

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 學 系
碩 士 論 文

以非量測性相機進行近景攝影測量探討

**Analysis of Close-range Photogrammetry by Using
Non-metric Camera**

研 究 生：鄒芳諭

指 導 教 授：史天元

中 華 民 國 九 十 九 年 七 月

以非量測性相機進行近景攝影測量探討
**Analysis of Close-range Photogrammetry by Using
Non-metric Camera**

研究生：鄒芳諭
指導教授：史天元

Student : Fang-Yu Tsou
Advisor : Tian-Yuan Shih

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

以非量測性相機進行近景攝影測量探討

學生：鄒芳諭

指導教授：史天元

國立交通大學土木工程學系

摘要

三維模型之需求逐日增加，利用非量測性數位相機獲取之目標物影像，得到三維空間資訊，已成為一項極具經濟效益之課題。非量測性數位相機之量測性應用，內方位參數為關鍵因素，本研究選用三套近景攝影測量商用軟體 PhotoModeler、iWitness 及 Lensphoto 探討相機率定結果及像距與物距之關係。使用 Lensphoto 軟體以近景攝影測量技術生成目標物之點雲，並與地面雷射掃描儀獲得之點雲，探討近景攝影測量之限制。以平行及旋轉多基線攝影之方式，拍攝目標物影像，生成點雲資料並分析其精度。

研究成果顯示，兩次實驗在輻射距離最大之輻射透鏡畸變差之差值：PhotoModeler 為 11.135 μm ，iWitness 為 3.489 μm ，Lensphoto 為 1.664 μm ，PhotoModeler 之差值為最大；最大輻射透鏡畸變差之平均：PhotoModeler 為 336.097 μm ，iWitness 為 343.531 μm ，Lensphoto 為 320.847 μm 。相機率定時受率定標涵蓋影像畫面之限制，使鏡頭對焦距離非無窮遠，則率定所得的焦距為像距。其中，由於 PhotoModeler 相機率定標之尺寸不同，造成攝影物距不同，導致率定所得攝影像距差值達 1.04 mm。

鏡面雕塑之三維建模難以在近景攝影測量中實現，因鏡面會隨不同拍攝角度而呈現不同之反射影像，造成立體像對無法匹配。載入 Lensphoto 軟體之影像受目標物涵蓋影像範圍之限制，使匹配難以生成整體模型點雲。以平行與旋轉多基線攝影方式取得目標物影像並經空三解算後生成點雲，平行多基線攝影之控制點及檢核點整體精度以 RMSE (Root Mean Square Error)表示，分別為 0.0066m 及 0.0678m，旋轉多基線交會攝影則分

別為 0.0016m 及 0.0425m，顯示旋轉多基線交會攝影之精度高於平行多基線攝影方式。在近景攝影測量與地面雷射掃描之精度比較，地面雷射掃描之控制點及檢核點整理精度之 RMSE 分別為 0.0376m 及 0.0382m，結果顯示近景攝影測量之精度略高於地面雷射掃描之精度。

關鍵字：非量測性相機、近景攝影測量、相機率定、地面雷射掃描、旋轉多基線交會攝影、點雲。



Analysis of Close-range Photogrammetry by Using Non-metric Camera

Student : Fang-Yu Tsou

Advisor : Tian-Yuan Shih

**Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University**

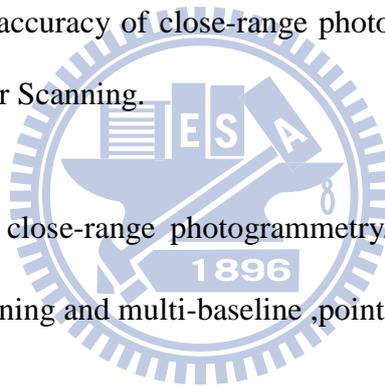
Abstract

The demand of 3D models increased day by day, using non-metric digital camera to capture the image with 3D information, has a great economic benefit. In the non-metric digital camera applications, the interior orientation parameters are very important. This study used three sets of close-range photogrammetry software : PhotoModeler, iWitness and Lensphoto, and analyze the result of camera calibration and the relationship between image distance and object distance. Using Lensphoto software to generate point clouds of objects, analyze the limitations of close-range photogrammetry with the point cloud from ground laser scanner. Finally, analyze the accuracy of parallel multi-baseline and panning and multi-baseline digital close-range photogrammetry.

Results show that difference of the largest radial lens distortion on the largest radial : PhotoModeler is $11.135\mu\text{m}$, and iWitness is $3.489\mu\text{m}$, and Lensphoto is $1.664\mu\text{m}$. Average of the largest radial lens distortion on the largest radial : PhotoModeler is $336.097\mu\text{m}$, and iWitness is $343.531\mu\text{m}$, and Lensphoto is $320.847\mu\text{m}$. When object distance is equal to infinity, the image distance is equal to the focal length. Due to the different sizes of targets in PhotoModeler, the object distances are different and the difference of image distance up to 1.04mm .

It is difficult that modeling 3D mirror sculpture in the close-range photogrammetry, because mirror will reflect rays in different angles and different reflectance sights, resulting stereopairs not match. Because the softwares of close-range photogrammetry have some restrictions of images, the object is difficult to reconstruct overall 3D model. The two methods of taking images are parallel multi-baseline and panning and multi-baseline, and generate point clouds. The RMSE (Root Mean Square Error) of control points and check points for parallel multi-baseline are 0.0066m and 0.0678m, and for panning and multi-baseline are 0.0016m and 0.0425m. From the result of Terrestrial Laser Scanning, it shows that the RMSE of control points and check points are millimeter. From the result of Terrestrial Laser Scanning, it shows that the RMSE of control points and check points are 0.0376m and 0.0382m. From the result of this research, the accuracy of close-range photogrammetry is slight higher than the accuracy of Terrestrial Laser Scanning.

Keyword: non-metric camera, close-range photogrammetry, camera calibration, Terrestrial Laser Scanning, panning and multi-baseline point cloud.



誌謝

我畢業了!!!兩年的碩士生涯終於結束了!!!

期間非常感謝恩師史天元教授，老師在學術研究上的執著精神及待人處事的態度，使我刻骨銘心；老師在我課業與研究上的細心指導，及學習態度的諄諄教誨，使我獲益匪淺，在此致上最真誠的謝意。另外，承蒙曾義星老師、蔡榮得老師與張智安老師在學生論文口試期間不吝指正，並提供寶貴意見，使此論文得以順利完成，學生感激之情盡在不言中。

這兩年，我有幸遇上俊毅學長與雅信學姐，不僅在課業與學習上無私地提供自身經驗與技術支援，在日常生活中也很照顧我、幫助我，非常感謝你們。謝謝一起學習與成長的同學們：凱程、卡拉、美芳、千惠、洵韻，也謝謝建成學長、恩銘學長、逸如學姐、暉尊、佳筠與沐崧，謝謝研究所一起相處的所有人，使我彷彿身處在一個大家庭中，生活中的酸、甜、苦、辣都可一同分享與承擔。

此外，謝謝靜玫跟小竹紫，我的可愛室友們，為我緊繃壓頂的碩二生活增添不少樂趣，炮製一帖舒壓良藥。非常感謝老伴兒一依吟，傾聽我訴說心事，陪伴我迎面挑戰，還有常常留在我桌上的驚喜便條，都是給予我最大的鼓勵。謝謝律吟、秉豬、家儀、凱惠與小月，「有福同享、有難同當」用在我們身上最適合不過了。

最後要謝謝我親愛的爸爸、媽媽，總是把最好的留給我，並給我最大的支持與鼓勵，謝謝你們給我最安心的避風港。

目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
誌謝.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究方法與流程.....	3
1.4 論文架構.....	4
第二章 近景攝影測量基礎理論.....	5
2.1 透鏡成像幾何.....	5
2.2 物空間坐標系統與像坐標系統之關係.....	6
2.2.1 內方位參數.....	6
2.2.2 透鏡畸變差.....	7
2.2.3 外方位參數.....	9
2.2.4 共線方程式.....	9
2.2.5 空間前方交會.....	11
2.3 核幾何原理.....	12
2.4 影像匹配.....	13
2.4.1 標準化互相關法.....	14
2.4.2 最小二乘匹配法.....	15
2.5 LENSPhoto 軟體處理影像之攝影方式.....	17
2.5.1 平行多基線攝影.....	18
2.5.2 旋轉多基線交會攝影.....	18
第三章 內方位參數與其率定.....	20
3.1 實驗資訊與流程.....	20
3.1.1 資料獲取系統.....	20
3.1.2 實驗流程.....	21
3.2 相機率定程序.....	22
3.2.1 PhotoModeler.....	22
3.2.2 iWitness.....	28
3.2.3 Lensphoto.....	34

3.3	實驗成果與分析.....	41
3.3.1	內方位參數率定結果.....	41
3.3.2	輻射透鏡畸變差.....	45
3.3.3	像距與物距之關係.....	49
3.3.4	相機率定之程式集評比.....	51
第四章	三維模型點雲生成.....	55
4.1	研究相關資訊與流程.....	55
4.1.1	實驗區資訊.....	55
4.1.2	研究數據介紹.....	56
4.1.3	研究流程.....	57
4.2	近景攝影測量點雲生成程序.....	58
4.2.1	外業控制點量測與拍攝作業.....	58
4.2.2	載入影像與空三匹配.....	64
4.2.3	影像之控制點量測.....	66
4.2.4	生成點雲.....	67
4.3	實驗成果與分析.....	69
4.3.1	實例一—鏡面雕塑.....	69
4.3.2	實例二—應用近景攝影測量生成目標物點雲.....	73
4.3.3	實例三—平行與旋轉多基線攝影測量.....	77
4.3.4	近景攝影測量與地面雷射掃描精度比較.....	82
第五章	結論與建議.....	86
參考文獻	88
附錄一、相機鏡頭拆裝實驗	90
附 1.1	相機率定處理.....	90
附 1.2	率定成果與分析.....	93
附 1.3	小結.....	95

圖目錄

圖 1-1、研究流程圖.....	3
圖 2-1、透鏡成像原理.....	5
圖 2-2、近景攝影測量垂直攝影之示意圖 (Arias, 2005)	6
圖 2-3、對稱輻射畸變差與離心畸變差示意圖 (柯濤, 2008)	9
圖 2-4、近景攝影測量垂直攝影時示意圖 (龔健彬, 1997)	11
圖 2-5、核幾何示意圖.....	13
圖 2-6、NCC 影像匹配之示意圖 (修改自 Wolf & Dewitt, 2000)	15
圖 2-7、左右影像間幾何變形.....	16
圖 2-8、考慮幾何變形之最小二乘匹配法圖示 (修改自 Schenk, 1999)	16
圖 2-9、平行多基線攝影示意圖 (柯濤, 2008)	18
圖 2-10、旋轉多基線交會攝影示意圖 (柯濤, 2008)	19
圖 3-1、相機率定實驗流程圖.....	21
圖 3-2、PhotoModeler 率定標.....	22
圖 3-3、拍攝 PhotoModeler 率定標影像的位置示意圖.....	23
圖 3-4、拍攝 PhotoModeler 率定標之影像.....	24
圖 3-5、以 PhotoModeler 進行影像量測之結果.....	26
圖 3-6、PhotoModeler 相機率定報告.....	27
圖 3-7、iWitness 率定標及檢驗場佈設.....	28
圖 3-8、拍攝 iWitness 率定標之實際位置.....	29
圖 3-9、拍攝 iWitness 率定標之影像.....	30
圖 3-10、以 iWitness 進行影像量測之結果.....	32
圖 3-11、iWitness 參數率定結果之視窗.....	33
圖 3-12、本實驗所用 Lensphoto 之網格.....	35
圖 3-13、拍攝 Lensphoto 率定標影像的位置示意圖.....	36
圖 3-14、拍攝 Lensphoto 率定標之影像組 set5	37
圖 3-15、拍攝 Lensphoto 率定標之影像組 set6	38
圖 3-16、Lensphoto 操作視窗.....	39
圖 3-17、以 Lensphoto 進行影像量測之結果.....	40
圖 3-18、Lensphoto 參數率定結果之視窗.....	41
圖 3-19、PhotoModeler 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖.....	46
圖 3-20、iWitness 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖.....	46
圖 3-21、Lensphoto 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖.....	47
圖 3-22、各軟體兩組率定結果之鏡頭輻射畸變差折線圖.....	48
圖 3-23、六組實驗之輻射畸變差折線圖.....	48
圖 3-24、拍攝 PhotoModeler 率定標位置.....	53

圖 3-25、拍攝 iWitness 率定標位置.....	53
圖 3-26、拍攝 Lensphoto 率定標位置.....	53
圖 4-1、緣慧潤生鏡面雕塑群組作品.....	55
圖 4-2、實驗區之一—緣慧潤生外觀尺寸示意圖.....	56
圖 4-3、實驗區之二—水袖外觀尺寸示意圖.....	56
圖 4-4、實驗區之三—工程一館外觀尺寸示意圖.....	56
圖 4-5、近景攝影測量生成點雲流程圖.....	58
圖 4-6、緣慧潤生之控制點與檢核點示意圖.....	59
圖 4-7、水袖之控制點與檢核點示意圖.....	60
圖 4-8、工程一館之控制點與檢核點示意圖.....	60
圖 4-9、拍攝緣慧潤生之影像.....	61
圖 4-10、拍攝水袖之影像.....	62
圖 4-11、平行多基線拍攝工程一館之影像.....	63
圖 4-12、旋轉多基線拍攝工程一館之影像.....	63
圖 4-13、建立專案之視窗，在此將影像分條帶後續處理.....	64
圖 4-14、人工點選種子點操作視窗.....	65
圖 4-15、粗略空三匹配之成果.....	65
圖 4-16、影像控制點初步量測.....	66
圖 4-17、影像控制點精密校正.....	67
圖 4-18、經空三匹配與加密匹配之成果.....	68
圖 4-19、未經編修之點雲展示.....	68
圖 4-20、鏡面雕塑之立體像對.....	70
圖 4-21、以 Photosynth 展示緣慧潤生點雲，(a)紅框表示 100%.....	71
圖 4-22、五個掃描站所生成之緣慧潤生全景點雲模型.....	72
圖 4-23、五個掃描站生成之緣慧潤生點雲模型.....	72
圖 4-24、經人工邊修後之緣慧潤生三維點雲資料.....	73
圖 4-25、緣慧潤生邊修後之三維模型.....	73
圖 4-26、水袖之環繞影像空三匹配成果.....	74
圖 4-27、再次實驗所使用之水袖影像.....	74
圖 4-28、使用之控制點及其與影像位置之關係.....	74
圖 4-29、水袖之點雲展示.....	75
圖 4-30、以 Photosynth 展示水袖之點雲.....	76
圖 4-31、以地面雷射掃描儀獲取之水袖點雲.....	77
圖 4-32、平行多基線攝影之點雲正視與俯視圖.....	78
圖 4-33、旋轉多基線交會攝影之點雲正視與俯視圖.....	79
圖 4-34、控制點及檢核點之位置關係.....	79
圖 4-35、工程一館之光達點雲模型（正視圖）.....	83
圖 4-36、工程一館之光達點雲模型（斜視圖）.....	83

圖 4-37、工程一館之光達點雲模型（俯視圖）	84
圖 4-38、工程一館之光達點雲模型（局部放大圖）	84
附圖 1-1、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set7	91
附圖 1-2、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set8	92
附圖 1-3、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set9	93



表目錄

表 3-1、數位相機之相關規格表.....	20
表 3-2、定焦鏡頭之相關規格表.....	21
表 3-3、PhotoModeler 率定參數及精度之整理.....	27
表 3-4、iWitness 率定參數之整理.....	33
表 3-5、Lensphoto 率定參數之整理.....	41
表 3-6、各組實驗之內方位參數率定結果.....	42
表 3-7、各組實驗之內方位參數標準差.....	43
表 3-8、各組實驗之相機鏡頭畸變程度.....	44
表 3-9、輻射畸變差實驗之差值與平均.....	47
表 3-10、六組實驗之攝影物距.....	49
表 3-11、物距與像距之關係.....	50
表 3-12、近景攝影測量軟體相機率定之評比.....	51
表 3-13、率定標影像拍攝位置及數量.....	52
表 4-1、地面雷射掃描儀參數表.....	57
表 4-2、平行與旋轉多基線攝影之控制點精度.....	81
表 4-3、平行與旋轉多基線攝影之檢核點精度.....	81
表 4-4、兩種攝影方法涵蓋控制點之影像數.....	82
表 4-5、控制點精度比較表.....	85
表 4-6、檢核點精度比較表.....	85
附表 1-1、相機經鏡頭拆裝及率定後之內方位參數與標準差.....	94
附表 1-2、相機鏡頭經拆裝及率定後之鏡頭畸變程度.....	95

第一章 前言

1.1 研究動機與目的

攝影測量 (Photogrammetry) 技術從早期類比攝影測量時代演變於現今數位攝影測量時代，舉凡資料獲取、軟硬體設備、處理效率等皆大幅提升。近景攝影測量 (Close-range Photogrammetry) 是透過對目標物進行攝影，且攝影物距不超過 300 公尺之攝影測量 (Wolf & Dewitt, 2000)。近景攝影測量為對目標物拍攝影像並經由影像量測處理後，確定目標物形狀、大小、運動型態、三維空間坐標及其周邊環境空間資訊之一種獲取方法。

隨著相機的普及，今日可用不斷推陳出新且價格較低的高解析度非量測性數位相機 (Non-Metric Digital Camera) 來代替量測性相機。Karara & Faig (1980) 對非量測型相機的定義是：內方位元素全部或部份未知，或已知但不穩定者。Fryer (1996) 因非量測性相機之內方位元素較不穩定，且鏡頭畸變差較嚴重，進行量測性應用時必須經過相機率定，決定其內方位元素與鏡頭畸變差。

數位三維模型之需求逐日增加，可應用之領域廣泛，包含土木、測量、數位典藏及文化資產等。目前產製三維模型方法有兩種，一種為近景攝影測量獲取之影像經相機率定，外方位解算，影像匹配，獲得目標物三維資訊，成為一項極具經濟效益之課題。另一種常用於建物模型重建測量方法為雷射掃描儀 (Laser Scanning)，又稱為光達 (Light Detection and Ranging, LIDAR)，可快速且高精度獲取大量的點雲 (Point Cloud) 資料。

針對非量測性相機所發展之近景攝影測量軟體，皆各自具備相機率定方式與操作程序，因此本研究使用非量測性相機及三個近景攝影測量軟體進行相機率定，探討其率定處理流程與成果差異。利用能生成點雲之旋轉多基線攝影測量軟體，生成目標物點雲，加入地面雷射掃描之點雲數據，探討近景攝影測量軟體之限制及精度比較，並以實例分析平行多基線攝影與旋轉多基線攝影方式之精度及適用時機。

1.2 文獻回顧

龔健彬(1997)使用非量測性相機APS、非量測性數位相機DC210及量測性相機P32，進行三個實例（MONIWA試驗體、成大檢定場及交大電子資訊大樓）的模擬測試，當APS相機像片比例尺約1/500時，相對精度可達平均物距之1/500；DC210相機相對精度可達平均物距之1/330。

劉虹妤（2001）設計一種可供自動辨識及定位的人工標點及自動量測之程序，以達到相機率定之自動化，整合自動辨識及量測功能於相機率定系統中。其可解決自率光束法繁重之量測工作，並以研究成果顯示相機率定及定位標準差可達公分級以下精度。

廖彥舒（2004）以六種不同性質的非量測型數位相機，真實畫素由300萬到600萬不等，針對自訂的模型，物距1620 mm拍攝立體像對，透過自行設計整合的像對點位量測系統，進行控制點與檢核點的直接線性轉換法（Direct Linear Transformation, DLT）解算，經實證結果得到檢核點中誤差與物距比為1/3406 ~ 1/2140，成果顯示非量測性相機之解算已達相當精度。

柯濤（2008）研究一種可提高測量精度與生產效率的近景攝影測量方法—旋轉多基線數值近景攝影測量，其透過旋轉攝影增加攝影視場角，應用多基線交會攝影增大攝影交會角以提高交會精度，且解決近景攝影測量中大交會角影像難實現自動匹配的困難。同時將傳統的區域網空中三角測量原理應用於影像外方位元素的解算，並實現對旋轉多基線攝影數據的全自動處理。

吳笛豪（2008）將近景攝影測量獲取實驗區之數位影像以iWitness軟體進行三維模型重建，並以全測站量測物空間控制點及檢核點之三維坐標，以控制點及檢核點之均方根誤差呈現近景攝影測量及地面雷射掃描儀所達到之模型量測精度。近景攝影測量之量測精度，控制點及檢核點之總均方根誤差皆為8 mm；地面雷射掃描成果分析，控制點及檢核點之總均方根誤差皆為11 mm。根據實驗成果，近景攝影之平面精度略高於地面雷射掃描，地面雷射掃描之高程（景深）精度則略高於近景攝影。

1.3 研究方法與流程

本研究分為兩部分進行，第一部分：以商用近景攝影測量軟體進行相機率定，第二部分：以旋轉多基線數值近景攝影測量系統生成點雲。圖1-1為本研究流程圖。

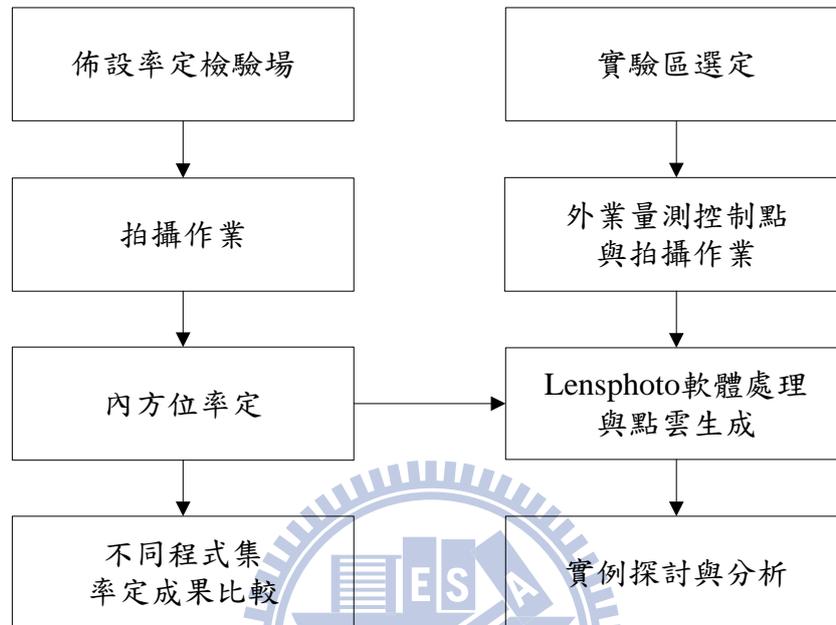


圖 1-1、研究流程圖

1. 以近景攝影測量軟體率定相機參數

選擇三個商用數值近景攝影測量軟體PhotoModeler、iWitness及Lensphoto進行相機率定。首先分別佈設相機率定檢驗場，並以非量測性數位相機Nikon D80搭配28mm定焦鏡頭進行拍攝作業，將影像匯入軟體處理相機率定。分析相機參數率定結果，並探討像距與物距之關係。

2. 以旋轉多基線數值近景攝影測量軟體生成點雲

以非量測性相機Nikon D80拍攝目標物影像，並用全站儀量測目標物控制點與檢核點之三維坐標，將所得影像及控制點坐標載入旋轉多基線數值近景攝影測量軟體—Lensphoto中，以兩種攝影方式：平行多基線攝影及旋轉多基線交會攝影生成目標物點雲，探討其使用時機。加入地面雷射掃描之點雲資料，比較近景攝影測量與地面雷射掃描之

精度，並探討近景攝影測量之限制。

1.4 論文架構

第一章：說明本研究之動機與目的及本研究之方法與流程。

第二章：與本研究相關近景攝影測量基礎理論，包含內外方位參數、透鏡畸變差、共線式方程式、影像匹配、攝影方式等。

第三章：以三軟體 PhotoModeler、iWitness 及 Lensphoto 進行內方位率定實驗，分析率定成果及操作流程、可靠性等評比。

第四章：以旋轉多基線攝影測量軟體 Lensphoto 生成目標物點雲資料，並加入地面雷射掃描所獲得之點雲資料，探討近景攝影測量之限制及精度分析。

第五章：整體實驗成果之結論與建議。



第二章 近景攝影測量基礎理論

攝影測量之中心透視投影，光線經三維空間之物點通過透視投影中心至像平面上對應物點之像點，三點共線，其為攝影測量原理之主軸。本章先介紹透鏡成像原理，再引出近景攝影測量基礎理論。

2.1 透鏡成像幾何

簡易透鏡由一片光學玻璃所組成，其可以是兩球面或一球面、一平面之組合，通過透鏡各面曲率中心之直線為透鏡之光軸 (Optical Axis)，如圖 2-1 中 \overline{AB} 連線。平行光軸之光線射入透鏡後，聚焦於透鏡之光軸上一點，是為焦點 (Focal Point)，圖中之 F 與 F' 。透鏡中心至焦點之距離為焦距 (Focal Length)，記作 f ，通過焦點且垂直光軸的平面稱為焦平面 (Focal Plane)。透鏡前方的物體，每個物點經光束通過透鏡並聚集在透鏡後方成一像點，涵蓋整個物體之無窮多個像點聚集於像平面 (Image Plane)。當物距 o (物體與透鏡中心間之距離) 為無窮遠時，物點上所有光束會聚焦於焦平面上；若物距非無窮遠，則像距 i (透鏡中心至像平面之距離) 會大於焦距。以透鏡成像公式 (Lens Equation) 來表達物距 o 、像距 i 與焦距 f 之關係：

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (2-1)$$

若透鏡之焦距與物距為已知，可用透鏡成像公式來推算像平面的位置。

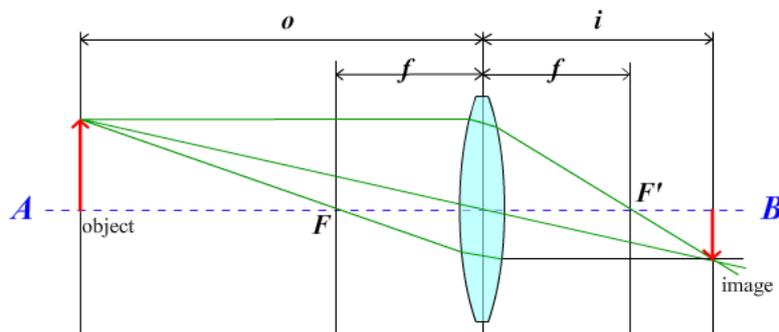


圖 2-1、透鏡成像原理

2.2 物空間坐標系統與像坐標系統之關係

物空間坐標系統與像空間坐標系統之關係可由中心透視投影 (Central Perspective Projection) 描述。所謂中心透視投影是由物體所發出或反射的光線，依照光線的直進性經過一投影中心，投影在像平面上。圖 2-2 中，三維物空間之物點 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 穿過透視投影中心 $O(X_0, Y_0, Z_0)$ ，投影在像平面上為像點 $a(x_a, y_a)$ ，其三點共線 (Collinearity)。點 P 為像平面上之像主點 (Principal Point, PP)，像主點至透視投影中心之距離為像主距 (Principal Distance)，物距無窮遠時像主距等於焦距 f 。

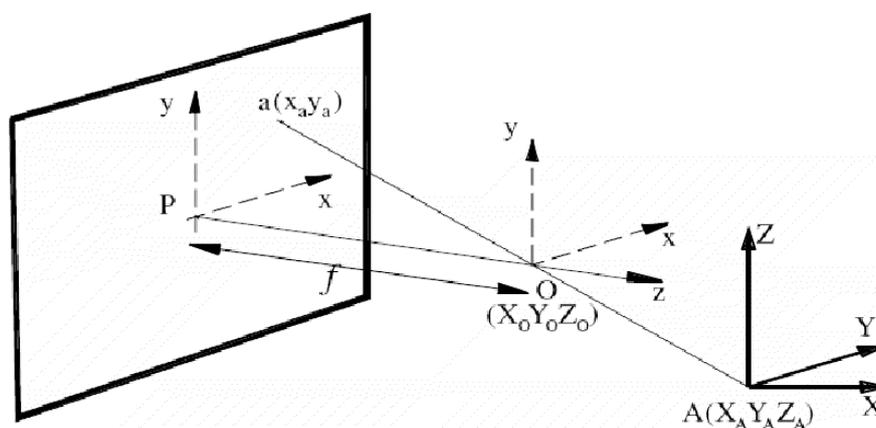


圖 2-2、近景攝影測量垂直攝影之示意圖 (Arias, 2005)

2.2.1 內方位參數

內方位元素 (Element of Interior Orientation) 為恢復拍攝瞬間，相機透視投影中心與像片或影像間相對關係之參數，包含相機率定後焦距及像主點在像坐標系統之坐標改正值。除了上述三個廣義之內方位元素 (f, x_p, y_p)，尚包含透鏡畸變差改正量 $\Delta x, \Delta y$ ，在 2.2.2 描述。

(1) 率定後焦距 (Wolf & Dewitt, 2000)

相機透鏡之後節點 (Rear Nodal Point) 沿著攝影光軸到像平面上像主點之距離，為率定後焦距 (Calibrated Focal Length, CFL)，亦可稱作率定後像主距 (Calibrated Principal

Distance)。相機製造時，會盡量將率定後焦距接近光學透鏡焦距，但仍有差異，因此以率定後焦距稱之。一般以 f 標記之。

(2) 像主點

相機攝影光軸垂直交於像平面上之點稱之，此為像平面坐標之真正原點。傳統光學量測性相機皆以影像上對邊框標兩兩連線之交點為影像中心，稱為框標中心 (Fiducial Center, FC)，為框標坐標系統之原點。理論上框標中心與像主點應為同一點，但事實上有所差異，其微小偏差量為 (x_p, y_p) ，應改正為以像主點為原點之坐標值。

2.2.2 透鏡畸變差

相機鏡頭由球面透鏡所組成，拍攝影像時，投射光線通過相機鏡頭產生折射現象，導致影像形變且像點偏移而無法投影在像點正確位置，造成無法滿足共線條件 (Collinearity Condition)。因此率定相機時，除了 2.2.1 所敘述的內方位元素外，尚須對造成影像形變之透鏡畸變差進行率定。主要有輻射透鏡畸變差 (Radial Lens Distortion)、離心透鏡畸變差 (Decentric Lens Distortion)，說明如下：

(1) 輻射透鏡畸變差

輻射畸變差一般是由於鏡頭形狀缺陷 (Imperfect Lens Shape) 所引起，只與像點離像主點的距離有關，使成像點沿輻射方向偏離其理準確位置 (Weng, 1992)。其以對稱像主點 (Principal Point of Symmetric, PPS) 為中心，像點沿著輻射方向產生移位，有輻射對稱的特性，故又稱對稱輻射透鏡畸變差 (Symmetric Radial Lens Distortion)，且離對稱像主點之輻射距離越大則輻射畸變量越大。包含正輻射畸變差與負輻射畸變差，像點相對於對稱像主點往外移者，為正輻射畸變差；像點相對於對稱像主點往內移者，為負輻射畸變差，如圖 2-3(a) 所示，黑色框線為正確的影像點位， a 、 b 分別為正、負輻射畸變差所造成的影像變形。Wolf & Dewitt (2000) 輻射畸變差改正公式：

$$\Delta r = k_1 r^1 + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7 \dots \dots \dots (2-2)$$

其中， $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ ， $\bar{x} = x - x_p$ ， $\bar{y} = y - y_p$ 。求得輻射畸變差後，可依幾何關係計算像點於像坐標 x 軸與 y 軸方向之改正量 ($\delta x, \delta y$)：

$$\delta x = \frac{\Delta r}{r} \bar{x} \quad , \quad \delta y = \frac{\Delta r}{r} \bar{y} \dots\dots\dots (2-3)$$

- Δr : 對稱輻射畸變差
- k_1, k_2, k_3, k_4 : 對稱輻射畸變差係數
- r : 像點至像主點之輻射距離
- \bar{x}, \bar{y} : 改正像主點偏移之像坐標
- x, y : 量測而得之像坐標
- x_p, y_p : 像主點偏移量
- $\delta x, \delta y$: 對稱輻射畸變差之改正量

(2) 離心透鏡畸變差

組裝相機鏡頭時，鏡片排列中心未對準相機主軸，或製造鏡片時兩球面中心對準之誤差，造成入射相機之光線行進方向非一直線，當光線投射至像平面時，影像產生非對稱形變，如圖 2-3(b)所示。離心透鏡畸變差可分為輻射方向之分量 (Radial Component) 與正切方向之分量 (Tangential Component) 之畸變差，正切方向之分量垂直於輻射方向之分量。Brown (1971) 提出改正方程式如下：

$$\Delta x = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y}] \dots\dots\dots (2-4)$$

$$\Delta y = (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2)] \dots\dots\dots (2-5)$$

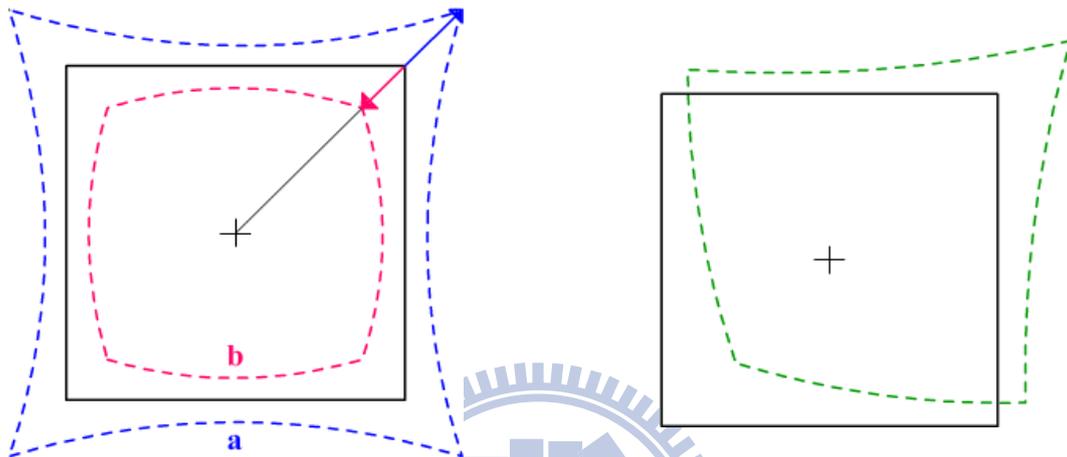
- $\Delta x, \Delta y$: 離心畸變差之改正量
- p_1, p_2, p_3, p_4 : 離心畸變差係數

將對稱輻射畸變差與離心畸變差合併，得透鏡畸變差在像坐標 x 軸方向之總改正量 $\delta x + \Delta x$ ，及在 y 軸方向之總改正量 $\delta y + \Delta y$ ，影像上之像點位置改正公式如下：

$$x_c = \bar{x} + \delta x + \Delta x = \bar{x} + \bar{x} \frac{dr}{r} + (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y}] \dots (2-6)$$

$$y_c = \bar{y} + \delta y + \Delta y = \bar{y} + \bar{y} \frac{dr}{r} + (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) [2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2)] \dots (2-7)$$

x_c, y_c : 改正像主點偏移及透鏡畸變差後之像坐標



(a) 對稱輻射畸變差 (b) 離心畸變差

圖 2-3、對稱輻射畸變差與離心畸變差示意圖 (柯濤, 2008)

2.2.3 外方位參數

外方位元素 (Element of Exterior Orientation) 為重建攝影瞬間相機透視投影中心於物空間坐標系統之位置 (Position) 與姿態 (Attitude)，其以六個參數表達。三個位置參數，包含攝影瞬間透視投影中心之物空間坐標 (X_0, Y_0, Z_0) ；三個姿態參數，包括攝影瞬間相機之旋轉姿態角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 。當恢復相機內方位元素 (f, x_p, y_p) 及外方位元素 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ 後，可達到物點 A、相機攝影中心 O 與像點 a 之三點共線條件，如圖 2-2 所示。

