

使用無人飛行載具進行攝影量測以建置 三維模型

Application of an Unmanned Aerial Vehicle and Photogrammetry Techniques to Construct Three-Dimensional Model

國立聯合大學
土木與防災工程學系
教授兼副校長暨研發長

柳文成*

Wen-Cheng Liu

國立聯合大學
土木與防災工程學系
碩士班研究生

呂建興

Chien-Hsing Lu

國立聯合大學
材料與化學工程博士學位學程
博士班研究生

黃偉哲

Wei-Che Huang

摘 要

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)結合影像量測技術已廣泛應用在地形及建物量測。將 UAV 所拍攝的影像輸入三維軟體(3D modeling software)就能建置三維數值模型。在建立三維數值模型時，其影像的攝影高程、拍攝角度、解析度及影像重疊率將會影響該三維數值模型的精度。本研究使用 3 種拍攝航高與及 3 種影像重疊率分別建置三維數值模型，並討論拍攝航高及影像重疊率對三維數值模型精度的影響。結果顯示，當影像重疊率超過 70%後，其三維數值模型檢核點誤差將小於 1.5 公尺，而主要的誤差來源為高程誤差，且高程誤差將隨著拍攝航高越高，其高程誤差越大，但混合不同拍攝航高的影像，將大幅減少高程誤差，於本研究混合三種拍攝航高影像後，其高程誤差由 1.43 公尺降低為 0.11 公尺。

關鍵詞：無人飛行載具，影像測量，三維數值模型，影像重疊率，拍攝航高。

ABSTRACT

Recently UAV (Unmanned Aerial Vehicle) photogrammetry, which combines UAV and three-dimensional modeling software, is widely used for terrain and buildings measurements. There are several factors to affect the accuracy of digital elevation model (DEM) and three dimensional model including photography altitude, photography angle, image resolution, and photo overlap ratio. In the present study, we use three different

*通訊作者，國立聯合大學土木與防災工程學系教授兼副校長暨研發長，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號，wcliu@nuu.edu.tw

UAV altitudes to take photos and three different photo overlap ratios to construct a three-dimensional model and discuss the influences of photography altitude and photo overlap ratio on the accuracy of three-dimensional model. The results reveal that when the photo overlap ratio is over 70%, the root mean square error (RMSE) will be less than 1.5 m. The height error is the main error and increases with UAV altitude. The height error can be decreased by using images form difference UAV altitudes. We found that the height error decreased from 1.43 m to 0.11 m.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Photogrammetry, Three-dimensional model, Photo overlap ratio, Fly altitude.

一、前言

無人飛行載具 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)源自於陸軍的發展使用，1955 年美國首次發展能夠取得航空影像的 UAV 稱為 Radioplane，一直到 1994 年 Predator UAV 已經可提供 30 公分解析度的影像(Rango *et al.*, 2009)。近年來以無人飛行載具 UAV 為平台的航空攝影測量相關研究越具成熟，相對於全球定位系統 (Global Position System, GPS)、預定程式飛行 (Pre-programmed flights)、IMUS (Inertial Movement Units)、及自動飛行，UAV 具備低成本、操作簡單、機動性、體積小；UAV 是以低空飛行為主，不受限於雲遮影響，且可量測高精度的空間資料 (Remondino *et al.*, 2013; Haubeck and Prinz, 2013; Hugenholtz *et al.*, 2013; Seibert and Teizer, 2014; Lo *et al.*, 2014)。因此近年來 UAV 的航空攝影已被廣泛應用於各種不同測量對象與研究領域，例如露天礦面(Kršák *et al.*, 2016)、古蹟(Remondino *et al.*, 2013; Lo *et al.*, 2014; Nikolakopoulos *et al.*, 2017)、河岸地形變化(Westoby *et al.*, 2012; Tamminga *et al.*, 2015; Cook, 2017)、火山(Darmawan *et al.*, 2018)、農業管理(Xiang and Tian, 2011; Baluja *et al.*, 2012; Zarco-Tejada *et al.*, 2012; 2013; Gago *et al.*, 2015; Rokhmana *et al.*, 2015)、河道地形與植物覆蓋(Watanabe and Kawahara, 2016)、崩塌與土石流(Liu *et al.*, 2015; Neugirg *et al.*, 2016)、河川流速與流量量測(Tauro *et al.*, 2015;

Serban *et al.*, 2016; Tauro *et al.*, 2016a, 2016b; Langhammer *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017)等，越是複雜的地形條件或植物覆蓋越能展現 UAV 的優勢。而使用 UAV 拍攝影像建置三維數值模式之精度，受到 UAV 拍攝航高、影像解析度、控制點數量及影像重疊率等影響。本研究目的為探討 UAV 拍攝航高與影像重疊率對於建置三維數值模型精度的影響。

二、研究區域概述

本研究地區是國立聯合大學八甲校區的東北部分(如圖 1 所示)，研究地區總面積為 45,578.40 平方公尺，以 UAV 在 55 m 至 85 m 的

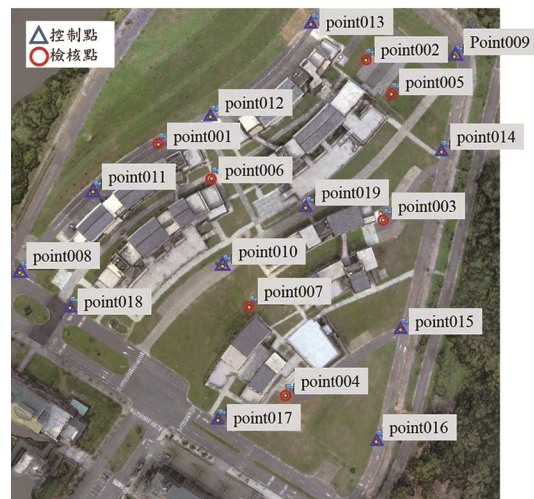


圖 1 控制點與檢核點分布圖。

表 1 各控制點及檢核點之編號點與 TWD97 座標

編號	X (m)	Y (m)	Z (m)	編號	X (m)	Y (m)	Z (m)
point001	228762.84	2714969.13	221.75	point011	228722.93	2714941.29	221.71
point002	228887.64	2715018.80	219.58	point012	228794.11	2714985.07	221.72
point003	228897.05	2714921.89	214.75	point013	228855.30	2715039.40	221.75
point004	228836.20	2714814.65	205.75	point014	228933.08	2714962.24	215.71
point005	228903.06	2714997.43	218.85	point015	228907.74	2714854.28	204.60
point006	228793.95	2714948.48	219.87	point016	228892.37	2714784.19	200.72
point007	228815.17	2714869.99	213.97	point017	228794.85	2714800.94	211.25
point008	228678.23	2714893.49	221.83	point018	228707.52	2714871.70	218.50
point009	228940.27	2715024.25	219.23	point019	228850.49	2714929.95	215.72
point010	228799.46	2714895.04	214.54				

