



VBS-RTK GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像定位定向

邱式鴻^{1,*} 許翎淦²

¹ 國立政治大學地政學系教授

² 國立政治大學地政學系碩士

摘要

熱像儀獲取之地表溫度變化常反映地物重要資訊，若能提高其空間解析度，將可擴展其應用領域，本研究嘗試以單旋翼無人機系統（Unmanned Aircraft System, UAS）酬載熱像儀，期更有效率地蒐集高解析度熱影像，供防災、環境監測使用。但熱控制點布設不易，本研究欲以 GPS（Global Positioning System）輔助單旋翼 UAS 熱影像定位定向，降低地面控制點需求，故於 UAS 上加裝 Trimble BD970 GNSS OEM 接收模組，以 VBS-RTK（Virtual Base Station—Real Time Kinematic）GPS 定位技術，將 GPS 觀測資訊作為空中控制使用。但此需解決 GPS 天線相位中心與像機透視中心之偏移量（即 GPS 天線偏移量）的問題，因此本研究基於光束法空中三角測量平差，視 GPS 天線偏移量為一定值，發展一數學模式，解決此偏移量的問題。此外，熱像儀屬於非量測型像機，研究中以野外率定場法，執行熱像儀率定，取得較精確之像機參數，供後續空中三角測量平差使用。由測試資料中，因 GPS 觀測量精度不佳，即使有 GPS 天線偏移量觀測量約制，仍無法成功解算 GPS 天線偏移量，但其精度已經可供防災與監測之用。雖 GPS 觀測量精度不佳，但於影像連結性佳之情形下，仍可達到有效之空中控制，降低地控點之需求。

關鍵詞：無人機系統、虛擬主站即時動態定位、熱影像、定位定向、空三平差

* 通訊作者：邱式鴻

電子郵件：chio0119@gmail.com

（收件日期：2022 年 8 月 24 日；修正日期：2022 年 9 月 12 日；接受日期：2022 年 9 月 18 日）



VBS-RTK GPS Supported Positioning and Orientation for Helicopter UAS Thermal Images

Shih-Hong Chio^{1,*}, Ling Yi Hsu²

¹Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University

²Master, Department of Land Economics, National Chengchi University

Abstract

Thermal infrared images can show the temperature change of objects that represent the significant characteristics, therefore they have been applied on many fields. With the development of UAS (Unmanned Aircraft Systems), the thermal infrared camera can be carried on the Helicopter UAS to collect thermal images with high resolution in a local area more efficiently. However, the ground control marks for thermal images are uneasy to be set up. In this study, the Trimble BD970 GNSS OEM board was carried on the Helicopter UAS to collect Global Positioning System (GPS) data and the bundle adjustment for the positioning and orientation of collected thermal images, i.e., AT (Aerial Triangulation), was supported by Virtual Base Station—Real Time Kinematic (VBS-RTK) GPS technique. In theory, the GPS antenna offset is not changed and can be viewed as constant. Therefore, in this study, the new model based on bundle adjustment was developed to solve GPS antenna offset, exterior orientation parameters and the object coordinate of tie points simultaneously by unified least squares adjustment. Besides, thermal infrared camera is a non-metric camera. In order to acquire high precision camera parameters for AT, thermal infrared camera was calibrated by field method. In this study, due to the bad accuracy of GPS observations in real data collection, the GPS antenna offset could be not solved. Although the accuracy of GPS observations was bad, the GPS observations could also be used to support the bundle adjustment for the positioning and orientation of thermal images under better block geometry and ground control points still could be reduced.

Keywords: unmanned aircraft system, VBS-RTK GPS, thermal images, positioning and orientation, aerial triangulation

* Corresponding Author: Shih-Hong Chio
E-mail: chio0119@gmail.com

壹、前言

熱影像可不接觸到物體，就能由熱紅外波段萃取可見光影像無法獲取之溫度資訊，通常偵測到地物之溫度變化與其自然環境間常具有特殊意義，又因其拍攝時間不受晝夜限制，使得熱影像應用越來越廣。在地面應用方面，以熱影像技術應用於調查公路邊坡特性之適用性，瞭解公路邊坡之崩壞行為（吳秉晃，2002）；亦有利用熱影像技術於監測土石流發生流動現象與源頭崩塌地之位移情形，以非接觸式之方法，判釋坡地災害發生與否，提供土石流與坡地監測之應用參考（李璟芳、張守陽、林志平，2004）；再者，亦有使用熱影像技術快速判別海堤淘空的位置，對河堤淘空位置進一步評估，以減少對工程上的破壞檢測（方啟任，2007）；James, Robson, Pinkerton, and Ball（2006）以熱影像取得熔岩現場狀況之資訊，以便得知熔岩停止及冷卻地點；在林業試驗所亦有應用紅外線熱影像技術評估及管理受保護樹木健康性的研究（張東柱、林振榮，2010）。James, Robson, Pinkerton, and Ball（2013）藉由熱影像與可見光影像，執行建築物影像密匹配，快速地三維重建，以獲取建物位置及溫度資訊，即時找尋隔熱裝置毀損或較差之部分，幫助建物所有權人與設施管理人員修補隔熱裝置，避免不必要之能源浪費；於空中獲取熱像之應用方面，Faux, Maus, Lachowski, Torgersen, and Boyd（2001）則利用熱影像對河水及溪流之溫度進行監測，尋找出溫度較高之部分，針對此部分予以降溫至符合該生物棲地之溫度，執行復育之工作；衛載熱像之應用方面，Avery and Berlin（1992）利用衛載熱紅外波段偵測地下水之應用，尋找地下水流經之處。Tronin（2000）藉由衛載熱紅外波段偵測中國與日本地區之地震帶所發出之輻射資訊，探討熱紅外波段對預測地震之可行性；謝啟文（2011）利用 Landsat ETM+ 熱波段影像於災害後復建狀況評估，亦有透過遙感遙測衛星熱影像，探究臺北都會區之熱島效應強度，以及不同地表土地利用型對於區域內地表溫度之影響（王冠中，2012）。

此外，近幾年來隨著無人機系統（Unmanned Aircraft System, UAS）快速發展，其具備高機動性、安全、及時回覆等特性，能以低成本即時獲取資料，使得其應用範圍日趨廣泛；且多數 UAS 的飛行高度較一般大型飛機為低，不易因雲層遮蔽而降低資料蒐集之品質，亦可獲取一般地面人員難以接近的惡劣地形影像，對特定區域監測、調查、記錄而言，具有相當高的應用價值。因此已有以無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）酬載熱像儀進行相關應用之研究，如 Ambrosia et al.（2003）於 2003 年即運用 UAV 酬載熱像儀，配合衛星上傳及下載影像資料之遙測系統，將產製的近即時地理糾正影像透過網際網路傳輸給防災管理者；Berni, Zarco-Tejada, Suarez, and Fereres（2009）提出使用直升機式 UAV 酬載便宜的熱感測器和多光譜感測器執行植被監控。Miraliakbari, Hahn, and Engels（2010）的研究中，利用 UAS 搭載光學像機及熱像儀，熱影像在空中三角測量（簡稱空三）平差處理後取得正射影像，因線特徵不明顯，因此將光學影像與熱影像之正射影像進行影像融合，便於判釋熱影像。Hartmann, Tilch, Eisenbeiss, and Schindler（2012）則以使用人工地面控制點（Ground Control Points, GCP），研究將無人機獲取的熱像以攝影測量處理流程應用於熱像的定位定向。研究顯示，攝影機位置精度為 ± 10 厘米或更高時，其物點的平面測量精度約為 ± 1 厘米，高度精度約為 ± 3 厘米，而使用無人機載單頻 GPS（Global Positioning System）直接地理參考的精度則為 ± 100 厘米或更差。Brumana et al.（2013）則以多旋翼 UAS 酬載非量

測像機 Sony NEX-5N 和熱像儀 FLIR TAU 640 進行較大範圍熱影像地理對位的研究，該研究中將 50 m 航高下拍攝的熱像，以嚴密光束法平差搭配地面控制點執行影像定位定向，精度可達 0.8 像元，這對後續其他使用者的加值處理有著莫大的助益。Amici, Turci, Giammanco, Spampinato, and Giuliotti (2013) 則使用六旋翼 UAS 載熱像儀對義大利埃特納火山 (Mount Etna) 西南處之 Le Salinelle 泥火山進行航拍試驗，研究中將航拍熱像結果與現地收集的熱資訊，以及同時從泥漿與水的獨立溫度測量中進行交叉驗證。後續 Nishar, Richards, Breen, Robertson, and Bree (2016a, 2016b) 則使用小型，具成本效益的四旋翼 UAS 載 FLIR Tau 320 熱像儀，準確地繪製紐西蘭 Taupo 附近 Wairakei-Tauhara 地熱場獨特棲息地的物理和生物特徵。該研究中使用 Pix4D 和 ArcGIS 10.2 產製大約 700 m² 面積、像元地面解析度約 0.5 cm 的正射影像來顯示熱異常。Harvey, Rowland, and Luketina (2016) 證明沒有技術障礙能阻礙使用 UAS 在大面積，且難以進入的地熱區製作精確的熱像圖。該研究中以大約兩週時間，收集紐西蘭 Waikite 地熱區 2.2 平方公里近 6,000 張熱像，但使用大量的地面控制點進行影像定位定向，之後製作正射熱影像。這是第一次使用載有熱像儀的 UAS 產製大區域地熱區正射影像的測試。Chio and Lin (2017) 研究使用四旋翼酬載 GPS 接收雙頻資料並取得 XM6 熱像儀熱成像對應後處理所得之 GPS 觀測量執行輔助影像定位定向，研究中使用 Pix4DMapper 軟體直接產製熱正射影像；邱式鴻與謝耀震 (2019) 藉由旋翼型 UAS 酬載 FLIR Tau 640 熱像儀熱感測器的方式，快速地蒐集區域性的熱像資訊，再經適當的熱像地理定位，進而產製數值表面模型 (Digital Surface Model) 並製作正射鑲嵌熱影像，最後以數值表面溫度模型 (Digital Surface Temperature Model) 方式呈現，將提供環境監測另一重要之空間資訊。

