

國立臺灣師範大學

地理學系第一屆空間資訊碩士在職專班論文

以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像快速空間
資料產製之探討



指導教授：張國楨

研究生：徐金煌

中華民國一〇六年六月

以 Pix4Dmapper 進行 UAV 影像快速空間資料產製之探討

A Study of the Use of Innovative Software Pix4Dmapper to Generate Spatial Data rapidly from UAV's Aerial Images

徐金煌^a

張國楨^b

Chin-Huang Hsu

Kuo-Chen Chang

關鍵詞: 無人飛行載具、Pix4Dmapper、影像匹配

摘要

近年來因微機電系統(Micro-electromechanical Systems - MEMS)的演進迅速，提升無人飛行載具 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)自動導航系統的可靠度和性能，使得 UAV 操控可以完全自動化，提升航拍作業時的安全性，又因 UAV 有較佳的機動性和可在低空 30-50 公尺執行任務，以取得高解析度的航拍影像，因此平時可進行長期的環境變遷監測；災時可快速取得影像資料，以做為決策分析等應用。但傳統使用 UAV 進行正射影像產製，必須透過地面控制測量、空中三角測量與立體製圖等方式，才可以取得正射影像與地形資訊，無法滿足災害發生時需快速取得空間資料之需求，因此如何透過 UAV 所拍攝的影像資訊快速產製正射影像與地形資訊為本研究之重點。本研究將以 Pix4Dmapper 為先進技術軟體，探討以 UAV 航拍取像後，透過先進技術取得正射影像與地形資料之可行性。結果顯示，UAV 拍攝所得影像透過 Pix4Dmapper 進行影像匹配三維點生成地表模型，快速生產正射影像，並可以不需經由人工介入的空中三角測量步驟回推內、外方位參數。並以苗栗後龍溪測區為例，在涵蓋範圍 4 平方公里，影像數量 354 張，在自動化的作業流程下，可在 5 小時內取得相關空間資料，經檢核後，正射影像之平面精度均方根誤差 30 cm 內。

^a 國立台灣師範大學地理系第一屆空間資訊碩士在職專班研究生

^b 國立台灣師範大學地理學系教授

A Study of the Use of Innovative Software Pix4Dmapper to Generate Spatial Data rapidly from UAV's Aerial Images

Key Words: UAV, Pix4Dmapper, image matching

ABSTRACT

.....

It is the rapidly developing and evolution of micro-electromechanical systems (MEMS) in the past years and it have been improved for the reliability and performance of the automatic navigation and operation system of UAV (Unmanned Aerial Vehicle), hence UAV can be fully automated and improved the security during aerial photo capturing. Due to UAV has better mobility and can perform tasks at low altitude in 30m to 50m to obtain high-resolution aerial image, so it can be using in long-term environmental change monitoring in normal ; but it can quickly obtain the aerial image data in disaster to analyze and make the decision and other applications. However, the traditional orthoimage process to produce images captured by UAV, it has to implement ground-based measurements, aerial triangulation, and stereoscopic mapping are required to obtain orthophoto and terrain information, but it can not meet the need for rapid acquisition of spatial data when a disaster occurs. How to produce orthophoto and terrain information by UAV is the focus of this study. The study focus on optimizing the process and on reducing time-consumption to acquiring orthophotos and the DSM from UAVs' aerial image by using Pix4Dmapper. The Pix4Dmapper could automatically process orthophotos and the DSM purely using aerial image captured by UAVs. The Houlong River, Miaoli, Taiwan case is used in the study. The Houlong River covers an area about 4 sq. km, and the analysis of aerial images of the River are 354 images. The automatic process workflow of acquiring orthophotos and the DSM from the aerial images by the Pix4Dmapper is within 5 hours. And the accuracy achieve 30 cm RMS error.

目錄

第一章、緒論	1
第一節 研究動機與目的	1
第二節 文獻探討	3
第三節 遭遇問題與解決方法	4
第二章、研究測區與實驗	5
第一節 使用軟硬體設備	5
第二節 Pix4DMapper 軟體操作業流程	6
第三節 研究測區-苗栗後龍溪實際案例探討	11
第四節 未做控制點約制的後龍溪正射影像平面精度之檢核	27
第三章、結論與建議	30
參考文獻	31
附錄一、控制點與檢核點的點誌記	33
附錄二、後龍溪測區成果品質報告書	45
致謝	54

圖目錄

圖 1	傾斜式拍攝與 3D 建物模型	1
圖 2	光雲原理	5
圖 3	影像重疊率示意圖	7
圖 4	相機參數設定畫面	8
圖 5	像主點計算示意圖	8
圖 6	控制點編修操作畫面	9
圖 7	加密三維光雲示意圖	9
圖 8	鑲嵌線編修操作畫面	10
圖 9	光雲群組分類操作畫面	10
圖 10	SV-1000A 定翼型 UAV	11
圖 11	Sony DSC-RX100 數位相機	12
圖 12	相機像素寬度與 GSD 的對應關係	12
圖 13	UAV 實際拍攝的航線圖	21
圖 14	苗栗後龍溪測區正射影像成果	23
圖 15	苗栗後龍溪測區 DSM	23
圖 16	苗栗後龍溪測區以 KML 格式套疊在 Google Earth 之成果	23
圖 17	苗栗後龍溪測區 3D 點雲成果	24
圖 18	控制點(黃色)與檢核點(紅色)分布圖	26
圖 19	已知控制點基線(藍線)與無正射影檢檢核點基線(黃線)	27
圖 20	ML08 已知控制點(黃色)與 CK08 無正射影檢檢核點(紅色)	28
圖 21	ML01 已知控制點(黃色)與 CK01 無正射影檢檢核點(紅色)	28
圖 22	ML05 已知控制點(黃色)與 CK05 無正射影檢檢核點(紅色)	29
圖 23	ML12 已知控制點(黃色)與 CK12 無正射影檢檢核點(紅色)	29
圖 24	ML03 已知控制點(黃色)與 CK03 無正射影檢檢核點(紅色)	29

表目錄

表 1	LiDAR/Pix4D/NGATE 影像檢核精度比較表	3
表 2	控制點與檢核點的三維坐標	25
表 3	控制點檢核精度表	25
表 4	影像檢核精度表	26
表 5	其無地面控制的正射精度與已知控制點的較差(Dxy)	28

附錄圖目錄

圖附 1	ML01 地面控制點(黃色)和點誌記	33
圖附 2	ML03 地面控制點(黃色)和點誌記	34
圖附 3	ML05 地面控制點(黃色)和點誌記	35
圖附 4	ML08 地面控制點(黃色)和點誌記	36
圖附 5	ML12 地面控制點(黃色)和點誌記	37
圖附 6	ML02 地面檢核點(紅色)和點誌記	38
圖附 7	ML04 地面檢核點(紅色)和點誌記	39
圖附 8	ML06 地面檢核點(紅色)和點誌記	40
圖附 9	ML07 地面檢核點(紅色)和點誌記	41
圖附 10	ML09 地面檢核點(紅色)和點誌記	42
圖附 11	ML10-1 地面檢核點(紅色)和點誌記	43
圖附 12	ML11 地面檢核點(紅色)和點誌記.....	44



第一章、緒論

第一節 研究動機與目的

由於微機電系統(Micro-electromechanical Systems - MEMS)的發展迅速，提升無人飛行載具 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 或無人飛行載具系統 UAS (Unmanned Aircraft System)自動導航系統的可靠度與性能，使得 UAV 操控得以全自動化，提升航拍作業時的安全度。

無人飛行載具 UAV 一般主要分為旋翼機、定翼機兩種，但兼具定翼與旋翼優點的垂直起降複合機 VTOL (Vertical Take-Off and Landing) 亦陸續在發展中，應使用哪種形式的 UAV，主要取決於滯空時間、航拍高度、拍攝面積、地面解析度和地形考量等因素，國內研製的大型定翼 UAV 滯空時間可長達 3-8 小時，飛行速度可高達 100km 時速以上，能在海拔 1,000 公尺至 4,000 公尺間的航高執行作業，如此可獲取較大航拍的範圍和較遠距的航拍任務，而旋翼型 UAV 可作定點巡航拍攝，所拍攝的影像地面解析度(GSD)可優於 5 公分；另以傾斜式攝影 (Oblique photography)方法，可得到建物側面影像資訊，產製擬真的 3D 建物模型 (Photorealistic 3D model)如圖 1，以解決數位城市(Smart City)中巨量建物模型建置的成本與時效。

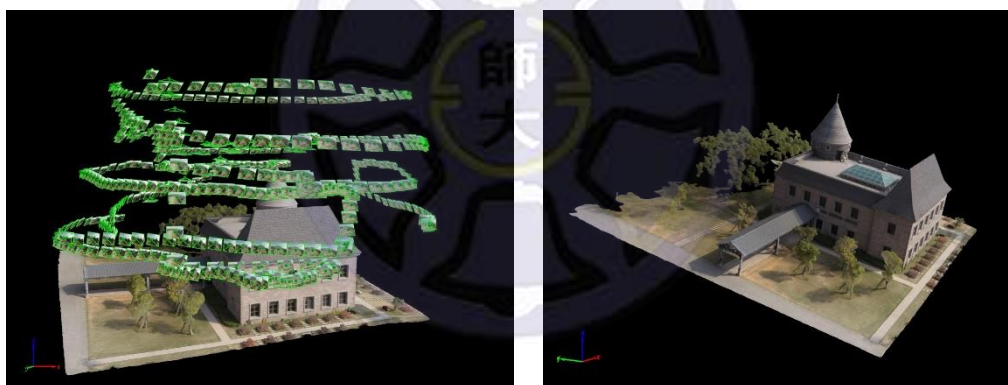


圖 1 傾斜式拍攝與 3D 建物模型

因 UAV 有較佳的機動性，可在雲下的低空執行任務，取得高解析度的航拍影像，平時可做為長期環境變遷的監測；災時可快速取得影像資料，做為決策分析等應用。相似於傳統航空攝影測量方式，UAV 進行航空攝影測量所使用到的硬體設備大致包括：一台輕型 UAV，衛星定位系統(GPS)，慣性導航系統(INS)，以及用來進行拍攝動作的消費型相機或攝影機。以一般市面上常見之微型定翼 UAV，材料多為高密度泡棉，材質具有遇紫外線不產生反應、對酸鹼穩定、不吸水、不易形變、且燃燒不產生有毒氣體等優點，因此此類載具不但具有許多優勢、價格低廉，材料容易取得，為製造 UAV 之理想材質。而機上搭載 GPS 及 INS 兩大系統，能取得空中三維坐標及姿態參數，將此六參數解算至相機曝光點與投影中心，作為後續解算影像外方位參數的初始值。與傳統空中三角測量稍有不同的是姿態參數之取得，UAV 之 INS 使用低規格的航姿參考系統 (Attitude and

Heading Reference Systems - AHRS)，但同樣具有加速規(Accelerometer)、陀螺儀(Gyroscope)及電子羅盤(Digital Compass) 輔以濾波器取得三軸方位。

傳統利用 UAV 進行製圖，常遇到一些困難處包含：低精度 GPS、低精度 INS（或無 INS）、非量測型相機、GPS/INS 與相機間之幾何關係、模糊影像與 UAV 飛行中抗風力較低等問題，上述問題皆影響後續空中三角測量與立體測繪作業程序中，造成資料產製耗時和精度品質不佳。應用 UAV 在緊急防救災時所產製的空間資訊，雖在資料精度上並不會要求太精確，但對於原始資料取得後的產製時效性卻相當重要，以作為防救災時的決策參考的依據。為解決上述問題，本研究提出以 Pix4Dmapper 軟體之先進的影像匹配與自動化產製程序，藉以快速取得正射影像，探討 UAV 拍攝影像產製空間資料之時效性與資料精度評估。



第二節 文獻探討

UAV 搭載之非量測型相機內方位參數不如量測型相機來的穩定，故須先以近景攝影測量率定相機，解算相機焦距及鏡頭畸變差，才能用於後續正射影像產製程序（謝幸宜，2011）；使用不同相機率定結果，對空三平差成果將無法達到預期的先驗精度，且高程精度的影響最深，但如採以附加參數進行自率光束法空三平差，無論是以何種軟體率定，只要以自率光束法空三平差的方法，均能有相當一致的成果（顏怡和，2011）。

