

## 以四旋翼UAS酬載熱感測器取像製作 數值表面溫度模型

邱式鴻\* 謝耀震\*\*

論文收件日期：106年03月29日

論文修訂日期：106年12月10日

論文接受日期：106年12月28日

### 摘 要

熱感測器能感測可見光感測器無法取得的訊息，因此若能透過熱感測器進行環境監測，便能得到一般可見光感測器無法獲取的資料。本研究以四旋翼UAS酬載熱感測器得到局部區域地面高解析度之熱像並製作數值表面溫度模型（Digital Surface Temperature Model, DSTM）供環境監測之用。而一般環境監測區，如火山地區，不易布設控制點，因此本研究除於UAS上酬載熱感測器之外，並搭載GNSS接收模組，探討GNSS觀測量輔助熱像定位定向之可行性，研究以國立政治大學旁的指南溪為實驗區，使用AI-RIDER YJ-1000-HC四旋翼UAS酬載FLIR Tau 640熱感測器以及Trimble BD970 GNSS接收模組，透過GNSS動態後處理資料，取得取像時對應的GNSS觀測量，再搭配少量地面控制點執行光束法平差輔助熱像定位定向，過程中透過三焦張量約制剔除自動匹配之誤匹配連結點。實驗結果顯示，所產製之數值表面模型（Digital Surface Model, DSM）於不易變動區，經現有資料檢核均在 $\pm 1\text{m}$ 之間，產製出地面解析度11 cm的DSM與正射熱像，且正射熱像平面精度為47 cm。雖然DSM和正射熱像精度無法符合一般常規的測量規範，但成果仍可證明熱像直接產製DSM以及正射熱像之可行性，最後生成數值表面溫度模型的成果可供後續環境監測研究使用。

關鍵詞：三焦張量、光束法平差、定位定向、無人機系統、熱像

\* 通訊作者；副教授，政治大學地政學系，TEL：(02)29393091#51657，E-mail：chio0119@nccu.edu.tw。

\*\* 碩士，政治大學地政學系。

# Generation of Digital Surface Temperature Model from Images Collected by Thermal Sensor on Quadcopter UAS

Shih-Hong Chio\*, Yao-Chen Hsieh\*\*

## ABSTRACT

Thermal infrared camera can sense some important information that general optical digital cameras cannot do for the environment monitoring. In this study, the Quadcopter UAS for thermal image collection applied to environment monitoring was developed. FIIR Tau 640 thermal infrared sensor was used in this thermal image collection system. Additionally, Trimble BD970 GNSS OEM board was also carried on the Quadcopter UAS to collect dual-frequency GNSS observations for determining the flying trajectory by Post-processed kinematic (PPK) technique to support the positioning and orientating of collected thermal images by bundle adjustment. Meanwhile the trifocal tensor constraint was used to delete wrong matching tie images points before performing bundle adjustment for positioning and orientation of thermal images. The test area was located at Zhinan River nearby National ChengChi University, Taipei, Taiwan. From the test, the differences between produced DSM and existing DSM data were  $\pm 1$  m on stable ground surface. Both the resolution of produced DSM and thermal orthoimages were 11 cm and the accuracy of thermal orthoimages could reach 47 cm. The accuracy of thermal orthoimages might not comply with a normal surveying standard, but it proved the possibility of DSM and orthorectified thermal images generated from thermal images directly. Additionally, the produced Digital Surface Temperature Model (DSTM) could be used for environment monitoring in the future.

**Key words:** Trifocal Tensor, Bundle Adjustment, Positioning and Orientation, Unmanned Aircraft System (UAS), Thermal Images

---

\* Corresponding author, Associate Professor, Department of Land Economics, National ChengChi University, TEL: +886-2-29393091 #51657, E-mail: chio0119@nccu.edu.tw.

\*\* Master of Arts, Department of Land Economics, National ChengChi University.

## 一、前 言

隨著無人航空系統UAS (Unmanned Aircraft System) 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、紀錄而言，具有相當高的應用價值。而目前UAS主要分為定翼機與旋翼機，其中定翼機的飛行穩定性較佳，但必須維持一定的飛行速度以產生足夠的升力，且起降時需要一定的跑道長度或回收機制，在任務的執行上較受到環境與空間的限制，但若監測地區較空曠，則定翼式的UAS卻能提供品質較佳的影像（黃昭雄等，2005）；而旋翼機的機動性則較高，除不需跑道，可垂直起降，也可隨時改變飛行速度、修正飛行高度，且具備停懸能力（趙弘文，2009），若監測地區位於山區、或地表起伏變化較大的區域，能夠垂直起降的旋翼機則較合適。此外，目前UAS系統已可整合全球導航衛星系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）作為導航、定位之用，部分的UAS系統更安裝電子式的慣性導航系統（Inertial Navigation System, INS），搭配地面監控系統或晶片執行自動駕駛與拍照等功能，可同時記錄飛行時軌跡資料。因此，於小區域之環境監控，可藉由旋翼型UAS酬載熱感測器的方式，準確且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, DSM）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, DSTM）方式呈現，將提供環境監測另一重要之空間資訊。

國外以UAS酬載熱感測器（或稱熱像儀）蒐集熱像的實驗眾多，如Ambrosia et al. (2003) 於2003年即運用UAS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 et al. (2009) 提出使用直升機式UAS酬載便宜的熱感測器和多光譜感測器獲取遙測產品之方法。Miraliakbari et al. (2010) 的研究中，利用UAS酬載可見光相機及熱像儀，可見光相機為Canon EOS 350D，焦距為70 mm，以航高500 m取像；而熱像儀FLIR SC660，焦距為74 mm，以航高400 m取像。可見光相機及熱像儀皆經相機率定，獲得相機內方位及鏡頭畸變差參數。可見光影像經過嚴密空三平差處理程序後，可產生地面解析度為10 cm之正射影像，並將可見光影像與熱像之正射影像進行影像融合，提供判釋。而Hartmann et al. (2012) 以八旋翼UAS酬載焦距13 mm FLIR Tau 640熱像儀以航高38 m取得高重疊熱影像，經嚴密空三平差處理程序

後，產生地面解析度為5 cm之正射影像並產製DSTM，但其飛行高僅為38 m，且試驗區相當小。Řehák and Pavelka (2012) 使用UAS酬載熱像儀航取得垃圾堆積區之熱像，但並未進行任何處理。Brumana et al. (2013) 則以多旋翼UAS酬載非量測相機 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 et al. (2013) 用六旋翼UAS載熱像儀對義大利埃特納 (Mt. Etna) 火山西南處之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 et al. (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 m<sup>2</sup>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 et al. (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2週時間，收集紐西蘭Waikite地熱區2.2平方公里近6000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。

國內以UAS酬載熱像儀進行相關研究者，如廖家翎 (2014) 研究以UAS酬載熱像儀拍攝熱影像，再以純地面控制之空中三角測量光束法平差求其外方位元素，搭配率定得到的內方位元素和溫度灰階值經過標準化之後的熱影像，結合空載光達測量所獲取之DSM產製正射鑲嵌熱影像，其研究中DSM產製時間與熱像儀取像時間不同，且其地控測量需花費更多人力成本。而許翎依 (2014) 以VBS-RTK GNSS輔助單旋翼UAS熱影像定位定向之研究中，透過VBS-RTK GNSS的輔助，大大的降低對地控點的要求，且即使GNSS定位精度不佳，其解算空三之精度仍優於未以GNSS輔助之成果。Chio and Lin (2017) 則開發適用於台灣地區獲取火山地區熱像的四旋翼UAS取像設備，以克服高變異和極端環境條件的困難地形，採用XM6熱像機，並將Trimble BD970 GNSS接收器酬載於UAS上進行雙頻GNSS原始觀測量收集，之後使用動態後處理 (Post-processed kinematic, PPK) 技術求定飛行軌跡資料；並將其搭配少量地面控制點執行熱像的定位和定向；然後從完成定位定向的熱像，產生DSM和熱正射影像，以及DSTM，期待進一步用於台灣地區之火山地熱監測。

