

## 旋翼 UAV 影像製作千分之一都市區局部區域 正射影像之探討

論文收件日期：103.04.08

論文修改日期：103.05.14

論文接受日期：103.05.27

邱式鴻<sup>1\*</sup>

### 摘要

正射影像(Orthoimage)是將航拍影像上的像點高差和影像傾斜位移移除，可提供正確的幾何和輻射資訊作地理資訊的底圖、或套疊數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作為三維景觀模擬供相關研究之用。以往千分之一正射影像製作仰賴大型航空攝影飛機酬載量測型相機進行航空攝影測量取像，並依此進行資料正射影像製作。近年來無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)發展快速，以其自動導航技術的提升與穩定的航拍取像設備，使得 UAV 可以更安全、更自動化的方式、甚至可在低空雲下飛行取得高解析度的航拍影像，相當適合作為局部區域製作正射影像的航拍取像系統，尤其是旋翼型 UAV 雖航程較小、抗風性較定翼機差，但因可垂直起降、機動更強，更適合用於都市地區局部製作正射影像之航拍取像。然而旋翼型 UAV 因酬載能力僅能酬載非量測型相機航拍取像，且因其像幅涵蓋範圍有限，因此取得之 UAV 影像是否能局部製作符合都市地區千分之一精度之正射影像將是本研究探討之重點。實驗結果顯示於航線規劃後以旋翼型 UAV 航拍取得品質佳之影像，並透過自率光束法空中三角測量平差，解決以近距離近景攝影測量程序率定之相機參數無法完整描述於空中航拍取像時的相機參數問題之後，再限制每張影像製作正射影像之範圍，證實以旋翼型 UAV 影像能製作都市區局部區域符合千分之一精度要求之正射影像，而本研究最後並依據實驗結果提出結論與建議。

**關鍵詞：**正射影像、無人飛行載具、自率光束法、空中三角測量

<sup>1</sup> 副教授，國立政治大學地政學系。

\* 通訊作者，TEL:(02)29393091ext.51657，E-mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw)。

# An Investigation into the Generation of 1/1000 Orthoimages for Local Urban Area by VTOL UAV

## Images

Shih-Hong Chio<sup>2\*</sup>

### Abstract

The image displacements on aerial images due to photographic tilt and topographic relief should be exactly removed to generate orthoimages. Thus orthoimages can provide the correct geometrical and radiometric information for basic image maps for geographic information, or they can overlap with digital elevation model for landscape simulation for advanced studies. In the past, 1/1000 orthoimage generation relies on large-scale aerial aircraft with metric cameras for collecting the aerial images. In recent years, the development of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is quite fast. Due to the automatic navigation technology, it makes UAVs be a stable platform to collect high-resolution aerial images much more safely and automatically. Also, UAVs can acquire the aerial images with low-altitude and under cloud, UAVs become quite suitable aerial image collection system to locally produce the orthoimages. Particularly, VTOL (Vertical Take Off and Landing) UAVs can take off and land vertically, therefore they are more flexible and more suitable for acquiring aerial images in urban areas to generate 1/1000 orthoimages locally. The payload capacity of VTOL UAV is much more limited than the fixed-wing UAV, thus only the non-metric camera can be implemented to collect aerial images. Additionally, the images are often limited ground coverage. Therefore, this study will focus on the investigation into the generation of 1/1000 orthoimages locally by using these collected aerial images. Based on the experimental results, after planning and acquiring the aerial images with good quality, self-calibration bundle adjustment for aerial triangulation is performed to overcome the imperfect camera parameters calibrated by the procedure of close-range photogrammetry. Next, by limiting the used image content it proves that the aerial images collected by VTOL UAVs can be used to generate the orthoimages locally in urban area. Finally, the suggestion will be presented based on the experimental results.

**Keywords:** Orthoimage, UAV, Self-calibration Bundle Adjustment, Aerotriangulation.

---

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Land Economics, National Cheng-Chi University.

\* Corresponding Author, TEL: +886-2-29393091#51657, E-mail: [chio0119@nccu.edu.tw](mailto:chio0119@nccu.edu.tw).

## 一、前言

正射影像是將航拍影像上的像點高差和影像傾斜位移移除，可提供正確的幾何和輻射資訊作地理資訊的底圖；並可與其他主題套疊展示，更可作為地理資料分析之基礎；或套疊數值高程模型作為三維景觀模擬供相關研究之用，具有廣泛之應用層面。而千分之一正射影像屬大比例尺圖資，原則上是以都市土地(都會區)、即將快速發展地區作為測製範圍，屬地方政府之權責，各地方政府考量其實際業務需求，研擬實施計畫推動。因此千分之一正射影像一般是縣市政府建置都會區(都市計畫區)一千分之一地形圖時所產製的成果之一。自 87 年度起內政部以「國土資訊系統基礎環境建置計畫(第一期及第二期)」、「國家地理資訊系統建置推動十年計畫」，依各縣市政府執行能力、建置範圍迫切需求程度及財力，分年補助縣市政府建置都會區(都市計畫區)一千分之一地形圖(內政部，2013)，過程中即依據內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」產製千分之一正射影像，因此目前千分之一正射影像測製方式是以載人飛行載具酬載量測型相機進行航空攝影測量取像來源，並依此進行資料處理與測製(內政部，2010)。

無人飛行載具 UAV 近年來發展快速，加上自動導航技術的提升與穩定的航拍取像設備，使得 UAV 可以更安全、更自動化的方式取得高解析度的航拍影像，UAV 亦能執行低空雲下自動化取像，相當適合作為正射影像製作時的航拍取像系統。因此內政部國土測繪中心(2010)近年來發展以 UAV 航拍影像快速更新航拍影像資料庫，運用國土利用更新機制，發展測圖技術，推廣 UAV 迅速取得國土空間資訊，以達到國土監測、環境保護配合緊急防救災應變機制等運用。而目前以定翼型 UAV 在航高 500 公尺與 1000 公尺取像後製作正射影像，其精度不論於山區或平地區均已可滿足 1/5000 正射影像製作精度要求(內政部國土測繪中心，2011)。然定翼型 UAV 用於都市地區之航拍取像有其安全性之考量，且其需要跑道起降並需以較高航高航拍取像，反觀旋翼型 UAV 雖航程較小、抗風性較定翼機差，但因可垂直起降、機動更強，更適合用於都市地區航拍取像製作局部區域千分之一正射影像。而至今尚未有研究探討旋翼型 UAV 航拍影像是否能製作滿足都市局部區域千分之一精度要求之正射影像，因此本研究將以此為探討，最後並根據實驗結果提出結論與建議。

## 二、文獻回顧

UAV 具機動性強、成本低、即時回傳感測訊息且可於高風險之惡地進行航拍感測之優勢下，廣泛應用於如考古(Bendea et al., 2007)、農業(David et al., 2007)、災難即時監測、自然資源監控(Horcher and Visser, 2004)以及作物監控(Kise et al., 2005; Laliberte et al., 2007)；UAV 亦因可依據任務需求選擇飛行高度，獲得高空間解析度之航拍影像，並可在多雲天氣於雲下拍攝影像，因此可應用於要求精度之正射影像(Bendea et al., 2007; Patias et al., 2007)、數值地形模型(Haarbrink and Eisenbeiss, 2008; Eisenbeiss and Zhang, 2006)及三維模型之建置(Pueschel et al., 2008)、甚至於三維虛擬城市建置時，UAV 所獲取高解析度影像，經過適當的影像糾正，可提供建物側面