國內利用 UAV 航拍影像作為航測製圖應用中，內政部國土測繪中心在 2011 至 2014 年度的「發展無人飛行載具航拍技術作業」計畫中，使用非測量型 Canon 5D MKII 相機和 ERDAS LPS 製作正射影像，其精度在山區或平地區均可符合基本圖測製規範要求，亦即「正射影像位於平坦地表面無高差移位的明顯地物點其位置中誤差應小於 2.5 公尺，最大誤差應小於 10 公尺」之規定（內政部國土測繪中心，2012），後續國土測繪中心「發展無人飛行載具系統測繪作業計畫」計畫執行中，在 2016 年度共計有 25 區的 UAV 航拍及影像處理作業，其正射影像成果精度亦達到「臺灣通用電子地圖相關測製規範要求」，作為臺灣通用電子地圖局部區域圖資的更新作業（內政部國土測繪中心，2016）。

應用 UAV 測製地形圖相關實驗中，國外 Vallet (2011) 以 Helimap 校正場 (Calibration field) 導入微型定翼 UAV Swinglet 酬載消費型相機 Canon Ixus 120IS，以離地面 100 公尺和 150 公尺的兩種航拍高度、交叉航線攝影方式，GSD 約 4cm，利用航測數值工作站 BAE SocetSet 與空三平差軟體 BINGO 和校正場的 LiDAR DTM 成果資料作為比較的基準，來探討 Pix4D UAV 影像處理軟體所產製的相機率定參數(Camera Parameters)、自率光束法空中三角測量平差 (Self-Calibration Bundle Adjustment) 成果和 DTM 地形資料做精度檢核比較，其中 DTM 精度比較是以三者不同方法包含 LiDAR、Pix4D 和 NGATE，其中 NAGATE 是 BAE 公司 SOCET GXP 航測軟體的 NGATE(Next-Generation Automatic Terrain Extraction) 模組，可利用影像匹配方式自動所產製的 DTM 的比較如下表 1 所示，Pix4D 所產製的 DTM 精度標準差可達近 10cm。

表 1 LiDAR/Pix4D/NGATE 影像檢核精度比較表

[m]	Average	Standard. deviation	Min	Max
LiDAR	0.007	0.040	-0.085	0.047
Pix4D	0.047	0.095	-0.073	0.223
NGATE	0.110	0.267	-0.093	0.835

Table 3: Statistics of height difference between DTM's and GCP's. This observation confirm the previous observation with an accuracy (1 sigma) of ~10cm for the Swinglet Pix4D DTM and of ~30cm for the Swinglet NAGTE DTM

國內亦以旋翼型 UAS 在 200 公尺航高，使用 Canon 550D 焦距約 28mm 的非量測型數位相機取得航拍地面解析度約 10cm 影像，在無地面控制點條件下，利用 Pix4DMapper 和高精度 GPS 觀測量作為空中控制輔助的自動化空中三角測量平差，空三平差之後的平面與高程精度均在 1 公尺以內，且其所製作正射影

像的精度平面可高達 0.20 公尺 (邱式鴻, 2015), 對於 UAV 搭載採用消費型攝影機 GOPRO HERO3, 飛行高度約 200 公尺, 採用 4K 動態攝影採集地形資訊, 搭配 Pix4Dmapper 影像處理軟體可快速製作空間解析度 15.6 公分正射影像及 DSM 等資料, 經檢核點位的精度可達 7.5 公分(X), 4.2 公分(Y), 12.4 公分(Z), 研究分析後可應用於防災之需求(白絜成, 2015)。

第三節 遭遇問題與解決方法

由於機翼長度約一公尺的小型 UAV, 它的酬載重量大都在 1.5 公斤以內, 扣除電池重量, 僅能搭載非測量用的消費型數位相機, 而消費型相機在機身結構穩定性和鏡頭防震度較不佳, 又小型 UAV 飛行上容易受到側風的影響, 造成拍攝影像較易模糊或拍攝角度過大, 在空間資料產製中會造成影像自動匹配不佳等影響而使得資料成果精度不好; 另 UAV 拍攝的像幅涵蓋面積較小, 當測區面積較大時, 拍攝影像數量少則數百張照片, 多則會有數千張影像, 選用空間資料產製效率高且資料成果精度能達到 1 公尺之內, 利用較高效能的硬體, 其處理時效不超過半個工作日條件下, 如何選用適合的 UAV 空間資料產製軟體工具至為重要, 不但該工具須自動剔除航拍時品質不佳的影像外, 對於全程資料處理過程中, 可降低人為介入處理作業亦是考慮的因素, 市面上以電腦視覺原理處理三維模型重建的軟體甚多, 但 Pix4DMapper 以 SIFT 演算法進行影像特徵值萃取及匹配和 DAISY 演算法進行密集點雲重建成果精度較佳(蕭震洋, 2015), 且因全程自動化處理的作業, 能自動剔除品質不佳的影像, 本研究課題是假設災害發生時, 例如颱風地震等天然災害所造成的土石流、大規模崩塌或房屋、農作物、堤防等災損, 擬以 UAV 緊急拍攝所獲得的高解析度影像, 以 Pix4DMapper 產製空間資料包含正射影像、地形資料等, 並探討其成果精度和完成所有的資料產製所需的時間, 據以評估是否可作為防救災指揮中心做為災害的面積範圍、災損判釋和量測分析, 以做為緊急救災評估決策之用。

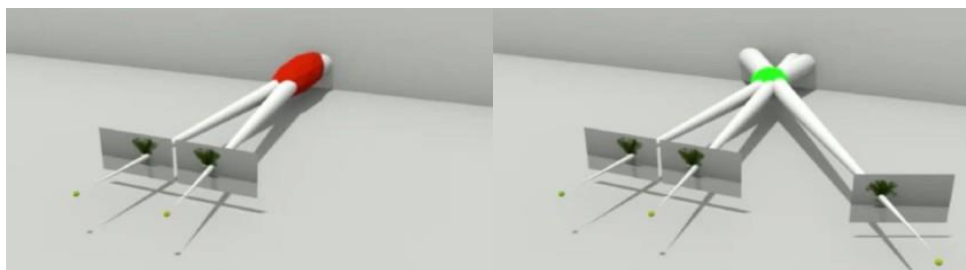
第二章、研究測區與實驗

第一節 使用軟硬體設備

本研究方法是採用 Pix4D 公司所研發的 UAV 影像處理軟體-Pix4DMapper，其有別於傳統航測軟體在資料處理條件上有諸多的限制，該軟體核心技術是從瑞士洛桑聯邦理工學院（EPFL）計算機視覺實驗室的 Dr. Christoph Strecha 與其團隊，於 2011 年將相關研究成果彙整，研發出來之新創公司(Pix4D)，主要特色是針對 UAV 拍攝的影像、使用消費型數位相機和利用影像加密匹配 (dense image matching) 技術作為 UAV 航測處理的解決方案。

Pix4Dmapper 之自動匹配能力極高，可在像對中自動匹配特徵點，進行內、外方位參數解算，而經自動空三與平差處理後，為使成果三維視覺化展示，Pix4Dmapper 產製光雲(RayCloud)進行後續 DSM 之解算，解算出 DSM 後，即可使用 DSM 進行正射糾正，產製正射影像。Pix4Dmapper 軟體分有雲端與桌機版本，主要以 UAV 拍攝之影像匹配三維點生成地表模型，快速產出正射影像、DSM 等地形資訊。此軟體自動進行空中三角測量步驟，並回推內、外方位參數，過程不需人工介入。軟體支援的輸入影像格式包括：Jpeg、多色帶 8 或 16 位元 Tiff（RGB/紅外/熱影像），輸出網格式之正射影像、數值表面模型、紀錄空三平差後之曝光站三維點位文字檔，成果也可套疊於 Google Earth 與 Google Map，解算之內、外方位參數可供 Bingo、Orima 等專業空三軟體使用 (Laurent, 2012)。

Pix4Dmapper 之自動匹配能力極高，可在像對中自動匹配特徵點，進行內、外方位參數解算，而經自動空三與平差處理後，為使成果三維視覺化展示，Pix4Dmapper 產製光雲(RayCloud)進行後續 DSM 之解算，解算出 DSM 後，即可使用 DSM 進行正射糾正，產製正射影像。其中光雲產製之原理如下圖 2 所示，以立體製圖原理，可由兩曝光站與兩像點交會求出物點之絕對位置，而此點位若有第三張相片加入時，即可作為多餘觀測，使此點位結果經過更嚴謹之平差處理，計算出之誤點坐標精度較高，而 Pix4Dmapper 即是利用此方式產製光雲。



(源自 <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559139-What-is-the-Theoretical-Error-S-X-Y-Z-of-a-computed-3D-point>)

圖 2 光雲原理

第二節 Pix4DMapper 軟體操作業流程

Pix4Dmapper 為專業 UAV 後製處理軟體，從原始影像 EXIF 讀取 GPS 紀錄、相機參數設定到空間資料產製都有自動化的作業流程，相關作業流程圖如下：



圖 3 Pix4Dmapper 操作流程

(一) UAV 影像品質檢核

UAV 拍攝之影像，若影像中含有雲，在影像匹配時難以辨認有效之特徵點，而拍攝時受到側風影響使得拍攝影像模糊，也會影響後續解算成果，為避免此情況發生，在執行前應將此類影像剔除，此外，為實現自動化影像匹配，影像的前後、左右重疊率亦為重要之考量因素，以下針對各種情況說明：

1. 雲

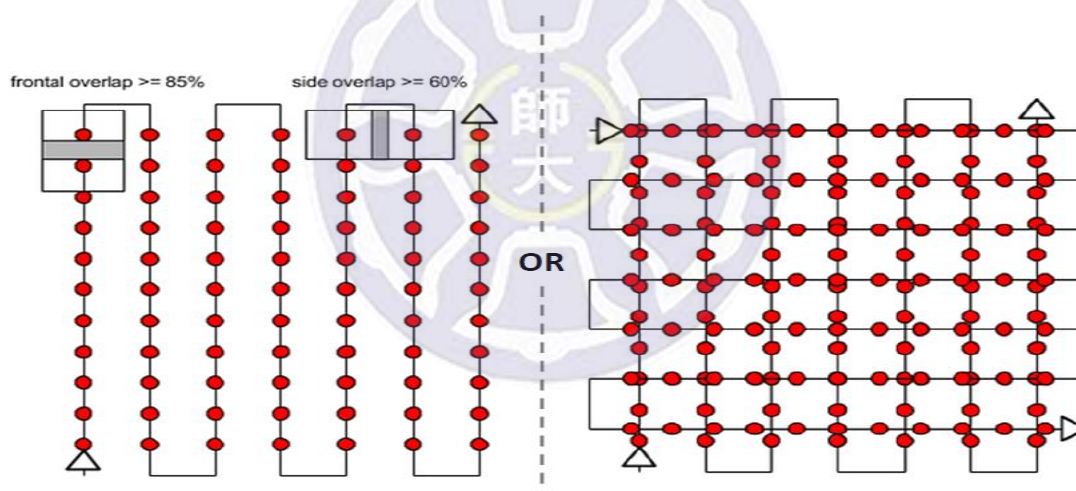
若影像中含雲範圍太大，需重飛補拍再進行專案合併；但若影像涵蓋率高僅有小部分雲則仍可運算，之後再於鑲嵌線編修模組中進行人工處理即可。在地形允許的情況下，UAV 可在雲下飛行避開雲層，但需注意若在水面上進行飛航拍攝則仍會留有雲影影響匹配與正射影像成果。

2. 模糊影像

處理前應剔除模糊影像，或者鑲嵌完成後的正射編修步驟再剔除。若模糊影像為連續數張，則需鑲嵌完成後再作處理。

3. 重疊率

Pix4Dmapper 之影像匹配能力佳，惟在自動匹配時，若影像重疊率過低，會無法萃取特徵點，完成匹配。在地形起伏較小的平原地區，需達到前後重疊率 75%以上、左右重疊率 50%以上；如圖 3，在地形起伏較大之山區，需達到前後重疊率 85%以上、左右重疊率 60%以上，或在密林區、植被相似度高的測區可採用棋盤式飛行之方式，以達到更高重疊率以提高影像匹配正確率之要求。



(源自 <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-Acquisition-Plan#gsc.tab=0>)

圖 3 影像重疊率示意圖

(二) 建立專案

建立專案檔將影像匯入，並設定坐標系統及初始方位。專案檔的建立可支援未來跟其他相關專案檔進行合併工作。

(三) 相機參數設定

以往使用 UAV 拍攝影像欲產製正射影像前，必須對相機焦距、影像畸變及離心畸變差進行率定。Pix4Dmapper 軟體已建立大量之相機參數資料庫可使用，如圖 4 所示，一般相機可直接於下拉選單選取，若有自行率定後的

