功案例2(成功率98.1%)

(水平方向兩匹配點間距2 pixels，垂直方向間距1 pixels，共13800匹配點，計算時間2947秒)

將匹配成功的結果重建立體海況影像，如圖 106~圖 108 所示，它們分別是採用不同的匹配解析度的結果。從主觀的判斷中可以發現，匹配格點的解析度愈高，其重建出來的海況影像更細緻，當然，計算時間花費更大。

圖 109 則是把匹配成功點的位置繪製在圖上，從該圖可以看出，匹配成功的點都位於前波面上，近處分布較密，愈遠愈稀疏。這結果事實上反應了一個利用攝影觀測海況的限制，即當攝影機放置在岸邊，尤其距離海平面不高處時，攝影面對海面的掠角很小，近岸影像清晰，但遠海處的特徵僅存在影像照片上一小區域，難以辨識其特徵，更何況解析出其波形；再者，波浪的前波面面對攝影機，影像清晰，但後波面大都被前波面所遮蔽，尤其當掠角很小時，無法取得後波面影像，無法攝得影像的地方遑論可以匹配出真實海況影像。唯此點可以藉由把攝影系統架設在高度改善。

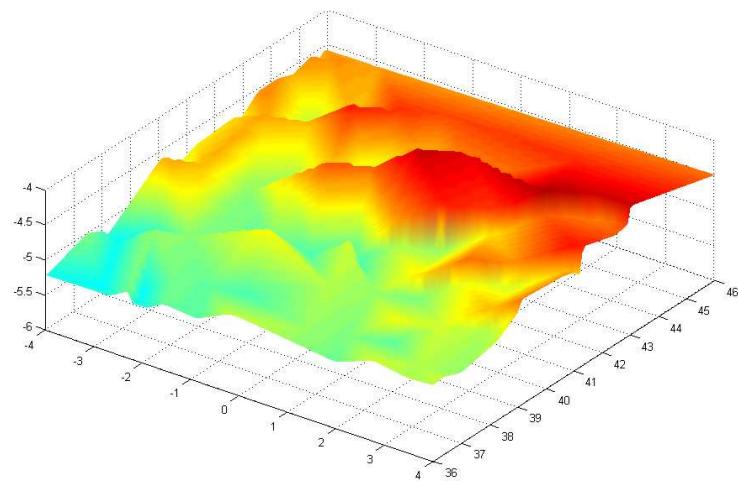


圖106 立體影像重建結果

(匹配横向間距20 pixels, 縱向10 pixels, 計算時間9秒)

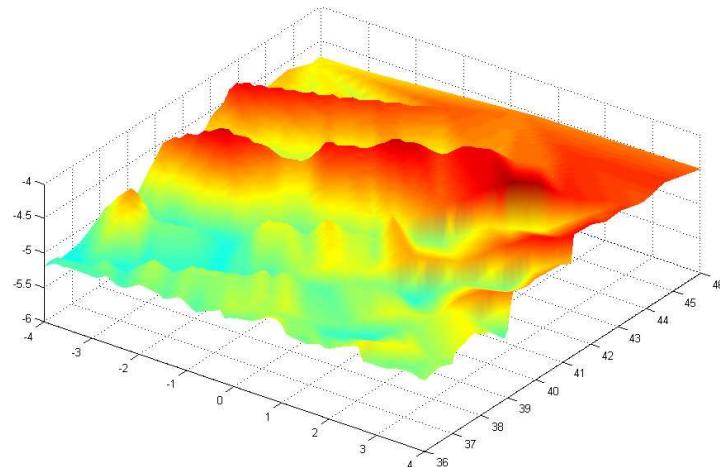


圖107 立體影像重建結果

(匹配横向間距 10 pixels, 縱向 5 pixels, 計算時間 35 秒)

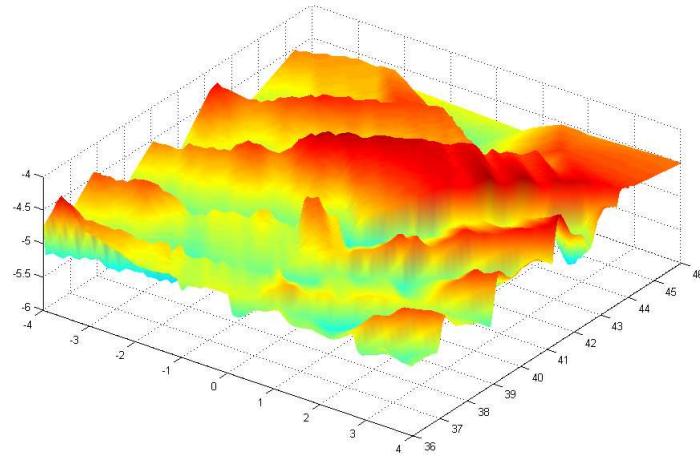


圖108 立體影像重建結果

(匹配橫向間距2 pixels, 縱向1 pixels, 計算時間2947秒)

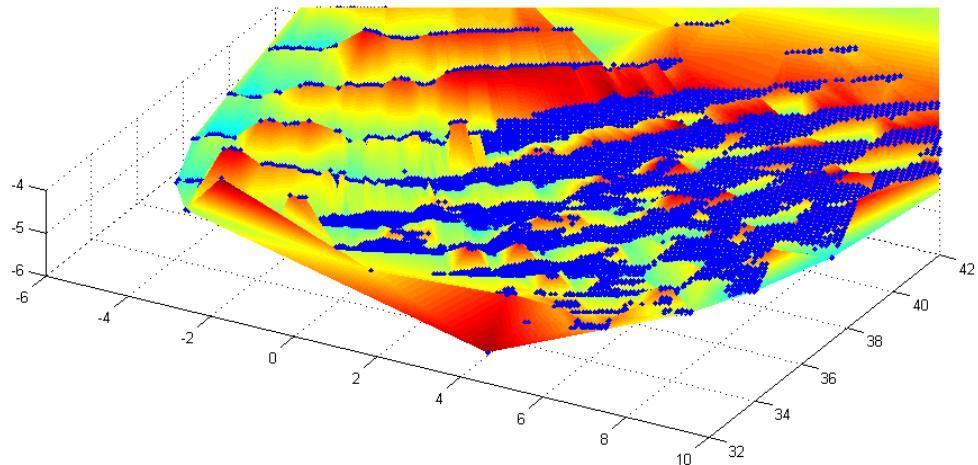


圖109 匹配成功點在空間上分佈之一例

現場試驗取樣了約50秒的動態影像時序列，逐筆分析這影像時序列後，重建海況立體影像獲得動畫，衡量書面報告之展示限制，僅能顯示二維圖檔，如前述圖106~圖108。任取匹配所得之立體影像時序列中的三個位置點，獲得其水位變化時間序列如圖110。分析結果顯示其平均波高約為10~55公分，週期約為4~8秒，與台南海域當時之風浪特性一致。

分析其頻譜如圖111所示，圖中紅色圈線為鄰近海域之七股觀測浮標同一時間的頻譜，由圖可看出兩者主頻均在0.15Hz左右，與實際物理現象相符，惟能量分布略有不同，研判是因為立體影像重建所取得的資料僅有50秒，與七股浮標觀測10分鐘相比，資料顯然較少，無法完整呈現出整段時間內的所有波浪特性所致。

