



交通部中央氣象局

自動化三維立體影像岸基
海象觀測技術開發(1/3)

期末報告

國立台灣海洋大學
海洋環境資訊系

中華民國 97 年 12 月

摘要

現場的海象觀測資料可以提供模式驗證與同化應用，有助於提昇波浪預報準確度。目前的海象觀測技術包含以設置資料浮標、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，並已證實在海岸邊棧橋上可以正確地量測到短週期的風浪，本計畫擬採用前述文獻所提出的方法，將攝影機架設於現場岸邊，重建出立體海況影像，以分析實際海岸的波浪參數。本計畫研究目的為立體海況影像觀測技術之開發，探討觀測結果之準確性，評估此技術是否值得進一步推廣作為未來作業化海象觀測之方法。

本計畫為三年期計畫，第一年(2008)研究重點在於立體海況影像觀測系統的整合測試、攝影機內部校正、立體影像重建理論研析以及現場測試地點踏勘。本計畫已完成立體海況影像觀測系統之整合與測試，並證實可以錄得實際海況影像。要將三台攝影機所錄得之海況影像立體化，本研究採用直接線性轉換法(DLT)，並採用 Wanek and Wu (2006)所提出的技巧，避免選取地面控制點(GCP)的動作以使此攝影系統在觀測海面波浪更為實用。影像立體化過程中，校正(calibration)是最重要的過程之一，包含內部校正與外部校正，本年度重點工作即是在於進行攝影機內部校正。本計畫使用中央氣象局所提供之 Qimage 攝影機與自備之 Basler 攝影機，設計五種不同校正點大小與間距的校正版從事攝影機內部校正工作，藉以探討影響內部校正的因子，研究結果顯示，以棋盤格式的校正版進行內部校正有較小的扭曲量，棋盤格的間距也不宜過大或過小，本研究使用間距 3 公分的棋盤格，校正後的最大扭曲量還不到 1 pixel，十分精確。另外，本研究也發現，距離並不影響校正結果，但相機(鏡頭)是影響校正結果的原因之一，定焦距的鏡頭有助於內部校正的執行，除此，攝影機和校正版的布置是否平行也對於內部校正結果有所影響，說明了未來在從事各台攝影機校正時，在儀器布置上必須相當謹慎。內部校

正的過程獲得了校正參數(DLT 過程中的八個 L 參數)以及主軸點(principal point)的位置，這些資料是本計畫後續進行外部校正以及影像重建時所必要的資料。

本計畫規劃於第二年度下半年於現場架設一個原型觀測站，根據現場調查的結果，以海洋大學工程二館頂樓為較合適地點。

目 錄

摘 要	i
目 錄	iii
第一章 計畫背景與目的	1
1-1 計畫背景	1
1-2 研究目的	4
1-3 工作項目	5
第二章 三維立體影像岸基海象觀測系統	7
2-1 系統組成	7
2-2 觀測系統元件整合與測試	14
2-2-1 系統元件	14
2-2-2 整合測試	22
第三章 立體影像分析相關研究	27
3-1 應用在現場觀測之相關研究	27
3-2 應用在實驗室水槽之相關研究	34
第四章 立體影像重建理論	38
4-1 光學成像原理	38
4-2 實物座標系統與影像座標系統之轉換	43
4-2-1 圖像投影幾何理論	43
4-2-2 直接線性轉換法	52
4-3 內部校正	56
4-4 外部校正	62
4-5 影像匹配與立體影像重建	64
第五章 內部校正結果	68
5-1 影像數位化處理	68
5-2 內部試驗布置與設定	80
5-3 內部校正結果與討論	85
5-3-1 校正點大小之影響	86
5-3-2 相機、鏡頭對校正距離之影響	88

5-3-3 校正距離之影響	88
5-3-4 相機屏幕與校正板平行敏感度	89
5-4 主軸點之計算	93
第六章 現場測試地點評估	96
第七章 結論與第二年工作	99
參考文獻	102
附錄一：內部校正所有案例分析結果	
附錄二：期初評選會議紀錄	
附錄三：期中審查意見與回覆	
附錄四：績效報告表	
附錄五：摘要報告表	
附錄六：期末審查意見與回覆	

第一章 計畫背景與目的

1-1 計畫背景

水是生命的必要組成，地球表面約有四分之三的面積被水所覆蓋。水對生物的發展與演化關係密切，因此瞭解水的分佈和特性，是掌握自然環境的形成和演化的關鍵。根據估計，地球表面約有13億立方公里的水，海洋就占了97.2%。人類大部份的活動均與水息息相關，當前人類對水的利用主要著重在河川、湖泊以及地下水等陸上水資源，但隨著陸上資源的逐漸匱乏，蘊含豐富資源的海洋已成為人類未來生存發展的重要憑藉。近年來，無論農、漁、工業及居住休閒都對土地之需求日與益增，海岸地帶之土地逐步朝高利用率發展，不但從原來之海岸地區延伸到潮間帶之海埔地開發，土地開發之界限更擴展至外海，形成填海造地工程，且開發之水深日益加大，不斷與海爭地以拓展生活空間，海岸地區的發展已成為一不可避免的趨勢。

不論從事海洋資源的開發或是海岸地區發展首要面對的是巨大險惡的海洋環境外力，根據統計數據資料發現，臺灣海域發生的海難事件每年都在數百件以上，直接或間接的人命損失每年上百人以上，而這些海難事件中，有80%是發生在惡劣的海象條件下。造成海象惡劣的主要原因為海洋環境中的許多外力，海洋環境的外力主要包括風、波、流等，這些物理量也是海上或海岸工程設計時，影響工程成敗關鍵性的因素。在各種海洋環境外力中，波浪是非常複雜的因子，潮汐和海流受天體運動及地球自轉的影響，其變化在時間上具有一定的規律性，海浪因受到氣象以及地理條件的影響，變化極不規律，為能掌握波浪的特性，「波浪的觀測與分析」是瞭解波浪特性的重要方法之一。

研究波浪特性可從理論解析計算、物理模型試驗與現場觀測分析三方面著手，其中現場觀測分析是基本且重要的手段，現場觀測資料通常被視為真值(ground truth)，透過分析現場資料可以直接從事問題研究，除此，現場波浪數據更是驗證理論計算以及模型試驗正確與否之依據。由於現場觀測所耗

費的人力物力較巨，實施起來並不算太容易，在臺灣光復後的海岸工程研究工作一開始大多是利用水工模型試驗來進行，開始從事海象觀測的歷史必須回溯到民國五十年代(1960年代)的嘉義海埔地開發以及台中港的興建時期，為了台中港的興建，早在民國46年(1957)間就開始用波高桿目測高潮時淺灘上的波浪，民國48年時改用直結式波高計觀測水深7m處的淺海波浪，民國50年才購置觀標式波高計，直到民國60年在台中港北堤外海水深19m處設置超音波波高計，這段期間的現場觀測作業是為了實施某個工程計畫所進行的短時觀測任務，在臺灣，真正開始從事長期有系統的海象觀測作業是從民國六十年代(1970年代)後期開始，交通部中央氣象局在台北鼻頭角、台東成功、高雄小琉球島以及澎湖東吉島等四處設置底床超音波波高計。民國七十年代後期，由於人口增長，經濟發展，內陸資源逐漸不敷使用，環保意識的抬頭使得工業開發逐漸離開人們居住區域往海岸地帶發展，海岸開發行為愈來愈多，海岸侵蝕問題逐漸被重視，海岸地帶的管理問題也開始被廣泛討論，為了要安全且有效地進行開發、保護與管理海岸地區的工作，海洋資料的收集是最重要的工作之一。中央氣象局「海象測報中心」於民國八十二年(1993)成立後，積極增建海氣象觀測站，自民國八十六年(1997)開始，建置了以資料浮標(Data Buoy)為主的環島海氣象觀測網，其目的是在於收集臺灣環島海域的海氣象資料，做為海氣象預報的依據，在此同時，經濟部水利署自民國八十八年(1999)也開始設立一些海氣象測站，其目的在於海岸地區的防災搶險與海岸管理等用途，上述測站大都是屬於即時且長期的監測。除此之外，學術界也有為了一些研究計畫的執行，從事現場觀測研究，設置了一些短期的現場觀測站。

中央氣象局與水利署所建置的海氣象觀測站是以建立自主的海洋監測技術能力為出發點，事實上，早期的海氣象觀測大都是向國外廠商購置商業儀器，使用商品化儀器的量測，雖有便利的優點，但對於數據的產出過程，資料分析方法是否適合使用者的需要，這些資訊都不是很容易獲得，使用者只能被動地相信所量測的資料，萬一監測的資料不正確，造成學術研究的謬誤或工程設計的失當，這後果可能比沒有提供資料還要嚴重。另外，通常商業儀器在設置後運作的短期間內可能不會出現問題，但在海上惡劣的環境作用下，難免會出現損壞或故障的情形，送回原廠檢修所耗費的時間與金錢甚鉅，最重要的是造成觀測作業中斷，這情形在以海象預報或防災搶險為目的的作

業中是不容許發生的。因此，中央氣象局海象測報中心從民國八十五年開始研發海氣象資料浮標，從研究、設計、製作、佈放、操作、維護與管理等建立了技術自主的系統，由於資料浮標系統的各個子系統均是自行研發而成，對於量測的誤差與資料的品質都可以掌握，並且透過操作經驗的累積，可以瞭解系統不足的地方，持續研發改良，提昇資料品質。

中央氣象局的海氣象監測站網所收集的資料都經過一套品質控管(Data Quality Control)系統來維護品質，這套品質控管系統的內容包含有資料檢測(QC)和資料保證(QA)兩部分，資料檢測係與美國國家大氣總署(NOAA)採用相同的方法，利用本地的海象資料特性加以修正改進，資料保證是指可以令資料使用者增加信心的手段，其中非技術性的教育宣導是要順利從事海象觀測重要的措施之一，近年來由於中央氣象局的努力，一般漁民與民眾已經從以前對放置在海上的觀測儀器從排斥的態度轉變為依賴這些儀器所測得的海象資訊，從原本是海象觀測作業的阻力變成助力。資料品管的方針是”不漏除錯誤資料，不誤刪正確資料”，這套品管系統以兩種方式施行，分別是由電腦執行的”自動品管”與由專人檢查的”人工品管”，不論是自動或人工的品管方法以及前述系統研發與操作的過程均遵守嚴格的規範與程序。

中央氣象局與水利署在台灣環島所建置的海氣象觀測站型式包含了資料浮標(Data Buoy)、氣象站(Meteorological Station)、潮位站(Tidal Station)、雷達站(radar station)等，截至2007年底年為止，其總數量已經超過50個測站，對於掌握台灣環島的海象(波高、週期、波向、方向譜)與氣象(氣壓、氣溫、水溫、風速、風向)資訊有很大的貢獻。其中，資料浮標是一座海上無人氣象站，具有很好的擴充性與耐海性，可以加掛多種儀器如流速計以符合不同任務的需求；另外，由於海岸地區位處陸地與海洋的交界面，此間的氣候資訊相當重要，因此在離岸2公里內設置了岸邊的氣象站，量測氣壓、氣溫、風、溼度、日照與雨量等資料提供氣象預報的參考；而潮位觀測則是引進美國大氣總署的新一代潮位的概念，量測精度到達毫米(millimeter)的等級，對於颱風引起的暴潮與海平面上升的監測有相當的幫助。為了要達到防災以及海象預報的任務，必須得知最新的海上狀況，因此中央氣象局的海氣象監測站網都是具有全自動且作業化(operational)運作的功能，並配備資料即時傳輸系統，監測資料在觀測結束後很快地便可完成分析、品管、編碼的動作並傳送到中央氣

象局。

前文所述的這些海氣象觀測站網大都是屬於短時離散(short-time and discrete)的現場觀測，它們通常是連續取得10-20分鐘的樣本，計算出代表那段時間內的波浪特性，然而對於許多重要的物理過程，諸如碎波、群波、異常大浪(freak or rogue waves)等短暫現象都難以測得，事實上，海面風浪其實是一個三維現象，使用一維的定點觀測不易窺其全貌，除非在波場符合均一性(homogeneous)及遍歷性(ergodic)的假設，才可以使用這些測點的量測結果代表一個區域的波場特性，但海洋通常不會那樣地單純，尤其是在地形、地物變化較大的海岸附近，該區波場特性並不滿足前述假設，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。若能透過遙測技術從事連續觀測(continuous measurement)則對於海洋的掌握必定有很豐富的收穫。遙測技術的發展，一般是透過各種雷達的偵測或是攝影的方式擷取所需的資料。然而，不管是雷達或是攝影，最終處理的是由波浪反射回量測儀器的訊號，利用底片或是類似的機制將傳回的訊號顯影。圖像中所顯現的紋理(或色彩)，則直接反應海面上的水面變化，因此，遙測記錄影像裡每一點的色階代表該瞬時空間域裡波浪對訊號源的反應。隨著科技的進步，目前已經可以將錄製的影像，直接轉換成數位的訊號存入電腦，方便後續的處理分析。最近Wanek and Wu(2006)發展一個自動3維立體影像系統(AT SIS, 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，可以計算出波高與週期等海洋參數，此套設備安置在海邊，在設置經費、維修便利性與安全性上比其他海上觀測設施具有優勢。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。

1-2 研究目的

中央氣象局多年來在現場海象觀測的研發上已經有相當的進展，為了能將在單點上的海象觀測擴展到面的觀測，將短時間的觀測擴展到連續的觀測，海象測報中心推動從事海象遙測技術。海象遙測有很多方式，本計畫利用攝影機從事海象觀測研究。

本計畫將參考國外最先進的近岸海象遙測技術，利用三台攝影機從事三維海況觀測研究。計畫目的在於根據國外先進理論建立三維立體海況影像觀測系統，從事波浪分析，探討將此新觀測技術應用到現場從事近岸海象觀測作業的準確性與適用條件。

完成此研究後，可以掌握立體海況影像關鍵技術，經由現場觀測試驗與比對結果，可以得知此系統應用到近岸海域進行長期觀測的準確性與相關注意事項。若此系統確實可以提供足夠信賴的海況觀測數據，則對於未來有災害性天氣系統侵襲臺灣時，能迅速將觀測影像與數據傳送至氣象局，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，透過此計畫，可將國內海象觀測技術由單點數據形式昇級為三維立體影像資訊，提升國家整體海象觀測技術。

1-3 工作項目

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，民國99年則針對獲得之觀測資料與實測資料分析比對，並探討此新觀測方法之準確性。

逐年之計畫工作內容列點如下：

第一年：

- (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) 完成實驗室影像初步校正。
- (4) 初步完成實地觀測前置作業

第二年：

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

第三年：

- (1) 持續於現場進行觀測收集現場數據進行分析。
- (2) 比對現場實測波浪資料。
- (3) 探討觀測準確性。
- (4) 回傳現場影像與觀測結果至中央氣象局。
- (5) 評估此系統之整體觀測效能、準確性與優缺點。

第二章 三維立體影像岸基海象觀測系統

2-1 系統組成

海洋觀測儀器在考量安裝地點、量測內容、使用環境等因素下，往往必須要做特殊之設計，一般商業化制式的產品並不一定能符合需求，目前中央氣象局的環島波浪觀測與潮位觀測站大多是由國內廠商提供規畫設計，研發適合的設備，減少對外國廠商的依賴。一般而言，一個自動化的海氣象水文觀測系統均包含以下幾個部分：(1)觀測載台(或站房)，(2)儀測子單元，(3)電力供給子單元，(4)資料擷取與分析子單元以及(5)資料傳輸子單元，如圖2-1所示。觀測載台(或站房)是一套觀測系統主要的外觀，如潮位站的站塔(房)、資料浮標的殼體、觀測樁的樁體等，其作用是用來搭載感測器、電力單元、資料傳輸單元等酬載，在設計上必須考慮安全性、耐海性、運輸便利性及裝設簡便性等，如潮位站的站房必須有很好的防蝕處理，設置在海邊容易受海浪侵襲，因此必須要能很堅固地固定在岸邊，若能建造水泥式潮位站房最佳，如中央氣象局的龍洞潮位站、水利署的富岡潮位站等。如為資料浮標，則需考慮具有良好之隨波性，因此其觀測載台設計為軸對稱碟形，也必須考慮到公路運輸的便利性、海上工作的安全性等因素來設計。儀測單元指的是系統中所安裝的海氣象量測感應器(sensor)，這些感測器大多由國內外專業公司生產，如資料浮標上的三軸加速度計、陀螺姿態儀、電羅經、風速風向計、水溫計、氣溫計、大氣壓計，潮位站之超音波潮位計，氣象站的雨量計、濕度計、日照計以及本計畫立體海況影像觀測系統所將使用的攝影機等，這些感應器必須定期經過校驗以維護觀測準確性，本計畫所使用的攝影機也需經過校驗，詳如後文說明。為使觀測系統能長期作業化的工作，必須配備長期穩定的電力供給子單元，在海上從事現場觀測的電力通常由太陽能板、充電電路以及蓄電池提供，太陽能板將光能轉成電能，是源源不絕的再生能力，白天陽光充足時，太陽能板發電量較多，電壓高，除可供整個測站系統使用外，尚可將多餘電量儲存於蓄電池內，當夜晚或日照量不足時，則由蓄電池供應，以保長期操作。至於資料擷取與分析子單元則是所有自動化海氣象水文觀測系統的核心，它控管觀測系統的作業流程，包含觀測、存取、分析、傳輸、

休眠與叫醒等任務，掌握此核心可使觀測作業具有擴充性與技術自主性，如當感測器有更新時，自行研發之資料擷取系統可依據最新感測器之規格調整，隨時都能結合最新感測器進行觀測作業，一般而言，掌握資料擷取與分析技術，即掌握了觀測主要技術。目前常見的觀測資料傳輸方式包含有無線電、大哥大(2G)、GPRS(2.5G)、衛星傳輸、微波以及無線網路等方式，各種方法在傳輸速度、穩定性、通訊費用、維護管理等都有其優缺點。如無線電傳輸安裝容易、技術門檻較低，同時不需要通訊費用，適合於長期作業化需求，然而無線電之通訊品質較易受到天候與外在電訊之干擾，且傳輸距離受限，通訊速率也有所限制；俗稱大哥大的全球通訊系統(GSM)為另一種受歡迎的資料傳輸方式，它耗電量低、通訊品質佳且不易受天候影響，目前被廣泛應用，但其傳輸成本高於無線電方式；GPRS興起後，很多作業化的觀測都已改用GPRS，因為它有費用節省和速率快以及永久上線的特性；衛星通訊則是較高階的資料傳輸方式，其優點與GSM方式相同，但優於GSM的是衛星通訊不需要基地台，因此可以適用於離岸較遠之測站或深海測站，然而其通訊費為上述幾種常見通訊方式中最高者。近年來，為了傳輸大量的影像數據，利用遠距離無線網路(Wireless)是新興的方法之一，隨著技術的進步，想必未來將逐漸以此方式為主要的傳輸方法。

在前述的自動化海氣象水文觀測系統框架下，本計畫所欲研發的立體海況影像觀測系統之架構繪如圖2-2所示，其中的儀測子單元是三台數位攝影機，此系統的電力供給直接採用市內固定供電，此乃因研發階段，不希望把太多精力花費在系統的硬體上，當此方法證實可行後，未來系統設置時再解決電力問題，為了測試研究使用，本計畫觀測系統購置了幾顆蓄電池，儲存必要的電力供緊急情形斷電時系統可以使用；而資料擷取與分析子單元是由一台工業級電腦(IPC)或筆記型電腦(NB)與資料擷取與分析程式組成，而本計畫的研究工作重點就是在於透過學理依據，開發資料擷取與分析的程式；至於資料傳輸子系統則透過固定光纖電路，如學術網路或電信公司提供的專線網路(如ADSL)將觀測影像與結果回傳至中央氣象局。整體而言，由於本計畫之立體海況影像觀測系統預計將設置在岸邊現場建築物上，減少了在電力供給與資料傳輸上所可能遭遇的困難，讓此計畫可以將研究能量集中在分析方法的探究上。圖2-3是節錄自Wanek and Wu(2006)論文的立體海況影像觀測系統，也是本計畫研究在建置立體海況影像觀測系統時的參考對象，但本計畫

預計將此系統應用到海邊現場觀測，因此整體設計將有所改良。

水利署為了海岸防災預警的需要，在本省海岸邊設置了數座海岸影像監測站，如嘉義好美里與塭港、台南黃金海岸、高雄蚵仔寮、屏東塭豐與台東富岡等地，其外觀大致上如圖2-4所示，此海岸影像監測站配備了所有前述自動化海氣象水文觀測系統應有的儀測單元，也具有影像即時傳輸的功能，然而，它並不具有海象觀測的功能，它目前僅具有監視海岸水位與預警的功能，未來若本計畫研究成果證實立體海況影像觀測結果可以滿足中央氣象局的任務需求時，若欲設置長期的立體海況影像監測站時，建議可以參考水利署現有測站之規劃設計。至於在本計畫研究期間，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。圖2-5分別為室內與戶外的儀器之架設計，相當於圖2-4所示水利署的永久測站，本計畫設計以不銹鋼可伸縮支架組合出一套簡便的系統，可方便於研究期間時常之搬運與安裝、拆卸時使用。圖2-6是本計畫將組裝的立體海況影像觀測系統範例，表2-1則列出本計畫組裝之立體海況影像觀測系統的各部分組成。表2-2為本系統之電力計算，搭配四顆蓄電池，備用電力可以使用51小時，超過2天。

表 2-1 本計畫組裝之立體海況影像觀測系統各子單元內容

	內容	功能	數量	主要規格	備註
觀測載台 (或站房)	可伸縮十字形不銹鋼支架	固定觀測系統	2 座 (室內 1 座、戶外 1 座)	寬 1~2m (可伸縮) 高 1.5~2m (可伸縮) 室內支架可收合 戶外支架具固定錨錠鋼板	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±10%，電流 0-30A。 每顆蓄電池容量 12V 120AH	
資料擷取子單元	工業級電腦與影像擷取軟體	控制系統運作並進行分析	1 台	Intel Core 2 CPU 6700 2.66GHz HD 300G 具有 IEEE 輸入介面	
資料傳輸子單元	學術網路、網路控管終端機	可傳回影像並可遠端遙控	1 組	固定 IP	學術網路由海洋大學提供

表 2-2 本計畫立體海況影像觀測系統耗電計算

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

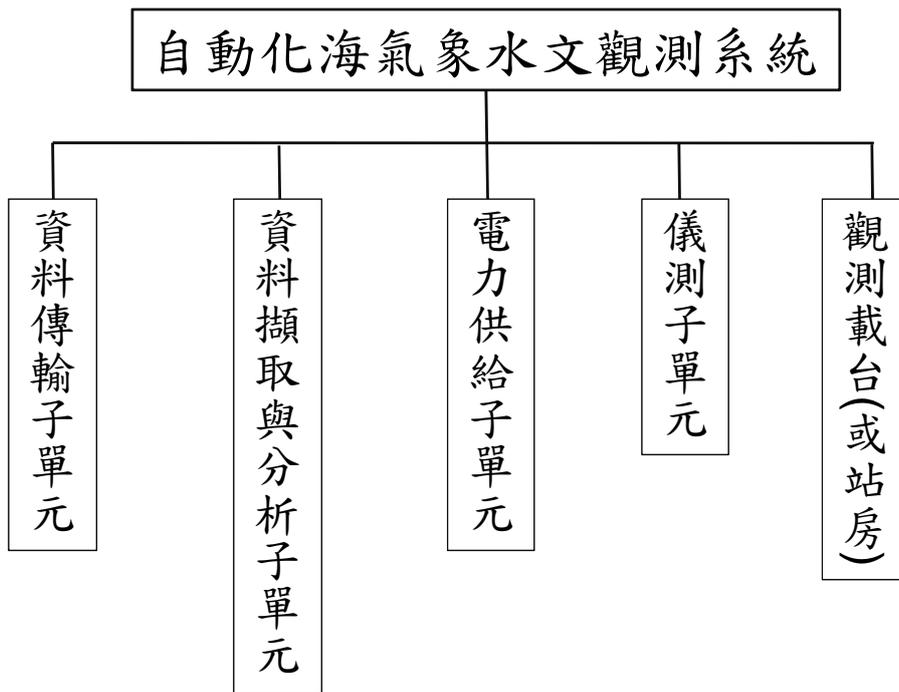


圖2-1 自動化海氣象水文觀測系統組成

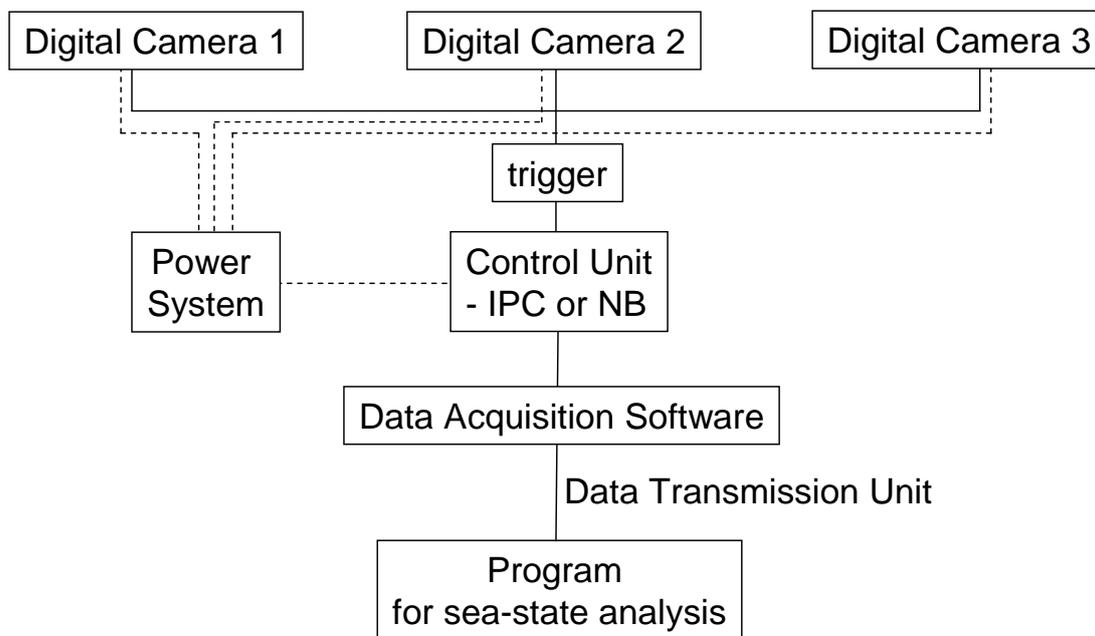


圖2-2 立體攝影系統架構

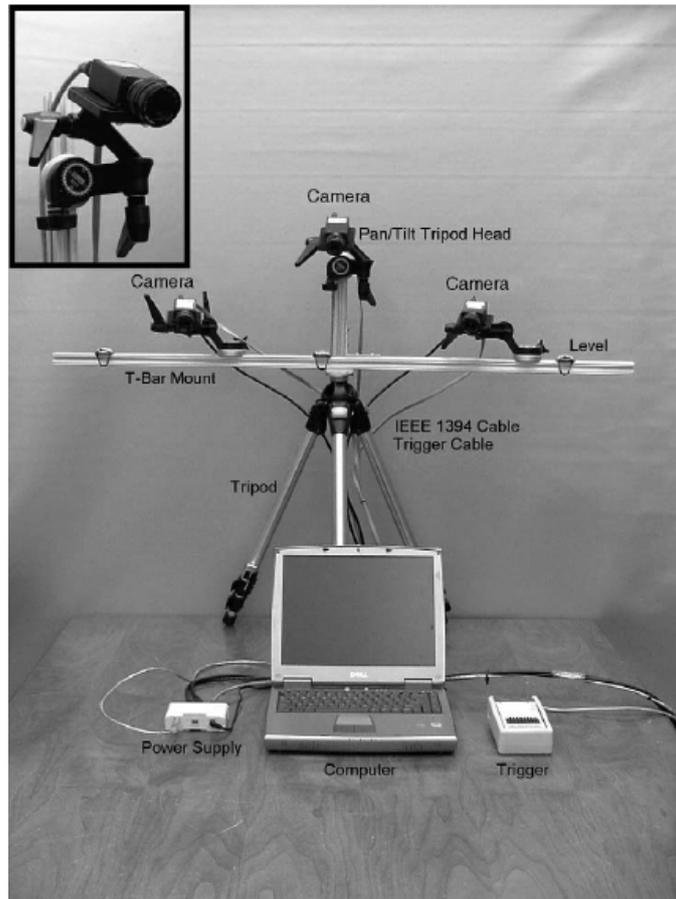


圖2-3 立體海況影像觀測系統
 (節錄自 Wanek and Wu, 2006，為本計畫系統設計之參考對象)