參數，亦可新增或修改，並可將自己輸入的相機參數匯出儲存，建立使用者常用的客製化相機參數資料庫。輸入參數包括：像幅 (pixel)、焦距、像主點位置、像幅大小 (mm)；另可輸入鏡頭畸變差 K1、K2、K3 與 P1、P2。像主點位置計算如圖 5 所示：如已知像主點與相片中心偏移量為 0.001、-0.002，而像幅大小為 10 mm x 10 mm，則像主點實際於相片坐標系的位置為 $(10/2) + 0.001$ ； $(10/2) + 0.002$ ，故輸入 5.001，5.002。

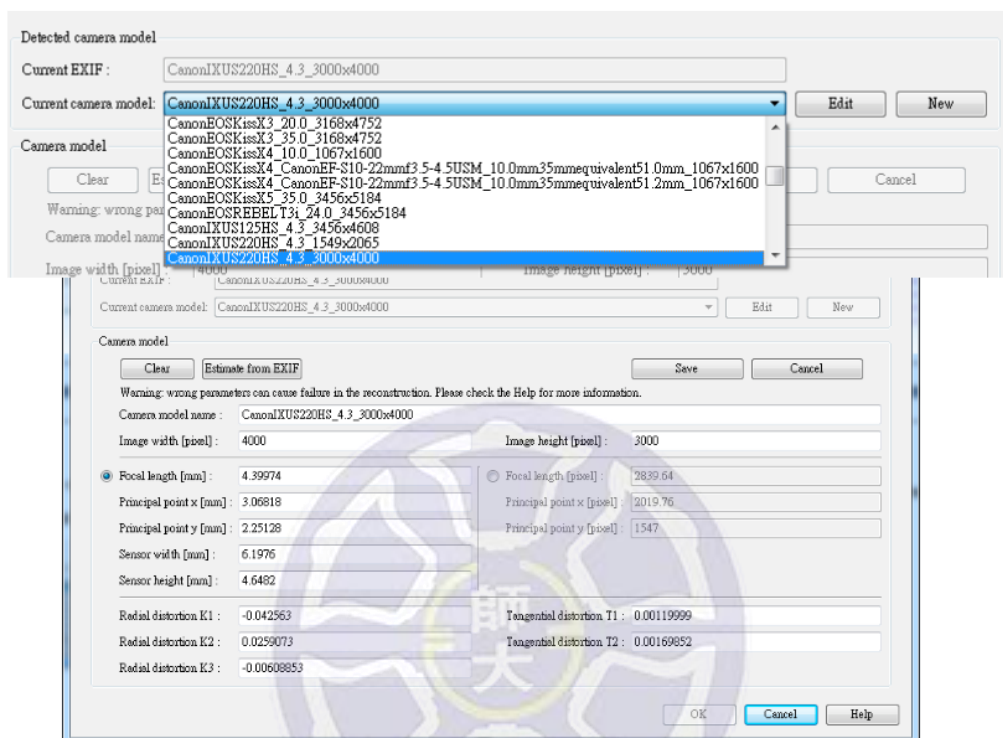


圖 4 相機參數設定畫面

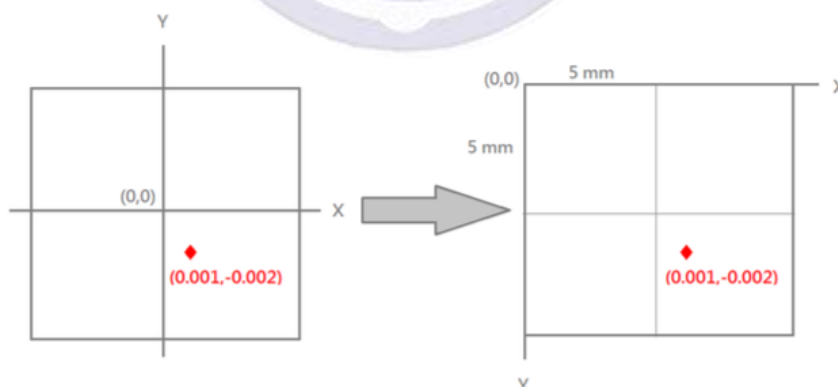


圖 5 像主點計算示意圖

(四) 控制點輸入及編修

如圖 6 所示，軟體內建控制點輸入與編修功能，可以搭配實地控制點測量成果，提升產製空間資料的精度。

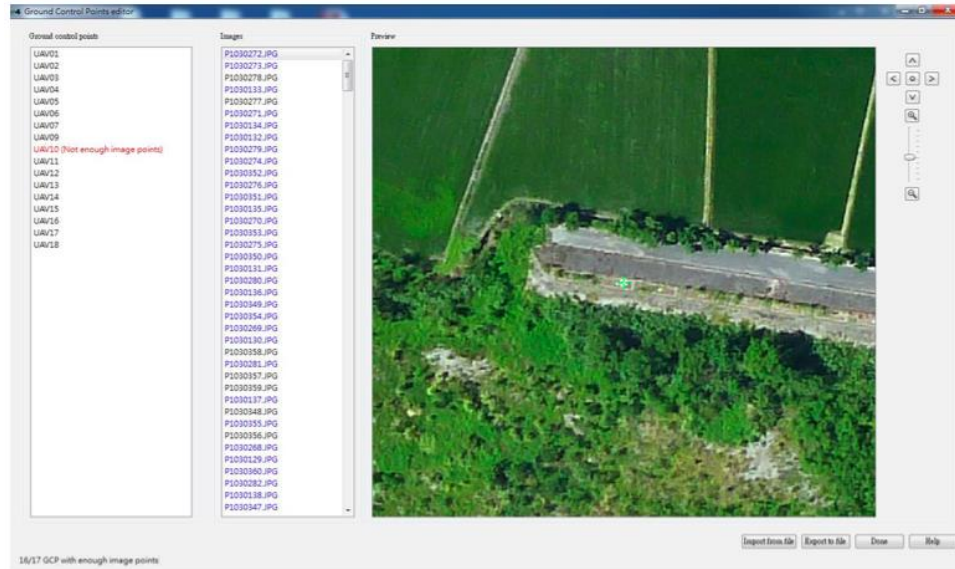


圖 6 控制點編修操作畫面

(五) 運算模組

軟體運算核心在新版本改用圖形處理器 (Graphic Processing Units, GPU) 進行運算，大幅降低圖資運算時間。內建模組包含初始計算、加密三維光雲與正射糾正 (圖 7) 與鑲嵌，使用者可依據不同的需求進行設定。



圖 7 加密三維光雲示意圖

(六) 鑲嵌線編修

如圖 8 所示，軟體內建鑲嵌線編修功能，可以透過編修鑲嵌線，選擇適合的影像進行鑲嵌工作；軟體提供兩種正射糾正模式，orthomosaic 為使用匹配產生的 DSM 進行正射糾正；planar 則為以平面進行正射糾正。



圖 8 鑲嵌線編修操作畫面

(七) 光雲群組分類

如圖 9 所示，透過影像處理可以得到類似 LiDAR 點雲（Point Cloud）資料的光雲資料，軟體內建光雲資料過濾分類功能，提供使用者自行設定過濾條件，過濾出建物模型、地形模型等。

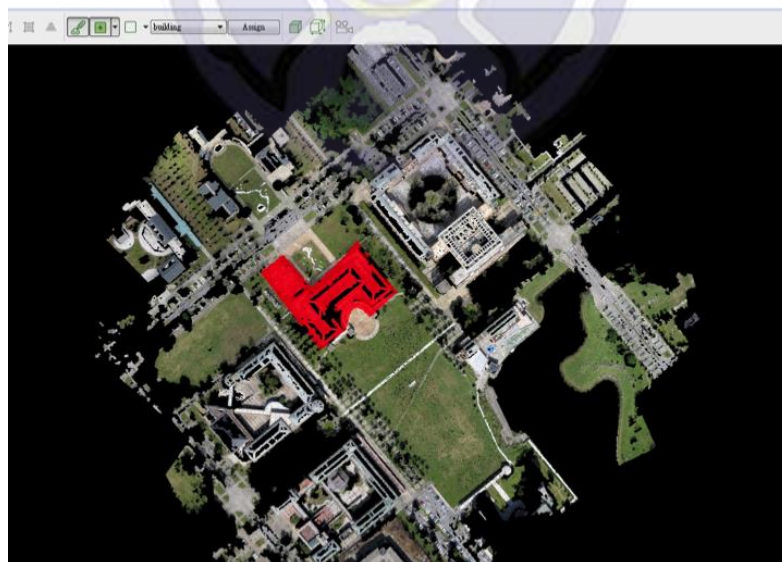


圖 9 光雲群組分類操作畫面

(八) 空間資料產製

運算之後的成果，可輸出標準的空間資料，提供後續加值。輸出成果包含：Kml、Orthomosaic、DSM、DSM Point Cloud、Triangle mesh model、Parameters、Contour line 等。

第三節 研究測區-苗栗後龍溪實際案例探討

本研究是以 Pix4DMapper 應用於空間資料產製上其時效性與資料精度問題的探討，故以苗栗的後龍溪測區為實驗區(以下簡稱本專案)，採國產觀天科技有限公司所自行研發的小型定翼型 UAV，型號 SV-1000A 進行空中對地垂直攝影，SV-1000A UAV 主要規範如下：

- (1). 固定翼型態，翼展 1000mm。
- (2). 動力採鋰電池。由無刷馬達推動螺旋槳前進。滯空時間 30--40 分鐘。
- (3). 內建 GPS、IMU、資料記錄器等。
- (4). 內建飛航控制器，可自動導航拍照及起飛及降落。
- (5). 整體重量包含電池及相機 1100--1300g。
- (6). 最大巡航速度至少 10m/s(含)以上。
- (7). 具拍攝穩定控制。
- (8). 具自動返航功能。當電力不足或超出作業範圍時會自動返航。
- (9). 起飛方式不須特別裝置可由人工釋放起飛。
- (10). 內建通訊裝置，最大可控制範圍至少 1.5km 以上。
- (11). 外型照片如圖 10

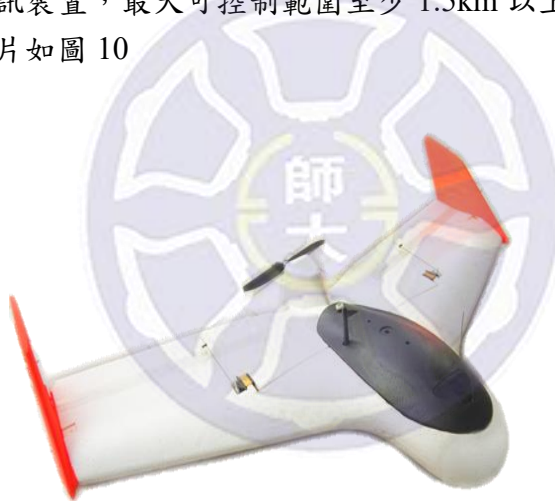


圖 10 SV-1000A 定翼型 UAV

取像設備採用以非量測用相機（non-metric camera）Sony DSC-RX100，影像解析度為 4,864 x 3,648 (RGB)，其感光元件尺寸(Sensor Dimensions)為 13.000 [mm] x 9.750 [mm]，相機外型照片如圖 11。



圖 11 Sony DSC-RX100 數位相機

本專案的航線設計規劃如下：

- (1) 相鄰航線左右重疊率為 55%，同一航線的前後重疊率為 80%，故同一航線影像每隔 55 公尺拍一張，航線間相隔 150 公尺，此測區規劃七條航線，每條航線長度為 2.4 公里，。
- (2) 依據相機感光元件(CCD sensor)的每一像素寬度(Pixel Size) 與相機焦距長 (Focal Length)，相對於地面解析度(GSD, Ground. Sample Distance) 與航高（離地表高 Above Ground Level, AGL），如圖 12 所示；



圖 12 相機像素寬度與 GSD 的對應關係

可得到關係式為：

$$\frac{\text{Pixel Size}}{\text{Focal Length}} = \frac{\text{GSD}}{\text{AGL}}$$

如相機沒有直接提供 CCD Pixel Size 規範，但有感光元件尺寸(Size)規範，例如 Sony DSC-RX100 是 13mm x 9.750 mm，將感光元件尺寸除上最大解像度 4,864 x 3,648，即得到 Pixel Size 為 2.67 μ m (13mm / 4,864=2.67 μ m)。

本專案設計欲得到地面解析度 7.5cm GSD (Ground Sample Distance)，其航高 AGL 約為 330 公尺(測區的海拔高度約 30 公尺-120 公尺)。