而以 UAS 航拍取得熱影像後續相關處理與分析時必須先將熱影像精確定位定向，Chio and Lin (2017) 研究中是獲取 GPS 接收雙頻資料並由後處理所得之 GPS 觀測量執行輔助影像定位定向；因此本研究將研究如何以 VBS-RTK GPS 即時動態定位之結果輔助 UAS 航拍之熱影像進行精確之地理定位定向，供後續精確熱影像正射糾正鑲嵌及相關資料分析之用。

貳、研究目的

過去由於手持式熱感測器技術尚未成熟，使得熱影像來源大部分來自衛載熱感測器，如 LANDSAT 5 TM、LANDSAT 7 ETM+、ASTER 感測器等，此類感測器所獲取熱影像之空間解析度約為 60 m 至 120 m，相較於空載熱感測器而言，其空間解析度不佳，又因其拍攝易受雲霧等外界環境影響，使得取得之熱輻射資訊與真實物體溫度有所差異。目前雖已發展大型載具酬載熱感測器 (如 ITRES SASI-600)，以取得較佳空間解析度之熱影像，但其作業成本高且機動性不佳。近年來 UAS 技術益趨成熟，其具機動性佳、低成本、安全、快速取像與即時回覆特性，亦可依不同需求執行航拍規劃獲取資訊，且能於高風險之惡地環境下執行航拍取像任務，並可於雲下拍攝，降低雲霧干擾。此外，亦可選擇不同飛行高度，以獲取較高空間解析度之影像。雖 UAS 酬載熱像儀無法如衛載熱感測器可一次取得大範圍之熱影像資料，但酬載熱像儀可以較低飛行之高度，獲取更高空間解析度之熱影像與降低環境干擾，取得較貼近地物之溫度資訊供後續研究使用。然而，以 UAS 酬載熱像儀獲取影像資

料後，仍須定位定向，才可進行後續處理取得三維分布的空間溫度資訊。熱影像定位定向可透過航測空三平差作業程序，於已知精確之熱像儀像機參數，量測影像間之連結點（Tie Point）及控制點對應之影像的像點坐標，基於共線條件式，以最小二乘法原理解算 UAS 航拍影像於物空間之成像位置與姿態（外方位參數），即光束法空三平差。但由於熱成像之特性，導致熱控制點與一般航測標設計與布設方式皆有所不同，且布設較不易，又控制測量皆需耗費大量勞力、時間及成本，若可減少地面控制點之需求，將可使得熱影像之應用更為廣泛。以往可見光影像定位定向研究中，已有相當多研究將 GPS 觀測量引入光束法空三平差程序中，解決可見光學影像定位定向之問題，研究成果顯示可將地面控制點需求降低（Ackermann, 1992, 1994; Ackermann and Schade, 1993; Friess, 1990; Ruzgiene and Vainauskas, 2000; Skarlatos, Procopiou, Stavrou, and Gregoriou, 2013）。

參、文獻探討

以單旋翼 UAS 酬載熱像儀，獲取熱影像資料執行定位定向，首先面臨熱像儀為非量測型像機，欲以其執行定位定向，必須先對熱像儀率定，故第一小節回顧熱像儀率定之相關研究、熱像儀率定標設計及率定方式。由於 GPS 輔助可見光影像光束法空三平差之研究已趨成熟，故第二小節將回顧 GPS 輔助可見光影像定位定向之相關研究，而最後一小節則回顧 GPS 輔助可見光影像光束法空三平差與地面控制點布設關係之文獻，藉以瞭解後續熱影像地面控制點布設之方式。

一、熱像儀率定

熱像儀是記錄物體熱輻射資訊，其率定標須明顯地呈現於熱影像上，使標點易於影像上辨識，才可執行率定，因此須設計具有溫度差異之率定標，以供熱像儀拍攝率定之。目前熱像儀普遍是以平面率定場方式率定。那至中（2010）根據 PhotoModeler 所設計之率定模板，依不同顏色具有不同之吸熱程度之特性，將其率定標以日光均勻照射之，執行取像拍攝後，消除點模糊與增強對比，求得像機參數；Luhmann, Ohm, Piechel, and Roelfs（2010）所設計之熱率定標是根據不同金屬具有不同之放射率而設計，其中鋁金屬之放射率最低。將鋁製率定板經由陽光照射後，可於影像上呈現黑色；Hartmann et al.（2012）亦是沿用前者率定標及方式執行熱像儀像機率定；而 Lagüela, González-Jorge, Armesto, and Arias（2011）則以平面方式規則排列燈泡設計率定標，亦經由拍攝後求取像機參數；然而，以平面率定板率定所得之像機參數，對於欲求熱影像共軛點景深方向之測定精度較差（Lagüela et al., 2011），故為解決此問題，因而衍生三維率定場，執行熱像儀率定。

Lagüela et al.（2011）即以三維率定場率定熱像儀，其設計之率定標，其所求之像機參數，對於欲求得不同景深之地物點坐標較為合適，而其率定之焦距與廠商規格相近；而 Liao and Huang（2013）亦以三維率定場方式布設鋁製率定標，其率定標改良 iWitnessPRO 所設計之率定標，將其黑點部分改鋁製材質，以陽光均勻照射之，拍攝後求得像機參數；而

Hsu, Chen, and Chio (2013) 則亦改良 iWitnessPRO 所設計之率定標，以保麗板為底，將其黑點部分填以冰棉花，根據黑點溫度較低的特性，進而拍攝率定之。

然而，由非量測型變焦光學像機得知，於航拍取像與近景率定像機時之取像條件不同時，使得近景率定之像機參數，無法描述像機於 UAS 航拍時之狀態。因此，本研究擬以符合熱影像特性之熱率定標，設計一野外率定場，使其率定之焦距與航拍取像之焦距近乎一致，克服率定不完全所產生系統誤差之問題，以取得較精確之熱像儀像機參數。

二、GPS 輔助可見光影像定位定向

GPS 輔助光束法空三平差於理想上係期望 GPS 定位成果等同曝光瞬間像機透視中心，但由於空間之限制，GPS 天線中心位置無法與像機透視中心位置重合。以往傳統大型載具，可透過地面測量方式（如：自由測站法）求得 GPS 天線中心於像坐標系中的偏移量，再藉由與地面坐標系之間旋轉矩陣，將此偏移量轉換至物空間坐標系；而 UAS 酬載像機透視中心無法得知，致使無法利用地面測量之方式求得 GPS 天線中心於像坐標系中的偏移量。於 GPS 輔助 UAS 可見光影像光束法空三平差文獻中，提及線性漂移參數可解決 GPS 天線偏移量、大氣折光差、衛星軌道誤差、整數週波未定值不精確等問題 (Ackermann, 1994; Blankenberg, 1992; Hinsken, Miller, Tempelmann, Uebbing, and Walker, 2002)。此外，Hinsken et al. (2002) 則是透過漂移參數中之常數項補償 GPS 天線至像機透視中心空間偏移量，即便此偏移量未知，亦可透過線性漂移參數將此偏移量所引起的系統誤差之影響降到最低。李敏瑜 (2013) 以 GPS 輔助 UAS 可見光影像光束法空三平差研究中，亦證實線性漂移參數之常數項可解決 GPS 天線偏移量之問題，但上述線性漂移參數是基於定翼機探討，因定翼機飛行速度較快，曝光站間之 GPS 觀測量間具有線性相關性，可透過時間關係，描述相鄰曝光站間之 GPS 觀測量，接續將 GPS 天線相位中心歸算於像片透視中心，才可執行光束法空三平差。而本研究以單旋翼 UAS 航拍取像，其飛行速度較慢且易受陣風影響，致使將以不規則之飛行軌跡航拍取像，其曝光站間之 GPS 觀測量關係勢必無法透過時間關係，描述相鄰曝光站間之 GPS 觀測量，故本研究將基於聯合平差 (Unified Least Squares Adjustment) 發展一數學模式解算 GPS 天線偏移量。

此外，GPS 定位時間與像機曝光瞬間存在一時間差，兩者時間並不一致；因此，即使擁有精確 GPS 定位成果，仍須考量 GPS 天線至像機透視中心偏移量與時間延遲之問題。目前普遍使用時間內插處理方式，皆以 GPS 接收儀記錄像機曝光瞬間時間，藉由 GPS 接收模組所記錄之像機曝光瞬間時間及 GPS 定位所記錄之規則時間作時間內插。常見內插方式有：線性內插 (Ackermann, 1992; Blankenberg, 1992; Ebadi, 1997; Friess, 1989)、多項式 (Lucas, 1987)、拉格朗日 (Friess, 1990)，其中以線性內插最為普遍，又僅 Ackermann (1992) 於研究中使用線性內插時探討其接收頻率，因此本研究採用多數研究所使用之線性內插方式。

