

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

以人工紋理協助弱紋理區影像三維重建

Using Artificial Texture to Assist 3D Reconstruction of
Low Texture Imagery

陳婉婷

Wan-Ting Chen

指導教授：趙鍵哲 博士

Advisor: Jen-Jer Jaw, Ph.D.

中華民國 106 年 8 月

August, 2017

誌謝




兩年的研究生涯讓我獲益良多，有各種痛苦和歡笑。就讀研究所是一段未知的旅程，經歷了許多不同的人事物，而壓力與激勵也成為成長的養分。其中，非常感謝我的指導老師趙鍵哲老師，再學術用，用嚴謹的態度督導我，遇到任何問題時，都耐心引導我找到方向。也感謝擔任口委的蔡展榮老師、邱式鴻老師及莊子毅學長給予我寶貴意見。

感謝這段時間一直再身邊的家朋友們。家人給我一個遮風避雨的地方；朋友則給我心靈上的依靠，感謝在最辛苦的階段給予幫助的君芸學姊；感謝同是 DP 組的韋彤傾聽我的抱怨；感謝當了六年同學的毅俞和湘琳，互相扶持度過艱困的研究生涯；感謝 DP 組的學弟妹-雅博、鼎方及冠臻在口試時幫忙紀錄。

謝謝所有陪伴及幫助我的貴人們，因為你們才能造就現在的我。

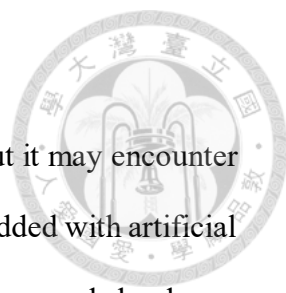
摘要



隨著電腦設備及攝影測量技術的進步，立體匹配已可有效產製高密度點雲。但是，對於弱紋理區，考量場景或物件地域性、施作條件及硬體需求性，在人工紋理的輔助作業模式下，還有許多限制及作業挑戰待解決。立體匹配藉由投射人工紋理於場景或物件以增加其紋理變化及豐富度，考量場景幾何、大小及所需重建之完整度，會對應不同的方法選擇、設備需求及操作細節。本研究採用一般消費型投影機及相機，在低成本的設備需求下搭配所設計人工紋理、影像拍攝配置、像點量測與方位解算一套流程拍攝影像及獲致品質足夠的方位參數，並利用 SURE 進行影像密匹配獲取三維點雲。本研究工作具體貢獻主要分為人工紋理設計及取像幾何規劃，人工紋理包括用於影像密匹配的匹配紋理及連接拍攝不同紋理的相鄰像對的連結紋理；由所需的重建精度，可推求攝影測量作業參數包含像主距、物距、像基距及 f-number 等參數，結合適當的相機與投影機之設備配置以進行影像獲取。本研究從模擬場景的三維重建進行模擬資料與實際資料成果分析，再推展至真實場景之三維重建。本研究提出的人工紋理及設備配置對人工場景及真實場景均可達至預期精度中的三維重建成效。

關鍵字：人工紋理、立體匹配、連結紋理、三維重建

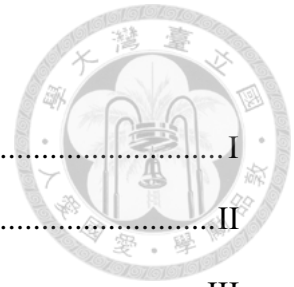
ABSTRACT



Stereo matching can effectively produce dense point cloud, but it may encounter great challenge when faced with low-textured image content. Even added with artificial texture, the location of the targeted scene, operation condition, and hardware requirement, among others, still demand considerable concerns to arrange for appropriate work scheme. This work captures images by low cost projectors and a camera, and dense matching software SURE is used to generate 3D point clouds. Regarding how and what to project textures, the main focus is on analyzing and designing suitable textures taking the surface, geometry, and making succession of scene into consideration. On the other hand, the fine placements of projectors and camera stations are also crucial to maintaining quality imaging geometry. The four main parameters for image acquisition, baseline, object distance, principal distance, and f-number can be determined by the required accuracy for 3D reconstruction. This study establishes appropriate work steps and rules for reconstructing low texture scene, and the experiments validate its effectiveness and applicability meeting quality requirement.

Keywords: Artificial texture, Stereo matching, Tie texture, 3D reconstruction

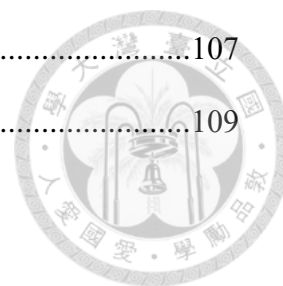
目錄



誌謝	I
摘要	II
ABSTRACT	III
目錄	IV
圖目錄	VII
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	4
1.3 研究方法與流程	5
1.4 論文架構	6
第二章 文獻回顧	7
2.1 結構光系統	7
2.2 影像密匹配	10
2.3 小結	14
第三章 研究方法	15
3.1 紋理設計	15
3.1.1 匹配紋理	20
3.1.2 連結紋理	22
3.2 攝影規劃	23
3.2.1 計算攝影參數	23
3.2.2 設備配置	26
3.3 像點量測	27
3.3.1 控制點與檢核點像點量測	28

3.3.2	連結點像點量測.....	28
3.4	方位解算模式.....	32
3.5	小結.....	35
第四章	實驗及成果分析.....	37
4.1	實驗設備與軟體.....	38
4.2	控制點與檢核點物空間坐標量測.....	40
4.3	紋理密度.....	40
4.4	場景 1.....	50
4.4.1	坐標系統.....	51
4.4.2	影像獲取.....	51
4.4.3	場景 1 模擬資料製作及成果分析.....	55
4.4.4	像點量測.....	66
4.4.5	方位解算.....	70
4.4.6	點雲成果與品質評估.....	71
4.5	場景 2.....	76
4.5.1	坐標系統.....	77
4.5.2	影像獲取.....	77
4.5.3	像點量測.....	84
4.5.4	方位解算.....	88
4.5.5	點雲成果與品質評估.....	91
4.6	小結.....	94
第五章	結論與建議.....	95
5.1	結論.....	95
5.2	建議.....	96
參考文獻	99
附錄一	103

附錄二	107
附錄三	109



圖目錄



圖 1-1、點雲資料示意圖	1
圖 1-2、台大土木系館門口浮雕影像與點雲成果	2
圖 1-3、蘭花影像與點雲成果	2
圖 1-4、航空影像點雲產製(丁皓偉, 2014)	3
圖 1-5、近景影像點雲產製(Wenzel et al., 2013a)	3
圖 1-6、整合 UAV 及地面影像進行三維重建(Mayer, 2015)	3
圖 1-7、研究流程圖	5
圖 2-1、結構光示意圖(Geng, 2011)	7
圖 2-2、序列式圖徵投影示意圖	8
圖 2-3、視差地真資料(Scharstein and Szeliski, 2003)	9
圖 2-4、人臉三維模型建置(Alexander et al., 2009)	9
圖 2-5、圖徵樣式(Lin et al., 2016)	9
圖 2-6、階層式策略示意圖(Wenzel et al., 2013b)	11
圖 2-7、多重模型一致性檢驗示意圖(Wenzel et al., 2013b)	11
圖 2-8、SURE 運作流程示意圖(Wenzel et al., 2013b)	12
圖 2-9、"Testy" 成果(Wenzel et al., 2013b)	12
圖 2-10、Microsoft Kinect (https://goo.gl/M6tL7b , last date accessed: 30 June 2017)	13
圖 2-11、Kinect 圖徵	13
圖 2-12、設備配置(Wenzel et al., 2012)	13
圖 2-13、阿姆斯特丹宮殿山形牆面的浮雕(Wenzel et al., 2012)	14
圖 2-14、部分點雲成果(Wenzel et al., 2012)	14
圖 3-1、紋理示意圖	16
圖 3-2、點雲成果	19
圖 3-3、局部放大	19
圖 3-4、點雲數量	19
圖 3-5、由本原多項式 $h(x)$ 定義的回饋位移暫存器(MacWilliams and Sloane, 1976)	21
圖 3-6、人工紋理	23
圖 3-7、重疊像對的幾何(Wolf et al., 2014)	24
圖 3-8、景深示意圖	25
圖 3-9、場景與相片涵蓋	26
圖 3-10、控制點及檢核點標型	27
圖 3-11、標準化互相關法示意圖 (Schenk, 1999)	28
圖 3-12、連結點模板	29
圖 3-13、幾何變形示意圖(Schenk, 1999)	30

圖 3-14、左右像對應的視窗位置示意圖(改編自 Wolf et al., 2014)	30
圖 3-15、像片坐標系示意圖	33
圖 3-16、SURE 之影像坐標系示意圖(Camera Coordinate System, 2014)	33
圖 4-1、場景 1 原紋理匹配之點雲成果	38
圖 4-2、實驗設備.....	38
圖 4-3、全測站檢測示意圖	39
圖 4-4、全測站距離測量示意圖	40
圖 4-5、邊長比例示意圖	41
圖 4-6、不同密度匹配紋理	41
圖 4-7、積木編號示意圖	42
圖 4-8、點雲成果.....	44
圖 4-9、點雲數量比較圖	45
圖 4-10、紋理亂度分析樣本示意圖.....	48
圖 4-11、紋理隨機性比較圖	49
圖 4-12、實驗 1 場景.....	50
圖 4-13、場景 1 物空間坐標系	51
圖 4-14、場景 1 投影機與相機配置示意圖	52
圖 4-15、曝光站、像點及物點	57
圖 4-16、控制點及檢核點標型影像及灰階直方圖.....	68
圖 4-17、二進制影像.....	69
圖 4-18、質心	69
圖 4-19、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度.....	71
圖 4-20、像對點雲成果	72
圖 4-21、全景點雲.....	72
圖 4-22、檢核點誤差(絕對值)與理論精度	73
圖 4-23、實驗 2 場景.....	76
圖 4-24、場景 2 控制點分布	76
圖 4-25、場景 2 物空間坐標系	77
圖 4-26、設備配置.....	78
圖 4-27、控制點及檢核點標型影像及灰階直方圖.....	86
圖 4-28、二進制影像.....	87
圖 4-29、質心	87
圖 4-30、曝光站、像點及物點	88
圖 4-31、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度.....	91
圖 4-32、場景 2 點雲	92
圖 4-33、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度.....	93
圖 4-34、點雲局部放大與特徵檢核示意圖	93

表目錄

表 2-1、結構光分類(Van der Jeught and Dirckx, 2016)	8
表 3-1、影像獲取.....	16
表 3-2、本原多項式(over $GF(q)$) (MacWilliams and Sloane, 1976)	21
表 3-3、匹配紋理單元顏色	22
表 3-4、連結點顏色.....	22
表 3-5、連結點圖樣.....	22
表 4-1、實驗項目及相關內容	37
表 4-2、全測站檢測紀錄.....	39
表 4-3、實驗影像.....	42
表 4-4、積木點雲比較.....	45
表 4-5、紋理影像單元對應所獲取的影像上的大小(像元)	47
表 4-6、紋理單元邊長 1~32 之 9 個區塊的熵	48
表 4-7、場景 1 拍攝規劃	52
表 4-8、場景 1 相機率定	53
表 4-9、影像獲取.....	54
表 4-10、模擬資料外方位參數	56
表 4-11、實驗 1 成果.....	59
表 4-12、實驗 2 成果(1)	60
表 4-13、實驗 2 成果(2)	61
表 4-14、實驗 2 成果(3)	62
表 4-15、實驗 3 成果(1)	63
表 4-16、實驗 3 成果(2)	64
表 4-17、實驗 3 成果(3)	65
表 4-18、模板匹配成果.....	66
表 4-19、LSM 成果(+為 LSM 結果；+為原像點).....	67
表 4-20、外方位參數解算成果	70
表 4-21、檢核點誤差.....	71
表 4-22、點雲之檢核點誤差	73
表 4-23、點雲積木分析.....	74
表 4-24、場景 2 拍攝規劃	78
表 4-25、場景 2 相機率定	79
表 4-26、帶狀區域 1 影像獲取 1	80
表 4-27、帶狀區域 1 影像獲取 2	81
表 4-28、帶狀區域 2 影像獲取 1	82
表 4-29、帶狀區域 2 影像獲取 2	83
表 4-30、模板匹配成果.....	84

表 4-31、LSM 成果(+為 LSM 結果；+為原像點).....	85
表 4-32、帶狀區域 1 外方位參數解算成果	89
表 4-33、帶狀區域 2 外方位參數解算成果	90
表 4-34、檢核點誤差.....	91
表 4-35、檢核點誤差.....	92
表 4-36、特徵檢核.....	94

第一章 緒論



1.1 前言

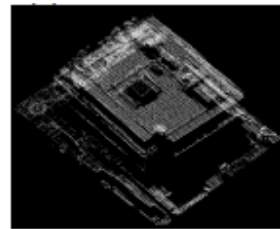
隨著攝影測量技術演進，二維影像資料透過立體匹配(Stereo matching)可以有效產製細緻且高精度之三維點雲(point cloud)。點雲是以密集之三維點位描述空間中的物件(如圖 1-1)，現今測繪技術中，獲取物體高密度點雲的方法主要有 2 種，影像密匹配(Dense matching)及光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)技術。光達可快速獲取大量的具空間資訊的點雲資料，但是作業成本高。近年來，由於計算機軟硬體設備的快速發展及影像匹配演算法的改進，低成本光學影像亦可於短時間內產製具有空間資訊及色彩的點雲，和光達資料相比，在視覺上更貼近真實物件的樣貌，為了展示影像密匹配之可行性，分別對人造物及花卉進行影像拍攝，由 VisualSFM (Wu, 2011)解算方位，以 SURE (Rothermel et al., 2012)產製密點雲，影像獲取及點雲成果如圖 1-2 及圖 1-3 所示。



(a) 地面光達點雲(Chuang and Jaw, 2017)



(b) 空載光達點雲(Chuang and Jaw, 2017)



(c) 高密度隧道點雲(趙鍵哲，2016)

圖 1-1、點雲資料示意圖

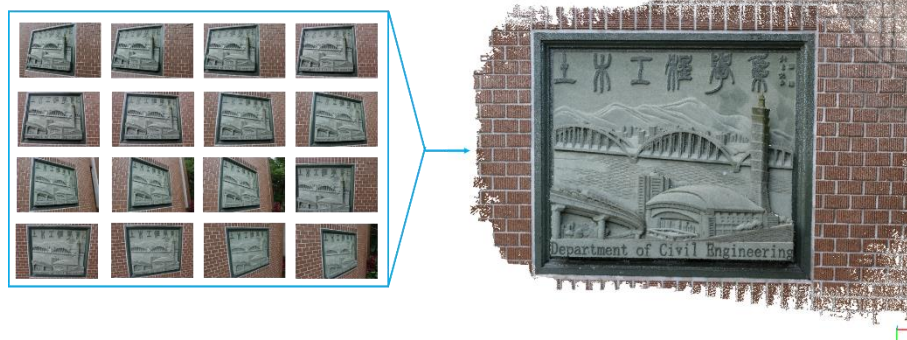


圖 1-2、台大土木系館門口浮雕影像與點雲成果

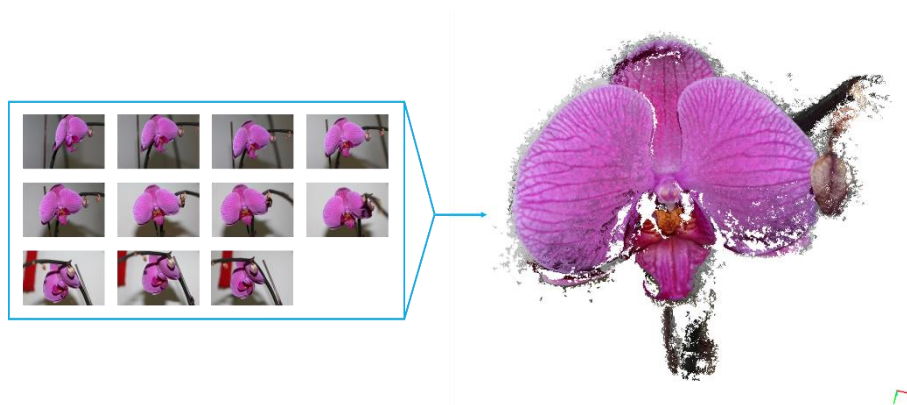


圖 1-3、蘭花影像與點雲成果

影像取得成本低且有空間及輻射資訊，因此以影像產製高密度點雲是當前趨勢。丁皓偉(2014)以 Cross-based Matching+半全域式匹配法(Semi-Global Matching, SGM)，從航空影像產製高密度點雲(圖 1-4)。Wenzel et al. (2013a)使用數位單眼相機 Nikon D7000 環狀拍攝 35 cm 高的目標物”Testy”以獲取影像，使用 SURE 進行影像密匹配產生點雲(圖 1-5)。Mayer (2015)整合多張 UAV 影像及地面影像，以 SGM 產製點雲(圖 1-6)。綜上所述，從航空影像到近景影像均可用立體匹配進行三維重建。

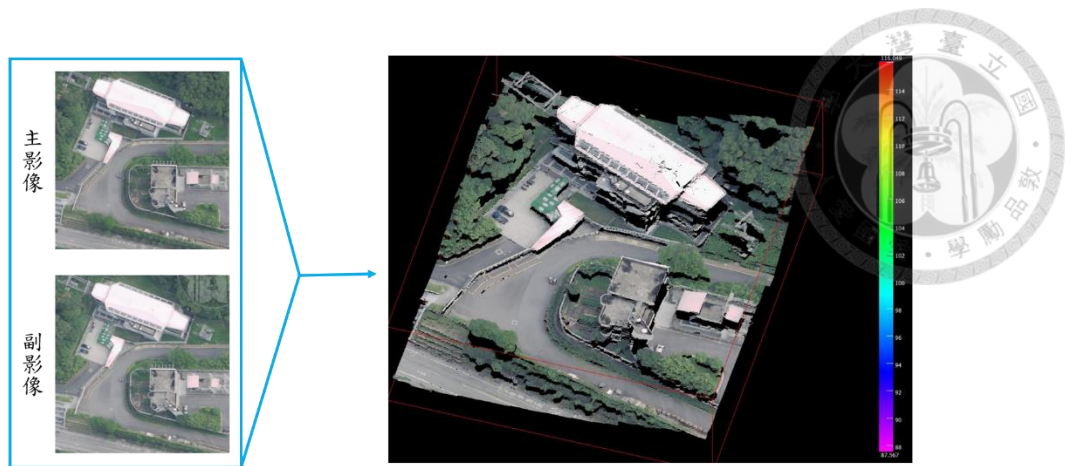
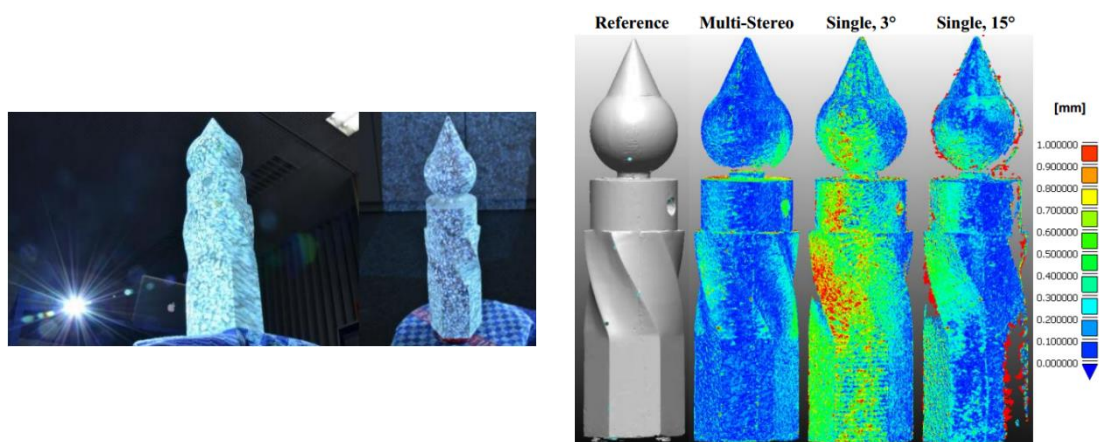


圖 1-4、航空影像點雲產製(丁皓偉，2014)



(a) 測試物“Testy”

(b) 產製之點雲

圖 1-5、近景影像點雲產製(Wenzel et al., 2013a)

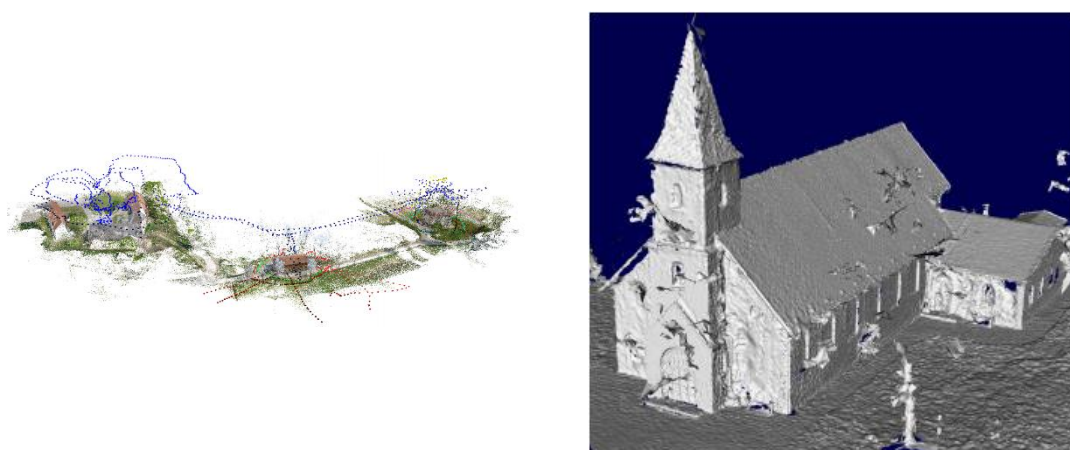


圖 1-6、整合 UAV 及地面影像進行三維重建(Mayer, 2015)



1.2 研究動機與目的

立體匹配雖然可以產製高密度三維點雲，但有其施作前提。Mattoccia (2012)列舉執行立體匹配的挑戰，包括光學失真(photometric distortions and noise)、鏡面反射(specular surfaces)、投影縮減(foreshortening)、透視畸變(perspective distortions)、重複圖徵(repetitive/ambiguous patterns)、透明物件(transparent objects)、遮蔽與不連續(occlusions and discontinuities)及單調或低紋理區(uniform/ambiguous regions)等。當獲取的影像有前述現象時，容易造成匹配錯誤或是無法匹配，而大部分的挑戰已有相應的解決方法，亦改善三維重建的成果。但是，對於低紋理區的三維重建，考量場景或物件地域性、施作條件及硬體需求性，在人工紋理(artificial texture)輔助下，仍有諸多限制及挑戰。

投射人工紋理於場景或物件以增加紋理變化及豐富度，是協助立體匹配於弱紋理區的基本概念，實際操作時，根據場景幾何、大小、欲重建的完整度及使用設備，會有不同的方法選擇及操作細節。本研究主要研究目的為設計合適的人工紋理，並提出適當的影像拍攝配置，使弱紋理區能夠以立體匹配順利獲取三維點雲。現階段所使用之投影器及相機之感測波段均為可見光，因此作業環境限於可投射清楚紋理的光源環境，例如室內及夜間作業的室外場景。



1.3 研究方法與流程

為了利用人工紋理與相應的工作規劃進行場景重建，本研究所設計之研究方法與流程如圖 1-7。

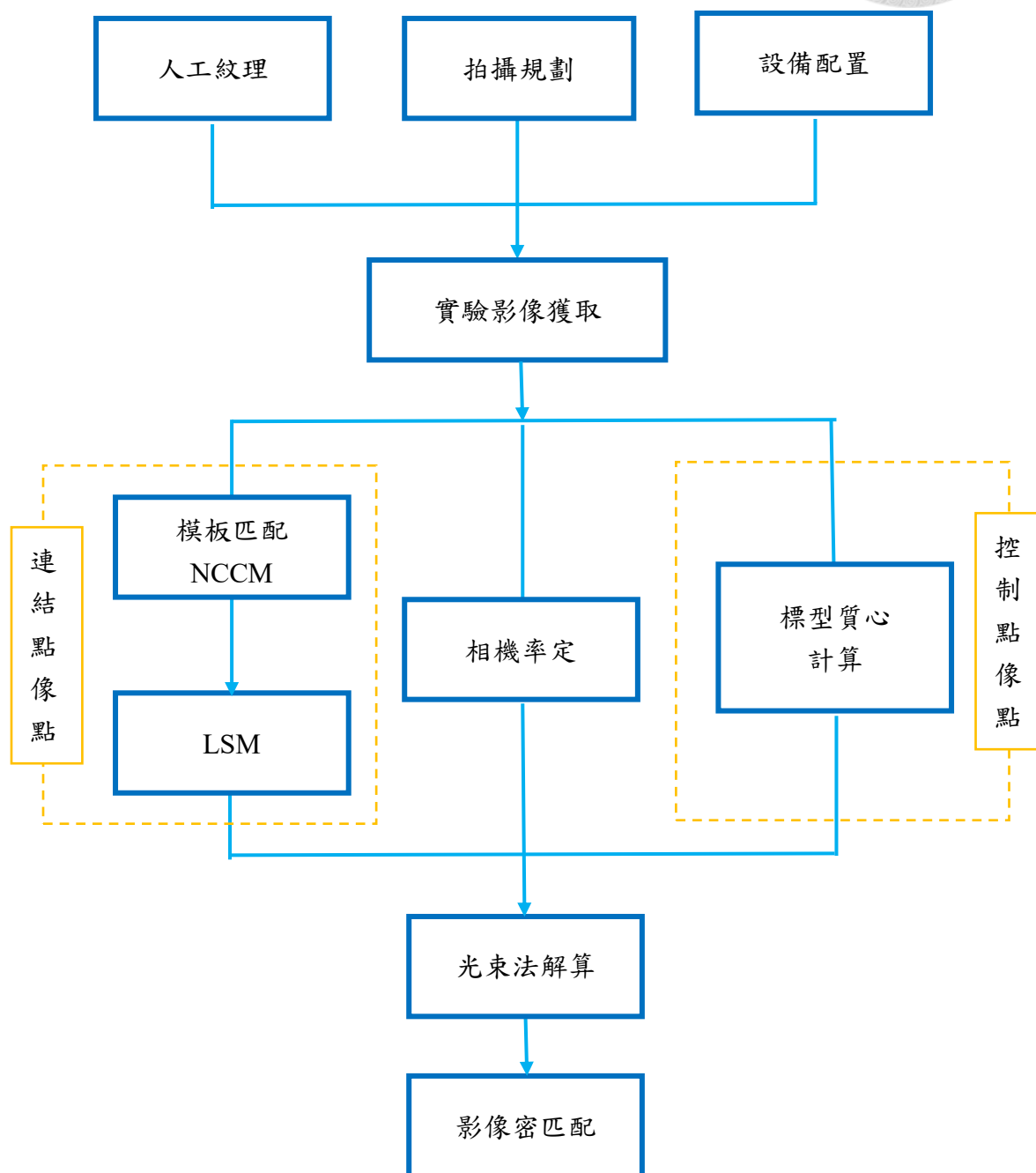


圖 1-7、研究流程圖



1.4 論文架構

本論文依循下列幾個章節做詳細的論述，其中章節內容概要如下：

第一章 緒論

說明本研究之動機與目的、研究流程圖，並簡述論文架構。

第二章 文獻回顧

簡述結構光與影像匹配理論及相關應用成果。

第三章 研究方法

詳論本研究採用的人工紋理、工作規劃及像點量測策略

第四章 實驗及成果分析

探討紋理密度對三維重建成果的影響及根據研究所提出之方法進行場景 1 及場景 2 的三維重建。

第五章 結論與建議

針對實驗成果進行整體性之分析，提出本研究目前的結論及後續研究工作之建議。

第二章 文獻回顧



2.1 結構光系統

結構光系統(structured light system)是一個歷史悠久且發展成熟的三維重建技術，該方法的原理為對欲重建的目標物投影特定圖徵(pattern)，結構光投射的圖徵由多個平面組成，每個面有一獨立編碼，由編碼可知該平面是結構光系統的哪一個平面，因此透過編碼比對即可進行三維重建。如圖 2-1 所示，結構光最基礎的設備為一部投影機與一台相機，當物體表面不為平面時，投射於物體的結構光圖徵，會根據物體的幾何形狀產生變形，藉由分析投影後的圖徵變形資訊可以取得物體的空間資料。

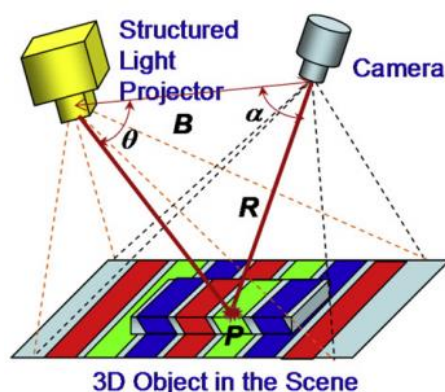
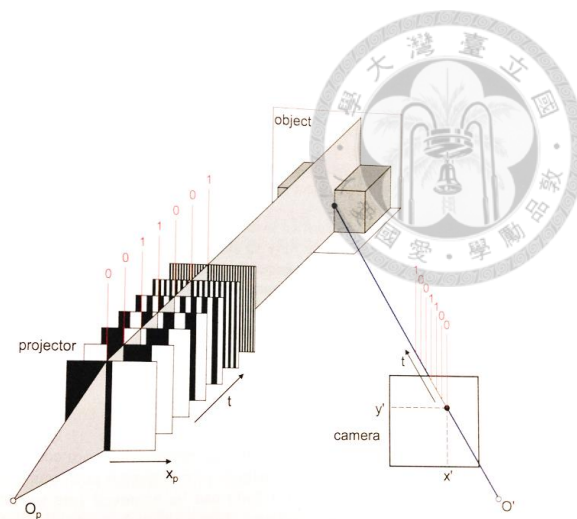
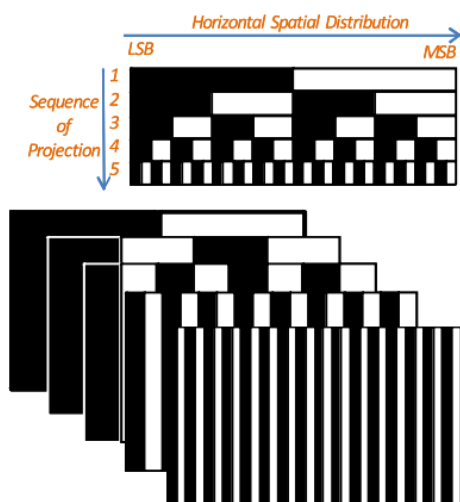


圖 2-1、結構光示意圖(Geng, 2011)

