

無人飛行載具 數值地形模型精度評估及應用

黃美甄／國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士

張國楨／國立臺北科技大學土木與防災研究所副教授

摘要

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 為一近年來新興熱門的技術，但其資料及後端產品之品質仍存爭議。本研究運用定翼型與旋翼型兩種飛行器，針對不同載具、不同相機、不同飛行特性、及地面控制點數量及分佈... 等因子，在同一地區的拍攝之影像及數值地形模型建模成果進行討論。研究成果顯示控制點分布最為重要；再以空載光達資料為基準，其剖面之高程誤差之可控制於 $\pm 20\text{cm}$ 以內；再與現地進行的精密水準高程測量做比較，其無人機建模之高程精度和空載光達資料相近。

Abstract

In recent years, unmanned aerial vehicle (UAV) become a popular technology, and is very useful for natural disaster assessment and hazard mitigation study. However the data quality is still a debated issue. This study is thus focus on the feasibility and adaptability analysis of the UAV techniques and its' applications. We compare the quality evaluation of DTM from these two kinds of UAV (fixed wing and the rotor wings). Different factors are also evaluated in this study, including UAV platform, digital cameras, different sets of GCP groups, by comparing the DTM quality that applying in the same area based on the airborne LiDAR data. The result shows the distribution and the amount of the ground control points are the dominant factors affecting DTM quality. The precision of the UAV-derived DTM could be better than 20cm, compared

with airborne LiDAR data. Based on the objective of this study, some suggests and results related with different platforms and equipment selection, and the mission planning is thus discussed accordingly.

緒論

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 為一近年來新興且熱門的科技，尤其在防災方面擁有許多優勢及發展空間。UAV 依不同的目的、任務而有不同的分類模式，單就動力推進方式的不同，可分為定翼型與旋翼型兩類，各有其優缺點，但無論那一型飛行載具，其運用及風險依然仍高；另一方面即為其產品之仍不易定義及規範。本研究主要在討論不同硬體平台下，所建置之數值地形模型精度差異及比較，分析之對象及參數包括搭載相機不同、無人飛行載具不同、飛行特性不同，在同一地區拍攝的成果建置模型進行討論；期望透過本研究，在未來的飛行任務中，針對不同需求，以選取效率最高、風險最低、且最合適的飛行載具。

研究方法

研究方法與流程

本研究是利用 UAV 搭載相機拍攝影像來建置數值地形模型。利用不同無人飛行載具、並掛載不同相機所拍攝之影像來建置數值地形模型，針對所建置的模型之精度加以比較。首先取得目標影像及每張影像拍攝時的空間位置資訊與瞬時飛機姿態角，設計不同

參數和控制點位分布建置數值地形模型；並以不同之地面控制點數量與分布來控制數值地形模型建模及平差，再以空載光達及現地水準高程測量之資料相互比較，以討論 UAV 之建模精度。

使用之無人飛行載具比較

本研究團隊主要使用的 UAV 為德國 Microdrones 公司的 md4-1000 四旋翼 UAV (圖 1)，為目前市面上最大型的旋翼無人飛行載具之一，視飛行任務需求可選擇搭載 Canon 6D、Olympus EP2、Sony a7r...等相機或多光譜儀。另一台由觀天科技所生產之定翼型無人飛行載具 SV1000 (圖 2)，搭載 Sony RX100 或 Sony QX100 相機。



圖 1 Microdrones md4-1000 無人飛行載具



圖 2 SV1000 無人飛行載具

研究設計

本研究設計基礎為表 1 裡四組影像資料，搭配無控制點以及三組分布之控制點共四種不同地面控制點，進行模型精度分析，控制點使用現地擁有之高精度地形資料的高程資訊 GCP1 (圖 3)、GCP2 (圖 4)、GCP3 (圖 5)。

