

# 以無人飛機系統(UAS)獲取國立中興大學校區三維地形之 精度分析

蘇柏軒<sup>(1)</sup> 蕭宇伸<sup>(2)</sup>

## 摘要

本論文主要目的為分析航測標分佈情況以及航線設計等對固定翼無人飛機系統(UAS)航測成果的影響。本研究於 2013 年 6 月在國立中興大學校園，使用 UAS 進行縝密且完整的航空攝影測量，並利用航測軟體 Pix4Dmapper 製成三維點雲以及數值表面模型(DSM, Digital Surface Model)，再利用地面測量所得結果檢核其精度。除此之外，本次航拍結果也和過去兩次中興大學航拍任務進行精度比較。分析結果採用雙 S 型航線並在測區外側設置航測標的任務 3-O 精度及控制點使用率最佳，平面誤差地表檢測點 RMSE 為 16.3 公分，樓頂檢測點 RMSE 為 35.1 公分；高程誤差地表檢測點 RMSE 為 10.2 公分，樓頂檢測點 RMSE 為 52.6 公分。

(關鍵字：無人飛機系統、Pix4Dmapper、三維點雲)

## Accuracy analyses of UAS-derived 3D topography in the campus of National Chung Hsing University

Bo-Hsien Su<sup>(1)</sup> Yu-Shen Hsiao<sup>(2)</sup>

Master Student<sup>(1)</sup> Assistant Professor<sup>(2)</sup> Department of Soil and Water Conservation, National  
Chung-Hsing University, Taiwan

## ABSTRACT

We mainly investigate the influences of the distributions of the control points, and the flight designs on the Unmanned Aircraft System (UAS) surveys. A rigorous and completed UAS mission with fixed-wing vehicle was carried out on the campus of National Chung Hsing University (NCHU) in June, 2013. Pix4Dmapper was used to generate 3D point clouds and digital surface model (DSM). The related results were subsequently evaluated by land survey at both horizontal and vertical components. In addition, two previous UAS missions implemented on NCHU in 2011~2013 are also compared with the new mission. The case 3-O shows the best result and the RMSE. At horizontal

---

(1)國立中興大學水土保持學系碩士生(通訊作者 E-mail:[bcsu1106@hotmail.com.tw](mailto:bcsu1106@hotmail.com.tw))

(2)國立中興大學水土保持學系助理教授

component, the RMSE are 16.3 and 35.1 cm validated by ground and building check points, respectively; at vertical component, the RMSE are 10.2 and 52.6 cm validated by ground and building check points, respectively.

(**Keywords:** Unmanned Aircraft System, Pix4Dmapper, 3D Point Clouds).

## 前言

現今無人飛機系統(UAS, Unmanned Aircraft System)航空攝影測量由於各方面技術的進步，例如：數位相機的解析力及影像品質的提升、載具的可載重及穩定性增加、定位及慣性測量儀器的微型化、計算機及航測軟體效能的大幅進步等，讓UAS航空攝影測量可獲得之精度，能達到一定的工程標準，但是否能達到要求更高的製圖標準，是一個值得探討的課題。

UAS航測的優勢在於多數UAS的飛行高度較飛機較低，除了可獲取地面解析度高的影像，也不易因雲層遮蔽而降低影像品質，對特定區域內的監測、調查、記錄而言，有相當高的應用價值（謝幸宜, 2009）；而使用非量測型相機有以下優點（龔健彬 & 史天元, 2000）：體積較小、重量輕、取得容易、價格低廉、影像獲取方便、記憶卡可重複記錄使用且輸出為數值影像可直接在電腦上修改。

國內外皆有學者使用UAS航空測量進行研究，蕭震洋等（2011）使用UAS進行民國99年國道3號大規模邊坡崩塌事件之推估崩塌量作業，估算數據與實際資料相近。Harwin 與 Lucieer (2012)在澳大利亞塔斯馬尼亞州東南沿海使用UAS獲取影像，使用多視圖立體技術結合攝影測量和計算機視覺產生密集點雲，最後測試點雲的精度，與RTK-DGPS(Real Time Kinematic-

Differential Global Positioning System) 以及使用地面控制點之全站儀測量結果比較精度，結果在DGPS的精度範圍以內。Eisenbeiss 與 Zhang (2006)在秘魯Pinchango Alto的考古遺址，進行UAS航拍的航測任務，飛機航高設定為300公尺，所建立的DSM及UAS影像所得到的地面解析度為10公分。Douterloigne等 (2010)利用UAS在有地面控制點的區域所拍攝的相片製成三維建模，並對其三維模型做精度分析，航高約為150公尺，地面解析度為5公分，而高程及平面精度約為10-20公分，而沒有地面控制點時，精度則高達約5公尺。

本研究利用嚴謹的影像處理、特徵匹配及正射鑲嵌等步驟，再搭配不同的地面控制點與飛行航線的選擇，探討UAS航測成果精度是否可達到內政部正規航測之精度要求（國土測繪中心, 2011），進而對救災、製圖等任務提供即時精確的成果。

本文研究的課題主要著重在三方面：  
1.以自製人工航測標當地面控制點、2.分析航測標不同的分佈情況、3.航線設計等對UAS航空攝影測量成果的影響。相關結果將以若干地表與樓頂檢核點來檢核UAS航測精度。藉由此研究，吾人希望能提供後續使用者在UAS航拍任務上，精度與效率權衡上的一些參考依據。

## 航測相關理論

### 1. 共線條件

利用航測技術測定環境地形座標的基本原理為共線條件(Collinearity Condition)，

是為了將像點坐標測量推估各物點在物空間坐標系中位置之過程，理論上在三維空間中，曝光點L、任意物點A與在影像上的位置(像點a)會在同一直線上(圖 1)。

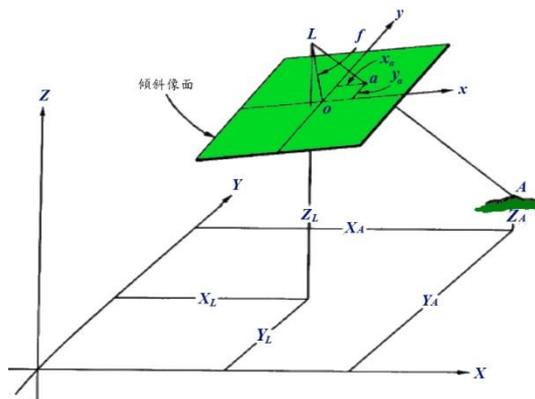


圖 1 空間關係示意圖

Figure 1. The relation between object space and image space.

