

高密度雷射點雲成果與大比例尺航測數 值地形向量資料測製成果之精度比較分析

Accuracy comparison between high density Airborne laser cloud
and large scale photogrammetry topographic map

徐明鎰¹

Ming-Yi Shu

李佩芝²

Pei-Chih Lee

鄒慶敏³

Ching-Ming Chou

摘要

本文在於探討利用空載雷射地形掃描儀與數位相機整合應用於鹿港市中心地區進行高精度及高密度雷射地形掃描，同時進行該區大比例尺航測數值地形圖測製，並比較分析兩者平面與高程的精度，最後嘗試提出光達與航測數位像機整合系統製作大比例尺數值地形圖的可行性評估。

關鍵字：光達、慣性導航器、數位量測相機。

ABSTRACT

In this study we have intended to use Leica ALS50 equipped with integrated high resolution digital metric camera, Rollei AIC with frame size 5440 X 4080 pixels, to fly over Lu-Kan county as test area for high density and high accuracy laser profiling. At the same time high resolution 10cm GSD digital photos were taken. We will try to propose the possibility of applying LiDAR system in large scale mapping and analyze the results of the planimetry and vertical accuracy between high density laser cloud and large scale topographic map produced by stereo mapping.

Keyword : Lidar、IMU、Digital metric camera.

¹亞新國土科技股份有限公司總經理，mingyi6700@giga.net.tw

²亞新國土科技股份有限公司工程師，[Tel:04-23221422](tel:04-23221422)

³內政部國土測繪中心測量員，22044@mail.nlsc.gov.tw

本論文為內政部國土測繪中心「96年度以空載光達技術建立數值地形模型」案之部分研究成果

一、前言

空載雷射掃描系統(Airborne Laser Scanning, 簡稱 ALS) 整合了雙頻衛星定位器(Global Position System, GPS)、慣性導航儀(Initial Measurement Unit, IMU)、雷射掃描儀及機上電腦系統(computer rack)四部份如圖 1, 以即時獲取大量的地形高程點空間資料[史天元,2002/2003]。本公司為投入與工研院合作之內政部「九十三年度辦理 Lidar 測區之高精度及高解析力數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作」, 特於 2004 年 10 月引進德國 LEICA 公司最新的空載雷射掃描系統(ALS50, 諸元如表 1), 系統除了有高脈衝率(83khz)、高掃描角度(75 度)、飛行滾轉角度自動補償(Automatic adaptive roll compensation)及最大海平面飛行高度(AGL4000m)等特色外, 亦融合了工研院精心設計的機載平台(如圖 2)及率定程序以提昇設備整體耐用性、操作方便性及掃描精度, 經過這多年來的使用及改良, 工作成果及精度受到內政部長官及審查委員的肯定。本公司為回應航測方面的需求, 更引進高解析力數位量測相機模組(Rollei Aerial Industrial Camera, 以下簡稱 AIC, 相機諸元如表 2), 安裝於 ALS50 光學掃描儀旁的雙照相孔以同時獲取三度空間地形資料及 RGB 航測影像資料。兩者結合之後數位影像可快速獲取 RGB 彩色正射影像及高精度數值地形, 並可帶來許多後續如水資源應用分析、3D 都市管理、山坡地管理及監測等地理資訊(GIS)廣大應用領域。

本文選擇鹿港市中心約 48 公頃為測試區, 提出之數據及研究重點將會放在整合 AIC 及 ALS50 之先期系統率定及精度分析、高密度雷射點雲掃描資料獲取後之精度分析、航照數位影像空三精度分析及雷射點雲與航測數值地形圖測圖成果之平面及高程精度比較分析等, 並探討以整合系統製作大比例尺數值地形圖的可行性。

表 1、ALS50 性能諸元表

項目	LEICA ALS50
掃描型式	Oscillating, Mirror, Z-shaped
雷射脈衝率	83khz
雷射波長	1064nm
掃描頻率	70Hz
最大掃描角度(FOV)	75 度
操作高度(AGL)	200m~4000m
飛行滾轉角度補償	自動
回測次數	4
GPS/IMU	Novatel/Applanix POS AV 510(200Hz)
掃描儀尺寸/重量	37W*56L*24Hcm/30kg
控制電腦尺寸/重量	48W*52L*64Hcm/64kg



圖 1、LEICA ALS50



圖 2、ALS50 機載平台

表 2、Rollei AIC 性能諸元表

項目	Rollei AIC
影像感測器	CCD-chip 4080*5440 pixels
影像尺寸	36.72mm*48.96mm
像素大小	9 μ m
每張影像大小	65MB in TIFF
影像錄取速度	3 sec/frame
數位機背底片速度	相當 ISO 50~800
鏡頭/光圈	Rollei PQS metric lenses 50mm/80mm/f2.8
與 Applanix POS 連接介面	有
尺寸(cm)/重量	15.1W*14.2H*13L/950g

RolleiMetric



圖 3、Rollei AIC

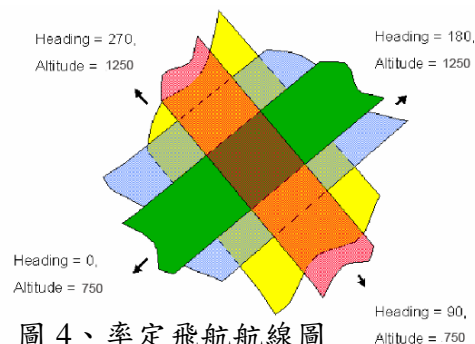


圖 4、率定飛航航線圖

二、系統率定及精度分析

2.1 ALS50 空載雷射掃描系統自身的率定

Boresight Calibration 是以不同之航向、角度與高度之 LIDAR 掃描資料，利用共軛點之 intensity image、laser point 進行計算，以求取 IMU 與雷射中心偏移值之系統誤差值。

系統於 2008 年 3 月 4 日率定時先以預先規劃之飛航參數（航高 750m/1250m）及測區內外三個 GPS 基站於率定場測區進行往返掃描，再以垂直前次飛行之航向同樣進行往返之掃描(如圖 4 及圖 5)，共完成八條航線之掃描；其中並配合各航線最佳共軛點選取及量測(如圖 6)，各高低掃描航線共量取至少 30 個共軛點 進行類似空三參數解算觀念解出 Roll,Pitch,Heading 的差異量如圖 6。

最後將求解後率定參數回應至原始光達點雲資料並與現場已知高程資料比對可產生出如右表 3 精度評估表，由表中標準偏差值 (Std. deviation) 為 0.0361m 可知整體光達系統率定結果符合精度預期。

表 3、率定場掃描精度分析

Use	Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
<input checked="" type="checkbox"/>	46	200622.42	2681755.17	23.610	23.610	+0.000
<input checked="" type="checkbox"/>	79	200325.16	2681872.32	23.860	23.860	+0.000
<input checked="" type="checkbox"/>	425	200274.56	2681196.85	24.232	24.230	-0.002
<input checked="" type="checkbox"/>	222	200758.51	2681673.79	23.513	23.510	-0.003
<input checked="" type="checkbox"/>	238	200609.72	2681732.70	23.623	23.620	-0.003
<input checked="" type="checkbox"/>	61	200483.26	2681810.02	23.834	23.830	-0.004
<input checked="" type="checkbox"/>	89	200232.36	2681908.83	23.924	23.920	-0.004
<input checked="" type="checkbox"/>	68	200418.19	2681835.68	23.785	23.780	-0.005
<input checked="" type="checkbox"/>	60	200492.54	2681806.37	23.856	23.850	-0.006
Average magnitude		0.0644		Average dz		+0.0635
Std deviation		0.0361		Minimum dz		-0.0420
Root mean square		0.0730		Maximum dz		+0.1550

