

結合 UAV 與 Mobile LiDAR 等各式測量技術 應用於快速 3D 影像展示之研究

黃立信^{1*} 黃騰輝²

¹國防大學理工學院環境資訊與工程學系

²憲兵訓練中心教學研究組

摘 要

本研究首先針對無人飛行載具系統(Unmanned Aerial Vehicle System, UAS)所獲取的影像資料處理，輔以全球導航衛星系統(Global Navigation Satellites System, GNSS)之快速靜態觀測為參考，利用車載光達(Mobile LiDAR)與虛擬基準站即時動態定位技術(electronic-Global Navigation Satellites System, e-GNSS)兩種測繪技術做為檢核控制，且進行幾何高差之精度比較分析，藉以探討無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)影像高程於不同區域之差異性，期能快速獲得大面積幾何高程數據，並提升觀測成果精度。其次結合上述數值測量技術，快速將研究區域內之平面影像以三維(Three-Dimensional, 3D)形式立體化展示，提供 3D 立體空間訊息。

本研究透過 Mobile LiDAR、e-GNSS、GNSS 及 UAV 等測量技術實施高程資料的分析比較與檢核，驗證 Mobile LiDAR 法於測量作業的實用性，並利用 3ds Max 通用軟體中的兩種方法，製作 3D 模型及影像紋理貼圖，於 25-29 小時內快速展示 3D 圖台，其成果均具備 LOD2 的層級。

關鍵詞：無人飛行載具系統，快速靜態 GNSS，車載光達，e-GNSS，三維建模

Integration UAV and Mobile LiDAR of Surveying Techniques for Rapid 3D Mapping and Representation

Lih-Shinn Hwang^{1*}, and Teng-Hui Huang²

¹ Department of Environmental Information and Engineering,
Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University

² Military Police Training Center, Teaching Research Group

ABSTRACT

This research, primarily, is about image processing of air photos acquired from UAS (Unmanned Aerial Vehicle System), technology of rapid static GNSS(Global Navigation Satellites System) technology as reference, using Mobile LiDAR and e-GNSS (electronic-Global Navigation Satellites System) for controlling recognition and analysis of geometric heights precision in the imagery. Moreover, by investigating the geospatial differences of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) imagery heights in various areas in order to quickly obtain geometric elevation data in large areas and improve the accuracy of observation results. Secondly, combined with the results from the above digital surveying techniques, the 2D imagery can be rapidly transformed and represented as 3D geospatial information in the study areas.

In this research, Mobile LiDAR, e-GNSS, GNSS and UAV methods were applied to analysis and comparison of elevation data. It is confirmed that Mobile LiDAR method is a practical tool in surveying operations with combination of UAV technology. Because of two methods in 3ds Max used, 3D modeling and image texture mapping can in 25-29 hours quickly display the 3D graphics and the achievement has the grade of LOD2.

Keywords: UAS, Rapid Static GNSS, Mobile LiDAR, e-GNSS, 3D Modeling

文稿收件日期 106.10.18; 文稿修正後接受日期 107.5.4;*通訊作者

Manuscript received October 18, 2017; revised May 4, 2018;* Corresponding author

一、緒 論

1.1 研究動機與目的

空間科學領域近年來以無人飛行載具系統(Unmanned Aerial Vehicle System, UAS)與光達(Light Detection And Ranging, Lidar)等測量技術最為蓬勃發展，共通特性為可大量且快速的獲得大範圍的地理空間資訊，有效提供給需求單位，惟為提高系統精度，仍需較高精度的點位資料來約制；一般UAS作業常需使用內政部公告的控制點，而實際情況常因點位數不足，且無法形成三角包圍，導致需至現地另作實測點位外業，非常耗時耗力，故本研究針對車載光達(Mobile LiDAR)與虛擬基準站即時動態定位技術(electronic-Global Navigation Satellites System, e-GNSS)兩種測量技術，對單人攜帶方便之小型無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)所獲取之影像數據進行約制檢核，另輔以全球導航衛星系統(Global Navigation Satellites System, GNSS)快速靜態，實施幾何高差之精度比對分析，並將其結果融合影像資料內，期能快速獲得大面積且高精度之UAV影像資料，以提供快速三維(Three-Dimensional, 3D)立體化展示之參考。

1.2 研究流程

本研究之資料獲得與處理流程圖如圖1所示。

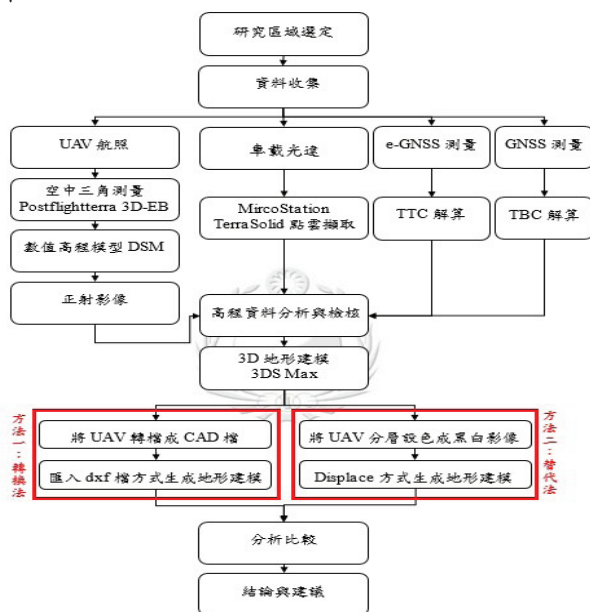


圖1. 實驗研究流程圖

二、基礎理論

2.1 GNSS 介紹

全球導航衛星定位系統(GNSS)含括美國 GPS、俄羅斯 GLONASS 及歐洲伽利略(Galileo)，因 Galileo 衛星系統未完善目前尚啟用，而 GLONASS 系統之組成和服務內容上和 GPS 系統相似，定位原理也大致相同，惟兩種系統間仍存在著差異性，如表 1 所示，可知兩種系統間僅 L1 及 L2 兩個載波頻道無差異存在，因此 GNSS 系統乃是透過 GLONASS 系統的觀測量來提升 GPS 系統的定位精度與可靠度，而結合兩種系統的 GNSS 系統具有增加衛星訊號的觀測量、顯著增加可視衛星的空間分佈、降低水平和垂直坐標的精度衰減因子 DOP 值及減少觀測所需的時間等優勢[1,2]。

表 1. GPS 系統與 GLONASS 系統架構差異

導航系統	GPS	GLONASS
衛星數目	32	24
軌道面	6 (軌道間相距 60°)	3 (軌道間相距 120°)
每個軌道上的衛星數	5 (非均勻分布)	8 (均勻分布)
軌道傾角	55°	64.8°
衛星高度	20,200 公里	19,100 公里
衛星軌道半長軸	26,560 公里	25,510 公里
衛星週期	11 時 58 分 00 秒	11 時 15 分 40 秒
地面追蹤重複週期	1 個恆星日	8 個恆星日
訊號型式	CDMA (碼分多址)	FDMA (頻分多址)
坐標系統	WGS84	PZ90
時間系統	UTC (USNO)	UTC (SU)
載波頻率	L1:1575.42 MHz	L1:1602+0.5625 q MHz
	L2:1227.60 MHz	L2:1246+0.4375 q MHz
	L5:1176.45 MHz	$q = -7 \sim 24$
編碼	L1:CA-Code L1&L2:P-Code	L1:CA-Code L1&L2:P-Code
廣播軌道參數	克卜勒六軌道參數 (每小時)	衛星位置、速度、加速 (每 30 分鐘)
涵蓋範圍	中、低緯度地區	高緯度地區

2.2 e-GNSS 介紹

內政部國土測繪中心自民國 93 年度起採用先進的虛擬基準站即時動態定位技術(Virtual Base Station Real-Time Kinematic, VBS RTK)，於民國 97 年度完成建置「電子化全球衛星即時動態定位系統(簡稱 e-GPS 即時動態定位系統)」與測試分析作業。透過即時傳輸建置於全國各地之衛星定位基準站每天 24 小時每 1 秒之連續性

