

# UAV-LiDAR 於大規模崩塌潛勢區地表測量精度探討

吳孟姍<sup>[1]\*</sup> 陳國威<sup>[2]</sup> 林宥伯<sup>[2]</sup> 李暉<sup>[1]</sup> 吳東諺<sup>[3]</sup>

**摘要** 大規模崩塌潛勢區的調查與地形特徵判釋，有賴高精度數值地形資料建置。然台灣山區植被茂密，不利於地表特徵直接判釋，光達 (LiDAR) 技術具備多回波及濾除植被之特性，常應用於山區地形測量。無人飛行載具具備機動性高、航高低且負載力提升，結合定位定向系統及輕量化光達之發展，無人機光達成為快速取得空間資訊之新興技術，且適用於易達性低之山區地形測量。本研究於嘉義縣梅山鄉幼葉林及阿里山鄉樂野等大規模崩塌潛勢區，應用無人機光達 Lair X3-H 以對地航高 80 公尺、側向重疊率大於 50%、交叉航線等規劃進行掃描。為了解點雲測量精度及誤差，檢核航線平差成果、點雲密度外，航標除作為控制點外，布設檢核點與點雲進行誤差分析，結果顯示樂野研究區水平 RMS 為 6.68 公分、高程 RMS 為 6.23 公分。局部以高精度之地面光達點雲成果比對，於平坦路面其精密度分布於±5 公分左右。

**關鍵詞：**無人機光達、數值高程模型、大規模崩塌、點雲。

## Accuracy Assessment of UAV-LiDAR in Areas Prone to Large-Scale Landslides

Meng-Shan Wu<sup>[1]\*</sup> Kuo-Wei Chen<sup>[2]</sup> Yu-Po Lin<sup>[2]</sup> Wei Li<sup>[1]</sup> Dong-Yan Wu<sup>[3]</sup>

**ABSTRACT** High-precision and high-resolution digital terrain model data are crucial for the investigation and interpretation of terrain characteristics in large-scale landslide prone areas. However, dense vegetation in Taiwan's mountainous areas hinders direct interpretation of surface features. Because of its ability to capture multiple returns and filter out vegetation, light detection and ranging (LiDAR) technology is commonly used in mountainous terrain surveys. Unmanned aerial vehicles, which feature high maneuverability, increased payload capacity, and allowance for low flight altitude, can be combined with position and orientation systems and lightweight LiDAR technology to efficiently and rapidly acquire spatial data. This technique is particularly suitable for surveying difficult-to-access mountainous areas. In this study, an unmanned aerial vehicle LiDAR system, called lair X3-H, was used to survey large-scale landslide prone areas in Youyelin (Meishan Township) and Leye (Alishan Township), Chiayi County, Taiwan. The surveys were conducted at a flight altitude of 80 m above ground level, with a lateral overlap of >50% and a cross-flight plan. To evaluate the accuracy and error of the point cloud data, the flight line adjustments and point density were examined. In Leye for example, checkpoint verification of point cloud data revealed root mean square error values of 6.68 horizontally and 6.23 cm vertically. Comparisons of point cloud thickness with high-precision terrestrial LiDAR revealed a precision of approximately ±5 cm.

**Key Words:** UAV-LiDAR, digital elevation model, large-scale landslide, point cloud

### 一、前言

大規模崩塌的滑動面是經過長時期的發育、演化形成，滑動面發育過程中，會在地表留下崩塌微地形徵兆，地形特徵判釋，有賴高精度數值地形資料建置。在 2010 年以前，大部分大範圍數值地形模型多以航空攝影測量技術執行測製，如 2005 年第一版全臺 5 公尺網格數值地形模型；2009 年 8 月莫拉克風災後產生許多新的崩塌地，災區地形地貌有

大幅度改變，中央地質調查所從 2010 年起，分年分期應用空載光達 (Airborne LiDAR) 技術建置 1 公尺數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，後續大量被應用於大規模崩塌潛勢區之特徵判釋。隨著近年來，無人飛行載具的蓬勃發展，其具備機動性高、航高低且負載力提升等特點，使小範圍之崩塌區或崩塌潛勢區域相較於空載光達能有更高效率、高頻率進行調查，且空載光達受限於作業方式在林區掃描之點雲經處理所得之地面點有限，常導致數值地形模型之分類

[1] 台灣省測量技師公會  
Taiwan Professional Surveying Engineers Association, TPSEA

[2] 農業部農村發展及水土保持署  
Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA

[3] 翔隆航太股份有限公司  
Dragonfly Unmanned Aircraft Systems Co., Ltd.

\* Corresponding Author. E-mail: jallyjuice.survey@gmail.com

錯誤或失真。結合輕量化光達之發展,無人機光達成為快速取得空間資訊之新興技術,由於現階段可能收限於任務風險、及設備成本等因素,國內相關文獻較少,為了解無人機光達測繪成果精度,於本研究區執行無人機光達掃描檢核,其誤差分布情形以供後續參考。

## 二、研究區

### 1. 嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林)

嘉義縣梅山鄉幼葉林劃定之大規模崩塌潛勢區面積約 120 公頃,位於生毛樹溪上游集水區(圖 1),溪谷陡坡面上之溝狀蝕溝發達,主要保全對象位於大規模崩區範圍內,包括瑞里國小以及沿縣道 166 線之住宅及觀光民宿。

