

旋翼型UAV影像 局部重測都市區千分之一地形圖之研究

邱式鴻* 顏怡和** 丁育群***

論文收件日期：102年2月25日
論文接受日期：103年1月6日

摘 要

無人飛行載具UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 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，此外UAV亦能執行低空雲下自動化取像，相當適合作為地形圖局部重測的航拍取像系統，尤其是旋翼型UAV因以電池為飛行動力來源且可垂直起降、機動更強，更可安全地適用於都市地區航拍取像進行局部重測千分之一地形圖。而旋翼型UAV酬載能力比定翼型UAV更有限，因此亦僅能酬載非量測型相機航拍取像，因此取得之影像是否能夠局部重測都市區千分之一地形圖是本研究探討之重點。本研究以內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」逐一探討各重要的工作項目。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（簡稱空三）平差，解決以近景攝影測量程序率定之相機參數無法完全描述以UAV航拍取像時的相機參數問題之後，再透過立體模型有效立製測製範圍之概念，實證以旋翼型UAV影像局部重測都市區千分之一地形圖的可行性，本研究最後並依據實驗結果提出相關重要工作項目之建議。

關鍵詞：無人飛行載具、局部重測、自率光束法、空中三角測量、立體測製

* 副教授，國立政治大學地政學系，TEL：(02)29368610#51657，E-Mail：chio0119@nccu.edu.tw。

** 工程師，岳達科技股份有限公司，TEL：(02)29180592，E-Mail：yihoyen@hotmail.com。

*** 局長，臺北市政府都市發展局（現任內政部營建署署長），TEL：(02)87712350，E-Mail：cpa1209@cpami.gov.tw。

A Study on Local Resurvey for 1/1000 Topographic Maps by Using VTOL UAV Images

Shih-Hong Chio*, Yi-Ho Yen, Yuh-Chyurn Ding*****

Abstract

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 for aerial image collection system to resurvey locally for topographic maps. In particular, 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 for local resurvey to generate 1/1000 topographic maps. The payload capacity of VTOL UAV is more limited than the fixed-wing UAV, thus only the non-metric camera can be implemented to collect aerial images. Therefore, this study will focus on the possibility for local resurvey to generate 1/1000 topographic maps by using these collected aerial images. The individual critical processing items of mapping regulations for 1/1000 digital topographic maps, approved by Ministry of the Interior, will be investigated and discussed one by one in this study. Based on the experimental results, after planning and accruing 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 introducing the concept of effective stereo mapping in stereo model it proves that the aerial images collected by VTOL UAVs can be used for local resurvey in urban area to generate 1/1000 topographic maps. Finally, the suggestion about each critical processing item for mapping will be presented based on the experimental results.

Keywords: UAV, Local Resurvey, Self-calibration Bundle Adjustment, Aerotriangulation, Stereo Mapping

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

** Engineer, YueDa Ltd., TEL:+886-2-29180592, E-Mail: yihoyen@hotmail.com.

*** Commissioner, Department of Urban Development of the Taipei City Government, (Current Post: Director General, Construction and Planning Agency, Ministry of the Interior), TEL: +886-2-87712350, E-Mail: cpa1209@cpami.gov.tw.

一、前言

基本地形圖測繪為國土基本資料建置項目之一，提供國土保育、規劃、防救災、民生經濟建設等高度共通性圖資。而一千分之一地形圖屬大比例尺圖資，原則上以都市土地（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。內政部鑑於一千分之一地形圖為辦理都市計畫、土地重劃、公共管線、防救災、土木、水利及交通等業務之參考現況資料，亦是國家重大政策建設規劃時所需之重要基礎資料，對於國土資訊系統發展亟具重要效益，自87年度起以「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，對推動國土資訊系統基礎圖資建置，已有相當之成效（內政部，2013）。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」，目前一千分之一地形圖測製方式是以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（Unmanned Aerial Vehicle）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，相當適合作為地形圖局部重測的航拍取像系統。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航拍影像在航高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），且顏怡和等人（2012）已經針對定翼型UAV影像立體測圖之精度提出探討。然定翼型UAV用於都市地區之航拍取像時，因其若以汽油為飛行動力來源有其安全性之考量，且其需要跑道起降；而旋翼型UAV因以電池為飛行動力來源，且可垂直起降、機動更強，更能安全地應用於都市地區航拍取像進行局部重測千分之一地形圖。而國內至今尚未有人研究探討旋翼機UAV航拍影像是否適用於局部重測都市區千分之一地形圖，因此本研究以內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」逐一探討各重要工作項目，最後並根據實驗結果做出結論與建議。

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（Eisenbeiss, 2004; Bendea 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）；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（Patias et al., 2007）、數值地形模型（Haarbrink and Eisenbeiss, 2008; Eisenbeiss and Zhang, 2006）及三維模型建置、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，甚至可提供建物牆面紋理（Pueschel et al., 2008）。

應用UAV影像製作地形圖的相關試驗中，Li et al.（2008）以定翼型UAV酬載焦距35mm的專業數位SLR相機，以平均航高350公尺航拍取得北京海淀區Beianhe鎮1.5平方公里區域地面解析力8公分之七條航帶前後約60%重疊、左右重疊約35%的56張影像，以一般航測標準設置20個全控點、12個高控點完成符合大陸1/2000之空中三角測量（簡稱空三）平差精度，即空三平差於控制點平面精度0.16公尺（符合容忍誤差0.50公尺）以及高程精度0.06公尺（符合容忍誤差0.22公尺），檢核點平面精度0.10公尺（符合容忍誤差0.88公尺）以及高程精度0.16公尺（符合容忍誤差0.38公尺）；研究中以102個外業實測點驗證所繪數值線畫圖（Digital Line Graphic, DLG）之精度，平面均方根誤差 ± 0.246 公尺可滿足大陸1/2000數值線畫圖DLG之精度。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24mm的Canon 450D 數位相機，以平均航高800公尺航拍取得地面解析力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，其平面精度 ± 0.385 公尺、最大誤差0.792公尺；以及高程精度 ± 0.230 公尺、最大誤差-0.577公尺，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與檢核點之數量；完成空三後以航測軟體進行地形圖繪製，透過比較RTK測量特徵位置和高程測量點坐標誤差，在18張圖上共336點的最大位置誤差1.66公尺、點平面平均誤差0.57公尺；以及在12張圖上共113點的最大高程誤差1.70公尺、點高程平均誤差0.62公尺，說明可滿足大陸丘陵區1/2000製圖精度。Chen et al.（2012）以UAV酬載Canon 5D Mark II所組成的四合成相機組以地面解析力10公分，航拍取得山西地區12條航帶、1024張影像，以106個全控點完成空三加密點，其平面均方根誤差0.21公尺、高程均方根誤差0.35公尺；13個均勻分布檢核點X、Y、Z方向均方根