本研究與Chio and Lin (2017) 研究同樣使用四旋翼酬載GNSS接收雙頻資料並取得熱成像對應之GNSS觀測量執行輔助影像定位定向，但Chio and Lin (2017) 研

究中使用Pix4DMapper軟體直接產製熱正射影像，並未處理軟體自動匹配產生誤匹配之問題，因此本研究中選定不同實驗區，除以旋翼UAS酬載熱像儀航拍取像並以GNSS觀測量輔助熱像光束法空三平差進行熱像定位定向之外，亦探討誤匹配點之問題；此外，由於本研究所使用的FLIR Tau 640熱像儀與Chio and Lin（2017）所酬載之XM6熱像儀不同，因此研究過程中亦將探討取像之問題；最後，Chio and Lin（2017）研究中所酬載之XM6熱像儀，能將記錄的資料轉換成真正的溫度值，然而本研究中使用之FLIR Tau 640熱像儀僅能以影像灰階（0~255）顯示溫度資訊，原廠亦不提供所記錄影像灰階值轉換真正溫度值之轉換公式，因此本研究中，開發顯示或查詢以影像灰階（0~255）顯示溫度資訊之系統。

綜合上述，本研究具體研究目的如下：一、以旋翼UAS酬載熱像儀航拍取像並以GNSS輔助熱像光束法空三平差進行熱像定位定向。二、以定位定向的熱像產製DSM，並製作正射熱影像。三、將正射熱像和產製之DSM套疊製作DSTM供後續應用。

## 二、研究方法

首先將圖1所示的BD970 GNSS接收板與ANTCOM GNSS天線G5（簡稱BD970）以及圖2所示的熱像儀FLIR Tau 640酬載於AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAS（圖3），此多旋翼UAS性能規格如表1所列，於載重2,500 g時可至多飛行20分鐘，適合小範圍的拍攝任務，且裝設慣性導航單元（Inertial Measurement Unit, IMU）可記錄飛行時載具之姿態參數，更新頻率為100Hz。

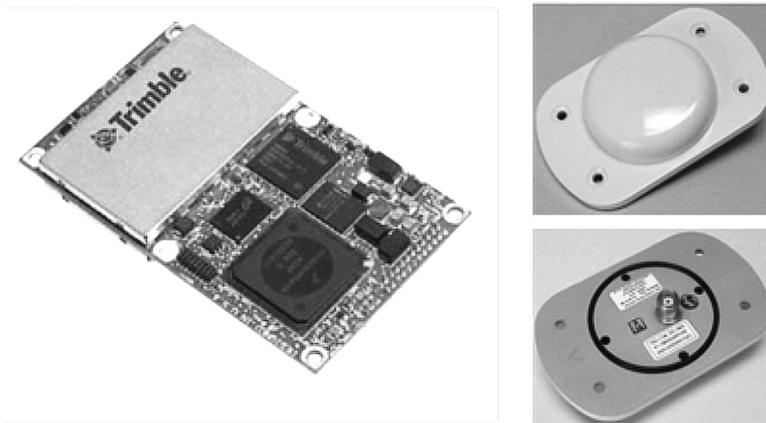


圖1 Trimble BD970 GNSS OEM接收模組及天線（Chio and Lin, 2017）



圖2 FLIR Tau 640熱像儀 (© FLIR® Systems, Inc.)



(a) 無人機AI-RIDER © 2017



(b) 控制器AI-RIDER © 2017



(c) 地面監控站AI-RIDER © 2017

圖3 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAS (<http://www.ai-rider.com/>)

表1 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAS特性 (<http://www.ai-rider.com/>)

載具淨重：5,500 g (含電池)	飛行輔助系統：AAHRS, DPH, DFC
最大載重：2,500 g	
GNSS定位精度：< 2.5 m CEP	
軸距尺寸：100 cm	可抗穩定風速 < 12 m/sec
機身材質：碳纖維	可抗瞬間風速 < 18 m/sec
飛行時間：21~43分	動態位置與高度可自主保持
飛行半徑：< 750 m	

由於熱像儀FLIR Tau 640須配合錄影卡於航拍時錄製熱像供後續處理，而受限於多旋翼UAS之酬載能力，本研究選擇H.264 MINI DVR（Digital Video Recorder）錄影卡（見圖4）安裝於UAS上錄製熱像。該MINI DVR透過SD Card為儲存媒體搭配H.264的影像壓縮格式及每秒30像幅數，可有效減輕取像設備之重量。



圖4 H.264 MINI DVR錄影卡

完成上述設備酬載之後，研究方法如下：

#### （一）FLIR Tau 640 熱像儀率定

FLIR Tau 640熱像儀為非量測型數位相機，須先經幾何率定求得相機參數。本研究採野外率定場法（field method）並使用iWitnessPro軟體率定熱像儀，場址選在國立政治大學體育館旁，具有10 m明顯地形高差的空曠處，如圖5所示。

使用熱像儀的焦距為25 mm，經計算後，航拍高度60 m時，成像公式中的物距倒數值幾乎為零，使得像距等於焦距，因此本研究以60 m的拍攝高度及其拍攝時所涵蓋之地面範圍設計率定場。此外，參考iWitnessPro軟體手冊及考慮光線交會，設計拍攝時以率定場中心點為圓心、40 m為半徑，以航高60 m繞圓心的方式，分別在8個位置（見圖5黃色八邊形之交角處）對地面率定場航拍取像，最後回到圖5中白色圓心正上方高度60 m處取像。位於圖5黃色八邊形之下方交角處航拍位置朝率定場航拍，涵蓋地面範圍如綠色梯形所示，而8個航拍位置所拍攝之8張影像所涵蓋地面八塊梯形重疊範圍形成藍色八邊形涵蓋範圍，由此範圍和白色圓心正上方60 m航拍範圍，設計出率定場為21 m×26 m（見圖5粉紅色四邊形），並均勻布設32個率定標供率定使用。