2.2.4 共線方程式

數學上物點、像點與透視投影中心之關係，可用共線方程式 (Collinearity Equations) 來表示，其應用於攝影測量各個層面，如空間前方交會與後方交會、空中三角測量及影

像正射糾正等。圖 2-2 為中心透視投影幾何之物點 A、透視投影中心 O 及像點 a 三點共線，其數學方程式如下：

$$x_a - x_p = -f \frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} \dots\dots\dots (2-8)$$

$$y_a - y_p = -f \frac{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} \dots\dots\dots (2-9)$$

- x_a, y_a : a 點之影像坐標
- x_p, y_p : 像主點偏移量
- f : 相機焦距長
- X_A, Y_A, Z_A : 點 A 之物空間坐標
- X_0, Y_0, Z_0 : 攝影中心之物空間坐標
- $m_{11} \sim m_{33}$: 為 3×3 旋轉矩陣 R 之元素
- $\delta x, \delta y$: 對稱輻射畸變差之改正量

旋轉矩陣 R 為旋轉元素 ω, φ, κ 之函數：

$$R = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$m_{11} = \cos\varphi \cos\kappa$$

$$m_{12} = -\cos\varphi \sin\kappa$$

$$m_{13} = \sin\varphi$$

$$m_{21} = \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\varphi \cos\kappa$$

$$m_{22} = \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\varphi \sin\kappa$$

$$m_{23} = -\sin\omega \cos\varphi$$

$$m_{31} = \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\varphi \cos\kappa$$

$$m_{32} = \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\varphi \sin\kappa$$

$$m_{33} = \cos\omega \cos\varphi$$

像點、物點及透視投影中心三點共線之關係，實際上和理論上會有些微差異，因存在系統誤差而造成像平面上之點位坐標偏移，影響點位物空間坐標之解算精度。系統誤差主要來源為鏡頭畸變差、底片變形或不平坦、大氣折光及地球曲率等因素，在近景攝影測量中，通常不考慮大氣折光及地球曲率的影響。為消除系統誤差之影響，可將附加參數（Additional Parameters）加入共線式中，以做為系統誤差之補償。將 2.2.2 所描述的對稱輻射透鏡畸變差改正量 $(\delta x, \delta y)$ 及離心畸變差改正量 $(\Delta x, \Delta y)$ 加入共線式中，則原有共線式可改寫為：

$$x_a - x_p + \delta x + \Delta x = -f \frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} \dots\dots\dots (2-10)$$

$$y_a - y_p + \delta y + \Delta y = -f \frac{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)} \dots\dots\dots (2-11)$$

2.2.5 空間前方交會

空間前方交會（Space Intersection）數學模式是以共線方程式為基礎，利用立體對重疊影像之共軛光束實施前方交會為攝影測量獲取物點坐標的基本做法，如圖 2-4 所示，將線性化的共線方程式以最小二乘法平差模式迭代求解未知物空間坐標。理論上單像光束無交會點，故無法求解三維空間物點坐標 (X, Y, Z) ，但若結合數值地形模型（Digital Terrain Model, DTM），利用光束與數值模型表面交會為物點之原理亦可解算空間坐標。

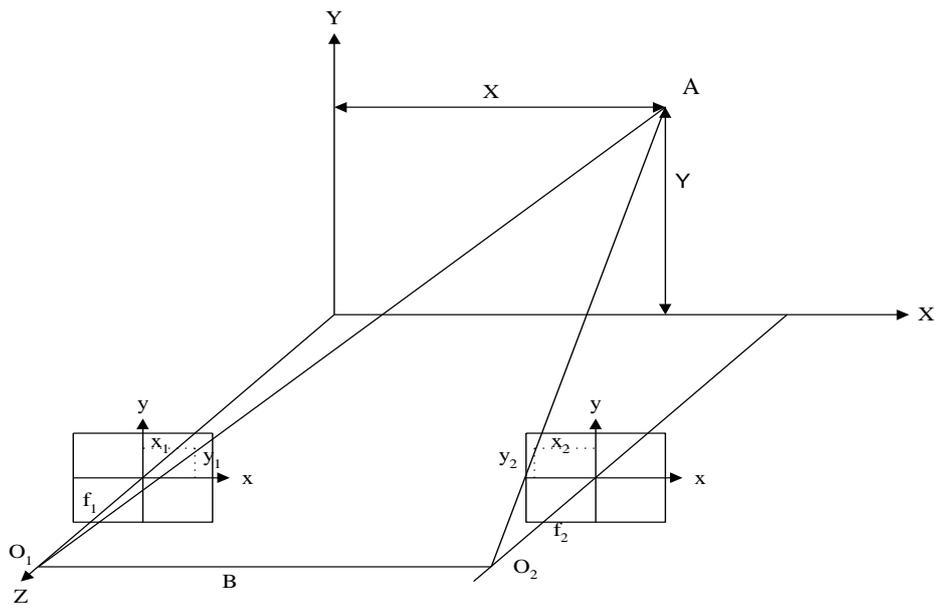


圖 2-4、近景攝影測量垂直攝影時示意圖（龔健彬，1997）

在一般垂直攝影情況（如圖 2-4 所示），假設攝影機光軸與物空間坐標系統之 Z 軸平行， O_1 和 O_2 為攝影站位置， A 點為物空間中的物點，則 A 點在左右兩張影像之像坐標分別為 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ， $m_{ij,i=1\sim3;j=1\sim3}$ 為左影像旋轉矩陣之元素， $m'_{ij,i=1\sim3;j=1\sim3}$ 為右影像旋轉矩陣之元素。其數學模式如下：

左影像：

$$x_1 - x_p = -f \frac{m_{11}(X_A - X_{O_1}) + m_{12}(Y_A - Y_{O_1}) + m_{13}(Z_A - Z_{O_1})}{m_{31}(X_A - X_{O_1}) + m_{32}(Y_A - Y_{O_1}) + m_{33}(Z_A - Z_{O_1})} \dots\dots\dots (2-12)$$

$$y_1 - y_p = -f \frac{m_{21}(X_A - X_{O_1}) + m_{22}(Y_A - Y_{O_1}) + m_{23}(Z_A - Z_{O_1})}{m_{31}(X_A - X_{O_1}) + m_{32}(Y_A - Y_{O_1}) + m_{33}(Z_A - Z_{O_1})} \dots\dots\dots (2-13)$$

右影像：

$$x_2 - x_p = -f \frac{m'_{11}(X_A - X_{O_2}) + m'_{12}(Y_A - Y_{O_2}) + m'_{13}(Z_A - Z_{O_2})}{m'_{31}(X_A - X_{O_2}) + m'_{32}(Y_A - Y_{O_2}) + m'_{33}(Z_A - Z_{O_2})} \dots\dots\dots (2-14)$$

$$y_2 - y_p = -f \frac{m'_{21}(X_A - X_{O_2}) + m'_{22}(Y_A - Y_{O_2}) + m'_{23}(Z_A - Z_{O_2})}{m'_{31}(X_A - X_{O_2}) + m'_{32}(Y_A - Y_{O_2}) + m'_{33}(Z_A - Z_{O_2})} \dots\dots\dots (2-15)$$

2.3 核幾何原理

以共面條件式為基礎所建立之核幾何（Epipolar Geometry）原理，在攝影測量中最常用於影像自動匹配，可將影像匹配由二維搜尋簡化之一維搜尋，提高效率及可靠性。如圖 2-5 所示，左、右兩影像之透視投影中心 O_L 、 O_R 及物點 A 在物空間中所組成之平面，稱為核面（Epipolar Plane）。物點對應之像點 a_L 、 a_R ，位於核面與左、右影像像平面相交之直線上，為核線（Epipolar Lines）。兩立體像對之左、右核線為共軛核線（Conjugate Epipolar Lines），左影像像點 a_L 與右影像像點 a_R 為共軛點，其必然分別落於左核線與右核線上。以兩透視投影中心連線 $\overline{O_L O_R}$ 為核軸（Epipolar Axis），物空間中每個物點與其構成一個核面，故核面有無窮多個，其與像平面相交之核線也無窮多。影像匹配時，可將左影像上之像點作為參考點，搜尋右影像上之共軛點時將共軛點的搜尋建立在一維核線上，節省搜尋次數與時間而提升自動化效能。

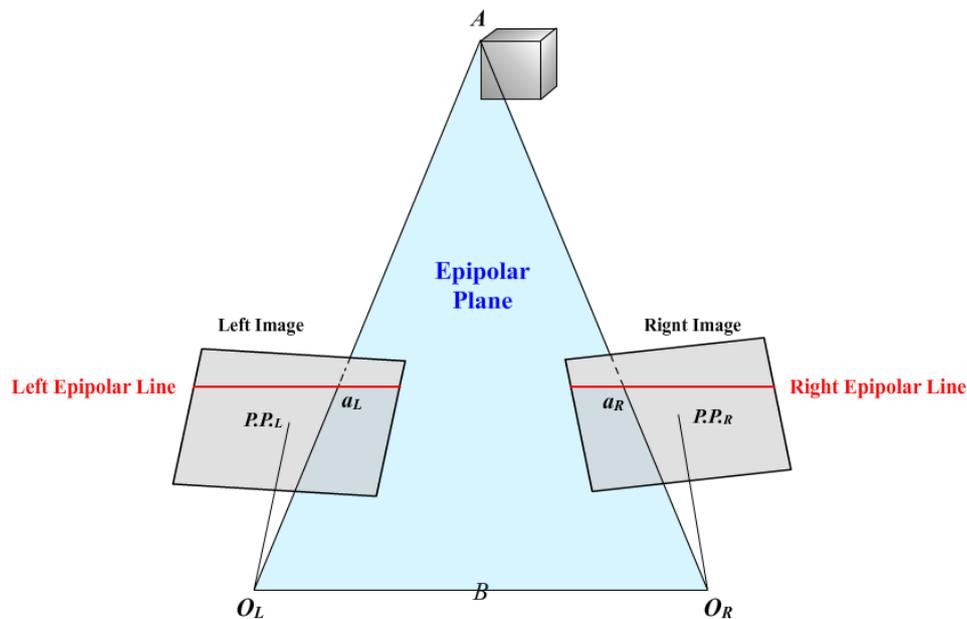


圖 2-5、核幾何示意圖

2.4 影像匹配

在數位攝影測量中，影像匹配 (Image Matching) 利用影像灰度值之相關特性，以數學演算法決定立體像對重疊區之共軛像點。一般常見的數位影像匹配技術，可分為區域匹配 (Area-Based Matching)、特徵匹配 (Feature-Based Matching) 及混合匹配 (Hybrid Matching) 三種 (Wolf & Dewitt, 2000)。區域匹配是於參考影像上確定一目標點，並以其為中心設計目標視窗，至另一影像之搜尋視窗中尋找最相似區域，找尋方式為計算搜尋視窗中像元之灰度值相似程度，並以相關係數作為相似度指標，最相似區域之中心像元位置代表共軛像點；特徵匹配之目的為在影像中灰度值變化較明顯的地方，萃取影像目標物之點、線、面特徵，根據不同特徵與應用發展出不同特徵匹配演算法：基於點特徵 (Point-based)、邊界特徵 (Edge-based) 及區塊特徵 (Segment-based) 等匹配法，針對特徵之幾何屬性加以描述並作相似性評估，獲得共軛像點；混合匹配為結合上述兩種方法，先強調左右影像中之邊界特徵，再以區域匹配得到共軛像點 (Wolf & Dewitt, 2000)。

一般常用區域匹配方法有標準化互相關法 (Normalized Cross Correlation, NCC)、最

小二乘匹配法 (Least Squares Matching, LSM) 等。柯濤 (2008) 提及 Lensphoto 軟體在空三匹配之粗略匹配時使用標準化互相關法，而空三精密匹配時使用最小二乘匹配法。此兩種方法茲加以介紹如下。

2.4.1 標準化互相關法

標準化互相關法 (NCC) 是依統計相關原理進行影像匹配，經找尋目標視窗與其搜尋視窗中相重疊區域之灰度值互相關係數 (Cross Correlation Coefficient) 最大者，為最佳匹配位置 (吳怡燊, 2003)。Wolf & Dewitt (2000) 說明在立體像對之左、右影像分別選取相同大小 ($m \times n$) 之子陣列 A 、 B ，其相關係數是透過子陣列內像元灰度值之計算得到，方程式如下：

$$c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})^2][\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{ij} - \bar{B})^2]}} \dots\dots\dots (2-16)$$

c : 相關係數 ($-1 \leq c \leq 1$)
 i, j : 子陣列中像元所在之行列表
 A_{ij}, B_{ij} : 子陣列之像元灰度值
 \bar{A}, \bar{B} : 子陣列中像元灰度平均值

圖 2-6 為標準化互相關法計算相關係數之示意圖，此影像匹配法以左影像上目標點之像元為中心，選取 $m \times n$ 灰度值子陣列作為目標視窗 A ，在右影像上設計較目標視窗大且易找到共軛像點之搜尋視窗，與目標視窗相同大小之移動視窗 B 將在搜尋視窗內以公式 (2-16) 計算，得到相關係數矩陣，其中最大相關係數值即為匹配點位置。

計算所得相關係數值為： $-1 \leq c \leq 1$ ，當 $c = 1$ 為高相關性之完美匹配，實際上影像受到噪聲 (noise) 干擾等因素影相關係數僅能接近 1，通常設定一門檻值 (例如：0.7)，當相關係數值超過門檻值便視為匹配 (Wolf & Dewitt, 2000)。當 $c = 0$ 表示匹配點位與目標點無相關性；當 $c = -1$ 代表匹配點與目標點為負相關性，例如：正、負片之匹配。

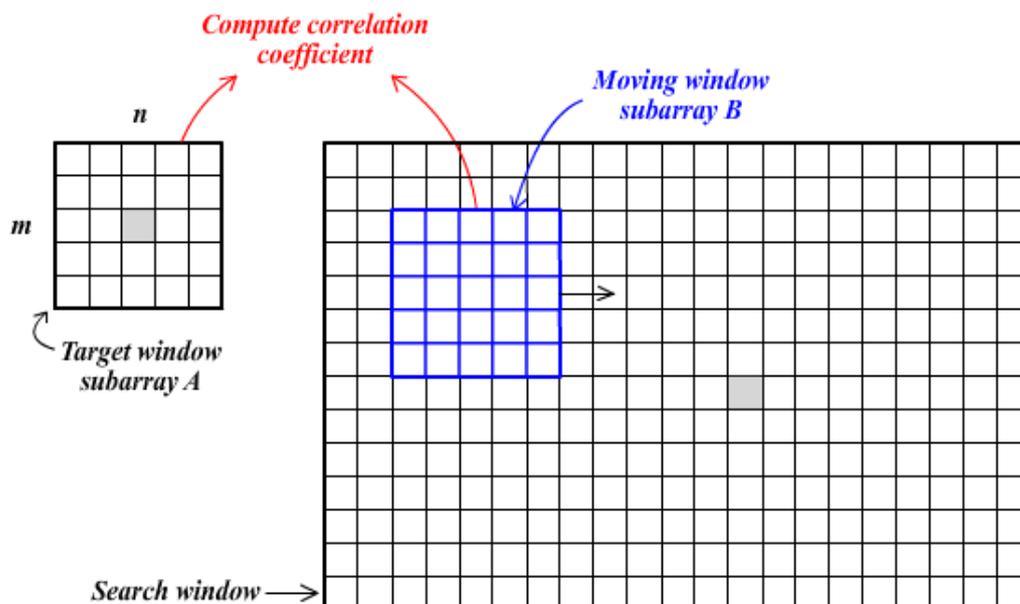


圖 2-6、NCC 影像匹配之示意圖（修改自 Wolf & Dewitt, 2000）

2.4.2 最小二乘匹配法

最小二乘匹配法 (Ackermann, 1983) 主要為求取目標視窗與搜尋視窗中像元灰度值差異最小之位置，其為最佳匹配位置。數學模式上，是以影像灰度值進行最小二乘法平差計算，可獲得共軛點位之次像元 (Sub-pixel) 精度。最小二乘匹配法分為兩大類，一種為僅考慮輻射變形而不考慮幾何變形之最小二乘匹配法 (LSM1)，另一種為輻射變形與幾何變形皆考慮之最小二乘匹配法 (LSM2)，本文在此介紹 LSM2。LSM2 同時考慮兩種影像灰度值之變形：輻射變形與幾何變形，輻射變形由照明條件、目標物輻射面方向、大氣與相機物鏡之衰減等原因所造成；產生幾何變形之因是由相機透鏡畸變差、傾斜攝影造成影像透視畸變及地形造成之影像畸變等。

圖 2-7 為左右影像間之幾何變形示意圖，根據中心透視投影原理，目標物區塊為四邊形 $ABCD$ ，兩攝影中心 S_1 與 S_2 ，對應目標物區塊之影像視窗分別為左影像之矩形 $a_1b_1c_1d_1$ ，右影像之任意四邊形 $a_2b_2c_2d_2$ 。圖 2-8 為 LSM2 圖示，目標視窗 m_0 經參數轉換後在搜尋視窗中變成 m_1 形狀，並在搜尋視窗中與各個相對應灰度值相減，組成觀測方程式，利用最小二乘法原理解算對應中心像元之坐標，即共軛像點之位置。

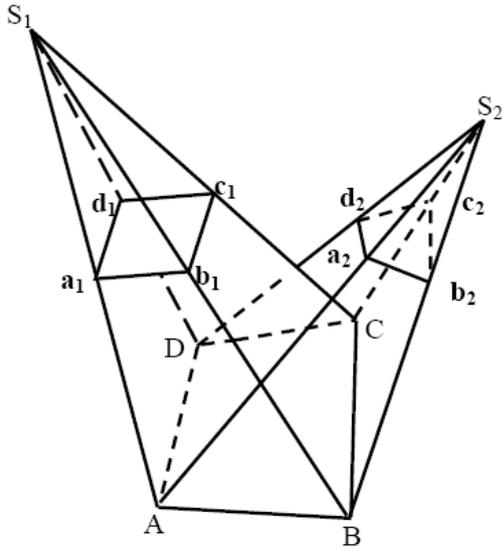


圖 2-7、左右影像間幾何變形
(柯濤, 2008)

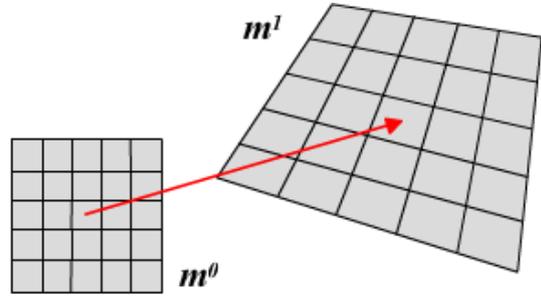


圖 2-8、考慮幾何變形之最小二乘匹配法圖
示 (修改自 Schenk, 1999)

以 $G_1(x_i, y_j)$ 表示目標視窗像元位置之灰度值函數， $G_2(x_i', y_j')$ 為搜尋視窗像元位置之灰度值函數，利用仿射轉換 (Affine Transformation) 來描述目標視窗與搜尋視窗之幾何轉換，基本方程式如下：

$$G_1(x_i, y_j) = h_1 + h_2 G_2(x_i', y_j') \dots\dots\dots (2-17)$$

$$x_i' = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_j \dots\dots\dots (2-18)$$

$$y_j' = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_j \dots\dots\dots (2-19)$$

以 (2-18) 與 (2-19) 式改寫 (2-17) 式，如下：

$$\begin{aligned} G_1(x_i, y_j) &= h_1 + h_2 G_2\left(\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_i \\ y_j \end{bmatrix}\right) \\ &= h_1 + h_2 G_2(x_i, y_j; A) \dots\dots\dots (2-20) \end{aligned}$$

其中 $A = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}$ ， $a_0 \sim a_2$ 、 $b_0 \sim b_2$ 為仿射轉換六個參數， $G_2(x_i, y_j; A)$ 表示 (x_i, y_j) 經 A 仿射轉換後所對應搜尋視窗之像元灰度值； h_1 ：輻射灰度值平移參數， h_2 ：

尺度參數；寫為誤差方程式 (2-21)，並將 G_1 及 G_2 中分別存在之隨機雜訊 n_1 及 n_2 同殘差 (Residual) 處理。

$$F = \Delta G(x_i, y_j) + v(x_i, y_j) = h_1 + h_2 G_2(x_i, y_j; A) - G_1(x_i, y_j) \dots \dots (2-21)$$

式 (2-21) 中元素解釋如下：

$$\Delta G(x_i, y_j) = G_2(x_i', y_j') - G_1(x_i, y_j) = l(x_i, y_j) \dots \dots \dots (2-22)$$

$$v(x_i, y_j) = n_2(x_i', y_j') - n_1(x_i, y_j) \dots \dots \dots (2-23)$$

其中觀測值 $\Delta G(x_i, y_j)$ 為搜尋視窗與目標視窗相對應像元之灰度差值，改正數 $V(x_i, y_j)$ 為搜尋視窗與目標視窗之隨機雜訊差值。因式 (2-21) 為非線性方程式，將 F 對 h_1 、 h_2 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 及 b_2 八個未知數偏微分予以線性化後，可依最小二乘法進行迭代計算求解。



2.5 Lensphoto 軟體處理影像之攝影方式

Lensphoto 軟體處理之影像主要攝影方式有二種：一種為平行多基線攝影，另一種為旋轉多基線交會攝影。兩種方法皆是基於共線方程式空間前方交會法求解近景物體之三維空間坐標，並且可利用多餘觀測值（多張影像）和最小二乘平差原理進行多片前方交會（柯濤，2008）。

在數值近景攝影測量中，無論是量測性數位相機還是非量測性數位相機，其最大缺點為像幅小，導致相機之視場角小。因此若依傳統垂直攝影方式進行攝影，會降低攝影光線之交會角，而降低交會精度；交會攝影是近景攝影測量中常用的方式，藉由交會攝影可增大交會角，進而提高精度。但當交會角度超過 15 度時，影像的自動化匹配就變得困難（張祖勛，2007）。所以為了解決交會精度及影像自動化匹配的矛盾，可採用多基線交會攝影。

2.5.1 平行多基線攝影

對目標物之攝影距離相同，以攝影光軸約略垂直目標物方向進行拍攝，如圖 2-9 所示， $S_1 \sim S_n$ 為攝影站有 n 站， $O_1 \sim O_n$ 為每個攝影站僅拍攝 1 張影像之攝影光束，各個攝影光束間約略平行且垂直攝影目標物。依 Lensphoto V2.0 操作手冊所述，相鄰攝影站所拍攝影像之左右重疊率須達 80%，且攝影站的個數至少要 3 個以上，會有較佳的成功率。

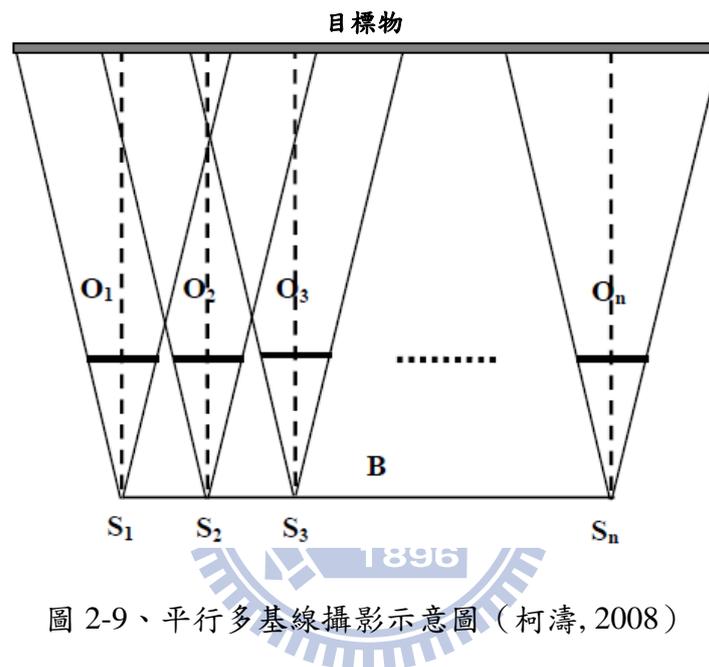


圖 2-9、平行多基線攝影示意圖 (柯濤, 2008)

2.5.2 旋轉多基線交會攝影

旋轉多基線交會攝影流程如下 (柯濤, 2008)：

- (1) 根據目標物寬度及相機拍攝之地面覆蓋範圍，將目標物依水平方向劃分為若干「條帶 (Strips)」，且兩兩劃分的條帶須具 60% 以上重疊度，以確保條帶間有足夠的連結點。
- (2) 根據攝影距離決定攝影基線長度及攝影站個數。相鄰攝影站個數間的基線長度應小於攝影距離的 20%，以確保相鄰攝影站影像間의 交會角 α 小於 10° ，易於自動化匹配；同時首尾攝影站的基線長度應大於攝影距離的 55%，以保證測區內影像間的最大交會角 β 不小於 30° ，確定交會精度 (交會角越大，基線越多，影像數也越多，考慮數據處理效率及精度之平衡， 30° 為較合理的交會角；若相鄰基線交會角為 10° ，此時攝影基線個

數為 3，因此攝影站個數至少為 3 個以上)。

(3) 將相機焦距調整至無窮遠，拍攝時保證每張影像焦距及景深不變。

(4) 在每個攝影站上手持相機，透過旋轉攝影方式，對準每一條帶中心進行連續攝影。

圖 2-10 中，待攝目標物被劃分為 5 個條帶，共設置 4 個攝影站，每個攝影站旋轉拍攝 5 張影像。黑色與白色粗線為被攝目標物之條帶劃分，黑色圓點 $S_1 \sim S_4$ 代表攝影站，黑色直線為攝影光束，阿拉伯數字為影像拍攝順序，虛線矩形區為同條帶內影像的地面覆蓋範圍。

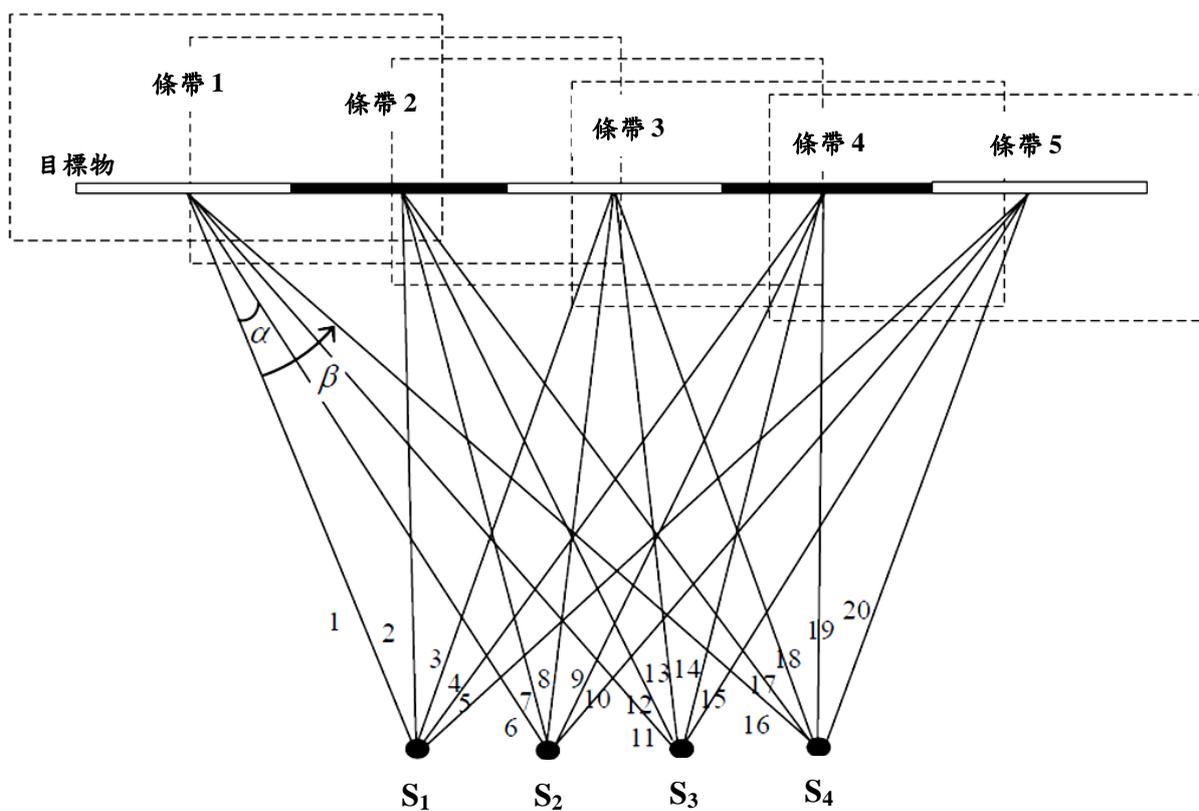


圖 2-10、旋轉多基線交會攝影示意圖 (柯濤, 2008)

第三章 內方位參數與其率定

使用非量測性相機獲取之影像，進行量測性應用時，內方位參數為重要關鍵。而非量測性相機所發展之攝影測量軟體，皆各自具備有相機率定的方式與處理程序，因此本研究選用三套近景攝影測量商用軟體，以實驗方式探討率定結果及像距與物距之關係。

3.1 實驗資訊與流程

3.1.1 資料獲取系統

內方位參數率定資料取得由相機拍攝影像而來，本實驗選用非量測性數位單眼相機 Nikon D80 搭配 Nikon AF Nikkor 28mm f/2.8 定焦鏡頭進行拍攝作業，表 3-1、表 3-2 分別為相機與鏡頭相關規格資訊。

表 3-1、數位相機之相關規格表

相機型號	數位單眼相機 Nikon D80	
感測器說明	1020 萬有效畫素，Nikon DX format CCD	
感測器大小	23.6 × 15.8 mm	
影像尺寸	3872 × 2592 pixels (L) 2896 × 1944 pixels (M) 1936 × 1296 pixels (S)	
ISO 感光度	Auto, 100 ~ 1600, up to 3200	
像素大小	0.006 mm	
快門速度	30 ~ 1/4000 秒	
對焦模式	手動/自動對焦	
儲存系統	NEF (RAW), JPEG	

表 3-2、定焦鏡頭之相關規格表

鏡頭型號	Nikon AF Nikkor 28mm f/2.8	
最小光圈	f 22	
對焦距離	25 cm ~ ∞	
最大重現比率	1/5.6	

3.1.2 實驗流程

近景攝影測量軟體有各自處理相機率定方式，本研究選擇三個數值近景攝影測量軟體及其版本：2007 年加拿大 EOS 公司所開發之 PhotoModeler V6，2006 年澳洲 Photometrix 公司所發表之 iWitness V1.2.3，及 2006 年武漢大學與朗視軟件公司合作研發之 Lensphoto V2.0，搭配上述數位相機與鏡頭，分別佈設檢驗場，進行拍攝作業，軟體操作相機率定，探討相機率定結果，率定實驗流程圖如圖 3-1 所示。在實地拍攝過程中，相機設定為影像最大解析度（ 3872×2592 pixels），鏡頭光圈設定為最小值（f 22），增加景深。拍攝時將變焦模式改為手動，但為使率定標成像清晰並未將鏡頭對焦距離調整至無窮遠（ ∞ ）。在拍攝過程中，相機安置於三腳架上，避免手震晃動影響影像品質。

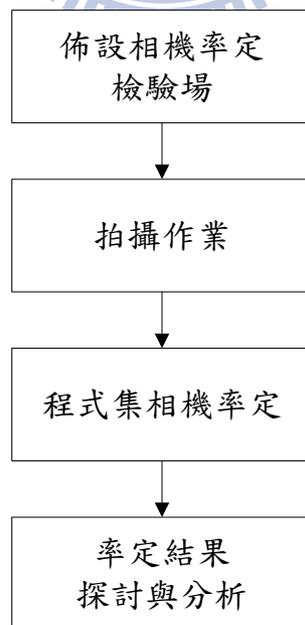


圖 3-1、相機率定實驗流程圖

3.2 相機率定程序

本研究選用三套近景攝影測量軟體：PhotoModeler、iWitness 及 Lensphoto 進行相機率定，各軟體皆有各自率定標、拍攝模式及率定處理流程等，本小節對此三軟體之相機率定程序分別作說明。

3.2.1 PhotoModeler

佈設檢驗場

PhotoModeler 軟體可自動化處理相機率定，隨軟體附有兩種規格正方形率定標，一為邊長 21.0 cm，另一為邊長 91.44 cm，圖 3-2 為兩種規格之率定標。兩種尺寸率定標皆以高色彩反差的白底黑圓點等距排列成正方形。邊長 21.0 cm 的率定標有 100 個點，邊長 91.44 cm 的率定標有 144 個點，皆含有 4 個控制點，分別位於率定標 4 個角落，如圖 3-2 紅框所示。佈設檢驗場時，將兩種規格率定標電子檔出圖，拉平黏貼於白色木板，再擺置於地板上。

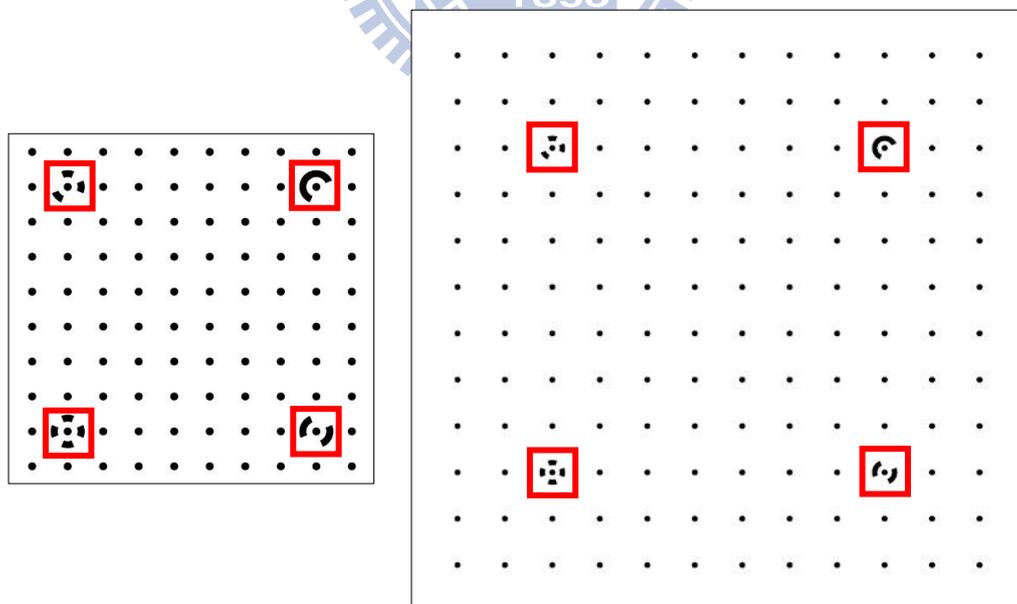


圖 3-2、PhotoModeler 率定標，左為 21.0 cm，右為 91.44 cm

拍攝作業

對兩種規格率定標各拍攝一組影像，21.0 cm 所拍得的影像以 set1 表示，91.44 cm 拍得的影像以 set2 表示。圖 3-3 為拍攝位置示意圖，在方形率定標的 4 個邊方向各拍 3 張影像，相機正拍一張、正 90 度旋轉相機與負 90 度旋轉相機各拍一張，因此共有 12 張影像，兩組率定標皆以此方式拍攝。

圖 3-4 為拍攝之影像，上排：正拍所得，中排：正 90 度旋轉相機拍得影像，下排：負 90 度旋轉相機拍得影像。軟體進行率定處理時，限制率定標成像必須涵蓋影像範圍 80%，拍攝 set1 影像之率定標涵蓋範圍為 90%，set2 影像之率定標涵蓋範圍為 92%。拍攝 set1 影像後，鏡頭經拆卸、裝載才進行 set2 拍攝。

