

利用GNSS、e-GPS和車載光達各式量測方法 對幾何高差精度之研究

黃立信

國防大學理工學院環境資訊及工程學系空間科學組

摘 要

本文的目的即在驗證 e-GPS 和車載光達量測方法的精度，且試用在大地起伏值計算之可行性。利用全球導航衛星系統(Global Navigation Satellites System,GNSS)、電子化全球衛星即時動態定位系統(Electronic-Global Positioning System,e-GPS)及車載光達(Mobile LiDAR)三種觀測模式，對佈設於三種不同環境施測幾何高差之影響做比較分析，以 GNSS 靜態觀測 22 個固定點位為作參考值，檢核 e-GPS 與車載光達相對於 GNSS 所得之幾何高差精度，經剔除較大之點位，e-GPS RMS 值為 0.631 公分，符合精度要求在 ± 2.27 公分之內；車載光達 RMS 值為 0.591 公分，亦符合精度要求在 ± 3.375 公分之內。再者就理論推算 e-GPS 法與車載光達法，配合直接水準法計算大地起伏差值之精度，經計算得知 e-GPS 法精度要求為 ± 2.899 公分，車載光達法精度要求為 ± 4.569 公分，經三個區域測試結果，兩種方法皆在精度要求範圍以內。

關鍵詞：全球導航衛星系統，電子化全球衛星即時動態定位系統，車載光達，幾何高差

The Study on GNSS, e-GPS and Mobile LiDAR for Effect of Ellipsoidal Height Differences Accuracy

Lih-Shinn Hwang

*Department of Enviromental Information and Enginerring,
CCIT, National Defense University, Taiwan*

ABSTRACT

This paper aims to verify the accuracy of e-GPS and Mobile LiDAR of surveying techniques, and to try out the feasibility for computing the values of geoid undulation. The accuracy of ellipsoidal height differences by using individual measured methods and technologies in different working environments. We use three kinds of technologies which are GNSS、e-GPS and Mobile LiDAR to survey three different regions. The 22 fixed points as referenced values were observed by GNSS, and compared exacting precision with the e-GPS and mobile LiDAR methods. By this way, filtered out the larger estimated errors. The e-GPS RMS can be achieved to 0.631cm, which standard error requires below ± 2.27 cm. and the mobile LiDAR RMS can be achieved to 0.591 cm, which standard error requires below ± 3.375 cm. Using the e-GPS and Mobile LiDAR methods with Leveling, geoid undulation of values can be calculated. The relative accuracy of e-GPS is about ± 2.899 cm, and that of Mobile LiDAR is about ± 4.569 cm. From these experiments, two methods can be satisfied with requirements of standard error.

Keywords: GNSS, e-GPS, Mobile LiDAR, Ellipsoidal height difference

文稿收件日期 105.4.21;文稿修正後接受日期 106.11.5; *通訊作者
Manuscript received April 21, 2016; revised November 5, 2017; * Corresponding author

一、前言

臺灣多年來各式測量技術及方法發展迅速，但受限於施測單位不同，常有不同儀器應用於不同測區，欠缺對各式儀器技術作統一精度之評估及檢核，且臺灣各區域之地殼變動等自然情況相當活躍，或人為因素如超抽地下水等因素影響，這些天然或是人為因素皆已直接影響到測量成果，隨著環境及時間的變化，點位高程精度及成果也已不符現實，如遇上天然災害來臨時，對即時想了解區域性的高程問題皆造成困擾。傳統水準測量精度雖號稱可達公厘等級，但缺點須耗費大量人力、時間及財力，無法即時了解高程連測問題，然而現今幾何高程系統在衛星測量上之應用，已充份解決傳統水準測量在技術上的限制，發展出新興的高程測量作業。

二、研究內容

本研究將探討利用現有各式量測方法和技術，應用於不同作業環境，對幾何高差之影響做比較分析，以 GNSS 靜態觀測 22 個固定點位為參考值，相對於 e-GPS 與車載光達觀測之幾何高差精度之研究。其次於各區段不同環境分析兩種觀測方式，並於點位間檢核幾何高較差之關係。再者就理論推算 e-GPS 法與車載光達法，並配合水準測量資料計算大地起伏差值之精度，驗證內政部 2014 大地起伏模式精度。最後透過以衛星測量為基礎的 GNSS、e-GPS 及車載光達等技術，與傳統水準測量在精度、時間、人力各方面加以比對，設定所有的基準均能架構在全球的參考橢球體上，降低點位因坐標轉換而產生之誤差，而能快速又有效率的得到計算資料。

