

航遙測感應器校正初探

A study on remote sensors calibration

黃英婷*

Ying-Ting Huang

李佩珊**

Pei-Shan Lee

蔡季欣***

Ji Shin Tsai

摘要

航遙測技術可機動迅速獲取大範圍地表面資訊，廣泛為產官學界運用於國土測量、調查或監測作業。航測攝影機與空載光達儀器出廠時雖已進行實驗室校正，然實際作業需結合多種設備且受環境影響，有賴整體系統校正以評估成果品質良窳。內政部國土測繪中心研擬「建立航遙測感應器系統校正作業」案，針對航測攝影機與空載光達系統校正作業進行探討。本文將針對目前已完成之國內外校正情形蒐集分析、國土測繪中心校正場建置規劃等作業進行說明。

Abstract

Large-area ground data can be acquired by remote sensors with its characters of mobility and rapidity. Remote sensing techniques are widely applied on land survey, investigation or monitoring. The sensors had been calibrated in the laboratory after production by the manufacturer. However, inaccuracy might occur after uses for the sensors are operated in combination with different equipments and affected by environments at the same time. The sensors should be calibrated to guarantee the quality of the overall performance. In 2011, the National Land Surveying and Mapping Center (NLSC) drew up the remote sensors calibration affairs project. The relative practical digital airborne camera and airborne lidar calibration papers had been collected and reviewed for the reference of the establishment of NLSC calibration field..

關鍵詞

數位式航空攝影機、空載光達、校正

Keyword

Digital Airborne Camera, Airborne Lidar, Calibration

* 內政部國土測繪中心 地形及海洋測量課 專員

* 內政部國土測繪中心 地形及海洋測量課 課員

** 內政部國土測繪中心 地形及海洋測量課 課長

一、前言

廣義的航遙測技術包含衛星攝影測量、航空攝影測量、空載多光譜系統、空載光達系統及雷達系統等【1】。其中我國自主擁有的第一枚遙測衛星-福爾摩沙衛星二號(Formosa II)及合成孔徑雷達(Synthetic aperture radar, 簡稱 SAR)技術已分別由國家實驗研究院國家太空中心(NSPO)辦理輻射與幾何率定【2】及衛載合成孔徑雷達校正由中央大學太空及遙測研究中心微波遙測實驗室發展多年、空載 SAR 率定目前正由行政院農業委員會林務局農林航空測量所(以下簡稱農航所)100 年度「空載合成孔徑雷達系統建置計畫」案內進行相關規劃。內政部國土測繪中心(以下簡稱國土測繪中心)則針對業務運用最為廣泛之航測攝影機與空載光達系統校正作業進行探討。

類比式航空攝影測量構造簡單且穩定，近年發展之數位式航空攝影機各廠牌構造差異大、電子零件來源分歧非專門為航測目的製造，且影像掃描與拼接融合成像方式有所差異，原始影像需經過電腦軟體轉換，當使用不同參數計算，卻可以得到不同幾何及輻射特性的成果影像。另空載光達實際作業時需固定於飛行載具上，並搭載 GPS、IMU 等導航系統與設備，故需進行整體系統之校正。

按國土測繪法應用測量實施規則第 12 條：「辦理應用測量使用之儀器裝備所為之校正，應依測量計畫目的及作業精度等需求辦理」，國土測繪中心為確保測繪成果品質，自 100 至 103 年度爭取經費辦理「建立航遙測感應器校正作業」工作以落實儀器校正作業。目前已完成國內航空攝影機及空載光達系統擁有者校正作法、國外校正場作業辦理情形及技術蒐集，並據以進行國土測繪中心校正場規劃。

二、國內校正作法

國內由農航所及 3 間公司引進共 6 臺數位式航測攝影機(如表 1)，其中農航所為新購航空攝影機之驗收、參數率定(Calibration)或測試用途，已設置 2 處率定場，2006 年 5 月於彰化縣鹿港鎮約 4 幅 1/5,000 圖幅範圍，設置自然點作為地面控制點；並於 2007 年 4 月在大坑山區附近約 50 幅圖之場地，於地面刷漆作為地面控制點，但因接近軍事區，不易申請飛航許可。另詮華、群立公司航測攝影機亦設置校正場不定期飛行測試，自強公司航測攝影機目前為保固期則送回原廠辦理校正。