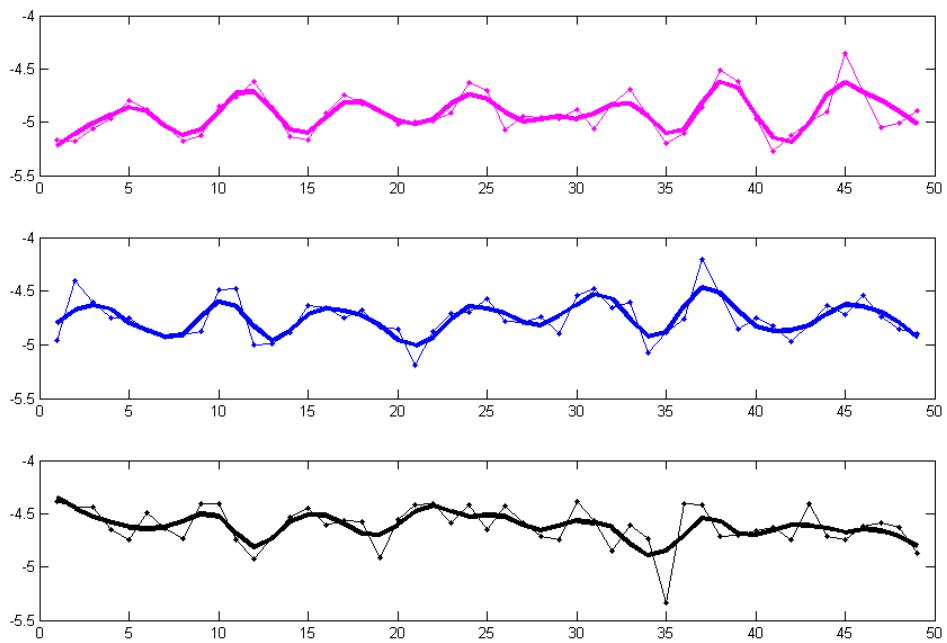


圖110 從重建所得之立體影像時序列中取出任意三點的水位變化時序列

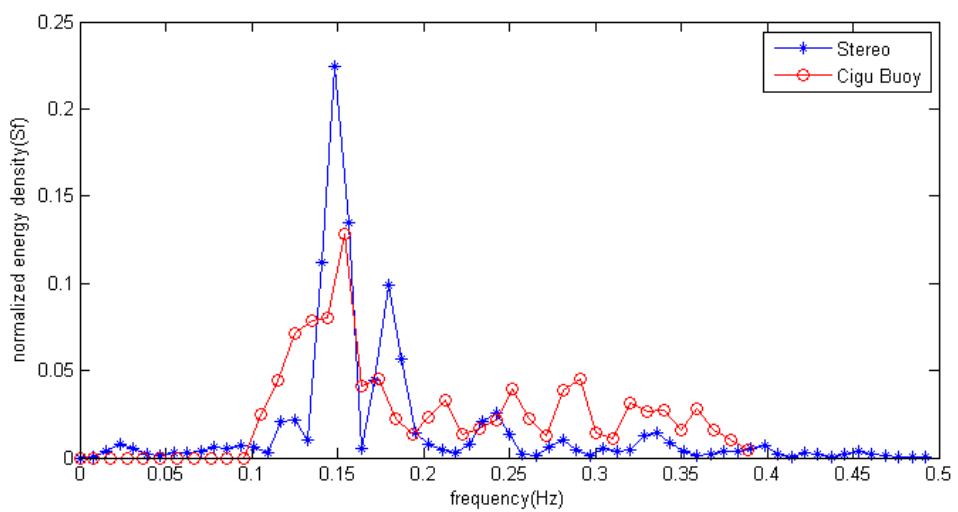


圖111 從重建所得之立體影像時序列中取出任意三點的水位變化時序列

## 第六章 關鍵問題與改善處理

### 6-1 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 39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。首先討討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0.611m，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112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113為水平俯角為35度時的原始相片與幾何校正後結果。圖114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115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116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 39 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								

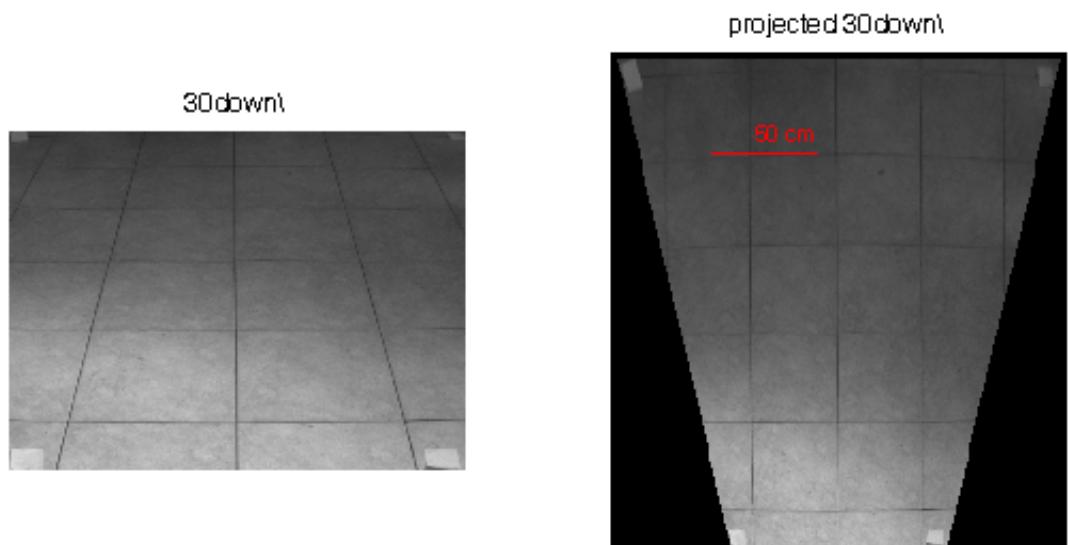


圖112 攝影參數：水平俯角30度，水平旋轉角0度(左)原相片，(右)幾何校正後影像

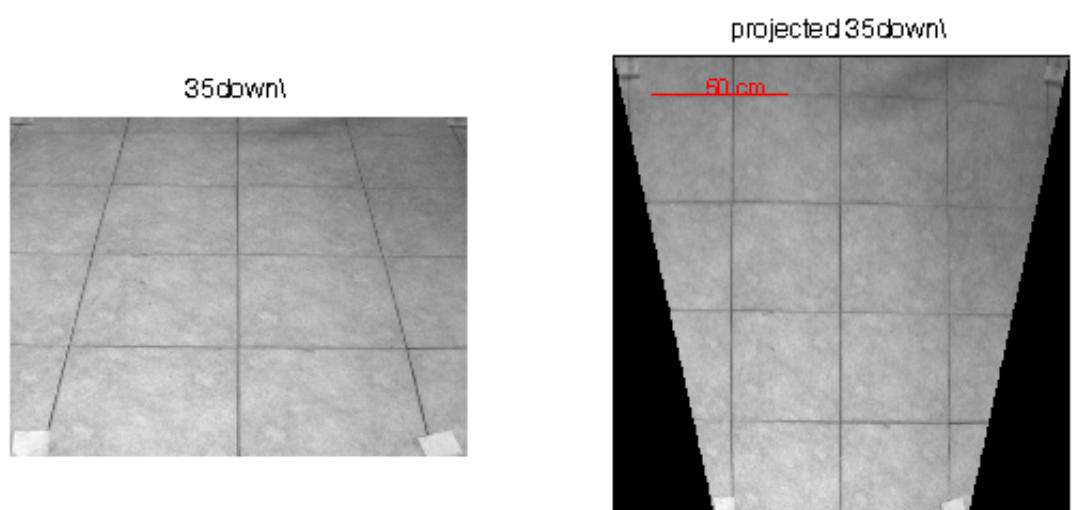


圖113 攝影參數：水平俯角35度，水平旋轉角0度(左)原相片，(右)幾何校正後影像

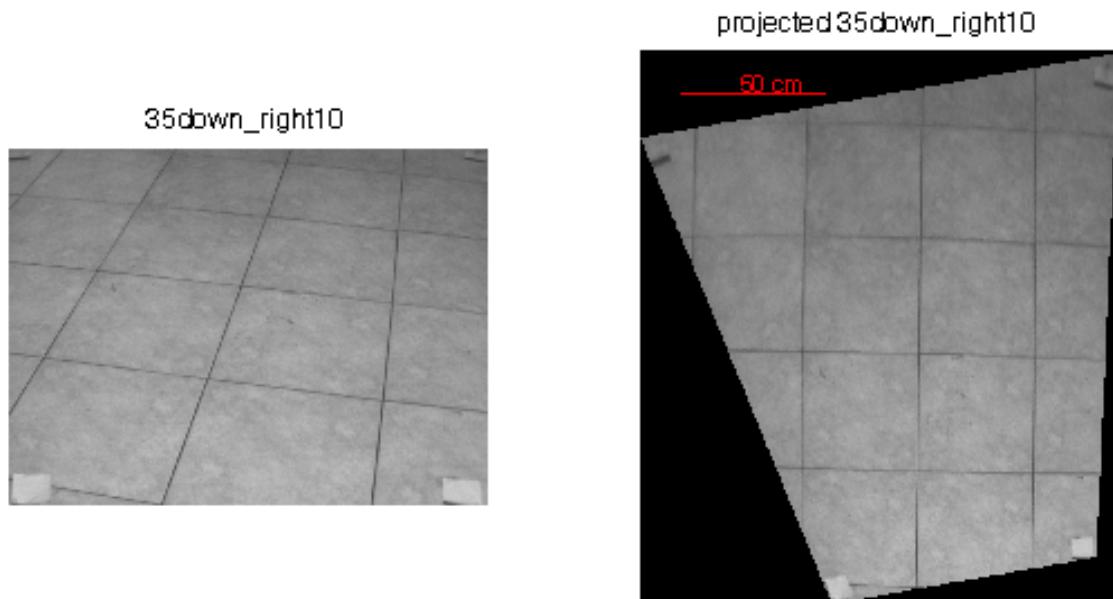


圖114 攝影參數：水平俯角35度，右側相機水平旋轉角10度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像