紋理來源(Küing et al., 2011)。

應用 UAV 影像製作正射影像的相關試驗中，國外 Patias et al. (2007)於考古應用時產製 1:100 正射影像，以旋翼直升機 CropCam UAV 酬載 CANON EOS 350D 數位相機，以航高 30 公尺航拍取得地面解析力約 2 公分，九條航帶共 97 張 UAV 影像，其航帶間影像前後重疊約 60%、左右重疊約 30%，使用全測站儀測得 70 個控制點與檢核點執行空中三角測量(簡稱空三)平差，檢核點平面 RMSE 是 2.5 公分，高程 RMSE 是 4 公分；完成空三後以航測軟體 LPS (Leica Photogrammetry Suite, Leica Geosystems)製作 DEM 精度是 15 公分的數值正射影像。Li et al.(2008)介紹低空 UAV 影像應用於數值正射影像的製作，該研究中以定翼型 UAV 酬載四個小像幅數位相機航拍所組成的超寬角(super-wide-angle)大像幅影像，解決像幅涵蓋太小的問題，並以平均航高 1100 公尺航拍取得大陸貴州省約 38 平方公里的影像，完成空三平差後製作符合大陸 1/2000 比例尺精度(平面位置中誤差於平地、丘陵地不應大於 2.5 m；於山地、高山地不應大於 3.75m)的數值正射影像；該文中也介紹以 UAV 影像製作大陸廣東省約 1 平方公里符合大陸 1/500 比例尺精度(平面位置中誤差於平地、丘陵地不應大於 0.6 m；於山地、高山地不應大於 0.8m)的數值正射影像作為都市規劃之用。Ahmad(2011)則以輕型定翼的 CropCam UAV 酬載焦距 24.mm 的 Pentax Optio A40 數位相機，航拍取得航帶間影像前後約 60% 重疊、左右約 30% 重疊的影像，以 GPS 測得適當數量的控制點完成空三平差，但文中並未說明航高、UAV 影像的地面解析力、所使用影像的航帶數和影像數量、以及控制點與檢核點之數量；完成空三後以航測軟體製作數值正射影像，並以立體量測方式 6 個檢核點與 GPS 所測坐標比較評估其精度可達次米(sub-meter)級精度。Li (2011) 以 PuWen 鎮丘陵區約 20.8 平方公里的 1:2000 製圖為例，介紹低空 UAV 影像應用於在大比例尺地形圖測繪，以定翼型 UAV 酬載焦距 24.mm 的 Cannon 450D 數位相機，於平均航高 800 公尺航拍取得地面解析力約 20 公分的 UAV 影像，其航帶間影像前後約 65% 重疊、左右重疊約 35%，以適當數量的控制點完成空三平差，但文中並未說明所使用的影像的航帶數和影像數量、以及控制點之數量；完成空三後以航測軟體 Virtuozo 製作正射影像，文中亦未對其精度進行評估。

國內關於應用 UAV 影像製作正射影像的相關試驗中，則有內政部國土測繪中心(2008)於“97 年度探測感應器繪平台架構規劃暨用作業”計畫案中以旋翼機進行航拍取像並製作正射影像，拍航高度分別為 600 公尺、900 公尺、和 1200 公尺，由空三資料配合 5 公尺 DEM(Digital Elevation Model)資料，製作 800 公尺 x600 公尺範圍的旋翼型 UAV 正射影像，但並未針對精度進行檢核；且於航高 600 公尺時，地面解析度為 17 公分，完成空三之檢核點 RMSE 為 0.484 公尺、高程 RMSE 為 0.692 公尺，無法滿足製作千分之一的製圖規範。此外，內政部國土測繪中心於 2011 年與 2012 年的發展無人飛行載具航拍技術作業工作案中，使用定翼型 UAV 於航高 500 公尺與 1000 公尺取像後，以定翼型 UAV 影像完成自率光束法空三後製作正射影像，其精度不論於山區或平地區可滿足 1/5000 正射影像製作精度要求(內政部國土測繪中心，2011；內政部國土測繪中心，2012)。

綜合上述，國內外尚未針對以旋翼型 UAV 影像製作都市區局部區域之千分之一正射影像進行相關研究與探討，而國內對於正射影像位於平坦地且表面無高差位移之明顯地物點，規定其位置中誤差應小於 50 公分，最大誤差應小於 2 公尺。因此本研究將以此為探討對象，以下將分別介紹研究方法、結果分析與探討、以及結論與建議。

### 三、研究方法

本研究依據內政部(2010)建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定，著重於 UAV 酬載非量測型數位相機取得之航拍影像是否能局部製作滿足都市地區一千分之一正射影像之精度要求。而整個研究流程(如圖 1)則依據內政部(2010)建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定之一千分之一正射影像製作程序設計，主要項目分別為：一、擬定測圖計畫；二、航測控制點與檢核點布設；三、航空攝影；四、控制點與檢核點測量；五、空中三角測量；六、正射影像製作(包含數值高程模型 DEM 自動匹配與編修)；以及七、幾何精度分析。

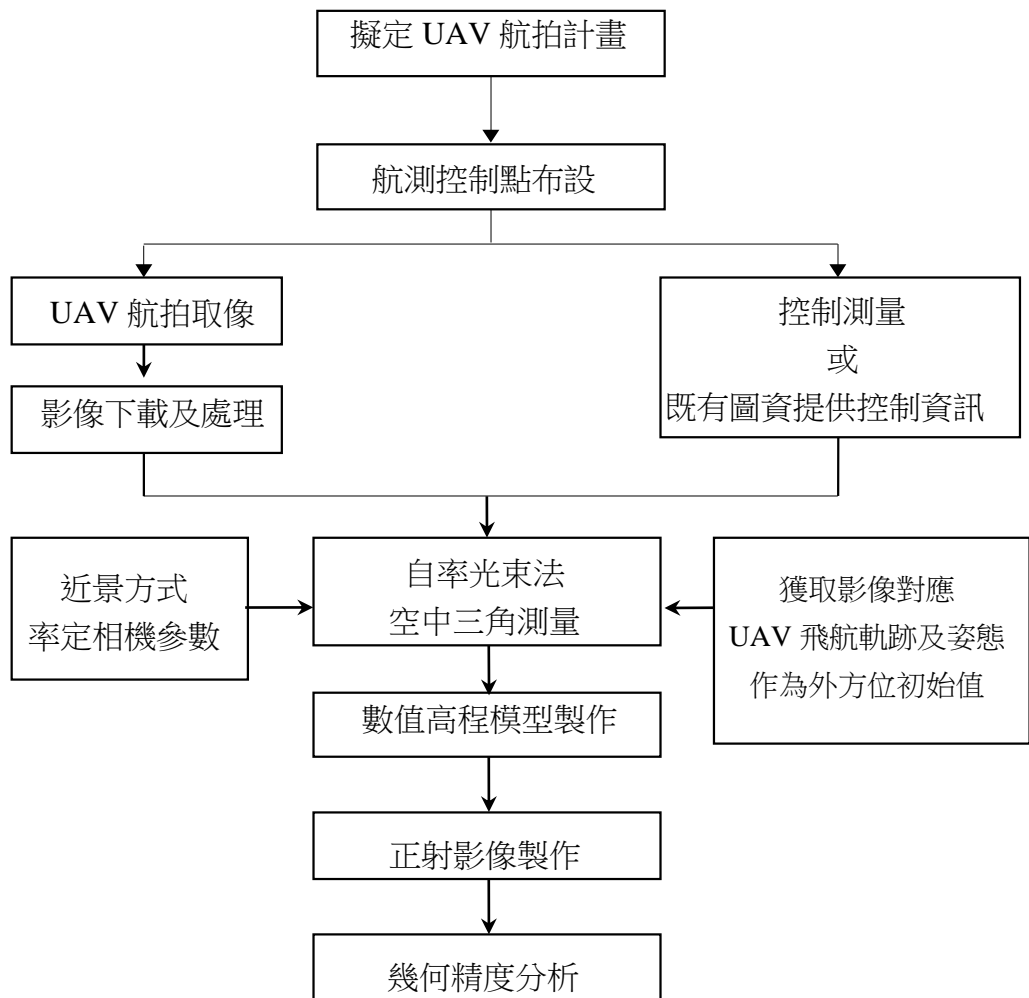


圖1 研究流程圖

如圖 1 流程圖所示，研究過程中首先依據所酬載的非量測型數位相機、以及所選定的試驗區擬訂測製地區航拍計畫，航線規劃時航線方向以南北、東西為原則，相鄰航線左右重疊率約 40%；航線內影像前後重疊率為 80%。