表 1 航拍任務及影像資料

UAV	搭載相機	航線數	日期	照片張數	對地飛行高度 (m)
md4-1000	Canon 6D	3	2013/11/30	300	130
md4-1000	Olympus EP2	6	2013/3/17	666	130
SV1000	Sony RX100	1	2013/11/30	275	230
six rotors	Sony RX100	1	2013/11/30	283	80

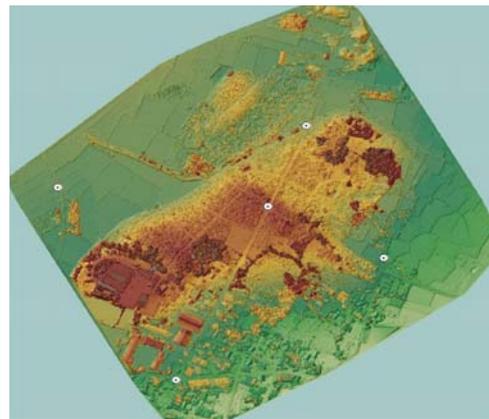


圖 3 GCP1 分布圖 (白色圈圈處)

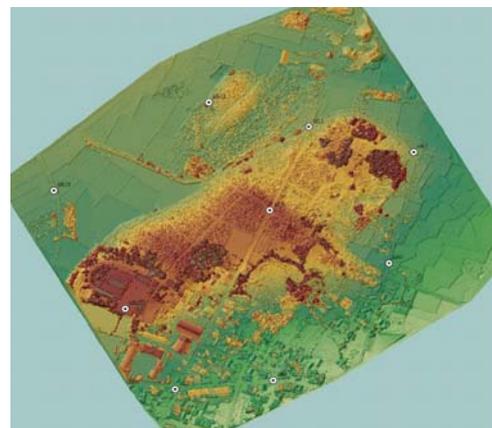


圖 4 GCP2 分布圖 (白色圈圈處)

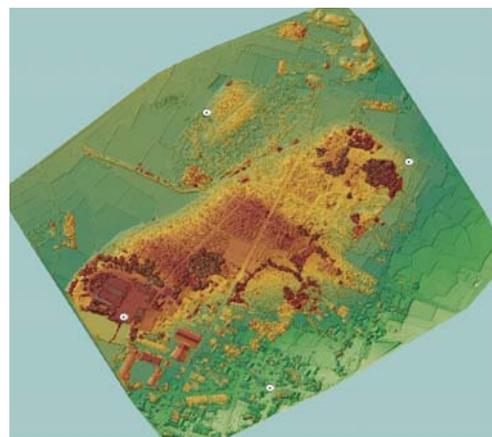


圖 5 GCP3 分布圖 (白色圈圈處)

研究成果

影像正射及 DSM

正射影像是航空像片經過幾何修正與拼接的真實地表資訊，含有地理資訊座標資訊，方便使用、容易辨識，能依所需在地理資訊系統上疊圖、量測與分析，若配合三維的數值地形模型能進行更多應用，由於正射影像以像片為基礎拼接再修正，像片解析度大大影響了正射影像的細緻度。由 UAV 拍攝影像所建置之 DSM 其地面取樣距離 (Ground Sampling Distance, GSD) 小於 6 cm。

點雲 (point cloud)

由於 UAV 拍攝影像多、解析度高，故本研究建置之點雲數量皆相當龐大，點雲數量與模型範圍沒有正相關，似乎與照片數量比較有關係，但也非絕對，再視軟體對像片裡物體辨識情形而定，若相機對物以多重方向拍攝，此物四面八方皆能辨識出點雲則點雲數量也會增加。圖 8 為點雲成果展示截圖。

表 2 各模型所建置之點雲數量

UAV+ 相機組合	點雲數量	照片張數
md4-1000 + Canon 6D	60,486,280	300
md4-1000 + Olympus EP2	84,931,024	666
SV1000 + Sony RX100	66,572,359	275
六旋翼 + Sony RX100	63,598,000	283