衛星觀測資料，即時傳回控制及計算中心，進行資料自動化處理後，在任何地點且極短的時間內，依使用者需求可獲得到公分級高精度的即時動態定位成果。

民國 102 年至 103 年進行系統現代化升級作業，逐步將軟硬體升級為雙星系統 (GPS+GLONASS)，並定於民國 103 年 7 月 1 日正式更新臺灣本島地區基準站名稱為 e-GNSS[3]，圖 2 是 e-GNSS 定位技術進行即時性動態定位實際運作可分為為四大部分。

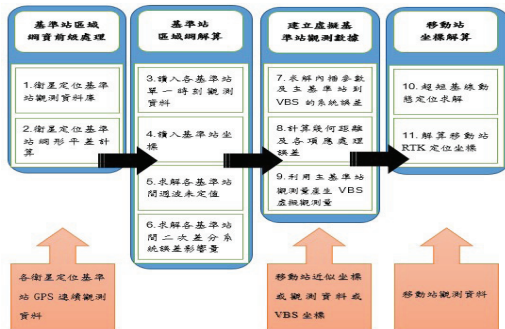


圖 2. e-GNSS 即時動態定位技術解算流程圖

2.3 Mobile LiDAR 介紹

光達最基本的原理，乃是計算雷射碰到測點時反射回到感應接收裝置之往返飛行時間，即距離 $R = (C \times T) / 2$ ，如圖 3 所示[4]。

Mobile LiDAR 乃是在移動的載具上結合了雷射掃描器 (Laser Scanner)、全球導航衛星定位系統 (GNSS)、慣性導航系統 (IMU)、輪速計 (Odometer) 及數位相機 (Digital Camera) 等設備，如圖 4 所示[5]，可沿行徑路線蒐集地物高精度點雲資料，提供豐富的車行軌跡側面地形點雲資料，其成果精度同樣取決於載具之 GPS 定位精度，但其施測範圍為僅 200 公尺以內，因此測量側面地形點雲精度能達到 5 公分以內，且其點雲密度遠高於空載光達移動測繪成果[6]。

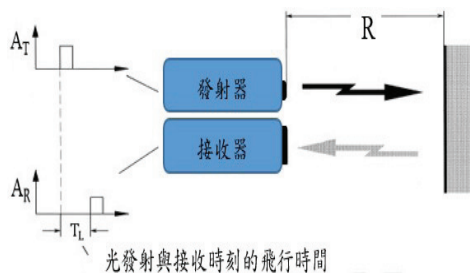


圖 3. 雷射測距原理示意圖

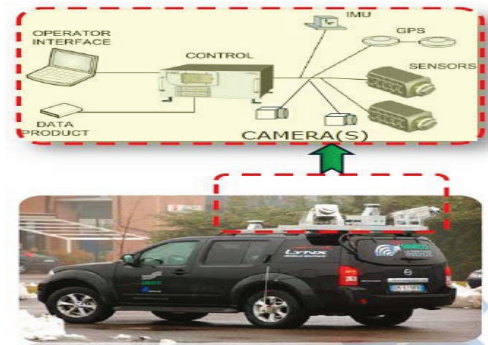


圖 4. 車載光達組合單元示意圖

2.4 UAS 介紹

UAS 主要由無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 構成，可搭載全球定位系統 (GPS)、慣性導航系統 (Inertial Measurement Unit, IMU) 及微型的飛控電腦等設備，進行半自動或全自動導航飛行，飛行時除了空中的 UAV 外，尚可搭配固定的地面控制站、移動式的地面控制車或攜帶式的控制器，利用高頻無線通訊系統即時地監控飛行狀態，如圖 5 所示[7]。

UAV 航拍獲得之影像資料透過自率光束法空三平差計算將可提高精度，尤其以高程精度最為顯著[8]，而自率光束法又稱附加參數的光束法平差，是由解析空三平差—共線式[9]的理論發展而來，共線式空間關係圖如圖 6 所示，最早應用於近景攝影測量，主要的附加參數為透鏡的輻射畸變差與離心畸變差，可提升測量平差的精度[8]，目前在空三平差中有廣泛的應用，加入附加參數後，共線式改寫成式 1， Δx 、 Δy 為相片坐標需改正的系統誤差及透鏡畸變差[10]。



圖 5. 無人航空系統(UAS)的基本組成

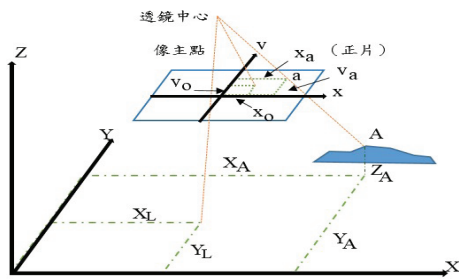


圖 6. 共線式空間關係圖



圖 7. 本文研究區域(理工學院第 I 區；大溪河谷第 II 區)

3.2 測量設備與建模軟體

3.2.1 GNSS 與 e-GNSS

GNSS 靜態觀測分別使用 SOKKIA GSR2700 ISX、LEICA GS15 及 LEICA GS08 GNSS 等三種衛星接收儀；e-GNSS 使用儀器為 Leica ATX1230-GG 接收儀，如表 2 所示。

表 2. 各型接收儀性能規格

型號		定位精度	通道數	啟動時間	防水性能	防震性能
SOKKIA GSR2700 ISX	RTK	平面：10 公厘 +1ppm 高程：20 公厘 +1ppm	14L1、14L2、6L5 GPS, 12L1、12L2 GLONASS 2SBAS	50 秒 / 0.5 秒 L1, 1.0 秒 L2	IP67 級	2 米處跌落
	靜態	平面：3 公厘 +1ppm 高程：10 公厘 +1ppm				
LEICA GS15	RTK	平面：10 公厘 +1ppm 高程：20 公厘 +1ppm	GLONASS、GPS GALILEO、SBAS COMPASS	8 秒	IP67 級	2 米處跌落
	靜態	平面：3 公厘 +0.1ppm 高程：3.5 公厘 +0.4ppm				
LEICA GS08	RTK	平面：10 公厘 +1ppm 高程：20 公厘 +1ppm	72。GPS、GLONASS、SBAS	8 秒	IP67 級	2 米處跌落
	靜態	平面：3 公厘 +0.5ppm 高程：6 公厘 +0.5ppm				
Leica ATX1230-GG	RTK	平面：10 公厘 +1ppm 高程：20 公厘 +1ppm	72。GPS、GLONASS、GALILEO	8 秒	IP67 級	2 米處跌落
	靜態	平面：5 公厘 +0.5ppm 高程：10 公厘 +0.5ppm				

3.2.2 Mobile LiDAR

使用加拿大 Optech 公司於 96 年推出的 Lynx

2.5 3D 地形建模

利用電腦圖形學來建立視覺影像，幫助人們理解科學技術概念或結果的那些錯綜複雜而又往往規模龐大的數位表現形式。

電腦圖學(Computer Graphics, CG)是一種利用數學的方式轉化成二維或三維可在電腦上顯示圖形的一門科學，圖形的形成方式通常會利用點、線、面等方式來形成幾何體，同時也會搭配色彩、材質、光源等方式來描述場景，且不論電腦圖學與任何一個範疇（如圖形介面、動畫、視覺化、虛擬實境等的結合使用），都可以經由幾何模型來建置場景。

3D 視覺化的相關研究，也為當前研究中受到注目的對象，在 3D 電腦繪圖標準中的形成可以分成「資料格式標準」與「應用程式介面標準」兩類，資料格式標準是用來定義資料儲存的格式，比較著名的有 DXF、3DS、VRML 等；應用程式介面標準則是用來定義發 3D 電腦標準函式庫，針對 Windows 平台所制定的電腦繪圖標準有 DirectX 與 OpenGL 兩種常用的標準格式。