2.1 研究用儀器

2.1.1 水準測量

本次水準測量使用儀器為瑞士 Leica DNA03 精密水準儀，如圖 1。



圖 1 Leica DNA03 精密水準儀

2.1.2 GNSS 靜態觀測

使用 SOKKIA GSR2700 ISX 接收儀、LEICA GS15 接收儀、LEICA GS08 接收儀，如圖 2、圖 3、圖 4 所示相關規格如表 1。



圖 2 SOKKIA GSR2700 ISX 接收儀[1]



圖 3 LEICA GS15 接收儀[2]



圖 4 LEICA GS08 接收儀[2]

2.1.3 e-GPS 觀測

本作業使用儀器為 Leica ATX1230-GG 接

收儀，可接收 GPS 訊號、GLONASS 訊號、GPS L2C 訊號、支援未來 GPS L5 訊號及歐洲系統 Galileo 衛星訊號如圖 5，相關規格如表 1。



圖 5 Leica ATX1230-GG

表 1 各型接收儀性能規格

型號	定位精度	
SOKKIA GSR2700 ISX	RTK	平面：10 公厘+1ppm 高程：20 公厘+1ppm
	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
	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
	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
	靜態	平面：5 公厘+0.5ppm 高程：10 公厘+0.5ppm

2.1.4 車載光達觀測

本研究使用加拿大 Optech 公司於 2007 年推出的 Lynx Mobile Mapper 車載光達行動測繪系統載具外觀及相關規格如圖 6 及表 2 所示，其主要組成元件為高精度的定位定向系統、光達測量系統及高解析度相機。



圖 6 Optech Lynx M1[3]

表 2 Lynx Mobile Mapper 規格表

掃瞄器(每秒點數)	2 組(各 500KHz)	
最大掃瞄距離	200 公尺	
旋轉鏡速度	80Hz~200Hz	
測距精度 絕對精度	8 公厘(1 sigma) ±5 公分 (1 sigma)	
工業級相機	4 組(各 500 萬畫素)	
衛星接收儀 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

因本次實驗車載光達移動在每一觀測站之間，仍有水準測量之數據加以糾正，所以本研究在評估車載光達量測精度時，僅以 GPS 接收儀運作 RTK 作業時平面精度與高程精度通盤考量，其觀測精度表達如下：

$$\sigma_{\text{Mobile LIDAR}} = \pm \sqrt{2 \times (\text{平面精度}^2 + \text{高程精度}^2)} \quad (1)$$

2.2 研究區域介紹

水準測量施測過程中，較常導致閉合差不閉合的環境，多半是橋樑與山區地形，前者因為往來車輛震動及橋面裸空等因素，易造成水準施測時閉合差不閉合，後者則因為蜿蜒的山區道路及地形落差大，需較多的轉點而導致系統誤差的累積，易造成閉合差較不易閉合，本研究以台 3 線為實驗區域如圖 7，並區分三種地形，依不同地形對幾何高差的分析，測區共計 6 個水準點及 67 個加密點。第一為丘陵地區

(綠線測區)、第二為平坦地區理工學院(紅線測區)、第三為高程落差大及過橋地區(黑線測區)如圖 7 所示。

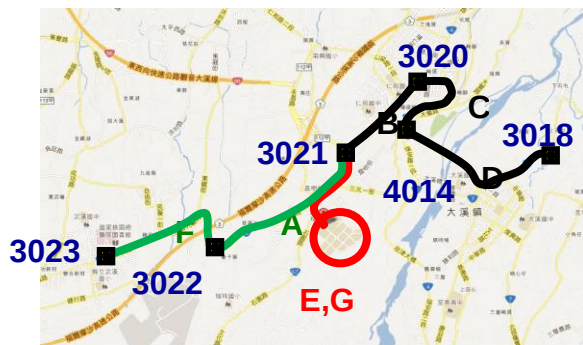


圖 7 研究區域圖

1. 第 I 區由水準點 3021 經 3022 到 3023 之間，分佈自大溪交流道沿台三線至桃園 804 國軍醫院，高程落差大約 40 公尺之丘陵地形，水準點 3021 到 3022 間設定為 A 測段；水準點 3022 到 3023 設定為 F 測段，總共水準點 3 點及加密點 34 點，共計 37 點 36 條測段，如圖 8。