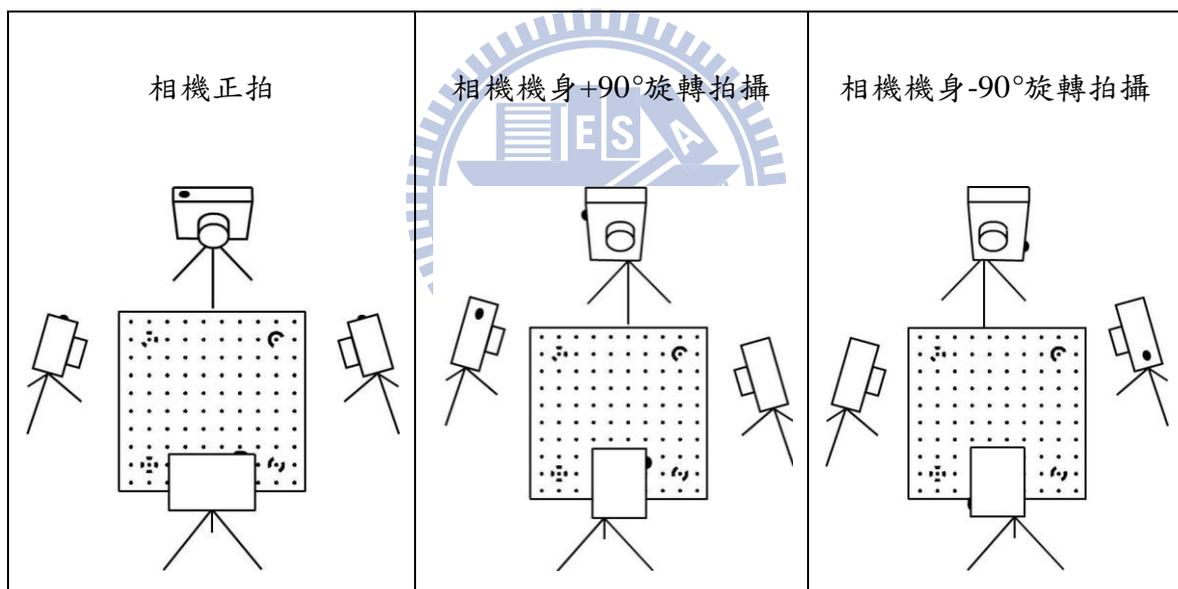


圖 3-3、拍攝 PhotoModeler 率定標影像的位置示意圖

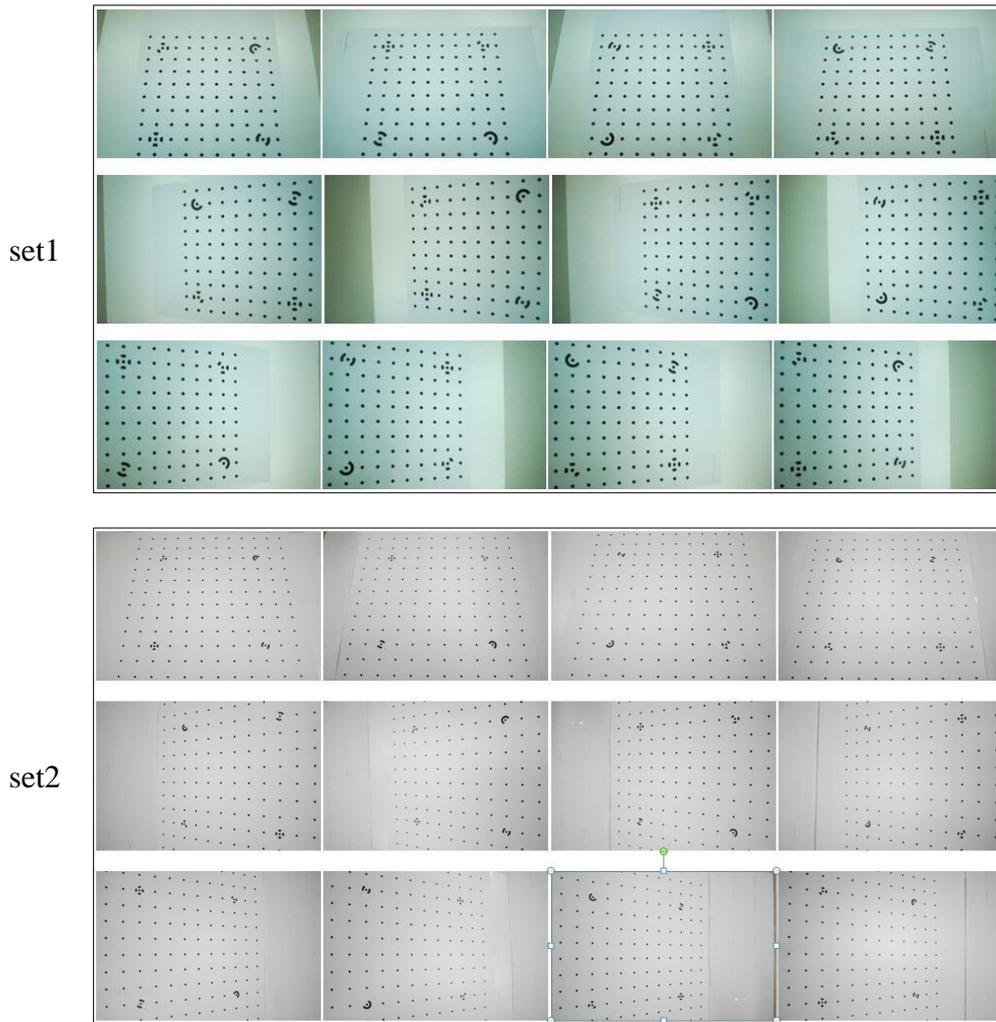


圖 3-4、拍攝 PhotoModeler 率定標之影像

率定處理及結果

在 PhotoModeler 相機率定中，影像坐標改正函數使用 7 個參數模型，包含廣義的 3 個內方位參數和 4 個附加參數表示鏡頭畸變差。其率定參數分別為：

- 相機內方位參數 (Camera interior orientation) : f, x_p, y_p
- 輻射畸變差參數 (Radial distortion parameters) : K_1, K_2
- 離心畸變差參數 (Decentering distortion parameters) : P_1, P_2

相關數學函式如下：

$$\bar{x} = x - x_p \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\bar{y} = y - y_p \dots\dots\dots (3-2)$$

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 \dots\dots\dots (3-3)$$

$$drb = \frac{dr}{r} = K_1 r^2 + K_2 r^4 \dots\dots\dots (3-4)$$

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 \dots\dots\dots (3-5)$$

$$x_c = \bar{x} + \bar{x} \frac{dr}{r} + P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \bar{y} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$y_c = \bar{y} + \bar{y} \frac{dr}{r} + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \bar{y} \dots\dots\dots (3-7)$$

式中

- \bar{x}, \bar{y} : 改正像主點偏移之像坐標
- x, y : 量測而得之像坐標
- x_p, y_p : 像主點偏移量
- r : 像點至像主點之輻射距離
- dr : 對稱輻射透鏡畸變差
- x_c, y_c : 改正後之像點像坐標

將拍攝影像匯入軟體進行自動化影像量測與參數率定，圖 3-5 為軟體處理率定標影像量測結果。白色中空十字標表示可量測到率定標正確位置；灰色十字標表示可量測出率定標的圓點形心像素，但因殘差太大而不加入率定解算；無十字標的圓點表示成像不清晰無法量測，也不加入率定解算。若影像中的 4 個控制點有其中一個無法量測，此張影像便不加入解算，如 set1 編號 2、4、8 影像，圖 3-5 之紅框所示。

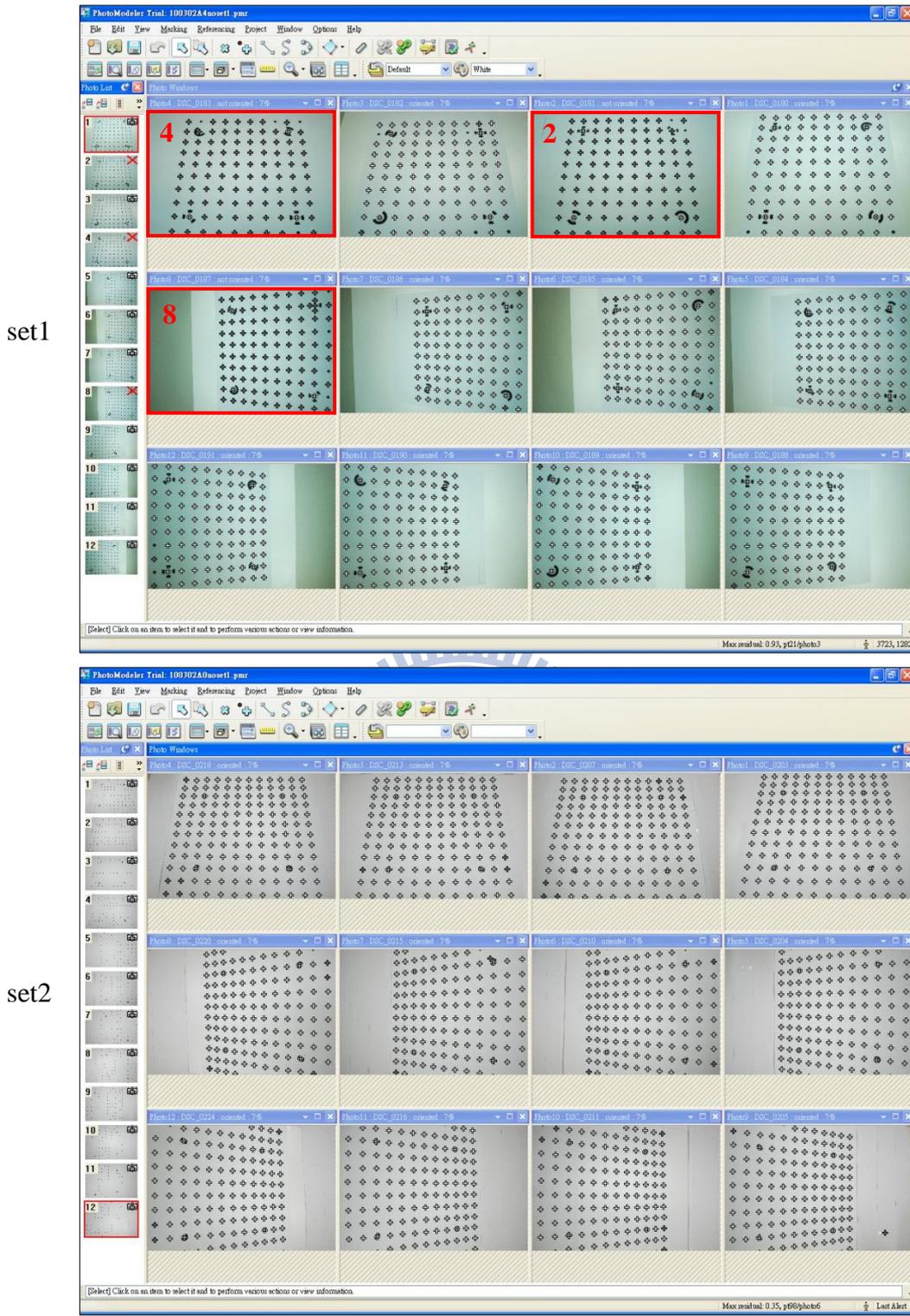
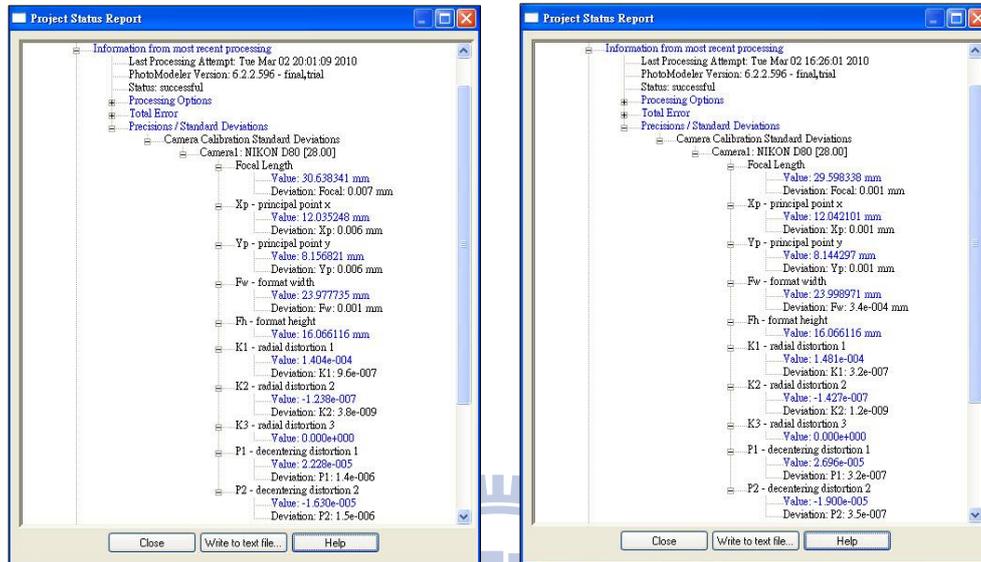


圖 3-5、以 PhotoModeler 進行影像量測之結果

圖 3-6 為率定報告，表 3-3 為率定參數與精密度 (Precision) 之整理。內方位參數 (f, x_p, y_p): set1 為 30.638 mm、0.046 mm、0.124 mm，set2 為 29.598 mm、0.043 mm、0.011 mm，其兩組內方位參數之率定後焦距差異達 1.04 mm，在 3.3.3 討論。內方位參

數之標準差 (Deviation) : set1 為 0.007 mm、0.006 mm、0.006 mm，set2 為 0.001 mm、0.001 mm、0.001 mm，顯示 set2 的標準差較 set1 小，即邊長 91.44 cm 率定標的率定結果較邊長 21.0 cm 率定標之精度高。



Set1

Set2

圖 3-6、PhotoModeler 相機率定報告

表 3-3、PhotoModeler 率定參數及精度之整理

相機參數	set1	標準差	set2	標準差
f (mm)	30.6383	0.007	29.5983	0.001
x_p (mm)	0.0464	0.006	0.0426	0.001
y_p (mm)	0.1238	0.006	0.0112	0.001
K_1	1.404×10^{-4}	9.6×10^{-7}	1.481×10^{-4}	3.2×10^{-7}
K_2	-1.238×10^{-7}	3.8×10^{-9}	-1.427×10^{-7}	1.2×10^{-9}
P_1	2.228×10^{-5}	1.4×10^{-6}	2.696×10^{-5}	3.2×10^{-7}
P_2	-1.630×10^{-5}	1.5×10^{-6}	-1.900×10^{-5}	3.5×10^{-7}

3.2.2 iWitness

佈設檢驗場

本實驗以 iWitness 原廠設計的率定標完成相機自動率定，其率定標共有 12 片紙板，每片皆由黑色紙板為主體且內含排列成「T」字的 5 個實心圓點，共有 60 個率定標點。圓點大小相同，顏色為螢光的紅色或綠色，每片的圓點顏色組合不盡相同，但皆與黑色紙板呈現明顯對比。佈設檢驗場時，將 12 片率定標擺置地板上，其中 2 片置於高約 10 公分的物體上，使與另外 10 片率定標位於不同平面，如圖 3-7 紅色方框所示的兩片率定標。

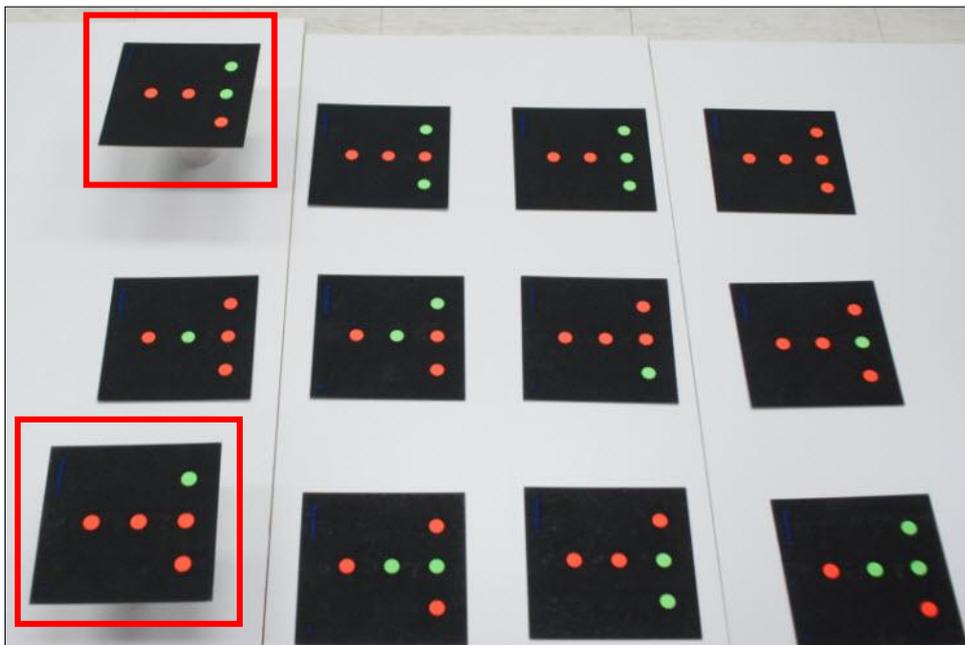


圖 3-7、iWitness 率定標及檢驗場佈設

拍攝作業

對率定標拍攝兩組影像(以 set3、set4 表示),拍攝兩組影像過程中無拆卸相機鏡頭。環繞率定標作 8 個方向(4 個邊及 4 個對角方向)正拍,並在檢驗場四個對角線方向以正、負 90 度旋轉相機機身拍攝,共拍得 18 張影像。圖 3-8 為實際拍攝率定標的位置,圖 3-9 為拍攝所得的影像。

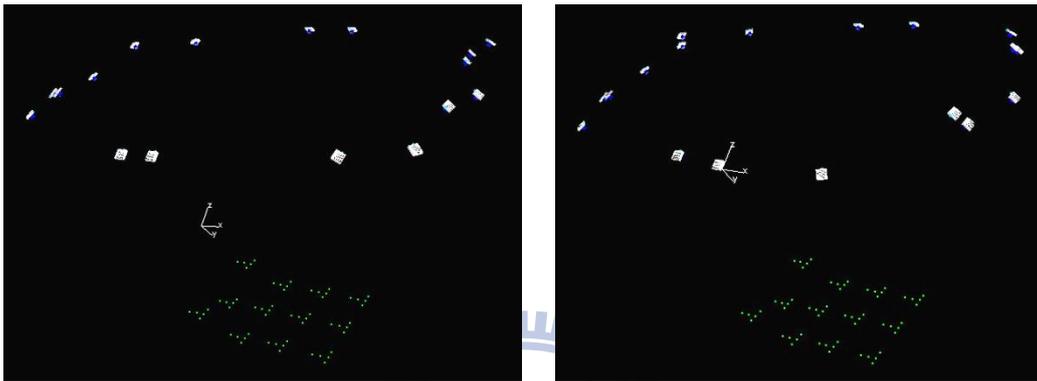
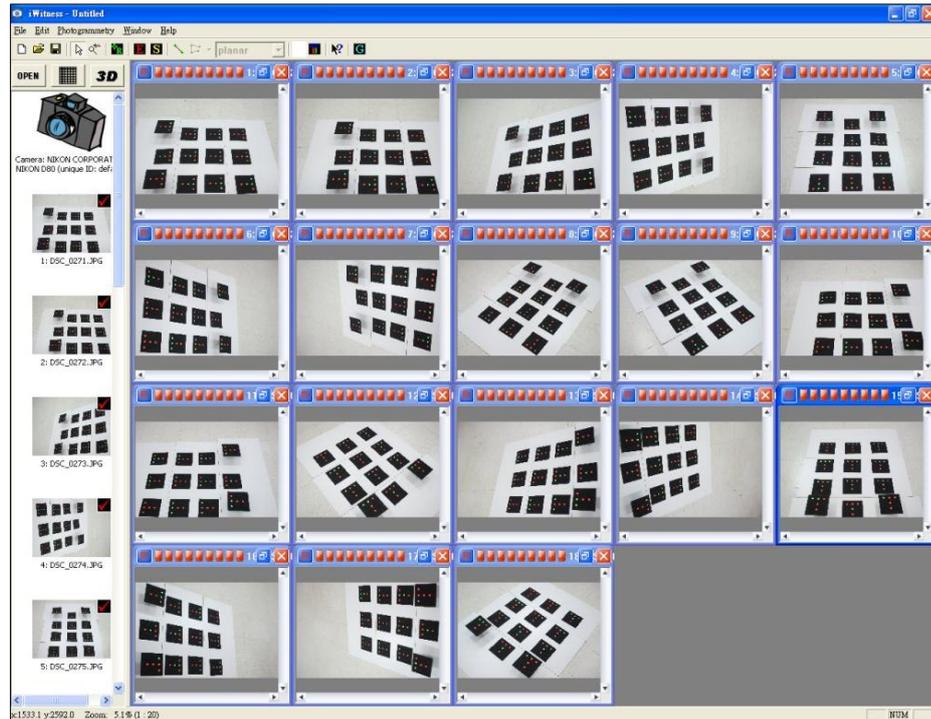


圖 3-8、拍攝 iWitness 率定標之實際位置,左為 set3,右為 set4

set3



set4

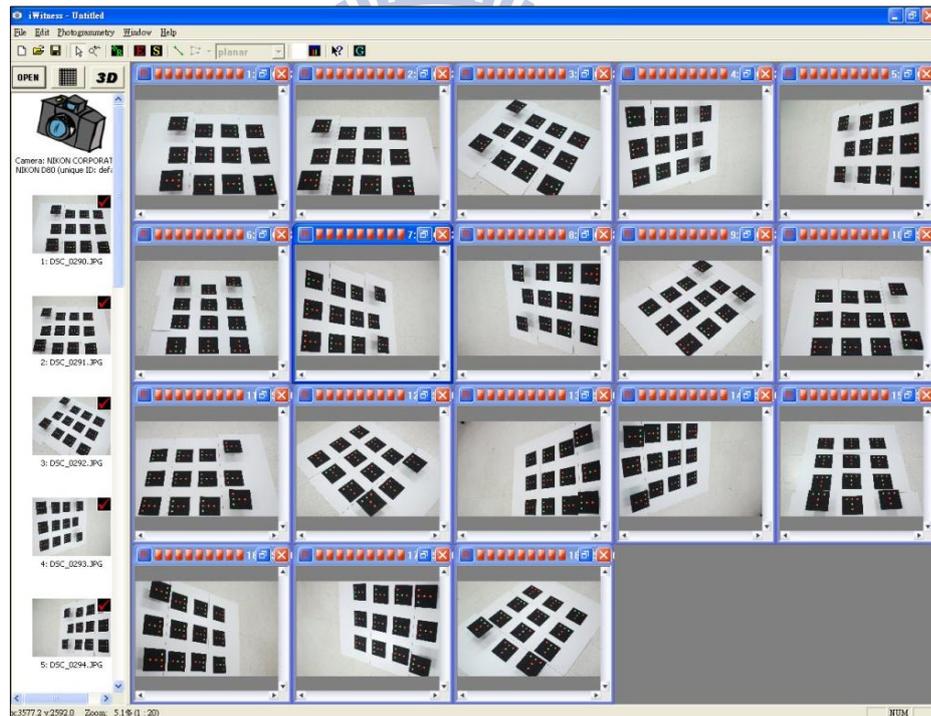


圖 3-9、拍攝 iWitness 率定標之影像

率定處理及結果

iWitness 近景攝影軟體影像坐標改正函數使用 10 個參數模型，除了廣義的 3 個內方位參數外，尚包含 7 個附加參數來表示鏡頭畸變差。其率定參數分別為：

- 相機內方位參數 (Camera interior orientation) : f, x_p, y_p
- 輻射畸變差參數 (Radial distortion parameters) : K_1, K_2, K_3
- 離心畸變差參數 (Decentering distortion parameters) : P_1, P_2
- 仿射、非正交參數 (Affinity, non-orthogonality parameters) : B_1, B_2

相關數學函式除了式(3-1)、式(3-2) 與式(3-3)外，其輻射透鏡畸變差(dr)及改正後之像點坐標(x_c, y_c)如下：

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \dots\dots\dots (3-8)$$

$$x_c = \bar{x} + \bar{x} \frac{dr}{r} + P_1 (r^2 + 2 \bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x} \bar{y} + B_1 \bar{x} + B_2 \bar{y} \dots\dots\dots (3-9)$$

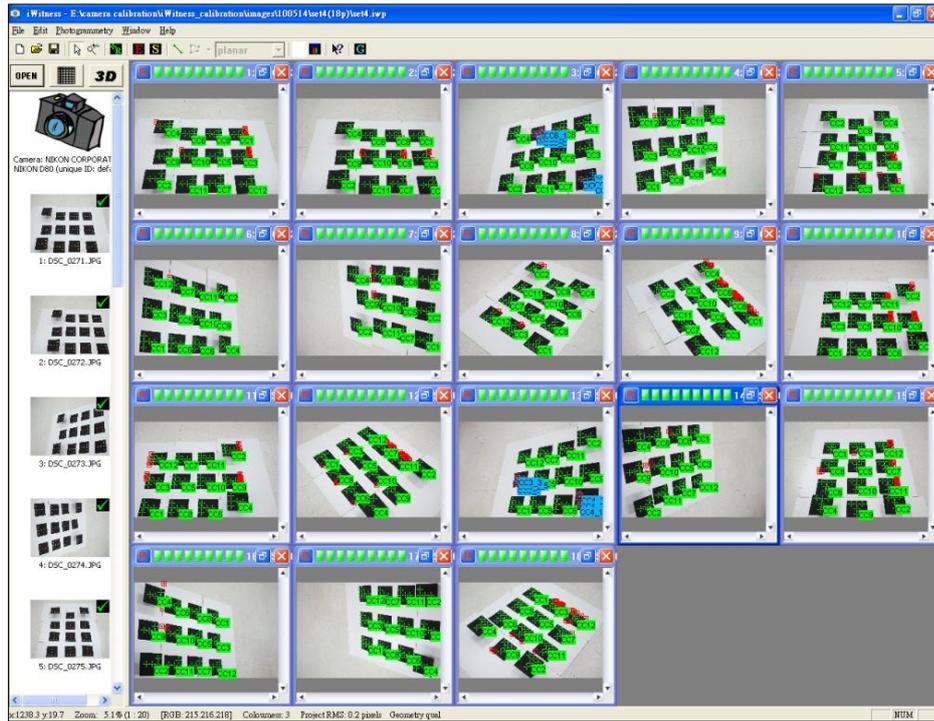
$$y_c = \bar{y} + \bar{y} \frac{dr}{r} + P_2 (r^2 + 2 \bar{y}^2) + 2P_1 \bar{x} \bar{y} \dots\dots\dots (3-10)$$

式中

- \bar{x}, \bar{y} : 改正像主點偏移之像坐標
- r : 像點至像主點之輻射距離
- dr : 對稱輻射透鏡畸變差
- x_c, y_c : 改正後之像點像坐標

完成拍攝後將影像載入軟體中進行自動化影像量測與參數率定，圖 3-10 為軟體操作影像量測。藍色編號為像點預測位置，綠色編號為像點正確位置，紅色框為出現錯誤訊息區域。由於拍攝影像之傾斜角度不同，會有不同程度之像點偏移，而出現錯誤訊息的像點在其他影像中仍可量測到，因此可進行初步相機率定，得到參數 $f, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3$ 。再將原預設固定的參數 (P_1, P_2, B_1, B_2) 取消掉，便可再次率定得到完整率定結果。

set3



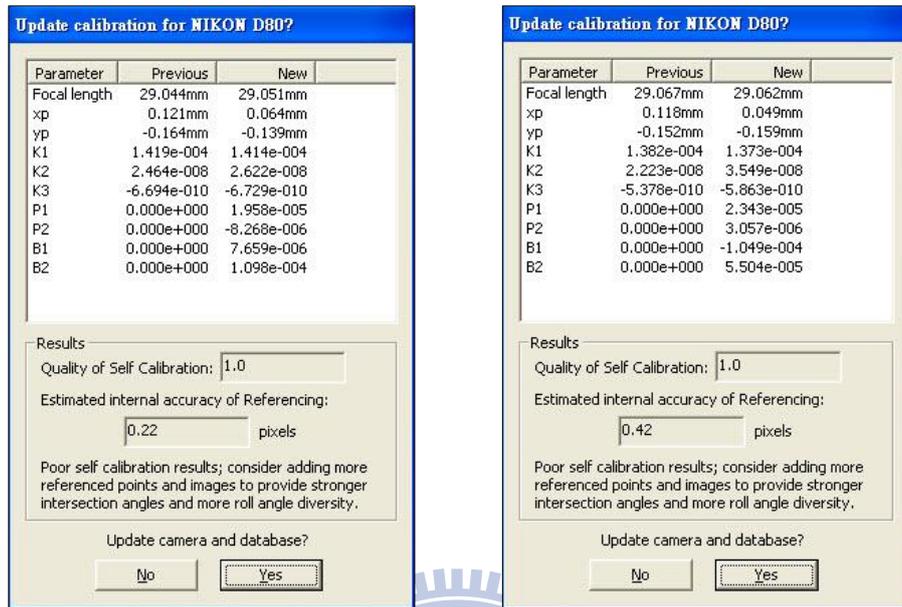
set4



圖 3-10、以 iWitness 進行影像量測之結果

圖 3-11 為初步率定及二次率定對照圖，視窗中左排數據為初步率定、右排數據為二次率定之結果，自率光束法平差之單位權中誤差：set3 為 0.22 pixels，set4 為 0.42 pixels。兩組參數率定結果整理於表 3-4，內方位參數(f, x_p, y_p): set3 為 29.051 mm、0.064 mm、

-0.139 mm，set4 為 29.062 mm、0.049 mm、-0.159 mm，其兩組內方位參數之率定後焦距差異僅 0.011 mm。



set3

set4

圖 3-11、iWitness 參數率定結果之視窗

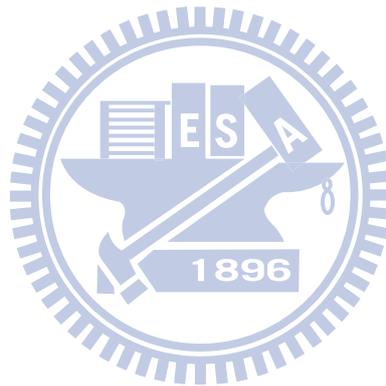
表 3-4、iWitness 率定參數之整理

相機參數	set3	set4
f (mm)	29.0508	29.0621
x_p (mm)	0.0643	0.0491
y_p (mm)	-0.1389	-0.1587
K_1	1.414×10^{-4}	1.373×10^{-4}
K_2	2.622×10^{-8}	3.549×10^{-8}
K_3	-6.729×10^{-10}	-5.863×10^{-10}
P_1	1.958×10^{-5}	2.343×10^{-5}
P_2	-8.269×10^{-6}	3.057×10^{-6}
B_1	7.659×10^{-6}	-1.049×10^{-4}
B_2	1.098×10^{-4}	5.504×10^{-5}

3.2.3 Lensphoto

佈設檢驗場

此軟體可設定率定網格點的大小與間距，使網格點在拍攝時成像清晰，並可選擇以電腦液晶螢幕（LCD）顯示平面網格點或列印網格點成紙張，進行相機率定。本實驗以 19 吋電腦液晶螢幕(30.4 cm × 37.9 cm)顯示平面網格點，將其置於高度 74 公分的桌上，完成檢驗場佈設。圖 3-12 (a) 設定格點直徑 3 mm 及間距 12 mm，共有 567 個格點規則排列成 21 列、27 行。圖 3-12 (b) 為 LCD 所顯示的平面網格點，除了率定標中央有三個控制點為紅、綠、藍色外，其於網格點皆為黑色，與白色背景呈明顯對比。圖 3-12 (c) 為控制點放大圖，紅、綠、藍點編號 0、1、2，為後續相機率定處理時標定控制點之順序。



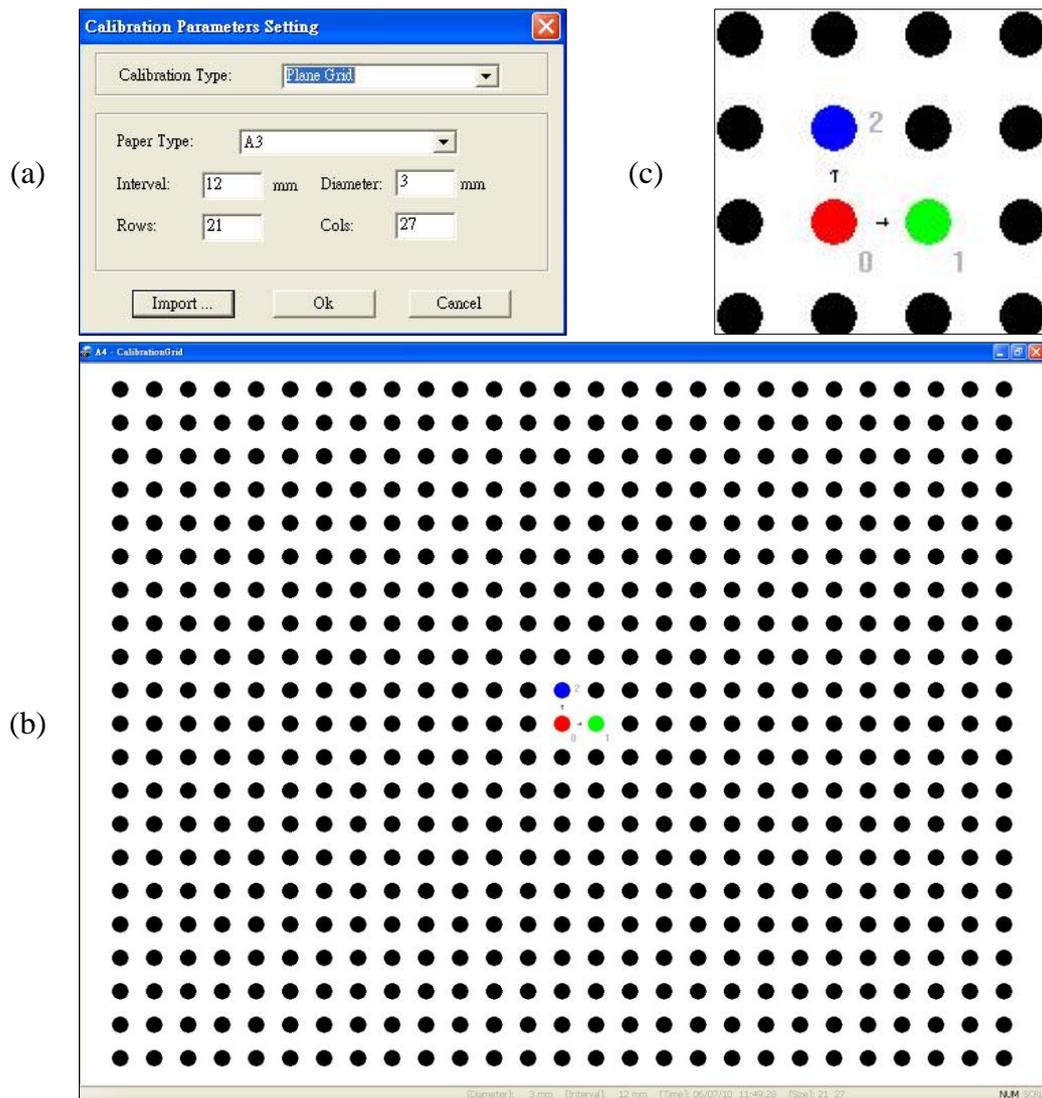


圖 3-12、本實驗所用 Lensphoto 之網格，(a)網格設定視窗，
(b)平面網格點，(c)率定標網格控制點

拍攝作業

於 LCD 前面 5 個不同的位置拍攝影像，如圖 3-13 中的星形標記 (S1~S5) 所示，分別為面對 LCD 的正前方、左上方、右上方、左下方及右下方位置。在每個攝影站藉由旋轉或俯仰相機拍攝以獲取影像，影像數量取決於率定標成像範圍的大小，且須確保於每個攝影站上之率定標均勻成像在像幅的不同範圍。例如：率定標可清晰成像且佔滿整個像幅，則每個攝影站只需拍一張影像。本研究在每個攝影站上拍攝了 9 張影像，使率定標成像均勻分佈在像幅的不同位置，呈九宮格排列，如圖 3-13 像幅分佈及編號 1~9。