圖5 熱像儀率定場設計說明圖

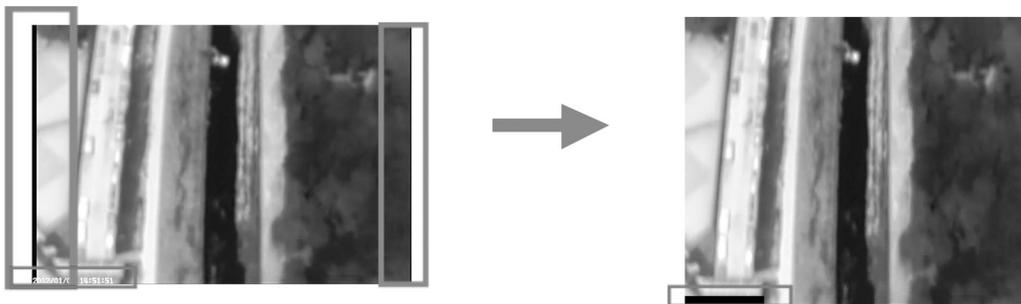
率定標材質選用，需考慮受熱之後能與背景能顯示溫差，並足以辨識率定標。由於鋁在大氣中對熱輻射的反射高達90%，其吸收率較低，因此鋁在熱影像呈現黑色（Ostermann, 2007）。因此本研究使用鋁材質設計率定標，圖6即為本研究使用之熱率定標，約為60 cm×60 cm；為使率定標中心點更易辨識，將率定標四等分並將左上和右下等分（約15 cm×15 cm）用厚紙板黏貼。航高60 m設計率定場時，熱像儀每個像元尺寸為17  $\mu\text{m}$ ，垂直拍攝時，每像元對應之地面解析度約4 cm，因此圖5中，右上和左下鋁材質的邊成像之後約4像元，能清楚呈現並辨識之。



圖6 設計之熱率定標（Chio and Lin, 2017）

將多旋翼UAS酬載熱像儀於九個設計之航高位置向率定場中心錄影之後，擷取九張交會幾何良好的熱影像，於iWitnessPro軟體中，量測均勻布設率定標的像坐標，執行熱像儀的相機參數率定。率定之成果，以全測站量測兩測回之平均距離取得實測距離，將實測距離與率定熱影像中所量之距離，計算均方根誤差RMSE評估率定之成果。

由於本研究以H.264 MINI DVR錄影卡錄影記錄熱影像，根據ITU-R BT.601，錄影時長寬的取樣比例並非1:1，原本的640 pixels會乘上1.1倍變為702 pixels，並在左右兩側各補8行無資料像點，因此錄影卡所儲存之片幅大小變為720 pixels×480 pixels。此大小和熱像儀CCD大小（640 pixels×480 pixels）不符，又加上影像左下角留有時間標記也會影響後續處理，必須先進行影像前處理。因此本研究使用Photoshop設定巨集將其裁切和重新取樣進行影像前處理，將左右兩側8行無資料留空像元（見圖7（a）紅色框標示處）和標示時間的影像區（見圖7（a）藍色框標示處）進行處理後得到後續使用之影像（見圖7（b））。之後實驗所用之熱像都會先經過此前處理後再進行後續研究。



(a) 720 pixels 480 pixels

(b) 640 pixels 480 pixels

圖7 熱像前處理後之比較

## （二）試驗區選擇、航線規劃與控制點布設及測量

本研究選擇政治大學指南溪為實驗區進行測試。航線規劃依據實驗區地形設計航線和航高，以能涵蓋實驗區為主並顧及地面解析度，由於熱像片幅相較於一般可見光影像來的小，研究所用熱像儀像幅僅有480 pixels 640 pixels，為此本研究採拍攝影像高重疊率的方式（前後重疊約80%、側向重疊約40%）規劃航點，以避免因旋翼機晃動而導致漏拍的情形。而為保證取像成功，在每個設計之航點均使四旋翼UAS停留約五秒執行錄影取像。

熱像儀像幅480 pixels 640 pixels，像元尺寸為17  $\mu\text{m}$ ，焦距為25 mm。因此在能涵蓋實驗區並顧及地面解析度設計航高，及計算每幅熱像地面涵蓋範圍，並由此規劃錄影取像之航向和航點。此外，於航帶頭尾布設四個全控點之外，並設法布設至少五個檢核點。至於控制點之測量方式則依據「數值法地籍圖重測作業手冊」所規定之RTK辦理圖根測量方法施測。

熱像控制標之設計尺寸與材質考量與率定標相同，材質使用鋁。並由所設計航高決定像元地面解析度，進而設計控制點實地布設之最小尺寸。

### (三) 航拍取像

航拍時採用MINI DVR錄製擷取熱影像，原因如前所述；欲達成GNSS輔助熱像定位定向之目標，因此，於實驗區附近選取一控制點當基站擺設衛星定位接收儀接收GNSS雙頻觀測量、並搭配UAS上酬載BD970所接收的GNSS雙頻觀測量進行PPK後處理解算精確飛行軌跡供後續使用。BD970 GNSS接收模組觀測量接收速率最多可達50 Hz，且因多旋翼UAS飛行速度較定翼UAS更慢，因此為滿足實驗需求，將資料接收速率設定為10 Hz，即每秒接收10筆雙頻載波相位觀測量。此外，基站接收速率為搭配UAS上BD970 GNSS接收速率，亦設定為10 Hz。

### (四) 資料前處理

航拍錄影取像之後，與熱像儀率定作業相同，須將實驗區以DVR錄影所記錄之熱像，經過相同之處理（見圖7），並擷取前後重疊80%、側向重疊40%之熱像供後續處理。

接著，分別將UAS上BD970和主站接收之10 Hz雙頻GNSS載波相位觀測資料下載進行PPK動態後處理解算飛行軌跡資料。由於所使用熱像是以錄像的方式取像，而錄影時間和解算後GNSS觀測量記錄的時間有一系統差，因此無法精確用時間對應取得熱像時的GNSS觀測量。但因此本研究於航拍時，為保證取像成功，在每個設計之航點均使四旋翼UAS停留約五秒。因此，透過分析其位移趨勢，取每段時間間隔內軌跡點明顯聚集之平均數作為該熱像對應之GNSS觀測量，用於光束法空三平差執行GNSS輔助熱像定位定向。



## 2. DSM製作與正射熱影像

完成熱像定位定向後，以ERDAS IMAGINE Photogrammetry 2015模組下的eATE功能設定DSM匹配策略與參數自動產生DSM，適度編修後製作每一像對對應的正射熱影像，製作此正射熱像時，先於ERDAS Image Photogrammetry 2015模組下的Ortho Resampling功能設定網格大小（Output Cell Sizes），如0.5 m。之後，於Mosaic Pro功能下執行熱影像之正射鑲嵌。

## 3. DSTM數值表面溫度模型製作

將所產製的DSM和正射鑲嵌熱像以Arc GIS展示，製成DSTM數值表面溫度模型。另透過全圖層檢索可以獲得任一點上的資訊；亦即在正射鑲嵌影像上，點選任一點，即可得知該點之平面坐標，再由DSM圖層得知該點的高程資訊，最後透過共線式即可顯示該點於原始熱像中以影像灰階值（0~255）表示的溫度資訊，但須注意的是，如前所述此並非真正之溫度值。

### （六）成果評估

本研究以RTK GPS實測地面檢核點，由其均方根誤差RMSE評估熱像空三平差以及正射糾正鑲嵌的精度。並以無人機影像所拍攝可見光影像執行空三製作DSM，檢核由完成定位定向熱像匹配產製的DSM成果。

## 三、成果與討論

本研究試驗區如圖8所示。

### （一）熱像儀率定

本研究於野外率定場環拍獲取九張相片，如下圖9。再於iWitness Pro軟體中以人工點選的方式量測率定標之位置並計算出相機參數（表2），為檢核率定成果，實地以全測站觀測9段距離兩測回並取平均值，再將其中最長之距離用來設定模型比例尺之用（見圖10），其餘8段距離作為檢核，檢核成果為每段距離較差值均在30 cm以內，其RMSE為22 cm。若以實驗場設計在航高60 m時，GSD應為4 cm，約為5像元，此乃熱像之影像品質不佳，導致在人工點選率定標方面無法十分精確所造成；因本實驗之成果著重於環境監測使用，而非測量製圖，因此此率定結果對於後續應用已足以使用。



