

UAV 航拍技術應用於河道變遷土砂監測 和山區地形製圖之可行性分析

張歲^[1] 蕭宇伸^{[1]*} 張榮傑^{[1][2]}

摘要 本研究利用無人飛行載具搭載相機，配合高精度之航測控制點，於南投縣貓羅溪和惠蓀林場進行空拍，以影像處理軟體 Pix4Dmapper 建立該區域之正射镶嵌影像與數值表面模型。本研究採用旋翼機獲取貓羅溪空拍結果後，計算一年期間（2015 年 4 月至 2016 年 4 月）之泥沙變化量，並利用地面檢核點分析平面與垂直方向之誤差。惠蓀林場則使用定翼機進行空拍，配合不同分布情形之地面控制點進行平面與垂直方向之誤差分析。

本研究主要相關結果如下：(1) 在使用四旋翼 UAV 搭載 GoPro 錄影式相機建立之河道數值表面模型在 X 方向精度為 9.2 公分、Y 方向精度為 5.3 公分、Z 方向精度為 4.8 公分；(2) 在使用六旋翼 UAV 搭載 Sony NEX7 相機建立之河道 DSM 在 X 方向精度為 3 公分、Y 方向精度為 4.1 公分、Z 方向精度為 1.6 公分；(3) 利用前後期數值表面模型計算河道泥沙變化量為 226,971.49 立方公尺，每 1 立方公尺估計量之內部精度為 0.202 立方公尺；(4) 在惠蓀林場方面，將控制點均勻分布之地形精度明顯優於只將控制點分布在地勢較低之區域。

關鍵字：無人飛行載具、數值地形模型、精度分析。

Feasibility Analyses of River Sediment Estimation and Mountain Mapping by UAV Techniques

Wei Chang^[1] Yu-Shen Hsiao^{[1]*} Jung-Chieh Chang^{[1][2]}

ABSTRACT We use unmanned aerial vehicles (UAV) with high-accuracy control points to obtain orthophoto mosaics and digital surface models (DSM) by Pix4Dmapper in parts of the Mao-Luo stream and Hui-Sun forestry areas, Nantou County. Two different rotor UAVs were used to carry out the missions in the Mao-Luo stream area. The results were used to estimate the river channel sediment variation from April 2015 to April 2016, and were also evaluated with ground check points with both horizontal and vertical components. A fixed-wing UAV was used for the mission in the Hui-Sun forestry area. The accuracies of the results using different distributions of control points were also computed and analyzed with both horizontal and vertical components.

The main results of this study include: (1) The DSM derived from the 4 rotor UAV with a GoPro yields the accuracies of 9.2, 5.3, 4.8 cm at directions of X, Y, and Z; (2) The DSM derived from the 6 rotor UAV with a Sony NEX7 camera yields the accuracies of 3.0, 4.1, 1.6 cm at directions of X, Y, and Z; (3) The river channel sediment variation from April 2015 to April 2016 is 225,685.61 m³, and the internal accuracy for 1 m³ earthwork reaches 0.202 m³; (4) In Hui-Sun forestry area, the accuracy of UAV-derived DSM using control points distributed averagely is obviously better than that using control points distributed over low elevations only.

Key Words: UAV, DSM, accuracy analysis.

一、前言

臺灣地區多為高山，此區域地勢陡峭且交通不易到達，若發生災害，不易讓調查搜救等相關人員深入災區，瞭解災害發生情形及進行搶救，於此緊急情況下，為能有效提供即時災情資訊，可利用無人空中載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

技術獲得基本圖資，甚至進一步產製正射影像及地表三維模型，以提供有關單位正確決策和災情搶救之用 (<http://www.coa.gov.tw/ws.php?id=2501511>)。UAV 除了能即時蒐集地表資訊外，更可應用於軍事國防、山坡地監測管理，土砂災害評估、環境保護管理以及河道變遷之監測。除此之外，UAV 技術亦廣泛應用於水壩監視、管道檢查、基礎設施維護、水災地區調

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 經濟部水利署第三河川局

Third River Management Office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taichung, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

查、消防應用、地形監視與火山觀察等研究課題 (Coppa et al, 2008)。然而上述各領域之研究，大多需要一定等級之 UAV 量測精度，方可獲得良好的研究成果。在 UAV 獲取影像精度分析上，前人已在這領域研究許久，例如利用 UAV 產製北二高崩塌地之救災圖資 (施錦揮等, 2010)、以 UAV 影像建製數值表面模型 (Digital Surface Model, DSM) 及精度分析 (申承翰, 2013)、在神木村地區使用 UAV 進行崩塌地潛勢區域分析 (莊大賢, 2015)、以 UAV 生成高精度 DSM 觀測河道變遷之研究 (陳修德, 2014; 白絜成等, 2015) 等。蘇柏軒 (2014) 以 UAV 於中興大學進行航空攝影發現，若地面控制點布設位置得宜，部分區域相對精度可達 10 公分以內；林秋芬 (2015) 以 UAV 建立三維模型進行精度評估，可發現和光達 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 所建置之 DSM 相比，高程方面約有 20 公分之差距；白絜成等 (2015) 利用 UAV 掛載消費型攝影機，針對旗山溪進行河道變遷之研究，發現產製之地形在 X、Y 與 Z 方向之相對精度分別為 7.5 公分、4.2 公分與 12.4 公分，其結果符合國土測繪中心一千分之一製圖平面精度須小於 25 公分 (<http://bmap.nlsc.gov.tw/files/topographic/CheckRequire.pdf>, 第 4-10 頁)，高程精度須小於 30 公分 (<http://bmap.nlsc.gov.tw/files/topographic/OperatingRequire.pdf>, 第 3-38 頁)、與正射影像位置中誤差應小於 50 公分，最大誤差應小於 2 公尺 (<http://bmap.nlsc.gov.tw/files/topographic/OperatingRequire.pdf>, 第 3-13 頁) 等相關規定。在國外研究方面，Fle

ner (2013) 以光達和 UAV 影像所建置之河床河岸之地形，其相對精度亦可達到公分等級；Uysal (2015) 以 UAV 於 Sahitler 峽谷進行空拍並建立 DSM，和地面控制點進行精度分析後，得到其均方根誤差約為 6.6 公分。

近年來山坡地監測及河道變遷觀測，一直是以遙測衛星和全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 為主要工具，雖然衛星影像製作 DSM 與數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的空間解析度已可達到 30 公分，例如 WorldView-3 衛星影像 (<http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-3/>)，但由於衛星軌道周期固定以及受到高空雲的影響，故發生災害時往往無法立即取得影像，而 GPS 獲取座標之精度雖高，但測量時間較長，且僅能點狀進行量測，無法完整獲取研究區域的地形模型。至於 UAV 航拍高度低，影像解析度高，再加上具有機動性強、經費需求較低以及操作所需的天氣條件較寬鬆等特性，更能做出高精度的 DSM。雖然上述所提到文獻回顧中，多個研究已提到 UAV 產製地形之相對精度，可達 10 公分以內之水準，然而 UAV 航拍影像精度與相機的解析度、飛行載具穩定度、研究區域地形條件、控制點布設方式皆有關，而目前較無相關文獻進行全面性之探討比較。本研究利用不同飛行載具搭載不同相機，針對不同地形 (河道與山坡地)，全面探討 UAV 產製地形技術應用於河道變遷監測與山坡地製圖之可行性，流程圖如圖 1 所示。