誤差分別是0.209公尺、0.182公尺、0.261公尺滿足大陸1/1000製圖空三精度；最後以GPS測量15個測區明顯的地物點其X、Y、Z方向均方根誤差分別是0.236公尺、0.223公尺、0.303公尺（相當平面0.325公尺、0.303公尺）說明立體繪製的DLG數值線畫圖符合大陸1/1000製圖之精度。國內則有顏怡和等人（2012）探討定翼型UAV影像完成自率光束法空中三角測量後立體測圖之精度。該文中使用非量測型數位相機航拍地面解析度0.11公尺之影像，經自率光束法空三平差，平差結果也符合精度要求，然而在測圖階段，模型邊緣影像品質仍影響測圖精度，目前初步經由測繪人員測試，航帶間重疊區域不同航帶所測得之地形圖差異較大，但也符合1/5000測圖標準。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中以顏怡和等人（2012）之試驗結果為基礎下，以花蓮縣壽豐鄉以及花蓮壽豐新豐平大橋附近各約300公頃範圍依基本圖測製規範之作業流程辦理基本地形圖測製，作為區域基本圖更新應用。但上述試驗是以1/5000基本圖為研究對象。

綜合上述，國內外尚未針對探討以旋翼型UAV影像局部重測都市區千分之一地形圖進行相關研究與探討，因此本研究以此為探討對象，以下分別介紹研究方法、結果分析與探討、以及結論與建議。

三、研究方法

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，以量測型數位相機測製一千分之一數值航測地形圖作業流程如圖1。

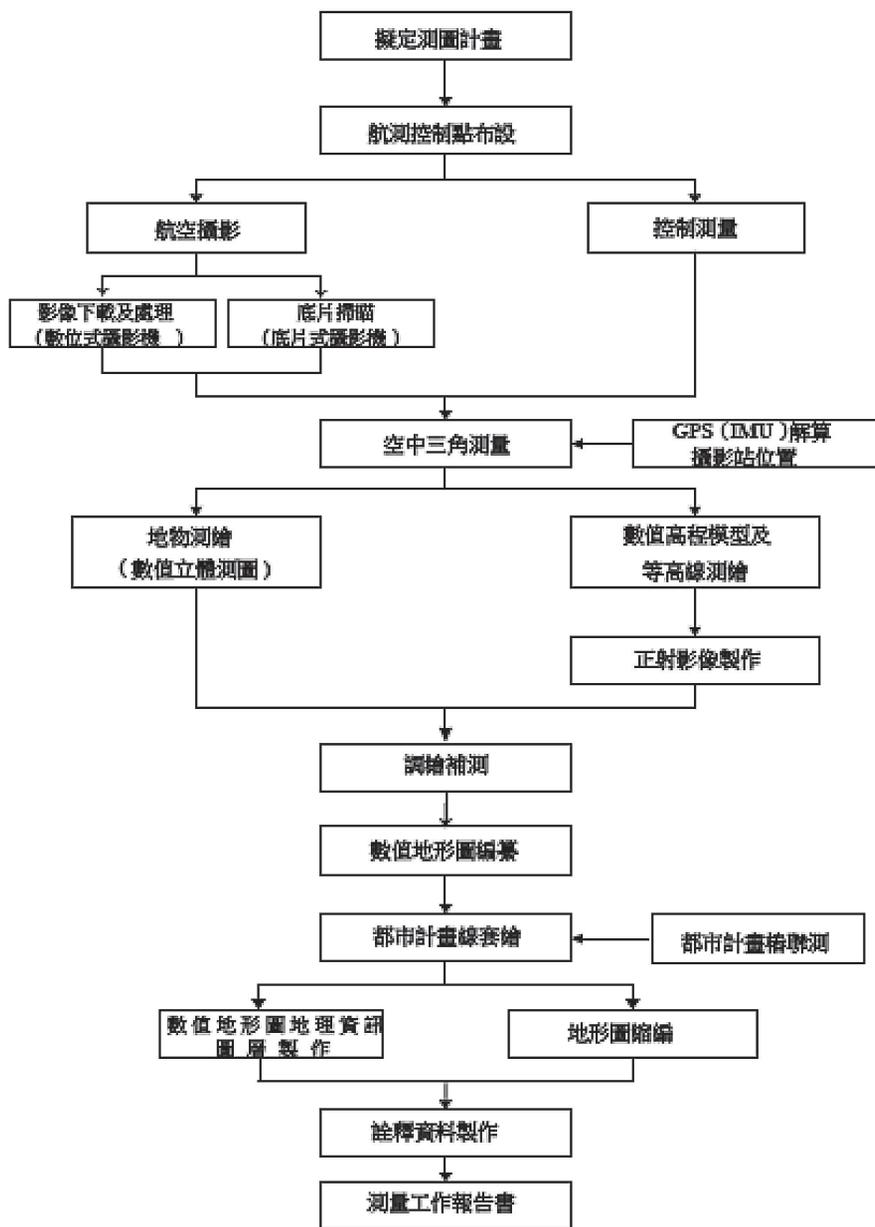


圖1 一千分之一數值航測地形圖測製作業流程 (內政部, 2010)

而本研究嘗試以旋翼型UAV酬載非量測型數位相機航拍取影，探討取得之影像是否能局部重測都市區千分之一地形圖，而其關鍵工作項目在於：一、擬定測圖計畫；二、航測控制點與檢核點佈設；三、航空攝影；四、控制點與檢核點測量；五、空中三角測量；以及六、立體測繪地形地物（亦即數值立體測圖）。因此，本研究針對上述關鍵工作項目，提出研究方法並進行探討。

（一）擬定測圖計畫

1. 考慮國內現有UAVS（Unmanned Aerial Vehicle System）的性能下選擇適合都市區航拍作業的UAV航拍取像系統。
2. 以UAV航拍取像系統航拍攝影前，先依據1/1000地形圖所需之精度、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攝影計畫，航線方向以南北、東西為原則，航線間相鄰影像重疊率（左右重疊）40%；航線內相鄰影像重疊率（前後重疊）為80%。

（二）航測控制點與檢核點佈設

1. 本研究佈設全控點與全檢核點，全控點分布位置乃以規劃完之航線與影像範圍涵蓋圖，將其佈設於測區（空中三角測量區域平差之測區）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）。若控制點不足處，則考慮以該區製作千分之一地形圖時已完成空中三角測量平差之航拍影像進行立體量測控制點（稱點特徵之航空影像控制資訊（control information）），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；全檢核點則至少五點自然點並平均分布於測區內作為空三平差檢核點，以確保空三成果。
2. 空中三角測量佈設之全控制點需透空度良好，其上空對天頂四周應有40度以上之透空度，並於UAV航拍取像前在點位上設置對空標誌（以下簡稱空標），做為空中三角測量控制之用。
3. 空標之尺寸應配合航高、立體測圖儀量測標尺寸及測圖精度等條件之考量，以立體測繪時可清楚辨認為原則。中心標採方形，中心標在影像上尺寸介於2個至4個像素（pixel）之間。翼標之寬度與中心標之邊長相等，長度則為寬度之2倍以上。本研究所規劃之空標如下圖所示：

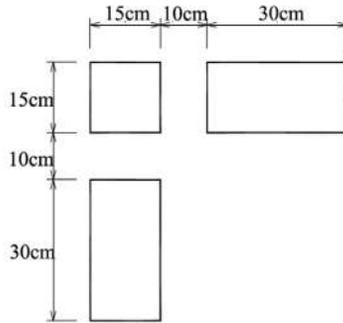


圖2 本研究所規劃之空標

(三) 航空攝影

1. UAV所酬載的非量測型數位相機，必須是全片幅單眼數位相機，2000萬像素以上，且須經過率定。考量透鏡畸變差大部分來自輻射畸變差（Clarke et al., 1998），率定項目至少包含焦距、像主點坐標、及透鏡畸變差。本研究採用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所佈設由8個黑點所組成的20個黑白的率定標（詳如圖3），並以自率光束法平差解算相機參數。