共線方程式如(1)、(2)式：

$$x_a = x_0 - f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (1)$$

$$y_a = y_0 - f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (2)$$

(1)、(2)式中， $x_0$ 、 $y_0$ 為像主點(principal point)，式中是指對稱像主點(principal point of symmetric, PPS)，可使影像上不對稱的畸變差(asymmetry of the distortion)最小的點位； $f$ 為像主距(principal distance)； $X_A$ 、 $Y_A$ 、 $Z_A$ 為物空間中地物點A的坐標； $X_L$ 、 $Y_L$ 、 $Z_L$ 為物空間中曝光點L的坐標； $m_{ij}$ 為旋轉矩陣元素，姿態角由像機投影中心的旋轉角 $\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$ 構成，分別對物空間坐標系的X、Y、Z軸旋轉。(Wolf & Dewitt, 2000)

## 2. 空中三角測量

空中三角測量 (Aerial Triangulation) 為利用航測共線式，建立像空間坐標系與物空間坐標系關係之作業程序，可建立一個立體模型，並可利用模型中已知點位，對未知點位進行化算量測。Pix4Dmapper中所使用的空中三角測量中之光束法區域平差(Bundle Block Adjustment)，為航測共線式的延伸，這方法是利用已知的地面控制點值，經由通過每個曝光點位的許多光線構成之光束同時進行校正，獲得新的像片資料。

## 3. 影像匹配

影像匹配主要是藉由評估立體像對影像中相似性，判定影像之間的共軛像點，建立影像之間的幾何套疊關係。而常見的影像匹配方法則包含了：區域匹配 (Area-based matching)、特徵匹配 (Featured-based matching)、相關/符號式匹配 (Relational/Symbolic matching) (Schenk, 1999)。

航測軟體Pix4Dmapper所使用特徵匹配技術是改良自David G. Lowe (2004)提出的SIFT尺度不變特徵轉換演算法 (Küng等, 2011)，SIFT之程序為先萃取特徵點，對特徵點進行向量化描述，匹配經向量化描述之特徵點，並對匹配結果剔除錯誤匹配之特徵點，對正確的特徵點做影像間的幾何差異調整，最後完成影像拼接。故此軟體使用的特徵匹配法屬於第三類。

## 4. 航拍計畫規劃

航拍計畫根據欲測量範圍以及比例尺大小決定飛機航高、攝影機焦距、航線規

劃、航測標佈設與測量等前置作業，會影響航空攝影測量之成敗，決定經費之多寡、測量之精度 (陳雍政, 2003)。以下介紹航線規劃之前後重疊 (End Lap)、左右重疊 (Side lap)、及相片比例尺與航高等資訊。前後重疊率指以航測像片製圖，航線方向 (x方向)重疊率，一般而言需有60%以上，才會有足夠的重疊區形成有立體模型 (Stereo model) 的效果 (Wolf & Dewitt, 2000)。左右重疊為因攝影目的、像片比例尺、比例尺變化的允許範圍、航偏角、偏斜、航高變化、地形變化而引起航帶間的空隙，一般左右重疊約15%到30%。相片比例尺須確保最小的重要地物可在相片中獲得，最佳地圖比例尺的選擇取決於地圖的目的，比例尺過大不符合經濟成本，比例尺過小降低了地圖的實用性，而隨著測繪精度要求的提高，飛行高度必須減少和照片比例尺也必須增加，一旦相機焦距和所需的平均相片比例尺已確定，所要求的航高將自動按照固定的比例調整。

## 研究材料及方法

### 1. 航測任務比較

本研究共有三個UAS航拍任務(任務1、2與3)。拍攝地點皆為中興大學校區，如圖2所示，此區域具有多樣建物，可知建物高矮及外觀形狀對航測成果精度之影響，且此區域在近幾年未有大規模的地貌變化，故與過去所拍的航空照片進行比較。另外此區域各路口均有中興大學土木工程學系所設置的控制點及控制樁，利於增加執行地面測量之成果的可靠度，讓地面測量結果更加適合作為精度比較的依據。三次任

務資訊如表 1，任務1與2使用傳統單S型航線且無航測標之佈設，而任務3採用雙S型航線並佈設均勻分之航測標於測區內，三次任務所搭載的數位相機皆不同，載具皆為固定翼。



圖 2 國立中興大學校區

Figure 2. The campus of National Chung Hsing University.

表 1 中地面解析度 (GSD, Ground Sample Distance) 為使用Pix4Dmapper計算航測成果之GSD，即數值影像中單一像元涵蓋地面上的尺寸，計算式如式3，由此可知雖然三次任務之相機不同，但得到之地面解析度並無相差太多，故可做比較。

$$\frac{\text{單一像素尺寸}}{\text{焦距}} = \frac{\text{地面解析度}}{\text{航高}} \quad (3)$$

### 2. 航線設計

有別於任務1、2使用一般傳統單S型的航線設計(圖 3左)，任務3航線任務配合交叉概念設計為雙S型(圖 3右)。傳統航線設計航線方向為南北向，飛S型由西向東移動，航線間距較近，左右重疊率較高，此種航線設計較常見；任務3航拍任務航線則為先東西向飛S型，再轉向飛南北向S型，等於飛了兩個S型故稱為雙S型航線，拍攝時間較長，航線間距較遠，左右重疊率較低。

蘇柏軒、蕭宇伸：  
以無人飛機系統(UAS)獲取國立中興大學校區三維地形之精度分析

表 1 三次航拍任務資訊比較

Table 1.The information of three aerial missions.