圖2-4 水利署設置在岸邊的海岸影像監測系統外觀

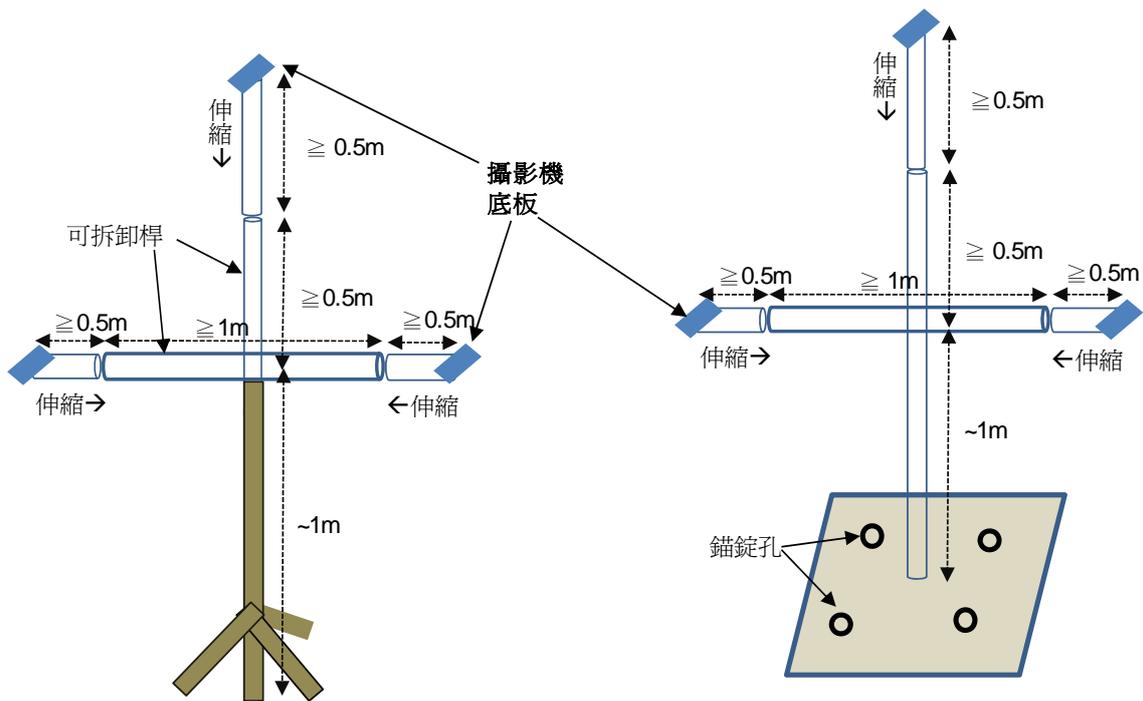


圖2-5 本計畫設計之室內(左圖)與室外(右圖)立體海況觀測系統儀器支架

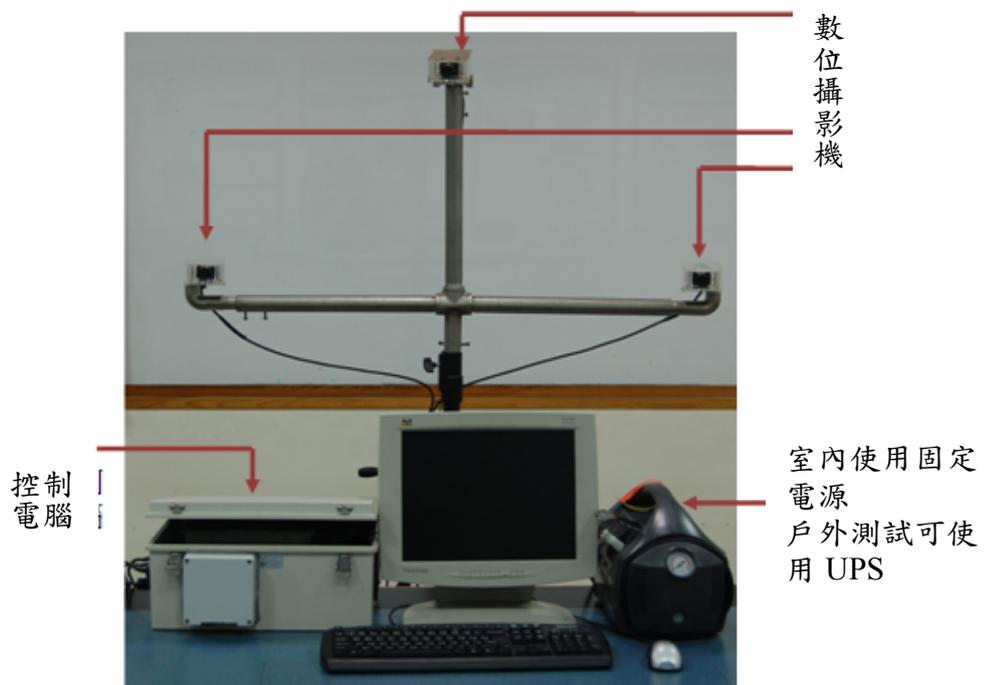


圖2-6 本計畫組裝整合之立體海況影像觀測室內測試系統範例。
相關感應器與子系統單元說明於後文中。

2-2 觀測系統元件整合與測試

2-2-1 系統元件

任何景物都因為有光的反射，被眼睛「看見」而「記憶」下來；在人類的發展歷史中，發現到可以利用針孔或透鏡來「攝取」景物反映過來的影像，再由感光材料把影像長久「記錄保存」，我們通稱為「攝影」。攝影又稱照相，俗稱拍照，日本則是引用中國古代繪畫的術語稱為「寫真」，英文 Photography，是由希臘文 Phos 與 Grapho 兩字的結合，Phos 是「光」的意思，Grapho 是「描繪」的意思，合起來就是「利用光來描繪」的意思。相機(camera)是攝影的工具，相機成像的基本原理就是所謂的針孔成像原理。當光線經過針孔進入暗箱時，外界的景物會在反射光成直線進行的原理下，於箱內的另一面呈現上下顛倒，左右相反的景物影像，但因為針孔成像的影像太過模糊，後來就發明以透鏡來代替小圓孔，而更求影像的清晰，現在更使用多片透鏡的組合來成像，多片透鏡組裝於鏡筒內，這就是所謂的鏡頭(Lens)。

本計畫所使用之鏡頭為 CCTV (Closed Circuit Television) 鏡頭。CCTV 鏡頭是為了在寬廣範圍中確認影像而開發，所有型號的光圈及焦點均可利用附設的鎖緊螺絲，隨使用者的意向而調校。表 2-3 為本計畫所使用之鏡頭規格，圖 2-7 為 11.5mm~69mm 可調焦距式 CCTV 鏡頭，圖 2-8 分別為 16mm、25mm、35mm CCTV 鏡頭。

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，本計畫採用的攝影機為加拿大 QImaging 公司出廠的 QICAM 高速攝影機，如圖 2-9，取樣速度達到每秒可以取樣 10 張(10fps)以上影像，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，因此傳輸方式也採用 IEEE 1394 介面，最重要的是此數位相機已內建有數位輸出，數位解析度為 12bit，代表對拍攝物體的反應可以用 0 表示到 4095 來表示。QICAM 攝影機之規格如表 2-4。

表 2-3 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

表2-4 QICAM 12-bit Mono FAST 1394規格

型號	QIC-F-M-12
CCD感應器	
感光像素	1392×1040 (140萬像素)
Binning	2x2, 4x4, 8x8
感應器型式	SONY 公司單色循序式掃瞄 CCD
像素大小	4.65μm×4.65μm
數位解析度	12bits
輸出頻率	20, 10, 5, 2.5MHz
取樣速度	10fps
相機	
電腦平台/操作系統	Windows & Mac
操作介面	IEEE 1394
資料速度	40MB/s
觸發方式	內部觸發、軟體觸發或外部觸發
電力需求	7W
重量	635 克



圖 2-7 本計畫所使用之 11.5~69mm 可調焦距式 CCTV 鏡頭



圖 2-8 本計畫所使用之 16、25、35mm 定焦距 CCTV 鏡頭



圖 2-9 QICAM 高速攝影機外觀

前述所提到的每秒 10 張影像(10 fps)亦即 10 frames per second，”frame”就是所謂的「圖框」，或者簡稱為「畫面」，譬如電影和電視都是利用人的視覺暫留，連續播映不同的圖片，達到動畫之效果，為了讓動作流暢，電影每秒放映 24 格畫面，而電視則每秒播放 30 個的畫面。電視螢幕會出現影像是由於電子槍射出的電子，經由磁場偏向後打在屏幕上而發光成像，因此每一個圖框都由電子槍的掃描線畫出來。美國國家電視系統委員會(NTSC)制訂的電視畫面播映標準，明定每幅畫面必需具備 525 條掃描線，及每秒鐘必需播映 30 幅畫面，而歐洲國家常用的 PAL 電視系統則有每個圖框 625 條掃描線，且每秒 25 個圖框的電視系統。

實際上電視或攝影機所使用的掃描方式為有兩種，分別是交錯式掃瞄(Interlaced scan)與循序式掃瞄(Progressive scan)或稱為非交錯式掃瞄(Non-Interlaced scan)。交錯式掃瞄是指先掃描 1、3、5、7..... 等奇數掃描線以構成第一個圖場 (field)，然後再掃描 2、4、6、8..... 等偶數掃描線以構成第二個圖場，兩個圖場構成一個圖框。而循序式掃瞄(又稱為 P-Scan)則是相對於交錯掃瞄則是從第一條掃描線一直掃到最後(依序自 1、2、3、4、5 至 525 線)，同時其速度也提高到每秒 60 個圖框 (31.5 kHz, 525 線 X 60 秒)，交錯式掃瞄和循序式掃瞄的概念如圖 2-10 所示。通常交錯掃瞄是以小寫的 i 來表示，例如 1080i，循序掃瞄則以小寫的 p 來表示，例如 720p。

攝影機的設計原理是從照相機的概念發展而來的，影像從攝影機的鏡頭進來，經過分色器之後由三個像手腕一樣粗的真空管分別處理 R、G、B 三原色，再經由一連串的電子處理，利用磁頭以每一秒數十張的畫面方式紀錄在錄影帶上，之後經過真空管的體積改良縮小，到了 1980 年初由日本 SONY 研發中心發明出電荷耦合原件(couple charge device)，也就是我們俗稱的 CCD，不僅解決了真空管容易燒掉的問題，同時攝影機的體積也相對的縮小許多，CCD 基本上就是取代了真空管，也就是將鏡頭拍攝進來的畫面先透過三稜鏡與分光器分成 R(紅)、G(綠)、B(藍)三種不同的光線，然後反射到 CCD 上，再以矩陣迴路轉換成表示明亮度的亮度訊號和表示顏色的兩種色彩訊號經過類比合成處理後轉換成電子訊號，最後再經過磁頭轉換成磁氣訊號到錄影帶上。從 1995 年開始攝影機數位化的技術越來越成熟，將原本從 CCD 輸出的合成訊號由磁氣訊號紀錄在錄影帶的方式，改變為合成訊號經過壓縮編碼器

編碼成數位訊號，並以數位信號的方式紀錄在存取媒介上(如錄影帶或硬碟)。另外有一種電腦系統裏的晶片進行加工後也可以作為攝影機(或相機)中的感光器，即互補金屬氧化物半導體(Complementary Metal Oxide Semiconductor)，簡稱 CMOS。CMOS 和 CCD 的差別是，CCD 感應器在光線經鏡頭會聚其上時，光敏元件因感受光強的不同而感應出不同數量的電荷，經記憶體暫存後，由電荷轉移電路、電荷資訊讀取電路按時鐘脈衝順序讀出電荷資訊，送往 A/D 轉換器，經轉換形成與光強度成比例的二進位數字，此二進位數字即對應一個像素的資料；而 CMOS 感測器，則是在經過光電轉換後產生的圖像資訊經由場效應管直接產生與光強度成正比的電壓（或電流）信號，送往 A/D 轉換器轉換為數位信號。一般而言，採用 CMOS 感測器的數位相機一般低於 35 萬像素，主要面向以家庭、個人用戶為主的低端市場。

由於電子攝影機的掃瞄線多寡直接影響畫面解像度的呈現，掃瞄線密度越高解像度就越佳，而計算水平掃瞄線數量多少我們稱為垂直解像度(Vertical Resolution)。另外一種可以比較出畫面品質高低的數據稱為水平解像度(Horizontal Resolution)，也就是計算一條掃瞄線裡電子數的多寡。本計畫所採用的 QICAM 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 $4.65\mu\text{m} \times 4.65\mu\text{m}$ ，數位解析度 12bits，在全解析度(full resolution)狀況下，每秒可拍攝 10 畫面，若在使用 binning 技巧以及使用感興趣區取樣(Region of Interest, ROI)功能的輔助下，每秒可拍攝達 165 畫面，所謂 Binning 是一種圖像讀出模式，將相鄰的像元中感應的電荷被加在一起，以一個像素的模式讀出，Binning 分為水平方向 Binning 和垂直方向 Binning，水平方向 Binning 是將相鄰的行的電荷加在一起讀出，而垂直方向 Binning 是將相鄰的列的電荷加在一起讀出，Binning 這一技術的優點是能將幾個像素聯合起來作為一個像素使用，提高靈敏度，輸出速度，降低分辨率，當行和列同時採用 Binning 時，圖像的縱橫比並不改變，當採用 2:2 Binning 時，也就是說水平和垂直兩個方向相鄰的兩個像素(pixel)當做一個像素，圖像的解析度將減少 75%，binning 圖像讀取方式如圖 2-11 所示。而此攝影機採用的是一個焦距 11~69mm 的可變焦鏡頭，可由內部觸發、軟體觸發或外部觸發等方式來控制。

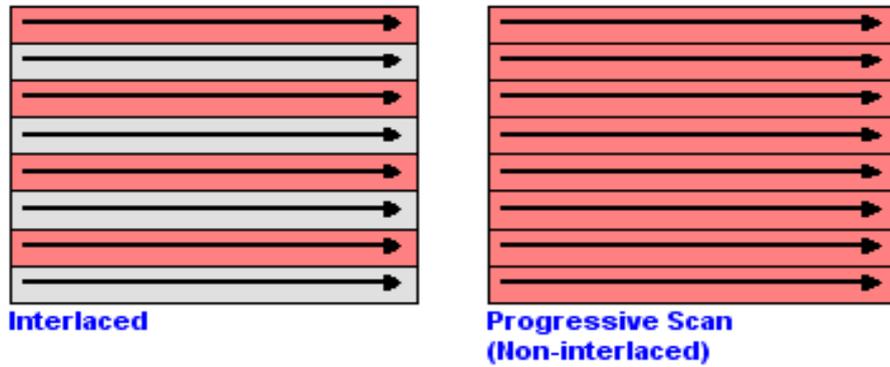


圖2-10 交錯式(左圖)和循序式(右圖)掃描成像示意圖

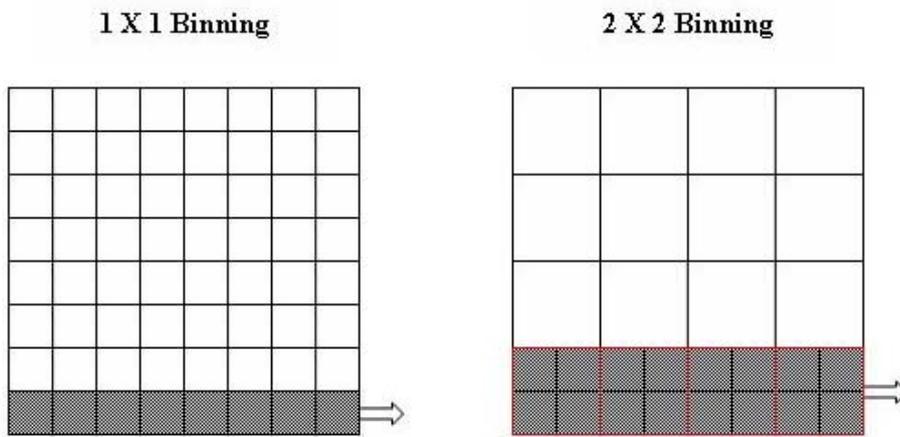


圖2-11 Binning圖像讀取模式的示意圖

高速數位攝影機(high-speed digital camera)所錄製下的畫面經由IEEE 1394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2-5。圖2-12為本計畫所使用之工業級電腦，圖2-12(3)為電腦背面，顯示電腦共有3張IEEE1394卡，雖每張卡有3個接頭，但每台高速攝影機必須接到不同之1394卡端，以避免影響其讀取速率。

本計畫所使用之影像擷取軟體為NorPix公司所研發之StreamPix，StreamPix軟體是專為數位高速度圖像擷取所設計，它可以將攝影機所攝取之畫面完整的存入儲存裝置內，並且支援同時多部攝影機之影像拍攝及多影像的擷取，影像輸出可儲存BMP、JPEG、TIFF、PNG、AVI格式，支援IEEE 1394、Color RGB、NTSC、RS170、USB、CameraLink, GigE傳輸方式，此外其人性化介面使操作更為簡易。圖2-13為StreamPix軟體操作介面。由於StreamPix

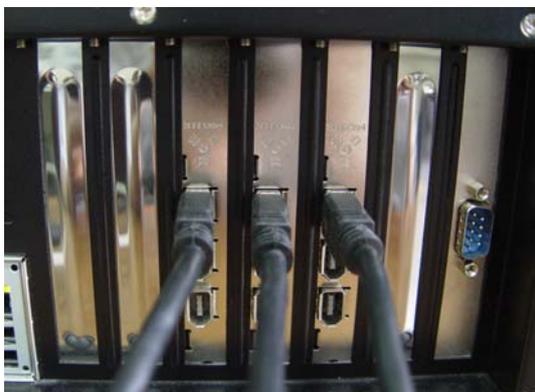
為付費授權之軟體，安裝好StreamPix後，使用前必須先插入USB Key 於工作電腦的USB插孔中解鎖，才可讓該軟體抓取攝影機之影像。

表 2-5 本計畫所使用工業電腦詳細規格

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



(1) (2)



(3)

圖 2-12 (1)本計畫所使用工業電腦之正面圖 (2)背面圖
(3)與高速攝影機連接之 IEEE1394 端

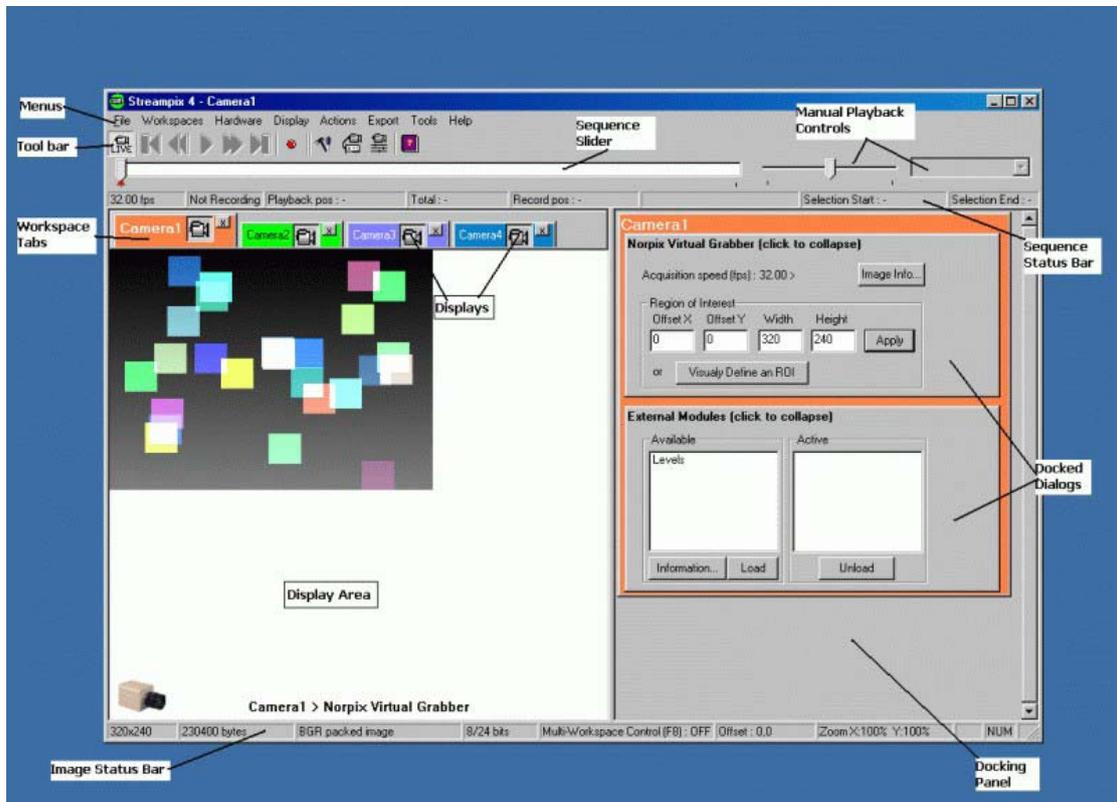


圖2-13 StreamPix軟體介面

將以上各元件整合後即為本計畫用以測試之海象觀測系統。本計畫測試所使用之各元件之組裝整合圖如圖2-14，首先將數位攝影機固定於不銹鋼可伸縮支架上三端點。再將伸縮支架與三腳架結合，接著將攝影機與工業電腦以IEEE1394傳輸線相連，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，藉此分析定位點之準確性。如何使用StreamPix軟體擷取相機畫面之詳細操作步驟將於5-1影像數位化處理章節中介紹。



圖2-14 本計畫測試所使用之各元件組裝整合圖

2-2-2 整合測試

各元件整合完成後，本計畫將系統搬至海洋大學距離海邊最近的工程二館樓頂進行測試，此處使用單一相機，固定其位置，拍攝不同鏡頭所呈現之實際海面波浪，並將畫面影像擷取下來。圖2-15為系統測試地點，圖2-16為系統測試實況，圖2-17 ~2-20為各鏡頭所拍攝畫面，各鏡頭參數列於表2-3，本測試之攝影機距離觀測海面約為100公尺。

另外，欲了解鏡頭拍攝時於實際畫面上呈現的距離範圍，便於海洋大學活動中心6樓，實際架設系統攝影機拍攝操場。以鏡頭焦距 f 為11.5mm，俯角為 22.5° 為例，利用顯示於影像畫面上的邊界四點，對應到操場上的實際位置，經雷射測距望遠鏡量測後，得到四點之間的大約距離範圍，標示於圖2-21上。



圖2-15 本計畫儀器測試地點(海洋大學工程二館頂樓)



圖 2-16 系統測試實況



圖2-17 由S6X11鏡頭(11.5mm)所拍攝之畫面



圖2-18 由ML-1614鏡頭(16mm)所拍攝之畫面



圖2-19 由ML-2514鏡頭(25mm)所拍攝之畫面



圖2-20 由ML-3519鏡頭(35mm)所拍攝之畫面

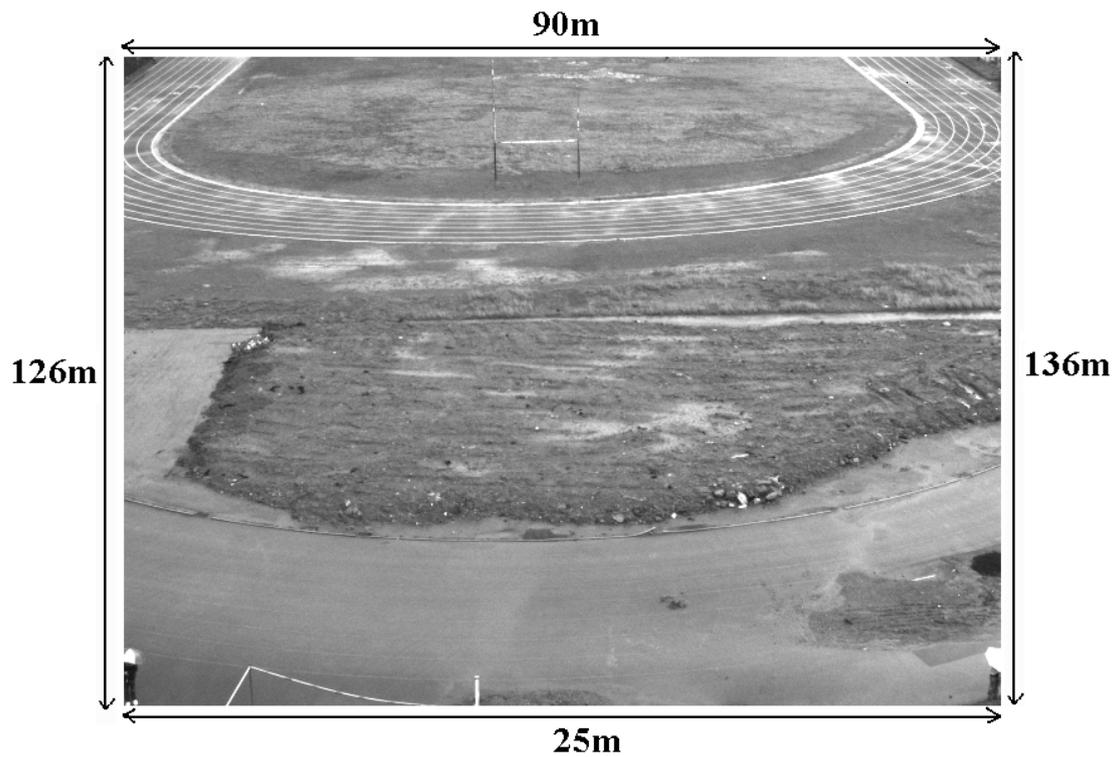


圖 2-21 利用 11.5mm 鏡頭實測取得的影像實際範圍

第三章 立體影像分析相關研究

本計畫為利用攝影機從事立體海況影像觀測技術研發計畫，為瞭解國內外相關技術的研究概況，本章整理所蒐集的文獻，整理報告將攝影機應用到現場與實驗室的研究成果，以掌握這領域的研究進展，減少摸索的時間，並希望能從此間獲得研究靈感，讓本計畫研究有正確的研究方向與良好的研究成果。