DEM 建置

高密度點雲資料透過不同的過濾方法，在去除人工建物、地表植被、雜訊後，可分類為地面點與非地面點。本研究中之分類皆使用軟體自動分類，未加入任何之人工點雲分類、編修。從點雲取剖面確認分類大致無誤後才使用地面點內差製作成 DEM。若使用人工分類及檢核，其結果較為準確，但需花費大量時間與精神；由於本研究之花蓮光復地區，其植被密度不高、地形較為平坦，使用自動分類之結果已然足夠。

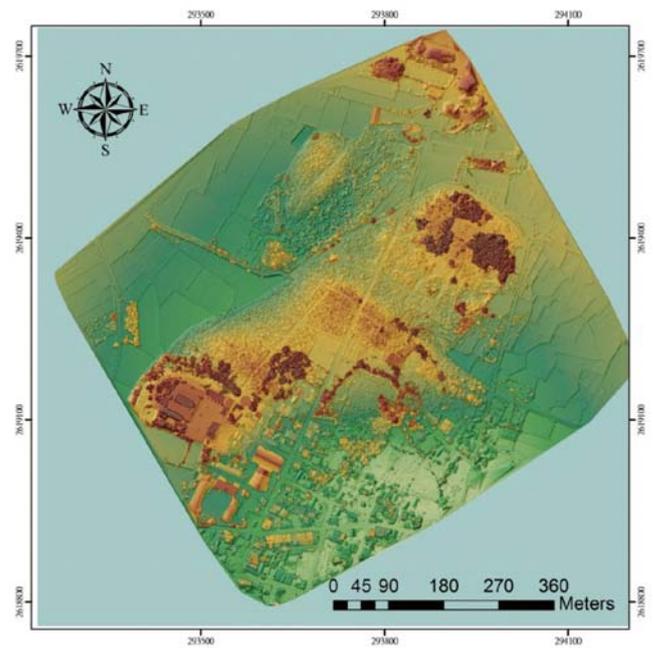


圖 7 md4-1000 搭載 Olympus EP2 之 DSM 成果



圖 6 Canon 6D 像片建置之正射影像細部



圖 8 光復地區點雲截圖

成果討論

DEM 精度及誤差

1. 資料剖面

為了解 UAV 影像建置之 DTM 能達到何種程度的精度，於平差結果取剖面進行討論（圖 9）。

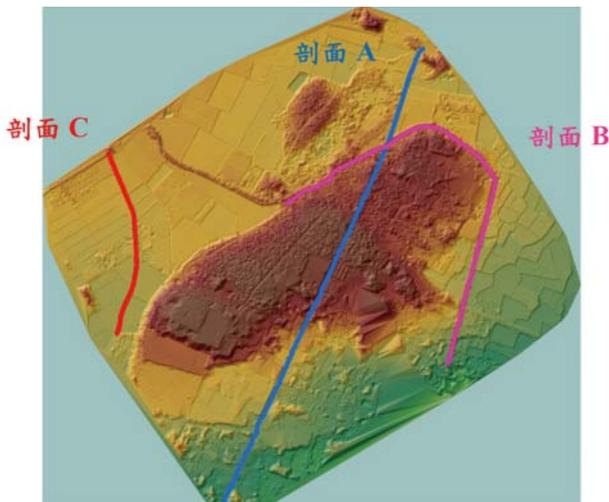


圖 9 剖面位置圖

經過檢查顯示大部分誤差突然異常變大的原因為點雲自動分類時所產生之錯誤，點雲人工分類或許可以解決這類錯誤，但需耗費大量的時間與人力，故本研究並未再針對點雲人工分類的模型再做討論。排除這些錯誤資訊，誤差範圍大都於 $\pm 20\text{cm}$ 內。