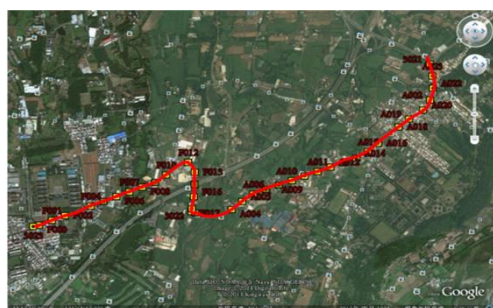


圖 8 第 I 區測段分佈圖

2. 第 II 區由水準點 3021 引測，分佈自大溪交流道沿台三線至國防大學理工學院校區，高程落差大約 2.3 公尺之平坦地形，此測段為 E 測段總共水準點 1 點及加密點 21 點，共計 22 點 21 條測段，如圖 9。

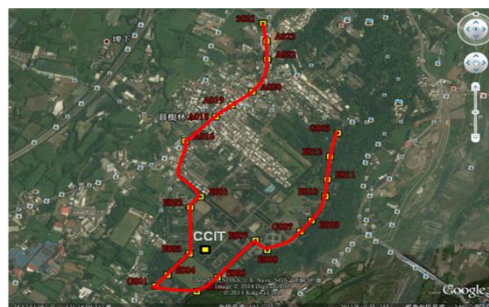


圖 9 第 II 區測段分佈圖

3. 第 III 區由水準點 3021、3020、4014 到 3018 區間，分佈自大溪交流道沿台三線過武嶺橋往大溪老街方向，高程落差大約 90 公尺，屬起伏落差大及過橋路段之地形，水準點 3021 到 3020 設定為 B 測段；水準點 3020 到 4014 為 C 測段；水準點 4014 到 3018 為 D 測段，總共水準點 4 點加密點 17 點，共計 21 點 20 條測段，如圖 10。

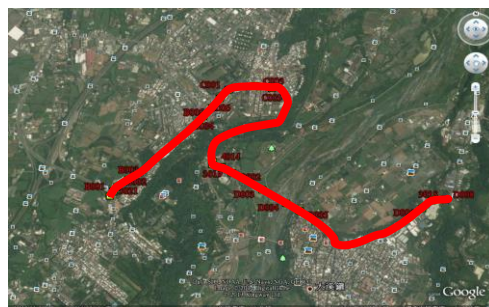


圖 10 第 III 區測段分佈圖

2.3 實驗所用之軟體

1. 座標解算 TRIMBLE BUSINESS CENTER 簡稱 T.B.C.[3]，該項軟體可以提供相關格式的資料輸入，可依實際需求而進行輸入各項資料進行計算。

2. 車載光達處理軟體為 MicroStation TerraSolid 套件，MicroStation 為 Bentley 公司於 1980 年所發布之軟體[4]，為領先全球之資訊建模軟體 可作為技術平台 亦可作為開發軟體的應用系統，TerraSlave 即是 TerraSolid 公司在 MicroStation 軟體架構下所開發，之光達點雲處理套件。

三、資料處理

3.1 各式量測方式精度評估

統計平差定義裏，高程與測距精度定義如下 [5、6]：

$$\sigma_D = \pm \sqrt{a^2 + b^2} \times D^2 \quad (2)$$

式中， a :加常數誤差、 b :乘常數誤差、 D 為距離（單位以公里計）。

在直接水準施測中，吾人得知點位 3021~3022 間之最大距離為 2.807 公里（見表 7），以此作為精度規範，分別代入 e-GPS 中 RTK 高程定位精度（見表 1，20 公厘+1ppm）得 $\sigma_{h_{e-GPS}} = \pm 2.019$ 公分；GNSS 靜態觀測高程定位精度取三種儀器之最大值（見表 1，10 公厘+1ppm）得 $\sigma_{h_{GNSS}} = \pm 1.038$ 公分；Mobile LiDAR RTK 高程定位精度（見表 2，20 公厘+1ppm），因 POS 系統由兩組 GPS 透過兩組雷射掃描儀間接獲得點位三維空間坐標，與前兩種直接觀測點位高程精度而言，需考量誤差傳播定律將平面精度一併計算，系統由兩組 GPS 接收儀所組

成，就精度而言，需乘以 $\sqrt{2}$ ，所以計算

$\sigma_{h_{Mobile LiDAR}}$ 可由公式(1)代表並

求得 $\sigma_{h_{Mobile LiDAR}} = \pm 3.211$ 公分。

由上述計算成果得：

(1) e-GPS 相對於 GNSS 所得之幾何高差精度為：

$$\Delta h_1 = h_{GNSS} - h_{e-GPS} \quad (3)$$

$$\sigma_{\Delta h_1} = \pm \sqrt{\sigma_{h_{GNSS}}^2 + \sigma_{h_{e-GPS}}^2} = \pm 2.270 \text{ 公分} \quad (4)$$

