

台灣航遙測感應器系統校正：數位航空測量攝影機、空載光達系統及無人飛行載具系統攝影機

李瓊武¹ 彭森祥² 張國明³ 許展祥⁴ 李佩珊⁵ 黃英婷⁶ 林昌鑑⁷

1. 量測中心動態工程量測研究室 / 正工程師
2. 量測中心動態工程量測研究室 / 研究員
3. 量測中心動態工程量測研究室 / 資深工程師
4. 內政部國土測繪中心 技士
5. 內政部國土測繪中心 技士
6. 內政部國土測繪中心 技正
7. 內政部國土測繪中心 課長

摘要

自 2011 年，內政部國土測繪中心為確保測繪品質及落實國土測繪法，規劃建置航遙測感應器校正場，以 GNSS 定位儀評估校正場內各校正標之地籍平面坐標(N_r, E_r)及大地橢球高 h_r ，作為參考值；然後，實際將航遙測感應器系統包括數位航空測量攝影機、空載光達系統及無人飛行載具攝影機，藉由空拍校正場，依既定幾何校正作業程序，測量所得各校正標之地籍平面坐標(N_m, E_m)及大地橢球高 h_m ，作為量測值。

本文分析各校正標三維方向之器差(量測值 - 參考值)及其擴充不確定度(95%信賴水準)，初步成果如下：(1)數位航空測量攝影機(大像幅)：擴充不確定度，平面 130 mm，垂直 180 mm。(2)空載光達系統：分析 19 點校正標，平面 N 及 E 方向之均方根誤差(RMSE)為 0.25 m、0.19 m，垂直方向 RMSE 為 0.06 m。(3)無人飛行載具攝影機(小像幅)：分析 36 點校正標，平面 N 及 E 方向之均方根誤差(RMSE)為 0.14 m、0.15 m，垂直方向 RMSE = 0.42 m。

前言

國土測繪法應用測量實施規則第 12 條，規定「辦理應用測量使用儀器設備所為之校正，應依測量計畫目的及作業精度等需求辦理」^[1]。由於航遙測影像資料具豐富資訊，已應用於各項測量工作，提供國土規劃、土地利用調查、防救災、環境與污染監控、資源探勘及地質分析等業務使用；目前，應用數位航空測量攝影

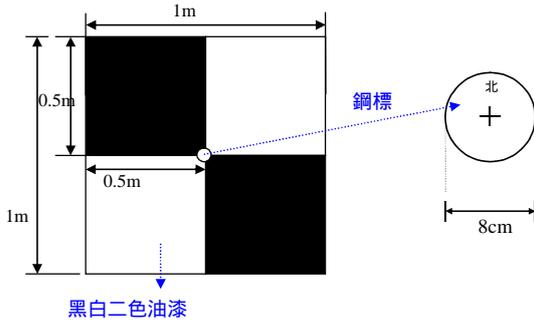
機(Digital photogrammetric airborne camera)、空載光達系統(Airborne LiDAR system)及無人飛行載具系統(Unmanned aircraft system, UAS)攝影機，進行空拍，已普遍應用於相關測繪工作。為此，主管測繪業務單位之國土測繪中心，乃規劃建置「航遙測感應器校正場」，具備校正能量，並申請 TAF 認證，以符國際認證規範 ISO/IEC 17025:2005 要求^[2]，藉以提升測繪成果品質，落實國土測繪法規。

航遙測感應器校正場

建置南崗校正場(以下稱校正場)，大範圍長邊 2000 m 及短邊 1750 m，供高空飛行感測器校正使用；並於中央區劃分一小範圍矩形校正場，邊長分別為 750 m 及 650 m，供低空飛行感測器校正使用。

執行現場校正(In-Situ Calibration)係以校正場內之均勻分布 180 點幾何校正標(Signalized Targets)為依據，樣式尺寸如圖一，邊長 1 m 的黑白相間正方形，中央直徑設置 8 cm 圓鋼標，黑白二色之設計，係考量校正標於淺色水泥地面或深色柏油路面皆可清楚辨識^[2]。