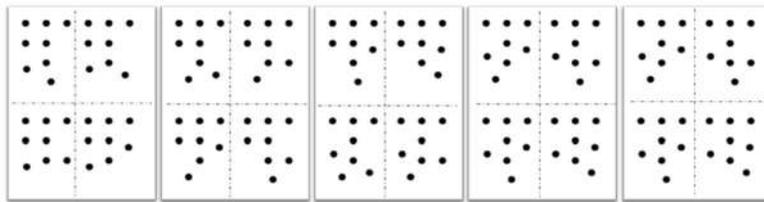


圖3 iWitnessPRO使用的20個黑白率定標

iWitnessPRO軟體率定的相機參數中包含內方位參數，以及七個描述鏡頭畸變所產生之影像變形的附加參數，所率定之參數分別描述如下：

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

iWitnessPRO所採用的附加參數數學模式如下方程式（1）（Fraser, 1997）：

$$\Delta x = -x_0 - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}r^2 k_1 + \bar{x}r^4 k_2 + \bar{x}r^6 k_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2 \bar{x}y + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y}$$

$$\Delta y = -y_0 - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}r^2 k_1 + \bar{y}r^4 k_2 + \bar{y}r^6 k_3 + 2P_2 \bar{x}y + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 \dots\dots\dots (1)$$

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

- 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
 Δc ：像主距之改正量

為精確求得相機參數，iWitnessPRO軟體使用手冊中建議相機需設定所需的影像解析度（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標之間的高差位於15~20公分之間；先設定好欲進行3D量測的焦距；依據設定好的焦距以及成像的距離設定標的大小；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）。

2. 以UAV航線規劃軟體規劃航線，航線方向以南北或東西為原則，並視地形狀況斟酌決定，航線設計必須確保涵蓋整個測區範圍。
3. 地面像素解析度（GSD）需小於10cm。
4. 攝影方式採垂直連續攝影，攝影軸傾斜角小於8度，航偏角小於10度，各航線前後應於測區外各多拍攝2個像對。航線間相鄰影像重疊率40%；航線內相鄰影像重疊率（前後重疊）為80%。
5. 航拍時機應儘量選擇晴朗無雲或雲高高於航高，無嚴重煙霧濛氣，能見度良好，且太陽高度大於30度以上時進行攝影。但UAV因具雲下飛行航拍之特性，因此，若能取得清晰影像供後續製圖，則應不受此限制。

（四）航測控制點與檢核點測量

1. 控制點測量

本研究設置全控點進行空中三角測量平差計算，其平面及高程坐標測量如下：

- (1) 平面控制點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。
- (2) 高程控制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)。

2. 檢核點測量

本研究設自然點為檢核點，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成果。所測高程以內政部公告之大地起伏模式改正為正高。

(五) 空中三角測量

UAV所酬載GPS及AHRS (Attitude and heading reference system) (即Inertial measurement unit, IMU) 其精度不足以輔助空中三角測量 (內政部國土測繪中心, 2011)。因此，本研究使用光束法區域平差進行空中三角測量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)，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航拍影像之空中三角測量採用自率光束法空三平差方式，需選取可執行此功能之航測空三軟體，本研究選取Socket Set ORIMA航測軟體，其自率光束法空三平差採用的附加參數模式如下式 (2) Brown物理模式 (Brown, 1976)， Δx 、 Δy 為描述像點的系統誤差，基本上可視為像坐標的函數，以18個參數所描述，而參數間近乎正交，以避免多數參數間高度相關。

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

$$+\frac{x}{f}[c_1(x^2-y^2)+c_2x^2y^2+c_3(x^4-y^4)]$$
$$+d_6x+d_7x^2+d_8x^2y+d_9xy^2+d_{10}x^2y^2 \dots\dots\dots (2)$$

- 其中， $\Delta x, \Delta y$: 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 : 輻射透鏡畸變差
 b_1, b_2 : 仿射及非正交
 c_1, c_2, c_3 : 底片不平坦
 d_1, \dots, d_{10} : 底片變形及非輻射方向畸變差

而本研究亦以Socket Set ORIMA航測軟體自動化量測空中三角測量所需之連結點：

1. 空中三角測量連結點分布：為求自率光束法空三平差解算之正確性，每片設定9個標準位置，每一標準位設定自動匹配9點，設定點量測精度，粗差偵錯後每一標準位至少需6點以上，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。
2. 空中三角測量平差計算，先以最小約制（或自由網）光束法平差進行大錯去除，之後再進行小約制（或自由網）自率光束法平差，並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約等於1像元，在坡度達IV級以上之山地或植被覆蓋達IV級之林地約等於1.5像元，坡度之定義詳見《建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊》附錄三附件3（內政部，2010）。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），自率光束法平差之自率參數至少應包含1.檢定焦距（Calibrated Focal Length）：CFL；2.像主點坐標（Coordinates of Principal point）： x_0, y_0 ；3.透鏡之輻射畸變差。

（六）立體測繪地形地物（數值立體測圖）

本項工作與內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」之作業規定相同。以數值航測影像工作站製作數值高程模型、等高線測繪、及立體測圖。測圖前先將各地物、地類、地貌以分類編碼，並依其性質分層施測。地物、地類、地貌之分層分類參照「基本地形資料分類編碼說明」進行分類編碼，其圖式依內政

部頒佈之「基本地形圖資料庫圖式規格表」規定辦理。一般作業原則、細部測繪原則與內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」作業規定相同。

五、結果分析與探討

本節針對上節所述影響旋翼型UAV取得影像是否能夠局部重測都市區千分之一地形圖的關鍵重要工作，逐一對其工作成果探討分析。

(一) 擬定測圖計畫

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 × 1Km，地表平均高程約20公尺。



圖4 試驗區

基於安全性、機動性及易操作性因素，本研究使用多旋翼UAV，如圖5所示。



(a) 機身



(b) 遙控器



(c) 地面控制站

圖5 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UAV特性（剛鈺，2012）如下表所列：

表1 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV特性

載具淨重：5500g（含電池）	飛行輔助系統：AHRS, DPH, DFC
最大載重：2500g	GPS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	

AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV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。該多旋翼UAV所採用的Canon EOS 5D Mark II 非量測型相機（見圖6）。



圖6 Canon EOS 5D Mark II單眼數位相機

(二) 航測控制點與檢核點佈設

本研究依據第三節所述布設控制點與檢核點，其分布情形如圖7所示，含19個航測控制點、15個自然地物的檢核點：



圖7 控制點與檢核點分布圖（藍色十字標為控制點；黃色圓圈O為檢核點）

(三) 航空攝影

多旋翼UAV酬載的非量測型相機，經iWitnessPRO率定之後相機率定參數如表2所示，iWitnessPRO率定報告中顯示自率品質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）。由上描述可知以iWitnessPRO近景方式率定成果良好無誤。