### 2. 嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野)

嘉義縣阿里山鄉樂野大規模崩塌潛勢區面積約為 124 公頃,位於阿里山公路與 169 縣道交會,屬曾文溪流流域之隙頂子集水區,沖蝕溝及野溪南向匯流至曾文溪水系中,包含南側有一潛勢溪流嘉縣 DF044(圖 2), 主要保全對象為樂野部落、茶園、景觀休憩園區、觀光旅宿設施以及阿里山公路和產業道路等。

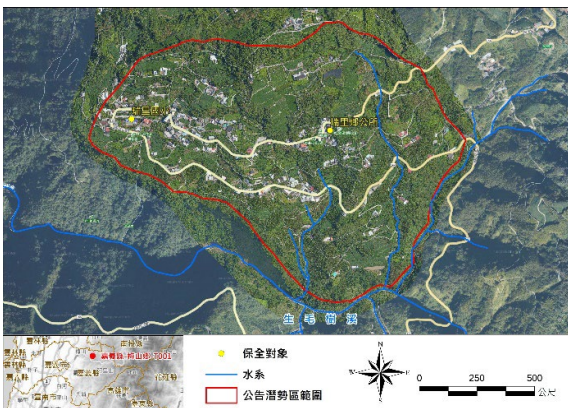


圖 1 嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林) 地理位置圖

Fig.1 Location of Chiayi County-Meishan Township-T001(Youyelin)

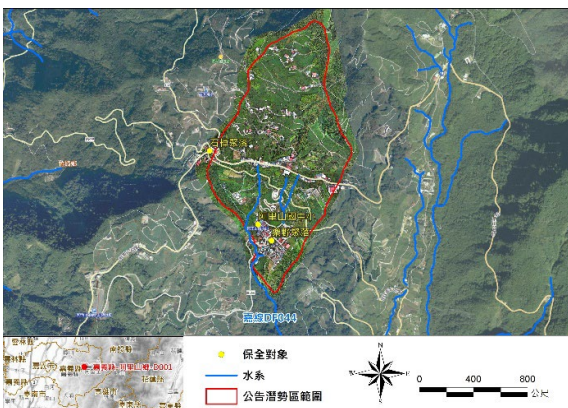


圖 2 嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野) 地理位置圖

Fig.2 Location of Chiayi County-Alishan Township-D001(Leye)

## 三、研究方法

### 1. 無人機光達作業流程

無人機光達測量作業自規劃、控制點量測、雷射掃描資料收集、點雲解算、平差校正等處理,作業流程如圖 3 所示。

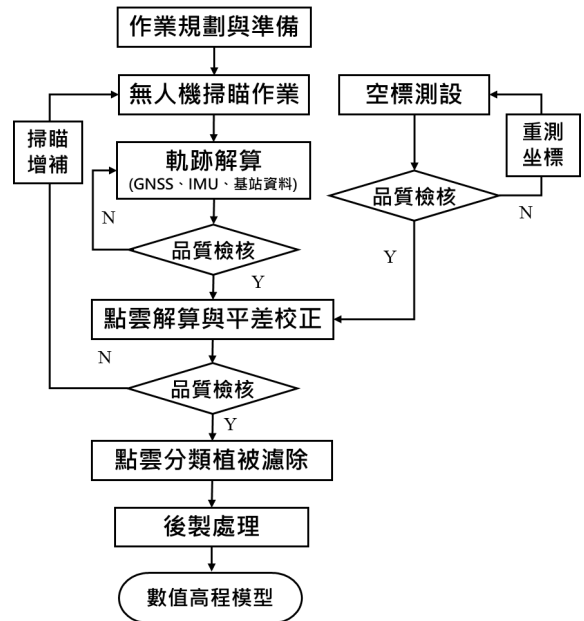


圖 3 無人機光達測量作業流程圖

Fig.3 Workflow of UAV-LiDAR survey

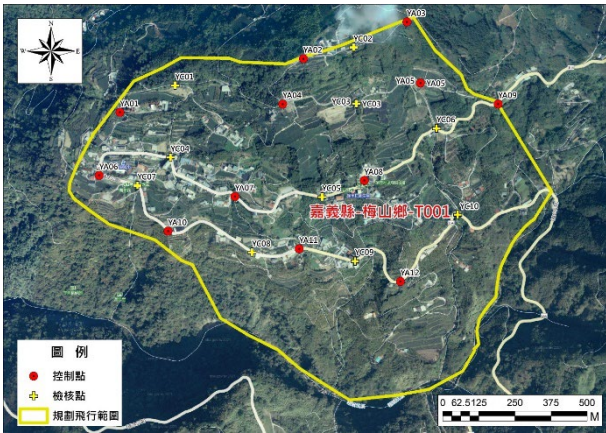
### 2. 光達測量標控制點 (檢核點) 佈設量測

#### (1) 光達測量標分布

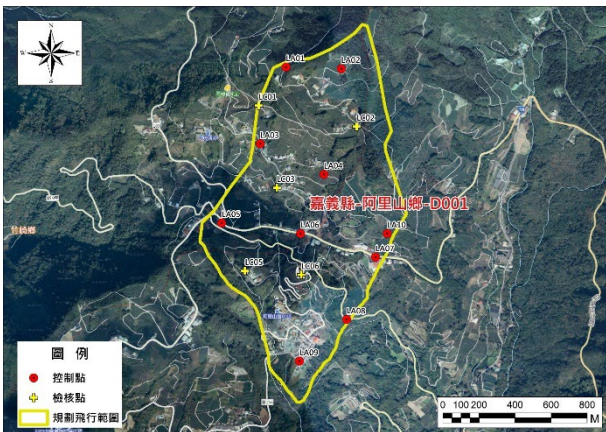
光達測量標分布規畫以將測區包覆及均勻分布為原則,至少間距 500 公尺一處,實際情況再依現地地形、交通、透空度等狀況進行調整,本研究區位於山區受限於道路易達性,於可達之產業道路及農路逕行規劃,本研究區光達測量標地面控制點(含檢核點)實測分布圖如圖 4。