表 1 國內數位式航測攝影機系統校正作業

航測攝影機 擁有單位	廠牌	引進時間	校正場所在位置	維護 狀況
農航所	DMC、ADS-40	2007、2008	彰化縣鹿港鎮、 台中北屯區大坑山區	不定期
詮華國土測 繪有限公司	DMC、DMC II	2007、2009	彰化縣鹿港鎮	不定期
群立科技股 份有限公司	UltraCAM-Xp w/a (原購置 UltraCAM-D)	2010 升級 (2004 購置)	台中市大甲區鐵崁山	不定期
自強工程顧 問公司	UltraCAM-Xp	2010	無	-

空載光達系統則均產業界引進，目前共有 5 間公司引進共 7 臺設備（如表 2）。空載光達掃描作業前需辦理視準率定（boresight calibration）以整合 GPS、IMU 及雷射掃描儀之坐標系統。然不同廠牌或型號的掃描儀機構設計不同，對於視準率定參數的率定方式與演算法不盡相同，由各儀器製造商依儀器設計，提供率定方法與率定場設置規格，與搭配的軟體提供儀器使用者使用，如 Leica 針對建物與道路進行 2 個不同航高與 8 條航帶掃描；Optech 針對建築物及道路進行 10 條航線與不同航高掃描；Riegl 則針對不同方向的屋頂進行 2 條平行及 2 條垂直航線（航帶重疊要大於 50%）且不同航高掃描獲取 4pts/m² 以上點雲密度，再以各廠牌提供軟體求取率定值。

表 2 國內空載光達系統率定場

空載光達 擁有單位	廠牌	引進時間	率定場所在位置	維護 狀況
中興測量公司	Optech LTM30/70、 Optech Pcgasus (原購 置 Optech Gemini)	2004、 2011(2010 購置)	彰化縣濱彰工業區	無
亞新國土科技股 份有限公司	Leica ALS50	2004	台中市台中港工業區	無
群立科技股份有 限公司	Leica ALS60	2010	台中市台中港工業區	無
詮華國土測繪有 限公司	Optech Orion、 Leica ALS60	2010、2010	彰化縣濱彰工業區	無

自強工程顧問公司	Riegl LMS-Q680i	2010	彰化縣二林鎮	無
----------	-----------------	------	--------	---

三、國外校正發展

為辦理航空攝影機與空載光達系統校正作業，針對國外目前校正發展及校正作法設計先進行蒐集分析。

(一) 國外數位航測攝影機系統校正文獻回顧

先進國家近年來均積極推動數位航測攝影機校正作業，美國自 2000 年開始建立校正機制，並於 2010 年提出校正運作規劃。歐洲挪威早於 1992 設置校正場，2003 年歐盟結合各國專家開始校正研究，2007 年決定要建立校正與認證機制。日本則於 2002 年、中國大陸並於 2007 年均已建立校正場並運作中（如表 3），可發現數位航測攝影機校正工作重要性極高，先進國家並已進行研究、測試與校正制度研擬。

表 3 國外數位式航測攝影機系統校正場【3】

國名 項目	美國	德國	挪威	義大利	芬蘭	中國大陸	日本
提出單位	USGS	Stuttgart 大學	Agricultural 大學	Pavia 大學	FGI	武漢大學	社團法人日本攝影測量學會
建置年代	2000	2003	1992	1997	1994	2007	2002
設置位置	SD、MO 及 CO 州	Stuttgart	Aas	Pavia	Masaala	河南省嵩山附近	神奈川縣松田町附近
校正場尺寸 (m)	1750* 2000、 600* 750	4800* 7500	4500* 6000	4500* 6000	10000* 10000	3000* 3000、 5000* 5000、 8000* 8000	1500* 3000
地面控制點形狀	圓形或十字形	方形及自然人孔點	—	正方形	圓形、正方形及三角形	正方形	圓形
地面控制點數量	75	234	51	592	79	214	64
校正項目	幾何及空間解析力	幾何	幾何	幾何	幾何、輻射及空間解析力	幾何	幾何