三、GPS 輔助光束法空三平差與地面控制點之關係

理論上以 GPS 觀測量作為大量空中控制點來輔助空三平差，將可取代地面控制點，可完

全免除地面控制點之需求，但為使 GPS 定位成果應用於製圖所採用之坐標系統，仍需於可見光影像空三平差中引入少量控制點。已有許多研究顯示，GPS 輔助航拍可見光影像光束法空三平差時，僅需於測區四個角落布設全控點，已足夠供坐標轉換之用，但僅布設四全控點其可靠度相當差，僅能於地面控制點之 X、Y 及 Z 坐標觀測量粗差分別達 $240\sigma_0$ 、 $108\sigma_0$ 、 $231\sigma_0$ ，才能於平差系統偵測出粗差。若未剔除地面控制點粗差，將會嚴重影響區域平差之精度，此時區域平差精度將取決於地面控制點精度，故為避免地面控制點含有粗差且未被偵測出，必須量測多次取平均以確定地面控制點觀測無粗差。此外，亦有提出於測區四個角落布設雙全控點，其實驗結果顯示，當控制點精度不佳或要求精度製圖時，可採雙全控點方式布設於測區四個角落，將可大幅提升精度（袁修孝，2001；Ackermann and Schade, 1993）。

肆、研究方法

本研究中 GPS 定位方式擬採用國土測繪中心所建置之 e-GPS（現稱 e-GNSS）即時定位服務，以 VBS-RTK GPS 定位技術即時獲取單旋翼 UAS 之飛行軌跡，故第一小節將介紹 e-GNSS 即時動態定位基本架構與原理。

由於本研究所使用熱像儀為非量測像機，航拍前像機需事先率定。為避免因率定環境與取像環境之焦距不同，造成像機參數無法完全描述航拍時之像機狀態，將於光束法空三平差中造成像點系統誤差，故本研究將採用野外率定場法執行率定，其所使用之率定數學模式及率定流程將於第二小節中介紹；而後第三小節則介紹本研究所發展 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像光束法空三平差之數學模式。

一、虛擬基準站即時動態定位

本研究欲使用 VBS-RTK GPS 即時定位技術，即內政部國土測繪中心所建置之 e-GNSS 服務（內政部國土測繪中心，n.d.），藉由 VBS-RTK GPS 即時定位技術即時獲取單旋翼 UAS 之飛行軌跡，在成本方面甚至不需至地面控制點架設參考站，只需在 UAS 上搭載雙頻之 GPS 接收器，便可透過國土測繪中心所建置之 e-GNSS 服務，產生虛擬觀測量，再以 RTK 定位技術即時求得 UAS 飛行移動軌跡，提供 UAS 航拍熱影像空三平差中之控制資訊。

二、像機率定數學模式

由於 UAS 酬載非量測像機，像機需事先率定。然而以近景方式率定像機，因物距非無窮遠，無法描述取像時之像機參數，將造成系統性誤差（Lin and Chio, 2012），降低光束法平差精度，故為克服不精確像機參數，致使空三平差成果不佳，本研究將以野外率定場法執行熱像儀率定，故於本小節將介紹像機率定數學模式。

像機參數率定之基本觀測方程式源自於共線式，見式（1）。於共線式基礎上增加 Δx 、 Δy 改正項（見式（1）），並於平差過程一併解算，稱為附加參數自率光束法平差。而 Δx 、 Δy 則是依不同模式由不同參數所構成：

$$\begin{aligned} x_a - x_0 + \Delta x &= f \left[\frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \\ y_a - y_0 + \Delta y &= f \left[\frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

x_a 、 y_a ：像點之影像坐標；

x_0 、 y_0 ：像主點之影像坐標；

f ：像主距；

X_L 、 Y_L 、 Z_L ：像片透視中心之物空間坐標；

X_A 、 Y_A 、 Z_A ：物點 A 之物空間坐標；

m_{ij} ：旋轉矩陣元素，由姿態角所組成。

本研究以野外率定場法率定熱像儀。所使用之軟體為 ORIMA (ORIENTATION Management)，利用地面控制點適當地配置，執行自率光束法空三平差後，將可獲得一組像機參數。而 ORIMA 自率附加參數之數學模式同 Brown (1976) 的模式，但參數之表達方式略有調整 (Hinsken, 2008)，見式 (2)：

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + x \left[a_1(r^2 - r_0^2)^2 + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6) \right] + b_1x + b_2y \\ &\quad + \frac{x}{f} \left[c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4) \right] + d_1xy + d_2x^2 + d_3x^2y \\ &\quad + d_4xy^2 + d_5x^2y^2 \\ \Delta y &= y_0 + y \left[a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6) \right] + \frac{y}{f} \left[c_1(x^2 - y^2) \right. \\ &\quad \left. + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4) \right] + d_6x + d_7x^2 + d_8x^2y + d_9xy^2 + d_{10}x^2y^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Δx 、 Δy ：像點改正量；

x_0 、 y_0 ：像主點偏移量；

f ：像主距；

a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 d_1 …… d_{10} ：像機畸變差改正參數。

其解算原理即以式 (1) 與式 (2) 建立觀測方程式，以自率光束法平差解算像機參數，即像主距 f 、像主點 x_0 、 y_0 ，以及輻射畸變差透鏡畸變差 a_1 、 a_2 、 a_3 ，仿射及非正交 b_1 、 b_2 ，底片不平坦 c_1 、 c_2 、 c_3 ，底片變形及非輻射方向畸變差 d_1 …… d_{10} 。

三、GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像空三平差模式

(一) 平差系統中之觀測方程式

本研究之觀測量分為四類：GPS 天線偏移量觀測量、GPS 觀測量、地面控制點觀測量及像點觀測量。由於本研究所使用之單旋翼 UAS 飛行速度較慢，易受陣風影響，故曝光站間勢必非為線性相關，以致線性漂移參數將不適用於對應的 GPS 觀測量解決 GPS 天線偏移量之問題。而 GPS 天線偏移量 S ，並不會隨著坐標系統改變而變化，理論上此距離 S 應為定值，以捲尺量測 GPS 天線偏移量之距離 S^0 ，觀測方程式表示如式 (3)，式中 v_s 為 GPS 天線偏移量之改正數。由 GPS 觀測量可組成第 l 像片天線偏移量的 GPS 觀測方程式（見式 (4)），其中 X_L^l 、 Y_L^l 、 Z_L^l ：像片透視中心之三維坐標； X_G^l 、 Y_G^l 、 Z_G^l ：GPS 觀測量之三維坐標； v_{XG}^l 、 v_{YG}^l 、 v_{ZG}^l ：GPS 觀測量之三維坐標改正數。

$$S^0 + v_s = S \quad (3)$$

$$S = \sqrt{(X_G^l + v_{XG}^l - X_L^l)^2 + (Y_G^l + v_{YG}^l - Y_L^l)^2 + (Z_G^l + v_{ZG}^l - Z_L^l)^2} \quad (4)$$

接續第三類觀測量為地面控制點觀測量，為避免施測地面控制點之精度不佳，降低平差系統精度，故將地面控制點觀測量亦視為未知數求解，即將地面控制點視為虛擬觀測量，第 j 個控制點其觀測方程式表示如式 (5)，式中 X^0 、 Y^0 、 Z^0 ：控制點坐標之觀測量； X_j 、 Y_j 、 Z_j ：待求解之控制點坐標； v_{xj} 、 v_{yj} 、 v_{zj} ：控制點觀測量改正數。

$$\begin{aligned} X^0 + v_{xj} &= X_j \\ Y^0 + v_{yj} &= Y_j \\ Z^0 + v_{zj} &= Z_j \end{aligned} \quad (5)$$

最後一類觀測量為像點觀測量，理論上每個像點與其對應物點物空間坐標及像片透視中心，應位於同一光線上，故像點觀測方程式將符合共線條件式，第 l 像片第 i 個物點觀測方程式表示如式 (6)。

$$\begin{aligned} x_i - x_0 + \Delta x &= -f \left[\frac{m_{11}(X_i - X_L^l) + m_{12}(Y_i - Y_L^l) + m_{13}(Z_i - Z_L^l)}{m_{31}(X_i - X_L^l) + m_{32}(Y_i - Y_L^l) + m_{33}(Z_i - Z_L^l)} \right] \\ y_i - y_0 + \Delta y &= -f \left[\frac{m_{21}(X_i - X_L^l) + m_{22}(Y_i - Y_L^l) + m_{23}(Z_i - Z_L^l)}{m_{31}(X_i - X_L^l) + m_{32}(Y_i - Y_L^l) + m_{33}(Z_i - Z_L^l)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

x_i, y_i ：像點之影像坐標；

x_0, y_0 ：像主點之影像坐標；

f ：像主距；

X_L^i, Y_L^i, Z_L^i ：像片透視中心之物空間坐標；

X_i, Y_i, Z_i ：物點 i 之物空間坐標；

m_{ij} ：旋轉矩陣元素，由姿態角所組成。

列出上述四類觀測方程式，將其線性化，給定未知數初始值，即可帶入聯合平差模式，迭代同時求解 GPS 天線偏移量、像片外方位參數及連結點之物空間坐標。

（二）聯合平差

於實際平差系統中之參數與觀測值可能來自大地測量、平面測量及攝影測量等不同領域，為了能夠同時平差處理來源不同之參數，因而衍生了最小二乘聯合平差。此方法最重要假設為條件方程式中包含之所有參數皆為觀測值，利用其協方差或權矩陣對不同觀測值賦予不同權重，界定此觀測值於平差系統中的意義（Mikhail, Bethel, and McGlone, 2001）。此模式一開始是由線性函數推導，給定參數向量 $\mathbf{x}$ 、對應之先驗協因子矩陣為 $\mathbf{Q}_{xx}$ 與改正數向量為 Δ ，接續給予一組 $\mathbf{l}$ 為 $n \times 1$ 觀測向量，對應 $\mathbf{l}$ 觀測向量之先驗協因子矩陣為 $\mathbf{Q}$ ，其方程式可統整為矩陣形式（8），進一步簡化成式（9）：

$$\mathbf{A}(\mathbf{l} + \mathbf{v}) + \mathbf{B}(\mathbf{x} + \Delta) = \mathbf{d} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{f} \quad (9)$$