#### (2) 光達測量標測量方法

採用虛擬基準站即時衛星動態定位 (Virtual Base Station, VBS) 測量方法,透過內政部國土測繪中心建置之 e-GNSS 系統,參採內政部國土測繪中心 (2021) 「採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊」,外業觀測準則包含衛星 PDOP(position dilution of precision 精度衰減因子) 應小於 10,衛星資料接收仰角  $\geq 15$  度,觀測資料記錄速率 1Hz。檢測標準為:觀測至少 2 測回,各測回觀測資料筆數應達 180 筆固定 (Fixed) 解,檢核兩測回坐標平面分量較差須  $\leq 20\text{mm}$ ,高程分量較差須  $\leq 50\text{mm}$ ,未通過標準則重新收測,通過檢核標準其坐標方得採用。平面坐標系統由 E-gnss2023 經過土測繪中心提供之三維坐標轉換服務轉換至內政部公告最新之 TWD97(2020),並將 GNSS 系統所測得之橢球高透過大地起伏模型轉換為正高。



(a)



(b)

圖 4 光達測量標實測位置圖 (a) 嘉義縣梅山鄉幼葉林；(b) 嘉義縣阿里山鄉樂野

Fig.4 Distribution of UAV LiDAR Ground Control Marks : (a) Youyelin in Meishan Township, Chiayi County ; (b) Leye in Alishan Township, Chiayi County

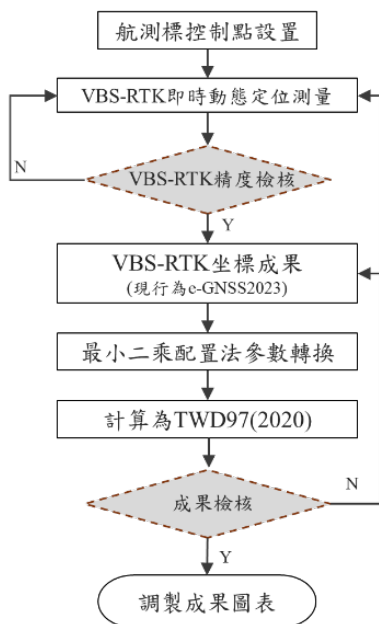


圖 5 VBS-RTK 定位測量流程圖

Fig.5 Workflow of VBS-RTK survey



圖 6 VBS-RTK 定位測量現場作業

Fig.6 Field operations of VBS-RTK survey

### 3. 無人機光達掃描規劃與資料獲取

- (1) 採用設備：光達 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 以雷射波脈衝進行掃描，記錄各反射訊號回波值，藉以求出反射訊號之距離，搭配飛行載具上之 GNSS 及掃描儀上之 IMU，以動態定位方式求得姿態參數，並獲取掃描點位之三維坐標。本研究無人機光達採用 Greenvalley LiAir X3-H 無人機光達設備 (表 1)，此為三回波型的光達，慣性測量單元 (Inertial measurement unit, 簡稱 IMU) 之規格如表 2。
- (2) 航線規劃：採用專業航線規劃軟體，設定任務執行參數包含脈衝重複率、點雲密度以及飛航速度等。航線規劃航高、航帶寬度、航帶側向重疊率，設計出航線間距、數目、起終點，此外還需考慮天氣與區域環境因素，將脈衝重複率、航高與視野 (FOV) 進行部分的調整。本研究區航線規劃為交叉航線，乃考量植被生長方向不同、原始點雲密度提升，增強全區平差時之幾何強度等，但非所有任務皆必要。
- (3) 航帶側向重疊率：考量山區側風影響，本研究航帶側向重疊率設定 50%，一般來說，若保持良好對地航高，5%之重疊率即可，國際間亦有使用 50%航帶重疊率者，其原因包含、提升全區平差之幾何條件等，如航空站區光達作業要求 (何心瑜等, 2007)。
- (4) 點雲密度與飛航設定：掃描點雲密度與距離、載具飛航速度有關，規劃無人機掃描仿地航高為 80 公尺，飛航速度為 5 m/s，原始點雲密度至少達 300 點/平方公尺。
- (5) GNSS 基站設置：將 GNSS 定位儀架設於本沿就區航測標控制點，於無人機光達掃描同時接收基站靜態觀測資訊，作為後續軌跡解算之參考站。

### 4. 無人機光達掃描資料處理

- (1) 軌跡解算與檢核：將 GNSS 基站資料與無人機定向定位資料 (position and orientation system, POS) 匯入 Navlab 軌跡軟體進行解算，以衛星動態相對定位原理求解載具高精度軌跡定向定位資料資訊。軌跡定向定位資料解算時，應檢核軌跡精度報表，包含衛星幾何分布之位置精度因子 PDOP 值、三軸定位定向精度... 等。
- (2) 點雲資料解算：將 POS 軌跡資料匯入點雲處理軟體 LiDARsnap 中，與掃描頭至測點之距離觀測量、水平