考量歐盟研究用的 4 個校正場中，僅芬蘭校正場最後被選為研究輻射校正之用，校正場設施相對完善，另美國在校正場設置之規格已建立完整規範，以下針對該 2 個國家校正內涵及場地設施進行介紹。

1、芬蘭【4】

芬蘭校正場可辦理幾何、空間解析力與輻射校正與測試，為辦理相關研究，設計多種校正標規格。校正場內包含可供大（1/3,000~1/4,000）、中（1/8,000~1/16,000）、小比例尺（1/16,000~1/40,000）使用之校正標，場地分別為 1*1、4*5、10*10km 範圍（如圖 1），可供 3 種 GSD（GSD 分別小於 10、30、50cm）校正使用，幾何校正標共有 3 種，含直徑 30~40cm 圓形、邊長 1m 方形、邊長 2.4m 之三角形幾何校正標（如圖 2）。

另有 60*100m 區域內設置解析力校正標含稀疏條狀校正標、稠密條狀校正標及西門子之星等 3 種（如圖 3 編號 1、4 及 6）與輻射校正標則分別由 8 個 2*3m 矩形、4 個 15*7m 矩形及 8 個 5*5m 正方形組成（如圖 3 編號 2、3 及 7）。

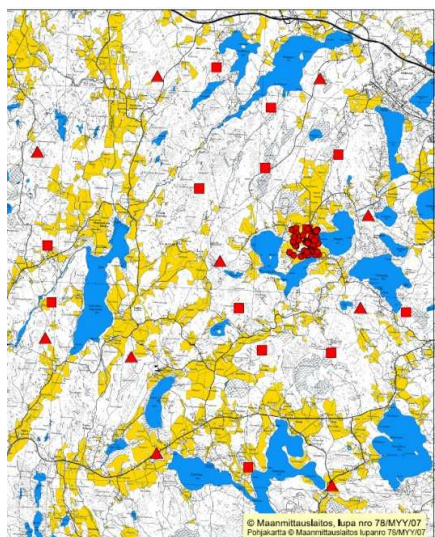


圖 1 幾何校正場



圖 2 幾何校正標標形



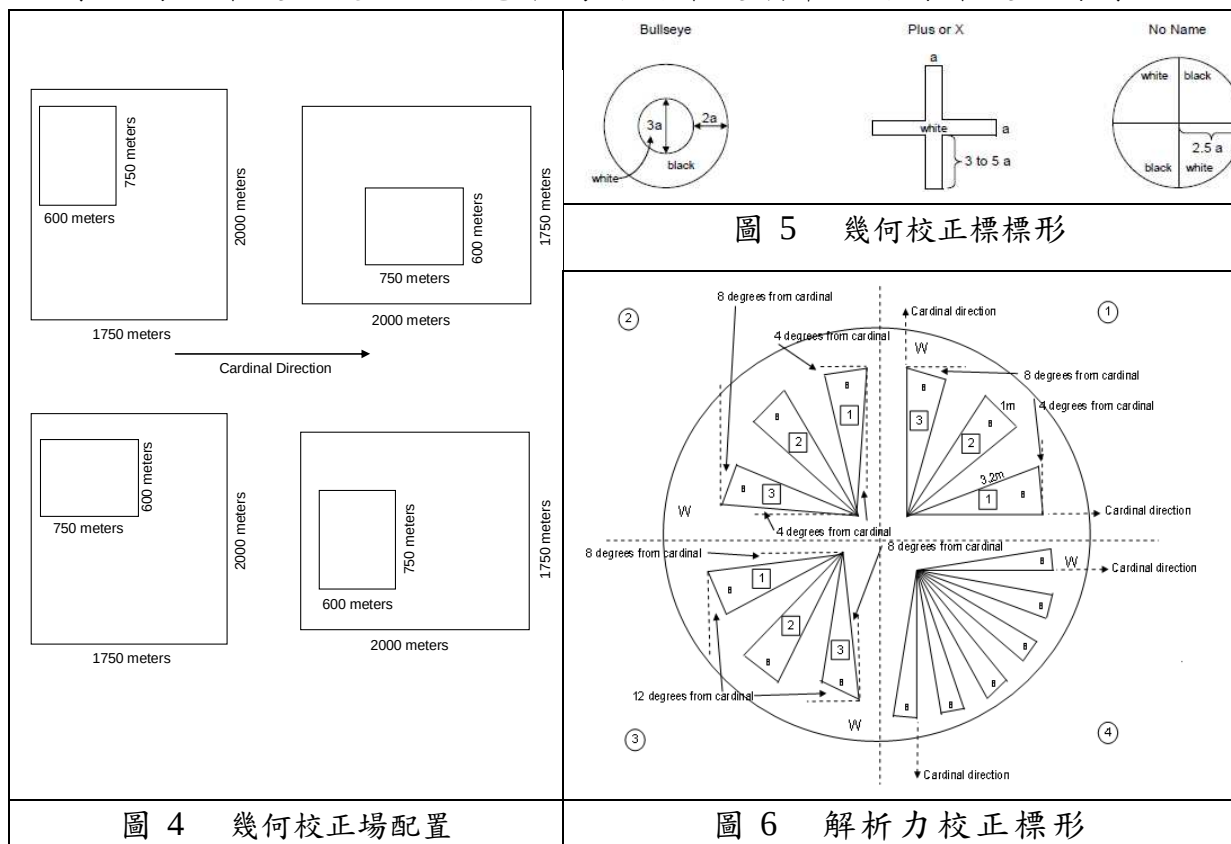
圖 3 解析力與輻射校正標形

2、美國

美國校正作法為由儀器製造商自行飛越 USGS 校正場進行航空攝影，並自行進行空三計算、正射影像製作後，再將正射影像提供給美國地質調查所進行評估【5】，只要廠商對於該型別感應器的設計、規格、品質、製造、校正之製程有保證，並通過 USGS 的觀察與驗證，則認證該型別的每一感應器。

美國共設置 3 個校正場，並建立校正場建立品質保證計畫，包含感應器的型別認證及執行建議書，針對校正場規格包含尺寸（如圖 4）、場