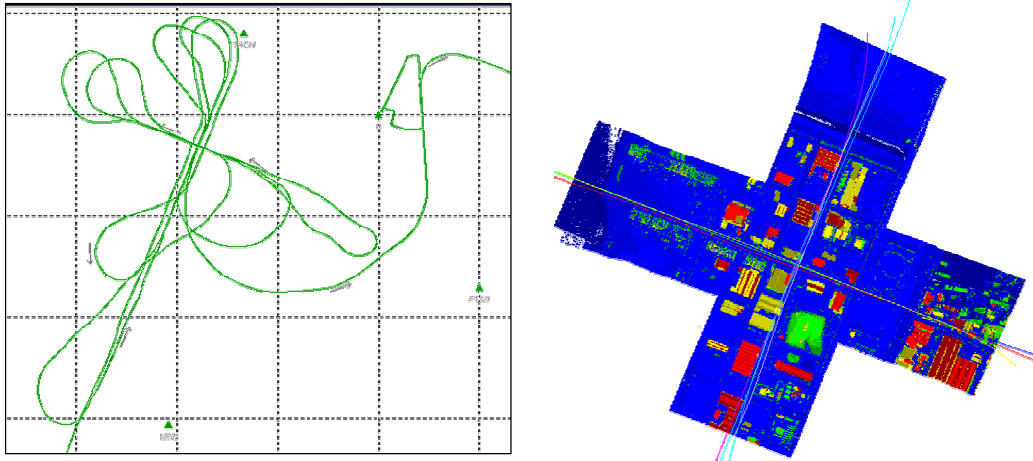


圖 5、率定場掃描軌跡及光達成果高程影像圖

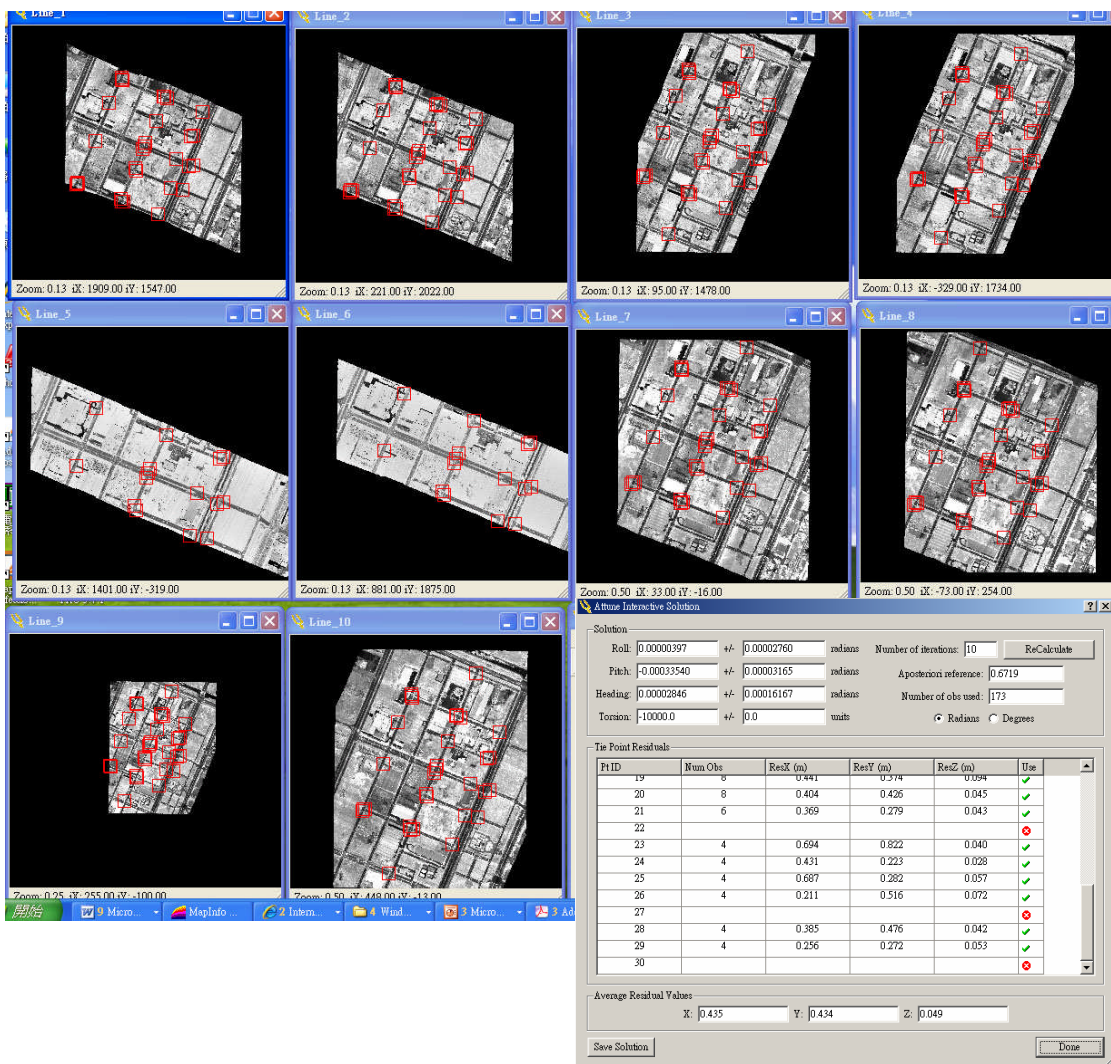


圖 6、共軛點選取量測及平差計算

2.2 AIC 數位相機與 ALS50 雷射掃描系統之間的率定

空載數位空照相機，其實最主要的目的是利用 Applanix POS AV 510 記錄每一個照相點啟動快門所送出的 TTL(Transistor-Transistor Logic)脈衝信號事件(Event mark)之瞬間 GPS 及 IMU 資料作為數位影像投影中心點外方位參數(x,y,z,ω,φ,κ)資料來源，優點是可節省大量地面控制、佈標及航測空三平差推算之工作量，並且可利用數位影像配合 LIDAR DSM 製作正射影像圖。實際應用上，如要達到大比例尺製圖精度要求，這中間則需經過精密率定程序找出像機像平面 XYZ 參考坐標系與 IMU 之 boresight angles(ω,φ,κ 差異量)(如圖 7)方可引用 IMU 的方位參數於航測空三平差，以下就率定場飛航成果(如圖 8)分析說明如下：

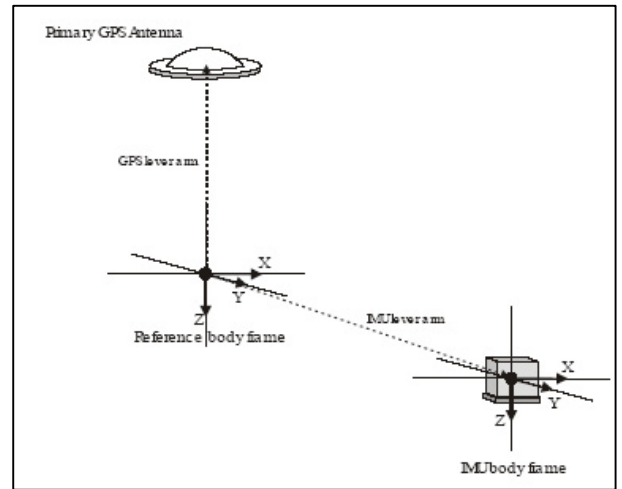


圖 7、GPS/IMU/Camera frame 相對關係位置圖

率定場於 2008 年 3 月 4 日以 1250m 飛航高度,80%前後重疊率及 30%側向重疊率之飛航照片重組空三模型並以地面布設每 50m 一點全控檢核點均勻分佈於各航帶內計 50 點，經 POSPAC/POSCAL 軟體解算後可得到 GPS/IMU/Camera 之間的 boresight angles(Tx,Ty,Tz)及檢核點標準偏差值(Rx=0.11m,Ry=0.12m,Rz=0.28m)。成果符合率定後反算地面檢核點精度需求。