圖8 政治大學指南溪試驗區

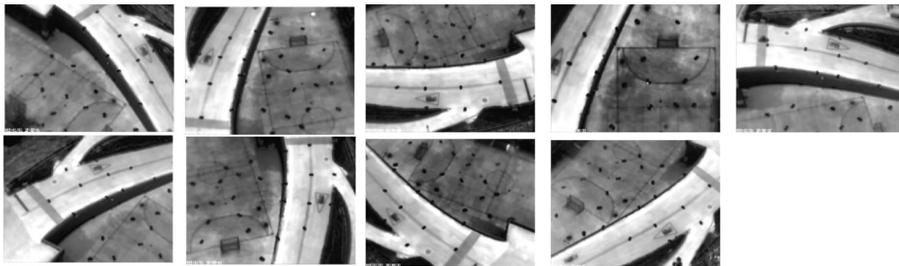


圖9 野外率定場所使用的9張率定場影像

表2 熱像儀野外率定場率定成果

焦距	24.9698 mm
像主點偏移量 (x0, y0)	(0.2849 mm, 0.1316 mm)
輻射畸變差 K1	-7.1503e-004
輻射畸變差 K2	6.9475e-005
輻射畸變差 K3	-1.2382e-006
離心畸變差 P1	-1.1397e-004
離心畸變差 P2	2.5136e-005

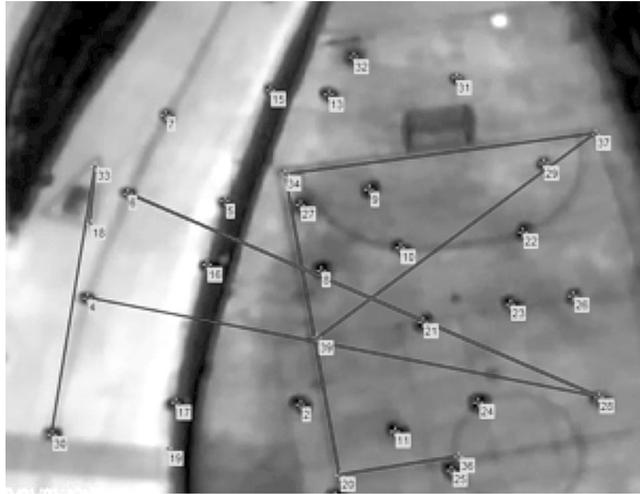


圖10 實地觀測距離示意圖，紫色線段作為設定模型比例尺之用

## (二) 規劃與取像

本研究試驗區如圖8所示，以地面解析度10 cm為設計條件，航拍航高應為150 m，為涵蓋實驗區，共設計兩條前後重疊約80%、側向重疊約40%之航帶，圖11紅點顯示規劃之航點。根據千分之一地形圖測繪規範，中心標在影像上尺寸應介於2至4個像素 (pixel) 之間，本次設計之控制標實地布設尺寸為60 cm×60 cm，可清楚顯示。而航帶頭尾布設四個全控點之外，在實驗區內均勻布設五個檢核點。控制點和檢核點分布如圖11。錄像時間為2015年6月。



圖11 規劃之航點、控制點（深藍）與檢核點（淡藍）分佈圖

### (三) 資料前處理結果與分析

如前所述，本次計畫以DVR錄影記錄熱影像，由於所採用之熱影像設備Tau 640解析度為640 pixels480 pixels，故錄影解析度搭配熱影像解析採用VGA（720 pixels480 pixels）模式，對應之錄影每秒像幅數為30，必須把影片中的每個frame擷取出來，選取重疊率須滿足前後重疊80%、側向重疊40%的熱影像供後續處理。此外，亦須如熱像儀率定時的處理相同，將左右留空像元和時間軸標誌進行處理後得到可後續使用之影像。航拍錄像最後取得兩條航帶共85張熱像地面涵蓋如圖12所示。

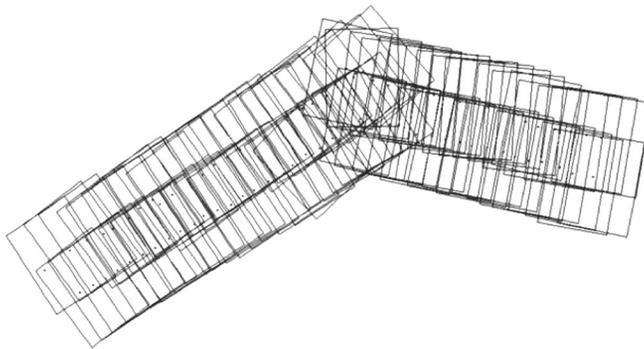


圖12 實驗區使用之熱影地面涵蓋示意圖

航拍取像之後將UAS上BD970和主站接收之10Hz雙頻GNSS載波相位觀測資料下載進行PPK動態後處理解算飛行軌跡成果，其X、Y坐標方向精準度約為1 cm，高程精度約為2 cm，圖13顯示計算之部分成果。

date	time	X	Y	Z	STD_X	STD_Y	STD_Z
2015/6/10	55:49.6	308135.5	2764240.503	209.294	0.0074	0.0068	0.0182
2015/6/10	55:49.7	308135.49	2764240.526	209.27	0.009	0.0082	0.0221
2015/6/10	55:49.8	308135.47	2764240.535	209.267	0.0106	0.0096	0.026
2015/6/10	55:49.9	308135.45	2764240.54	209.225	0.0102	0.0093	0.025
2015/6/10	55:50.0	308135.42	2764240.549	209.199	0.0087	0.0079	0.0213
2015/6/10	55:50.1	308135.38	2764240.552	209.171	0.0075	0.0069	0.0186
2015/6/10	55:50.2	308135.35	2764240.554	209.112	0.009	0.0082	0.0222
2015/6/10	55:50.3	308135.31	2764240.553	209.044	0.0092	0.0084	0.0226
2015/6/10	55:50.4	308135.27	2764240.55	209.012	0.0084	0.0077	0.0207
2015/6/10	55:50.5	308135.24	2764240.551	208.945	0.0097	0.0088	0.0238
2015/6/10	55:50.6	308135.19	2764240.544	208.92	0.0079	0.0072	0.0193
2015/6/10	55:50.7	308135.16	2764240.54	208.88	0.0094	0.0086	0.0232
2015/6/10	55:50.8	308135.12	2764240.535	208.827	0.0091	0.0083	0.0223
2015/6/10	55:50.9	308135.09	2764240.522	208.795	0.0093	0.0085	0.0229
2015/6/10	55:51.0	308135.07	2764240.521	208.736	0.0087	0.008	0.0215
2015/6/10	55:51.1	308135.05	2764240.513	208.68	0.0083	0.0076	0.0204

圖13 PPK動態後處理部分成果展示

將飛行軌跡展點檢視，發現飛行軌跡有規律之位移趨勢，每隔一定之間隔，飛行軌跡便會於一位置盤旋3~5秒，即為航線規劃時所設計的UAS停旋航點位置。進一步分析，發現在趨勢集中的兩秒區間中，UAS軌跡與此兩秒內之均值X、Y差量約為3 cm，而高程則在50 cm之間。