各幾何校正標鋼標(以下稱校正標)位置皆以 GNSS 定位儀觀測如圖二，經網形平差，推得 IERS 地面參考框架(ITRF)坐標，在轉換基準後，分析校正標地籍坐標參考值(L_r)在平面與高程方向之組合不確定度 $u_{Lr1} = 17 \text{ mm}$, $u_{Lr2} = 29 \text{ mm}$ ^{[3][4]}。



圖一 南崗校正場幾何校正標樣式尺寸

航遙測感測器校正結果與評估 數位航空測量攝影機

傳統底片式航空測量攝影機，地面地物點經中心透視投影到影面成像，係沒有加工轉換的原始影像。然而，2000 年後，電子科技迅速發展，成像原理複雜，都要經過軟體的轉換計算後，才輸出成果影像供航空測量使用；也就是說，經由不同的轉換計算參數，可得到不同幾何與輻射特性的成果影像。一般其像幅大小，以感測器的面積區分：24 × 36 mm 歸為「小像幅」；介於小像幅與 60 × 90 mm 間為「中像幅」；大於此者為「大像幅」^[5]。

一般大像幅攝影機多用於測繪製圖，製作高精度正射影像與數值地形模型。以校正場進行大像幅攝影機之校正，分析方法與評估成果，說明如下：

校正前準備^[6]：(a)航線須有交叉航拍如圖三；(b)絕對航高大於 800 m，影像地面解析度 GSD (Ground Sampling Distance) = 感光元件像素尺寸 (Pixel Size) × 航高 / 攝影機鏡頭焦距，介於 6 cm 至 25 cm 間；(c)航線縱向(前後)及左右(側向)重疊至少 80% 及 60%；(d)影象涵蓋校正場區域不得有遮蔽或模糊；(f)導航紀錄至少包含航空公司與載具型號、攝影機型號、作業人員、天候、航拍日期、GSD、比例尺、各航線之航線編號、片號、數量、作業時間、航高、航速、航向及前後重疊等。

校正人員依校正程序，在航空測量影像工作站，對攝影機影像實施空中三角測量，經由平差成果，量得非控制用校正標地籍坐標量測值 (Lm)。計算校正標之坐標器差 (LΔ) 方程式如下：

$$L\Delta = Lm - Lr \quad (1)$$

$$L\Delta = \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad Lm = \begin{bmatrix} E_m \\ N_m \\ h_m \end{bmatrix} \quad Lr = \begin{bmatrix} E_r \\ N_r \\ h_r \end{bmatrix}$$

Δ E: 地籍平面橫軸方向器差

Δ N: 地籍平面縱軸方向器差

Δ h: 高程方向器差

評估校正標之坐標器差 (LΔ) 在平面坐標之擴充不確定度 U_1 ^[7]，有效自由度 $\nu_1 = 60$ ，在 95% 信賴水準，得 t 分布值為 2.0，即涵蓋因子 $k_1 = 2.0$ 得

$$U_1 = k_1 \times (u_{Lm1}^2 + u_{Lr1}^2)^{0.5} = 2.0 \times (u_{Lm1A}^2 + u_{Lm1B}^2 + u_{Lr1}^2)^{0.5} \quad (2)$$

式(2)表示

u_{Lm1} : 校正標量測值平面坐標之組合不確定度

u_{Lr1} : 校正標參考值平面坐標之組合不確定度
17 mm

u_{Lm1A} : 空三成果平面量測不確定度 25 mm

u_{Lm1B} : 空拍 GSD 平面不確定度 29 mm

則

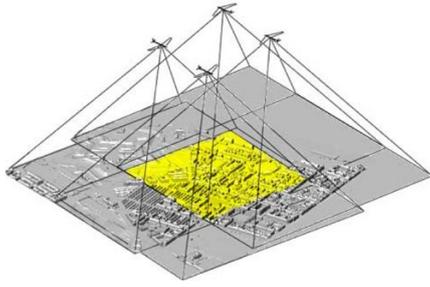
$$U_1 = 2.0 \times [(25 \text{ mm})^2 + (29 \text{ mm})^2 + (17 \text{ mm})^2]^{0.5} \approx 84 \text{ mm} \quad (3)$$