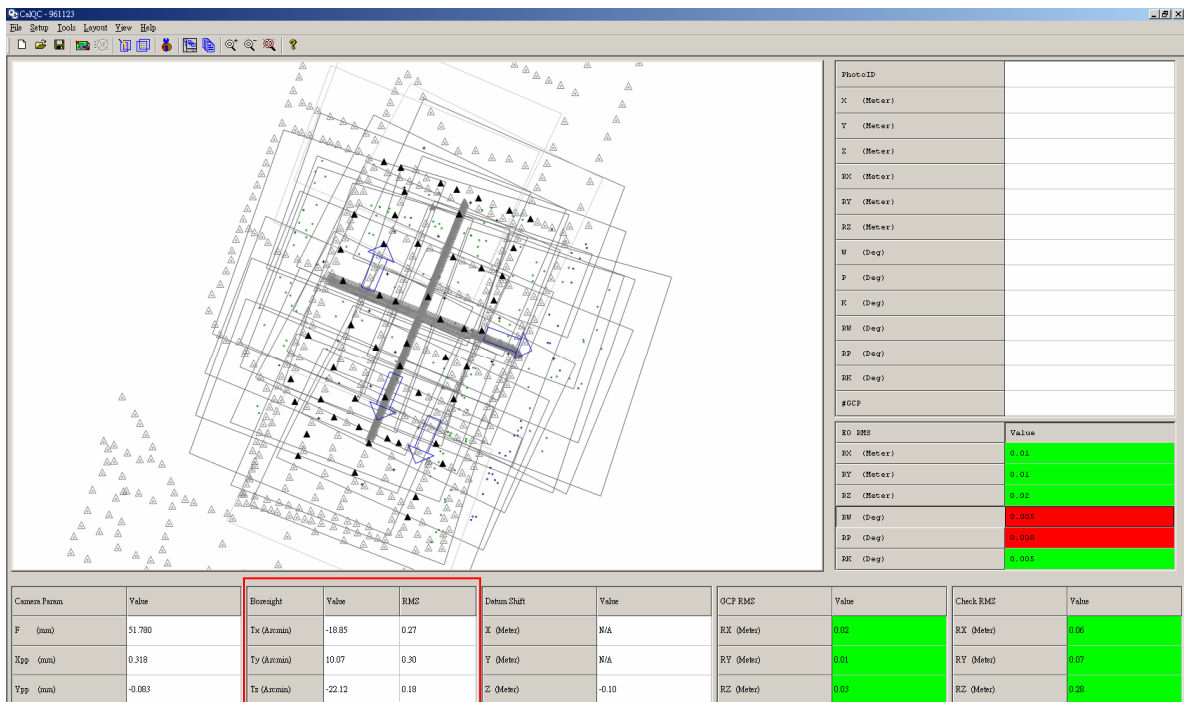


圖 8、相機率定場解算及精度分析

三、資料獲取及解算

本計畫於 2008 年 3 月 4 日所選取鹿港測區進行高密度高精度光達掃描(如圖 9、掃描參數如表 4)，地面基站共架設 5 站 1 筆/秒接收 GPS 觀測量，掃描後成果如圖 11。航拍數位影像照片共取得 8 條航線,139 張 GSD 10cm,1/11000 像比例尺影像如圖 12；將前述數位影像利用 POSPAC/POSEO 軟體轉置方位參數(來源:GPS/IMU 及 Boresight angles)並匯入 Z/I ISAT 空三軟體建立空三模型；地面控制點則以 e-GPS VRS 測量方式建立 12 個全控點，點位精度 XY 約為+3cm,Z 約為

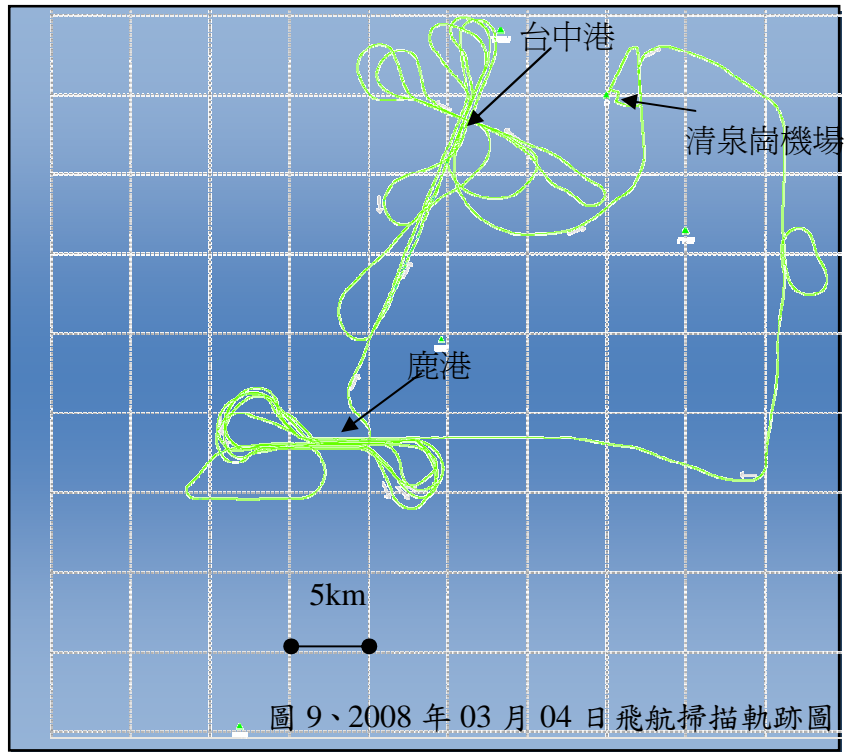


圖 9、2008 年 03 月 04 日飛航掃描軌跡圖

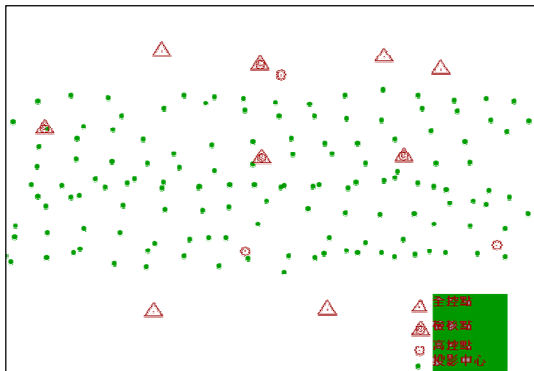


圖 10、鹿港測區地面控制點分佈圖

+5cm(所有 VRS 測量點位相對於 G018 一等水準點為基準修正 N,E,h 偏移量)；投影中心與控制點位分佈關係如圖 10，經過空三約制平差後可建立不同約制方式成果表 5、表 6 及表 7(空三高程系統採用橢球高系統)。最後以表 5 成果建立立體模型並依內政部 1/1000 製圖標準繪製一幅地形圖,成果如圖 13。

表 4、鹿港高密度高精度光達掃描參數表

<i>Scanner Setup</i>		鹿港
Scan FOV (full angle)	degrees	20.00
Nominal Flying Altitude AMSL(實際飛航高度)	meters	600.00
Airspeed	knots	90.00
<i>Resulting Scan Pattern</i>		
Total Swath Width (nominal, at lowest terrain elev'n)	meters	211.59
Point Density (average)	pts/meter ²	8.57

表 5、約制控制點及投影中心空三成果及檢核點誤差向量圖(by ISAT)