拍攝航高，以固定航速與飛行時間，在相同航線航拍。當控制航速與幀速(每秒拍攝影像之數量)，使用軟體以固定頻率挑相片的方式，也就是控制幀率，即能獲得相同位置但不同高度所拍攝的相片，也能控制拍攝間隔。

為建置三維數值模型並進行立體攝影測量，需要擁有將像座標轉換實際座標用的控制點(Ground Control Points, GCPs)以及比較模型精度的檢核點(Check Points, CPs)。本研究挑選明顯的目標物當作控制點與檢核點，控制點均勻分布在研究區域，而檢核點在均勻分布的原則下，從三個控制點所圍三角形中挑選適合的明顯目標做為檢核點。圖 1 為研究區域的控制點與檢核點分布，控制點與檢核點共 19 點，其中 point001 至 point007 為檢核點；point008 至 point019 為控制點。使用 e-GNSS 測量各點 TWD97 座標，詳見表 1 所示。

三、研究方法

航空攝影測量(Aerial photogrammetry)，是指攝影測量研究之對象為航空攝影相片，然後運用空中三角測量來算地面座標。UAV 即在此列，這種測量方式，又可以歸屬在遙感測量領域中，這表示測量者本身無須接觸所測量的事物，而只利用探測工具從空中量度或感應地面上被測量物的特質和位置。其主要目的是獲得立體空間

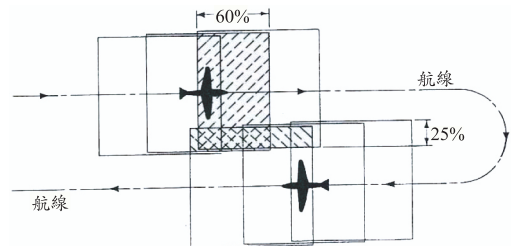


圖 2 前後重疊率與左右重疊率之示意圖(何維信，2006)。

中，各種物體的形狀、位置和特性(例如：地質狀況、植被生長狀況、建築物的種類等)。應用範圍可從學術研究、地理資訊系統、各種工程的設計與規劃、災害分析到軍事目的等。

航空測量時，為了得到立體空間資訊建立數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，將利用立體攝影測量學中重疊相片的原理，藉由多視角、部分重疊的影像來模擬立體的效果，進而將此模擬出來的立體模型建置出符合現地的高程模型，何維信(2006)指出相同航帶重疊率需大於 60%，相異航帶重疊率約寬度 20%~30%，如圖 2。但內政部國土測繪中心(2015)對於航空測量其影像重疊率規定「航線間相鄰影像重疊率(左右重疊)為 30%，航線內相鄰影像重疊率(前後重疊)數位式攝影機為 80%，底片式攝影機為 60%」，較上述嚴苛。故本研究目的即是檢驗 UAV 航拍

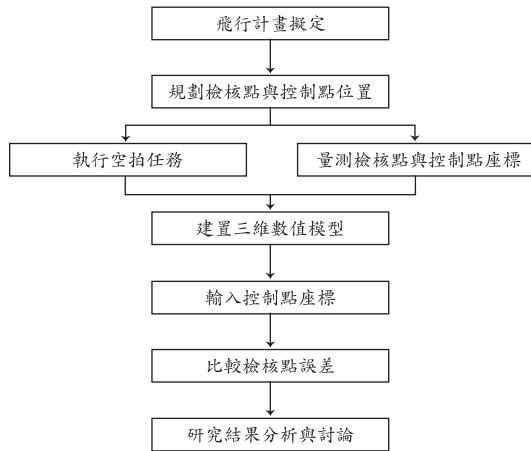


圖 3 研究流程圖。

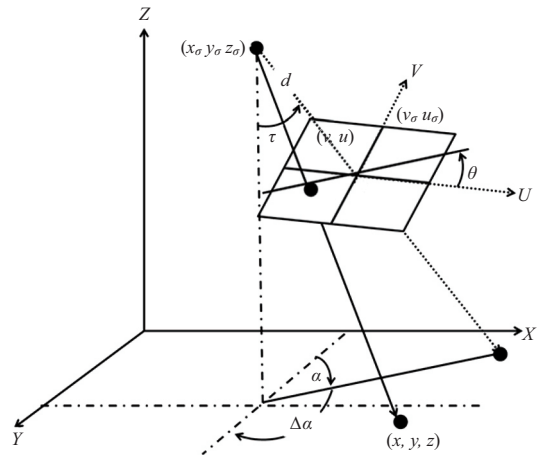


圖 4 共線式原理示意圖。

相片建置三維模型的影像重疊率是否需要滿足 80%。

3.1 研究流程

本研究首先於研究區域內規劃控制點與檢核點，控制點於三維數值模型轉換座標時使用，檢核點則做為比較精度之用。擬定飛行計畫後，即開始執行空拍任務，獲得航拍影像，這些相片可以藉由 Structure from Motion (SfM) 軟體提取特徵點，並進行空中三角測量等航空攝影測量、立體攝影測量計算比較出這些特徵點的相對座標，這些具相對座標的特徵點稱為點雲，此過程稱為製作點雲。本研究使用雷虎 Ghost+ (UAV) 及 PhotoScan-SfM 軟體來進行實驗，PhotoScan-SfM 軟體提取相片中的特徵點，製作點雲之後，藉由將相鄰點雲，以不重疊為原則，做不規則三角形拼接，形成三角網格 (Triangulated Irregular Network, TIN)，拼接出三維數值模型。在三維數值模型上標記出控制點與檢核點的位置後，輸入控制點的 e-GNSS 量測座標將模型的相對座標轉換成實際座標。並比較檢核點的三維數值模型計算值與 e-GNSS 量測座標之差，即可獲得三維數值模型精度，本研究流程見圖 3 所示。