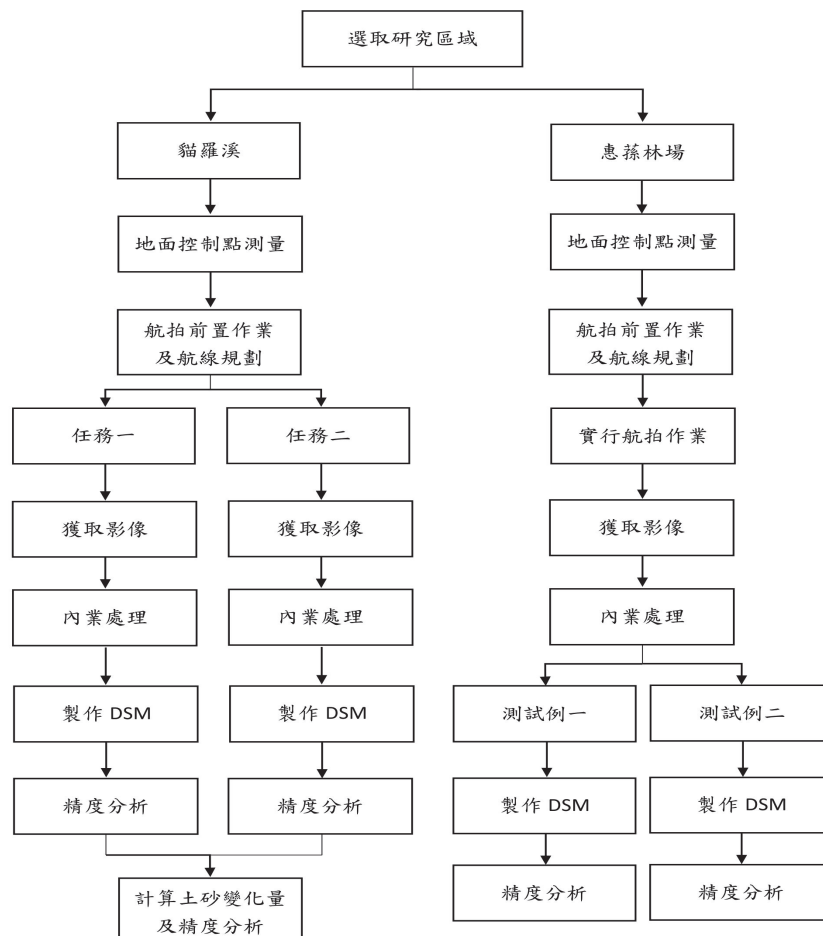


圖 1 研究流程圖。

Fig.1 The flow chart of this study.

二、研究方法

2.1 研究區域

本文研究區域分別位於南投縣貓羅溪及南投縣惠蓀林場，地理位置如圖 2 所示。貓羅溪位於臺灣中部，屬於烏溪支流，本研究選取的區域位於南投縣南投市綠美橋和祖祠橋中間的河道，再加上上游彎曲之河段。此區域河流泥沙搬運量大，為水利署第三河川局定期清疏之重點區域，本研究利用 UAV 航

拍影像建置當地地形，除了精度分析之外，還計算土砂變化量，希望能提供相關單位判讀泥沙搬運和河道變遷之情況。

惠蓀林場為國立中興大學所屬的實驗林場，海拔自 450 公尺至 2,419 公尺。其地點位在南投縣仁愛鄉、國姓鄉交界，烏溪集水區內。選擇此區域之原因為地形起伏變化量大，非常適合了解以 UAV 製圖時，高度起伏對精度影響。除此之外，今年適逢惠蓀林場建場 100 周年，本研究希望藉此研究，能提供惠蓀林場精細之地形地貌，以提供當地未來河道、崩塌地、裸露地、植被等研究之重要參考價值。

表 1 各 UAV 任務相關資訊

Table 1 The information of the UAV missions

空拍任務	空拍區域	日期	UAV	相機	航高	地面解析度
任務一	貓羅溪	2015/4/22	四旋翼機	Gopro Hero3	250m	14.3cm
任務二	貓羅溪	2016/4/27	六旋翼機	Sony NEX7	200m	5cm
任務三	惠蓀林場	2016/4/7	Avain P	Sony A5100	1100m	12.5cm

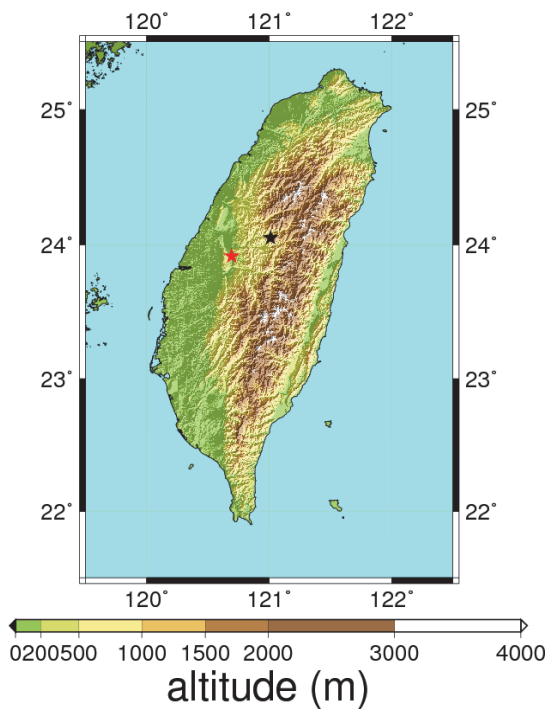


圖 2 研究區域位置圖，其中紅色星號為貓羅溪區域，黑色星號為惠蓀林場區域。

Fig.2 The locations of the study areas. The red and black stars mean the locations of Mao-Luo stream and Hui-Sun forestry areas.

2.2 空拍任務介紹

為研究貓羅溪一年之河道變遷及泥沙搬運之情形與 UAV 於高山區域製圖的可行性，本團隊於 2015 年 4 月 22 日及 2016 年 4 月 26 日在貓羅溪，與 2016 年 4 月 7 日於惠蓀林場進行 UAV 航拍任務。本研究將 2015 年 4 月 22 日於貓羅溪之航拍任務簡稱為任務一；2016 年 4 月 26 日於貓羅溪之航拍任務稱為任務二；惠蓀林場之航拍任務稱為任務三。上述空拍之詳細資訊如表 1 所示，而三次任務使用之 UAV 外觀如圖 3 所示。



(a)



(b)



(c)

圖 3 本研究使用之 UAV。其中 (a)~(c) 分別為任務一、二與三使用之 UAV。

Fig.3 The used UAVs in (a) mission 1, (b) mission 2, and (c) mission 3.