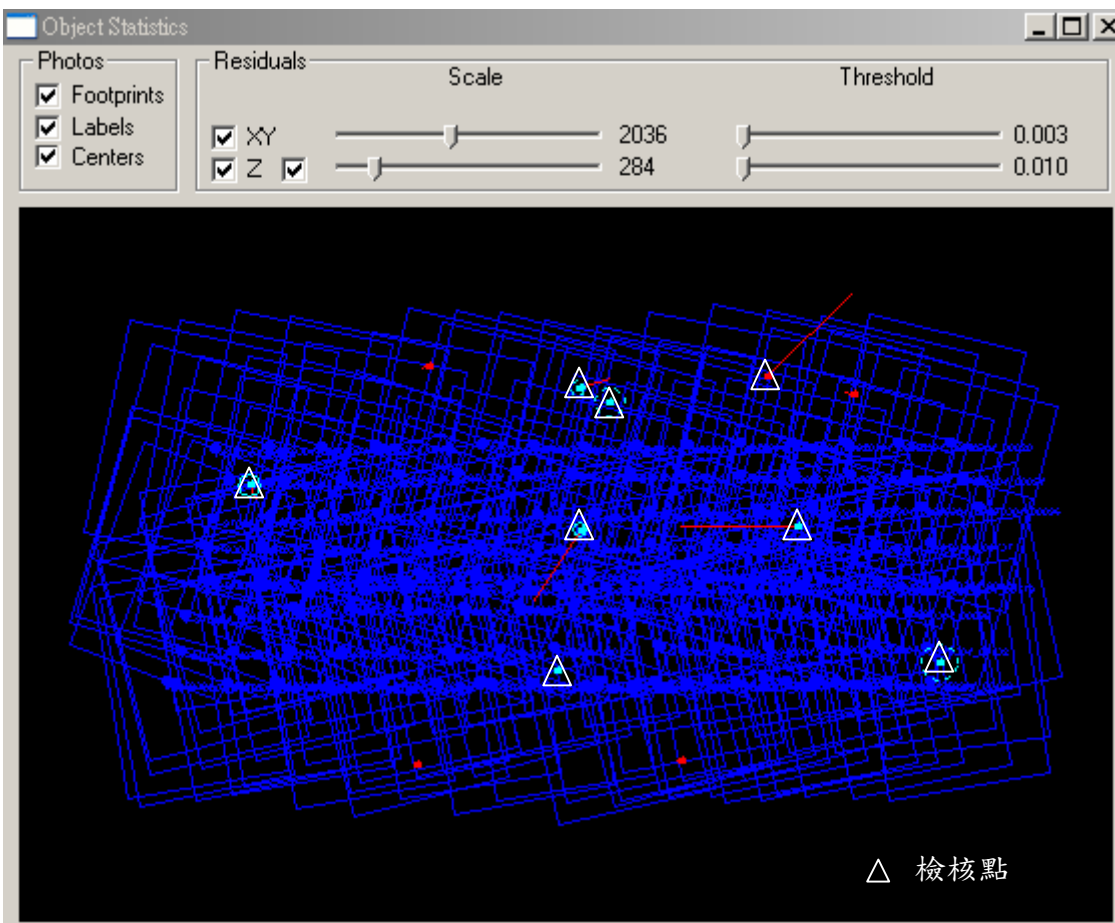
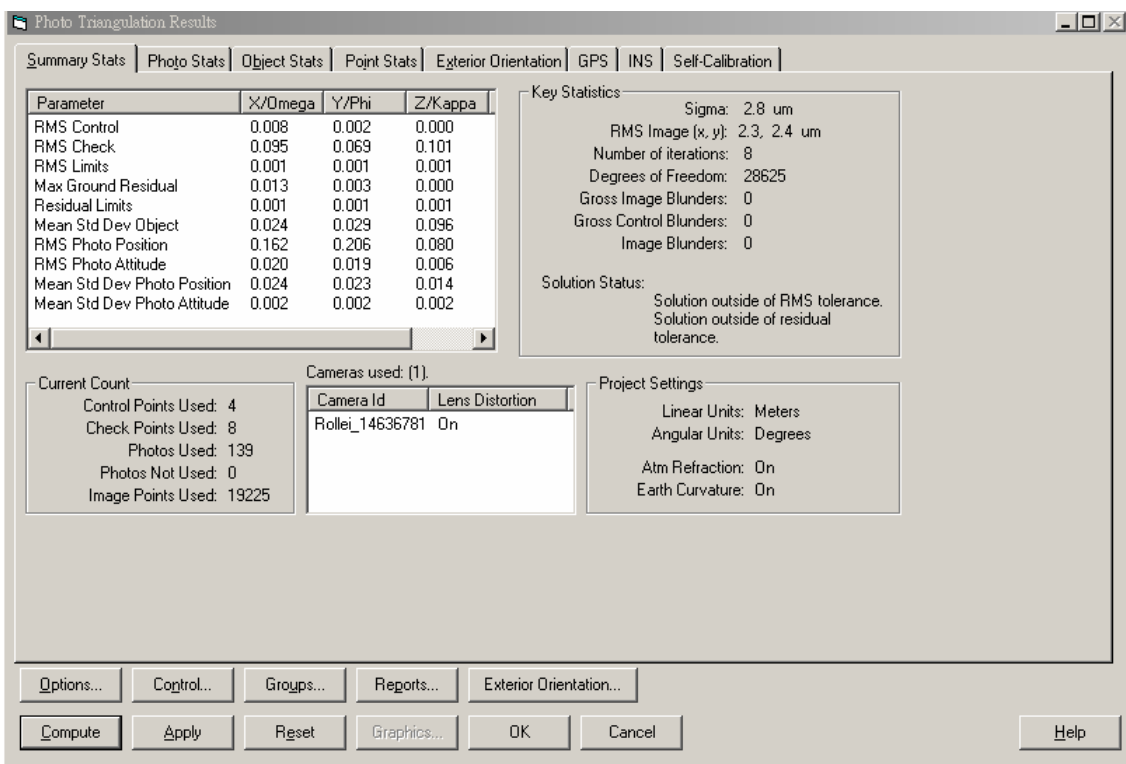


表 6、只約制投影中心空三成果及檢核點誤差向量圖(by ISAT)