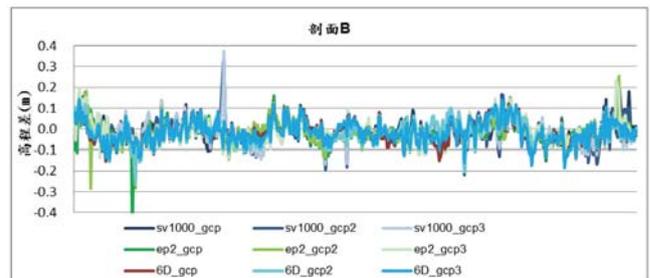


圖 10 剖面 B 高程差

2. 植被影響

拍攝時間不同時植物與作物生長狀況直接的影響到 DEM 結果，例如拍攝當時稻田的水稻高度。於不是那麼密集生長的稻作，由像片能辨識出來之空間算出地面點，如圖 11 所示，DSM 與 DEM 皆有零星的地面點位，這種情況能就零星之地面點，經人工分類取那幾點地面點對該片農地做內差，取得較正確的 DEM。

林區狀況類似，過於緻密的大片密林區無法取得地面資訊，本研究區域內的樹木生長不茂密、面積也不大，所以樹林區還是能取得地面點製作出 DEM。



圖 11 在稍微能看見地面的植被地區也能判斷出地面點

地面控制點與誤差關係分析

控制點分布及數量對模型建模結果比較中，其中第一組五點控制點（GCP1）與九點控制點（GCP2）造成結果其實相近，最大的變化都在外圍，研究區域內的變化則不大。結果顯示，相較於四點控制點模型（GCP3）及九點控制點模型（GCP2），GCP1 五點控制點已經能良好修正與掌握整個地形的變形，較高重疊率的相片搭配控制點的效果更好。建議於航拍任務規劃中，其拍攝範圍比目標區域還要大一些，以減少邊緣重疊率過小、且又無控制點時造成模型修正不易的問題。