任務一使用的 UAV 為四旋翼的機種搭載 GoPro HERO3 攝影機，Gopro HERO3 錄影解析度可達到 4K/15FPS。並搭配高精度 GPS 確認相片中心位置，以錄影方式拍攝整個區域。

根據白絜成等 (2015) 使用四旋翼搭配 GoPro HERO3 攝影機於旗山溪進行空拍研究，在 X、Y、Z 方向之精度分別為 7.5 公分、4.2 公分、12.4 公分，證明使用四旋翼搭載 GoPro HERO3 攝影機進行航拍所獲取的地形精度，對於研究河道變遷是可行的。此外，任務一內業處理方面乃將錄影截圖為單張相片，並利 Pix4DMapper 軟體計算產製地形。任務一之相關相機率定與錄影截圖等方式均與白絜成等 (2015) 處理方式相同。任務二使用的 UAV 為六旋翼的機種搭載 Sony NEX7 相機 (24mm 鏡頭，有效畫素為 2430 萬，快門設定為 1/800 秒)，並搭配高精度 GPS 確認每張相片拍攝中心座標。任務二以前後重疊率 80%，左右重疊率 60% 進行空拍任務。任務一和二之航線圖如圖 4(a) 所示，兩任務主要均採 S 型航線設計，但任務一之航線主要沿著貓羅溪，而任務二之航線則垂直於貓羅溪。無論是

任務一或任務二，航拍涵蓋範圍均包含本文主要研究區域。兩次任務都挑選在天氣晴朗及能見度佳的時段進行航拍，故影像品質均相當良好。本團隊於貓羅溪區域分別選取 7 個控制點與 6 個為檢核點，點位分布如圖 4(b) 所示。部分控制點與檢核點以全測站測量各點之平面座標，並以水準儀測量各點之高程座標 (以水利署斷面樁為基準點引測)，而部分點位以 trimble 4000 GPS 接收儀接收 8 小時，搭配國土測繪中心 e-GPS 站解算座標。由 GPS 所得到之高程為橢球高，故本研究以台灣最新之大地起伏模型 (Hwang et al., 2013) 修正，得到各點之正高值。上述各控制點與檢核點之平面與垂直方向均可達公分等級精度。每個控制點於航拍前會噴上噴漆，使其在每張相片中都可以清楚呈現，降低後續作業所產生之誤差。

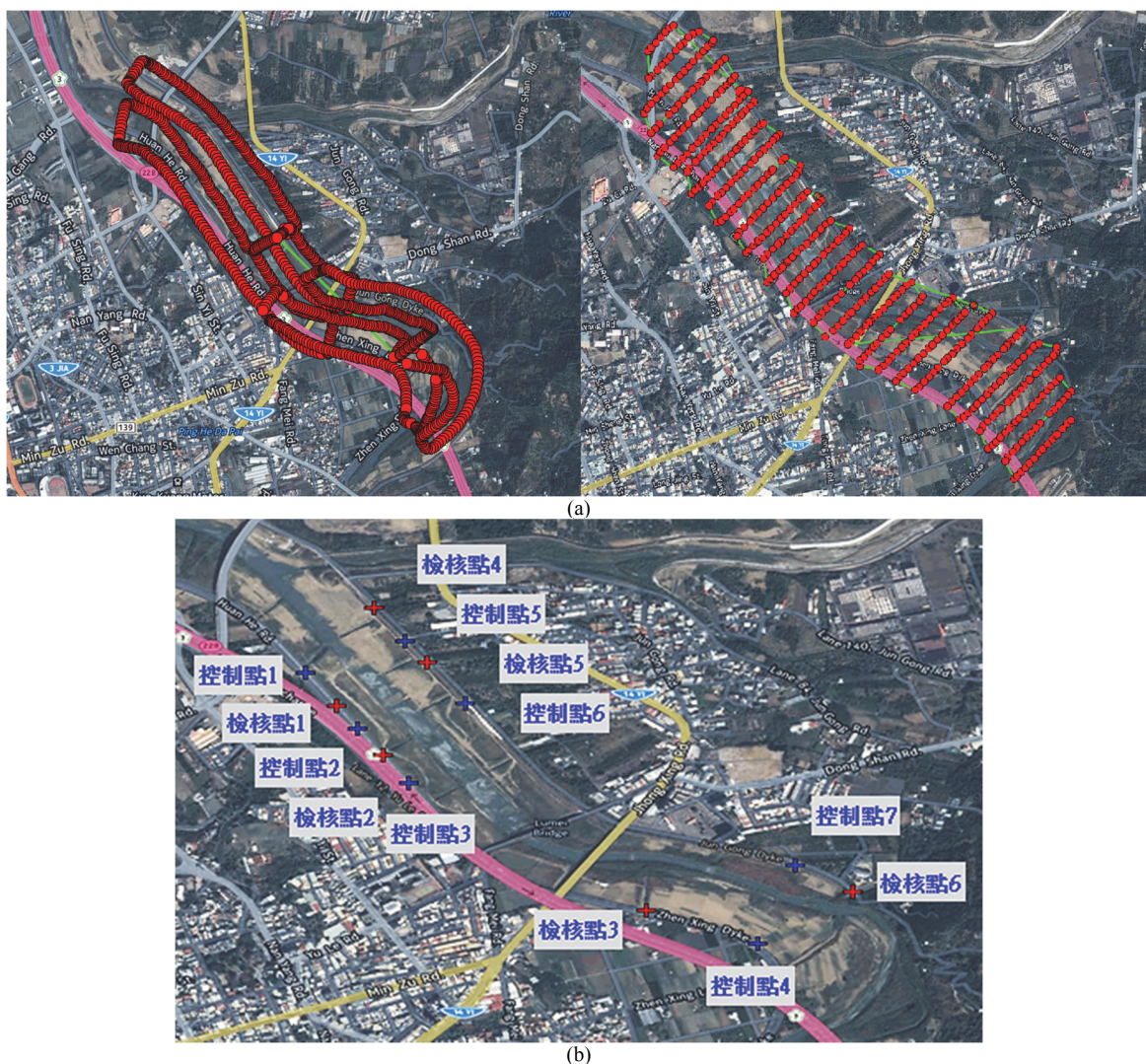


圖 4 (a) 貓羅溪航拍任務航線圖，其中任務一航線為左圖，任務二航線為右圖。(b) 貓羅溪航拍任務控制點與檢核點分布圖。

Fig.4 (a) The flight tracks of mission 1 (left) and mission 2 (right) in Mao-Luo stream . (b) The distributions of the GCPs (blue cross) and check points (red cross) in Mao-Luo stream

任務三於 2016 年 4 月 7 日在惠蓀林場進行航拍，使用的 UAV 為 Avain-P 搭載相機為 Sony A5100，快門設定為 1/800 秒，以前後重疊率 70%，左右重疊率 50% 進行空拍任務。航線設計亦採 S 型航線 (圖 5 (a))，拍攝區域涵蓋惠蓀林場主要區

域，空拍時天氣晴朗且能見度佳，故影像品質亦相當理想。惠蓀林場海拔高度相差大，本次任務航拍範圍海拔介於 400 公尺最高至 1200 公尺，區域內含有裸露地、河川、崩場地等地型。另外針對任務三，本研究利用兩種不同控制點分布情形來分析

對高山區域製圖的精度影響，第一組（測試例一）是將控制點分布在海拔高度較低的區域，而檢核點分布於海拔較高的區域，選擇原因乃模擬當高山區域交通阻礙時，僅能於海拔相對較低之區域布設控制點，而無法深入該區域內布設點為時之情況，其產製之地形是否依然能為有關單位所使用；第二組（測試例二）則是將控制點均勻分布在整個研究區域時，分析其所產製之地形精度，測試例二可做為測試例一之對照組。無論是測試例一或測試例二，均為 8 個為控制點與 7 個為檢核點，點位分

布如圖 5 (b) 所示。測試例一之控制點均分布在高程較低的區域，檢核點則是分布於高程較高的區域；測試例二控制點和檢核點則均勻分布在整個研究區域。除此之外，所有控制點和檢核點均以 GPS 接收儀搭配國土測繪中心 e-GPS 站解算座標，故各點平面與垂直方相精度均可達公分等級。每個控制點航拍前會鋪上自製航測標（帆布材質，尺寸為 2 公尺 x 2 公尺），使其在每張相片中都可以清楚呈現控制點位置，以降低後續作業所產生之誤差。