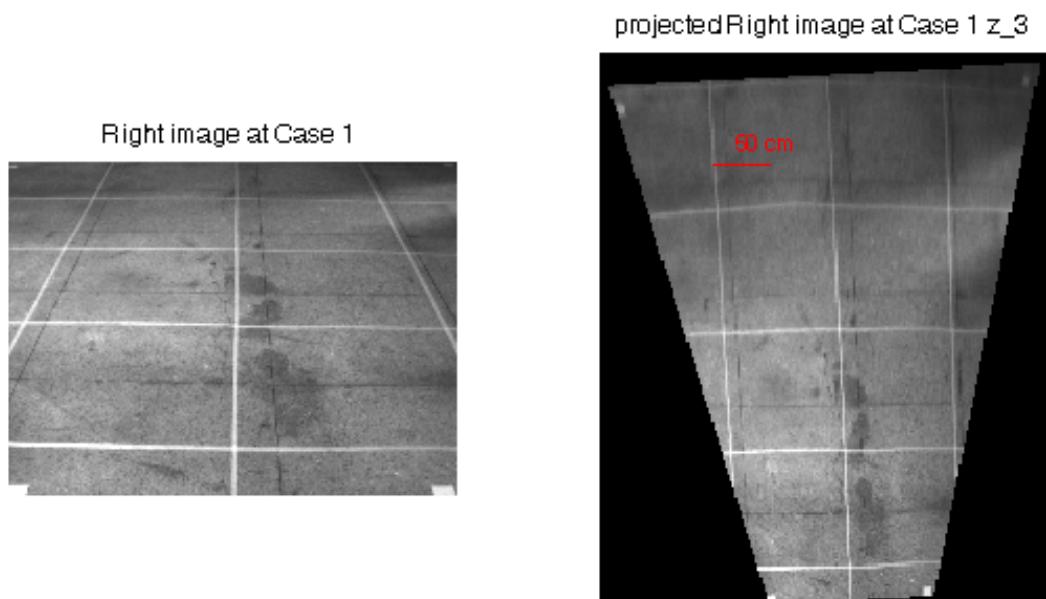


圖115 攝影參數：水平俯角25度，右側相機水平旋轉角3度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像

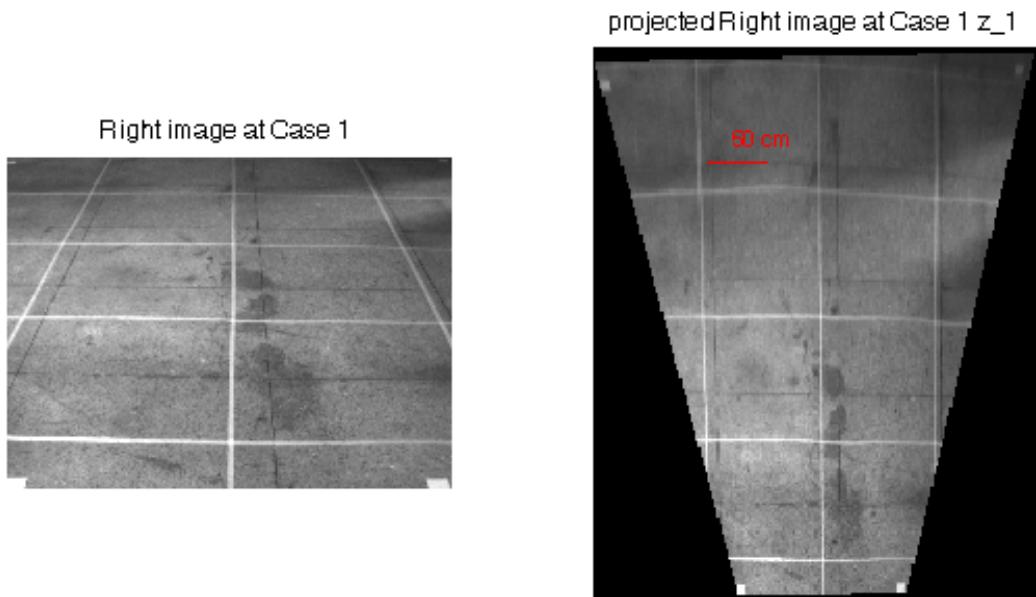


圖116 攝影參數：水平俯角25度，右側相機水平旋轉角1度 (左)原影像，(右)幾何校正後影像

#### ※改善處理結果

圖117為原攝影觀測系統及固定攝影機之腳架。此腳架與支撐攝影機的固定架的連結處較小，且兩者間無法緊密結合，使得進行現場攝影觀測時，會產生左右晃動問題。目前本研究已改用土木測量用腳架取代原攝影機腳架（如圖118），由於腳架較粗，且能與攝影機的固定架緊密結合，改進儀器系統水平固定問題。



圖117 原攝影機腳架



圖118 改進後攝影機腳架

## 6-2 時間同步取樣問題

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119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120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121 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122 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123)。

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。

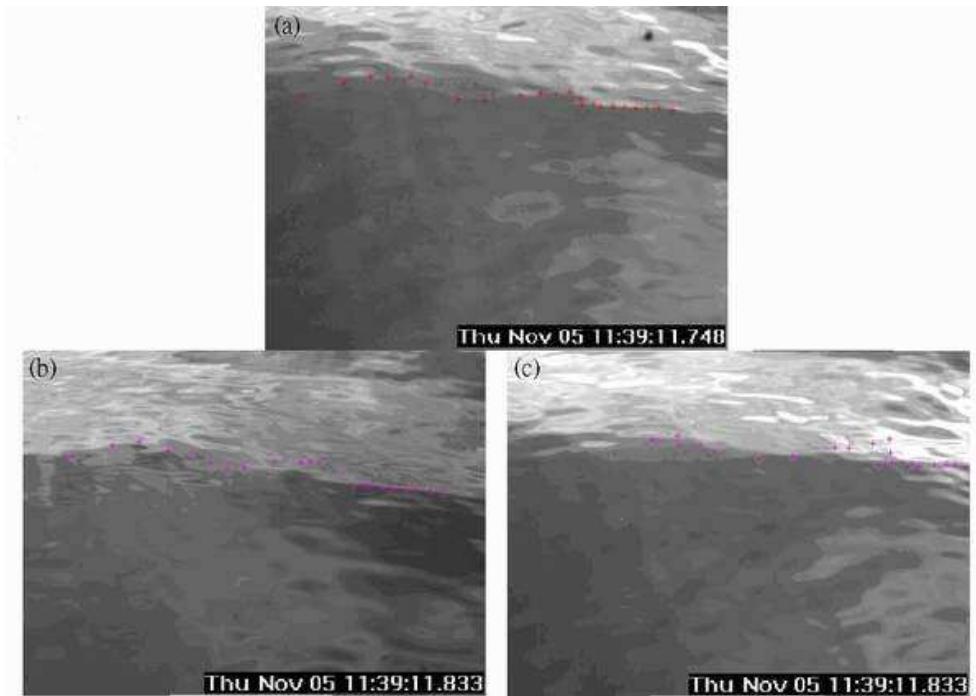


圖119 (a)(b)(c) 依序是三台高速攝影機(某一case中第820張)上方、左側、與右側所拍攝的海面即時影像匹配結果。

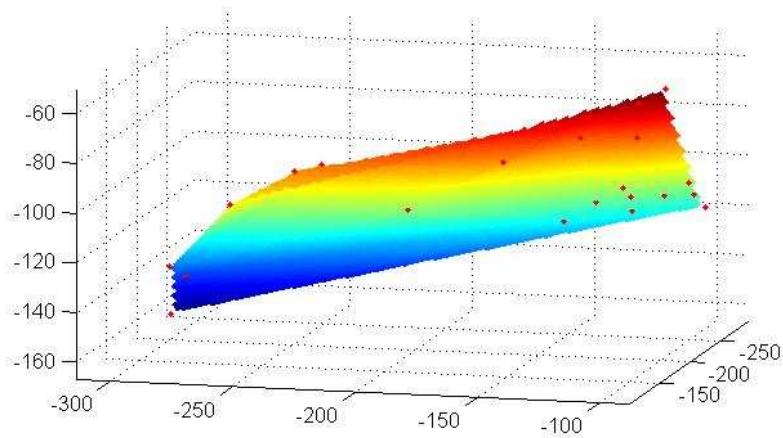


圖120 時間差較大之立體影像匹配，結果與實際海面狀況差異大

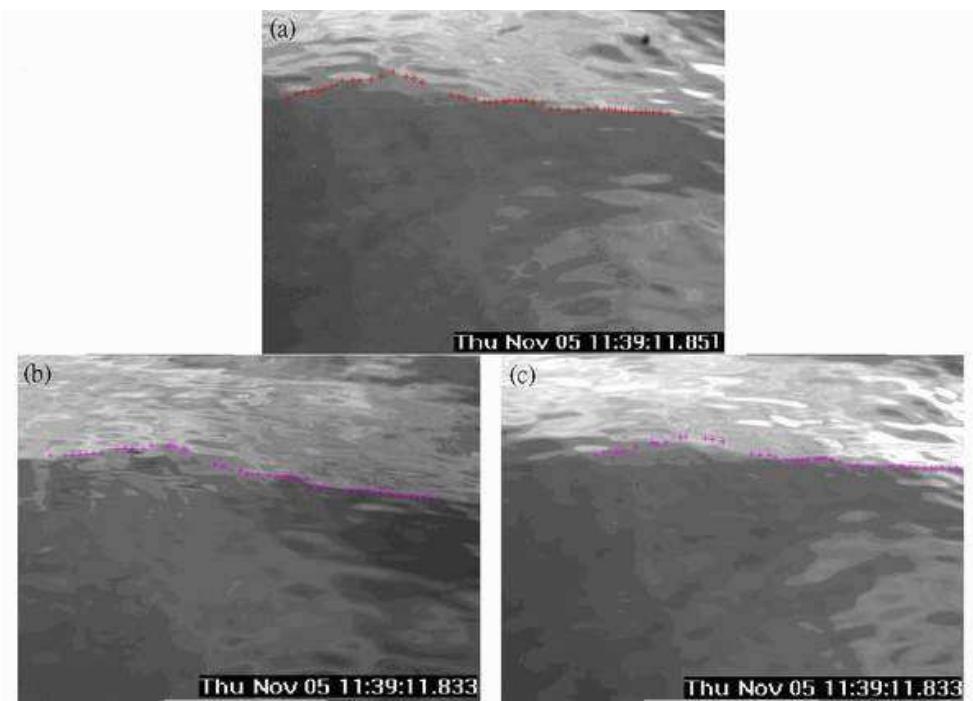


圖121 (a)(b)(c)依序是三台高速攝影機上方所拍攝的影像(圖6-12)往後取一張frame (第821張)、左側(第820張)、與右側(第820張)所拍攝的海面即時影像之匹配結果。