三、研究方法

3.1 研究區域介紹

本研究選定高程起伏較平坦的本院院區（國防大學理工學院）為第 I 區，面積約 3.027 平方公里；與高程起伏較大的大漢溪河谷為第 II 區，面積約 2.886 平方公里，針對

Mobile Mapper 車載光達行動測繪系統[11]，載具相關規格如表 3 所示。

表 3. 各型接收儀性能規格

掃描器(每秒點數)	2 組(各 500KHz)	
最大掃描距離	200 公尺	
旋轉鏡速度	80Hz~200Hz	
測距精度	8 公厘(1 sigma)	
絕對精度	±5 公分 (1 sigma)	
工業級相機	4 組(各 500 萬畫素)	
衛星接收儀 GPS Trimble SPS851	RTK	平面：10 公厘+1ppm 高程：20 公厘+1ppm
	靜態	平面：5 公厘+0.5ppm 高程：5 公厘+1ppm

3.2.3 UAV

用由瑞士 Sensefly 公司所製造之定翼型無人飛行載具 Sensefly eBee，如圖 8 及表 4 所示 [12,13]，使用 Canon IXUS 125 HS 數位相機，其相關參數如表 5 所示。

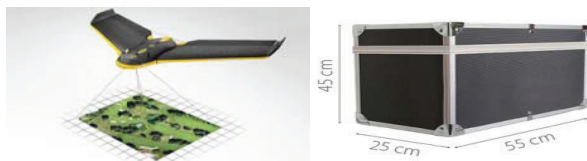


圖 8. eBee 定翼無人飛行載具及機箱尺寸圖

表 4. 各型接收儀性能規格

空機重量	630 g
翼展	0.96 m
巡航速度	10-16 m/s
工作海拔	1500 m
飛行時間*	最大 45 分鐘

表 5. Canon IXUS 125 HS 相機參數

Canon IXUS 125 HS 相機與參數		
	像素	1,610 萬像素
	快門速度	15 ~ 1/2000 秒
	焦距	24mm ~ 120mm
	光圈	f/2.7 ~ f/5.9
	檔案格式	*.JPEG (靜態影像)、*.MOV (動態短片)
	重量	約 120 克 (淨機身) 約 135 克 (包括電池及記憶卡)

3.2.4 3ds Max

3ds Max 在 3D 功能上有許多特色，本論文即使用到它以下的軟體優勢[14]：

1、人性化的界面設計，入門簡單快捷，針對

複雜 3D 圖形的修改與編輯較其他 3D 軟體容易，惟該軟體不具絕對座標系統，僅可以相對座標來實施建模。

- 2、曲面製作功能及逼真的材質貼圖效果讓立體圖形的表現更加真實。
- 3、對於 PC 系統要求不高，故不需額外購置高階昂貴電腦，即可順暢操作軟體。
- 4、具備強大 plugins 功能支援軟體不足處，併可容納多樣化的檔案格式如 *.dwg、*.dxf、*.dem、*.xml、*.fbx、*.shp、*.3ds 等。

3.3 資料收集時間及區域分析

本研究將 GNSS 快速靜態、e-GNSS 即時動態、車載光達及 UAV 影像等量測資料進行測區與時間分析，如表 6 所示；資料收集時間於 102 年 6 月至 10 月內完成，施測期間雖歷經帕布等 5 個颱風[15]，幸該測區內均無重大災變導致地形及地貌有大規模的差異性，故可有效進行各項測量資料的比對與分析作業。

表 6. 資料時間、區域、儀器設定暨軟體分析表

資料種類	測區	時間	儀器設定	軟體
GNSS 快速靜態測量	理工學院	102 年 9 月	1.接收仰角 15° 2.接收頻率每 15 秒一筆 3.接收時間 4 小時 4.每測回加入 CCIT 追蹤站聯測	TBC 解算
	大溪河谷			
e-GNSS 即時動態測量	理工學院	102 年 8 月	1.接收仰角設定為 15 度 2.PDOP 值小於 5 3.觀測量 1 秒紀錄 1 筆 4.每個時段觀測 5 分鐘	TTC 解算
	大溪河谷			
車載光達	理工學院	102 年 6 月	1.掃描頻率 200Hz 2.接收器頻率 500kHz 3.車速在 40 公里/小時以下	系統程式 DASHMAPTM (濾條件、進行坐標轉換) MicroStation TerraSolid 套件進行車載資料處理
	大溪河谷			
UAV 影像	理工學院	102 年 7 月	1.對地高 200 公尺 2.照片數量 220 張 3.前後重疊率為 70% 4.左右重疊率為 60% 5.單張像幅大小 4608 *3456 像素	Pix4D 軟體
	大溪河谷	102 年 10 月	1.對地高 130 公尺 2.前後重疊率為 70% 3.左右重疊率為 60% 4.單張像幅大小 4608 *3456 像素	

四、數據整合與建模研究成果

4.1 數據檢核分析

4.1.1 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 幾何高差比較

由資料收集可以得知，e-GNSS 與 Mobile LiDAR 兩種測量技術之觀測資料內，共同點位計有 28 處，其幾何高程較差結果，如表 7 所示；將兩者資料加以分析其較差值之最大、最小、平均及 RMSE 值，如表 8 所示。由表 7 及表 8 所示可知：

- 1、e-GNSS 與 Mobile LiDAR 兩者幾何高程較差較大的點位，計有 E012 及 DS22 兩處，其值分別為-0.277 公尺及 0.113 公尺，同時也是 28 個點位較差之最大值與最小值。
- 2、另由表 6 來看 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 兩者方法之高程較差數據，e-GNSS 點位高程平均略大於 Mobile LiDAR 的點位高程值；而兩種測量方法的幾何高較差平均值為 0.0353 公尺，RMSE 值為 0.07523 公尺。
- 3、上述可以發現兩種測量方法的測量成果相近，除 E012 及 DS22 兩處外，餘觀測點位幾何高較差均小於 0.083 公尺。

表 7. e-GNSS 與 Mobile LiDAR 高程較差（單位：公尺）

項次	點名	e-GNSS 幾何高	Mobile LiDAR 幾何高	較差
1	E001	212.420	212.358	0.062
2	E003	214.482	214.474	0.008
3	E004	216.091	216.024	0.067
4	E006	215.264	215.263	0.001
5	E007	212.814	212.757	0.057
6	E008	213.334	213.255	0.079
7	E009	212.033	211.993	0.040
8	E010	210.719	210.705	0.014
9	E011	209.782	209.734	0.048
10	E012	207.639	207.916	-0.277
11	G001	216.844	216.765	0.079
12	G002	215.687	215.649	0.038
13	G003	206.518	206.435	0.083
14	G007	212.442	212.427	0.015
15	3019	125.724	125.676	0.048
16	3020	191.349	191.269	0.080
17	3021	204.114	204.038	0.076
18	DS01	204.072	204.024	0.048
19	DS02	202.284	202.246	0.038
20	DS04	200.612	200.594	0.018
21	DS05	203.460	203.418	0.042
22	DS06	203.015	202.970	0.045
23	DS07	195.301	195.269	0.032
24	DS12	194.078	194.038	0.040
25	DS15	192.504	192.439	0.065
26	DS16	198.093	198.059	0.034
27	DS21	191.525	191.527	-0.002
28	DS22	191.313	191.200	0.113

表 8. e-GNSS 與 Mobile LiDAR 高差精度統計表（單位：公尺）

項目 \ 方法	e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差
最大值	0.113
最小值	-0.277
平均值	0.0353
均方根誤差 (RMSE)	0.0723

4.1.1 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差精度驗證與分析

於 Mobile LiDAR、e-GNSS 兩測量路徑中，以 GNSS 靜態測量為基準取 17 個重疊點位，分別對重疊點位實施高程較差分析，說明如次：

- 1、GNSS 與 Mobile LiDAR 較差結果見表 9 及圖 9，各點位相對精度高於 ± 0.03376 公尺，計有 G001、G002 及 3020 等 3 處，餘均符合精度內。
- 2、GNSS 與 e-GNSS 較差結果見表 10 及圖 10，各點位相對精度僅 E003、E006、E010、3019、3020 及 3021 諸點之精度達 ± 0.02271 公尺之內，餘 11 個點位精度均大於規範要求。
- 3、由 GNSS 相對於 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差的直方圖（如圖 11 所示）可知其線性曲線近乎相同，在 GNSS 相對於 Mobile LiDAR 的部份，僅 G002 等 1 處差異明顯較大，考量其原由說明如次：