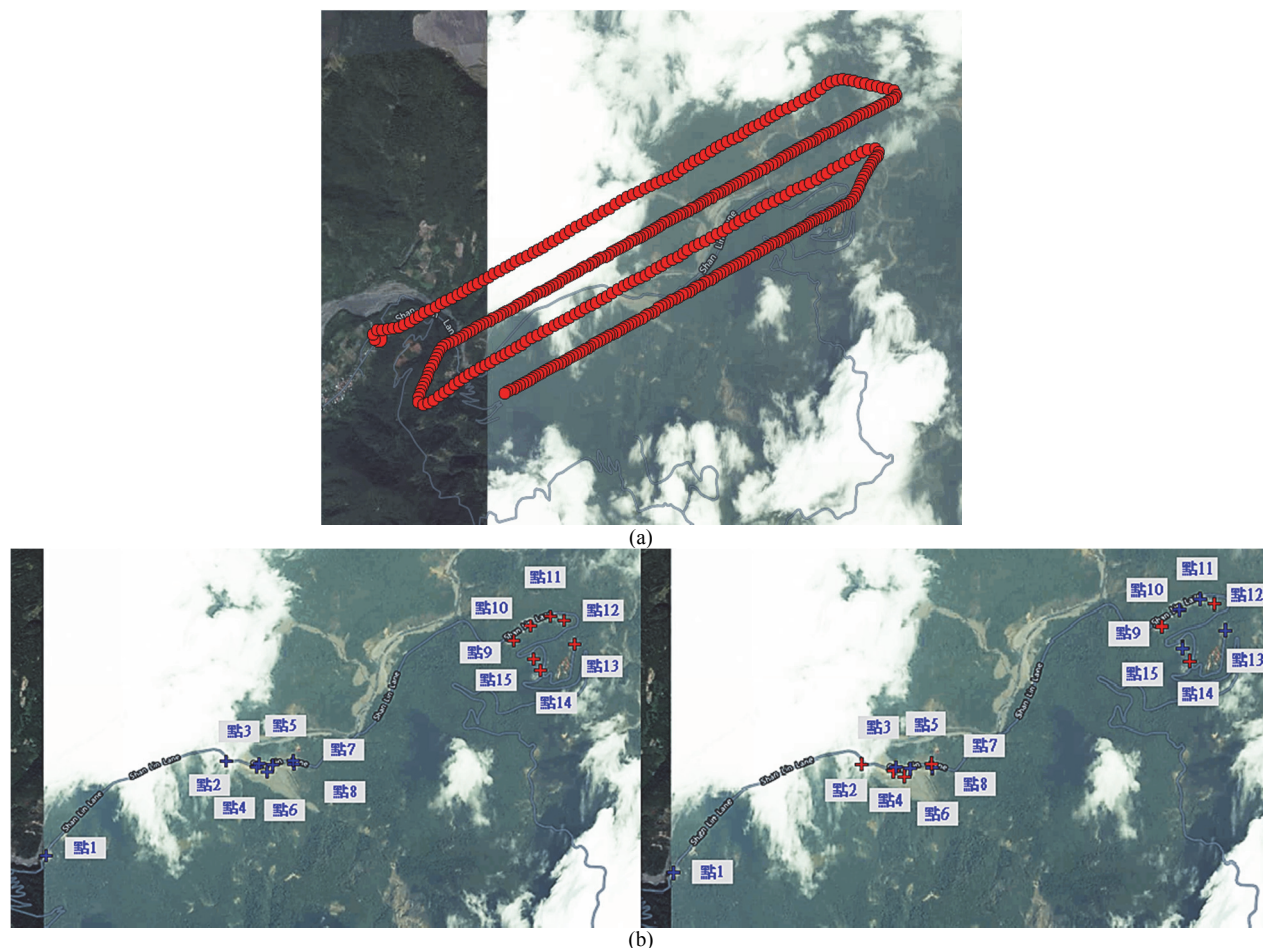


圖 5 (a) 惠蓀林場航拍任務航線圖。(b) 惠蓀林場航拍任務控制點與檢核點分布圖，其中左圖為測試例一，右圖為測試例二。

Fig.5 (a) The flight tracks in the mission of Hui-Sun forestry. (b) The distributions of the GCPs (blue cross) and check points (red cross) for example 1(left), and example 2(right).

三、結果與討論

3.1 任務一

此次航拍任務以攝影的方式將貓羅溪研究區域進行航拍，在內業處理的部份共截取 1128 張影像，配合地面控制點，使用 Pix4Dmapper 產製正射影像鑲嵌圖（圖 6）和 DSM（圖 7），其中正射影像鑲嵌圖的地面解析度為 14.3 公分，而 DSM 網格大小為 1 公尺。由產製出的正射鑲嵌影像可以清楚辨別出各種地物，包括河道、建築物、高速公路以及植被等。若將 UAV 產製地形在檢核點位置的座標值，減去檢核點實測座標值後，即得到 UAV 航拍在每個檢核點位置上誤差值，如表 2 所示。由表 2 可以看出 X 方向最大誤差是 14.9 公分，而平均誤差約 9.2 公分；在 Y 方向之最大誤差是 10.8 公分，而平均誤差約

5.3 公分。至於高程精度最大之高程差為 11.9 公分，平均誤差約為 4.8 公分。

表 2 任務一之檢核點誤差表（單位為公尺）

Table 2 The accuracies (m) of UAV-derived results validated with the check points in mission 1.

點位	X誤差	Y誤差	高程誤差
檢核點1	0.149	0.092	-0.02
檢核點2	0.126	-0.009	0.103
檢核點3	-0.068	0.062	0.038
檢核點4	-0.088	-0.108	-0.01
檢核點5	-0.078	-0.018	0.119
檢核點6	0.046	-0.029	-0.027
平均誤差	0.092	0.053	0.048
標準偏差	±0.107	±0.071	±0.064
均方根	±0.099	±0.065	±0.068



圖 6 任務一正射鑲嵌圖。

Fig.6 The ortho-mosaics in mission 1.

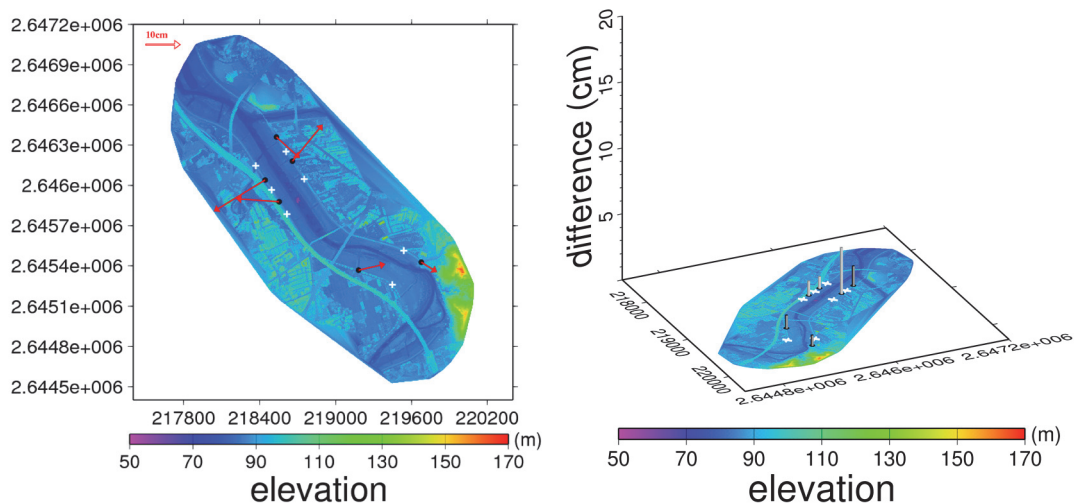


圖 7 任務一之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點位置，黑色圓形為檢核點位置；左圖中紅色箭頭方向與長度別代表誤差方向與大小；右圖深灰色長柱代表誤差為正值，淺灰色的長柱代表誤差為負值。

Fig.7 The DSM of mission 1 and the accuracies of UAV-derived results validated with the check points at horizontal (left) and vertical (right) components. The white crosses and the black circles represent GCPs and check points, respectively. The directions and the lengths of the red arrows in the left panel represent those of the errors. The dark and bright grey vertical bars in the right panel mean the errors positive and negative, respectively.