由上述觀察結果，撰寫程式擷取出85張影像的GNSS觀測量，由於觀測量為一秒十筆，因此本研究將於兩秒集中之區間中再取最集中之一秒的區間，共十筆資料的均值作為對應該熱像透視中心之GNSS觀測量，並求出此十筆觀測量均值之標準差，分布圖如下圖14，而85筆GNSS觀測量在X、Y、Z方向標準標均值為8 cm、6 cm以及7 cm，代表觀測量的中誤差。

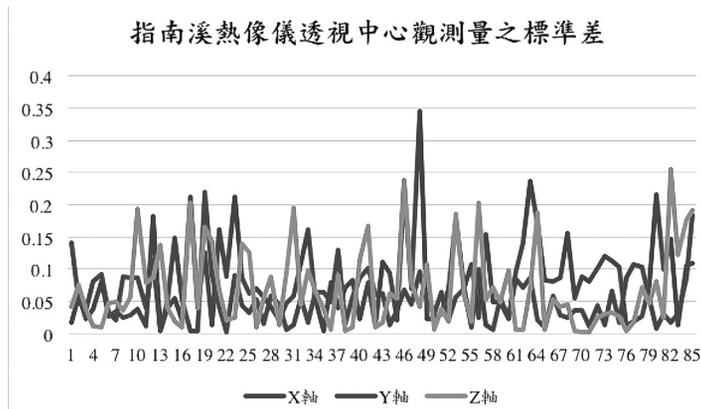


圖14 各熱像透視中心每十筆GNSS觀測量均值之標準差

接著，將取得對應熱像之GNSS觀測量資料透過IMU所記錄的姿態參數歸算至相機透視中心，UAS上之GNSS天線中心、IMU中心、和透視中心關係如圖15。

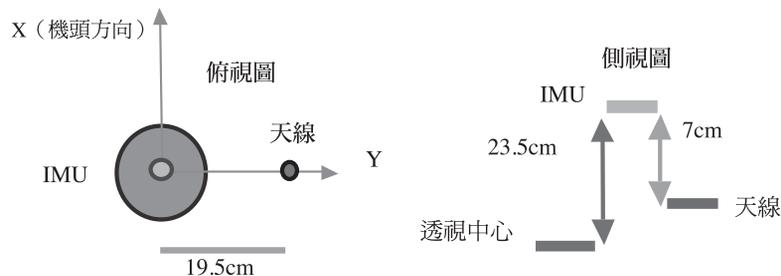


圖15 UAS上衛星接收天線中心（紅色）與IMU中心（綠色）及透視中心之相對關係（Chio and Lin, 2017）

由上圖可看出機頭方向為IMU之X軸正向，天線位置剛好位於IMU正Y軸上，而IMU之Z軸方向向下為正，因此可透過此相對關係設立IMU坐標系，再透過其所記錄之姿態參數將GNSS觀測量歸算至IMU中心。裝設於UAS上的雲台有自動補償的特性，能確保相機不會隨風而晃動，因此只要將GNSS觀測量歸算至IMU中心後再減去Z方向的值（23.5 cm）即能歸算至相機透視中心。

#### （四）DSTM 數值表面溫度模型製作

製作實驗區DSTM數值表面溫度模型程序是先以GNSS輔助熱影像空中三角測量求熱像之外方位、以熱像製作DSM、及熱正射影像，結合DSM及熱正射影像製作DSTM，以下分述研究程序：

##### 1. GNSS輔助影像空中三角測量

GNSS輔助影像空中三角測量時需使用資料包含GNSS觀測量、控制點和控制點以及連結點之影像坐標。如前所述，研究中使用商用軟體Pix4Dmapper匹配連結點，仍存在誤匹配點。如圖16即是將Pix4Dmapper自動空三平差解算出內外方位參數與其連接點地面坐標成果匯入ORIMA展示，明顯看出位於熱像涵蓋範圍外存在許多錯誤點，亦即顯示由誤匹配連結點所造成，因此Pix4Dmapper之自動空三平差結果，見圖17，其成果在X、Y、Z三方向RMSE分別約40 cm、78 cm、127 cm，尤其是高程方向誤差高達1 m多。

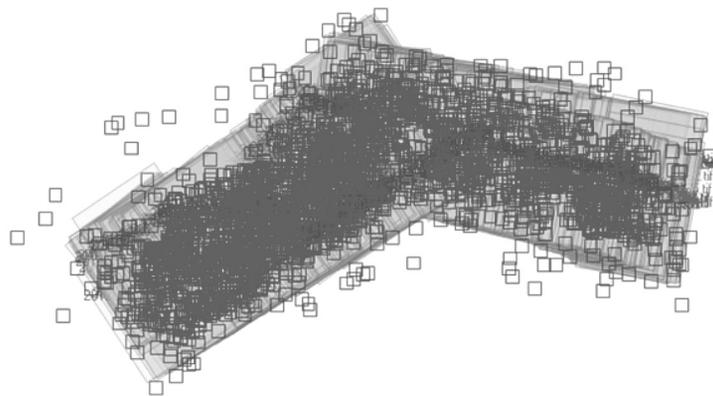


圖 16 以Pix4Dmapper匹配之連接點存在誤匹配點之示意圖

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
6 (3D)	0.020/0.020	-0.011	-0.058	-0.340	0.031	5 / 5
9 (3D)	0.020/0.020	-0.046	0.014	-0.107	0.600	2 / 2
10 (3D)	0.020/0.020	0.004	0.002	-0.103	0.637	3 / 3
13 (3D)	0.020/0.020	0.013	0.019	-0.067	0.320	3 / 3
<b>Mean [m]</b>		-0.010088	-0.005971	-0.154214		
<b>Sigma [m]</b>		0.022702	0.030935	0.108129		
<b>RMS Error [m]</b>		0.024843	0.031506	0.188345		

0 out of 5 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1	0.0200/0.0200	-0.4749	-1.1810	0.0593	0.8383	6 / 6
5	0.0200/0.0200	-0.4557	-0.2359	-1.2703	0.7965	4 / 4
7	0.0200/0.0200	-0.5882	-0.9954	-1.6638	0.4570	10 / 10
8	0.0200/0.0200	-0.0637	-0.5004	-0.9318	0.5037	11 / 11
11	0.0200/0.0200	-0.3097	-0.6180	-1.7020	0.6876	5 / 5
<b>Mean [m]</b>		-0.378433	-0.706147	-1.101715		
<b>Sigma [m]</b>		0.180580	0.340693	0.645220		
<b>RMS Error [m]</b>		0.419310	0.784038	1.276748		

圖 17 Pix4Dmapper自動光束法平差解算成果

因連結點仍存在誤匹配點，本研究以RANSAC執行三焦張量解算並剔除誤匹配點，在信心水準95%，並假定Pix4Dmapper匹配出的連結點有60%是對的，解三焦張量。而為使剔除之後的連結點能有最少的誤匹配點出現，本研究將RANSAC中判斷是否正確對應點之門檻值設為次像元8.5 μm（約0.5像元）。

本研究使用兩組資料評估三焦張量之效益；一組資料為將Pix4Dmapper解算之像點帶入軟體ORIMA進行空三平差後之像點數，另一組為經由三焦張量將Pix4Dmapper誤匹配點剔除後之像點數。Pix4Dmapper解算之像點帶入軟體ORIMA完成空三平差後之像點數，視為已無誤匹配點的存在，以此作為基準值可進行分析比較。