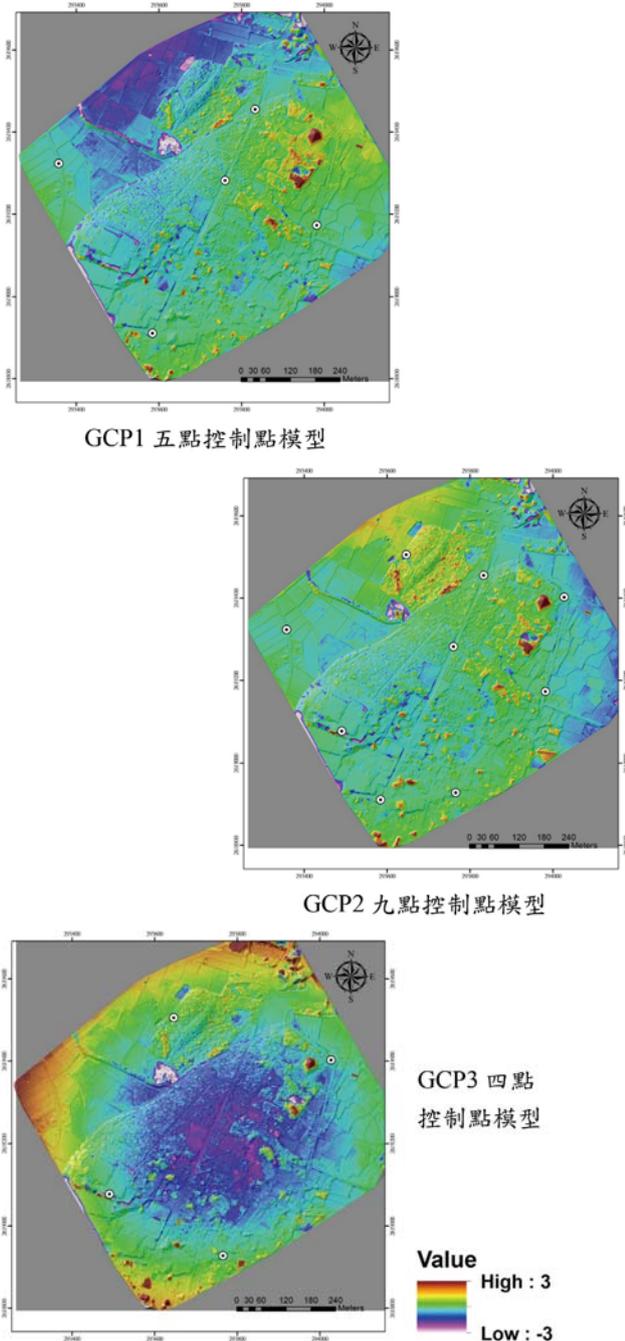


圖 12 各組控制點誤差分布狀況

無控制點誤差情況

無控制點的模型，因 UAV 定位由 GPS 而來，故模型之建模為橢球高，須換為正高後方能與基準比較，其中發現 SV1000 這組成果單純之 GPS 定位所出現之 X 與 Y 位置錯誤的情況（如圖 13），表示未給控制點的模型有可能因 GPS 定位出現 X、Y 的誤差。無控制點之模型，其水平之誤差過大，故未再討論其高程誤差。

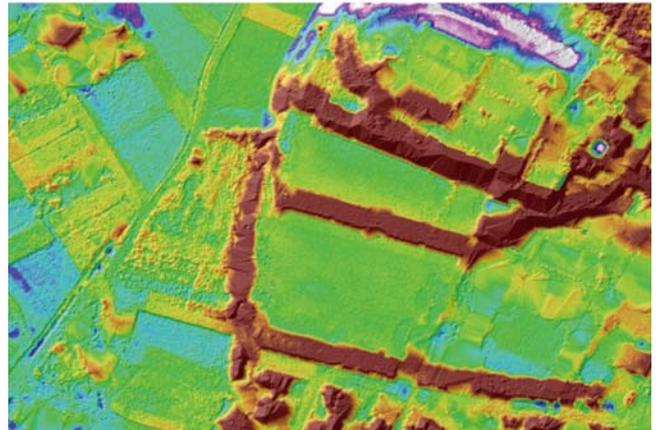


圖 13 未給予控制點之成果有水平向位移情形

不同 UAV 與相機影響分析

表 3 模型成果資訊

UAV	搭載相機	對地飛行高度	模型面積	像片解析度	模型解析度
md4-1000	Olympus EP2	130m	56.17h	4.03cm	3.20cm
md4-1000	Canon 6D	130m	47.15h	4.07cm	3.71cm
SV1000	Sony RX100	230m	172.04h	6.11cm	5.55cm
Six axis	Sony RX100	80m	34.04h	2.12cm	2.26cm

從表 3 的原始像片資訊與模型成果，推斷影響模型解析度的因素為 UAV 飛行高度，飛行高度影響原始像片的像素解析度進而影響製作的 DTM 模型解析度，像片和模型解析度越細緻，就能對越小的物體做辨識，有模型解析度要求的時候，需要從 UAV 飛行高度做調整。

表 4 DEM 全區域誤差評估 *

	No_GCP	GCP1	GCP2	GCP3
md4-1000 與 Canon 6D	M:0.46m SD:1.14m	M:-0.23m SD:0.55m	M:0.2m SD:0.45m	M:-0.17m SD:0.54m
md4-1000 與 Olympus EP2	M:-0.07m SD:0.71m	M:-0.20m SD:0.64m	M:0.06m SD:0.58m	M:0.17m SD:1.08
SV1000 與 Sony RX100	M:-0.34m SD:1.30m	M:-0.21m SD:0.56m	M:-0.20m SD:0.65m	M:-0.22m SD:0.53m

* (M: 平均誤差; SD: 標準差)