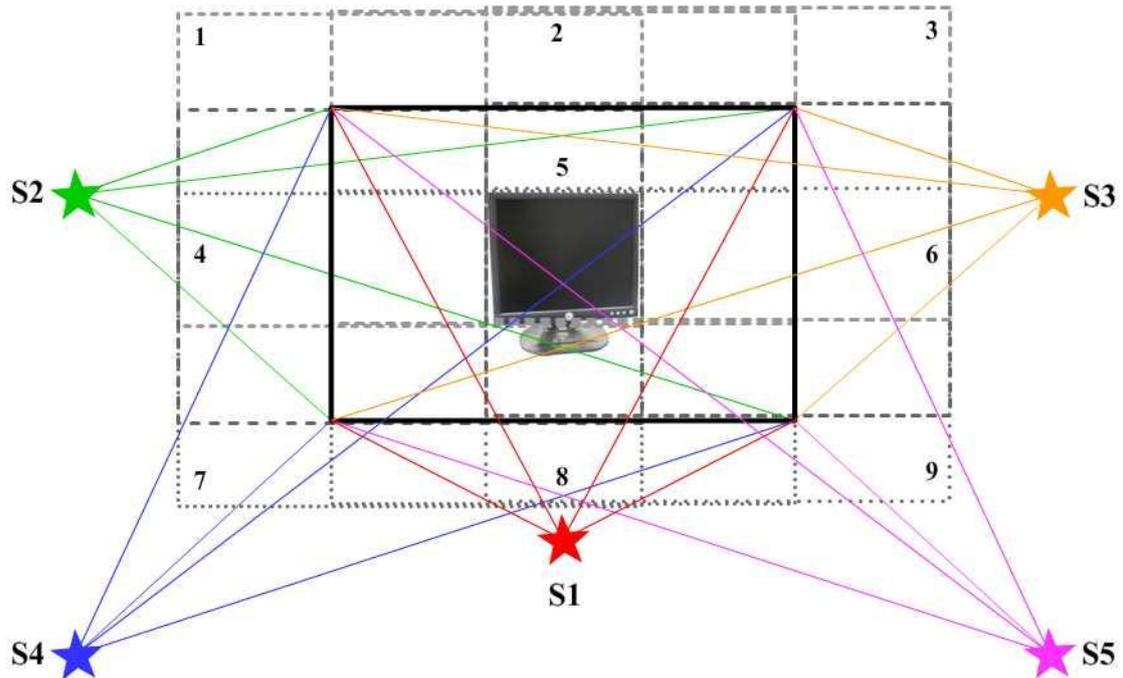


圖 3-13、拍攝 Lensphoto 率定標影像的位置示意圖

本研究共拍攝兩組率定影像，以 set5、set6 表示，兩組影像拍攝過程中鏡頭未拆卸。圖 3-14、圖 3-15 為拍攝所得影像，在 LCD 的正前方、左上方、右上方、左下方及右下方各拍攝 9 張影像，使此 9 張影像均勻成像在像幅的不同位置，形同九宮格的安排。一攝影站拍攝 9 張影像，五個攝影站，共拍得 45 張影像。拍攝時，關閉室內檢驗場燈光，以利 LCD 明亮顯示率定標網格點，白底黑圓點的率定標與黑暗背景皆成良好色彩反差。

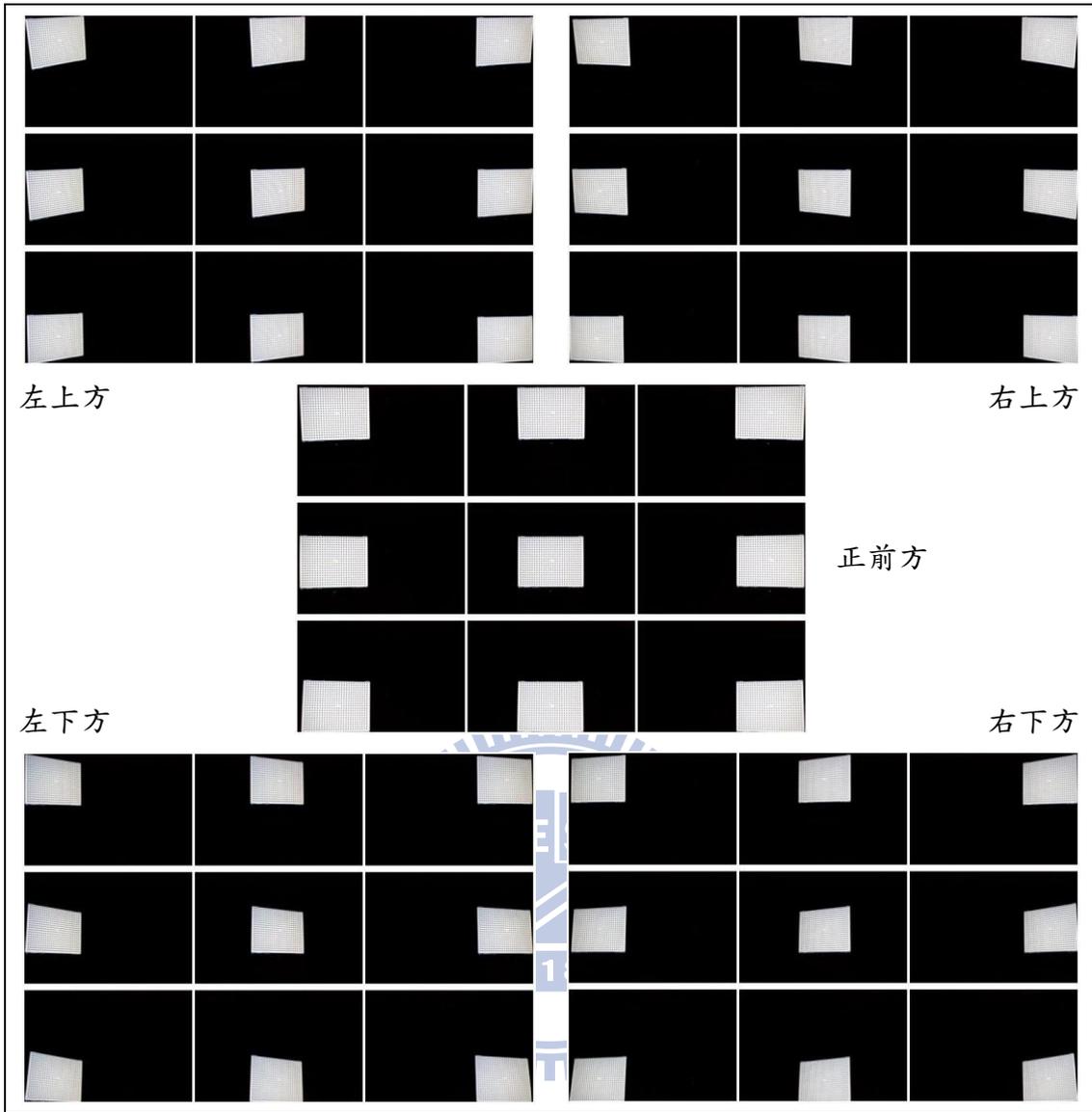


圖 3-14、拍攝 Lensphoto 率定標之影像組 set5

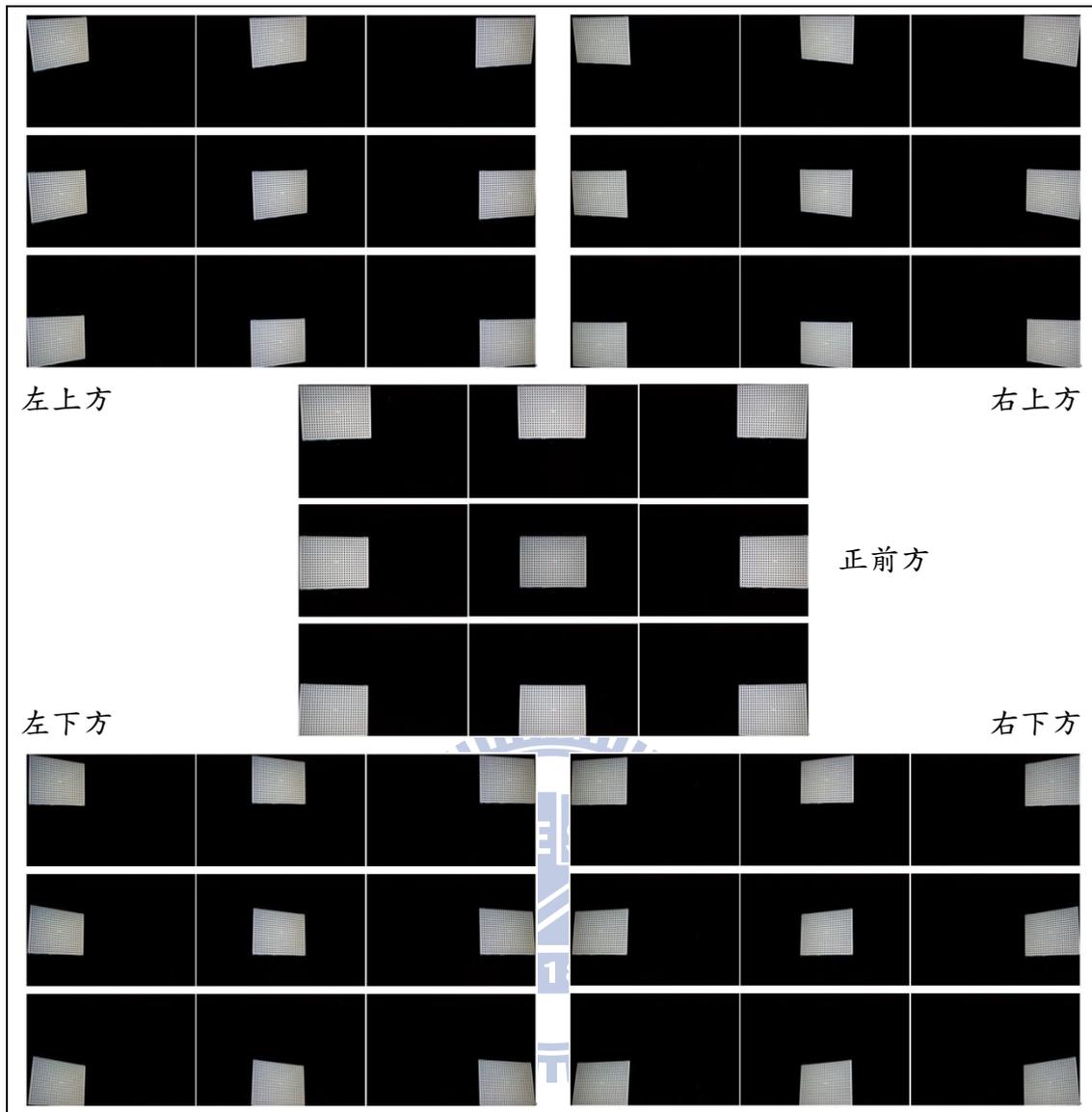


圖 3-15、拍攝 Lensphoto 率定標之影像組 set6

率定處理及結果

Lensphoto 在相機率定所使用的參數與相關數學模式和 PhotoModeler 相同。其率定參數為：

- 相機內方位參數 (Camera interior orientation) : f, x_p, y_p
- 輻射畸變差參數 (Radial distortion parameters) : K_1, K_2
- 離心畸變差參數 (Decentring distortion parameters) : P_1, P_2

將拍攝所得的 45 張率定標影像匯入軟體中進行半自動相機率定，圖 3-15 為加載率定標影像後之操作視窗。圖 3-16 中編號 a 及 b 的區塊為影像列表，區塊 c 為展示所選擇的率定標影像並可縮放影像，接著在放大視窗（區塊 d）以手動的方式點選控制點坐標方位，順序為圖 3-12 (c) 所示之數字編號 (0→1→2)：紅→綠→藍，即軟體設定率定標之坐標方位：原點→X 軸→Y 軸。每張影像皆需人工點選 3 個控制點，點選完三個控制點時，系統會自動量測網格點坐標，提取所有點的輪廓及其坐標方位，圖 3-17 為系統量測坐標後以紅色十字標標記每個網格點之位置。手動點選完 45 張影像後，可執行控制點平差與相機率定，求得內方位參數，解算成果與精度在區塊 e 展示。

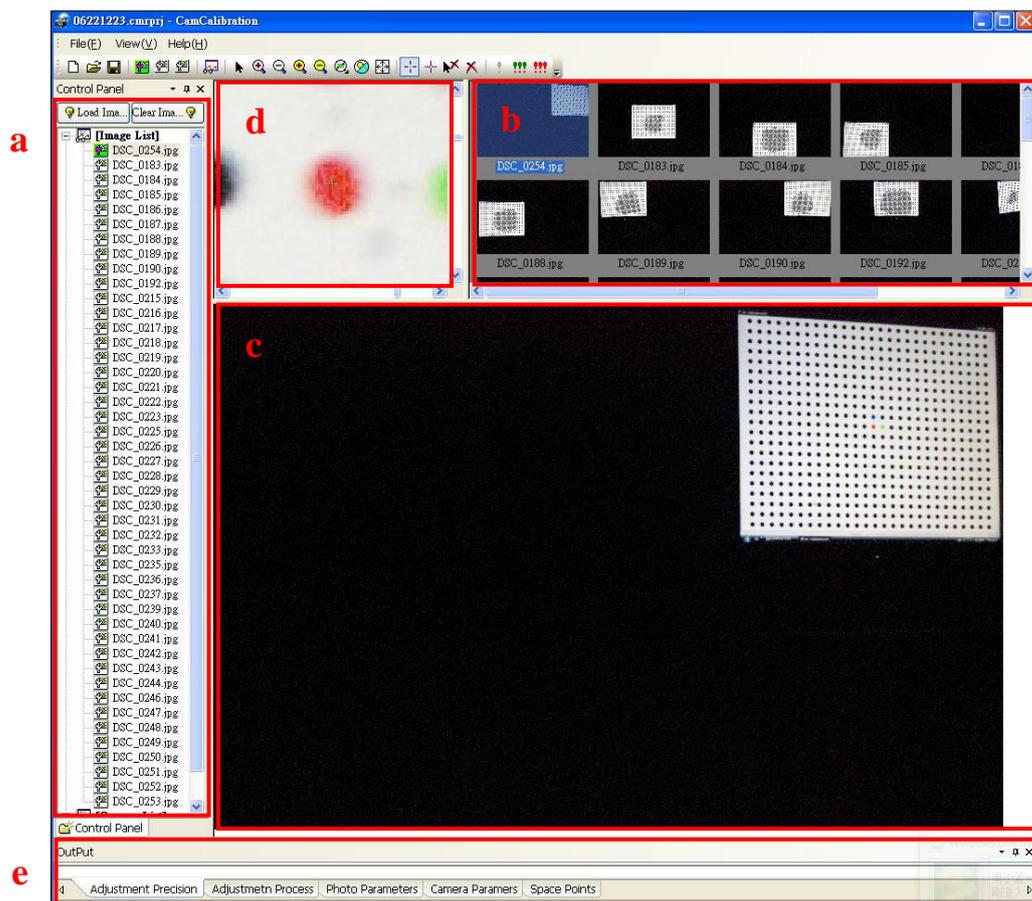


圖 3-16、Lensphoto 操作視窗

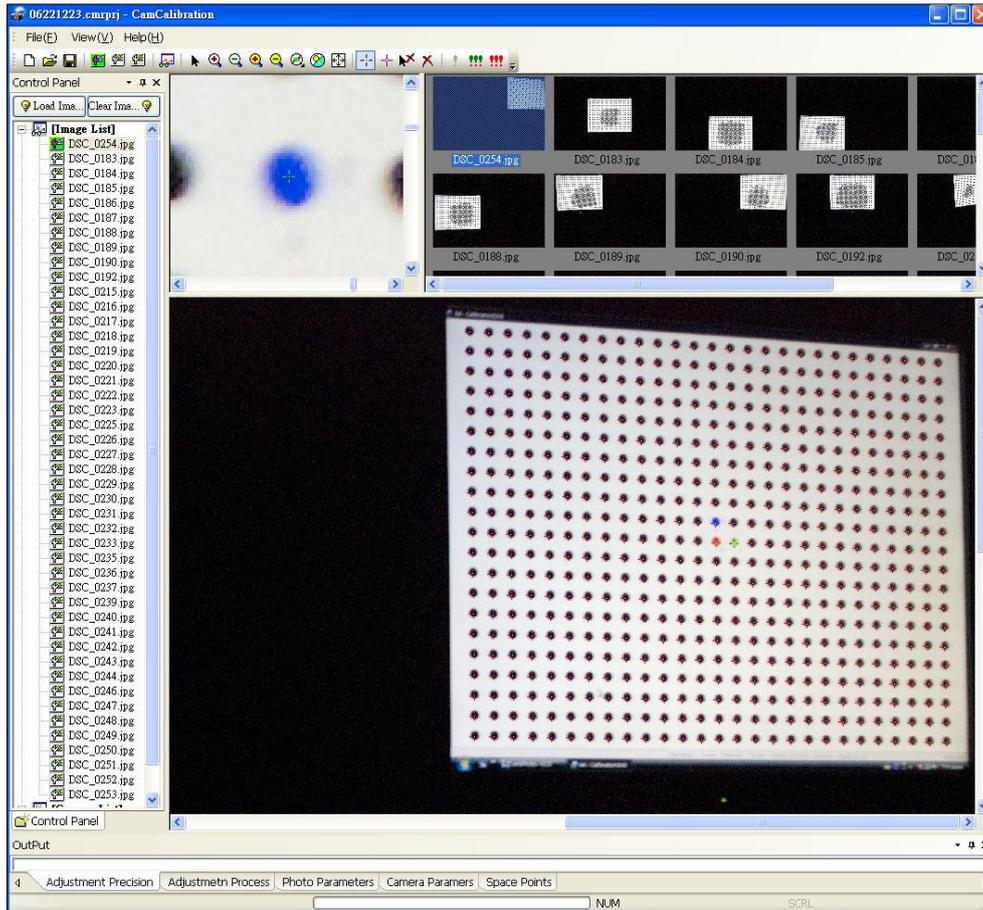
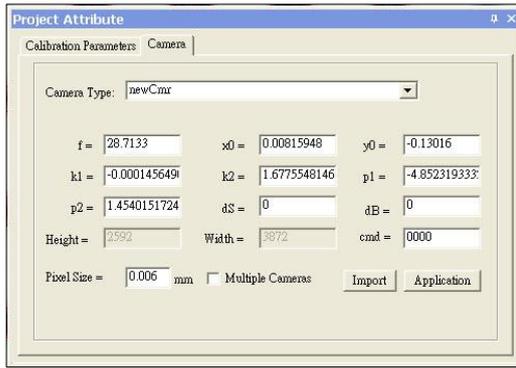
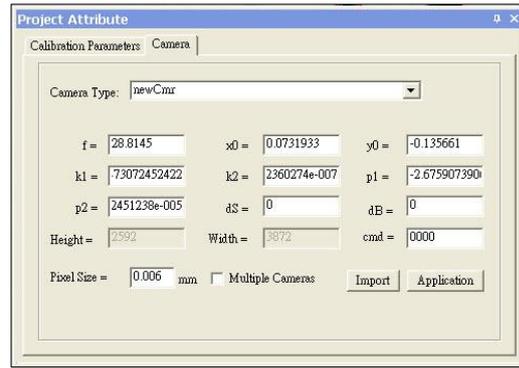


圖 3-17、以 Lensphoto 進行影像量測之結果

圖 3-18 為解算結果，因求得的 K_1 、 K_2 、 P_1 、 P_2 參數代入解算畸變差之值為改正量，將其表示成參數於表 3-5。內方位參數 (f, x_p, y_p) ：set5 為 28.713 mm、0.008 mm、-0.130 mm，set6 為 28.815 mm、0.073 mm、-0.136 mm，其兩組內方位參數之率定後焦距差異僅 0.102 mm。內方位之標準差：set1 為 1.080×10^{-5} mm、 2.790×10^{-6} mm、 2.806×10^{-6} mm，set2 為 9.055×10^{-6} mm、 2.340×10^{-6} mm、 2.354×10^{-6} mm，兩組參數率定結果之精度差異不大。



set5



set6

圖 3-18、Lensphoto 參數率定結果之視窗

表 3-5、Lensphoto 率定參數之整理

相機參數	set5	標準差	set6	標準差
f (mm)	28.7134	1.080×10^{-5}	28.8145	9.055×10^{-6}
x_p (mm)	0.0082	2.7907×10^{-6}	0.0732	2.340×10^{-6}
y_p (mm)	-0.1302	2.806×10^{-6}	-0.1357	2.354×10^{-6}
K_1	1.456×10^{-4}	4.109×10^{-9}	1.485×10^{-4}	3.416×10^{-9}
K_2	-1.678×10^{-7}	3.506×10^{-11}	-1.793×10^{-7}	2.901×10^{-11}
P_1	4.852×10^{-5}	1.548×10^{-8}	2.676×10^{-5}	1.291×10^{-8}
P_2	-1.454×10^{-5}	2.457×10^{-8}	-1.778×10^{-5}	2.043×10^{-8}

3.3 實驗成果與分析

以三軟體率定非量測性數位相機之內方位參數，其結果以相機鏡頭透鏡畸變差來作探討，並引出像距與物距之關係，再將三軟體之相機率定程序作整理比較。

3.3.1 內方位參數率定結果

在相機率定時，其所使用的附加參數不盡相同，PhotoModeler 與 Lensphoto 系統皆使用四個附加參數：對稱輻射畸變差參數 K_1 、 K_2 及離心畸變差參數 P_1 、 P_2 ，對影像進行改正；而 iWitness 使用 7 個附加參數：除了上述 4 個外，尚包含對稱輻射畸變差 K_3

及仿射參數 B_1 、 B_2 ，對影像進行改正。六組實驗之內方位參數率定結果整理於表 3-6，其中 PhotoModeler 兩組實驗，set1 使用 21.0 cm 率定標，率定後的焦距(f)為 30.6383 mm；set2 使用 91.44 cm 率定標，率定後的焦距為 29.5983 mm，兩組實驗之率定後焦距差異大，在 3.3.3 討論。各組實驗之內方位參數標準差整理於表 3-7，其中 iWitness 軟體無提供內方位參數率定後的標準差，因此 set3 與 set4 沒有數據；比較 PhotoModeler 及 Lensphoto 軟體的內方位參數率定結果，Lensphoto 軟體的標準差較小，精度較高。

表 3-6、各組實驗之內方位參數率定結果

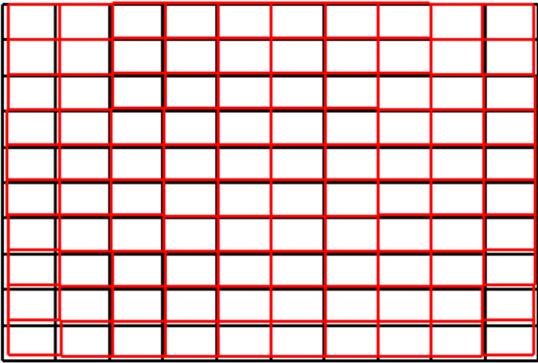
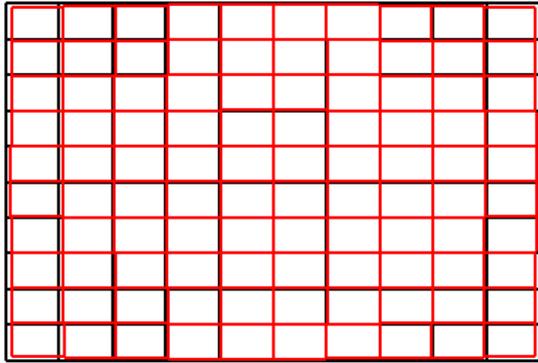
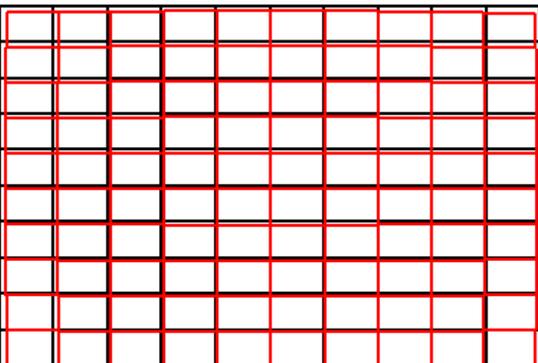
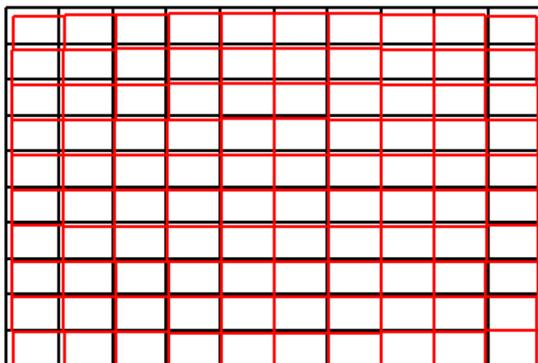
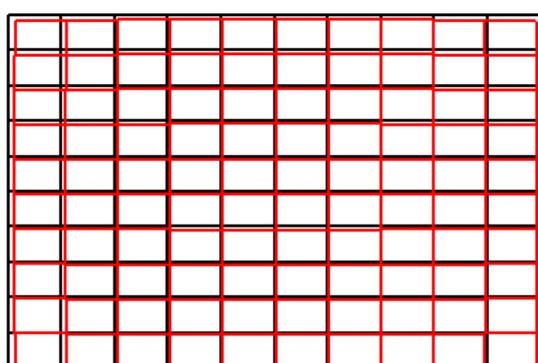
軟體名稱		PhotoModeler		iWitness		Lensphoto	
組別		set1	set2	set3	set4	set5	set6
內方位參數	f (mm)	30.6383	29.5983	29.0508	29.0621	28.7134	28.8145
	x_p (mm)	0.0464	0.0426	0.0643	0.0491	0.0082	0.0732
	y_p (mm)	0.1238	0.0112	-0.1389	-0.1587	-0.1302	-0.1357
	K_1	1.404×10^{-4}	1.481×10^{-4}	1.414×10^{-4}	1.373×10^{-4}	1.456×10^{-4}	1.485×10^{-4}
	K_2	-1.238×10^{-7}	-1.427×10^{-7}	2.622×10^{-8}	3.549×10^{-8}	-1.678×10^{-7}	-1.793×10^{-7}
	K_3	----	----	-6.729×10^{-10}	-5.863×10^{-10}	----	----
	P_1	2.228×10^{-5}	2.696×10^{-5}	1.958×10^{-5}	2.343×10^{-5}	4.852×10^{-5}	2.676×10^{-5}
	P_2	-1.630×10^{-5}	-1.900×10^{-5}	-8.269×10^{-6}	3.057×10^{-6}	-1.454×10^{-5}	-1.778×10^{-5}
	B_1	----	----	7.659×10^{-6}	-1.049×10^{-4}	----	----
	B_2	----	----	1.098×10^{-4}	5.504×10^{-5}	----	----

表 3-7、各組實驗之內方位參數標準差

軟體名稱		PhotoModeler		iWitness		Lensphoto	
組別／標準差		set1	set2	set3	set4	set5	set6
內方位參數之精度	f (mm)	0.007	0.001	----	----	1.080×10^{-5}	9.055×10^{-6}
	x_p (mm)	0.006	0.001	----	----	2.790×10^{-6}	2.340×10^{-6}
	y_p (mm)	0.006	0.001	----	----	2.806×10^{-6}	2.354×10^{-6}
	K_1	9.6×10^{-7}	3.2×10^{-7}	----	----	4.109×10^{-9}	3.416×10^{-9}
	K_2	3.8×10^{-9}	1.2×10^{-9}	----	----	3.506×10^{-11}	2.901×10^{-11}
	K_3	----	----	----	----	----	----
	P_1	1.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	----	----	1.548×10^{-8}	1.291×10^{-8}
	P_2	1.5×10^{-6}	3.5×10^{-7}	----	----	2.457×10^{-8}	2.043×10^{-8}
	B_1	----	----	----	----	----	----
	B_2	----	----	----	----	----	----

表 3-8 為綜合內方位參數率定結果之相機鏡頭畸變程度，將 23.6 mm×15.8mm 影像幅平均分配成 10×10 的網格，每個網格大小皆相同，紅色網格為鏡頭畸變差改正前，黑色網格為改正鏡頭畸變差後之示意圖。六組實驗相機未率定前之紅色網格變形，皆與圖 2-3(a)之 b 線較為接近，像主點偏移量及像點最大變形量如表 3-8 所示。像主點偏移量：set1 為 22.03 pixels，set2 為 7.34 pixels，set3 為 25.51 pixels，set4 為 27.69 pixels，set5 為 21.74 pixels，set6 為 25.70 pixels；以 iWitness 軟體率定後之像主點偏移量較大，PhotoModeler 軟體率定邊長 91.44 cm 率定標之像主點偏移量為最小。像點最大變形量：set1 為 70.40 pixels，set2 為 59.62 pixels，set3 為 75.10 pixels，set4 為 76.33 pixels，set5 為 66.87 pixels，set6 為 71.70 pixels；同樣以 iWitness 軟體率定後之像點最大變形量為較大，PhotoModeler 軟體率定邊長 91.44 cm 率定標之像點最大變形量為最小。

表 3-8、各組實驗之相機鏡頭畸變程度

<p style="text-align: center;">set1</p>  <p>像主點偏移量：22.03 pixels 像點最大變形量：70.40 pixels</p>	<p style="text-align: center;">set2</p>  <p>像主點偏移量：7.34 pixels 像點最大變形量：59.62 pixels</p>
<p style="text-align: center;">set3</p>  <p>像主點偏移量：25.51 pixels 像點最大變形量：75.10 pixels</p>	<p style="text-align: center;">set4</p>  <p>像主點偏移量：27.69 pixels 像點最大變形量：76.33 pixels</p>
<p style="text-align: center;">set5</p>  <p>像主點偏移量：21.74 pixels 像點最大變形量：66.87 pixels</p>	<p style="text-align: center;">set6</p>  <p>像主點偏移量：25.70 pixels 像點最大變形量：71.70 pixels</p>

3.3.2 輻射透鏡畸變差

將對稱輻射畸變差繪製成折線圖，以影像上對稱像主點為原點，橫軸模擬以像主點為中心至像點之輻射距離 r (單位：mm)，縱軸為對稱輻射畸變差 dr (單位： μm)。在對稱輻射畸變差的折線上，每隔 1 mm 輻射距離便標記其所對應的對稱輻射畸變量，本研究使用相機影像感測器大小為 23.6 mm×15.8 mm，在影像上最大輻射距離 (影像像幅對角線之半) 為 14.2 mm。圖 3-19、圖 3-20、圖 3-21 分別為軟體 PhotoModeler、iWitness、Lensphoto 兩組實驗對稱輻射畸變差折線圖，橫軸之輻射距離為 0~15 mm，縱軸之對稱輻射畸變量為 0~400 μm ，紅色數值表示影像上像點在最大輻射距離之對稱輻射畸變差。

以軟體作區別，圖 3-22 為各軟體分別兩次實驗率定結果之輻射畸變量折線圖，各軟體內兩組實驗之最大對稱輻射畸變量折線差異程度由大至小：PhotoModeler > iWitness > Lensphoto。圖 3-23 為六組實驗數據之輻射畸變差折線圖，六組數據很接近，Lensphoto 兩組對稱輻射畸變量數值較小，曲線在最下方；iWitness 兩組對稱輻射畸變量較大，曲線在最上方；而 PhotoModeler 兩組差異較大的曲線介於前述兩軟體間。最大對稱輻射畸變差之差值與平均整理於表 3-9，影像上最大輻射距離所對應之最大輻射畸變差，兩組實驗差值最大為 PhotoModeler 的 11.136 μm ，最小為 Lensphoto 的 1.664 μm ；兩組實驗平均值最大為 iWitness 的 343.531 μm ，最小為 Lensphoto 的 320.847 μm ，差異小僅達 22.684 μm 。