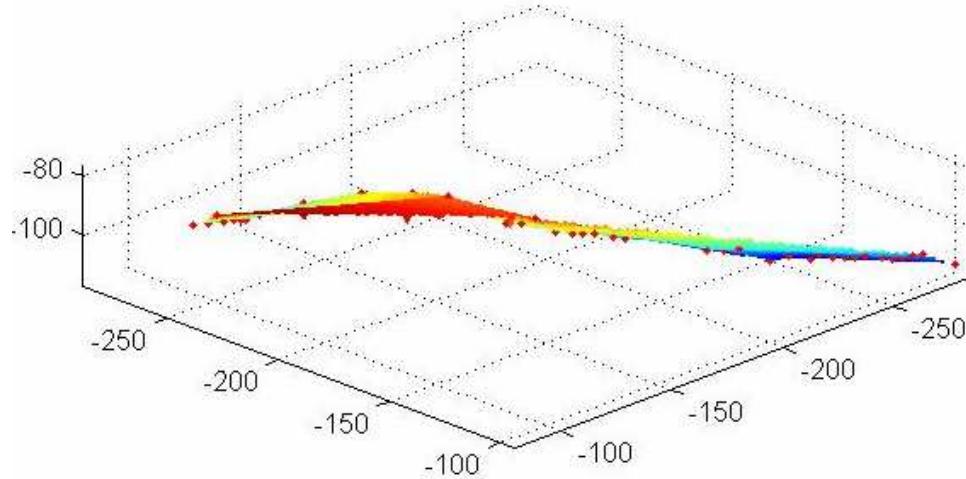


圖122 時間差較小之立體影像匹配，結果與實際海面狀況較接近



圖123 2009/11/5實驗時海面狀況

#### ※改善處理結果

本攝影系統是由攝影外部觸發器(trigger)發送訊號，以啟動攝影機拍攝。在本研究的實測過程中，發現當攝影頻率太高時，三部攝影機所拍攝的時間會產生差異。經向外部觸發器製造公司與攝影機原廠確認，目前此攝影機使用外部觸發器在高速拍攝時仍存在著同步拍攝問題。因此本研究在不影響觀測波浪所需的採樣頻率下，使用較低的頻率進行觀測。若將每秒張數降低至5至2張，則可以有效提升影像的同步拍攝與降低資料儲存所造成的延遲。

### 6-3 影像光線均勻問題

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124 (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125 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。

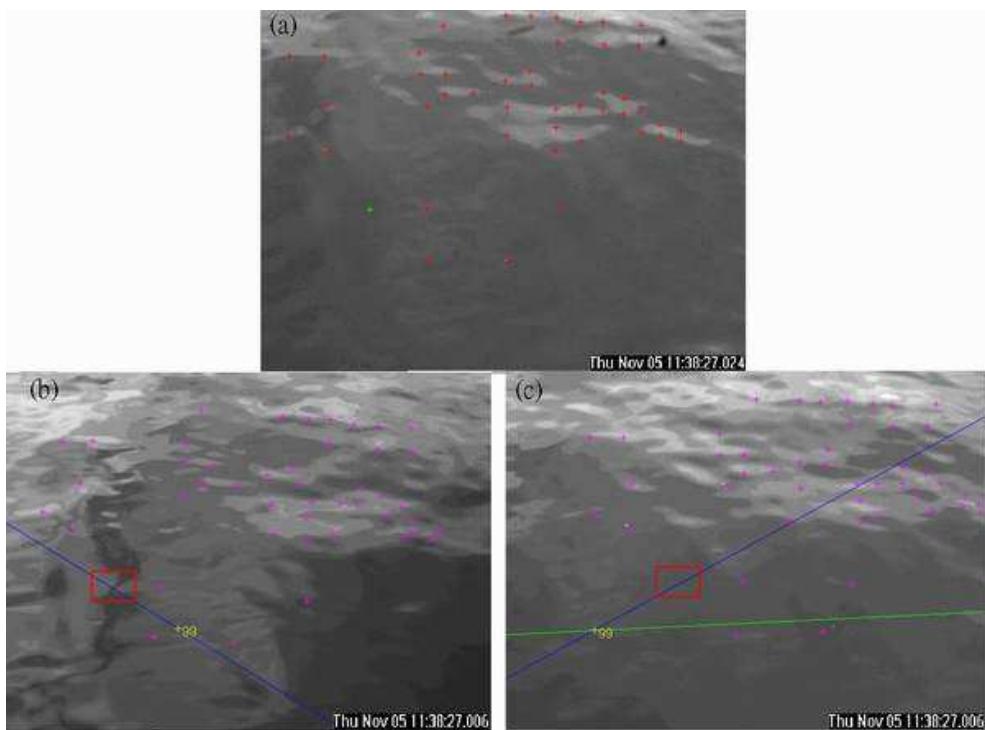


圖124 (b)圖左側與右下區塊的光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判

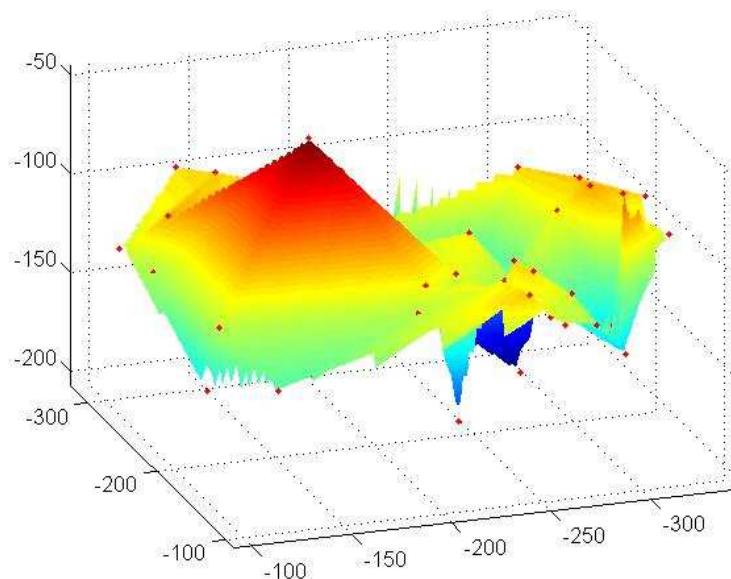


圖125 光影變化大導致立體影像匹配結果並不理想

※案例二：

圖126 (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。

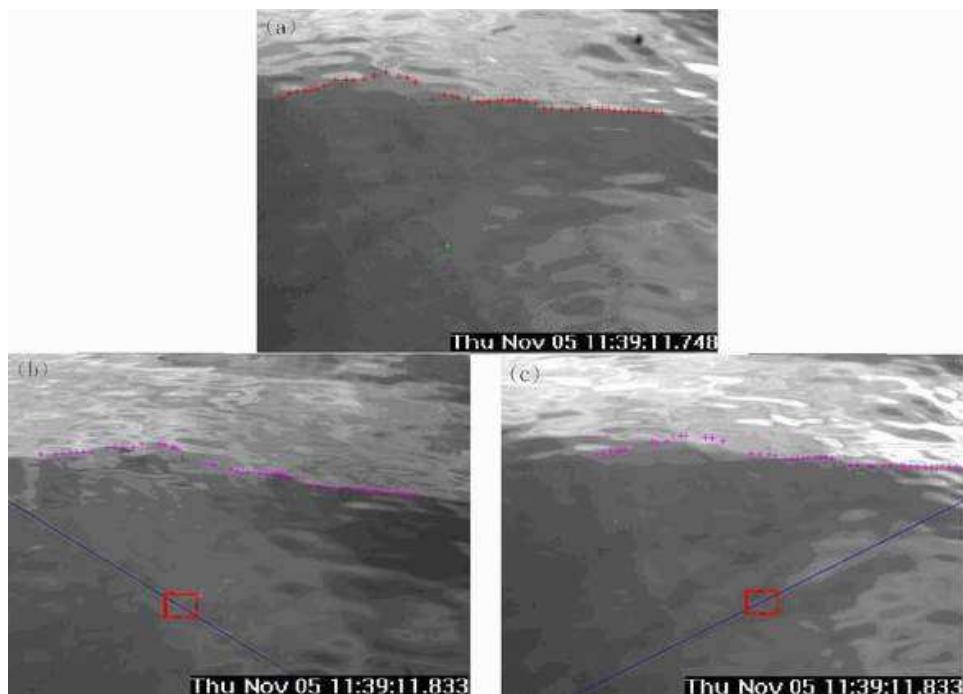


圖126 波峰位置明顯，匹配結果良好；圖中下塊區域水位變化不明顯，上塊區域光影變化相異，造成匹配結果不準確。

※案例三：

此例時間差為0.018秒，可從圖127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128為立體影像匹配結果。