表2 Canon EOS 5D Mark II相機率定結果

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 像主點偏移 x_p, y_p (mm)		-0.0593, -0.1212
Radial Distortion 輻射畸變差	K_1 (mm^{-2})	1.3230e-004
	K_2 (mm^{-4})	-2.2379e-007
	K_3 (mm^{-6})	-1.5571e-011
Decentering Distortion 離心畸變差	P_1 (mm^{-1})	7.2189e-006
	P_2 (mm^{-1})	-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

航空攝影前先以多旋翼UAV航線規劃軟體規劃，以像元地面解析度為4.5公分，航線間相鄰影像重疊率（左右重疊）40%；航線內相鄰影像重疊率（前後重疊）為80%，規劃之航高離地高約200公尺，所規劃之航線如下圖8。



圖8 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV航線規劃軟體規劃航線圖示

本研究於西元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，當天作業情形如圖9所示，共花費約3小時順利完成航拍取像，共取得如圖10所示之7條航帶，共147張影像，的確顯示UAV雲下作業的特性。



(a) 系統安裝



(b) 操作起飛

圖9 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV航拍作業情形



圖10 AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV航拍取像成果圖示

本次航拍取像結果約每隔10張選取1-2處明顯道路標線（如下圖11所示），共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 ± 0.095 像元，顯示本次航拍影像品質佳。

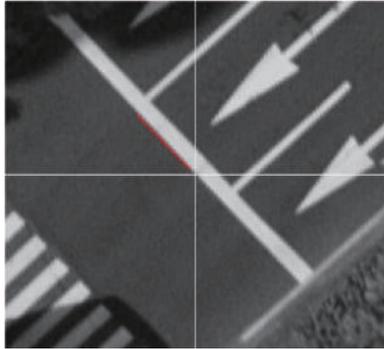


圖11 所選明顯道路標線計算MTF模糊參數位置示意圖

由本次航拍取像經驗顯示，UAV飛航之條件，除在天候許可（不一定要艷陽高照）以及周遭環境未有GPS干擾源下，於安全性考量下選擇抗風性佳的UAV可酬載性能佳的數位相機獲取MTF模糊參數小於1個像元的航拍影像，才能供影像空中三角測量使用。而就飛航能量而言，AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAVS可於三小時內取得試驗區的影像，若再將航高升到300公尺，應可更快速取得試驗區之影像。就目前執行狀況而言，若能選擇合適之起飛點（以能目視UAV載具為原則，該起飛點未必需位處制高點），在氣候不影響下，且UAV不受干擾之情形下，每天應可航拍製作兩幅1/1000地形圖範圍之影像資料。就整體而言，此次所選AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV表現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12所示，此乃由於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。

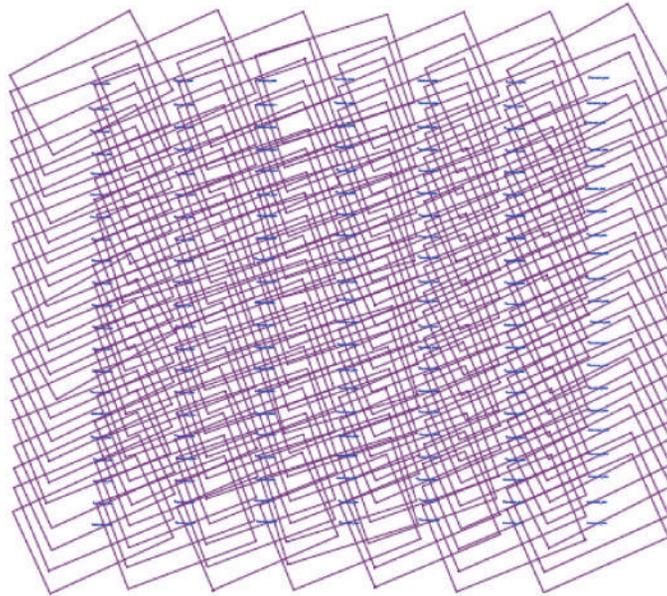


圖12 UAV取像後航帶中相鄰影像前後重疊與航帶間影像左右重疊之情形圖示

(四) 航測控制點與檢核點測量

本次布設控制點與檢核點，其分布情形如圖7所示，含19個航測控制點、15個自然地物的檢核點。由第三節第(四)小節中所描述之航測控制點與檢核點測量方法所測得之控制點與檢核點坐標如表3和表4所示，其中表3中控制點P11、P14兩次RTK測量坐標空間距離差分別是1.93與1.25公尺，而其餘控制點兩次RTK實測空間距離差均在6公分以內；而表4檢核點C13因遮蔽問題無法施測，檢核點C02、C03、C06、C15兩次RTK測量坐標平面距離差分別是5.53、12.28、3.15與1.97公尺，而其餘檢核點兩次RTK實測坐標空間距離均在7公分以內。而造成表3與表4兩次RTK測量坐標平面距離差大於10公分之原因為建物遮蔽造成有限時段所接收之衛星幾何條件不佳所導致。

表3 控制點測量成果（單位：m）

點名	RTK實測N坐標平均成果	RTK實測E坐標平均成果	RTK實測幾何高H坐標平均成果	直接水準測量正高h	兩次實測空間距離
P01	2778999.460	303468.719	45.124	18.197	0.03
P02	2778954.112	303795.272	38.793	12.067	0.03
P03	2778971.015	304095.501	39.652	12.684	0.03
P04	2778992.050	304346.680	50.624	26.293	0.05
P05	2778788.062	304360.719	39.761	19.457	0.06
P06	2778847.922	303911.001	31.449	11.483	0.02
P07	2778817.786	303667.327	34.514	13.887	0.06
P08	2778670.593	303537.414	32.043	11.484	0.02
P09	2778688.053	303896.161	30.911	10.823	0.03
P10	2778702.374	304506.329	66.079	39.093	0.03
P11	2778474.130	304254.351	30.360	8.690	1.93
P12	2778478.178	303667.188	29.287	9.163	0.03
P13	2778378.851	303601.836	28.282	8.075	0.05
P14	2778399.420	303942.846	28.043	7.993	1.25
P15	2778340.923	304414.589	36.741	9.768	0.03
P16	2778192.187	304443.170	38.203	11.234	0.02
P17	2775247.810	300826.669	28.128	8.735	0.03
P18	2778174.045	303847.493	31.845	7.218	0.05
P19	2778193.838	303537.252	27.191	7.056	0.02

表4 檢核點測量成果（單位：m）

點名	RTK實測N坐標平均成果	RTK實測E坐標平均成果	RTK實測幾何高H坐標平均成果	以大地起伏換算之正高h	兩次實測空間距離
C01	2778967.099	303920.201	38.815	18.815	0.04
C02	2778886.905	304359.907	54.253	34.253	5.53
C03	2778781.942	304027.121	30.761	10.761	12.28
C04	2778902.010	303573.292	36.650	16.650	0.05
C05	2778653.736	303790.765	30.004	10.004	0.05
C06	2778654.805	304136.508	33.355	13.355	3.15
C07	2778513.201	304393.553	36.634	16.634	0.07