接著，與建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊規定(內政部，2010)之千分之一正射影像製作程序不同的是，本研究布設全控點(設計之航空標誌見圖 2)進行空中三角測量平差計算，其分布位置以規劃完之航線與影像範圍涵蓋圖，將其布設於測區界線外為原則，點位間間隔約為 2 至 4 個空中攝影基線(基線長以重疊 60% 為準計算)，全控點的平面及高程坐標測量如下：

- (一) 全控點平面坐標測量依據台北市都市發展局公告之控制點，以「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。將來自二個不同主站所得之坐標成果比較若其空間距離小於 10 公分則取平均值，作為該點之平面坐標成果。
- (二) 全控點高程坐標測量方式採水準測量為原則，水準測量由已知高程控制點引測閉合至另一已知高程控制點，並施以往返觀測。系統誤差改正前每測段往返閉合差不得大於  $10\text{mm}\sqrt{K}$  (K 為單一測段長度之 km 數)，系統誤差改正後閉合水準環線閉合差不得大於  $10\text{mm}\sqrt{F}$  (F 為水準環線長度之 km 數)。

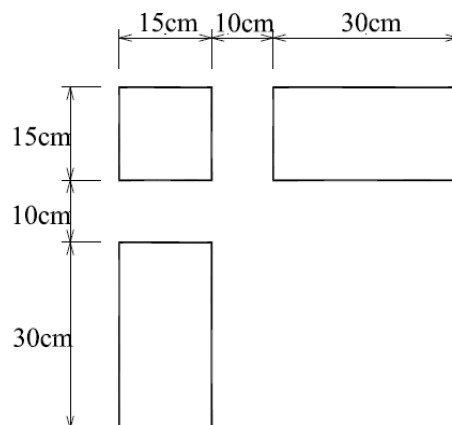


圖2 本研究所規劃之航空標誌

此外，本研究嘗試於控制點不足處，以該區既有圖資，即製作千分之一地形圖時已完成空三平差之航拍影像進行立體量測控制點(稱點特徵航空影像控制資訊)，量測時選取基線航高比大於 0.3 且重複量測無粗差之三次觀測值取其平均值作為此點特徵航空影像控制資訊之三維坐標。本研究另設自然點為檢核點，以「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，同樣將二個不同主站所得之坐標成果比較，若其空間距離小於 10 公分則取平均值，作為該點之平面坐標；所測高程則以內政部公告之大地起伏模式改正為正高。

完成航測控制點布設與測量之後，緊接著以 UAV 航拍取像並執行空三、數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)自動匹配與編修、以及正射影像製作。

由於本研究 UAV 酬載的是非量測型數位相機，依據謝幸宜(2010)，相機參數率定並不完全且率定當時之相機參數無法完整描述相機航拍時的相機狀態，雖然本研究於後續 UAV 航拍影像之空三採用自率光束法空三平差方式解決此問題，但相機仍必須先率定以取得相機參數初始值，供後續空三平差時可以執行初步粗差偵錯。因此，研究中採用 iWitnessPRO 軟體(Photometrix, 2010)進行相機率定，其特色是全自動率定，率定原理是全自動匹配率定場中所布設由 8 個黑點所組成的 20 個黑白率定標，並以自率光束法平差解算相機參數。iWitnessPRO 軟體率定的相機參數包含，所採用的附加參數數學模式如式(1)(Fraser, 1997)：

- (一) 內方位參數(the element of interior orientation)：像主距  $c$ 、像主點偏移量( $x_0$ ,  $y_0$ )。
- (二) 透鏡輻射畸變差參數(Radial distortion parameters)： $K_1, K_2, K_3$ 。
- (三) 透鏡離心畸變差參數(Decentering distortion parameters)： $P_1, P_2$ 。
- (四) 仿射畸變差參數(Affinity, non-orthogonality parameters)： $b_1, b_2$ 。

所採用的附加參數數學模式如式(1)(Fraser, 1997)：

$$\begin{aligned} \Delta x &= -x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}r^2 K_1 + \bar{x}r^4 K_2 + \bar{x}r^6 K_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2 \bar{x}\bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y &= -y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}r^2 K_1 + \bar{y}r^4 K_2 + \bar{y}r^6 K_3 + 2P_1 \bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

- 式中  $r$  : 以像主點為中心的像點輻射距離
- $x, y$  : 以影像中心為原點之原始像坐標觀測量
- $\Delta x, \Delta y$  : 原始像坐標觀測量之改正量
- $\Delta c$  : 像主距之改正量

為較精確求得相機參數，iWitness Pro 軟體使用手冊中建議率定取像時相機需設定後續取像時所用的影像解析度(全解析度最佳)且率定標佈在約 3 公尺\*3 公尺的空間中；率定標之間儘量不要在同一平面上；率定場中的某些率定標與其他率定標之間的高差需在 15~20 公分之間；先設定好欲進行 3D 量測的焦距(本研究於空中航拍取像，因此將相機設定遠距離清晰成像之後的焦距固定之)；依據設定好的焦距以及成像的距離設計率定標的大小；拍攝時離率定標至少 3 公尺~6 公尺以上；取像時最外圍的光線交會要介於 70~100 度之間(Photometrix, 2010)。

UAV 所酬載 GPS 及 AHRS(Attitude and heading reference system)(即相當於 Inertial Measurement Unit, IMU)其精度不足以輔助空三(內政部國土測繪中心，2011)，僅能提供外方位初始值。因此，本研究並未使用 GPS/IMU 資料輔助空三，而以光

束法區域平差進行空三平差解算航拍影像之方位與姿態(即外方位參數)；而 UAV 所酬載的相機為非量測型數位相機，雖已於室內率定，但依據謝幸宜(2010)研究顯示相機參數率定並不完全且率定當時之相機參數無法完整描述相機航拍時的相機狀態；因此本研究中 UAV 航拍影像之空三採用自率光束法空三平差方式，並選取 SOCET SET ORIMA 航測軟體，該軟體自率光束法空三平差採用的附加參數模式，如下式(2)，為 Brown 物理模式(Brown, 1976)，其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  為描述像點的系統誤差，基本上可視為像坐標的函數，以 18 個參數描述之，而參數間近乎正交，以避免多數參數間高度相關。

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + x[a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)] + b_1x + b_2y \\ &\quad + \frac{x}{c}[c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4)] + d_1xy + d_2y^2 + d_3x^2y + d_4xy^2 + d_5x^2y^2 \\ \Delta y &= y_0 + y[a_1(r^2 - r_0^2) + a_2(r^4 - r_0^4) + a_3(r^6 - r_0^6)] \\ &\quad + \frac{y}{c}[c_1(x^2 - y^2) + c_2x^2y^2 + c_3(x^4 - y^4)] + d_6xy + d_7x^2 + d_8x^2y + d_9xy^2 + d_{10}x^2y^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $\Delta x, \Delta y$  : 像點改正量  
 $x_0, y_0$  : 像主點坐標  
 $c$  : 像主距  
 $a_1, a_2, a_3$  : 輻射透鏡畸變參數  
 $b_1, b_2$  : 仿射及非正交參數  
 $c_1, c_2, c_3$  : 底片不平坦參數  
 $d_1, \dots, d_{10}$  : 底片變形及非輻射方向畸變參數

而本研究亦以 SOCET SET ORIMA 航測軟體自動量測空三所需之連結點，且：

- (一) 為求自率光束法空三平差解算之正確性，連結點匹配時，於每片設定的 9 個標準位置中均需自動匹配 9 點；且於設定像點量測精度，經粗差偵錯後每一標準位置至少需保留 6 點以上，不足 6 點需以人工方式量測補足，且每一標準位置至少有二量測點與同航帶或相鄰航帶像片上共軛點相連，不同鄰片允許以不同量測點連結。
- (二) 空三平差計算時，先以最小約制(或自由網)光束法平差進行大錯去除，再進行最小約制(或自由網)自率光束法平差，之後再進行粗差偵測得到觀測值精度的估值，其觀測值之殘餘誤差均方根值不得大於 1 像元，在坡度達 IV 級以上之山地或植被覆蓋達 IV 級之林地不得大於 1.5 像元。接著強制附合至控制點上進行自率光束法平差，其觀測值之殘餘誤差均方根值增量不得大於 30%，否則必須檢核控制點或另外選擇控制點。自由網及強制網平差過程中，考量透鏡畸變差大部分來自輻射畸變差(Clarke et al., 1998)，因此本研究行自率光束法平差時，