(1)就 GNSS 相對於 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差的直方圖（如圖 11 所示）來研判肇因，乃因本實驗區中 Mobile LiDAR 雷射掃描儀位無法直接掃描地面之點位，計有 G001、G002、G003 及 G007 等 4 處，故增設 1.5 公尺高的追蹤桿立標（如圖 12 所示），以避免點位資料遺失，也因此導致 G002 該點位高程誤差增加；而 GNSS 相對於 e-GNSS 的部份，因樹林林立，道路狹小，測站位置接收仰角大，相對訊號接收範圍較差，成果較不佳。

(2)若綜合研判肇因，可以發現 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 兩者幾何高程在 G002 的較差為 0.038 公尺，整體的 RMSE 值為 0.07523 公尺，兩者量測成果近乎相近；而從 GNSS 相對於 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差的直方圖（如圖 11 所示）來看 G002 點位，GNSS 與 Mobile LiDAR 與 e-GNSS 較差分別為

1.114 公尺(如表 9 所示)與 1.076 公尺(如表 10 所示),兩者相對較差值如此的大,顯有不合理之處,初步可判定 GNSS 靜態觀測於該點位資料可能有誤,故導致 GNSS 相對於兩種測量技術於 G002 的點位較差如此大的原因。

由表 11 結果,可以得知:

- 1、GNSS 靜態測量的 17 個點位為基準的情形下,與 e-GNSS 之 RMSE 值為 0.273 公尺;與 Mobile LiDAR 之 RMSE 值僅為 0.271 公尺,兩者 RMSE 值接近。
- 2、根據圖 9、圖 10 及表 11 所示,可得知 e-GNSS 及 Mobile LiDAR 兩種方法相對於 GNSS 之誤差比較,最大值分別為 1.076 公尺與 1.114 公尺,且均是在 G002 的點位上,另依 4.1.2 節分析可知兩者測兩方法於該點位之高差僅 0.038 公尺,尤此可推測 G002 的誤差來源不是出自兩種測量方法,而是在作為參考值之 GNSS 測量上就出現問題,若將該點位剔除,則 GNSS 相對於 e-GNSS 及 Mobile LiDAR 的 RMSE 則分別提升為 0.0827 公尺及 0.019 公尺,如表 12 所示,此數值方為可能之正確結果。
- 3、由各點位較差來看,可知 e-GNSS 量測值較平穩,Mobile LiDAR 量測值較不穩,但由表 11 來看,剔除爭議點位後,其平均值與 RMSE 值均優於前者,且其更大優點為較 e-GNSS 施測快速且便利,此特點大幅增加該技術在測量作業上的實用性。

表 9. GNSS 與 Mobile LiDAR 高程較差 (單位:公尺)

項次	點名	GNSS 幾何高	Mobile LiDAR 幾何高	較差
1	E001	212.383	212.358	0.025
2	E003	214.461	214.474	-0.013
3	E004	216.027	216.024	0.003
4	E006	215.274	215.263	0.011
5	E007	212.751	212.757	-0.006
6	E008	213.260	213.255	0.005
7	E009	211.991	211.993	-0.002
8	E010	210.700	210.705	-0.005
9	E011	209.736	209.734	0.002
10	E012	207.892	207.916	-0.024
11	G001	216.799	216.765	-0.034
12	G002	216.763	215.649	1.114
13	G003	206.433	206.435	-0.002
14	G007	212.418	212.427	-0.009
15	3019	125.648	125.676	-0.028
16	3020	191.312	191.269	0.043
17	3021	204.020	204.038	-0.018

表 10. GNSS 與 e-GNSS 高程較差 (單位:公尺)

項次	點名	GNSS 幾何高	e-GNSS 幾何高	較差
1	E001	212.383	212.420	-0.037
2	E003	214.461	214.482	-0.021
3	E004	216.027	216.091	-0.064
4	E006	215.274	215.264	0.010
5	E007	212.751	212.814	-0.063
6	E008	213.260	213.334	-0.074
7	E009	211.991	212.033	-0.042
8	E010	210.700	210.719	-0.019
9	E011	209.736	209.782	-0.046
10	E012	207.892	207.639	0.253
11	G001	216.799	216.844	-0.045
12	G002	216.763	215.687	1.076
13	G003	206.433	206.518	-0.085
14	G007	212.418	212.442	-0.024
15	3019	125.648	125.724	0.006
16	3020	191.312	191.349	0.001
17	3021	204.020	204.114	0.009

表 11. GNSS 相對 Mobile LiDAR 與 e-GNSS 高差精度統計表 (單位:公尺)

項目 \ 方法	GNSS 與 e-GNSS 較差	GNSS 與 Mobile LiDAR 較差
最大值	1.076	1.114
最小值	-0.094	-0.028
平均值	0.036	1.086
均方根誤差 (RMSE)	0.273	0.271

表 12. GNSS 相對 Mobile LiDAR 與 e-GNSS 高差精度統計表 (單位:公尺)

項目 \ 方法	GNSS 與 e-GNSS 較差 (剔除前)	GNSS 與 e-GNSS 較差 (剔除後)	GNSS 與 Mobile LiDAR 較差 (剔除前)	GNSS 與 Mobile LiDAR 較差 (剔除後)
最大值	1.076	0.253	1.114	0.043
最小值	-0.094	-0.094	-0.028	-0.028
平均值	0.036	-0.029	1.086	0.001
均方根誤差 (RMSE)	0.273	0.0827	0.271	0.019

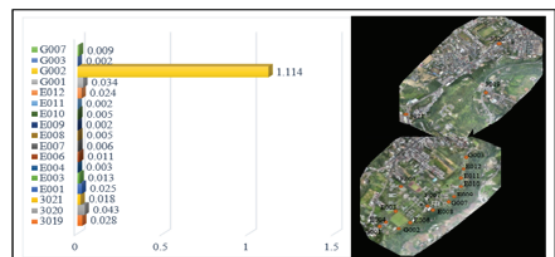


圖 9. GNSS 與 Mobile LiDAR 較差橫條圖及點位分布圖

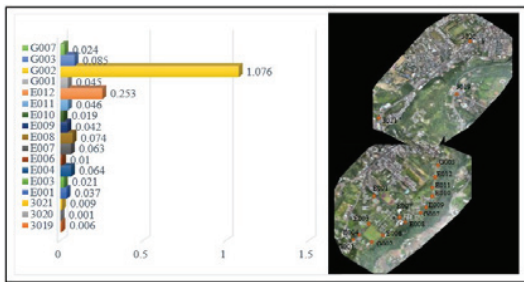


圖 10. GNSS 與 e-GNSS 比較橫條圖及點位分布圖

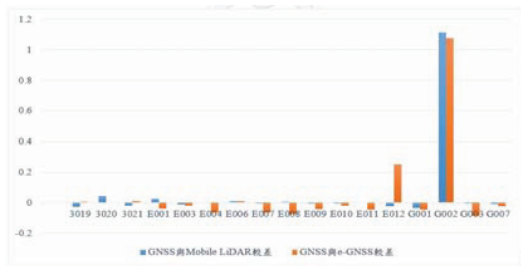


圖 11. GNSS 相對於 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 較差直方圖



圖 12. 觀測點位增設 1.5 公尺追蹤桿立標圖示

4.1.2 UAV 影像較差精度驗證與分析

於第 I 區 14 個重疊點位中，以 e-GNSS 動態測量及 Mobile LiDAR 行動測繪分別對 UAV 影像之同點位實施高程較差分析，說明如次：

- 1、e-GNSS 與 UAV 較差結果見表 13 及圖 13，各點位相對精度高於 ± 2.19505 公尺計有 E004 及 E006 等 2 處，餘均符合精度內。表 14 及圖 14，各點位相對精度高於 ± 2.25323 公尺計有 E004 及 E006 等 2 處，餘均符合精度內。
- 2、由 e-GNSS 及 Mobile LiDAR 相對於 UAV 較差的直方圖（如圖 15 所示），可發現兩者間線性曲線近乎一致，且精度相近。
另由表 15 結果，可以得知：
 - 1、UAV 在 GNSS 靜態測量 3 個控點的狀況下，與 e-GNSS 之 RMSE 值為 2.195 公尺；與 Mobile LiDAR 之 RMSE 值為 2.253 公尺。
 - 2、e-GNSS 與 Mobile LiDAR 相對於 UAV 之 RMSE 之差 0.058 公尺，兩者與 UAV 之差值近乎相等，且精度相近。