3.2 研究原理介紹

三維數值模型建置原理是使用運動回復結

構 (Structure from Motion, SfM)，其原理是透過一連串影像 (需要有一定影像重疊率)，透過連續影像中共同特徵點進行影像匹配計算每張影像的透視中心並建置三維數值模型，以建立三維數值模型、物體於每張影像及每張影像透視中心的關係。SfM 是由攝影測量學共線式方程式發展而來，因此三維數值模型、物體於每張影像及每張影像透視中心之關係亦可由共線式方程式描述，以下分別就共線式方程式、影像匹配及 SfM 進行說明：

3.2.1 共線式方程式

攝影測量學是基於透視理論，並發展出共線式方程式 (Wolf and DeWitt, 2000)，透過共線式方程式可建立透視中心、拍攝之物體及物體於影像之間的關係 (見圖 4)，其方程式如式 (1) 所示。方程式左邊為像空間座標系統，而方程式右邊則是待解算之內、外方位參數及物體於真實空間之座標 (x, y, z) 。內方位參數為透視中心在像空間座標系統的座標，外方位參數為透視中心在物空間座標系統的座標及旋轉角參數，共 9 個參數。

因每張影像中的每個像點及對應的物點可形成 1 組共線式方程式，因此需要 5 個控制點，形成 5 組共線式方程式，共 10 個方程式解算 9 個參數；而一個物點及在一張影像形成的對應像點只能形成 1 組共線式方程式，因此需要對同一個物體拍攝兩張影像，形成 2 組共線式方程式，

共 4 個方程式解算物體於真實空間之座標(x, y, z)。

$$\begin{aligned} u - u_c &= \\ -d \frac{[r_{11}(x - x_c) + r_{12}(y - y_c) + r_{13}(z - z_c)]}{[r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c)]} \\ v - v_c &= \\ -d \frac{[r_{21}(x - x_c) + r_{22}(y - y_c) + r_{23}(z - z_c)]}{[r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c)]} \end{aligned} \quad \dots(1)$$

式中

d : 攝影瞬間之焦距；

x_c, y_c, z_c : 透鏡中心在物空間座標系統的座標；

u_c, v_c, d : 透鏡中心在像空間座標系統的座標；

$r_{11} \sim r_{33}$: 旋轉角參數由 α, τ, θ 組合而成；

x, y, z : 物點在物空間座標系統的座標；

u, v : 對應像點在像空間座標系統的座標。

3.2.2 影像匹配

影像匹配是指在第二張影像尋找與第一張影像相同地面點的共軛像點觀測量。在傳統上是使用人工配對指定同一地面點分別在兩張影像上的位置，因此在攝影測量朝自動化演進的過程中，數位影像的發明是很重要的里程碑。數位影像是指將傳統影像切割成數個小區塊，並給予每個區塊一個數字。透過數位影像上這些數字的計算，可以算得 A 影像上另一點在 B 影像上的位置，當得到地面未知點分別在兩張影像上的像點觀測量，才可以透過共線式方程式去計算地面未知點的座標值，在傳統影像匹配較為常見方法共有三種(王樹根，2009)：相關係數法、協方差法、最小二乘匹配法。

而隨著電腦視覺的發展，尺度不變特徵轉換(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)演算法由 Lowe 在 1999 年提出來，透過影像中大量不同特徵點進行影像匹配之工作。SIFT 是一種機器視覺的演算法用來偵測與描述影像中的局部性特徵，它在空間尺度中尋找極值點，並提取出其位置、尺度、旋轉不變數。並於後續發展許多基於 SIFT 改進的方法，例如加速穩健特徵(Speeded Up Robust Features, SURF)及主成分分析尺度不變特

徵轉換(Principle Component Analysis Scale-Invariant Feature Transform, PCA-SIFT)。

3.2.3 運動回復結構(Structure from Motion, SfM)

運動回復結構(SfM)攝影測量技術與傳統攝影測量技術相比，允許使用一般商業用數位相機之影像執行攝影測量分析，且提高數據自動化處理之程序，因此 SfM 比傳統攝影測量技術更為快速、高度自動化且低成本獲得三維數值模行之數據(Micheletti *et al.*, 2015a)。但在擷取影像時，仍須注意以下事項(Micheletti *et al.*, 2015b)：1. 計劃攝影機之規格，並調整好焦距；2. 首先拍攝全景影像，然後拍攝細節，確保物體細節均有在影像上呈現；3. 確保影像覆蓋率，基本原則為每一物體、特徵、景物必須至少出現在三個不同空間拍攝影像中；4. 被拍攝物體須為靜態場景；5. 一致的光線及陰影，表示不能使用上午及下午拍攝之影像進行 SfM；6. 避免曝光過度和曝光不足的影像；7. 避免模糊的影像；8. 避免透明，反光或均勻的表面。

SfM 的運作流程大致可分為 6 個部分，分別為：1. 影像特徵點的選取；2. 由連續影像中的影像特徵點的相對位置推算場景形狀、大小及不同影像之相對位置，其中不同影像之相對位置即為攝影機的運動位置；3. 透過不斷增加的影像，調整計算結果；4. 確認所有影像拍攝時之攝影機位置；5. 得到拍攝影像之密集點雲；6. 由密集點雲形成三角網格後，貼上物體的顏色及紋理。

3.3 硬體介紹

本研究所使用之無人飛機為雷虎科技(TTRobotix)所推出的 Ghost+ (見圖 5)，可用於公安、消防、環境、氣象監測等領域，表 2 為雷虎 Ghost+ 之規格表，其機體重量為 1.55 公斤，最大滯空時間為 25 分鐘，可飛行距離為 1 公里，其攝影機為另外裝設，為 GoPro Hero3，最高規格可提供 4K/15 fps 的錄影解析度及 1200 萬畫素的 30 fps 連拍功能，本研究使以 1080p 解析度，30 fps 的設定下進行錄影。於拍攝前並未對鏡頭進行標定；航拍時的攝影機拍攝方向為垂直向下，因此拍攝角度為 180 度。



圖 5 雷虎 Ghost+四軸無人飛機。



圖 6 Leica ATX1230GG 儀器圖。

表 2 雷虎 Ghost+規格表

對角線馬達軸距 (mm)	450	起飛重量 (Kg)	2.25
機體重量 (Kg)	1.55	最大載重 (Kg)	0.81
馬達定子尺寸 (mm)	28 × 14	最大滯空時間 (Min)	25
馬達 KV 值 (rpm/V)	450	空機最大滯空時間 (Min)	25
速控器電流值 (A)	30	含雲台相機最大 滯空時間(Min)	15
速控器電壓值 (V)	22.2	機體類型	4 旋翼
螺旋槳尺寸 (in)	12	最遠飛行距離 (km)	1