- (3) 共拍攝影 359 張而每張影像大小約 8MB(jpg 格式)，拍攝所涵蓋範圍約 3.78 平方公里。全程拍攝時間約僅 20 分鐘即完成。

本研究是採用 Pix4D 公司於 2016 所發表的 Pix4Dmapper 3.0.17 版本進行處理，處理的電腦硬體是搭配 Intel i7-6700@3.4GHz CPU，16GB RAM 和 nVIDIA GeForce GTX960 GPU 進行運算，含地面控制點、檢核點的輸入與篩選，全程作業時間約 5 小時內，即可完成 DSM 和正射影像之產製，並取得地面解析度 7.54 cm 之正射影像與網格大小 7.54 cm 之 DSM。Pix4DMapper 處理完成每個階段資料成果後，會自動產生一份品質報告(Quality Report)，茲將本實驗專案品質報告之內容作一簡述如後：

(1). 總表(Summary):

Summary

Project	miaoli_1219
Processed	2017-01-25 10:27:43
Camera Model Name(s)	DSC-RX100_10.4_4864x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	7.54 cm / 2.96 in
Area Covered	3.7803 km ² / 378.027 ha / 1.4603 sq. mi. / 934.61 acres
Time for Initial Processing (without report)	18m:02s

其內容包含專案名稱、資料處理開始的日期與時間、航拍相機的型號與影像解析度，正射影像空間解析度(GSD)、測區影像資料涵蓋範圍、初始處理所耗時間，本專案的正射影像 GSD 為 7.54cm，涵蓋 3.7803 平方公里，使用 18 分 03 秒完成專案初始計算的成果。

(2). 品質檢核表(Quality Check):

Quality Check

Images	median of 56980 keypoints per image	✓
Dataset	354 out of 358 images calibrated (98%), 1 images disabled	✓
Camera Optimization	0.03% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 28168.8 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.006 m	✓

本專案的整體檢核共有五項檢核作業，該項如合格，系統會用✓為標示。每項檢核項目的說明如後：

- Images :針對每張影像是否有足夠的特徵點(Keypoint)數量可以做為後續的處理，本實驗專案所使用的影像特徵點的中位數(Median)是 56,980，最低標準必須超過 10,000 特徵點。如果影像模糊或影像不易辨識的特

徵點例如水體、雲霧或沙等佔據整體影像比例過大，就會產生特徵點點數不足的問題。

- Dataset: 整個專案所使用與未使用(被剔除)的影像數量
- Camera Optimization: 相機率定優化後的焦距和仿射變換參數(affine transformation parameters)與相機初始值的比較，一般透鏡(Perspective lens)的初始值與優化後的率定值差異不能高於 5%，本專案僅有 0.03% 的差異；如是使用魚眼鏡頭(Fisheye lens)拍攝，其優化後仿射變換參數 C 和 F 亦不能高於 5%。
- Matching: 已校正過影像的匹配數量，本實驗專案每張影像匹配點中位數是 28,168.8，最低必須高於 1,000。此匹配指標可以看到專案區的匹配品質與強度都非常的好。
- Georeferencing: 使用多少的地面控制點(GCP)和使用的控制點均方根誤差，控制點的數量建議 5-10 個 GCP，且平均分布整個測區；GCP 控制點均方根誤差需小於平均 GSD 才算通過，本專案共使用 5 個控制點，控制點的均方根誤差為 0.006m。如果 GCP 均方根誤差高 2 倍的 GSD 或者沒有使用 GCP，系統會出現黃色的「!」警告，當高於兩倍 GSD 即是紅色的「!」警告

(3). 正射影像與 DSM 預覽:

Preview

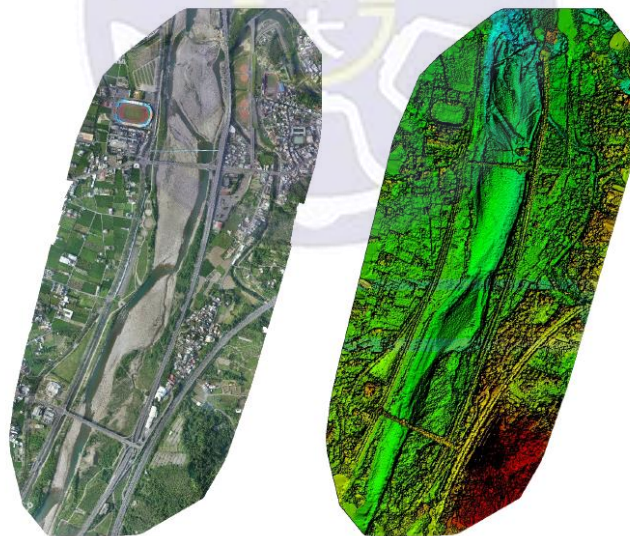


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Preview: 顯示的圖像是作為處理步驟第二階段(點雲密集化)作業之前的正射鑲嵌影像 (Orthomosaic)和數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM) 低解度的預覽，可以對初始率定後的成果品質先進行目視檢查，如果正射影像有發生扭曲，則可能坐標投影定位可能出錯或需要 GCP；如果 DSM 有大的裂縫或突出物，則可能發生多個區塊有互相重疊；如果正射鑲嵌影像和 DSM 中有孔，需檢查 2D 特徵點匹配圖(2D Keypoint Matches graph)。

(4). 影像率定明細表(Calibration Details)

Calibration Details

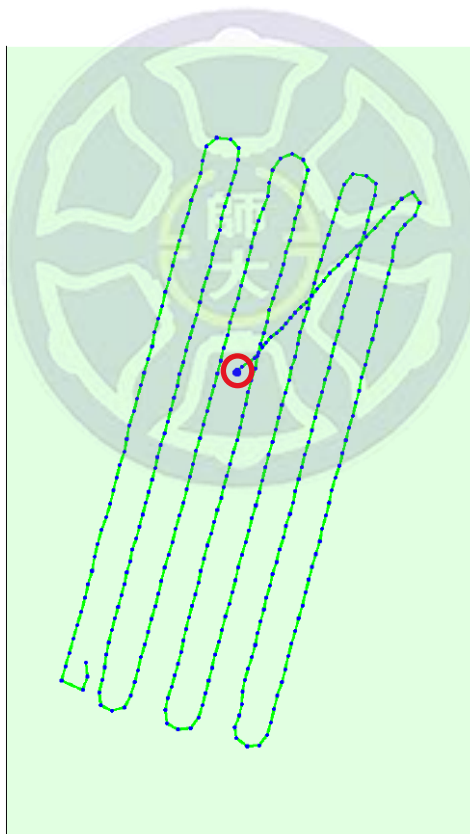
Number of Calibrated Images	354 out of 359
Number of Geolocated Images	358 out of 359

Number of Calibrated Images: 已經校準過的影像數量，即有 354 張影像有已經用於重建(Reconstruction)，相對於本專案中總拍攝的影像總數 359 張（包含有使用和沒使用的影像總數）。

Number of Geolocated Images: 已定位的影像的數量，本專案有 358 張影像已經定位。

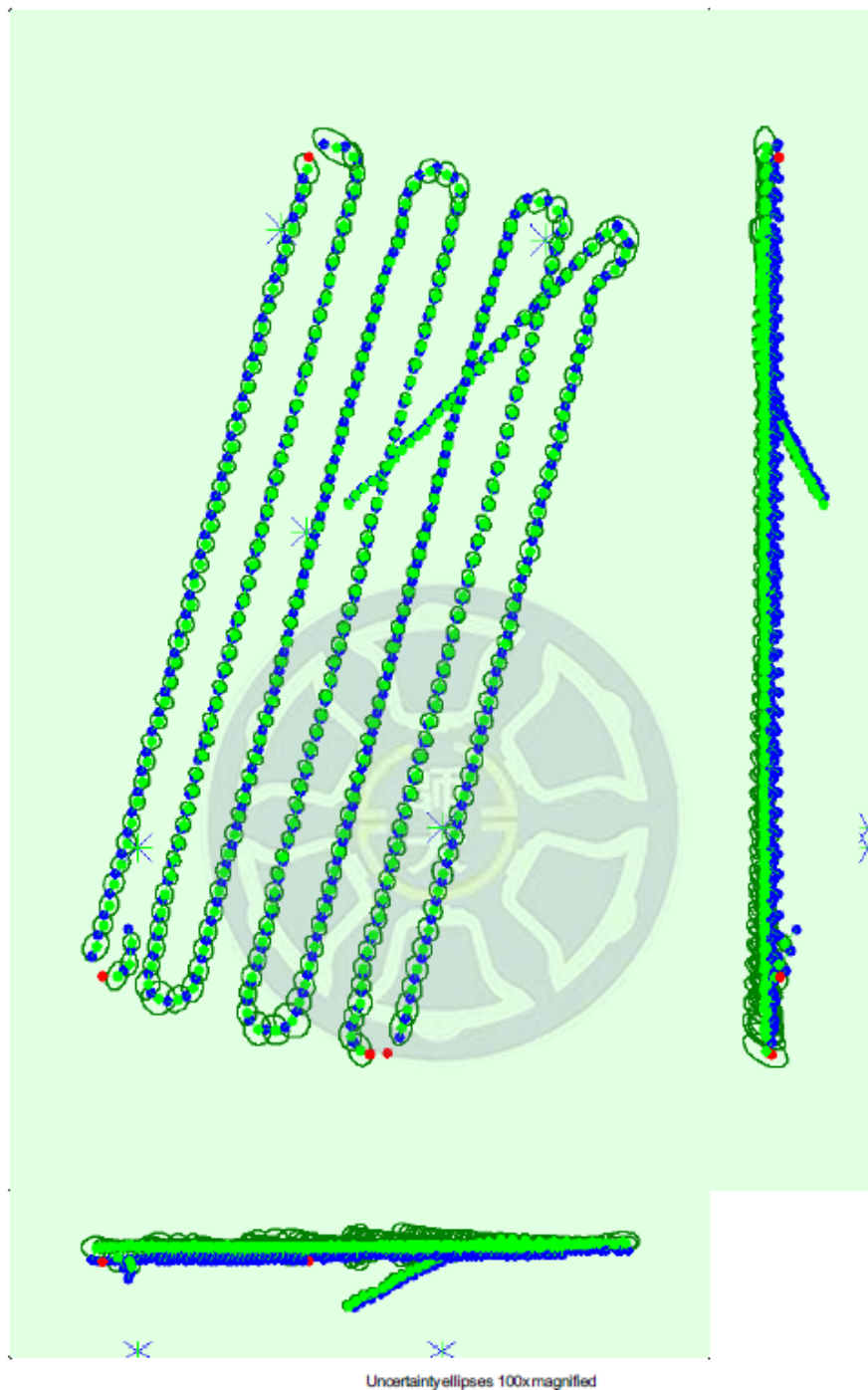
(5). 初始影像航拍軌跡圖(Initial Image Positions)

Initial Image Positions



利用此圖表可以查看 UAV 拍攝每張影像的順序、方向和位置，以便確認與原來所規劃的航拍計劃是否相符，如果順序或方向不對，就會造成影像匹配不好，其中紅色框的較大的藍色點，表示是專案第一張影像起點的位置。

(6). 計算後影像/控制點/手動連結點位置圖(Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions)



上圖中表示初始影像(藍點)和計算後(綠點)影像位置之間的偏移以及 GCP 初始位置(藍色十字)和它們的計算後之位置(綠色十字)之間的偏移；另深綠色橢圓圈表示空三平差成果的精度，愈小愈圓表示精度越好；在測區的外圍航線和轉彎處影像，因影像匹配度不佳，其精度會較差。

(7). 相機內方位誤差(Absolute camera position and orientation uncertainties)

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.220	0.241	0.223	0.040	0.040	0.014
Sigma	0.063	0.075	0.101	0.014	0.015	0.012