內地形起伏、雲霧狀況等；控制點規格包含形狀（如圖 5）、尺寸、點位分布、點位間距離等；解析力標規格包含尺寸、標形（如圖 6）、油漆規格等；場地維護及使用規定包含需訂定維護頻率、保存維護紀錄等。



(二) 國外空載光達系統校正文獻回顧

空載光達所蒐集文獻含三種校正目的，包含點雲精度評估、視準率定研究與強度值校正（如表 4）。

表 4 國外空載光達校正文獻分析【3】

國名 項目	美國	荷蘭	加拿大	瑞士	芬蘭
提出單位	美國俄亥俄州大學	ITC	Calgary 大學	EPFL	FGI
提出年代	2006	2008	2010	2007	2006
儀器設備	Optech ALTM 30/70	FLI- MAP400	Optech ALTM 2050	Optech ALTM3100、 Leica ALS 50、 Riegl LMS Q240-x	Optech ALTM 3100
校正項目	點雲的水平與	進行平面精	視準率定	視準率定	強度值

	高程精度探討	度評估			(Intensity values)
場地及校正標的	設置 15 對校正標於俄亥俄州 Ashtabula 之 23km 長筆直道路	屋脊線比對	Simplified method：需在平坦地形進行， Quasi-rigorous method：無地形限制	城市中具有較大且不同方向與傾角之屋頂	採用芬蘭的 Sjokulla 測試場輻射灰度標
航線	第 1 次測試：2 條平行航線、 第 2 次測試：2 條垂直航線	Brabant：16 條航線、 Zeeland：9 條航線、 Enschede：15 條航線。	8 條航線	2 條平行、 2 條垂直航線	3 條平行航線
航高(m)	第 1 次測試：610、 第 2 次測試：700	Brabant：1000 Zeeland：375 Enschede：275	1000、2000	ALTM：550、1100、 ALS：1000、1500 LMS：未特別說明	200、1000、3000