(2) Mobile LiDAR 相對於 GNSS 所得之幾何高差精度為：

$$\Delta h_2 = h_{GNSS} - h_{Mobile LiDAR} \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta h_2} = \pm \sqrt{\sigma_{h_{GNSS}}^2 + \sigma_{h_{Mobile LiDAR}}^2} = \pm 3.375 \text{ 公分} \quad (6)$$

3.2 22 個固定點位觀測

本次以 GNSS 靜態觀測水準點 7 點及加密點 15 點，共計 22 點，作為此次幾何高參考值之數據，點位分佈如圖 11 所示。102 年 9 月底約六天時間進行 GNSS 靜態觀測，觀測時儀器設定以接收仰角 15° 、接收頻率每 15 秒一筆，接收時間 4 小時，點位解算資料如表 3 所示。

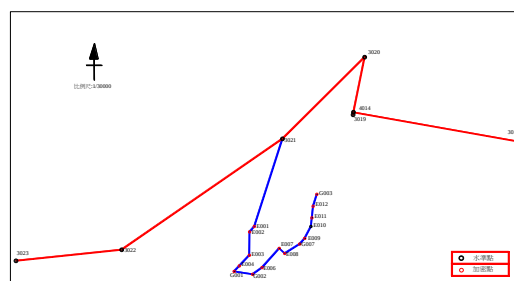


圖 11 固定點位分佈圖

於 102 年 8 月 6、7 日進行 e-GPS 觀測，作業時基站與移動站需同時能接收 5 顆以上衛星、必須能同時接收到 GPS 衛星的訊號與基地站廣播的差分訊號，方可求解未知點坐標，點位解算資料如表 3 所示。

於 2013 年 6 月底本研究委由中興測量公司，使用 Lynx M1 行動測繪系統進行點位外業資料收集，Lynx 行動測繪系統雷射掃描頭之掃描頻率可以依據需求而調整，規格其掃描頻率可自由從 80Hz 調整至 200Hz，接收器頻率亦可從 75kHz 調整至 500kHz，本次作業則設定為掃描頻率 200Hz、接收器頻率 500kHz，車速在 40 公里/小時以下，點位解算資料如表 3 所示。

表 3 各式量測方式固定點位幾何高資料（公尺）

點名	GNSS(h)	e-GPS(h)	車載光達(h)
3018	126.976	126.960	126.871
3019	125.648	125.724	125.676
4014	126.274	126.316	126.294

3020	191.312	191.349	191.269
3021	204.020	204.114	204.038
3022	222.065	222.137	221.973
3023	243.770	243.755	243.767
E001	212.383	212.420	212.358
E002	212.889	212.929	212.902
E003	214.461	214.482	214.474
E004	216.027	216.091	216.024
E006	215.274	215.264	215.263
E007	212.751	212.814	212.757
E008	213.260	213.334	213.255
E009	211.991	212.033	211.993
E010	210.700	210.719	210.705
E011	209.736	209.782	209.734
E012	207.892	207.639	207.916
G001	216.799	216.844	216.765
G002	216.763	215.687	215.649
G003	206.433	206.518	206.435
G007	212.418	212.442	212.427

E010	-0.019	-0.005
E011	-0.046	0.002
E012	0.253	-0.024
G001	-0.045	0.034
G002	1.076	1.114
G003	-0.085	-0.002
G007	-0.024	-0.009

由表 4 得知 e-GPS 較差過大之點位為 E012 及 G002，車載光達較差過大之點位為 3018、E012 及 G002，統一將固定點較差過大之點位 3018、E012 及 G002 統一剔除，分析兩種觀測方式較差值之最大、最小、平均及 RMS 值刪除前後之差異如表 5、表 6

表 5 e-GPS 幾何高較差別除前後比較表（公尺）

e-GPS 項目	較差別除前	較差別除後
最大值	1.076	0.015
最小值	-0.094	-0.094
平均值	0.022	-0.045
均方根值 (RMS)	0.05233	0.00631

3.3 各式量測方式固定點位幾何高比較

將 22 個固定點位以 GNSS 靜態觀測為參考值作幾何高分析，e-GPS 相對於 GNSS 靜態觀測幾何高較差之關係如表 4 所示，車載光達相對於 GNSS 靜態觀測幾何高較差之關係如表 4 所示。