任務	1	2	3
UAV型號	Avian UAS	SV-1000	Avian UAS
相機型號	Panasonic DMC-FT2	Canon PowerShot S100	Samsung NX200
航線設計	單S型	單S型	雙S型
航高	約340m	約325m	約420m
拍攝時間	2011.11	2013.3	2013.6
拍攝起時	AM 10:19	PM 4:25	AM 11:00
航測標	無	無	有
成果GSD	8.03公分	9.27公分	9.56公分
前後重疊	73%~82%	69%~77%	80%~90%
左右重疊	約53%	約61%	約48%
像片比例	約1:12100	約1:13500	約1:17500

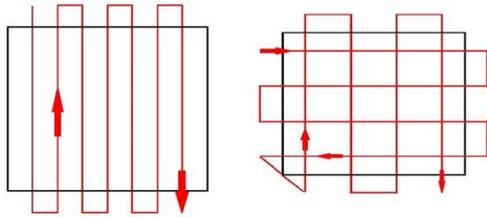


圖 3 航線設計示意圖，左圖與右圖分別表示單 S 型與雙 S 型航線。

Figure 3. The designs of flight lines. Left: Single-S type; right: Double-S type.

### 3. 研究使用器材

#### (1) 固定翼 UAS

本研究三次任務所使用的UAS皆為固定翼，而任務3所使用的UAS為碳基公司的Avian UAS(圖 4右)，與任務1所使用的載具相同，而任務2則使用SV-1000(圖 4左)。Avian與SV-1000的詳細規格如表 2與表 3所示。



圖 4 UAS 示意圖，左為 SV-1000，右為 Avian UAS。

Figure 4. The pictures of UAS. Left: SV-1000; right: Avian UAS.

表 2 Avian 規格

Table 2.The specification of Avian.

Avian 規格			
翼展	1.6 m	有效飛行高度	海拔3200 m
高度	1.05 m	一般工作高度	150 ~ 610 m 地面相對高度
長度	0.5 m	最大滯空時間	90 min
最大起飛重量	4.3 kg	最遠傳輸距離	15 km

表 3 SV-1000A 規格

Table 3. The specification of SV-1000A.

SV-1000A 規格	
翼展	1m
全備重量	全備重量: 1100—1300克
一般工作高度	300m以上地面相對高度
最大滯空時間	30—40分鐘。
最遠傳輸距離	至少1.5km以上

兩種 UAS 上都具備全球定位系統 (GPS, Global Positioning System) 及慣性測量單元 (IMU, Inertial measurement unit) 這兩個系統。藉由GPS與IMU，可得到航測軟體所需要的外方位元素，包括相機在拍照時的透視中心在空間坐標系的坐標( $X_L$ ,  $Y_L$ ,  $Z_L$ )以及三個方向的旋轉姿態( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ )。除了這兩個重要的系統外，UAS上還有其他系統以利於對地面控制平台通訊，讓UAS能飛在正確的航線上並能在正確的時間拍照。

(2) 數位相機規格

三次航拍任務所使用各相機如表 4至表 6中，其中任務3為Samsung NX200可換鏡頭，故焦距與光圈範圍要試鏡頭而定。

表 4 Panasonic DMC-FT2 規格  
Table 4. The specification of Panasonic DMC-FT2.

型號	Panasonic DMC-FT2
最大解像度:	4320 x 3240
135 焦距:	28 mm 至 128 mm
光圈範圍:	F3.3- F5.9
快門速度:	1/1300 至 60 秒
ISO 感光值:	Auto / 100 / 200 / 400 / 800 / 1600 - 6400
實體圖	

表 5 Canon PowerShot S100 規格  
Table 5. The specification of Canon PowerShot S100

型號	Canon PowerShot S100
最大解像度:	4000 x 3000
135 焦距:	24 mm 至 120 mm
光圈範圍:	F2- F5.9
快門速度:	1/2000 至 15 秒
ISO 感光值:	Auto / 80/100/125/160/ 200/250/320/400/500/ 640/800/1000/1250/1600/2000/2500/ 3200/4000/5000/ 6400
實體圖	

表 6 Samsung NX200 規格  
Table 6. The specification of Samsung NX200 NX200

型號	Samsung NX200
最大解像度:	5472 x 3648
135 焦距:	視鏡頭而定
光圈範圍:	視鏡頭而定
快門速度:	1/4000 至 30 秒
ISO 感光值:	100 - 12800

實體圖



4. 特徵點與航測標點位之地面測量

本研究區域內共有三種點位，分別為(1)特徵地面控制點(2) 航測標控制點(3) 特徵檢測點。在遙測影像校正中，地面控制點(Ground Control Point, GCP)的大地座標，可以作為影像幾何校正時，轉換為地圖座標系統的參考點位座標 (李良輝, 1991)。換句話說，航空攝影測量地面控制的目的是用以決定航測像片上像點的地面位置。

(1) 特徵地面控制點

為了解決在航拍相片上找不到地面控制樁的問題，因此採取影像中可辨識之特徵點位或航測標取代作為地面控制點，特徵點位選擇原則如下：1.顏色分明之交界處的直角：如斑馬線邊。2.不被障礙物遮蔽：以相機的角度俯視，不被大樹等障礙物者。3.不可太接近大樓：接近大樓會導致可拍攝到點位的角度過小。4.不被陰影覆蓋：被陰影覆蓋會造成圖像解析力變差，易造成點位之誤判，更嚴重者則會無法判釋。5.不易移動之地物：若容易被天然或人為因素更動位置，難保在過程中特徵物沒有移位。6.地勢平坦：地貌局部凸起或凹陷，短距離間高程瞬變，如花台、階梯等，都容易造成當地高程的誤判。

依據以上原則，挑選出了十五個特徵點做為特徵控制點，分布情形如圖 5上綠點記號之分布。

## (2) 航測標控制點

參考Wu等 (2013)之航測標規格進行人工佈標，將白色帆布上印上黑色圖案如「井」狀，帆布長寬皆為210公分，外圍是白色5公分邊框，黑色線條寬度為25公分，白色格子長寬皆為50公分，製成航測標(如圖 6)，並在帆布正中央開一個直徑2公分的小洞，方便對準及標記航測標點位。