與垂直方向角資訊結合, 解算並產生點雲三維坐標資訊 (圖 8)。

跡由於飛航當下之衛星訊號條件差異, 航帶間可能存在可能錯位或誤差, 進行軌跡平差校正使點雲相對誤差減小, 再由航測標控制點校正絕對位置。

(3) 點雲軌跡平差校正 (Trajectory Alignment) : 各航帶軌

表 1 無人機光達(Greenvalley LiAir X3-H)規格

Table 1 Specification of UAV-LiDAR

儀器照片	項目	規格
	廠牌/型號	Greenvalley LiAir X3-H
	儀器重量	1.25公斤
	作業高度(AGL)	120公尺
	測量距離	190m @10% 反射率 450m @ 80% 反射率
	垂直視角	4.5°
	水平視角	70.4°
	作業溫度	-20°~+50° C
	精密度(Precision)	5cm
	典型作業速度	5~10m/s
	點頻率	720,000 points/s

表 2 無人機光達慣性測量單元(IMU)規格

Table 2 Specification of inertial measurement Unit

GNSS系統	GPS、GLONASS、BeiDou	航向精度(heading)	0.038°
姿態精度(roll & pitch)	0.008°	IMU 接收頻率	200HZ

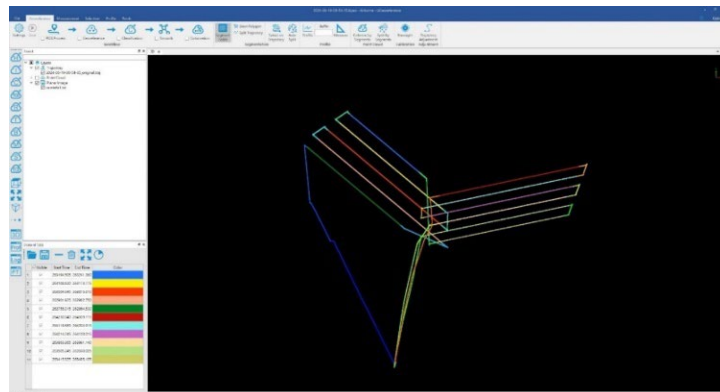


圖 7 無人機光達軌跡解算

Fig.7 Trajectory process of UAV-LiDAR

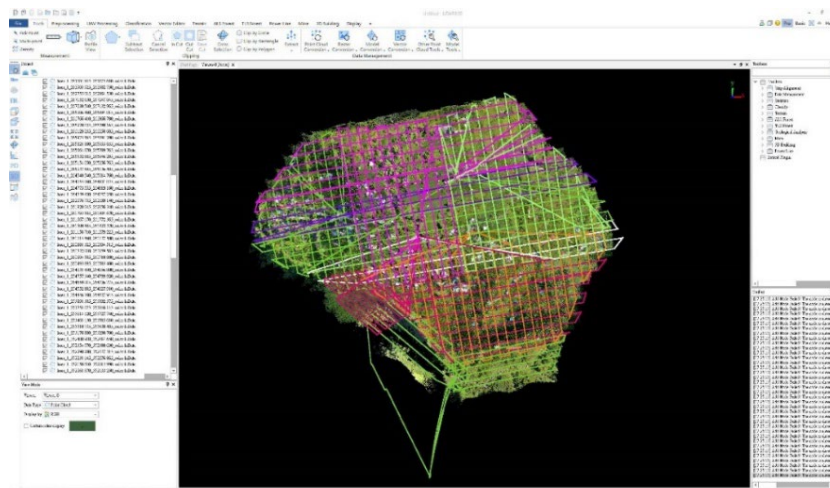


圖 8 無人機光達點雲解算

Fig.8 Computation of point cloud of UAV-LiDAR

## 四、結果與討論

### 1. 點雲航帶平差結果

相鄰航帶重疊區經前述之平差修正，各架次航帶平差前後均方根誤差 (root-mean-square error, RMSE) 如表 3 所示，平差後均方根誤差 2.9~4.9 公分。

### 2. 點雲絕對誤差

本研究使用反射強度較高之路線漆標記航測標，點雲完成航帶軌跡平差後，於軟體中加入航標控制點坐標，並透過其高反射強度 (Intensity) 顯示及搭配真實色彩點雲，標示點雲航測標中心，進行點雲校與坐標轉換。再由檢核點進行點雲坐標檢核，如表 4、表 5，結果顯示研究區嘉義縣-梅山鄉-T001 檢核點 N、E、H 方向均方根誤差分別為 10.37、10.46、5.47 公分，嘉義縣-阿里山鄉-D001 檢核點 N、E、H 方向均方根誤差分別為 2.98、5.97、6.23 公分。可發現嘉義縣-阿里

山鄉-D001 水平誤差相對於嘉義縣-梅山鄉-T001 小約 4.5 公分以上，主要與航標之尺寸與反射強度有關，嘉義縣-阿里山鄉-D001 布標時參考前次梅山鄉經驗，航測標尺寸由 50×50 公分加大為 60×60 公分，並改採用路線漆，航測標改良前後如圖 8 所示，由於改良後提高了辨識度，使檢核點水平誤差縮小，航測標改善後樂野研究區水平 RMS 為 6.68 公分、高程 RMS 為 6.23 公分。

### 3. 點雲相對精密度(precision)

「精密度 (precision)」為觀測值相互間之關係 (史天元, 2013)，在點雲之表現為點雲離散的區間，為呈現無人機光達點雲精密度，於掃瞄作業區選擇局部採用精密度為 5mm 之地面式光達 Rigel VZ-1000，於道路量測機具可及之處進行掃描，作為無人機光達掃描成果比對。剖面比對如圖 8，本研究採用之無人機光達點雲成果精密度分布於+5 公分左右。