3-1 應用在現場觀測之相關研究

攝影機在十九世紀被發展出來後，除了改變人類對於儲存景物的方式之外，對於工業界、學術界等各行各業領域都提供了非常有用的應用，尤其是高速攝影技術的改良後，更提昇工業界諸多的進步，譬如利用高速攝影紀錄汽車撞擊時各部位的反應，找出脆弱點改進汽車設計、彈道分析、流體力學分析、昆蟲或鳥類振翅運動分析、燃燒過程等。在海洋與海岸研究領域，利用攝影技術從事的研究如質點影像速度儀(Particle Image Velocimetry, PIV)的應用，非常熱門，很多研究也獲得非常好的成果。

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

Santel et al. (2004) 在德國北海一島嶼之海岸用3維立體影像法量測碎波帶之波浪，其目的為將立體數位影像序列(stereoscopic image sequences)經影像匹配(image matching)後重建出數位水面模式(digital surface model, DSM)，該

文使用電腦軟體LISA (Linder, 2003)進行影像匹配，此軟體從立體數位影像中先對預定之種子點(seed points)以交相關係數(cross correlation)作逐點匹配(point-wise matching)，該程式進一步可產生之立體影像雲點(three-dimensional point cloud)，將這些雲點內差就可得到數位水面模式，如圖3-1、圖3-2所示。此研究應用此等影像匹配法在碎波帶之波浪測試，他們將攝影機架設於岸邊建築物頂，高度約40m，距影像區最遠400m，而相機俯角約10度，量測區域中心點離攝影機約200m，因此影像比例約1:16000。因量測區域內有波高計，影像量測之水面與波高計可互相比對，圖3-3為量測56秒、取樣頻率8Hz，共450張影像得到的結果，圖中顯示在10:03:58時之波谷有35cm之誤差，Santel et al. (2004)指出這是由於海面影像之紋質不佳，分析方法已達到極限的緣故，另外，在10:04:21處，水面高度差別小於5cm，顯然影像匹配法有不錯的結果。

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

(ground control points, GCP)在實物空間中的座標與相片平面上的座標以求解，Holland et al. (1997)提出一個兩階段的率定方法解決需要尋找地面控制點的問題，他們並把率定後的攝影機應用到現場觀測研究上，圖3-4是利用十張影像平均來分析近岸碎波帶的位置，圖3-5則是從影像中判釋現場漂流浮球(drifter)在沿岸(alongshore)和離岸方向的漂流運動時序列，此方法可以瞭解沿岸流場的分佈，他們的研究結果顯示漂流速度約0.1m/s，向離岸的運動狀況跟碎波衝擊距離有很大的關係。

陳等(2006)用動態輪廓模式來偵測、追蹤連續影像上的邊緣特徵，配合影像座標轉換與現場測量，來分析旗津海岸公園在夏季季風以及珍珠颱風期間之海岸波浪影像，因其可得實際影像尺寸，可追蹤波浪淺化時波峰線之變化以及波浪之週期、波長、波速、碎波位置等相關數據。該研究將Sony DCR-TRV40 DV與所使用Pentax PCS-335之光波測距經緯儀架設於旗津旗後砲台，攝影鏡頭與水平線夾角6度，DV影像有155萬畫素。此研究之影像座標之轉換成實體座標亦使用Holland et al. (1997)建議之直接線性轉換(Direct linear transformation)法，另在影像範圍內設置兩地面控制點，用光波測距經緯儀測出控制點間之距離，以還原影像點間之實體距離。

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

港灣出入口航道的波浪可能會影響到進出船舶航行的安全，港口航管單位有必要知道航道的波浪特性，用影像測量法的好處是在交通頻繁的航道很難用傳統的測波儀。MacHutchon et al. (2008)敘述他們在南非開普敦港之航管大樓屋頂架設數位影像系統(圖3-6)，該系統僅錄未校正之數位影像(即CCTV，閉路影像系統)，由影像之光強度可看來波峰位置(圖3-7與3-8)。圖3-9為將兩張圖合併即可看出波長為11-41 m，波速與週期分別為2.0-13.0 m/sec與1.2-8.2 sec。另他們亦將應用Wanek and Wu (2006)之立體影像系統於此現

場測量港灣航道的波動。

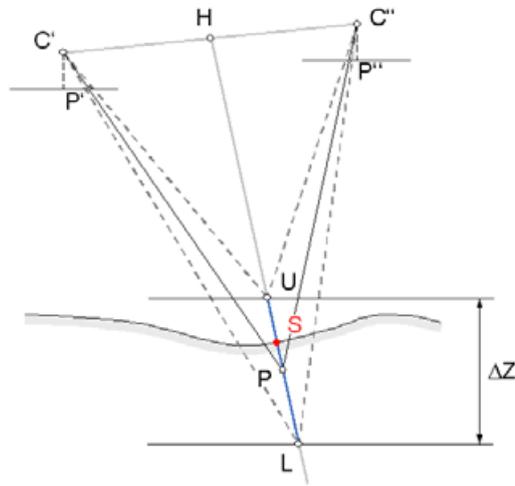


圖3-1 Santel et al.(2004)使用之逐點匹配步驟以獲取數位水面結果之示意圖

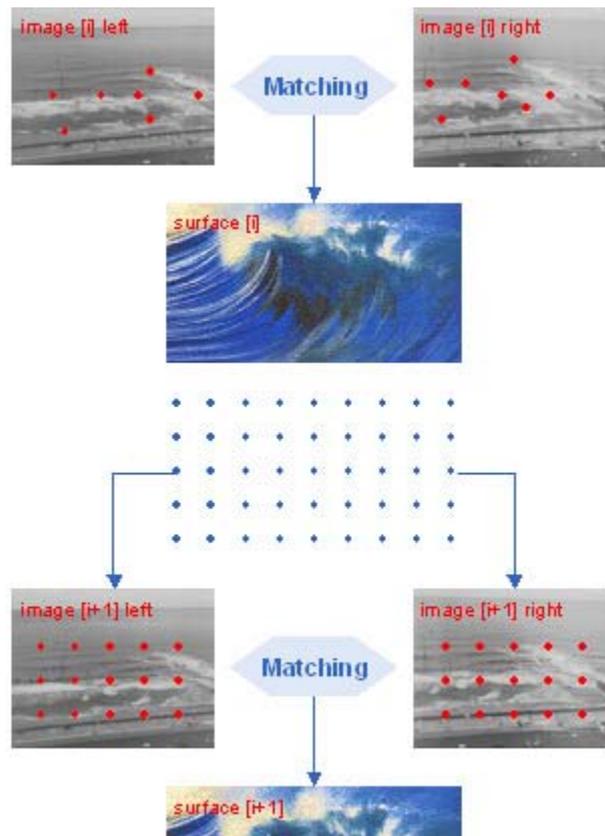


圖3-2 Santel et al.(2004)分析現場波浪表面時間之流程

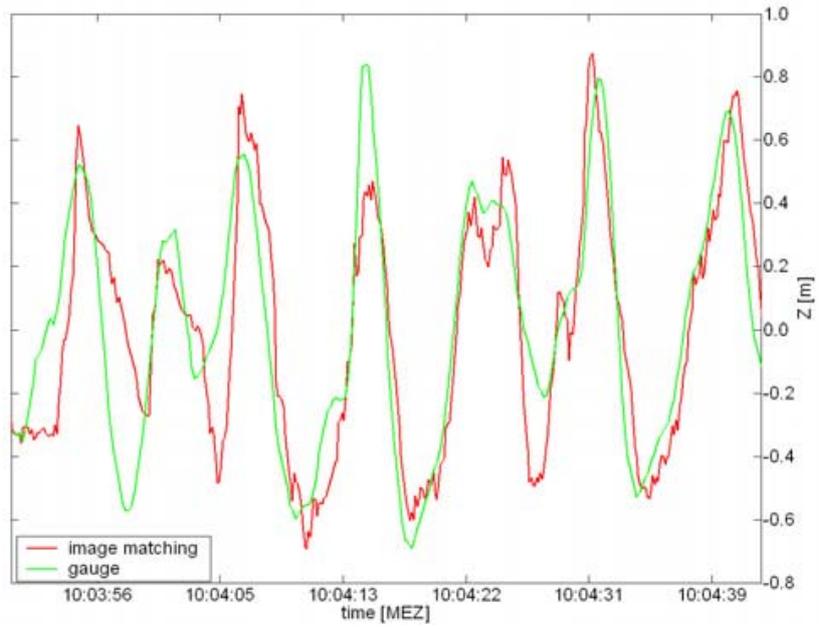


圖3-3 影像匹配法(image matching)結果與波高計(gauge)之比對

(Santel et al., 2004)

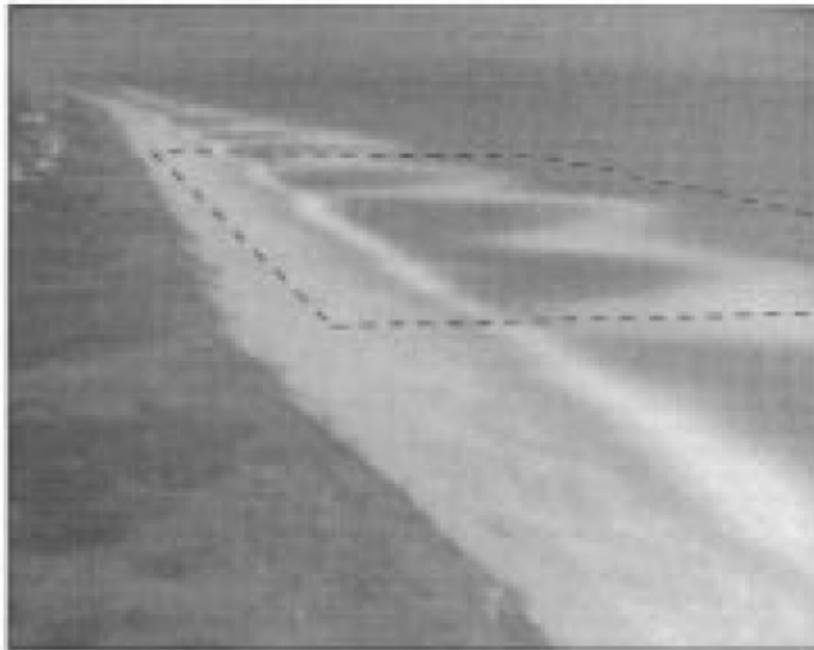


圖3-4 Holland et al. (1997)利用十張影像平均分析碎波帶位置的結果

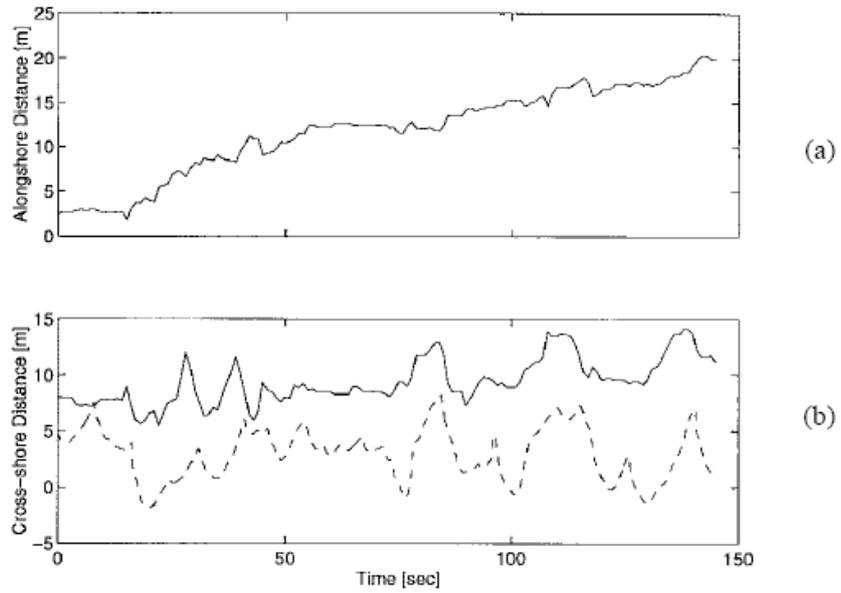


圖3-5 (a)利用攝影機判釋水面漂流浮球的軌跡以計算漂流速度，結果顯示約 0.1m/s；(b)向離岸的漂流運動狀況(實線)跟碎波衝擊距離(虛線)有很大的相關性 (摘自Holland et al., 1997)



圖3-6 南非開普敦港與其航管大樓 (MacHutchon et al. 2008)

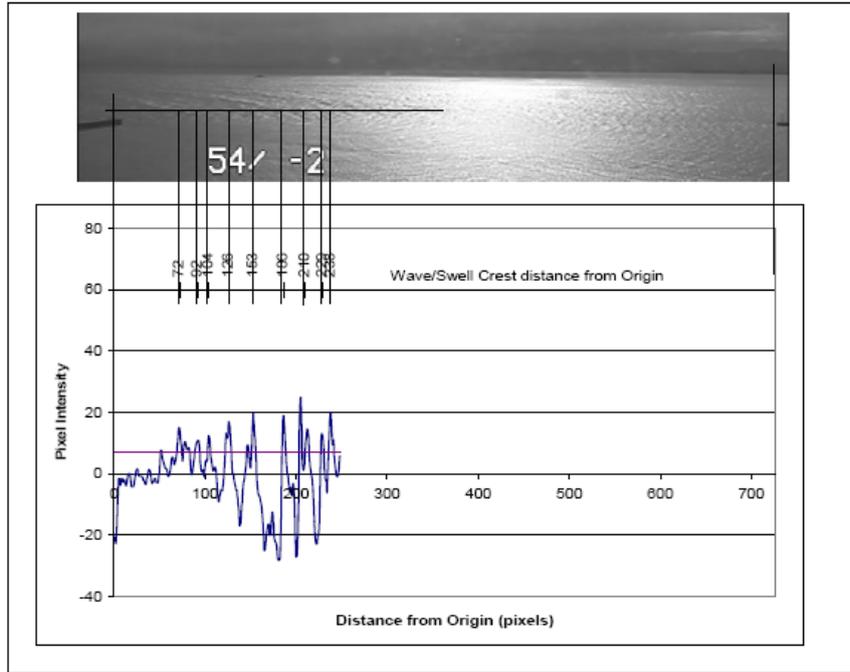


圖3-7 像素光強度顯示波峰在時間 $t = 0$ sec (MacHutchon et al. 2008)

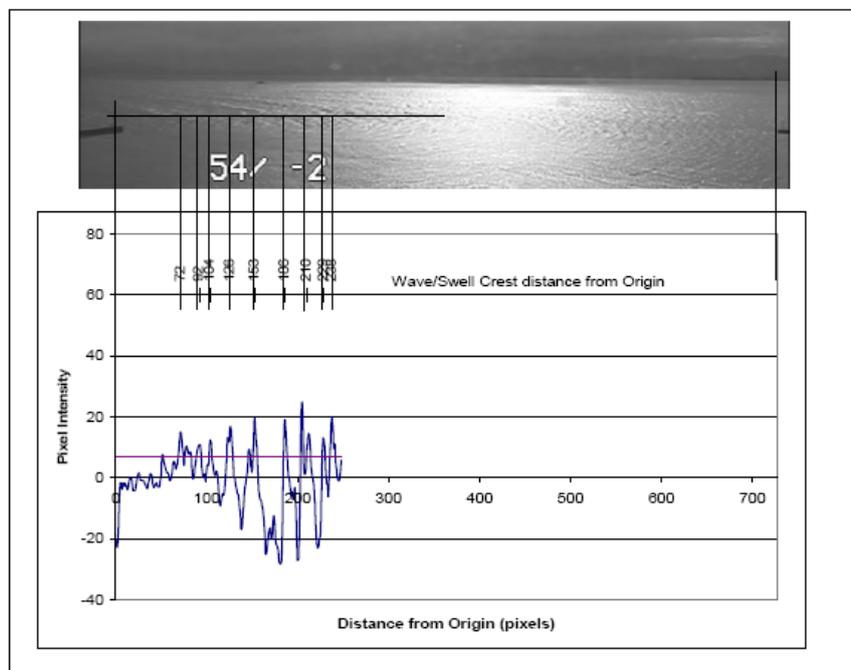


圖3-8 像素光強度顯示波峰在時間 $t = 1$ sec (MacHutchon et al. 2008)

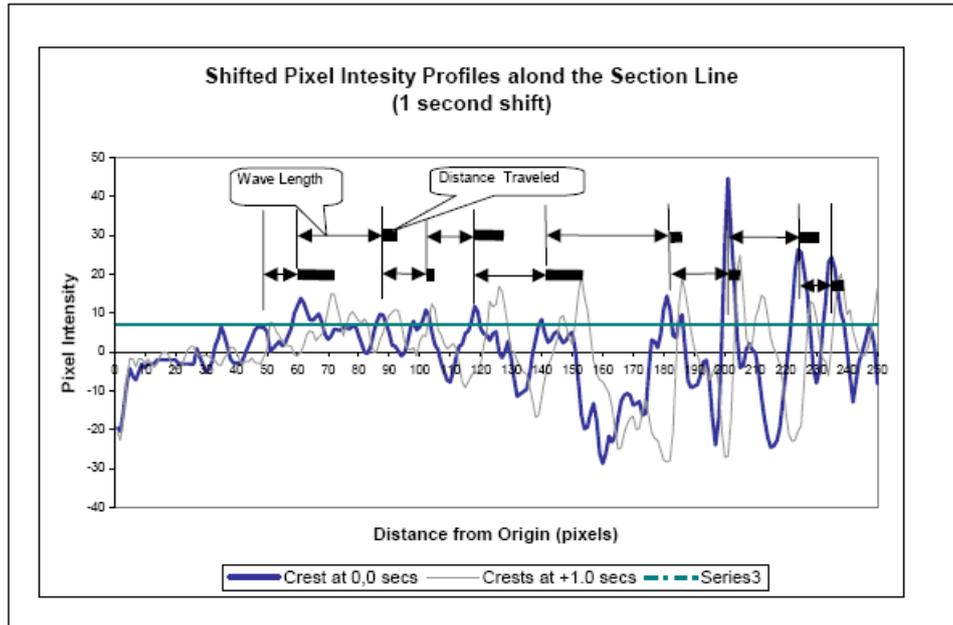


圖3-9 1秒時間差之像素光強度(圖3-7與圖3-8)之合成圖(MacHutchon et al. 2008)

3-2 應用在實驗室水槽之相關研究

在海岸與海洋領域，攝影機最多的應用仍然在實驗室水槽試驗中，本文收集整理近年來有關攝影機在實驗室的應用案例，提供本計畫應用於現場時的參考。林等(2005)運用二維影像分析中之邊緣偵測法之一的動態輪廓模式(Active Contour Model)來追蹤断面水槽內波形之時序。該研究用單一高速攝影機以每秒500張，每張240×210像素之直立壁前孤立波破碎時影像。他們分析20張連續影像，每張時間間隔為1ms。他們認為動態輪廓模式可成功得追蹤出波形，甚至不連續之輪廓亦可被追蹤。不過此法在疊代運算較費時。

Ferreira *et al.* (2006)嘗試用立體影像法來測量水波槽內模型拋石堤面之破壞。其主要動機是為了節省將水波槽內水放掉來檢視堤面之破壞所須時間。因此欲用兩台相機之立體影像照相技術來測量堤面消波塊流失量。此法與用立體影像測量波浪水面不同的是還須考慮光線通過水層之折射。為此該文已設計一套Matlab軟體程式，此程式組可用來執行(1)相機校正：寬高比、焦距、主軸點 (principal point)、及變形。(2)影像重建：此步驟分別對左右相機水線上與水線下影像進行。(3)資料整合。此研究重點之一在應用Snell's Law

處理水線下影像。利用此Matlab軟體程式描繪出之水波槽內模型拋石堤面之曲線與用雷射儀測量之曲線相當吻合。

周等(2003)以嘗試利用電荷耦合裝置(Charged Couple Device, CCD)攝影機拍攝實驗水槽中的波浪場的變化，結果顯示，在規則波條件下，週期小於1.1秒的遙測波浪與波高計的測量結果相當吻合，但當波浪週期增加時，其相對誤差也隨之而增加。而在遙測不規則波時，在波浪斜率小於0.04時，遙測所得之示性波高週期，則小於波高計的測量結果。同時也發現，在固定的光源，相同的規則波條件下，測點的照度越強，該測點所反應的灰階振幅越小。所以在實驗室中，利用光學遙測波浪時，必須考慮各測點受光源照度不同的問題。

圖3-10為Piepmeier and Waters (2004)在波浪實驗室的光學遙測波浪系統，其觀測幅角為 50° ，在水槽中可用的波浪觀測面積為 $0.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 。圖3-11為利用此系統，在週期為1.1秒的規則波條件下，所觀測到的立體對影像。再利用Point Grey研究團隊在Matlab環境下所發展的Digiclops軟體，處理成圖3-12的三維波浪影像。在這研究中，所反演出的規則波的波高與波長，和現場的波高計測量結果十分接近。Piepmeier and Waters (2004)在實驗過程中也發現，在實驗水槽中利用光學遙測波浪時，因為天花板、水槽底板等結構物的影響，使得水面波紋不易辨識。由於拍攝影像可用幅寬的限制，使得短波長波浪的估算的準確度較好。

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

Keller and Gotwols(1983)利用CCD攝影系統觀測實驗室裡水槽波場的變

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

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

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

除此之外，Hilsenstein (2005)、Piepmeier and Waters (2004)均利用兩台的

數位攝影機在實驗室中紀錄水槽中的波動，Benetazzo(2006)使用雙眼望遠鏡頭(binocular)來從事波浪觀測研究，本計畫則擬應用Wanek and Wu(2006)所提出來的的方法，利用三台數位相機，觀測近岸水位進行立體映射(stereo imaging)，數位化的海面動態資料可以用來重建波場。

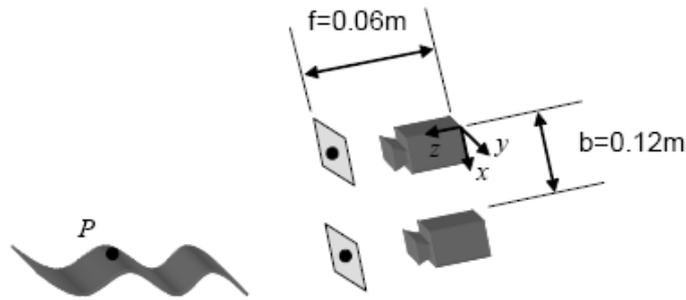


圖3-10 Piepmeier and Waters (2004)在波浪實驗室的光學遙測波浪系統。

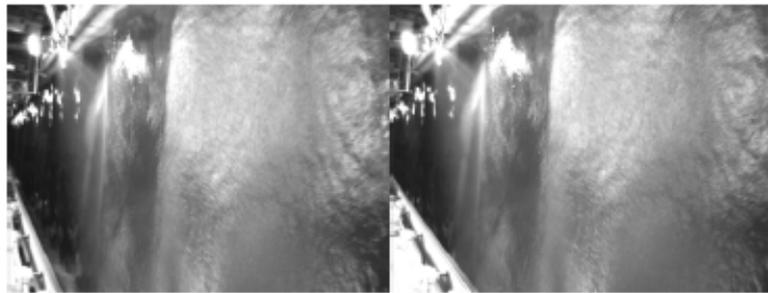


圖3-11 Piepmeier and Waters (2004)在波浪實驗室的光學遙測波浪系統所拍攝到的立體對。波浪週期為1.1秒的規則波。

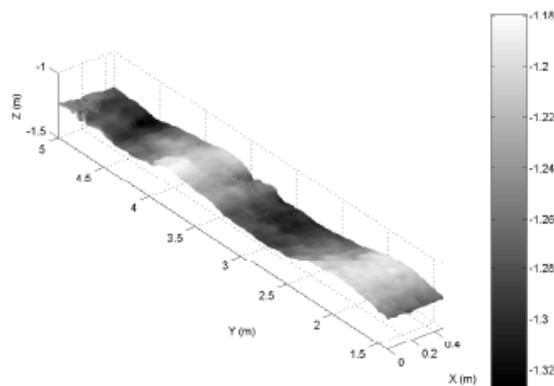


圖 3-12 Piepmeier and Waters (2004)在波浪實驗室的光學遙測波浪系統所拍攝到的立體對，所反演出的三維波浪圖。波浪週期為 1.1 秒的規則波。

第四章 立體影像重建理論

4-1 光學成像原理

攝影機是攝影測量上主要獲取量測資料的工具，具高性能的透鏡與濾鏡等光學組件的攝影裝備，可攝取良好的地面資訊。在幾何光學上，光被視為呈直線前進的射線，線與線間互相平行成平行光束，這些平行光線通過正透鏡後，會聚於一點(如圖4-1)。就物理光學而言，光視為電磁波，以不同的振幅、頻率與相位的波動向前傳播。平行光波通過正透鏡後，波形被改變成球形波，會聚於理論上的一點(如圖4-2)。

一般而言，在研究透鏡的成像性質時，通常不考慮透鏡的厚度。一平行於透鏡光軸的平行光束入射且通過此透鏡，並交會於F'點，此點稱為主焦點(如圖4-3a)。主焦點距透鏡中心的長度，稱為焦距 f 。此焦距長度 f 與玻璃介質的折射率 n ，透鏡的左、右曲面的曲率半徑 r_1 和 r_2 有關，其關係式如下：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.1.1)$$