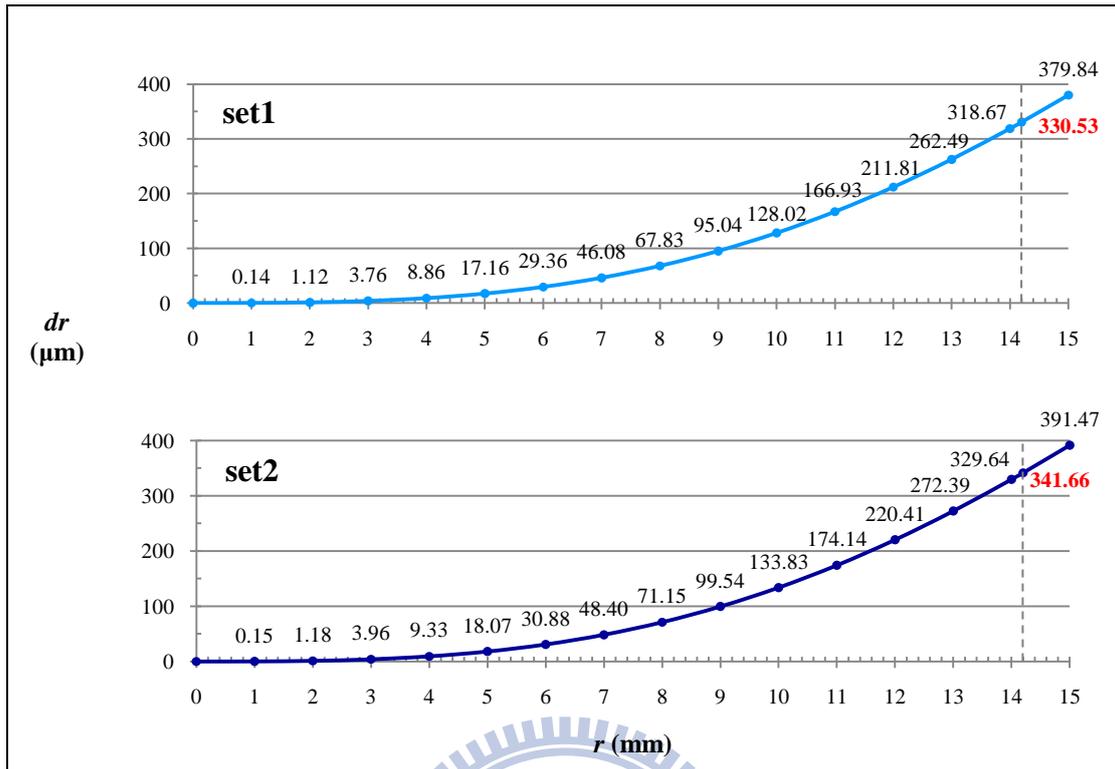


圖 3-19、PhotoModeler 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖

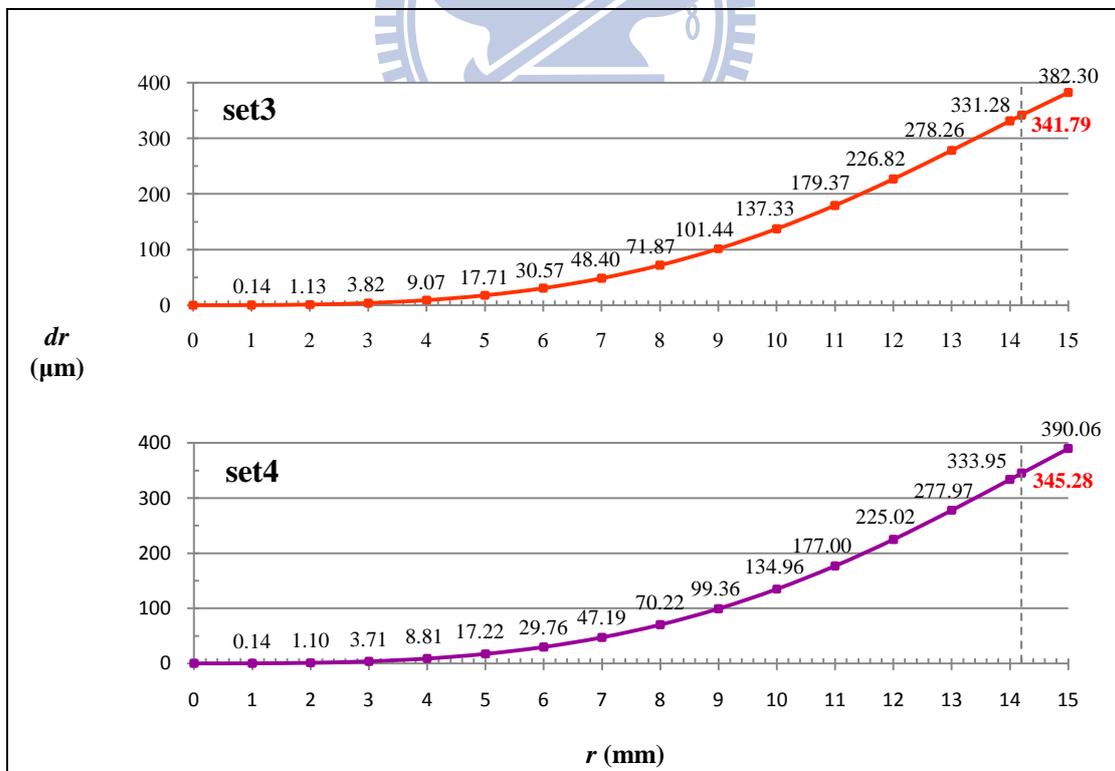


圖 3-20、iWitness 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖

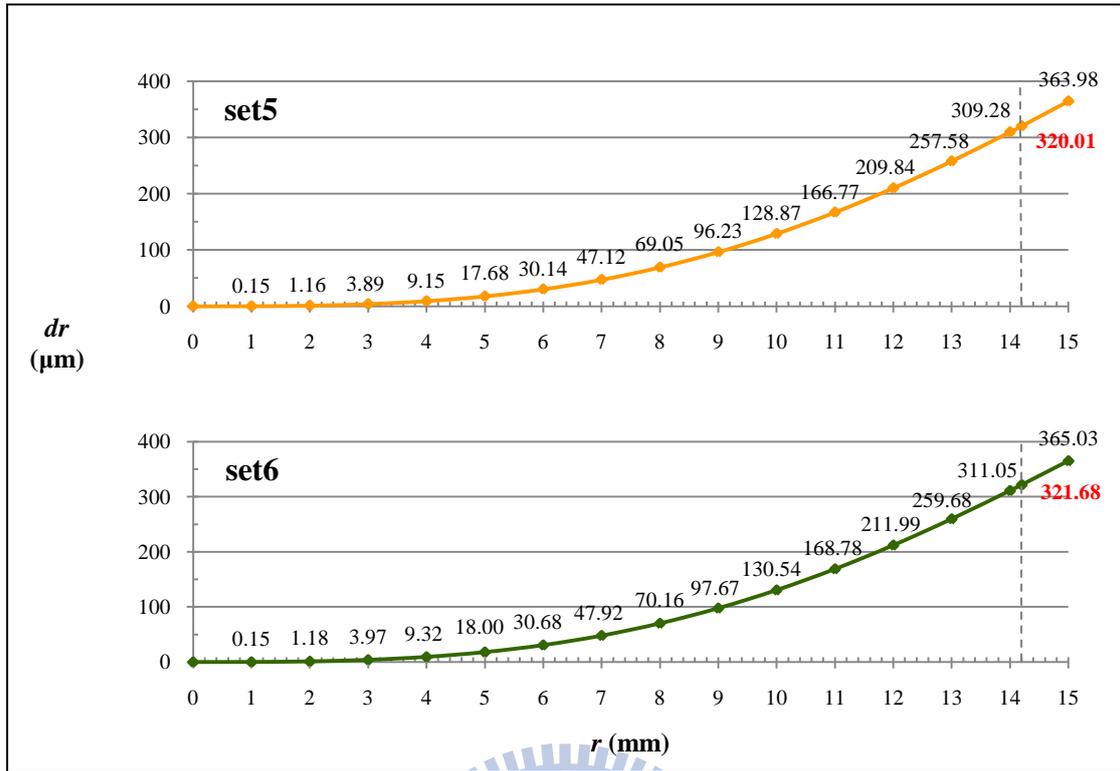


圖 3-21、Lensphoto 之鏡頭對稱輻射畸變差折線圖

表 3-9、輻射畸變差實驗之差值與平均

軟體	組別	最大輻射畸變差 (μm)	差值 (μm)	平均 (μm)
PhotoModeler	set1	330.529	11.136	336.097
	set2	341.665		
iWitness	set3	341.787	3.488	343.531
	set4	345.275		
Lensphoto	set5	320.015	1.664	320.847
	set6	321.679		

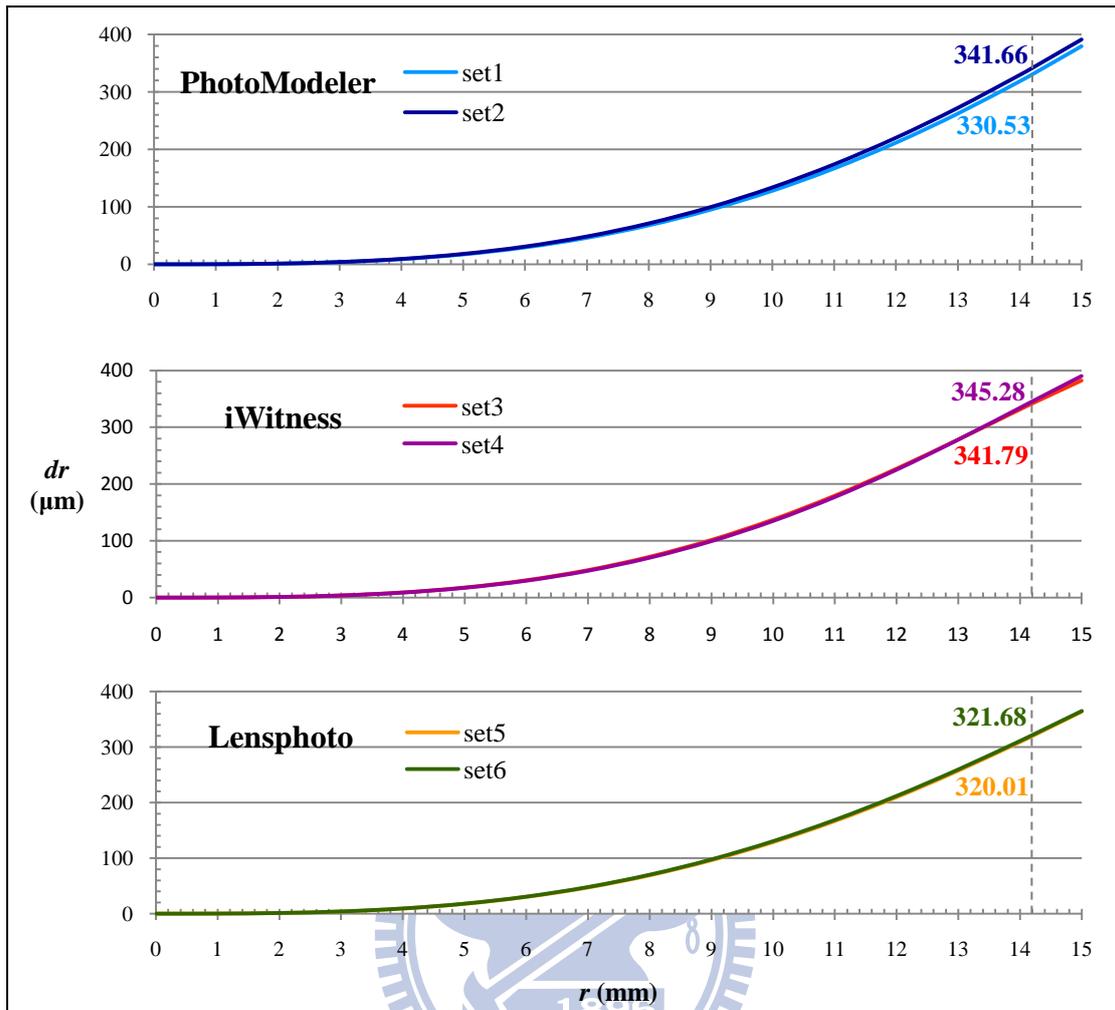


圖 3-22、各軟體兩組率定結果之鏡頭輻射畸變差折線圖

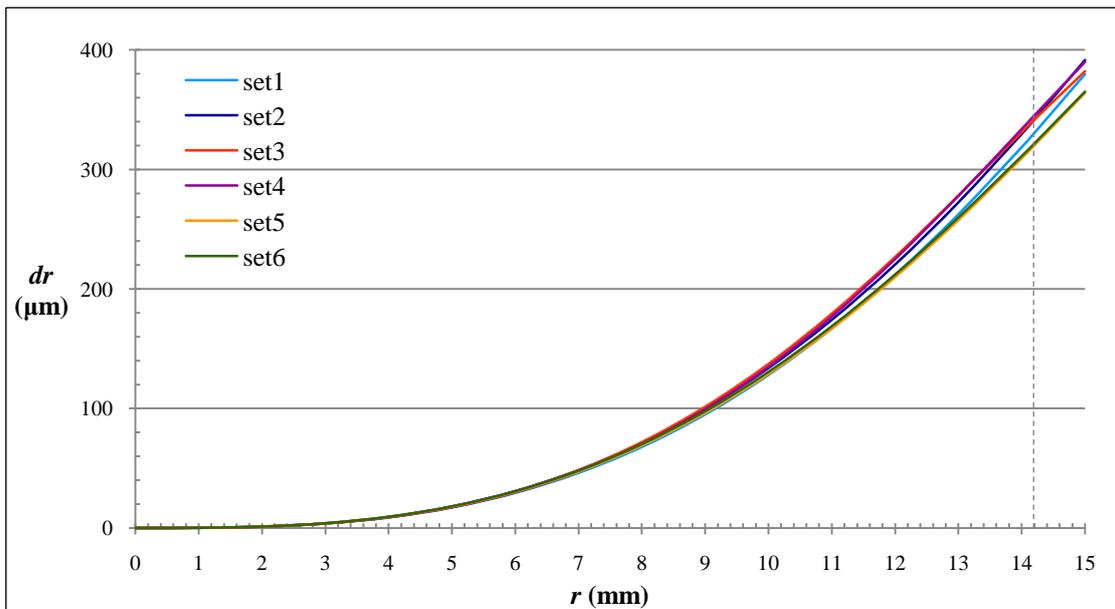


圖 3-23、六組實驗之輻射畸變差折線圖

3.3.3 像距與物距之關係

拍攝率定標影像時，若將鏡頭對焦距離調整至無窮遠 (∞)，為使控制點成像清晰，造成率定標涵蓋影像畫面不足而軟體無法處理相機率定。受到率定標涵蓋影像畫面之限制，在拍攝時欲取得清晰控制點影像，未將鏡頭對焦距離調整至無窮遠，導致軟體率定結果之 f 非為率定後焦距長，而是像距。

表 3-10 是以固定相機鏡頭焦距長 28 mm 及軟體率定報告得到的像距，代入透鏡成像公式，得到拍攝率定標影像的物距。因 set1 為 21.0 cm 之率定標，拍攝時為了率定標成像清晰且涵蓋足夠畫面，物距較小，僅 32.5 cm；set2 為 91.44 cm 之率定標，拍攝時為了使率定標控制點皆在影像畫面中，需較長的物距，為 51.9 cm；物距差 19.4 cm，解釋 set1 與 set2 所得 f 值率定結果之差值達 1.04 mm。

表 3-10、六組實驗之攝影物距

軟體	組別	像距 (mm)	物距 (m)
PhotoModeler	set1	30.6383	0.325
	set2	29.5983	0.519
iWitness	set3	29.0508	0.774
	set4	29.0621	0.766
Lensphoto	set5	28.7134	1.127
	set6	28.8145	0.991

根據透鏡成像公式，焦距為定值，拍攝時物距不同會造成像距的不同。本實驗使用 28 mm 定焦鏡頭，焦距為定值，定焦物距範圍 25 cm $\sim \infty$ ，可推算不同物距所對應的像距，表 3-11 為物距與像距之關係。

根據透鏡成像公式，式(2-1)，焦距 $f = 28$ mm 為定值：

(1) 當物距 $o = 25$ cm，

$$\frac{1}{250} + \frac{1}{i} = \frac{1}{28} \quad , \text{ 得到像距 } i = 31.5315 \text{ mm}$$

(2) 當物距 $o = \infty$,

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{i} = \frac{1}{28} \quad , \text{ 得到像距 } i = 28.0000 \text{ mm} = f \text{ 焦距}$$

物距越小，像距越大；最小對焦物距 25 cm 可得像距為 31.5315 mm，物距達到無窮遠則可得像距等於焦距長（28 mm）。

表 3-11、物距與像距之關係

物距(m)	像距(mm)	物距(m)	像距(mm)	物距(m)	像距(mm)	物距(m)	像距(mm)
0.25	31.5315	1.6	28.4987	5.5	28.1433	26	28.0302
0.26	31.3793	1.7	28.4689	6.0	28.1313	27	28.0291
0.27	31.2397	1.8	28.4424	6.5	28.1211	28	28.0280
0.28	31.1111	1.9	28.4188	7.0	28.1124	29	28.0271
0.29	30.9924	2.0	28.3976	7.5	28.1049	30	28.0262
0.30	30.8824	2.1	28.3784	8.0	28.0983	35	28.0224
0.35	30.4348	2.2	28.3610	8.5	28.0925	40	28.0196
0.40	30.1075	2.3	28.3451	9.0	28.0874	45	28.0174
0.45	29.8578	2.4	28.3305	9.5	28.0828	50	28.0157
0.50	29.6610	2.5	28.3172	10	28.0786	55	28.0143
0.55	29.5019	2.6	28.3048	11	28.0715	60	28.0131
0.60	29.3706	2.7	28.2934	12	28.0655	65	28.0121
0.65	29.2605	2.8	28.2828	13	28.0604	70	28.0112
0.70	29.1667	2.9	28.2730	14	28.0561	80	28.0098
0.75	29.0859	3.0	28.2638	15	28.0524	90	28.0087
0.80	29.0155	3.2	28.2472	16	28.0491	100	28.0078
0.85	28.9538	3.4	28.2325	17	28.0462	125	28.0063
0.90	28.8991	3.6	28.2195	18	28.0436	150	28.0052
0.95	28.8503	3.8	28.2078	19	28.0413	175	28.0045
1.00	28.8066	4.0	28.1974	20	28.0393	200	28.0039
1.1	28.7313	4.2	28.1879	21	28.0374	250	28.0031
1.2	28.6689	4.4	28.1793	22	28.0357	300	28.0026
1.3	28.6164	4.6	28.1715	23	28.0341	350	28.0022
1.4	28.5714	4.8	28.1643	24	28.0327	400	28.0020
1.5	28.5326	5.0	28.1577	25	28.0314	∞	28.0000

3.3.4 相機率定之程式集評比

本研究使用 PhotoModeler、iWitness、Lensphoto 三個近景攝影測量軟體進行相機鏡頭率定，獲得率定成果，整理相關資訊於表 3-12。

表 3-12、近景攝影測量軟體相機率定之評比

軟體	PhotoModeler	iWitness	Lensphoto
率定標屬性	列印成紙張	原廠率定標紙板	螢幕顯示網格點
率定標樣式	白底+黑圓點	黑底+紅、綠圓點	白底+黑圓點
率定標大小	21.0 cm/91.44 cm 之正方形率定標	約 70cm×83cm	19 吋螢幕 (30.4cm×37.9cm)
控制點數	100 個(10 行 10 列)/ 144 個(12 行 12 列)	60 個 (5 點/片，12 片)	567 個 (27 行 21 列)
檢驗場佈設	須拉平率定標且呈 水平面佈設	架高其中 2 片率定 標，使與另 10 片在 不同平面上	需電腦設備且將螢 幕置於桌面上
拍攝作業	在率定標的 4 個邊 方向分別正拍及 正、負 90 度旋轉相 機拍攝 (圖 3-24)	至少在率定標的邊 角 8 個方向拍攝， 包含旋轉相機機身 拍攝 (圖 3-25)	5 個位置拍攝：前 方、左上、右上、 左下、右下 (圖 3-26)
影像條件	率定標須涵蓋影像 畫面的 80%	影像品質須清晰	每攝影站拍攝的影 像數取決於率定標 涵蓋影像的範圍
所需影像數	12 張	最少 8 張	最少 5 張
使用影像數	12 張 (表 3-13)	18 張 (表 3-13)	45 張 (表 3-13)
自動化率定	可	可	半自動
處理效率	快	快	較慢
鏡頭拆裝	有	無	無

表 3-13、率定標影像拍攝位置及數量

拍攝方位	PhotoModeler	iWitness	Lensphoto
東	正拍×1、+90°×1、-90°×1	正拍×2	———
南	正拍×1、+90°×1、-90°×1	正拍×1	———
西	正拍×1、+90°×1、-90°×1	正拍×2	———
北	正拍×1、+90°×1、-90°×1	正拍×1	———
東南	———	正拍×1、正旋轉×1、負旋轉×1	———
西南	———	正拍×1、正旋轉×1、負旋轉×1	———
西北	———	正拍×1、正旋轉×1、負旋轉×1	———
東北	———	正拍×1、正旋轉×1、負旋轉×1	———
正前方	———	———	正拍×9
右上方	———	———	正拍×9
左上方	———	———	正拍×9
左下方	———	———	正拍×9
右下方	———	———	正拍×9

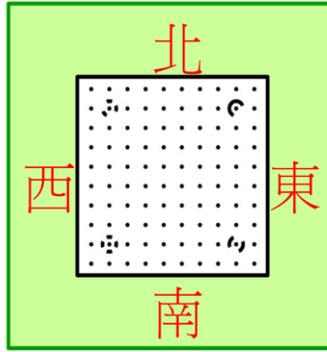


圖 3-24、拍攝 PhotoModeler 率定標位置

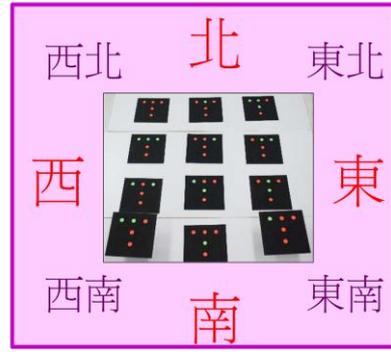


圖 3-25、拍攝 iWitness 率定標位置

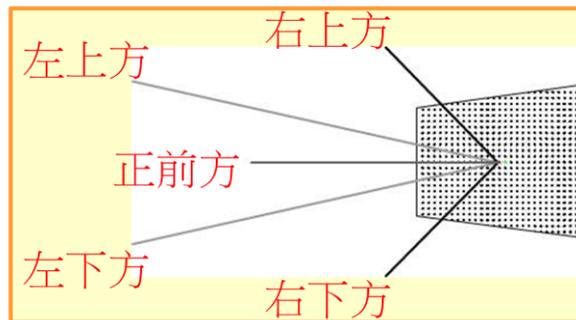


圖 3-26、拍攝 Lensphoto 率定標位置

三軟體之率定標規格、控制點數皆不相同，但率定標點與背景顏色皆作高色彩反差的設計，且其皆用實心圓點作為率定標點樣式，因不論以任何角度拍攝率定標造成圓形標點變形後，仍可輕易地找到圓形標點形心，進行影像坐標量測。

檢驗場佈設，PhotoModeler 率定標為出圖紙張，即使拉平黏貼於木板上仍有不平整的問題，造成圓形控制點變形；iWitness 使用原廠率定標厚紙板，紙張不平整與率定標變形量較小；Lensphoto 以電腦液晶螢幕顯示網格點，無率定標紙張不平整及控制點變形的問題。

拍攝 PhotoModeler 率定標，軟體限制率定標須涵蓋影像畫面 80% 以上，且須在方形率定標的 4 個邊方向分別正拍一張及正、負 90 度旋轉相機拍攝一張，因此會有 12 張影像。拍攝 iWitness 率定標，須至少在率定標的 4 個邊與 4 個角方向拍攝，8 個方向取

得的 8 張影像，須包含旋轉相機拍攝。拍攝 Lensphoto 率定標，若控制點成像清晰且佔滿整個影像像幅，每個攝影站僅需拍攝 1 張影像，只需要 5 張影像便可進行相機率定；若率定標成像清晰卻無法佔滿整個像幅，則每個攝影站須多拍幾張影像，使率定標均勻成像在像幅的不同位置，如圖 3-13、圖 3-14 所示。

實驗所用率定標控制點數目：PhotoModeler 有 100 個、144 個，iWitness 有 60 個，Lensphoto 有 567 個，其中以 Lensphoto 控制點數為最多。使用影像數：PhotoModeler 有 12 張，iWitness 有 18 張，Lensphoto 的 45 張為最多。Lensphoto 使用之率定標控制點最多且影像觀測數較多，因此平差解算成果較佳。

雖然 Lensphoto 率定標控制點數量最多，且可使用較多的影像數以提高其相機率定精度，但軟體操作處理上為半自動，需人工點選率定標影像之控制點，隨著觀測數增加亦會造成人力浪費及增加系統處理時間。

拍攝率定標影像時，不同軟體間之影像皆經過相機鏡頭拆裝，而軟體內兩組實驗僅 PhotoModeler 處理之影像拍攝時有經過鏡頭拆裝；也就是拍攝率定標影像 set1、set2 與 set3、set4 及 set5、set6 兩兩影像組間皆經過鏡頭拆裝，其中 set1 與 set2 間亦經過鏡頭拆裝。經過鏡頭拆裝所拍攝之率定標影像對於率定結果之影響，設計一實驗來驗證，拍攝兩組沒有經過鏡頭拆裝之影像 set7 與 set8，拆裝鏡頭後再拍攝率定影像 set9，並以同一軟體進行相機率定處理，此實驗於附錄一進行探討。

第四章 三維模型點雲生成

利用可獲得點雲之近景攝影測量軟體 Lensphoto 進行三維目標物點雲之生成，加上以地面雷射掃描儀取得之點雲資料，用兩個實例探討近景攝影測量之限制。第三個實例為平行多基線與旋轉多基線近景攝影測量之精度分析，及近景攝影測量與地面雷射掃描方式獲取之點雲精度探討。

4.1 研究相關資訊與流程

4.1.1 實驗區資訊

國立交通大學校園內有 13 件楊英風藝術家的雕塑作品，其中以「緣慧潤生」與「水袖」作為本研究之實驗區，探討近景攝影測量與地面雷射掃描儀之三維建模限制。緣慧潤生為 1996 年楊英風先生祝賀交通大學百年校慶所設計之雕塑作品，設置於交通大學浩然圖書館前廣場，主要透過直線、曲面、實圓與虛圓型塑不銹鋼群組雕塑，其鏡面可反射生活萬象，如圖 4-1 為不同角度所拍攝之雕塑群。選擇鏡面雕塑群組之一進行研究，如圖 4-1 之紅框與圖 4-2 所示，其尺寸約為 1.34m×0.36m×1.18m。水袖為 2001 年楊英風先生銅雕山水系列作品之一，以京劇水袖舞動為題，其尺寸約為 3.45m×1.75m×3.30m，如圖 4-3 所示。本研究為進行平行多基線交會攝影與旋轉多基線交會攝影之探討，以校園內之工程一館牆面為實驗區，其牆面尺寸為 20.95m×5.35m，如圖 4-4。



圖 4-1、緣慧潤生鏡面雕塑群組作品



圖 4-2、實驗區之一—緣慧潤生外觀尺寸示意圖



圖 4-3、實驗區之二—水袖外觀尺寸示意圖



圖 4-4、實驗區之三—工程一館外觀尺寸示意圖

4.1.2 研究數據介紹

本研究使用之地面雷射掃描點雲數據有緣慧潤生與水袖，皆為已處理完之資料，緣慧潤生之點雲數據為 2005 年 12 月採用 Riegl LMS-Z420i 地面雷射掃描儀進行掃描，其

共設置 5 個掃描站；水袖之點雲數據為 2009 年 12 月以 Leica HDS4500 雷射掃描儀所獲得，其共設置 4 個掃描站；工程一館之點雲數據為 2010 年 8 月以 Optech LIRIS-3D 雷射掃描儀獲得，共設置 3 個掃描站，相關掃描參數列於表 3-1。

表 4-1、地面雷射掃描儀參數表

雷射掃描儀名稱	Riegl LMS-Z420i	Leica HDS4500	Optech LIRIS-3D
量測距離範圍	2 m ~ 1000 m	1 m ~ 25 m	3 m ~ 1200 m
掃描頻率	11000 Hz	500000 Hz	2500~3500 Hz
測距精度	10 mm	3 mm	7 mm
角度精度	250 μ rad	350 μ rad	80 μ rad
垂直掃描角度範圍	0°~80°	0°~310°	0°~40°
水平掃描角度範圍	0°~360°	0°~360°	0°~40°

4.1.3 研究流程

本研究以非量測性相機 Nikon D80 搭配定焦鏡頭 Nikon AF Nikkor 28mm f/2.8 進行拍攝作業，利用近景攝影測量軟體 Lensphoto 生成目標物點雲三維資料，實驗流程如圖 4-5。選定實驗區為緣慧潤生、水袖及工程一館，分別佈設其控制點與檢核點且以全測站儀量測三維坐標，並進行拍攝作業。將拍攝所得影像匯入軟體 Lensphoto 中，並加載第三章之相機率定結果，進行影像空三匹配，影像控制點量測及光束法平差，進行加密匹配以產生點雲資料。將緣慧潤生及水袖之實驗成果與地面雷射掃描儀之點雲資料，探討近景攝影測量之限制。工程一館之牆面以平行多基線與旋轉多基線交會攝影之實驗成果，於各控制點與檢核點位置之均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 與整體均方根誤差用以進行精度分析，並加入地面雷射掃描之點雲數據比較兩者之精度。

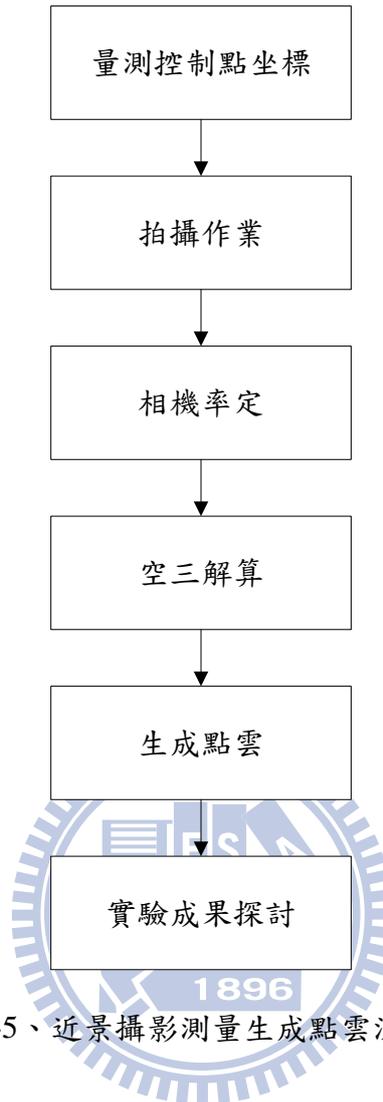


圖 4-5、近景攝影測量生成點雲流程圖

4.2 近景攝影測量點雲生成程序

全測站儀之控制點外業量測三維坐標，並進行拍攝目標物影像後，匯入近景攝影測量軟體 Lensphoto 中操作，其相關作業在下面作介紹。

4.2.1 外業控制點量測與拍攝作業

三個實驗區分別佈設控制點，緣慧潤生與水袖以貼標方式進行佈設，工程一館不貼標以自然物點為控制點。緣慧潤生佈設 24 個控制點與 16 個檢核點，使用之影像有 36 張，其分別為圖 4-6 與圖 4-9 所示；水袖佈設 50 個控制點與 30 個檢核點，使用之影像有 28 張，其分別為圖 4-7 與圖 4-10 所示；工程一館共佈設 5 個控制點與 2 個檢核點，使用之影像以平行多基線攝影有 15 張，旋轉多基線交會攝影有 20 張，其分別為圖 4-8、

圖 4-11 及圖 4-12 所示。圖 4-12 之每列影像為同一攝影站所拍攝，為旋轉拍攝之影像，藍色矩形框為每攝影站同一序號之影像組成之條帶。

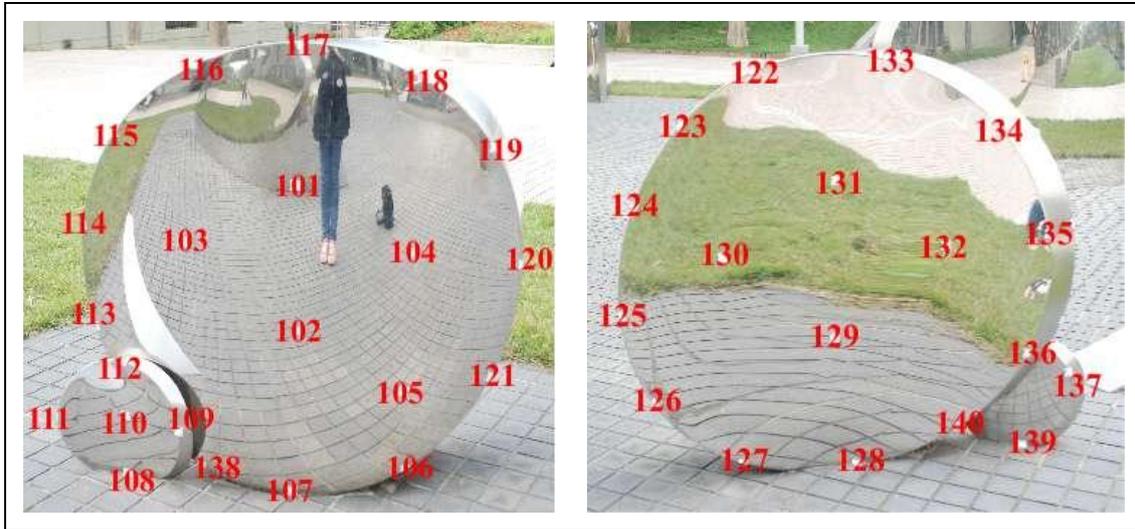


圖 4-6、緣慧潤生之控制點與檢核點示意圖



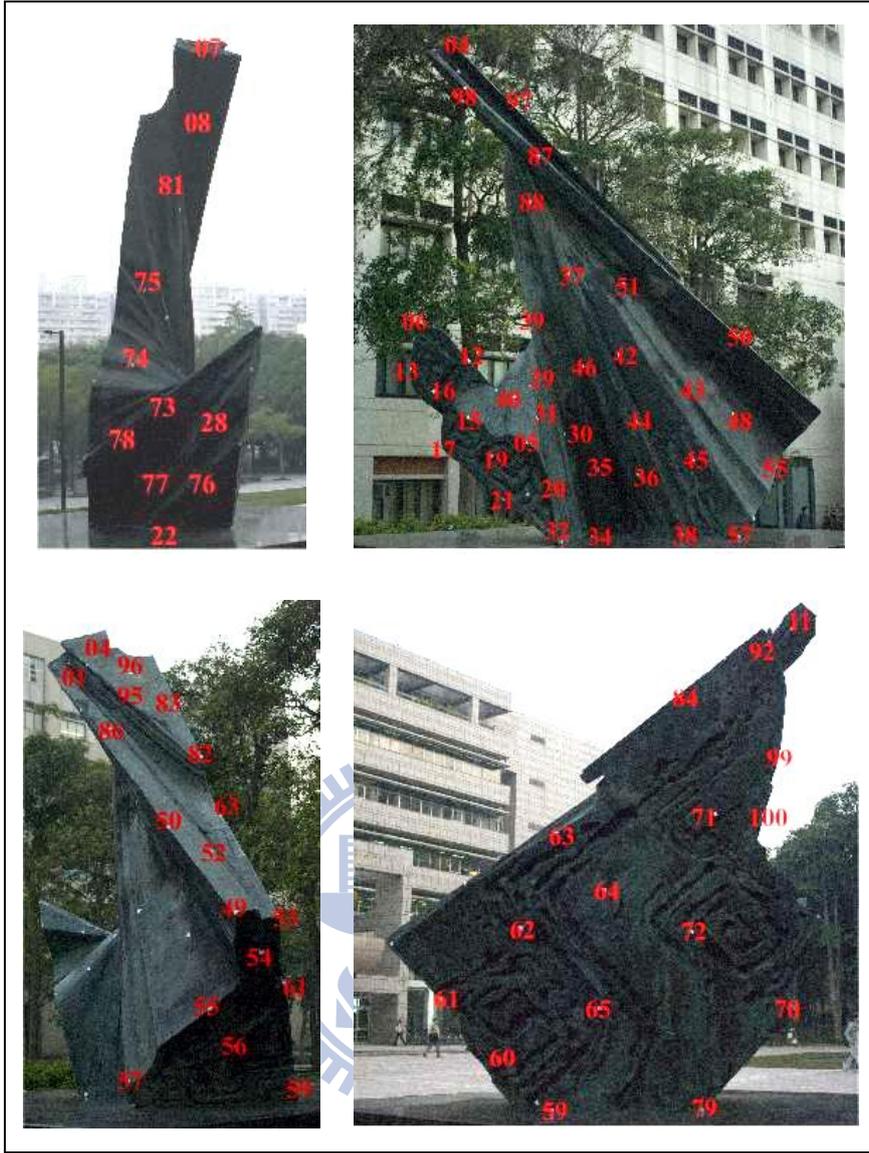


圖 4-7、水袖之控制點與檢核點示意圖



圖 4-8、工程一館之控制點與檢核點示意圖



圖 4-9、拍攝緣慧潤生之影像



圖 4-10、拍攝水袖之影像



圖 4-11、平行多基線拍攝工程一館之影像

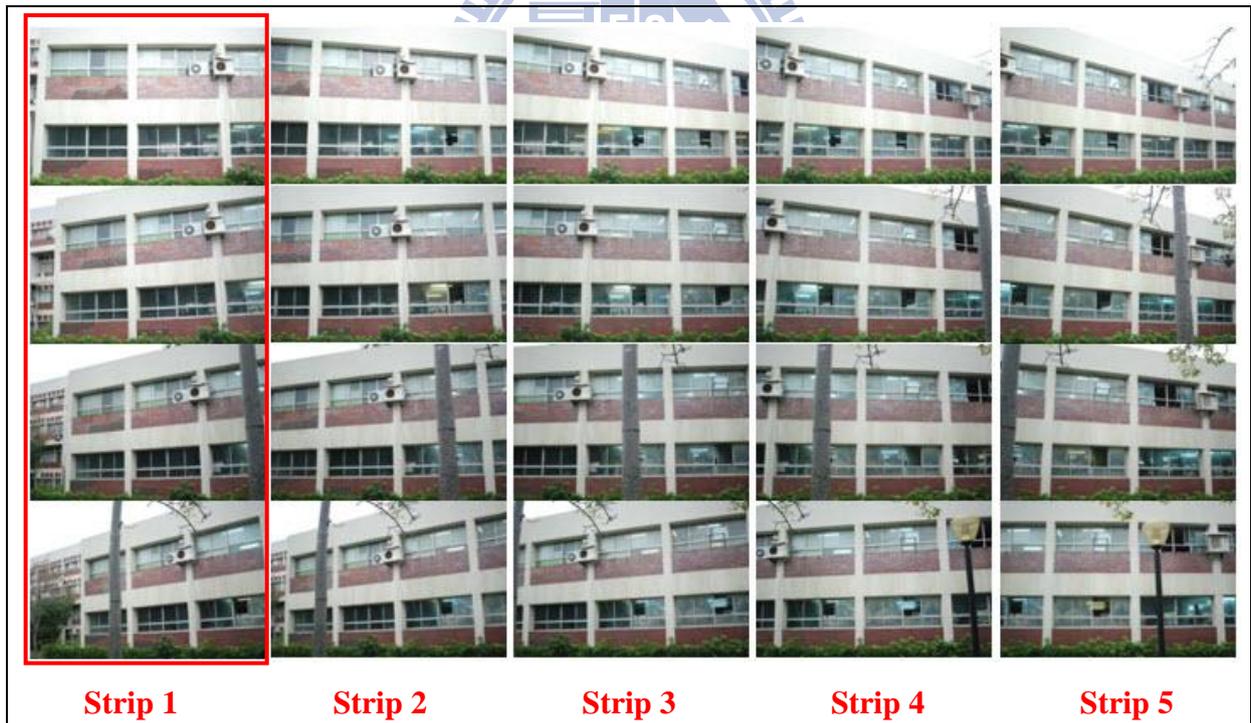


圖 4-12、旋轉多基線拍攝工程一館之影像

4.2.2 載入影像與空三匹配

將影像載入 Lensphoto 中，若為平行基線或環繞目標物拍攝，則將所有影像分為一條帶；若為旋轉多基線攝影目標物，則依各攝影站同序號拍攝之影像分為一條帶，如圖 4-12 為條帶示意圖，以實例三之旋轉多基線攝影為例，有 5 個條帶，每個條帶皆有 4 章影像。圖 4-13 為建立影像條帶及載入每個條帶之影像，並輸入事先完成之相機率定參數檔。