表 4 e-GPS 與車載光達相對於 GNSS 幾何高較差表（公尺）

點名	e-GPS 較差	車載光達較差
3018	0.016	0.105
3019	-0.076	-0.028
4014	-0.042	-0.020
3020	-0.037	0.044
3021	-0.094	-0.018
3022	-0.072	0.092
3023	0.015	0.003
E001	-0.037	0.025
E002	-0.040	-0.013
E003	-0.021	-0.013
E004	-0.064	0.003
E006	0.010	0.012
E007	-0.063	-0.006
E008	-0.074	0.005
E009	-0.042	-0.002

表 6 車載光達幾何高較差別除前後比較表（公尺）

車載光達 項目	較差別除前	較差別除後
最大值	1.114	0.092
最小值	-0.028	-0.028
平均值	0.059	0.005
均方根值 (RMS)	0.05075	0.00591

以 GNSS 靜態觀測 22 個固定點位為參考值之幾何高，將兩種方式共同剔除 3 個較差過大之點位後，則 e-GPS 固定點位觀測符合 e-GPS 相對於 GNSS 所得之幾何高差精度在 ± 2.27 公分之間；車載光達固定點位觀測符合車載光達相

對於 GNSS 所得之幾何高差精度在 ± 3.375 公分之間。

四、幾何高差之應用

利用 e-GPS 法與車載光達法得之幾何高差，配合直接水準作業之正高值，計算所得之大地起伏差值，驗證檢核內政部 2014 年大地起伏模式，計算相同點位測段之精度分析比較。

4.1 直接水準觀測作業

首先進行水準點檢測，由水準點 3018 至 3023 共 6 個水準點為此次檢測之點位，以精密水準檢測水準點往返閉合差是否符合一等二級每測段往返最大閉合差 $3\text{mm}\sqrt{k}$ (k 為單一測段長度之公里數) 如表 7 所示。檢測無誤後，以 3022 水準點為起算高程，依政部國土測繪中心 97 年公告之正高，並推算其餘點位正高值。

以水準點 3022 為起始點位，在一等二級水準測量往返容許誤差為 $3\text{mm}\sqrt{k}$ ， k 假設為測段最長距離 2.807 公里 (3021 與 3022 點間距離)，則 ΔH 之最大容許誤差 ($\sigma_{\Delta H}$) 為 0.502 公分。

表 7 水準點檢測資料表

點號	公告值 (公尺)	高程差 (公尺)	往測高 程差 (公尺)	返測高 程差 (公尺)	距離 (公 里)	容許閉 合差 $3\text{mm}\sqrt{k}$ (公厘)
3023	223.6136	21.70259	21.70922	21.70994	1.944	4.18
3022	201.91101	17.99686	17.99327	17.9946875	2.807	5.02
3021	183.91415	12.72397	12.74869	12.748935	1.473	3.63
3020	171.19018	65.71051	65.67717	-65.68059	1.682	3.89
3019	105.47967	-1.13831	-1.12416	-1.12433	2.565	4.8
3018	106.61798					

4.2 2014 內政部大地起伏模式精度評估

本研究沿用 2014 年內政部衛星資訊中心提供之大地起伏模式 [7]，作為後續內插正高計算使用。透過檢核路線檢核此大地起伏模式精度，同時也藉本研究 e-GPS 法與車載光達法，檢驗 2014 大地起伏模式計算大地起伏值之精度，檢核路線共有 39 個檢核點，其中包含了 38 個一等二級水準點，一個二等衛星控制點 (此點不用作檢核)，檢核點是使用 24 小時的 GPS 定位獲得高精度的橢球高，以及水準測量所獲得正高資料，將橢球高減去各點，即可建立精度足供與大地起伏值比較精度之依據。圖 12 為四條檢核路線由內政部於 2003 年委託中興測量公司及內政部土地測量局所辦理，路線分佈於台灣北部、中部、南部，分別是北部濱海公路、台 9 線花東路線、中部橫貫公路路線、南部橫貫公路路線。

上述說明之檢核路線圖，將台灣地區大地起伏模型，帶入檢核路線得到成果表 8，綜合此大地起伏成果統計來看，標準偏差在 0.1697 公尺左右。北部濱海沿線之精度約為 4 公分上下，中部地區之路線精度約為 3 公分上下，在花東及南部精度均超過 10 公分以上，若以點位間大地起伏差值考量，本測區之大地起伏差值之精度約在 5 公分上下。