現今，已發展出許多結構光系統的應用方法，根據投影圖徵的數量可分為序列式投影及單次投影。序列式投影是對物體分別投射多張圖徵(圖 2-2)，相機在同一位置對每一圖徵拍攝一張影像，合併後，每個圖徵投影面可賦予一獨立編碼；單次投影是只對場景投射一張圖徵。對於靜態物體，使用序列式可獲得較可靠且精確的成果，然而動態物件就只能使用單次投影(Geng, 2011)。Van der Jeught and Dirckx (2016)將目前為止應用於三維重建的結構光圖徵根據編碼方式分為五類彩色編碼投影(Color Encoded Projection)、灰階索引(Greyscale Indexing)、傅立葉(Fourier-based)、序列式投影(Sequential Projections)及混合型(Hybrid Method)(表 2-1)。



(a) 二元圖徵投影平面示意圖(Geng, 2011)

(b) 二元圖徵投影立體示意圖(Luhmann et al., 2014)

圖 2-2、序列式圖徵投影示意圖

表 2-1、結構光分類(Van der Jeught and Dirckx, 2016)

Color Encoded Projection (single-shot)	Fourier-based (single-or multi-shot)
<div>Rainbow 3D</div> <div>Color coded stripes</div> <div>De Bruijn sequence</div> <div>Composite (PU)</div> <div>Color coded grid</div> <div>Color coded dot array</div>	<div>(PU) Standard FTP</div> <div>(PU) 1 + 1 modified FTP</div> <div>(PU) π-shifted modified FTP</div> <div>(PU) 2D FTP</div> <div>(PU) Windowed FTP</div> <div>(PU) Wavelet FTP</div> <div>(PU) FTP + EMD/PCA</div>
Greyscale Indexing (single-shot)	Sequential Projections(multi-shot)
<div>Pseudo-random 2D array</div> <div>Mini-pattern codes</div> <div>Segmented stripes</div> <div>Greyscale coded stripes</div>	<div>Binary code</div> <div>(R) N-ary gray code</div> <div>(R) Stripe boundary code</div> <div>(PU) Moiré</div> <div>(PU, R) Sinusoidal</div> <div>(PU, R) Trapezoidal</div> <div>(PU) Triangular</div> <div>(PU, R) 2 + 1, 2 + 2 sinusoidal</div>
Hybrid Method	
<div>Adaptive structured light (R)</div> <div>Phase-shift + gray code</div>	

結構光的圖徵類型多變且應用廣泛。Scharstein and Szeliski (2003)利用黑白條紋圖徵計算 Middlebury 實驗影像之視差地真資料(圖 2-3(b))。Alexander et al. (2009)提出以彩色條紋圖徵及不同的光源條件拍攝 15 張影像，並建置人臉三維模型(圖 2-4)。早期結構光系統的圖徵，受限於電腦的硬體設備，為了減少編碼的複雜度，使用的圖徵多為單一幾何圖樣且以灰階為主，隨著計算機的演進，結構光系統的圖徵也出現更多元的變化，除了加入色彩，為了增加紋理變異性，Lin et al. (2016)提出以虛擬隨機陣列為基礎，加入 2 種不同幾何圖樣及 4 種顏色的結構光圖徵(如圖 2-5)。

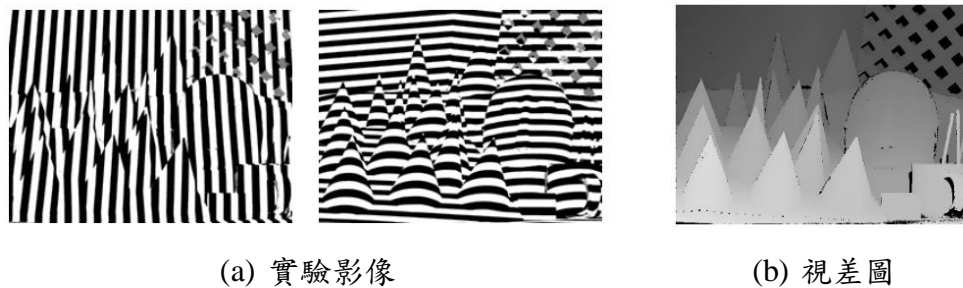


圖 2-3、視差地真資料(Scharstein and Szeliski, 2003)

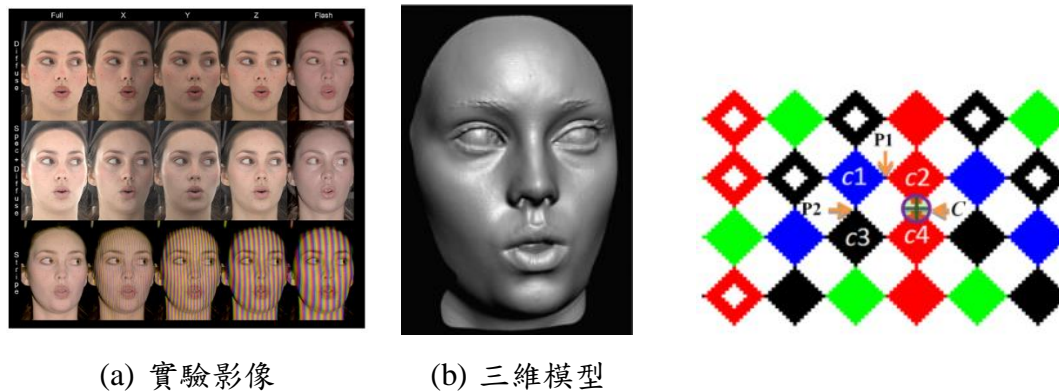


圖 2-4、人臉三維模型建置(Alexander et al., 2009)

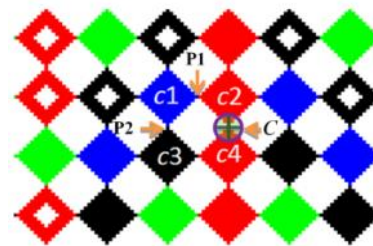
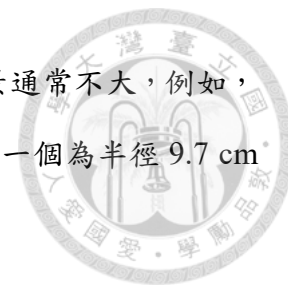


圖 2-5、圖徵樣式(Lin et al., 2016)

綜上所述，結構光系統雖然可以進行三維重建，但是有許多的作業限制。其以投影面與攝影光線交會計算物點坐標，所以相機位置與姿態以及投影機光源所投射之平面軌跡都必須精確掌握。另外，為了減少外來光源干擾，實驗皆為在黑暗的

室內環境中進行，而且投影機的投影範圍有限，因此重建的場景通常不大，例如，人臉的長度一般不超過 30 cm，Lin et al. (2016)的實驗對象其中一個為半徑 9.7 cm 的圓球。



2.2 影像密匹配

結構光系統中，透過賦予投影圖徵每個面獨立編碼，尋找對應的共軛點，再求解投影面與攝影光線的交點，即可得物點坐標。相對而言，在攝影測量中自動量測共軛點的技術為影像匹配(image matching)，與結構光的編碼不同的是，影像匹配是以影像的灰階值或幾何特徵搜尋及確認共軛點或共軛特徵點，藉此所獲致的共軛點或特徵再經前方交會解算得物點三維坐標或三維特徵。傳統的影像匹配方法分為區域式匹配(Area-based matching)、特徵式匹配(Feature-based matching)及混合式匹配(Hybrid matching)。區域式匹配是以固定的罩窗計算灰階值的相關性找出共軛點位置，常見的區域式匹配法有標準化互相關法(Normalized Cross Correlation Matching, NCCM) (Barnea and Silverman, 1972)及最小二乘匹配法(Least-Squares Matching, LSM) (Ackermann, 1983)，最小二乘匹配法除了考慮灰階變化，也考慮了幾何變異之調整；特徵式匹配中常見的方法有尺度不變特徵轉換(Scale Invariant Feature Transformation, SIFT) (Lowe, 1999)及加速穩健特徵(Speeded Up Robust Features, SURF) (Bay et al., 2008)。

傳統的影像匹配方式不易成功遂行逐點匹配，往往僅能取得稀疏點雲，而立體匹配法目標為計算影像上每一像元的視差值，以取得細緻的三維空間資訊，又稱為高密度匹配。Hirschmüller (2005)提出 SGM，採用 Mutual Information (MI)為基礎的逐像元匹配成本計算，以補償影像間的輻射差異，並以全域的路徑優化快速取得視差初始值。Rothermel et al (2012)發表名為 SURE 的三維重建程序，其密匹配演算法是以 Hirschmüller (2008)提出的 SGM 為基礎，加入影像金字塔概念進行階層式由粗到細(hierarchical coarse-to-fine)的處理程序(如圖 2-6)，稱為 tSGM，該方法可以縮小視差的搜尋範圍，縮短計算時間和所需要的記憶體。除此之外，亦藉由邊緣

偵測成果進行懲罰參數(penalty parameter)優化調制。SURE 另一特色為可整合多重疊影像密匹配點雲成果，透過偵錯及一致性檢驗，提升場景點雲成果(如圖 2-7)。

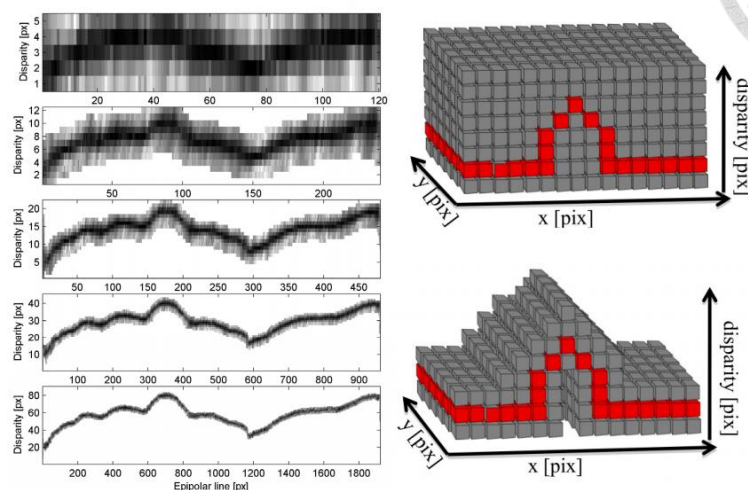


圖 2-6、階層式策略示意圖(Wenzel et al., 2013b)

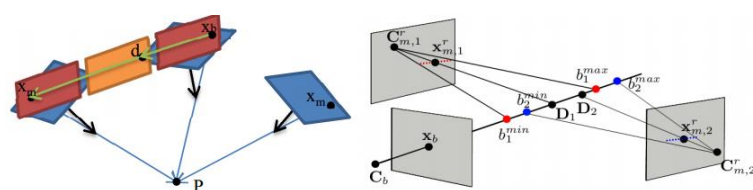


圖 2-7、多重模型一致性檢驗示意圖(Wenzel et al., 2013b)

Wenzel et al. (2013b)介紹影像密匹配軟體 SURE，密匹配部分使用了前述方法，該軟體除了產製點雲，亦可產製 mesh 及正射影像。其運作流程如圖 2-8 所示，輸入影像及方位參數後即可解算點雲，根據需求可再進一步產生 mesh 或正射影像。SURE 是一套發展成熟的高密度匹配軟體，本研究工作使用此軟體進行影像密匹配並產製三維點雲。

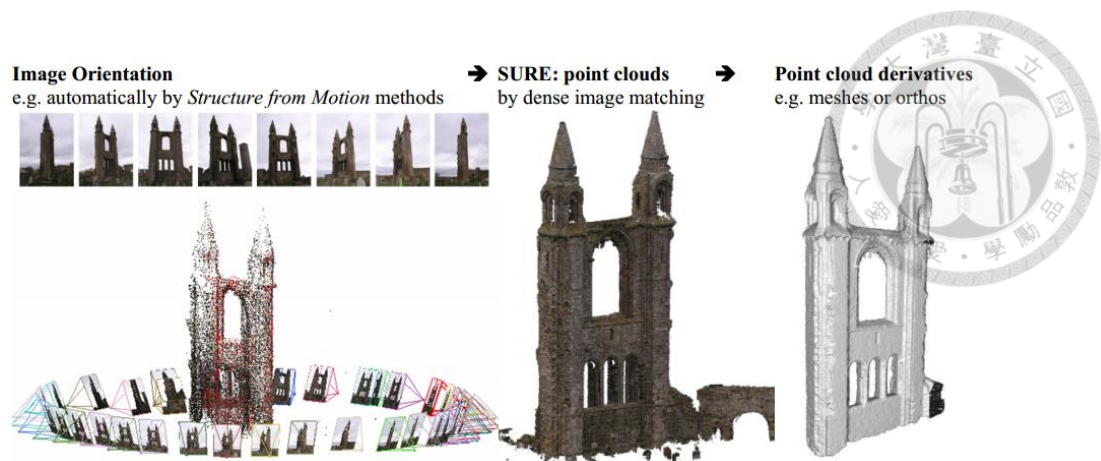


圖 2-8、SURE 運作流程示意圖(Wenzel et al., 2013b)

於場景投射人工紋理，是弱紋理區進行三維重建的基本概念，在立體匹配尚未發展成熟時，結構光系統即是利用投影機投射特定圖徵，以編碼方式找到對應共軛點。立體匹配不對人工紋理建立獨立編碼，而是以影像中像素的灰階值透過匹配成本值計算、匹配成本值加總、視差計算/優化即視差精化等步驟(Scharstein and Szeliski, 2002)，計算像對逐像元的視差值。

Wenzel et al. (2013a)放置 3 台投影機投射紋理於 35 cm 高的標的物“Testy“，以單眼數位相機 Nikon D7000 環狀拍攝 46 張影像，再用 SURE 產製高密度點雲，如圖 2-9，左圖為 GOM Atos 1 結構光系統產製的三維模型，右圖為此文獻影像密匹配成果與 GOM Atos 1 的差值，均小於 1 mm (圖 2-9)。

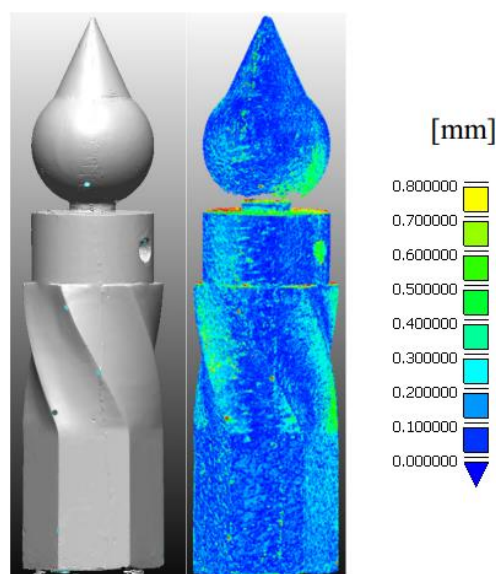


圖 2-9、“Testy”成果(Wenzel et al., 2013b)

Wenzel et al. (2012)利用輕便的 Microsoft Kinect 投射近紅外(near-infrared, NIR)雷射人工紋理(如圖 2-10)，該紋理是由有不同大小斑點組成的虛擬隨機圖徵(如圖 2-11)，使用近紅外波段的優點為白天於室外進行投影時不易受太陽光影響。將 Kinect 和 5 台相機(含 4 台 NIR 相機及 1 台 RGB 相機裝設於一 7.5×7.5 cm 的正方形鋁架以進行影像獲取(圖 2-12)，再利用 tSGM 與多模型一致性檢驗進行三維重建。採用這樣的設備及資料處理程序進行阿姆斯特丹一座宮殿的文化遺產資料保存，主要標的為該宮殿的山形牆面的浮雕(如圖 2-13)，耗時 9.5 天架設 2,000 站，共蒐集 10,000 張影像，圖 2-14 為部分重建成果，精度為 0.2 mm。



圖 2-10、Microsoft Kinect

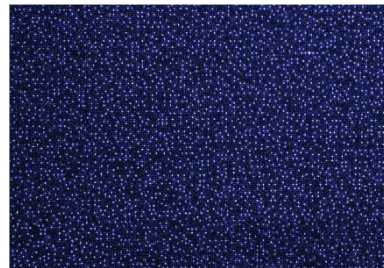


圖 2-11、Kinect 圖徵

(<https://goo.gl/M6tL7b>, last date
accessed: 30 June 2017)

(<https://goo.gl/gFSjp3>, last date accessed:
30 June 2017)



圖 2-12、設備配置(Wenzel et al., 2012)



圖 2-13、阿姆斯特丹宮殿山形牆面的
浮雕(Wenzel et al., 2012)

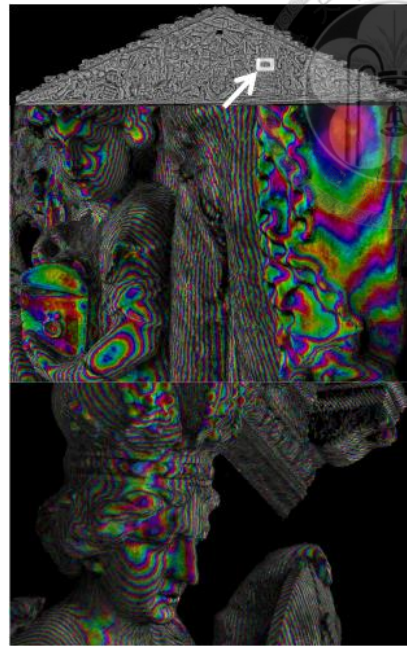


圖 2-14、部分點雲成果(Wenzel et al.,
2012)

2.3 小結

綜前所述，人工紋理輔助三維重建的作業模式，根據場景及設備會有不同的方法選擇。而本研究的目標是探討以較低成本且方便取得的設備：消費型投影機及相機，在最少的設備數量需求下進行場景三維重建的可能性。

本研究所使用的設備為 2 部投影機及 1 台數位單眼相機。投影機的光源及相機感測器之波段為 RGB，投影效果容易受到太陽光影響，不適用於白天室外投影；與輕便的 Microsoft Kinect 相比，本研究使用的投影機較笨重，體積亦較大。考量作業的便利性，本研究中的 2 個實驗標的均位於室內。另外，人工紋理分為匹配紋理及連結紋理，匹配紋理用於增加場景紋理豐富度，以利進行影像密匹配，而連結紋理則用於連接拍攝不同匹配紋理的影像，並進行方位解算。

第三章 研究方法



本研究的目標是以 2 部投影機及 1 台相機，進行低成本的三維重建。為達成此目標，本研究工作包含三個主要發展項目，一為設計可進行完整場景三維重建的紋理樣式，二為根據精度需求，反推進行攝影測量的必要參數及設備配置以獲取影像，三為設計搭配連結點及控制點標型的像點量測並以光束法解算影像方位參數。以下將詳述紋理設計、攝影規劃(包括決定攝影參數及設備配置)、像點量測及方位解算模式。

3.1 紋理設計

為了觀察不同紋理的密匹配成果，設計了一個小實驗，有 4 張圖像及 4 種文字(圖 3-1)作為紋理投射至場景，並分析其成果。圖像來源是 Middlebury 的實驗影像，文字分為中文及英文，其中中文字有 3 種不同大小字體，字體越小的意義為紋理密集度越大。每種紋理均拍攝一組實驗影像對，表 3-1 列出了所拍攝的影像。利用 VisualSfM (Wu, 2011)進行方位解算，再用 SURE 獲取點雲，圖 3-2 及圖 3-3 為場景點雲，文字紋理的完整性比圖像紋理高且點雲數量也較多，文字紋理部分，中文 24 及中文 18 的紋理上有些許空洞且中文 24 的空洞比中文 18 多，就中文字而言，字體越小，密及度越高，整體的重建完整性較高，但是點雲數量並不一定較多，點雲數量多，表示越多的像元找到匹配點，而造成空洞的主要原因是匹配錯誤。英文文字的密集度比中文字低，但匹配的完整性比中文 24 高，以文字而言，密集度雖然會影響成果，但也不一定是越密越好。圖像紋理中，Moebius 的完整性最差，點雲數量也越低，有需多匹配錯誤的點，另外三幅圖像的點雲成果對照獲取的影像可發現，有空洞的區域皆是對應到圖像紋理本來的邊緣部分(表 3-1)。

投影紋理於場景輔助低紋理區三維重建是核心的方法，如果欲以立體匹配進行三維重建，投射的紋理內容會影像匹配成果。根據實驗成果，文字紋理已可進行完整的三維重建，但是文字紋理的文字大小不容易進行量化分析，且每個字的密度

都不同，為了方便進行量化分析且紋理每個區塊要有一致的隨機性，因此本研究採用結構光系統中的一種紋理類型：虛擬陣列(pseudo-random array)，設計可進行場景重建的紋理。

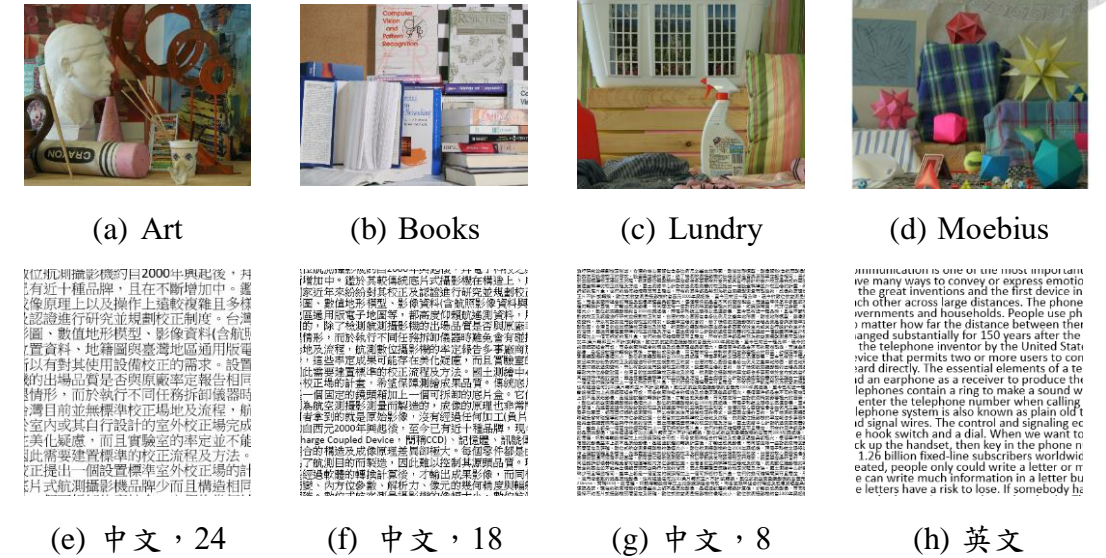


圖 3-1、紋理示意圖

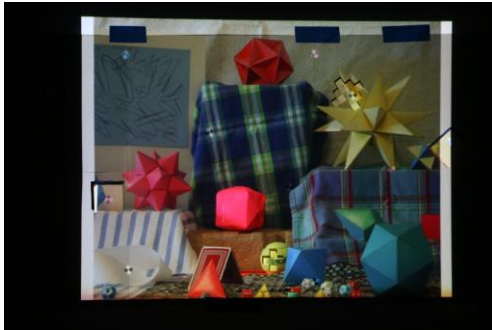
表 3-1、影像獲取

Art	
Books	

Lundry



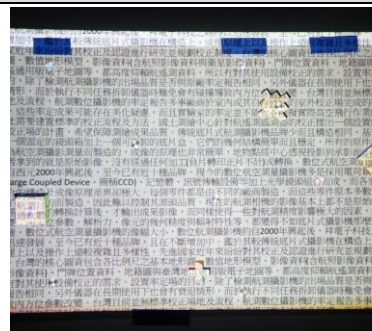
Moebius



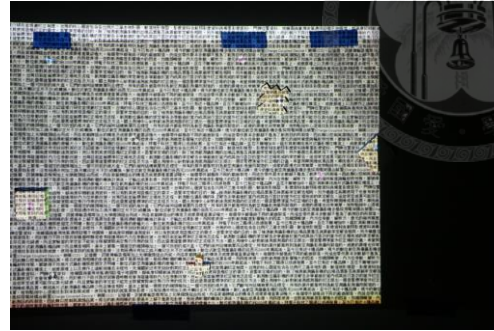
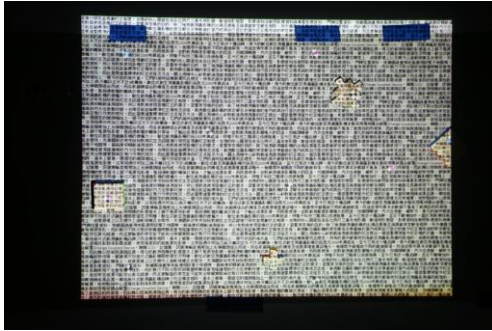
中文，24



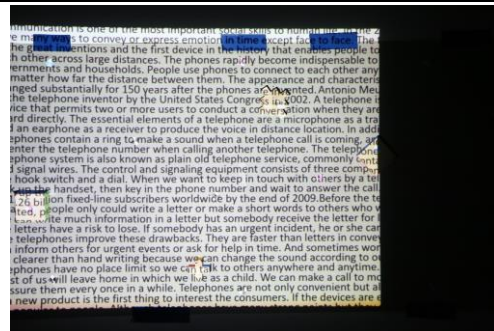
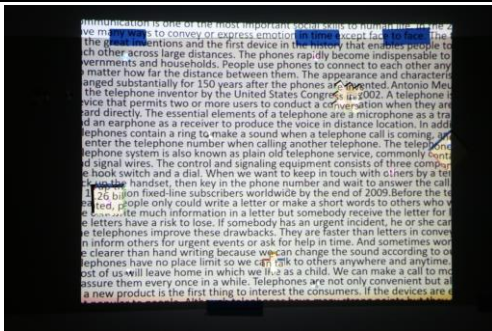
中文，18



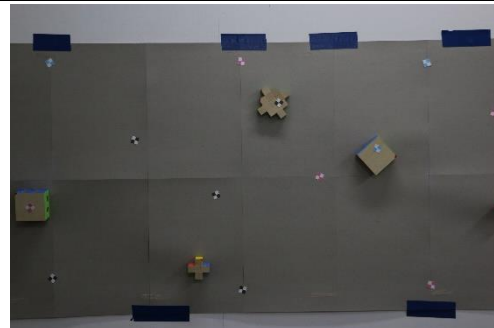
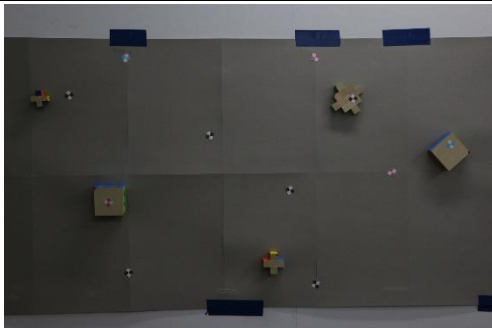
中文，8



英文



原場景紋理



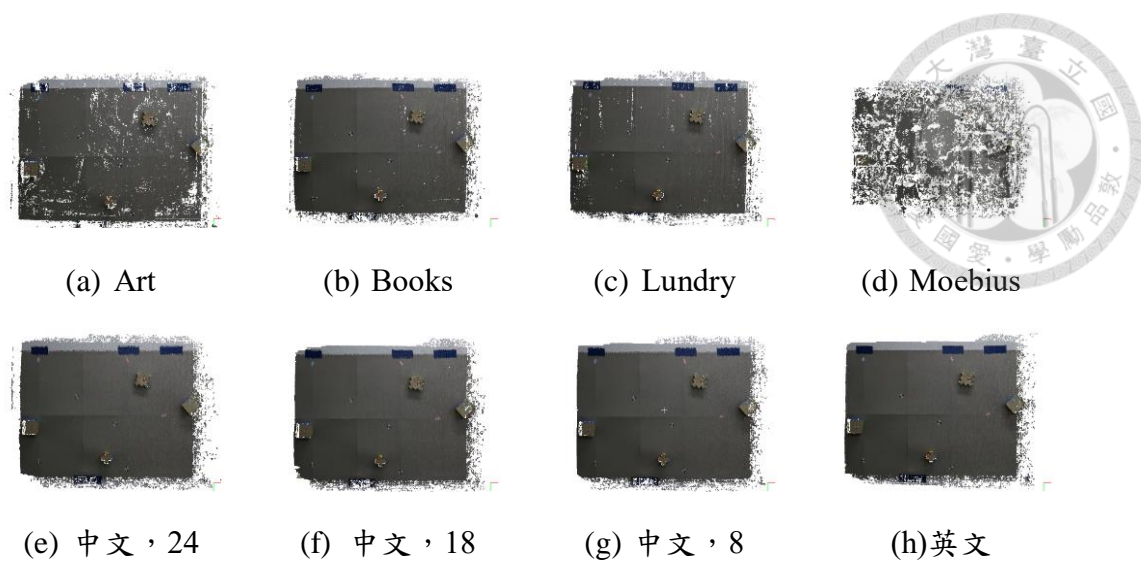


圖 3-2、點雲成果



圖 3-3、局部放大

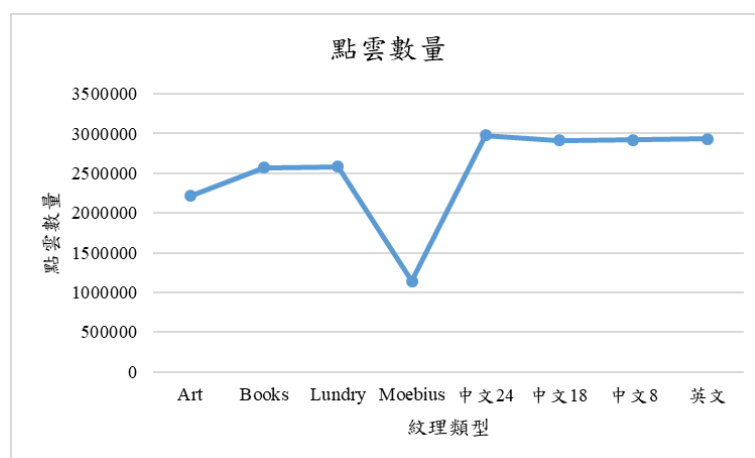


圖 3-4、點雲數量

實驗使用的投影機之標準解析度為 1024×768，根據此解析度設定整體紋理影像的大小為 1024×768。人工紋理分為兩部分，一為增加場景或物件紋理豐富度的匹配紋理，另一為連結相鄰區段間的連結紋理。投影機的投影範圍有限無法完全涵蓋場景，若要完整重建場景，需移動投影機改變匹配紋理的投射範圍，但是匹配紋理移動後就無法與前一次投影的匹配紋理連結，對場景而言，改變匹配紋理的投影範圍，就是改變場景紋理，對於只拍攝匹配紋理的影像，拍攝不同紋理的像對是無法拼接的，因此連結紋理的目的是在拍攝不同紋理的像對之間提供連結點。