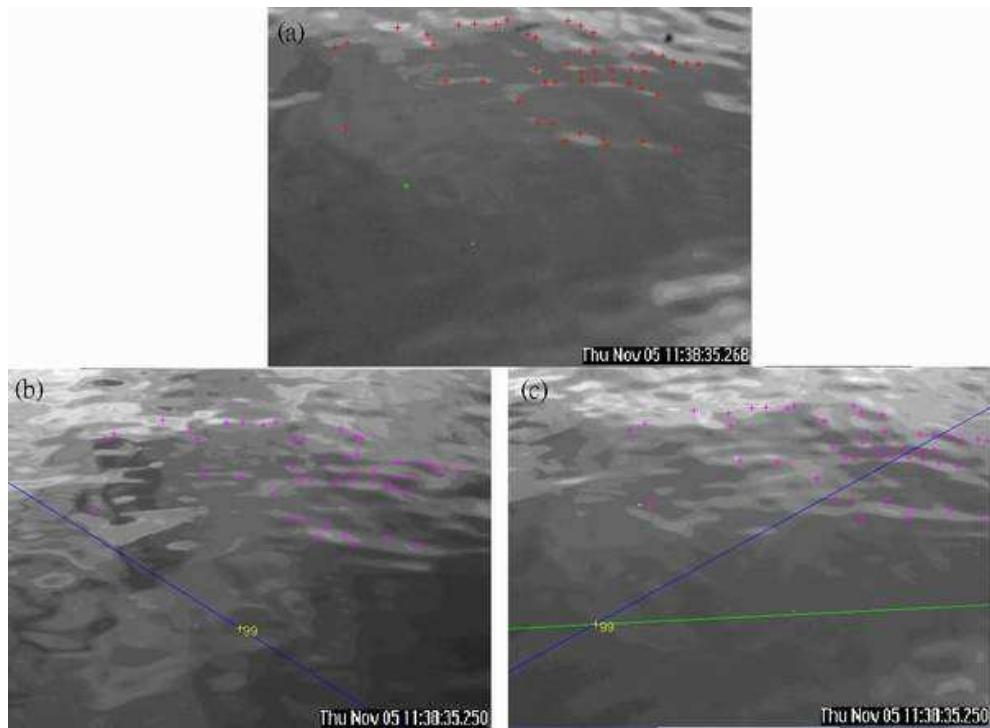


圖127 (b)圖左側及下塊區域光影變化與(a)(c)明顯相異，造成落點的誤判

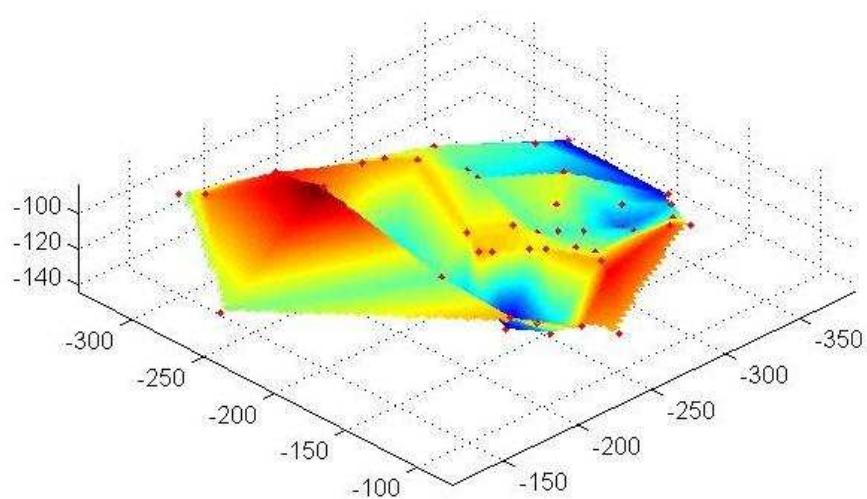


圖128 立體影像匹配結果

※案例四：

圖129(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130 為立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為50 cm。

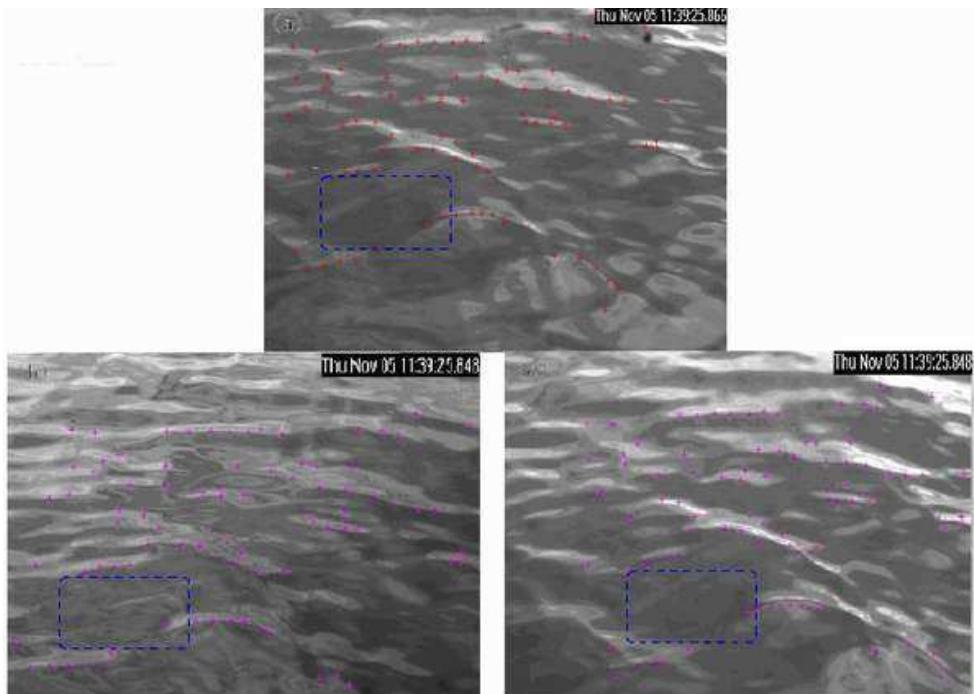


圖129 時間差小且海面波紋明顯，匹配結果準確且匹配成功點數多。

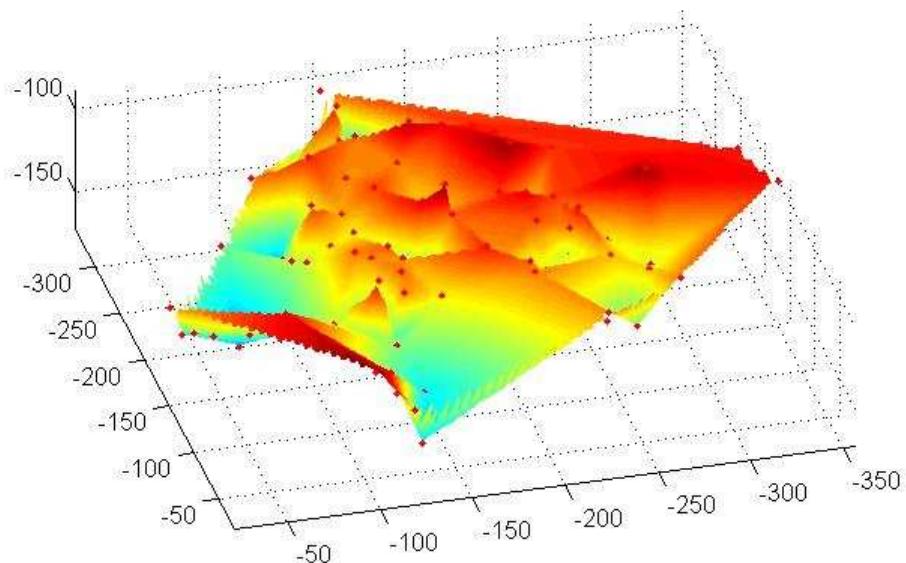


圖130 立體影像匹配結果

※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131，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132 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準確定是否準確。