本研究佈置航測標之目的在於研究當地表特徵清楚足以做為地面控制點時，佈設航測標是否還有具有提升精度之成

效。故在執行任務3之前，在地面佈置15個航測標，分佈與特徵控制點相似，如

圖 7的綠色十字標記。

## (3) 特徵檢測點

遵循上段找尋影像控制點之原則，選擇了23個檢測點，其中12點為地表檢測點(圖 8紅色點位)，編號以G開頭；另外11點在建築物的頂樓上，(圖 8黃色點位)，編號以T開頭。

本研究模擬了一個待測區域之邊界(圖 8藍色框)，若比照圖 5或

圖 7可以發現，各有四個地面控制點在地表檢測點(紅色)所圍成的區域裡面，其他地面控制點都在外面，進行精度比較時，可以推知在地面控制點分佈不同的情況下，對於一個待測區塊的邊界造成的影響程度。

本次研究所使用的全站儀機種為Nikon光波測距經緯儀DTM-30系列的DTM-332，利用全站儀執行地面測量後，全站儀可直接計算出上述各點位之精確座標，座標將用於航測控制或檢核之用，各

點位的座標均由最近的控制樁引測而得。



圖 5 特徵地面控制點分佈示意圖

Figure 5. Distribution of feature ground control points.

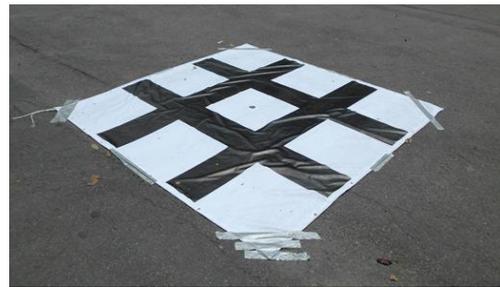


圖 6 人工航測標實佈圖

Figure 6. An artificial aerial photogrammetric target.



圖 7 航測標分佈示意圖

Figure 7. Distribution of all artificial photogrammetric targets.



圖 8 待測測區邊界示意圖

Figure 8. The distribution of ground (red) and building (yellow) check points, and the boundary of test area (blue).

#### 5. Pix4Dmapper內業計算

航測軟體Pix4Dmapper運作流程步驟包含 (Strecha, et al., 2012)：(1)進行特徵萃取以及匹配；(2)執行空三平差，重新計算出相機確切資料；(3)利用重算後之相機資料，以前方交會法計算匹配點之三維坐標，形成三維點雲；(4)將匹配點內插形成不規則三角網格，使用密集匹配技術 (Dense Matching) 增加三角網格之空間解析力，獲得數值表面模型 (DSM, Digital Surface Model)；(5)在DSM上投影圖像，製作真實正射鑲嵌影像 (True Orthoimage)。圖9為成果之三維點雲圖。



圖 9 加密三維點雲圖

Figure 9. Dense 3D point cloud data.

#### 6. 精度檢核方法

本研究之精度分析是用地面測量結果之三維座標為基準，將各任務使用航測軟體產出之三維點雲，在航測軟體的點雲介面中經由人工判釋尋找檢測點，研究該檢測點與地面測量結果的差異比較獲得平面及高程精度，再討論誤差來源。使用三種指標，第一種為平均誤差；第二種是標準偏差 (Standard Deviation)，僅反映各誤差值之離散程度，與平均誤差大小無關，故屬於相對誤差指標；第三種均方根誤差 (RMSE)，除了反映誤差的離散程度，亦會反映平均誤差的大小，故屬於絕對誤差指標。

#### 7. 研究結果種類

本文依研究目的不同，將研究結果分為兩類比較。比較一為比較有無控制點差異、使用特徵地面控制點與使用航測標地面控制點差異、不同航線設計差異，各編號由任務及控制點使用來決定，前號為任務編號，後號控制點使用狀況，1為無使用控制點，2為使用特徵控制點，3為使用航測標。各任務編號如表 7 所示。比較二為

研究控制點不同分布對精度的影響，如表 8 所示。

表 7 各任務(比較一)編號

Table 7. The division of cases for analysis 1

任務		1	2	3
編號	無控制點	任務1-1	任務2-1	任務3-1
	特徵控制點	任務1-2	任務2-2	任務3-2
	航測標	X	X	任務3-3

表 8 各任務(比較二)編號

Table 8. The division of cases for analysis 2

編號	任務	控制點分布
3-3	3	十五點航測標
3-O	3	外側五點航測標
3-I	3	內側四點航測標
3-N	3	北方三點航測標
3-S	3	南方四點航測標
3-E	3	東方四點航測標
3-W	3	西方三點航測標

## 研究結果與精度分析

本章節為本論文之研究結果與精度分析，根據內政部正規航測之規定（國土測繪中心，2011），正規航測平面之均方根誤差（RMSE）不能大於25公分，方能用於製圖之用；在高程精度要求方面，如(4)式訂定誤差允許值 $\sigma$ 。

$$\sigma = a+b+c \cdot k \quad (4)$$

其中a為常數(a=0.3 公尺)；b參數為地表坡度分級，c參數為植被覆蓋密度分級，係數k為植被平均高度（公尺）。本文研究區域為中興大學校區地形平坦，坡度均為一級坡，但遍布教學大樓，故本研究地表檢測點位置須滿足一級坡規範，b參數代入值為0，無植被覆蓋c係數為0，地表之高程誤差允許值為30公分，樓頂檢測點則滿足六級坡(坡度>175%)規範，故b參數為6公尺，c係數為0，樓頂高程誤差允許值為6.3

公尺。

### 1. 平面精度分析

#### (1) 有無控制點

地表檢測點之誤差結果如表 9 所示。無控制點的情況下，平均誤差皆達5公尺以上，RMSE皆大於597公分，加入控制點之後RMSE降至32公分以下。任務3-2、3-3不論是平均誤差或標準偏差，皆優於任務1-2、2-2，顯示雙S型航線成果精度較單S型航線高。比較使用特徵控制點與航測標控制點時可發現3-2及3-3的精度相近，這代表特徵控制點可用航測標取代。

表 10為樓頂檢測點之誤差，無控制點使用時，RMSE皆在4.5公尺以上，加入控制點平均誤差則降至55公分以下。任務3-2及3-3精度皆優於任務2-2及1-2，RMSE下降10到15公分，雙S型航線成果精度較單S型高。比較使用特徵控制點(3-2)與航測標控制點(3-3)，航測標的結果較優，推測原因是航測標之點位佈點較自由，使控制點容易被影像捕捉，控制點使用率較佳。