表4 檢核點測量成果（單位：m）（續）

點名	RTK實測N坐標 平均成果	RTK實測E坐標 平均成果	RTK實測幾何高 H坐標平均成果	以大地起伏 換算之正高h	兩次實測空 間距離
C08	2778490.607	304113.700	29.207	9.207	0.07
C09	2778589.432	303820.754	29.409	9.409	0.04
C10	2778534.885	303472.813	35.314	15.314	0.03
C11	2778370.352	303732.094	27.733	7.733	0.06
C12	2778379.823	304199.093	28.426	8.426	0.07
C14	2778206.005	304027.188	27.583	7.583	0.05
C15	2778214.769	303698.633	29.932	9.932	1.97

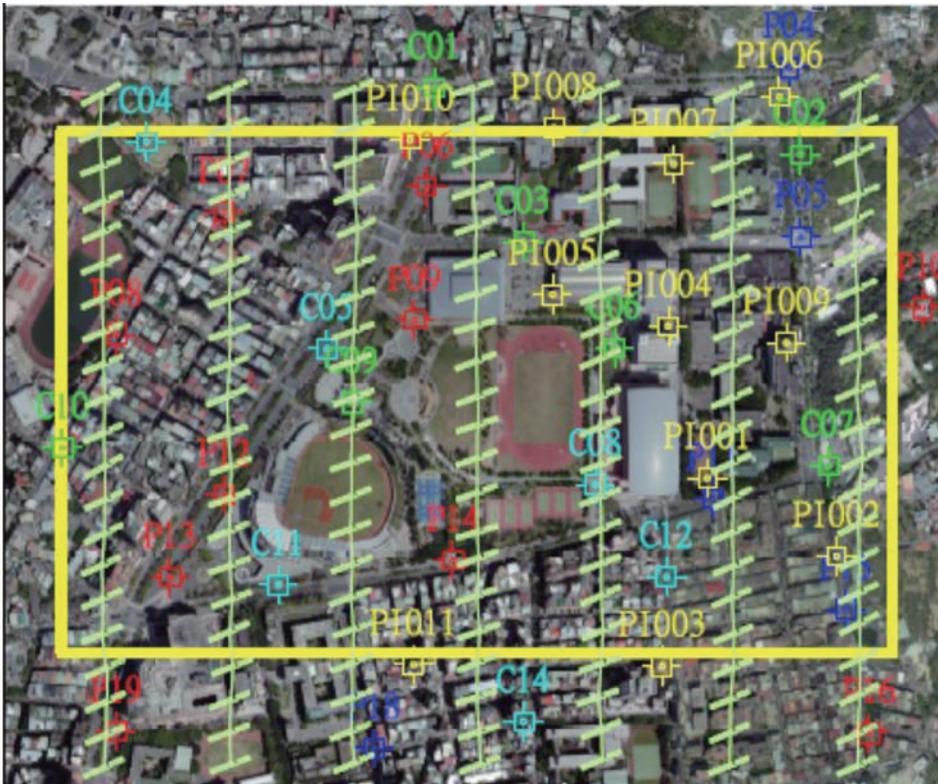
本研究航測控制點及檢核點測量以「數值法地籍圖重測作業手冊」所規定之RTK辦理圖根測量方法施測其平面坐標，然由作業過程中發現RTK接收的衛星訊號受到都市區高樓影響，遮蔽嚴重，造成能施測RTK之時段有限，同時，無線電訊號也因巷弄轉折過多造成訊號遮蔽，主站需多次搬移至適當控制點上才能施測，因此本研究控制點與檢核點測量作業時間約計五天才完成；且部分點位仍未達到RTK施測兩次其坐標空間距離需在10公分之要求，因此針對在都市地區小規模區域之重測，建議將來可採用導線或導線網的控制測量方式，以減少成本，增進效益。

（五）空中三角測量

AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV航拍影像（參考圖10與圖12），共7條航帶，147張影像，進行空三處理，本研究空三平差計算時使用表3中15個控制點及6個檢核點、並引入11個點特徵之航空影像控制資訊，其分布如圖13所示，完成空三。本次除使用布標點外，另由101年度「臺北市3D航測數值地形圖重製工作案」測製作業案中涵蓋試驗區且已完成空三之航拍影像，由立體像對中重複量測三次確定無誤取其平均作為本研究所需點特徵之航空影像控制資訊點坐標。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。

此次空三共匹配4186點模型點，空三時將實測控制點之精度設定為（0.07m，0.07m，0.10m），點特徵航空影像控制實體之精度設定為（0.10m，0.10m，0.20m），像點量測精度設定為6 μ m，執行自率光束法空三平差時的相機率定參數設定如圖14所示，包含像主點（ x_0, y_0 ）、檢定焦距（CFL）以及鏡頭的輻射畸變差（ a_1, a_2, a_3 ）。自率光束法空三平差執行結果如圖15所示，經過七次迭代計算

收斂，權單位中誤差為 $6.2\mu\text{m}$ ，由圖中虛線黑框處顯示並無粗差，空三平差網型如圖16，連結點之N、E、h三個方向的RMSE（即內部精度）分別是0.06m、0.07m、及0.18m；檢核點精度如表5所示，N、E、h坐標之RMSE分別是0.11m、0.09m、與0.31m。化算成平面約0.14m。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。由收斂後之權單位中誤差與先驗設定之像點量測精度相近以及表5檢核點檢核成果說明自率光束法空三平差精度滿足精度要求。