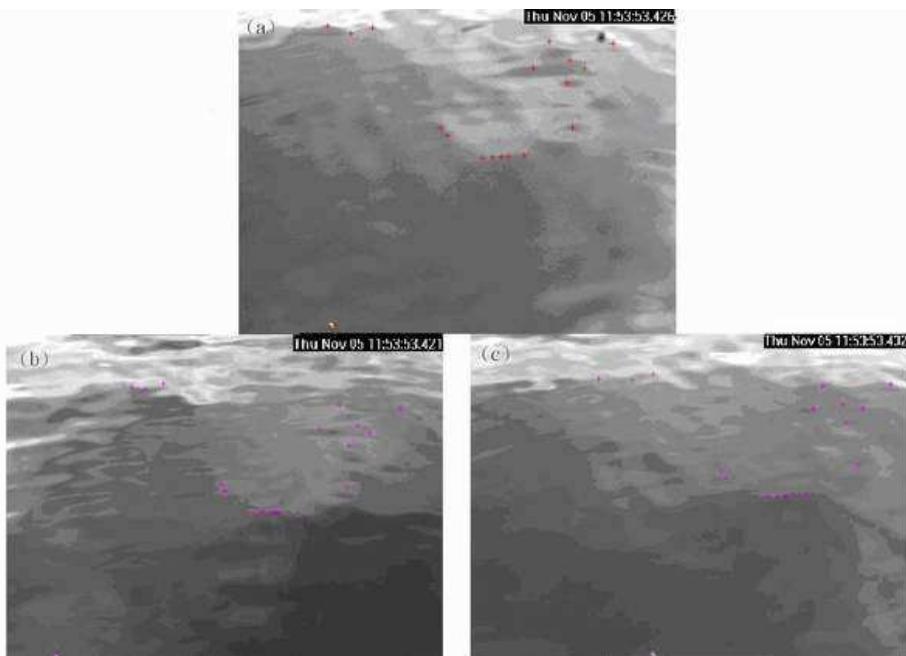


圖131 水位變化不明顯，海面上並無明顯波紋，故匹配結果不理想。

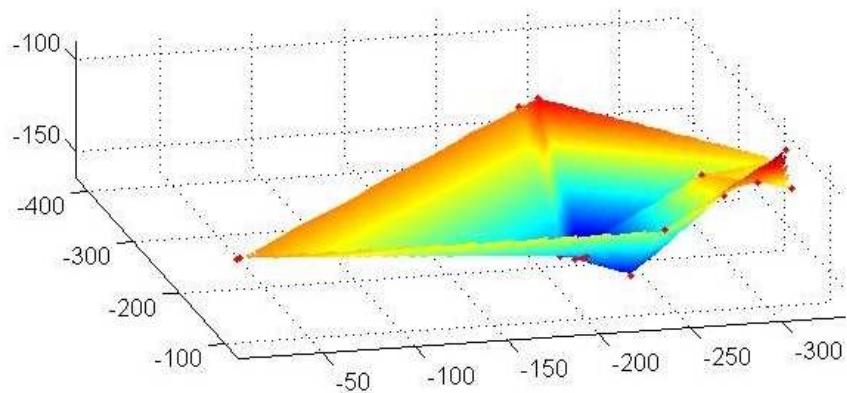


圖132 立體影像匹配結果，所測量之波峰線高程約為50 cm，與當日實際海面狀況不符，推測是因為匹配成功點數過少。

#### ※改善處理結果

當入射光源以入射角 $\theta'$ ，入射方位角 $\alpha'$ ，被目標物反射後，將以某一反射角 $\theta$ 和反射方位角 $\alpha$ 抵達攝影機(如圖133)。本研究在拍攝海面時同時使用三部攝影機拍攝同一目標物，因為同時拍攝，所以同一入射光源，分別以不同的反射角( $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ )和不同的反射方位角( $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ )將光源反射到各個攝影機。當目標物與攝影機距離較近時，這不同的反射角間及不同的反射方位角間的差距會較大，各相機受到反射光影響的位置的差異也會較大。但當目標物與攝影機間的距離愈遠時，因為攝影機間的間距相同，目標物將同一光源，反射到不同攝影機時，光線抵達各攝影機反射角與反射方位角則愈相近，因此不同攝影機受反射光影響的位置與強度也會較一致。所以本研究選擇將攝影機架設在離目標海面較遠的位置，進行攝影觀測，以降低因反射光問題所造成的影像光線不均勻問題。

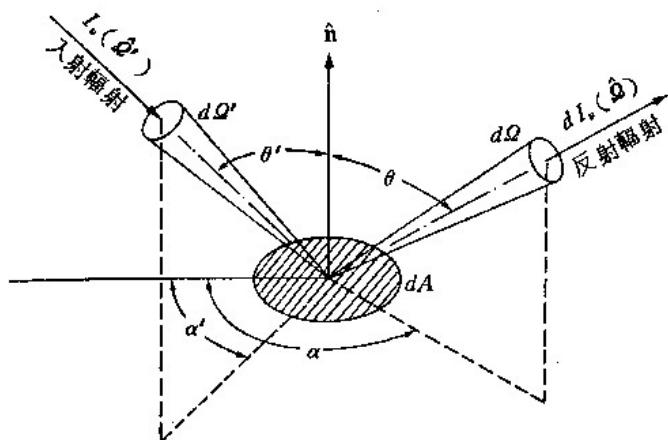


圖133 光源與攝影機位置幾何示意圖(曾, 1988)

## 6-4 影像分析波浪技術歸納與未來提升需求

整題而言，海面的立體影像重建已獲致良好成果，然而若要達到實際應用或作業化操作，仍有部分問題需要克服，計畫執行至今遭遇的關鍵問題包括如下：

1. 儀器水平：由於座標軸原點位於相機鏡頭的主軸點，在轉換為立體影像時，若相機不水平，則尚需要複雜之座標轉換，將會增加觀測的複雜性及增加計算的誤差，因此在進行拍攝前，需調整觀測平台與相機雲台為水平，並輔以水準氣泡雙重確認水平。
2. 時間同步：立體影像重建的過程中，最關鍵步驟即為影像匹配，要在兩(三)影像間找到對應的點位，若拍攝的影像不同步時，拍攝的影像將因些為時間差而略有不同，將導致影像匹配不成功。目前已由添購之外部觸發器利用方波控制，但是因為系統資源(關係資料存取速度)限制，不能設定太密集的取樣頻率。
3. 光線：海面立體攝影結果與光線均勻度有關，若陽光直射或有其他光源干擾(含背景物體的反射)時，立體影像匹配結果不佳，加裝濾光片的改善程度不高。近距離海面的觀測時，攝影機到海面上各點的角度變化大，容易出現光線不均勻的問題，解決的方案之一是拍攝遠處海面，遠處海面影像中各點到攝影機的角度接近，光線均勻度的問題不顯著，可以獲得較佳的結果。唯拍攝遠處海面會發生大波浪遮蔽的問題，這點與儀器高度有關，如下點說明。
4. 高度：在 5-2 節中，當攝影機放置在岸邊，波浪的前波面面對攝影機，影像清晰，但後波面大都被前波面所遮蔽，尤其當掠角很小時，無法取得後波面影像，無法攝得影像的地方遑論可以匹配出真實海況影像。此乃利用攝影觀測海況的限制，可藉由把攝影系統架設在高度獲得改善。
5. 計算時間：影像匹配是立體影像重建最關鍵的技術，同時也是花費最多時間計算的步驟，本計畫引入許多增加效率的方法包括極線幾何法、快速標準化互相關係法、影像邊界距離等，已縮短許多時間，但若選取範圍為小間距(如圖 105 案例中 13800 點約需 50 分鐘)，計算時間還是太久，還不能滿足作業化觀測系統的要求。

由於科技日新月異，新的儀器與觀測計算方法不斷推陳出新，若能引用這些新的方法或儀器設備，將可提升整體實驗的準確性與時效性，以下列出可能藉由硬體或軟體改善而提升整體功能之需求。

1. 攝影機：本計畫採用的攝影機，輸出相片為  $1392 \times 1040$  pixels (Basler scA1390-17gm)，適合拍攝小區域的實景，若要增加觀測範圍與解析度，建議可提升攝影機之解析度效能。
2. 鏡頭：本計畫採用的鏡頭為 11.5-69 mm 變焦鏡頭，當拍攝距離較遠時，影像解析度受限，重建之立體影像誤差也較近處大，若採用望遠鏡頭可拍攝遠處較清晰影像，並可獲得較準確的遠處立體影像資料。
3. 計算系統：包含兩部分影像擷取單元與資料處理單元，現採用之影像擷取單元等級不高，記憶體與硬碟存取速度較小會影響影像資料的存檔，造成些微時間差，導致最後的計算結果產生誤差。資料處理單元主要關係到影像匹配的計算，若提升效能則能增加計算的速率，更符合實際應用的需求。
4. 軟體：目前影像匹配的計算僅至最小單位 1 個 pixel，若能引用 sub-pixel 計算方法計算至小數點下 2 至 3 位，將可提升重建後立體影像之準確性。