成果顯示Pix4Dmapper解算之像點為14235個，而將其匯入軟體ORIMA完成空三平差後剩下10968個；將Pix4Dmapper解算之14235個像點，經由三焦張量模式以RANSAC除錯後剩下7372個，其中有5047個像點與10968個像點資料是相同的，也就是說三焦張量剔除誤匹配點後，其像點正確率約68.5%。由於本研究僅以同一條航帶之鄰近三張影像解算三焦張量並剔除誤匹配點，並未考慮相鄰航帶間之鄰近影像，因此才會仍有誤匹配點存在。

完成誤匹配點分析之後，接著以Pix4Dmapper所計算出來的外方位參數作為初始值，並將經三焦張量以RANSAC模式除錯後的像點匯入ERDAS IMAGINE Photogrammetry 2015的外掛平差軟體ORIMA進行空間前方交會後發現仍有不正確的地物點分佈於航帶涵蓋之範圍外，如圖18。因此再將匯入ORIMA之連結點再次除錯完成空三平差，如此可視為已無誤匹配點，並用此成果加入不同的GNSS觀測量探討不同的GNSS觀測量對整體空三平差結果的影響。

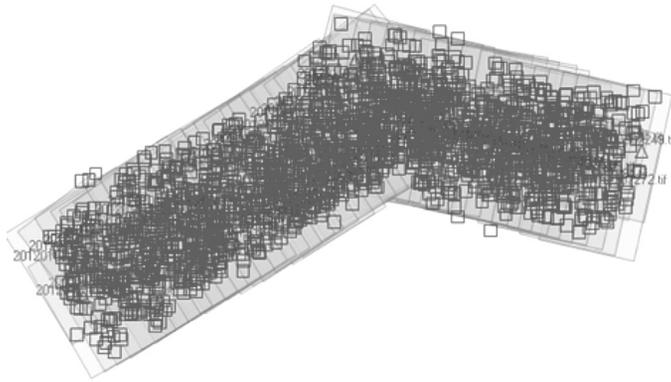


圖18 經三焦張量約制除錯後連接點仍存在誤匹配點之示意圖

探討不同GNSS觀測量輔助空三平差精度時，將以頭尾純四點地控、UAS本身之單頻GNSS觀測量（稱FCS觀測量）輔助、歸算前以及歸算至熱像透視中心的GNSS觀測量輔助空三平差四種成果之比較。空三平差時各觀測量精度設定分別是地控點之X、Y、Z方向精度均設為5 cm；FCS觀測量於X、Y、Z方向精度均設定為5 m、歸算前GNSS觀測量於X、Y方向精度設為0.25 m，Z方向精度設為0.35 m；歸算至熱像透視中心，X、Y方向精度設為0.06 m，Z方向精度設為0.1 m，四組空三平差之成果如表3所示。

表3 實驗區四種空三平差成果比較

方法名	純地控	FCS觀測量 輔助	歸算前GNSS 觀測量補助	歸算後GNSS 觀測量補助
RMSE				
X (m)	0.20	0.37	0.16	0.11
Y (m)	0.37	1.25	0.20	0.24
Z (m)	7.83	8.64	0.63	0.58
平面精度 (m)	0.42	1.30	0.26	0.26

由上表3可看出平面與高程精度之趨勢皆為FCS觀測量輔助最差、純地控次差、歸算前GNSS觀測量輔助與歸算後GNSS觀測量輔助空三平差之精度最佳且相似，除了FCS觀測量輔助之平面精度外，其他三種方式之成果皆優於Pix4Dmapper得到之0.88 m平面精度（見圖17）。由於純地控之高程精度相當差，進一步探討可發現，位於實驗區中間的檢核點高程較差均較大，如下圖19所示，此因實驗區屬於帶狀狹長區域且只有頭尾各兩個地控點，容易造成中央區域扭曲變形所造成。

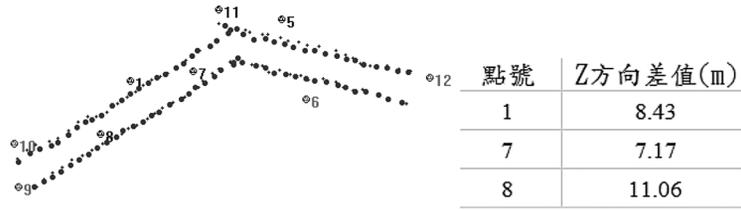


圖19 純地控檢核點分布及高程較差值

接著探討歸算前後GNSS觀測量輔助空三平差之結果僅有些微差別的原因，理論上歸算後GNSS觀測量輔助空三平差精度應優於歸算前，但所得之結果卻並非如此，因此先對GNSS觀測量之權重進行探討，看是否因給權不當所造成。透過動態後處理所求得之GNSS觀測量精度在X、Y、Z三方向精度分別約為3 cm、3 cm、5 cm，因GNSS天線與相機透視中心存在一偏移量，實際以鋼捲尺量測之距離約為32 cm，因此將歸算前之GNSS觀測量X、Y、Z三方向精度分別設為26 cm、26 cm、35 cm。而由於UAS上所裝載之IMU精度不高，因此將歸算後之X、Y、Z三方向精度除分別設為3 cm、3 cm、5 cm之外，亦另設6 cm、6 cm以及10 cm以及26 cm、26 cm、35 cm共三組輔助空三平差。GNSS觀測量歸算前後共四組不同精度設定之輔助空三平差成果如表4所示。

表4 GNSS觀測量歸算前後不同精度設定之空三平差成果之比較

方法名 軸向分量	歸算前 (26,26,35) cm	歸算後 (3,3,5) cm	歸算後 (6,6,10) cm	歸算後 (26,26,35) cm
X (m)	0.16	0.10	0.11	0.17
Y (m)	0.20	0.27	0.24	0.20
Z (m)	0.63	0.54	0.59	0.69
平面精度 (m)	0.26	0.28	0.26	0.26

由上表4可看出歸算後的GNSS觀測量帶入不同精度給權所得輔助空三平差結果與歸算前差異不大，平面精度都約在26 cm上下，高程精度則在60 cm上下。由此成果可說明權重並不是影響歸算後成果不如預期的主因，推論成果之所以不如預期或許是由於影像品質以及獲取GNSS觀測量之方式所造成的。

## 2. DSM製作與正射鑲嵌熱影像

完成空三平差後的成果繼續使用ERDAS IMAGINE Photogrammetry 2015生成密點雲接著產製DSM以及正射鑲嵌熱影像，成果如圖20與圖21所示。DSM與正射熱影像之網格大小皆為11 cm。



圖20 指南溪熱像所產製之DSM

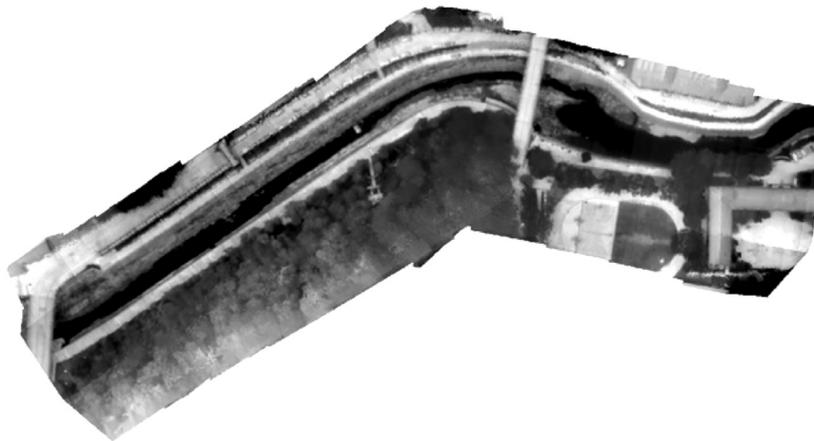


圖21 指南溪熱像所產製之正射鑲嵌熱影像

接著，本研究以2014年8月無人機航拍取得之指南溪可見光影像所產製之DSM執行熱影像產製之DSM檢核，Minus為ArcGIS中的網格分析工具，其能將兩DSM相減（可見光影像產製DSM減熱影像產製之DSM）得高程較差，如此便能進一步分析熱影像產製之DSM整體高程的精度，藉此補足檢核點選取困難的問題。