字首英文為P開頭之點號為控制點、
字首英文為PI開頭為點特徵航空影像控制實體、字首英文為C開頭為檢核點

圖13 航拍影像空三控制點與檢核點分布圖

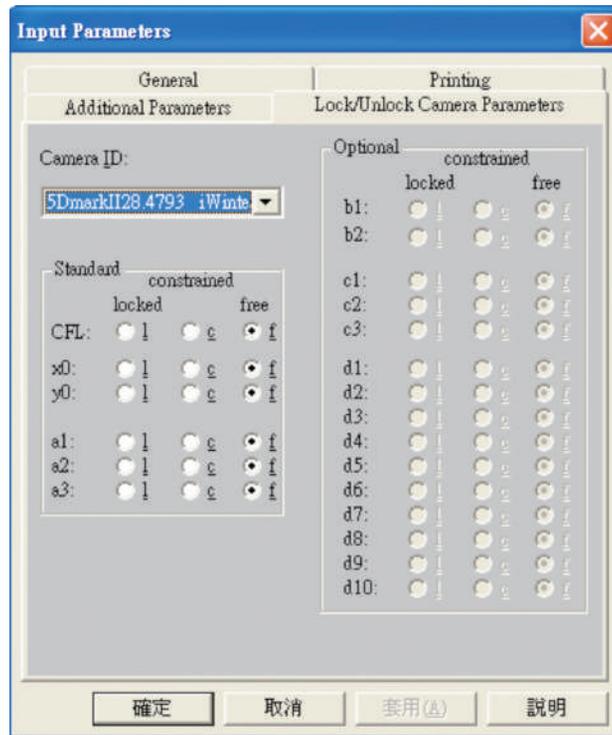


圖14 多旋翼UAV航拍影像自率光束法空三平差相機參數設定畫面

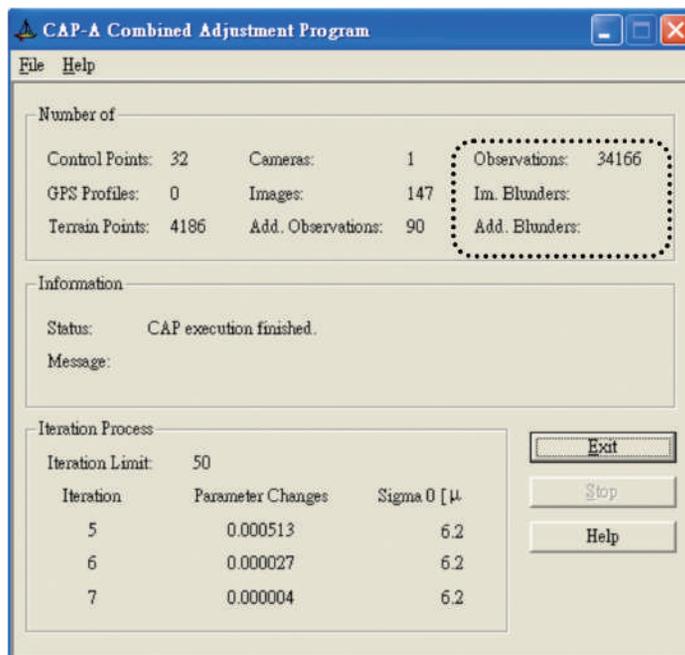


圖15 多旋翼UAV航拍影像自率光束法空三平差執行結果視窗畫面

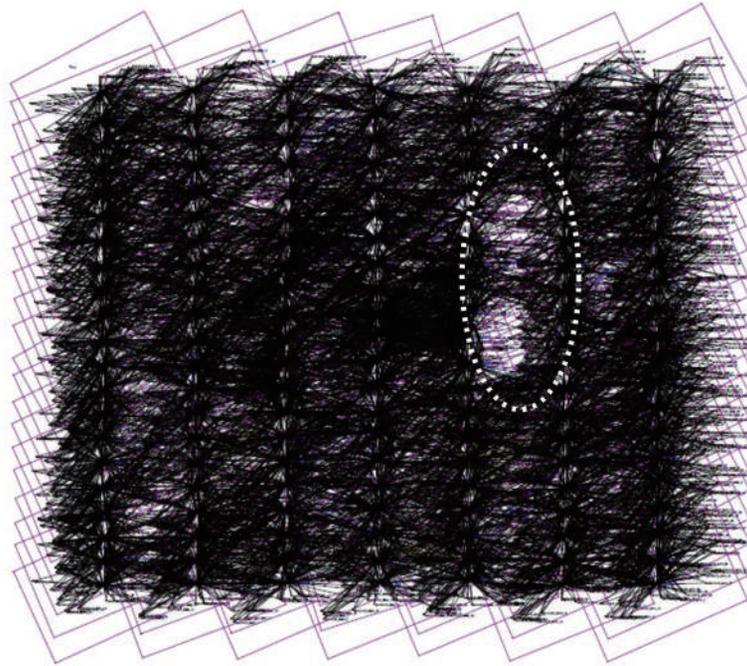


圖16 多旋翼UAV航拍影像空三平差網形圖

表5 多旋翼UAV航拍影像自率光束法空三平差檢核

點號	N坐標較差 (m)	E坐標較差 (m)	h高程較差 (m)
C04	0.24	-0.17	0.34
C05	0.02	-0.05	-0.05
C08	-0.09	0.01	-0.24
C11	-0.05	0.08	-0.02
C12	-0.01	-0.06	-0.38
C14	0.05	-0.09	-0.52
RMSE	0.11	0.09	0.31

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成像於整張影像中的大部分（如下圖），若該樓頂面是均調之影像使得自動匹配發生問題並對平差網形造成影響（見圖15中虛線白色橢圓框處）。

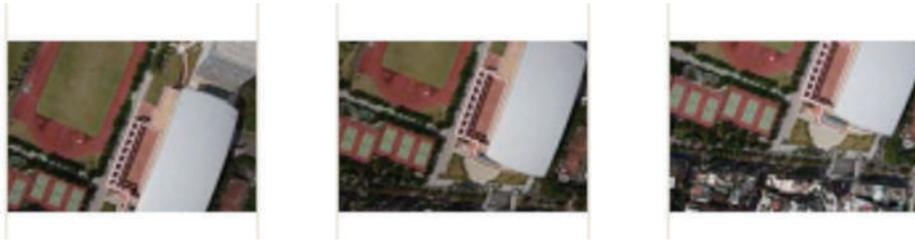
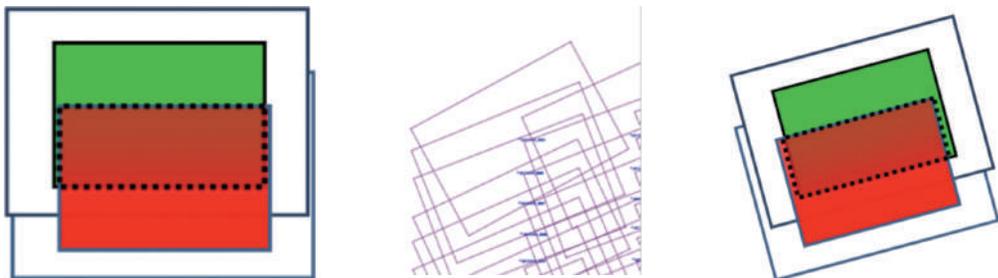


圖17 大型建物的樓頂面成像於整張影像中大部分之示意圖

(六) 立體測繪地形地物 (亦即數值立體測圖)

本項工作與內政部核定之「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」作業規定相同。以數值航測影像工作立體測繪等高線及地形地物。

由於所使用的相機屬非量測型數位相機，雖經自率光束法空三平差解決以近景攝影測量率定所得相機參數無法完全描述以UAV航拍取像時的相機參數問題，但測圖過程中仍發現於整張影像周圍之鏡頭畸變差仍存在且會影響立體測圖作業，因此研究過程中，嘗試以模型的有效測製範圍解決上述問題。所謂模型的有效測製範圍是由每兩相鄰影像以其中心70%涵蓋範圍所組成的模型，如圖18 (a) 是一上下重疊的立體像對所組的立體模型，以第一張影像為中心的70%範圍為淺綠色、以第二張影像為中心的70%範圍為紅色，兩張影像70%範圍重疊的區域 (即圖18 (a) 虛線框所圍之紅色區域) 即為模型的有效測製範圍；然而，由於本次實驗採用之多旋翼UAV航拍影像因航偏角使得像對重疊方式與一般航測影像重疊方式不同 (見圖18 (b))，其原因是UAV上羅盤校正不完整，因此有效之模型測圖範圍如圖18 (c) 虛線框之範圍所示。