## 第七章 結論與建議

現場的海象觀測資料可以提供模式驗證與同化應用，有助於提昇波浪預報準確度。目前的海象觀測技術包含以設置資料浮標、浮球、波高計等現場儀器的方式，以及從衛星、雷達等遙測影像進行分析的技術，除此之外，也有很多學者利用光學方式來從事海洋(岸)觀測。Wanek and Wu (2006)提出一個利用三台攝影機建構出立體海況影像的方法，初步證實在海岸邊棧橋上可以正確地量測到短週期的風浪，本計畫從參考前述文獻所提出的方法出發，嘗試建立類似以光學攝影機從事海象立體觀測之自有技術。

利用攝影機從事海象立體觀測的關鍵技術包含了相機內部校正、外部校正、以及影像匹配技術。本研究除參考前述文獻所述的方法外，也參考測量學原理，進行前述幾項關鍵工作的研究。例如前述文獻提出的實驗室外部校正的方法應用到天氣惡劣的現場並不全然合適，本研究於第三年度採用了地面控制點方法，獲得的結果優於先前的測試結果。然而本研究也確實在現場的測試中遭遇了部分困難，這包含了儀器水平問題、影像同步問題以及光影差等問題，本研究針對上述問題提出改善措施。

關於儀器轉動水平的問題，本研究強化支架，並配合地面控制點的方法，將外部校正板置放於三台相機觀測區域內，藉此解決此問題；至於影像同步的問題有其先天上的限制，本研究以降低取樣頻率至 1-5 fps (frames per second)解決之，前述取樣頻率已能滿足波浪傳遞過程的記錄，但若要拍攝碎波過程或在實驗室內進行更精密的拍攝，高取樣頻率仍有其必要性；第三個問題也是最棘手的問題是光線均勻性的問題，入射光線進入海面反射到相機的不均勻造成三張影像上存在光影差，嚴重影響分析結果，本研究嘗試利用濾光鏡，但仍無法完全解決光影差的問題，經過研討與驗證，本研究發現，初步測試階段都拍攝近距離海面，反而出現光影差問題，但在拍攝遠距離海面時，光影差現象大幅降低，往往能獲得良好的分析結果，這也是可以理解的，因為遠處海面空間中不同點入射到相機的角度變化不大，影像上光線均勻性趨於一致，事實上，拍攝遠處海面也正是中央氣象局海象中心推動此觀測技術研究之目的。然而，解決了光影差問題卻又帶來了另一個問題，拍攝遠距離若立體攝影系統架設高度不夠高，則廣大海面在影像上幾乎只有一個很小的區域(因掠角很小)，這廣大海面上的波浪特徵很難被攝得，當浪高較大時，再增加一個遮蔽問題，大浪後方的小浪無法被攝得，這類問題的解決的方案是增加系統架設高度。

立體攝影系統拍攝海面確實存在不少待解決問題，但它卻並非不能使用，本研究已掌握了前述關鍵技術，自行開發了分析程式，當然，本研究也進行了驗證作業，包含靜態與動態驗證，實驗室的靜態驗證結果證實，本研究所開發了立體攝影系統可以非常正確地匹配出靜止不動的物體，獲得其立體影像，這結果可以應用於靜態現象，譬如颱風前後海岸沙灘的變化，或水工實驗室內，動床試驗後的地型型態變化等。

本研究分別在基隆長潭里海域以及台南安平海域進行現場動態驗證。在基隆長潭里海域的試驗以驗證防波堤前方波浪觀測的正確性；在臺南黃金海岸則驗證開放性海域波浪觀測的正確性，這兩個現場試驗都是從事遠距離的觀測，觀測目標區約距離立體攝影系統 30-200m。長潭里的測試把地面控制點設在遠方海堤上，或者也可以說把遠方海堤作為外部校正板，本研究同時還開發了一個影像辨識方法來獲取水面變動量值，當做是現場水位變化真值，長潭里試驗的分析結果顯示水位變化趨勢與頻譜分析結果均與實際海面相當接近，但它也發現了，距離遠方海堤(外部校正板)愈遠，匹配結果偏差愈大。對此，台南海域的分析作業中則採用了一個更新的外部校正程式，分別拍攝不同空間處的外部校正板，計算相機姿態取得外部校正參數，外部校正的目的是建立立體攝影系統與待測物之間的空間幾何關係，將外部校正板分散擺設在待測物件周遭，可以提高前述空間幾何關係的正確性，提昇匹配成功率，現場試驗結果，匹配成功率增加到 95% 以上，可以正確地重建出立體海況影像。這兩個試驗都證實了立體攝影系統的量測結果是正確的，量測誤差也在可以接受的範圍內。從這兩處的現場作業可以證實，本研究所開發的立體影像系統與分析程序可以合理地獲得防波堤附近海域立體影像以及開放海域立體影像。未來的應用可以擴展至防波堤附近波浪量測，如龜山島登島碼頭海況量測；或將立體攝影系統架設在港區燈塔上，可以量測港口航道處海況，提昇操船進港安全；再者，將海岸附近攝影機提升為具有海象觀測能力，譬如海巡署諸多海防站之攝影機。

此技術未來仍須繼續投入提昇改善，雖然多數遭遇問題均已在本計畫中解決，但仍有諸多未解之處，譬如系統高度對分析結果的影響等。同時，隨著電腦與攝影機的精進，未來的量測準確性與計算效率都應能顯著提昇，在現有的研發基礎下，未來有機會能夠更掌握更多的技術，對於提昇我國的自主觀測系統研發能力有所助益。

## 參考文獻

林松柏、陳飄揚、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。

陳飄揚、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。

曾忠一，大氣衛星遙測學，渤海堂，1988。

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.

Bouguet, J.Y., Camera Calibration Toolbox for Matlab. Computational Vision at the California Institute of Technology, 2010.

[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)

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, 19

## 附錄一：期初評選會議紀錄

### 交通部中央氣象局 99 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（3/3）」

#### 服務建議書審查會議

#### 會議紀錄

壹、時間：民國 98 年 12 月 17 日（星期四）15 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、99 年度委託研究計畫服務建議書審查委員意見及建議事項：

一、程委員家平

- (一) 建議對本計畫開發的各項技術，提出可能的應用範圍或項目。
- (二) 有關光影的問題，可以考慮是否將光源效應納入考量。

二、李育棋副主任：

- (一) 對此計畫為基礎研究，對此方法開發應用可提出建議。

三、周思運研究員：

- (一) 增加動態範圍(Dynamic Range)是改善光源變化的方法之一。  
建議使用 12bits 的影像來處理影像。

- (二) 可能需要在匹配影像之前做一下影像亮度的規一檢查。
- (三) 偏光鏡在實作上應該是需要的，這在動態範圍不足時，恐怕更重要。
- (四) 建議檢查 CDD 對光亮度的反應。

拾、審查結果：

原執行單位(國立台灣海洋大學)所提之明(99)年度「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發（3/3）」服務建議書，經審查委員審查後所獲評分符合審查評選標準(經出席委員過半數以上審議合格)。

拾壹、散會：下午 16 時 30 分

## 附錄二：期中審查會議紀錄與回覆

交通部中央氣象局  
99 年度委託研究計畫[期中報告]審查驗收會議紀錄

一、採購案號：992097C

二、驗收標的(計畫名稱)：「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)」

三、廠商名稱：國立台灣海洋大學

四、履約期限：99 年 1 月 29 日至 99 年 7 月 2 日

五、完成履約日期：99 年 6 月 30 日

六、驗收日期：99 年 7 月 8 日（星期四）下午 3 時 30 分

七、地點：本局 616B 會議室

八、主 持 人：高惠雲

紀錄：陳伊秀

九、出席人員：

審查委員：

單位	姓名	簽名
預報中心	李育棋	李育棋
氣象中心	勝春英	勝春英

監辦單位：會計室

政風室

業務單位：

中央氣象局

高惠雲

陳伊秀

計畫主持人：

政風室

黃世任

楊一中

周于洋

十、簡報計畫研究成果：

略

十一、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：：	
(一) 建議增加測試使用一般物品做測試控制點。	謝謝委員意見。
二、李委員育棋：	
(一) 期末測試可考慮不同時間，光影是否影響。	謝謝委員意見。
三、滕委員春慈：	
(一) 期末報告請加入未來可能的應用。	謝謝委員意見。

十二、驗收結果：

期中報告符合驗收標準。

十三、散會：17 時 30 分。

### 附錄三：期末審查會議紀錄

交通部中央氣象局  
99 年度委託研究計畫[期末報告]審查驗收會議紀錄

- 一、採購案號：992097C
- 二、驗收標的(計畫名稱)：「自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)」
- 三、廠商名稱：國立台灣海洋大學
- 四、履約期限：99 年 1 月 29 日至 99 年 12 月 31 日
- 五、完成履約日期：99 年 12 月 1 日
- 六、驗收日期：99 年 12 月 14 日（星期四）下午 2 時 30 分
- 七、地點：本局 616B 會議室
- 八、主 持 人： 紀錄：陳思良
- 九、出席人員：
- 審查委員：