其對應總協因子矩陣為：

$$\dot{\mathbf{Q}} = \dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{A}}^T = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{A}}\dot{\mathbf{Q}}\dot{\mathbf{A}}^T & 0 \\ 0 & \dot{\mathbf{Q}}_{xx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Q}}_e & 0 \\ 0 & \dot{\mathbf{Q}}_{xx} \end{bmatrix} \quad (10)$$

接續根據最小二乘法，得其解為：

$$\begin{aligned} \Delta &= (\dot{\mathbf{N}}^1)\dot{\mathbf{i}} = (\mathbf{N} + \mathbf{W}_{xx})^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{W}_{xx}\mathbf{f}_x) \\ \dot{\mathbf{N}} &= \dot{\mathbf{B}}^T \dot{\mathbf{W}}_e \dot{\mathbf{B}} = [\mathbf{B}^T \mathbf{W}_e \mathbf{B} + \mathbf{W}_{xx}] = (\mathbf{N} + \mathbf{W}_{xx}) \\ \dot{\mathbf{i}} &= \dot{\mathbf{B}}^T \dot{\mathbf{W}}_e \dot{\mathbf{f}} = \dot{\mathbf{B}}^T \dot{\mathbf{W}}_e \mathbf{f} - \mathbf{W}_{xx}\mathbf{f}_x = (\mathbf{t} - \mathbf{W}_{xx}\mathbf{f}_x) \end{aligned} \quad (11)$$

B : 對未知參數偏微分之係數矩陣

Δ : 未知參數向量

A : 對觀測量偏微分之係數矩陣

v : 觀測量改正數向量

Q : 觀測量之協因子矩陣

Q_{xx} : 未知參數之協因子矩陣

W : 觀測量之權矩陣

W_{xx} : 虛擬觀測量之權矩陣

f : 觀測方程式之不符值

f_x : 虛擬觀測方程式之不符值

本研究所發展之數學模式之多餘觀測數為，GPS 觀測量組成 GPS 天線偏移量之觀測方程式個數及像點觀測量組成觀測方程式個數之總和，與待求解之外方位參數及連結點物空間坐標總和相減。其相關矩陣內容如下所示，其中 $\dot{A}$ 矩陣包含式 4 對 GPS 觀測量偏微分之係數矩陣 A_{GPS} 、式 (6) 對像點觀測量偏微分之係數矩陣 A_{im_point} 、式 (3) 對 GPS 天線偏移量觀測量偏微分之係數與式 (5) 對地面控制點虛擬觀測量偏微分之係數所組之矩陣 I ，而 v 向量包含由 GPS 觀測量之改正數向量 v_{GPS} 、像點觀測量之改正數向量 v_{im_point} 及 GPS 天線偏移量與地面控制點虛擬觀測量之改正數向量 v_{xx} ，而 $\dot{B}$ 矩陣則包含共線式對未知參數偏微分之係數矩陣 (B_{EO} 、 B_S 、 B_{cpTIE})，而 Δ 向量包含對應之未知參數增量，其中未知參數增量即外方位參數增量向量 x_{EO} 、GPS 天線偏移量增量向量 x_S 、地面控制點與連結點物空間坐標增量向量 x_{cpTIE} 。而 W 、 W_{xx} 、 f 、 f_x 矩陣定義皆如式 (11) 所敘，各矩陣如下，其中：IM 代表影像個數，noob 代表像點觀測量個數，cp 代表地面控制點個數，TIE 代表地面連結點個數。

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} A_{GPS_{IM*3IM}} & 0 & 0 \\ 0 & A_{im_point_{2noob*2noob}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{(6IM+1+3cp+3TIE)*(6IM+1+3cp+3TIE)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\dot{B} = \begin{bmatrix} B_{EO_{(IM+2noob)*6IM}} & B_{S_{(IM+2noob)*1}} & B_{cpTIE_{(IM+2noob)*(3cp+3TIE)}} \\ & -I_{(6IM+1+3cp+3TIE)*(6IM+1+3cp+3TIE)} & \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} v_{GPS_{3IM*1}} \\ v_{im_point_{2noob*1}} \\ v_{xx_{(6IM+1+3cp+3TIE)*1}} \end{bmatrix}; \Delta = \begin{bmatrix} x_{EO_{6IM*1}} \\ x_{S_{1*1}} \\ x_{cpTIE_{(3cp+3TIE)*1}} \end{bmatrix}; \dot{f} = \begin{bmatrix} f \\ f_x \end{bmatrix}; \dot{w} = \begin{bmatrix} w \\ w_{xx} \end{bmatrix} \quad (14)$$

伍、結果與討論

一、儀器及軟體

(一) GPS 接收模組：BD970

BD970 為 Trimble 公司所開發設計 (Trimble, 2022)，此接收模組體積小、重量輕 (見圖 1)，易於安裝於 UAS 上。其可接收多個衛星系統，包括 GPS L2C/L5、GLONASS L1/L2、Galileo 及北斗衛星系統，且能夠提供公厘級之定位精度。此外，BD970 具有保護高品質 GNSS 訊號之設計，以避免訊號被干擾。此接收模組具有一個 USB、控制器區域網路 (Controller Area Network) 介面、乙太網端口及三個 RS-232 之高速數據傳輸端口，其亦支持多種網路協議，如 HTTP、動態 DNS 及 NTP 服務等，不同資料格式皆可互相流通，其相關規格如表 1。

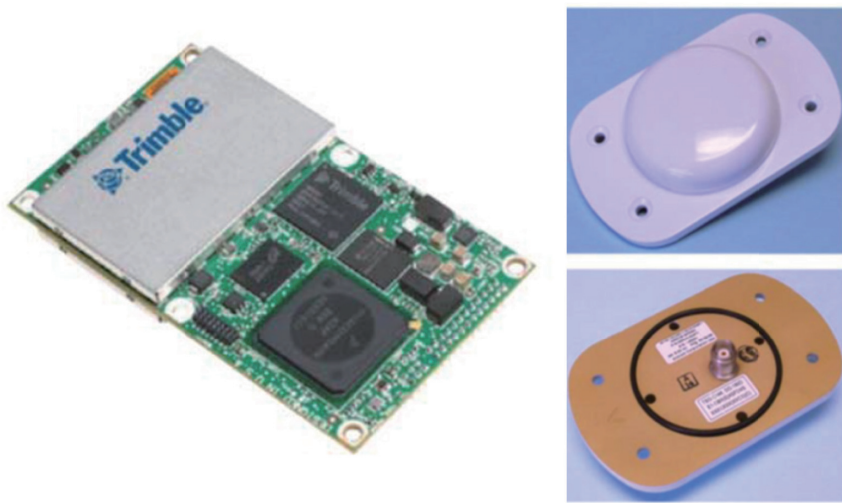


圖 1 Trimble BD970 接收模組及天線

資料來源：Trimble (2022)。

表 1 Trimble BD970 規格

項目	規格
體積	100 mm × 60 mm × 11.6 mm
重量	62 g
天線種類	ANTCOM GPS antenna
初始化時間	< 10 seconds
初始可靠度	> 99.9%

資料來源：Trimble (2022)。

於本研究中，BD970 接收模組資料接收設定如下：

1. GPS 接收頻率為 20 Hz，即每秒接收 20 筆雙頻載波相位觀測量。
2. 當 GPS 衛星高程角低於 15 度時，易造成多路徑效益，故將低於 15 度之高程角之觀測資料予以刪除。
3. 利用網際網路連結至國土測繪中心所建置之 e-GNSS 定位服務。

（二）熱像儀：FLIR-T360

本研究使用現有的 FLIR 公司所製造之熱像儀 T360（見圖 2）作為取像儀器，其相較於傳統點掃描式熱感測器，具有以下優點（FLIR Systems, 2022）：

1. 使用固態微電子感測器，相較於以往感測器體積更小且重量更輕，亦較為節省電力。
2. 相較於點感測器能於感測時間內駐留更多時間，使得感測器平均接收之能量較高，進而提高輻射解析度。
3. 以往所有熱像儀皆需冷卻系統，確保感測器所接收之輻射能量來自感測之物體而非儀器本身，而手持式面陣列熱像儀已無此問題。