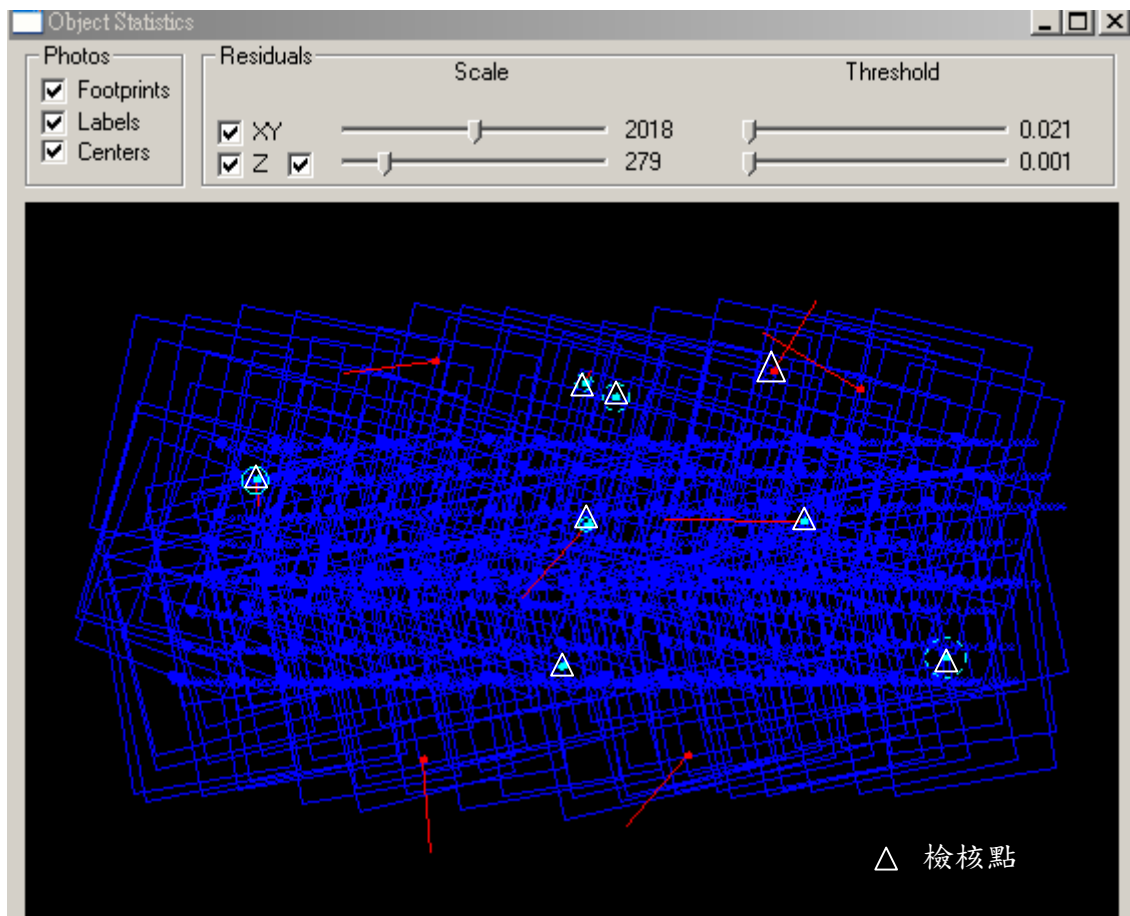
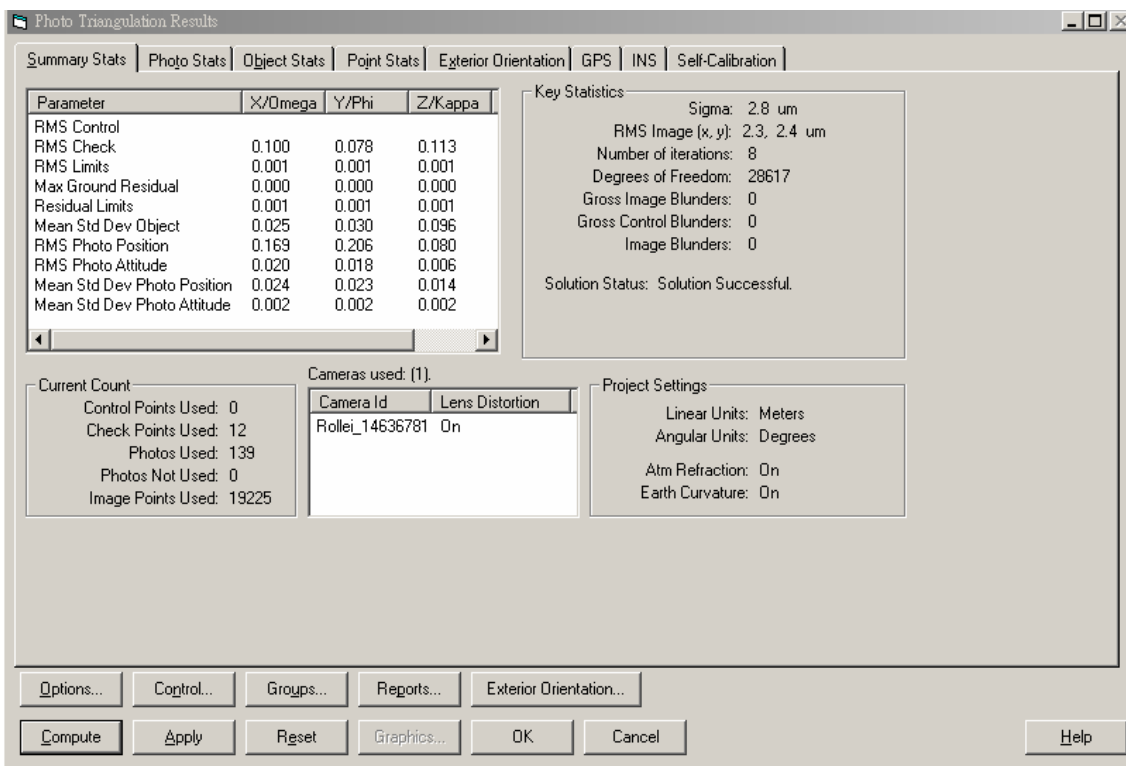
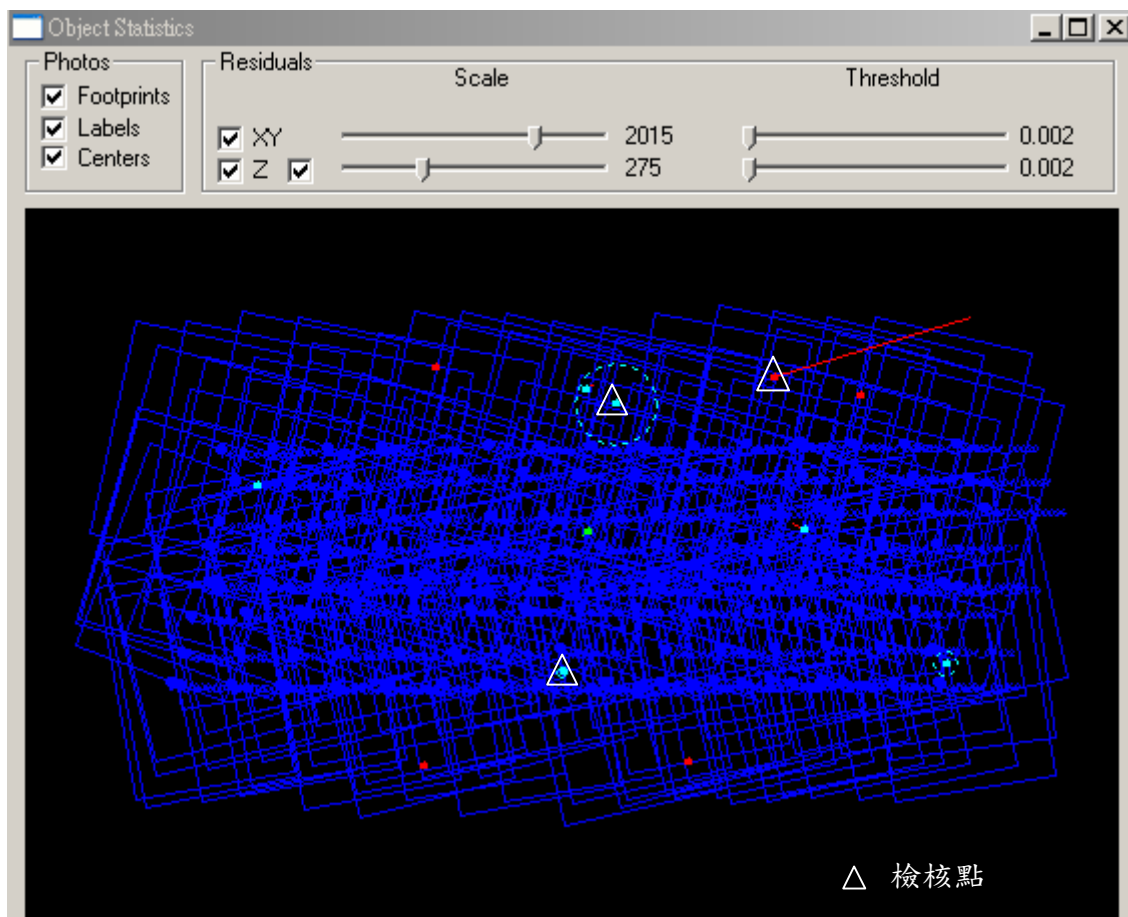
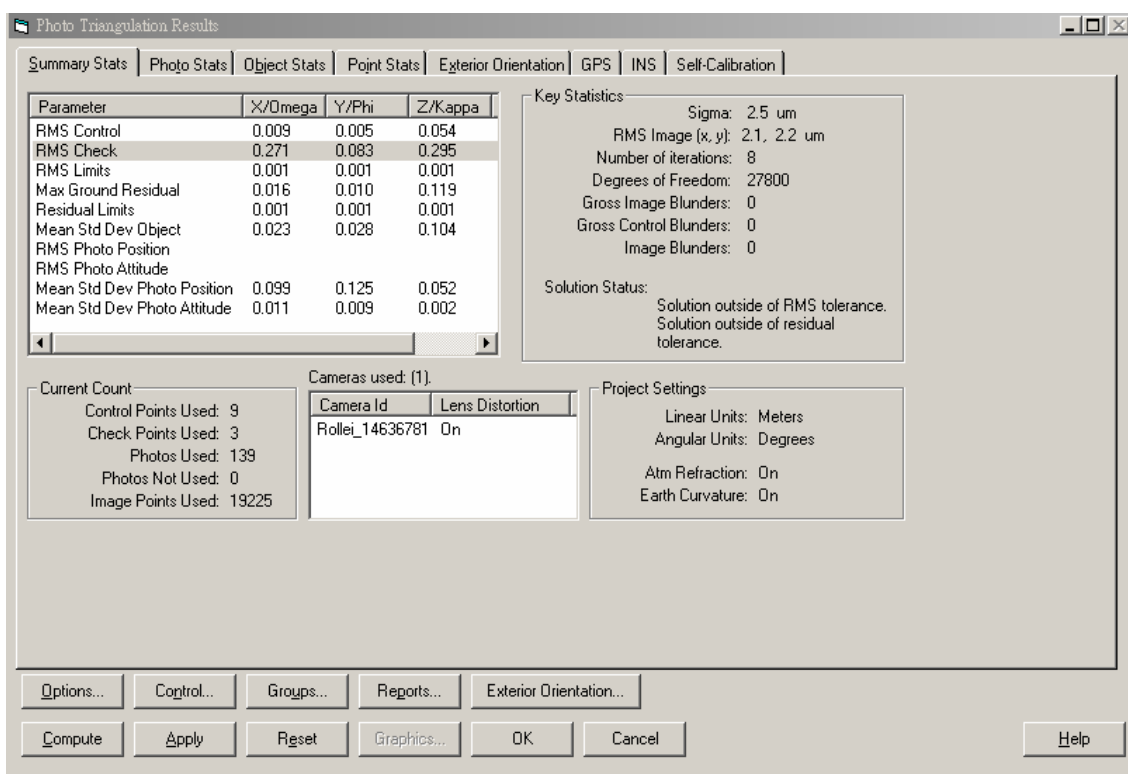