匹配用於尋找立體像對之共軛點，匹配前需人工給定條帶內立體像對及條帶間立體像對之種子點 (Seed point)，目的為給定匹配像對間概略偏移量，確定影像間大致的位置關係，每立體影像對只需一個種子點，如圖 4-14 之操作。視窗左區塊為影像列表，可點選左右影像以添加種子點，點選完後可進行全自動空三匹配，如圖 4-15 之匹配結果，綠色十字標為匹配所得之共軛像點。

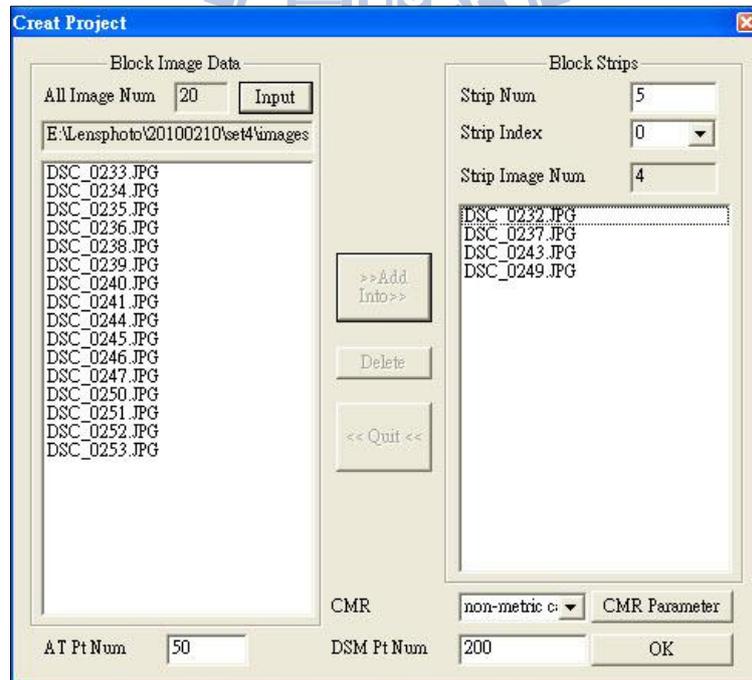


圖 4-13、建立專案之視窗，在此將影像分條帶後續處理

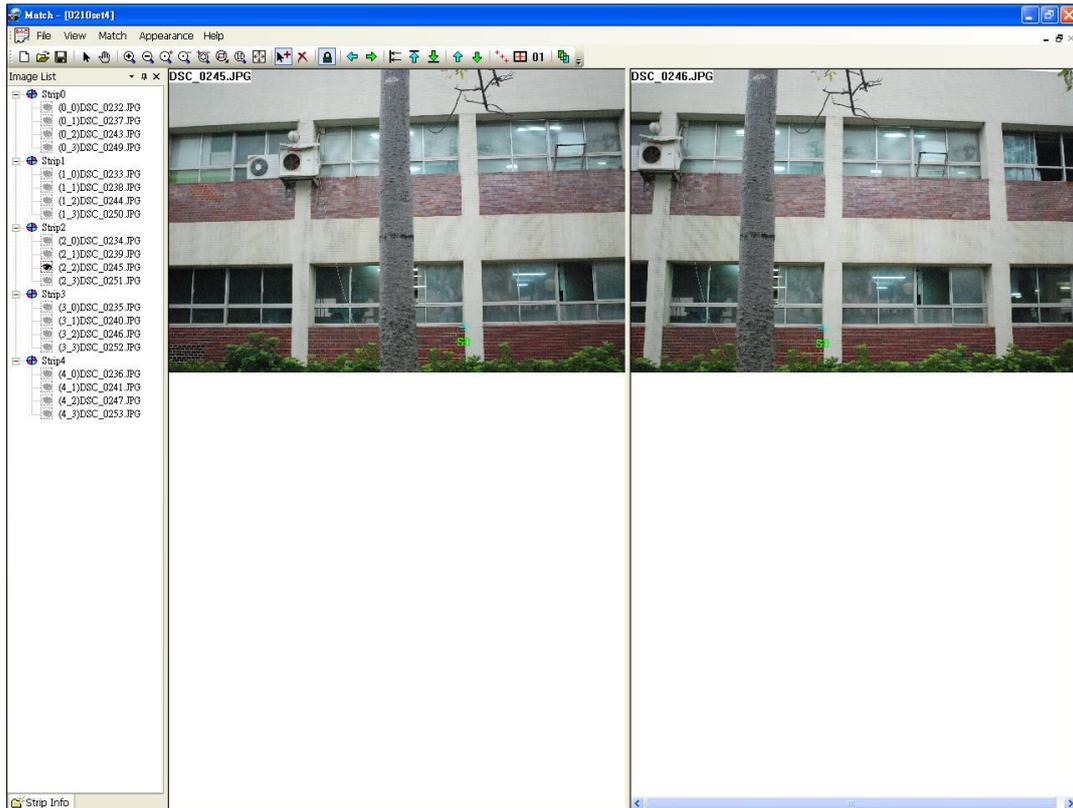


圖 4-14、人工點選種子點操作視窗

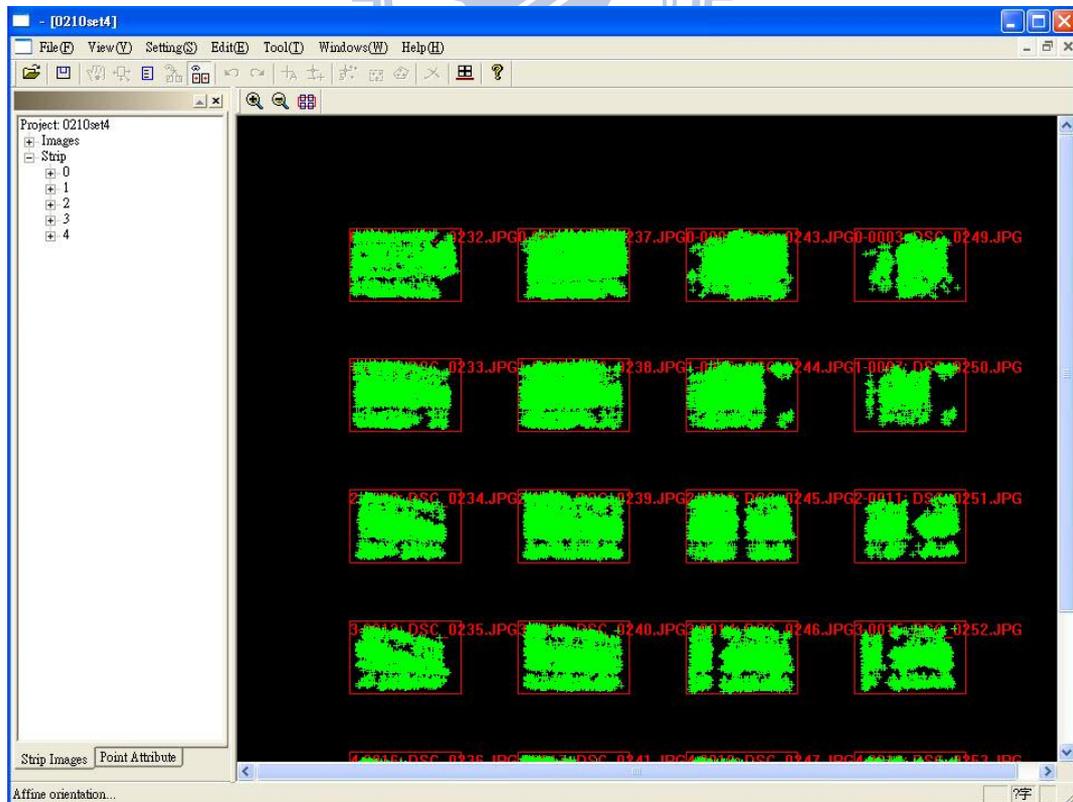


圖 4-15、粗略空三匹配之成果

4.2.3 影像之控制點量測

引入控制點及檢核點位置之三維坐標後，便可進行影像控制點量測，圖 4-16 為其操作視窗，可先匯入一張影像並開啟自動預測功能（紅色框所示），當標定任一個控制點時，自動預測功能會將該點可能出現之影像顯現出來，並標定預測之控制點點位，如圖 4-16 之紅色十字標。點選控制點初步位置後便可進入精確校正模式，如圖 4-17 所示，其放大初步點選控制點位置之影像，可較精確標定其控制點位置，並將其與先前匯入控制點三維坐標之編號作連結。

點選完測區 4 個角區域上之 4 個控制點，便可執行光束法平差，絕對定向成功後可再開啟控制點量測視窗，將預測其餘控制點及檢核點位置，直接進行精密校正模式並再次執行光束法平差。利用光束法區域網平差原理解算測區所有影像之外方位元素及模型點空間坐標，並能進行自檢校。

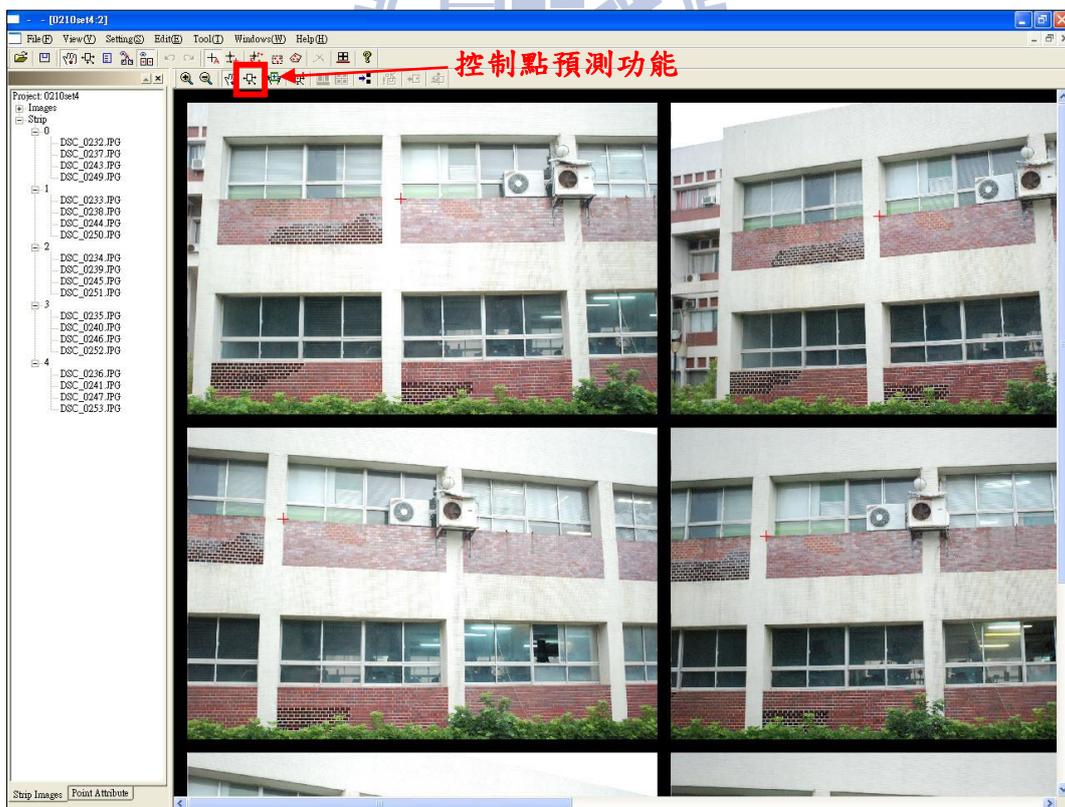


圖 4-16、影像控制點初步量測

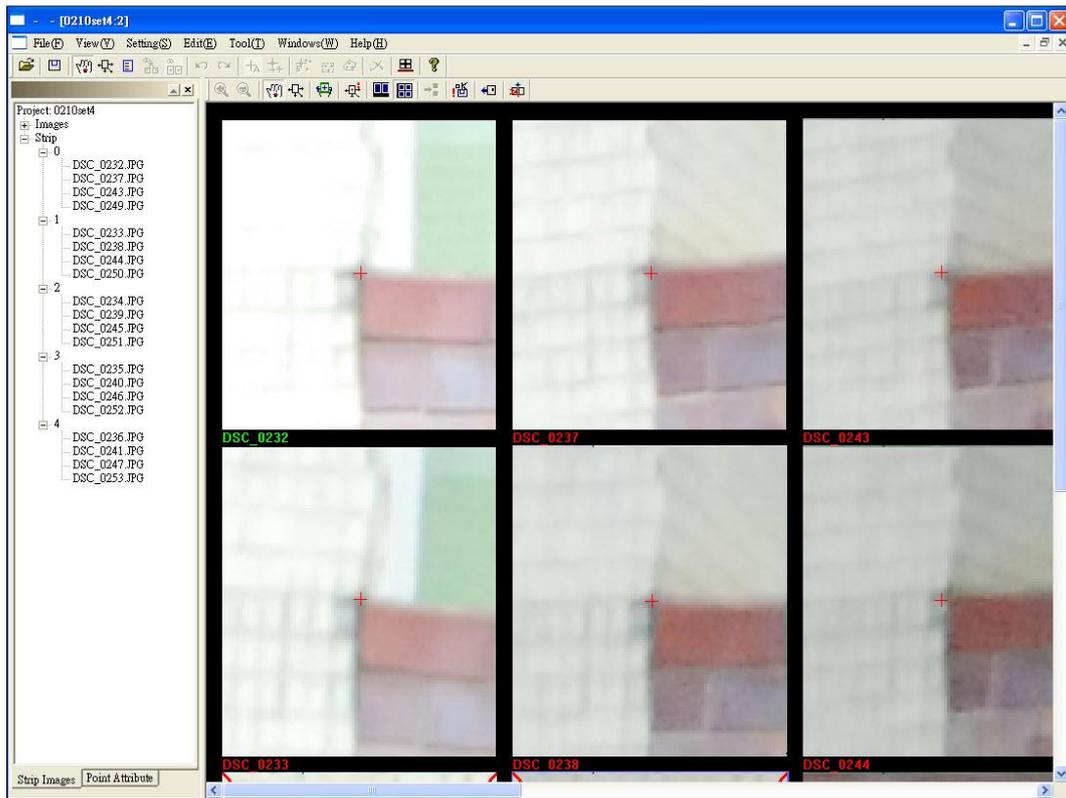
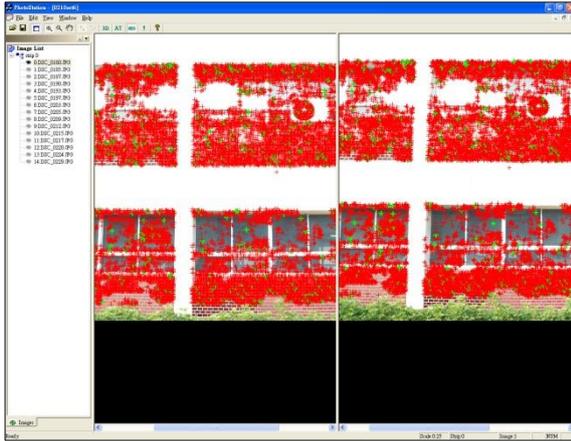


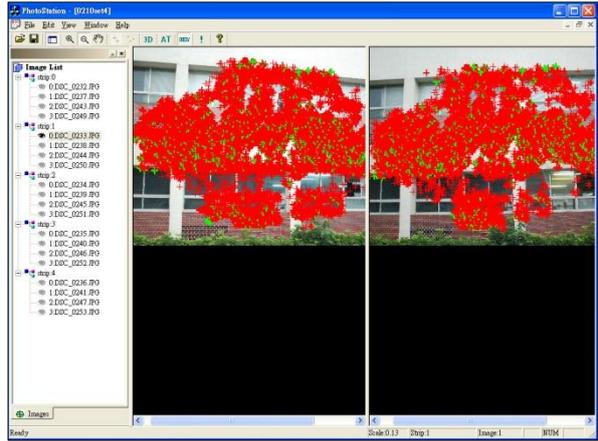
圖 4-17、影像控制點精密校正

4.2.4 生成點雲

先進行全自動影像加密匹配，圖 4-18 為加密匹配之成果展示，兩立體像對之空三匹配成果為綠色十字標，加密匹配之成果為紅色十字標。軟體可選擇只剔除空三結果粗差或密集匹配結果粗差，亦可同時自動剔除空三匹配與加密匹配結果之粗差。匹配粗差剔除後可生成點雲，如圖 4-19 為平行基線攝影所得未經編修之點雲，操作視窗中除了白色點雲外，其可同時展示坐標軸方向，X 軸為紅色，Y 軸為綠色，Z 軸為藍色，每張影像拍攝瞬間之位置與方位以黃色矩形框示意。



(a) 平行多基線攝影匹配成果



(b) 旋轉多基線交會攝影匹配成果

圖 4-18、經空三匹配與加密匹配之成果

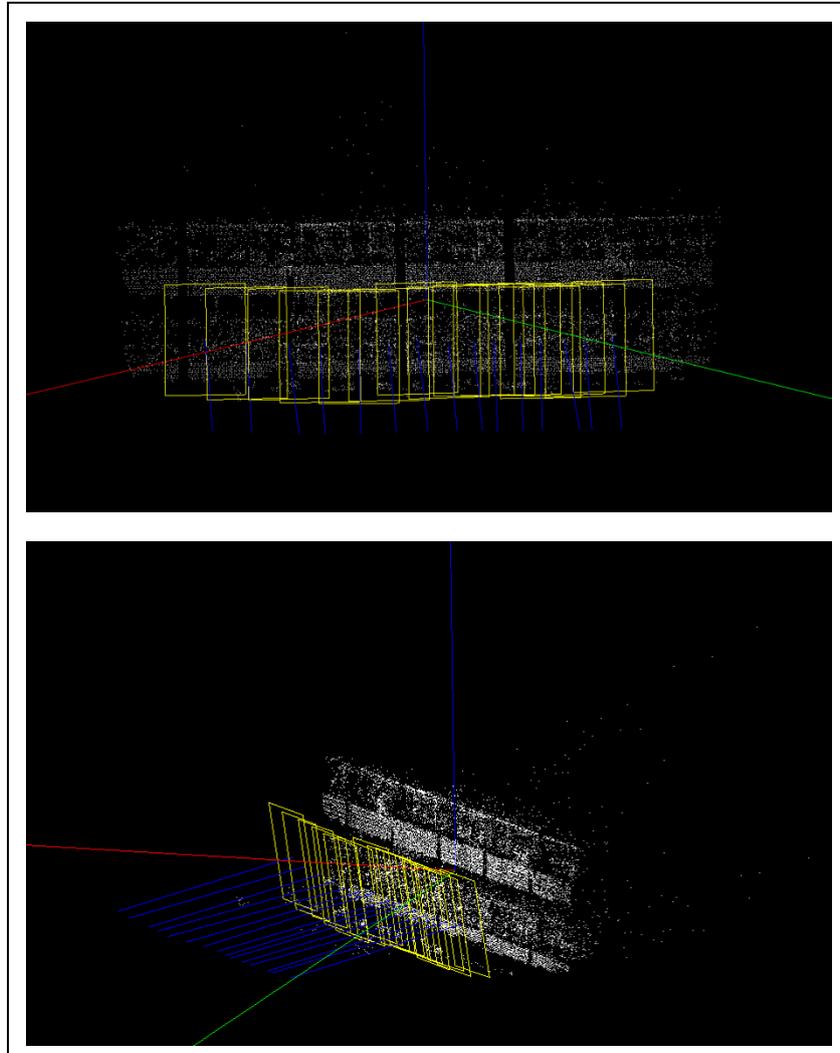


圖 4-19、未經編修之點雲展示

4.3 實驗成果與分析

近景攝影測量軟體 Lensphoto 可生成三維目標物之點雲資料，以緣慧潤生、水袖及工程一館三個實例分別探討近景攝影測量之問題。緣慧潤生及水袖皆為雕塑作品，以目標物為中心作環繞攝影，因此於本節中加入影像於 Photosynth 展示之結果及地面雷射掃描儀獲取之點雲，進行探討近景攝影測量軟體之限制。

Photosynth 是由 Microsoft Live Labs 合力研發之技術，Photo 為相片，Synth 即 Synthesis，有結合的意思；Photosynth 依影像相似性將許多影像結合，重組影像拍攝之三維空間。

4.3.1 實例一—鏡面雕塑

以鏡面雕塑緣慧潤生為實驗區，利用近景攝影測量方式欲重建鏡面雕塑之三維模型，拍攝鏡面雕塑之影像因鏡面反射作用，原為立體像對影像中之鏡面隨著拍攝位置不同而反映不同景物，導致立體像對匹配失敗。圖 4-30 之兩張立體像對，曲面鏡面雕塑品反射出不同畫面，尤其反射出之地面網格磁磚有明顯不同之變形，因此影像匹配遭致失敗。將所拍攝之 33 張影像以 photosynth 展示，如圖 4-31(a)、(b)所示，雖用 100%的照片來建立三維空間 (synthy 100%)，但程式結合影像之效果仍不彰。

地面雷射掃描儀發射出雷射光後，遇到不銹鋼材質之鏡面雕塑其反射訊號強，造成接近全反射之效果而難以接收到訊號。雖地面雷射掃描儀難以對鏡面目標物進行掃描作業，但其仍可成功得到點雲資料，如圖 4-32 為地面雷射掃描儀 Reigl LMS-Z420i 在五個掃描站所獲取之緣慧潤生點雲資料，以 RealWorks Viewer 展示。圖 4-33 為圖 4-32 放大後之俯視圖，其皆為未編修前點雲資料。經人工編修後，可獲得較完整之三維模型點雲資料，如圖 4-34 所示。圖 4-35(a)為編修後之全景三維點雲，(b)為數貼上紋理之三維模型。

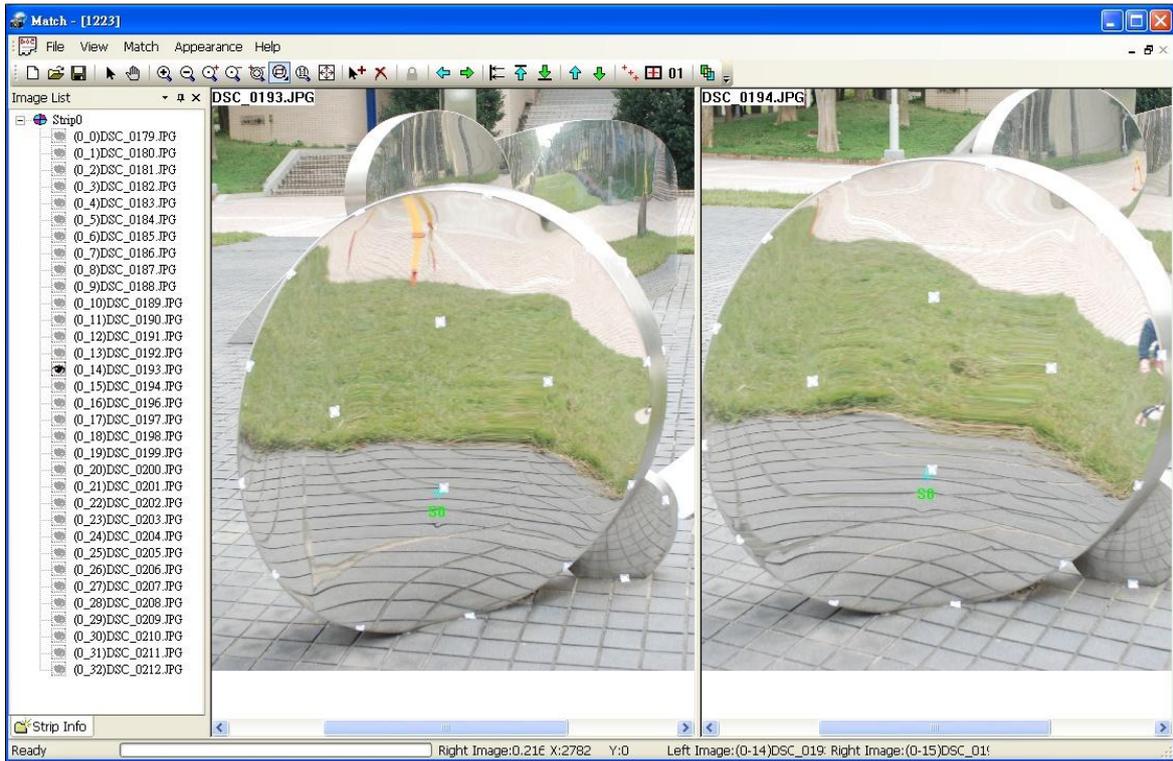


圖 4-20、鏡面雕塑之立體像對



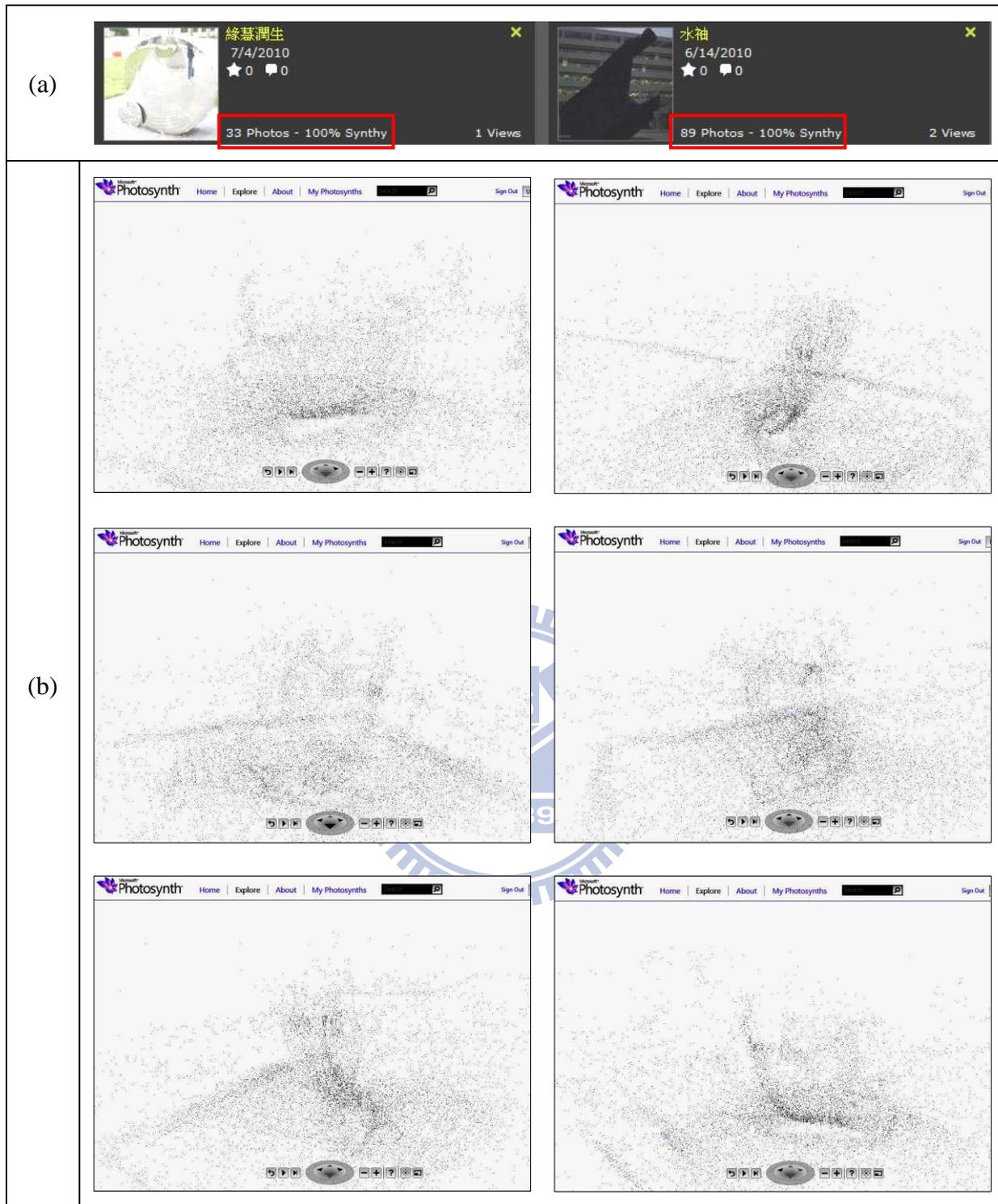


圖 4-21、以 Photosynth 展示綠慧潤生點雲，(a)紅框表示 100% 使用全部影像數，(b)為綠慧潤生之點雲示意圖

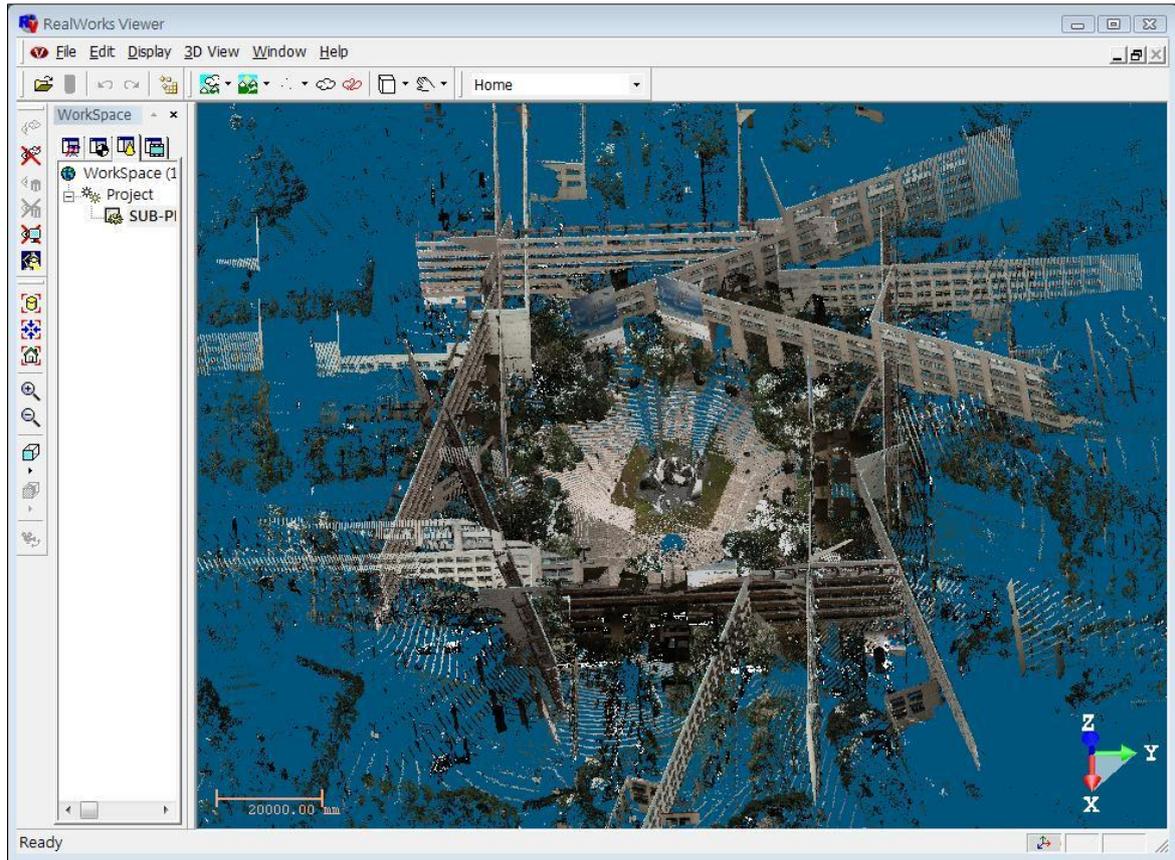


圖 4-22、五個掃描站所生成之緣慧潤生全景點雲模型

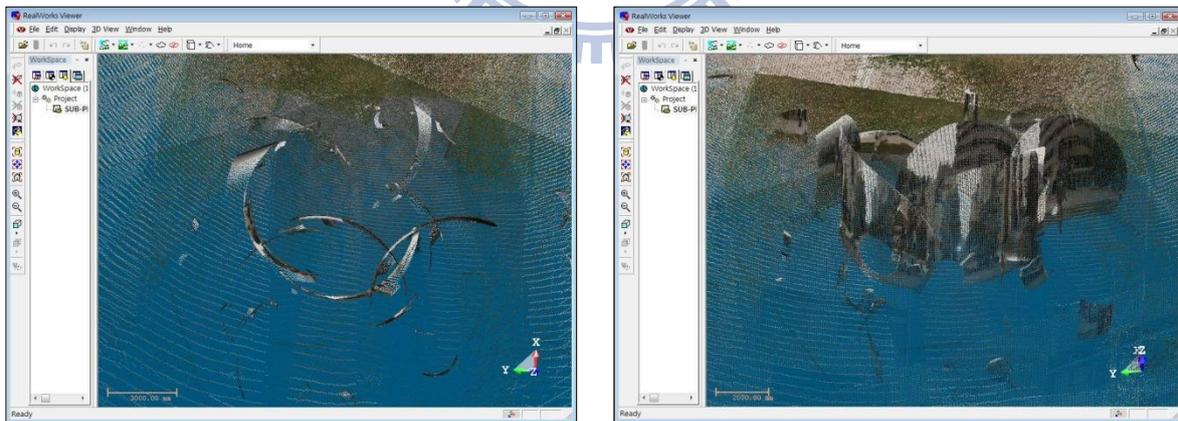


圖 4-23、五個掃描站生成之緣慧潤生點雲模型

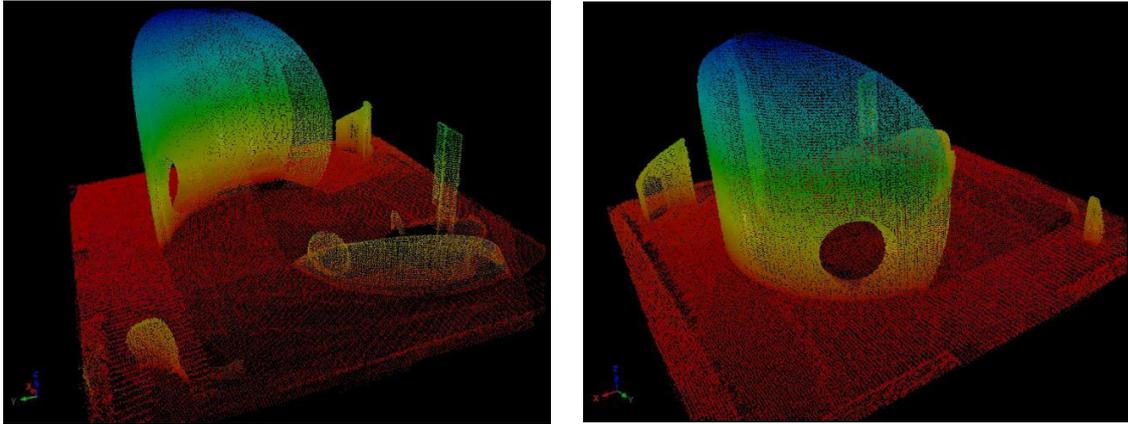


圖 4-24、經人工邊修後之緣慧潤生三維點雲資料



(a)三維點雲資料之全景

(b)紋理敷貼後之三維模型

圖 4-25、緣慧潤生邊修後之三維模型

4.3.2 實例二—應用近景攝影測量生成目標物點雲

以水袖為目標物，由拍攝影像中挑出 28 張影像（圖 4-10 所示）進行點雲生成，但因水袖為不規則雕塑品，拍攝時盡可能使其涵蓋像幅範圍為最大，但仍難以達到 Lensphoto 軟體處理影像之條件：目標物須盡可能佔滿整個影像像幅，至少涵蓋影像畫面之 80%。因此 28 張影像進行空三匹配時，僅能匹配出少許共軛點，如圖 4-26 所示。進行空三匹配時，雖然目標物上有匹配到共軛點，但不密集且雕塑品凹陷處均無被匹配出來（如圖 4-26 之藍框所示），甚至匹配出背景景觀之共軛點多於目標物，使匹配成果不佳，無法生成點雲。因此選擇水袖其中一面作為再次實驗之目標物，挑選 8 張影像及