當左曲面的曲率中心位於透鏡的右方，則 r_1 為正，而當左曲面的曲率位於左方則 r_1 為負值。當右曲面的曲率中心位於透鏡的左方，則 r_2 為正，反之則 r_2 為負。如果所計算得到的焦距 f 為正值，則此透鏡稱為正透鏡，而焦距 f 為負值，則為負透鏡，圖4-3為 r_1 與 r_2 均為正值的正透鏡。當平行光束由不同方向從透鏡左側入射通過後，在透鏡右側，理論上都會聚通過主焦點並且垂直於透鏡光軸的焦面上(如圖4-3b)。

在圖4-4中，位於透鏡左側主焦點F之後的A、B兩物點各發出三條光線，AA'平行於光軸，經折射後沿A'a線經過主焦點F'。光線AA''直接通過透鏡中心，並不改變方向，再沿著A''a與A'a交會於a點。而光線AA'''則經由共軛主焦點F至透鏡，折射後沿平行光軸之A'''a行進，與A'a和A''a交會於a點。相同原理下，物點B成像於b點，使物體AB形成實像於ab。

物體與透鏡中心間距離 p 稱為物距，而像與透鏡間的距離 q 稱為像距，與焦距間的關係如下：

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (4.1.2)$$

依上式，當 p 為無限大時，則 $q=f$ 。因為 ΔOAB 與 ΔOab 為相似三角形，所以物體 AB 經透鏡成像於 ab ，其成像大小與原物體大小的關係比值稱為放大倍率 M ，其計算式如下：

$$M = \frac{\text{成像大小}}{\text{物體大小}} = \frac{q}{p} \quad (4.1.3)$$

在圖4-5中，物點 A 置於透鏡前的物距 p_A ，從(4.1.2)式得知其成像於透鏡後的像距 q_A 。如果 A 點向前移動到 A_N 點，則會聚像於 a_N ，因已在焦點後方，使得成像模糊。同理，若物體從 A 點移到 A_F 點，則將聚像於焦面之前，也會造成影像模糊。一般而言，人類眼睛辨識像點的直徑約為 0.25mm 。但如果影像要投影在銀幕上，則模糊程度就必須縮小，其像點直徑約為 0.025mm 。圖4-5中模糊圓直徑 c 值的大小由攝影用途來決定。一旦模糊圓的大小決定，則物點 A 在某段距離內移動，其所形成的影像都被視為清晰像點，這段距離程為景深(depth of field)。

在航空攝影上，因物距很大，使得景深已經包含了地面的高低起伏變化，所以不考慮景深問題，但在近景攝影時，景深就變得非常重要。景深的計算式為

$$P_N = \frac{P}{1 + (p-f)CD/f^2} \quad (4.1.4)$$

$$P_F = \frac{P}{1 - (p-f)CD/f^2} \quad (4.1.5)$$

其中 p 為物距， P_N 是達到景深限制的最近物距， P_F 則是最遠的物距， D 為 f 數， C 是允許模糊圓的直徑。而景深等於 $P_F - P_N$ 。

由於光線在透鏡的光圈邊緣會產生繞射(diffraction)，其繞射效應所產生的光碟和光環如圖4-6a所示。其中大約84%的光度落於中央光碟，約有6%在第一個光環上。假設有2個光碟彼此相對靠近移動，當兩光碟中心距離恰好等於兩者中任一個光碟半徑時(如圖4-6b)，則這兩個光碟將無法分辨。此一極限半徑 r 的關係式為

$$r = 1.22\lambda \left(\frac{f}{d} \right) \quad (4.1.6)$$

其中 λ 為光波波長(單位為mm)， f 為焦距， d 為光圈直徑， f/d 即為 f 數。透鏡系的解像力(resolving power)就是以這極限半徑 r 的倒數來衡量。其計算式為

$$r = \frac{1}{r} = \frac{1}{1.22\lambda(f/d)} \quad (4.1.7)$$

表示在1mm寬的範圍內，能分辨出彼此等間距的直線數量。

一般而言，透鏡都已經過精密校正使像差趨近於零，則此透鏡的解像力僅受到繞射效應的限制，。這種繞射限制透鏡，在平均波長為 $0.56\mu\text{m}$ 或 0.00056mm 的白色光使用，其解像力為

$$\text{解像力} = \frac{1460}{f/d} \quad (4.1.8)$$

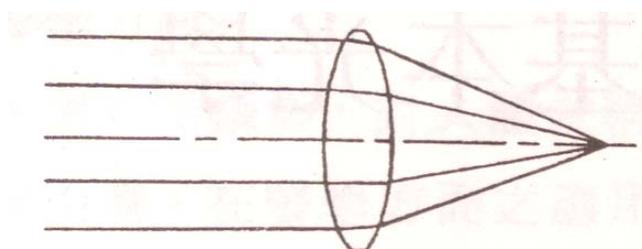


圖4-1 正透鏡示意圖 (何維信，1995)

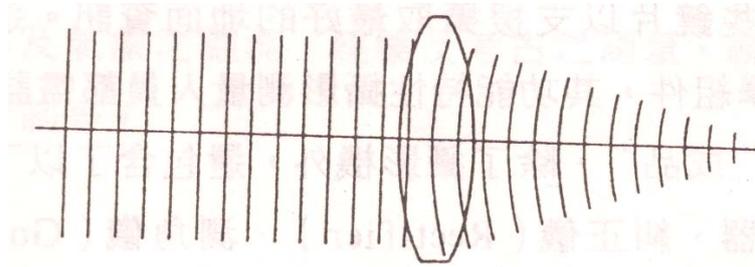


圖4-2 平行波之聚會(何維信，1995)

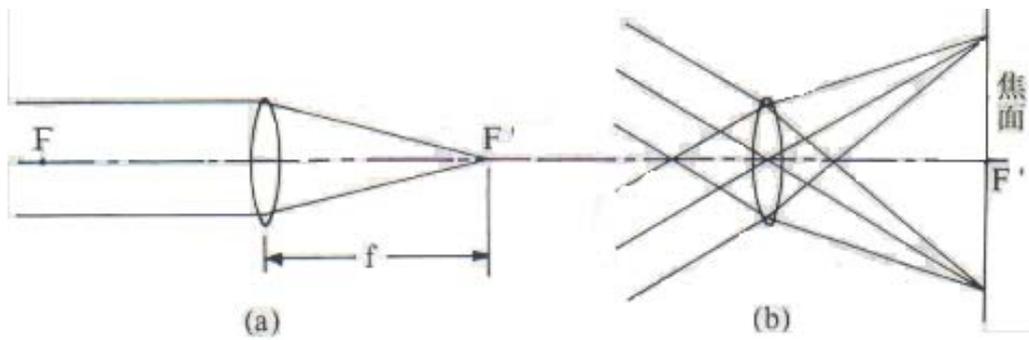


圖4-3 透鏡的主焦距與焦面(何維信，1995)

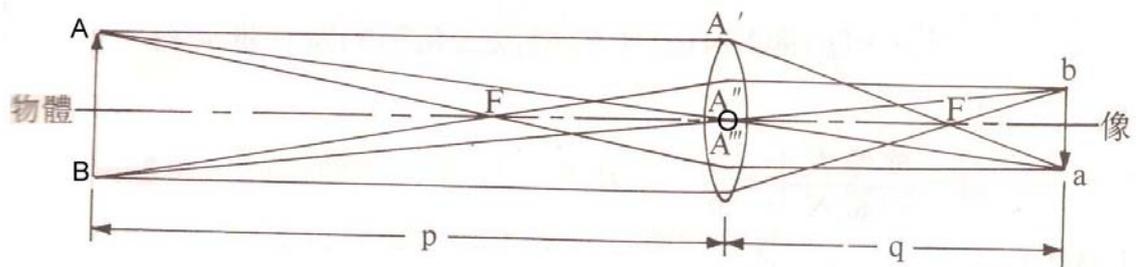


圖4-4 物體位於主焦距 F 外，成像為實像的示意圖(何維信，1995)

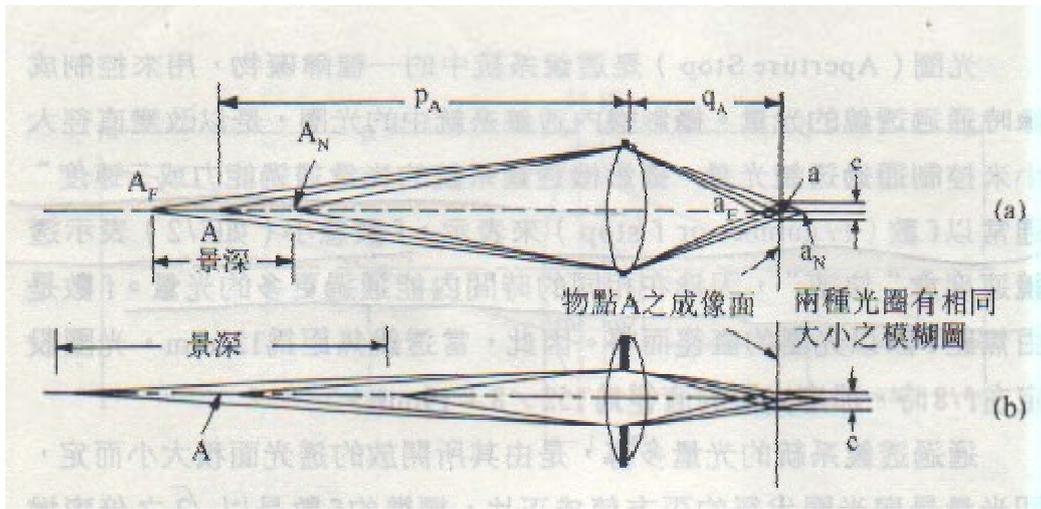


圖4-5 景深與光圈之關係(何維信，1995)

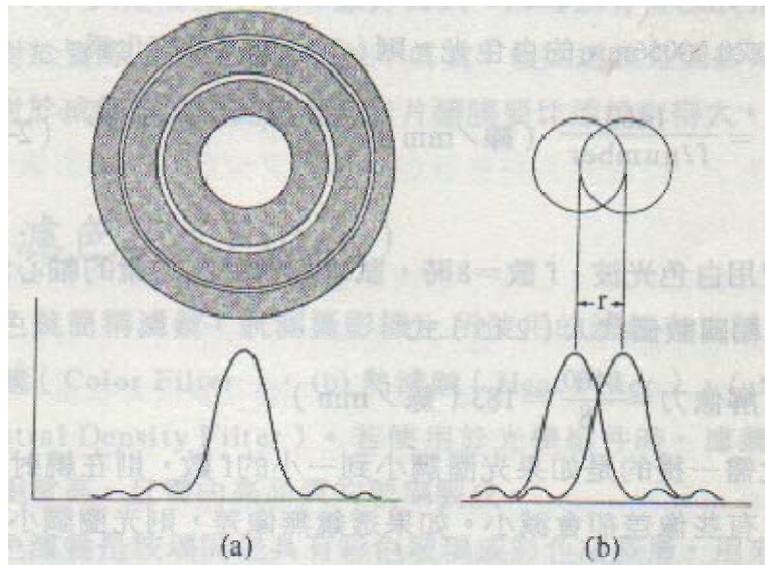


圖4-6 繞射效應 (a)單點之像 (b)兩點之像重合在一起(何維信，1995)

4-2 實物座標系統與影像座標系統之轉換

4-2-1 圖像投影幾何理論

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

1. 影像座標系統

影像座標系統是指紀錄數值影像資訊所用的座標參考系統，影像是由行與列上的灰度值數值矩陣所組成的，這個灰度值矩陣所存在的座標系統就是所謂的影像座標系統。其座標原點定義在影像的左上角，為左旋直角座標系統，若以行方向為u軸，列方向為v軸，任一影像點可由u軸與v軸兩座標量來表示之，如圖4-7，點a的影像座標為 (u_a, v_a) 。

2. 相片座標系統

相機的相片座標系統是以四個邊角框標連線交點做為座標參考基準，而一般數位相機雖無框標，但是其感應面(CCD Array)由CCD規則排列而成，每個CCD均位於感應面上位置、大小均固定，經由相機設定的結果定義該相機的相片座標系統。數位相機其設定方式是拍攝特製的設定版，先量測設定版上控制點之間的距離，並以8個預設方位拍攝設定版，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4-8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 4-9 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4-9 所示，此時相主點的像空間座標則為 $(x_0, y_0, -f)$ 。

3. 物體空間座標系統

物體空間座標系一般是以右手定則來決定其物體空間三維座標系統的X、Y、Z 三軸，而其座標原點可以自定，如圖 4-10 所示，稱之為地面座標系或物體空間座標系。因此在物體空間座標系上任一物點 P_i ，在空間之位置可由三維直角座標 (X_i, Y_i, Z_i) 來表示。物點之空間位置尚可由其他之三維座標系來表示，但以三維直角座標最容易瞭解其與相片座標系之間的關係，如圖 4-10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4-11 所示，以下就內、外方位轉換做逐一說明：

1. 內方位轉換(Interior Orientation Transformation)

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

所謂內方位的轉換，就是將量測得知的影像座標系，轉換到相片座標系。

相片座標系統乃根據相機框標來確定，一般相機框標設計都是以成對的形式，因此必須注意框標點號的對應，以避免搞混。而數位相機雖無框標但是其影像感應面CCD 是固定於相機內的，可利用CCD 相素尺寸與影像大小來求解其內方位參數。

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

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

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

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

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

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

2. 外方位轉換(Exterior Orientation Transformation)

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

若攝影當時投影中心座標及相機姿態角為已知，則可將任意點的相平面座標轉換成物體空間座標向量。近景攝影時，若攝影軸與地面平行呈水平攝

影，而相片座標 z 軸與地面座標 Z 軸近似平行，則 $\omega \doteq 0$ 、 $\varphi \doteq 0$ 及 $\kappa \doteq 0$ 。物體空間座標系統與相空間座標系統之間關係的建立，直接影響到外方位的定義和解算，在程式設計及應用上亦與外方位元素起始值之求解息息相關。為了求解上的方便，本研究所採用，則是維持地面座標系統不變，相平面座標系統為 x 、 y 軸，而攝影軸為 z 軸。

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

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (4.2.1a)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (4.2.1b)$$

式中

f : 相機焦距

x, y : 量測點的相片座標

X, Y, Z : 量測點的物理空間座標

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

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

當相片座標與物體空間座標重合時，二座標系之間存在相片的三個旋轉角：Roll、Pitch、Yaw 等所組成的姿態參數，令 ω 表示Roll， φ 表示Pitch， κ 表示Yaw。相片投影中心的外方位元素為已知的條件下，即可利用共線式，式(4.2.1)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 (4.2.1)，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(4.2.1)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 4-12 說明光束法中兩張相片與物體空間控制點的關係， O_L 點為左側攝影時的投影中心，其物體空間座標為 (X_{L0}, Y_{L0}, Z_{L0}) ， O_R 點為右側攝影時的

投影中心，其物體空間座標為 (X_{R0}, Y_{R0}, Z_{R0}) ，已知三個控制點的物體空間座標，經量測後分別可得到控制點在兩張相片上的相片座標。

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

若所採用的座標系是維持地面系統不變，而相空間座標系的各軸與地面座標系各個對應軸為互相平行的且方向相同，如圖 4-13 所示。

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

$$m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa \quad (4.2.2a)$$

$$m_{12} = -\cos \varphi \sin \kappa + \cos \omega \sin \kappa \quad (4.2.2b)$$

$$m_{13} = \sin \varphi \quad (4.2.2c)$$

$$m_{21} = \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa \quad (4.2.2d)$$

$$m_{22} = -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \quad (4.2.2e)$$

$$m_{23} = -\sin \omega \cos \varphi \quad (4.2.2f)$$

$$m_{31} = -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \quad (4.2.2g)$$

$$m_{32} = \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \quad (4.2.2h)$$

$$m_{33} = \cos \omega \cos \varphi \quad (4.2.2i)$$

而共線式(4.2.1)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(4.2.3)：

$$x_i = F_x(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad (4.2.3a)$$

$$y_i = F_y(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad (4.2.3b)$$

由於式 (4.2.3) 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 (4.2.3) 予以線性化，可得到式 (4.2.4)：

$$x_i + v_{xi} = \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial X_0} \right]_0 \Delta X_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial Y_0} \right]_0 \Delta Y_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial Z_0} \right]_0 \Delta Z_0 + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \omega} \right]_0 \Delta \omega + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \varphi} \right]_0 \Delta \varphi + \left[\frac{\partial F_{xi}}{\partial \kappa} \right]_0 \Delta \kappa + F_{xi}^0 \quad (4.2.4a)$$

$$y_i + v_{yi} = \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial X_0} \right]_0 \Delta X_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial Y_0} \right]_0 \Delta Y_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial Z_0} \right]_0 \Delta Z_0 + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \omega} \right]_0 \Delta \omega + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \varphi} \right]_0 \Delta \varphi + \left[\frac{\partial F_{yi}}{\partial \kappa} \right]_0 \Delta \kappa + F_{yi}^0 \quad (4.2.4b)$$

由式 (4.2.4) 得知，每個控制點可列出二個觀測方程式($x_i + v_{xi}, y_i + v_{yi}$)，若要求解六個外方位元素($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ 等六個未知數)，則至少必須要有三個控制點才能求解。因此，本研究應用光束法投影方式，利用二張照片投影將所有控制點的觀測方程式列出，輸入相片外方位元素的起始值，經由平差計算後，再以逐次迭代的方式求出外方位元素的收斂值。

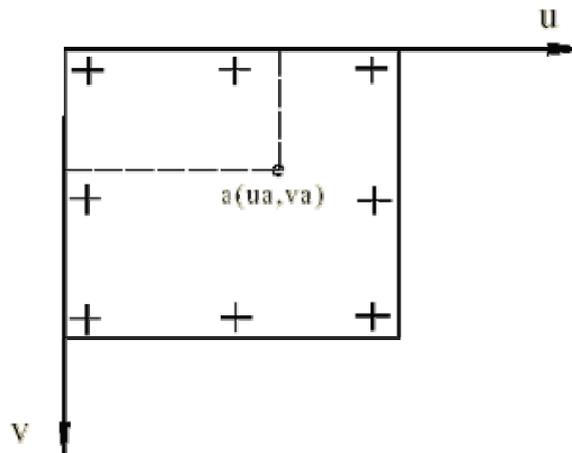


圖4-7影像座標系統示意圖

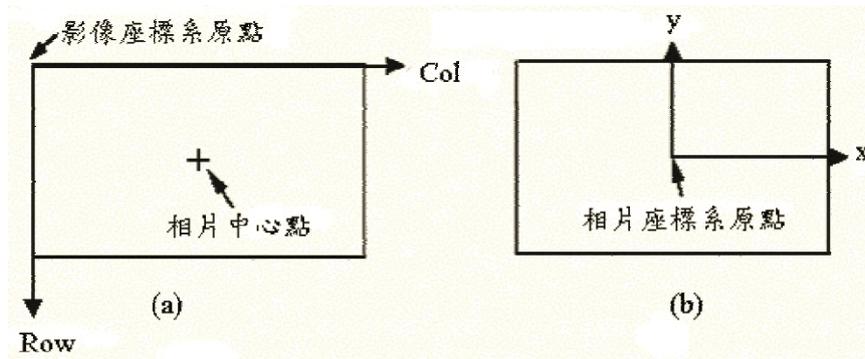


圖 4-8 影像座標與相片座標示意圖(a)影像座標(b)相片座標

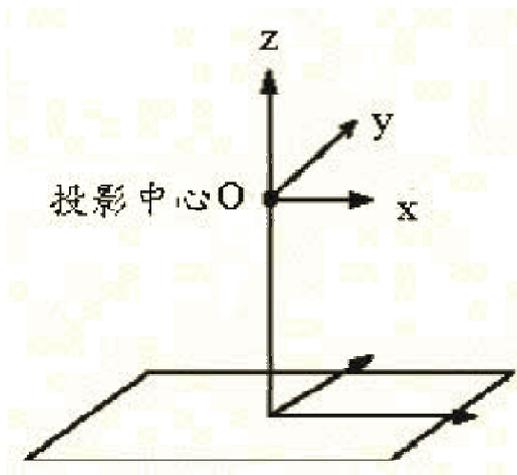


圖 4-9 三維相片座標系統示意圖

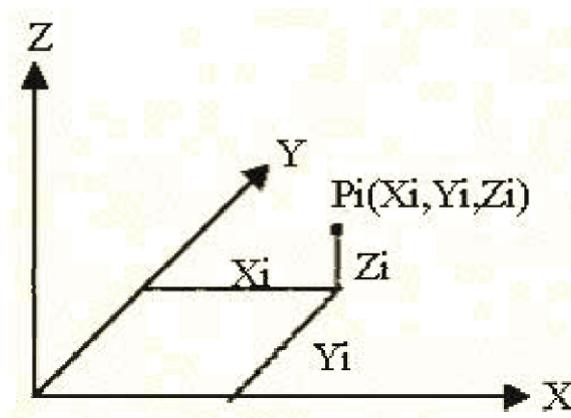


圖4-10 物體空間座標系統示意圖

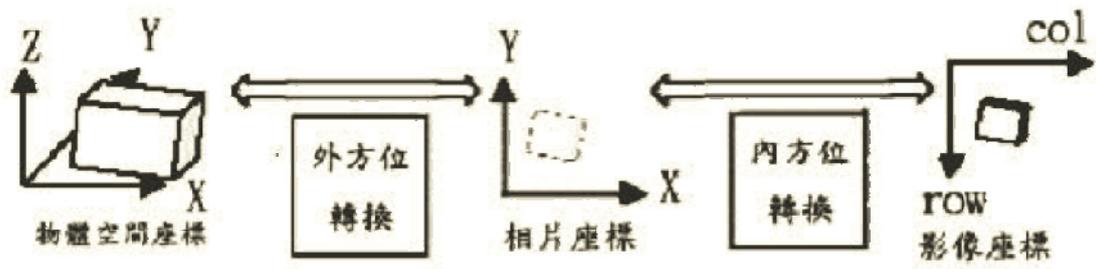


圖4-11 圖像投影三種座標系統與內、外方位轉換之關係

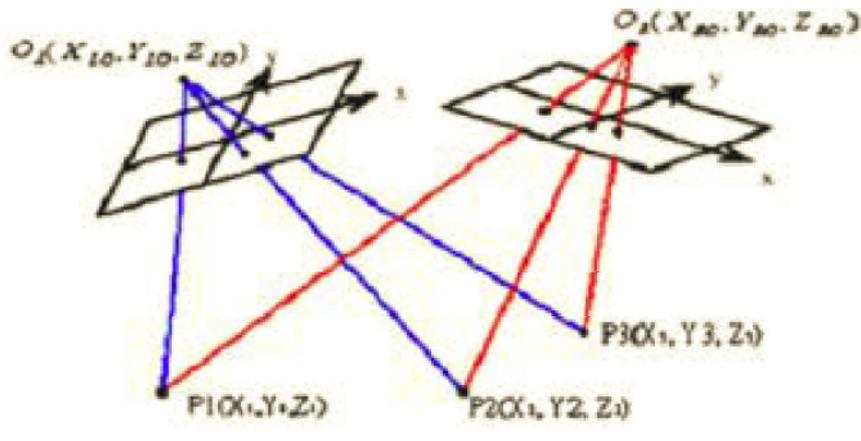


圖 4-12 光束法中控制點與相片之示意圖

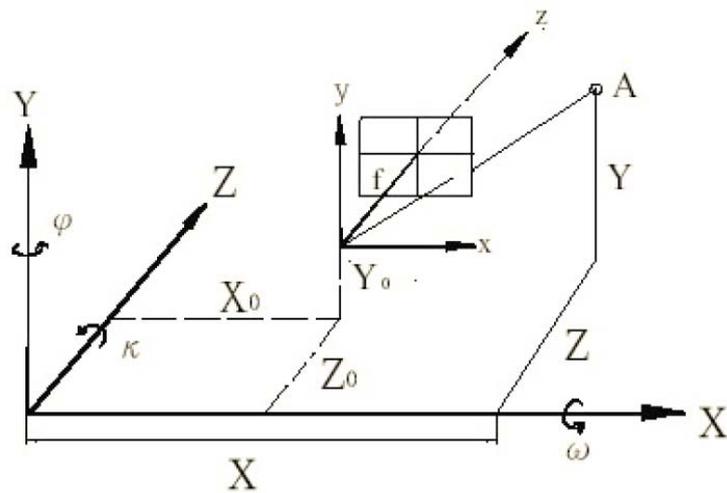


圖 4-13 座標系統示意圖

4-2-2 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，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4-14可知，攝影測量共線條件式為：

$$B^{(t)} = cA^{(t)} \quad (4.2.5)$$

其中，c為尺度參數 (scale factor)。將式子改寫為下：

$$A^{(t)} = R \bullet A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \bullet A \quad (4.2.6)$$

$$B = cRA \quad (4.2.7)$$

$$\begin{bmatrix} u_w - u_{w0} \\ v_w - v_{w0} \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

其中，

- u_w, v_w : 像點之影像座標
- u_{w0}, v_{w0} : 主點(principal point)之影像座標
- d : 相機焦距
- λ : 尺度比例因子
- r_{ij} : 轉換矩陣元素
- x, y, z : 實物空間中之某點座標
- x_0, y_0, z_0 : 相機之物體空間座標

若已知內方位元素(u_{w0}, v_{w0}, d)與外方位元素(x_0, y_0, z_0)與旋轉角所決定的轉換矩陣元素 m_{ij} ，即可求解，而共線式並非線性，需利用泰勒展開式展開成線性式方可求解，DLT是將前二式連接成一虛擬的線性式。根據(4.2.8)式，改寫為下式：

$$c = \frac{-d}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (4.2.9)$$

$$u_w - u_{w0} = -d \frac{[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (4.2.10)$$

$$v_w - v_{w0} = -d \frac{[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)]}{[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)]} \quad (4.2.11)$$