表 7、只約制控制點空三成果及檢核點誤差向量圖(by ISAT)



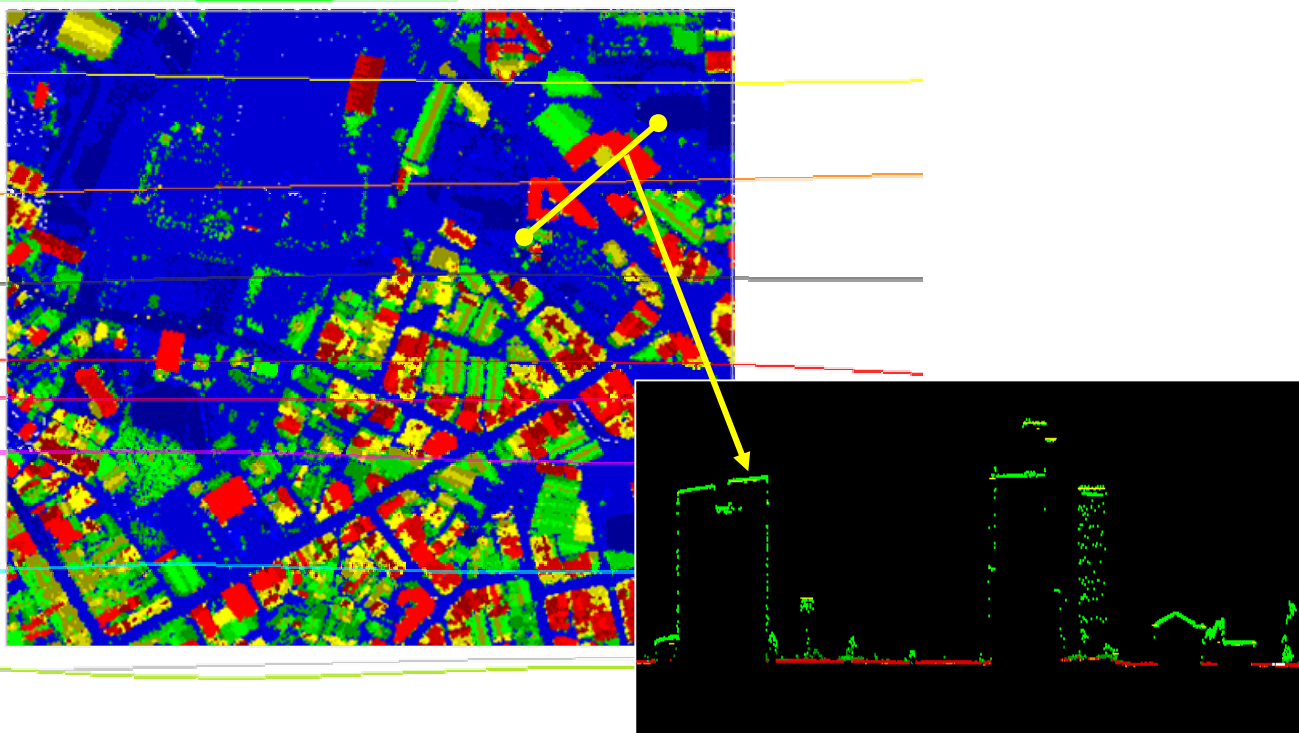


圖 11、航跡與光達掃描點雲及剖面圖

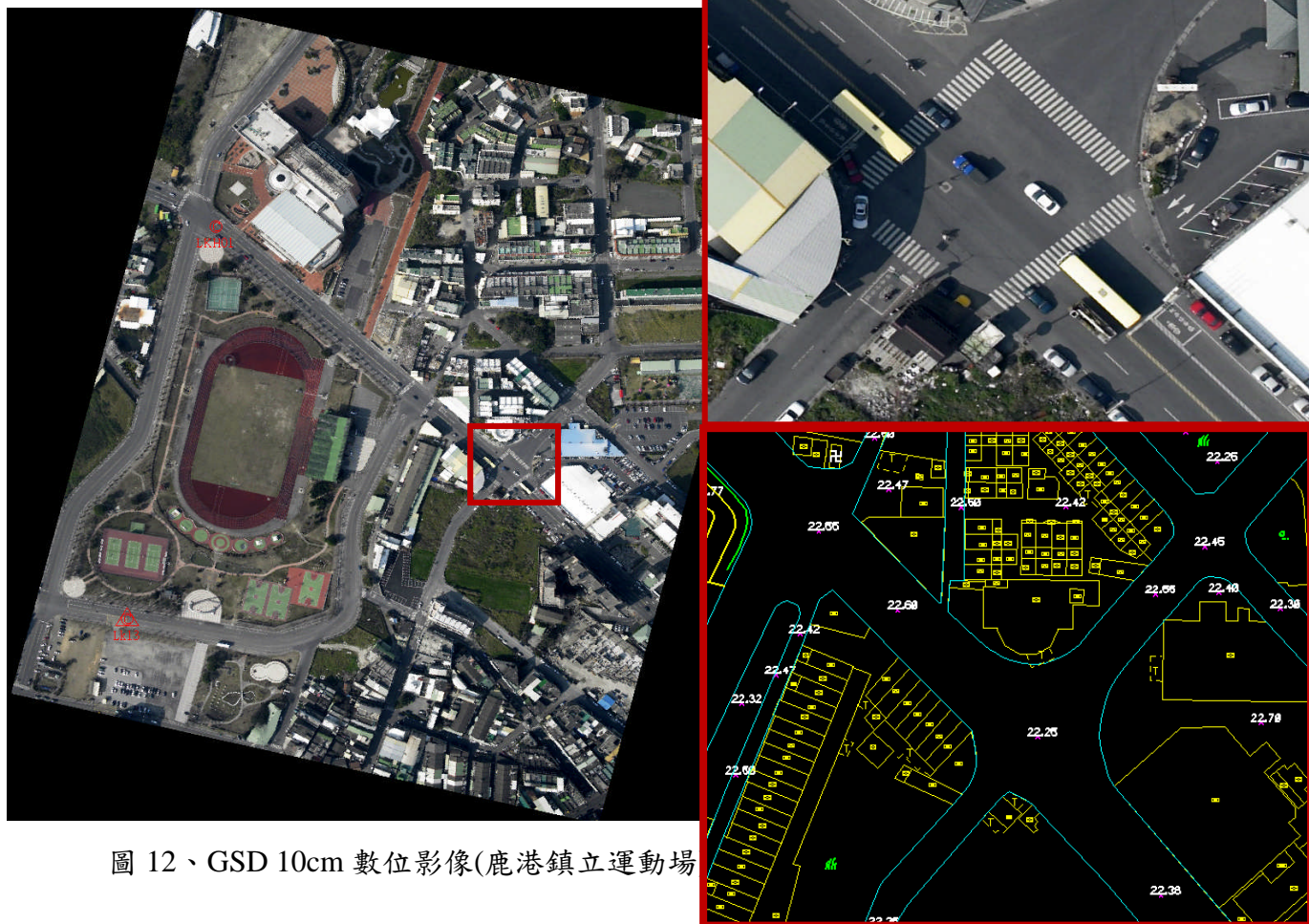


圖 12、GSD 10cm 數位影像(鹿港鎮立運動場)