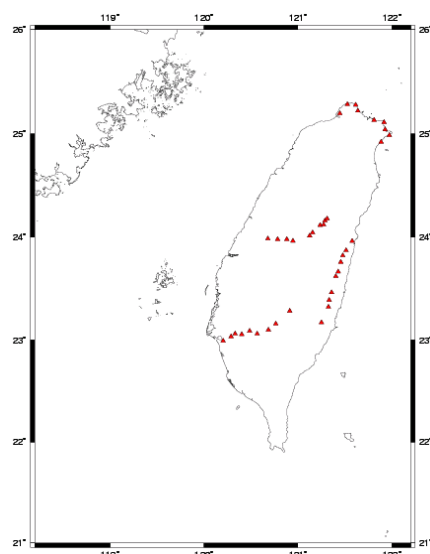


圖 12 台灣地區大地起伏檢核點之分布圖

表 8 重力法大地起伏檢核成果統計 (單位：公尺)

	最大值	最小值	平均	標準 偏差
北部濱 海路線	-0.060	-0.197	-0.1094	0.0416
台 9 線 花東路 段	0.134	-0.159	0.0098	0.1553
中部橫 貫公路	0.230	-0.262	0.1526	0.0366
南部橫 貫公路	0.041	-0.376	-0.2614	0.1246
全部	0.230	-0.376	-0.08305	0.1697

4.3 大地起伏差值精度之比較

4.3.1 各式方法相對大地起伏差值精度評估

幾何高差為各測段，也就是點位間之高程差值的表示，則 $\Delta h = h_1 - h_2$ ，在誤差傳播定律中幾何高差隨著點到點的關係，各式量測方式之高程精度（參考 3.1 節），然而幾何高差高程精度（ $\sigma_{\Delta h}$ ）需乘與 $\sqrt{2}$ ，分別計算如下：e-GPS 觀測幾何高差高程精度計算 $\sigma_{\Delta h_{e-GPS}}$ ：

$$\sigma_{\Delta h_{e-GPS}} = \pm \sqrt{\sigma_{h_{e-GPS}}^2 + \sigma_{h_{e-GPS}}^2} = \pm 2.855 \text{ 公分} \quad (7)$$

車載光達觀測幾何高差高程精度計算

$\sigma_{\Delta h_{Mobile LiDAR}}$ ：

$$\sigma_{\Delta h_{Mobile LiDAR}} = \pm \sqrt{\sigma_{h_{Mobile LiDAR}}^2 + \sigma_{h_{Mobile LiDAR}}^2} = \pm 4.5 \text{ 公分} \quad (8)$$

由上述成果配合水準觀測正高容許誤差 $\sigma_{\Delta H} = 0.502$ 公分（參考 4.1 節），利用公式 h （幾何高）= N （大地起伏）+ H （正高）[8]經誤差傳播定律得公式(9)，為觀測差值相對正高差值，所得之大地起伏差值之精度。

$$\sigma_{\Delta N} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} \quad (9)$$

e-GPS 觀測差值相對正高差值，所得之大地起伏差值之精度計算 $\sigma_{\Delta N_{e-GPS}}$ 計算如下：

$$\sigma_{\Delta N_{e-GPS}} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta h_{e-GPS}}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 2.899 \text{ 公分} \quad (10)$$

車載光達觀測差值相對正高差值，所得之大地起伏差值之精度計算 $\sigma_{\Delta N_{Mobile LiDAR}}$ 計算如下：

$$\sigma_{\Delta N_{Mobile LiDAR}} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta h_{Mobile LiDAR}}^2 + \sigma_{\Delta H}^2} = \pm 4.569 \text{ 公分} \quad (11)$$

4.3.2 各區段相對大地起伏差值精度分析

(1)第 I 區段成果分析

以 2014 內政部大地起伏計算值為參考值，相較其他兩種觀測方式，所換算出之大地起伏值如表 9 所示，在各別說明最大、最小、平均及 RMS 值如表 10 所示。

表 9 第 I 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏較差表（單位：公尺）

測段	點名	e-GPS 法 ΔN 較差	車載光達 法 ΔN 較差
1	A023	-0.039	0.000
2	A022	0.026	0.028
3	A020	-0.006	-0.015
4	A019	-0.045	-0.042
5	A018	0.044	0.042
6	A016	-0.010	-0.022
7	A015	0.033	0.050
8	A014	0.009	0.011
9	A013	-0.028	-0.031
10	A012	0.012	0.003
11	A011	-0.375	-0.411
12	A010	0.383	0.430
13	A009	-0.006	-0.004
14	A008	0.006	-0.002
15	A007	-0.107	-0.113
16	A006	-0.205	-0.198
17	A005	-0.083	-0.074
18	A004	0.346	0.340
19	A001	-1.056	-0.027
20	3022	1.104	-0.050