3.1.1 匹配紋理

匹配紋理的設計採用 MacWilliams and Sloane (1976)提出的虛擬隨機陣，該方法產製的虛擬陣列的每個單元都是獨立的，符合前述的紋理每個區塊都要有相似的隨機性。產製虛擬隨機陣列前，需先取得虛擬隨機序列(pseudo-random sequence)。一個階數為 m 且有 $GF(q)$ 元素的本原多項式(primitive polynomial) $h(x) = x^m + h_{m-1}x^{m-1} + \dots + h_1x + h_0$ 可得到週期為 $q^m - 1$ 的虛擬隨機序列。表 3-2 列出部分的本原多項式，每個本原多項式 $h(x)$ 可以定義一個回饋位移暫存器(feedback shift register)(如圖 3-5)，該回饋位移暫存器有 m 個盒子 a_{i+m-1}, \dots, a_i ，每個盒子的值為 $GF(q)$ 的元素，產生的數值為 $a_{i+m} = -h_{m-1}a_{i+m-1} - h_{m-2}a_{i+m-2} - \dots - h_1a_{i+1} - h_0a_i$ 。例如， $q = 4$ ， $m = 2$ ，且 $h(x) = x^2 + x + \omega$ ，透過回饋位移暫存器可以得到週期為 15 的序列「0 1 1 ω^2 1 0 ω ω 1 ω 0 ω^2 ω^2 ω ω^2 」。

表 3-2、本原多項式(over $GF(q)$) (MacWilliams and Sloane, 1976)

deg	$q = 3$	$q = 4$	$q = 8$
1	$x + 1$	$x + \omega$	$x + \alpha$
2	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x + \omega$	$x^2 + \alpha x + \alpha$
3	$x^3 + 2x + 1$	$x^3 + x^2 + x + \omega$	$x^3 + x + \alpha$
4	$x^4 + x + 1$	$x^4 + x^2 + \omega x + \omega^2$	$x^4 + x + \alpha^3$
5	$x^5 + 2x + 1$	$x^5 + x + \omega$	$x^5 + x^2 + x + \alpha^3$
6	$x^6 + x + 1$	$x^6 + x^2 + x + \omega$	$x^6 + x + \alpha^3$
7	$x^7 + x^6 + x^4 + 1$	$x^7 + x^2 + \omega x + \omega^2$	$x^7 + x^2 + \alpha x + \alpha^3$
8	$x^8 + x^5 + 2$	$x^8 + x^3 + x + \omega$	
9	$x^9 + x^7 + x^5 + 1$	$x^9 + x^2 + x + \omega$	
10	$x^{10} + x^9 + x^7 + 2$	$x^{10} + x^3 + \omega(x^2 + x + 1)$	

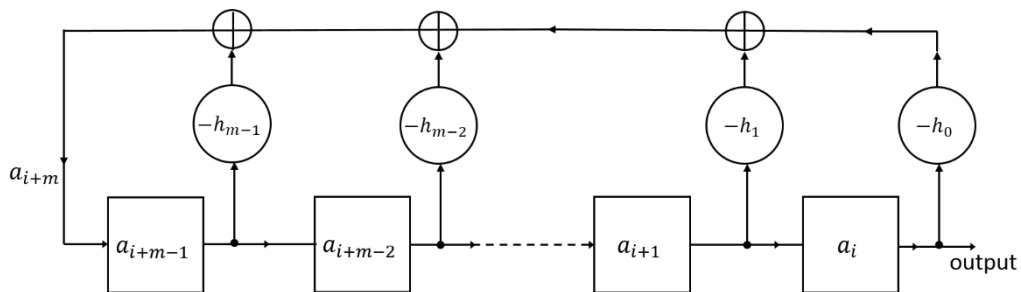


圖 3-5、由本原多項式 $h(x)$ 定義的回饋位移暫存器(MacWilliams and Sloane, 1976)

利用中國餘數定理 (Chinese remainder theorem) 將虛擬隨機序列 $a = a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ 轉變為 $n_1 \times n_2$ 的虛擬隨機陣列 b 。序列 a 元素的下標，分別除以 n_1 和 n_2 就可以得到在 b 陣列的列與行位置(式(3-1))。



$$b = \begin{bmatrix} b_{00} & b_{01} & \dots & b_{0,n_2-1} \\ b_{10} & b_{11} & \dots & b_{1,n_2-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n_1-1,0} & \dots & \dots & b_{n_1-1,n_2-1} \end{bmatrix}$$

$$a_0 = b_{00}, a_1 = b_{11}, a_2 = b_{22}, \dots, a_i = b_{i_1 i_2} \quad (3-1)$$





其中

$$i \equiv i_1 \pmod{n_1}, 0 \leq i_1 \leq n_1$$

$$i \equiv i_2 \pmod{n_2}, 0 \leq i_2 \leq n_2$$

人工紋理影像的大小為 $768 \times 1024 = 786,432$ ，使用 4 種不同灰階(表 3-3)，所以 $q = 4$ ，選擇 $m = 10$ ，則 $h(x) = x^{10} + x^3 + \omega(x^2 + x + 1)$ ，週期為 $4^{10} - 1 = 1,048,575$ ，製作成 1023×1025 的陣列再擷取 768×1024 作為匹配紋理(圖 3-6 (a))。

表 3-3、匹配紋理單元顏色

白	灰階 1	灰階 2	黑
			

3.1.2 連結紋理

由於拍攝不同匹配紋理的像對在影像上無共軛點，因此連結紋理的目的是提供拍攝不同匹配紋理像對連結點。連結點特徵的設計概念為 1 個大正方形切成 4 個大小相等的小正方形，以左上及右下的小正方形是否填入顏色，設計了 3 種連結點幾何圖樣(如表 3-5)，並以大正方形中心做連結點。搭配紅、綠、藍、黑及洋紅 5 種顏色(如表 3-4)，可組成成分布於 1024×768 影像的 18 個連結點，如圖 3-6(b) 所示。

表 3-4、連結點顏色









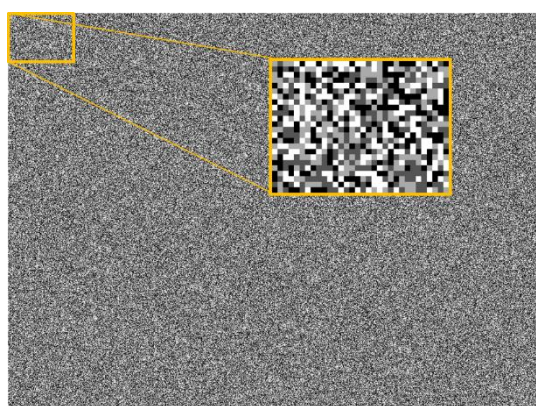
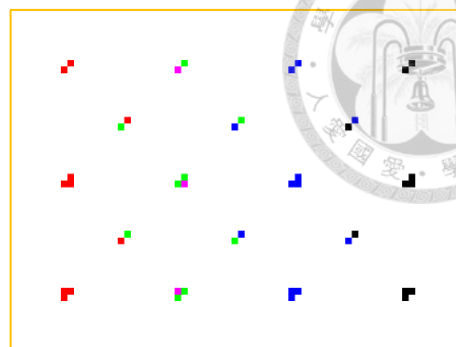
紅	綠	藍	黑	洋紅
				

表 3-5、連結點圖樣

圖樣 1	圖樣 2	圖樣 3
		



(a) 匹配紋理



(b) 連結紋理

圖 3-6、人工紋理

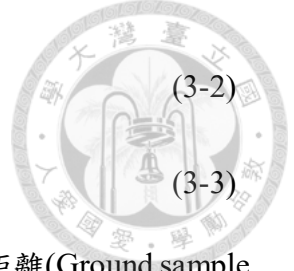
3.2 攝影規劃

進行攝影測量工作最重要的項目就是攝影規劃，重建場景除了考量完整性和視覺效果，也要達到一定的精度才能進行測量作業。本研究的工作規劃分為拍攝規劃及設備配置。攝影測量中交會幾何影響成果精度，為了達到相應品質，從預期的精度，可以回推進行拍攝時需要的參數，包括像主距、物距及像基距。另外，成像的清晰度會影響像點匹配品質，因此拍攝規劃從景深原理推求相機的最小 f-number 以確保成像清晰。設備配置主要對象為相機及投影機，相機的擺設位置和站數是根據物距、像基距及相對應的場景大小而定。為了避免遮擋，投影機須放置於相機前方，最多次的投影次數為一個像對對應一次投影，然而，本研究使用的投影機的寬度大於像基距，因此投影機可架設的最多次數和相機站數有關。

3.2.1 計算攝影參數

進行影像獲取前，需已知像主距、物距、像基距及 f-number，由視差及景深原理，可以推求這 4 個參數。

如圖 3-7 所示，物點 A 之物距為 $Z = H - h_A$ ，A 點的視差為 d ， f 為像主距， B 為像基距， p 為像元大小，則根據相似三角形可得式(3-2)，對 Z 偏微分後可得物距方向精度 σ_Z 與視差精度 σ_d 之關係如式(3-3)。



$$-Z = \frac{f \times B}{d \times p} \rightarrow d = -\frac{f \times B}{Z \times p} \quad (3-2)$$

$$\sigma_Z = \frac{p \times Z^2}{f \times B} \sigma_d \quad (3-3)$$

另外，由成像幾何可得物距 Z 、像主距 f 、像元大小 p 與地面取樣距離(Ground sample distance, GSD)的關係式為式(3-4)。

$$Z = \frac{f \times GSD}{p} \quad (3-4)$$

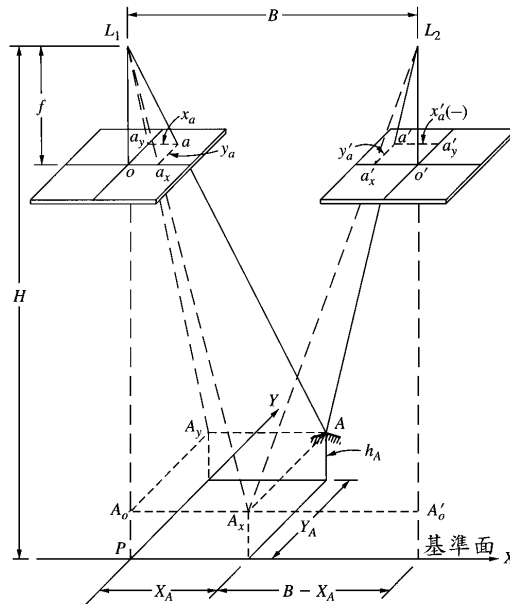


圖 3-7、重疊像對的幾何(Wolf et al., 2014)

將(3-4)帶入(3-3)，可得像主距 f

$$f = \frac{\sigma_Z \times p \times B}{GSD^2 \times \sigma_d} = \frac{\sigma_Z \times p \times C \times GSD \times (1-a)}{GSD^2 \times \sigma_d} = \frac{\sigma_Z \times p \times C \times (1-a)}{GSD \times \sigma_d} \quad (3-5)$$

其中， a 為影像重疊率， C 為影像行數，像基距 $B = C \times GSD \times (1 - a)$ 。重新排列式(3-3)可以求得另一物距方程式(3-6)。將像主距 f 計算式(3-5)帶入式(3-6)，可以得物距 Z 以式(3-7)表示。

$$Z = \sqrt{f \times B \times \frac{\sigma_Z}{p \times \sigma_d}} \quad (3-6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\sigma_Z \times p \times C \times (1-a)}{GSD \times \sigma_d} \times C \times GSD \times (1-a) \times \frac{\sigma_Z}{p \times \sigma_d}} = \sqrt{\frac{\sigma_Z \times C^2 \times (1-a)^2}{\sigma_d^2}} \times \sigma_Z = \frac{\sigma_Z \times C \times (1-a)}{\sigma_d} \quad (3-7)$$

一般進行密匹配，相鄰影像的重疊率應至少達 80% (Wenzel et al., 2013a)，如



果 σ_z 、 C 及 σ_d 不變，重疊率 80%時會有最大的物距。

相機對焦於某一點時，該點於影像上可以清晰成像，其他位置的點於影像上會形成一圓盤(disk)，離對焦的點越遠，形成的圓盤越大。這個圓形稱為 blur spot，當 blur spot 夠小時，就可以將其視為一個點，在物空間中對焦物點沿物距方向前後兩側則有一個可接受的清晰度區間，及稱為景深(depth of field, DoF)。可接受的 blur spot 直徑則稱為可接受的(acceptable)模糊圈(circle of confusion, CoC)。如圖 3-8 所示， Z 為物距， f 為像距， f' 為焦距， c 為模糊圈直徑， d 為透鏡孔徑， z_n 為景深範圍的 near point， z_f 為景深範圍的 far point。其中， $\frac{1}{Z} + \frac{1}{f} = \frac{1}{f'}$ ， $\frac{1}{Z_n} + \frac{1}{f_n} = \frac{1}{f'}$ ， $\frac{1}{Z_f} + \frac{1}{f_f} = \frac{1}{f'}$ 。

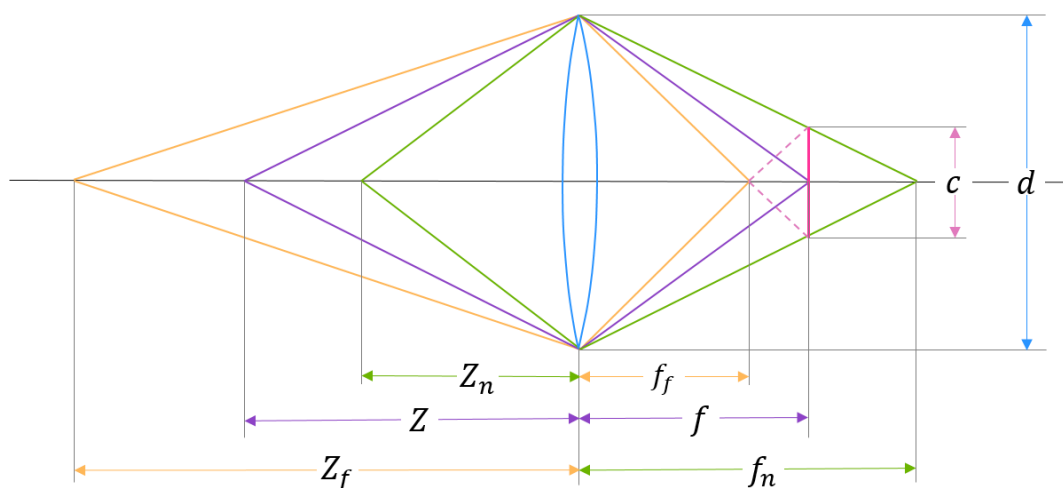


圖 3-8、景深示意圖

根據相似三角形可得式(3-8)及(3-9)。焦距和光圈比值稱為 f-number，在數位相機上光圈大小通常以 f-number 表示，如果焦距固定，則光圈越小 f-number 越大，景深也越大。令 N 為 f-number，將 $N = \frac{f'}{d}$ 帶入式(3-8)及(3-9)得式(3-10)(3-11)，再將式(3-12)帶入，即可得景深範圍方程式(3-13)(3-14)。整理式(3-13)(3-14)，可得 f-number 計算式(3-15)。

$$\frac{f_n - f}{f_n} = \frac{c}{d} \quad (3-8)$$



$$\frac{f-f_f}{f_f} = \frac{c}{d} \quad (3-9)$$

$$f_n = \frac{f' \times f}{f' - Nc} \quad (3-10)$$

$$f_f = \frac{f' \times f}{f' + Nc} \quad (3-11)$$

$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{f} = \frac{1}{f'} \rightarrow f = \frac{Z \times f'}{Z - f'} \quad (3-12)$$

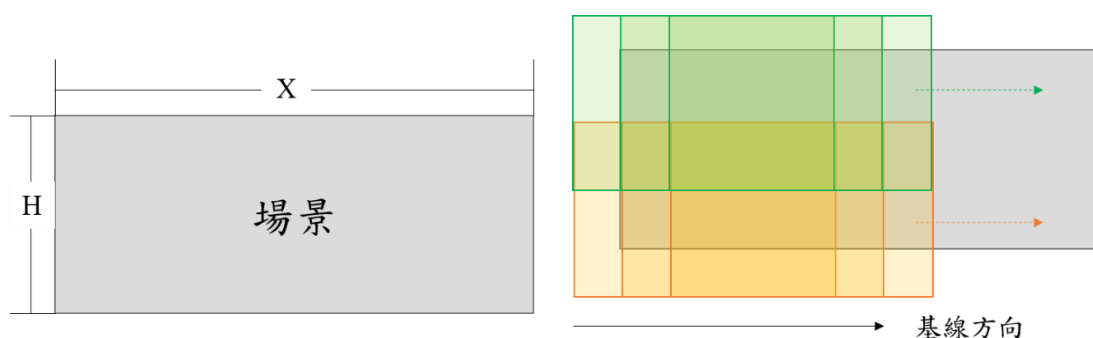
$$Z_n = \frac{Z \times f'^2}{f'^2 + N \times c \times (Z - f')} \quad (3-13)$$

$$Z_f = \frac{Z \times f'^2}{f'^2 - N \times c \times (Z - f')} \quad (3-14)$$

$$N = \frac{f'^2}{c} \frac{Z_f - Z_n}{Z_f \times (Z_n - f') + Z_n \times (Z_f - f')} \approx \frac{f'^2}{c} \frac{Z_f - Z_n}{2 \times Z_f \times Z_n} \quad (3-15)$$

3.2.2 設備配置

如圖 3-9 (a)，假設場景寬度為 X ，高度為 H ，沿場景寬度方向即為拍攝影像之基線方向， X 決定沿基線方向需要幾張影像才能涵蓋場景。另外，一張影像可拍攝高度有限，因此沿場景高度 H 方向上也需要計算需要幾張影像，同一高度拍攝的影像稱為帶狀區域，類似航空攝影測量中之航帶概念，圖 3-9(b) 中黃色及綠色長方形表示影像對應場景的涵蓋範圍，同一顏色表示拍攝高度相同，為同一帶狀區域。



(a) 場景示意圖

(b) 帶狀區域示意圖

圖 3-9、場景與相片涵蓋

假設基線方向上的影像重疊率為 a ，影像的行數為 C ，則像基距 $B = C \times GSD \times (1 - a)$ ，相機站數 S_c 如式 (3-16)：($\lceil \quad \rceil$ 表示上取整函數)



$$S_c = \left\lceil \frac{X-C \times GSD \times a}{B} + 2 \right\rceil \quad (3-16)$$

假設帶狀區域間的之重疊率為 b ，影像的列數為 R ，則帶狀區域數量如式(3-17)。

$$S_h = \left\lceil \frac{H-R \times GSD}{R \times GSD \times (1-b)} \right\rceil + 1 \quad (3-17)$$

假設投影機寬度為 W ，投影範圍 W_p ，投影機站數 S_p ： $\lfloor \quad \rfloor$ 表示下取整函數)

$$S_{pmin} = \left\lceil \frac{W}{W_p} \right\rceil, S_{pmax} = \left\lceil \frac{(S_c-1) \times B}{W} \right\rceil \quad (3-18)$$

3.3 像點量測

像點量測分為兩部分，一為連結點像點量測，另一為控制點與檢核點像點量測。控制點及檢核點之像點必須量測標型中心，因為其對應於控制點之物空間坐標；相對而言，連結點僅強調共軛對應，所以不一定要量測標型中心，只要共軛像點對應同一物點即可。控制點與檢核點的標型如圖 3-10 所示，標型具有對稱特性，點的位置在標型中心，因此控制點與檢核點的像點坐標可用質心方式計算。連結點為圖 3-6 (b) 中的 18 個特徵點，如表 3-5 所示，連結點的圖樣 2 和圖樣 3 不具有對稱性，無法用質心計算中心點，所以採用模板匹配(template matching)(Gonzalez et al., 2011)計算整數像元值，再利用最小二乘匹配精化至次像元。

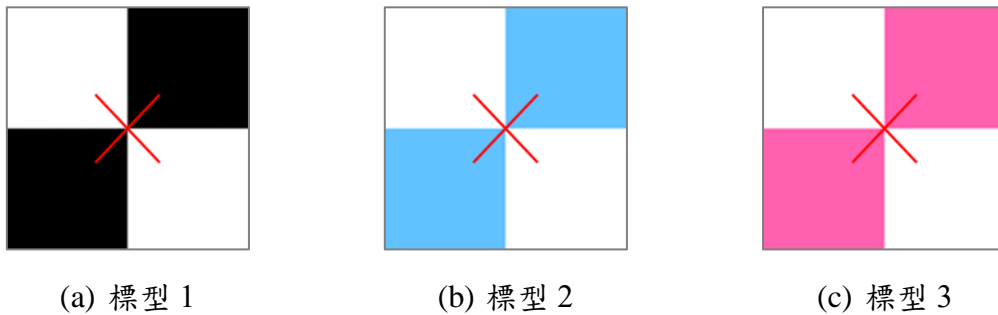


圖 3-10、控制點及檢核點標型



3.3.1 控制點與檢核點像點量測

如圖 3-10 所示，控制點與檢核點有三種顏色黑、藍、紅，點的位置在標型中心，該中心位置亦為標型質心，因此在影像上計算質心即可找出精確的控制點及檢核點像點。質心公式為式(3-19) (Gonzalez et al., 2011)，其中 g 為影像 (x,y) 位置之灰階值。

$$\begin{aligned} x_M &= \frac{\sum(x_i \cdot g_i)}{\sum(g_i)} \\ y_M &= \frac{\sum(y_i \cdot g_i)}{\sum(g_i)} \end{aligned} \quad (3-19)$$

3.3.2 連結點像點量測

模板匹配屬於影像匹配中的區域式匹配，如圖 3-11 所示，模板匹配是利用模板做為目標視窗，在搜尋視窗中透過演算法尋找最佳位置。本研究採用標準化互相關法(Normalized Cross Correlation Matching, NCCM)，計算模板和搜尋視窗的相關係數(式(3-20))，相關係數最大的位置即為最佳位置。本研究使用的 18 個特徵作為連結點，每個特徵可做一個如圖 3-12 的模板，利用模板進行影像匹配。

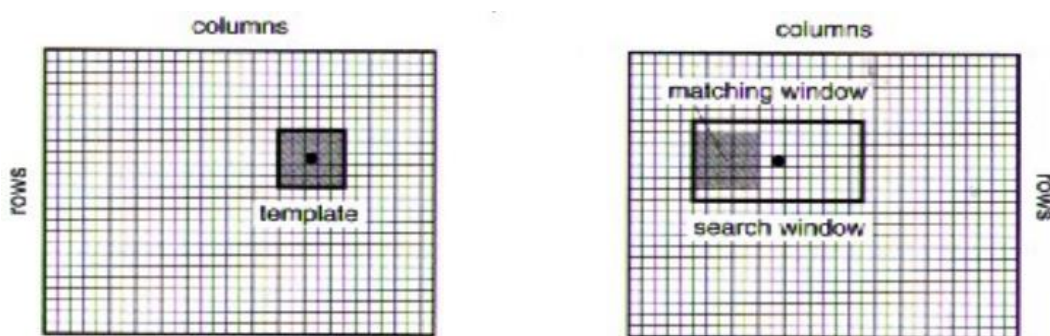


圖 3-11、標準化互相關法示意圖 (Schenk, 1999)

$$\rho = \frac{\sigma_{ts}}{\sigma_t \times \sigma_s} = \frac{\sum_{i,j} [G_t(i,j) - \bar{G}_t] \times [G_s(i,j) - \bar{G}_s]}{\sqrt{\sum_{i,j} [G_t(i,j) - \bar{G}_t]^2} \times \sqrt{\sum_{i,j} [G_s(i,j) - \bar{G}_s]^2}} \quad (3-20)$$



其中，

$G_t(i,j)$ ：模板之灰階值

$G_s(i,j)$ ：搜尋視窗之灰階值

$\overline{G_t}$ ：模板灰階平均值

$\overline{G_s}$ ：搜尋視窗灰階平均值

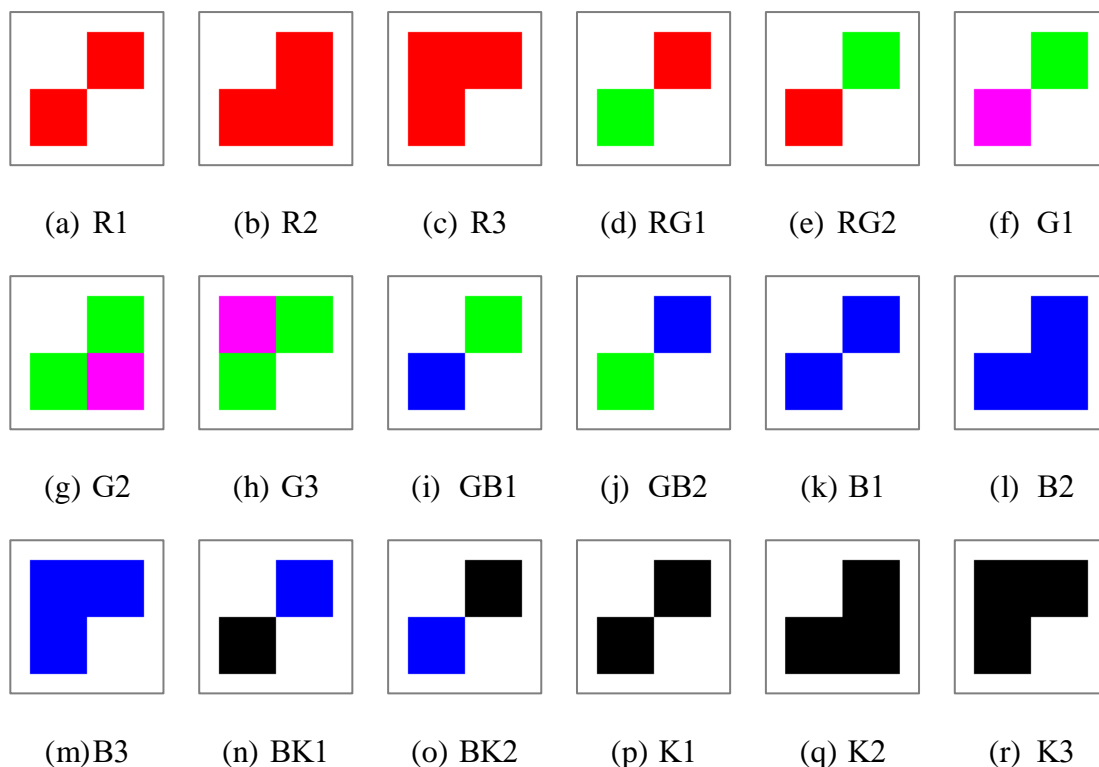


圖 3-12、連結點模板

崎嶇地表在外方位參數不同的左右像上會有幾何變形，包括旋轉和尺度等幾何因素，所以標視窗和搜尋視窗的大小並不一致，如圖 3-13 所示，而 NCCM 中目標視窗和搜尋視窗的大小一致，因此同一塊模板在不同張影像上的匹配位置會有些不同。

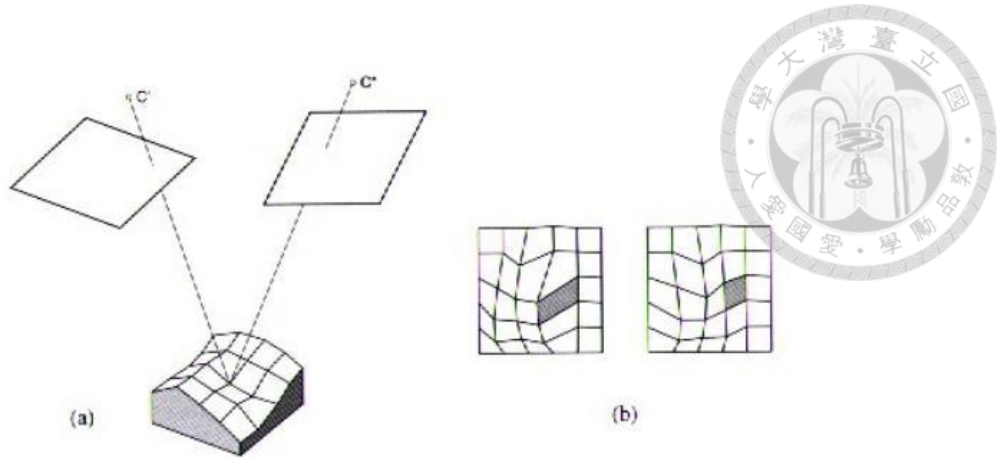


圖 3-13、幾何變形示意圖(Schenk, 1999)

最小二乘匹配法(Least-Squares Matching, LSM)，同時考慮輻射和幾何變異以強化匹配成果。最小二乘匹配法公式如下(Wolf et al., 2014)：

$$T(x, y) = h_0 + h_1 S(x', y') \quad (3-21)$$

(x, y) 和 (x', y') 分別為共軛點對在左像及右像的坐標(圖 3-14)； $T(x, y)$ 和 $S(x', y')$ 則為該坐標對應的灰階值；左右像相同點位的灰階值呈線性關係， h_0 為平移量， h_1 為尺度。最小二乘匹配法匹配的最終目的為左右像共軛點的灰階差異有最小值。

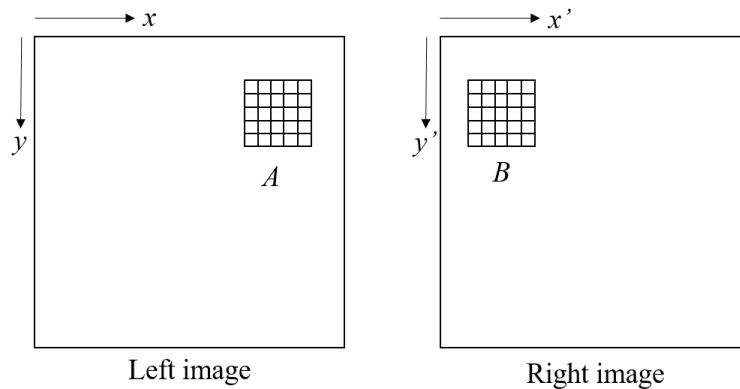


圖 3-14、左右像對應的視窗位置示意圖(改編自 Wolf et al., 2014)

本研究中，最小二乘匹配的左像及右像坐標轉換模式採用仿射轉換，仿射轉換包含了平移、尺度、旋轉及非正交角等幾何變形因素，如下式(3-22)

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned} \quad (3-22)$$

將式(3-22)代入式(3-21)，可得觀測方程式如下式(Wolf et al., 2014):

$$F = T(x, y) - [h_0 + h_1 S(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)] \quad (3-23)$$

平差模式為間接平差，如式(3-24)；式(3-25)則為最小二乘平差模式解算之參數估值及其他相應之精度指標。

$$e + A\xi = y, \quad e \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (3-24)$$

$$\begin{cases} \hat{\xi} = (A^T P A)^{-1} (A^T P y) \\ \hat{e} = y - A \hat{\xi} \\ \hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\hat{e}^T P \hat{e}}{d.o.f}} \\ \hat{\Sigma}_{\xi} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \end{cases} \quad (3-25)$$

此平差模式中，

A ：未知參數偏微分的係數矩陣(見附錄二)；

e ：誤差向量；

ξ ：未知參數向量，包括 h_0 、 h_1 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2

y ：為約化後像點觀測量向量；

σ_0 ：先驗單位權標準(偏)差；

P ：為觀測量之權矩陣；

ξ ：未知參數增量向量；

\hat{e} ：改正數向量；

$\hat{\sigma}_0$ ：後驗單位權標準(偏)差；

$\hat{\Sigma}_{\xi}$ ：未知參數最或是值後驗方差-協方差矩陣；

$d.o.f.$ ：多餘觀測數。

平差迭代計算直至獲致未知數收斂解，即可用式(3-22)計算右像像點坐標。



令 $\Sigma_{X'X'}$ 為右像坐標精化後之像點精度，

$$\Sigma_{X'X'} = \begin{bmatrix} \sigma_{x'}^2 & \sigma_{x'y'} \\ \sigma_{y'x'} & \sigma_{y'}^2 \end{bmatrix} = J_{FX} \hat{\Sigma}_{XX} J_{FX}^T \quad (3-26)$$