圖 7 包含任務一之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點位置，黑色圓形為檢核點位置。圖 7 (左) 紅色箭頭方向與長度別代表誤差之方向與大小。由圖 7 (左) 中可發現每個檢核點產生誤差的方向是隨機的，這代表本研究產製之任務一 DSM 平面系統誤差較小。檢核點 1 有最大的平面誤差，其值為 17.5 公分；在檢核點 6 有最小的平面誤差，其值為 5.4 公分。另外由圖 7 (左) 可以看出下方兩個檢核點之誤差較小，原因為該區域有較多影

像且影像分布較密集，故能提升此區域 DSM 之精度。在高程精度分析圖中 (圖 7 (右))，白色十字為控制點，黑色圓形為檢核點，深灰色的長柱代表為誤差為正值，亦表示建置之 DSM 高程在檢核點位置較實際值高；淺灰色的長柱代表為誤差為負值，亦表示建置之 DSM 高程在檢核點位置較實際值低。由圖 7 (右) 可發現檢核點之誤差正負值皆有且平均分布，表示任務一 DSM 高程方向系統誤差亦相對較小。圖 7 (右) 中，正值之誤差最大約為 10 公分，而負值的誤差均在 5 公分內。本研究

任務一使用之 UAV、航高、航線等條件均與白絮成等 (2015) 航拍任務相同，且地點均在河道進行航拍，但本研究較其結果更佳，主要原因為本研究任務一之地面控制點較多且分布更為均勻所致。

3.2 任務二

任務二航拍任務以航照（非攝影）的方式拍攝整個貓羅溪區域，共有 29 條航線，而共拍攝 529 張相片，使用 Pix4Dmapper 軟體並搭配地面控制點，生成正射鑲嵌圖（圖 8）

和 DSM（圖 9），其中正射影像鑲嵌圖的地面解析度為 5 公分，此次任務所使用的設備採六旋翼機搭載 Sony NEX7 相機，故無論飛行穩定性與相片空間解析度均較任務一更佳。表 3 為利用檢核點檢核任務二地形之誤差統計表，由表 3 可發現任務二 DSM 在 X 方向最大誤差是 9.2 公分，而平均誤差約 3 公分；在 Y 方向之最大誤差是 8 公分，而平均誤差約 4.1 公分。至於高程精度最大之高程差為 3 公分，平均誤差約為 1.6 公分。



圖 8 任務二之正射鑲嵌圖。

Fig.8 The ortho-mosaics in mission 2.

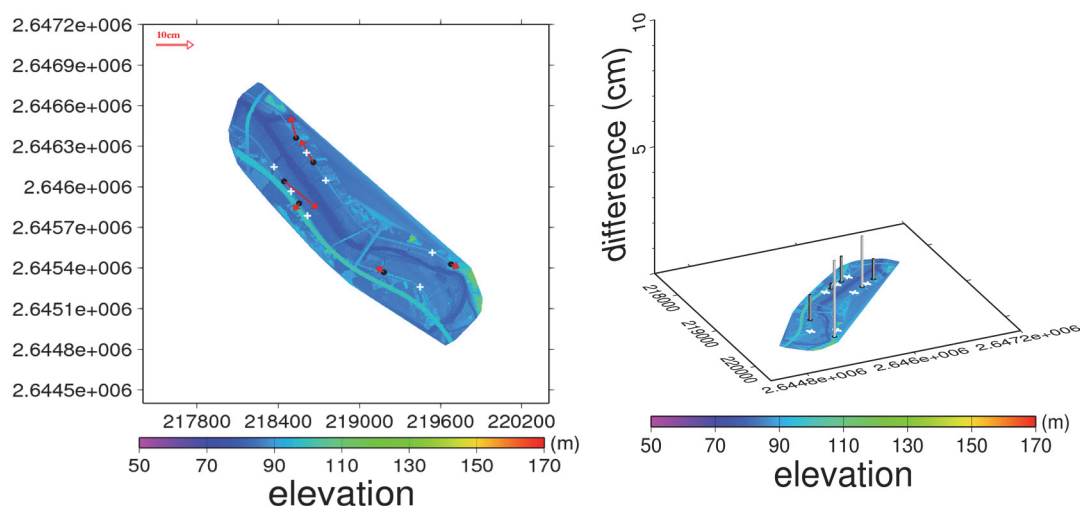


圖 9 任務二之 DSM 成果、平面精度分析圖（左）和高程精度分析圖（右），其中白色十字為控制點，黑色圓形為檢核點。左圖中紅色箭頭方向與長度別代表誤差方向與大小；右圖深灰色長柱代表誤差為正值，淺灰色的長柱代表誤差為負值。

Fig.9 The DSM of mission 2 and the accuracies of UAV-derived results validated with the check points at horizontal (left) and vertical (right) components. The white crosses and the black circles represent GCPs and check points, respectively. The directions and the lengths of the red arrows in the left panel represent those of the errors. The dark and bright grey vertical bars in the right panel mean the errors positive and negative, respectively.

表 3 任務二之檢核點誤差表 (單位為公尺)

Table 3 The accuracy (m) of UAV-derived results validated with the check points in mission 2

點位	X誤差	Y誤差	高程誤差
檢核點1	0.092	-0.080	0.010
檢核點2	-0.015	-0.021	0.002
檢核點3	-0.016	0.064	0.008
檢核點4	-0.035	0.066	-0.020
檢核點5	-0.012	0.011	0.010
檢核點6	0.009	-0.005	-0.030
平均誤差	0.030	0.041	0.016
標準偏差	±0.045	±0.055	±0.017
均方根	±0.042	±0.051	±0.016

圖 9 為任務二之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點位置，黑色圓形為檢核點位置。由圖 9 (左) 可發現每個檢核點的誤差方向乃隨機分佈，代表任務二 DSM 在水平方向較無系統誤差存在。此外，任務二研究區域下半部的檢核點 2、3 和 6 的平面精度相當準確，其誤差皆在 2 公分內，而在檢核點 1 有最大的平面誤差，其值約 12 公分。另外由圖 9 (右) 顯示，檢核點之誤差正負值皆有，代表建置之 DSM 在高程方向亦較無系統誤差，而正值的誤差平均僅約 1 公分；負值的平均誤差也僅約 2.5 公分，在檢核點 6 有最大之高程誤差，其值也僅約為 3 公分。由表 3 與圖 9 可發現由於任務二使用之 UAV 相關設備較佳，故產製的 DSM 精度無論平面方向與高程方向，均較任務一結果 (表 2 與圖 7) 更佳。

3.3 貓羅溪土砂變化量

本研究為探討貓羅溪研究區域河道一年期間土方變化量，將任務一和任務二建置之 DSM，以 GMT (Generic Mapping Tools)(Wessel et al., 2013) 軟體將兩期 DSM 每一個網格值進

行相減 (任務二減任務一)，以藉此觀察一年間土方總變化量 (圖 10 (左))，相減後再將每一個網格值之高程變化量加總，即可得到總土方變化量為+226,971.49 立方公尺。若不計 UAV 本身之觀測內部誤差，此土方變化量估計值可能的外在誤差來源有三個，分別如下：