考量國土測繪中心係為針對完成視準率定後所掃描的點雲成果進行平面與高程精度評估，僅有美國俄亥俄州大學設計校正標探討點雲水平及高程精度與荷蘭使用國家高程模型萃取屋脊線評估平面精度，以下針對此兩種作法進行說明。

1、美國【6】

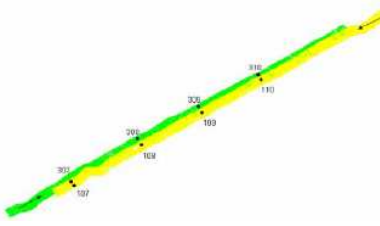
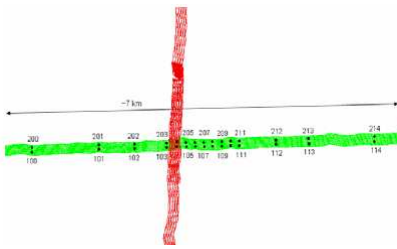
美國俄亥俄州大學設計空載光達專用的校正標（如圖 7），以探討點雲的平面與高程精度。空載光達校正標設計考慮 2 個層面，需具備容易反射雷射訊號的表面，使點雲資料易於辨識，且需進行水平與高程方向高精度定位。經過光達資料特性分析，校正標設計為無方向性之圓形且需具備一定高度，並考量運用強度值資訊，校正標面塗刷不同塗料以與周遭環境有所區隔。

為設計最佳的校正標形狀與塗料亦進行相關模擬，包含使用同心圓標形，並於內、外圈塗上不同塗料進行反射訊號模擬測試，及假設點雲高程與平面精度為常態分布下，使用 16、4、1.6pts/m² 點雲密度進行模擬，並假設高程精度為 10cm (1 sigma)、點雲大小為 25cm 的情況。根據上述兩模擬資料可得以下三點結果：校正標尺寸越大定位精度越好，但約 5pts/m² 的點雲密度，校正標 1m 半徑的圓便可提供足夠的精度；同心圓設計(內圓半徑為外圓半徑之一半)，不同塗料可提升水平定位精度，因為內外兩圓可以提供幾何約束與對比；最好方法是內、外圈分別塗刷白、黑色的特殊塗層。

第一次進行平行航線試驗飛行（如圖 8），飛行高度：約 620m，掃

描角度：14 度，脈衝頻率：70kHz，掃描頻率：70Hz，可獲得約 5pts/m² 的點雲密度。第二次進行垂直航線試驗飛行（如圖 9），飛行高度：約 700m，掃描角度：10、20 度，脈衝頻率：33、50、70kHz，掃描頻率：36~70Hz。

根據模擬最好的校正標標形為同心圓，外圓半徑 1m，內圓半徑 0.5m，分別塗上不同的塗層可獲得最好的水平與高程精度。在點雲密度 5pts/m² 條件下，可利用校正標得到 10cm 的平面精度與 2~3cm 的高程精度。

		
圖 7 俄亥俄校正標	圖 8 平行航線飛行圖	圖 9 垂直航線飛行圖

2、荷蘭【7】

荷蘭地理資訊科學與地球觀測機構（ITC）利用重疊的航帶萃取建物屋脊線以評估平面精度。研究資料分別位於 Brabant、Zeeland 及 Enschede，各資料飛航掃描資訊如表 5。將點雲萃取出面狀資訊後，針對坡度介於 30~70 度平面進行後續計算，當兩個面出現共同的交集即為屋脊線，再將 2 條航帶萃取之屋脊線進行匹配，如 2 條屋脊線方向和中心點位一致，即為同棟建築屋脊線。

表 5 研究資料飛航掃描資訊

	航帶數	航帶寬	航高	航帶重疊範圍	pts/m ²
Brabant	16	550m	1000m	55m	0.5
Zeeland	9	460m	375m	100m	10
Enschede	15	330m	275m	100m	20

ITC 藉由萃取重疊航帶建築物屋頂脊線，進行 GPS 和 IMU 在測量上引入誤差修正。由於屋脊線為屋頂兩個面的交線，位置不受其周圍點雲分布影響，屋脊線精度可完全歸因於測量儀器，即可用於解釋空載光達系統間誤差。