21	F017	-0.011	-0.005
22	F016	-0.210	-0.093
23	F014	0.160	0.166
24	F013	0.015	0.015
25	F012	0.016	0.014
26	F010	-0.537	0.016
27	F009	0.559	0.006
28	F008	0.016	0.018
29	F007	-0.068	-0.075
30	F006	0.071	0.075
31	F005	-0.018	-0.018
32	F004	0.128	0.141
33	F002	-0.140	-0.169
34	F001	-0.362	-0.342
35	F000	0.388	0.424
36	3023	-0.065	-0.057

表 10 第 I 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏差
值精度分析表 (單位: 公尺)

項目 \ 第 I 區	e-GPS 法	車載光達法
最大值	1.104	0.430
最小值	-1.056	-0.411
平均值	-0.002	0.001
均方根值(RMS)	0.00917	0.00454

由公式(10)得知, e-GPS 觀測差值相對正高差值, 所得之大地起伏差值之精度, 理想值為 2.899 公分, 實際精度為 0.917 公分; 由公式(11)得知, 車載光達觀測差值相對正高差值, 所得之大地起伏差值之精度, 理想值為 4.569 公分, 實際精度為 0.454 公分, 則兩種觀測方式都遠優於 2014 內政部大地起伏之 5 公分之精度, 且第 I 區段車載光達法精度也優於 e-GPS 法。

(2) 第 II 區段成果分析

以 2014 內政部大地起伏計算值為參考值, 相較其他兩種觀測方式, 所換算出之大地起伏值如表 11 所示, 在各別說明最大、最小、平均及 RMS 值如表 12 所示。

表 11 第 II 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏較差
表 (單位: 公尺)

測段	點名	e-GPS 法	車載光達法
	3021	△N 較差	△N 較差
1'	A023	-0.039	0.000
2'	A022	0.026	0.028
3'	A020	-0.006	-0.015
4'	A019	-0.045	-0.042
5'	A018	0.044	0.042
6'	A016	-0.010	-0.022
7'	E001	0.018	0.011
8'	E002	0.000	0.034
9'	E003	0.004	0.024
10'	E004	0.035	-0.024
11'	G001	-0.036	-0.048
12'	G002	0.003	0.044
13'	E006	-0.015	0.022
14'	E007	0.016	-0.039
15'	E008	0.013	-0.010
16'	G007	-0.048	0.017
17'	E009	0.010	-0.015
18'	E010	-0.006	0.020
19'	E011	0.055	0.020
20'	E012	-0.350	-0.024
21'	G003	0.340	-0.020

表 12 第 II 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏差
值精度分析表 (單位: 公尺)

項目 \ 第 II 區	e-GPS 法	車載光達法
最大值	0.340	0.044
最小值	-0.350	-0.048
平均值	0.000	0.000
均方根值(RMS)	0.00536	0.00135

由公式(10)得知, e-GPS 觀測差值相對正高差值, 所得之大地起伏差值之精度, 理想值為 2.899 公分, 實際精度為 0.536 公分; 由公式(11)得知, 車載光達觀測差值相對正高差值, 所得之大地起伏差值之精度, 理想值為 4.569 公分, 實際精度為 0.135 公分, 則兩種觀測方式

都遠優於 2014 內政部大地起伏之 5 公分之精度，且第 II 區段車載光達法精度也優於 e-GPS 法。

(3) 第 III 區段成果分析

以 2014 內政部大地起伏計算值為參考值，相較其他兩種觀測方式，所換算出之大地起伏值如表 13 所示，在各別說明最大、最小、平均及 RMS 值如表 14 所示。

表 13 第 III 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏較差表（單位：公尺）

測段	點名	e-GPS 法 ΔN 較差	車載光達法 ΔN 較差
	3021		
1''	B001	-0.023	0.009
2''	B002	0.019	0.022
3''	B003	-0.008	-0.006
4''	B004	0.022	0.029
5''	B005	0.024	0.028
6''	B006	0.022	0.005
7''	3020	-0.038	-0.073
8''	C001	-0.056	-0.005
9''	C003	-0.287	-0.283
10''	C005	0.336	0.240
11''	4014	-0.015	0.084
12''	D001	0.021	0.023
13''	D002	-0.026	-0.045
14''	D003	0.038	0.078
15''	D004	-0.030	-0.071
16''	D005	-0.010	-0.008
17''	D006	0.020	0.009
18''	D007	-0.299	-0.296
19''	D008	0.253	0.225
20''	3018	0.044	0.030