Mean X/Y/Z: 相機 X / Y / Z 方向平均誤差值。

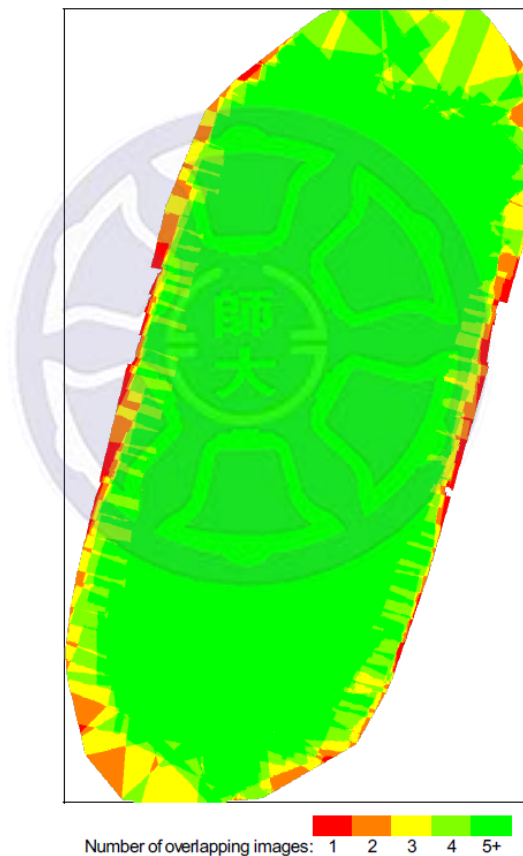
Mean Omega/Phi/Kappa: 相機 omega/phi/kappa 定向角平均誤差值。

Sigma X/Y/Z: 相機 X / Y / Z 方向標準差。

Sigma Omega/Phi/Kappa: 相機 omega/phi/kappa 定向角標準差。

(8). 影像重疊圖(Overlap)

🔍 Overlap



測區內所涵蓋的影像重疊張數圖，綠色區表示有超過 5 張影像重疊到，多餘觀測量足夠，紅色區表示僅有一張影像，其精度誤差會較大。

(9). 光速法平差成果(Bundle Block Adjustment Details)

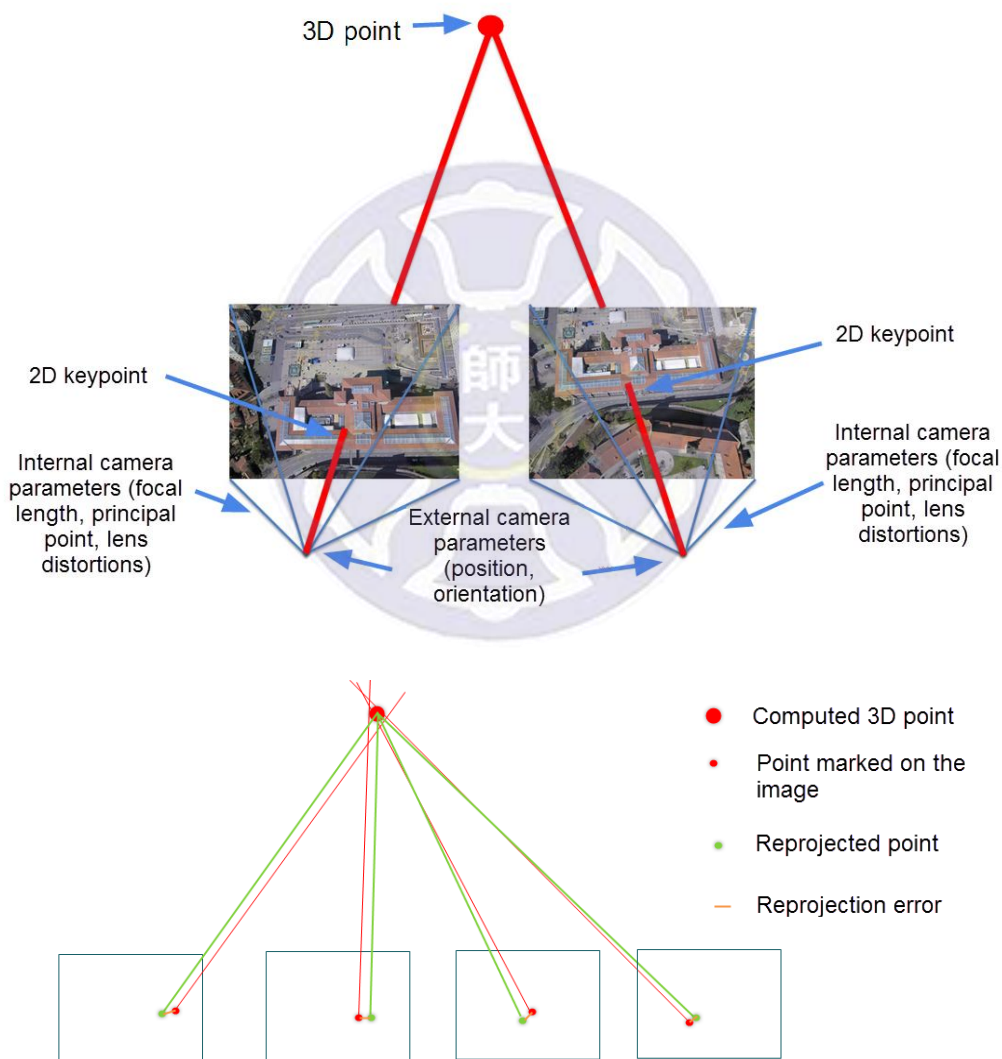
Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	9759497
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3336320
Mean Reprojection Error [pixels]	0.161

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment: 利用自動空中三角測量(AAT) / 光速法平差(BBA)方法得到影像自動連結點的總數量。

Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment: 以匹配好 2D 點所產生 3D 點雲的總數量。

[pixels]:再投影平均誤差(單位:Pixel)◦Reprojection error 是在至少兩張重疊的影像，利用匹配計算的自動連接點(Automatic Tie Point)或透過手動連接點(Manual Tie Point)或 GCP 所得到的點，再以相機的內部和外部參數以及該點的 2D 位置計算出該點的 3D 點 (Computed 3D point) 坐標，3D 點再投影到原有拍攝的影像位置 (Reprojected Point) 與原連結點之間的距離差 (Reprojection error)，如下圖所示。

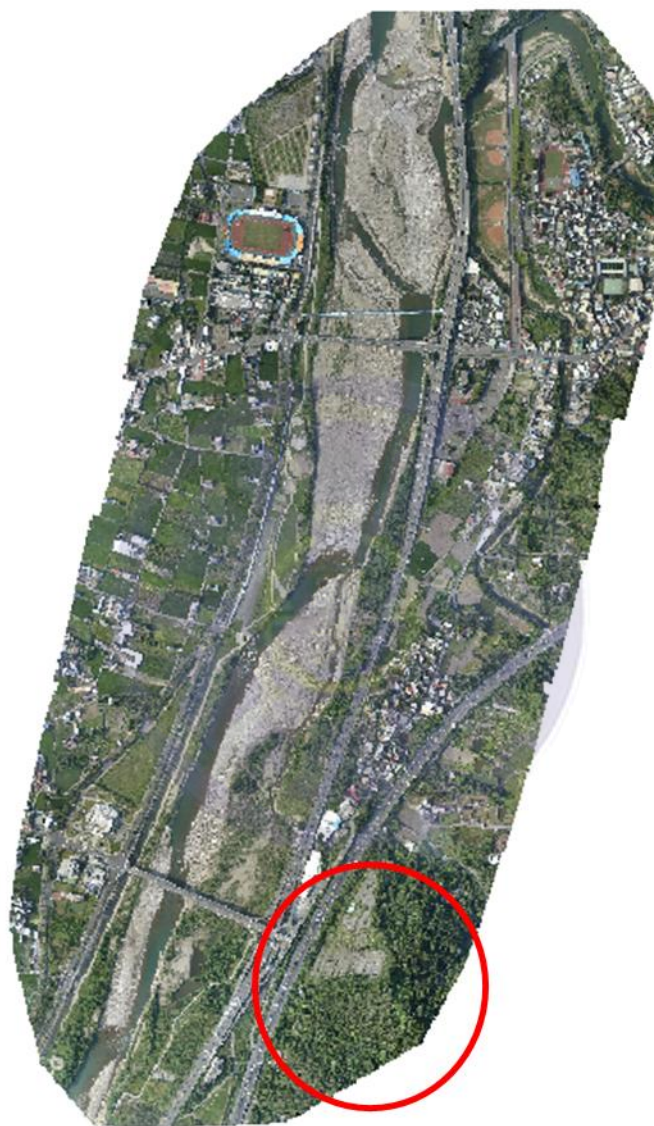


(源自 <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-Error#gsc.tab=0>)

(10). 2D 特徵點匹配圖(2D Keypoint Matches)



圖中影像間的連結線顏色越深(黑色)，表示多張影像間的自動匹配成果佳且連結強度夠，如果連結線顏色是淺色(灰色)，表示影像間連結強度弱，必須利用手動方式做影像間特徵點的連結(manual tie points) 或該地區必須拍攝更多張的影像來加強，以正射影像測區檢查影像後發現該灰色地區(紅色圈)是屬於密林區，故特徵匹配較不好，如下圖紅色圈。



本專案之航線圖如圖 13 與相關成果如圖 14、圖 15、圖 16 和圖 17 所示：



圖 13 UAV 實際拍攝的航線圖

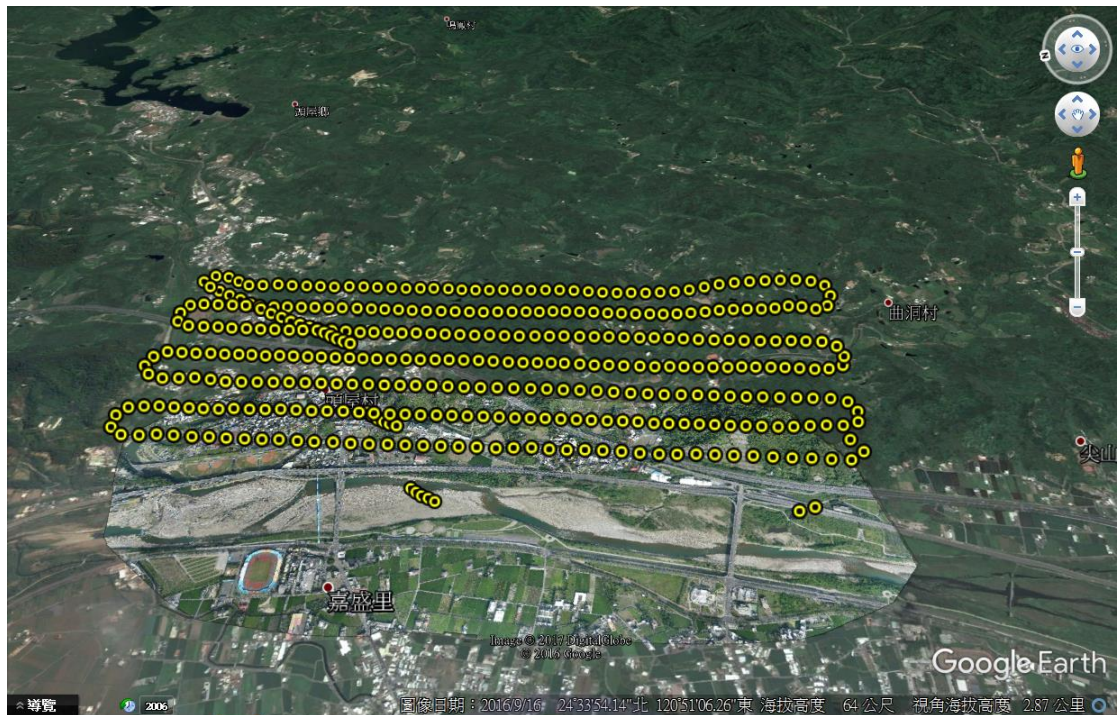


圖 13 UAV 實際拍攝的航線圖(續)

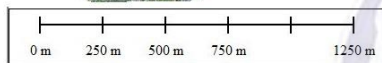


圖 14 苗栗後龍溪測區正射影像成果

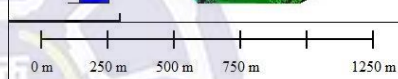
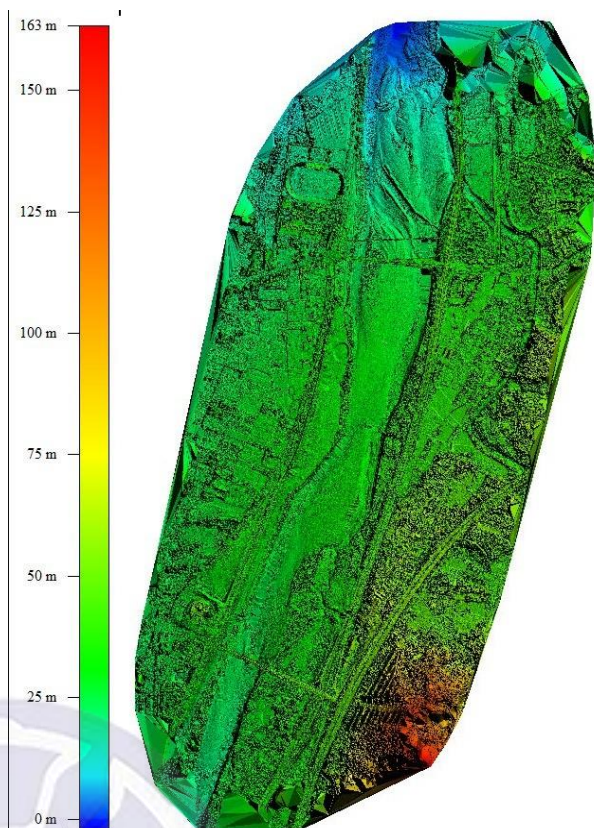