其中， $\hat{\Sigma}_{XX}$ 是由 $\hat{\Sigma}_{\xi}$ 所得的 a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 最或是值後驗方差-協方差矩陣；

$$J_{FX} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

3.4 方位解算模式

每一個相機擺站位置會拍攝 3 個種類的影像：匹配紋理、連結紋理及原場景紋理。匹配紋理用於影像密匹配，連結紋理用於連接模型並解算方位參數，原場景紋理是為了進行三維重建時賦予點雲原場景紋理。可進行方位求解及匹配的商業軟體很多，例如：PhotoScan 及 Pix4D 等，這些軟體可以進行解算的先決條件為輸入的影像對應相同紋理，然而，本研究所拍攝的影像內容的紋理是會變動的，而且同一位置拍攝的匹配紋理及連結紋理影像之間並無足夠共軛點，因此使用商業軟體無法同時解算所有影像。

本研究工作利用光束法解算方位參數，光束法的基本原理為共線條件，即曝光站、像點及物點在同一直線上，共線條件方程式如下(Wolf et al., 2014)：

$$\begin{cases} x_a - x_0 = -f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \\ y_a - y_0 = -f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \end{cases} \quad (3-28)$$

上式中， (x_a, y_a) 為像點坐標； (x_0, y_0) 為像主點偏移量； f 為像主距； (X_L, Y_L, Z_L) 為相機知物空間坐標； (X_A, Y_A, Z_A) 為像點對應的物點坐標； $m_{11} \sim m_{33}$ 為相機姿態角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 組成的旋轉矩陣 M 的元素。式(3-29)即為旋轉矩陣 M 。

$$\begin{aligned} M &= M_{\kappa} M_{\varphi} M_{\omega} \\ &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-29)$$

式(3-28)中的像點坐標系為攝影測量中慣用的像片坐標系(photo coordinate system)，定義為以像主點為原點，像片行數(column)方向為 x 軸正向，垂直向上方向為 y 軸方向(如圖 3-15 所示)；旋轉矩陣則為物空間至像片坐標系。SURE 定義的方位參數檔案中，旋轉矩陣為物空間至影像坐標系，其影像坐標系定義為以最左上角之像元中心為原點，沿行數方為 x 軸正向，沿列數(row)方向向下為 y 軸正向(如圖 3-16 所示)，y 軸方向和攝影測量慣用之像片坐標系 y 軸方向相反，因此共線條件方程式需修正為式(3-30)。

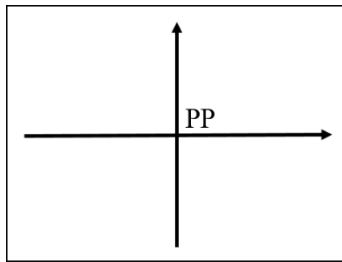


圖 3-15、像片坐標系示意圖

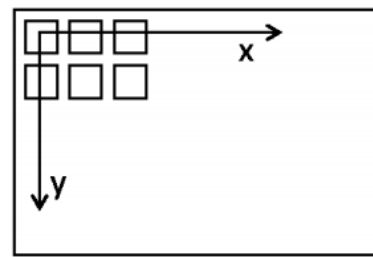


圖 3-16、SURE 之影像坐標系示意圖

(Camera Coordinate System, 2014)

$$\begin{cases} x_a - x_0 = f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \\ y_a - y_0 = f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \end{cases} \quad (3-30)$$

式(3-30)數學模式中包含許多不同型態且具有隨機性的資料，如內外方位參數、像點觀測量及控制點物點坐標。考量各變數的隨機誤差行為及大小及對平差解算的影響，將控制點及未知參數作為額外觀測條件，此平差模式稱為虛擬平差(unified least square adjustment)，如式(3-31)。透過誤差量調製以賦予各參數於平差模式中的角色，當給予參數相對顯著之誤差，表示該參數為未知參數；若給定參數之誤差不顯著，則視為常數；誤差介於兩者之間，表示該參數為觀測量。本研究中，像點為觀測量，控制點的物空間坐標則給予較高的權作為常數，外方位參數及其餘的物空間點則為未知數。

$$\begin{cases} B e_1 + A \xi = y_1, & e_1 \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P_1^{-1}) \\ e_2 + \xi = y_2, & e_2 \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P_2^{-1}) \end{cases} \quad (3-31)$$



式(3-31)之矩陣列式如下

$$\begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} \Delta = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

此平差模式簡化後之數學模式如式(3-33)；式(3-34)則為虛擬觀測最小二乘平差模式解算之參數估值及其它相應之精度指標：

$$\bar{B}e + \bar{A}\xi = \bar{y}, \quad e \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (3-33)$$

$$\begin{cases} \hat{\xi} = [A^T (BP_1^{-1}B^T)^{-1}A + P_2]^{-1} [A^T (BP_1^{-1}B^T)^{-1}y_1 + P_2y_2] \\ \hat{e} = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^{-1}B^T (BP_1^{-1}B^T)^{-1}(y_1 - A\hat{\xi}) \\ y_2 - \hat{\xi} \end{bmatrix} \\ \hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\hat{e}_1^T P_1 \hat{e}_1 + \hat{e}_2^T P_2 \hat{e}_2}{d.o.f.}} \\ \hat{\Sigma}_\xi = \hat{\sigma}_0^2 [A^T (BP_1^{-1}B^T)^{-1}A + P_2]^{-1} \end{cases} \quad (3-34)$$

此平差模式中，

B ：觀測量偏微分的係數矩陣(見附錄三)；

A ：未知參數偏微分的係數矩陣(見附錄三)；

e ：誤差向量；

ξ ：未知參數向量；

y_1, y_2 ：分別為像點觀測量及虛擬觀測量向量；

σ_0 ：先驗單位權標準(偏)差；

P_1, P_2 ：分別為觀測量及虛擬觀測量之權矩陣；

$\hat{\xi}$ ：未知參數增量向量；

\hat{e} ：改正數向量， \hat{e}_1, \hat{e}_2 分別為像點觀測量、虛擬觀測量之改正數向量；

$\hat{\sigma}_0$ ：後驗單位權標準(偏)差；

$\hat{\Sigma}_\xi$ ：未知參數最或是值後驗方差-協方差矩陣；

$d.o.f.$ ：多餘觀測數。

透過光束法之虛擬觀測平差數學模式，解算獲得外方位參數及物點之最或是值。

3.5 小結

綜合前述 3.1~3.4 小節的說明，本研究會製作適當的人工紋理，根據拍攝規劃及設備配置進行影像獲取，自動化量測控制點與檢核點像點後，使用光束法計算影像外方位參數，將方位參數資料輸出成 SURE 定義的方位參數檔案格式即可產製密點雲。



第四章 實驗及成果分析



為了驗證前述研究方法於實務應用之可行性，本論文工作設計了 3 個主要實驗，包含紋理密度影響探討以及場景 1 與場景 2 的三維重建。紋理密度實驗是探討以虛擬隨機陣列為基礎的匹配紋理進行三維重建的可行性，並以點雲數量、紋理單元成像大小及熵(Etropy)作為評估指標，提出適合場景重建的紋理的條件。場景 1 是一個人造的模擬場景，為了測試該場景是否為弱紋理區，先利用 PhotoScan 進行方位解算，再用 SURE 產製密點雲，其成果如圖 4-1 所示，許多區域有匹配錯誤或缺漏，需要以人工紋理增加場景紋理豐富度以進行三維重建。另外，場景 1 的實驗中，加入了模擬資料分析像點精化及控制點對光束法解算品質的影響。場景 2 為真實場景，利用所提出的研究方法探討真實工程場景重建的可行性。本章分為 4 節，詳述實驗設備與軟體、紋理密度、場景 1 及場景 2 的實驗成果。

表 4-1、實驗項目及相關內容

實驗名稱	內容
紋理密度	不同紋理密度成果分析 品質評估項目：點雲數量、積木特徵完整度、熵
場景 1	模擬資料分析 實際資料分析，品質評估項目：光束法與點雲檢核點誤差、積木特徵點雲完整度
場景 2	場景 2 重建 品質評估項目：光束法與點雲檢核點誤差、場景特徵誤差



圖 4-1、場景 1 原紋理匹配之點雲成果

4.1 實驗設備與軟體

本實驗採用的硬體設備有一台單眼相機 Canon EOS 70D 及兩部投影機 Epson EB-1860，另使用全測站 Trimble M3 DR 2”量測控制點及檢核點坐標，圖 4-2 為上述三種設備的示意圖。軟體部分，採用 SURE 產出密點雲，並以 Cloud Compare 展示點雲。



(1) Canon EOS 70D



(2) Epson EB-1860



(3) Trimble M3

圖 4-2、實驗設備

全測的測距理論精度為 $\sigma_{SD} = \pm\sqrt{3^2 + (2 \text{ ppm} \times SD(mm))^2}$ (Trimble, 2013)，量測控制點時最長的斜距不超過 4 公尺，為了驗證全測站量測實驗場景的測距品質，設計一實驗，如圖 4-3，以鐵捲尺設置一 4 公尺線段，重複觀測 10 次(如表 4-2)，獲取的水平距最或是值為 4.000 m，標準差為 $\pm 0.471 \text{ mm}$ ，如果視鐵捲尺設置一 4 公尺線段為真值，全測站量測水平距無顯著誤差，因此將測距的理論誤差中的常數誤差視為 0，以測距精度 $\sigma_{SD} = \pm\sqrt{(2 \text{ ppm} \times SD(mm))^2}$ 計算後續的控制點及檢核點量測精度。



圖 4-3、全測站檢測示意圖

表 4-2、全測站檢測紀錄

次序	距離 (m)	次序	距離 (m)
1	3.999	6	4.000
2	4.000	7	4.001
3	4.000	8	4.000
4	4.000	9	4.000
5	4.000	10	4.000



4.2 控制點與檢核點物空間坐標量測

如圖 4-4，假設在 A 點架設一全測站觀測 B 點，全測站量得之距離為斜距 SD ，天頂距為 α ，水平角為 β ，可得 B 點坐標(式(4-1)~式(4-3))。精度如式(4-4)(4-5)，由誤差傳播即可得每個點坐標 X 、 Y 及 Z 的精度(式(4-6))。

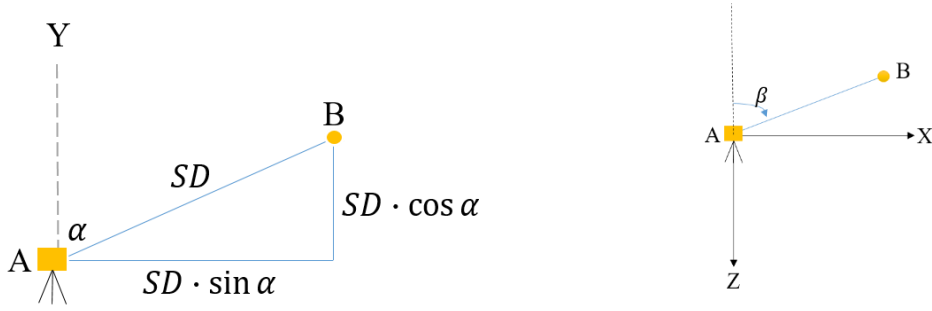


圖 4-4、全測站距離測量示意圖

$$X_B = X_A + SD \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad (4-1)$$

$$Y_B = Z_A + SD \cdot \cos \alpha \quad (4-2)$$

$$Z_B = -(Y_A + SD \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta) \quad (4-3)$$

$$\sigma_{SD} = \pm \sqrt{(2 \text{ ppm} \times SD(\text{mm}))^2} \quad (4-4)$$

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\beta} = \frac{2''}{3600} \times \frac{\pi}{180} \quad (4-5)$$

$$\Sigma_{pp} = J_{po} \Sigma_{oo} J_{po}^T \quad (4-6)$$

4.3 紋理密度

以立體匹配進行三維重建，影響重建完整性最主要因素為場景紋理，如果投射的紋理豐富度不足，仍會產生重建不完整的情形。本實驗欲探討隨機紋理的密度(豐富度)對三維重建的影響。匹配紋理的紋理單元形狀是正方形，當此紋理單元對應的像元數越多，代表其紋理密度越低。本實驗製作邊長 1、2、4、8、16 和 32 像元等 6 種不同大小紋理單元，邊長數值越大，紋理單元所占像元數越多，表示整體紋理密度越低。

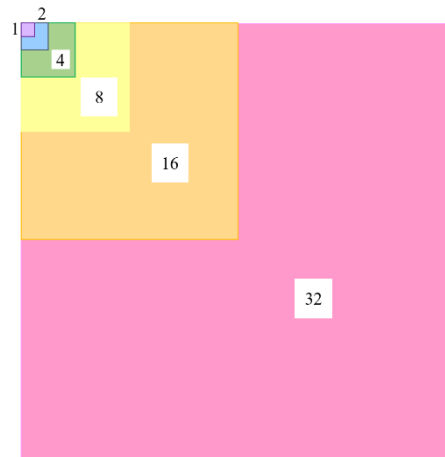
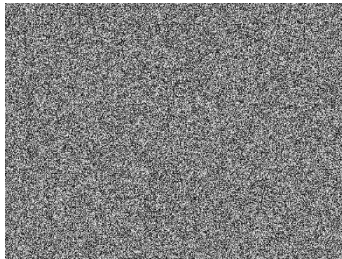
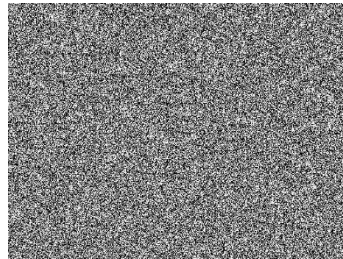


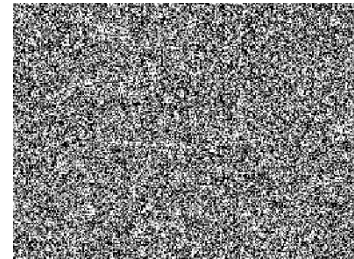
圖 4-5、邊長比例示意圖



(a) 邊長 1



(b) 邊長 2



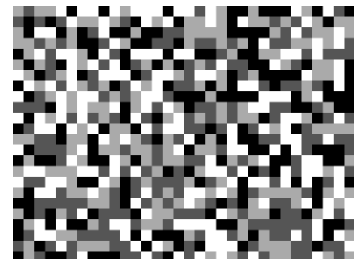
(c) 邊長 3



(d) 邊長 8



(e) 邊長 16



(f) 邊長 32

圖 4-6、不同密度匹配紋理

實驗場景是由數張低紋理紙板拼貼而成，並放置了 6 個大小和形狀相異的積木(圖 4-7)，紋理密度的實驗僅拍攝一像對進行測試，因此重建範圍為積木 1~積木 3。拍攝規劃及相機內方位參數率定成果如表 4-7 及表 4-8；表 4-3 為實驗影像。

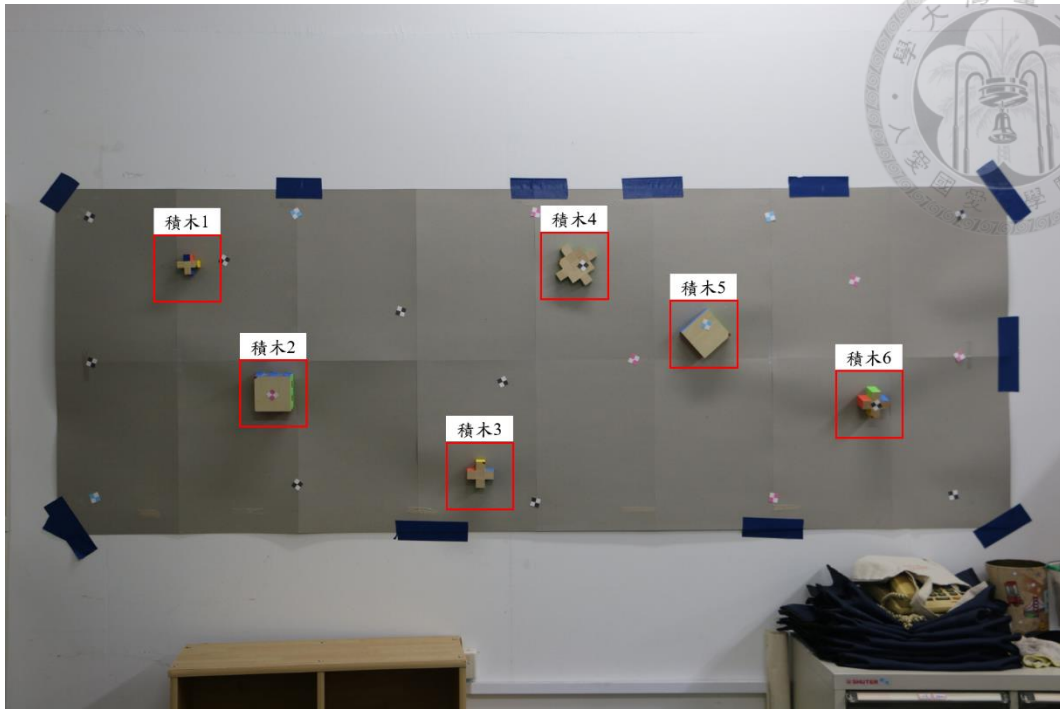






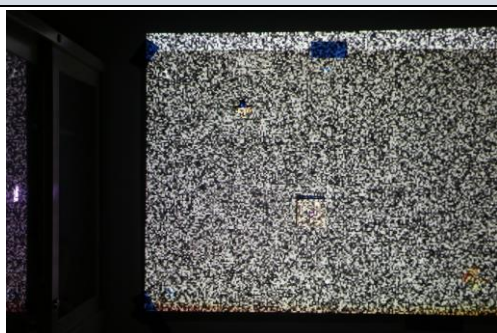
圖 4-7、積木編號示意圖

表 4-3、實驗影像

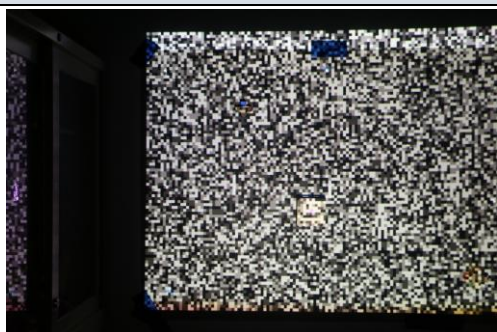
邊長 1	
	
邊長 2	
	



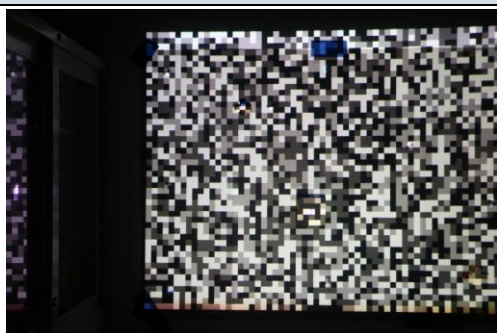
邊長 4



邊長 8



邊長 16



邊長 32



原場景紋理

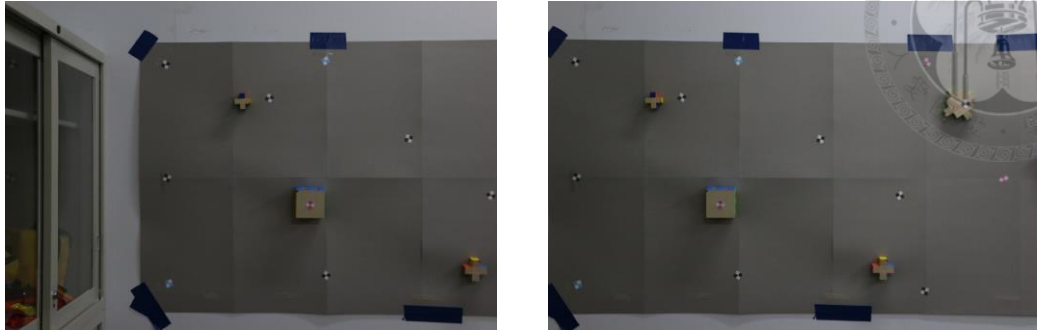
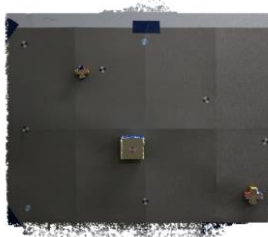


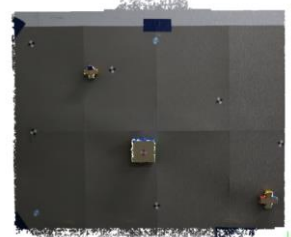
圖 4-8 為紋理單元邊長 1~32 的點雲成果，邊長 8 的成果已經有些許空洞，邊長 32 的空洞最多，這些點雲空洞並非完全無資料，有部分是因為匹配錯誤導致解算的物點不正確，從拍照視角看點雲時就會呈現空洞。從點雲數量(圖 4-9)可看到點雲數量最多的是邊長 4，邊長 1~邊長 4 雖然紋理的密度降低，但是點雲的數量增多，表示可找到共軛點的像元更多，邊長 16 及邊長 32 的點雲數量急遽下降，比對點雲成果，可知邊長 16 及邊長 32 不適合進行三維重建。



(a) 邊長 1



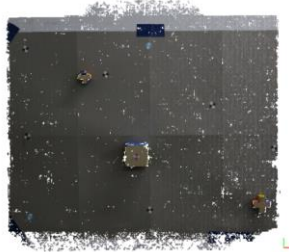
(b) 邊長 2



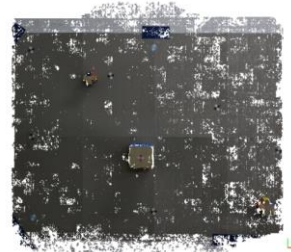
(c) 邊長 4



(d) 邊長 8



(e) 邊長 16



(f) 邊長 32

圖 4-8、點雲成果

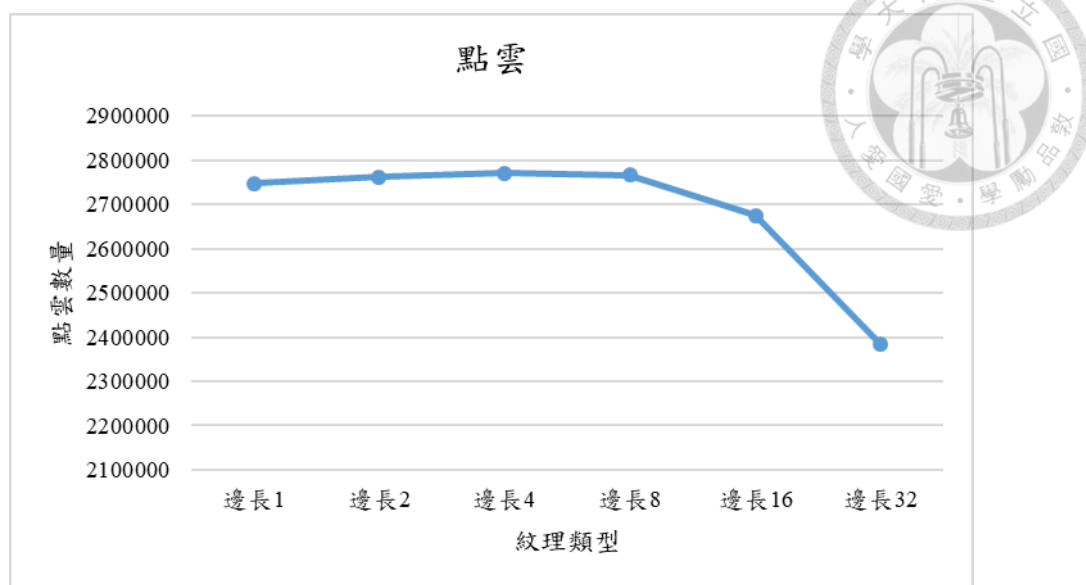
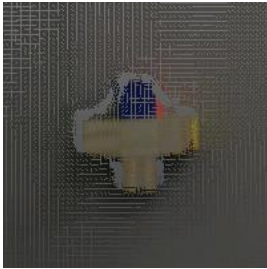
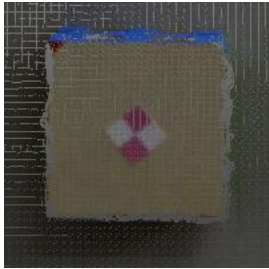
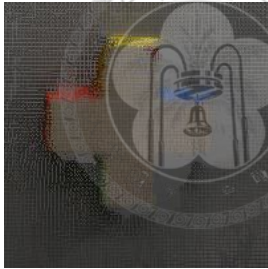
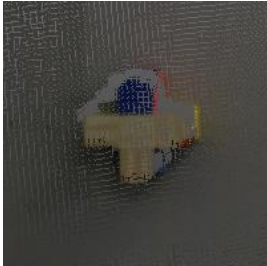

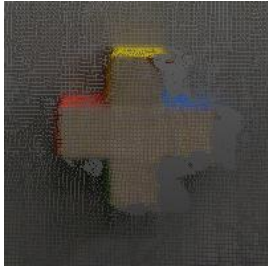
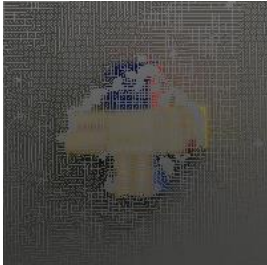



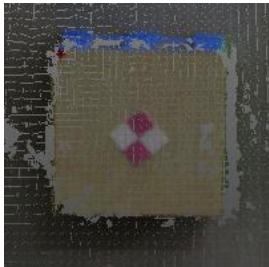



圖 4-9、點雲數量比較圖

表 4-4 列出了邊長 1~邊長 6 的積木的點雲成果，本實驗重建的範圍有 3 個積木塊，編號為積木 1~積木 3。從積木的成果可發現，在積木邊緣部分，因為紋理弱化其邊緣資訊，因此會有重建不完整的情形，邊長 8~邊長 16 可看到，紋理不只弱化了邊緣，較平坦部分也出現空洞。

表 4-4、積木點雲比較

紋理單元	積木 1	積木 2	積木 3
邊長 1			
邊長 2			

邊長 4			
邊長 8			
邊長 16			
邊長 32			

投影機物距為 155 cm 時，投影機一次可投影範圍約為 112×84 cm，匹配紋理大小為 1024×768 像元，可計算紋理上的 1 像元，投影至場景後大小約為 1.0938 mm，本實驗的工作規劃設計的地面取樣距離為 0.39 mm，邊長 1 的紋理的 1 個單元在紋理影像上為 1 像元，邊長 2 為 2 像元；以此類推，邊長 32 為 32 像元。由投影範圍可推估紋理影像上一個單元投影至場景後的物空間大小，再根據 GSD 可推算一個紋理單元在所拍攝的影像上的大小。表 4-5 即列出了紋理影像的一個紋理單元投影至場景再拍攝後的影像上的大小。

表 4-5、紋理影像單元對應所獲取的影像上的大小(像元)

紋理單元	邊長 1	邊長 2	邊長 4	邊長 8	邊長 16	邊長 32
像空間	2.8	5.6	11.2	22.4	44.9	89.7

為了量化紋理密度，本實驗使用熵做為評估指標。熵是量測紋理的亂度或是隨機性，亂度越高表示紋理越豐富，越有利於進行影像密匹配。式(4-7)為熵之公式 (Gonzalez et al., 2011)， L 為影像可記錄的最大灰階值， $p(z_i)$ 為影像中灰階的機率，在 256 灰階影像中，最大的熵為 8。

$$-\sum_{i=0}^L p(z_i) \log_2 p(z_i) \quad (4-7)$$

本實驗前述的紋理密度中，紋理的密度越低指紋理豐富度越低，亦表示紋理的亂度或隨機性越低。如圖 4-10，場景並非依單一平面，有一些凸出的特徵(例如，積木)，因此將實驗影像分成 9 個區塊，每個區塊取一小區作為代表該區的樣本。表 4-6 列出每個紋理密度 9 個樣本的熵，並計算每個紋理 9 個樣本的平均值，圖 4-11 為對應表 4-6 的圖表。從表 4-6 及圖 4-11 可以看到，熵的曲線變化和各紋理的點雲數量的變化是一致的，紋理邊長 4 的熵最大。值得討論的是紋理邊長 1 和紋理邊長 8 的成果，紋理邊長 8 的熵大於紋理邊長 1，但是點雲數量和點雲完整性卻相反，認為造成這現象的原因和灰階有關，仔細觀察表 4-3 可發現，紋理的密度越小，拍照獲取的紋理亮度越高，這是因為投影機投射紋理邊長 1 時，每個單元只有 1 像元的光源，紋理單元越大時，投影機投射的該單元的光源越多，影像上看起來也越亮，紋理邊長 8 的熵偏高的原因為每個紋理單元由較多的光源組成，而在未率定投影機投射的光源的情況下，投射出的每個光束的強度會有不一致現象，成像後就會有不同輻射值，且拍攝時的角度也會影響灰階值，在紋理影像上同一灰階，投射到場景不同位置時，因為投影機投影的變異量，會有不同的輻射值，在加上影像拍攝時，因為反射角度的關係，同樣顏色的地物成像於不同影像區域亦會有不同灰階值。在進行影像密匹配時，演算法可以抵抗由影像拍攝幾何造成灰階不一致的

現象，對於合適的紋理的評估除了考量熵，應考量紋理影像單元對應所獲取的影像上的大小。由本實驗結果，建議可進行三維重建的匹配紋理的熵應至少達 6.5 且紋理單元對應所獲取的影像上的大小應不超過 11.5 像元。