四、國土測繪中心校正作業規劃

國土測繪中心經蒐集國內感應器資訊與自我校正方法、國外校正場設施及相關技術，並針對國內感應器擁有者、測繪公司進行訪談，研擬

航測攝影機與空載光達初步建置規劃說明如下。

(一) 航測攝影機系統校正場建置規劃

校正場址經邀集攝影機擁有者、航空業者及相關領域之專家學者，召開校正場選擇評估因素專家學者研商會議與校正作業場址選定研商會議討論校正場址，最後選定設置於南投南崗工業區（如圖 10）。

為確認航測攝影機幾何精度、幾何解析力及輻射特性等與原製造廠商所宣稱者是否相符及是否符合我國對航空攝影測量航拍所訂之規範需求，規劃建置校正場規格說明如下：

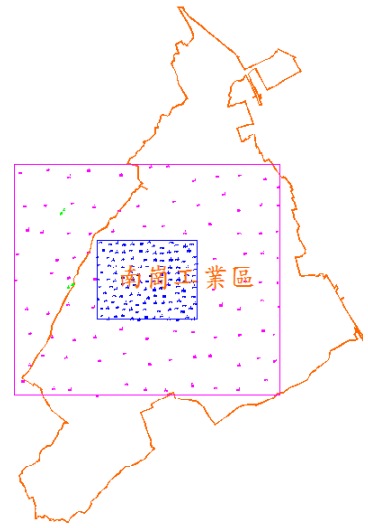


圖 10 南投縣南崗工業區

1、校正場規格

參考美國 USGS 規範【8】，設計 2,000*1,750m 矩形場地供較高航高校正（GSD>20cm）之大校正場（如圖 10 粉紅色區域），內含 750*600m 矩形場地供低空飛行校正（GSD>5cm）之小校正場（如圖 10 藍色區域）。場地條件含地形起伏高差至少達 100m，且場址應避開管制空域及校正飛行時（包含必要的航線末端迴轉區）會受危險或阻礙的地區，每年至少有一個月的期間平均雨霧天不應多於 6 天。

2、幾何校正標

校正場內幾何校正標參考國家太空中心（NSPO）於澎湖設置標標形並依地面像素解析度（Ground Sampling Distance，簡稱 GSD）需求改良尺寸為 1*1m（如圖 11）。共規劃設置 150 個標，標心並設有鋼標。校正標以均勻分布且間距以不低於 USGS 規範 $D_p = \sqrt{\frac{(D_x * D_y)}{(2.5 * N)}}$ m（ D_p ：幾何校正標間距、 D_x ：校正場長、 D_y ：校正場寬、 N ：幾何校正標數量）。

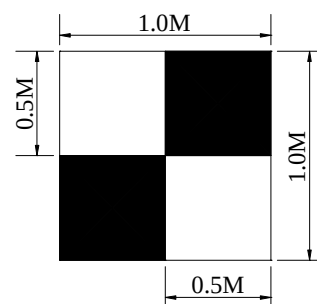


圖 11 幾何校正標

3、解析力校正

解析力校正是藉由解算平均相對邊緣反應 (Average Relative Edge Response) 為主，對單一邊緣而言，即為測定其點散函數 (Point Spread Function, 簡稱 PSF, 亦有稱為邊散函數 Edge Spread Function, 簡稱 ESF), 以點散函數推估調制轉換函數 (Modulation Transfer Function, 簡稱 MTF)。解析力校正標則參考 USGS 設計改良式西門子之星，尺寸約為 $8 \times 5\text{m}$ (如圖 12)。