圖 15 苗栗後龍溪測區 DSM



圖 16 苗栗後龍溪測區以 KML 格式套疊在 Google Earth 之成果



圖 17 苗栗後龍溪測區 3D 點雲成果

本研究欲檢驗此成果之精度，由於本專案並未事先布標，故於在測區內實地使用 e-GNSS 儀器施測於影像中易於判釋的地面標線或停車格邊緣，本研究共測量了 12 個地面點位之三維空間坐標，內業作業時，將坐標與控制點位置輸入於軟體中，並在相片中找尋相對應之控制點與檢核點位置，經過計算後，即可解算正射影像中檢核點與實際位置之絕對精度誤差，最後經過篩選後，本實驗場使用 ML1，ML3，ML5，ML8，ML12 等共 5 個點位作為三維控制點，其他的 ML02，ML04，ML0，ML07，ML09，ML10-1，ML11 等共 7 個作為精度誤差檢核點，請參考控制點和檢核點的三維坐標如表 2 所列，控制點與檢核點點誌記請參考附錄一，另附錄二是 Pix4DMappeer 完整的後龍溪測區成果品質報告書，對於航測資料成果是簡而易懂的參考文件，另報告裡也紀錄各種空間資料的產製時程，可作為大區域災害發生時，評估需多少數量的計算主機，才能在時限內完成重要的空間資料產製，以達到緊急防救災決策參考之依據。

表 2 控制點與檢核點的三維坐標

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML01	233919.474	2719084.718	52.832
ML03	234002.374	2718210.58	55.446
ML05	233527.276	2717285.903	65.384
ML08	234683.795	2719066.054	52.032
ML12	234407.389	2717355.698	65.142
精度誤差檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML02	234039.25	2718695.117	58.169
ML04	233908.247	2717935.794	56.654
ML06	233700.838	2718274.887	55.247
ML07	234620.49	2719319.574	54.651
ML09	234554.814	2718627.992	54.388
ML10-1	234582.029	2718223.453	55.046
ML11	234458.318	2717869.579	64.74

點位之示意與空間分布如圖 15 所示，其中藍色點位為控制點，紅色點位為檢核點，七個點檢核點之檢核成果列於下表 3，正射影像之均方根誤差約達 30 cm。

表 3 控制點檢核精度表

控制點	X 方向誤差 (m)	Y 方向誤差 (m)	Z 方向誤差 (m)
ML1 (3D)	0.003	0.013	0.002
ML3 (3D)	0.006	-0.007	-0.008
ML5 (3D)	0.003	0.004	0.011
ML8 (3D)	-0.009	-0.005	0.005
ML12 (3D)	-0.001	-0.004	-0.003
平均誤差(m)	0.000379	-0.000003	0.001492
Sigma(m)	0.005334	0.007595	0.006551
均方根誤差(m)	0.005347	0.007595	0.006719

表 4 影像檢核精度表

檢核點	X 方向誤差 (m)	Y 方向誤差 (m)	Z 方向誤差 (m)
ML2	-0.0619	0.0891	0.2188
ML4	0.1623	0.0695	0.2629
ML9	-0.1707	-0.1846	-0.3483
ML6	0.0267	0.1278	0.3245
ML7	0.0088	0.2184	0.0307
ML10-1	0.2764	0.3456	-0.4311
ML11	0.0415	0.5470	-0.0722
平均誤差 (m)	0.040536	0.173737	-0.002485
Sigma (m)	0.134773	0.213118	0.277200
均方根誤差 (m)	0.140737	0.274962	0.277211

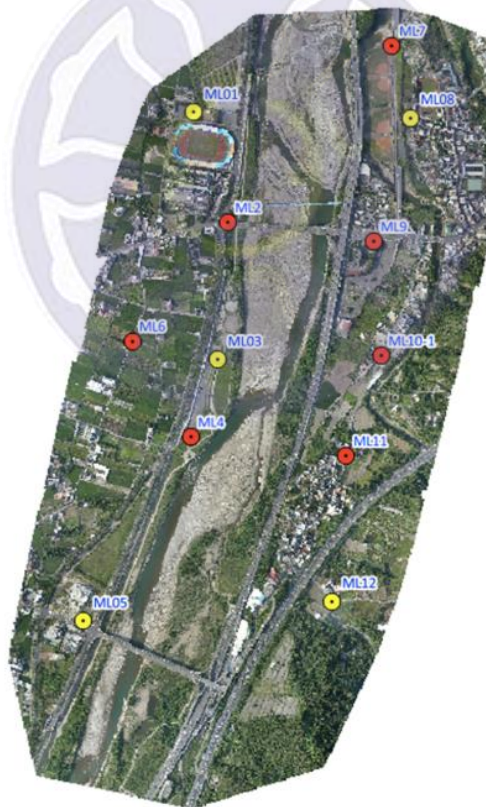


圖 18 控制點(黃色)與檢核點(紅色)分布圖

第四節 未做控制點約制的後龍溪正射影像平面精度之檢核

地面控制點係在航測時作為空中三角測量中所需的控制點資訊，並計算各像片透視中心相對於地面坐標的三維空間關係，以作為數值地形模型(DSM/DTM)或正射影像、地形圖測製等產製應用；如發生重大災害例如地震、土石流時發生交通中斷或其他因素並無法取得地面控制點資料時，如果沒有輸入控制點資料時來作最小約制(minimally constrained)，則 Pix4DMapper 所處理的正射影像資料是以 UAV 內的 INS 和 GPS 所提供的外方位 EO(Exterior orientation)資料為準，又 UAV 上裝載的 INS、GPS 與專業航測設備的精度有差距，所以其處理的成果資料精度是無法確保在何種的範圍內，因此將其未做控制點約制的正射影像成果(以下簡稱 NGCP 正射影像)，從影像上取得與已知地面控制點相同點位置當作檢核點，再將其與已知控制點的基線(Baseline)作長度精度的檢核比較，此處我們選用點 ML08，ML01，ML03，ML05，ML12 五個控制點，再以 Pix4DMapper 不輸入控制點所得到的 NGCP 正射影像，利用 QGIS 軟體從影像中點選與控制點相同位置的坐標，可得到 CK08，CK01，CK03，CK05，CK12 等五個檢核點，如圖 30,31,32,33,34 所示之正射檢核點(紅色字)與控制點(藍色字)的位置圖，明顯瞭解已知控制點的位置在 NGCP 正射影像原有位置有顯著的差距，再下一步是已知控制點與 NGCP 正射影像檢核點各所組成的五條基線 BL_0801，BL_0103，BL_0305，BL_0512，BL_1208(其中 BL_0801 表示 ML08 到 ML01 或者 CK08 至 CK01 的基線，餘此類推)如圖 30 所示，我們將兩組基線做較差(Discrepancy)的檢核分析，其差值成果如表 4 所示，其無地面控制的正射精度與已知控制點的較差(Dxy)均方根誤差為 1.359m。

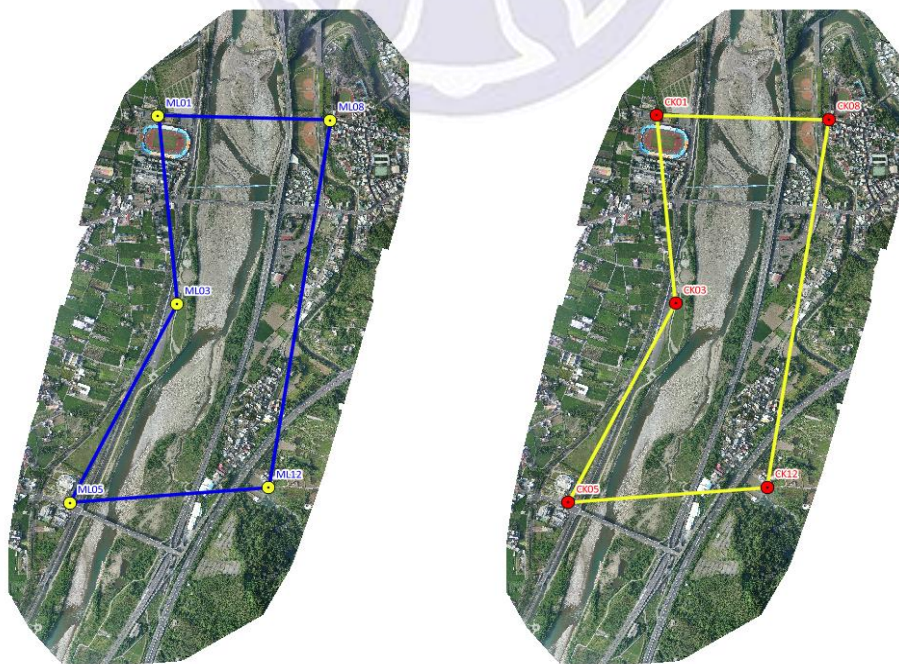


圖 19 已知控制點基線(藍線)與無正射影檢檢核點基線(黃線)

表 5 其無地面控制的正射精度與已知控制點的較差(Dxy)

檢核點ID	X	Y	控制點ID	X	Y	基線(Point to Point)	GCP基線長(m)	NGCP正射基線(m)	Dxy差(m)	RMSE(m)	Std. (m)
CK08	234687.66	2719070.748	ML08	234683.795	2719066.054	BL_0801	764.55	765.44	(0.89)	1.359	0.435
CK01	233922.436	2719088.857	ML01	233919.474	2719084.718	BL_0103	878.06	879.05	(0.99)		
CK03	234005.965	2718213.783	ML03	234002.374	2718210.58	BL_0305	1,039.59	1,041.13	(1.54)		
CK05	233530.635	2717287.49	ML05	233527.276	2717285.903	BL_0512	882.88	884.02	(1.14)		
CK12	234411.811	2717358.336	ML12	234407.389	2717355.698	BL_1208	1,732.55	1,734.49	(1.94)		



圖 20 ML08 已知控制點(黃色)與 CK08 無正射影檢檢核點(紅色)



圖 21 ML01 已知控制點(黃色)與 CK01 無正射影檢檢核點(紅色)



圖 22 ML05 已知控制點(黃色)與 CK05 無正射影檢檢核點(紅色)



圖 23 ML12 已知控制點(黃色)與 CK12 無正射影檢檢核點(紅色)

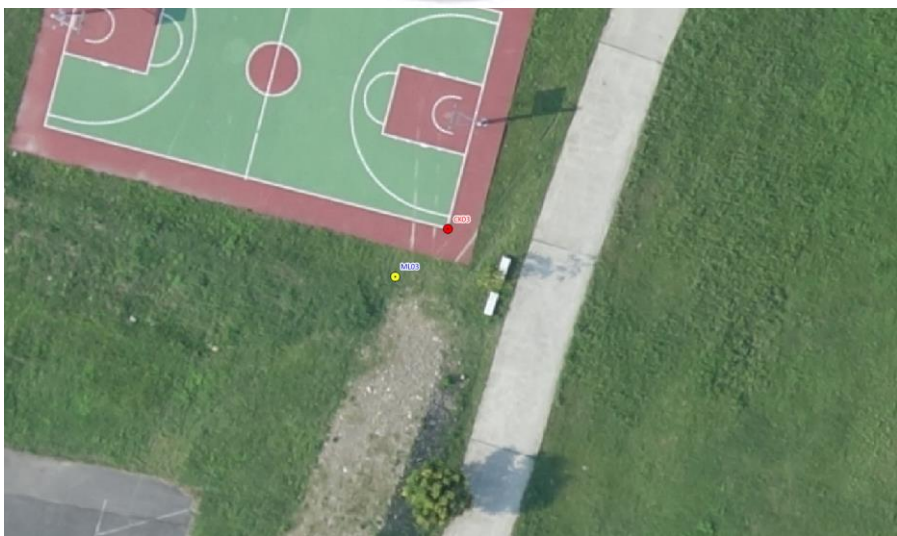


圖 24 ML03 已知控制點(黃色)與 CK03 無正射影檢檢核點(紅色)