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

$$u_w - u_{w0} = \lambda_u (u - u_0) \quad (4.2.12)$$

$$v_w - v_{w0} = \lambda_v (v - v_0) \quad (4.2.13)$$

將(4.2.12)、(4.2.13)式代回(4.2.9)~(4.2.11)式中，並改寫為：

$$u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (4.2.14)$$

$$v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \quad (4.2.15)$$

其中，

$$L_1 = \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \quad (4.2.16a)$$

$$L_2 = \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \quad (4.2.16b)$$

$$L_3 = \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \quad (4.2.16c)$$

$$L_4 = \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \quad (4.2.16d)$$

$$L_5 = \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \quad (4.2.16e)$$

$$L_6 = \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \quad (4.2.16f)$$

$$L_7 = \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \quad (4.2.16g)$$

$$L_8 = \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \quad (4.2.16h)$$

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D} \quad (4.2.16i)$$

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \quad (4.2.16j)$$

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \quad (4.2.16k)$$

$$d_u = \frac{d}{\lambda_u} \quad (4.2.16l)$$

$$d_v = \frac{d}{\lambda_v} \quad (4.2.16m)$$

$$D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \quad (4.2.16n)$$

$L_1 \sim L_{11}$ 即是所謂的DLT參數。若DLT應用在相機校正時，假設選定影像平面六個以上之控制點，(4.2.14)、(4.2.15)式則可以改寫為：

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4.2.17)$$

然後利用最小平方法（Least Square Method）解出 $L_1 \sim L_{11}$ 。經過上述得到11個DLT參數之後，將(4.2.14)、(4.2.15)式再度改寫為：

$$\begin{bmatrix} L_1 - uL_9 & L_2 - uL_{10} & L_3 - uL_{11} \\ L_5 - vL_9 & L_6 - vL_{10} & L_7 - vL_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - u \\ L_8 - v \end{bmatrix} \quad (4.2.18)$$

同樣利用最小平方法，可解出對應點之物體空間座標。

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

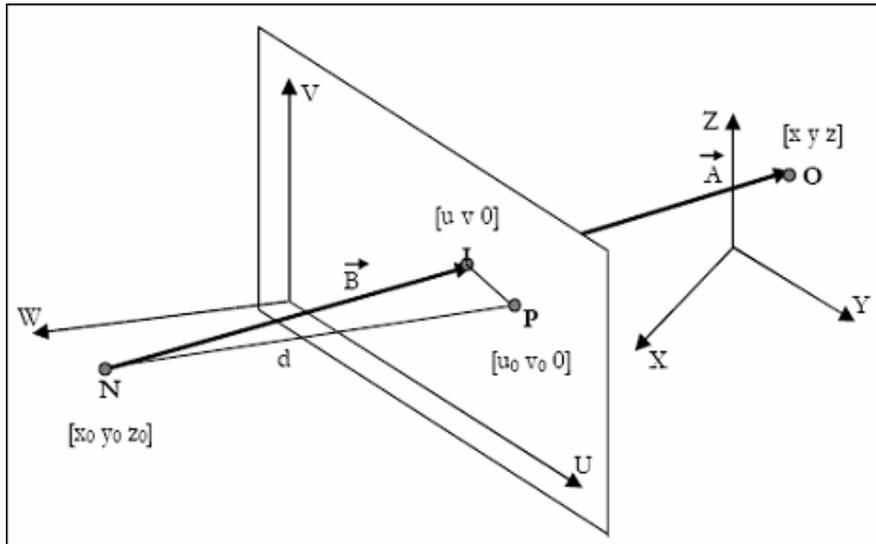


圖4-14 實物空間與相機空間之關係

4-3 內部校正

攝影機校正(calibration)是立體海況影像觀測的技術關鍵(Wanek and Wu, 2006)。攝影機校正包含兩個部分，第一是內部校正(Interior calibration)，第二是外部校正(Exterior calibration)。內部校正的目的有兩個，第一的目的是求取主軸點(Principle Point)；第二個目的則是在校正因透鏡誤差所造成之影像扭曲變形的現象。透鏡產生的像差(Lens aberrations)會使得物點無法在焦面的正確位置上成像，而會使物點在焦面上成像變成一個稍為模糊的點，常見的有以下五種主要的像差：

1. 球面像差(Spherical aberration)，如圖4-19，其成像會變成一模糊小圓圈，並且只發生在光軸上物點的成像。
2. 慧形像差(Coma)，如圖4-20，其效應類似球面像差，只是其所影響的像點不在光軸上，而會產生類似彗星形狀的模糊影像。
3. 像散性(Asigmatism)，如圖4-21，使不在光軸上的物點成像於不同平面的兩條相互垂直的線上，垂直於光軸之直線與垂直於光線主軸的直線會形成橢圓形的橫切面，而在某處洽為一圓形且其模糊程度最

小，用以表示物點的成像結果。

4. 像場變曲(Field curvature)，如圖4-22，是指成像的最佳面並非一平面，而是一彎曲的曲面稱之。
5. 畸變差(Distortion)，如圖4-23，一光線由後節點射出時，路徑改變了方向，此一方向稱為透鏡輻射畸變差(Radial distortion)，也有人稱之為徑向扭曲。

參考圖4-15，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，

$$x_{iL} = \frac{L_1^L X_0 + L_2^L Y_0 + L_3^L Z_0 + L_4^L}{L_9^L X_0 + L_{10}^L Y_0 + L_{11}^L Z_0 + 1} \quad (4.3.1)$$

$$y_{iL} = \frac{L_5^L X_0 + L_6^L Y_0 + L_7^L Z_0 + L_8^L}{L_9^L X_0 + L_{10}^L Y_0 + L_{11}^L Z_0 + 1} \quad (4.3.2)$$

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

為了進行內部校正，本計畫製作了一塊校正版，如圖4-24所示，校正版的大小為75公分x75公分，版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，將校正版和相機(CCD平面)擺設至平行的狀態，因此式(4.3.1)與式(4.3.2)中的 Y_0 為零，方程式簡化為下式，

$$XL_1 + ZL_3 + L_4 - x_d XL_9 - x_d ZL_{11} = x_d \quad (4.3.3)$$

$$XL_5 + ZL_7 + L_8 - y_d XL_9 - y_d ZL_{11} = y_d \quad (4.3.4)$$

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) 則為校正版上某校正點的座標。實際進行校正作業時，需至少選取校正版上任意四個點，根據這四個點在校正版上的座標以及在影像上的座標代入(4.3.3)式與(4.3.4)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(4.3.5)和(4.3.6)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。

$$x_p = \frac{XL_1 + ZL_3 + L_4}{XL_9 + ZL_{11} + 1} \quad (4.3.5)$$

$$y_p = \frac{XL_5 + ZL_7 + L_8}{XL_9 + ZL_{11} + 1} \quad (4.3.6)$$

內部校正的第二個目的是在求主軸點的位置。相機拍照後因為透鏡的像差造成成像的扭曲，拍攝後影像上某點的位置與透過前述校正所得影像上同一點位置的距離差稱之為徑向扭曲(radial distortion)，它與距離主軸點的徑向距離有關，如圖4-25所示，愈接近主軸點，徑向扭曲愈小。Holland et al. (1997) 回歸出徑向扭曲量值與徑向距離的關係，如圖4-26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，

$$\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r \quad (4.3.7)$$

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

$$\Delta r = \sqrt{(x_d - x_0)^2 + (y_d - y_0)^2} - \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2} \quad (4.3.7)$$

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(4.3.7)和(4.3.8)，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。

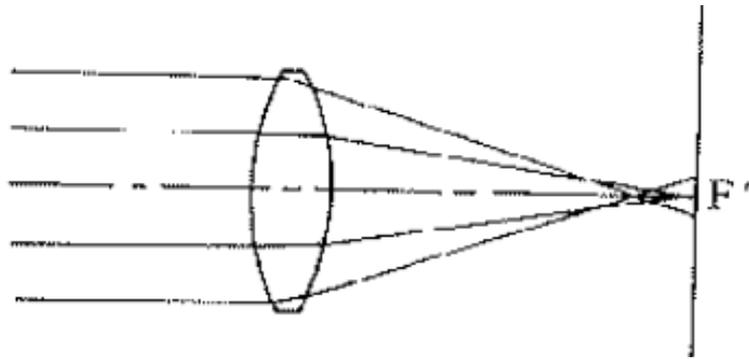


圖4-19 球面像差示意圖 (何維信，1995)

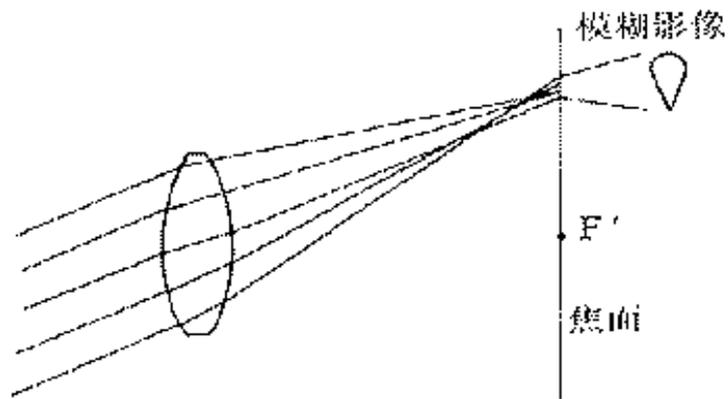


圖4-20 彗形像差示意圖(何維信，1995)

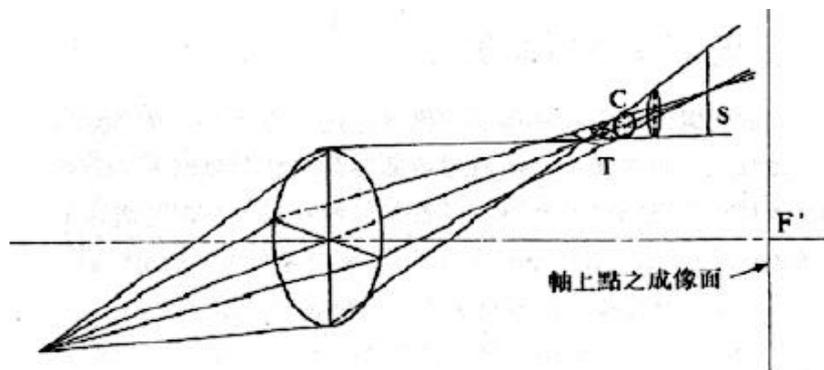


圖4-21 像散性示意圖(何維信，1995)

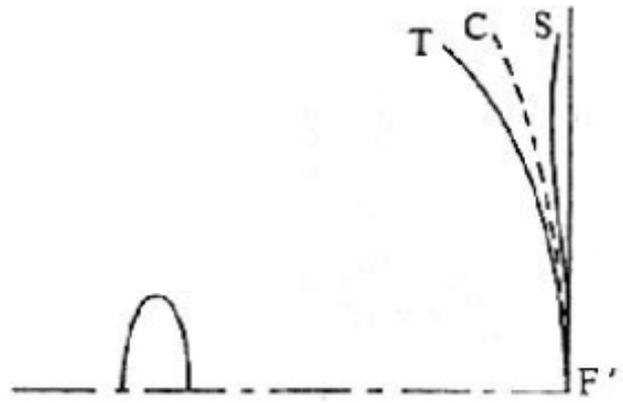


圖4-22 像場彎曲示意圖(何維信，1995)

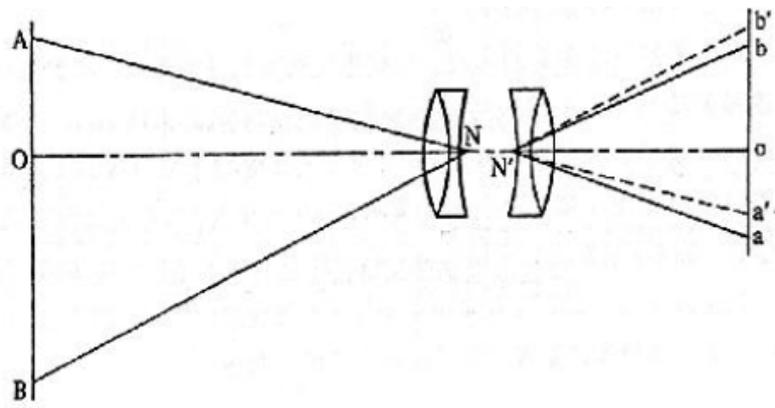


圖4-23 輻射畸變差示意圖(何維信，1995)

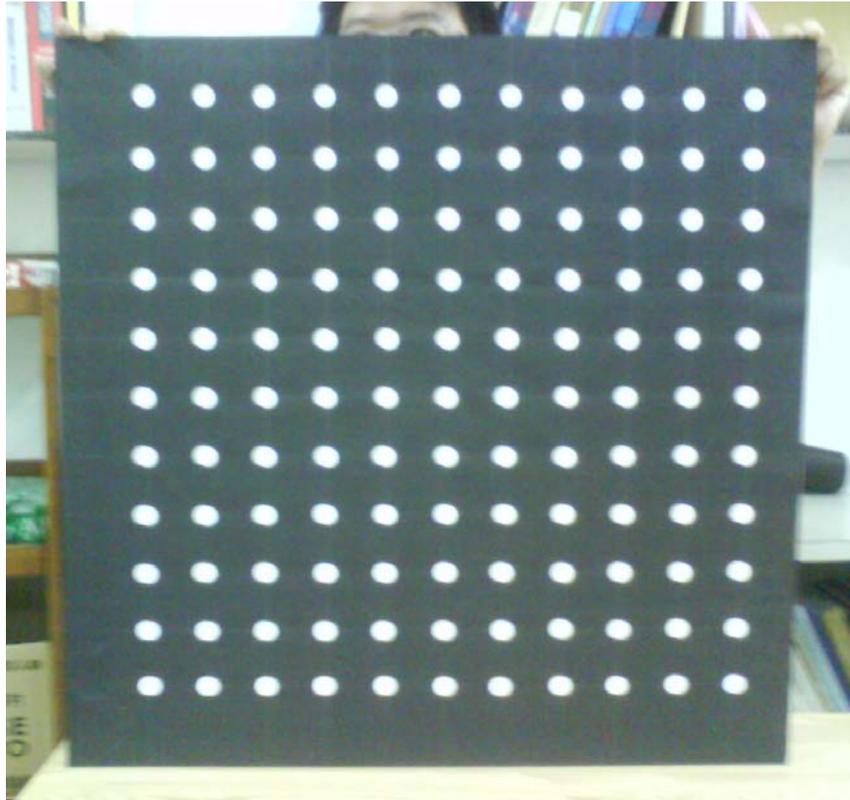


圖4-24 本計畫所製作的攝影機內部校正用板

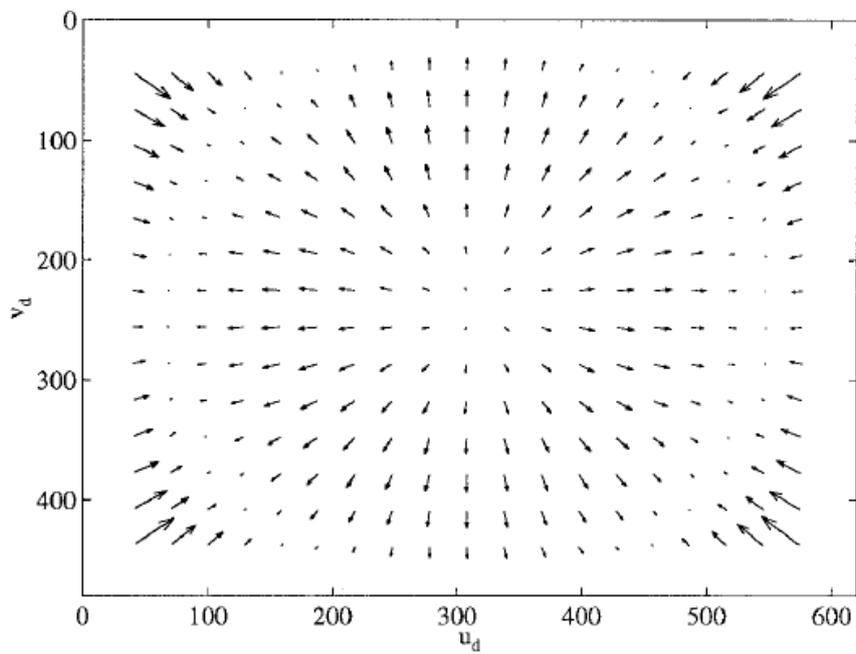


圖4-25 徑向扭曲大小分佈示意圖(箭號長度代表扭曲的量值)
(Holland et al., 1997)

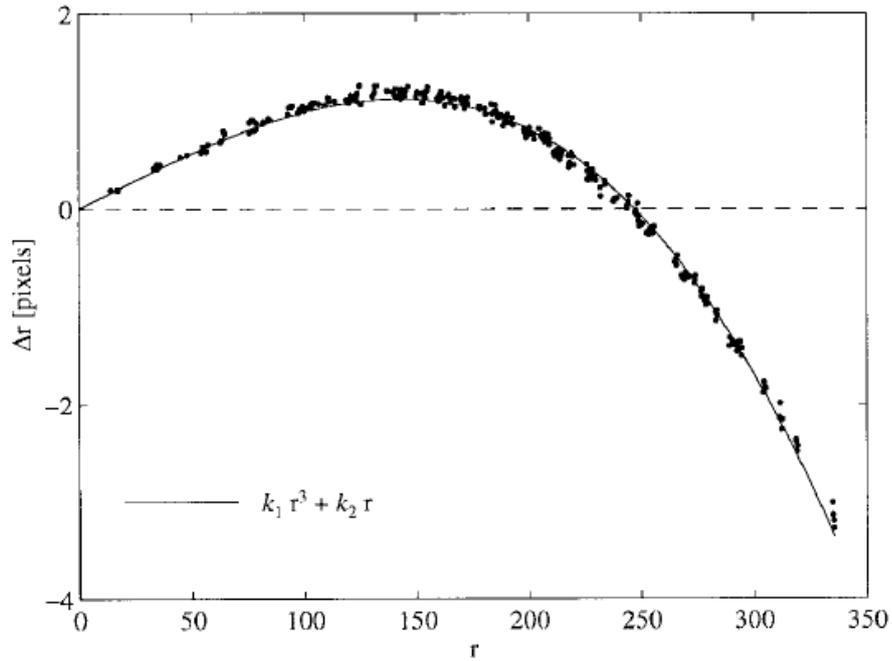


圖4-26 徑向扭曲量值與徑向距離的回歸關係 (Holland et al., 1997)

4-4 外部校正

校正的第二步驟為外部校正，其目的為測量立體攝影系統在現場之方向與位置。因此系統是用來觀測隨時在動的水面，傳統的測量所用的地上控制點(ground control point)方法並不適用。因此Wanek and Wu (2006) 發展出一套方法，以在實地觀測時須量得測量各攝影機之相對方向。他們的方法不需在現場設置地上控制點。此校正步驟為在實地觀測時須先利用裝在立體攝影系統之T架上的氣泡水平儀將此系統調成水平。再用手持式羅盤量出T架法線之方向。

當實地觀測結束後將整個系統在不變動各攝影機的相對方向與位置的情況下送回實驗室。系統在實驗室須重新調整水平並對一3D之校正網格板作校正(圖4-27)。

此校正步驟可確定海水面與系統之X-Y面平行。另T架在實驗室之法線方向與3D網格板之正y方向也須用羅盤量出，如此可得到系統在實地觀測時與

實驗室校正時之相對角度。然後各攝影機可分別如在現場實測狀況下作校正。

要解出各攝影機方向就必須用到完整的直接線性轉換(DLT)公式。如果選取校正網格板上 n 個控制點，總共會有 $2n$ 條方程式。

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -u_2y_2 & -u_2z_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -v_2x_2 & -v_2y_2 & -v_2z_2 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.4.1)$$

式中 x_i, y_i, z_i 為板面控制點之位置， u_i, v_i 為影像上之位置。一般說來必須選至少6個分佈在不同板面之控制點以解出11個 L_i 未知數。不過最好選20-30個控制點。當11個 L_i 未知數求出後影像上之位置與板面控制點之位置的關係就可以建立。最後現場實體位置在(X, Y, Z)座標之絕對方向就可經由前已測量之兩個分別在現場與實驗室T架羅盤方向算出。

Wanek and Wu (2006)發展的外部校正方法的優點是可直接求出11個 L_i 對應參數。但須注意的是現場測量後系統必須要再運回實驗室作校正。還有現場測量時之各攝影機的方向與相對位置在系統搬運時必須保持不變。另外此外部校正方法是否可適用於實體與攝影機距離超過10 m以上還必須要測試才可知。Wanek and Wu (2006)所作的例子都是攝影機架設於岸邊，攝影之目標區離攝影機距離在5.1 m至 12.8 m間(表4-4-1)。本實驗首先要測試的是這距離範圍，測試成功後再將此距離拉長。

表 4-4-1 Wanek and Wu (2006)測試三實驗案例(ATISIS)
系統架設參數(setup and configuration)

Experiment case	Frame Rate (Hz)	Base distance (m)	Camera object distance (m)	Tile angle (o)	X scale (cm/poxel)	Y scale (cm/pixel)
1	10.0	0.43	5.12	63	0.29-0.37	0.45-0.88
2	15.0	0.43	6.99	71	0.33-0.93	0.71-2.44
3	10.0	0.61	12.8	68	0.64-1.00	1.48-2.70

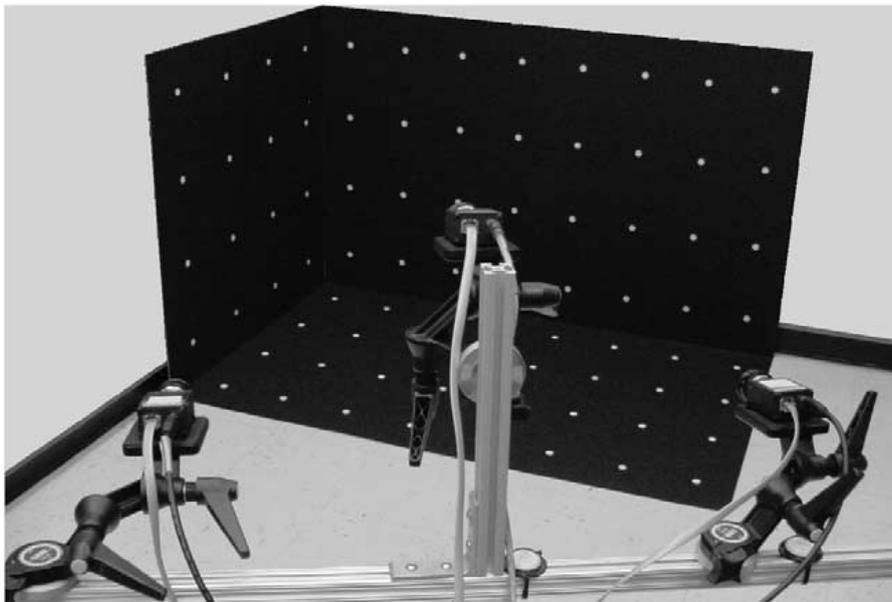


圖4-27 ATISIS系統實驗室內外部校正用之3D校正網格板與在T架上的攝影機
(Wanek and Wu, 2006)

4-5 影像匹配與立體影像重建

影像匹配(Image match)技術為攝影測量邁入自動化的關鍵步驟，這個技術含蓋了電腦視覺、人工智慧及攝影學等學門，當使用兩台以上攝影機要計算立體影像時，必須找到同一空間點在不同攝影機攝得影像上之二維座標，此一過程即稱為影像匹配；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。

影像匹配最基本的方法即為標準化互相關法(Normalized Cross Correlation, NCC)，其原則為「目標視窗與搜尋視窗中相重疊區域之灰度值加權互相關係數(Cross Correlation Coefficient)最大者為最佳匹配位置」，其示意圖如圖 4-28，其中加權的權數選用灰階特徵加權或距離特徵加權，加權的標準化互相關法的數學式為

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i, j) - \overline{G_t})(G_s(i, j) - \overline{G_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_t(i, j) - \overline{G_t})^2 \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (G_s(i, j) - \overline{G_s})^2}} \quad (4.5.1)$$

- j : 視窗內像元所在的行列值
- $G_t(i, j)$ 、 $G_s(i, j)$: 目標視窗、搜尋視窗的像元灰度值
- $\overline{G_t}$ 、 $\overline{G_s}$: 目標視窗、搜尋視窗內像元的灰度平均值或灰度加權平均值
- P_{i1} 、 P_{i2} : 加權的權數

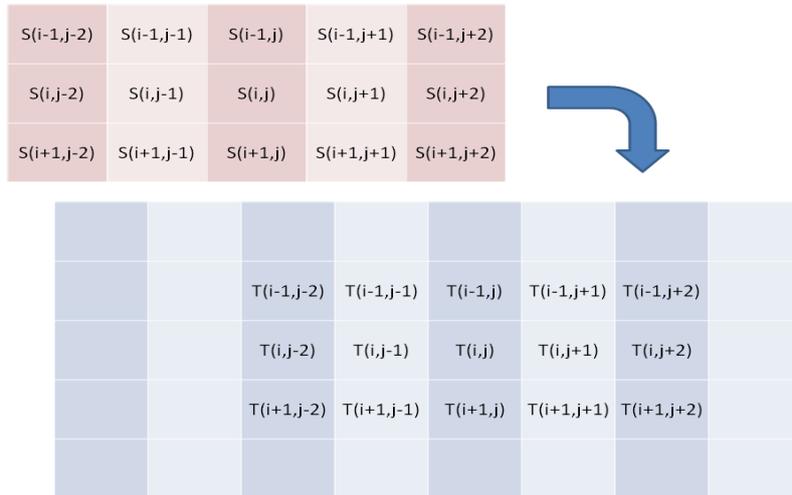


圖4-28 影像匹配NCC法示意圖

若僅採用NCC法針對目標影像逐一計算比對，將耗費大量的計算時間，為提升其執行效率，本計畫在此將引用極線幾何的概念，所謂的極線幾何(Epipolar Geometry)係指三維空間的座標與二維影像平面之間的一種可以相互轉換的空間幾何對應關係。

以圖4-29為例，左右攝影機投影中心 C 與 C' 之間的連線稱為基線(baseline)。左右兩攝影機影像中皆觀測到三維場景中的 M ，而 M 、 C 、 C' 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 l_m 與 l'_m ，此二條直線稱為極線(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)。對每個空間點而言，無論場景中的 X 如何移動，所有極線必定通過左影像的 e 點與右影像的 e' 點。

假設 m 與 m' 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 CM 代表左影像中 m 的所有可能三維位置 M ，投影到右影像平面則成為對應的極線 l'_m 。顯然的，左影像投影點 m 在右影像的對應點 m' 即落在 l'_m 上，此幾何關係提供了一個強而有力的外極線幾何限制條件，將原本二維的對應點搜尋平面區域降維一維的搜尋線段區間。