(a) 前後重疊影像未偏轉 (b) UAV 航拍影像前後重疊示意圖 (c) 前後重疊影像偏轉某前之有效模型製圖範圍圖示 一角度之有效模型製圖範圍

圖18 多旋翼UAV航拍影像模型有效測繪範圍示意圖

之所以選擇70%建立模型的有效測製範圍可由下圖兩相鄰模型繪製之成果分析之，當相鄰兩模型有效測圖範圍分別為100%、90%、80%、70%、60%時，檢查其有效範圍邊界處（如圖19黑色虛線處）重疊繪製之地物，隨機選取20處（如圖19綠色圈處即為有效測圖範圍70%時所選的位置）重覆繪製之處計算其較差絕對值之平均值，分別為10公分、8公分、8公分、6公分、與6公分；較差絕對值最大值分別是25公分、16公分、19公分、16公分、與13公分；較差絕對值之均方根誤差分別是6公分、4公分、4公分、4公分、與4公分，因此本研究中綜合上述較差絕對值平均值、最大值與均方根誤差分析，以及立製之實際狀況，最終使用每兩相鄰影像以其中心70%涵蓋範圍所組成的模型建立模型的有效測製範圍。圖20即為以70%涵蓋範圍所組成模型有效測製範圍地形地物測繪之成果。

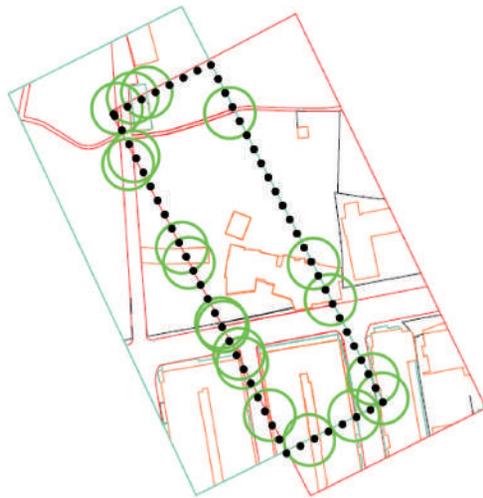


圖19 UAV航拍影像模型有效測繪範圍70%重複繪製處之分析圖示

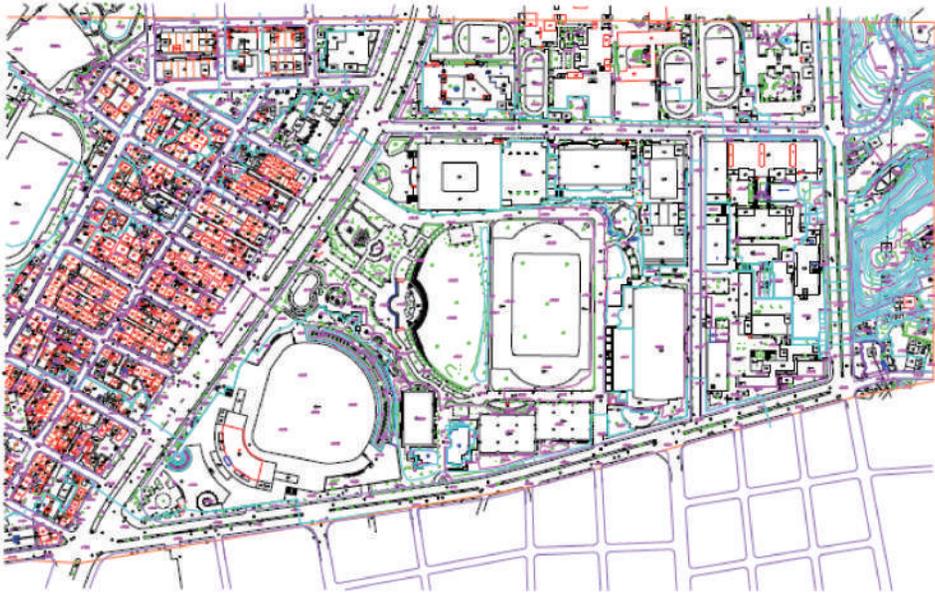
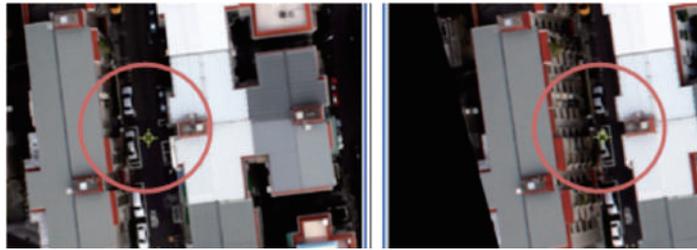


圖20 多旋翼UAV航拍影像地形地物測繪成果

比較量測及非量測相機之航拍影像立製，兩者皆須在立測階段前進行有效測繪範圍規劃，惟非量測型相機像幅小，畸變差較大，規劃時更須細心。本研究以約60%重疊率組一模型，基高比B/H約0.34，共70模型以約1人/月完成地形圖繪製；亦即僅使用一台UAV航拍取像回內業之後，由一人使用一台影像工作站依序於一個月工作天內完成空三（約4天）、製圖（約20天）；然運用量測型數位相機測繪千分之一地形圖時，以焦距91mm DMCII相機為例，航拍取像航高約1200公尺，其地面解析力約10公分，需3模型，同樣以大約1人/月繪製完成地形圖。以UAV立體影像對繪製時僅是每個模型涵蓋較少，較常需要換模進行繪製，然因數位化影像組成之模型時，換模時並不會花費太多時間，因此兩種影像立製所需之時間約略相同。此外，以UAV立體影像繪製時因遮蔽比量測型數位影像所組的立體模型繪製更少，反而會讓後續外業補測之工作量減少。如圖21紅色圈處顯示，UAV航攝影像地面解析度為4.8公分，重疊率80%，市區狹小巷弄遮蔽情況可因解析度較高、獲得較多影像資訊。量測型相機地面解析度為10公分，重疊率80%，相較於UAV影像，市區狹小巷弄遮蔽所獲得影像資訊相對較少。



(a) 狹小巷弄區UAV非量測型相機影像



(b) 狹小巷弄區量測型相機影像

圖21 量測型數位相機與非量測型數位相機狹小巷弄區影像資訊可視比較圖

本研究針對地形圖測製之幾何精度於內業查核時，規劃平面精度查核點約50點、高程精度查核點約30點，平面精度檢核點選擇屋頂點、斑馬線角點、或標線角點等明顯特徵點位置；而高程精度檢核點則選擇不因立體觀測時導致高程變化太大

之明顯特徵點，如平坦路面上之標線角點或操場跑道上標線角點等特徵點，其分布如圖22。內業查核時，除在本研究UAV影像所組的模型上進行量測外，並以同樣查核點位於航測量測型相機航拍取像測製1/1000地形圖的立體模型（簡稱既有1/1000立體模型）上進行重複量測，比對兩者間差異，檢核結果如下表6。

表6 UAV地形圖幾何精度內業查核統計

項目	以UAV影像模型查核			以既有1/1000立體模型查核		
	查核點數	差量 平均值	較差 均方根	查核點數	差量 平均值	較差 均方根
平面精度	51*	0.08m	0.1m	50	0.13m	0.15m
高程精度	31	0.08m	0.09m	31	0.16m	0.19m