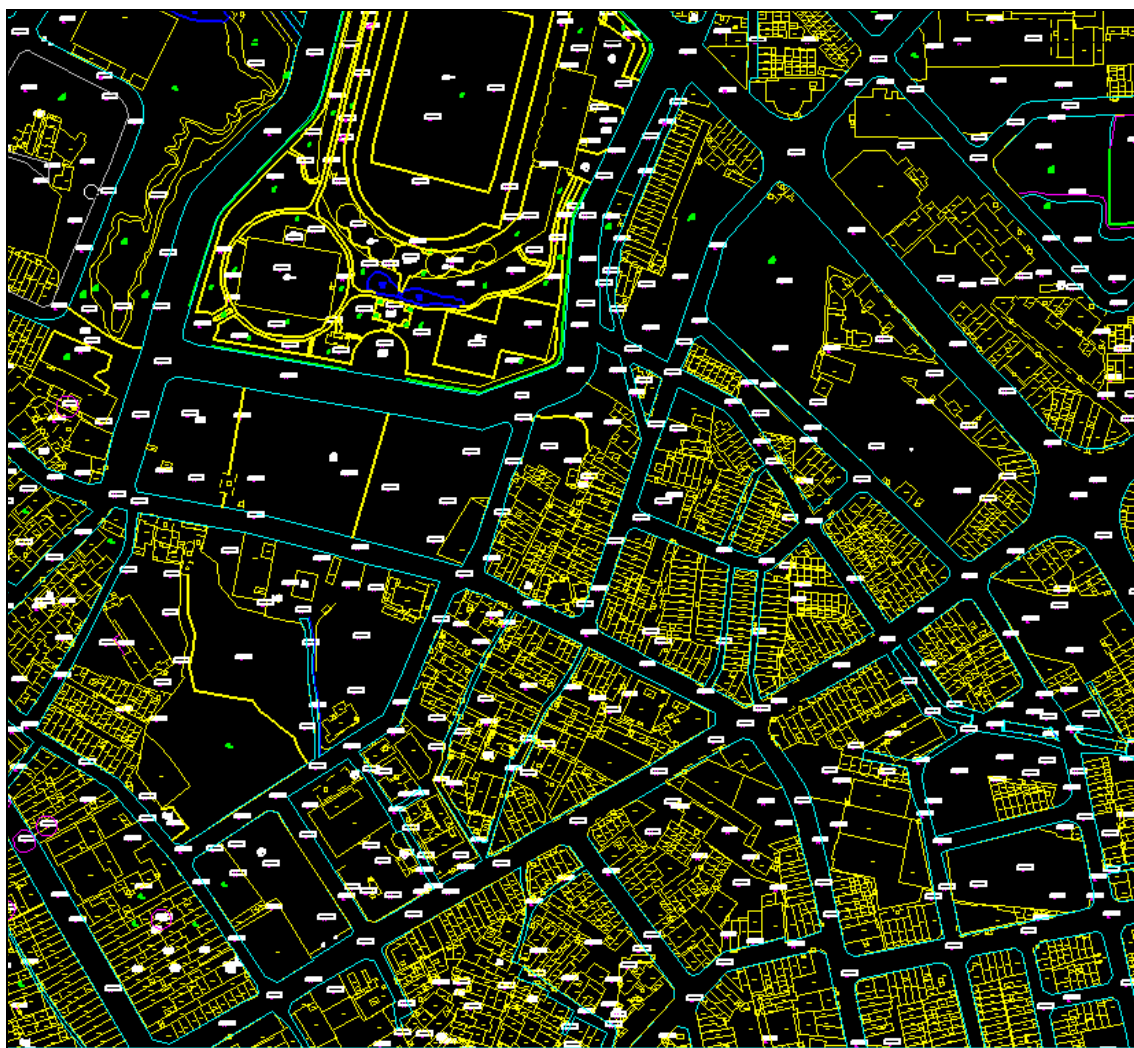


圖 13、1/1000 地形圖航測測製成果(約 800mx600m)

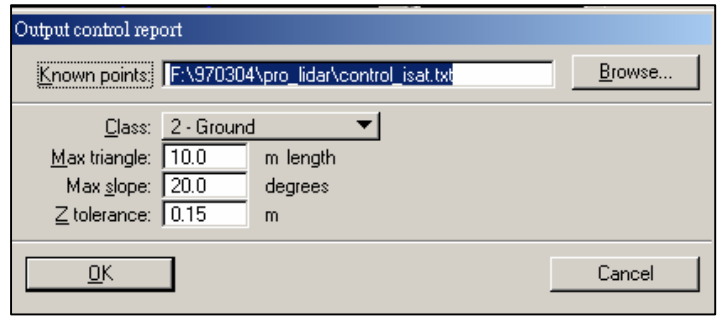
四、精度分析

4.1 空三成果精度分析

由表 5 及表 6 可知約制控制點及投影中心與只約制投影中心空三平差成果之八個地面檢核點平面及高程精度均相當好，約略小於或等同 1pixel size(10cm)。反觀只約制控制點不加入 GPS/IMU 輔助資料空三平差成果(如表 7)，其中三個檢核點(一平控、二高控)之平面及高程精度均大於 2pixel size，因此，加入 GPS/IMU 為輔助的空三平差對於提昇模型絕對精度有極大助益，表 5 及表 6 顯示加入 GPS/IMU 輔助資料對於不需地面控制點或只需少量外圍四點即可達到高精度空三控制的效果。

4.2 光達掃描地面點雲成果與已知地面檢核點高程比較分析

由表 8 比較分析可知同樣的地面已知檢核點與光達掃描點雲成果 (10m 半徑範圍內坡度小於 20 度的所有點雲資料如圖 14 設定)比較分析統計結果為標準偏差 0.0461m,最大



值+0.0941m,最小值-0.0359m,雷射掃描地面點雲分類後成果符合地面檢核之精度要求(<0.34)雷射點雲精度檢核設定值

表 8、雷射掃描點雲與已知地面檢核點高程精度比較分析

Use	Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
<input type="checkbox"/>	Lk16	193253.15	2662118.52	22.357	-	outside
<input checked="" type="checkbox"/>	Lk14	193097.40	2661750.72	22.484	22.500	+0.016
<input type="checkbox"/>	Lk15	193015.68	2662169.00	22.404	-	outside
<input type="checkbox"/>	LK02	192493.07	2662136.52	21.956	-	outside
<input checked="" type="checkbox"/>	Lk13	192499.09	2661744.00	22.936	22.900	-0.036
<input checked="" type="checkbox"/>	LKH01	192580.64	2662095.30	22.430	22.450	+0.020
<input type="checkbox"/>	LK03	192078.10	2662193.98	21.591	-	outside
<input checked="" type="checkbox"/>	LK04	191586.11	2661868.21	22.136	22.230	+0.094
<input checked="" type="checkbox"/>	LKH02	192431.54	2661352.70	22.590	22.580	-0.010
Average magnitude		0.0327		Average dz		+0.0107
Std deviation		0.0461		Minimum dz		-0.0359
Root mean square		0.0434		Maximum dz		+0.0941

4.3 雷射掃描點雲成果與 1/1000 航測地形圖套合之平面及高程精度比較分析

4.3.1 高程精度比較分析

將航測所測製之獨立高程點(道路交叉口至少一點)共計 642 點與鄰近之光達點如圖 14 方式進行比對分析,統計結果如表 9 為標準偏差 0.1434m,最大值+0.289m,最小值-0.287m,雷射掃描地面點雲分類後成果與航測高程測製成果差異尚屬合理範圍。

表 9 雷射掃描點雲與航測高程測製成果高程精度比較分析

Control report - Y:\資料後處理\高精度光達掃描精度評估\98121.bct

Use	Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
<input checked="" type="checkbox"/>	480_360	192265.10	2661567.06	21.802	21.860	+0.058
<input checked="" type="checkbox"/>	480_518	192758.37	2661943.50	22.474	22.530	+0.056
<input checked="" type="checkbox"/>	480_648	192212.45	2661892.30	21.774	21.830	+0.056
<input checked="" type="checkbox"/>	480_36	192695.36	2661390.96	22.504	22.560	+0.056
<input checked="" type="checkbox"/>	480_395	192302.48	2661408.09	21.784	21.840	+0.056
<input checked="" type="checkbox"/>	480_209	192597.99	2661669.69	22.556	22.610	+0.054
<input checked="" type="checkbox"/>	480_63	192929.92	2661341.83	22.406	22.460	+0.054
<input checked="" type="checkbox"/>	480_77	192955.96	2661618.52	22.706	22.760	+0.054
<input checked="" type="checkbox"/>	480_79	192938.09	2661601.09	22.756	22.810	+0.054
Average magnitude		0.1236		Average dz		-0.0352
Std deviation		0.1434		Minimum dz		-0.2870
Root mean square		0.1476		Maximum dz		+0.2893

Show location Identify

4.3.2 平面精度比較分析

由於雷射點雲的平面位置落點之判釋，與點雲的密度及掃描方式有關，因此為提高點雲的分辨率，Foot print diameter 設定為 0.23m, FOV +-10 度，點雲取樣密度為 8.57pts/m²，如果將重疊區點雲加計可達 11pts/m²；另外以同樣 10mx10m 方格內量取建物點雲密度及道路點雲密度，可發現建物的反射密度高於一般道路面，因此為提高與航測地形圖平面位置比對分辨率，以航帶重疊區內建物為樣區進行平面精度比較分析。