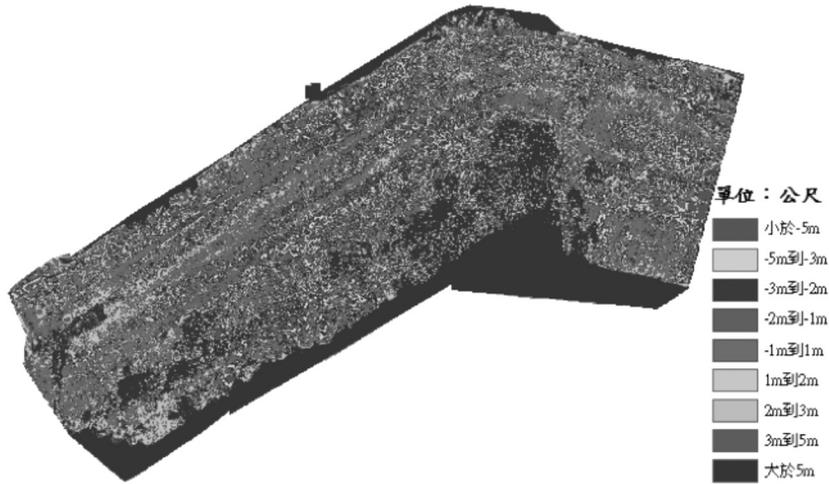


圖22 可見光影像與熱影像產製DSM相減較差顯示

由上圖22可看出主要實驗區較差都位在5 m的區間內，中間部分幾乎是藍色、黃色以及淺綠色交雜，推論應是未將DSM平滑處理與人為修改導致此結果。進一步量化如下表5所示，可看出較差於1 m的佔23.93%，而3 m佔57.06%，而位於南邊山區部分因屬測區邊緣，其高程較差較大，大於5 m的較差大多來自該區域。而圖23中不易變動區域的河堤和道路面，較差則是在1 m間。

接著使用RTK GPS量測地物點作為檢核點檢核正射影像精度，點位分佈如下圖24。由下表6檢核成果可看出除了較靠近邊緣的3號點以外，其餘檢核點位皆在30 cm左右，平面精度為47 cm。

### 3. 數值表面溫度模型製作

將上述（2）步驟所產製的DSM和正射熱影像同時展示在Arc GIS上即會自動套疊，製成數值表面溫度模型。以滑鼠游標在影像上移動至欲查詢點位（圖25左下方之紅點），則可獲取該點位之地面坐標資訊（圖中紅色框處），而由於熱像儀TAU 640無法輸出真實溫度值，因此以原始影像灰階值（圖中綠色框處）展示溫度資訊。

表5 可見光影像與熱影像產製之DSM相減較差量化表

區間名稱	網格數量 (個)	百分比
小於-5 m	116615	4.50%
-5 m到-3 m	182327	7.04%
-3 m到-2 m	205815	7.94%
-2 m到-1 m	314433	12.13%
-1 m到1 m	620025	23.93%
1 m到2 m	196533	7.58%
2 m到3 m	141701	5.47%
3 m到5 m	182920	7.06%
大於5 m	630971	24.35%
總數	2591340	100.00%

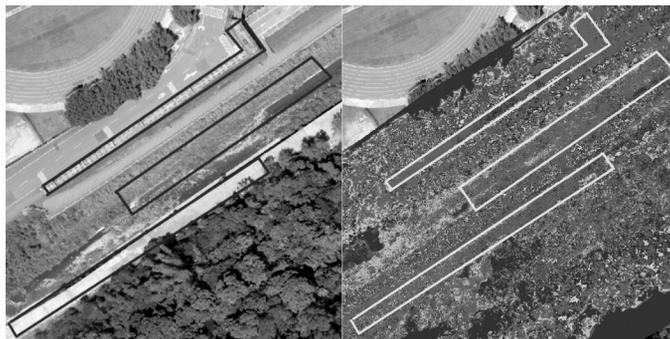


圖23 指南溪不易變動區可見光影像與熱影像產製DSM相減較差顯示圖  
(框線處)



圖24 指南溪正射熱影像檢核點分布圖

表6 指南溪正射熱影精度檢核

點號	X方向較差 (m)	Y方向較差 (m)	位置較差 (m)
1	0.05	-0.42	0.42
2	0.03	-0.23	0.24
3	-0.13	0.83	0.84
4	-0.21	0.08	0.22
5	-0.20	0.23	0.31
RMSE	0.15	0.44	0.47

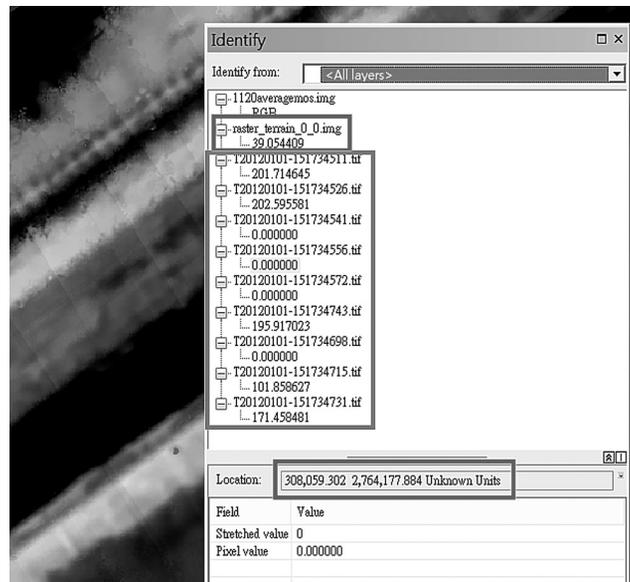


圖25 指南溪DSTM於ArcGIS展示示意圖

由此展示可知紅點地物點之三維坐標為（308,059.302 m、2,764,177.884 m、39.054 m），此紅點顯示在某些影像上的溫度灰階值為0，乃因該影像並無此地面位置之感應溫度資訊，而在五張影像有感應的溫度灰階值中，仍有幾張之灰階值明顯與其他張影像有所差異，此可視為錯誤或雜訊。

## 四、結論與建議

熱像儀進行環境監測，能得到一般可見光感測器無法獲取的資料。本研究以四旋翼UAS酬載熱像儀得到局部區域高解析度之地面熱像資訊作為環境監測使用。而一般環境監測區（如火山地區），不易布設控制點，因此本研究除於UAS上酬載熱像儀之外，並同時搭載Trimble BD970 GNSS接收模組，嘗試以少量地面控制點、以及GNSS動態後處理的方式取得取像時對應的GNSS觀測量輔助熱像定位定向，並製作高地面解析度的數值表面溫度模型（DSTM），供後續環境監測研究使用。依據實驗成果，分別依研究流程得到下列結論：