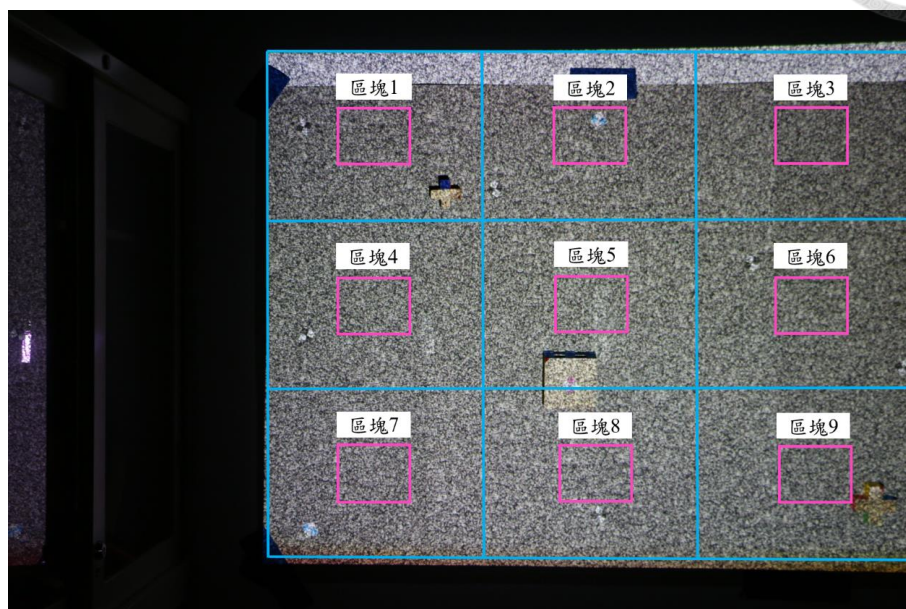
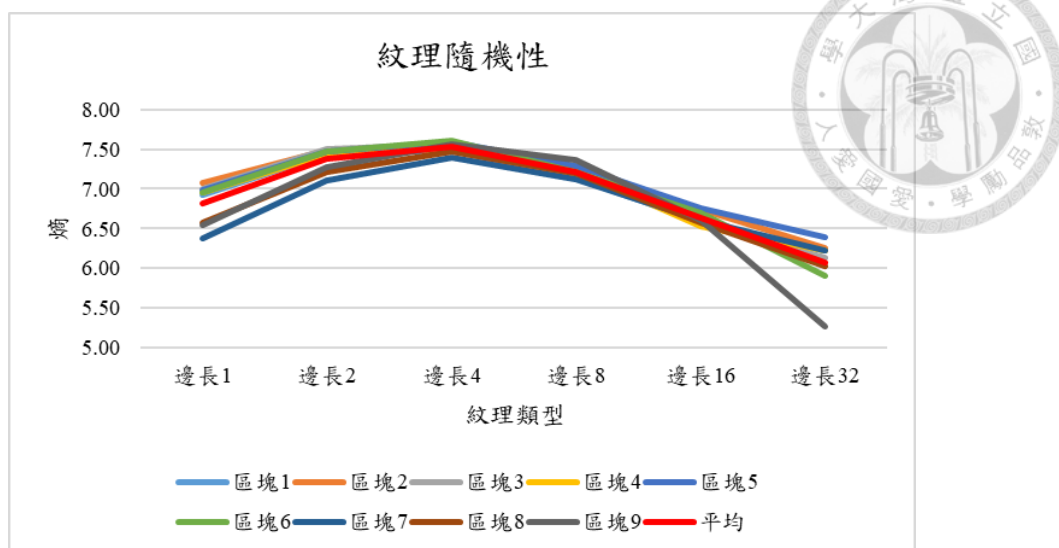


圖 4-10、紋理亂度分析樣本示意圖

表 4-6、紋理單元邊長 1~32 之 9 個區塊的熵

區塊編號	邊長 1	邊長 2	邊長 4	邊長 8	邊長 16	邊長 32
區塊 1	6.93	7.43	7.48	7.13	6.59	6.22
區塊 2	7.08	7.48	7.49	7.19	6.73	6.25
區塊 3	7.00	7.50	7.57	7.20	6.58	6.14
區塊 4	6.95	7.44	7.58	7.22	6.53	6.22
區塊 5	6.98	7.48	7.59	7.29	6.76	6.39
區塊 6	6.96	7.46	7.61	7.22	6.69	5.91
區塊 7	6.38	7.10	7.39	7.13	6.60	6.22
區塊 8	6.57	7.21	7.47	7.20	6.57	6.03
區塊 9	6.55	7.27	7.56	7.36	6.60	5.27
平均	6.82	7.38	7.53	7.21	6.63	6.07





4.4 場景 1

實驗地點為台大土木系館 2 樓儀器室，實驗場景是由數張低紋理紙板拼貼而成，並放置了六個大小和形狀相異的積木(圖 4-12)。該場景有 21 個特徵點，有 12 控制點，編號為 CP1~CP12，及 9 個檢核點，編號為 CK1~CK9。控制點及檢核點分布如圖 4-12 所示。下面將詳述控制點量測、影像獲取、模擬資料成果與分析及實際資料方位解算成果。



圖 4-12、實驗 1 場景



4.4.1 坐標系統

場景坐標系以全測站中心為坐標系原點，從場景到全測站的方向為 Z 軸，全測站天頂方向為 Y 軸，如圖 4-13 所示。

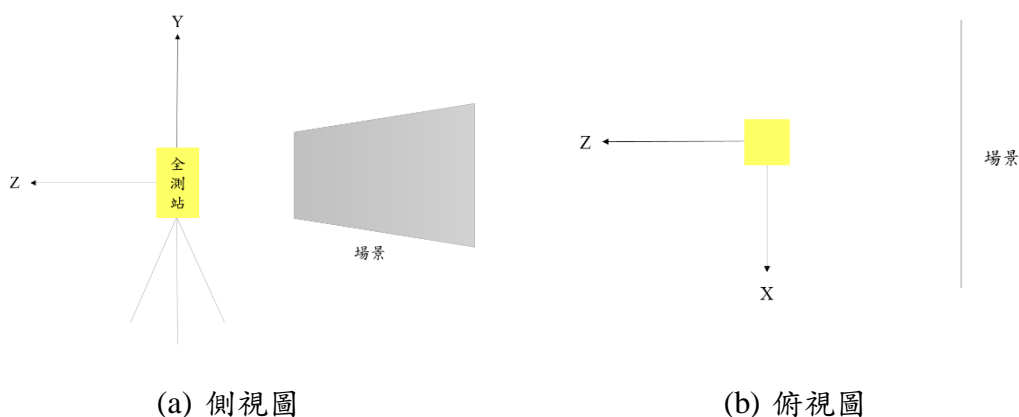


圖 4-13、場景 1 物空間坐標系

4.4.2 影像獲取

場景 1 的大小為 210×70 cm。根據研究方法提出的工作規劃方程式，可以得到表 4-7 的拍攝規劃。影像間的像基距約為 28.45 cm，場景寬度 210 cm，投影機寬度 34.5 cm，則相機站數為 6，投影機站數為 4。完整重建場景需要 6 個相機位置 S1~S6，投影機一次可投影範圍約為 112×84 cm，因此分別投影 2 次即可完全涵蓋該場景。投影機寬度(34.5 cm)大於像基距，若投影機擺設位置要在相機位置之內，投影機最多可擺設 4 個位置。根據前述，投影機擺設站數為 2-4 站，而本次實驗採用最密集的 4 站，每站會投射人工紋理及連結紋理(M1~M4, T1~T4)。每 2 個相鄰的相機位置，會拍攝至少一組人工紋理，而每三個相鄰的相機位置，會拍攝一組連結紋理。圖 4-14 為投影機與相機配置示意圖。圖 4-14 列出每個相機位置拍攝的實際影像。為了有效連結各像對，每次投影的連結紋理中至少要有 3 個連結文特徵同時被 3 張影像拍到。

表 4-7、場景 1 拍攝規劃

影像大小	3648×2432 像元	地面取樣距離	0.39 mm
像元大小	0.006168 mm	像主距	34.6 mm
視差精度	1/3 像元 (Wenzel et al., 2013a)	像基距	284.544 mm
物距方向精度	1 mm	物距	2188.8 mm
重疊率	80%	f-number	4.5

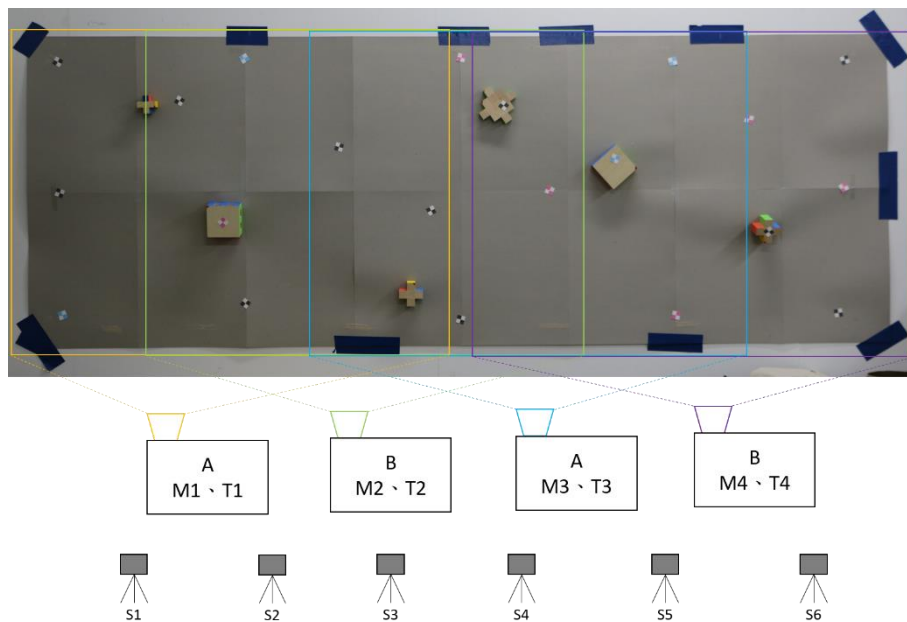


圖 4-14、場景 1 投影機與相機配置示意圖

本次實驗採用商業軟體 PhotoModeler 2016.2.1 進行相機內方位參數率定，率定成果如表 4-8 所示。

表 4-8、場景 1 相機率定

像主距	34.433655 mm	輻射透鏡畸變差	$K_1: -3.502E-005$
像主點	Xp: 11.469120 mm Yp: 7.492234 mm		$K_2: -3.367E-007$ $K_3: 0$
像幅	寬: 22.826366 mm 高: 15.214600 mm	離心透鏡畸變差	$P_1: 0$ $P_2: 0$

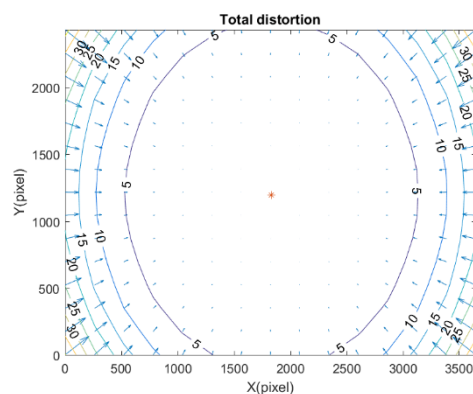
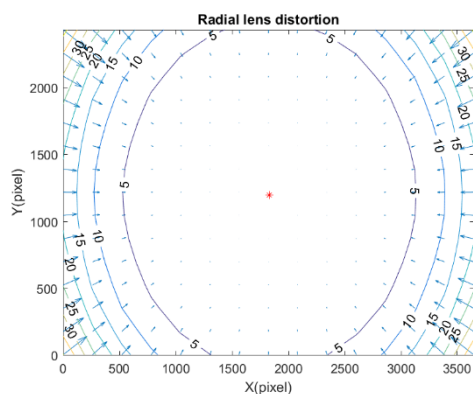


表 4-9、影像獲取



相機	M1	T1	M2	T2	M3	T3	M4	T4	UN
S1									
S2									
S3									
S4									
S5									
S6									



4.4.3 場景 1 模擬資料製作及成果分析

為了驗證程式碼及模擬實際資料可能發生的情況，製作了一組測試資料，幫助後續進行實際資料時的分析。模擬資料之控制點的真值為前述實際資料之控制點坐標。依據影像所拍攝的連結點與控制點的相對位置，設計 4 組連結點的物空間坐標作為連結點真值。表 4-10 為模擬資料的外方位參數，以共線式計算物空間點位在 6 拍攝位置的像點真值。在模擬資料中，連結點具有真值，因此可視為檢核點與原有的 9 個檢核點一起分析成果。

模擬資料於控制點及像點加入誤差後進行資料分析。根據實際資料可能出現的狀況，設計 3 組實驗：實驗 1，像點精度為 ± 0.1 像元，控制點 XY 誤差為 ± 0.04 mm，Z 誤差為 ± 0.01 mm；實驗 2，像點精度為 ± 1 像元，控制點 XY 誤差為 ± 0.04 mm，Z 誤差為 ± 0.01 mm；實驗 3，像點精度為 ± 0.1 像元，控制點 XY 誤差為 ± 0.04 mm，Z 誤差為 ± 0.01 mm，控制點減少為 3 個。

模擬資料品質驗證有兩項指標：實際精度(Empirical accuracy)及理論精度(Theoretical precision)。於控制點及像點分別加入 100 次誤差以 RMSE(式(4-8))作為實際精度，理論精度以平差的法方程矩陣乘以驗單位權標準差表示(式(4-9))。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\theta - \hat{\theta})^2}{100}} \quad (4-8)$$

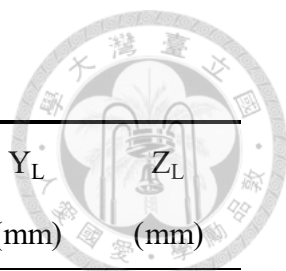
$$\hat{\sigma}_0 \times (\bar{B}^T \times \bar{W}_e \times \bar{B})^{-1} \quad (4-9)$$

其中，

$\hat{\theta}$ ：未知數之真值；

θ ：未知數平差後之數值。

表 4-10、模擬資料外方位參數



Camera station	ω°	φ°	κ°	X_L (mm)	Y_L (mm)	Z_L (mm)
S1	0.000000	0.000000	0.000000	-418.600	-0.547	-1567.2
S2	1.020532	0.012982	-0.043456	-134.056	-0.547	-1567.2
S3	0.927604	0.013956	0.097940	150.488	-0.547	-1567.2
S4	0.954045	0.001963	0.031643	435.032	-0.547	-1567.2
S5	0.973043	0.009279	-0.127049	719.576	-0.547	-1567.2
S6	1.000911	0.009976	0.071235	1004.120	-0.547	-1567.2

4.4.3.1 實驗 1

實際資料中，最終的像點量測精度為 ± 0.1 像元，控制點 XY 誤差為 0.04 mm，Z 誤差為 0.01 mm。模擬資料實驗 1 的像點和控制點加入的誤差與實際資料之誤差相同。表 4-11 為外方位參數與檢核點 CK1~CK9 的理論精度與實際精度比較，實際精度比理論精度差，兩者曲線變化一致。控制點的 Z 方向精度優於 XY 方向，經光束法解算後檢核點得 Z 方向精度比 XY 方向差，因為光束法為方向交會，當交會角度小於 90° 時，物距方向精度會比平面精度差。

4.4.3.2 實驗 2

實際資料中，連結點進行 LSM 前，其誤差為 ± 0.1 像元，本實驗欲模擬，未精進像點量測精度，對解算品質的影響。如表 4-12~表 4-14 所示，若未進行像點精化，物點的解算品質會變差，且各點位的品質差異也較大，改善像點精度後，可以大幅提升物點及方位參數解算品質。

4.4.3.3 實驗 3

進行三維坐標轉換，至少需要 3 個全控點或 2 個平面控制點與 3 個高程控制點。實際資料設置了 12 個控制點，已超過幾何上的最低需求，在攝影測量中，控制點的佈設除了需要考量是否能包覆場景，還需考慮交會幾何。如圖 4-15 所示，

相鄰曝光站交會角度小， $\overline{S_1S_2}$ 基高比為 0.13， $\overline{S_1S_6}$ 基高比為 0.65。

實驗 3 選取可包覆場景且只成像於相鄰 2 張影像的 3 個控制點：CP1、CP3 及 CP11，探討在最少的控制點數量下，交會幾何較差的控制點的成果。如表 4-15~表 4-17 所示，在控制點精度不變下，若控制點的交會幾何較差，外方位參數及物點解算成果皆顯著變差。

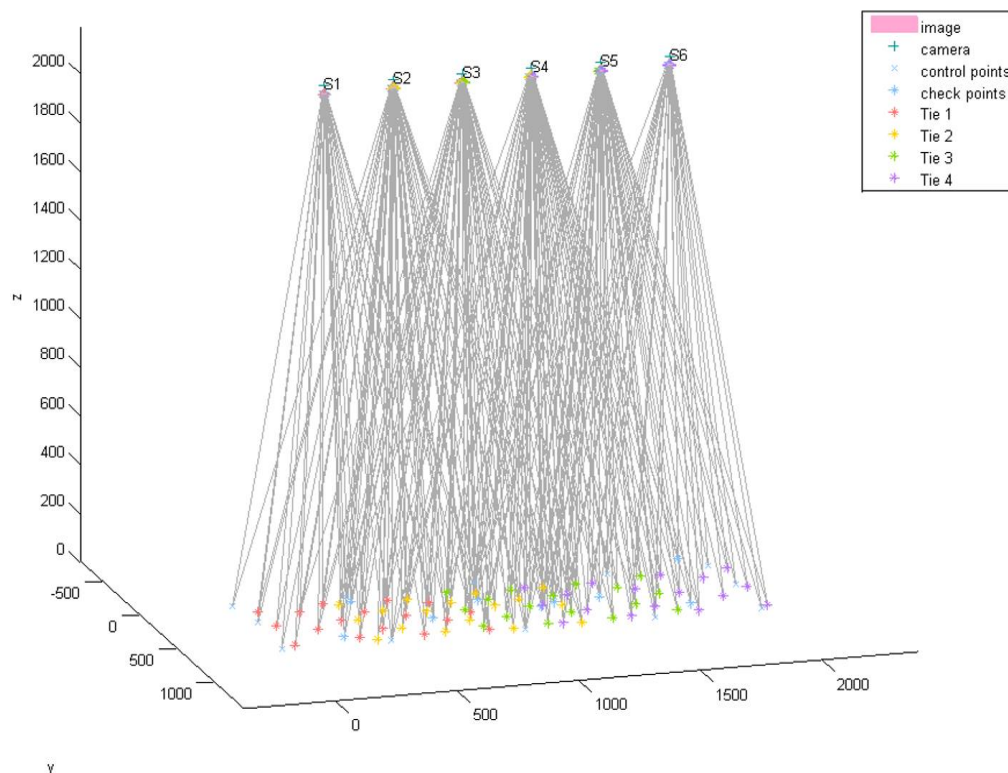


圖 4-15、曝光站、像點及物點

4.4.3.4 小結

實際資料解算成果中除了檢核點，其他僅能計算理論精度，無法取得實際精度，模擬資料實驗結果顯示，理論精度和實際精度的差距不大，因此實際資料分析中的理論精度可以代替實際精度進行資料成果分析。外方位參數解算品質除了受到控制點品質的影響，也與像點品質有關，實驗 2 的結果顯示，提高像點精度可同時提升外方位參數及物點解算精度，因此精進像點量測精度有其必要性。實驗 3 的成果說明了，控制點的佈設，除了考量是否滿足基準需求及包覆實驗場景，還要考慮交會幾何，實驗區周圍佈設控制點目的是包覆實驗區，但是交會幾何較差，因此需

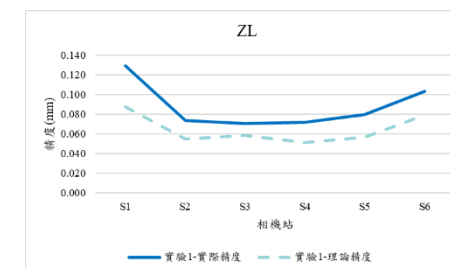
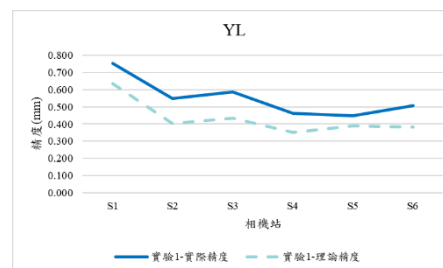
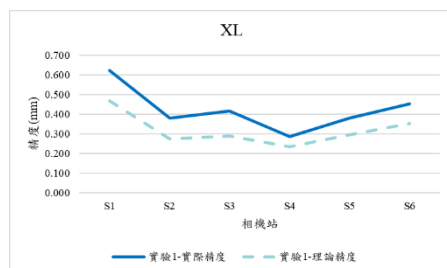
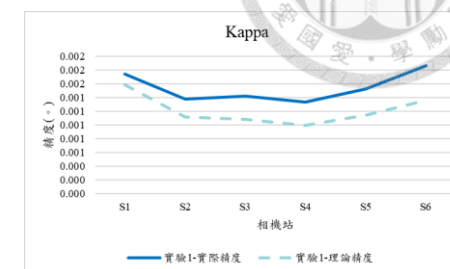
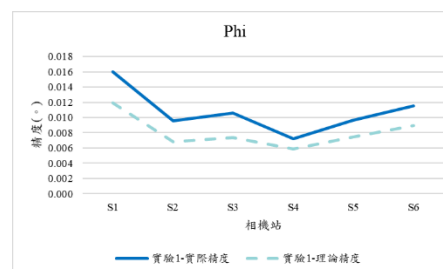
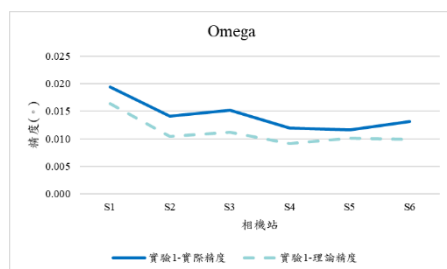
加密佈設交會幾何較好的控制點，以提升解算精度。





表 4-11、實驗 1 成果

外方位參數



檢核點

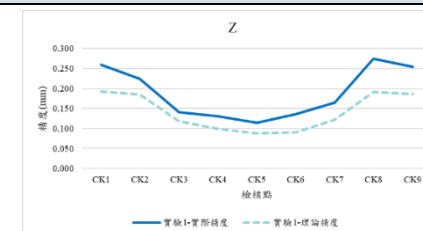
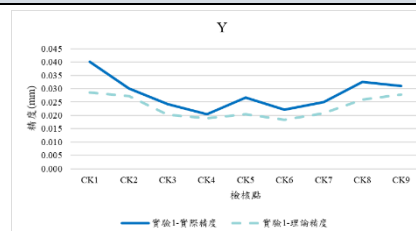
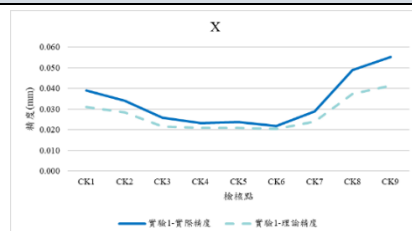
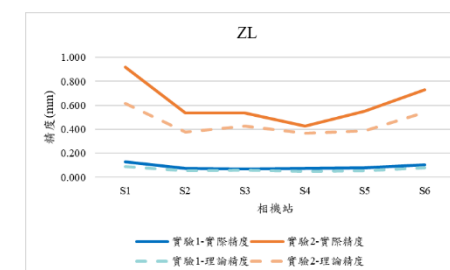
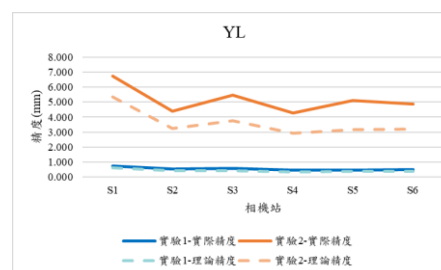
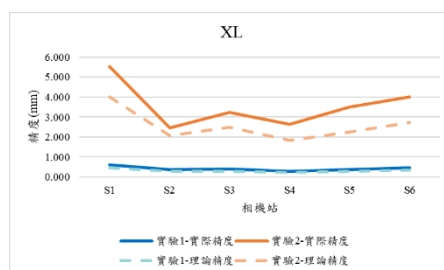
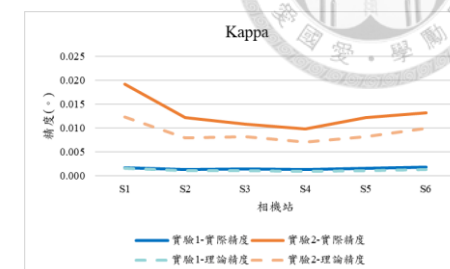
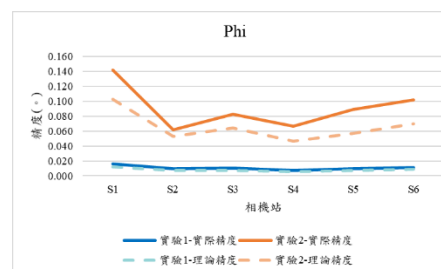
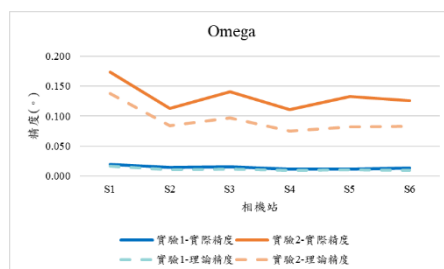




表 4-12、實驗 2 成果(1)

外方位參數



檢核點

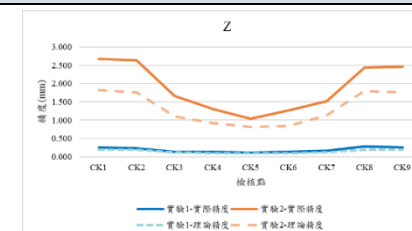
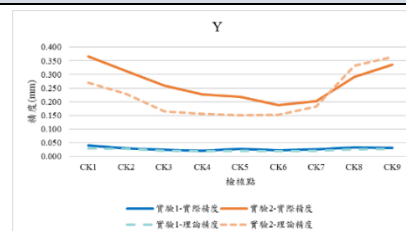
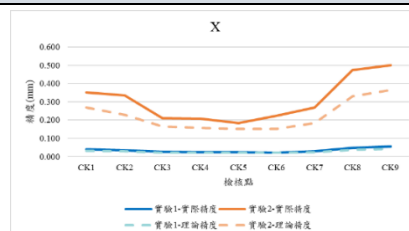
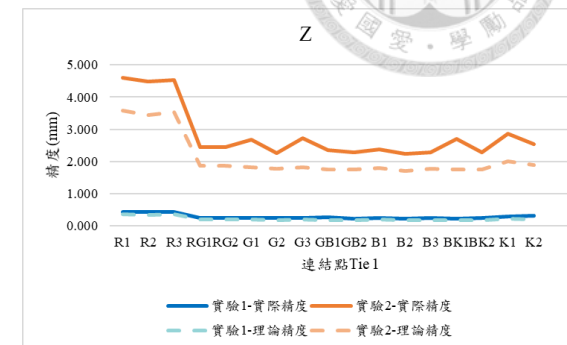
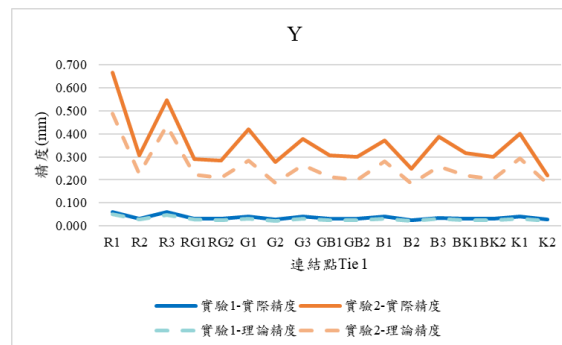
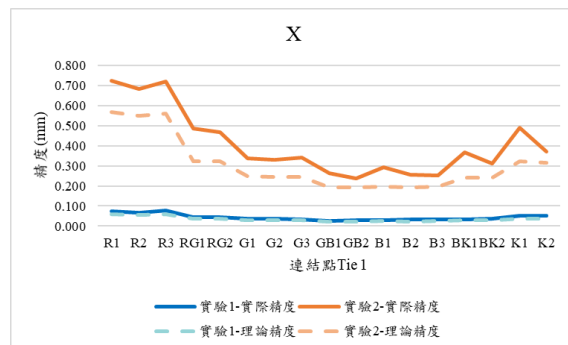




表 4-13、實驗 2 成果(2)

Tie 1



Tie 2

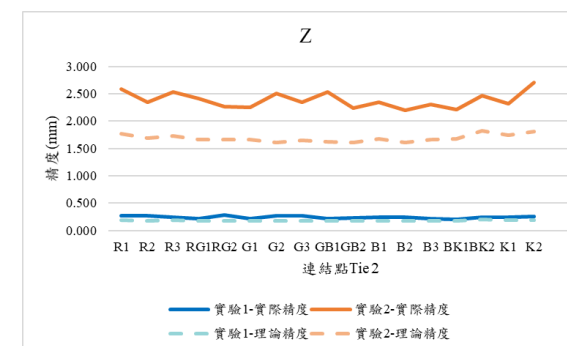
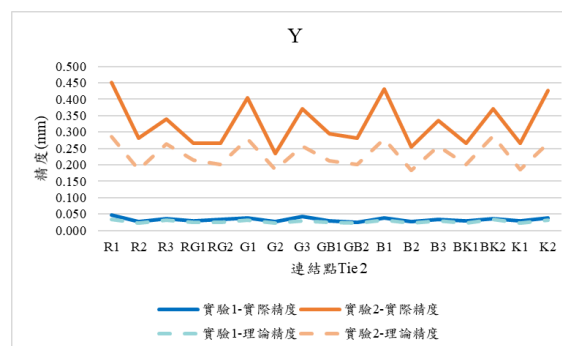
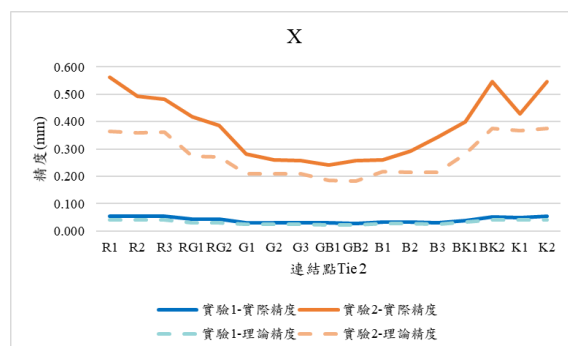
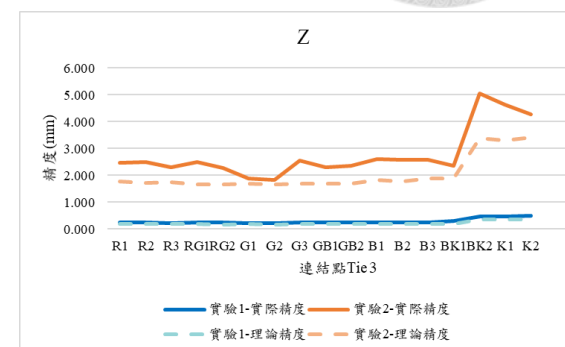
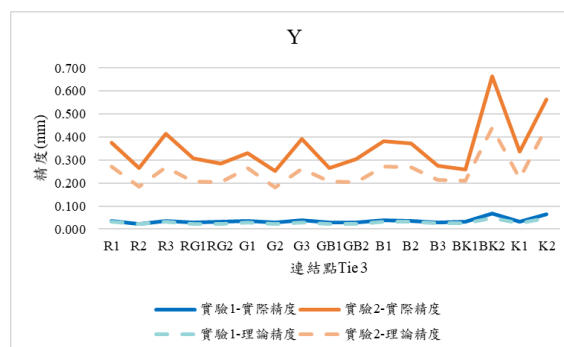
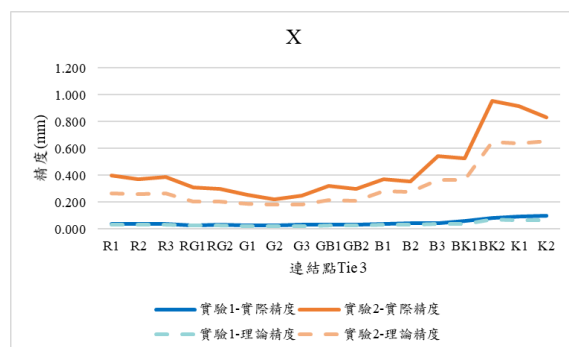