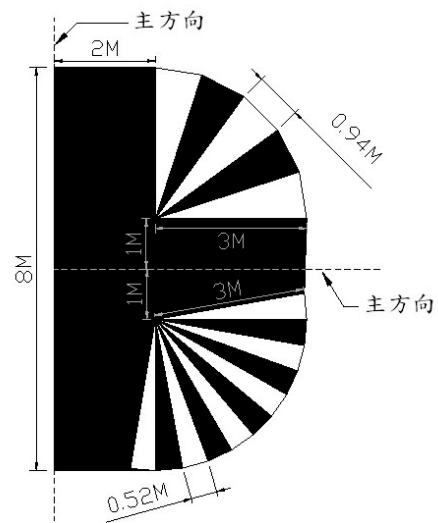


圖 12 解析力校正標

4、輻射校正

輻射校正是比對影像三原色波段光譜與地面光譜儀 (Spectral Radiometer) 配合標準白板量取之輻射值 (Radiance) 化算為反射值 (Reflectance)，輻射校正標參考芬蘭之可攜式對空近似藍勃特散射面八階之灰度標，由 8 個邊長 2m 正方形組成 (如圖 13)。

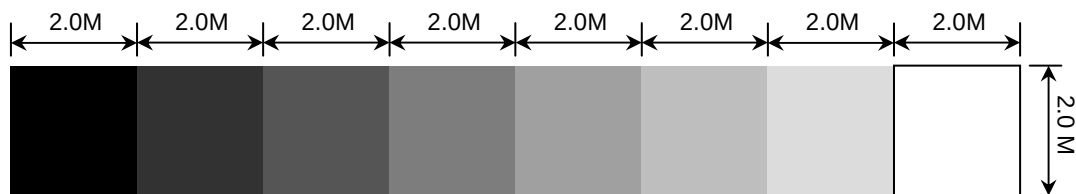


圖 13 輻射校正標

目前已完成校正標設置，後續將辦理校正測試飛行及校正結果分析與校正作業程序研擬等工作。另經蒐集國外校正場資料發現無正式的校正認證機制，歐盟目前正在研究當中，且國內尚無機構辦理航測攝影機校正與認證作業，未來將針對認證機制進行評估、規劃及準備作業。

(二) 空載光達系統校正場建置規劃

為確認已完成視準率定後之空載光達系統的水平與高程精度是否與儀器商所宣稱的精度一致，規劃建置校正場規格說明如下：

1、校正場規格

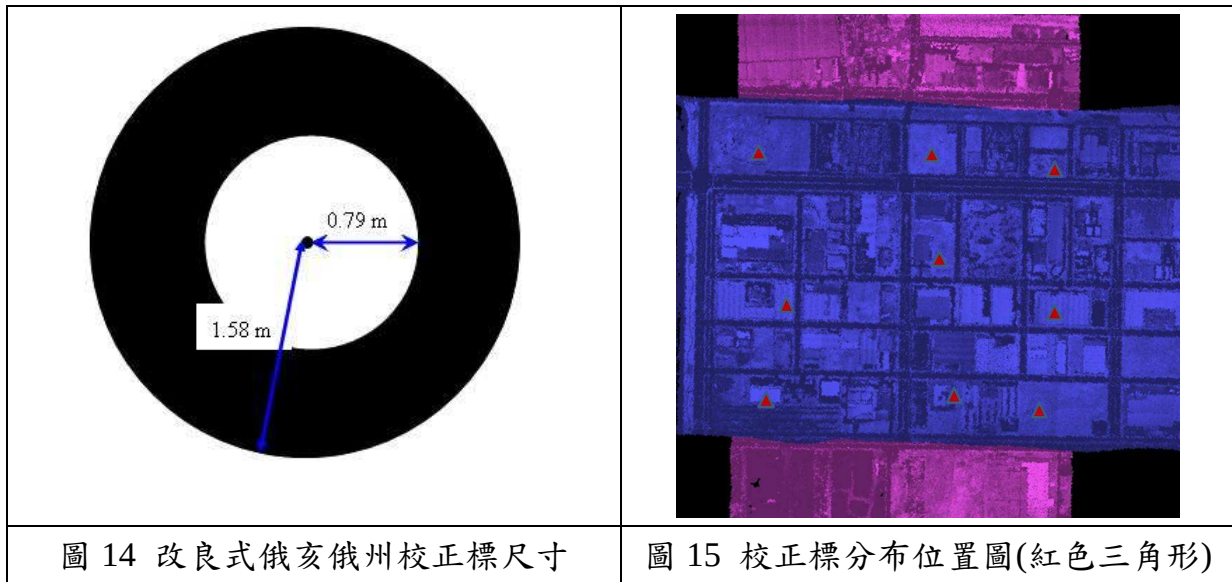
校正場設計為 $1 \times 1\text{km}$ 正方形場地【9】，場內應具有容易辨識之大型建物(平頂、斜頂)，地表坡度容許緩和的起伏變化，但若在地形起伏較大區域設置校正標時，應使校正標保持水平。另 20km 範圍內應設置 2 點以上之透空度佳(仰角 10° 以上無遮蔽)的地面 GPS 基站。