自率參數僅使用 1.像主距(Principal distance)：CFL；2.像主點(Coordinates of Principal point)： $x_0, y_0$ ；3.透鏡之輻射畸變差。

完成 UAV 航拍影像自率空三平差後，即可同時解算出影像外方位參數及改正後的相機參數，再以數值航測影像工作站製作 2m 網格間距數值高程模型資料並製作正射影像，正射影像製作時，每一像素以使用距離像主點最近之像元為原則。

#### 四、結果分析與探討

本研究實驗區域位於臺北市士林區，北至天母東西路、東至東山路、南至德行路北側、西至忠誠路，如下圖框線所含範圍，約 1Km X 1Km，地表平均高程約 20 公尺。



圖3 試驗區



(a) 機身

(b) 遙控器

(c) 地面控制站

圖4 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統(剛鈺，2012)

AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統可於荷重 2500g 下飛行至少 20 分

鐘，適合小範圍的拍攝任務，可抗穩定風速 12 m/sec，可抗瞬間風速 18 m/sec。該系統所採用的非量測型相機為 Canon EOS 5D Mark II (見圖 5)。



圖5 Canon EOS 5D Mark II 單眼數位相機

Canon EOS 5D Mark II 非量測型數位相機搭配 28mm 鏡頭航拍取像，其取像寬是 3648 像元、高是 2736 像元，像元大小是  $6.4 \mu\text{m}$ 。其相機參數採用設於政治大學綜合院館北棟三樓中庭內(見下圖 6)的率定場進行相機率定。



圖6 Canon EOS 5D Mark II 相機 28mm 鏡頭的相機率定場

依據 iWitnessPRO 軟體使用手冊中建議，將 20 個黑白率定標均勻布設之後，依操作手冊率定時影像取像要點，拍攝 27 張率定用影像，以 iWitnessPRO 軟體進 28mm 鏡頭的全自動率定，圖 7 顯示率定用 27 張影像拍攝位置與率定標空間位置分布圖，表 1 為相機率定之結果。iWitnessPRO 率定報告中顯示率定的品質 1.0 為良好，預估的像點對位精度為 0.11 像元，3D 點坐標在 X、Y、Z 方向預估精度是 0.0088 單位(或 1:154200)、0.0127 單位(或 1:107200)、以及 0.0070 單位(或 1:195100)，整體精度是 0.0095 單位(或 1:143300)；而根據 iWitnessPRO 說明書，良好的率定結果整體精度通常介於 1:500~1:10000 之間，本次率定結果超過 1:10000，因此由上描述可知以 iWitnessPRO 地面近景拍攝率定成果良好無誤。

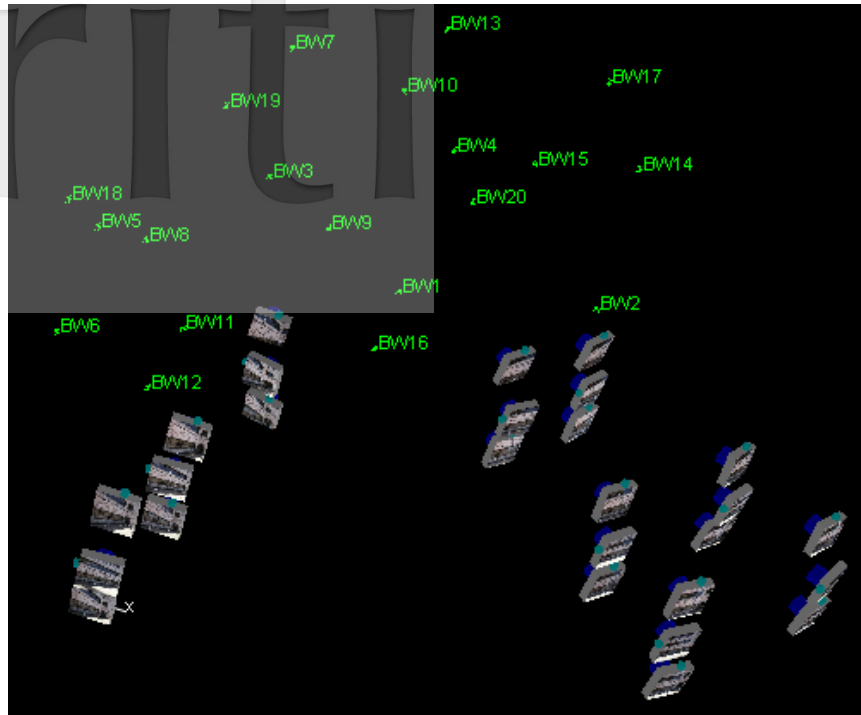


圖7 率定用 27 張相片拍攝位置與率定標空間位置分布圖

表 1 Canon EOS 5D Mark II 相機 28mm 鏡頭率定結果

率定日期		2012/07/10
Canon EOS 5D Mark II 相機		28mm 鏡頭
Principal Distance 像主距 $c$ (mm)		28.4793
Principal Point Offsets 像主點位移( $x_0, y_0$ )(mm)		(-0.0593, -0.1212)
Radial Distortion 輻射畸變差	$K_1$	1.3230e-004
	$K_2$	-2.2379e-007
	$K_3$	-1.5571e-011
Decentering Distortion 離心畸變差	$P_1$	7.2189e-006
	$P_2$	-5.8909e-006
Affinity Parameter $x$ 、 $y$ 軸尺度比	$B_1$	2.695e-004
Affinity Parameter $x$ 、 $y$ 軸非正交	$B_2$	1.225e-005

率定得到相機參數之後，接著設計以像元地面解析度約 4.5 公分，航線前後影像重疊 80%，航線間左右影像重疊 40%、以及航高離地高約 200 公尺藉由 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 航線規劃軟體規劃航線。所規劃之航線於西元 2012 年 10 月 15 日航拍取像，當天從下午約一點到下午約四點執行航拍任務，起飛點位於天母運動公園內，當天天候多雲短暫陣雨，但仍能於雲下作業，顯示 UAV 雲下作業的特性，共花費約 3 小時順利完成航拍取像，共取得如圖 8 所示之 7 條航帶，147 張影像。所拍攝之影像有明顯之航偏角，經分析此一偏移現象其偏移量具規律性，並非載具控制系統不穩定造成，而是載具之羅盤於校正過程中因人為校正不當，導致此航偏角。

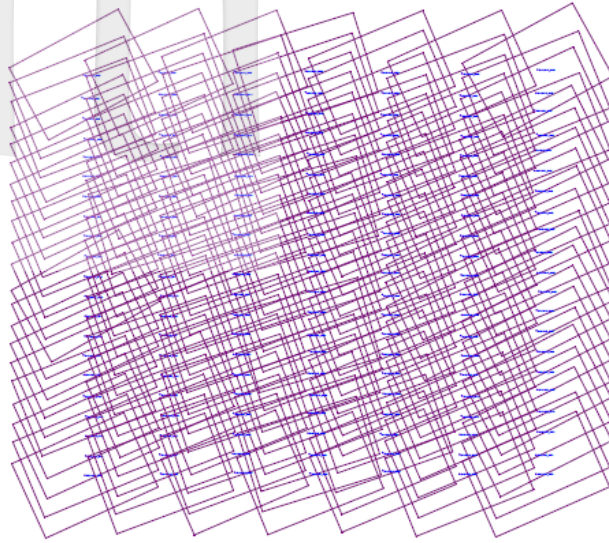


圖8 多旋翼 UAV 取像後航帶中影像前後重疊與航帶間影像左右重疊情形之圖示

將本次航拍取像結果以約每隔 10 張選取 1-2 處明顯道路標線(如下圖 9 所示)方式，共選取 22 處計算其 MTF (Modulation Transfer Function) 模糊參數均在 1 個像元以下，平均值 0.802 像元，標準差  $\pm 0.095$  像元，顯示本次航拍影像品質佳。