另本研究使用 Leica ATX1230GG (見圖 6) 進行 e-GNSS 量測，其量測精度可達 2 公分，以 Leica ATX1230GG 進行 e-GNSS 量測控制點及檢核點之座標，其控制點座標可輸入至三維數值模型中，使三維數值模型中所有點雲獲得真實座標值 (包含檢核點)，再由三維數值模型計算之檢核點座標與 e-GNSS 量測檢核點座標進行比較，即可計算三維數值模型之精度。

3.4 軟體介紹

本研究是使用俄羅斯 Agisoft 公司研發的

Agisoft photoscan 建置三維數值模型。Agisoft photoscan 係根據多視圖三維重建技術，可以對任意像片進行處理，小到考古擺件，大到大量航片數據處理。軟體通過導入具有一定重疊率的數位影像，便可實現高質量的正射影像生成及三維模型重建，AgiSoft PhotoScan 匹配原理是 SfM (Structure from Motion, SfM)，三維數值模型建置流程為利用多視立體視覺三維重建技術依序完成對齊像片、建立密集點雲、生成網格，最後生成紋理。

四、研究結果與討論

本研究目的為討論不同影像重疊率、不同影像解析度及混合不同拍攝航高之影響對建置三維數值模型精度之影響，因此本研究進行三組實驗 (如表 3)，第一組實驗為討論不同影像重疊率對建置三維數值模型精度之影響，因此實驗設計拍攝航高為 85 公尺 (以 point006 為基準)，並使用不同軟體選取影像頻率，分別為 0.15 fps、0.3 fps 及 0.4 fps，其分別選取 117 張影像、232 張影像及 318 張影像，其影像前後平均重疊率分別為 74.63%、84.81% 及 92.04%；第二組實驗為討論不同影像解析度對建置三維數值模型精度之影響，因此實驗設計三種拍攝航高，分別為 55 公尺、70 公尺及 85 公尺，其影像解析度為 3.16 cm/pixel、4.02 cm/pixel 及 4.87 cm/pixel，其中航拍高度 55 公尺進行兩項實驗，一項為影像重疊

表 3 實驗設計相關資料彙整表

項次	拍攝航高	幀速(fps)	相片數量(張)	影像前後平均重疊率(%)	備註
第一組實驗設計					
1	85	0.15	117	74.63	
2	85	0.3	232	84.81	
3	85	0.4	318	92.04	
第二組實驗設計					
4	55	0.3	247	66.25	
5	55	1.0	785	88.3	
6	70	0.3	241	72.5	
7	85	0.3	232	84.81	
第三組實驗設計					
8	85	0.3	232	84.81	Case1
9	85	0.3	232	--	Case2
	85	--	86		
10	85	0.3	232	--	Case3
	70	--	56		
	55	--	30		

註：「--」：表示無相關數據。

率小於 70%，另一項為影像重疊率大於 70%；第三組實驗為討論混合不同拍攝航高之影響對建置三維數值模型精度之影響，因此以航高 85 公尺且軟體以 0.3 fps 選取之 232 張影像作為 Case 1；以 Case 1 的 232 張影像為基礎，再增加相同航高拍攝之影像，總影像數量共 318 張做為 Case 2；Case 3 則以 Case 1 的 232 張影像為基礎，再增加不同航高拍攝之影像，總影像數量共 318 張做為 Case 3。

均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)是由三維數值模型計算之檢核點座標值，與 e-GNSS 量測檢核點座標值相減後平方相加，再除以檢核點的個數後開根號，如式(2)所示。RMSE_X 表示在 X 軸座標值的均方根誤差；RMSE_Y 表示在 Y 軸座標值的均方根誤差；RMSE_Z 表示在 Z 軸座標值的均方根誤差。將 RMSE_X、RMSE_Y、RMSE_Z 三個值平方相加再開根號，即可得到整體的均方根誤差(Total RMSE)，如式(3)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{oi} - N_{si})^2}{n}} \dots\dots\dots(2)$$

$$Total\ RMSE = \sqrt{(RMSE_X^2 + RMSE_Y^2 + RMSE_Z^2)} \quad (3)$$

式中

- N_{oi} ：三維數值模型計算檢核點之座標值；
- N_{si} ：e-GNSS 量測檢核點之座標值；
- n ：檢核點的數量。

4.1 影像重疊率對建置三維數值模型之精度比較

本實驗以拍攝航高 85 公尺(以 point006 為基準)之影像，再透過軟體以幀率 0.15 fps、0.3 fps 及 0.4 fps 分別選取 117 張影像、232 張影像及 318 張影像，其影像前後平均重疊率分別為 74.63%、84.81%及 92.04%，並分別建置三維數值模型，輸入 e-GNSS 量測之控制點座標後，紀錄三維數值模型計算檢核點之座標，並分別與 e-GNSS 量測之檢核點座標計算誤差，見表 4 所示。並計算檢核點 RMSE_X、RMSE_Y、RMSE_Z 與 Total RMSE，其結果彙整如表 5 及圖 7 所示。研究結果顯示相同拍攝航高，但使用不同影像數量(即影像重疊率不同) 建置三維數值模型之檢核點誤差，其 RMSE 相近。檢核點於 X 軸方向誤差之 RMSE 分別為 0.23 公尺、0.33 公尺及 0.31 公尺；

表 4 不同影像重疊率建置三維數值模型之各檢核點誤差列表

點號	影像前後平均重疊率 (%)											
	74.63				84.81				92.04			
	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)
point001	-0.26	-0.25	1.72	1.76	-0.40	-0.41	1.21	1.34	-0.33	-0.36	1.21	1.30
point002	0.04	-0.10	-0.40	0.41	-0.10	0.55	-0.57	0.80	-0.01	0.12	-0.53	0.54
point003	0.31	-0.29	1.81	1.86	0.35	-0.33	2.27	2.32	0.29	-0.38	2.17	2.22
point004	-0.31	0.11	1.19	1.24	-0.57	0.13	0.57	0.82	-0.58	0.23	0.56	0.84
point005	0.21	0.45	-0.37	0.62	0.23	0.59	-0.11	0.64	0.23	0.54	-0.12	0.59
point006	0.09	-0.51	3.14	3.18	0.08	-0.58	2.94	3.00	0.09	-0.58	2.79	2.85
point007	0.03	-0.34	2.76	2.78	0.00	-0.36	2.94	2.96	-0.01	-0.28	2.78	2.79