### （一）資料前處理

TAU 640熱像儀經野外率定場率定求得相機參數，以地面實測距離執行檢核，距離較差均在30 cm以內。而以此率定結果用於後續實驗顯示，產生之DSM於不易變動區域精度在 $\pm 1$  m之間，精度雖不高，但產製之正射熱影像精度約0.5 m已足以供後續環境監測使用。

因熱像儀設備限制，採錄像取像，其截取之影像經由Adobe Photoshop設定之巨集重新取樣至與CCD感應之相同熱像影像解析度，其錄像雖經由錄影卡輸出且經過影像壓縮，但實驗成果顯示，此處理方式仍足以產製供後續環境監測使用的正射熱影像。

### （二）誤匹配點剔除與 GNSS 輔助空三

由於熱像為熱成像，其成像品質較可見光影像差，導致不易執行影像匹配，但透過特徵式匹配能匹配出較多的連接點，但仍存在諸多誤匹配點，而本研究使用三焦張量約制可剔除大多數之誤匹配點，其正確率為68%；使用三焦張量約制仍存在誤匹配點之原因，推論是因僅考慮連續編號之相鄰三張影像間的三焦張量關係，並未納入相鄰航帶間與非相鄰但重疊率足夠之三張影像關係所導致。

本研究在四旋翼UAS上搭載Trimble BD970之衛星接收模組，在實驗區附近架設衛星基站，以PPK動態後處理方式成功解算出UAS之精密度為公分級的飛行軌跡。雖然因記錄取像之時間只到整數秒，導致影響後續空三平差之成果；但成果仍足以證明若於不易布設地面控制點之區域，以GNSS輔助空三能達到提升空三精度，其中以將GNSS歸算至透視中心之成果最佳，X、Y、Z方向RMSE分別為11 cm、24 cm、59 cm，相當平面精度為26 cm，高程精度為59 cm。

### (三) 成果產製

實驗區的DSM以及正射影像皆直接經由熱像產製，兩成果地面解析度皆為11 cm。DSM資料透過UAS航拍可見光影像所製成之DSM資料檢核，顯示實驗區不易變動區域之較差約為 $\pm 1$  m之間。正射熱影像以RTK GPS量測檢核，其檢核成果平面精度約47 cm。產製的DSM與正射影像精度無法符合一般常規的測量規範，但成果仍可證明熱影像直接產製DSM以及正射影像之可行性，雖TAU 640熱像儀因儀器輸出限制無法產生呈現真正溫度之數值表面溫度模型，但以影像灰階（0~255）顯示的溫度資訊仍可供後續環境監測使用。

本研究除上述結論之外，同時提出以下三點建議：

- (一) 本研究顯示考慮三張連續影像之三焦張量約制確實能將大部分之誤匹配點剔除，但正確率為68%。後續若能同時考量相鄰航帶與非相鄰但重疊率足夠之三張影像的三焦張量關係，應能更有效提高三焦張量剔除誤匹配點的能力。
- (二) 由於本實驗取像時間之最小單位僅至整數秒，後續整個實驗結果皆受到其影響，因此若能配合GNSS觀測量的擷取頻率，將取像記錄時間最小單位與GNSS觀測量記錄的時間最小單位一致，相信能精確取得取像時對應的GNSS觀測量，提升GNSS輔助空三精度。
- (三) 本研究僅由原始影像的灰階值0~255顯示溫度資訊，無法得知其與真實溫度之轉換關係，亦未對其進行溫度校正，此待後續研究。若能得知其與真實溫度之轉換關係並精確地校正至地表真正溫度，其後續應用性將會大大的提升。

## 五、致 謝

本研究承蒙科技部產學合作計畫，計畫編號MOST104-2622-E-004-001-CC3，研究經費贊助、剛鈺股份有限公司協助感測器和GNSS接收儀系統整合、以及岳達科技股份有限公司資料處理，使得本研究能順利完成，特此致謝！

## 六、參考文獻

- 許翎依，2014，以 VBS-RTK GPS 輔助單旋翼 UAS 熱影像定位定向之研究，國立政治大學地政學系碩士論文。
- 趙弘文，2009，無人旋翼機自動駕駛系統之研發，國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文。
- 黃昭雄、徐逸祥、朱子豪，2005，無人載具（UAV）應用於海岸濱線追蹤調查—以鹽寮福隆沙灘為例，2005 年台灣地理資訊學會年會暨學術研討會。
- 廖家翎，2014，熱影像建製數值地表溫度模型之研究，國立政治大學地政學系碩士論文。
- Ambrosia, V. G., S. S. Wegener, D. V. Sullivan, S. W. Buechel, S. E. Dunagan, J. A. Brass, J. Stoneburner, and S. M. Schoenung, 2003, Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal Data Over Fires, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 2003, 4, pp. 391-402.
- Amici, S., M. Turci, S. Giammanco, L. Spampinato, and F. Giulietti, 2013, UAV thermal infrared remote sensing of an Italian Mud Volcano. *Adv. Remote Sens*, 2, pp. 358-364.
- Berni, J., P. Zarco-Tejada P., L. Suarez, and E. Fereres, 2009, Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47(3), pp. 722-738.
- Brumana, R., D. Oreni, L. Van Hecke, L. Barazzetti, M. Previtali, F. Roncoroni, and R. Valente, 2013, Combined Geometric and Thermal Analysis from UAV Platforms for Archaeological Heritage Documentation, Paper presented at 2013 XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg: France.
- Chio, S. H. and C. H. Lin, 2017, Preliminary Study of UAS Equipped with Thermal Camera for Volcanic Geothermal Monitoring in Taiwan, *Sensors* 2017, 17(7), pp. 1649.
- Fischler, M. A. and, R. C. Bolles, 1981, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 24(6), pp. 381-395.
- Hartley, R. and A. Zisserman, 2004, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition, New York: the United States of America by Cambridge University Press.

- Hartmann, W., S. Tilch, H. Eisenbeiss, K. Schindler, 2012, Determination of the UAV Position by Automatic Processing of Thermal Images, Paper presented at XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Melbourne: Australia.
- Miraliakbari, A., M. Hahn, and J. Engels, 2010, Development of A Low-Cost Sensor System for Use on Gyrocopters, Paper presented at The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics – Shaping Canada’s Competitive Landscape, Calgary: Canada.
- Nishar, A., S. Richards, D. Breen, J. Robertson, and B. Breen, 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. *Renew. Energy*, 86, pp. 1256-1264.
- Nishar, A., S. Richards, D. Breen, J. Robertson, and B. Breen, 2016b, Thermal infrared imaging of geothermal environments by UAV (unmanned aerial vehicle). *J. Unmanned Veh. Syst.* 4, pp. 136-145.
- Harvey, M. C., J. V. Rowland, and K. M. Luketina, 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, pp. 61-69.
- Ostermann, F., 2007, *Anwendungstechnologie Aluminium*, Berlin: Springer.
- Řehák, M. and K. Pavelka, 2012, Using of UAV for Photogrammetry and Thermal Imaging, Paper presented at The 33rd Asian Conference on Remote Sensing, ACRS2012, Pattaya: Thailand.
- Wolf, P. R., B. A. Dewitt, and B. E. Wilkinson, 2014, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, Fourth edition, Taipei: The McGraw-Hill.