7 個控制點，分別如圖 4-27 及圖 4-28 所示。

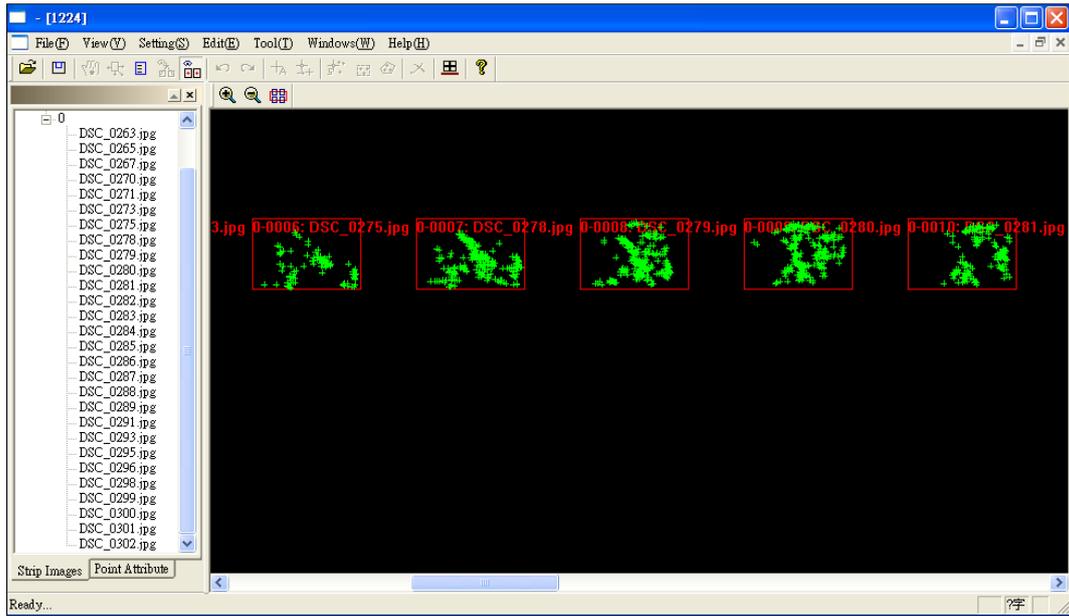


圖 4-26、水袖之環繞影像空三匹配成果

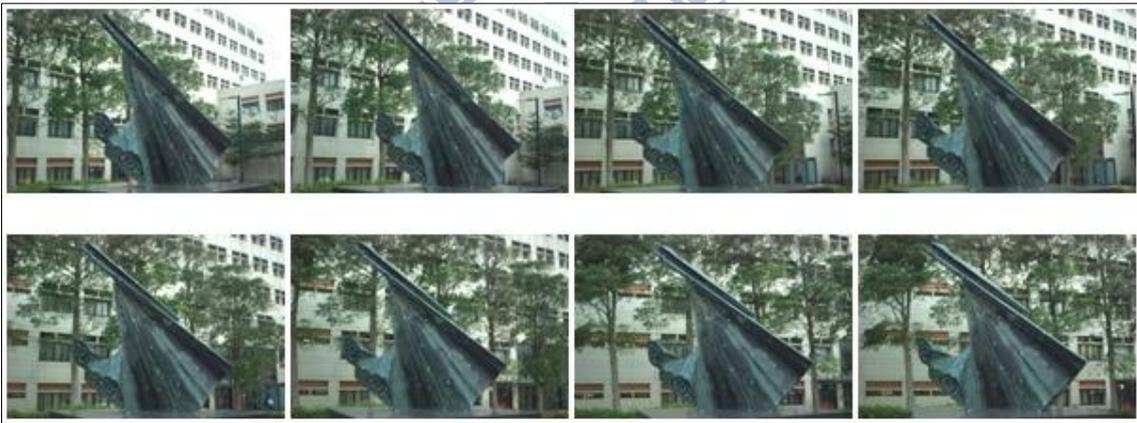


圖 4-27、再次實驗所使用之水袖影像

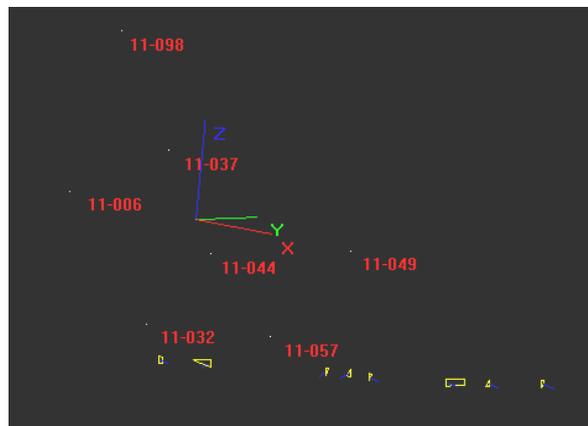


圖 4-28、使用之控制點及其與影像位置之關係

因目標物涵蓋影像像幅未達門檻值，匹配條件不佳，其點雲成果如圖 4-29 所示，匹配到許多背景景觀之共軛點，且甚至多過於目標物。將環繞攝影之水袖影像以 Photosynth 展示點雲，如圖 4-30 所示。在 Photosynth 展示中，亦可發現背景景觀之點雲，但與目標物之點雲相比卻顯得稀疏。圖 4-31 為地面雷射掃描儀 Leica HDS4500 對水袖掃描所得到之點雲資料，呈現出水袖表面之紋理。

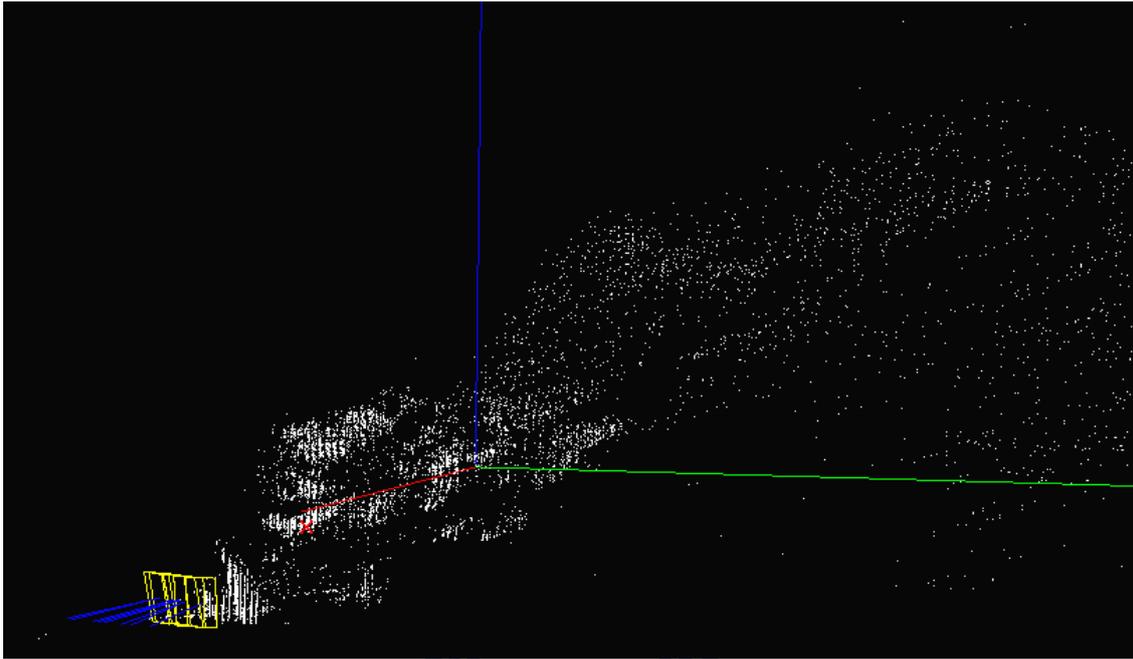


圖 4-29、水袖之點雲展示

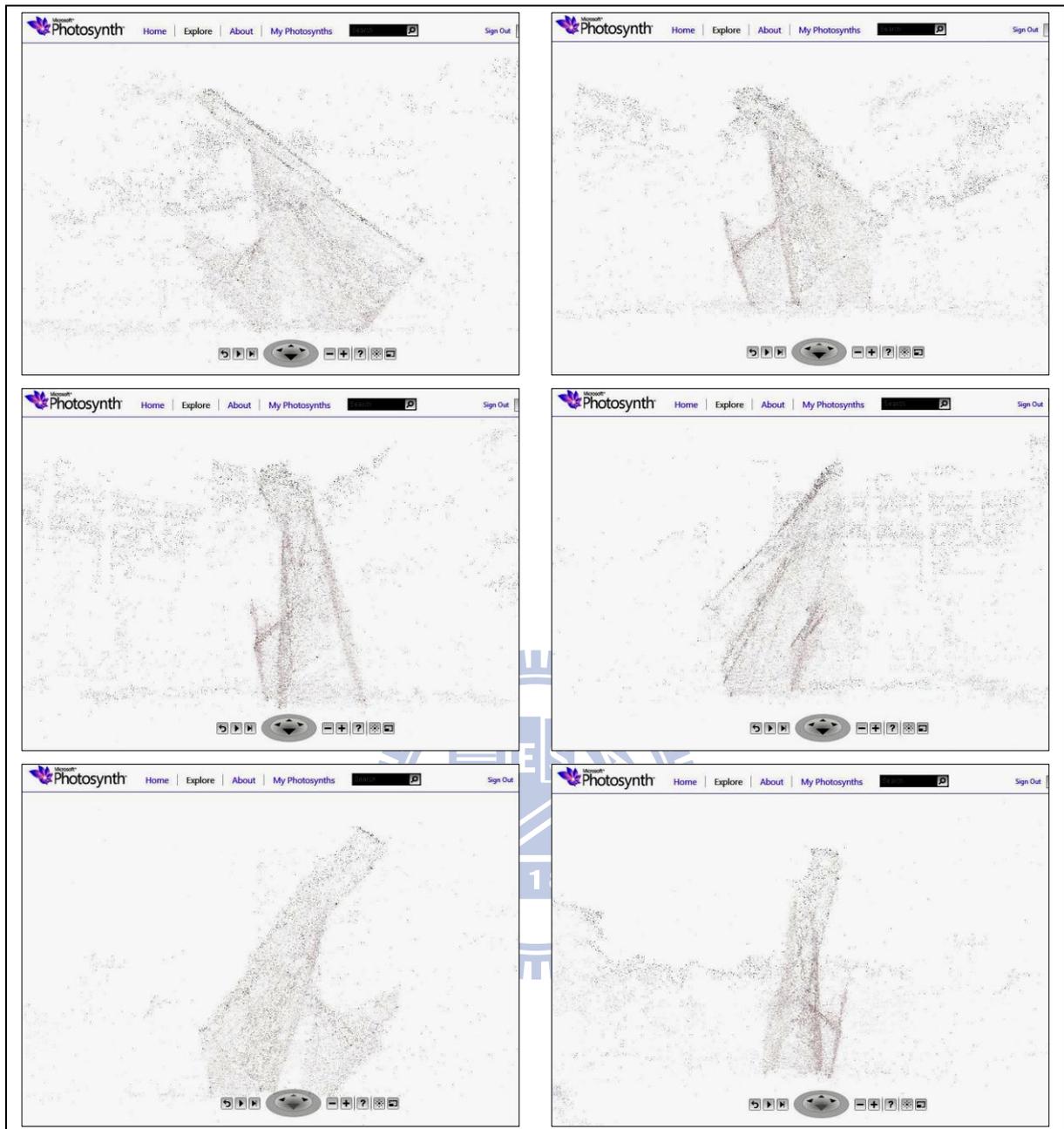


圖 4-30、以 Photosynth 展示水袖之點雲

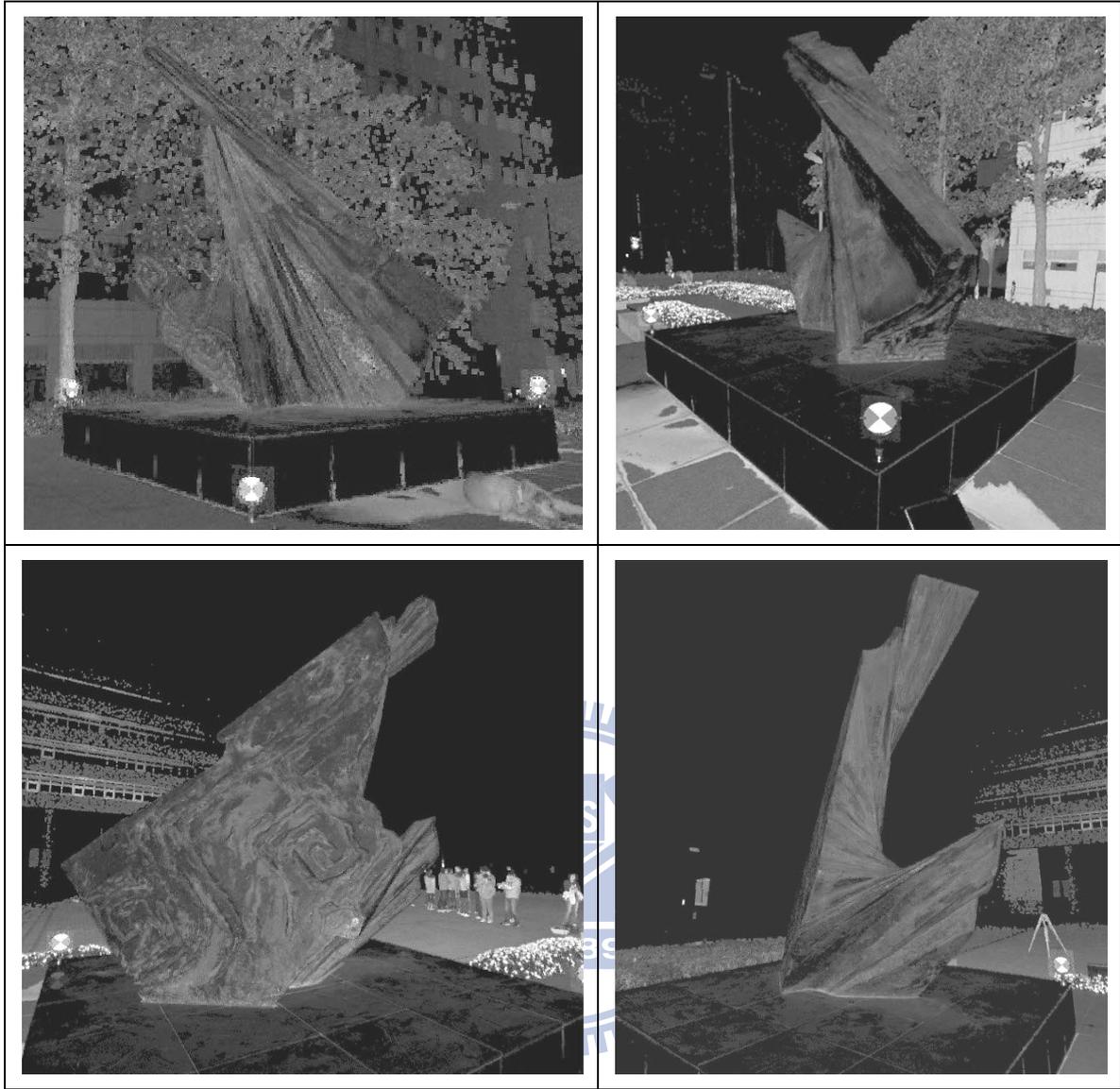


圖 4-31、以地面雷射掃描儀獲取之水袖點雲

4.3.3 實例三—平行與旋轉多基線攝影測量

以工程一館之牆面分別進行平行多基線與旋轉多基線交會攝影，並以 Lensphoto 軟體生成點雲，其成果以圖 4-32 展示平行多基線攝影之點雲正視與俯視圖，圖 4-33 展示旋轉多基線交會攝影之點雲正視與俯視圖。其黃色方框為使用影像所在位置及其與目標物之方位關係，由俯視圖可顯而易見攝影光軸在平行基線攝影及旋轉多基線攝影之安排。平行多基線攝影所生成之點雲分佈較均勻，旋轉多基線交會攝影所生成之點雲分佈較集中。

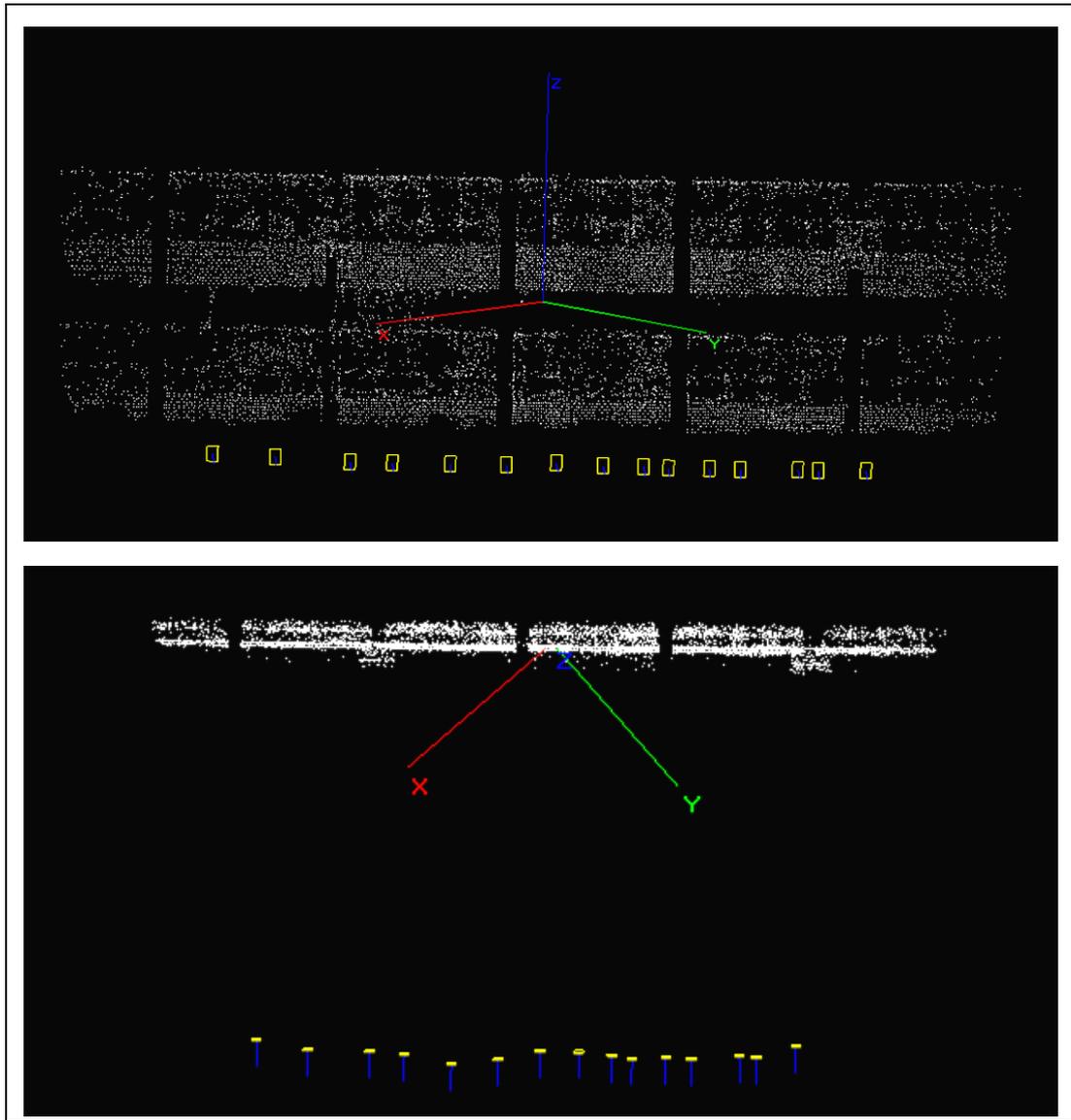


圖 4-32、平行多基線攝影之點雲正視與俯視圖

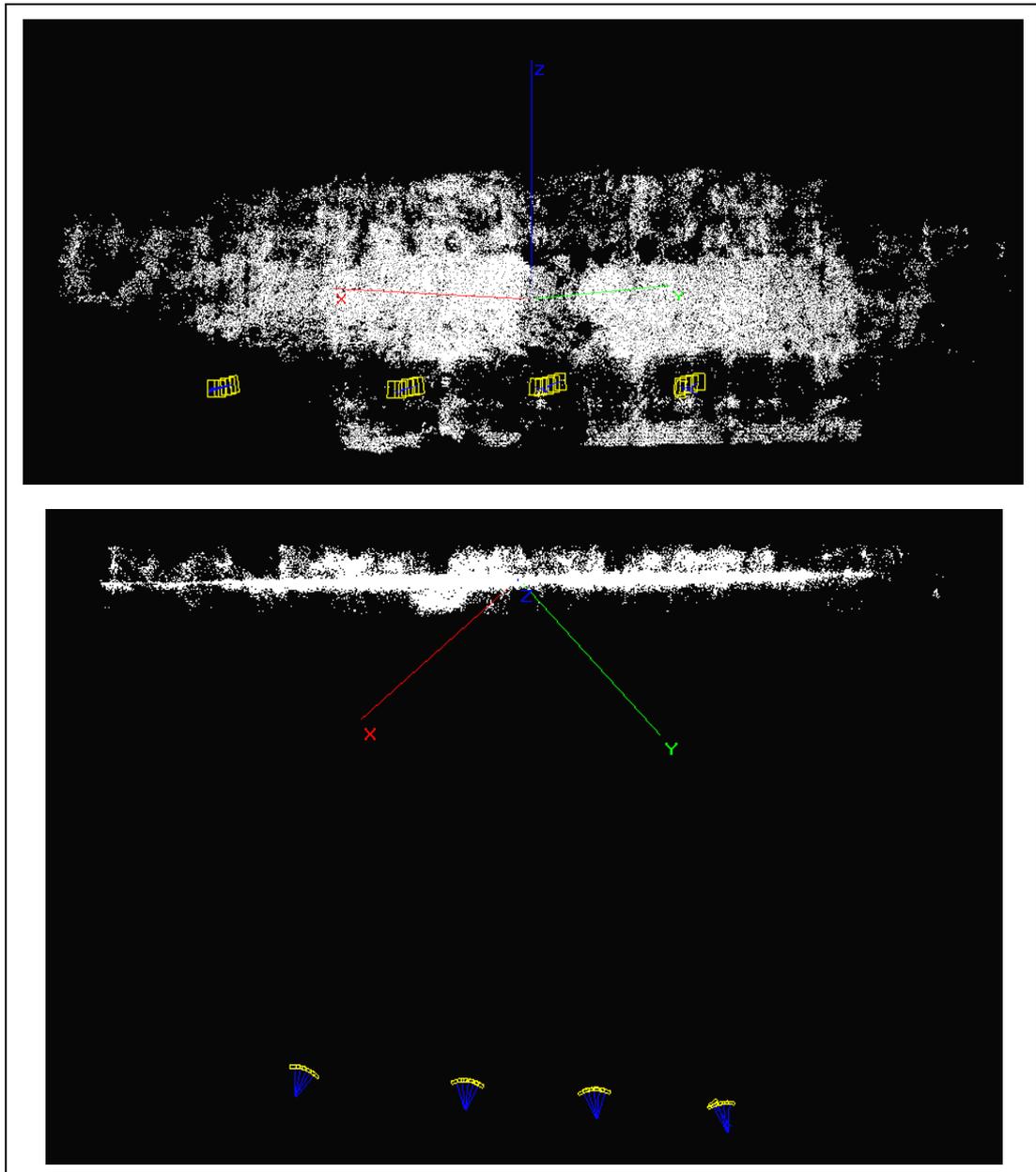


圖 4-33、旋轉多基線交會攝影之點雲正視與俯視圖

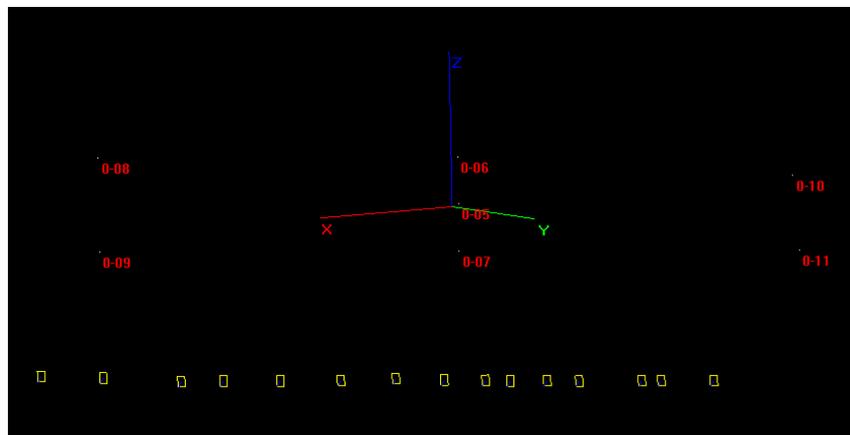


圖 4-34、控制點及檢核點之位置關係

控制點及檢核點分布狀況及其與影像之空間關係如圖 4-34 所示，測區 4 個角落及中心之控制點為 0-08、0-09、0-10、0-11 及 0-05，檢核點為 0-06 及 0-07。表 4-2 為平行多基線與旋轉多基線交會攝影之控制點精度，表 4-3 為兩種攝影方法之檢核點精度。平行多基線攝影在兩控制點 0-08、0-11 及檢核點 0-06、0-07 之解算精度較差，皆超過 1cm 以上；而旋轉多基線交會攝影在控制點 0-11 及檢核點 0-06 之解算精度較差，亦已超過超過 1cm 以上，但其錯誤之控制點及檢核點較平行基線攝影少，且其它控制點（0-05、0-08、0-09 及 0-10）精度皆較平行多基線攝影之解算精度高。兩者皆有解算精度較差之控制點 0-11 與檢核點 0-06，但旋轉多基線交會攝影之平差解算精度仍舊高於平行多基線攝影。

控制點精度，軟體自動剔除誤差太大之控制點才進行平差解算，因此平行多基線攝影剔除 0-08 及 0-11 兩控制點，所得 RMSE X 為 3.3mm，RMSE Y 為 5.7mm，RMSE Z 為 0.7mm，其平面精度較高程精度差；旋轉多基線交會攝影剔除控制點 0-11 解算得 RMSE X 為 0.3mm，RMSE Y 為 0.9mm，RMSE Z 為 1.3mm，平面精度較高程精度佳，旋轉多基線交會攝影方式之平面精度優於平行多基線攝影方式。控制點解算成果之整體精度，旋轉多基線交會攝影之 RMSE 為 1.6mm，平行多基線攝影之 RMSE 為 6.6mm，則旋轉多基線攝影方式之控制點精度高於平行多基線攝影方式；檢核點解算成果之整體精度，旋轉多基線交會攝影之 RMSE 為 42.5mm，平行多基線攝影之 RMSE 為 67.8mm，因此旋轉多基線攝影方式之檢核點精度亦高於平行多基線攝影方式。

表 4-2、平行與旋轉多基線攝影之控制點精度

差值(m)	平行多基線攝影			旋轉多基線交會攝影		
	X	Y	Z	X	Y	Z
控制點編號						
0-05	-0.0007	-0.0013	0.0006	-0.0004	-0.0000	-0.0004
0-08	-0.0413	-0.0441	0.0021	-0.0002	0.0014	-0.0019
0-09	0.0053	0.0096	-0.0010	0.0003	-0.0009	0.0007
0-10	0.0019	0.0022	-0.0005	0.0002	0.0008	0.0015
0-11	0.0457	0.0042	-0.0038	0.0260	0.0041	0.0017
RMSE (X,Y,Z)	0.0033	0.0057	0.0007	0.0003	0.0009	0.0013
Total RMSE	0.0066			0.0016		

表 4-3、平行與旋轉多基線攝影之檢核點精度

差值(m)	平行多基線攝影			旋轉多基線攝影		
	X	Y	Z	X	Y	Z
檢核點編號						
0-06	-0.0573	-0.0640	-0.0127	-0.0355	-0.0450	-0.0160
0-07	0.0207	0.0337	-0.0083	-0.0052	0.0054	-0.0030
RMSE (X,Y,Z)	0.0431	0.0511	0.0107	0.0254	0.0320	0.0115
Total RMSE	0.0678			0.0425		

平行多基線攝影使 15 張影像，15 個攝影站，影像重疊率約 80%；旋轉多基線交會攝影使用 20 張影像，4 個攝影站，立體像對影像重疊率約 60% 以上，在影像量測控制點時，兩者皆使用相同物空間坐標之控制點與檢核點，但旋轉多基線交會攝影控制點與檢核點解算精度較高之因，為攝影方式之不同使涵蓋控制點之影像數量不同，如表 4-4 所示。旋轉多基線交會攝影方式，可使測區邊角 4 個控制點皆出現於每攝影站之第一張與最後一張影像上，因此其涵蓋控制點之影像數至少與攝影站數相同；包含測區內部控制點之影像數大於等於攝影站數。測區內控制點為 0-05，檢核點為 0-06 及 0-07，旋轉多基線交會攝影方式使涵蓋之影像數分別為 16 張、13 張及 16 張。

表 4-4、兩種攝影方法涵蓋控制點之影像數

檢核點與控制點 編號	平行多基線攝影涵蓋 之影像數	旋轉多基線交會攝 影涵蓋之影像數
0-06	4	13
0-07	8	16
0-05	7	16
0-08	3	4
0-09	3	4
0-10	5	4
0-11	5	4

根據所拍攝之目標物必須盡可能充滿整幅影像之條件下(約至少佔滿像幅之 80% 以上)，拍攝方式取決於目標物之距離及其拍攝位置地形複雜度。拍攝影像時，旋轉多基線攝影方式適用於遠距離拍攝作業及拍攝位置地形複雜，因近距離拍攝易使測區之邊緣影像變形過大，造成影像量測及平差解算條件不佳，所以較適合遠距離拍攝；因其攝影基線長約為攝影距離之 1/10，而總基線長為攝影距離之 1/4~1/2，推算攝影站數量為 3~5 站，相較於平行多基線攝影方式之多攝影站拍攝，若拍攝位置地形複雜，則適合以旋轉多基線交會攝影方式取得影像。換言之，使用平行多基線攝影方式之時機，為近距離拍攝目標物及拍攝位置條件良好。

4.3.4 近景攝影測量與地面雷射掃描精度比較

利用地面雷射掃描儀 Optech LIRIS-3D 掃描工程一館相同牆面，此實驗區掃描作業以 3 個掃描站完成，後續點雲數據之處理以 PolyWorks 軟體進行。將 3 個掃描站之各自儀器坐標系統經轉換為同一儀器坐標系統，並將其點雲模型拼接在一起，為後續與近景攝影測量精度之比較，須將光達點雲經坐標轉換為近景攝影測量三維模型坐標系統。圖 4-35、圖 4-36 及圖 4-37 為以 RealWorks Viewer 展示光達點雲模型之不同視角圖，圖 4-38 為光達點雲模型之局部放大圖，由圖 4-35、圖 4-36、圖 4-37 及圖 4-38 中密度高且分布均勻之點雲，可應用於建構較完善之三維模型。