平面位置比較點取樣採取剖面線(0.1m 帶寬)截取所有點雲 xyz 位置與航測 3D 地形圖建物邊緣線交叉點進行比對量測之間的差值如圖 15。經取樣 800mx600m 內均勻分布約 15 處(如圖 16)並統計雷射點與向量點相對距離差值後統計如表 10。

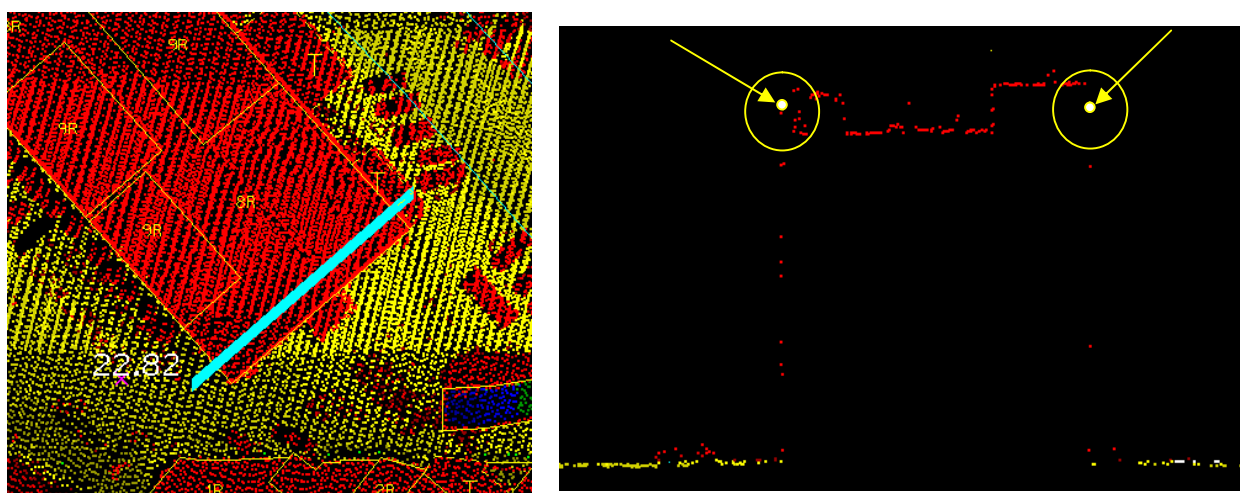


圖 15、剖面線(0.1m 帶寬)截取點雲與航測 3D 地形圖建物邊緣線進行比對量測差值

表 10、雷射點雲與建物邊線相對距離差值統計表

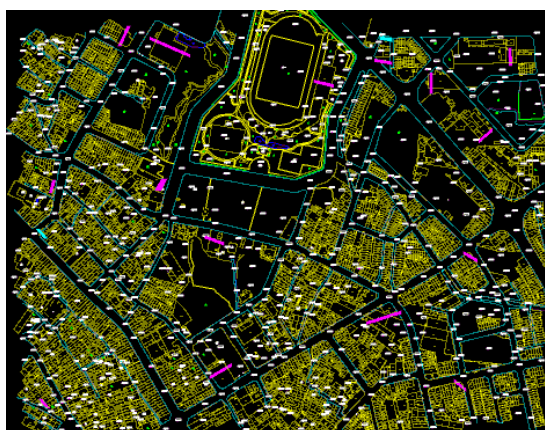


圖 16、剖面線取樣位置分布圖

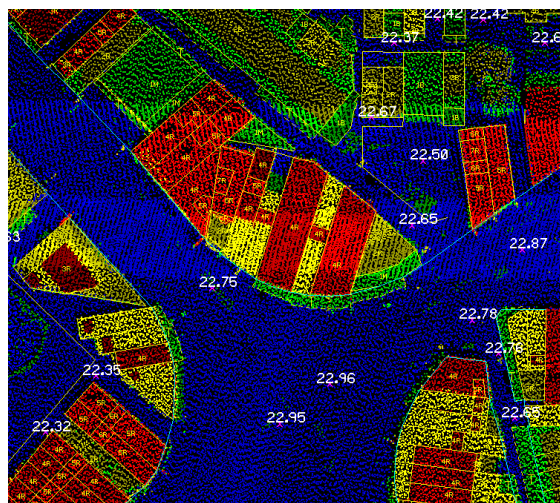


圖 17、雷射點雲與地形圖套合圖

由表 10 可知雷射點雲所組成之建物 3D 點雲正射圖與實測之 1/1000 航測地形圖相較之平均誤差值約為 0.12m~0.15m，與實際軌跡 GPS 解算之精度(+0.03m)稍大，可能是航測人工量測誤差或是雷射點雲在該處密度不足所致，不過應仍屬合理誤差範圍。

五、結論

由本文之研究可知高精度高解析度的雷射點雲掃描之高程精度與地面檢核點之比較標準偏差約為+4.6cm 與率定場率定成果+3.6cm(表 3)相當，可見雷射高程精度非常精確且可靠。

雷射點平面位置雖然有判釋及確認上困難，但是經過表 10 的量測成果可確認雷射點雲的平面位置與航測地形圖相當一致(如圖 17)。光達配合量測型數位相機的同步拍攝取像確實能夠達到互補的效果，對於未來使用光達點雲資料搭配具備

剖線	剖面線左邊(m)	剖面線右邊(m)
1	0.139	0.129
2	0.136	0.034
3	0.073	0.165
4	0.024	0.048
5	0.101	0.152
6	0.114	0.025
7	0.082	0.326
8	0.206	0.033
9	0.122	0.129
10	0.150	0.338
11	0.228	0.076
12	0.286	0.115
13	0.208	0.104
14	0.143	0.095
15	0.148	0.129
平均	0.144	0.127

GPS/IMU 外方位參數的數位影像製作大比例尺地形圖不但可同步提昇數值地形圖的平面及高程精度並且可有效降低地面控制點數量甚至不需要任何事先佈標的控制點(如表 5 至表 7 比較)即可完成直接定位(Direct Georeference)空三及地面 3D 地形資料的獲取，達到高精度的質與量同步快速測繪的目標。

六、誌謝

本文感謝國土測繪中心長期對於光達測繪計畫經費的支持及劉正倫副主任與地形及海洋測量課林志清課長的行政協助下方能順利完成，另外亦感謝交通大學土木系史天元教授的諸多寶貴意見，特此銘謝。

參考文獻

- 史天元、彭森祥，2002，九二一地震災區空載雷射掃描作業成果初步報告，第二十一屆測量學術研討會，論文編號 A135。
- 史天元、曾義星、劉榮寬，2003，空載雷射掃描與航空測量數據高程精度比較之研究，第二十二屆測量學術研討會，195-204 頁。
- 徐明鑑、江俊泓、陳文欽，2005，LEICA ALS50 空中雷射地形掃描系統與高解析力數位相機整合率定精度探討，第二十四屆測量學術研討會，59-66 頁。
- Leica Geosystems GIS & Mapping GmbH， 2004，ALS50 User Guide 700U036003 Rev.B。
- BALTSAVIAS, E., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(1), pp. 83–94.
- POSTOLOV, Y., A. Krupnik, and K. McIntosh, 1999. Registration of airborne laser data to surfaces generated by photogrammetric means. In *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 32(3W14), pp. 95-99.
- Applanix corp.， 2004， POSPac/PosGPS/POSAV/PosEO/POSCal User Manual.
- Rollei GmbH， 2005， Rollei Aerial Industrial Camera User Manual.
- A. F. Habib， M. S. Ghanma， M. F. Morgana, E. Mitishita, 2004, INTEGRATION OF LASER AND PHOTOGRAMMETRIC DATA FOR CALIBRATION PURPOSES， ISPRS 2004, TS - PS: WG I/5 Platform and Sensor Integration
- A. F. Habib, 2006, Integration of Photogrammetric and LIDAR data for Quality Assurance and Quality Control Purposes， Digital Photogrammetry Research Group.
- Ayman Habib, Mwafag Ghanma, Edson Mitishita， CO-REGISTRATION OF PHOTOGRAMMETRIC AND LIDAR DATA: METHODOLOGY AND CASE STUDY， Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.