

# 無人飛行系統大面積航測精度評估

## — 以小金門(烈嶼)為例

蔡秉宏、林秋芬、黃美甄／國立臺北科技大學土木工程系碩士

張國楨／國立臺北科技大學土木工程系副教授

### 摘要

近年來遙測的進步與電腦計算能力的提升，獲得的資料更準確也更接近真實，影像解析度也從公尺降至公分等級。運用無人飛行系統（Unmanned Aerial System, UAS）搭載消費級相機來拍攝像片，再以攝影測量方式，來建置資料庫，此一應用為近年來學界發展的重點。受限於載具硬體、相機及技術整合等工具的影響，空間資料成果的品質、精度等評估方面的研究，猶仍不足。

小金門（烈嶼）無複雜地形、測區範圍封閉、面積相對大，因此選擇此地點作為大面積航測精度的研究。本研究利用 UAS 搭載相機拍攝像片，藉由像片重疊原理產生立體像對，並給予控制點（Ground Control Point, GCP），來建置小金門地區正射影像與數值地形模型；並再搭配現地 e-GPS、水準，及三邊等測量方式，以獲取真實空間資訊，進而整合並比較真實空間與模型上的差異，期望藉由無人載具所建置出的數值地形模型的精度進行評估，並在未來工程規劃、防災、減災上等不同的需求上，呈現可能的應用。

本研究 UAS 拍攝像片時航線重疊率大於 75%，側向重疊率大於 40%，搭載 Sony QX100 與 QX1 相機，一共拍攝 2735 張像片，建置出地面解析度 10.16 公分影像，全區域面積為 34.16 km<sup>2</sup>，UAS 飛行拍攝像片時記錄像片位置與像片角度，搭配地面控制點利用共線方程式匹配出不同像片上相同點，計算重疊區域影像共軛點坐標，並製作數值地形模型。控制點測量方法為衛星定位虛擬基準站即時動態技術（Virtual Base Station Real-Time Kinematic, VBS-RTK），控制點數量與模型精

度有一定的影響，但是在面積前提下控制點數量增加也反應在成本與時間上，現實上無法將現地布滿控制點，因此本研究主要探討在少量控制點下建置出數值地形模型，再與現地測量成果精度比較，並與既有衛星影像與 UAS 影像進行細緻度比較；UAV 數值地形模型精度優於衛星影像許多，精度方面 UAS 模型與現地測量結果比較，其兩條橫剖面結果之標準差在  $\pm 20$  cm 內，離散檢核點之標準差在  $\pm 50$  cm 內。本研究結果指出在大面積測繪下，均勻分散的控制點分布下，誤差較大點位分布於地形起伏較大的區域，為提升數值地形模型精度，控制點布設需均勻，且於高程起伏落差較大處布設，另外提高像片重疊率與多視角拍攝皆可增加模型精度。在資料後處理方面可以依照需求的精度搭配相機、感光元件、解像力與航高不同排列組合建置出符合需求的解析度與精度，期望在未來執行航拍任務上與建置模型上可以達到最佳的效率。

### 動機目的

由於電子產業的進步使得電子組件趨於便宜與輕量化因此可將無人飛機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）從原本的軍事用途運用到攝影與測繪，此外利用重疊度照片也可以建置出災前災後數值地形模型進行災變探討。又因近年來遙測的進步與電腦計算能力的提升，獲得的資料更準確也更接近真實，影像解析度也從公尺降至公分等級，傳統上判斷相片間相同點位需要以人工方式判斷且非常的費時，而現今電腦計算能力已可以在相同的時間內自動判斷出相同點位。本研究使用無人飛行載具搭載相機拍攝航空像片，利用像片重疊原理產生立體像對，並給予控制點來建置

小金門地區正射影像與數值地形模型。另外，同時搭配現地量測所獲取的真實空間資訊，進一步來比較模型與現地測量的差異，期望藉由無人飛行載具所建置出的數值地形模型，在合理的精度下可以運用到未來工程規劃、防災、減災等工程上的用途。