圖 2 FLIR-T360 熱像儀

資料來源：FLIR Systems（2022）。

FLIR-T360 詳細產品規格見表 2。

（三）UAS：單旋翼無人直升機

於研究中將使用單旋翼 UAS（見圖 3），其詳細規格見表 3。而 BD970 接收模組則安裝於 (a) 藍色框處，GPS 天線則安裝於單旋翼直升機右側，見 (b) 紅色框處。FLIR-T360 熱像儀則安裝於正下方。

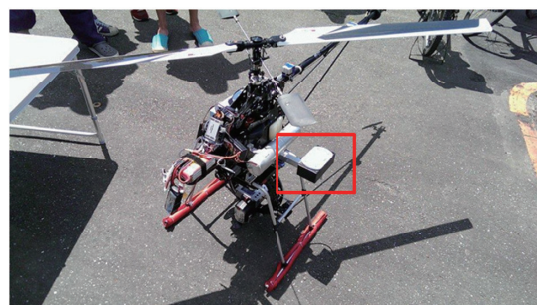
表 2 FLIR-T360 紅外線熱像儀產品規格

項目	規格
焦距	18 mm
視場角	25° × 19°
熱靈敏度	0.06°C
感測器類型	焦面陣列
瞬間視場角	1.36 mRad
紅外線空間解析度	320 × 240 pixels
光譜解析度	7.5 至 13.0 μm
涵蓋溫度範圍	-20°C 至 120°C / 0°C 至 150°C
精度	$\pm 2^\circ\text{C}$ 或讀數之 $\pm 2\%$ 取較高值
重量	0.88 kg
體積	106 mm × 201 mm × 125mm

資料來源：FLIR Systems（2022）。



(a) Trimble BD970 接收模組



(b) Trimble BD970 天線

圖 3 本實驗建置之單旋翼 UAS 熱像取像系統

資料來源：作者自行研究整理。

表 3 單旋翼無人直升機規格

項目	規格	項目	規格
機身總長	1,650 mm	主要羅盤轉速	1,350 rpm
總重量	10 ~ 12 kg	爬升速度	4 m/s
高度	600 mm	飛行最大速度	25 m/s
主要羅盤旋轉直徑	1,780 mm	飛行最大高度	3,700 m
尾翼羅盤旋轉直徑	265 mm	起落架長度	230 mm
載重飛行時間	50 ~ 60 mins	最高風速容忍度	6 級風
燃料	汽油	材質	碳纖維

資料來源：作者自行研究整理。

(四) 軟體

本研究以野外率定場法率定熱像儀時使用軟體為 ORIMA，利用地面控制點適當地配置，執行自率光束法空三平差後，將可獲得一組像機參數 (Hinsken, 2008)。

另一使用軟體為 LPS，掛載於 ERDAS IMAGINE 之空三模組 (Erdas Inc., 2010)，可對衛星影像、航空影像及近景攝影之影像執行自動匹配連結點、空三平差、產製 DEM、正射鑲嵌影像及 3D 建物模型等功能，亦可執行飛行模擬，是專為攝影測量所開發設計之軟體。由於此軟體未有 GPS 輔助光束法空中平差之功能，本研究僅使用此軟體執行自動匹配連結點，供所發展模式使用。此外，為比較真實資料有無 GPS 輔助光束法空三平差之成果，本研究將使用此軟體執行光束法空三平差後，與本研究所發展模式解算之成果作比較。

二、熱像儀率定

本計畫設計一與航拍取像環境一致之野外率定場，執行野外率定場法。野外率定場之實驗區為政治大學體育館旁，此區物表起伏及涵蓋地物種類較為豐富，而其實驗場範圍約為 $100\text{ m} \times 50\text{ m}$ ，均勻布設 20 個鋁質板 (見圖 4)，其中 17 個為控制點，三個為檢核點。率定場之航帶規劃為四條與航帶首尾各一條正交航帶，共六條航帶 (圖 5)，而影像前後重疊率 80%，側向重疊率為 50%。據本次研究之熱像儀 (FLIR Systems, 2022)，其每個像元尺寸為 $25\text{ }\mu\text{m}$ ，焦距約為 18 mm 。於率定場航拍取像時，航高設計 100 m ，每個像元之地面涵蓋範圍為 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ ，控制點及檢核點實地布設尺寸為 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ 。

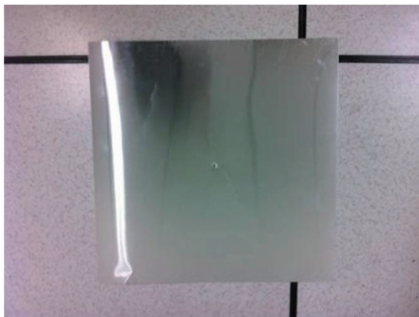


圖 4 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ 方形鋁質板

資料來源：作者自行研究整理。

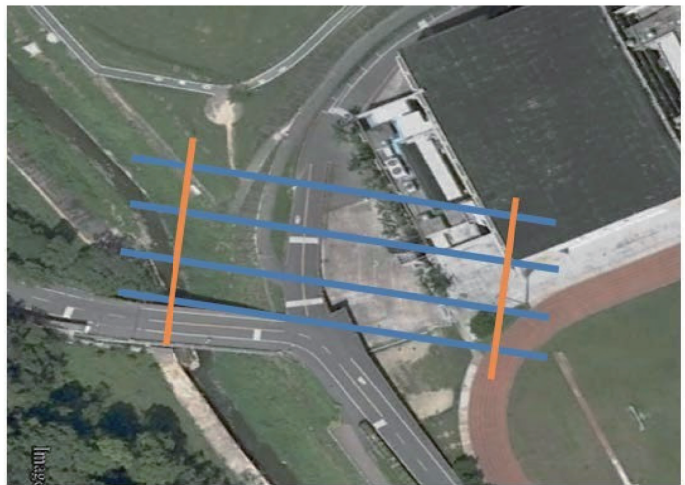


圖 5 野外場率定場之航線規劃

資料來源：作者自行研究整理。

以 ORIMA 自率光束法區域空三平差之附加參數模式包含：像主距、像主點、鏡頭透鏡輻射畸變差透鏡畸變差、仿射及非正交、底片不平坦、底片變形及非輻射方向畸變差等參數，但僅率定像主距、像主點、透鏡輻射畸變差，求得一組像機參數，其成果見表 4。野外率定

場之控制點與檢核點皆以 GPS-RTK 施測而得，控制點、檢核點及自動匹配連結分布情形見圖 6。

表 4 野外率定之熱像儀像機參數

項目	參數	項目	參數
焦距	18.7384 mm	輻射畸變差 K1	1.07e-03
像主點 x_0 偏移量	1.7004 mm	輻射畸變差 K2	-1.18e-05
像主點 y_0 偏移量	-0.6963 mm	輻射畸變差 K3	1.72e-07

資料來源：作者自行研究整理。

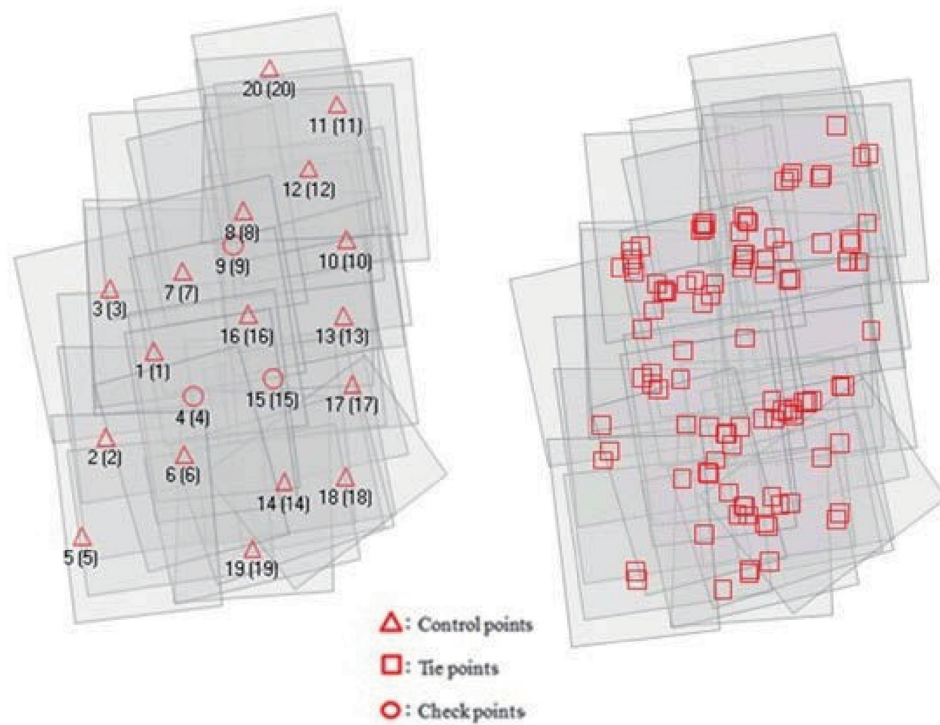


圖 6 野外率定場之控制點與檢核點、地面連結點分布情形

資料來源：作者自行研究整理。

三、實驗

(一) 實驗配置

假設欲監測河川，因此實驗規劃為政治大學校區內之指南溪，設計單航帶取像，由於受限 e-GNSS 接收品質不佳，僅能取得部分指南溪（圖 7）之真實資料，測區內控制點皆以國土測繪中心 e-GNSS 施測，其控制標材質為方取形鋁製標（如圖 7）。獲取真實資料之相關設定可參考表 5。