表 14 第 III 區段 e-GPS 法與車載光達法大地起伏差值精度分析表（單位：公尺）

項目 \ 第 III 區	e-GPS 法	車載光達法
最大值	0.336	0.240
最小值	-0.299	-0.296

平均值	0.000	0.000
均方根值(RMS)	0.00690	0.00634

由公式(10)得知，e-GPS 觀測差值相對正高差值，所得之大地起伏差值之精度，理想值為 2.899 公分，實際精度為 0.690 公分；由公式(11)得知，車載光達觀測差值相對正高差值，所得之大地起伏差值之精度，理想值為 4.569 公分，實際精度為 0.634 公分，則兩種觀測方式都遠優於 2014 內政部大地起伏之 5 公分之精度，第 III 區段車載光達法精度也優於 e-GPS 法。

五、結論

5.1 結論

1. 本實驗以 GNSS 觀測 22 個固定點當參考值，當 e-GPS 相對於 GNSS 所得之幾何高差精度 RMS 值為 0.05233 公尺，將較差過大 3 點剔除後 RMS 值為 0.00631 公尺，符合精度要求在 ± 2.27 公分之內；當車載光達相對於 GNSS 所得之幾何高差精度 RMS 值為 0.05075 公尺，將較差過大 3 點剔除後 RMS 值為 0.00591 公尺，符合精度要求在 ± 3.375 公分之內，兩種觀測方式均符合精度要求。
2. 再者就理論推算 e-GPS 法與車載光達法，配合直接水準法計算大地起伏差值之精度，經計算得知 e-GPS 法精度要求為 ± 2.899 公分，車載光達法精度要求為 ± 4.569 公分。第 I 區 e-GPS 法計算精度為 0.917 公分，車載光達法計算精度為 0.454 公分；第 II 區 e-GPS 法計算精度為 0.536 公分，車載光達法計算精度為 0.135 公分；第 III 區 e-GPS 法計算精度為 0.690 公分，車載光達法計算精度為 0.634 公分，經過三個區域測試結果，兩種方式皆在精度要求範圍內，車載光達法計算之精度均優於 e-GPS 法。且兩種觀測方式計算大地起伏差值之精度，均遠優於內政部 2014 大地起伏模式差值約在 5 公分上下之精度。

5.2 建議

1. 本研究為各式量測技術於不同測區之精度相較，成果部分僅針對高程數據做比較分析，對於平面坐標精度尚未探討，期許日後再作

相關研究時，應一併考慮平面坐標精度差異，增加內容之豐富性。

2. 本次作業以 GNSS 靜態觀測作為參考值，理論上其觀測精度為最優。因各式量測作業使用不同衛星接收儀間接影響觀測作業，本研究如能使用同一型號之接收儀，相信可避免就此觀點而言，車載光達技術勢必成為未來測繪作業之新趨勢，但就現況成本考量，e-GPS 量測技術仍有其不可取代性。車載光達外業作業時，雖然比較快速便捷，但該技術對於透空性較不佳的點位，仍需改以立標方式進行掃描，增加前置作業困擾，且車載光達後續內業（軟體）處理部份，仍非常複雜困難，尚待業者的檢討與改進。

因儀器不同所導致之誤差，更能大幅提升精度。

3. 就 e-GPS 與車載光達兩種模式比較，車載光達量測技術實際觀測精度最高，且在外業效率時間或人力運用上，為兩者中之最佳者，

參考文獻

- [1] 森泰儀器有限公司，
[http://www.sokkia.com.tw/\(2013/09/15\)](http://www.sokkia.com.tw/(2013/09/15))
- [2] 宏遠儀器有限公司，
[http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm\(2013/08/06\)](http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm(2013/08/06))
- [3] 中興測量公司，
[http://www.chsurvey.com.tw/\(2013/6/30\)](http://www.chsurvey.com.tw/(2013/6/30))
- [4] 迅聯光電有限公司，
[http://www.linkfast.com.tw/\(2013/12/01\)](http://www.linkfast.com.tw/(2013/12/01))
- [5] Ghilani, C. D. and Paul, R., Elementary surveying, Pearson Education Limited, USA, pp.180, 2011.
- [6] Charles, D. G., Adjustment computations: spatial data analysis, John Wiley and Sons., Canada, pp.124, 2010.
- [7] 內政部地政司衛星測量中心，
[http://www.gps.moi.gov.tw/sscenter/\(2014/03/05\)](http://www.gps.moi.gov.tw/sscenter/(2014/03/05))
- [8] 黃立信，“大地測量學”，課程講義，國防大學理工學院環境資訊及工程學系，桃園，第 54-95 頁，2010。