- (1) 兩期水位變化量影響：無論任務一或任務二，其航拍時間均恰逢旱季尾端，河川的水位均處於最低點，故總土方變化量中，包含兩期水位變化量之誤差雖有，但的比率相當低。
- (2) 植物高度變化影響：在任務一航拍時，河岸兩旁並沒有雜草 (如圖 6)，而任務二進行航拍時，雜草卻非常茂盛 (如圖 8)，故圖 10 (左) 之土方變化量圖包含了因植物高度變化造成的影響，這也是土方變化量估計值誤差主要來源。
- (3) 建築物影響：建築物 (房屋、橋梁等) 因兩期航拍誤差產生之平面座標些微位移，進而造成高程巨大變化量，此亦為土方變化量估計值誤差主要來源。

為了消除上述誤差，本研究使用 GMT 軟體的中位數濾波程式，將計算點網格值重新以鄰近網格的中位數值取代，如此可將土方變化量極端值消除。圖 10 (右) 為經過濾波處理後之土方變化量結果。圖 10 中藍色箭頭代表綠美橋位置，在未使用濾波處理前 (圖 10 (左))，因兩期平面位置誤差而造成綠美橋位置有非常明顯的土方變化誤差 (可達 5 公尺以上的誤差量)。在經過濾波處理後 (圖 10 (右))，綠美橋位置偏移引起的土方估計誤差已經消除，且河道兩側因野草生長而產生之土方變化誤差，也能大部分消除。經由濾波處理後，一年期間土方總變化量下降至 225,685.61 立方公尺，較濾波處理前，降低了約 1,200 立方公尺的土方量。另外由圖 10 可發現在河道直線段中間有塊紅色的區域 (紅色箭頭方向) 之土砂淤積量非常大，此現象並非上述三種外在原因所造成的誤差，而是此地區屬於較容易土砂沉積的區域 (圖 11)，此現象可提供政府有關單位日後整治之參考。

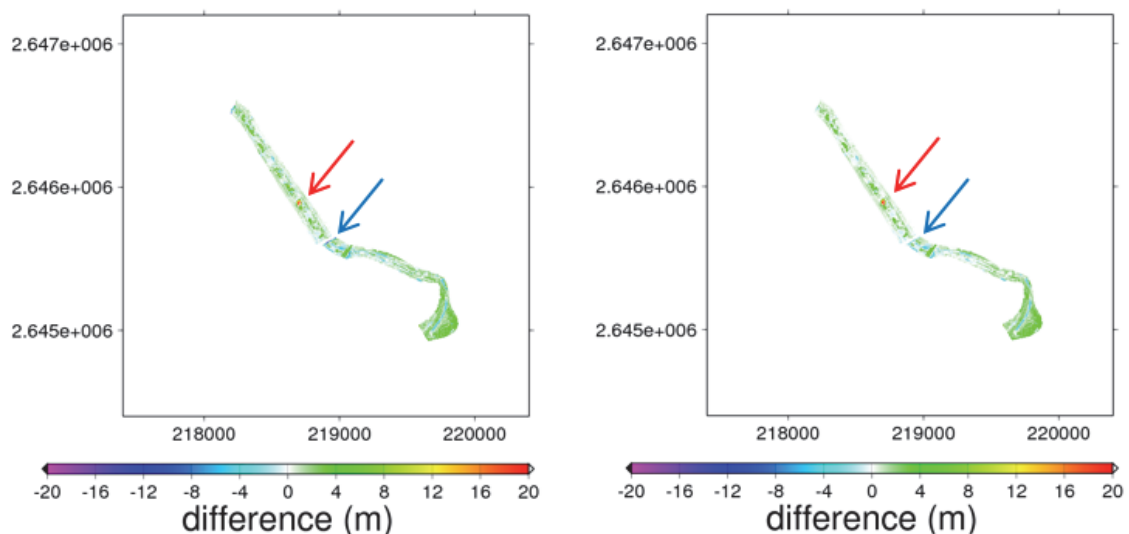


圖 10 任務一與任務二所測得貓羅溪研究區域土砂變化量，其中左圖為未使用濾波之結果，而右圖使用濾波之結果。

Fig.10 The earthwork difference between mission 1 and mission 2 non-using filter (left), and using filter (right).



圖 11 貓羅溪土砂變化主要區域圖。(a) 任務一之空拍結果；(b) 任務二之空拍結果。

Fig.11 The main location of sediment variations in Mao-Luo stream. (a) The results from mission 1. (b) The results from mission 2.

為了評估本研究方法之內部精度，本文使用誤差傳播定律估算 1 立方公尺土方誤差值。誤差傳播定律之公式如下（施永富，2002）：

$$x = f(l_1, l_2, \dots, l_n) \quad (1)$$

$$m_x^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 m_n^2 \quad (2)$$

(1) 式中 x 為獨立觀測值 $l_1, l_2 \dots l_n$ 之任意函數； $m_1, m_2 \dots m_n$ 為各觀測值標準偏差。而 1 立方公尺之土方體積 V 計算如下：

$$V = X_2 Y_2 Z_2 - X_1 Y_1 Z_1 \quad (3)$$

而 V 伴隨之誤差，依誤差傳播定律可表示為：

$$\begin{aligned} \delta V^2 = & (-Y_1 Z_1)^2 (\delta X_1)^2 + (Y_2 Z_2)^2 (\delta X_2)^2 \\ & + (-X_1 Z_1)^2 (\delta Y_1)^2 + (X_2 Z_2)^2 (\delta Y_2)^2 \\ & + (-X_1 Y_1)^2 (\delta Z_1)^2 + (X_2 Y_2)^2 (\delta Z_2)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\delta X_1, \delta Y_1, \delta Z_1$ 分別代表任務一在 X、Y、Z 方向誤差之標準偏差，其值分別為 ± 0.107 公尺、 ± 0.071 公尺、 ± 0.064 公尺（表 2）；而 $\delta X_2, \delta Y_2, \delta Z_2$ 分別代表任務二在 X、Y、Z 方向誤差之標準偏差，其值分別為 ± 0.045 公尺、 ± 0.055 公尺、 ± 0.017 公尺（表 3）。若 X_1, Y_1, X_2, Y_2, Z_1 均為 1 公尺，而 Z_2 為 2 公尺，則(4)式代表 1 立方公尺土方變化量所伴隨的內部誤差量。經過計算後，每 1 立方公尺土方變化量估算，會產生約 0.202 立方公尺的內部誤差。本研究僅分析 1 立方公尺土砂變化量之

誤差，作為本研究精度評估之標準，然而實際任務一與二之土砂變化量之量體非常巨大，其真實土砂變化量之誤差絕非以 1 立方公尺土砂變化量所估計之誤差以倍數得到全體誤差。然而任務一與任務二之 DSM 為不規則變化，且本研究除了將兩期 DSM 相減之外，再以濾波處理進而得到土砂變化，因此要精確計算得之整體土砂變化量之內部精度相當困難，故本研究僅採用 1 立方公尺土砂變化量作為精度評估標準。

3.4 任務三

任務三以定翼機 Avain P 進行空拍，以 S 型航線設計覆蓋惠蓀林場區域，航高為對地高 1100 公尺，總共拍攝 469 張影

像，並使用 Pix4Dmapper 生成兩組不同的正射鑲嵌圖 (圖 12) 和 DSM (測試例一與測試例二)(圖 13 與圖 14)，其中正射影像鑲嵌圖的地面解析度為 12.5 公分。表 4 為經檢核點檢核後的測試例一誤差統計表。由表 4 可發現測試例一 DSM 在 X 方向最大誤差是 71.3 公分，而平均誤差約 25 公分；在 Y 方向之最大誤差是 37.2 公分，而平均誤差約 17 公分；高程最大之誤差為 93.9 公分，平均誤差約為 68.3 公分。整體而言，無論是平面 (X 與 Y 方向) 或高程 (Z) 方向，測試例一產製之結果均不理想。