3、各式測量方法對 UAV 之較差，其最大差異量達 6.533 公尺，究其原因於觀測點位內以 E004 及 E006 較差最大，檢視其 DSM 資料（如圖 16 所示），可知該點位鄰近植被（如圖 17 所示），軟體在影像匹配自動化計算 DSM 時，在邊緣線附近會因位內插或摺積的關係產生吉布斯(Gibbs)震動或是被平滑化，不僅使得邊緣線本身不正確，連帶其鄰近網格點也有錯誤（如圖 18 所示），因此 DSM 在表示邊緣線附近的高程具有較大的誤差[16]，也是導致 UAV 較差如此大的原因，相對也影響整體的精度。

4、若將 E004 及 E006 兩的點位剔除，則 e-GNSS 相對於 UAV 之 RMSE 則由 2.195 公尺降至 0.498 公尺；Mobile LiDAR 相對於 UAV 之 RMSE 則由 2.253 公尺降至 0.691 公尺（如表 16 所示）故可以得知 DSM 在鄰近植被與建築物周邊必須予以修正，也是提升 UAV 影像精度檢核的要點之一。上述可知第 I 區修正後之測試結果，e-GNSS 技術優於 Mobile LiDAR 觀測精度。

於第 II 區 14 個重疊點位中，以 e-GNSS 動態測量及 Mobile LiDAR 行動測繪分別對 UAV 影像之同點位實施高程較差分析，說明如次：

- 1、e-GNSS 與 UAV 較差結果如表 17 及圖 19 所示，各點位相對精度高於 ± 0.64098 公尺計有 DS07、DS16、DS21 及 DS22 等 4 處，餘均符合精度內。
- 2、Mobile LiDAR 與 UAV 較差結果見表 18 及圖 20，各點位相對精度高於 ± 0.62672 公尺計有 DS07、DS16、DS21 及 DS22 等 4 處，餘均符合精度內。
- 3、由 e-GNSS 及 Mobile LiDAR 相對於 UAV 較差的直方圖（如圖 21 所示），可發現兩者間線性曲線結果與第 I 區略同，更可證明 Mobile LiDAR 在地勢起伏較大的地區所量測之精度仍與 e-GNSS 相近。

第 II 區仍以 e-GNSS 動態觀測中 14 個固定點位為基準，另因該區域內 GNSS 資料與其他測量資料無共通測點，故僅分別比較 UAV 與 Mobile LiDAR 交疊區域相同點位之幾何高差，以及 UAV 與 Mobile LiDAR 間幾何高較差之相互關係，加以分析其較差值之最大、最小、平均及 RMSE 值，如表 19 所示。

由表 1 結果得知與第 I 區段成果相似且優於它，歸究其原因主要是環境因素影響，整個環境透空程度明顯第 II 區優於第 I 區，第 I 區平坦地形相對第 II 區地形來說，因為第 I 區（理工學院）

內高聳樹林林立，枝葉生長茂盛且蔓延向狹小道路的道路，測站位置接收仰角大，相對訊號接收範圍較差，成果較不佳，故本區相對精度之RMSE相較較高，且第Ⅱ區的精度顯示 Mobile LiDAR 在環境透空度要求的條件下，優於 e-GNSS，但其間差異不大，均在公尺級以下兩位。

表 13. Mobile LiDAR 與 e-GNSS 高差精度之剔除前後統計表（單位：公尺）

項次	點名	e-GNSS 幾何高	UAV 幾何高	較差
1	E001	212.420	213.636	-1.216
2	E003	214.482	215.211	-0.729
3	E004	216.091	222.557	-6.466
4	E006	215.264	220.025	-4.761
5	E007	212.814	213.187	-0.373
6	E008	213.334	213.247	0.088
7	E009	212.033	211.872	0.161
8	E010	210.719	210.612	0.107
9	E011	209.782	209.905	-0.123
10	E012	207.639	207.931	-0.292
11	G001	216.844	216.606	0.237
12	G002	215.687	214.906	0.781
13	G003	206.518	206.387	0.131
14	G007	212.442	212.480	-0.039

表 14. Mobile LiDAR 與 e-GNSS 高差精度之剔除前後統計表（單位：公尺）

項次	點名	Mobile LiDAR 幾何高	UAV 幾何高	較差
1	E001	212.358	213.636	-1.278
2	E003	214.474	215.211	-0.737
3	E004	216.024	222.557	-6.533
4	E006	215.263	220.025	-4.762
5	E007	212.757	213.187	-0.430
6	E008	213.255	213.247	0.008
7	E009	211.993	211.872	0.121
8	E010	210.705	210.612	0.093
9	E011	209.734	209.905	-0.171
10	E012	207.916	207.931	-0.015
11	G001	218.265	216.606	1.659
12	G002	215.649	214.906	0.743
13	G003	207.935	206.387	1.548
14	G007	213.927	212.480	1.447

表 15. 第Ⅰ區影像相對高差之精度統計表（單位：公尺）

項目 \ 方法	e-GNSS 與 UAV 較差	Mobile LiDAR 與 UAV 較差
最大值	0.781	1.659
最小值	-6.466	-6.533
平均值	-0.893	-0.808
均方根誤差 (RMSE)	2.195	2.253

表 16. 第Ⅰ區影像相對高差之精度剔除前後統計表（單位：公尺）

項目 \ 方法	e-GNSS 與 UAV 較差 (剔除前)	e-GNSS 與 UAV 較差 (剔除後)	Mobile LiDAR 與 UAV 較差 (剔除前)	Mobile LiDAR 與 UAV 較差 (剔除後)
最大值	0.781	0.781	1.659	1.659
最小值	-6.466	-1.216	-6.533	-1.278
平均值	-0.893	-0.106	-0.808	-0.001
均方根誤差 (RMSE)	2.195	0.498	2.253	0.691

表 17. 第Ⅱ區 e-GNSS 與 UAV 較差（單位：公尺）

項次	點名	e-GNSS 幾何高	UAV 幾何高	較差
1	3019	125.724	125.651	0.073
2	3020	191.349	191.329	0.019
3	3021	204.114	204.069	0.046
4	DS01	204.072	203.690	0.382
5	DS02	202.284	202.389	-0.105
6	DS04	200.612	201.037	-0.425
7	DS05	203.460	203.341	0.120
8	DS06	203.015	202.964	0.051
9	DS07	195.301	195.986	-0.685
10	DS12	194.078	194.630	-0.552
11	DS15	192.504	192.706	-0.202
12	DS16	198.093	198.817	-0.723
13	DS21	191.525	190.718	0.807
14	DS22	191.313	189.469	1.844

表 18. 第Ⅱ區 Mobile LiDAR 與 UAV 較差（單位：公尺）

項次	點名	Mobile LiDAR 幾何高	UAV 幾何高	較差
1	3019	125.676	125.651	0.025
2	3020	191.268	191.329	-0.061
3	3021	204.038	204.069	-0.031
4	DS01	204.024	203.690	0.334
5	DS02	202.246	202.389	-0.143
6	DS04	200.594	201.037	-0.443
7	DS05	203.418	203.341	0.077
8	DS06	202.970	202.964	0.006
9	DS07	195.269	195.986	-0.717
10	DS12	194.038	194.630	-0.592
11	DS15	192.439	192.706	-0.267
12	DS16	198.059	198.817	-0.758
13	DS21	191.527	190.718	0.809
14	DS22	191.200	189.469	1.731