第三章、結論與建議

本研究使用 Pix4Dmapper 軟體處理 UAV 拍攝之苗栗後龍溪測區有效影像共 354 張，於 5 小時內產製地面解析度 7.54 cm 之正射影像與 DSM，且正射影像之平面精度可達到 30cm，以其快速、自動化產製與高精度之優點，如搭配各種 UAV 的拍攝，可提供防救災時需快速取得空間資訊之需求。

當發生重大災害如無法即時從災區測得控制點時，可利用 UAV 裝置上的 INS、GPS 所計算所獲取的 EO 資料，可以處理作無控制約制的正射影像，經過較差成果，其正射影像成果平面精度均方根誤差亦可在 1.5 公尺，對於災害救災講求時效的情形下，其成果亦在可接受範圍。

展望未來幾年內，無人機發展會越加迅速，其承載重量會越大、飛行距離更遠，因此專為 UAV 專用掛載的感應器將會陸續朝多元性的發展，任務考量上有更多的選擇，例如高光譜相機、光達(Lidar)設備、多鏡頭相機、熱感相機、輻射偵測器和 PM2.5 偵測儀等，因高性能 UAV 所蒐集的空間非常廣闊，對於複合型重大災害所產生的大量多樣的資訊，利用強大的雲端計算，可即時處理成有效的情資，作為救災指揮中心重要的決策依據。

目前利用 UAV 所搭載的感應器，仍須等執行飛航蒐集完成後，才能將其記錄在感應器設備的相關資訊下載後做後續的資料處理，對於分秒必爭的救災需求，上述方式仍顯不足，如何將 UAV 蒐集的資料即時線上傳輸到救災指揮中心，並可達到 Process on the Fly 的即時處理技術，是將來非常重要的研究課題。

參考文獻

1. Laurent, and Glassey, "Photogrammétrie par drone traitée à l'aide de pix4UAV Cloud Pro"(2012)
2. Anderson, and Eric, "ASPRS Camera Calibration Panel Report" (2000)
3. Küng, and Olivier, "Enabling UAV-based 3D Mapping", GIM International, Vol.26, No.7 (2012)
4. Kerdsrilek, and Jedsada, "Reduction of DSM to DTM and Quality Assessment", Photogrammetry and remote sensing project (2008)
5. Ge-Wen, Fang-Shii, and Feng-Liang, "A Study of Vehicle-Based Mobile Mapping System Using GPS and Non-Metric Camera", Vol.39, No.2, Journal of C.C.I.T, November (2010)
6. Sahar, Muthukumar, and French, "Using Aerial Imagery and GIS in Automated Building Footprint Extraction and Shape Recognition for Earthquake Risk Assessment of Urban Inventories", Vol. 48, Issue 9, pp.3511-3520, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (2010)
7. Henri Eisenbeiss, "A Mini Unmanned aerial Veficle (UAV) : System Overview and Image Acquisition", International Workshop on-Processing and Visualization Using High-resolution Imagery (2004)
8. Timothy, Christopher, Mark, Ivan, and Ryan, "Civil UAV Capability Assessment" (2004)
9. Greg, George, "USGS Digital Aerial Mapping Camera Status", 51 st Photogrammetric Week in Stuttgart (2007)
10. U.S. Geological Survey National Mapping Division, "Procedure For Compensation of Aerial camera Lens Distortion as Computed by the Simultaneous Multiframe Analytical Calibration(SMAC) System" (2008)
11. J. Vallet , F. Panissod , C. Strecha and M. Tracol "Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet “UAV” " (2011)
- 12.內政部國土測繪中心，「101 年度發展無人飛行載具航拍技術作業 工作總報告書」，2012。
- 13.內政部國土測繪中心，「105年度發展無人飛行載具系統測繪作業 工作總報告書」，2016。
- 14.羅正方，「運用視距外自主飛控無人載具(UAV)進行國土資訊偵蒐與災區探勘」，經緯衛星資訊股份有限公司，2011。
- 15.謝幸宜，「以自率光束法提升四旋翼 UAV 航拍影像之定位精度」，碩士論文，國立政治大學地政學系、私立中國地政研究所，台北，2011。
- 16.廖玄銘，「海峽兩岸無人載具航測作業標準以及應用」，2011無人飛行載具在航拍製圖及GIS應用技術研討會，台北，2011。

- 17.邱式鴻，「旋翼UAS 影像製作飛航事故現場正射影像之精度探討」，航空安全及管理季刊，Vol. 2, No. 4, October 2015。
- 18.顏怡和，「不同相機率定條件對UAV影像空三精度之探討」，台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文集，台北，2011。
- 19.蕭震洋、安軒霈、陳俊愷、饒見有、陳樹群，「應用UAV 量化台東金崙溪河川型態演變及致災特性」，中國土木水利工程學刊 第二十七卷 第三期，2015。
- 20.白絮成、劉益誠、蕭宇伸、連惠邦、林秉賢，「無人飛行載具掛載消費型攝影機應用於防災可行性研究」，中華水土保持學報，第四十六卷 第三期，2015。
- 21.Pix4D, <https://support.pix4d.com/hc/en-us#gsc.tab=0>網站



附錄一、控制點與檢核點的點誌記



圖附 1 ML01 地面控制點(黃色)和點誌記

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML01	233919.474	2719084.718	52.832



圖附 2 ML03 地面控制點(黃色)和點誌記

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML03	234002.374	2718210.58	55.446



圖附 3 ML05 地面控制點(黃色)和點誌記

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML05	233527.276	2717285.903	65.384



圖附 4 ML08 地面控制點(黃色)和點誌記

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML08	234683.795	2719066.054	52.032



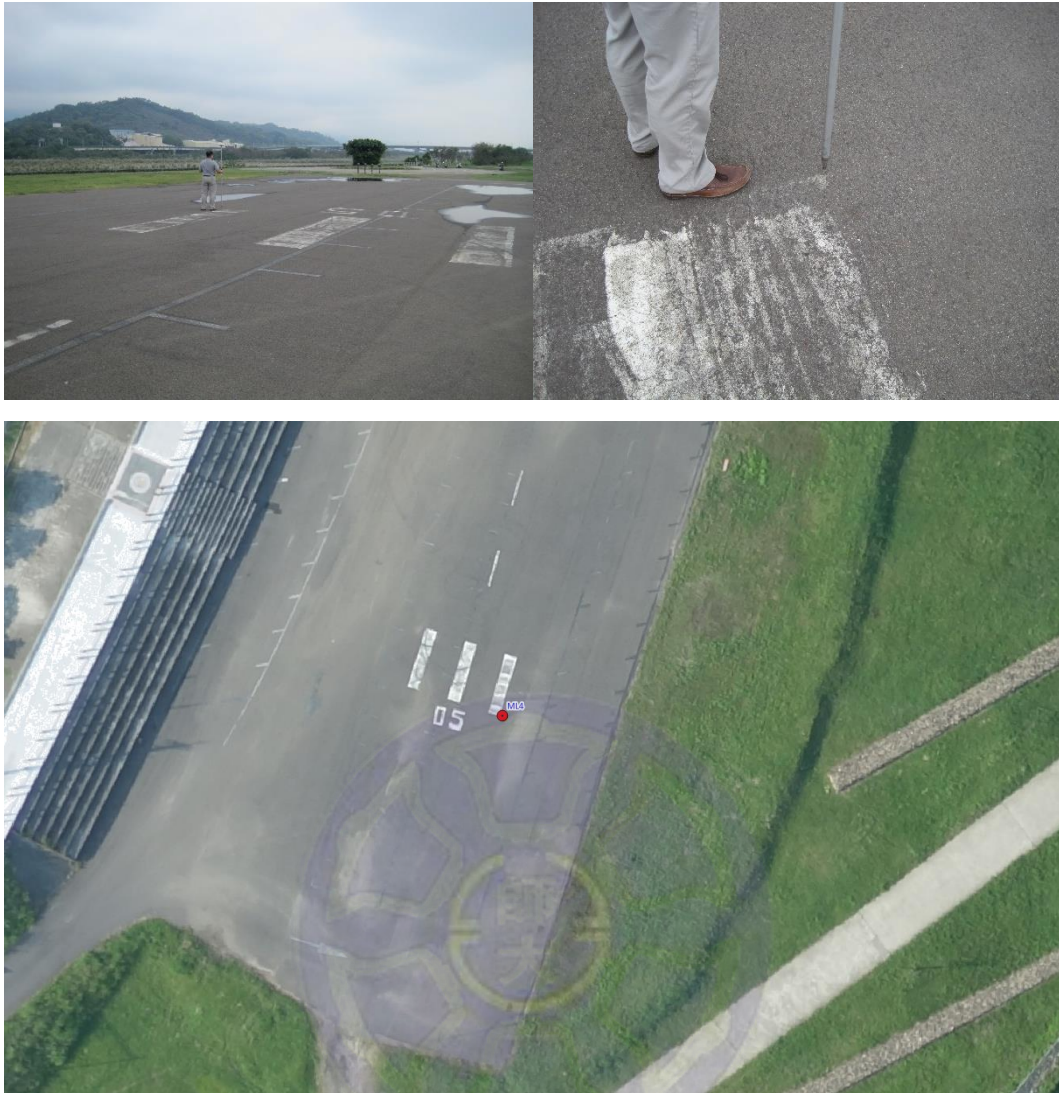
圖附 5 ML12 地面控制點(黃色)和點誌記

控制點坐標			
編號	X	Y	Z
ML12	234407.389	2717355.698	65.142



圖附 6 ML02 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML02	234039.25	2718695.117	58.169



圖附 7 ML04 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML04	233908.247	2717935.794	56.654



圖附 8 ML06 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML06	233700.838	2718274.887	55.247



圖附 9 ML07 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML07	234620.49	2719319.574	54.651



圖附 10 ML09 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML09	234554.814	2718627.992	54.388



圖附 11 ML10-1 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML10-1	234582.029	2718223.453	55.046



圖附 12 ML11 地面檢核點(紅色)和點誌記

檢核點坐標			
編號	X	Y	Z
ML11	234458.318	2717869.579	64.74

附錄二、後龍溪測區成果品質報告書

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.0.17

- Important:** Click on the different icons for:
- Help to analyze the results in the Quality Report
 - Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	miaoli_1219
Processed	2017-01-25 10:27:43
Camera Model Name(s)	DSC-RX100_10.4_4864x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	7.54 cm / 2.96 in
Area Covered	3.7803 km ² / 378.027 ha / 1.4603 sq. mi. / 934.61 acres
Time for Initial Processing (without report)	18m:02s

Quality Check

Images	median of 56980 keypoints per image	✓
Dataset	354 out of 358 images calibrated (98%), 1 images disabled	✓
Camera Optimization	0.03% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 28168.8 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.006 m	✓

Preview

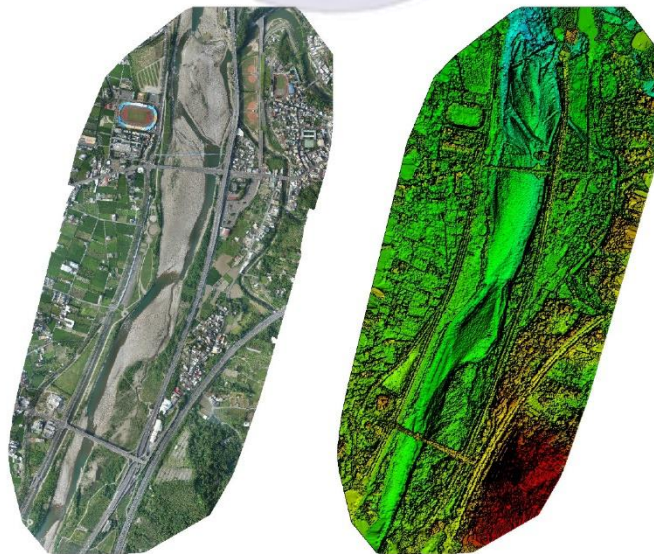


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	354 out of 359
Number of Geolocated Images	358 out of 359