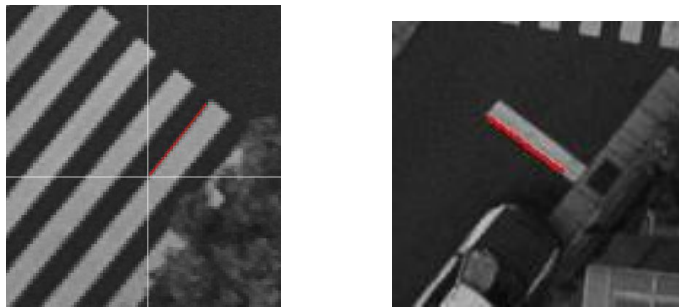


圖9 所選明顯道路標線計算 MTF 模糊參數位置示意圖(紅色線處)

接著進行空三處理，空三共使用 15 個控制點、11 個點特徵航空影像控制資訊、6 個檢核點，其分布如圖 10 所示。使用點特徵航空影像控制資訊的原因是原先控制點布設是以其他種類六旋翼 UAV 所酬載之 Ricoh GR Digital III 相機進行航線規劃，導致原布標點無法滿足空三控制之需求，因此由 101 年度「臺北市 3D 航測數值地形圖重製工作案」中涵蓋試驗區且已完成空三之航拍影像，由立體像對中量測本研究所需之點特徵航空影像控制資訊。此次空三平差採自率光束法空三平差，經粗差偵錯共得 4186 點地形點對應之像點坐標，執行自率光束法空三平差時相機率定參數僅率定像主點(x0,y0)、像主距(CFL)以及鏡頭的輻射畸變差(a1,a2,a3)，實測控制點之精度設定為(0.05m, 0.05m, 0.10m)，點特徵航空影像控制資訊之精度設定為(0.10m, 0.10m, 0.30m)，像點量測精度設定為 6 $\mu$ m，自率光束法空三平差的結果如圖 11 所示，空三平差網型如圖 12，空三平差網系總多餘觀測數除以總觀測數所得之平均多餘觀測數約 0.6，可知影像量測空三連結點平均可靠度指標 $\geq 0.6$  滿足規

範。而連結點之 N、E、h 三個方向的 RMSE(即內部精度)分別是 0.07m、0.06m、及 0.19m；檢核點精度如表 5 自率光束法空三平差成果所示，N、E、h 坐標之 RMSE 分別是 0.08m、0.11m、與 0.28m。化算成平面精度為 0.14m、高程精度 0.28m。其中高程 h 之 RMSE 是以 RTK 實測坐標以內政部公告之大地起伏公式推估的正高檢核之成果。