表 4-14、實驗 2 成果(3)

Tie 3



Tie 4

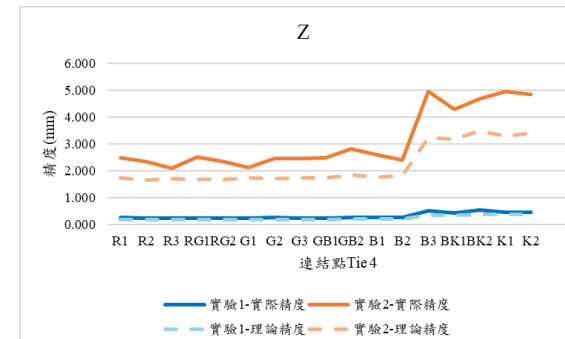
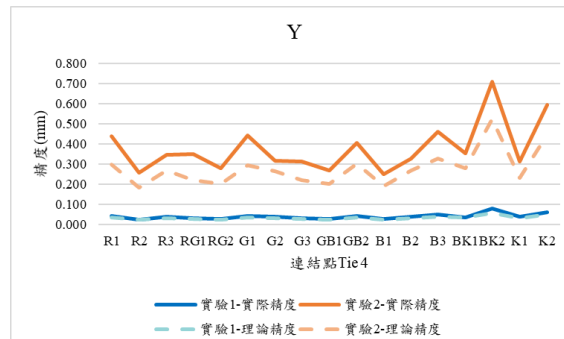
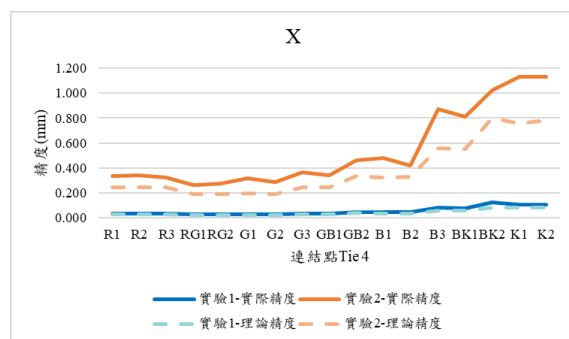
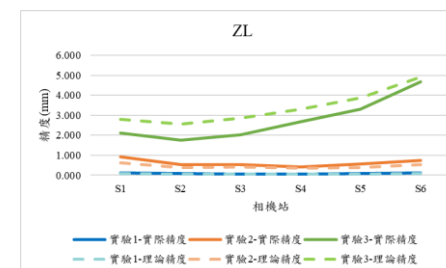
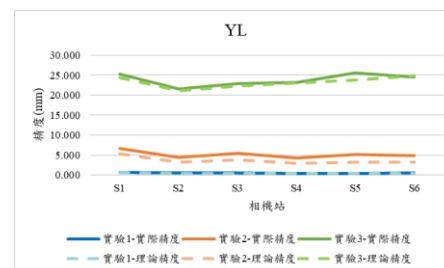
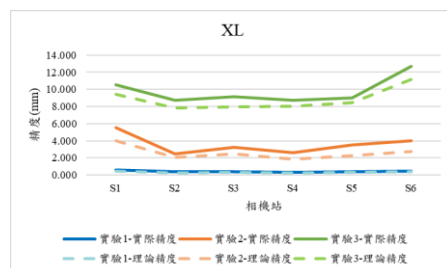
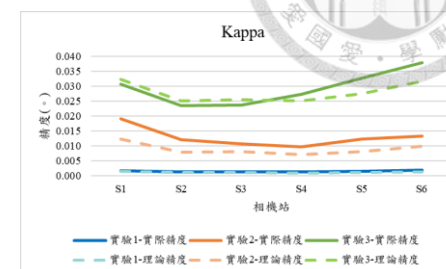
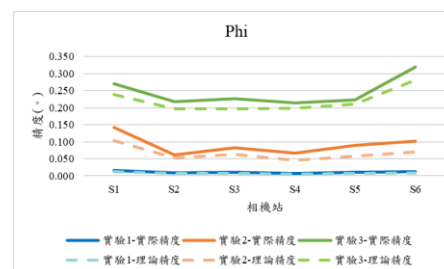
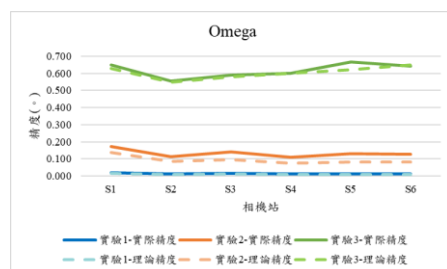




表 4-15、實驗 3 成果(1)

外方位參數



檢核點

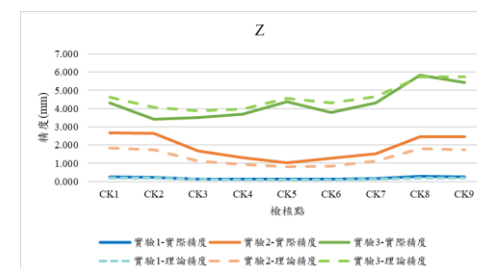
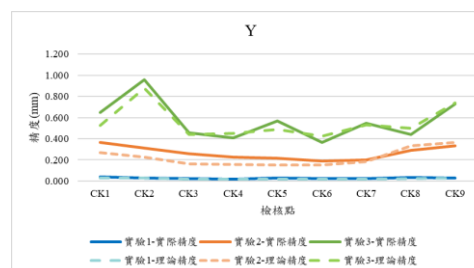
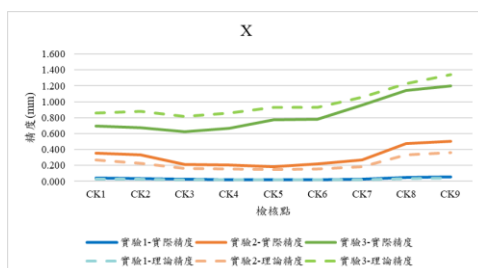
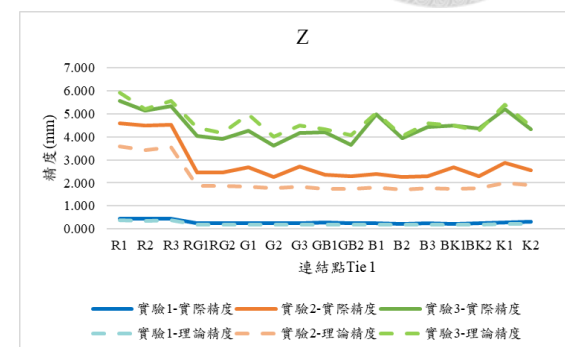
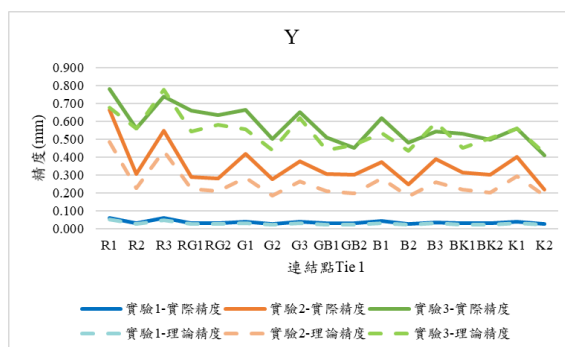
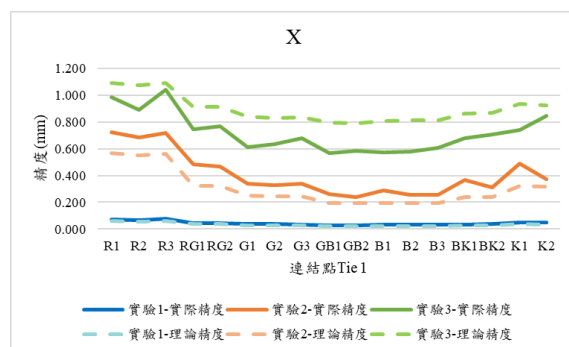




表 4-16、實驗 3 成果(2)

Tie 1



Tie 2

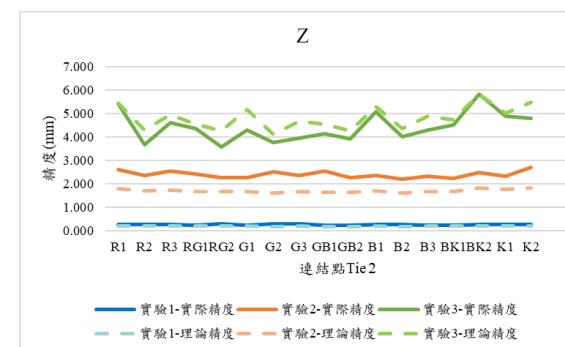
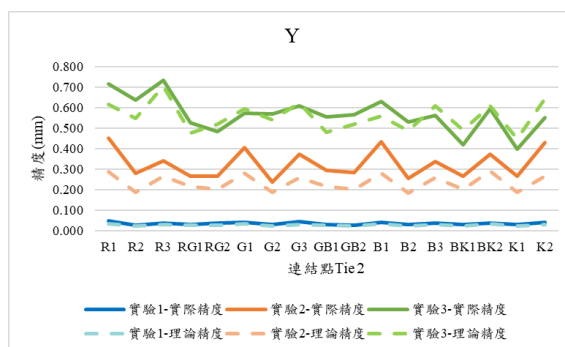
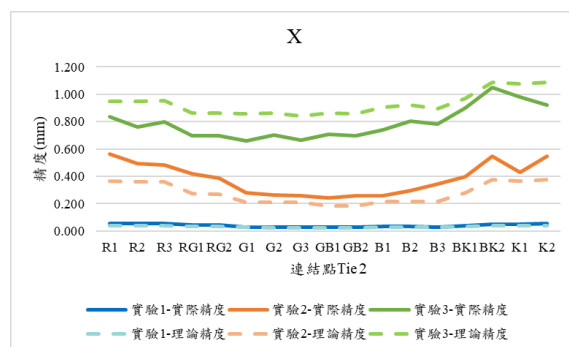
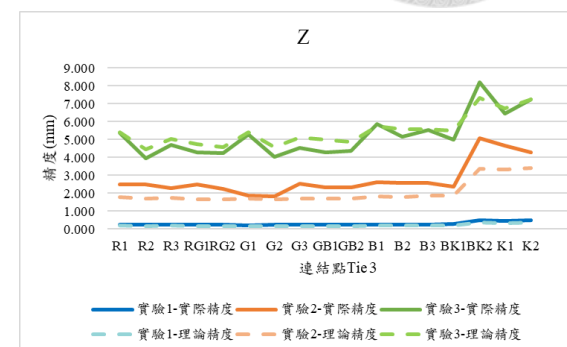
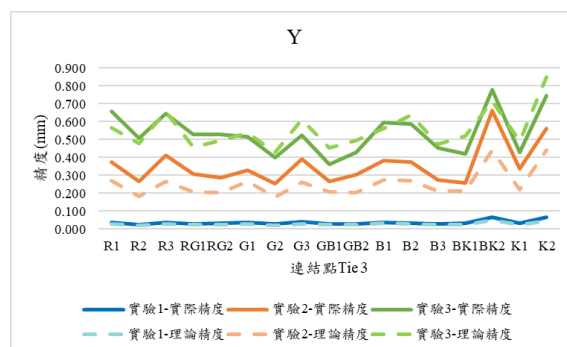
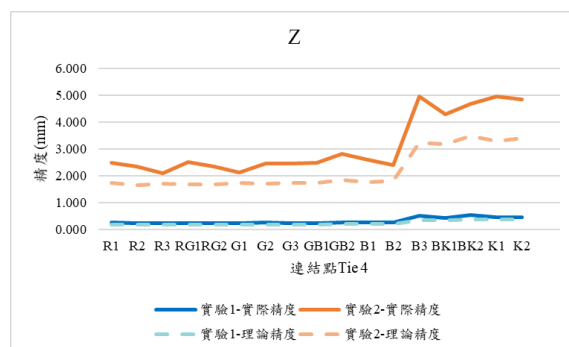


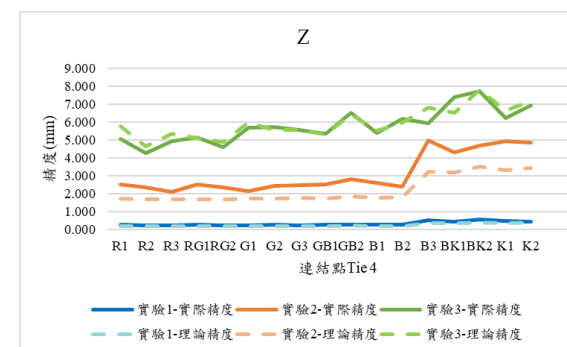
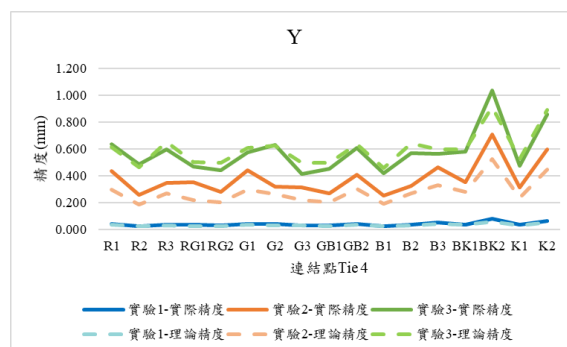
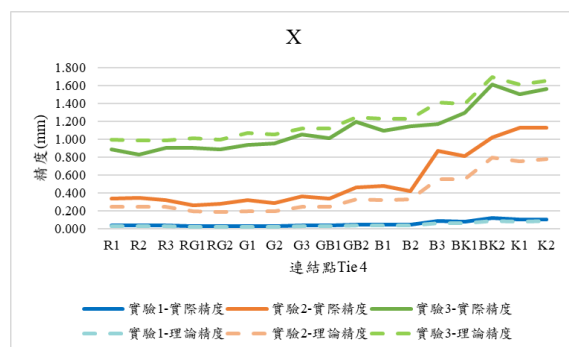


表 4-17、實驗 3 成果(3)

Tie 3



Tie 4





4.4.4 像點量測

如研究方法所述，像點量測與精化分為兩部分，連結點像點及控制點像點，下面將分述兩者精化成果。

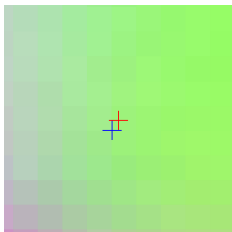
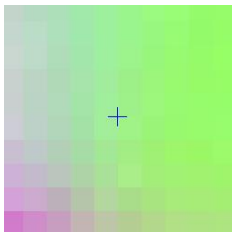
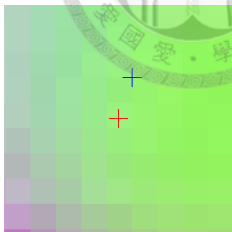
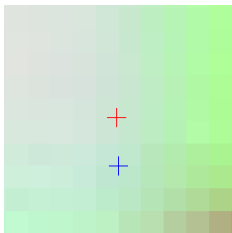
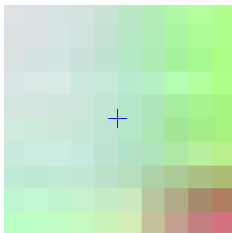
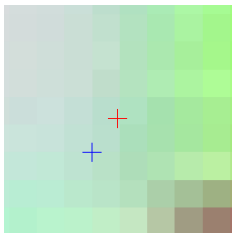
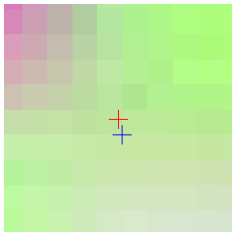
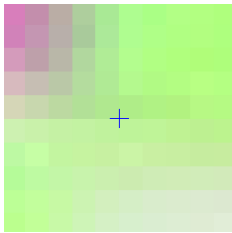
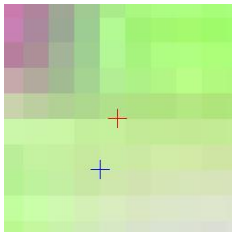
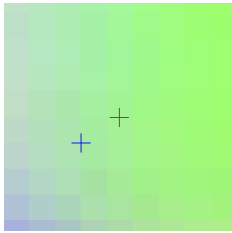
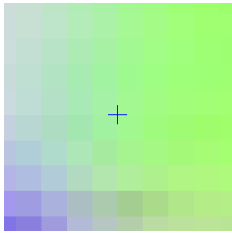
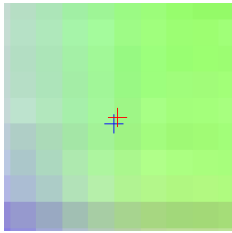
4.4.4.1 連結點像點量測

每個連結點會出現在 2-3 張影像上，先利用模板匹配在每張影像上搜尋連結點整數像元坐標，再將左右兩張影像對中間影像的像點進行 LSM，精化左右兩像的共軛點至次像元精度。表 4-18 列出部分的模板匹配成果，可以看到其實每張影像上的像點是有差異的，表 4-19 列出相對應的 LSM 成果，+ 為模板匹配像點，+ 為進行 LSM 後的像點。

表 4-18、模板匹配成果

點號	S3	S4	S5
G1			
G2			
G3			
GB1			

表 4-19、LSM 成果(+為 LSM 結果；+為原像點)

點號	S3	S4	S5
G1	 <p> $\sigma_x = \pm 0.066$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.055$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.049$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.049$ (pixel) </p>
G2	 <p> $\sigma_x = \pm 0.113$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.091$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.042$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.042$ (pixel) </p>
G3	 <p> $\sigma_x = \pm 0.071$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.053$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.063$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.040$ (pixel) </p>
GB1	 <p> $\sigma_x = \pm 0.072$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.066$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.057$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.037$ (pixel) </p>

4.4.4.2 控制點像點量測

場景 1 使用 3 種標型作為控制點及檢核點。擷取拍攝後的標型並繪製灰階直方圖後可發現每種標型都有 3 個波峰和兩個波谷(圖 4-16)，直方圖最右邊波谷的右方表示標型的白色，最左邊的波谷的左方表示黑色、藍色或紅色。

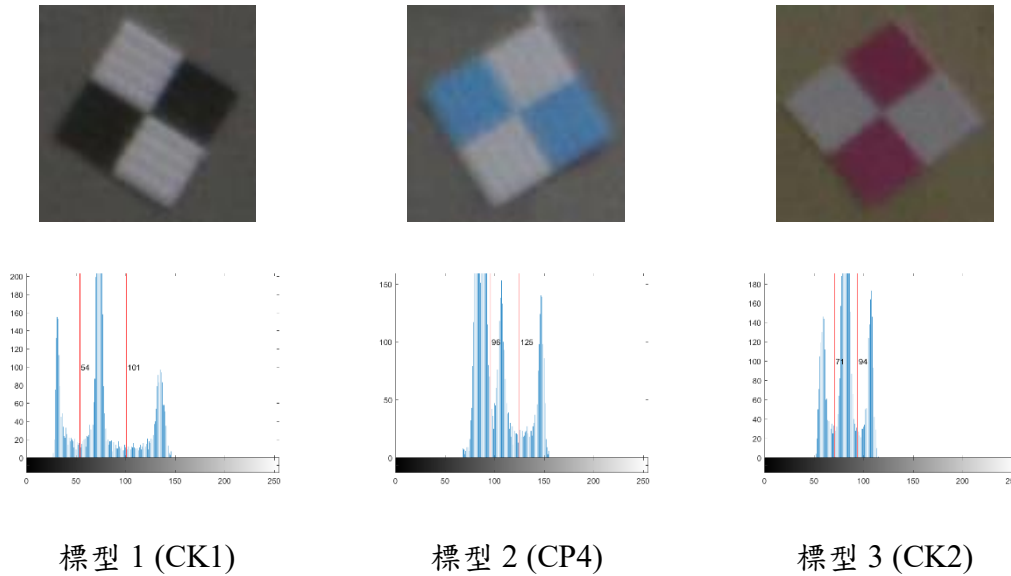


圖 4-16、控制點及檢核點標型影像及灰階直方圖

利用 Matlab 函數 `multithresh`，可以找出直方圖中的兩個門檻值(波谷): t_1 及 t_2 。門檻值 t_1 及 t_2 可以將影像分為三個區域 a 、 b 及 c (式(4-10))， a 為標型白色區域， c 為標型的黑色、藍色或紅色區域。以兩個門檻值可製作兩張二進制影像(圖 4-17)。

$$g(x, y) = \begin{cases} a, & (x, y) > T_2 \\ b, & T_1 < (x, y) \leq T_2 \\ c, & (x, y) \leq T_1 \end{cases} \quad (4-10)$$



標型 1 (CK1)



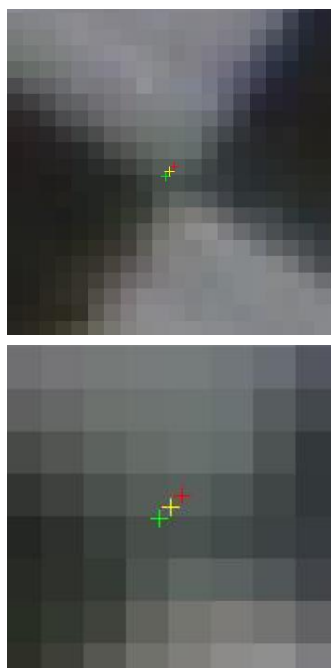
標型 2 (CP4)



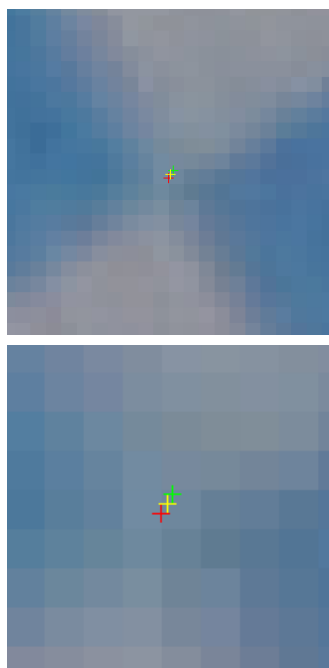
標型 3 (CK2)

圖 4-17、二進制影像

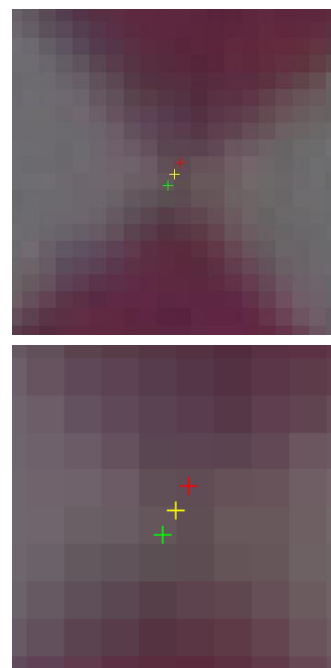
每個標型有兩個顏色，每個顏色塊的質心即為欲尋找之標型中心，因此每個標型可計算出 2 個中心。如圖 4-18，白色區塊質心位置標示為紅色十字，其他顏色區塊的質心位置標示為綠色十字，2 個中心點的加權平均值(圖 4-18 之黃十字)即為最終的控制點或檢核點像點。



標型 1 (CK2)



標型 2 (CK2)



標型 3 (CK2)

圖 4-18、質心



4.4.5 方位解算

量測控制點、檢核點及連結點的像點後，以光束法計算外方位參數。有 303 個未知數，831 條觀測方程式，多餘觀測為 528，後驗單位權標準差 $\hat{\sigma}_0 = \pm 5.3126 \text{ mm}$ 。外方位參數成果。表 4-20 列出以光束法平差求得的 6 張像片的外方位參數及理論精度。平差後檢核點在 XY 方向上的誤差幾乎小於 0.39 mm，CK6 在 Z 方向上誤差最大，但是理論精度並沒有顯示 CK6 的精度較差。

表 4-20、外方位參數解算成果

Camera station	ω°	φ°	κ°	X_L (mm)	Y_L (mm)	Z_L (mm)
S1	179.826066	-0.842299	0.213340	-390.074	16.340	-1607.438
	± 0.097308	± 0.076074	± 0.009188	± 2.921	± 3.710	± 0.422
S2	179.837105	1.660701	-0.097634	-105.093	15.019	-1604.450
	± 0.059624	± 0.037144	± 0.005784	± 1.444	± 2.277	± 0.272
S3	179.895082	0.142798	-0.258956	169.662	12.419	-1624.187
	± 0.067335	± 0.044908	± 0.005949	± 1.710	± 2.542	± 0.305
S4	179.796695	-0.342873	-0.164060	455.675	12.256	-1634.459
	± 0.053025	± 0.032719	± 0.005156	± 1.253	± 1.994	± 0.267
S5	179.649537	0.391098	-0.037485	746.086	13.733	-1612.210
	± 0.058348	± 0.040571	± 0.005883	± 1.563	± 2.214	± 0.272
S6	179.691897	-0.464436	-0.164198	1029.319	11.472	-1629.749
	± 0.057963	± 0.048703	± 0.007253	± 1.860	± 2.183	± 0.407



表 4-21、檢核點誤差

點號	Xerr	Yerr	Zerr
CK1	-0.193	0.074	-0.589
CK2	-0.116	0.464	0.554
CK3	-0.097	-0.068	1.356
CK4	-0.107	-0.058	0.687
CK5	-0.211	0.141	0.248
CK6	-0.427	-0.112	2.770
CK7	-0.087	0.490	1.534
CK8	-0.329	-0.044	1.618
CK9	0.093	0.721	-0.471

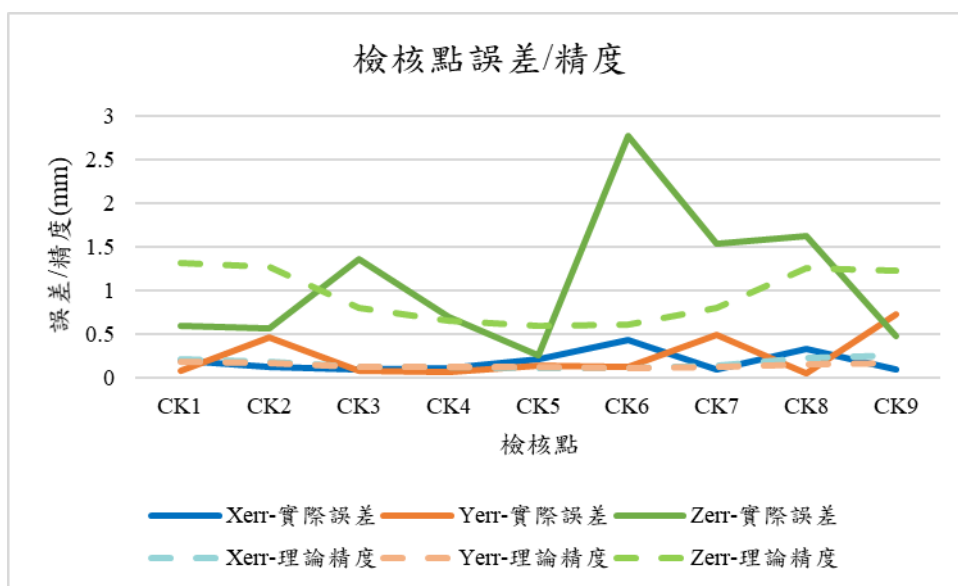


圖 4-19、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度

4.4.6 點雲成果與品質評估

將光束法解算出的外方位參數，放入 SURE 進行密匹配獲取點雲。圖 4-20 為像對點雲成果，圖 4-21 為全景。表 4-22 列出了點雲上量得的檢核點坐標的誤差，

從圖 4-22 可看到 CK6 在 Z 方向上精度最差。場景 1 是由數張紙板拼貼後再黏於牆上，受到積木重量影響，場景容易因外力而改變，由於量測控制點的時間不是緊接在獲取影像前後，可能場景已有變動導致 CK6 誤差較大。

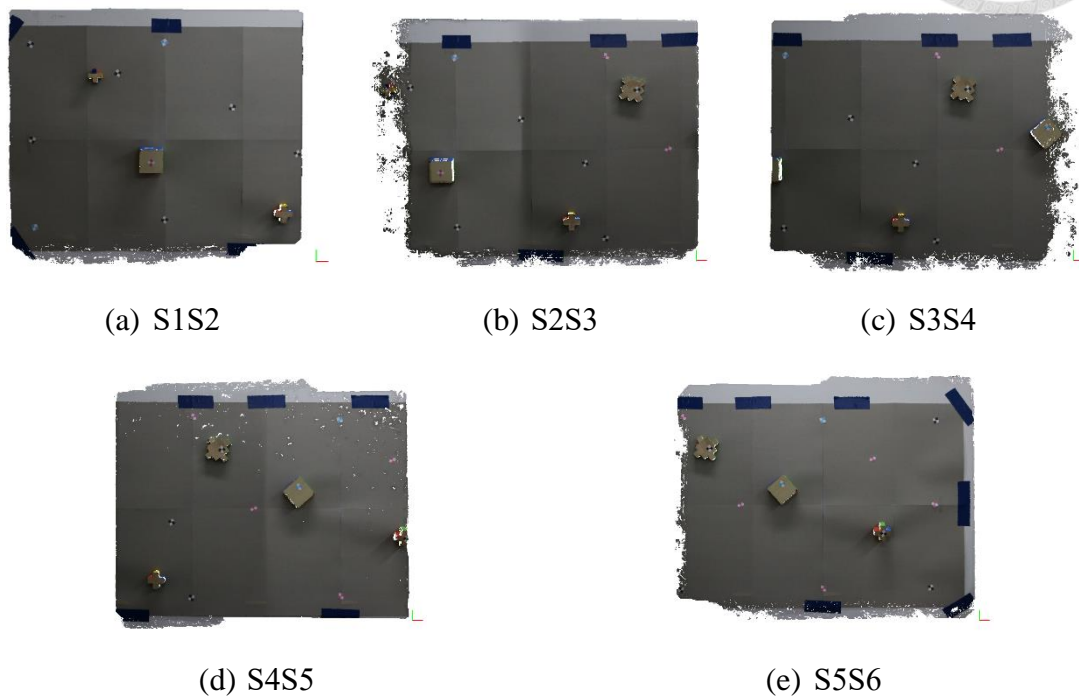


圖 4-20、像對點雲成果

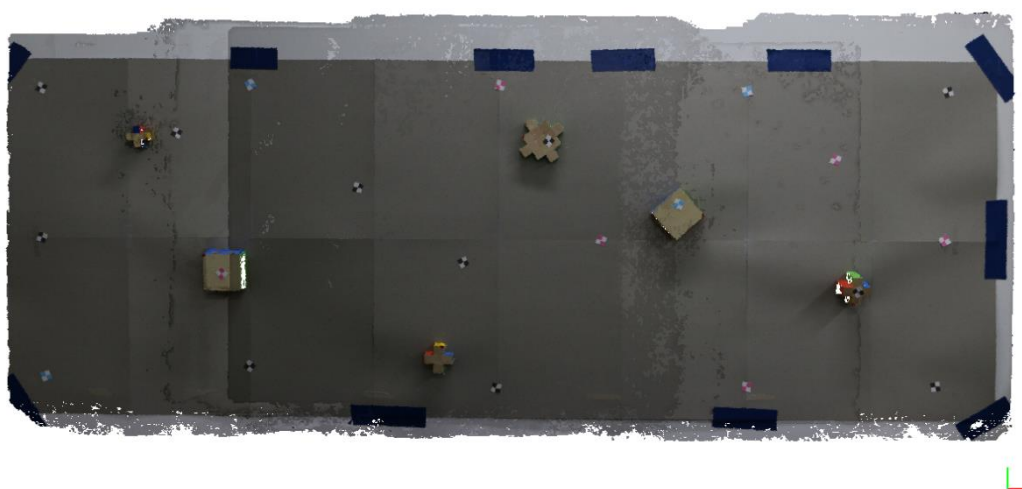


圖 4-21、全景點雲



表 4-22、點雲之檢核點誤差

點號	Xerr	Yerr	Zerr
CK1	0.150	0.356	-1.241
CK2	-0.400	-0.128	-0.152
CK3	-0.088	-0.151	0.924
CK4	0.097	-0.360	2.198
CK5	-0.129	0.011	1.033
CK6	-0.227	-0.018	4.704
CK7	-0.101	-0.176	0.111
CK8	-0.111	-0.341	0.197
CK9	0.058	-0.057	0.284