表 3 點雲航帶平差後誤差

Table 3 RMSE of point cloud after alignment

嘉義縣-梅山鄉-T001 架次	Before Alignment	After Alignment	嘉義縣-阿里山鄉-D001 架次	Before Alignment	After Alignment
	RMSE(m)	RMSE(m)		RMSE(m)	RMSE(m)
2024-06-19-00-54-35-H	0.062	0.049	P1-A-2024-10-09-04-23-24	0.041	0.029
2024-06-19-06-13-51-H	0.055	0.040	P1-A-2024-10-10-02-54-54	0.053	0.040
2024-06-24-22-14-49-H	0.045	0.035	P1-A-2024-10-15-00-46-08	0.054	0.042
2024-06-24-23-09-48-H	0.039	0.029	P1-B-2024-10-10-03-57-37	0.049	0.038
2024-06-25-00-25-05-H	0.040	0.029	P1-B-2024-10-10-04-22-00	0.048	0.036
2024-06-25-01-05-16-H	0.039	0.028	P1-B-2024-10-15-01-24-48	0.053	0.038
2024-06-25-01-27-01-H	0.050	0.031	P2-A-2024-10-08-01-32-10	0.046	0.036
2024-06-25-22-16-12-V	0.035	0.027	P2-B-2024-10-08-02-52-17	0.050	0.038
2024-06-26-00-17-35-V	0.045	0.031	P3-A-2024-10-10-00-58-23	0.051	0.038
2024-06-26-01-17-13-V	0.042	0.033	P3-A-2024-10-10-01-53-31	0.045	0.036
2024-06-27-01-05-15-V	0.047	0.033	P3-B-2024-10-14-22-33-15	0.054	0.040
-	-	-	P4-A-2024-10-09-00-27-42	0.047	0.034
-	-	-	P4-B-2024-10-09-01-09-21	0.046	0.032

表 4 無人機光達點雲檢核點誤差表：嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林)

Table 4 Check Point Error of UAV-LiDAR at Chiayi County-Meishan Township-T001(You-Ye-Lin)

點號	控制點量測(單位：M)			UAV-LiDAR			誤差 (單位：cm)			
	縱坐標 (N)	橫坐標 (E)	正高 (H)	縱坐標 (N)	橫坐標 (E)	正高 (H)	N-error	E-error	horizontal error	vertical error
YC01	2604367.993	216016.968	1093.261	2604368.078	216017.025	1093.197	8.50	5.75	10.26	6.40
YC02	2604500.412	216635.133	1178.071	2604500.455	216635.255	1178.129	4.35	12.25	13.00	5.80
YC03	2604305.318	216644.62	1107.273	2604305.242	216644.531	1107.245	7.60	8.90	11.70	2.75
YC04	2604119.143	216000.878	1041.291	2604119.153	216000.917	1041.229	1.00	3.95	4.07	6.20
YC05	2603981.859	216525.663	1036.896	2603981.924	216525.582	1036.869	6.55	8.05	10.38	2.70
YC06	2604219.498	216922.697	1057.166	2604219.594	216922.897	1057.143	9.65	20.00	22.21	2.30
YC07	2604021.797	215886.31	1023.686	2604021.9	215886.454	1023.678	10.30	14.40	17.70	0.75
YC08	2603790.380	216282.849	986.120	2603790.559	216282.774	986.025	17.95	7.50	19.45	9.45
YC09	2603760.151	216640.007	969.186	2603760.32	216639.916	969.213	16.90	9.05	19.17	2.75
YC10	2603921.125	216995.958	967.249	2603921.212	216995.934	967.166	8.70	2.35	9.01	8.30
控制點	平均誤差						9.15	9.22	13.70	4.74
	均方根誤差(RMSE)						10.37	10.46	14.73	5.47

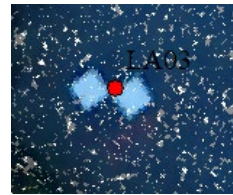
表 5 無人機光達點雲檢核點誤差表：嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野)

Table 5 Check Point Error of UAV-LiDAR at Chiayi County-Alishan Township-D001(Leye)

點號	控制點量測(單位：M)			UAV-LiDAR			誤差(單位：cm)			
	縱坐標(N)	橫坐標(E)	正高(H)	縱坐標(N)	橫坐標(E)	正高(H)	N-error	E-error	horizontal error	vertical error
LC01	2597332.755	219385.764	1480.47	2597332.724	219385.681	1480.459	3.10	8.30	8.86	1.10
LC02a	2597218.012	219931.88	1525.96	2597217.97	219931.858	1525.938	4.20	2.20	4.74	2.20
LC03	2596877.697	219486.927	1381.214	2596877.713	219486.939	1381.184	1.60	1.20	2.00	2.95
LC05	2596416.838	219309.681	1215.558	2596416.804	219309.605	1215.542	3.35	7.60	8.31	1.60
LC06	2596395.212	219622.281	1250.49	2596395.23	219622.348	1250.623	1.85	6.75	7.00	13.30
檢核點誤差	平均誤差						2.82	5.21	6.18	4.23
	均方根誤差(RMSE)						2.98	5.97	6.68	6.23



改良前：嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林)



改良後：嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野)