表 19. 第 II 區影像相對高差之精度統計表(單位:公尺)

項目 \ 方法	e-GNSS 與 UAV 較差	Mobile LiDAR 與 UAV 較差
最大值	1.844	1.731
最小值	-0.723	-0.758
平均值	0.046	0.002
均方根誤差(RMSE)	0.641	0.627

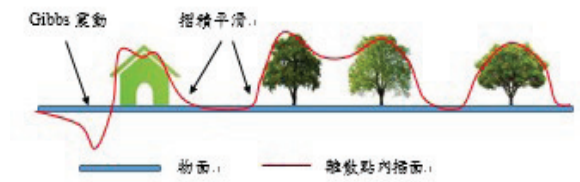


圖 18. 離散點內插或摺積時誤差示意圖

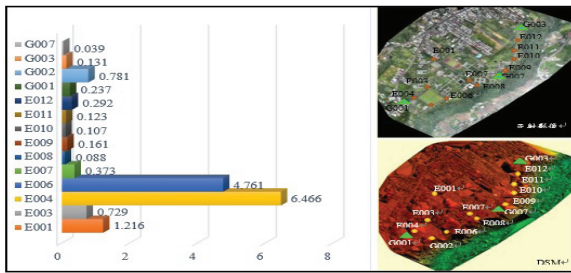


圖 13. 第 I 區 e-GNSS 與 UAV 較差橫條圖及點位圖

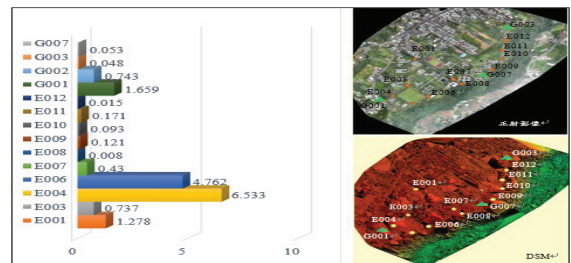


圖 14. 第 I 區 Mobile LiDAR 與 UAV 較差橫條圖及點位圖

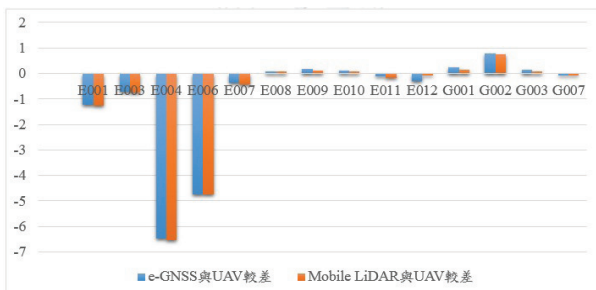


圖 15. 第 I 區 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 相對於 UAV 較差直方圖



圖 16. E004 及 E006 影像及 DSM 對照圖



圖 17. E004 及 E006 環境透空圖

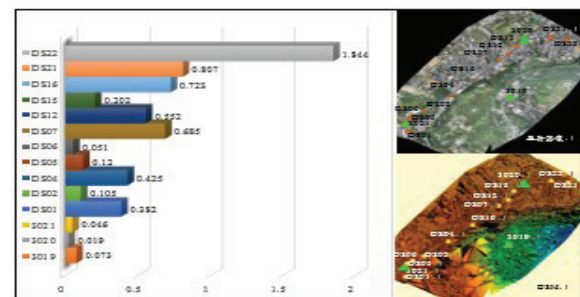


圖 19. 第 II 區 e-GNSS 與 UAV 較差橫條圖及點位圖

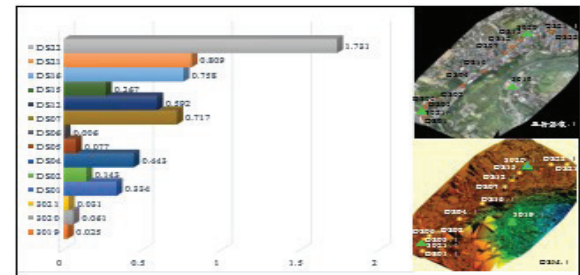


圖 20. 第 II 區 Mobile LiDAR 與 UAV 較差橫條圖及點位圖

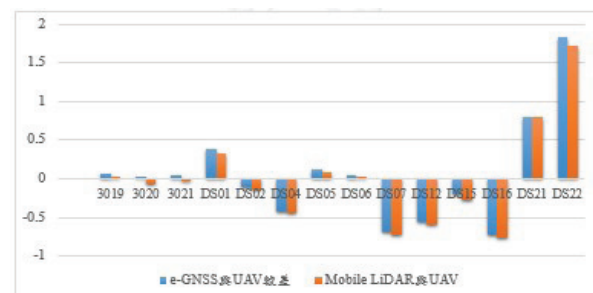


圖 21. 第 II 區 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 相對於 UAV 較差直方圖

4.2 3D 立體化製作

於各式測量資料中多屬於點的資料，若要将平面數據 3D 立體化僅靠點的資料是不夠的，雖在點位數量足夠且分佈平均的情形下可透過內差的方式獲得面的資料，惟與實際狀況仍有些許差異，而傳統 UAV 影像資料所需之檢核點或控制點，為求快速多以 e-GNSS 即時單點定位施測，雖其精度較 Mobile LiDAR 高，惟測量點位仍受限於人力與時間，無法快速獲得區域面的點

位數量，故本研究則是透過 UAV 獲得面資料，並輔以 Mobile LiDAR 快速獲取大量 Cloud Point 資料的優點，將其作為控制進行 3D 立體化之快速轉換，另透過格式轉換的轉換法（方法一）與影像分層設色的替代法（方法二）等兩種方法匯入 3ds Max 進行 3D 立體化作業，如圖 22 所示。



圖 22. 3D 立體化製作方法

4.2.1 轉換法與替代法建模成果

1、轉換法

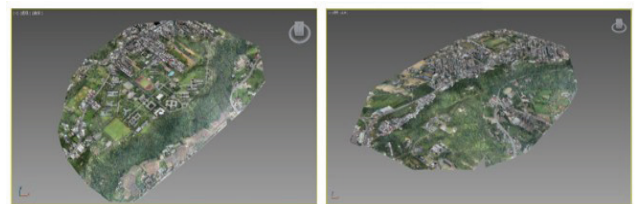
將本院院區（國防大學理工學院）及大溪河谷兩實驗區 DSM 的影像資料(*.tif 檔)透過 Global Mapper 的 Export 功能，將資料轉換成 3ds Max 能夠匯入的檔案格式(*.dxf)，而原始*.tif 檔影像 pixel 為 0.07 公尺，經轉換後的*.dxf 檔案過大（約 100GB 及 67.7GB），故本研究條件考量快速且電腦配備於中階的情形下實施及 92 年內政部委託國立成功大學之研究「高精度及高解析度數值地形模型測製規範」於無植被無建物區的平地與丘陵地 DSM 標準精度分別需小於 0.7 公尺及 0.9 公尺之精度[16]，本實驗經考量檔案大小及製作效率等因素兩區域採取精度 0.5 公尺方式實施檔案的立體化作業，且使用此方法轉檔時其座標系統不受影響。

在 3ds Max 的環境下，可逐一檢視 3D 立體化地形實施點、線、面的網格修正，以獲得較正確之 DSM 資料，由於本研究在有限的資料條件下時施快速立體化作業，僅將過份不合實際狀況部份時施修正，再經由模型與影像的套合，透過 3ds Max 渲染展示立體化後之真實地形，如圖 23。