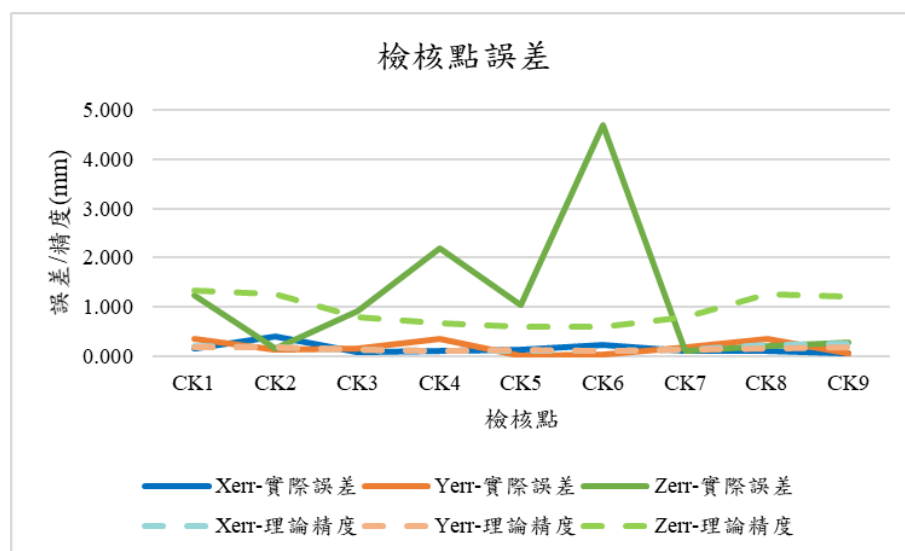
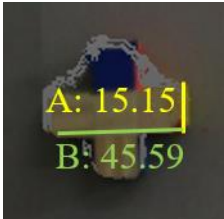


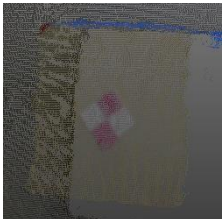
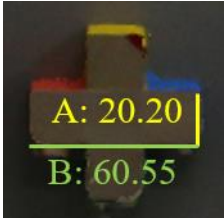
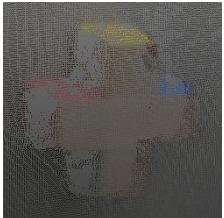
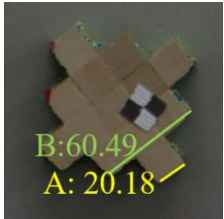
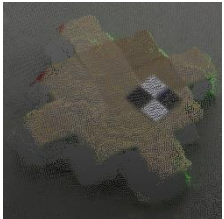
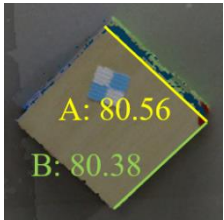
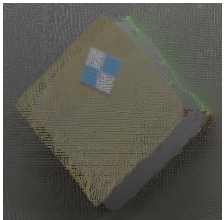


圖 4-22、檢核點誤差(絕對值)與理論精度

表 4-23 列出了六個積木特徵的點雲成果，積木分布參考圖 4-7。可以發現邊緣部分匹配不完整，每個積木挑選 2 個線段及高度，並計算誤差，積木高度指的是積木塊本身的高度，高度部分的量測不受到邊緣重建不完整的影響，積木的高度誤差均很小，表示點雲重建的物空間精度佳。積木上 2 個線段的誤差越大，表示在該線段的 2 端的邊緣重建越不完整，誤差最大的為積木 6 之線段 A 為-4.902 mm，表示積木 6 之 A 線段兩端有顯著的重建不完整的情況。

表 4-23、點雲積木分析

編號	點雲局部圖(mm)		線段	誤差
積木 1			A	-0.323 mm
			B	-0.907 mm
			高	0.070 mm
積木 2			A	-0.950 mm
			B	-1.108 mm
			高	0.090 mm
積木 3			A	-2.634 mm
			B	-0.364 mm
			高	0.090 mm
積木 4			A	-0.738 mm
			B	-0.132 mm
			高	0.093 mm
積木 5			A	-1.069 mm
			B	-4.184 mm
			高	0.114 mm

積木 6			<div data-bbox="1125 190 1404 459">  </div> <div> A -4.902 mm B -1.725 mm 高 0.190 mm </div>
------	---	---	--



4.5 場景 2

實驗地點為台大土木系館二樓電梯旁的牆面，如圖 4-23，紅色框線為欲進行重建之範圍，該場景由兩面接近垂直的牆面組成，兩個牆面的磁磚材質和大小不同，佈設 8 個控制點及 6 個檢核點(圖 4-24)。

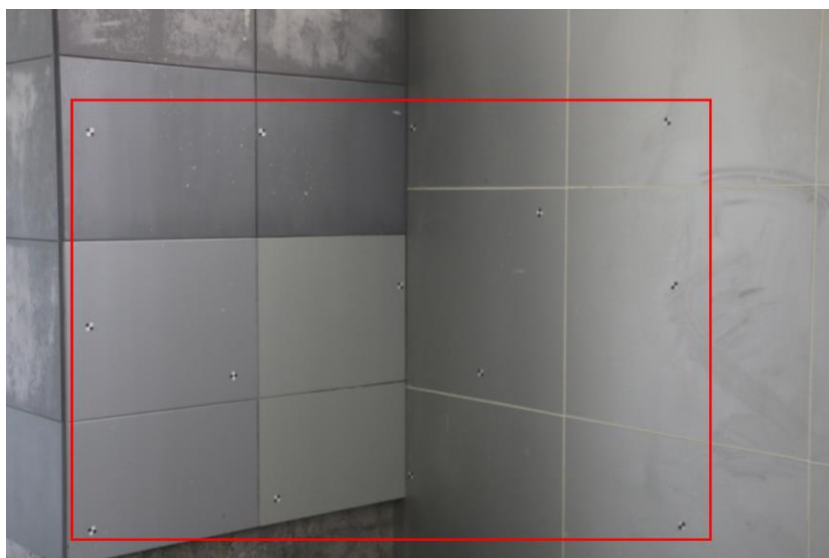


圖 4-23、實驗 2 場景



圖 4-24、場景 2 控制點分布



4.5.1 坐標系統

場景坐標系以全測站中心為坐標系原點，從場景的其中一面到全測站的方向為 Z 軸，全測站天頂方向為 Y 軸，如圖 4-25 所示。

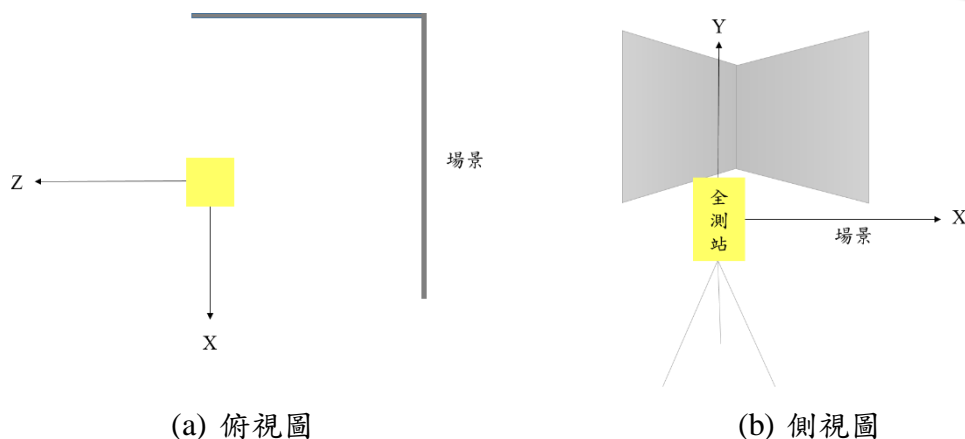


圖 4-25、場景 2 物空間坐標系

4.5.2 影像獲取

場景 2 有 A 和 B 兩面牆，A 面牆大小為 121.5×130 cm，B 面牆大小為 110×130 cm。根據研究方法提出的工作規劃方程式，可得表 4-24 的拍攝規劃。如圖 4-26 所示，AB 兩面牆的寬度分別為 121.5 cm 和 110 cm。重建 A 牆至少需擺設的相機站數為 $\left\lceil \frac{1215 - 3648 \times 0.39 \times 0.8}{284.544} + 2 \right\rceil = 3$ ，重建 B 牆至少需擺設的相機站數為 $\left\lceil \frac{1100 - 3648 \times 0.39 \times 0.8}{284.544} + 2 \right\rceil = 2$ ，總共至少需要 5 個站，由於兩個牆互相垂直，而不是在同一牆面，因此須採取環狀拍攝，為了完整涵蓋場景，拍攝的起始位置和最終位置相距的弧長為 234.32 cm，而基距為 28.45 cm，因此相機站的總數為 9。

考量相機腳架的大小，投影機可擺設的物距最遠為 155 cm，投影範圍約為 108.5 cm×80.3 cm，因此投影機站數至少須為 3 站，和實驗一不同的是，實驗二是環狀拍攝，因此投影機擺設方式也為環狀，而在物距 155 cm 時，起始位置和最終位置的弧長為 136.86 cm，考量相機腳架寬度，最多可擺放的投機站數亦為 3 站，每站會分別投射一次匹配紋理及連結紋理(M1~M3，T1~T3)。場景的高度為 130 cm，上下重疊率為 60%，所以要拍攝兩個帶狀區域：帶狀區域 1 和帶狀區域 2。每個帶狀區域需要 9 個相機站進行拍攝，總共為 18 個相機站：帶狀區域 1，S1-1~S9-1；帶

狀區域 2，S1-2~S9-2。表 4-26~表 4-29 列出所拍攝的影像。

表 4-24、場景 2 拍攝規劃

影像大小	3648×2432 像元	地面取樣距離	0.39 mm
像元大小	0.006168 mm	像主距	34.6 mm
視差精度	1/3 像元 (Wenzel et al., 2013a)	像基距	284.544 mm
物距方向精度	1 mm	物距	2188.8 mm
重疊率	80%	f-number	11

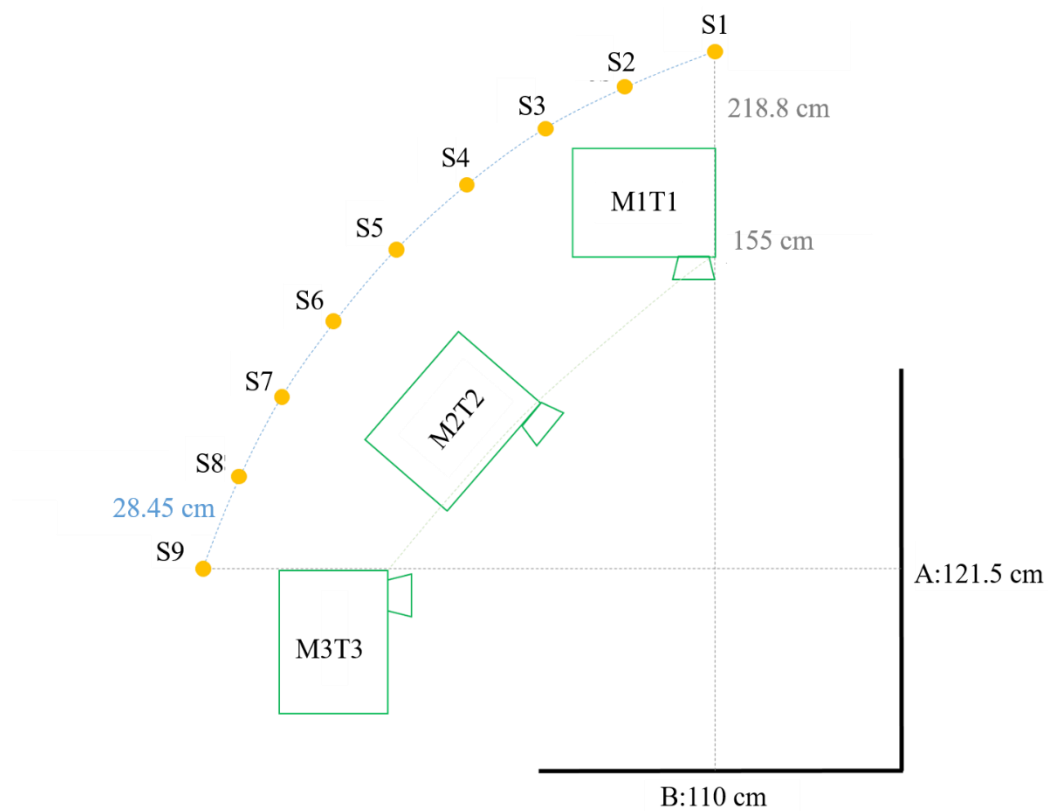


圖 4-26、設備配置

本次實驗採用商業軟體 PhotoModeler 2016.2.1 進行相機內方位參數率定，率定成果如表 4-8 所示。

表 4-25、場景 2 相機率定

像主距	35.082611 mm	輻射透鏡畸變差	$K_1: -4.450\text{E-}005$
像主點	Xp: 11.387022 mm Yp: 7.500418 mm		$K_2: -2.6957\text{E-}007$ $K_3: 0$
像幅	寬: 22.820672 mm 高: 15.214600 mm	離心透鏡畸變差	$P_1: 0$ $P_2: 0$

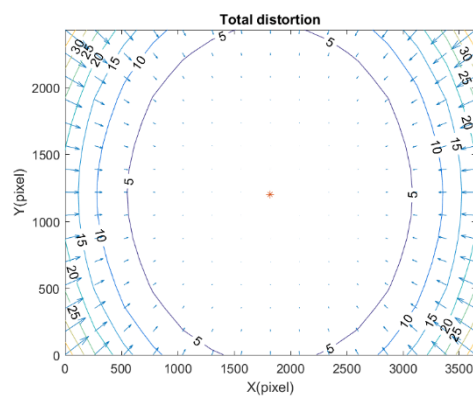
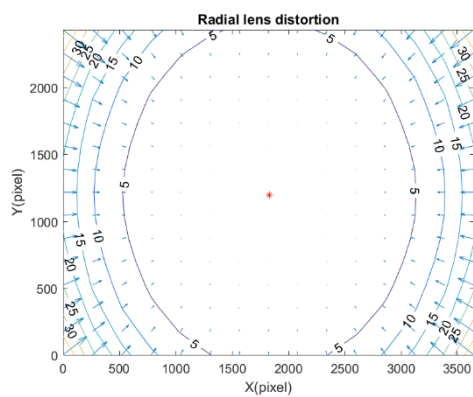




表 4-26、帶狀區域 1 影像獲取 1

相機	M1	T1	M2	T2	M3	T3
S1-1						
S2-1						
S3-1						
S4-1						
S5-1						

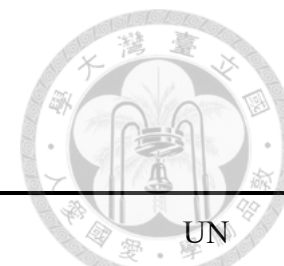


表 4-27、帶狀區域 1 影像獲取 2

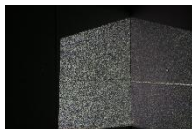






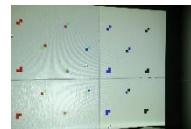

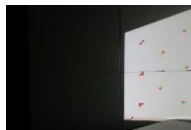

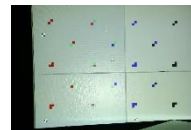

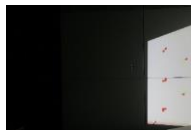

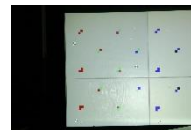

相機	M1	T1	M2	T2	M3	T3	UN
S6-1							
S7-1							
S8-1							
S9-1							

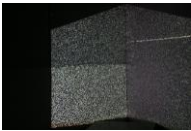


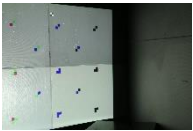


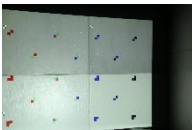
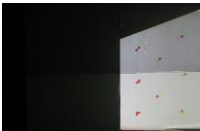

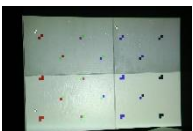
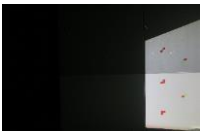




表 4-28、帶狀區域 2 影像獲取 1

相機	M1	T1	M2	T2	M3	T3
S1-2						
S2-2						
S3-2						
S4-2						
S5-2						



表 4-29、帶狀區域 2 影像獲取 2

相機	M1	T1	M2	T2	M3	T3
S6-2						
S7-2						
S8-2						
S9-2						



4.5.3 像點量測

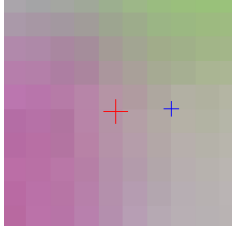
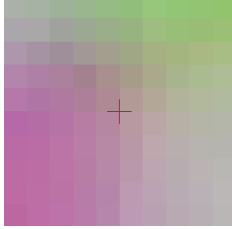
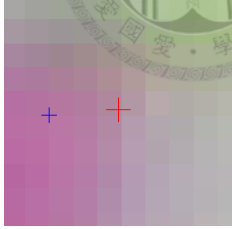
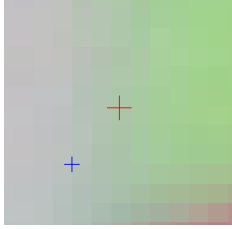
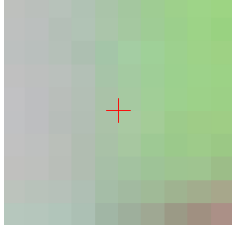
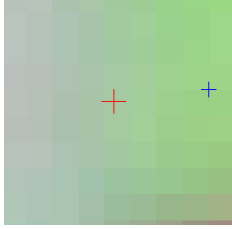
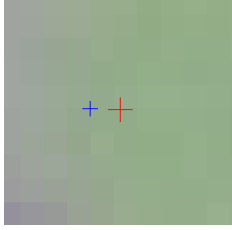

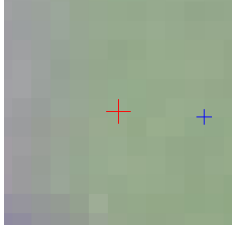
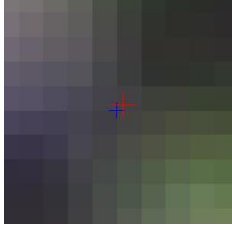
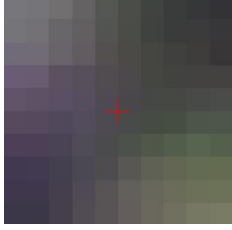
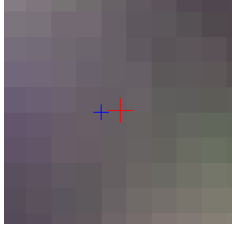
4.5.3.1 連結點像點量測

先利用模板匹配在每張影像上搜尋連結點整數像元坐標，再將左右兩張影像對中間影像的像點進行 LSM，精化左右兩像的共軛點至次像元精度。表 4-30、模板匹配成果表 4-30 列出部分的模板匹配成果，由於拍攝時為環狀拍攝，每張影像間的拍攝角度變化大，因此不同影像上同一標型的模板匹配成果有較大差異，但是，進行 LSM 精化後之後，像點均可精化至正確位置，表 4-31 列出相對應的最小二乘匹配成果，+為模板匹配像點，+為進行 LSM 後的像點。

表 4-30、模板匹配成果

點號	S4	S5	S6
G1			
G2			
GB1			
K1			

表 4-31、LSM 成果(+為 LSM 結果；+為原像點)

點號	S3	S4	S5
G1	 <p> $\sigma_x = \pm 0.040$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.052$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.035$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.046$ (pixel) </p>
G2	 <p> $\sigma_x = \pm 0.071$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.068$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.056$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.057$ (pixel) </p>
GB1	 <p> $\sigma_x = \pm 0.073$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.065$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.072$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.069$ (pixel) </p>
K1	 <p> $\sigma_x = \pm 0.023$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.023$ (pixel) </p>		 <p> $\sigma_x = \pm 0.030$ (pixel) $\sigma_y = \pm 0.032$ (pixel) </p>

4.5.3.2 控制點像點量測

場景 2 中，控制點的標型只有以黑色及白色兩色組合的一種標型，場景 2 有兩材質不同的牆，CK2 和 CK5 分別位在兩個牆面上，拍攝影像時，有些點位受到拍攝角度影響，在影像上有較大的幾何變形，圖 4-27(c)。擷取 CK2、CK5 及 CK3 拍攝後的標型並繪製灰階直方圖後可發現每個都有有 3 個波峰和兩個波谷(圖 4-27)，直方圖最右邊波谷的右方表示標型的白色，最左邊的波谷的左方表示黑色。

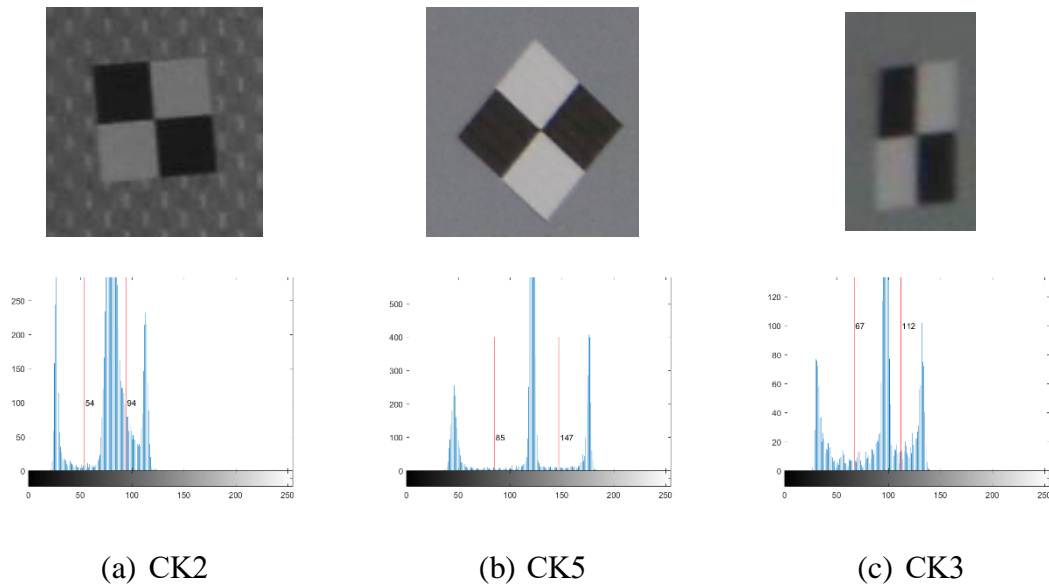
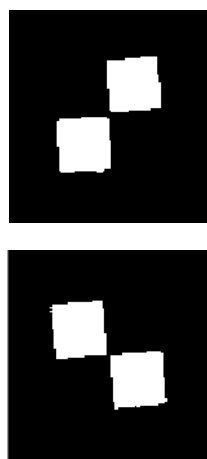
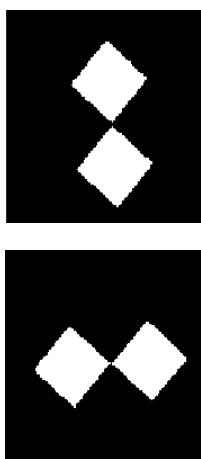


圖 4-27、控制點及檢核點標型影像及灰階直方圖

利用 Matlab 函數 `multithresh`，可以找出直方圖中的兩個門檻值(波谷): t_1 及 t_2 。門檻值 t_1 及 t_2 可以將影像分為三個區域 a、b 及 c(式(4-10))，a 為標型白色區域，c 為標型的黑色、藍色或紅色區域。以兩個門檻值可製作兩張二進制影像(圖 4-28)。



(a) CK2



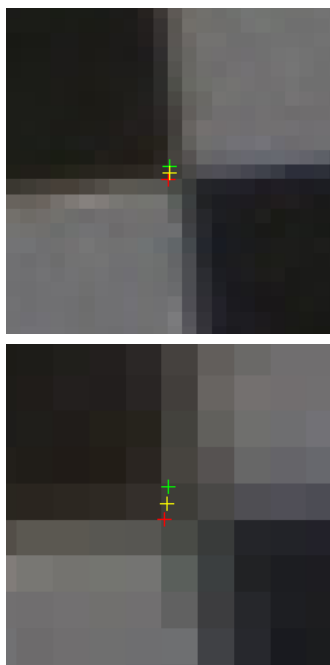
(b) CK5



(c) CK3

圖 4-28、二進制影像

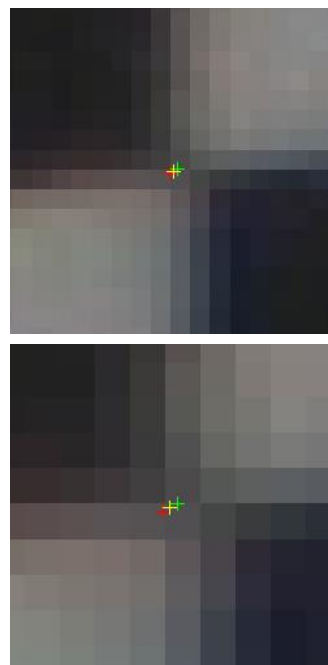
控制點及檢核點標型有黑與白兩個顏色，每個顏色塊的質心即為欲尋找之標型中心，因此每個標型可計算出 2 個中心。如圖 4-29，白色區塊質心位置標示為紅色十字，黑色區塊的質心位置標示為綠色十字，2 個中心點的加權平均值(圖 4-29 之+)即為最終的控制點或檢核點像點。



(a) CK2



(b) CK5



(c) CK3

圖 4-29、質心



4.5.4 方位解算

量測控制點、檢核點及連結點的像點後，以光束法計算外方位參數。帶狀區域 1 有 243 個未知數，811 條觀測方程式，多餘觀測為 568，後驗單位權標準差 $\hat{\sigma}_0 = \pm 4.8146 \text{ mm}$ ；帶狀區域 2 有 240 個未知數，832 條觀測方程式，多餘觀測為 592，後驗單位權標準差 $\hat{\sigma}_0 = \pm 3.2407 \text{ mm}$ 。表 4-32 及表 4-33 列出以光束法平差求得的外方位參數及理論精度。平差後檢核點在物距方向上誤差較大。

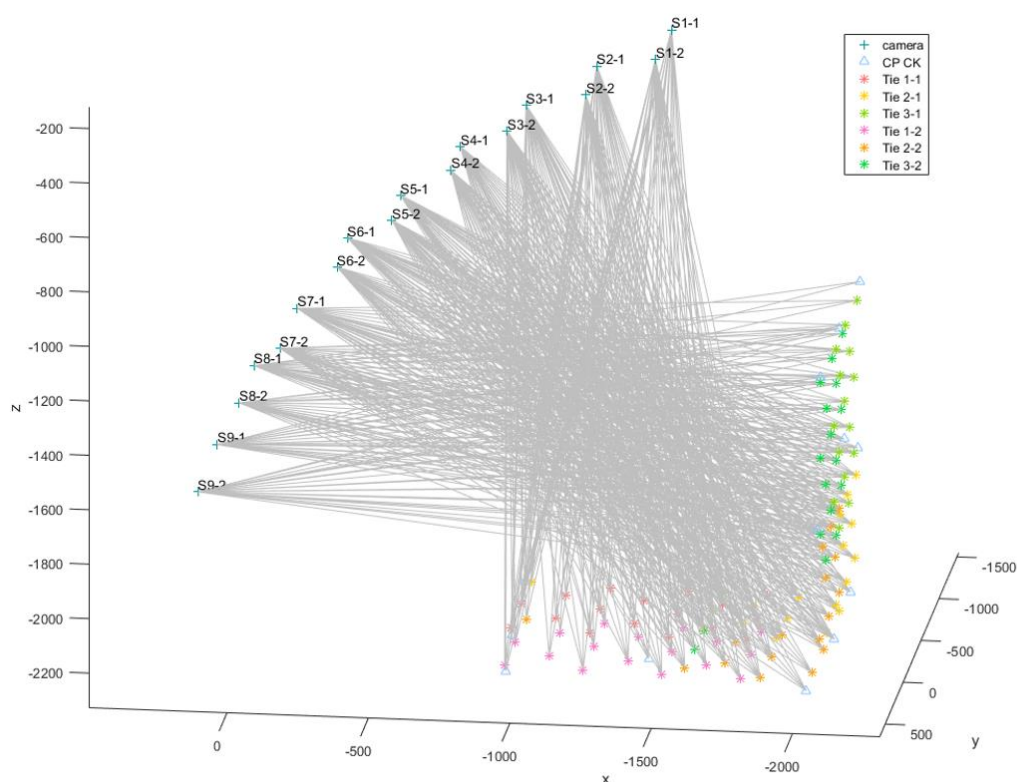


圖 4-30、曝光站、像點及物點

表 4-32、帶狀區域 1 外方位參數解算成果

Camera station	ω°	φ°	κ°	X_L (mm)	Y_L (mm)	Z_L (mm)
S1-1	179.2055	-4.8308	-0.9013	-1422.091	-533.586	-129.776
	± 0.0411	± 0.0372	± 0.0041	± 1.373	± 1.512	± 0.164
S2-1	179.2937	2.1117	-0.9799	-1157.591	-534.721	-273.432
	± 0.0310	± 0.0238	± 0.0032	± 1.328	± 1.135	± 0.169
S3-1	179.3044	13.0617	-0.9634	-907.319	-535.837	-427.255
	± 0.0167	± 0.0276	± 0.0028	± 1.521	± 3.264	± 0.194
S4-1	179.2654	30.1695	-0.8661	-674.820	-537.210	-588.252
	± 0.0088	± 0.0282	± 0.0049	± 1.605	± 2.634	± 0.184
S5-1	179.7419	43.6248	-0.8635	-463.363	-537.658	-775.746
	± 0.0103	± 0.0265	± 0.0091	± 1.175	± 2.077	± 0.163
S6-1	178.8955	57.4120	-0.8454	-275.921	-538.044	-940.079
	± 0.0132	± 0.0217	± 0.0012	± 1.148	± 2.250	± 0.193
S7-1	179.1218	72.5038	-0.8671	-97.526	-539.489	-1205.478
	± 0.0247	± 0.0320	± 0.0025	± 0.993	± 3.086	± 0.089
S8-1	179.5622	80.1595	-0.9186	54.853	-539.038	-1421.705
	± 0.0702	± 0.0363	± 0.0071	± 1.184	± 2.915	± 0.079
S9-1	179.1892	88.0716	0.9858	185.994	-540.516	-1717.269
	± 0.0276	± 0.0348	± 0.0030	± 1.856	± 3.475	± 0.111