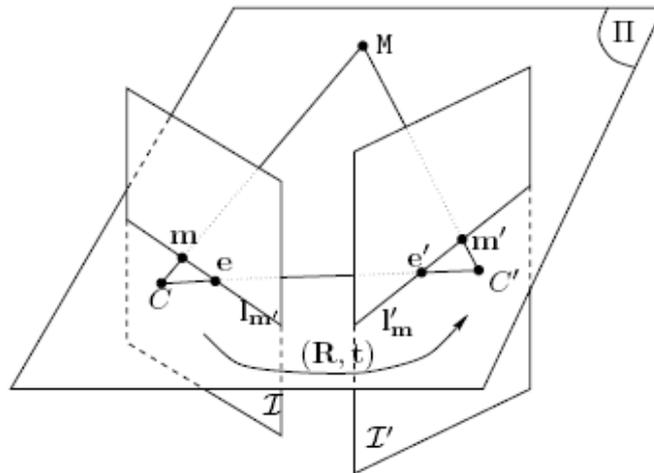


圖4-29 極線幾何示意圖(Zhang, 1998)

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4-29是利用立體影像攝影機拍攝海面之示意圖，由前述Abdel-Aziz and Karara (1971)所提出的DLT方法，再使用影像匹配的方法，我們可以找出海面上任一點 (X_0, Y_0, Z_0) 分別在三台相機上影像對應點的位置 (x_{iL}, y_{iL}) (x_{iC}, y_{iC}) (x_{iR}, y_{iR}) 及其相關的線性關係式，以矩陣的形式表示，如下式，

$$\begin{bmatrix} L_1^L - L_9^L x_{iL} & L_2^L - L_{10}^L x_{iL} & L_3^L - L_{11}^L x_{iL} \\ L_5^L - L_9^L y_{iL} & L_6^L - L_{10}^L y_{iL} & L_4^L - L_{11}^L y_{iL} \\ L_1^C - L_1^C x_{iC} & L_2^C - L_{10}^C x_{iC} & L_3^C - L_{11}^C x_{iC} \\ L_5^C - L_9^C y_{iC} & L_6^C - L_{10}^C y_{iC} & L_4^C - L_{11}^C y_{iC} \\ L_1^R - L_9^R x_{iR} & L_2^R - L_{10}^R x_{iR} & L_3^R - L_{11}^R x_{iR} \\ L_5^R - L_9^R y_{iR} & L_6^R - L_{10}^R y_{iR} & L_4^R - L_{11}^R y_{iR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{iL} - L_4^L \\ y_{iL} - L_8^L \\ x_{iC} - L_4^C \\ y_{iC} - L_8^C \\ x_{iR} - L_4^R \\ y_{iR} - L_8^R \end{bmatrix} \quad (4.5.2)$$

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，以建構成完整的三維影像。

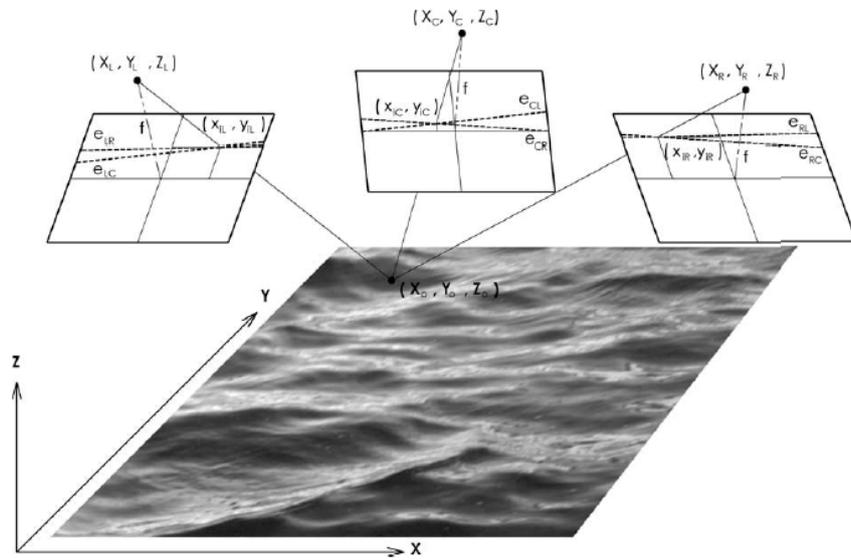


圖4-29 立體影像從事表面海況監測示意圖

第五章 內部校正結果

5-1 影像數位化

光線是影像最主要的能量來源，因為這是人類能夠直接觀察到的能量，相片就是一種視覺景象的圖像化紀錄，很多影像都是透過可見光這種能量來源而擷取下來。以數位相機而言，被攝物體受到太陽光線的反射進入相機鏡頭，利用感光元件(如第二章所述的CCD)收集能量，將能量大小的標準化至可見光譜的範圍內，以產生「顏色」，如圖5-1所示。

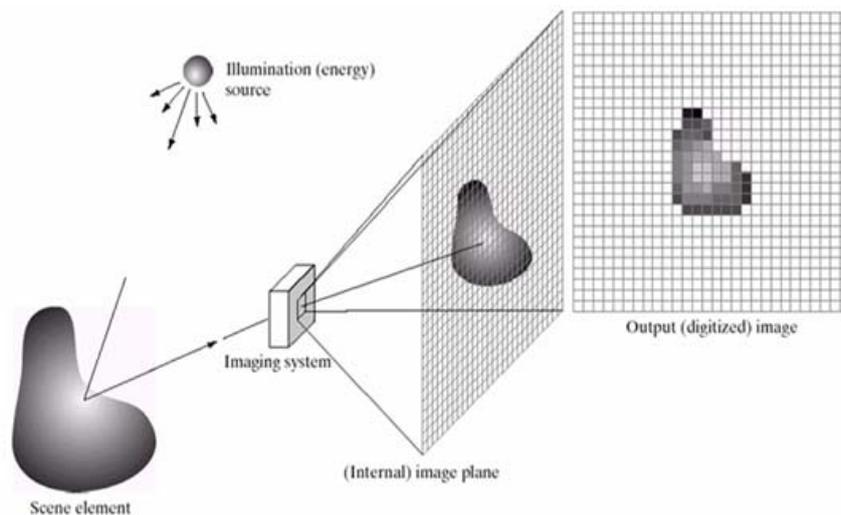


圖5-1 數位影像成像基本原理

相機若與電腦相連，感光單元獲取的資訊便會輸出至適當的儲存媒介中，一般來說都是用影像擷取卡進行，比使用軟體來的快速有效率，可以在非常短的時間內擷取大量影像，然後這些影像可以再複製到永久的儲存元件中。另外，也可以利用平台式掃描器來數位化影像，它的運作原理類似CCD相機，然而它不是透過大型陣列一次擷取整個影像，而是由一行感光單元掃過影像，隨著感光單元的移動一行一行擷取，這樣的擷取過程比用相機照相慢很多，因此需要適當軟體來處理擷取與儲存的動作。

一般而言，由影像資訊轉換為利用的數位資訊，需經一連串的流程(如圖5-2)，而為方便計算常轉換成灰階影像，再進行影像分析處理。



圖5-2 影像擷取流程

所謂灰階影像即為把影像視為一個二維函數，一張2D的數位影像可以想像成是一個函數 $f(x,y)$ ，其中 x, y 代表座標位置， $f(x,y)$ 則為該位置對應的顏色或灰階值，數位影像有時也被當成是二維的訊號般地來解析。影像中每一點 (x, y) 都對應到這張影像最基本的元素，這些元素就是所謂的「像素(pixel)」。數位影像的處理包含有兩層含意，第一是改變或增強影像中像素的值，讓觀察者容易辨識，例如進行亮度增強、對比增強等；第二則是從影像的像素值所呈現的找出特徵來加以量化分析，例如找出影像中的線段、臉部自動辨識等。

影像數位化的過程包含兩個步驟，其一是取樣(sampling)，也就是將點座標數位化和離散化的工作；其二是量化(quantization)，指的是把表現像素的數值找出來。至於影像的解析度可以分成兩個部分來討論，(1)空間解析度：取樣越細，越能表現出影像中的細微變化；(2)灰階解析度：灰階越細，越能表現出豐富的顏色。原則上，解析度越高，越能表現實務的細節與色澤，但解析度高到某一個程度，肉眼即難以分辨其差異，且解析度高代表影像的資料量也隨之增大。數位影像的解析度取決於三個參數： M 、 N 與 L ，如圖5-3所示。

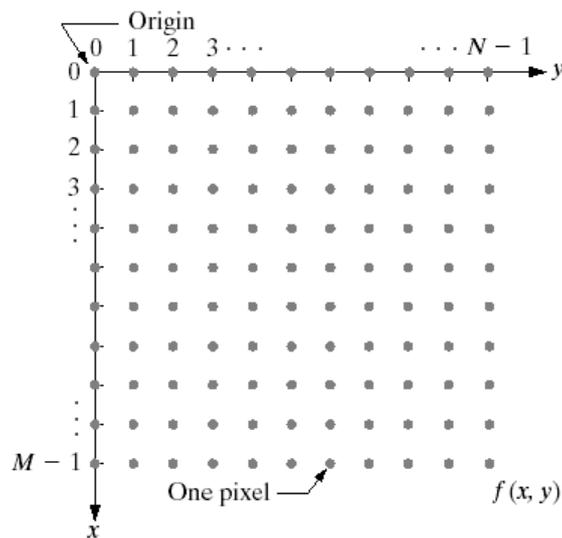


圖5-3 數位影像示意圖

其中 M 與 N 分別代表空間的解析度（影像的長度與寬度）， L 代表「灰階」（gray level）， $L = 2^k$ ， k 代表灰階所使用的bit個數。通常影像的灰階以一個位元組，即8位元，來表現一組灰階。故共有 $2^8=256$ 種組合，代表256個灰度，其值介於0（黑）到255（白）之間。常見的色彩模型為RGB模型，代表一種顏色可分成三個紅、綠、藍三種channel。每一種channel用一個byte表示，故一種channel可表現256種程度的色階。一張全彩的點矩陣影像（*.bmp），像素最少會用三個位元組表示（24位元），故共可表現出 $(256)^3$ 種顏色。

本研究由中央氣象局採購提供之攝影機為QImaging公司的QICAM數位攝影機，它的最大好處是該攝影機已經內含數位化功能，也就是不需要利用影像擷取卡甚至是掃瞄的方式取得數位資料，可以透過高速傳輸線如IEEE 1394直接連接攝影機與電腦，將數位影像傳送電腦中，但遭遇的問題是，仍然需要把已經由攝影機數化好的影像資料”讀出”，此時則再透過氣象局所採購提供的StreamPix軟體將數位影像讀入電腦儲存成檔案，這裡的關鍵是快速的IEEE 1394傳輸通道與影像讀取軟體，由於本計畫是採用高速攝影機，每秒可達100張畫面以上(實際作業時可能使用每秒10-30張畫面)，加上攝影機的數位解析度為12 bits，也就是每個像素以0-4095的數值來儲存顏色，因此資料量相當大，如表5-1所示，因此藉由商業套裝軟體的可以協助讀取高速的數位化影像，套裝軟體將影像存取寫入電腦後，本計畫再以Matlab程式語言撰寫數位影像擷取程式讀取影像時序列(image sequences)的灰度值，包含 x, y, z, t 四個維度的資料，做為後續影像內部校正與外部校正的資料來源。

表5-1 一台數位攝影機(與本計畫將採購者同等級)在各種取樣時間以及取樣頻率下之數位檔案大小

	10 秒	1 分	2 分	5 分	10 分
10 fps	23MB	138MB	276MB	690MB	1.4G
15 fps	34MB	204MB	408MB	1.1G	2.1G
20 fps	46MB	274MB	552MB	1.4G	2.8G
30 fps	69MB	414MB	828MB	2.1G	4.2G
60 fps	138MB	828MB	1.6	4.2G	8.3G

先前於 2-2 節 觀測系統元件整合與測試章節中已介紹各元件的規格與整合，及StreamPix軟體的基礎介紹，接著將說明如何用StreamPix軟體來讀入QICAM數位攝影機的影像，並擷取及儲存成檔案。

在此先介紹何謂 workspace，以利以下操作了解。所謂 workspace 就是用以儲存使用者各項設定值的工作空間，讓使用者在不同的拍攝狀況下，可便捷的選取各個先前設定好、已存在的workspace做使用，可避免每次再重新做設定。舉例來說，要拍攝光亮與昏暗房間內的影像，其曝光度與亮度對比等設定一定不同，可分別建立兩個workspace來儲存光亮房間與昏暗房間下的不同設定，於下次使用時直接下載該workspace，而不必再重新調整設定了。

使用StreamPix軟體來讀攝影機影像的步驟如下：

於桌面點選StreamPix軟體開啟之，如圖5-4。進入StreamPix介面後，從**[Workspaces]** >> **[Workspace Manager]**來建立 workspace。選擇**[New Workspace...]**來命名一個新的workspace，此名稱會產生一個工作空間，如圖5-5。接著系統會要求使用者為此workspaces選擇一標籤代表顏色，新的workspaces便產生。因StreamPix有記憶性，會於每次關閉時自動儲存記錄，於下次開啟StreamPix時會回復到上次結束前的workspaces狀態及設定，因此使用者可直接從**[Workspace Manager]**中選擇已存在的Workspaces，點選**[Load]**或直接連按左鍵兩下點選欲選擇的workspace下載之，相反的**[Unload]**可以移除已下載的workspace，**[Reset]**重設原先的設定，**[Duplicate]**可直接複製已存在的workspace、**[Rename]**重新命名、及**[Delete]**刪除，另外還有從檔案輸入及輸出等，確定後點選 **[Done]**確定，如圖5-6。

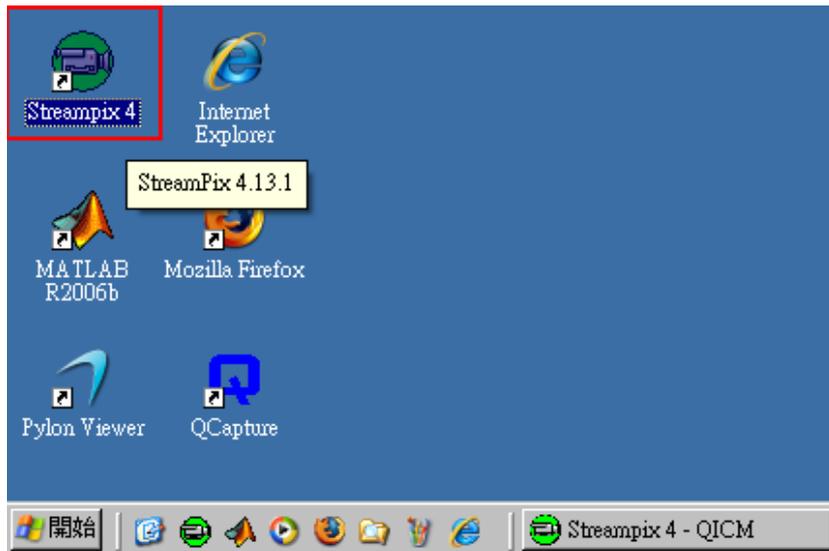


圖5-4 於桌面上開啟StreamPix軟體

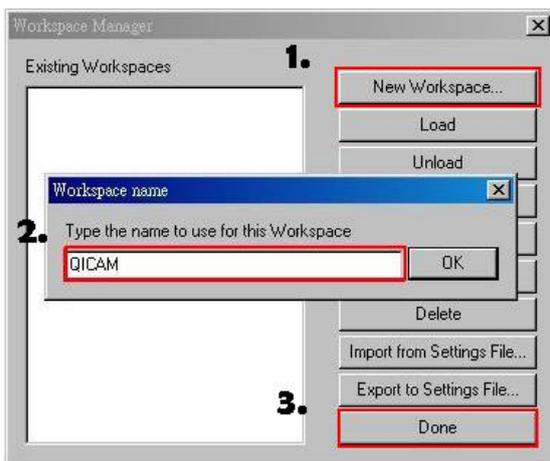


圖5-5 從Workspace Manager建立新的workspace的各項功能鍵

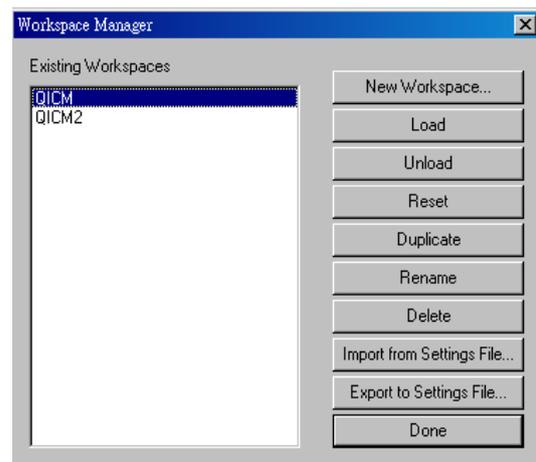


圖5-6 Workspace Manager

當建立一個新的workspace後，要取得live影像，首先要先下載適當的StreamPix camera driver。可直接點選[Hard >> Load Camera / Frame Grabber...] 或 從其空白處[click here to open it]點選，便會跳出[Grabber Section]視窗，選擇適當的Grabber然後點選[OK]，如圖5-7。StreamPix 會確認已選擇grabber的認證碼，待下載後便可取得相機的Live即時影像，如圖5-8。

若要停止或接收相機的即時影像畫面，可從[Hardware] >> [Live] 或工具列上選擇  on/off。另外，於視窗右側 [Docking Panel] >> [Docked Dialogs] 中可選擇畫面的維度 [Width x Height] 及 [Binning] 值作設定，亦可點選[Visually Define an ROI]，直接用滑鼠拉取使用者的興趣範圍，如圖 5-9。

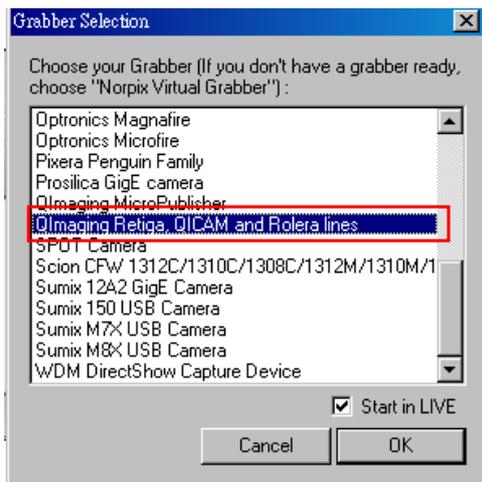


圖5-7 從Grabber Section中選擇適當的Grabber

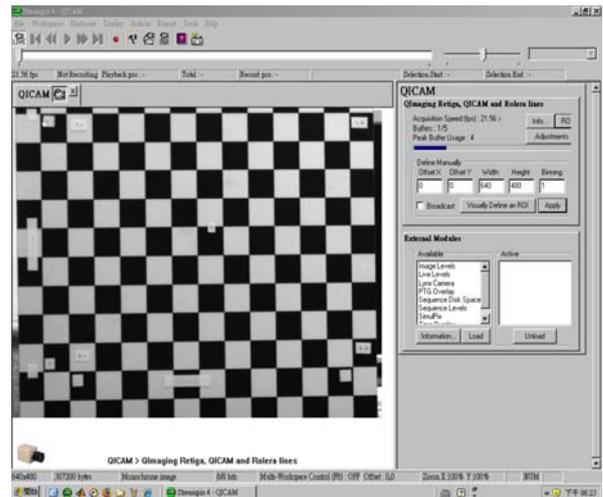


圖5-8 取得相機Live影像的畫面

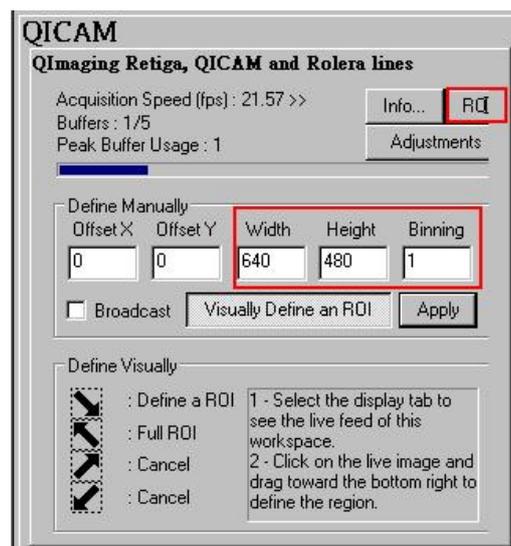


圖5-9 於Docked Dialogs中設定Width、Height及Binning值

依使用者所需，可選擇不同的檔案類型及檔案儲存位置來記錄影像。如圖5-11所示，從 [File] 中可選擇要儲存於 **Disk** 磁碟上或 **RAM** 記憶體裡的快速連續畫面，**AVI**影片檔(.avi)，或**BMP**,**JPG**,**TIF**, **PNG**, **fit**, **jp2** 等單張圖檔，決定好儲存格式後，選擇檔案儲存位置及命名檔案即可，如圖5-10。

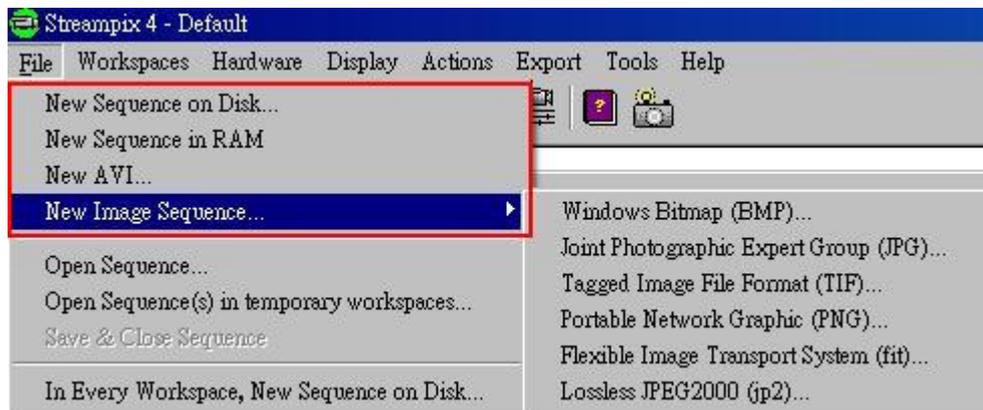


圖5-10 從 [File] 中選擇欲儲存的檔案類型及儲存位置選擇好儲存的檔案類型後便可開始擷取相機影像。

若使用者要記錄的是快速的連續畫面，為**New Sequence on Disk** 或 **New Sequence in RAM**，可從 [Actions] >> [Record] 或直接於工具列按下 [Record] 快捷鍵 ，StreamPix 便會開始紀錄，再點選一次按鈕，即會停止紀錄，連續畫面檔案會出現在Workspace標籤上，如圖5-11中綠色框框處。此時可以從工具列按鈕上按  Play/Pause 來播放或暫停影像，回到第一張、往前一張、往後一張，或到最後一張，如圖5-11紅色框框處；或從Slider滑軸移到所欲觀看之畫面。亦可從[Action] >>[Goto Frame #]直接輸入要移至哪個畫面，如圖5-12。

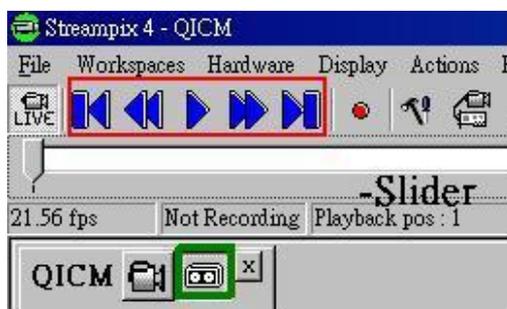


圖5-11 綠色框為Record的檔案，可由Slider或紅色框內的按鈕移動至所欲觀看之畫面

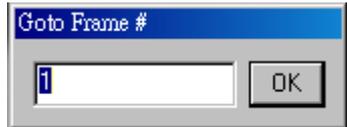


圖5-12 從[Action] >>[Goto Frame#]直接輸入要移至哪個畫面

移動至所想要的畫面後，可從 [Export] >> [Current Image] 中選擇欲輸出的檔案類型，此動作即為從連續畫面中擷取所想要的單張畫面並儲存之，如圖5-13。

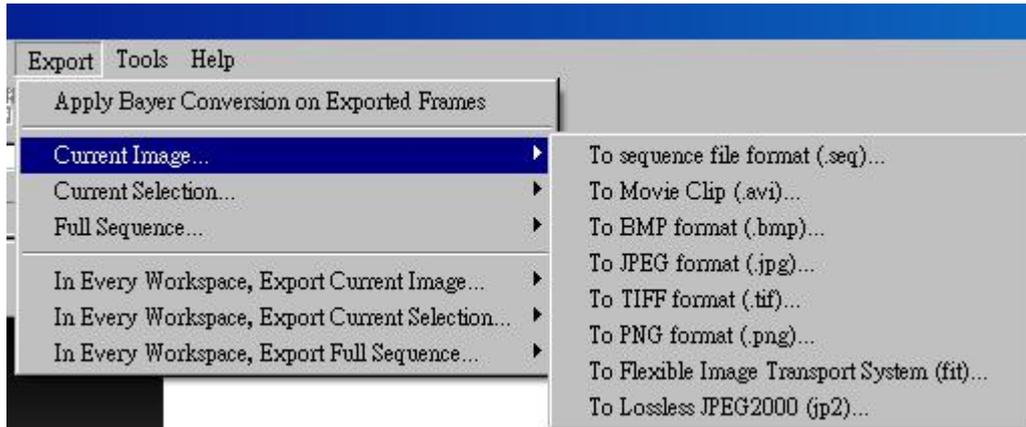


圖5-13 從連續畫面中擷取所想要的單張畫面並儲存成使用者所需格式

若是要記錄單張影像的話，從 [Actions] > [Snap One Frame] 或於工具列按下 [Snap One Frame] 快捷鍵 ，即可照下單張圖檔。另外也可選點 [Record] 鍵，其會將影像畫面連續以單張的方式拍攝且儲存下來。



圖5-14 當[Record]或[Snap One Frame]時，會於Display Area左下角處出現REC圖示

所擷取的影像皆儲存在使用者於一開始選擇的檔案位置中，所選的檔案儲存格式亦可用適當的檔案類型開啟之。

以上即為如何使用StreamPix軟體來讀入QICAM攝影機影像，擷取並儲存

成檔案。接著將進一步說明如何同時讀入一台攝影機以上，並同樣的擷取所需畫面。(以下將使用兩台攝影機為操作範例)

用IEEE1394高速傳輸線連結相機及電腦端孔，如上述步驟相同，建立Workspace後，再分別於各Workspace中 Load Camera / Frame Grabber，即可同時讀取到不同相機所拍攝到的Live畫面，如圖5-15。