#### (2) 不同控制點分布

比較任務3在不同控制點分佈情況下，平面精度結果的影響，表 11為地表檢測點誤差結果，表 12為樓頂檢測點誤差結果。在表 11中各任務之RMSE在16公分到22公分左右，皆已達內政部之標準(平面精度RMSE<25公分)，若使用全控制點(任務3-3)，RMSE為17.1公分，與任務3-0、3-1比精度未比較高。四種在單側設置控制點的任務(3-N、3-S、3-E、3-W)均顯示，其平均誤差相較結果顯示差異不大，標準偏差皆不超過11公分。

在樓頂檢測點誤差分析部分，各任務 RMSE 皆未達內政部標準。單就此表格之誤差結果來看，任務 3-E 的平均誤差及標準偏差比其他都小，推測原因為樓頂檢測點分布在東半部較多，受控制點控制較多，故相較於其他任務精度較高。任務 3-O 及 3-I 的平均誤差與任務 3-3 的平均誤差相近，3-O 的標準偏差與 3-3 的標準誤差相比，低了約 1.5 公分，任務 3-3 的 RMSE 比 3-I 及 3-O

少 2~3 公分。

綜合地表及樓頂檢測點結果，使用較多控制點未能明確提升 UAS 航測精度，在單側設置控制點來看，地表及樓頂檢測點最大誤差分別為 43.3 公分以及 88.3 公分。

本文將各任務的二維平面誤差大小及移位方向繪製成圖。由於無使用控制點(任務 1-1、2-1、3-1)的誤差都過大，故省略。圖 10 (a) 為任務 3-3 各檢核點(包括地表與

表 9 比較一地表檢測點平面誤差(單位：公分)

Table 9. The accuracy validated by ground check points at horizontal component.(unit:cm)  
(analysis 1)

任務編號	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	3-3
平均誤差	555.7	1221.8	692.9	24.3	26.3	16.5	14.2
標準偏差	227.7	36.8	101.8	20.8	14.2	8.1	9.9
RMSE	597.0	1222.3	699.7	31.4	29.6	18.2	17.1

表 10 比較一樓頂檢測點平面誤差 (單位：公分)

Table 10. The accuracy validated by building check points at horizontal component. (unit:cm)  
(analysis 1)

任務編號	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	3-3
平均誤差	457.6	1182.4	706.6	50.4	43.7	36.2	31.3
標準偏差	218.6	41.2	105.3	26.3	29.4	18.4	18.0
RMSE	481.4	1132.7	683.3	53.9	49.7	38.5	34.2

表 11 比較二地表檢測點平面誤差 (單位：公分)

Table 11. The accuracy validated by ground check points at horizontal component. (unit:cm)  
(analysis 2)

任務編號	3-3	3-I	3-O	3-E	3-S	3-N	3-W
平均誤差	14.2	13.7	13.9	14.6	18.9	15.8	19.8
標準偏差	9.9	10.2	8.8	7.9	9.2	8.6	10.7
RMSE	17.1	16.8	16.3	16.5	20.8	17.8	22.2

表 12 比較二樓頂檢測點平面誤差 (單位：公分)

Table 12. The accuracy validated by building check points at horizontal component. (unit:cm)  
(analysis 2)

任務編號	3-3	3-I	3-O	3-E	3-S	3-N	3-W
平均誤差	31.3	34.5	34.2	31.1	36.4	35.1	56.5
標準偏差	18.0	18.2	16.5	9.9	21.0	16.1	18.0
RMSE	34.2	37.0	36.1	31.1	39.8	36.6	56.5

頂樓)的誤差方向與大小圖，圖座標使用 TWD97座標系統，底圖為各任務所得到的全測區20公分 DSM，黑色十字為地面控制點點位，黑色箭頭與灰色箭頭分別為地表與樓頂檢測點移位方向及大小。

從圖 10 (a)中可看出，地表檢測點的誤差移位屬於隨機，且誤差量都不大，樓頂檢測點的誤差移位則明顯皆往建物內部移動，原因為使用航空攝影測量時，較難精確測出垂直的地形。