? Initial Image Positions

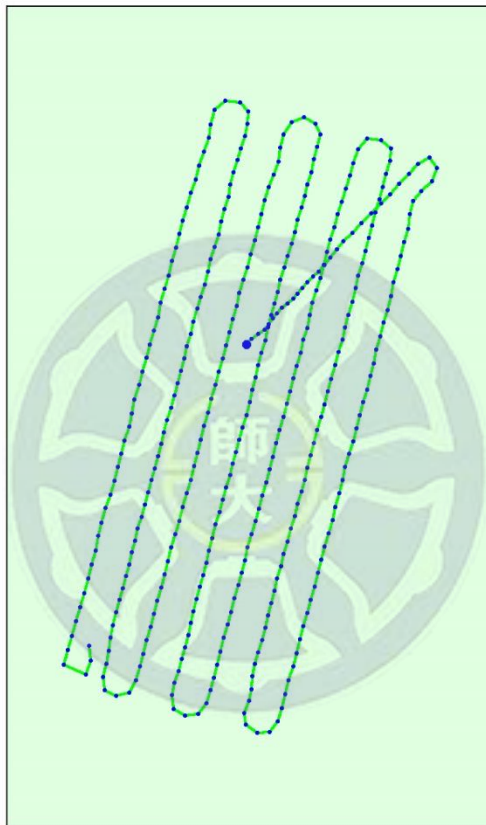


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.220	0.241	0.223	0.040	0.040	0.014
Sigma	0.063	0.075	0.101	0.014	0.015	0.012

? Overlap

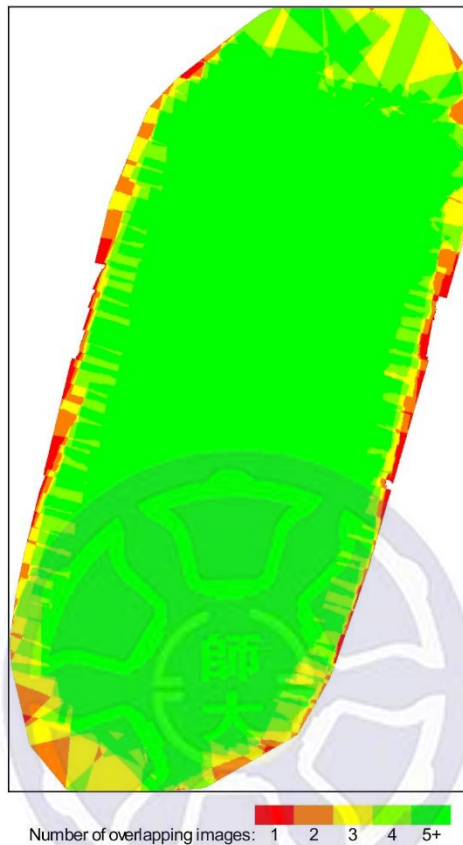


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	9759497
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3336320
Mean Reprojection Error [pixels]	0.161

? Internal Camera Parameters

DSC-RX100_10.4_4864x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 13.000 [mm] x 9.750 [mm]



EXIF ID: DSC-RX100_10.4_4864x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
--	--------------	-------------------	-------------------	----	----	----	----	----

Initial Values	4335.915 [pixel] 11.589 [mm]	2431.189 [pixel] 6.498 [mm]	1827.328 [pixel] 4.884 [mm]	0.015	-0.018	0.006	0.001	0.000
Optimized Values	4334.606 [pixel] 11.585 [mm]	2431.801 [pixel] 6.499 [mm]	1828.468 [pixel] 4.887 [mm]	0.013	-0.016	0.004	0.001	0.000
Uncertainties (Sigma)	1.346 [pixel] 0.004 [mm]	0.597 [pixel] 0.002 [mm]	0.675 [pixel] 0.002 [mm]	0.001	0.003	0.005	0.000	0.000



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel averaged over all images of the camera model is color coded between black and white. White indicates that, in average, more than 16 ATPs are extracted at this pixel location. Black indicates that, in average, 0 ATP has been extracted at this pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the reprojection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization.

? 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	56980	28169
Mn	40253	5108
Max	80424	43644
Mean	58711	27569

? 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2123826
In 3 Images	562520
In 4 Images	253688
In 5 Images	139890
In 6 Images	74558
In 7 Images	51251
In 8 Images	39034
In 9 Images	30430
In 10 Images	22703
In 11 Images	14328
In 12 Images	9079
In 13 Images	5824
In 14 Images	3267
In 15 Images	1938
In 16 Images	1091
In 17 Images	738
In 18 Images	572
In 19 Images	474
In 20 Images	304
In 21 Images	231
In 22 Images	172
In 23 Images	156
In 24 Images	110
In 25 Images	74
In 26 Images	45
In 27 Images	14
In 28 Images	2
In 29 Images	1

? 2D Keypoint Matches

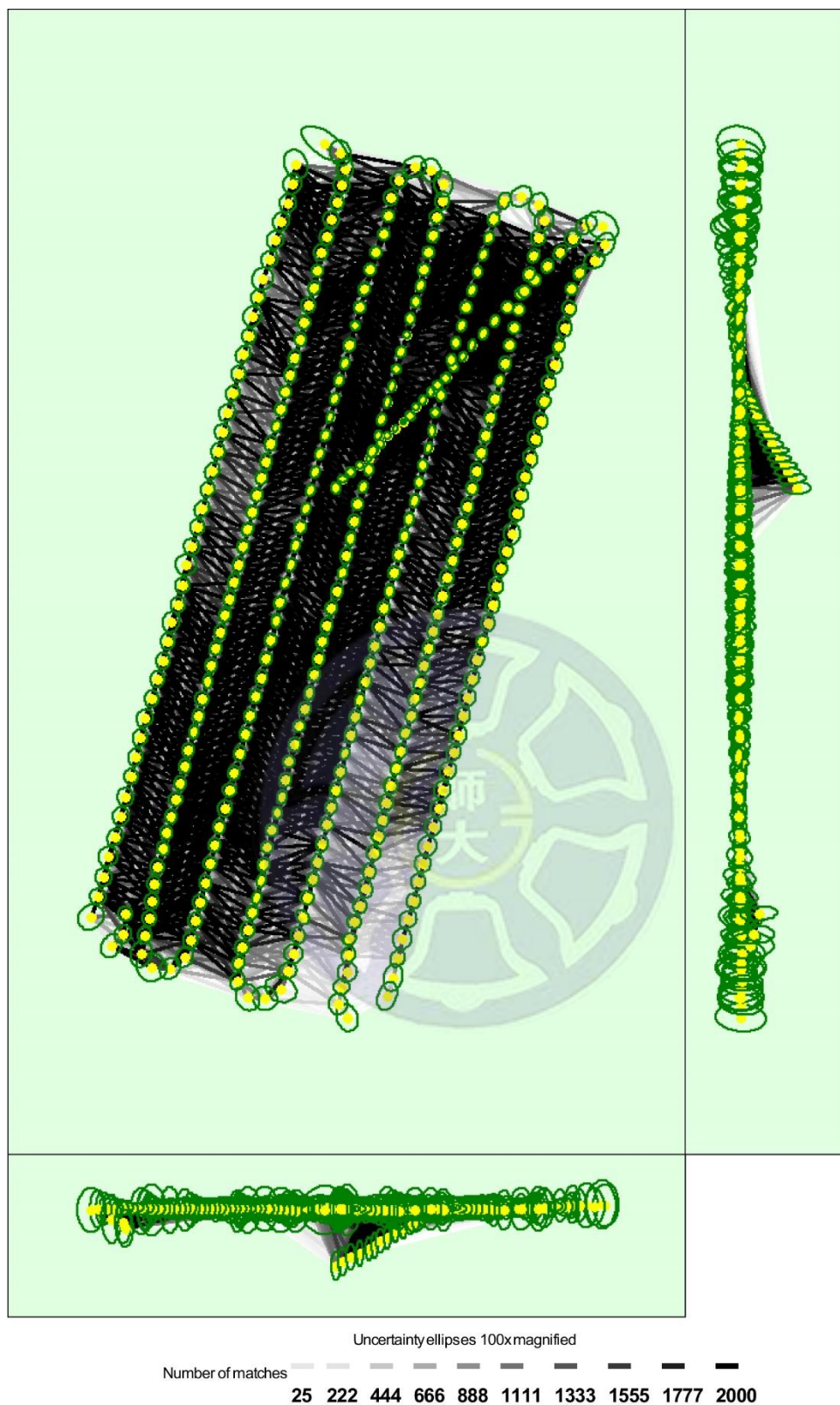


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.202	0.233	0.314	0.060	0.043	0.019
Sigma	0.063	0.060	0.147	0.022	0.020	0.016

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ML1 (3D)	0.020/0.020	0.003	0.013	0.002	0.702	7 / 7
ML3 (3D)	0.020/0.020	0.006	-0.007	-0.008	0.579	13 / 13
ML5 (3D)	0.020/0.020	0.003	0.004	0.011	0.259	9 / 9
ML8 (3D)	0.020/0.020	-0.009	-0.005	0.005	0.532	13 / 13
ML12 (3D)	0.020/0.020	-0.001	-0.005	-0.002	0.474	9 / 9
Mean [m]		0.000379	-0.000003	0.001492		
Sigma [m]		0.005334	0.007595	0.006551		
RMS Error [m]		0.005347	0.007595	0.006719		

0 out of 7 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
ML2	0.0200/0.0200	-0.0630	0.0902	0.2204	0.4014	11 / 11
ML4	0.0200/0.0200	0.1636	0.0701	0.2617	0.3662	11 / 11
ML9	0.0200/0.0200	-0.1702	-0.1830	-0.3514	0.4628	21 / 21
ML6	0.0200/0.0200	0.0267	0.1278	0.3245	0.2234	5 / 5
ML7	0.0200/0.0200	0.0088	0.2184	0.0307	0.4077	4 / 4
ML10-1	0.0200/0.0200	0.2764	0.3456	-0.4311	0.4337	10 / 10
ML11	0.0200/0.0200	0.0415	0.5470	-0.0722	0.2985	10 / 10
Mean [m]		0.040536	0.173737	-0.002485		
Sigma [m]		0.134773	0.213118	0.277200		
RMS Error [m]		0.140737	0.274962	0.277211		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	10.45	48.31	9.04
-15.00	-12.00	5.93	0.28	2.26
-12.00	-9.00	1.41	0.00	1.69
-9.00	-6.00	13.84	0.00	1.98
-6.00	-3.00	16.95	0.28	14.69
-3.00	0.00	3.39	0.00	13.84
0.00	3.00	1.69	0.56	17.23
3.00	6.00	5.37	0.28	18.36
6.00	9.00	17.23	0.00	14.41
9.00	12.00	10.17	0.85	3.39
12.00	15.00	8.76	2.26	0.85
15.00	-	4.80	47.18	2.26
Mean [m]		-1.449050	4.923278	-22.819118
Sigma [m]		11.332477	31.996461	7.699290

RMS Error [m]	11.424744	32.373016	24.083007
---------------	-----------	-----------	-----------

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-1.449050	4.923278	-22.819118

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	17.23	0.85	83.05
[-2.00, 2.00]	63.56	1.13	100.00
[-3.00, 3.00]	84.75	4.52	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	10.835
Phi	16.802
Kappa	85.699

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40GHz RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 960 (Driver: 10.18.13.6822), RDPDD Chained DD (Driver: unknown), RDP Encoder Mirror Driver (Driver: unknown), RDP Reflector Display Driver (Driver: unknown)
Operating System	Windows 7 Professional, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	TWD97 / TM2 zone 121 (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 51N (egm96)

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	01h:24m:04s
Time for 3D Textured Mesh Generation	20m:57s

Results



Number of Processed Clusters	2
Number of Generated Tiles	2
Number of 3D Densified Points	47736408
Average Density (per m ³)	3.56



致謝

首先感謝指導教授張國楨老師的引薦與耐心的教導，才有機會且幸運地進入師大地理系第一屆在職碩士專班就讀和得以完成論文；亦要特別謝謝犧牲周六日假期來校授課的陳哲銘老師、周學政老師、王聖鐸老師、李萬凱老師、紀聰吉老師、卓政宏老師、林柏丞老師們，同時感恩系主任歐陽鍾玲老師，時常給予本班同學鼓勵與關懷，關心我們課程的學習；另對於我的研究上給予許多協助的朋友與同事們，包含觀天科技房兆麟總經理在影像資料的提供、群立科技楊進雄技師在測量相關學理之指正、洪翊甯先生在 Pix4D 軟體技術傳授、郭中宇先生和童鈺雯小姐在資料處理和論文的編排協助、陳思翰先生在運算主機的支援和何偉聰先生 e-GNSS 控制點的量測等。感恩學校提供完善的學習環境與地理系碩士在職專班課程精心的設計與安排，受益良多，系上美萱助教給予我在論文口試等作業流程文件的幫忙與提醒，才得以順利完成口試排成的作業，最後要感謝我的公司和我太太永華給我很大的支持，讓我無後顧之憂完成學業，感恩在學業上所有幫助我的人，謹此致謝。