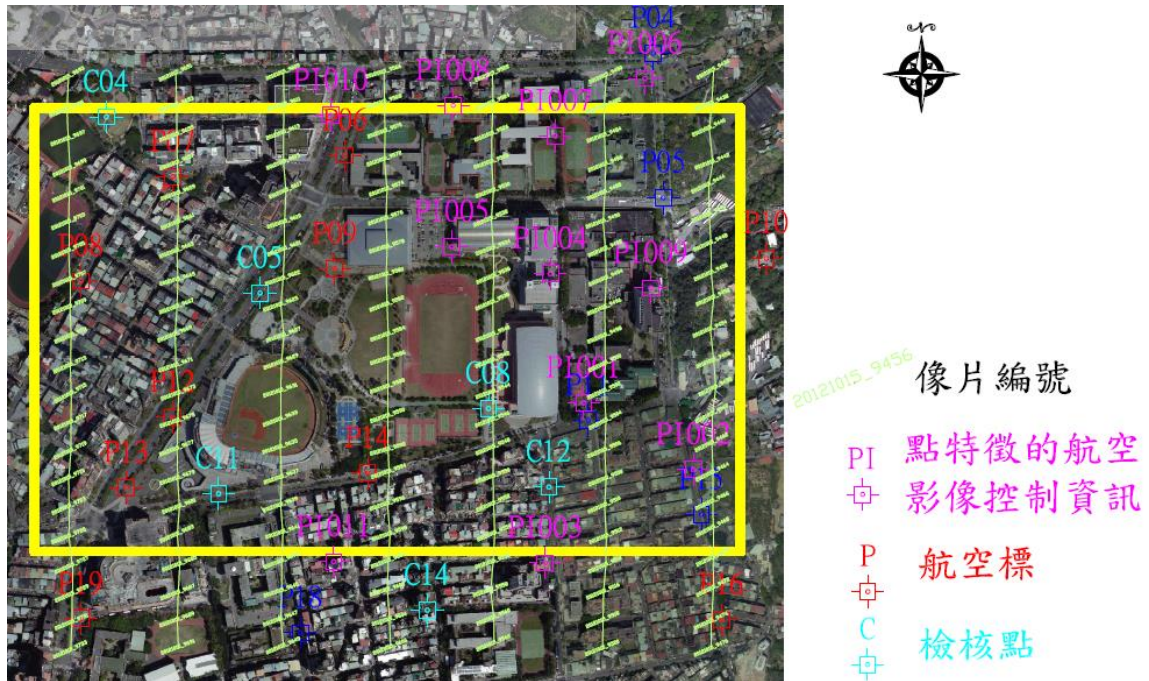


圖 10 航拍影像空三控制點與檢核點分布圖

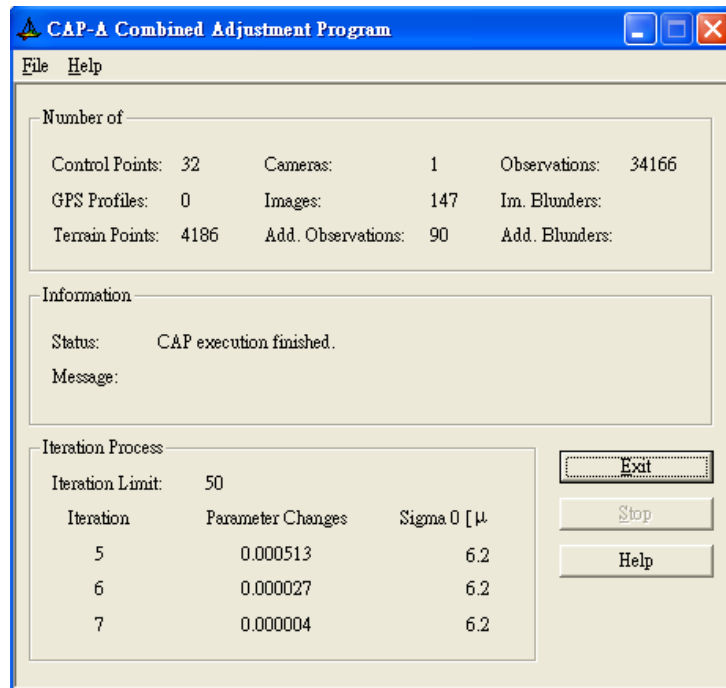


圖 11 多旋翼 UAV 航拍影像自率光束法空三平差執行結果視窗畫面

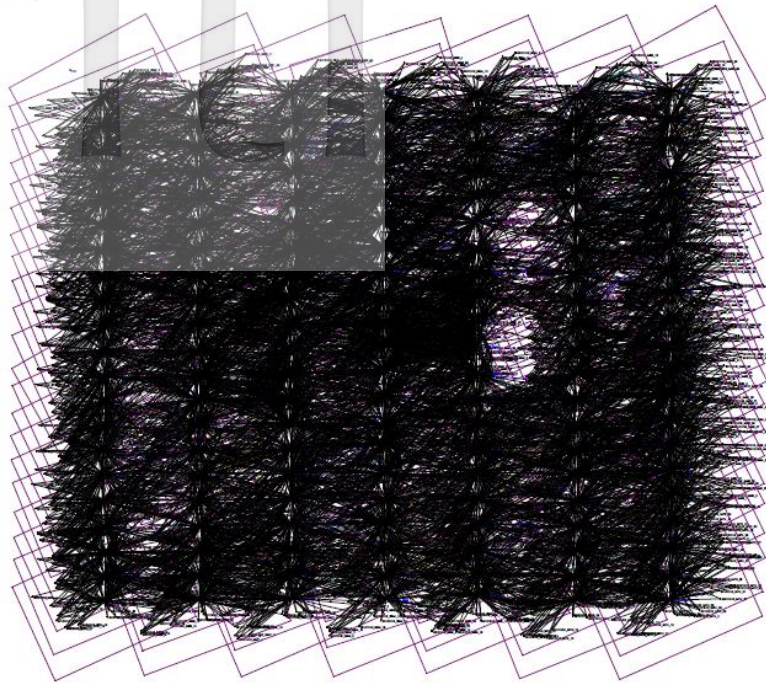


圖 12 多旋翼 UAV 航拍影像空三平差網形圖

為比較自率光束法空三平差與一般光束法空三平差之成果，本研究將上述自率光束法空三平差，經粗差偵錯共得到的 4186 點地形點對應之像點坐標資料與執行自率光束法空三平差時設定相同的實測控制點精度、點特徵航空影像控制資訊之精度、像點量測精度後執行一般光束法空三平差。由 iWitnessPRO 率定之相機參數帶入 SOCET SET ORIMA 航測軟體執行一般光束法空三平差時須特別注意，因數學模式之差異，其相機參數中畸變參數(像主點和焦距除外)正負符號要互變，亦即正變負、負變正，平差所得之  $\Sigma_0$  為  $33.1\mu\text{m}$ ，檢核點精度如表 5 一般光束法空三平差成果所示，N、E、h 坐標之 RMSE 分別是 0.08m、0.12m、與 0.39m。表 5 中可發現一般光束法空三平差之精度因其地面率定相機參數無法描述航拍時之相機參數，其高程精度的確比自率光束法空三平差精度差。比較地面率定與自率光束法空三平差兩種方式率定所得之相機參數值如表 6 所示，如前所述，地面率定與自率光束法率得的輻射畸變參數正負號確實相反。

表 5 多旋翼 UAV 航拍影像光束法空三平差檢核

點號	自率光束法空三平差			一般光束法空三平差		
	N 坐標較差(m)	E 坐標較差(m)	H 坐標較差(m)	N 坐標較差(m)	E 坐標較差(m)	h 高程較差(m)
C04	0.17	-0.24	-0.58	0.18	-0.26	-0.77
C05	0.05	-0.02	-0.17	0.05	-0.03	0.06
C08	-0.01	0.09	-0.03	-0.04	0.09	0.23
C11	0.00	0.05	-0.23	-0.01	0.07	-0.12
C12	0.06	0.01	0.13	0.03	0.01	0.38
C14	0.10	-0.05	0.22	0.06	-0.04	0.31
RMSE	0.08	0.11	0.28	0.08	0.12	0.39

表 6 Canon EOS 5D Mark II 相機參數率定之結果比較

Canon EOS 5D Mark II 28mm 鏡頭相機參數			
		原率定值	執行自率光束法空三率定結果
像主距 c (mm)		28.4793	28.4156
像主點位移( $x_0, y_0$ )(mm)		(-0.0593, -0.1212)	(-0.0789, -0.0806)
輻射畸變差	K <sub>1</sub>	1.3230e-004	-1.27e-004
	K <sub>2</sub>	-2.2379e-007	2.09e-007
	K <sub>3</sub>	-1.5571e-011	1.55e-11
離心畸變差	P <sub>1</sub>	7.2189e-006	無
	P <sub>2</sub>	-5.8909e-006	無
x、y 軸尺度比	B <sub>1</sub>	2.695e-004	無
x、y 軸非正交	B <sub>2</sub>	1.225e-005	無

本研究上述空三平差計算時並未全部使用所布設的全控點，原因是本研究一開始時使用其他類型之 UAV 進行航拍，因此控制點與檢核點是針對其酬載之相機涵蓋範圍布設，因此後續改用 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 航拍取像時，由於控制點並非針對此 UAV 酬載之相機規劃所布設，因此必須再引用點特徵航空影像控制資訊才完成上述之空三平差實驗。後續若能針對控制布標部份加以改善應可得到更佳之空三成果。

此外，空三過程中亦發現，由於航拍高度較低(約 200 公尺)，因此像幅涵蓋地面範圍較小，因此大型建物的樓頂面即可能成像於整張影像中的大部分(如圖 13)，若該樓頂面是均調之影像將使得自動匹配發生問題。圖 12 中網形空白縫隙處即為此因素所造成。

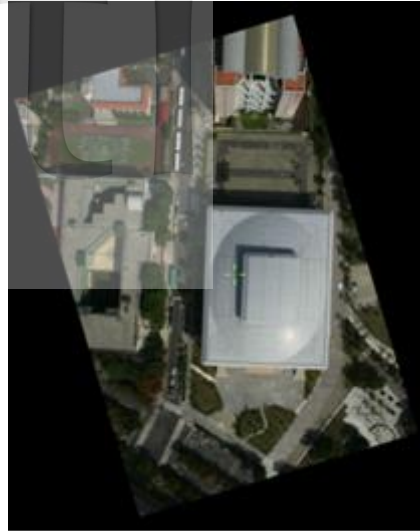


圖 13 大型建物的樓頂面於 UAV 航拍影像中成像之圖示

本研究接著使用多旋翼 UAV 航拍影像自率光束法空三平差的成果，以 SOCET SET 航測軟體自動匹配產生數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)經人工編修所得之 DEM 成果如圖 14，再以 SOCET SET 航測軟體完成航拍影像正射影像製作，成果如圖 15 所示。

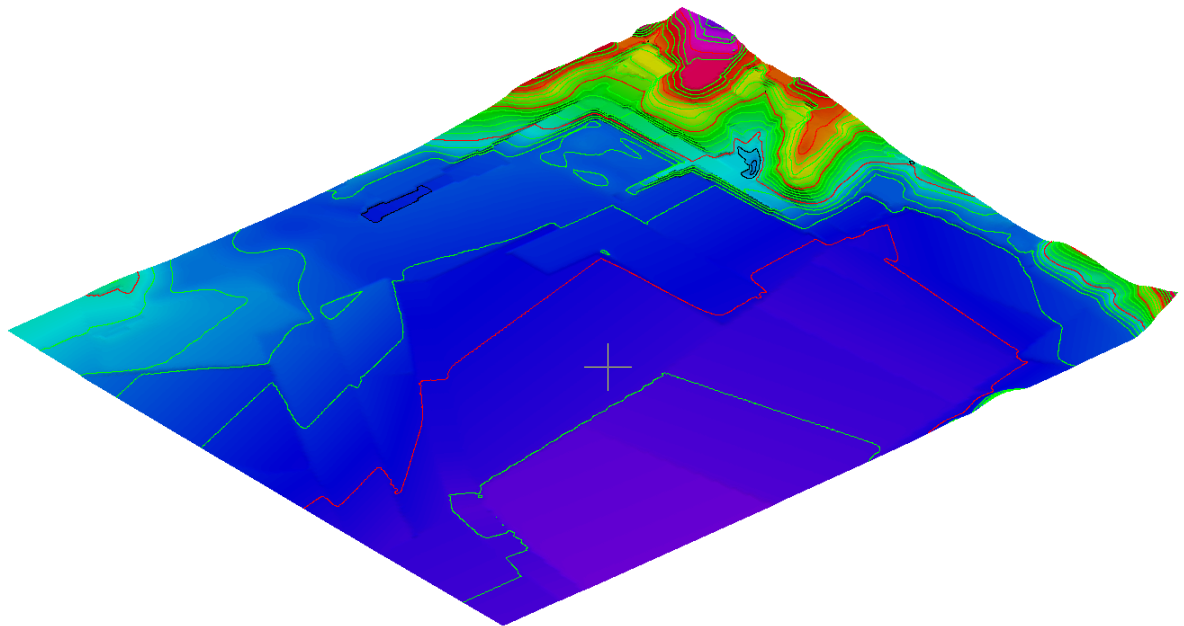


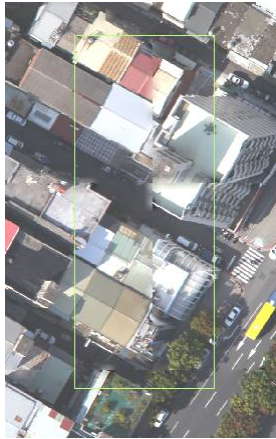
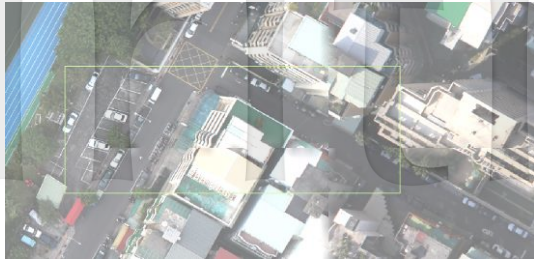
圖 14 多旋翼 UAV 航拍影像數值高程模型 3D 透視圖