圖 12 惠蓀林場正射鑲嵌圖

Fig.12 The ortho-mosaics in Hui-Sun forestry area (mission 3)

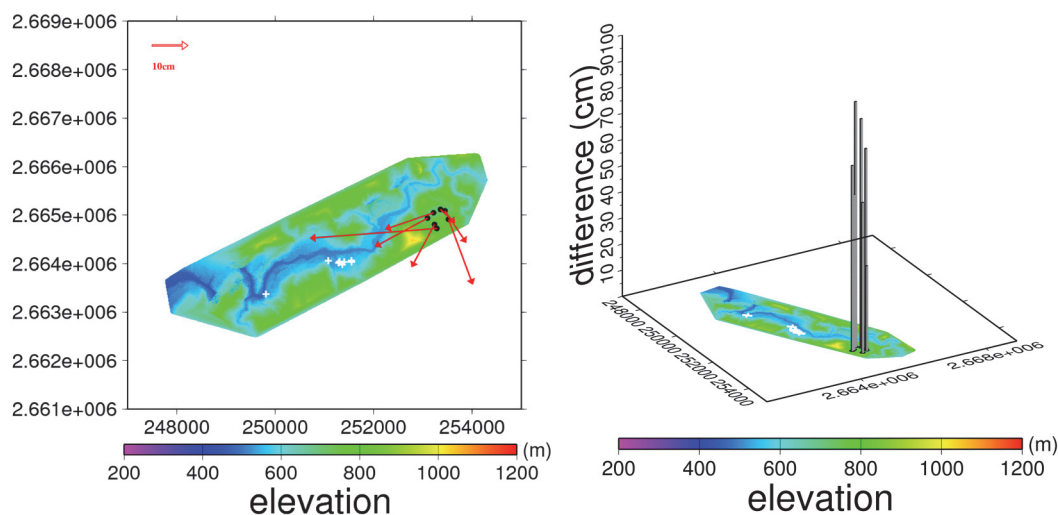


圖 13 航拍任務三測試例一之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點，黑色圓形為檢核點。左圖中紅色箭頭方向與長度別代表誤差方向與大小；右圖深灰色長柱代表誤差為正值，淺灰色的長柱代表誤差為負值。

Fig.13 The DSM of example 1 in mission 3, and the accuracies of UAV-derived results validated with the check points at horizontal (left) and vertical (right) components. The white crosses and the black circles represent GCPs and check points, respectively. The directions and the lengths of the red arrows in the left panel represent those of the errors. The dark and bright grey vertical bars in the right panel mean the errors positive and negative, respectively.

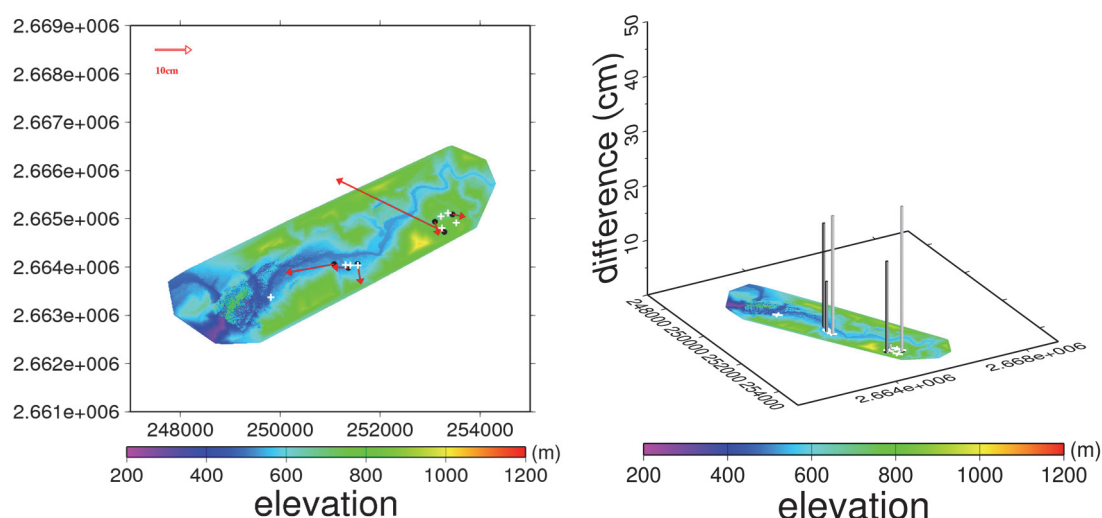


圖 14 航拍任務三測試例二之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點，黑色圓形為檢核點。左圖中紅色箭頭方向與長度別代表誤差方向與大小；右圖深灰色長柱代表誤差為正值，淺灰色的長柱代表誤差為負值。

Fig.14 The DSM of example 1 in mission 3, and the accuracies of UAV-derived results validated with the check points at horizontal (left) and vertical (right) components. The white crosses and the black circles represent GCPs and check points, respectively. The directions and the lengths of the red arrows in the left panel represent those of the errors. The dark and bright grey vertical bars in the right panel mean the errors positive and negative, respectively.

表 4 測試例一之檢核點誤差表 (單位為公尺)

Table 4 The accuracy (m) of UAV-derived results validated with the check points in example 1 of mission 3

點位	X誤差	Y誤差	高程誤差
點9	-0.295	-0.163	0.939
點10	-0.271	-0.095	0.876
點11	0.084	-0.078	0.767
點12	0.120	-0.182	0.324
點13	0.136	-0.372	0.575
點14	-0.713	-0.056	0.710
點15	-0.129	-0.244	0.594
平均誤差	0.249	0.170	0.683
標準偏差	±0.306	±0.111	±0.208
均方根	±0.322	±0.199	±0.710

圖 13 為任務三測試例一之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點位置，黑色圓形為檢核點位置。由圖 13 (左) 可知，在平面精度方面，所有點位之誤差方向均朝西或朝南方向，表示測試例一 DSM 平面方向存在明顯的系統誤差；而在高程方面，所有檢核點之高程誤差均為正值，亦代表測試例一 DSM 高程方向具有較大之系統誤差。整體而言，若以測試例一這種控制點分布方式建置 DSM 時，在遠離地面控制點位置的區域，無論平面或高程方向均有極大之誤差存在，此 DSM 精度等級並無法提供製作高精度的山區地形圖。

表 5 為經檢核點檢核後的測試例二誤差統計表。由表 5 可發現檢核點 4 位置的 X 座標與高程值都有極大的誤差，其原因為在空拍時該航測標被風吹走，導致後續處理時，其位置無

法正確出現在影像中，因此後續精度討論時檢核點 4 之結果並未納入分析之中。由表 5 所示，X 方向最大誤差是 59.8 公分，而平均誤差約 18 公分；在 Y 方向之最大誤差是 30.2 公分，而平均誤差約 10 公分；高程方向最大之誤差為 26.6 公分，平均誤差約為 16 公分。相較於測試例一之成果，測試例二不僅在平面方向精度優於測試例一，在高程方向精度改善情況更佳明顯。

表 5 測試例二之檢核點誤差表 (單位為公尺)

Table 5 The accuracy (m) of UAV-derived results validated with the check points in example 2 of mission 3