圖 7 單航帶測區（指南溪）

資料來源：作者自行研究整理。

表 5 獲取真實資料之相關設定

項目	數值
航高	150 m
航線	1
像片總數	6 張
涵蓋面積	3,000 m ²
前後及左右重疊	80%
GSD (焦距 = 18.3045 mm)	18 cm
控制標大小	60 cm × 60 cm

資料來源：作者自行研究整理。

為符合單旋翼 UAS 重心配置，熱像儀機身需旋轉 90 度放置，即以 240 × 320 之像幅取像，故航高為 100 m，每張熱影像之地面涵蓋範圍為 32.34 m × 43.12 m，但單航帶測區中因指南溪兩側河堤距離約為 40 m，控制點僅能於河堤兩岸上布設，故若以航高 100 m 航拍取像，將無法涵蓋河堤兩岸，故規劃單航帶測區之航高為 150 m。

（二）資料獲取與前處理

1. 航拍熱影像獲取

由於本研究使用之熱像儀，其像幅可涵蓋地面範圍較可見光影像小，且所獲取之影像右側皆有溫標資訊，致使欲獲得較高重疊率之影像，必須密集地拍攝取像。但熱像儀拍攝與儲存時間間隔至少三秒以上，故不同航高之航拍計畫，UAS 飛行速度將有所不同，以航高 150 m 與前後重疊率為 80% 為例，其曝光站間距為 13 m，為確保熱像儀取像成功，必須使其拍

攝與儲存時間總和達四秒以上，故飛機飛行速度必須為 3 m/s，但以此飛行速度航拍取像，將易受陣風影響，導致所獲取之影像有重疊率不足之情況發生，故為取得足夠重疊率之熱影像，本研究將以熱像儀外接訊號線至錄影卡，以飛行速度為 10 m/s，每秒記錄 30 幅影像之錄影方式獲取熱影像。

2. e-GNSS 觀測量之取得

當 GPS 訊號且無線電與網路設備訊號良好時，e-GNSS 即時解算可得固定解，其理論定位精度在 2 ~ 5 cm 範圍內，但由於本研究 GPS 天線安裝於機身左側（見圖 3），可能受到電磁波干擾，又取像時間為中午 12 點至下午 3 點，此時通過臺灣上空之衛星顆數較少，故於航拍取得真實資料時，所得之即時解算 GPS 資料定位品質不佳，大多為廣域差分增強系統（Satellite-Based Augmentation Systems, SBAS），亦有少數 Differential GPS（DGPS）及 RTK 之定位品質。以本研究使用之 Trimble BD970 接收模組其 SBAS 定位精度約 0.5 ~ 0.85 m，DGPS 之定位精度約 0.25 ~ 0.5 m，而 RTK 定位精度約 0.002 m（Trimble, 2022）。本研究為對應以每秒 30 像幅之錄影方式，GPS 觀測量接收頻率為 20 Hz。不論 GPS 定位品質優劣，皆須以時間內插取得 GPS 觀測量，本研究將以線性內插方式取得對應像片之 GPS 觀測量。

3. 熱影像處理

熱像資料是由錄影機卡錄影獲取，故須由錄影檔擷取所需之熱影像。然而，錄影模式之限制，使得所擷出之熱影像（704 × 480 pixels）不為原始像幅（320 × 240 pixels）且影像向上偏移 8 pixels（圖 8 藍色框），故須將截出之影像重新取樣至原像幅大小（見圖 8 右圖）。此外，熱影像硬體的限制，使其於影像上之右側有溫標顯示（見圖 8 左圖紅色框），此溫標為明顯特徵，易使後續自動匹配連結點時產生錯誤之成果，故須予以剔除，接續將影像匯入 LPS 空三軟體，執行標準化互相關（Normalized Cross Correlation）匹配連結點，其匹配相關係數設定為 0.6，搜尋罩窗大小為 7 × 7。連結點自動匹配完成後，以人工方法剔除錯誤點位，將像點資料經輻射畸變差改正後，匯入本研究所發展的 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像光束法空三平差之數學模式中進行解算。

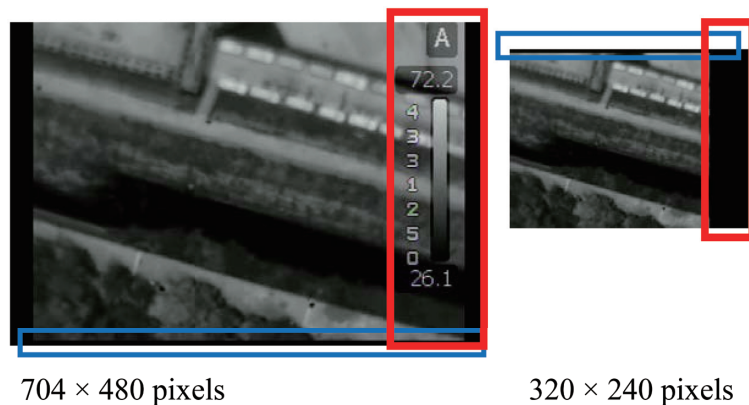


圖 8 錄影取得之真實熱影像資料（左）及經處理之熱影像資料（右）

資料來源：作者自行研究整理。

(三) 實驗成果與分析

實驗成果與分析將比較有無 GPS 觀測量輔助單旋翼 UAS 熱影像光束法空三平差之外部精度，其中無 GPS 觀測量輔助光束法空三平差，將使用 LPS 執行；而有 GPS 觀測量輔助光束法空三平差，則使用本研究所發展之數學模式執行，兩者使用之像機參數及連結點位分布及個數皆相同。由 e-GNSS 即時定位品質之精度為依據，以加權平均方式約略估計 X、Y 及 Z 三方向之定位精度為 0.5 m、0.5 m、1 m；地面控制點施測方式皆以 e-GNSS 即時動態定位技術測得，其定位理論精度 X、Y 約為 2 cm，而高程 Z 精度約為 5 cm；而 GPS 天線偏移量之實際量測值為 42 cm，以捲尺人為量測此段距離誤差為 2 cm；像點量測方式有人工量測及自動匹配而得，故以匹配精度 (0.33 pixels) 與人工量測精度 (1 pixels) 之平均 (0.66 pixels) 作為像點量測精度之設定。真實資料之相關參數設定，見表 6。

表 6 真實資料之相關參數設定

解算方式	LPS	所發展數學模式
有無 GPS 觀測量輔助	無	有
e-GNSS 於 X、Y 及 Z 定位精度		0.5 m、0.5 m、1 m
GCPs 於 X、Y 及 Z 度	2 cm、2 cm、5 cm	
像點量測精度	0.66 pixels	

資料來源：作者自行研究整理。

單航帶 6 張影像匯入 LPS 執行連結點匹配，由於熱影像空間解析度較差，且影像上邊緣線特徵模糊不清，而地物又缺乏明顯特徵物，不易自動正確匹配連結點。自動匹配成果經人工除錯與人工加量連結點後，共得連結點個數僅 53 個，其於各影像上連結點分布情形見圖 9。

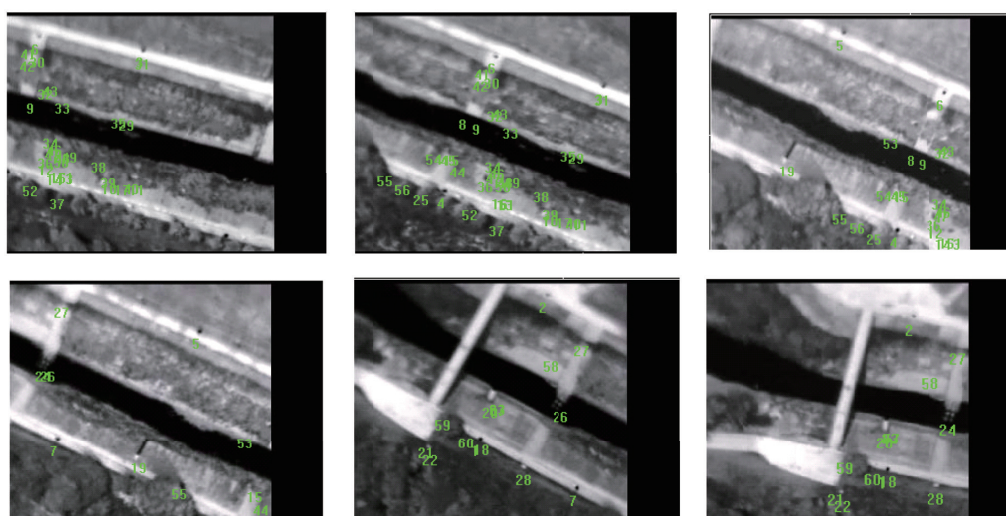


圖 9 單航帶中各影像之連結點分布狀況

資料來源：作者自行研究整理。

由於單航帶測區為河道，地面控制點僅能於河岸兩側布設，不易於重疊區布設控制點，故以測區四角落布設單全控點配置，探討有無 GPS 輔助光束法空三平差之外部精度。因檢核點不易實地量測，僅用 3 個檢核點探討。因於此配置下，LPS 無法解算，故表 7 僅列所發展之數學模式解算成果，表中包含有無 GPS 天線偏移量觀測量加入解算的兩者成果。