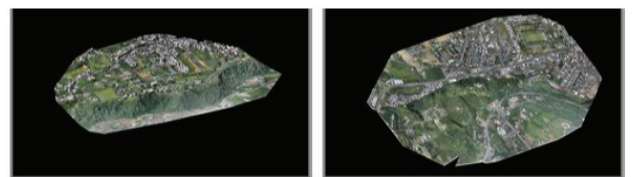
2、替代法

直接使用 3ds Max 的 Displace 功能建立研究區域範圍，並將處理後的分層設色影像

資料導入，該軟體會自動依據黑白色層建立區域範圍內地形模型，顏色越深（黑）代表地形高度越低，顏色越淺（白）表示地形高度越高，故原始的影像資訊則顯得更為重要，若再執行黑白化分層設色前，已有部份資訊遺失導致影像上成黑色區塊，則將導致模型本身出現凸起或凹陷地貌，透過 3ds Max 的編輯器可快速修正並建立 3D 立體化地形模型，如需獲得更逼真的地形模型，同樣需要將模型與影像的套合，透過 3ds Max 渲染展示立體化後之真實地形，如圖 24 所示。



(a)理工學院 (b)大溪河谷
圖 23. 轉換法立體化展示圖



(a)理工學院 (b)大溪河谷
圖 24. 替代法立體化展示圖

4.2.2 建模方法分析比較

1、轉換法模型與原始 DSM 比較

經由轉檔方式匯入 3ds Max 生成 3D 立體化地形，由圖形直觀來看可知，新建之立體化地形與原始 DSM 資料的平面及高程的影像訊息相似，而資料缺少的部份則需始用 3ds Max 的編修器配合現況實施少部份修改，惟不會因為缺少資訊而導致模型有凸起或凹陷的地方，故此方法適用於再電腦設備效能足夠且 DSM 資訊完整的狀況下，可快速生成與測量資訊相符精度之立體地形，由原始 DSM 與新建立立體化 DSM 兩圖來細觀，可知兩者相似度甚高，如圖 25 所示。

2、替代法模型與原始 DSM 比較

3ds Max 的 Displace 主要是採貼圖方式產生印壓或改變物件形狀，透過黑白、灰階的色彩模式來產生位移，而利用 ArcMap 產生黑白色層，因受到最大層數 24 層每層約 6 公尺限制，相對該方法模型解析度因限制而提高，雖可以透過 Max 軟體於模型區域內增加網格數量提高模型解析度，仍有部份結構物與地形凹凸處，因高程不足或個體面積不夠大無法有效建立模型，故由原始影像、黑白色層影像及新建模型三者比較圖（如圖 26 所示）來看可知：

- (1) 新建模型區域內，主體建築結構物件均可有效快速建立，且清晰可見。
- (2) 新建區域模型中，部份大面積粗糙地或屋頂平面無法細緻生成屋凸結構物，並趨向於平滑，故模型細緻度較差。
- (3) 影像資料缺口處，因 DSM 未經人工修正，導致航拍資料再製作正射影像及接合時，產生空白區塊，致使模型生成時，產生高聳的凸起物。
- (4) 區域內地形高程落差越明顯處，其建立模型之效果越佳；高差越不明顯處，則成像越差，甚至導致物件形變。

3、轉換法與替代法優劣比較

經本研究查詢，3ds Max 通用軟體確為坊間最易於取得、操作容易、檔案相容性與通用性高。在有限的資料數據中，透過兩種不同方法導入 3ds Max 中生成 3D 模型展示，依 DSM 及影像資料的轉換與處理、模型生成與編修的便利性、檔案傳輸與管理、系統設備及製作效率等方面實施優劣評估來可知：

- (1) 轉換法在*.tif 影像檔轉換為*.dxf 製圖檔的過程耗時；Displace 法無需將影像轉換為製圖檔，惟需考量影像座標系統及範圍。
- (2) 轉換法的檔案大小如未提高影像解析度，檔案最大可達 100GB。
- (3) 轉換法在 DSM 未編修的狀況下所產生的空白資訊，轉換法不會產生變化；替代法則依空白影像深淺產生凹凸物件。
- (4) 轉換法的解析度與轉換前的原始檔案相似；替代法則會因為分層設限導致模型解析度明顯提高。
- (5) 轉換法轉檔後因製圖檔案網格面數過多，導致檔案過大，相對所需電腦設備記憶體

較高（至少 16G）；替代法乃透過影像黑白漸層產生位移，所耗資源較低。

- (6) 經由兩種方式之立體化成果來看，均具備 LOD2 層級。

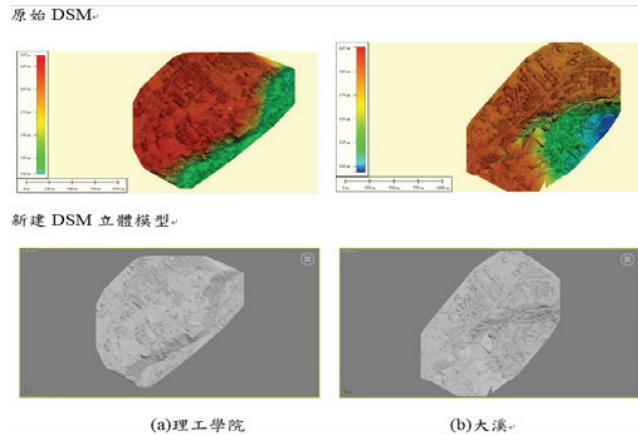


圖 25. 轉換法與原始資料之 DSM 比較

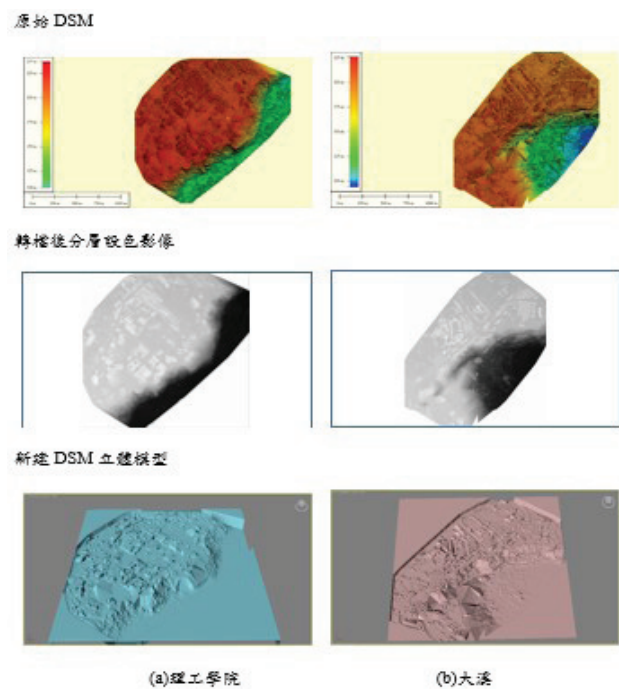


圖 26. 替代法與原始資料之 DSM 比較

4.2.3 工作時效評估

1、測量作業比較

由表 20 中可得知[17]：

- (1) 在外業部份 e-GNSS 觀測所需人力 2 人，花費時間約 4 小時；Mobile LiDAR 僅需 2 人作業，作業時間花費僅需 1 小時；GNSS 靜態觀測觀測所需人力 4 人，花費時間約 28 小時，惟觀測點位精度最高，另因內業時

間牽涉因素繁多的，較難客觀評估，若不考慮內業時間可知三者工作時效以 Mobile LiDAR 最省時，其次為 e-GNSS，最耗時仍為 GNSS。

(2)另再透過 GNSS 精度驗證 e-GNSS 及 Mobile LiDAR 結果，並僅針對 e-GNSS 與 Mobile LiDAR 兩測量方法進行比較可知，傳統 e-GNSS 精度略優，且觀測數據較為穩定，惟外業作業較為耗時且點位數量有限；Mobile LiDAR 雖然測量數據較為不穩，但其快速便捷的測量時效與數據資料量龐大的優勢，讓後續研究者對其應用趨之若鶩，惟該技術對透空性較差的點位，需額外改以立標方式進行掃描，增加前置作業困擾，且現階段內業處理部份，仍需加強其便利性與自動化的時效性。