註*：有1個原UAV模型平面精度查核點於既有1/1000立體模型上因遮蔽無法進行量測

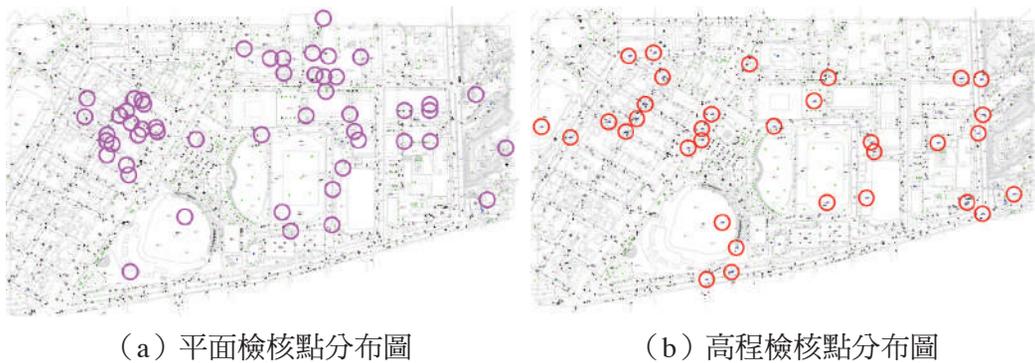


圖22 UAV影像之地形圖精度查核點位分佈

本研究繪製成果檢核（表6）滿足內政部<建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊>附錄4<一千分之一數值航測地形圖成果檢查作業規定>：於立體模型上進行重複量測地物點平面位置及高程，地物點重複量測平面位置與原平面位置之均方根誤差（RMSE）不大於30公分；地物點重複量測高程值與原高程值之均方根誤差（RMSE）不大於所定高程中誤差允許值20公分。

此外，本研究中另以高精度外業實測的高程檢核點以及檢核距離進行精度檢核。共選擇34點位於較平坦之地物特徵點（如道路標線角點），以全測站實際量測其正高與UAV影像測製之高程進行精度檢核，分布如圖23（a），高程較差平均值為-5公分，較差之均方根誤差為11公分。另外亦以外業實測如建物頂樓屋角點間

之距離等共22段（分布如圖23（b））與UAV影像測製之地形圖上對應之距離比較其較差，較差平均值為0.4公分，較差之均方根誤差8公分。以內政部〈建置都會區一千分之一數值航測地形圖作業工作手冊〉附錄4〈一千分之一數值航測地形圖成果檢查作業規定〉而言，以內業檢核時，需滿足抽查點位重複量測地物點間之相對距離與原距離較差之均方根值不大於50cm之規定。且亦滿足抽查點位重複量測高程值與原高程值較差之均方根值不大於作業規定所定高程中誤差允許值20公分，本研究以外業檢核之精度均比內業檢核佳，因此可符合都會區一千分之一數值航測地形圖之精度需求。



(a) 外業實測34高程檢核點分布圖

(b) 外業實測22段檢核距離分布圖

圖23 UAV影像立製地形圖之外業精度檢核點位與檢核距離分佈圖

六、結論與建議

本研究以UAV針對發展快速、變異大的都市地區，進行局部圖資重測更新作業之探討。主要應用多旋翼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，以執行自主飛行並航拍高解析度之UAV影像，供UAV航拍影像重測1/1000地形圖。基本上研究成果由地形圖內業與外業檢核精度可知目前以AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV系統酬載Canon EOS 5D Mark II 焦距28mm鏡頭之全片幅單眼數位相機以航高200公尺進行航拍取像重測1/1000地形圖試驗是可行的，相較傳統航測，雖然UAV影像所需片幅較多、所需控制點也較多；但其優點是航拍時作業快速。以目前研究結果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1/1000地形圖所需MTF模糊參數小於1像元的航拍影像，再以自率光束法空三平差取得航拍影像正確的拍攝位置

與姿態，並解決以近景攝影測量率定所得相機參數不適用的問題，最後才能在模型的有效測製範圍內（目前是以每相鄰兩張影像中心70%之涵蓋範圍所組成）立製測得1/1000地形圖。但整個研究過程發現幾點可供未來工作參考：

- (一) 提高航拍高度：目前以AI-RIDER YJ-1000-HC多旋翼UAV系統酬載Canon EOS 5D Mark II 焦距28mm鏡頭之全片幅單眼數位相機以航高200公尺進行天母地區航拍取像重測一幅1/1000地形圖試驗是可行的，此時像元地面解析度約4.5公分，將來可再以航高300公尺的航拍影像測試。
- (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重測，建議將來可採用導線或導線網的控制測量方式，以減少成本，增進效益。
- (三) 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所得相機率定參數不適用之問題，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。

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，台北：內政部。
- 內政部，2013，基本地形圖資料庫服務入口網站，網址：<http://bmap.nlsc.gov.tw/bmap/ch/>；網頁截取日期 2013 年 1 月 10 日。
- 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，台中：內政部國土測繪中心。
- 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，台中：內政部國土測繪中心。
- 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，台中：內政部國土測繪中心。
- 剛鈺，2012，<http://www.ai-rider.com/>，網頁截取日期 2012 年 11 月 1 日。

- 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。
- 顏怡和、邱式鴻、徐百輝、蔡季欣、林世賢與施錦揮，2012，定翼型 UAV 影像立體測圖之精度探討，第三十一屆測量與空間資訊研討會論文集：中國文化大學。
- Bendea, H., F. Chiabrando, F. Giulio Tonolo, D. Marenchino, 2007, Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site, Paper presented at XXI International CIPA Symposium.1, Athens, Greece, 01-06 October 2007.
- Brown, D. C., 1976, The bundle adjustment – progress and prospects, *International Archives of Photogrammetric and Remote Sensing*, 21. Part 3, pp.01-33.
- Chen, Junqing, Zongjianb Lin, Xiaojing Wang, Yongrong Li, 2012, A APPLICATION OF UAV SYSTEM FOR LOW ALTITUDE PHOTOGRAMMETRY IN SHANXI, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B1.
- Clarke, T. A., Fryer, J. G., and Wang, X., 1998, The Principal Point and CCD Cameras, *Photogrammetric Record*, 16(92): 293-312.
- Eisenbeiss, H., 2004, A mini unmanned aerial vehicle (UAV): System overview and image aquisition, Paper presented at International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery. Pitsanulok, Thailand, 18-20 November 2004.
- Eisenbeiss, H. and Li 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*, Vol. 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. Part B1, pp.1259-1264.
- Horcher, A. and Rien J.M. Visser, 2004, Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring, *Proceedings of the Council of*

- Forest Engineering Annual Meeting-Machines and People, The Interface, 5 pp.
- 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.
- Li, Shihua, 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, Paper presented at 11th South East Asian Survey Congress and 13th International Surveyors' Congress Innovation towards Sustainability, Malaysia.
- Li, Baoping, Xinpu Sheng, Zhiyu Xia, Chengwen E, 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 Sciences*. Vol. XXXVII. Part B1.
- Patias, P., Chr. Saatsoglou-Paliadeli, O. Georgoula, M. Pateraki, A. Stamnas a, 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, Retrieved May 13, 2010 from Photometrix on the World Wide Web: <http://photometrix.com.au/support.html>
- Pueschel, H., M. Sauerbier, 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*, Vol. XXXVII. Part B8, pp.93-98.