表 7 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像單航帶光束法空三平差之成果

解算方式	所發展數學模式 (GPS)	
有無 GPS 天線偏移量觀測量	有	無
外部精度 (m)		
X	0.32	1.25
Y	0.24	0.11
平面	0.40	1.25
Z	1.27	1.45
S (m)	0.42	30.58

資料來源：作者自行研究整理。

由表 7 得知，有 GPS 天線偏移量觀測量加入解算時，由於熱影像之基線航高比較小，致使其高程精度解算成果較差，但由於本研究 GPS 觀測量精度不佳，使其平面精度 (0.40 m) 及高程精度 (1.27 m) 無法達到預期成果，但此精度已可達監測之用。此外，無 GPS 輔助光束法空三平差時，將無法解算，由此可知，即使 GPS 觀測量品質不佳，亦仍有空中控制之作用；於 GPS 天線偏移量之解算成果得知，當所發展模式中引入 GPS 天線偏移量觀測量時解算成果幾乎等同於實際觀測量，故於 GPS 觀測精度不佳時，無法成功求得正確之 GPS 天線偏移量，但受 GPS 天線偏移量觀測量影響，使其解算成果皆接近於 42 cm。此外，若無 GPS 天線偏移量觀測量引入模式解算時，會解算出錯誤甚巨之 GPS 天線偏移量 30.58 m (見表 7)，且其外部精度也變更差。然而，由於單航帶測區中間部分，其連結性較弱 (見圖 10)，亦為 LPS 無法解算成果因素之一，若於中間部分增加一控制點 (如圖藍色框)，雖可解算，但平面精度高達 1.5 m，而高程精度更高達 10 m。圖 11 展示 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像單航帶光束法空三平差後，製成單航帶正射熱影像與可見光正射影像套和之成果，白色部分即為河水反射陽光溫度較高處。

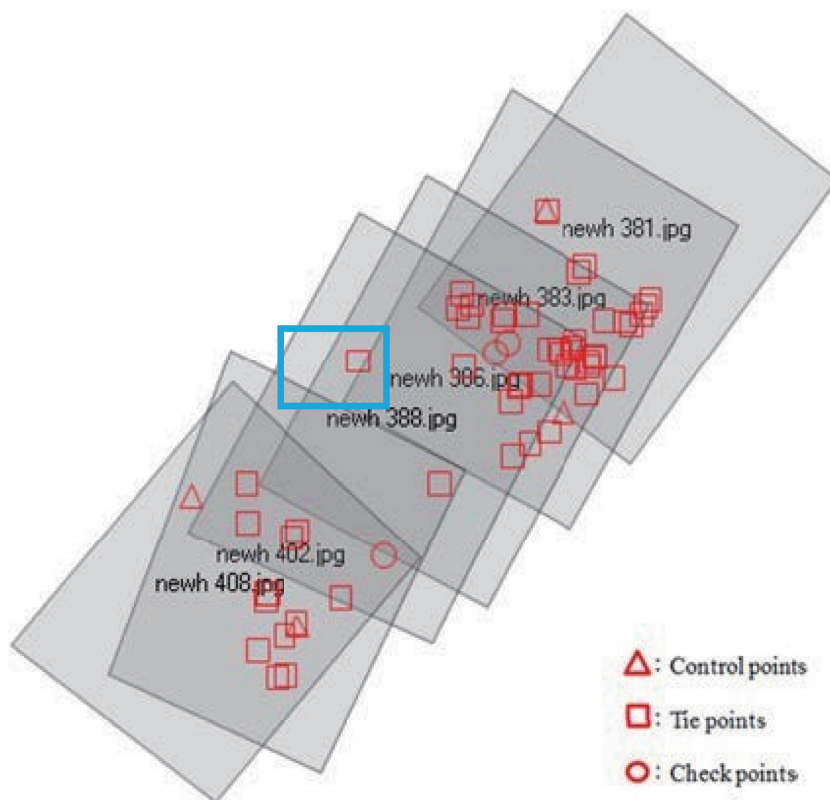


圖 10 單航帶四角落布設單全控點之地面連結點、檢核點及控制點分布情形

資料來源：作者自行研究整理。

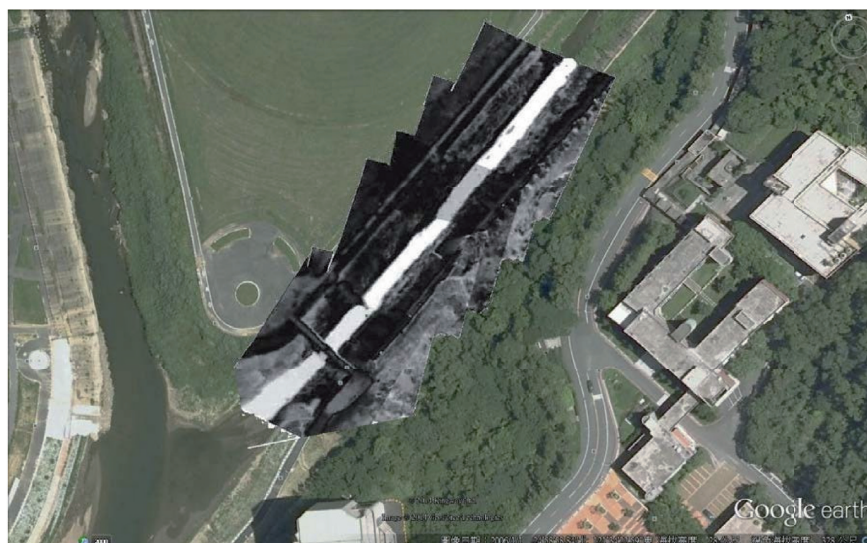


圖 11 單航帶正射熱影像

資料來源：作者自行研究整理。

陸、結論與建議

一、結論

本章將根據前述實驗，針對熱像儀率定、VBS-RTK GPS 即時動態定位方式輔助單旋翼 UAS 熱影像空三平差之可行性、所發展模式於 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像空三平差解算 GPS 天線偏移量之可行性，提出結論與建議。

（一）熱像儀像機率定

以往非量測型像機率定皆採近景攝影方式率定，但以此方式率定將產生像機率定不完全之情況發生，嚴重影響高程精度。本研究提出以野外率定場法，使其航拍取像與率定環境之焦距近乎一致。

（二）VBS-RTK GPS 輔助 UAS 熱影像光束法空三平差

以 VBS-RTK GPS 輔助 UAS 熱影像光束法空三平差時，作為空中控制，以減少地面控制點之成果優劣取決於 GPS 定位品質好壞。於高速移動之載具，仍受 GPS 訊號接收狀況、無線電與網路之傳輸及電磁波干擾等因素，使得 GPS 定位成果不佳，故本研究試驗以 VBS-RTK GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像光束法空三平差，仍無法作為高精確之空中控制，但此定位精度已足夠應用於環境監測領域。

（三）所發展 GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像空三平差解算之數學模式

GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像光束法空三平差，以本研究所發展之數學模式解算時，即使 GPS 定位精定不佳，GPS 觀測量仍可作為空中控制，解算之空三精度仍優於未以 GPS 輔助之成果。

二、建議

- （一）由於 GPS 即時定位成果不佳，影響其定位品質因素甚多，如 GPS 天線位置、電磁波干擾、傳輸訊號及 GPS 觀測量、觀測時間等，致使後續模式解算精度不佳，故未來建議以後處理方式，以取得較佳之 GPS 定位成果，輔助 UAS 熱影像光束法空三平差，提升空三平差精度，期許未來可擴大其應用領域。
- （二）由於本研究所使用之單旋翼 UAS，其抗風性較差，易受陣風影響，又其硬體未設計完善，使其仍有搖尾之情況發生，導致取得之影像易有晃動之情形，故即使以每秒 30 像幅之錄影方式取得影像，仍不易取得穩定性較佳之熱影像。故建議使用穩定性較佳之多旋翼 UAS，以取得穩定性較佳之熱影像。此外，本研究設定其飛行速度為 10 m/s，若改以 20 m/s 飛行，應可提升其飛行取像之穩定性。
- （三）本研究未對熱影像之溫度資訊執行輻射改正，皆以相對溫度呈現。若能以真實溫度呈現，將可獲得較精確之溫度資訊，以利後續應用。

- (四) 本研究雖已產製正射鑲嵌熱影像，但區域甚小，建議後續進行大區域實驗以供大範圍環境熱效應之監測使用。

致謝

本研究承蒙科技部產學合作計畫（計畫編號 NSC 102-2119-M-004-001）研究經費贊助、剛鈺股份有限公司協助感測器和 GPS 接收儀系統整合，使得本研究能順利完成，特此致謝！