圖 9 光達測量在點雲中標辨識差異

Fig.9 Identification Difference of UAV LiDAR ground control marks in pointcloud

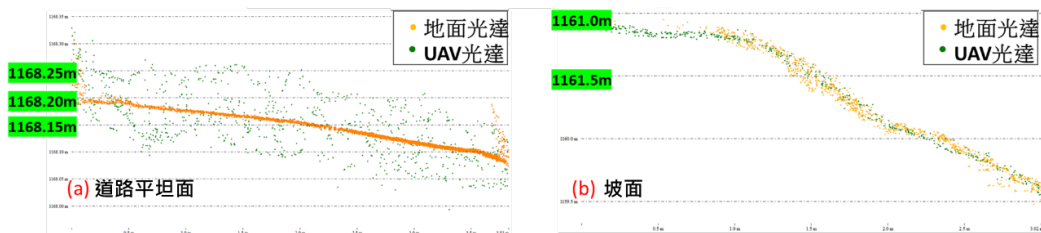


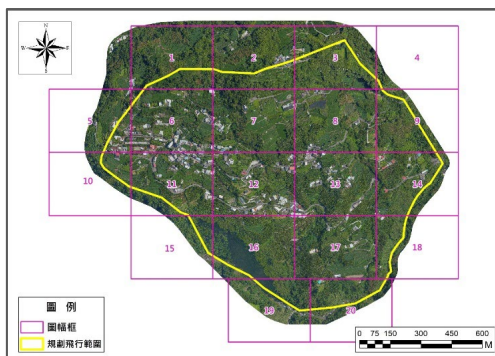
圖 10 本研究採用之無人機光達點雲精密度

Fig.10 precision of UAV LiDAR pointcloud in this study

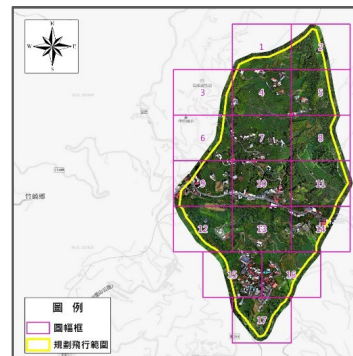
#### 4.點雲密度

掃描點雲密度與距離、載具飛航速度、雷射脈衝點頻率、重疊率有關。點雲為地表、地物不連續點組成，故點雲密度亦影響地物、航測標之精度，由於地上物及植被覆蓋率不相同，點雲在分類處理後地面點回波率（部分文獻稱為穿透率）表現不一，本計畫各測區地貌多樣，故本計畫以分幅統計全部點雲/地面點雲數量，圖幅接合表如圖 11，其中植被覆蓋

面積約超過 70%者列為密林類別計算，各測區點雲數量與地面點比例如表 6、表 7。嘉義縣-梅山鄉-T001 所有回波點雲密度為 2,374 pts/M<sup>2</sup>，地面點密度全區為 83 pts/M<sup>2</sup>、密林區則為 64 pts/M<sup>2</sup>；嘉義縣-阿里山鄉-D001 所有回波點雲密度為 3865 pts/M<sup>2</sup>，地面點密度全區為 68pts/M<sup>2</sup>、密林區則為 47 pts/M<sup>2</sup>。實際上雷射光接收到回波仍受不同物體的反射率及植被密度影響，使所有點回波數量有異，而地面點回波比例在不同林相亦有差異，值得後續深入研究。



(a)



(b)

圖 11 點雲分區圖幅接合表 (a) 嘉義縣梅山鄉幼葉林；(b) 嘉義縣阿里山鄉樂野

Fig.11 Point cloud tile index : (a) Youyelin in Meishan Township, Chiayi County ; (b)Leye in Alishan Township, Chiayi County

表 6 所有點及地面點雲密度：嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林)

Table 6 Density of pointcloud : Chiayi County-Meishan Township-T001(You-Ye-Lin)

圖框編號	所有點數量	地面點數量	是否為密林	地面點比例	面積 (平方公尺)	所有點密度 (pt/M <sup>2</sup> )	地面點密度 (pt/M <sup>2</sup> )
YYL_01	106,540,524	1,419,484	Y	1.3%	25,182	4,231	56
YYL_02	134,123,190	3,711,179	Y	2.8%	39,222	3,420	95
YYL_03	177,432,469	3,595,734	Y	2.0%	68,071	2,607	53
YYL_05	48,479,955	1,302,456	N	2.7%	17,329	2,798	75
YYL_06	222,883,557	9,009,182	N	4.0%	121,421	1,836	74
YYL_07	233,030,069	10,008,960	N	4.3%	124,000	1,879	81
YYL_08	210,147,399	8,361,266	N	4.0%	124,000	1,695	67
YYL_09	180,010,401	2,833,618	N	1.6%	58,448	3,080	48
YYL_10	53,841,553	1,056,287	N	2.0%	17,391	3,096	61
YYL_11	266,754,789	8,499,408	N	3.2%	101,594	2,626	84
YYL_12	263,646,292	10,991,562	N	4.2%	124,000	2,126	89
YYL_13	310,343,249	17,541,288	N	5.7%	124,000	2,503	141
YYL_14	231,559,585	7,961,386	N	3.4%	76,270	3,036	104
YYL_15	59,479,040	135,086	Y	0.2%	13,014	4,570	10
YYL_16	264,103,418	6,967,865	Y	2.6%	112,555	2,346	62
YYL_17	260,313,967	13,988,445	Y	5.4%	124,000	2,099	113
YYL_18	120,330,841	2,081,626	Y	1.7%	31,118	3,867	67
YYL_19	41,846,978	954,575	Y	2.3%	26,620	1,572	36
YYL_20	67,705,001	3,673,257	Y	5.4%	41,847	1,618	88
全區	3,252,572,277	114,092,664	-	3.5%	1,370,083	2,374	83
密林區總計	1,231,875,428	36,527,251	-	2.6%	481,629	2,558	64
非密林區總計	2,020,696,849	77,565,413	-	3.5%	888,454	2,274	82