同理，評估校正標之坐標器差 (LΔ) 在高程之擴充不確定度 U_2 ^[7]，得

$$U_2 = 2.02 \times [(60 \text{ mm})^2 + (29 \text{ mm})^2 + (29 \text{ mm})^2]^{0.5} \approx 150 \text{ mm} \quad (4)$$



圖二 校正標 GNSS 衛星定位儀觀測



圖三 航線交叉航拍示意圖

空載光達系統

空載光達系統的校正係評估整體性最終成果品質，也就是分析空載光達點雲(Point Cloud)，萃取成特徵點，量測地面校正場校正標三維坐標的量測值(E_{m1}, N_{m1}, h_{m1})，比對GNSS量測校正標三維坐標的參考值(E_r, N_r, h_r)，據以評估空載光達系統整體性量測三維坐標的器差(dE_l, dN_l, dh_l)及其不確定度，其中 $dE_l = E_{m1} - E_r, dN_l = N_{m1} - N_r, dh_l = h_{m1} - h_r$ 。

以空載光達 Leica ALS 70 為例，執行校正場掃描作業，東西向 3 條航帶，南北向 3 條航帶，絕對航高約 1400 m。比對校正標在高程方向之參考值與量測值，係由校正標參考值(E_r, N_r, h_r)，搜尋點雲數據，計算點雲與該校正標坐標 3 維空間距離最小者為最鄰近點(E_{m1}, N_{m1}, h_{m1})，高程器差 $dh_l = h_{m1} - h_r$ 。

經查核校正標點數共 54 點，分析高程器差 dh_l 之統計量如表一，均方根誤差(RMSE) 0.059 m， dh_l 最大誤差 0.160 m， dh_l 最小誤差為 -0.076 m。

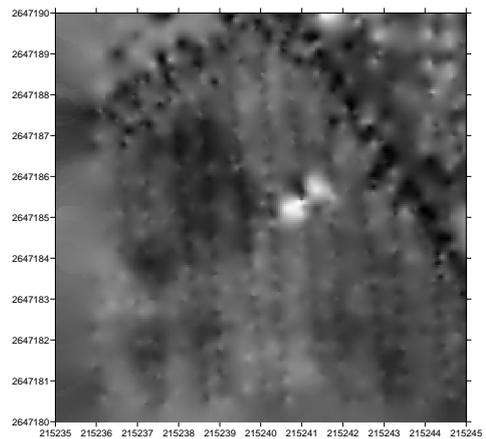
表一 光達點雲高程器差 dh_l 之統計量^[3]

光達點雲數 54	Dh_l (m)
均方根誤差(RMSE)	0.06
絕對平均誤差(MAE)	0.05
平均誤差(Mean Error)	0.02
標準差(Std. Dev)	0.06
最小值(Min)	-0.08
最大值(Max)	0.16

為評估光達點雲的平面精度，將點雲轉換成亮度值影像(Intensity image)，若是在亮度值影像內能辨識校正標的形狀，則可以量測校正

標平面坐標值。圖四展示校正標顯示在「點雲亮度值影像」放大後的形式，由於航測標為田字標型，在點雲亮度值影像的地面解析度(GSD)約 0.54 m，點雲亮度值影像內，呈現出高亮度「8」字形態，應用點雲亮度值影像，量測「8」字形態高亮度的兩個亮點的交會中點平面坐標量測值(E_{m1}, N_{m1})，比對校正標參考值(E_r, N_r)，則平面器差 $dE_l = E_{m1} - E_r, dN_l = N_{m1} - N_r$ 。

將 ALS 70 掃描的 6 條航帶點雲合併成單一檔案簡稱全數點檔案 ALS70.las。由全數點檔案轉檔成亮度值影像(Intensity image)。55 個校正標近似位置，逐一量測其在點雲亮度值影像的平面坐標，可以辨識「8」字形態的標型有 19 個，分析其平面器差(dE_l, dN_l)之統計量如表二，器差 dE_l 之RMSE = 0.19 m，器差 dN_l 之RMSE = 0.25 m。