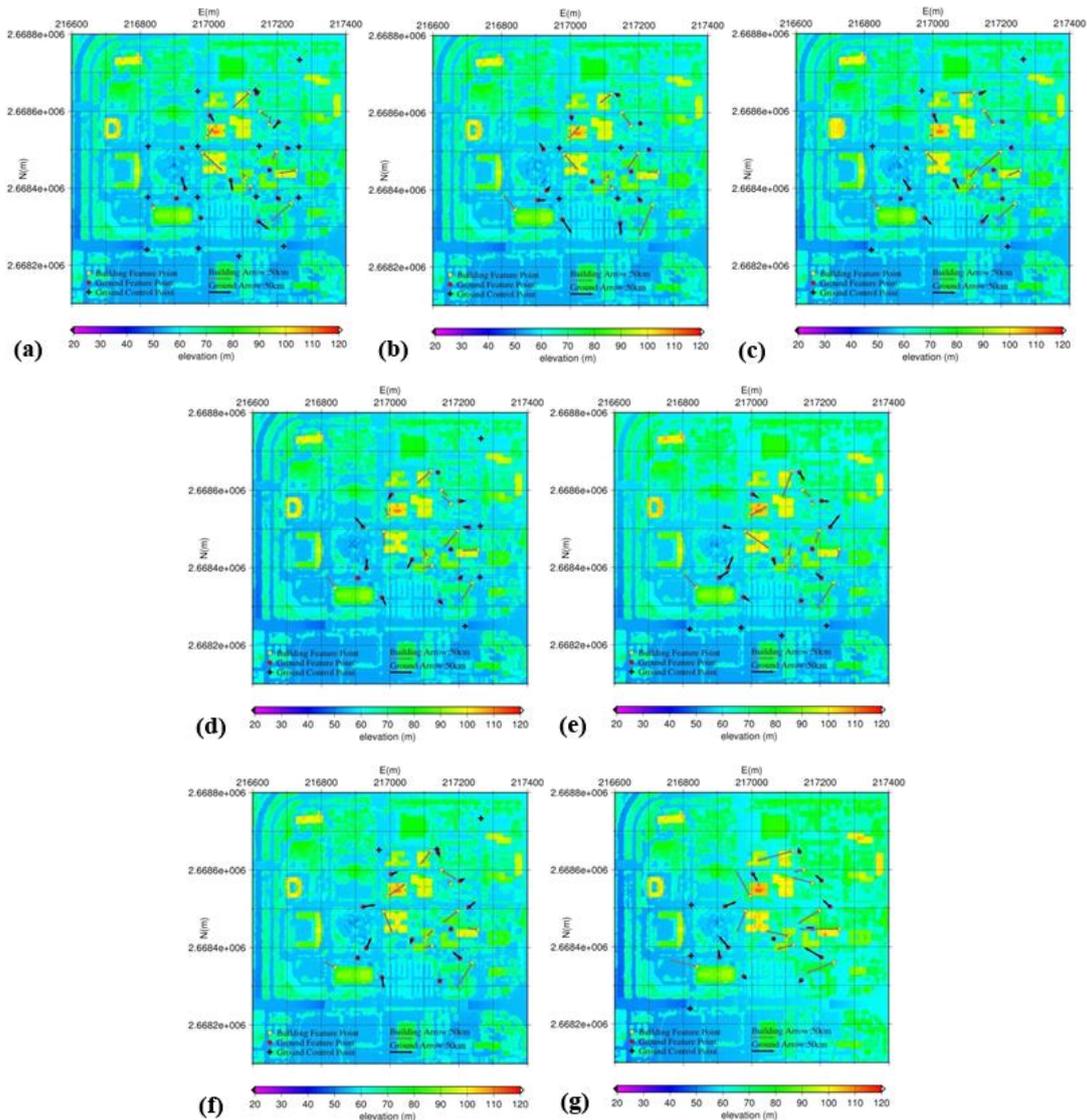


圖 10 用檢測點檢核誤差大小與方向圖(a)任務 3-3(b)任務 3-I(c)任務 3-O(d)任務 3-E(e)任務 3-S(f)任務 3-N(g)任務 3-W

Figure 10. The amounts and directions of the horizontal errors at (a) Case 3-3(b) Case 3-I(c) Case 3-O(d) Case 3-E(e) Case 3-S(f) Case 3-N(g) Case 3-W

任務3-I為模擬若僅在測區內部設置4點地面控制點時，如圖 10(b)黑色十字點位對UAS精度的影響，與任務3-3相比，大部分地表檢測點移位量較少，但在下方兩個地表檢測點(G05、G06)往外移位量較多，在樓頂檢測點方面也有向外移位的情形。任務3-I中在四點地面控制點內的樓頂檢測點誤差與任務3-3相比結果一致，但在四點地面控制點以外的誤差卻明顯變大。樓頂檢測點誤差與3-3比誤差方向除了原本的向建物內部外，與下方兩個地表檢測點相似，多了一個向外移位的分量，可視為三維點雲向外拉開或建物有向外傾斜的現象。

任務3-O為模擬若測區內部無法進入，僅能在外部設置地面控制點時對誤差的影響(如圖 10(c))，地表檢測點方面，誤差結果與任務3-3的誤差方向及大小都很接近，但略優於任務3-3。樓頂檢測點方面，相對於任務3-3RMSE增加2公分，誤差移位方向與3-3一致。在平面誤差方面，任務3-O與3-3的誤差非常接近，且平均誤差及標準偏差又都在可接受範圍內，故在控制點效率上的考量，任務3-O為建議的選擇。

3-E、3-S、3-N與3-W等任務的平面誤差移位方向與大小如圖 10(d)、(e)、(f)、(g)。上述四種任務是模擬當只能在測區的

表 13所示，不使用地面控制點的情況下，任務1-1、2-1與3-1的RMSE分別為453.1公分、520.5公分與569.0公分，遠高過高程精度標準30公分。比較使用地面控制點的任務，任務3-2在RMSE方面明顯小於任務1-2與2-2，雙S型航線所得成果無論是平

一側設置地面控制點時的情況。在圖 10(d)中，可以看出所有檢測點誤差方向皆往西移動。在圖 10(e)中，可看出接近控制點處之檢測點，誤差極小，而在北方的檢測點移位向南移動，這代表此任務產製的三維點雲在較北方有明顯偏移量。在圖 10(f)中任務3-N只有三點控制點，且在西北方無控制點，導致地表檢測點誤差皆往東北方(控制點方向)移位，但樓頂檢測點移位就較為不顯著，移位方向主要向建物內部。圖 10(g)任務3-W誤差明顯較大，且誤差移位方向皆向西，尤其樓頂檢測點的向西移位更是明顯。

綜合來說，吾人建議採用任務3-O的方式佈置控制點，與任務3-3相比，成果平面精度相近、控制點佈置較少且不用進入測區佈點，使用控制點效率相對較高；與任務3-I及在單側設置控制點(任務3-E、3-S、3-N與3-W)相比，任務3-O誤差較不會因測區變大而增加明顯誤差的趨勢。

## 2. 高程精度分析

### (1) 有無控制點

利用檢測點檢核任務1、2與3的高程誤差結果如制點(任務1-1、2-1與3-1)平均誤差皆在4.7公尺以上，RMSE皆小於6.3公尺，達到內政部高程精度標準。若三次任務使用特徵面或高程精度都比單S型為佳。比較使用特徵控制點(任務3-2)及航測標(任務3-3)的結果，可發現3-3的RMSE的10.9公分明顯的小於3-2的17.7公分，皆達到內政部標準，使用航測標高程精度明顯較高，故使用航測標優於使用特徵地面控制點，推測精度

較高原因與平面誤差原因相同。

公尺以上，RMSE皆小於6.3公尺，達到內政部高程精度標準。若三次任務使用特徵

在樓頂檢測點方面(表 14)，不使用控制點(任務1-1、2-1與3-1)平均誤差皆在4.7

表 13 比較一地表檢測點高程誤差(單位：公分)