單位	姓名	簽名
達研所	蘇立宏	蘇立宏
氣象局科技中心	程家平	程家平
海象局第二組	李育輝	李育輝

監辦單位：會計室

政風室

業務單位：

呂鵝洲

計畫主持人：

黃世任

十、簡報計畫研究成果：

略

十一、審查委員意見及建議事項：

(一)蔡委員立宏：

海洋大學團隊針對許多問題及限制，如光源、基線距離天氣因素等，皆有作有效改善處理，並詳細說明應用上之限制。成果可提供日後相關應用之參考。

(二)李委員育棋：

1. 研究過程可與使用單位充分交換研究心得，研究方法可作未來繼續使用。
2. 相關技術有關影像處理與系統軟硬體技術，建議能轉移海象中心做相關應用。

(三)程委員家平：

1. 本案在技術方面將三維影像波高量策相關的技術、方法、關鍵問題及優缺點做了完整的探討，研究成果豐碩。
2. 本案建議可加強技術轉移文件，以供海象中心於未來參考使用。

(四)周委員思運（書面審查）：

未來若有後續研究計劃，建議製作軸承系統，固定攝影機姿態以利觀測。

(五)滕委員春慈（書面審查）

1. 本計劃成功的克服困難，將影像處理技術用在導出波浪。
2. 對於如何應用在實際大範圍波浪上仍有一些要處理的情況，如計算廢時、訂正板需和測量物間不可過大距離等，離實際上線應用還有須研究的工作。
3. 計畫已開發的相關技術，建議可思考應用領域，應可解決一些觀測需要。

十二、驗收結果：

期末報告 符合驗收標準。

十三、散會：15 時 30 分。

## 附錄四：政府科技計畫成果效益報告

# 政府科技計畫成果效益報告

計畫名稱：自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)

---

( 群組 ) ( 領域 )

主管機關：交通部中央氣象局

執行單位：國立台灣海洋大學

## 第二部分：政府科技計畫成果效益報告

### 壹、 科技施政重點架構圖：

### 貳、 基本資料：

計畫名稱：自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發 (3/3)

主 持 人：蔡政翰

審議編號：                  

計畫期間(全程)：97 年 5 月 20 日至 99 年 12 月 31 日

年度經費：897 千元 全程經費規劃：2550 千元

執行單位：國立臺灣海洋大學

### 參、 計畫目的、計畫架構與主要內容

#### 一、 計畫目的與預期成效：

計畫目的為研發三維海況影像觀測技術，根據國外先進理論嘗試建立觀測系統，探討其觀測準確性與適用條件。完成此研究，瞭解該系統之效能後，未來具有應用於臺灣近海波浪觀測業務之潛力，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昇級為 3 維立體影像資訊，提升國家整體海象觀測技術。

#### 二、 計畫主要內容

本計畫工作期限為三年(97~99 年)，原則上民國 97 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準備工作，民國 98 年進行立體影像校正及系統現場設置等工作。

本年度之計畫工作內容列點如下：

- (1) 立體波浪影像分析結果之改進。
- (2) 地面控制法之導入與應用。
- (3) 現場實測與驗證。
- (4) 光學影像分析波浪技術之歸納。

#### **肆、 計畫經費與人力執行情形**

一、計畫經費執行情形：(可以下列表格表達)

##### **(一) 計畫結構與經費**

細部計畫		研究計畫		主持人	執行機關	備註
名稱	經費	名稱	經費			
		自動化 三維立 體影像 岸基海 象觀測 技術開 發 (3/3)	897,500	蔡政翰	國立臺灣 海洋大學	

(二)經資門經費表

或僅以人事費、業務費(研究設備費、材料與雜費)管理費分類

經費項目	主管機關預算(委託、補助)	自籌款	合計		備註
			金額	%	
人事費	407,000		407,000	45	
業務費	研究設備費				
	材料與雜費	439,500	439,500	49	
管理費	50,500		50,500	6	

與原計畫規劃差異說明：

### (三)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(3/3)	原訂	3.6	0.9		1.8	0.9
	實際	3.6	0.9		1.8	0.9
	差異					
	原訂					
	實際					
	差異					

### (四) 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	
			學歷	經歷
蔡政翰	主持人	11	學歷 碩士 經歷 海洋大學教授 專長 波浪統計、海岸和海洋工程及科學	

姓名	計畫職稱	投入主要工作及人月數	學、經歷及專長		
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	
董東環	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：

#### 伍、計畫已獲得之主要成果與重大突破(含量化成果 output)

- 請就本計畫涉及之(1)學術成就(2)技術創新(3)經濟效益(4)社會影響(5)其他效益方面說明重要之成果及重大之突破，以文字方式分列說明。
- 請依本計畫(涉及)設定之成果項目以量化績效指標方式及佐證資料格式填寫主要之量化成果(如學術成就代表性重要論文、技術移轉經費/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)。
- 請依本計畫(涉及)設定之成果項目先分別將底下研究計畫以領域別分類，再以量化績效指標方式及佐證資料格式填寫主要之量化成果。

本研究計畫主要成果為建立影像系統內部校正程序、克服光影問題及用地面控制點方法完成外部校正，影像匹配與用影像計算波浪水位之初步方法。這是本研究計畫的重要成就。

本計畫成立的研究團隊由國立台灣海洋大學與國立成功大學組成，計畫期間有 2 碩士班學生畢業，1 大學部學畢業、另 1 碩士班學生正參與計畫，其畢業論文與本研究有關。

在研究報告方面有 6 本計畫報告，及 4 篇研討會論文。

#### 陸、主要成就及成果之價值與貢獻度 (outcome)

請依前述重要成果及重大突破說明在學術成就上價值與貢獻度如：

- 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(產業經濟發展)(權重 0%)
- 四、 社會影響(民生社會發展、環境安全永續)(權重 10%)
- 五、 其它效益(科技政策管理及其它)(權重 0%)

註：若綱要計畫期程為 4 年期第 1 年執行者，請明確寫出本綱要計畫為第 1 年執行，固無主要成就及成果之價值與貢獻度；其他非第 1 年執行者請填寫起始年累積至今主要成就及成果之價值與貢獻度(例如：執行期程為第 3 年之綱要計畫即寫第 1 年到現在所有成果之 outcome)。

柒、 與相關計畫之配合

捌、 後續工作構想之重點

玖、 檢討與展望

填表人：\_\_\_\_\_ 聯絡電話：\_\_\_\_\_ 傳真電話：\_\_\_\_\_

E-mail：\_\_\_\_\_

主管簽名：\_\_\_\_\_

## 績效指標

請選擇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，未使用之指標及填寫說明文字請刪除)

屬性	績效指標	初級產出量化值	效益說明	重大突破
	B 研究團隊養成	1 系內與跨校合作團隊		
	C 博碩士培育	3 參與計畫執行之碩士研究生		
	D 研究報告	6 篇		
	研討會論文	4 篇		

## 佐證資料表

(請選擇合適之佐證資料表填寫，超過1筆請自行插入列繼續填寫，未使用之指標資料表請刪除)

### 計畫名稱：自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(3/3)

#### 【B 研究團隊表】

團隊名稱	團隊所屬機構	團隊性質	成立時間 (西元年)
本計畫研究團隊	國立台灣海洋大學 國立成功大學	b	2008

註：團隊性質分成 a 機構內跨領域合作、b 跨機構合作、c 跨國合作、d 研究中心、e 實驗室

#### 【C 培育人才表】

姓名	學歷	機構名稱	指導教授
蘇嘉平	b	國立成功大學	高家俊
楊一中	b	國立台灣海洋大學	蔡政翰
周于洋	b (修業中)	國立台灣海洋大學	蔡政翰
白儀芬	大學部畢業	國立台灣海洋大學	蔡政翰

註：學歷分成 a 博士、b 碩士

#### 【D 研究報告表】

報告名稱	作者姓名	出版年 (西元年)	出版單位
自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(1/3) 期中報告	蔡政翰、董東璟、黃世任	2008	
自動化三維立體影像岸基海象觀測技術開發(1/3) 期末報告	蔡政翰、董東璟、黃世任	2008	
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	蔡政翰、董東璟、黃世任	2009	
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	蔡政翰、董東璟、黃世任	2009	

自動化三維立體影像岸基海象觀測技術 開發(3/3) 期中報告	蔡政翰、董東璟、 黃世任	2010	
自動化三維立體影像岸基海象觀測技術 開發(3/3) 期末報告	蔡政翰、董東璟、 黃世任	2010	

**【I 技術活動表】**

技術論文名稱	研討會名稱	性質	舉辦日期 (YYYYMMDD)
應用海岸攝影機進行立體海況觀測 之研發	98 年中央氣象局研討 會	b	20090908
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	b	20091126
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	b	20091126
立體海況攝影技術研究與開發	99 年中央氣象局研討 會	b	20100629

註：性質分成 a 國內研討會、b 國際研討會