表 4-33、帶狀區域 2 外方位參數解算成果

Camera station	ω°	φ°	κ°	X_L (mm)	Y_L (mm)	Z_L (mm)
S1-2	179.8518	-6.7006	-0.9013	-1412.901	-153.663	-121.568
	± 0.0609	± 0.0334	± 0.0054	± 1.293	± 2.337	± 0.282
S2-2	179.7109	2.1040	-0.9433	-1166.623	-154.890	-262.979
	± 0.0438	± 0.0286	± 0.0048	± 1.043	± 1.578	± 0.267
S3-2	179.1538	15.7050	-0.9234	-887.569	-155.888	-405.546
	± 0.0203	± 0.0115	± 0.0042	± 1.805	± 3.391	± 0.304
S4-2	179.2390	31.8853	-0.8595	-689.164	-156.861	-557.999
	± 0.0111	± 0.0771	± 0.0067	± 2.026	± 3.252	± 0.268
S5-2	179.3124	44.6048	-0.8438	-480.742	-157.195	-749.839
	± 0.0118	± 0.0599	± 0.0090	± 1.463	± 2.837	± 0.224
S6-2	178.7826	55.0120	-0.8338	-287.291	-157.529	-930.079
	± 0.0177	± 0.0125	± 0.0016	± 1.339	± 3.369	± 0.103
S7-2	179.6180	74.1038	-0.8116	-84.342	-158.207	-1235.478
	± 0.0774	± 0.0836	± 0.0078	± 1.587	± 3.716	± 0.285
S8-2	178.8716	85.3933	-0.9226	59.874	-158.862	-1441.508
	± 0.0552	± 0.0183	± 0.0055	± 1.788	± 3.200	± 0.163
S9-2	178.8862	88.6836	0.9642	205.894	-159.551	-1774.551
	± 0.0333	± 0.0370	± 0.0034	± 2.474	± 2.070	± 0.259



表 4-34、檢核點誤差

點號	Xerr	Yerr	Zerr
CK1	0.223	-0.232	0.926
CK2	0.394	-0.323	0.874
CK3	0.698	-0.189	0.739
CK4	0.591	-0.256	0.476
CK5	-0.550	-0.160	0.454
CK6	0.798	-0.336	-0.493

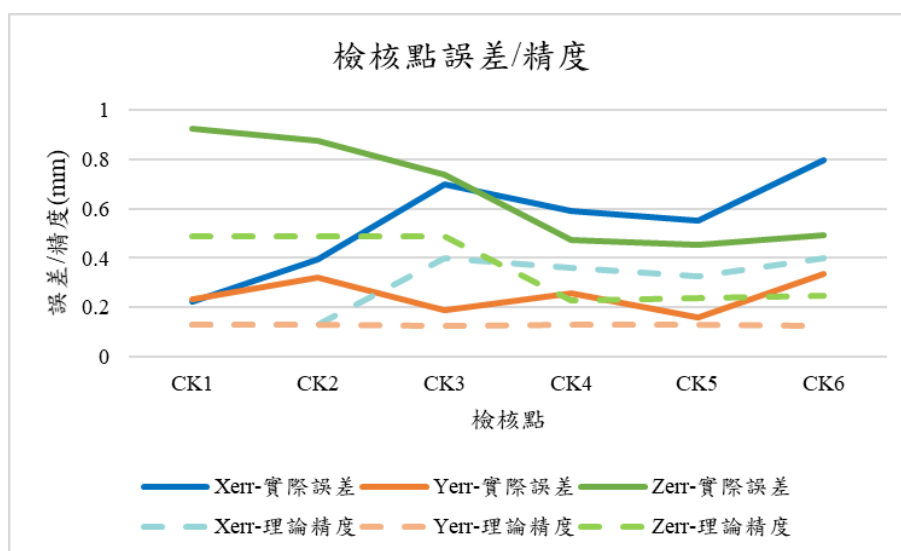


圖 4-31、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度

4.5.5 點雲成果與品質評估

將光束法解算出的外方位參數，再利用 SURE 獲取點雲。圖 4-32 為場景 2 點雲。表 4-34 列出了點雲上量得的檢核點坐標的誤差物距方向上誤差較大。點雲的紋理亮度不一致，有些部分有較強反光，因為使用閃光拍攝原紋理影像，導致同一位置在不同影像上的輻射值有顯著差異，且同紋理的區域於影像上也有明暗差異。

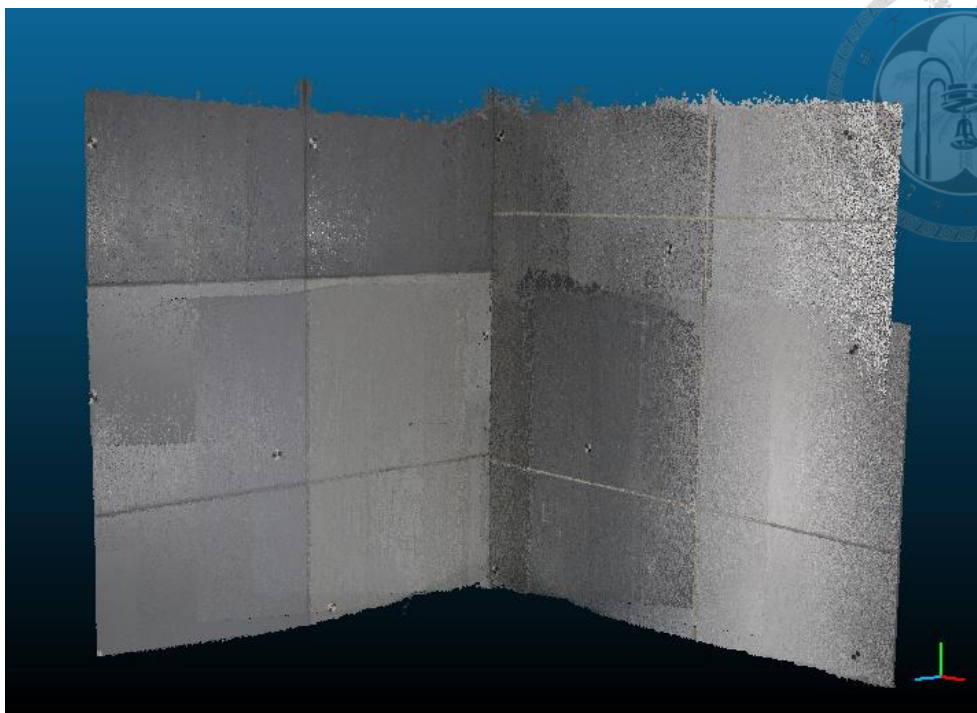


圖 4-32、場景 2 點雲

表 4-35、檢核點誤差

點號	Xerr	Yerr	Zerr
CK1	0.363	0.311	1.097
CK2	0.289	0.212	-1.095
CK3	0.798	-0.244	0.727
CK4	-0.816	-0.262	0.567
CK5	0.744	-0.278	0.609
CK6	-0.932	0.319	-0.653

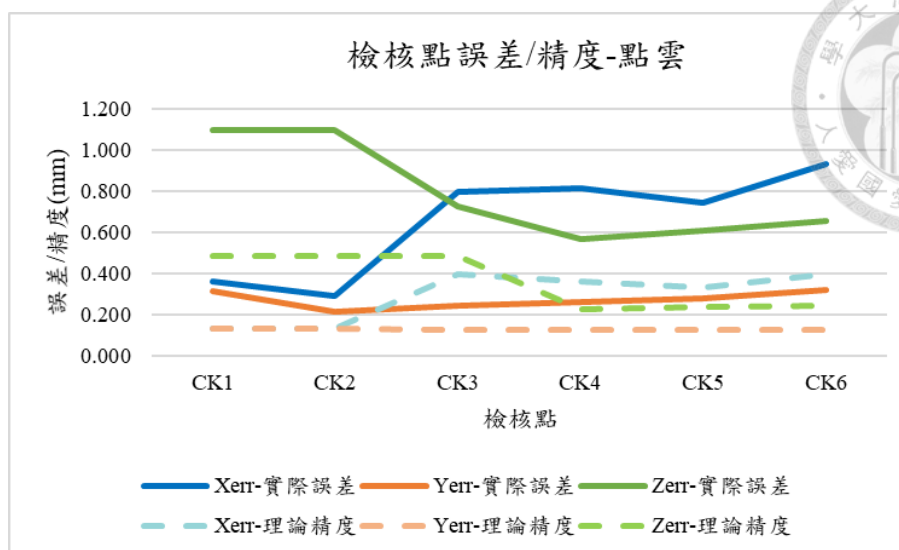


圖 4-33、檢核點的誤差(絕對值)與理論精度

於場景 2 挑選 6 條線段做為場景特徵進行分析，圖 4-12 為線段特徵位置示意圖。該場景重建的重要標的之一為磁磚間的溝縫，圖 4-12 可看到磁磚溝縫及交叉處的點雲均相當完整。表 4-23 列出 6 條線段與磁磚溝縫深度誤差，均小於 1 mm。

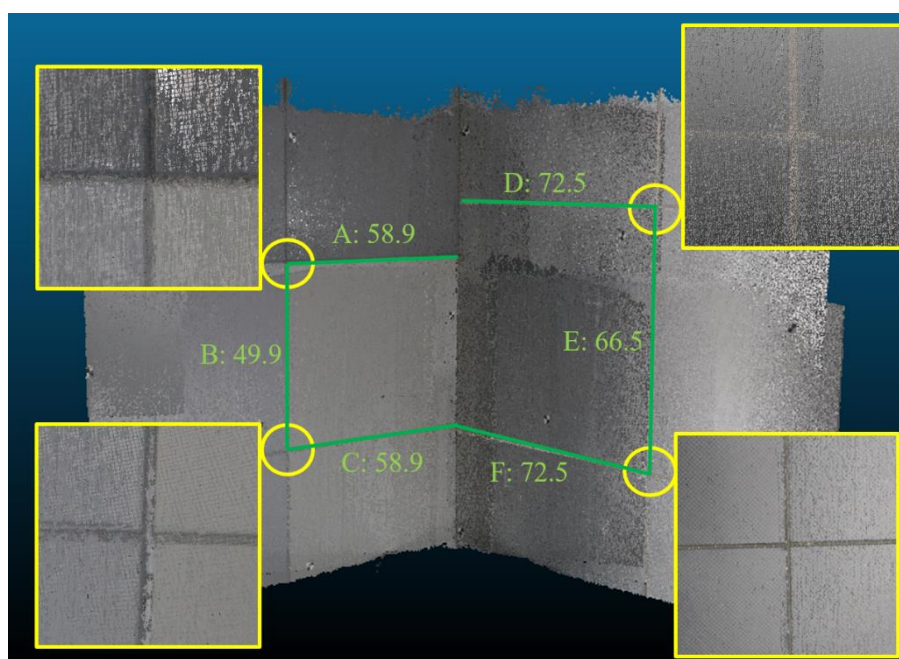


圖 4-34、點雲局部放大與特徵檢核示意圖

表 4-36、特徵檢核

項目	誤差 (mm)
A	0.342
B	-0.497
C	0.825
D	0.270
E	-0.330
F	0.950
磁磚縫深度	0.342
磁磚縫寬度	0.156



4.6 小結

根據圖 1-7 之流程，進行場景 1 與場景 2 之三維重建。整體上，2 個場景均有成功重建，就細節而言，場景 1 之積木邊緣有缺漏。場景 1 檢核點之 XY 坐標誤差不超過 0.4 mm，Z 坐標誤差多數小於 1.5 mm；場景 2 物距方向誤差均小於 1 mm。場景 2 之特徵誤差小於 1 mm，未來可利用該資料檢測牆面受到較強烈的外力作用時，如地震，是否有新的裂縫，若磁磚溝縫變深獲變寬，表示牆面可能有破損。

第五章 結論與建議



5.1 結論

本研究的目標是以較低成本且方便取得的設備進行場景三維重建。為達成此一目標，本研究提出合適的人工紋理及彈性的設備配置，使若紋理區能夠以立體匹配進行三維重建。

1. 本研究以虛擬陣列為基礎設計匹配紋理，並整合匹配紋理及連結紋理進行三維重建，匹配紋理至少出現於 2 張不同位置影像，而連結紋理則至少有 3 張影像，以連接拍攝不同紋理的像對。
2. 在紋理密度的實驗中，設計了 6 種不同大小的紋理單元，成果的量化指標有點雲數量及熵。點雲的視覺比對上可發現邊長 16 和邊長 32 的紋理不是用於場景重建，點雲數量也與其他紋理的成果有明顯差異。視覺上邊長 8 的紋理進行影像密匹配時，有些像點雖然可以找到共軛點，但是位置是錯誤的，邊長 8 的紋理單元在影像上為 22.4 像元，進行匹配時找到錯誤共軛點的機率較大。經實驗結果，建議進行場景重建的紋理的熵至少須達 6.5，且紋理單元成像後大小不超過 11.5 像元。
3. 場景 1 之模擬資料：
 - (1) 理論精度與實際精度的趨勢一致，所以解算實際資料後得到的理論精度可用於評估方位參數和物點解算精度。
 - (2) 比較實驗 1 和實驗 2 的成果可知，提升像點精度，可大幅提升光束法解算品質，因此精進像點量測精度有其必要性。
 - (3) 至少需 3 個全控點或 2 個平控點與 3 個高控點才能滿足坐標基準需求。一般對控制點的佈設要求是能包覆場景，所以控制點都是位於場景四周。在實際實驗中，帶狀區域最左側及最右側的控制點只成像於相鄰的 2 張影像，基高比為 0.13，也就是交會幾何較差。模擬資料實驗 3 從原本的控制點中



選擇 3 個交會角度最差的點作為控制點，其餘作為連結點，實驗成果顯示，控制點的佈設除了考量對場景的包覆性，還需要考慮交會幾何，好的交會幾何可以提升光束法解精度。

4. 場景 1 及場景 2 像點量測說明了，即使控制點及檢核點有較大的幾何變形，還是可以自動化量測像點，且精度可達 ± 0.1 像元。
5. 場景 1 及場景 2 的檢核點誤差顯示在物距方向上的誤差較大，有些點位的誤差略大於工作規劃設定的精度，但仍在容許範圍內。場景中的特徵線段若重建完整，線段的量測誤差是符合需求的。

5.2 建議

本研究提出的以消費型設備對弱紋理區進行影像密匹配的人工紋理和設備配置策略，透過相關實驗驗證此方法之可行性，而最後的研究成果顯示了一些不足之處。場景 1 為人工場景，是將數張紙板拼貼後放上 6 個積木塊，再黏貼於牆上，黏貼時以不破壞牆面為原則，因此只黏貼紙板邊緣，加上受到木塊重量的影響，場景 1 只要受力就會改變，若影像獲取與控制點物空間坐標量測的時間差距較大，有可能場景已產生變動，就會影響光束法解算品質及點雲精度。

實驗所使用的設備數量為本研究進行場景重建最少的需求量，相對的，影像獲取時間亦較長，包含搬動設備的時間，場景 1 需要 1 小時才能完成影像獲取，場景 2 則須 3 小時，若有更多的投影機或相機，就可以減少移動設備的時間。另外，建議為投影機設計專屬腳架，以方便更換投影機位置。

場景 1 有 6 個積木塊，放置的目的為檢驗對於小區域內有幾何變化的場景是否能進行三維重建，成果顯示人工紋理會弱化積木邊緣導致重建不完整。建議進行後續研究的場景若有類似場景 1 積木的特徵，可以增加拍攝多角度影像，並以原場景紋理對該特徵進行影像密匹配。

拍攝同一區域原場景紋理影像時，不同位置的影像之輻射值均不同，若有較顯著差異，密匹配後的點雲成果會有色調不一致的現象，若要改善點雲的視覺效果，

需進行影像色彩改正。






參考文獻



- Ackermann, F., 1983. High precision digital image correlation, *Proceedings of the 39th photogrammetric Week*, University of Stuttgart, pp. 231-243.
- Alexander, O., M. Rogers, W. Lambeth, M. Chiang, and P. Debevec, P., 2009. Creating a photoreal digital actor: The digital emily project, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 176-187.
- Barnea, D. I., and H. F. Silverman, 1972. A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, *IEEE Transactions on Computers*, c-21:179-186.
- Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, L. Van Gool, 2008. Speeded-up robust features (SURF), *Computer vision and image understanding*, 110(3), pp. 346-359.
- Camera Coordinate System, 2014. SURE-Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. URL: <https://goo.gl/uRz4zj> (last accessed: 30 April 2017).
- Chuang, T. Y., and Jaw, J. J., 2017. Multi-Feature Registration of Point Clouds, *Remote Sensing*, 9(3): 281.
- Geng, J, 2011. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, *Advances in Optics and Photonics*, 3(2): 128-160.
- Gonzalez, R. C., R. E. Woods, and S. L. Eddins, 2011. Digital Image Processing Using MATLAB, McGraw-Hill Education, Gatesmark, LLC, 738p.
- Hirschmüller, H., 2005. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2:807-814.
- Hirschmüller, H., 2008. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2):328-341
- Lin, H., L. Nie, and Z. Song, 2016. A single-shot structured light means by encoding both

- 
- color and geometrical features, *Pattern Recognition*, 54:178-189.
- Lowe, D. G., 1999. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features, *IEEE Conference on Computer Vision*, 2:1150-1157.
- Luhmann, T., S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, 2014. Close-range photogrammetry and 3D imaging, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 684p.
- Mattoccia, S., 2012. Stereo Vision: Algorithms and Application, University of Bologna, [URL: https://goo.gl/QRJbkf](https://goo.gl/QRJbkf) (last date accessed: 12 April 2016)
- Mayer, H., 2015. From Orientation to Functional Modeling for Terrestrial and UAV Images, *Proceedings of the photogrammetric week 2015*, University of Stuttgart, pp. 185-174.
- Rothermel, M., K. Wenzel, D. Fritsch, and N. Haala, 2012. SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery, *Proceedings Low-Cost 3D (LC3D) workshop*, Berlin.
- Scharstein, D., and R. Szeliski, 2002. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms, *International Journal of Computer Vision*, 47:7-42.
- Scharstein, D., and R. Szeliski, 2003. High-accuracy stereo depth maps using structured light, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003)*, 1:195-202.
- Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry-Vol. 1, TerraScience, pp. 247 & 300.
- Trimble, 2013. Trimble M3 DR Series Total Station User Guide, [URL: https://goo.gl/3gzh95](https://goo.gl/3gzh95) (last date accessed: 01, April, 2016).
- Van der Jeught, S., and J. J. J. Dirckx, 2016. Real-time structured light profilometry: a review, *Optics and Lasers in Engineering*, 87: 18-31.
- Wenzel, K., M. Abdel-Wahab, A. Cefalu, and D. Fritsch, 2012. High-resolution surface reconstruction from imagery for close range cultural Heritage applications,

International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS 2012 Congress,
Vol. 39, Part B5.

Wenzel, K., M. Rothermel, N. Haala, and D. Fritsch, 2013a. Image acquisition and model selection for multi-view stereo, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W1.

Wenzel, K., M. Rothermel, N. Haala, and D. Fritsch, 2013b. SURE – The ifp Software for Dense Image Matching, *Proceedings of the photogrammetric Week 2013*, University of Stuttgart, pp. 59-70

Wolf, P. R., B. A. Dewitt, and B. E. Wilkinson, 2014. Elements of photogrammetry: with applications in GIS, McGraw-Hill, 676p.

Wu, C., 2011. “VisualSFM: A Visual Structure from Motion System”, URL: <https://goo.gl/liwyZz> (last date accessed: 01, April, 2016).

丁皓偉，2014。結合十字區塊匹配之半全域式匹配法優化作業，國立臺灣大學土木工程研究所，碩士論文，162p。

趙鍵哲，2016。Introduction of Photogrammetry，測量及空間資訊概論授課投影片，國立臺灣大學土木工程研究所。

趙鍵哲，2017。Feature-based Registration of LiDAR Point Clouds，攝影測量特論授課投影片，國立臺灣大學土木工程研究所。



附錄一

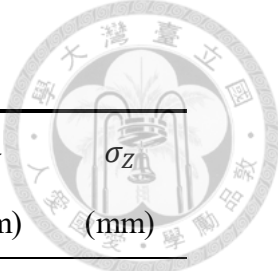
附表-1、Canon EOS 70D 規格(<https://goo.gl/GY4mLA>)

	感光元件種類	CMOS
	感光元件大小	22.5 x 15.0 mm
	感光元件像素(有效像素)	約 2020 萬像素
	最大解析度	6000×4000
	快門速度	1/4000 秒至 30 秒
	感光元件種類	CMOS

附表-2、EPSON EB-1860 規格(<https://goo.gl/W7sxB2>)

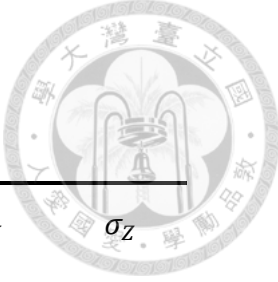
	投影方式	RGB 三片 TFT LCD
		同時聚合呈像投影
	投影亮度	4000 流明
		4000 流明
	標準解析度	XGA 1024x768
	投影畫面比例	4:3
	投射距離	0.84~13.9 m

附表-3、場景 1 控制點及檢核點坐標與精度



ID	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
CP1	-673.429	297.082	-3772.873	±0.04	±0.04	±0.01
CP2	-669.916	-32.821	-3767.766	±0.04	±0.04	±0.01
CP3	-666.434	-340.147	-3775.575	±0.04	±0.04	±0.01
CP4	-208.337	303.696	-3764.026	±0.04	±0.04	±0.01
CP5	-208.977	-315.199	-3762.039	±0.04	±0.04	±0.01
CP6	340.296	303.485	-3763.479	±0.04	±0.04	±0.01
CP7	333.430	-361.826	-3761.960	±0.04	±0.04	±0.01
CP8	878.083	290.373	-3754.776	±0.04	±0.04	±0.01
CP9	880.597	-356.349	-3754.690	±0.04	±0.04	±0.01
CP10	1316.160	290.281	-3753.346	±0.04	±0.04	±0.02
CP11	1308.858	-33.962	-3746.825	±0.04	±0.04	±0.01
CP12	1293.329	-353.532	-3752.671	±0.04	±0.04	±0.01
CK1	-371.101	197.475	-3765.609	±0.04	±0.04	±0.01
CK2	-256.924	-109.647	-3713.508	±0.04	±0.04	±0.01
CK3	29.378	78.106	-3759.074	±0.04	±0.04	±0.01
CK4	260.783	-84.727	-3760.015	±0.04	±0.04	±0.01
CK5	446.186	179.512	-3741.213	±0.04	±0.04	±0.01
CK6	562.665	-35.944	-3764.007	±0.04	±0.04	±0.01
CK7	724.834	42.353	-3724.896	±0.04	±0.04	±0.01
CK8	1071.511	141.541	-3753.487	±0.04	±0.04	±0.01
CK9	1104.942	-144.343	-3697.744	±0.04	±0.04	±0.01

附表-4、場景 2 控制點及檢核點坐標與精度



ID	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
CP1	-917.554	114.981	-2304.379	± 0.02	± 0.02	± 0.01
CP2	-885.105	-324.217	-2306.846	± 0.02	± 0.02	± 0.01
CP3	-850.634	-971.648	-2309.467	± 0.02	± 0.02	± 0.01
CP4	-1984.239	145.038	-2326.259	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CP5	-1991.900	-1035.384	-2326.500	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CP6	-2025.462	85.591	-1190.537	± 0.01	± 0.02	± 0.02
CP7	-2025.385	-452.034	-1177.488	± 0.01	± 0.02	± 0.02
CP8	-2027.942	-1027.060	-1181.712	± 0.01	± 0.02	± 0.02
CK1	-1391.501	-133.524	-2316.966	± 0.02	± 0.03	± 0.01
CK2	-1645.888	-644.588	-2320.441	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CK3	-2016.821	-386.032	-2299.631	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CK4	-2018.558	107.724	-1747.399	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CK5	-2020.592	-632.714	-1639.685	± 0.02	± 0.03	± 0.02
CK6	-2017.495	-1035.248	-1794.892	± 0.02	± 0.03	± 0.02



附錄二



觀測方程式：

$$F = T(x, y) + V_T - [h_0 + h_1 S(a_0 + a_1 x + a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y)]$$

未知參數係數矩陣 A ：

$$A = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial h_0} & \frac{\partial F}{\partial h_1} & \frac{\partial F}{\partial a_0} & \frac{\partial F}{\partial a_1} & \frac{\partial F}{\partial a_2} & \frac{\partial F}{\partial b_0} & \frac{\partial F}{\partial b_1} & \frac{\partial F}{\partial b_2} \end{bmatrix}_{8 \times i}$$

$$= - \begin{bmatrix} 1 & S(x', y') & h_1 S'_x & x h_1 S'_x & y h_1 S'_x & h_1 S'_y & x h_1 S'_y & y h_1 S'_y \end{bmatrix}_{8 \times i}$$

其中，

$$S'_x : x \text{ 方像的灰階梯度}, S'_x = \frac{S(x'+1, y') - S(x'-1, y')}{2};$$

$$S'_y : y \text{ 方像的灰階梯度}, S'_y = \frac{S(x', y'+1) - S(x', y'-1)}{2};$$

i ：像點個數。

假設旋轉角為 0，尺度為 1，則進行平差時未知數初值為：

$$h_0 = \frac{S_{TS}}{S_T^2}; h_1 = \frac{\sum S_i}{n} - h_0 \frac{\sum T_i}{n}.$$

$$a_0 = x' - x; a_1 = 1; a_2 = 0$$

$$b_0 = y' - y; b_1 = 0; b_2 = 1$$

$$S_{TS} = \sum (T_i S_i) - \frac{(\sum T_i)(\sum S_i)}{n}; S_T^2 = \sum T_i^2 - \frac{(\sum T_i)^2}{n}$$

其中，

T_i ：目標視窗灰階值；

S_i ：搜尋視窗灰階值。





附錄三

觀測方程式：

$$\begin{cases} F_1 = x_a - x_0 - f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \\ F_2 = y_a - y_0 - f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \end{cases}$$

觀測方程式係數矩陣 B ：

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_a} & \frac{\partial F_1}{\partial y_a} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_a} & \frac{\partial F_2}{\partial y_a} \end{bmatrix}_{2i \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2i \times 2}$$

未知參數係數矩陣 A ：

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \omega_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial F_1}{\partial \kappa_1} & \frac{\partial F_1}{\partial X_{L1}} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_{L1}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{L1}} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial \omega_j} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial F_1}{\partial \kappa_j} & \frac{\partial F_1}{\partial X_{Lj}} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_{Lj}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{Lj}} & \frac{\partial F_1}{\partial X_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial X_i} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_i} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_i} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \omega_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial F_2}{\partial \kappa_1} & \frac{\partial F_2}{\partial X_{L1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_{L1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{L1}} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial \omega_j} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial F_2}{\partial \kappa_j} & \frac{\partial F_2}{\partial X_{Lj}} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_{Lj}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{Lj}} & \frac{\partial F_2}{\partial X_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_1} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial X_i} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_i} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_i} \end{bmatrix}_{2i \times (6j+3i)}$$

$$= \begin{bmatrix} (a_{11})_1 & (a_{12})_1 & (a_{13})_1 & (-a_{14})_1 & (-a_{15})_1 & (-a_{16})_1 & \cdots & (a_{11})_j & (a_{12})_j & (a_{13})_j & (-a_{14})_j & (-a_{15})_j & (-a_{16})_j & (b_{14})_1 & (b_{15})_1 & (b_{16})_1 & \cdots & (b_{14})_i & (b_{15})_i & (b_{16})_i \\ (a_{21})_1 & (a_{22})_1 & (a_{23})_1 & (-a_{24})_1 & (-a_{25})_1 & (-a_{26})_1 & \cdots & (a_{21})_j & (a_{22})_j & (a_{23})_j & (-a_{24})_j & (-a_{25})_j & (-a_{26})_j & (b_{24})_1 & (b_{25})_1 & (b_{26})_1 & \cdots & (b_{24})_i & (b_{25})_i & (b_{26})_i \end{bmatrix}_{2i \times (6j+3i)}$$

j 為相機站數； i 為像點個數



其中，

$$\Delta X = X_A - X_L ; \Delta Y = Y_A - Y_L ; \Delta Z = Z_A - Z_L ;$$

$$q = m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L) ;$$

$$r = m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L) ;$$

$$s = m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L) ;$$

$$a_{11} = \frac{f}{q^2} [r(-m_{33}\Delta Y + m_{32}\Delta Z) - q(-m_{13}\Delta Y + m_{12}\Delta Z)] ; a_{21} = \frac{f}{q^2} [s(-m_{33}\Delta Y + m_{32}\Delta Z) - q(-m_{13}\Delta Y + m_{12}\Delta Z)] ;$$

$$a_{12} = \frac{f}{q^2} [r(\cos \varphi \Delta X + \sin \omega \sin \varphi \Delta Y - \cos \omega \sin \varphi \Delta Z) - q(-\sin \varphi \cos \kappa \Delta X + \sin \omega \cos \varphi \cos \kappa \Delta Y - \cos \omega \cos \varphi \cos \kappa \Delta Z)] ;$$

$$a_{22} = \frac{f}{q^2} [s(\cos \varphi \Delta X + \sin \omega \sin \varphi \Delta Y - \cos \omega \sin \varphi \Delta Z) - q(\sin \varphi \sin \kappa \Delta X - \sin \omega \cos \varphi \sin \kappa \Delta Y + \cos \omega \cos \varphi \sin \kappa \Delta Z)] ;$$

$$a_{13} = -\frac{f}{q}(m_{21}\Delta X + m_{22}\Delta Y + m_{23}\Delta Z) ; a_{23} = \frac{f}{q}(m_{11}\Delta X + m_{12}\Delta Y + m_{13}\Delta Z) ;$$

$$a_{14} = \frac{f}{q^2}(rm_{31} - qm_{11}) ; a_{24} = \frac{f}{q^2}(sm_{31} - qm_{21}) ;$$

$$a_{15} = \frac{f}{q^2}(rm_{32} - qm_{12}) ; a_{25} = \frac{f}{q^2}(sm_{32} - qm_{22}) ;$$

$$a_{16} = \frac{f}{q^2}(rm_{33} - qm_{13}) ; a_{26} = \frac{f}{q^2}(sm_{33} - qm_{23}) ;$$