Table 13.The accuracy validated by ground check points at vertical component. (unit:cm)  
(analysis 1)

任務編號	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	3-3
平均誤差	446.9	498.7	567.4	36.5	18.7	14.3	9.3
標準偏差	78.3	155.8	44.5	52.4	25.6	16.1	10.3
RMSE	453.1	520.5	569.0	56.1	25.0	17.7	10.9

表 14 比較一樓頂檢測點高程誤差(單位：公分)

Table 14.The accuracy validated by building check points at vertical component.(unit:cm)(analysis 1)

任務編號	1-1	2-1	3-1	1-2	2-2	3-2	3-3
平均誤差	472.2	495.0	627.4	45.8	65.4	50.0	49.2
標準偏差	61.7	191.1	80.7	50.8	60.5	58.0	44.4
RMSE	455.6	505.0	605.1	51.9	67.7	58.4	53.7

地面控制點(任務1-2、2-2與3-2)，則標準偏差降至50~60公分左右，RMSE為50~70公分。比較使用特徵控制點(任務3-2)與航測標(任務3-2)任務，RMSE值相近，航測標標準偏差比特徵控制點改善13.6公分。

## (2) 不同控制點分布

表 15為各任務地表檢測點的高程誤差，其中任務3-W的誤差最大，任務3-E、3-S、3-W的RMSE分別為34.6、101.1、297.7公分，超過內政部標準，任務3-S及3-W中，每一點高程誤差(地表檢測點位置)皆為正值，表示此二任務檢測點有向上移位的情況。任務3-N也同樣情況，但RMSE為28.7公分在可容許誤差範圍內。任務3-E則相反，

表 15中地表檢測點的誤差綜合來看，任務3-S與3-W各檢測點皆有明顯的正值誤差，可推測出有航測結果有明顯變型。3-N

單點誤差值大部分為負值，單點誤差最大值為-57.9公分，表示此任務在地表檢測點位置上有向下移位的情形。在3-3與3-0方面，地表檢測點所檢核的高程精度相近，皆優於3-1。以地表檢核點G01(約位於測區中央)為例，其位置較靠近任務3-I而較遠離任務3-0中的控制點，但檢核結果顯示，G01的誤差在任務3-I中(誤差值7.3公分)明顯高於任務3-0中(誤差值4.9公分)。

在利用樓頂檢測點檢核的高程誤差上(如表 16)，全部任務的標準偏差皆大於40公分，RMSE皆小於6.3公尺。任務3-S及3-W的成果平均誤差分別為139.1公分及361.2公分，遠大於其他控制點分布情況，與不宜使用。

除了T09(-15.6公分)以外，其他樓頂檢測點誤差皆為正值，與3-S及3-W結果一致顯示樓頂特徵點皆為向上移位。任務3-I結果標

準偏差為62.40公分，RMSE為64.1公分，精度與任務3-3及3-0差。任務3-3與3-0的標準RMSE為53.7公分及52.6公分，精度相似。

與上一節結果相近，吾人建議採用任務3-0的方式佈置控制點，與任務3-3相比，

高程精度用兩種檢測點檢核UAS結果，3-0的RMSE優於3-3，故使用控制點效率相對較高；單側設置控制點(任務3-E、3-S、3-N與3-W)，皆有檢測點向上移位或向下移位的趨勢，且各點垂直移位大小不一致，故不宜使用。

表 15 比較二地表檢測點高程誤差(單位：公分)

Table 15. The accuracy validated by ground check points at vertical component. (unit:cm)  
(analysis 2)

任務編號	3-3	3-I	3-O	3-E	3-S	3-N	3-W
平均誤差	9.3	14.6	9.0	27.9	92.3	24.8	269.3
標準偏差	10.3	18.2	10.4	22.9	43.2	16.1	132.5
RMSE	10.9	19.1	10.2	34.6	101.1	28.7	297.7

表 16 比較二樓頂檢測點高程誤差(單位：公分)

Table 16. The accuracy validated by building check points at vertical component. (unit:cm)  
(analysis 2)

任務編號	3-3	3-I	3-O	3-E	3-S	3-N	3-W
平均誤差	36.8	56.4	50.0	48.2	139.1	59.0	361.2
標準偏差	44.4	62.4	51.0	53.8	59.6	56.2	167.9
RMSE	53.7	64.1	52.6	53.1	143.9	74.3	378.2

若分析圖 10(d)(任務3-E) 底圖DSM之高程誤差變化，可發現DSM有向西方下沉的情況。將高程誤差與E座標的關係製成圖，則如圖 11 (a)所示。藍色點為地表特徵檢測點，橘色則為樓頂檢測點，藍色線則為全檢測點的線性回歸線，斜率為0.2632，表示每往西1公尺，增加-0.26公分的誤差，但相關係數為0.6845，僅為中度線性相關，故無法判定E座標及高程誤差的關聯性。

任務3-S從圖 10(e)底圖中DSM顏色可發現越北方高程越有抬高的現象，在北方的檢測點移位向南移動，像北方有翹起的感覺。N座標與高程誤差關係如圖 11(b)。線性回歸線斜率為0.4409，表示N值每增加1公尺，就會增加0.44公分的誤

差，相關係數為0.8，屬高度線性相關，故可推測若測區範圍變大後，抬升現象增大的可能性是偏高的。

任務3-N的N座標與高程誤差關係如圖 11(c)，相關係數為-0.2518，低度線性負相關，故無法判定趨勢。

任務3-W的E座標與高程誤差關係如圖 11(d)，斜率為1.2272，表示E座標每增加1公尺，高程誤差就會增加1.23公分，相關係數高達為0.9，故可推測若測區範圍變大後，抬升現象增大的可能性是偏高的。