表 7 所有點及地面點雲密度：嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野)

Table 7 Density of pointcloud : Chiayi County-Alishan Township-D001(Leye)

圖框編號	所有點數量	地面點數量	是否為密林	地面點比例	面積 (平方公尺)	所有點密度 (pts/m <sup>2</sup> )	地面點密度 (pts/m <sup>2</sup> )
LeYe_01	102,888,814	3,500,546	N	3.4%	33,282	3,091	105
LeYe_02	131,869,956	2,532,417	Y	1.9%	47,419	2,781	53
LeYe_03	38,125,674	5,058,396	N	13.3%	8,288	4,600	610
LeYe_04	342,358,927	11,406,509	N	3.3%	122,710	2,790	93
LeYe_05	261,910,778	3,579,569	Y	1.4%	82,398	3,179	43
LeYe_06	140,761,341	4,293,884	N	3.1%	29,720	4,736	144
LeYe_07	422,545,320	8,356,702	N	2.0%	124,000	3,408	67
LeYe_08	441,995,523	3,576,333	Y	0.8%	91,496	4,831	39
LeYe_09	320,011,013	6,523,278	N	2.0%	90,642	3,531	72
LeYe_10	429,227,274	5,922,378	N	1.4%	124,000	3,462	48
LeYe_11	470,326,786	6,844,929	N	1.5%	108,592	4,331	63
LeYe_12	289,915,860	3,607,720	N	1.2%	76,112	3,809	47
LeYe_13	538,798,913	4,682,239	N	0.9%	124,000	4,345	38
LeYe_14	324,690,622	6,282,015	N	1.9%	70,487	4,606	89
LeYe_15	319,732,244	5,130,214	N	1.6%	68,932	4,638	74
LeYe_16	326,889,074	5,698,268	N	1.7%	79,081	4,134	72
LeYe_17	254,553,564	3,085,842	Y	1.2%	53,031	4,800	58
全區	5,156,601,683	90,081,239	N	1.7%	1,334,188	3,865	68
密林區總計	1,090,329,821	12,774,161	-	1.2%	274,343	3,974	47
非密林區總計	9,222,873,545	167,388,317	-	1.8%	2,394,033	3,852	70

### 5. 數值地形模型建置

由無人機光達掃描作業經點雲分類作業, 包含軟體自動分類及人工分類與檢核等程序, 濾除地上點等輸出地面點 (即不包含植被、建物之陸面高程點), 地面點雲建置 0.2 公

尺數值高程模型 (DEM), 而未濾除地上物之點雲建置為數值地表模型 (DSM), 將數值地表模型 (DSM)、數值高程模型 (DEM) 成果以日照陰影圖呈現, 二者之差異分析即為即樹冠高度模型 (Canopy Height Model, CHM) 如表 8、表 9 所示。

表 8 無人機光達建置之 DEM 與 DSM 差異分析：嘉義縣-梅山鄉-T001(幼葉林)

Table 8 Difference between DEM and DSM derived from UAV LiDAR : Chiayi County-Meishan Township-T001(You-Ye-Lin)

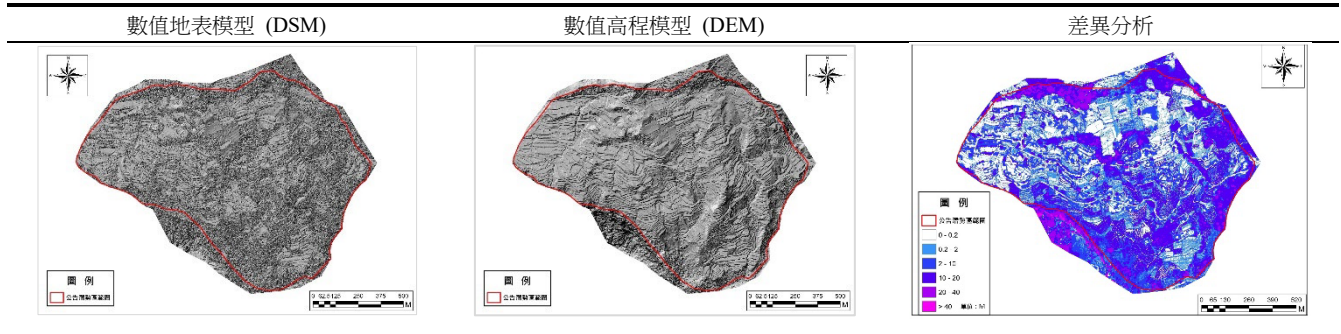
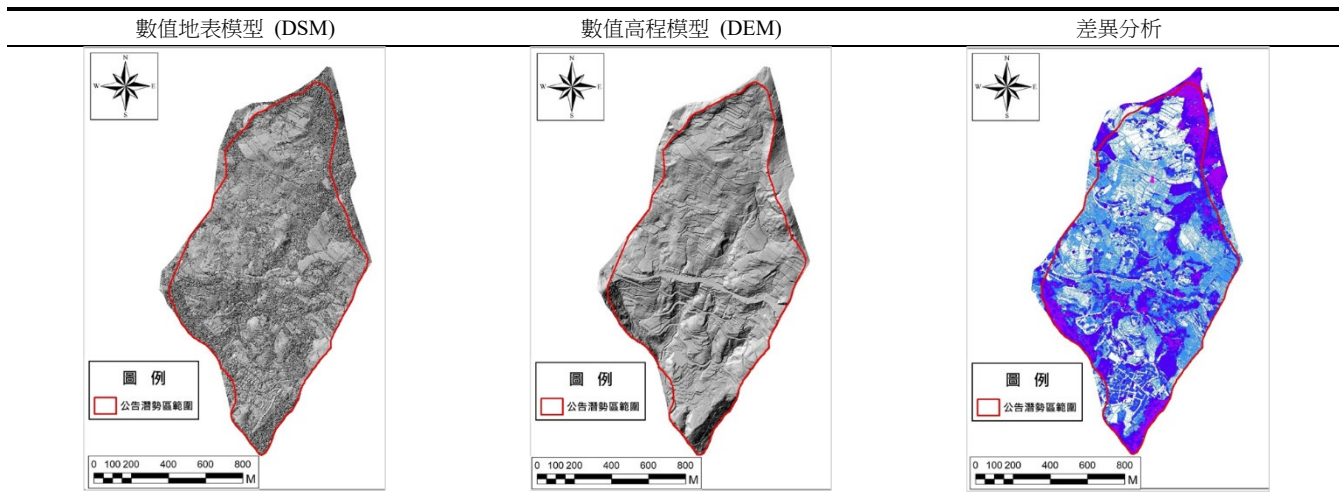