圖 15 多旋翼 UAV 航拍影像正射影像製作成果

以 UAV 進行航拍，由於受到其像幅小、航高低之影響，導致影像上建物高差位移大，於正射拼接鑲嵌作業上實有一定的作業難度，易發生建物傾斜方向不一與影像色調不連續之情形，如圖 16。故本研究中主要檢核正射影像之幾何精度，如圖 17，針對應無高差位移之處以全測站儀地面實測 20 個檢核點進行平面幾何精度檢核，檢核成果 X 坐標與 Y 坐標 RMSE 均為 0.09m，相當於平面位置 RMSE 為 0.13m，滿足千分之一正射影像位於平坦地且表面無高差位移之明顯地物點，其位置中誤差應小於 50 公分之精度要求，20 個實測地面檢核點位分布如圖 17。



(a) 建物傾斜方向不一致

(b) 影像色調不連續

圖 16 UAV 影像之正射影像問題圖示說明



(a) 正射影像精度檢核點位分布

(b) 檢核點位範例圖示

圖 17 UAV 影像之正射影像精度檢核點位分布

正射影像製作是由不包含地物的數值高程模型以及空三的成果進行正射糾正處理，但由於航拍取像高度離地高僅 200 公尺，因此建物之高差位移嚴重，此導致所製作的正射影像在高建物部分產生嚴重之位移現象，假設像片垂直攝影，則像點因高差位移  $d$  的公式如式(3)所示：

$$d = \frac{rh}{H} \tag{3}$$

其中， $r$ ：像點距像主點的距離； $h$ ：距選定基準面的物高； $H$ ：距選定基準面的航高。

表 7 是假設建物高度分別是 5.00m、10.00m、……、60.00m，像點分別距離像主點 1.50mm、2.50mm、5.00mm、7.50mm 時，選定以此區地表平均高程 20.00m 為基準面時，於航高約離地高 200m 的像點位移的數量表(分別以 mm 及像元(pixel)為單位，以像元為單位時此時一像元為 6.4 $\mu$ m)。將表 7 以像點與像主點距離為橫軸、高差位移像元數為縱軸，繪成圖 18 顯示不同建物高度於不同像點位置的高差位移像元數。

表 7 航高離地高 200 公尺像點位移數量表

離地航高(m)	200.00								
地表高程(m)	20.00								
離像主點(mm)	1.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.04	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.30	0.38	0.45
像點位移(pixel)	5.86	11.72	17.58	23.44	29.30	35.16	46.88	58.59	<b>70.31</b>
離像主點(mm)	2.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.06	0.13	0.19	0.25	0.31	0.38	0.50	0.63	0.75
像點位移(pixel)	9.77	19.53	29.30	39.06	48.83	58.59	78.13	97.66	117.19
離像主點(mm)	5.00								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	1.00	1.25	<b>1.50</b>
像點位移(pixel)	19.53	39.06	58.59	78.13	97.66	117.19	156.25	195.31	<b>234.38</b>
離像主點(mm)	7.50								
建物高度(m)	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	40.00	50.00	60.00
像點位移(mm)	0.19	0.38	0.56	0.75	0.94	1.13	1.50	1.88	2.25
像點位移(pixel)	29.30	58.59	87.89	117.19	146.48	175.78	234.38	292.97	351.56

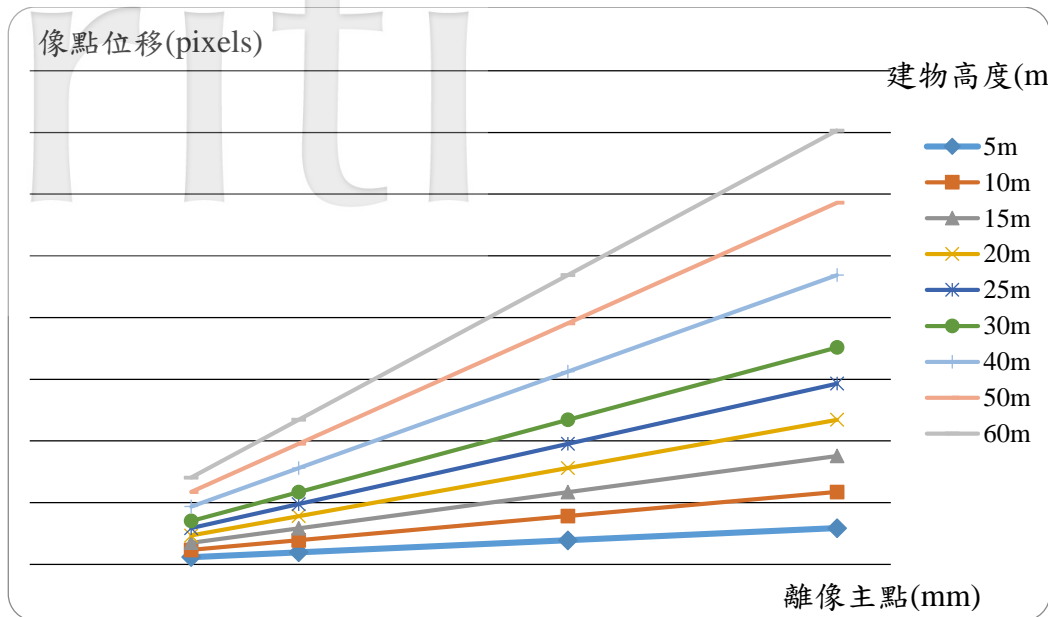


圖 18 不同建物高度於不同像點位置的高差位移像元數圖

本次研究儘量以選取離像主點約 5.00mm 範圍之中心影像製作正射影像，此時若 60m 高建物離像主點 5.00mm 時，像點位移高達 1.50mm(相當於 234.38 像元)。依據公式(3)，若航高升至離地高 300.00m 與 400.00m 時，60m 高建物離像主點 5.00mm 時，計算得到像點位移仍高達 1.00mm 與 0.75mm(相當於 156.256 與 117.19 像元)；離像主點 2.50mm 時，像點位移亦仍高達 0.50mm 與 0.38mm(相當於 78.13 與 58.59 像元)；離像主點 1.50mm 時，像點位移為 0.30mm 與 0.23mm(相當於 46.88 與 35.16 像元)，降至 50 像元內。由上述分析，航拍取像高度提高至離地高 300m 與 400m，對於較高建物(如 60m 高建物)在離像主點 5.00mm 左右的高差位移仍非常大，因此對高建物儘量取其成像於像主點中心約 1.5mm 的影像行正射糾正，如此一來於航高離地面高 200m、300m、400m 時原始成像時的高差位移可控制在 70~35 像元之間，進一步製作 10 公分解析度的正射影像時自然可將高建物的高差位移量影響降低。