2、3D 立體化作業比較

由表 21 中可得知：

- (1)在 UAV 航拍影像製作 DSM 及正射影像的時間兩者相同，故不再加以論述，就轉換法與替代法兩者實施說明，在轉換法的部份所需時間約為 8 小時，較為耗時、檔案較大且系統效能高，惟模型精度與原精度較為相似；在替代法的部份所需時間約為 4 小時，耗時較短、檔案較小且系統效能較低，惟模型精度與原精度較為低。
- (2)總合上述內、外業工作及立體化建模時效，本研究方法所需時間約 25 至 29 小時，遠小於前人作業所需時間（數值測量 3D 建模 462 小時及數值航照 3D 建模 294 小時）[18, 19]。

表 20. 測量作業時效比較表

作業方式	e-GNSS 觀測	Mobile LiDAR	GNSS 靜態觀測
測量儀器	GNSS 接收儀 1 部	行動測繪車 1 部	GNSS 接收儀 4 部
前置時間	提前開機 3 分鐘	系統開機 10 分鐘	基座校正、提前開 機 30 分鐘
人力	2 人 (1 組 2 人)	2 人 (1 組 2 人)	4 人 (1 組儀器 1 人)
外業時間 (每日 5 小時)	1 日 合計:4 小時	0.2 日 合計:1 小時	6 日 合計:28 小時
內業時間	8 小時	12 小時	8 小時
資料性質	單點	路線區段面	單點
取樣數量	28 點	28 點	19 點
整體時效	12 小時	13 小時	36 小時

表 21. 立體化建模時效及優劣比較表

立體化 建模方法	方法一：轉換法 轉* dxf 檔匯入生成模型	方法二：替代法 Displace 生成模型
檔案大小	劣 (GB)	優 (MB)
系統需求	劣 (記憶體至少 16G)	優 (記憶體至少 8G)
模型解析度	優 (與原檔相同)	劣 (較原檔高)
UAV 航拍影像 製作 DSM 及 正射影像	同 (約 6-8 小時)	同 (約 6-8 小時)
轉檔轉換時效	劣 (約 2-4 小時)	優 (約 0.5 小時)
檔案匯入	劣 (約 1-2 小時)	優 (約 0.2 小時)
檔案編修及 影像套疊	優 (約 1-2 小時)	劣 (約 3 小時)
整體時效合計	劣 (約 16 小時)	優 (約 12 小時)

五、結論

本研究歸納出以下幾點結論：

- 1、e-GNSS 及 Mobile LiDAR 兩種方法相對於 GNSS 之高程誤差比較，最大值均是在 G002 的點位上，且兩者測兩方法於該點位之高差僅 0.038 公尺，故本研究合理推測 GNSS 在 G002 點位上之觀測數據，本身就是有疑問，該點去除後始得較合理之結果。
- 2、本論文透過 Mobile LiDAR 及 e-GNSS 幾何高程的檢核分析及 UAV 技術融合 Mobile LiDAR 與 e-GNSS 技術，檢核控制之研究結果可以得知：
 - (1)Mobile LiDAR 點位較差精度較 e-GNSS 不穩，惟其在施測作業時較具便利性與快速性，遠小於 e-GNSS，此特點大幅增加該技術在測量作業上的實用性。
 - (2)另透過 I、II 實驗區的精度比對，更證明即使在地形起伏較大的區域，Mobile LiDAR 與 e-GNSS 的 RMSE 仍然相近；而越是樹林林立，道路狹小，測站位置接收仰角越大的區域，相對訊號接收範圍越差，成果則較差，第 II 區 Mobile LiDAR 測試成果優於第 I 區段，顯示衛星測量在環境透空程度的條件要求下，前者較佔優勢。
 - (3)故 Mobile LiDAR 行動測繪相比較傳統 e-GNSS 測量技術，e-GNSS 具備即時獲得單點定位資料的優點，也就是點位資料收集程序平穩且精度高；而 Mobile LiDAR 可快速獲得面的點雲資料，且較差精度與 e-GNSS 相近，故在特殊情況下，兩者方法皆可取代之或併行運用。
- 3、另本研究以 UAV 影像資料，輔以 Mobile

LiDAR 快速獲取點位資料做為控制，透過轉換法與替代法兩種立體化方式，將 DSM 影像資訊於 3ds Max 軟體中快速建立 3D 立體化地形之研究結果可得知：

- (1) 本研究整體時效（含外業測量及 3D 立體化製作）可於 25-29 小時內快速完成。兩種方式之立體化成果在滿足快速 3D 圖示的前提下，仍均具備 LOD2 的層級，區域模型建模時效遠小於前人作業時間（數值測量 3D 建模 462 小時及基礎 3D 建模 294 小時）。
- (2) 在有限的經濟效益下，可考量利用易於取得、操作容易、檔案相容性與通用性高的 3ds Max 通用軟體，透過 UAV 影像之 DSM 資料來製作大範圍的 3D 立體化模型，不僅降低了成本，更可簡化檔案格式轉換與軟體操作應用的複雜性，快速達到本論文之預期具體成效。

六、參考文獻

- [1] 蔡宜學，“GPS/GLONASS 整合式之導航系統”，碩士論文，國立臺灣大學電機工程學系，臺北，第 1-78 頁，2000。
- [2] 曾建榮，“GPS/GLONASS 訊號整合應用於高程系統之研究”，碩士論文，國防大學理工學院環資系空間科學所，桃園，第 10-77 頁，2009。
- [3] 內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態定位系統入口網站，<http://www.egnss.nlsc.gov.tw/> (2015.01.20)。
- [4] Wehr, A. and Lohr, U., “Airborne laser scanning—an introduction and overview,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.54, No.2, pp.68-82, 1999.
- [5] 林志交，“車載光達作業規範之建立與探討”，成功大學多平台移動製圖系統實務座談會簡報，中興測量有限公司，2013。
- [6] 莊鈞凱，“以物件式分類與車載光達資料辨識道路標誌”，碩士論文，國立成功大學，台南市，第 6-76 頁，2013。
- [7] 徐百輝，“無人飛行載具簡介及其於測繪領域之應用”，杜風電子報第 67 期特別報導，http://www.ntuce-newsletter.tw/vol.67/T4_1n.html(2014.7.30)。
- [8] 謝幸宜、邱式鴻，“以自率光束法提升四旋翼 UAV 航拍影像之定位精度”，碩士論文，國立政治大學地政學系，第 35-86 頁，2011。
- [9] Wolf, P. R. and Dewitt B. A., *Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS*, 3rd edition, Taipei: The McGraw-Hill, 2000.
- [10] 蔡依庭，“UAV 航拍影像點雲產生 DSM 之研究”，碩士論文，國立台北大學不動產與城鄉環境學系，第 13-107 頁，2012。
- [11] 中興測量，<http://www.chsurvey.com.tw/page04.html>(2014/3/18)。
- [12] Sensefly Company, <http://www.sensefly.com/home.html>(2014.7.30)。
- [13] 台灣佳能股份有限公司，<http://www.canon.com.tw/index.asp>(2014.7.30)。
- [14] Autodesk, <http://www.autodesk.com.tw/products/3ds-max/overview>
- [15] 中央氣象局颱風資料庫，http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning (2015/2/4)
- [16] 王蜀嘉、曾義星，“高精度及高解析度數值地形模型測製規範”，國立成功大學測量及空間資訊學系研究報告，臺南，第 1-39 頁，2003。
- [17] 尤竣彥，“各式量測方法對幾何高差精度之研究”，碩士論文，國防大學理工學院空間科學研究所，大溪，第 48-84 頁，2014。
- [18] 邱政君，“數值測量應用於 3D 仿真建模之研究”，碩士論文，國防大學理工學院環境資訊及工程學系研究所，大溪，第 28-55 頁，2010。
- [19] 羅永昇，“戰場環境資訊測繪與應用-以城鎮戰為例”，碩士論文，國防大學中正理工學院軍事工程研究所，大溪，第 10-56 頁，2008。