表 9 無人機光達建置之 DEM 與 DSM 差異分析：嘉義縣-阿里山鄉-D001(樂野)

Table 9 Difference between DEM and DSM derived from UAV LiDAR : Chiayi County-Alishan Township-D001(Leye)



## 五、結 論

大規模崩塌區及山區地形測量, 由人員可及之範圍以地面測量方法進行資料獲取不易, 透過無人機飛行載具搭載光達, 可節省人員現地作業時間外, 亦可執行人員、道路無法到達之邊坡區域掃描, 應為山區地形測量工具良好之選擇, 隨著無人飛行載具的蓬勃發展, 結合輕量化之光達其使用將逐步普及, 應了解其誤差分布以利於後續應用。

### 1. 相對誤差

本研究應用無人機光達 LiAir X3-H 以對地航高 80 公尺、側向重疊率大於 50%、交叉航線等規劃進行掃描, 航線平差後之均方根誤差 (RMSE) 分布於 2.9~4.0 公分; 以精密度 (Precision) 為 5 mm 之地面式光達點雲比對, 本研究採用之無人機光達設備點雲成果精密度分布於+5 公分。

### 2. 絕對誤差

絕對誤差影響後續分析之容許誤差, 如位移分析、前後期地形模型比對等。本研究 VBS-RTK 定位測量航標檢核點坐標與點雲坐標進行比對, 以樂野研究區為代表水平 RMS 為 6.68 公分、高程 RMS 為 6.23 公分, 幼葉林研究區高程 RMS 為 5.47 公分。

### 3. 影響誤差因素

包含設備本身精密度、點雲航帶平差品質 (即航帶間平差誤差分布), 航測標測量方法本身誤差、航測標辨識中心之誤差 (如航標尺寸及材料反射強度等), 及光達點頻率與實行計畫所產生之點雲密度等。無人機光達之點雲誤差分布情形可供後續資料應用、多期比對、分析等了解其研究對象之適用範圍。

## 誌 謝

本研究調查資料為農業部農村發展及水土保持署「113年南部地區無人機光達拍攝及圖層產製」計畫，在此感謝農業部農村發展及水土保持署減災監測組及陶林數值測量工程有限公司執行資料提供。

## 參考文獻

- [1] 史天元 (2013), 「準確度與精密度」, 地籍測量, 中華民國地籍測量學會會刊, 32(3), 18-26。(Shih, T.Y. (2013). "Accuracy and Precision." *Journal of Cadastral Survey*, 32(3), 18-26. (in Chinese))
- [2] 王星為、江晉霆、彭德熙、鄭鈺雯、余翠紋、陳立邦、謝有忠、費立沅、張國楨 (2019), 「Rigel VUX-1 無人機光達點雲資料處理及精度評估。中國土木工程學刊, 31(1), 29-39」。(Wang, H.W., Chiang, C.T., Peng, T.H., Cheng, Y.W., Yu, C.W., Chen, L.B., Hsieh, Y.C., Fei, L.Y., and Chang, K.J. (2019). "Rigel VUX-1 UAS LiDAR point cloud processing and data assessment." *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 31(1), 29-39. (in Chinese))
- [3] 內政部國土測繪中心 (2021) 「採用電子化全球衛星即時動態定位系統辦理控制測量作業手冊」。(National Land Surveying and Mapping Center (2021). "Standard operation manual for control survey using the E\electronic global satellite real-time dynamic positioning system." 6-8. (in Chinese))
- [4] 何心瑜、史天元 (2007), 空載光達作業及品質管流之研究, 航測及遙測學刊, 12(2), 165-177。(Ho, H.Y., and Shih, T.Y. "The Production Flow and Quality Control of Digital Elevation Model with Airborne LiDAR." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 12(2), 165-177. (in Chinese))
- [5] 何岱杰、張維恕、林慶偉、劉守恆 (2014), 應用數值地形及光學影像於潛在大規模崩塌地形特徵判釋, 航測及遙測學刊, 18(2), 109-127。(Ho, D.J., Chang, W.S., Lin, C.W., and Liu, S.H. "Topographic Characteristics Interpretation of Potential Deep-Seated Landslides from Digital Elevation and Remote Sensing Images." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 18(2), 109-127. (in Chinese))

2025 年 07 月 06 日 收稿

2025 年 12 月 02 日 修正

2025 年 12 月 25 日 接受