## 五、結論與建議

本研究針對發展快速、變異大的都市地區，應用多旋翼 UAV 系統，在安全無慮情況下，提供垂直起降，高機動性且可於低空雲下飛行等性能，執行自主飛行並航拍高解析度之 UAV 影像，記錄飛行時的 GPS、IMU 資訊供作影像外方位初始值，探討以旋翼 UAV 酬載非量測型數位相機拍攝之影像是否能製作都市局部區域千分之一正射影像。由地面實測檢核點之精度證實以旋翼 UAV 影像製作都市區局部區域正射影像能滿足千分之一正射影像之精度要求，雖然其具取像像幅小之缺點但卻有航拍作業快速之優點。以目前研究結果顯示在慎選抗風性佳且酬載高性能相機之多旋翼之 UAV 系統，於天候狀況許可下(即使陰偶陣雨)，且在 UAV 不受任何環境干擾下，可以航高 200 公尺的飛行下於三小時內取得製作一幅千分之一正射影像所需航拍品質佳的影像，再以自率光束法空三平差同時解決以近景攝影測量率定所得

相機參數無法描述航拍時相機參數之問題，亦可同時求得航拍影像正確的拍攝位置與姿態，最後指定每張影像合適製作正射影像之區域製作符合千分之一精度之正射影像。整個研究過程亦得到以下建議可供未來工作參考：

- (一) 航拍參數建議：欲製作具精度等級之正射影像，其數位相機不可使用自動對焦功能且不可開啟防手震功能，此外為防止影像邊緣變形，以本實驗所使用之 Canon5DII 相機為例，使用 28mm 定焦鏡頭，航拍地面解析度建議以可分辨雙黃線與雙白線為主，約為 6cm 以內，因此航高約 200m~300m；而航拍時影像前後重疊 80%、側向重疊 40%，控制點分布位置以規劃完之航線與影像範圍涵蓋圖，將其布設於測區界線外為原則，點位間間隔約為 2 至 4 個空中攝影基線（基線長以重疊 60% 為準計算），且須有至少均勻分布 5 點之檢核點檢查空三精度。而後續應累積更多之經驗，建議更優之航拍參數。
- (二) 改善控制測量方式：本次研究之控制點是以「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其平面坐標，然由作業過程中發現都市區遮蔽嚴重，導致作業相當困難，因此針對在都市地區小規模區域之控制測量方式，建議將來可採用導線或導線網的控制測量方式，增進效益。
- (三) 航拍取像之改善：本次實驗所選 AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼 UAV 能有效於短時間航拍取像，然於取像之航帶中相鄰影像之前後重疊與航帶間影像之左右重疊目前無法符合航空攝影測量作業之要求，如圖 8 所示。若將來改善其重疊狀況符合一般航拍影像之要求，對後續處理會更有助益。
- (四) 自率光束法空三平差之分析：本研究採用自率光束法空三平差，同時解決航拍影像之定位定向，以及以近景攝影測量方式率定相機所得參數不適用之問題，其基本假設是影像自動匹配可得涵蓋描述整個相機鏡頭的像點且影像前後重疊與左右重疊需足夠，然是否有無法大量獲取匹配像點之區域，如植被區或裸露地表，以及重疊率低於多少會導致自率光束法空三平差無法適用仍待更多經驗累積；此外，本次研究所使用的自率光束法空三平差的附加參數模式，僅使用像主點(x0,y0)、像主距(CFL)以及鏡頭的輻射畸變差(a1,a2,a3)，其他參數對空三平差影響如何，亦可進一步探究。
- (五) 點特徵航空影像控制資訊之使用：本研究於控制點不足處，以該區既有圖資，即製作一千分之一地形圖時已完成空三平差之航拍影像進行立體量測控制點（稱點特徵航空影像控制資訊），量測時選取基線航高比大於 0.3 且重複量測無粗差之三次觀測值取其平均值作為此點特徵航空影像控制資訊之三維坐標，此作法之空三精度亦滿足所需，因此後續可以繼續探究點特徵航空影像控制資訊與實測地控點的比例搭配對於空三精度之影響。
- (六) 正射影像之製作：目前航拍取像高度離地高 200 公尺，因此建物之高差位移嚴重，此導致所製作的正射影像在高建物部分產生嚴重之位移現象，因此對於高

建物儘量取成像於像主點中心附近(至少 1.5mm)範圍內的影像製作正射影像。

## 參考文獻

- 內政部，2010，《建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊》，內政部：台北。
- 內政部，2013，基本地形圖資料庫服務入口網站，<http://bmap.nlsc.gov.tw/bmap/ch/>，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 內政部國土測繪中心，2008，《測探測感應器測繪平台架構規劃暨應用作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2010，《測繪科技發展後續計畫-發展無人飛行載具航拍技術作業執行計畫 100 年~103 年》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2011，《100 年度發展無人飛行載具航拍技術作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 內政部國土測繪中心，2012，《101 年度發展無人飛行載具航拍技術作業工作總報告書》，內政部國土測繪中心：台中。
- 剛鈺，2012，AI-RIDER YJ-1000-HC 多旋翼空中攝影系統，AI-RIDER，<http://www.ai-rider.com/>，最近檢索時間 2013 年 6 月。
- 謝幸宜，2010，《以自率光束法提升四旋翼 UAV 航拍影像之定位精度》，國立政治大學地政學系碩士論文。
- Ahmad, A., 2011, Digital Mapping Using Low Altitude UAV, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 19 (S), pp. 51-58.
- Bendea, H., F. Chiabrando, F. G. Tonolo, and D. Marenchino., 2007, Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, *Paper presented at XXI International CIPA Symposium : Athens, Greece*.
- Brown, D. C., 1976, The bundle adjustment - progress and prospect, *International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing*, 21( 3), pp. 1-33.
- Chen, J., Lin, Z., Wang, X., and Y. Li, 2012, Application of UAV system for low altitude photogrammetry in SHANXI, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX(B1), pp. 351-354.
- Clarke, T. A., J. G. Fryer, and X. Wang, 1998, The Principal Point and CCD Cameras, *Photogrammetric Record*, 16(92), pp. 293-312.
- David, G. S. III, R. D. Benjamin, and R. Charles, 2007, Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields, *Journal of Field Robotics*, 25(3), pp. 133-147.
- Eisenbeiss, H., and L. Zhang. 2006, Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application, *International*

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI (5), pp. 90-96.
- Fraser, C. S., 1997, Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 52, pp. 149-159.
- Haarbrink, R. B., and H. Eisenbeiss, 2008, Accurate DSM production from unmanned helicopter systems, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B1), pp. 1259-1264.
- Horcher, A., and Rien J.M. Visser, 2004, Unmanned aerial vehicles: applications for natural resource management and monitoring, *Paper presented at the Council of Forest Engineering Annual Meeting-Machines and People, The Interface : Hot Springs, Arkansas*.
- Kise, M., Q. Zhang, and F. Rovira Más, 2005, A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance, *Biosystems Engineering*, 90(4), pp. 357-367.
- Küng, O., C. Strecha, P. Fua, D. Gurdan, M. Achtelik, K. M. Doth, and J. Stumpf, 2011, Simplified building models extraction from Ultra-light UAV Imagery. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 38(1), pp. 217-222.
- Laliberte, A. S., C. Winters, and A. Rango, 2007, Acquisition, orthorectification, and classification of hyperspatial UAV imagery, *Research Insights in Semiarid Ecosystems, RISE: Tucson*.
- Li S., 2011, The use of Low-altitude unmanned aerial vehicle system in the measurement of large scale topographic maps -Take the 1:2000 mapping of PuWen as an example, *11th South East Asian Survey Congress and 13th International Surveyors' Congress Innovation towards Sustainability: Malaysia*.
- L. Baoping, X. Sheng, Z. Xia, E. Chengwen, and Bing Li, 2008, Actualize of low altitude large scale aerophotography and geodesic base on fixed-wing unmanned aerial vehicle platform, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVII (B1), pp. 643-646.
- P. Patias, Chr. Saatsoglou-Paliadeli, O. Georgoula, M. Pateraki, A. Stamnas, and N. Kyriakoub, 2007, Photogrammetric documentation and digital representation of the macedonian palace in Vergina-Aegeae, *Paper presented at XXI International CIPA Symposium : Athens, Greece*.
- Photometrix, 2010, Australis Users Manual version 6.01, <http://photometrix.com.au> (last accessed June 14, 2014)
- Pueschel, H., M. Sauerbier, and H. Eisenbeiss, 2008, A 3D model of castle landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B8), pp. 93-98.