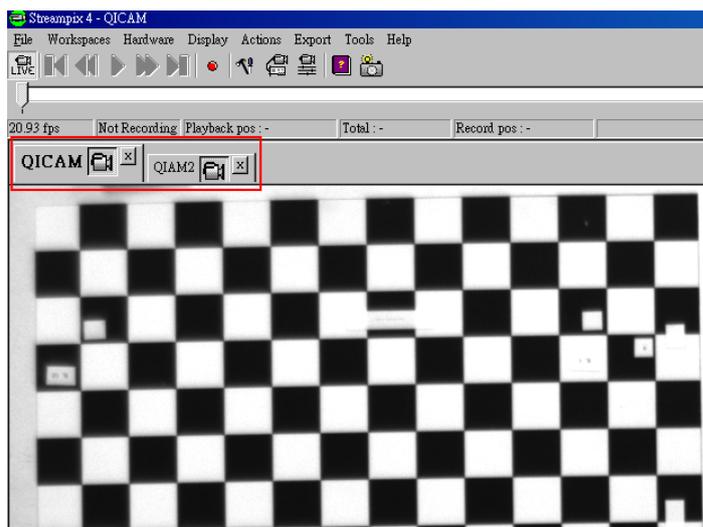


圖5-15 各Workspace可同時讀取到不同相機所拍攝到的Live畫面

上述動作並無法同時在同一個視窗內看見各相機的Live影像，接著可以從 [Tool] >> [Streampix Setting] >> [Advanced] 中，依目的選取 [Multi-Cameras / Advance Mode] 或 [Multi-Cameras / Simple Mode]，便可同時顯示多個相機的Live畫面，如圖5-16。

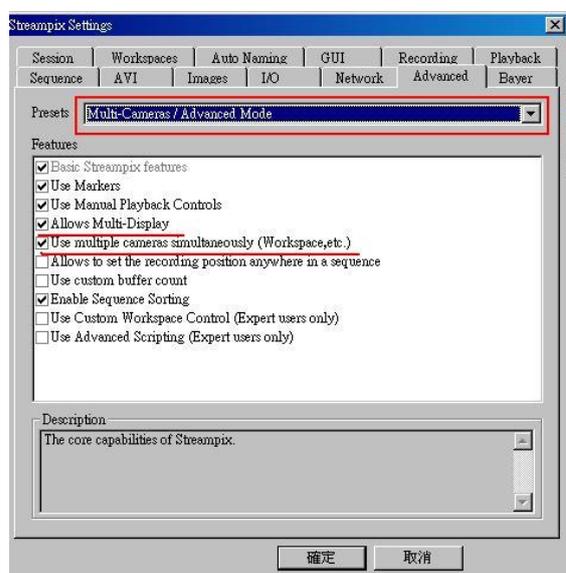


圖5-16 從 [Streampix Setting] >> [Advanced] 中選取可同時顯示多個相機畫面的 [Multi-Cameras / Advance Mode] 模式

視窗右側 Docked dialogs 中便出現 [Multi-Display]，可選取 Display Area 想要呈現的列與欄數，亦可自己輸入。先前已從 Grabber 下載 Live 影像到 Workspace 中，在於切割的 Display Area 中按右鍵，選取要在該 Area 中顯示的 Workspace，如此便可同時呈現不同相機捕捉的畫面，如圖 5-17、圖 5-18。

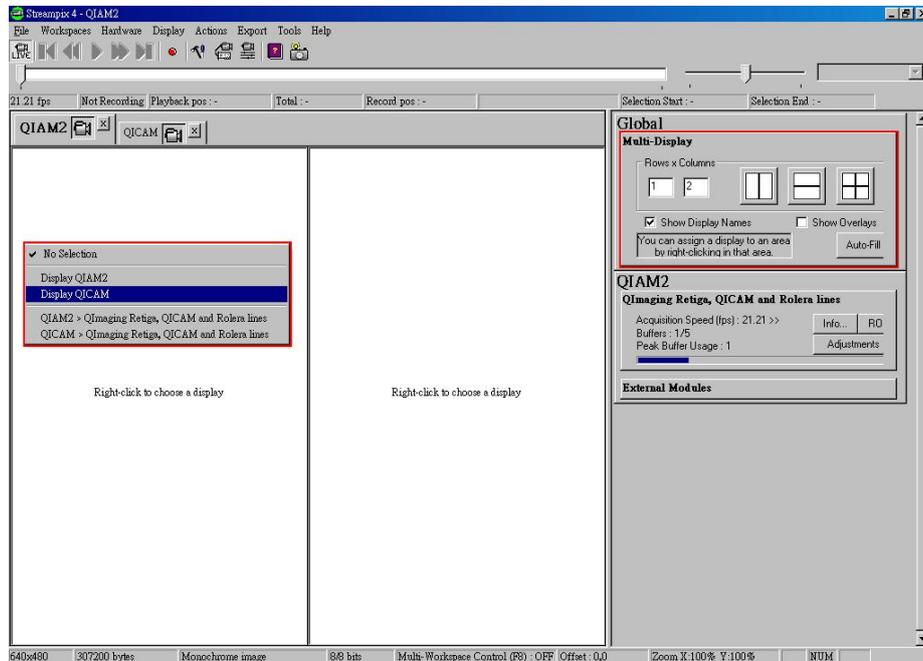


圖 5-17 於 [Multi-Display] 中設定欄與列並分別顯示個別 Workspace 之影像

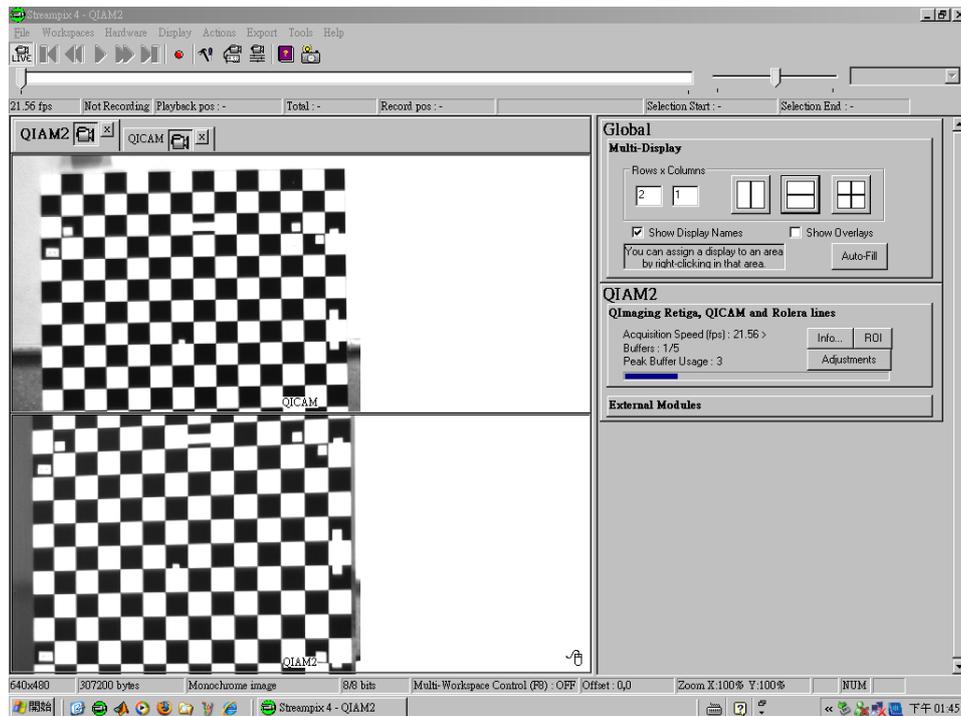


圖 5-18 同時呈現不同相機捕捉的影像畫面

呈現一台以上相機捕捉的 Live 畫面後，與先前提到的操作方式相同，可於工具列上分別進行紀錄及存檔等動作。但若欲“同時”紀錄畫面，可於 [Workspace] >> [Select All Workspaces] 選擇所有的 Workspace，此時 Workspace 標籤會反白，在執行動作時，例如 [Snap One Frame] 或 [Record]，便可將所有的 Workspace 畫面同時存取下來，如圖 5-19。



圖5-19 可選擇所有的Workspace，同時進行紀錄動作

經由StreamPix軟體將攝影機畫面擷取下來後，即可進行圖像之內部校正，校正試驗與設定將於下章5-2節詳述。

5-2 內部校正試驗布置與設定

攝影機的校正成效攸關重建之立體影像的正確性，因此在布置時必須謹慎。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？
- 相機是否對校正結果有影響？
- 校正布置(平行與否)對校正結果影響之敏感度為何？

實驗分組列表如表5-2，探討之各項因素分別說明如下：

1. 校正點大小

校正點大小會影響影像辨識度，由於進行內部校正時，需要知道相對應點的影像座標，當採用圓形校正點通常取其圓心做為參考點，較大之校正點在影像辨識的過程，容易因光線、對焦距離不同而產生變形(如圖5-20)，導致選點錯誤，但若校正點過小，影像可能因與雜訊污點同尺度而無法辨識。

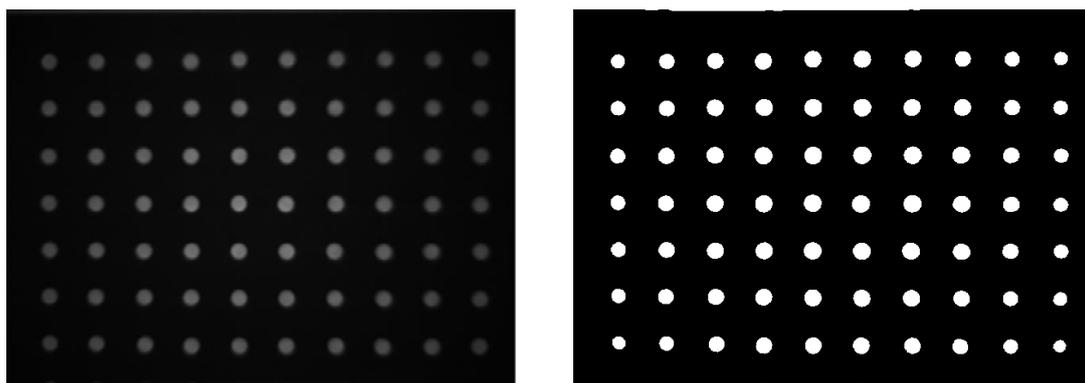


圖5-20 影像二值化處理後校正點呈不同大小

基於上述原因，採用棋盤形校正板上兩直線之正交點，或許是較適合的做法，然而當採用棋盤形校正板時，其網格大小也是需要考慮的因素，因網格太大則可所取的校正點較少，率定的結果可能會較不準確，若網格太小，則相對取點的誤差也增多，也可能會造成率定結果不準確。因此不同形式的

校正版以及校正點之間的距離是本計畫設計校正版時的考量。

2. 校正距離

攝影機的鏡頭有定焦與變焦之分，一般定焦鏡頭係採用標準鏡頭，即攝影視角約與人眼相近(約50度)，而校正距離(又稱對焦長度)指的是校正版至鏡頭的距離，一般像機經選擇拍攝近物(近距離)或風景(對焦距離無限遠)，即為調整此項參數。本試驗為驗證對焦距離對校正結果的影響程度，分別設計0.5、1.0及1.5m的對焦距離。

3. 相機因素

數位相機乃是以感光元件取代傳統相機的底片，所以感光元件的大小、精密度會影響拍攝影像的解析度與誤差。此外相機鏡頭也是影響像片品質的重要因素，包含焦距、光圈等皆會造成拍攝影像的優劣。本計畫分別採用Qimage QICAM 12bit與Basler A602f兩種型號之攝影機從事校正研究，兩種攝影機之外觀如圖5-21，其搭配鏡頭分別TV ZOOM LENS(2/3" 變焦C 11.5-69mm F1:1.4)與TV LENS (定焦12mm F1:1.4)。



圖5-21 本計畫內部校正採用之兩種攝影機(左：Qimage；右：Basler)

4. 試驗佈置

試驗佈置主要是指校正版與成像平面是否平行，因為進行內部校正時，是將三維世界的座標視作二維的座標，以減少高程這一參數，求解8個變數，如果校正版與成像平面不平行，則拍攝之像片會因有高程差而變不正確。本次試驗分別設計5度與10度(如圖5-22)，以探討內部校正時之試驗佈置對校正結果的敏感性。



圖 5-22 平行敏感度測試佈置
(左圖：相機與校正版偏斜五度；右圖：相機與校正版平行)

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

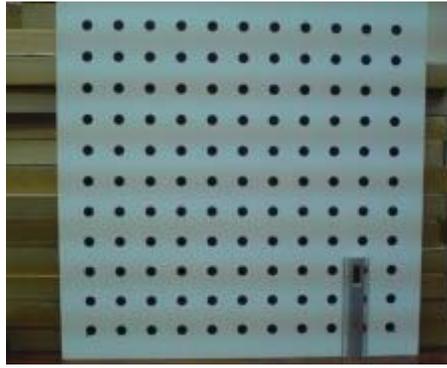
校正板【A】：直徑 2 公分之圓形校正點，校正點間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 121 點)

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

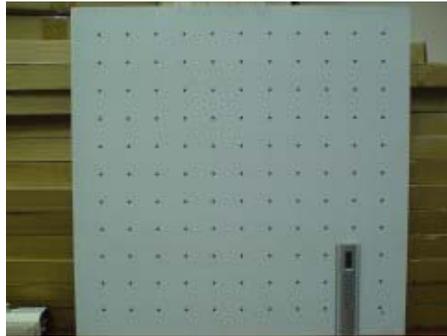
校正板【C】：棋盤式校正板，棋盤間距 6 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 121 點)

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

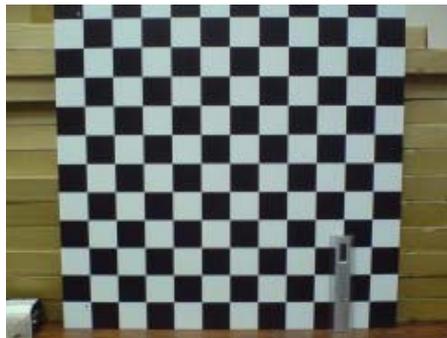
校正板【E】：棋盤式校正板，棋盤間距 1.5 公分，校正板大小 72×72 公分。(校正點合計 2209 點)



【A】圓點，直徑2公分



【B】圓點，直徑0.6公分



【C】棋盤格點，間距6公分



【D】棋盤格點，間距3公分



【E】棋盤格點，間距1.5公分

圖5-23 本計畫進行內部校正所設計之五種校正板

表5-2 內部校正實驗組別

目的	編號	相機與其參數	校正距離	校正版	相機與校正版位置
探討校正點大小對校正結果的影響	Exp 1	Qimage	1.5 m	A	平行
	Exp 2	Qimage	1.5 m	B	平行
	Exp 3	Qimage	1.5 m	C	平行
	Exp 4	Qimage	1.5 m	D	平行
	Exp 5	Qimage	1.5 m	E	平行
同上/ 不同相機	Exp 6	Balser	1.5 m	A	平行
	Exp 7	Balser	1.5 m	B	平行
	Exp 8	Balser	1.5 m	C	平行
	Exp 9	Balser	1.5 m	D	平行
	Exp 10	Balser	1.5 m	E	平行
校正距離的影響	Exp 11	Balser	0.5m	D	平行
	Exp 12	Balser	1.0m	D	平行
	Exp 13	Balser	1.5m	D	平行
探討布置對校正結果的敏感度	Exp 14	Balser	1.0m	D	水平順時間偏移 5 度
	Exp 15	Balser	1.0m	D	水平順時間偏移 10 度
	Exp 16	Balser	1.0m	D	水平逆時間偏移 5 度
	Exp 17	Balser	1.0m	D	水平逆時間偏移 10 度
	Exp 18	Balser	1.0m	D	垂直偏移 10 度
	Exp 19	Balser	1.0m	D	垂直偏移 20 度

5-3 內部校正結果與討論

在內部校正試驗中，試驗1~5 目的為探討校正點的大小是否影響校正結果?試驗6~10與試驗1~5對應，但採用不同相機，目的在於探討相機、鏡頭對校正之影響? 試驗11 ~13則是探討校正距離是否對校正結果有影響?至於試驗14~19則探討相機屏幕與校正板平行對校正結果之敏感度?根據4-3節對於內部校正的說明，再把內部校正執行步驟列點如下：

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

Step2: 選取多個校正點，利用 4-3 節(4.3.3)、(4.3.4)式求解八個 DLT 參數($L_1, L_3, L_4, L_5, L_7, L_8, L_9, L_{11}$)。

Step3: 根據所得之八個 L 參數，利用 4-3 節(4.3.5)、(4.3.6)式求解預測的未扭曲座標(predicted undistorted image coordinates) (x_p, y_p)，單位為 pixel，這也就是校正後的座標。

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

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

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

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

5-3-1 校正點大小之影響

試驗中採用的五種校正版分別為：A(圓點，直徑2cm)、B(圓點，直徑0.6cm)、C(棋盤，網格6cm)、D(棋盤，網格3cm)、E(棋盤，網格1.5cm)分別探討在不同類型校正版，探討校正點大小對內部校正之影響。內部校正結果如表5-3所示，說明如下。

1. 以各種校正點大小從事內部校正，其影像扭曲量值如表 5-3 所示。其中大圓點(編號 A)校正版產生的影像扭曲最大，主要是因為選點時，不易精準地選到目標點(圓心)所致，如圖 5-24。
2. 小圓點(編號 B)校正版得到的平均扭曲量是最小的，但最大誤差仍大，是因為有少數點與其選取點有較大誤差，如圖 5-25。
3. 綜合上述兩點以及由主軸點位置可發現到，圓點型校正版，經過內部校正後，扭曲較大且得到之主軸點位置也不盡正確，因此本文認為以圓點型校正版從事內部校正較不適宜。
4. 相對而言，棋盤格校正點產生之校正平均扭曲量均很小，如 Exp3~Exp5，但當棋盤間隔越小，也就是校正點愈多時，其扭曲量並沒有減小，甚至最大扭曲量越來越大，如圖 5-26。

綜合以上結果，本文認為在從事攝影機內部校正時，以棋盤式格點的校正版進行會有較小的扭曲誤差，並且棋盤格的網格間距也不宜過小。在本文所設計的五種校正版中，以編號【D】，間距 3 公分的棋盤式校正版有最好的校正結果，將以此結果作為後續研究的參考。

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

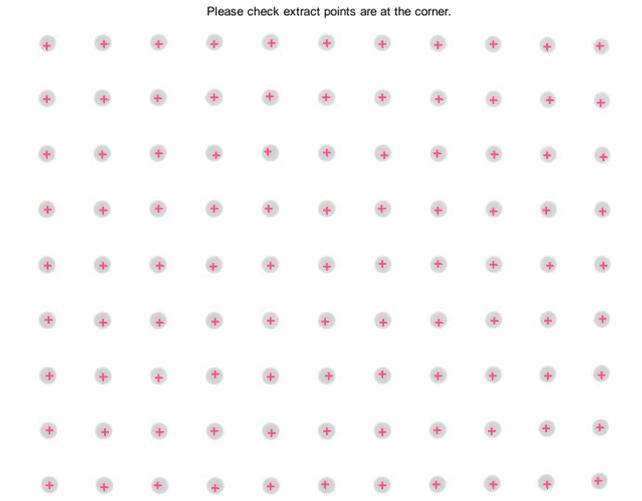


圖5-24 大圓點易發生選點不準問題(紅色代表選取位置)

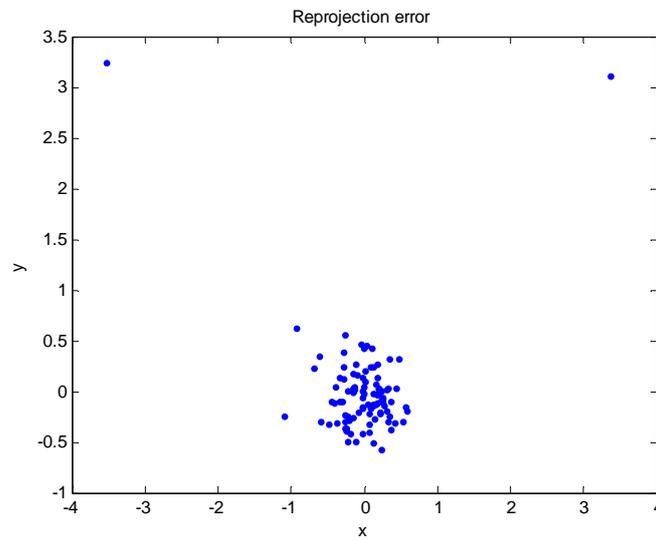


圖5-25 內部校正時，少數選點失敗導至誤差增大

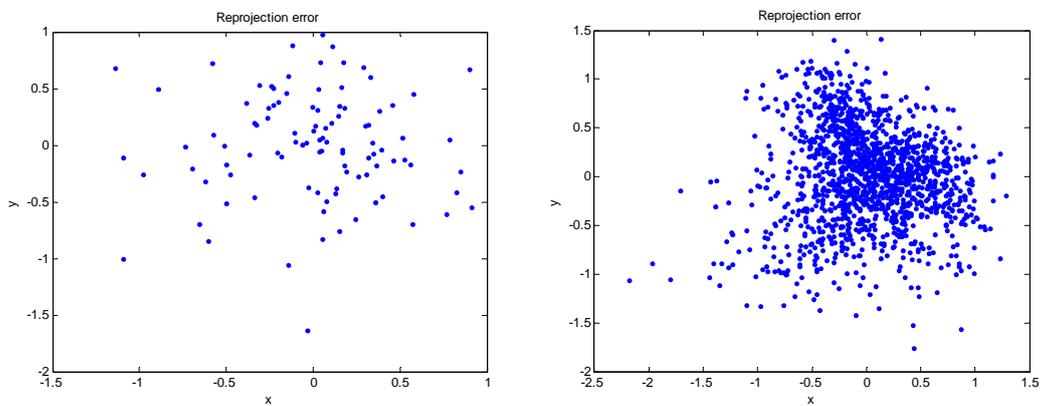


圖5-26 棋盤格校正版之校正誤差(左圖為校正版C；右圖為校正版E之結果)

5-3-2 相機、鏡頭對校正之影響

表5-2中Exp 6~10是採用Basler相機，在與Exp 1~5相同的環境設定下比較其校正結果，目的在於探討不同類型之攝影機，變焦鏡頭與定焦鏡頭之影響。校正結果如表5-4所示。

比較表5-3與表5-4分析結果，在Exp 4與Exp 9中，拍攝的距離均為1.5m且校正版均為棋盤式型號【D】之情況下，由Basler以及Qimage型號之攝影機所拍攝之影像經過內部校正後之平均扭曲量分別為0.6424與0.1514，得知以Basler型號攝影機從事內部校正所得之扭曲較小，最大扭曲量也獲得相同的結果，此結果可以說明，若變焦鏡頭沒有調整至最佳焦段，其校正結果可能比定焦鏡頭還差，後續試驗中將選取Basler型號之定焦距攝影機進行相關研究。

表 5-4 對應於前五組試驗以不同相機從事內部校正之結果
(鏡頭焦距:12mm, 影像畫數: 640 x 480)

編號	校正版	平均扭曲 (pixel)	最大扭曲 (pixel)	主軸點(x_0, y_0)
Exp 6	A	0.4643	4.6559	(319.3594, 140.5117)
Exp 7	B	2.0830	3.8452	(470.9453, 207.4180)
Exp 8	C	0.1405	0.4132	(319.3594, 237.0430)
Exp 9	D	0.1514	0.4649	(319.3594, 237.0430)
Exp 10	E	0.1572	0.4805	(320.1554, 238.1439)

5-3-3 校正距離之影響

試驗11~13中以Basler攝影機以及棋盤式型號【D】之校正版，在相同的條件下，依不同距離分別從事內部校正，設定的距離分別為1.5m、1.0m、0.5m，試圖探討距離對內部校正結果之影響，校正結果如表5-5。

校正結果顯示，實施三種距離的內部校正，其平均扭曲量都在0.1~0.2 pixel範圍內，最大扭曲量也不過在0.4 pixel上下，且計算出之主軸點都位於(319, 237)附近，三種距離的校正結果幾乎一樣，這說明了距離並不是影響內部校正的主要因子。為了統一起見，後續工作以1.0m為內部校正設定距離。

表 5-5 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)

5-3-4 相機屏幕與校正板平行敏感度

固定棋盤式型號【D】校正版之位置以及在1.0m之校正距離的情況下，以Basler型號之攝影機在不同角度的情況下進行試驗14~19，探討攝影機在不同角度所拍攝之影像對內部校正之影響，試驗得到之數據如表5-6。

由圖5-27，即使影像已達肉眼可分辨之傾斜程度(圖上紅線區塊框)，其經過內部校正後結果與Exp 12(棋盤式型號【D】校正版、1.0m之校正距離且相機屏幕與校正板平行)之結果比較，其誤差相差不大，且由圖5-28 影像扭曲分布向量圖可以發現，其扭曲方向圖呈現傾斜的現象，與Exp12之影像扭曲分布向量圖(請見附錄一)明顯不一致，而在右側扭曲量值(0.3137pixel)大於左側(0.0948pixel)，主軸點位置也有差異，所以相機屏幕與校正板平行與否亦影響到內部校正之結果。

表 5-6 不同布置方式執行校正誤差表
(鏡頭焦距:12mm, 影像畫數: 640 x 480)

編號	相機與校正板位置	平均誤差 (pixel)	最大誤差 (pixel)	主軸點 (x_0, y_0)
Exp 14	水平順時間偏移 5 度	0.1757	0.6455	(328.4844, 237.0430)
Exp 15	水平順時間偏移 10 度	0.1918	0.5586	(319.3594, 233.7363)
Exp 16	水平逆時間偏移 5 度	0.1934	0.9911	(313.3906, 237.0430)
Exp 17	水平逆時間偏移 10 度	0.1812	0.7215	(337.7344, 237.0430)
Exp 18	垂直偏移 10 度	0.1780	0.5288	(319.3594, 237.0430)
Exp 19	垂直偏移 20 度	0.1706	0.5703	(317.7969, 237.0430)