2、幾何校正標

經與空載光達設備擁有者、航空公司等相關單位進行訪談，了解國內業界空載光達實際作業的參數設定與率定方式，進而設計接近實際作業飛行參數。國內一般在進行空載光達作業之掃描角度設定為 40 度、飛機距地距離為 1200m，即地面上掃描的寬度為 900m 以內。並依據此飛行參數改良美國俄亥俄交通局校正標尺寸由直徑 1m 改良為 3.16m（如圖 14）。

3、校正標分布

校正標分布規劃以 9 宮格（如圖 15）設置，避免因航空器受氣流擾動產生擺動造成無效測量；另校正標盡量避免布設於一直線上，另於校正標附近尋找平頂建築物 2~3 棟，輔助校正標進行水平與高程精度的校正。並設計 2 組航線進行 2 次垂直交叉飛行，以求校正標上雷射點之平均分布。



考量目前設計校正標過大，實際布標設置恐有困難，後續將持續研擬使用人工構造物（如：平屋頂、斜屋頂、屋脊線等）取代校正標的方案，及南投南崗工業區場址適宜性。

五、結論

數位式航測攝影機系統校正作業已於國際間發展十數年，在學理及技術上確屬可行。經參考國際技術發展經驗進行校正場設置規劃，目前刻正於南投南崗工業區設置校正場，未來將進行校正測試作業、校正成果分析與作業程序研擬；然校正認證部分，國際間尚無相關案例，仍具有相當挑戰性。

空載光達系統校正作業至今仍未見有國家以公權力實施校正，然空

載光達近年於數值地形模型測製之應用廣泛，校正機制有必要加以探究。目前雖已針對校正場設置進行初步規劃，然技術與校正作法仍須進一步研究，未來將持續針對空載光達校正作法設計妥適性進行探討。

參考文獻

- 【1】陳哲俊、陳良健、王蜀嘉、史天元、吳水吉、劉進金、鄭祈全，2009。航遙測技術在自然資源之應用，財團法人中正農業科技社會公益基金會，台北。
- 【2】L. H. Chang, H. H. Cheng, S. J. Liu, S. C. Wu, “Calibrations of FORMOSAT-2 Satellite”, 2006 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, France.
- 【3】內政部國土測繪中心（2011），100 年度建立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，台中。
- 【4】Eija Honkavaara, Jouni Peltoniemi, Eero Ahokas, Risto Kuittinen, Juha Hyypä, Juha Jaakkola, Harri Kaartinen, Lauri Markelin, Kimmo Nurminen, and Juha Suomalainen, 2008. A Permanent Test Field for Digital Photogrammetric Systems, Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 74, Number 1.
- 【5】Stensaas, G., Lee, G.Y.G., and Christopherson, J., 2008. The USGS Plan For Quality Assurance Of Digital Aerial Imagery, http://calval.cr.usgs.gov/digital_aerial_imaging_quality_assurance.php,
- 【6】Csanyi, N., and Toth, C.K., 2007. Improvement Of Lidar Data Accuracy using Lidar Specific Ground Targets, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 73, No. 4, April 2007, pp. 385–396.
- 【7】Vosselman, G, 2008. Analysis of planimetric accuracy of airborne laser scanning surveys, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3a. Beijing 2008 pp. 99-104.
- 【8】USGS, 2008. Digital Aerial Imagery Calibration Range Requirements Version 0.2, EROS Remote Sensing Technology Project, http://calval.cr.usgs.gov/digital_aerial_imaging_quality_assurance.php。
- 【9】內政部，2005。LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序，內政部，台北。