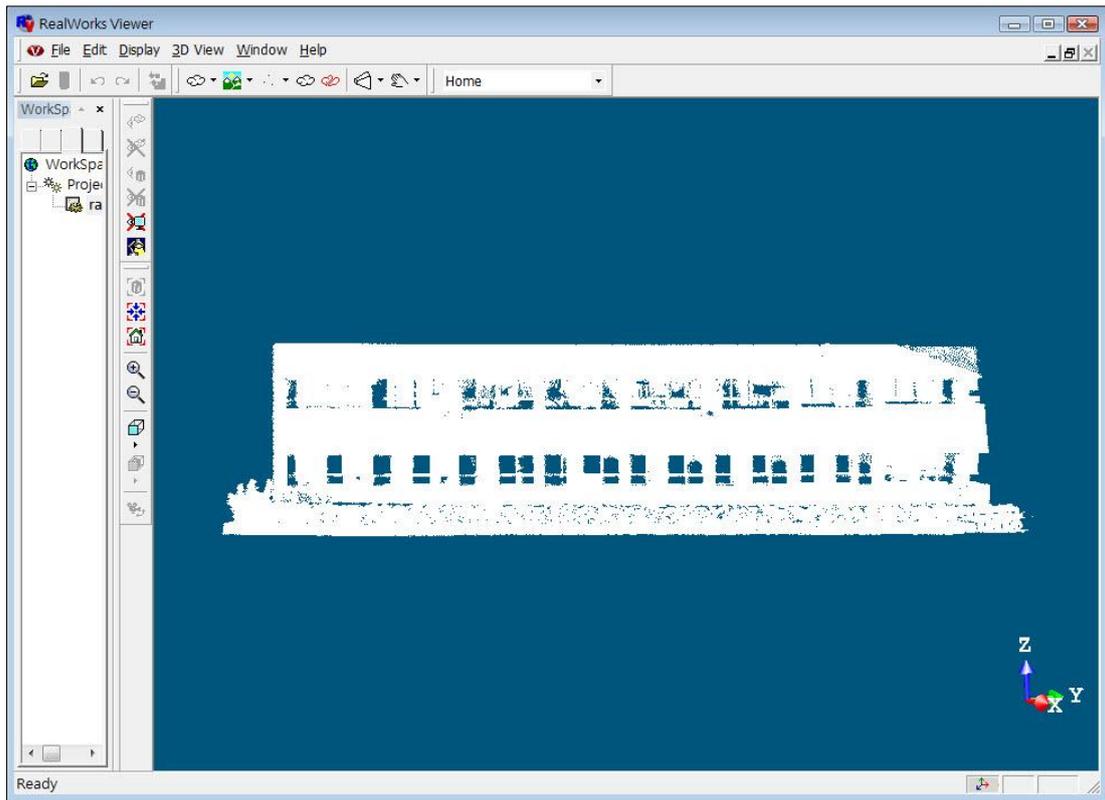


圖 4-35、工程一館之光達點雲模型（正視圖）

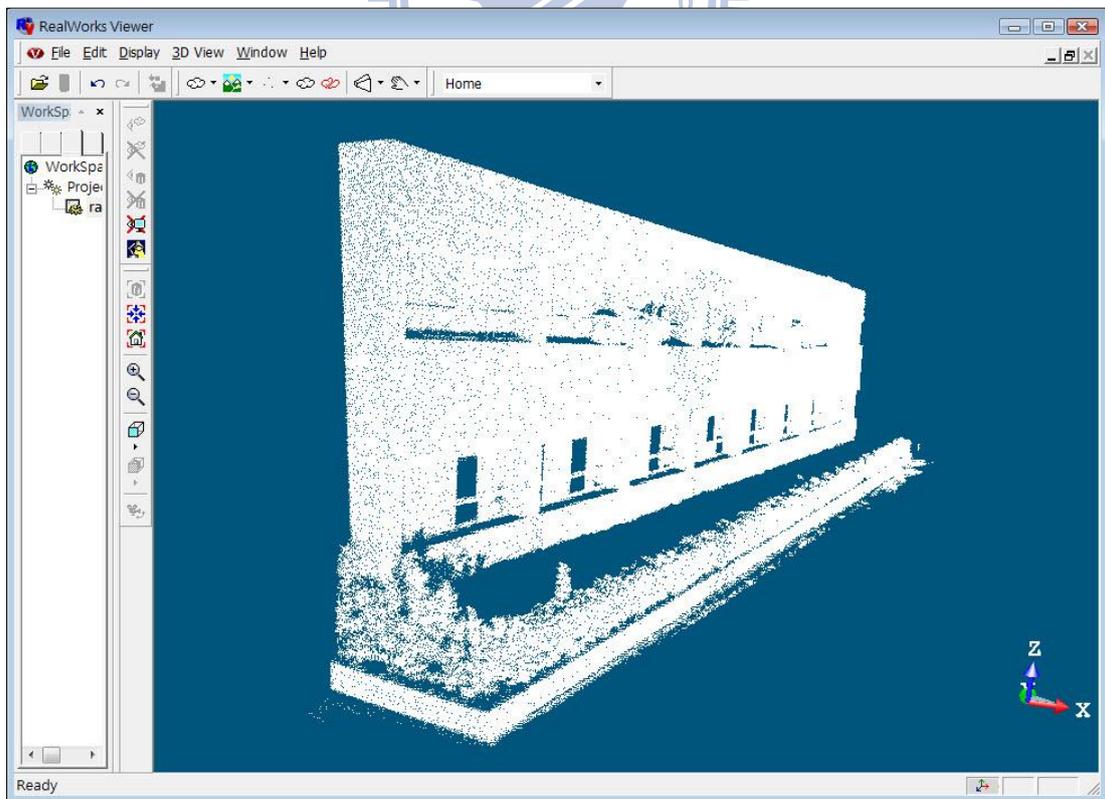


圖 4-36、工程一館之光達點雲模型（斜視圖）

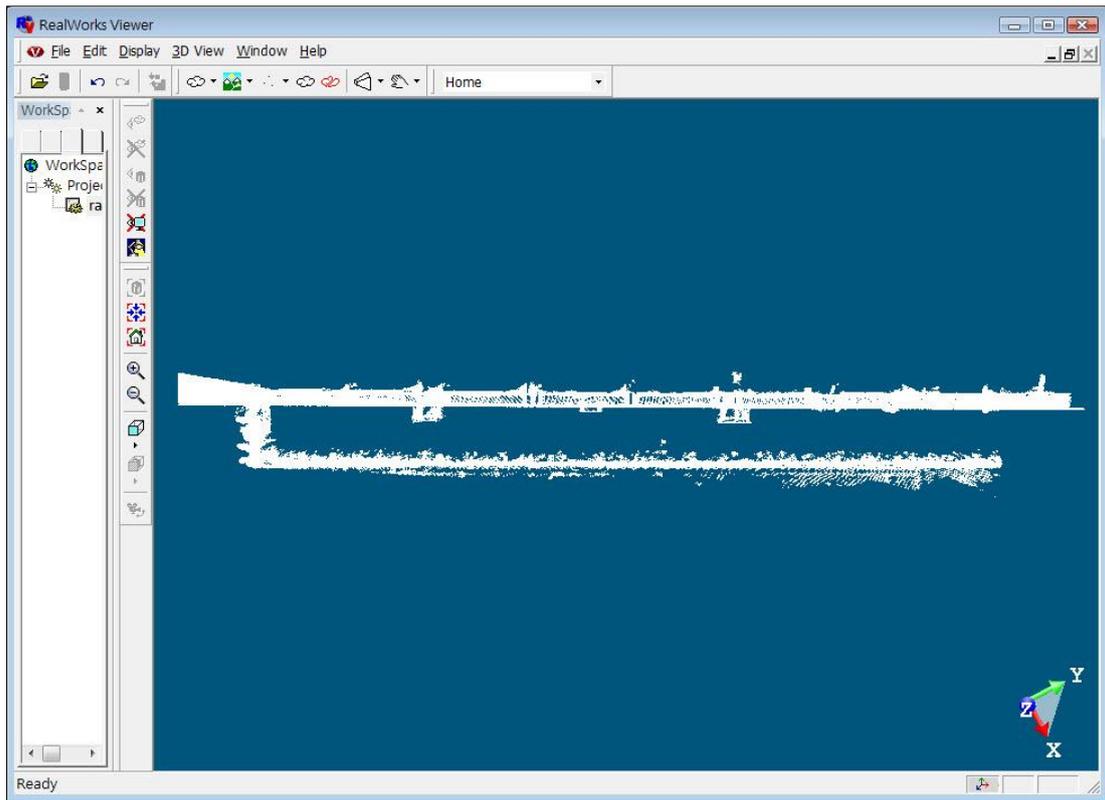


圖 4-37、工程一館之光達點雲模型（俯視圖）

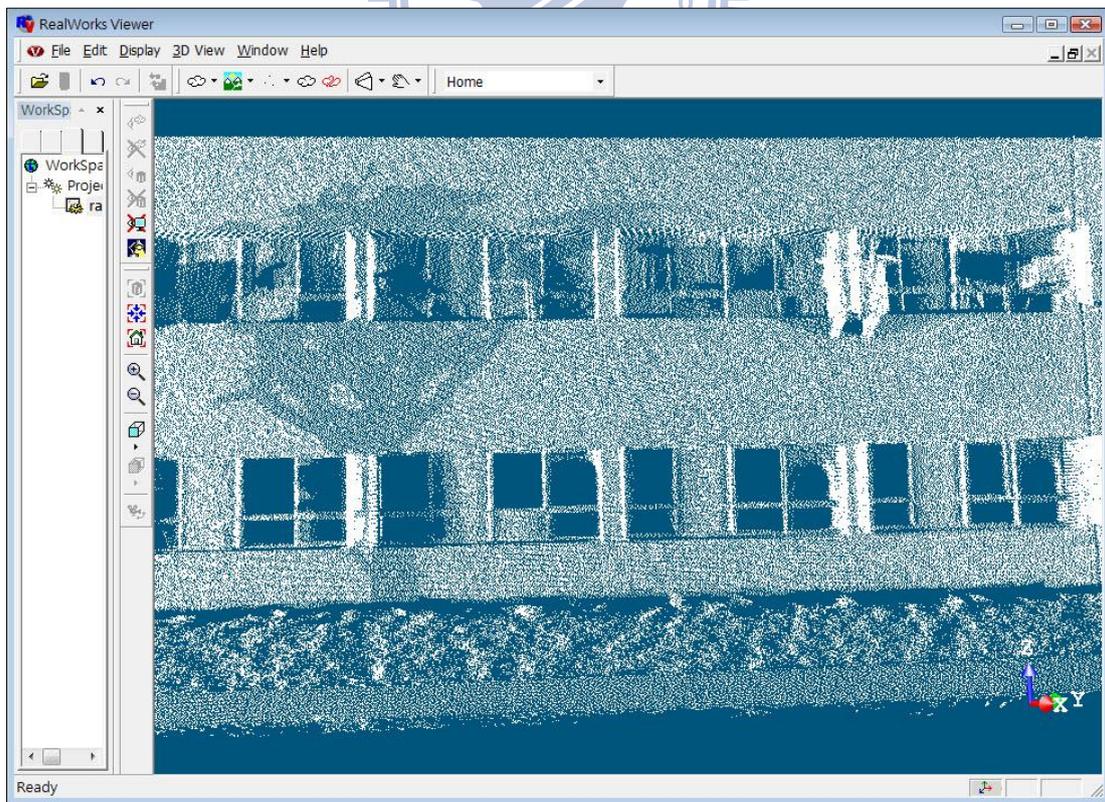


圖 4-38、工程一館之光達點雲模型（局部放大圖）

欲比較近景攝影測量及地面雷射掃描之精度，地面雷射掃描之精度評估，選擇同於 4.3.3 小節之近景攝影測量控制點及檢核點來進行，並將前述近景攝影測量之精度與地面雷射掃描精度列表，表 4-5 為控制點精度，表 4-6 為檢核點精度。已知 Lensphoto 在進行空三解算時，便自動將誤差較大之控制點剔除不予參與平差解算中，因此其控制點精度固然較高，如表 4-5 所示近景攝影測量精度可達到公分級以下。控制點之整體精度，近景攝影測量（旋轉多基線交會攝影）之 RMSE 為 1.6mm，地面雷射掃描之 RMSE 為 37.6mm，因此近景攝影測量控制點精度略高於地面雷射掃描。檢核點之整體精度，如表 4-5 所示，近景攝影測量（旋轉多基線交會攝影）之 RMSE 為 42.5mm，地面雷射掃描之 RMSE 為 38.2mm，則近景攝影測量控制點精度略低於地面雷射掃描。但因本研究應近景攝影測量技術而使用最少控制點及檢核點以達到最大效益，所選擇之控制點及檢核點數不足，使得精度評估上較不嚴謹。

表 4-5、控制點精度比較表

控制點精度(m)	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
近景測影測量 (平行多基線攝影)	0.0033	0.0057	0.0007	0.0066
近景測影測量 (旋轉多基線交會攝影)	0.0003	0.0009	0.0013	0.0016
地面雷射掃描	0.0193	0.0181	0.0267	0.0376

表 4-6、檢核點精度比較表

控制點精度(m)	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z	Total RMSE
近景測影測量 (平行多基線攝影)	0.0431	0.0511	0.0107	0.0678
近景測影測量 (旋轉多基線交會攝影)	0.0254	0.0320	0.0115	0.0425
地面雷射掃描	0.0252	0.0217	0.0187	0.0382

第五章 結論與建議

本研究以非量測性數位相機於三個不同的近景攝影測量軟體進行相機率定，並以三個實例探討非量測性數位相機用於近景攝影測量之限制，可得結論如下：

1. 內方位參數率定

- (1) 使用之近景攝影測量軟體不同，其率定標大小、控制點數目、所需影像數、拍攝模式及處理程序等皆不同。相機透鏡在最大輻射距離之最大輻射畸變差，其差異以軟體間之差異較大；軟體內部除 PhotoModeler 使用不同尺寸之率定標且其率定標為紙張，導致其兩次實驗之最大輻射畸變差差值為 11.136 μm 。
- (2) 研究之軟體內部兩組實驗僅 PhotoModeler 之 set1 與 set2 間有經過鏡頭拆裝，iWitness 及 Lensphoto 進行率定影像拍攝時沒有經過鏡頭拆裝，因此 PhotoModeler 兩組實驗成果差異大。非量測性相機進行外業拍攝時經過鏡頭之拆卸與重新安裝會影響內方位元素，因此應謹慎不拆卸鏡頭直至相機率定結束。

2. 以近景攝影測量生成點雲

- (1) 目標物之紋理若為鏡面所構成，於近景攝影測量上會造成兩立體對影像之重疊區域反射出不同畫面，造成影像匹配難以進行，無法建立三維點雲資料；於地面雷射掃描時，仍然獲取鏡面雕塑品點雲三維資料，如本研究中之緣慧潤生點雲資料。
- (2) 近景攝影測量商用軟體在水袖生成點雲部份，因水袖為不規則形狀，拍攝時難以達到 Lensphoto 軟體限制目標物須涵蓋影像畫面之 80% 以上，無法重建其三維模型。同樣以近景攝影測量為背景之 Photosynth 軟體對於同樣的影像卻能展示其環繞攝影之點雲資料。所以近景攝影測量是能夠重建目標物之環場點雲資料，但受使用軟體之限制。
- (3) 本研究之旋轉多基線交會攝影之整體精度為較平行多基線攝影之整體精度高，但因以旋轉多基線方式拍攝拍攝近距離目標物時，易造成距離較遠的兩攝影站之拍攝邊

緣影像變形過大而無法使不同攝影站相同序號之影像達 90% 以上重疊率，使得點雲模型左右兩端之多於觀測數較少。因此平行多基線攝影適合用於近距離拍攝目標物時，而旋轉多基線攝影較適合遠距離拍攝或攝影位置地形複雜處。

- (4) 近景攝影測量與地面雷射掃描點雲模型精度比較，地面雷射掃描之控制點整體精度達 0.0376m，近景攝影測量旋轉多基線交會攝影方式之控制點整體精度 0.0016m 達公分級以下，地面雷射掃描之精度較近景攝影測量略低。
- (5) 因應近景攝影測量軟體為使以最少控制點達到獲取高精度點雲模型的目的，在近景攝影測量及地面雷射掃描之點雲模型定位分析時，所使用之控制點及檢核點數量不足，若增加控制點及檢核點數量可使精度分析成果較可靠。



參考文獻

- 吳怡燊，2003。影像控制區塊自動化量測及方位求解作業之探討。國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- 吳笛豪，2008。應用近景攝影與地面雷射掃描於地物量測精度及三維建模之研究。國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文。
- 柯 濤，2008。旋轉多基線數字近景攝影測量。武漢大學遙感信息工程學院博士論文。
- 張祖勛，楊生春，張劍清，2007。多基線數值近景測量。地理空間信息。5(1), pp.1~4。
- 廖彥舒，2004。非量測型數位相機應用於近景攝影測量之研究—使用三~六百萬畫素相機。逢甲大學土地管理學系碩士在職專班碩士論文。
- 劉虹妤，2000。數位相機率定之自動化。國立成功大學測量工程學系碩士論文。
- 龔健彬，1997。運用非量測性相機、桌面掃描器進行近景攝影測量之研究。國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- Ackermann, F., 1983. High Precision Digital Image Correlation. Institute for Photogrammetry [J], Stuttgart University, Schriftenreihe.
- Arias P., Herráez J., Lorenzo H. and Ordóñez C., 2005. Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods. Computers and Structures 83, pp.1754-1766.
- Brown, D.C., 1971. Close-Range camera calibration. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 37(8), pp.855-866.
- Fryer, J. G., 1996. Camera Calibration, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, pp.156~179.
- Karara, H. M. and Faig, W., 1980. An Expose on Photogrammetric Data Acquisition Systems in Close-Range Photogrammetry. International Archives of Photogrammetry, 23(B5), pp.402-418.
- Schenk, T., 1999, Digital Photogrammetry, Volume I, TerraScience, pp.251-266.

Juyang Weng, 1992. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14 No.10, pp. 965-980.

Wolf, P. R. and Dewitt B A., 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS 3rd edition, McGRAW-HILL.



附錄一、相機鏡頭拆裝實驗

在實際工程應用中，依攝影站與目標物之距離，往往會使用到不同焦距之相機鏡頭，而鏡頭拆卸、安裝所引起的相機內方位元素之變化，會影響量測精度。本研究選用三軟體進行相機率定，拍攝影像時，軟體間兩兩影像組皆經過相機鏡頭拆裝，軟體內之兩組影像僅 PhotoModeler 軟體經過鏡頭拆裝。考慮本研究所使用之相機與鏡頭經拆卸、安裝後對內方位元素之變化，設計本實驗分析此因素對量測精度之影響。

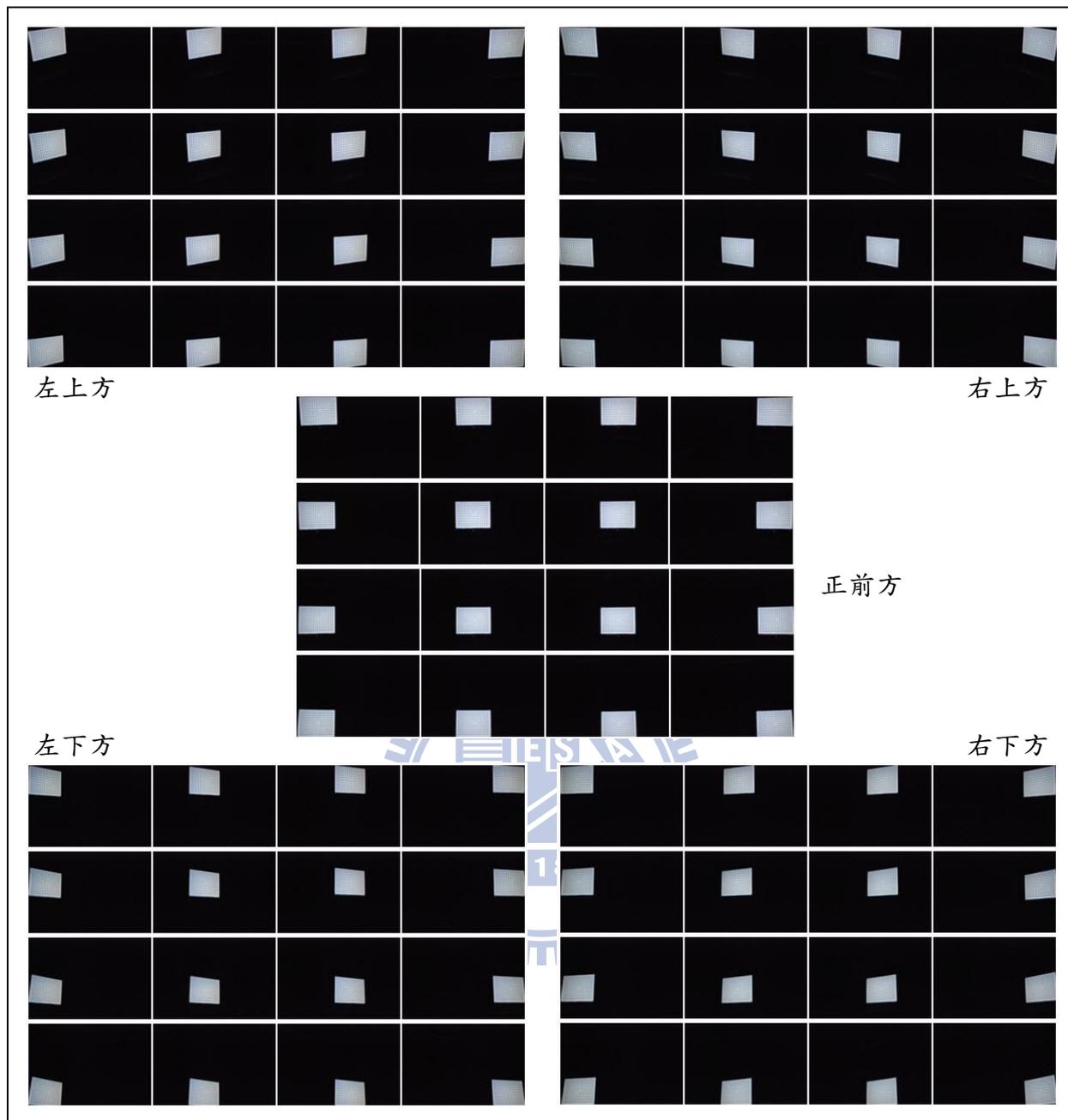
附 1.1 相機率定處理

以 Lensphoto 此單一軟體率定相機，在拍攝影像時將相機設定為手動模式並將對焦距離調至無窮遠，拍攝 3 組影像：set7、se8 及 set9，拍攝 set7 與 se8 影像期間沒經過鏡頭拆裝，拍攝完 set7 與 se8 影像後才將相機鏡頭拆卸、重新安裝，繼續拍攝 set9 影像。

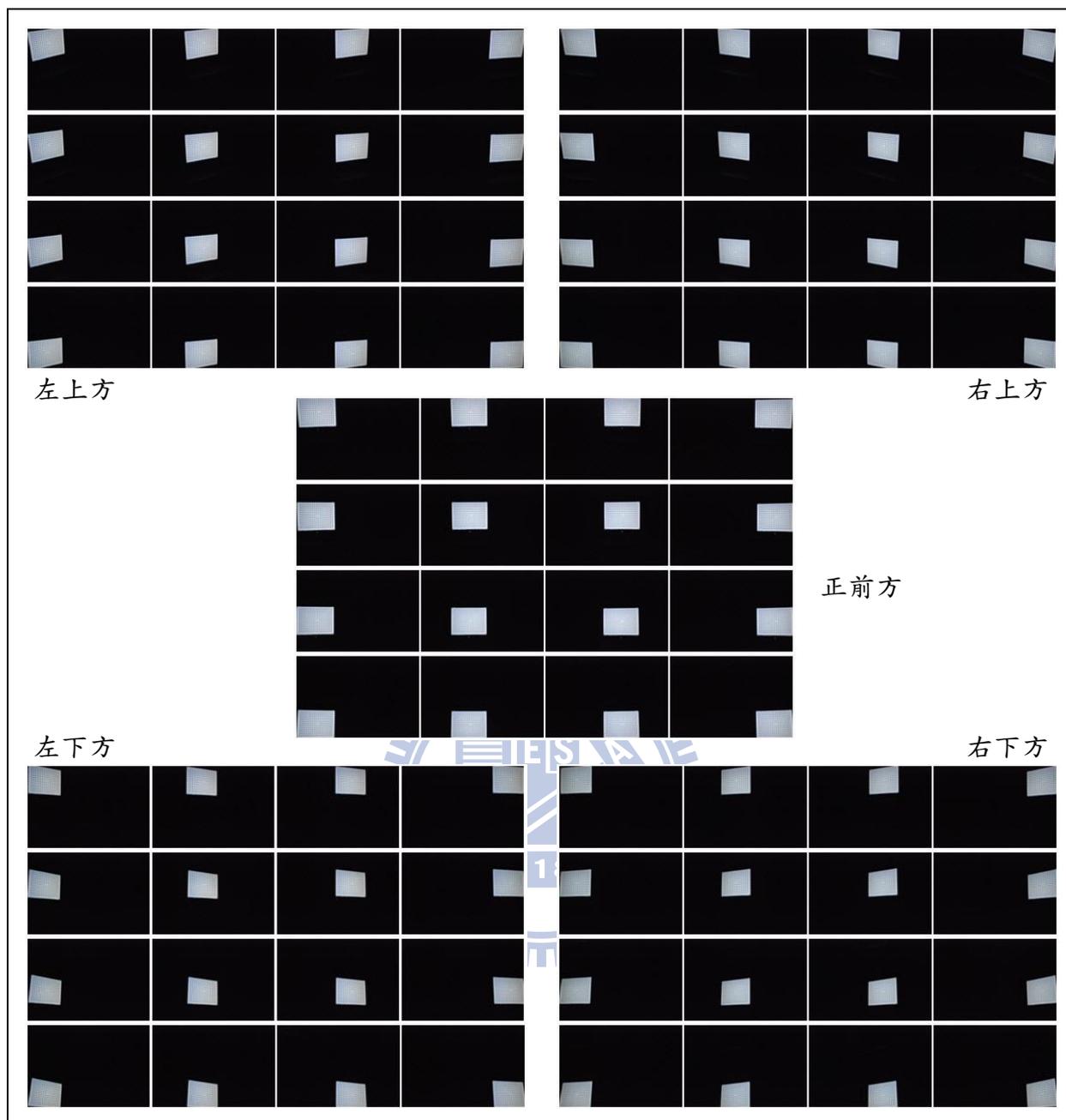
檢驗場佈設與前述 3.2.3 節相同，僅因相機對焦距離為設定無窮遠而改變率定標點的大小與距離。設定率定格點直徑 5 mm 及間距 18 mm，共有 221 個格點規則排列成 13 列、17 行，始能清晰拍攝率定標影像。以同一相機率定檢驗場拍攝三組影像。

拍攝率定標影像之方法與前述 3.2.3 節雷同，於 LCD 前面正前方、左上方、右上方、左下方及右下方 5 個不同位置進行拍攝，但因相機對焦距離設定為無窮遠，為使率定標影像成像清晰且均勻成像在像幅的不同範圍，每個攝影站須拍攝 16 張影像，令像幅範圍安排成 4x4 區域，率定標均勻分佈在不同區域。5 個攝影站便有 80 張率定標影像，如附圖 1-1、附圖 1-2 及附圖 1-3 所示，分別為 set7、se8 及 set9 影像組。

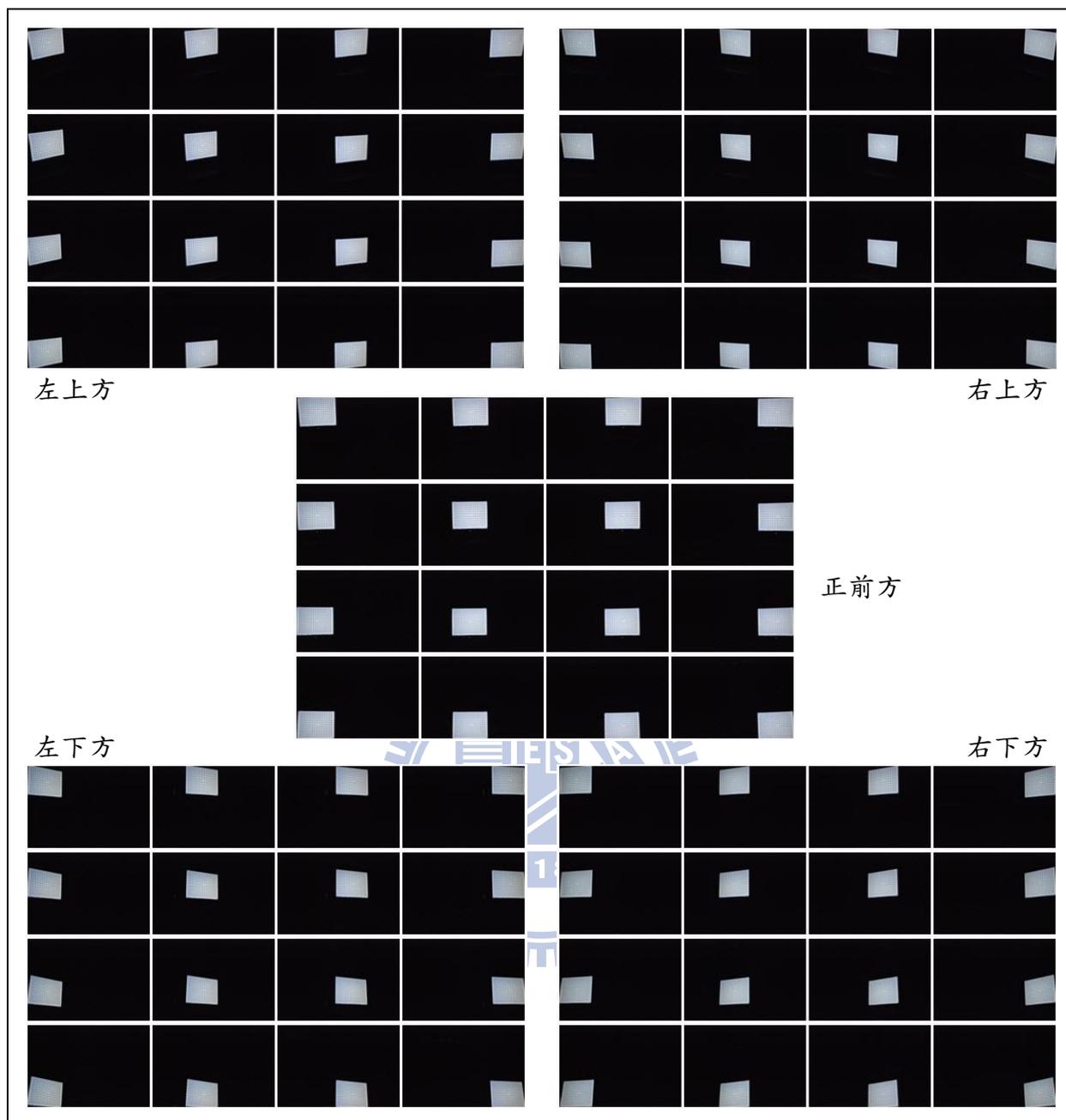
軟體處理相機率定之半自動操作，同前述 3.2.3 節，將 80 張率定標影像載入 Lensphoto 中，人工手動依序點選率定標三個控制點，再執行控制點平差與相機率定，求得內方位參數。



附圖 1-1、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set7



附圖 1-2、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set8



附圖 1-3、拍攝 Lensphoto 率定標之影像 set9

附 1.2 率定成果與分析

內方位參數率定結果與其標準差如附表 1-1 所示，本研究所使用之相機，其鏡頭經拆卸、安裝後對內方位元素會產生些微變化，其中像主點變化較大，而焦距與鏡頭畸變參數變化均很小。綜合內方位率定結果之相機鏡頭畸變程度如附表 1-2 所示，將 23.6 mm×15.8mm 影像像幅平均分配成 10×10 的網格，每個網格大小皆相同，紅色網格為鏡頭畸變差改正前，黑色網格為改正鏡頭畸變差後之示意圖。由鏡頭未改正透鏡畸變差之

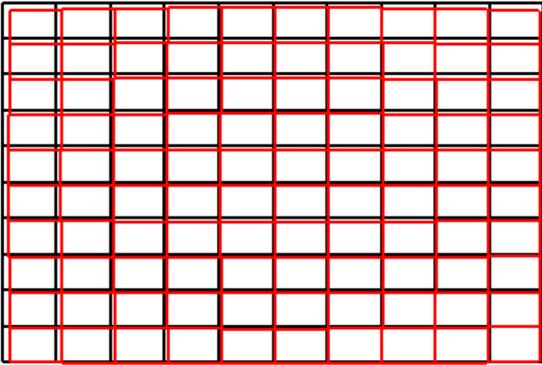
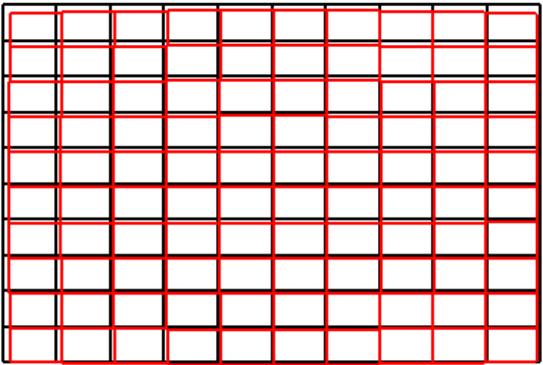
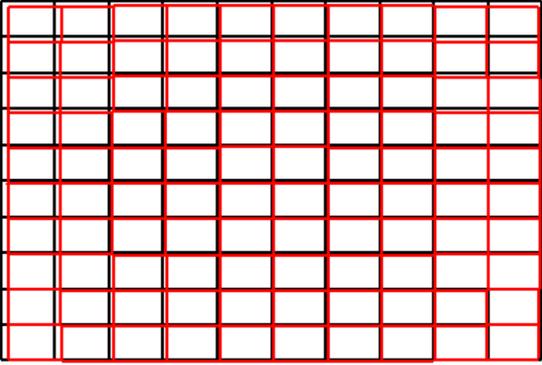
紅色網格與改正畸變差後之黑色網格作對照，未經鏡頭拆裝的 set7 與 set8 畸變程度較接近，經鏡頭拆裝的 set9 畸變程度與前述兩者較看得出差異。

set7、set8 及 set9 三組率定標影像之率定後焦距分別為 28.4648 mm、28.4724 mm 及 28.4721 mm，兩兩差異皆在 0.01 mm 以內。由附表 1-1 可得知三組影像之像主點偏移皆在像坐標第四象限內，其像主點偏移的像坐標距離以 set8 與 set9 之結果差異為最大，如附表 1-2 所示，set7、set8 及 set9 三組率定標影像之像主點偏移量依序為 29.52 pixels、31.57 pixels 及 27.04 pixels，set8 與 set9 差 4.53 pixels 為最大。三組影像上之像點最大變形量分別為 78.80 pixels、80.00 pixels 及 77.27 pixels，亦以 set8 與 set9 差異為最大，達 2.73 pixels。像主點偏移量及像點最大變形量，皆以 set8 與 set9 差異為最大，但分別僅差 4.53 pixels 及 2.73 pixels，實驗結果顯示本研究使用之相機與鏡頭經拆卸、安裝後，對內方位元素會有影響，但影響量不大。

附表 1-1、相機經鏡頭拆裝及率定後之內方位參數與標準差

軟體名稱		Lensphoto					
率定結果		參數數值			標準差		
組別		set7	set8	set9	set7	set8	set9
內方位參數	f (mm)	28.4648	28.4724	28.4721	2.910×10^{-5}	2.881×10^{-5}	2.883×10^{-5}
	x_p (mm)	0.0922	0.0885	0.1122	7.505×10^{-6}	7.582×10^{-6}	7.528×10^{-6}
	y_p (mm)	-0.1512	-0.1675	-0.1172	7.544×10^{-6}	7.624×10^{-6}	7.574×10^{-6}
	K_1	1.498×10^{-4}	1.493×10^{-4}	1.481×10^{-4}	1.114×10^{-8}	1.084×10^{-8}	1.097×10^{-8}
	K_2	-1.637×10^{-7}	-1.621×10^{-7}	-1.597×10^{-7}	9.532×10^{-11}	9.147×10^{-11}	9.345×10^{-11}
	P_1	1.873×10^{-5}	2.248×10^{-5}	1.491×10^{-5}	4.221×10^{-8}	4.142×10^{-8}	4.167×10^{-8}
	P_2	-6.078×10^{-6}	-4.184×10^{-6}	-1.124×10^{-5}	6.589×10^{-8}	6.452×10^{-8}	6.511×10^{-8}

附表 1-2、相機鏡頭經拆裝及率定後之鏡頭畸變程度

set7	set8
 <p>像主點偏移量：29.52 pixels 像點最大變形量：78.80 pixels</p>	 <p>像主點偏移量：31.57 pixels 像點最大變形量：80.00 pixels</p>
 <p>像主點偏移量：27.04 pixels 像點最大變形量：77.27 pixels</p>	

附 1.3 小結

本研究使用之相機與鏡頭經拆卸、安裝後，雖對內方位元素之影響不大，但欲將非量測性數位相機應用於實務工程上時，顧及量測精度須考慮內方位元素經相機鏡頭拆裝所引起的變化。因此以自率光束法平差對相機進行率定，不但解決前述的問題，且無須高精度的三維控制場，最為便利。