表 4 中除了有一組因控制點設置方式使全區域標準差高達 1.08m 之外，沒辦法從中清楚的分別出是哪台 UAV 或是哪台相機的模型成果誤差最小，md4-1000 與 Olympus EP2 此組像片稻田與墓園區都是剛整理過的狀態，理論上全區誤差應該較小才對，結果卻是普遍的比其他兩組大，再將原始像片拿出來比較，Olympus EP2 這台相機拍攝的像片較其他兩台模糊，影響到軟體匹配精準度，推測原始影像的地面解析度對成果精度有影響（圖 14）。

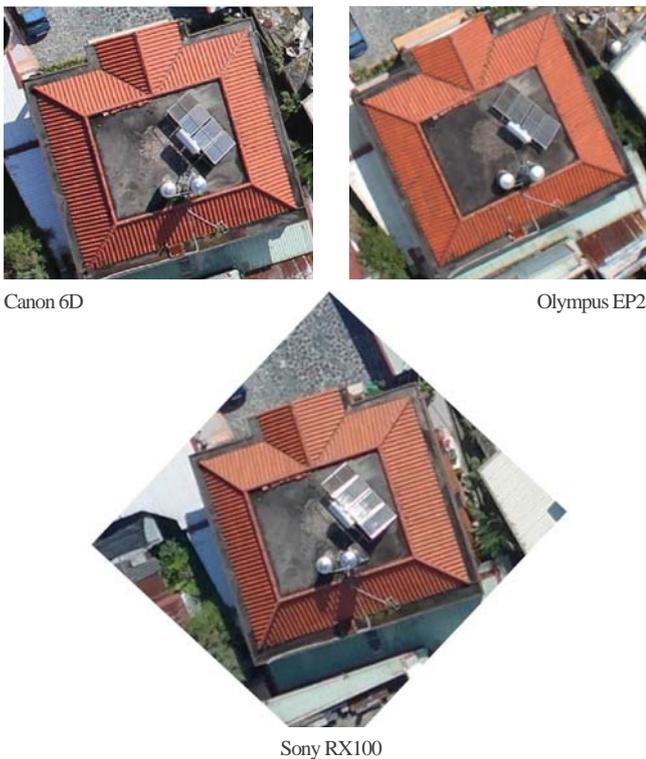


圖 14 原始像片地面解析度比較

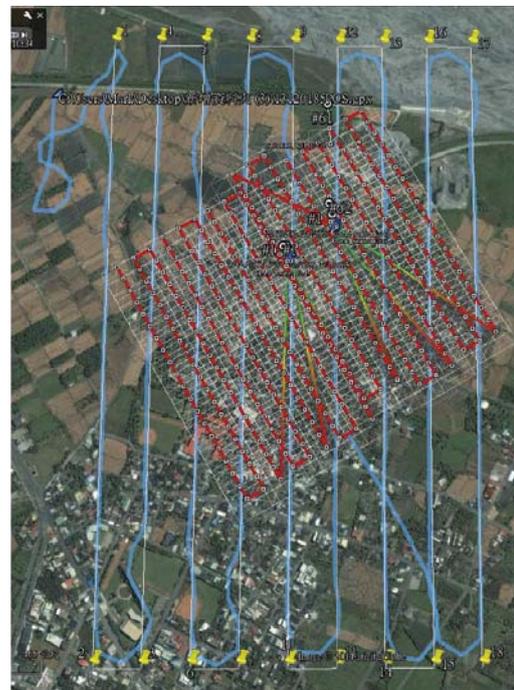
從本研究中成果無法看出不同 UAV 對誤差影響，從既有觀念之定翼機飛行高度高、速度快的情況下，所拍攝像片較不清晰、姿態較不穩定。但以現有軟體在像片匹配的過程中能容許些微的誤差自行修正，這些來自 UAV 拍攝過程之定位及姿態的誤差，由模型成果來看，幾乎不會影響成果的精度。