圖四 校正標之光達點雲強度放大影像^[3]

表二 光達點雲平面器差(dE_l, dN_l)之統計量^[3]

光達點雲數 19	dE_l (m)	dN_l (m)
均方根誤差(RMSE)	0.19	0.25
絕對平均誤差(MAE)	0.15	0.21
平均誤差(Mean Error)	-0.06	-0.18
標準差(Std. Dev)	0.19	0.17
最小值(Min)	-0.47	-0.45
最大值(Max)	0.19	0.12

無人飛行載具攝影機(小像幅)

無人飛行載具系統(Unmanned Aircraft System, UAS)搭載小像幅攝影機系統，設備體積

小、相對低廉及飛航相對機動，適合小範圍機動性調查測繪應用，隨著相關導航設備微型化與無人飛行載具系統快速發展，UAS 影像調查作業方式已深具發展潛力。

本文以 Canon EOS 5D2 MK 數位攝影機為例，2013 年 7 月航拍校正場，航高設定 650 公尺，航拍影像成果前後重疊率約 80%，左右重疊率約 40%，此區資料共使用 13 條航帶^[8]，地面解析度(GSD)分布約 0.15 m ~ 0.20 m。

量測校正標之 UAS 影像坐標，其步驟^[3]：

- (1)量測像坐標。
- (2)連結點匹配，辦理影像連結點自動匹配，每張影像與同航帶及鄰航帶之影像，均須有均勻分布之連結點，匹配不足處須由人工進行像坐標量測。
- (3)校正標最小約制，進行空中三角初步平差計算，並偵測剔除粗差。
- (4)並依照「平差計算 粗差偵測 平差計算 再粗差偵測」的原則循環作業，剔除經軟體平差計算後所判定為粗差的觀測量。
- (5)檢核連結點數量及分布，皆有 9 重光束連結點位與鄰片相連結。

36 個校正標之平差成果量測值(E_{m2} , N_{m2} , h_{m2})，分析平面器差 $dE_2 = E_{m2} - E_r$ ， $dN_2 = N_{m2} - N_r$ ，高程器差 $dh_2 = h_{m2} - h_r$ ，分析結果如表三。

表三 UAS 影像器差值(dE_2 , dN_2 , dh_2)之統計量^[3]

UAS 影像數 36	dE_2 (m)	dN_2 (m)	dh_2 (m)
均方根誤差(RMSE)	0.15	0.14	0.42
絕對平均誤差(MAE)	0.11	0.10	0.39
平均誤差(Mean Error)	0.02	0.03	-0.17
標準差(Std. Dev)	0.42	0.32	0.39
最小值(Min)	-0.09	-0.07	-0.35
最大值(Max)	0.10	0.08	0.08

結論

國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, NLSC)測量儀器校正實驗室已提供「航空測量攝影機」校正項目，且於 2016 年 2 月，經全國認證基金會(Taiwan Accreditation Foundation, TAF) 認證通過。未來，持續將建立中像幅攝影機、UAS 影像及空載光達等校正能

量，協助航遙測業者立足國內外市場，並推向國際服務。

參考文獻

1. 內政部，國土測繪法規彙編，2008。
2. 航空測量及遙感探測學會，*建立航遙測感應器系統校正作業(4年總報告)*，內政部國土測繪中心，2014。
3. 工研院量測技術發展中心，*104年度擴充航遙測感應器系統校正作業(工作總報告)*，內政部國土測繪中心，2015。
4. ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement-Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*, ISO, 2008.
5. 史天元、王蜀嘉、蔡季欣、李佩珊，數位空載製圖相機：2013，*Journal of Cadastral Survey*, vol 32, 2013, pp 1-17.
6. 內政部國土測繪中心，*航空測量攝影機校正作業程序*，SICL-3-04-0，2.2，105年12月。
7. 內政部國土測繪中心，*航空測量攝影機校正系統評估報告*，SICL-3-04-1，2.2，105年12月。
8. 經緯航太科技股份有限公司，*100~103年度發展無人飛機載具航拍技術作業(工作總報告)*，內政部國土測繪中心；2014。