點位	X誤差	Y誤差	高程差
點2	-0.267	-0.050	0.190
點4	6.802	-0.326	12.236
點6	-0.092	0.005	0.092
點7	0.019	-0.117	-0.215
點9	0.019	-0.080	-0.007
點12	0.073	-0.014	-0.266
點14	-0.598	0.302	0.166
平均誤差	0.178	0.094	0.156
標準偏差	±0.255	±0.151	±0.194
均方根	±0.272	±0.138	±0.178

註：平均誤差已將點 4 除去。

圖 14 為任務三測試例二之 DSM 成果、平面精度分析圖 (左) 和高程精度分析圖 (右)，其中白色十字為控制點位置，黑色圓形為檢核點位置。由圖中可發現，平面方向之平均誤差約 20 公分；高程方向之平均誤差約為 16 公分。若將測試例一與測試例二進行比較，測試例二無論在平面與高程方向精度均

較測試例一大幅改善，更重要的是，測試例二在平面方向（圖 14（左）誤差方向隨機）和高程方向（圖 14（右）誤差值正負值皆有）較不存在大的系統誤差。整體而言，測試例二之結果大致符合國土測繪中心一千分之一製圖精度要求（平面精度須小於 25 公分、高程精度須小於 30 公分、正射影像位置中誤差應小於 50 公分，最大誤差應小於 2 公尺等相關規定）。

四、結論與建議

本研究區域為貓羅溪與惠蓀林場區域，以 UAV 進行的航拍影像建置正射鑲嵌圖與 DSM，並分析其精度。在貓羅溪區域，除了探討建置地形之平面與高程精度之外，亦估算貓羅溪研究區域於 2015 年 4 月至 2016 年 4 月之河道土方變化量；在惠蓀林場區域，本研究利用不同地面控制點布設方式，分別建置地形，並進行平面與高程之精度分析。本研究之相關結論與建議如下。

- (1) 本研究在貓羅溪區域以四旋翼機用錄影之方式獲取影像，建置 DSM 之空間解析度可達 15 公分，在平面精度方面，平均誤差為 11.1 公分；在高程精度方面，平均誤差為 5.2 公分。以六旋翼機搭載 SONY NEX7 相機搭配 24mm 鏡頭拍攝影像，建置 DSM 之空間解析度可達 4 公分，在平面方面，平均誤差為 5.2 公分；在高程精度方面，平均誤差為 1.3 公分。
- (2) 在貓羅溪航拍方面，本研究產製之兩個時期 DSM 精度無論平面或高程方向其平均誤差均小於 10 公分，這代表無論是採用四旋翼 UAV 搭載 GoPro 攝影機，或六旋翼 UAV 搭載高畫素相機，只要天候良好且控制點布設得宜，均能產製河道高精度之地形。
- (3) 貓羅溪研究區域從 2015 年 4 月至 2016 年 4 月間，總土方變化量為 226,971.49 立方公尺（濾波處理前），在使用中位數濾波過濾極值後，土方變化量降為 225,685.61 立方公尺，減少約 1200 立方公尺。估算的土方量中，若利用誤差傳播公式計算，則每 1 立方公尺土方估算值會產生 0.202 立方公尺誤差（內部精度），然而實際土方估算誤差（外部精度），則無法得知。
- (4) 在估算貓羅溪河道土方變化量方面，濾波的使用，確實可以將因植物生長與建築物位移產生的誤差明顯降低。
- (5) 惠蓀林場航拍結果方面，若將地面控制點集中在高程較低之區域，檢核點分布於高程較高之區域，所產製地形其平面方向之平均誤差為 33.4 公分，高程方向之平均誤差為 68.3 公分，且無論平面或高程方向均包含大量系統誤差；若將地面控制點平均分布於整個研究區域，所產製之地形其平面方向之平均誤差下降為 21.8 公分，高程方向之平均誤差更是大幅下降為 15.6 公分，且地形中系統誤差大幅改善。
- (6) 惠蓀林場航拍結果顯示，在高海拔山區以 UAV 製圖方面，若控制點均勻分布在整個測區，才能產製符合國土測繪中心一千分之一製圖精度要求之地形。

誌謝

承蒙逢甲大學營建及防災研究中心、碳基科技股份有限公司和翔隆自動化有限公司之協助航空攝影之任務，方得以完成研究。

參考文獻

- [1] 白絜成 (2015)「UAV 掛載 GoPro 攝影機製作地形之精度分析」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。(Pai, C.C. (2015). *Analysis of accuracy for UAV-derived topography from a GoPro camera*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 申承翰 (2013)「無人飛行載具影像數值地形模型建置及精度評估」，國立台北科技大學碩士論文。(Shen, C.H. (2013). *Production and verification of unmanned aerial vehicle derived digital terrain model*, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 林秋芬 (2015)「無人飛行載具真實三維模型建模精度評估」，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文。(Lin, C.F. (2015). *Quality evaluation of true 3D model based on unmanned aerial vehicle-derived image*, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 施永富 (2002)，測量學（修訂二版），三民出版社。(Shi, Y.F. (2002). *Surveying*, San Min Book Co., Ltd., Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 施錦揮、游政恭、鄒慶敏、蔡季欣、林志清、林燕山 (2010)「無人人飛行載具應用於防救災圖資供應之研究-以北二高崩塌地為例」，地籍測量；中華民國地籍測量學會會刊，29(3)，17-36。(Shih, C.H., Yu, C.K., Chou, C.M., Tsai, J.S., Lin, J.C., and Lin, Y.S. (2010). *A Study on Unmanned Aerial Vehicles Applied to Disaster Prevention and Rescue: A Case of Landslide on Freeway Side*, Journal of Cadastral Survey. 29(3), 17-36. (in Chinese))
- [6] 陳修德 (2014)「UAV 高精度數值地形模型應用於河道變遷分析之可行性研究-以寶來地區為例」，國立台北科技大學碩士論文。(Chen, S.D. (2014). *Feasibility Study of Sediment Migration Based on UAV DTMs-Example of Baolai*, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [7] 莊大賢 (2015)「利用無人飛行載具可見光與近紅外光影像分析神木村崩塌潛勢」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。(Zhuang, D.X. (2014). *The Analysis of Landslide Susceptibility in Shenmu by BGR and NIR Photographs Derived from UAV*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [8] 蘇柏軒 (2014)「利用無人飛行載具系統 (UAS) 獲取環境地形之精度分析—以國立中興大學校區為例」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。(Su, B.H. (2014). *Accuracy analyses of environmental topography obtained from unmanned aerial vehicle system(UAS) - A Case Study in the*

- campus of National Chung Hsing University*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] Coppa, U., Guarnieri, A., Pirotti, F., and Vettore, A. (2008). "Accuracy enhancement of unmanned helicopter positioning with low cost system." *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII., Part B5, 843-850.
- [10] Flener, C., (2013), "Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV" *Remote Sens.* 5(12), 6382-6407.
- [11] Hwang, C., Hsu, H. J., and Huang, C. (2013). "A new geoid model of Taiwan: Applications to hazard mitigation, environmental monitoring and height modernization". *Taiwan Journal of Geoinformatics*, 1(1), 57-81. (in Chinese)
- [12] Uysal, M., Toprak, A.S., and Polat, N., (2015) "DEM Generation with UAV Photogrammetry and Accuracy Analysis in Sahitler Hill". *Measurement*, 73(7), 529-543.
- [13] Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F., and Wobbe, F. (2013). *Generic mappingtools: Improved version released*. EOS Trans. San Francisco, USA: AGU.
-

2016 年 08 月 25 日 收稿

2016 年 11 月 03 日 修正

2017 年 03 月 15 日 接受

(本文開放討論至 2017 年 9 月 30 日)