表 5 不同影像重疊率建置三維數值模型之檢核點誤差統計表

項次	影像前後平均重疊率 (%)	RMSE_X (m)	RMSE_Y (m)	RMSE_Z (m)	Total RMSE (m)
1	74.63	0.23	0.32	1.39	1.44
2	84.81	0.33	0.48	1.43	1.55
3	92.04	0.31	0.40	1.36	1.45

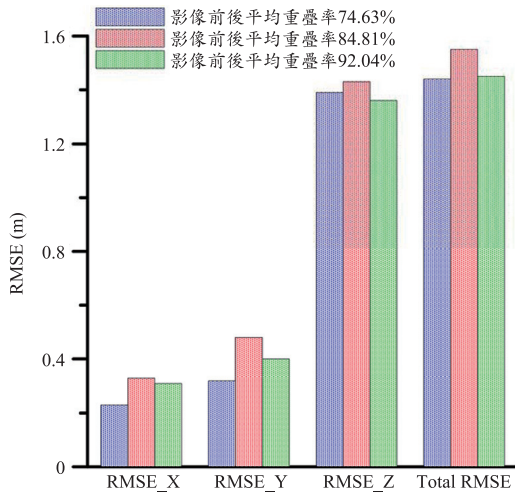


圖 7 不同影像重疊率建置三維數值模型之檢核點誤差比較圖。

於 Y 軸方向誤差之 RMSE 分別為 0.32 公尺、0.48 公尺及 0.40 公尺；於 Z 軸方向誤差之 RMSE 分別為 1.39 公尺、1.43 公尺及 1.36 公尺；Total

RMSE 分別為 1.44 公尺、1.55 公尺及 1.45 公尺。

在本次實驗中，三次實驗之影像前後平均重疊率分別為 74.63%、84.81%及 92.04%，但 Total RMSE 分別為 1.44 公尺、1.55 公尺及 1.45 公尺，影像前後平均重疊率分別提升 10.18%及 17.41%，但 Total RMSE 沒有降低，反而分別提升 0.11 公尺及 0.01 公尺，顯示影像前後平均重疊率 74.63%已達到最低影像前後重疊率之要求，此結果介於何維信(2006)所述 60%及內政部國土測繪中心(2015)規定 80%之間。此研究結果與 Rosnell and Honkavaara (2012)及 Yanagi and Chikatsu (2016)研究結果相同，於 Rosnell and Honkavaara (2012)研究中，當影像重疊率從 80% 提升至 90%時，其 RMSE 降低約 0.02 公尺；於 Yanagi and Chikatsu (2016)之研究結果則表示當影像前後平均重疊率滿足軟體最低影像前後重疊率之要求後，其重疊率的增加，不一定能持續增加三維數值模型的精度，如使用軟體 Pix4D，當影像重疊率從 80%上升為 86.7%(航高 50 公尺)

表 6 不同拍攝航高影像建置三維數值模型之各檢核點誤差

點號	影像解析度(cm/pixel)											
	3.16				4.02				4.87			
	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)
point001	-0.21	0.29	1.40	1.44	-0.49	0.06	0.88	1.01	-0.40	-0.41	1.21	1.34
point002	0.58	0.57	-1.88	2.05	0.34	-0.17	-0.12	0.40	-0.10	0.55	-0.57	0.80
point003	0.42	-6.64	21.46	22.47	0.19	-0.29	1.70	1.74	0.35	-0.33	2.27	2.32
point004	-0.11	0.15	1.46	1.47	-0.32	0.48	0.80	0.99	-0.57	0.13	0.57	0.82
point005	-6.53	-8.07	13.79	17.26	0.50	0.23	0.19	0.59	0.23	0.59	-0.11	0.64
point006	0.33	-0.04	2.87	2.89	0.25	-0.24	2.10	2.13	0.08	-0.58	2.94	3.00
point007	0.27	-0.15	3.58	3.59	0.04	-0.13	2.37	2.37	0.00	-0.36	2.94	2.96

表 7 不同拍攝航高影像建置三維數值模型之檢核點誤差統計表

項次	解析度 (cm/pixel)	拍攝航高 (m)	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	Total RMSE (m)
4	3.16	55	2.56	3.70	8.36	9.49
5	3.16	55	0.41	0.30	0.86	1.00
6	4.02	70	0.36	0.28	0.95	1.05
7	4.87	85	0.33	0.48	1.43	1.55

及 91.3%(航高 100 公尺)時，其三維數值模型的精度是增加的，但影像重疊率持續增加為 93.3%(航高 50 公尺)及 95.6%(航高 100 公尺)時，三維數值模型的精度反而降低；另一套軟體 Smart3D 則呈現航高為 100 公尺時，影像重疊率上升時，三維數值模型的精度降低，航高為 50 公尺時，影像重疊率從 80%上升為 86.7%時，三維數值模型的精度降低，影像重疊率從 86.7%上升為 93.3%時，三維數值模型的精度反而增加。

4.2 拍攝航高對建置三維數值模型之精度比較

UAV 在三個不同拍攝航高的相片，以軟體挑選出幀率 0.3 fps 的相片，相片數量介於 232 張至 247 張之間；前後重疊率隨著拍攝航高的增加而明顯增加，由拍攝航高 55 公尺至拍攝航高 85 公尺，前後重疊率從 66.25%提升至 84.81%，如表 3 所示。計算三種拍攝航高影像建置的三維數值模型所計算之檢核點座標與 e-GNSS 量測檢核點的座標之間的誤差，如表 6 所示，並計算檢核

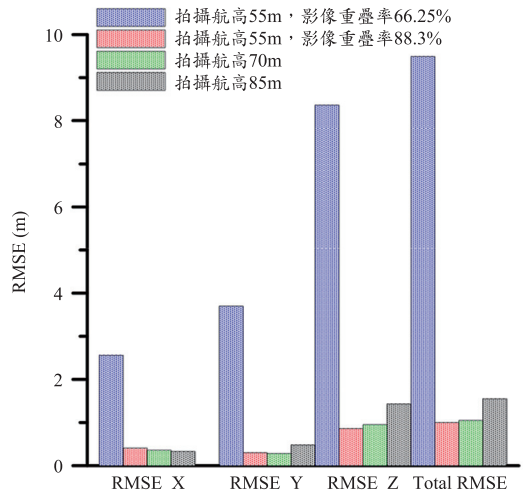


圖 8 不同拍攝航高影像建置三維數值模型之檢核點誤差比較圖。

點誤差之 RMSE_X、RMSE_Y、RMSE_Z 與 Total RMSE，其結果如表 7 及圖 8。結果顯示使用拍攝航高 55 公尺影像建置三維數值模型的檢核點