參考文獻

- 王冠中，2012，《都市土地利用型與地表溫度關係之探究——以臺北市為例》，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 內政部國土測繪中心，n.d.，《e-GNSS 即時動態定位系統入口網站》，<https://egnss.nlsc.gov.tw/HotNews.aspx>（瀏覽日期：2022 年 8 月 23 日）。
- 方啟任，2007，《熱影像技術與類神經網路應用於海堤淘空之研究》，立德管理學院資源環境研究所碩士論文。
- 那至中，2010，《面陣列熱影像特性之研究》，國立政治大學地政學系研究所碩士論文。
- 吳秉晃，2002，《集集地震後阿里山地區公路邊坡之崩壞行為與熱影像特性研究》，國立成功大學土木工程學研究所碩士論文。
- 李敏瑜，2013，《VBS-RTK GPS 輔助 UAV 影像自率光束法空三平差之研究》，國立政治大學地政學系研究所碩士論文。
- 李璟芳、張守陽、林志平，2004，〈紅外線熱影像應用於土石流監測之可行性研究〉，《中華水土保持學報》，35（3），頁 261-274。doi:10.29417/JCSWC.200409_35(3).0007
- 邱式鴻、謝耀震，2019，〈以四旋翼 UAS 酬載熱感測器取像製作數值表面溫度模型〉，《臺灣土地研究》，22（1），頁 1-28。doi:10.6677/JTLR.201905_22(1).0001
- 袁修孝，2001，《GPS 輔助空中三角測量原理及應用》，北京：測繪出版社。
- 張東柱、林振榮，2010，《應用紅外線熱影像技術評估及管理受保護樹木健康性的研究(I)（計畫編號：99 農科 -8.4.1- 森 -GE）》，臺北：林業試驗所。
- 謝啟文，2011，《利用 Landsat ETM+ 熱波段影像於災害後復健狀況評估》，朝陽科技大學營建工程系研究所碩士論文。
- Ackermann F., 1992, "Operational Rules and Accuracy Models for GPS Aerial Triangulation," in *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Washington, DC: Committee of the XVII International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, 691-700.
- Ackermann F., 1994, "On the Status and Accuracy Performance of GPS Photogrammetry," in *Proceedings: Mapping and Remote Sensing Tools for the 21st Century*, Washington, DC:

- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 80-90.
- Ackermann F., and Schade, H., 1993, "Application of GPS for Aerial Triangulation," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59(1), 1625-1632.
- Ambrosia V. G., Wegener S. S., Sullivan D. V., Buechel S. W., Dunagan S. E., Brass J. A., Stoneburner J., and Schoenung S. M., 2003, "Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal Data Over Fires," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), 391-402.
- Amici S., Turci M., Giammanco S., Spampinato L., and Giulietti F., 2013, "UAV thermal Infrared Remote Sensing of an Italian Mud Volcano," *Advances in Remote Sensing*, 2(4), 358-364. doi:10.4236/ars.2013.24038
- Avery T. E., and Berlin G. L., 1992, *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*, New York, NY: Macmillan.
- Berni J. A. J., Zarco-Tejada P. J., Suarez L., and Fereres E., 2009, "Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722-738. doi:10.1109/TGRS.2008.2010457
- Blankenberg L. E., 1992, "GPS-Supported Aerial Triangulation—State of the Art," *Photogrammetric Journal of Finland*, 13(1), 4-16.
- Brown D. C., 1976, "The Bundle Adjustment: Progress and Prospects," paper presented at *the XIII Congress of the International Society for Photogrammetry*, Helsinki, Finland.
- Brumana R., Oreni D., Van Hecke L., Barazzetti L., Previtali M., Roncoroni F., and Valente R., 2013, "Combined Geometric and Thermal Analysis from UAV Platforms for Archaeological Heritage Documentation," paper presented at *the 2013 XXIV International CIPA Symposium*, Strasbourg: France.
- Chio S.-H., and Lin C.-H., 2017, "Preliminary Study of UAS Equipped with Thermal Camera for Volcanic Geothermal Monitoring in Taiwan," *Sensors*, 17(7), 1649. doi:10.3390/s17071649
- Ebadi H., 1997, *A Comprehensive Study on GPS Assisted Aerial Triangulation*, unpublished doctoral dissertation, University of Calgary, Alberta, Canada.
- Erdas Inc., 2010, *LPS Project Manager User's Guide*, Norcross, GA: Erdas Inc.
- Faux R. N., Maus P., Lachowski H., Torgersen C. E., and Boyd M. S., 2001, *New Approaches for Monitoring Stream Temperature: Airborne Thermal Infrared Remote Sensing*, San Dimas, CA: Inventory & Monitoring Steering Committee.
- FLIR Systems, 2022, "Infrared Imaging Systems," *FLIR Systems on the World Wide Web*, <http://www.FLIR.com> (accessed October 23, 2022).
- Friess P., 1989, "Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne GPS Data," in *High Precision Navigation*, Berlin, Germany: Springer, 163-175. doi:10.1007/978-3-642-74585-0_10

- Friess P., 1990, "Kinematic GPS Positioning for Aerial Photogrammetry Empirical Results," *International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*, 3(7), 1169-1184.
- Ham Y., and Golparvar-Fard M., 2013, "An Automated Vision-Based Method for Rapid 3D Energy Performance Modeling of Existing Buildings Using Thermal and Digital Imagery," *Advanced Engineering Informatics*, 27(3), 395-409. doi:10.1016/j.aei.2013.03.005
- Hartmann W., Tilch S., Eisenbeiss H., and Schindler K., 2012, "Determination of the UAV Position by Automatic Processing of Thermal Images," paper presented at *the XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Melbourne, Australia.
- Harvey M. C., Rowland J. V., and Luketina K. M., 2016, "Drone with Thermal Infrared Camera Provides High Resolution Georeferenced Imagery of the Waikite Geothermal Area, New Zealand," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 325, 61-69. doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.06.014
- Hinsken L., 2008, *CAP-A—Combined Adjustment Program Aerial Version*, Norcross, GA: Erdas Inc.
- Hinsken L., Miller S., Tempelmann U., Uebbing R., and Walker S., 2002, "Triangulation of LH Systems' ADS40 Imagery Using ORIMA GPS/IMU," paper presented at *the Commission III Symposium "Photogrammetric Computer Vision"*, Graz, Austria.
- Hsu L. Y., Chen C. Y., and Chio S. H., 2013, "The Study on Position and Orientation of Close-Range Thermal Infrared Images," paper presented at *the International Symposium on Remote Sensing*, Tokyo, Japan.
- James M. R., Robson S., Pinkerton H., and Ball M., 2006, "Oblique Photogrammetry with Visible and Thermal Images of Active Lava Flows," *Bulletin of Volcanology*, 69(1), 105-108. doi:10.1007/s00445-006-0062-9
- Lagüela S., González-Jorge H., Armesto J., and Arias P., 2011, "Calibration and Verification of Thermographic Cameras for Geometric Measurements," *Infrared Physics & Technology*, 54(2), 92-99. doi:10.1016/j.infrared.2011.01.002
- Liao C. L., and Huang H. H., 2013, "Study on Using Thermal Image to Produce Digital Surface Temperature Model," paper presented at *the International Symposium on Remote Sensing*, Tokyo, Japan.
- Lin J.-Y., and Chio S.-H., 2012, "The Accuracy Influence of Different Camera Calibration Conditions to Bundle Adjustment of Closerange Images," paper presented at *the 33rd Asian Conference on Remote Sensing*, Pattaya, Thailand.
- Lucas J. R., 1987, "Aerotriangulation without Ground Control," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(3), 311-314.
- Luhmann T., Ohm J., Piechel J., and Roelfs T., 2010, "Geometric Calibration of Thermographic

- Cameras,” paper presented at *the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium “Close Range Image Measurement Techniques”*, Newcastle upon Tyne, UK.
- Mikhail E. M., Bethel J. S., and McGlone C. J., 2001, *Introduction to Modern Photogrammetry*, New York, NY: Wiley.
- Miraliakbari A., Hahn M., and Engels J., 2010, “Development of a Low-Cost Sensor System for Use on Gyrocopters,” paper presented at *the ISPRS Commission I Mid-Term Symposium “Image Data Acquisition—Sensors & Platforms”*, Calgary, Canada.
- Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., and Breen B., 2016a, “Thermal Infrared Imaging of Geothermal Environments and by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A Case Study of the Wairakei–Tauhara Geothermal Field, Taupo, New Zealand,” *Renewable Energy*, 86, 1256-1264. doi:10.1016/j.renene.2015.09.042
- Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., and Breen B., 2016b, “Thermal Infrared Imaging of Geothermal Environments by UAV (Unmanned Aerial Vehicle),” *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(2), 136-145. doi:10.1139/juvs-2015-003
- Ruzgiene B., and Vainauskas V., 2000, “Investigation of Error Distribution of Aerial Triangulation Applying Surface Deformation Theory,” paper presented at *the XIX ISPRS Congress, Commission IV*, Amsterdam, The Netherlands.
- Skarlatos D., Procopiou E., Stavrou G., and Gregoriou M., 2013, “Accuracy Assessment of Minimum Control Points for UAV Photography and Georeferencing,” paper presented at *the International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment*, Paphos, Italy.
- Trimble, 2022, “Trimble BD-970 Datasheet,” <http://x9gps.com/bin/TrimbleBD970DataSheet.pdf> (accessed October 23, 2022).
- Tronin A. A., 2000, “Thermal IR Satellite Sensor Data Application for Earthquake Research in China,” *International Journal of Remote Sensing*, 21(16), 3169-3177. doi:10.1080/01431160050145054