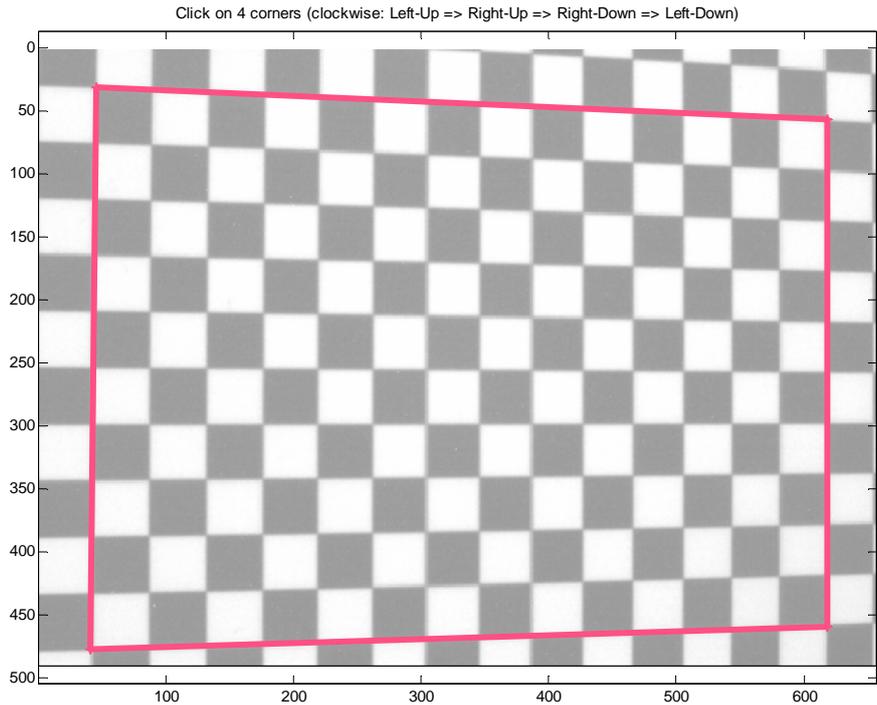


圖5-27 肉眼清晰可辨偏斜之影像 (Exp17：水平偏斜10度)

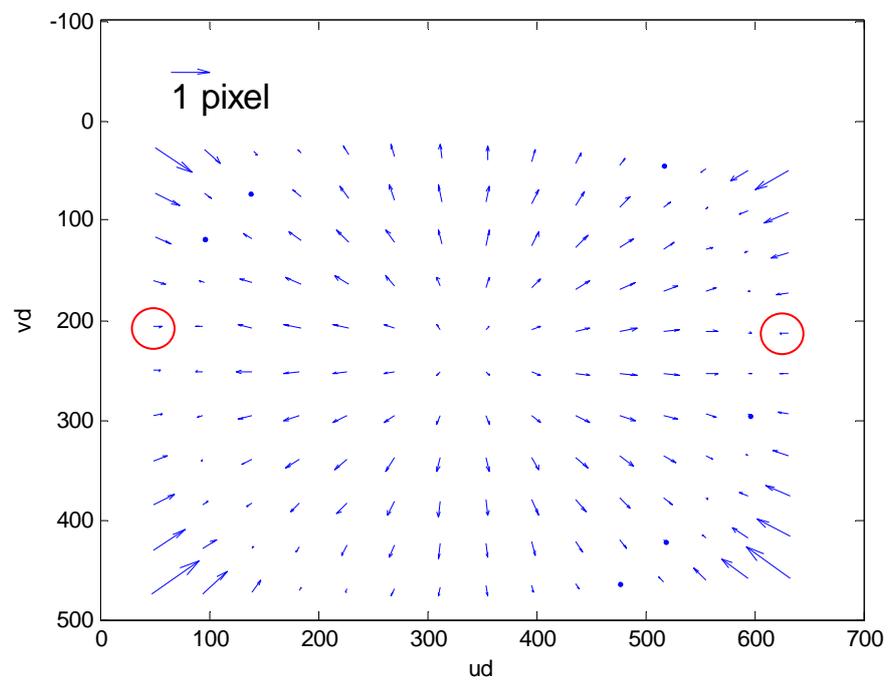


圖 5-28 影像扭曲分布向量圖

內部校正是影響後續影像重建重要的步驟之一，本計畫設計19組內部校正試驗，試圖探討可能影響內部校正之因子，根據試驗的結果，歸納成以三點結論：

1. 進行內部校正時，棋盤式校正版比圓點型校正版適合。
2. 內部校正之距離並不影響校正結果。
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。

圖 5-29 為攝影機拍攝，在校正前扭曲之影像，經過前述內部校正過程後，圖 5-30 為校正後之影像，由於校正量均僅在數個 pixel 之譜，因此透過眼睛在視覺上難以分辨出校正後的差別，唯若內部校正不確實，即使影像仍有微小扭曲，日後在利用三台攝影機從事影像重建時，將會出現無法匹配的結果或是匹配結果出現很大的偏差，內部校正可以說是未來海況影像是否可以成功立體化的重要過程。

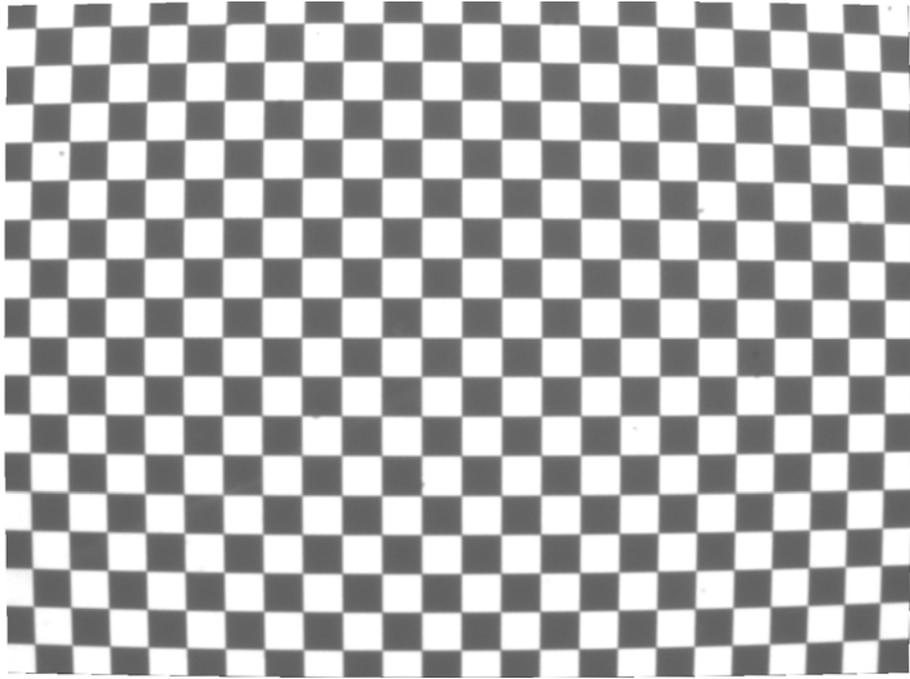


圖5-29 校正前扭曲影像

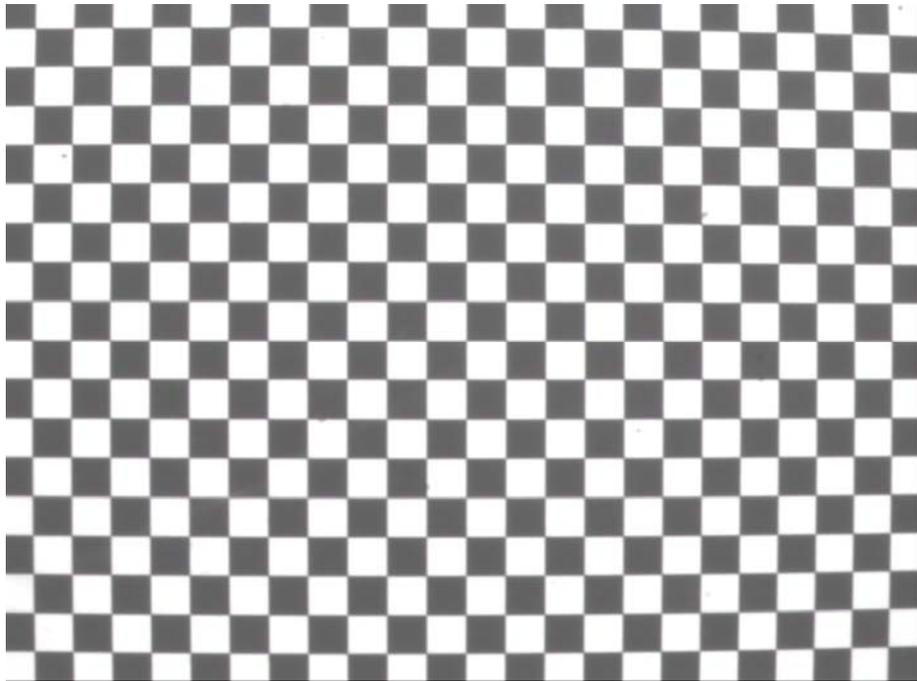


圖5-30 校正後未扭曲影像

5-4 主軸點之計算

內部校正的第二目的是在求主軸點的位置。透鏡產生的像差(Lens aberrations)會使得物點無法在焦面的正確位置上成像而產生扭曲，導致拍攝後之影像上某點的位置與實際空間上同一點位置會產生偏差，由5-3節內部校正可以驗證。因此根據上述之測試，針對本計畫所使用之三台攝影機鏡行選定最佳之佈置(Basler 相機、距離1.0m、棋盤式校正板網格3cm)進行內部校正並求得主軸點。其步驟如下：

1.讀入影像資料，進行灰階化處理。

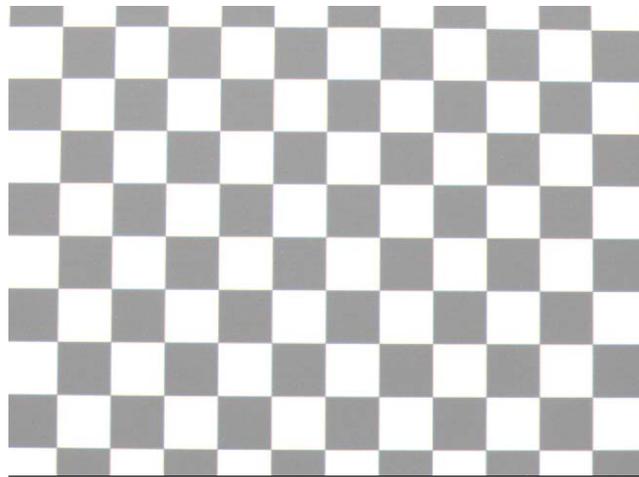


圖5-31 灰階化之原始影像

2.利用自行撰寫之影像辨識程式，找出網格角點的座標(x_a, y_a)。

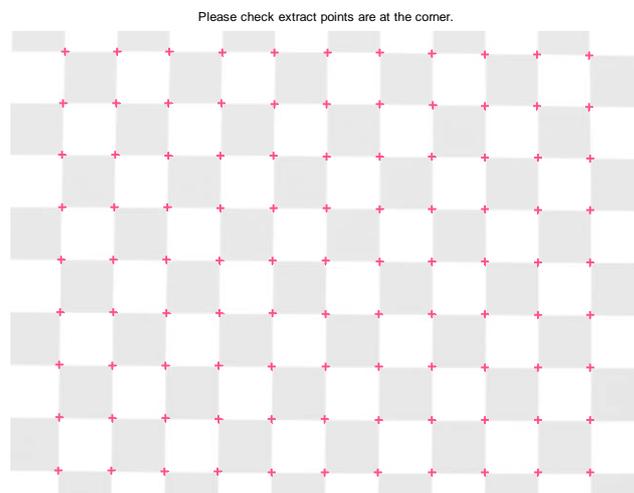


圖5-32 解析之網格角點

3.經過二維 DLT 公式計算，計算出之八個內部校正之參數為：

$$\begin{aligned} L1 &= 0.9105 & L3 &= -0.0148 \\ L4 &= 55.9080 & L5 &= 0.0065 \\ L7 &= 0.9032 & L8 &= 21.3667 \\ L9 &= 0.0000 & L11 &= 0.0000 \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

因為distorted(x_d, y_d)和predicted undistorted(x_p, y_p)座標的差異 Δr ，即扭曲量與radial distance有關係。由Holland et al.(1997)提出之 $\Delta r = k_3 r^3 + k_1 r$ ，利用疊代法可求解出主軸點(x_0, y_0)並由 Δr 與 r 進行回歸分析求得係數 k_3, k_1 ，如(5.3.2)、(5.3.3)、(5.3.4)所示，本例之徑向扭曲量與距離關係如圖5-33所示，徑向扭曲向量圖如圖5-34所示。

$$k_3 = -5.6965 \times 10^{-8} \quad (5.3.2)$$

$$k_1 = 0.0040 \quad (5.3.3)$$

$$(x_0, y_0) = (319.3594, 237.0430) \quad (5.3.4)$$

圖 5-31~34 為位於左側之攝影機所拍攝之影像。由於透鏡產生的像差(Lens aberrations)會使得物點無法在焦面的正確位置上成像，所以當我們使用攝影機拍攝實物時，會產生扭曲的現象，此種扭曲以中心點為基準，呈輻射狀向外圍擴散(圖 5-34)，因此攝影機所拍攝之影像和肉眼所見之實際影像有所差距而此些微之差異則會導致後來我們在測量及分析影像時產生一些誤差的結果，因此當我們要進行影像分析前的首要工作就是校正我們所得之影像。

表 5-7 本計畫所使用之三台攝影機內部校正結果
(鏡頭焦距:12mm, 影像畫數: 640 x 480)

攝影機	平均誤差 (pixel)	最大誤差 (pixel)	k_3	k_1	(x_0, y_0)
#1	0.1269	0.5218	-4.8951×10^{-9}	0.0035	(319.3594, 237.0430)
#2	0.1354	0.4239	-5.9824×10^{-9}	0.0045	(319.9219, 237.0430)
#3	0.1155	0.4452	-3.4701×10^{-9}	0.0045	(319.2964, 237.0430)

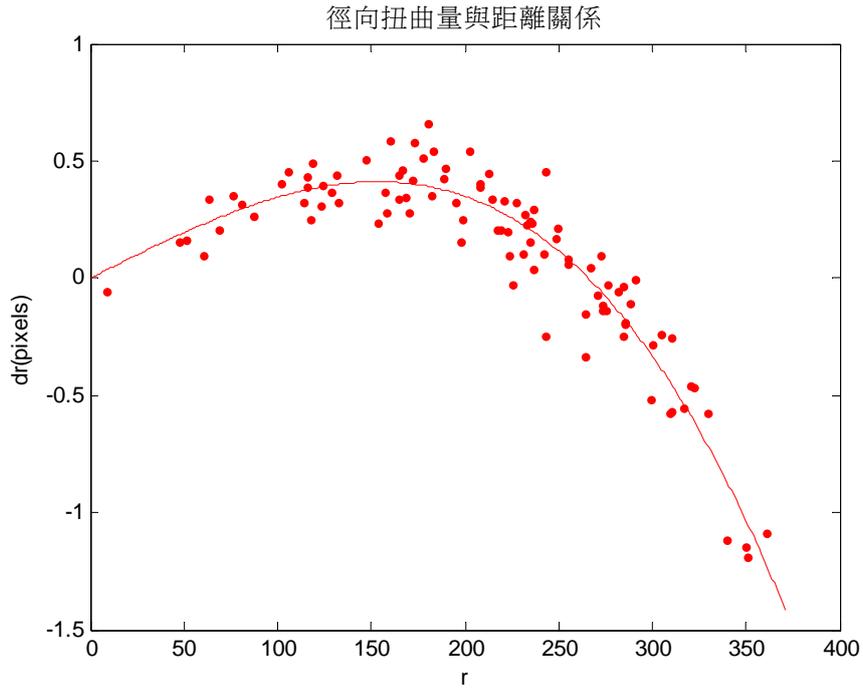


圖5-33 徑向扭曲量與距離之關係圖

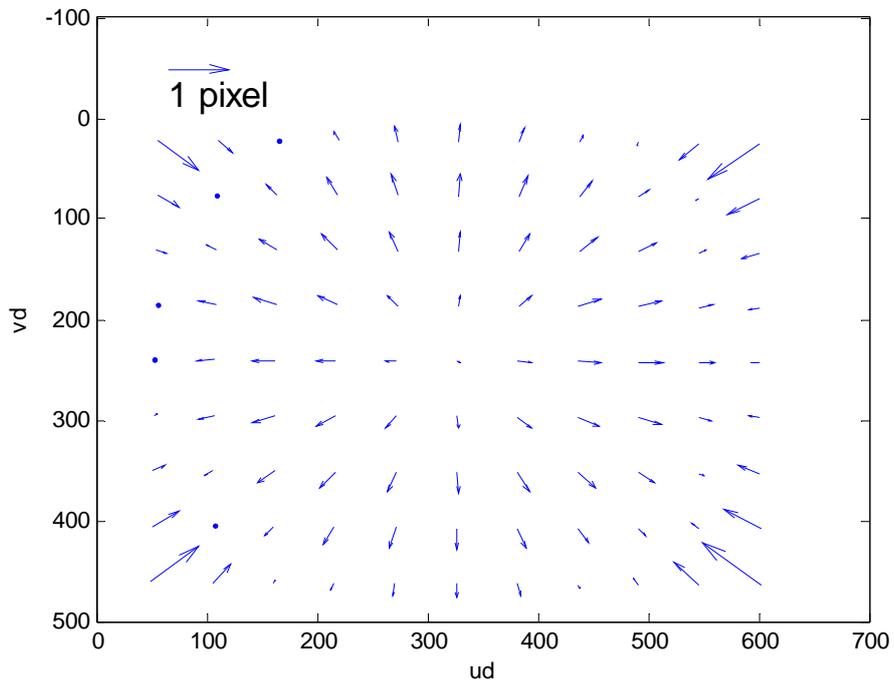


圖5-34 影像扭曲分布向量圖

第六章 現場測試地點評估

本計畫主要的目的是在開發利用攝影機從事海象觀測的技術，著重在理論與分析方法的建立上，雖然如此，但是為了驗證的需要，仍然需要從事現場的觀測試驗，同步和現場波浪量測站進行觀測與比對，以檢討立體海況影像攝影技術的準確性。因此，於本計畫工作合約中，需於第一年度尋找一個測試地點，以便第二年開始進行現場測試。根據本計畫工作計畫書所提，擬將此現場測試站設置於本計畫執行單位海洋大學海邊，其最大的好處就是該海域即將由本校(海洋大學)佈設一架底碇式波浪儀進行現場觀測(如後文所述)，屆時將有供本計畫研究比對的資料；另外的原因是為了儀器保全的問題，設置在校內相較於設置在戶外野地有較高的安全性；再者，電力與網路的供給在校內都相對的容易；最後一個考量是對於研究工作的便利性，由於研究期間可能會時常搬動觀測設備，測試地點的遠近與便利性與工作效率有很大的關連。基於上述原因，工作團隊以海洋大學為本計畫第二年建置測試站的最佳設置地點。

本計畫預計設置現場測試站的地點位於海洋大學電機資訊學院所處的工程二館A棟，如圖6-1所示，該棟建築物為一棟六層樓的建物，是海洋大學距海最近之樓房，研究團隊於六月及11月份前往踏勘，初步判定有兩個地點可以在明年設置立體海況影像攝影機，第一是位於工程二館前方之海堤上，如圖6-2所示，該處的優點為距海更近，根據學理判斷，海象觀測解析度應該會更高，但缺點是，颱風期間可能容易受到損壞，同時設置在該處必須在堤防上架設立桿，需要堤防管理單位的同意以及額外的立桿費用；第二個可能的地點為工程二館的頂樓，由於該棟為六層樓建築，因此頂樓距離地面約20公尺，與海平面垂直距離估計約25公尺，到海面之水平距離估計約104公尺，如圖6-2、圖6-3所示，此處有絕佳的視野與設置廠址，加上儀器的保全、電力、網路都應該較易取得，因此是目前本研究團隊認為較適合的地點，唯其缺點可能是距離海面太遠，觀測結果是否有足夠準確性必須要再深入討論。另外，研究團隊還踏勘了鄰近的碧沙漁港，港池內的中段碼頭距離海面僅約2公尺，是非常適合於初步測試立體海況影像觀測系統的地點，如圖6-4所示。根據前述初步踏勘結果，未來可以在上述地點從事系統測試研究，探討觀測系統在

各種與海面距離之條件下的準確性為何。



圖6-1 本計畫現場立體海況影像觀測系統預計設置處



圖6-2 海洋大學工程二館(圖左側)，距離海面約104公尺



圖6-3 海洋大學工程二館頂樓之視野。
(上圖)觀測系統可能的設置點；(下圖)觀測系統可能的視野



圖6-4 碧沙漁港中段碼頭，可為觀測系統近海面測試底點

第七章 結論與第二年度工作

本計畫目的為開發一個利用三台攝影機觀測海況的技術。利用攝影機觀測海洋很早就有相關的研究，利用一般手持式的相機或是將相機安裝在飛機上拍攝海面，然而這樣子的方式所測到的是靜態的海洋，海洋是隨時間持續變化的現象，海洋上的重力波週期大約介於 2 秒到 20 秒之間，人類有兩顆眼睛，所以可以看到立體的物體，包含海面上的波動，同理，若有兩台以上的攝影機同時看海面上一處，則可以觀察到隨時間變化的海洋波動，這也就是本計畫的出發點，利用兩台以上攝影機，透過學理的計算，將監看的物體匹配在一起使其立體化。立體化後的海況具有四個維度的資訊，包含了空間(x,y,z)和時間(t)的資訊，有了這些資訊，我們要計算相關的海洋參數都可以迎刃而解，本研究的目標為海象觀測，有興趣的是窺探海洋波浪的高度(波高)、長度(週期)與方向(波向)等參數。

本年度(2008)為計畫工作第一年度，計畫工作重點內容有四：(一)立體海況觀測系統整合與測試；(二)掌握立體影像重建理論；(三)攝影機內部校正；(四)現場原型測站位置踏勘。以下根據前述幾項，列點說明本計畫工作成果。

(一) 立體海況觀測系統整合與測試

1. 本計畫所需之系統硬體由中央氣象局交付。本計畫工作團隊已完成立體海況觀測系統之整合與現場測試，證實系統可以正常運作並可取得海面影像。
2. 本計畫完成影像數位化工作，利用 StreamPix 軟體可以擷取單張或動態影像，並可以設定相關攝影機參數，本計畫已熟練於使用該影像擷取軟體。
3. 本計畫工作團隊已製作了機動式的立體影像觀測系統，可以隨時搬移至任意場所從事觀測試驗。

(二) 掌握立體影像重建理論

1. 根據前人研究蒐集與整理結果，利用攝影機於海洋研究者很多著重在實驗室應用，現場觀測研究大都在觀察大尺度的海洋或海岸現

象，如沙灘的侵蝕等研究，利用立體攝影機在海象觀測方面的研究可以說才剛啟動。

2. 本計畫將應用直接線性轉換法(Direct Linear Transform, DLT)將影像所觀測到的物體，從影像空間直接轉換至實物空間，而不需要透過地面控制點(Ground Control Point)。
3. 立體海況成像過程中，幾個重要的過程包含了：內部校正、外部校正、影像匹配以及海況立體化。立體化之後的影像可以用來計算波浪相關參數。
4. 內部校正是校正攝影機本身所引起之影像扭曲效應，外部校正則是連結觀測系統和實物間的關係。本文將採用 Wanek and Wu (2006) 所提出來的方法來從事外部校正工作，外部校正為第二年工作項目，內部校正則為本年度預定工作內容。
5. 求解由 DLT 建構之方程式中的八個 L 參數後即可獲得內部校正式，觀測影像(扭曲)透過內部校正式可以獲得校正後未扭曲影像。

(三) 攝影機內部校正

1. 本計畫以中央氣象局提供的 Qimage 攝影機(變焦)和自備的 Balser 攝影機(定焦)從事內部校正工作。為實施內部校正，本計畫設計五片不同規格的校正版與 19 組試驗，藉此探討那些因子可能影響內部校正結果。
2. 內部校正試驗結果顯示，校正點的大小、形式與校正結果有關。利用棋盤格式的校正版從事內部校正，其校正後的扭曲量值低於圓形點校正版的結果。
3. 內部校正試驗結果顯示，鏡頭類型與校正結果有關。以定焦鏡頭(如本計畫所使用之 Balser 相機)進行內部校正的扭曲量低於變焦鏡頭(如本計畫使用之 Qimage 相機)。
4. 內部校正試驗結果顯示，距離和校正結果無關。不論校正距離為何，只要相機、鏡頭與相關設定不變，校正結果的變化不大。

5. 內部校正試驗結果顯示，相機或校正版的擺設對校正結果有影響，日後從事校正工作時，相關儀器擺設(如相機需與校正版平行)必須嚴謹以對，以免影響校正結果。
6. 歸納一系列內部校正的試驗結果，以間隔 3 公分的棋盤式格點校正版從事內部校正之扭曲量最小，相機則以搭配定焦鏡頭會有較好的結果，而校正距離對結果不產生影響，在室內從事內部校正，可以設定為 1 公尺。
7. 本計畫從事內部校正後的平均扭曲量僅在 0.15 pixel 左右，最大扭曲量不超過 0.5 pixel (見表 5-4)，這可以說是非常精確地校正結果。
8. 內部校正結果顯示扭曲量與和主軸點之間的徑向距離存在有具體的關係，以本計畫內部校正有最佳結果的試驗 9 為例，其關係為 $\Delta r = 0.0036r^3 - 4.8988 \times 10^{-8}r$ ，此方程式可以作為後續進行影像匹配和重建的使用。

(四)現場原型測站位置踏勘

1. 根據現場踏勘結果，本計畫認為海洋大學距離海岸最近的工程二館頂樓是最佳的原型測站設置地點。此處在電力、傳輸、儀器保全以及測試工作便利性上都具有相當好的優點。
2. 明年度與立體影像觀測系統比對的現場海上測站已有觀測儀器，設置上需請求中央氣象局協助。

以上為本計畫第一年度的工作成果，相關工作均已完成。計畫第二年度的工作重點將在於觀測系統的外部校正以及影像匹配和立體海況重現，這些工作可以說是本計畫的核心，均是在第二年度上半年應完成之事項，下半年預計在冬天來臨前，在海洋大學設置一座原型測站，開始進行現場觀測，蒐集與海上測站比對的資料，作為第三年觀測結果正確性評估的資料來源。

參考文獻

- [1] 林松柏，陳颯揚，黃明志，動態輪廓模式之波浪影像邊緣偵測處理，27 界海洋工程研討會，251-258 頁，2005。
- [2] 陳颯揚，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 界海洋工程研討會，217-222 頁，2006。
- [3] 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.
- [4] 何維信，航空攝影測量學，國立編譯館，1995。
- [5] 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.
- [6] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Keller, K. C., and Gotwols, B. L., Two-dimensional optical measurement, *Applied Optics*, Vol. 22, No. 22, pp. 3476-3478, 1983
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Linder, W., *Digital Photogrammetry – Theory and Applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Piepmeier, 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.
- [17] Plant, N. G. and Holman, R. A., Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140, 1-24, 1997.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhang Z., Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 27, No. 2, pp.161-198, 1998.