誤差最大，其 Total RMSE 為 9.49 公尺，其原因可能為影像前後平均重疊率不足，其影像前後平均重疊率為 66.25%，因此另外以拍攝航高 55 公尺，使用 1.0 fps 的頻率選取影像，共 785 張影像建置三維數值模型，並計算檢核點誤差，並與拍攝航高 70 公尺及 85 公尺影像建置三維數值模型的檢核點誤差進行比較，其 Total RMSE 分別為 1.00 公尺、1.05 公尺及 1.55 公尺，其影像前後平均重疊率分別為 88.3%、72.50%與 84.81%，結果與 4.1 節結果大致相同，影像前後平均重疊率 88.3%、72.50%與 84.81%已達到最低影像前後重疊率之要求。

在使用拍攝航高 55 公尺、70 公尺及 85 公尺影像建置三維數值模型的檢核點誤差比較中，拍攝航高 85 公尺影像建置三維數值模型的檢核點的 Total RMSE 為 1.55 公尺，比拍攝航高 70 公尺影像建置三維數值模型的檢核點的 Total RMSE 為 1.05 公尺較大，而比拍攝航高 70 公尺影像建置三維數值模型的檢核點的 Total RMSE 又比拍攝航高 55 公尺影像建置三維數值模型的檢核點的 Total RMSE 較大，顯示隨著飛行高度越高，其誤差逐漸增加。其中主要的誤差來源皆為高程誤差，RMSE_Z 從 0.86 公尺(拍攝航高 55 公尺)增加至 0.95 公尺(拍攝航高 70 公尺)，而隨著拍攝航高提升到 85 公尺，其 RMSE_Z 亦增加到 1.43 公尺，而 RMSE_X 則介於 0.33 公尺至 0.41 公尺之間，RMSE_Y 則介於 0.28 公尺至 0.48 公尺之間。Anders *et al.* (2013)及 Agüera-Vega *et al.* (2016)之研究結果與本研究一致，Anders *et al.* (2013)使用拍攝航高分別為 90 公尺及 185 公尺影像建置三維數值模型，其標準誤差(Standard Deviation)分別為 0.35 公尺及 0.45 公尺；Agüera-Vega *et al.* (2016)於 5 個研究區域使用 5 個控制點的案例中，拍攝航高分別為 50 公尺、80 公尺、100 公尺及 120 公尺之平均 RMSE_X 為 0.052 公尺，平均 RMSE_X 為 0.062 公尺，但於 RMSE_Z 從約 0.05 公尺(拍攝航高 50 公尺)上升到約 0.15 公尺(拍攝航高 120 公尺)，增加大約 0.1 公尺的誤差。

4.3 混合不同拍攝航高影像對建置三維數值模型之精度比較

從 4.1 節及 4.2 節的實驗結果顯示三維數值模型的誤差主要為高程誤差，而高程誤差大於水平誤差的原因可能為相鄰相片的焦點對同一點拍攝之光束垂直夾角較小，並且夾角變化亦小，所以不容易觀測。因此造成高程誤差的原因可能是因為同一組相片中，沒有其他拍攝航高所拍攝的相片，導致垂直關係的夾角變化不明顯而產生的。因此本研究進一步於已知輸出模型精度的案例中，加入其他不同航高拍攝的相片，並與同樣影像數量但全為相同拍攝航高的相片的案例結果進行比較。

本節之實驗是以航高 85 公尺且軟體以 0.3 fps 選取之 232 張影像做為 Case 1；以 Case 1 的 232 張影像為基礎，再增加相同航高拍攝之影像，總影像數量共 318 張做為 Case 2；Case 3 則以 Case 1 的 232 張影像為基礎，再增加不同航高拍攝之影像，總影像數量共 318 張做為 Case 3。其中 Case 3 是以 Case 1 的 232 張影像為基礎，其中 Case 1 影像重疊率已達 80%，因此所增加不同航高拍攝之影像只要有覆蓋到研究區域即可，因此分別以航高 70 公尺，0.06 fps，選取 56 張影像及航高 55 公尺，0.06 fps，選取 30 張影像，所選取之 318 張影像一起輸入軟體建置三維數值模型即可。

由 3 種 Case 中建置三維數值模型，分別計算檢核點座標並與 e-GNSS 量測之檢核點座標誤差如表 8 所示，其誤差統計結果如表 9 及圖 9 所示。結果顯示增加相同航高之影像數量所建置之三維數值模型，其檢核點座標誤差改善有限，於 Case 1 及 Case 2 之間誤差於 RMSE_X 相差 0.02 公尺；RMSE_Y 相差 0.08 公尺；RMSE_Z 相差 0.07 公尺；Total RMSE 相差 0.1 公尺。但在增加不同航高之影像數量建置三維數值模型之結果中，其檢核點座標誤差明顯減少，尤其在 Z 軸方向之誤差。於 Case 1 及 Case 3 兩者之比較，於 RMSE_X 減少 0.19 公尺；RMSE_Y 減少 0.18 公尺；RMSE_Z 減少 1.32 公尺；Total RMSE 減少 1.1 公尺。

表 8 混合不同拍攝航高影像建置三維數值模型之各檢核點誤差

點號	Case 1				Case 2				Case 3			
	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)	X 軸誤差 (m)	Y 軸誤差 (m)	Z 軸誤差 (m)	Total 誤差 (m)
point001	-0.40	-0.41	1.21	1.34	-0.33	-0.36	1.21	1.30	0.53	0.15	0.07	0.56
point002	-0.10	0.55	-0.57	0.80	-0.01	0.12	-0.53	0.54	0.22	0.27	0.05	0.35
point003	0.35	-0.33	2.27	2.32	0.29	-0.38	2.17	2.22	0.24	0.54	0.11	0.60
point004	-0.57	0.13	0.57	0.82	-0.58	0.23	0.56	0.84	0.32	0.20	0.09	0.38
point005	0.23	0.59	-0.11	0.64	0.23	0.54	-0.12	0.59	0.16	0.92	0.12	0.94
point006	0.08	-0.58	2.94	3.00	0.09	-0.58	2.79	2.85	0.39	0.07	0.32	0.51
point007	0.00	-0.36	2.94	2.96	-0.01	-0.28	2.78	2.79	0.13	0.18	0.31	0.38