## 結論

- 1.本研究三次UAS航拍任務所拍攝之

航拍相片，均使用航測軟體Pix4Dmapper進行處理，可得知航高約在300公尺到400公尺時，地面解析度可達8公分到10公分。

2.用檢測點檢核精度，若不使用控制點，則平面誤差RMSE高達約6公尺以上，高程誤差也高達4.5公尺以上，故在執行航測任務時加入控制點有絕對必要；傳統單S型航線(任務1與2)和雙S型航線(任務3)比較發現，平面誤差雙S型RMSE比單S型降低10~15公分，高程誤差則無明確改善，兩者相比RMSE降低量在-7~40公分之間，顯示使用雙S型航線對提升UAS航測精度有益；使用航測標控制較使用特徵點控制之結果精度好，原因為航測標之點位佈點較自由，使控制點容易被影像捕捉，控制點使用較佳；使用十五個控制點任務(任務3-3)的誤差移位與僅使用外側五點控制點任務(任務3-0)的精度差異很小。

3.當地面控制點僅設置在測區之一側時(任務3-N、3-S、3-E與3-W)，檢核點平面誤差會向控制點方向靠近(如任務3-N、3-S、3-E)，或向控制點方向遠離(如任務3-E)；在DSM地形方面，會出現向地面控制點壟起(如任務3-N、3-S和3-E)，或是向地面控制點下降(如任務3-E)。

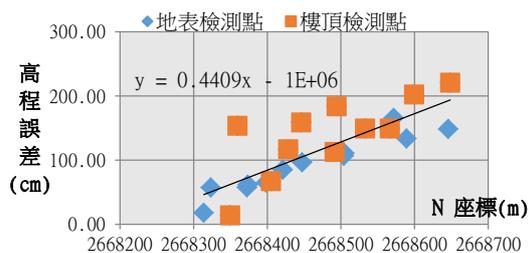
4.在地表檢測點檢核方面，平面誤差除了任務1、2、3-1外，皆符合內政部的精度規範；高程誤差除了任務1-1、2-1、3-1、1-2、3-E、3-S與3-W以外，其他皆達到精度標準；在樓頂檢測點檢核方面，平面誤差皆未符合內政部精度規範；高程誤差皆達到精度標準。

5.任務3-0精度及控制點使用率最佳，平面誤差地表檢測點RMSE為16.3公分，樓頂檢測點RMSE為35.1公分；高程誤差地表檢測點RMSE為10.2公分，樓頂檢測點RMSE為52.6公分，故建議採用任務3-0的方式佈置控制點，使用控制點效率相對較高。

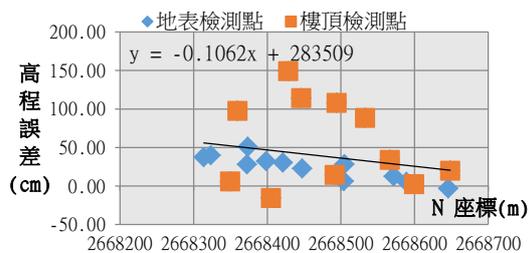
(a)任務3-E



(b)任務3-S



(c)任務3-N



(d)任務3-W

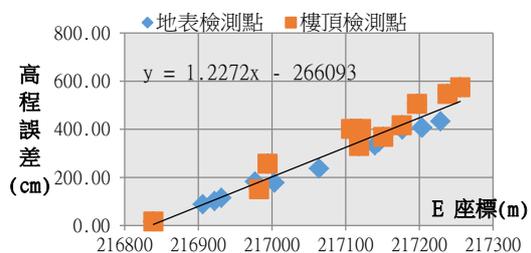


圖 11 高程誤差與大地座標關係圖(a)任務 3-E 與 E 座標(d)任務 3-S 與 N 座標(d)任務 3-N 與 N 座標(d)任務 3-W 與 E 座標，藍色點為地表特徵檢測點，橘色為樓頂檢測點。

Figure 11. The relationship between vertical errors and geodetic coordinates(a)Case 3-E and E-W going direction (b)Case 3-S and N-S going direction (c)Case 3-N and N-S going direction (d)Case 3-W and E-W going direction. The blue and orange dots mean ground and building check points, respectively.

### 參考文獻

1. 李良輝(1991)，「計算視覺方法於 SPOT 衛星影像之幾何特性分析」，國立中央大學大氣物理研究所博士論文。
2. 國土測繪中心(2011)，「建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊」。
3. 陳雍政(2003)，「航空攝影測量於河川管理之實務應用」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
4. 蕭震洋、謝寶珊、冀樹勇(2011)，「應用非常規攝影量測評估國道 3 號 3.1 公里崩塌事件之土方量」，中華水土保持學報 42(2)，pp. 120-130。
5. 謝幸宜(2009)，「以自率光束法提升四旋翼 UAV 航拍影像之定位精度」，國立政治大學地政學系碩士論文。
6. 龔健彬、史天元(2000)，「Kodak DCS210 數位相機量測特性之探討」，航測及遙測學刊 5(4)，pp. 39-54。
7. Douterloigne K., Gautama S. and Philips W., 2010. On the accuracy of 3D landscapes from UAV image data. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, IEEE, pp. 589-592.
8. Eisenbeiss H. and Zhang L., 2006. Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5, pp. 90-96.
9. Harwin S. and Lucieer A., 2012. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. Remote Sensing, 4(6), pp. 1573-1599.
10. Küng O., Strecha C., Beyeler A., Zufferey J.C., Floreano D., Fua P. and Gervais F., 2011. The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial. Zurich, Switzerland, pp. 14-16.
11. Lowe D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International journal of computer vision, 60(2), pp. 91-110.
12. Schenk T., 1999. Digital Photogrammetry. TerraScience: Laurelville, OH.
13. Strecha C., Küng O. and Fua P., 2012. Automatic mapping from ultra-light uav imagery.
14. Wolf P. and Dewitt B., 2000. Elements of photogrammetry: with applications

- in GIS, Vol. 3. New York:  
McGraw-Hill.
15. Wu C. T., Hsiao C. Y. and Hsieh P. S.,  
2013. Using UAV and VBS-RTK for  
Rapid Reconstruction of  
En-vironmental 3D Elevation Data of  
the Typhoon Morakot Disaster Area  
and Disaster Scale Assessment. *Journal  
of Chinese Soil and Water  
Conservation*, 44(1), pp. 23-33.
- 

103 年 08 月 07 日收稿

103 年 08 月 27 日修改

103 年 08 月 28 日接受

水土保持學報 47 (2): 1349–1366 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (2): 1349–1366 (2015)