因此挑選 UAV 就依當地地形情況與飛行效率，如圖 15 以光復這樣的平原區使用定翼機最為有效率，一趟 25 分鐘左右即可拍完 172 公頃的區域（藍色航線），md4-1000 搭載 Canon 6D 全片幅相機需要飛三個架次飛行時間共 60 分鐘拍攝 42.15 公頃（紅色區域），md4-1000 搭載 Olympus EP2 需要飛六個架次飛行時間

共 120 分鐘拍攝 56.17 公頃（紅色區域）。但如果是山谷等地形起伏度大的地區，亦或無起降場地時，旋翼機會是最好的選擇。因此每一 UAV 平台，在搭配不同的設備，都有其最適合的飛行任務。

模型三維建模

UAV 影像除了可以進行傳統上的影像正射、DSM 建製外，針對植生不茂密的地區，還可進行 DEM 產製。因無人機拍攝影像之重疊率大，側面影像亦可部份取得，在傾斜攝影（oblique photogrammetry）及真實三維建模的工作上變為可能。本研究中影像之重疊率大致為 60% 及 30%，三維建模的效果中，建築物垂直牆面仍有不足，再設置 75% 及 40% 的情形下，可大幅度改善，若能再增加傾斜拍攝之影像，真實三維建模成果及提供之資訊，亦相形提昇。圖 16 及 17 呈現真實三維都市模型，其中圖 16 指示高雄市凱旋路上，因氣爆所造成之地表下陷及車輛翻覆情況之現場三維模型；本區之互動式三維模型之動畫範例詳見 <https://www.youtube.com/watch?v=x-jkx4n7k> 所示。圖 17 則指示另外區域之三維都市近景視覺效果。



- md4-1000+Olympus EP2 六條航線 共飛行約 120 分鐘
- md4-1000+Canon 6D 三條航線 共飛行約 60 分鐘
- SV1000+Sony RX100 一條航線 共飛行約 25 分鐘

圖 15 UAV 拍攝效率比較



圖 16 UAV 影像互動式三維建模成果之畫面截取



圖 17 UAV 影像互動式三維建模成果之垂直牆面畫面截取

結論與建議

結論

1. UAV 影像因飛行高度低、其地面解析度相較於傳統之航空像片細緻許多，其解析度可達十公分以下。
2. 影響模型解析度的因素為 UAV 飛行高度，飛行高度影響原始像片的像素解析度，進而影響製作的 DTM 模型解析度。
3. 經過檢查顯示大部分 DEM 誤差突然異常變大的原因為點雲自動分類時所產生之錯誤，排除這些錯誤資訊，其剖面誤差範圍大都控制於 $\pm 20\text{cm}$ 內。
4. 可在非植被密集地區製做出 DEM，但是誤差較大。
5. 控制點的分布比數量重要，最大誤差均位於區域邊界，研究區域內的變化則不大。
6. 在像片匹配的過程中能容許些微的誤差自行修正，這些來自於 UAV 定位及姿態的誤差，對建模成果精度影響不大。

建議

1. 建議任務時，其拍攝範圍比目的區域還要大，可減少邊緣像片重疊率不足、且又無控制點修正時所造成的問題。
2. 最外圍的控制點可設置於研究區域之邊緣或區外，以減少邊界區域誤差變大的問題。
3. 欲將植物的影響減至最低，可以選擇植生較稀疏的季節拍攝，以保最佳成果。
4. 點雲自動分類，可再經人工分類檢查，以確保 DEM 品質。

致謝

本研究呈蒙中央地質調查所提供模型資料比較的機會，台北科技大學、先鋒材料、迅聯光電、群立科技、觀天科技及福依鷹航拍資訊等公司在 Acute3D、Pix4D 及航拍任務等軟硬體上的部份協助及科技部研究計畫（102-2116-M-027-002）的經費支助下，得以完成，特此申謝。