表 9 混合不同拍攝航高影像建置三維數值模型之各檢核點誤差統計表

項次	案例	RMSE_X (m)	RMSE_Y (m)	RMSE_Z (m)	Total RMSE (m)
8	Case 1	0.33	0.48	1.43	1.55
9	Case 2	0.31	0.40	1.36	1.45
10	Case 3	0.14	0.30	0.11	0.35

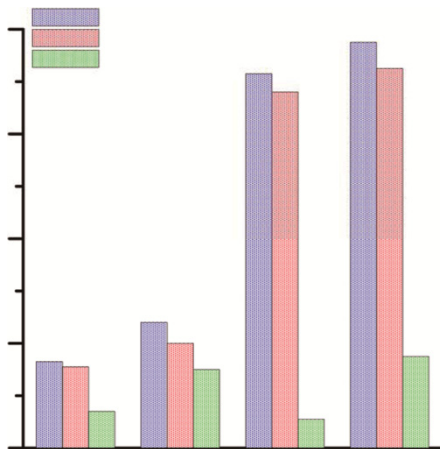


圖 9 混合不同拍攝航高影像對建置三維數值模型之檢核點誤差比較圖。

最後本研究所建置之三維數值模型如圖 10 所示，其 DEM 如圖 11 所示，由圖 10 及圖 11 可發現研究區域地形於東南方地勢較低，並往西北方逐漸升高，與實際地形走勢符合。且研究區域



圖 10 混合不同拍攝航高影像建置之三維數值模型。

中的建築物亦完整的表現出來，由圖 10 及圖 11 可以明顯看出有六棟主要建築物(圖中編號 1 至 6)及附屬設施，研究區域最下方尚有兩棟建築物(圖中編號 7 及 8)，但因高度只有一層樓，與地面高度差異不大，因此於圖 11 中第 7 棟及第 8 棟建築物之顏色與地面顏色差異不大。

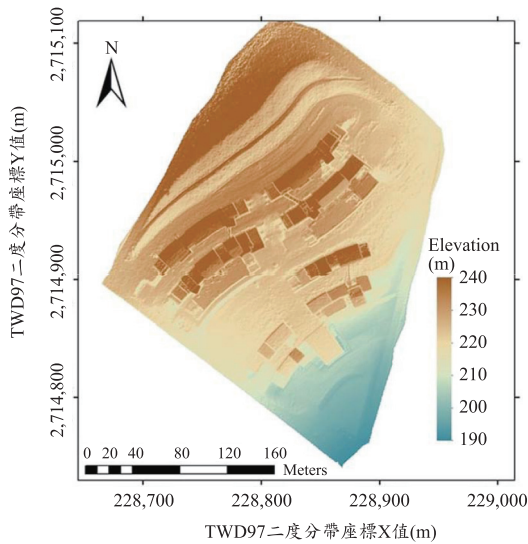


圖 11 混合不同拍攝航高影像建置三維數值模型之 DEM 圖。

五、結 論

本研究以 UAV 拍攝航高與影像重疊率對於建置三維數值模型精度的影響，研究過程中進行三項實驗：一、不同影像重疊率對建置三維數值模型之精度比較；二、不同拍攝航高對建置三維數值模型之精度比較；三、混合不同拍攝航高影像對建置三維數值模型之精度比較。經由實驗結果分析與探討，可獲得以下結論：

1. 依本研究實驗結果顯示，使用 Agisoft photoscan 建置三維數值模型，其影像前後平均重疊率須達 72.5% 以上，可獲得較好的三維數值模型精度，且繼續增加影像重疊率並不一定會提高三維數值模型精度。
2. 使用拍攝航高越高的影像建置三維數值模型，三維數值模型的高程誤差(RMSE_Z)越大，於本研究之實驗結果顯示，拍攝航高 70 公尺時，RMSE_Z 為 0.95 公尺；拍攝航高 85 公尺時，RMSE_Z 為 1.43 公尺。
3. 於本研究之實驗結果顯示，使用混合拍攝航高的影像，可以有效減少三維數值模型的誤差，其 RMSE_X 誤差減少 0.19 公尺；RMSE_Y

誤差減少 0.18 公尺；RMSE_Z 誤差減少 1.32 公尺；Total RMSE 誤差可減少 1.1 公尺。

參考文獻

1. 內政部國土測繪中心，「104 年度發展無人機飛行載具系統測繪作業工作總報告」，內政部國土測繪中心，2015。
2. 王樹根，攝影測量原理與應用，pp. 49-51，武漢大學出版社，2009。
3. 何維信，航空攝影測量學，134-143 頁，大中國圖書出版，台北市，2006。
4. Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F. and Martínez-Carricondo, P., "Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry," *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 143(2): 04016025, 2017.
5. Anders, N., Masselink, R., Keesstra, S. and Suomalainen, J. "High-Res Digital Surface Modeling Using Fixed-wing UAV-based Photogrammetry," In: *Geomorphometry 2013*. Nanjing, China, 2013.
6. Baluja, J., Diago, M.P., Balda, P., Zorer, R., Meggio, F., Morales, F. and Tardaguila, J., "Assessment of Vineyard Water Status Variability by Thermal and Multispectral Imagery Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," *Irrigation Science*, Vol. 30(6), pp. 511-522, 2012.
7. Cook, K.L., "An Evaluation of the Effectiveness of Low-cost UAVs and Structure from Motion for Geomorphic Change Detection," *Geomorphology*, Vol. 278, pp. 195-208, 2017.
8. Darmawan, H., Walter, T.R., Brotospito, K.S., Subandriyo and Nandaka, I G.M.A., "Morphological and Structural Changes at the Merapi Lava Dome Monitored in 2012 - 15 Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 349, pp. 256-267, 2018.

9. Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Gallego, P.P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J. and Medrano, H., "UAVs Challenge to Assess Water Stress for Sustainable Agriculture," *Agricultural Water Management*, Vol. 153, pp. 9-19, 2015.
10. Haubeck, K. and Prinz, T., "A UAV-based Low-coast Stereo Camera System for Archaeological Surveys, experiences from Doliche (Turkey)," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-1/W2, 2013.
11. Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K. and Hamilton, T., "Geomorphological Mapping with a Small Unmanned Aircraft System (sUAS): Feature Detection and Accuracy Assessment of a Photogrammetrically-derived Digital Terrain Model," *Geomorphology*, Vol. 194, pp. 16-24, 2013.
12. Kršák, B., Blišťan, P., Paulíková A., Puškárová, P., Kovanič, Ľ., Palková, J. and Zelizňaková, V., "Use of Low-cost UAV Photogrammetry to Analyze the Accuracy of a Digital Elevation Model in a Case Study," *Measurement*, Vol. 91, pp. 276-287, 2016.
13. Langhammer, J., Bernsteinova, J. and Mirijovsky, J., "Building a High-precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring," *Water*, Vol. 9(11): 861.
14. Liu, C.C., Chen, P.L., Matsuo, T. and Chen, C.Y., "Rapidly Responding to Landslides and Debris Flow Events Using a Low-cost Unmanned Aerial Vehicle," *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 9(1), pp. 096016-1-096016-18.
15. Lo, M., Brutto, A., Garraffa, B.A. and Meli, P., "UAV Platforms for Cultural Heritage Survey: First Results," *ISPRS Annals for the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-5, ISPRS Technical Commission Symposium, 2014.
16. Lowe, D.G., "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features," *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp. 1150-1157, 1999.
17. Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., "Investigating the Geomorphological Potential of Freely Available and Accessible Structure-from-Motion Photogrammetry Using a Smartphone," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40(4), pp. 473-486, 2015a.
18. Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., *Geomorphological Techniques*, Chapter 2, Section 2.2, British Society for Geomorphology, London England, 2015b.
19. Nikolakopoulos, K.G., Soura, K., Koukouvelas, I.K. and Argyropoulos, N.G., "UAV vs classical aerial photogrammetry for archaeological studies," *Journal of Archaeological Science: Reports*, Vol. 14, pp. 758-773, 2017.
20. Neugirg, F., Stark, M., Kaiser, A., Vlacilova, M., Della Seta, M., Vergari, F., Schmidt, J., Becht, M. and Haas, F., "Erosion Processes in Calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on Multitemporal High-resolution Terrestrial LiDAR and UAV Surveys," *Geomorphology*, Vol. 269, pp. 8-22, 2016.
21. Rango, R., Laliberte, A., Herrick, J.E., Winters, C., Havstad, K., Steele, C., Browning, D., "Unmanned Aerial Vehicle-based Remote Sensing for Rangeland Assessment, Monitoring, and Management," *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 3, 033542, 2009.
22. Remondino, F., Barazzetti L., Nex, F., Scaioni, M. and Sarazzi, D., "UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling - Current Status and Future Perspectives," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and*

- Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, pp. 1-7, 2013.
23. Rokhmana, C.A., "The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 24, pp. 245-253, 2015.
 24. Rosnell T. and Honkavaara E., "Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera," *Sensors*, Vol. 12, pp. 453-480, 2012.
 25. Serban, G., Rus, I., Vele, D., Bretcan, P., Alexe, M. and Petrea, D., "Flood-prone Area Delimitation Using UAV Technology, in the Areas Hard-to-Reach for Classic Aircrafts: Case Study in the North-East of Apuseni Mountains, Transylvania," *Natural Hazards*, Vol. 82(3), pp. 1817-1832, 2016.
 26. Siebert, S. and Teizer, J., "Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System," *Automation in Construction*, Vol. 41, pp. 1-14, 2014.
 27. Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B. and Lapointe, M., "Hyperspatial Remote Sensing of Channel Reach Morphology and Hydraulic Fish Habitat Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A First Assessment in the Context of River Research and Management," *River Research and Applications*, Vol. 31(3), pp. 379-391, 2015.
 28. Tauro, F., Pagano, C., Phamduy, P., Grimaldi, S. and Profiri, M., "Large-Scale Particle Image Velocimetry from an Unmanned Aerial Vehicle," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20(6), pp. 3209-3275, 2015.
 29. Tauro, F., Petroselli, A. and Arcangeletti, E., "Assessment of Drone-based Surface Flow Observations," *Hydrological Processes*, Vol. 30(7), 1114-1130, 2016a.
 30. Tauro, F., Profiri, M. and Grimaldi, S., "Surface Flow Measurements from Drones," *Journal of Hydrology*, Vol. 540, pp. 240-245, 2016b.
 31. Watanabe, Y. and Kawahara, Y., "UAV Photogrammetry for Monitoring Changes in River Topography and Vegetation," *Procedia Engineering*, Vol. 154, pp. 317-325, 2016.
 32. Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. and Reynolds, J.M., "Structure-from-Motion Photogrammetry: a Low-cost, Effective Tool for Geoscience Application," *Geomorphology*, Vol. 179, pp. 300-314, 2012.
 33. Wolf, P. and DeWitt, B., "Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS," McGraw-Hill, Boston, 2002.
 34. Xiang, H. and Tian, L., "Development of a Low-coast Agricultural Remote Sensing System Based on Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," *Biosystems Engineering*, Vol. 108(2), pp. 174-190, 2011.
 35. Yanagi, H. and Chikatsu, H., "Performance Evaluation of 3D Modeling Software for UAV Photogrammetry," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B5, pp. 147-152, 2016.
 36. Zarco-Tejada, P.J., Gonzalez-Dugo, V., Berni, J.A., "Fluorescence, Temperature and Narrow-band Indices Acquired from a UAV Platform for Water Stress Detection Using a Micro-hyperspectral Image and a Thermal Camera," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 117, pp. 322-337, 2012.
 37. Zarco-Tejada, P.J., Guillen-Climent, M.L., Hernandez-Clemente, R., Catalina, A., Gonzalez, M.R. and Martin, P., "Estimating Leaf Carotenoid Content in Vineyards Using High Resolution Hyperspectral Imagery Acquired from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," *Agricultural and Forest Meteorology*,

Vol. 171, pp. 281-294, 2013.

38. Zhao, C.S., Zhang, C.B., Yang, S.T., Liu, C.M., Xing, H., Sun, Y., Yang, Z.Y., Zhang, Y., Yu, X.Y., Shao, N.F. and Yu, Q., “Calculating E-flow Using UAV and Ground Monitoring,”

Journal of Hydrology, Vol. 552, pp. 351-365, 2017.

收稿日期：民國 107 年 3 月 13 日

修正日期：民國 107 年 4 月 9 日

接受日期：民國 107 年 4 月 17 日