無人飛行載具飛行時像片拍攝瞬間可以記錄像片的位置與像片角度，搭配地面控制點利用共線方程式自動匹配出不同像片的相同點計算重疊區域空間坐標並製作數值地形模型，而控制點測量方法為衛星定位虛擬基準站即時動態技術（Virtual Base Station Real-Time Kinematic, VBS-RTK），平面與高程精度為公分等級，控制點數量與模型精度有一定的影響，但在大面積前提下控制點數量增加也會反應在成本與時間上，在少量控制點前提下建置出的數值地形模型與 e-GPS 測量成果做比較，探討無人載具建置出來模型精度。

本研究區域為小金門（烈嶼）全區。小金門整個島嶼無複雜地形、測區範圍封閉、面積相對大，因此選擇此地點作為大面積航測精度的研究。小金門於金門本島西側，居於金門與廈門之間，在戰略上可說是外島中的外島，前線中的前線，丘陵及平地各半。圖 1 指示本研究之區域位置。另外因拍攝期間為秋末冬初時間，正處東北季風強盛期，因此執行航拍任務時也有一定的難度。

## 方法與流程

本研究利用無人飛行載具搭配相機對地面拍攝影像，並搭配地面控制點建置數值地形模型，並探討在大面積下搭配少量控制點建置出的模型精度。圖 2 為本研究之執行流程。定翼型無人飛行載具是指具有固定翼的飛行載具，此類載具特點為負重量高與較長的滯空時間。

### 航線規劃及任務執行

執行航拍任務前需事先於室內進行飛航任務的規劃。首先決定拍攝地區範圍後，依所需之影像解析度設置飛行高度，再依航向及航帶間的影像重疊度需求，來產生航線、航點，並使相機在航線上以等時距（或等間距）的方式進行拍攝。航線規劃地圖資料來源為 Google map，其中難免有地形高程的錯誤，所有飛行高度需經過再三的確認，比對每條飛行航線的航高與地形高度剖面，確保飛行安全。航拍任務規劃時，因在室內工作，故僅能先就測區內，以 Google Earth / Map 等影像上找尋可能的起降場地，因此任務執行時，至現地附近確認可行性，並再次以現地地形、地貌及風向等天候狀況，重新設置起飛點及降落點方向、位置飛行任務之調整。事前設備的準備與器材狀況都需要經過仔細檢查，到現場周遭環境植生情形與高壓電塔

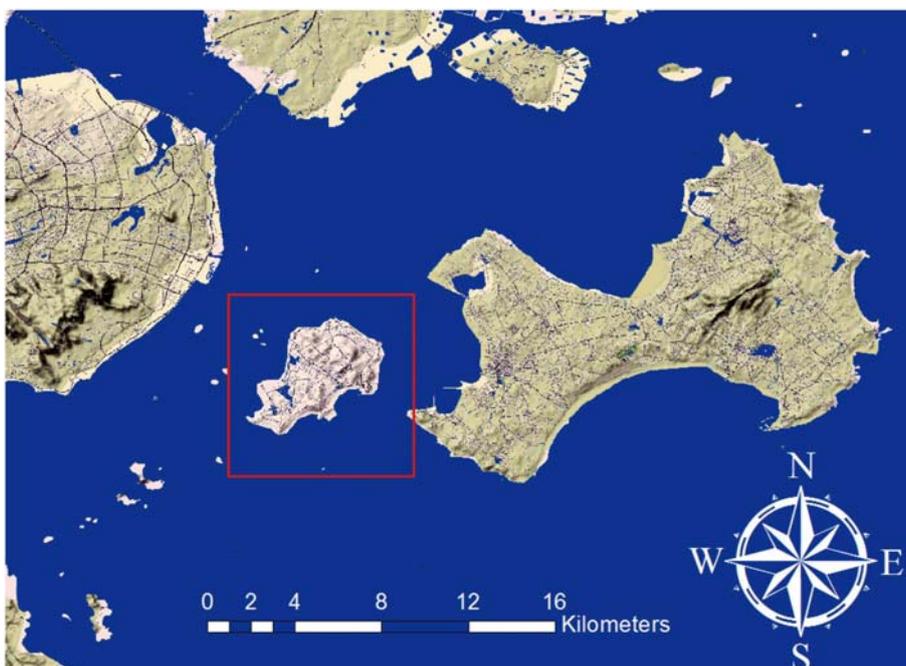


圖 1 小金門地理位置

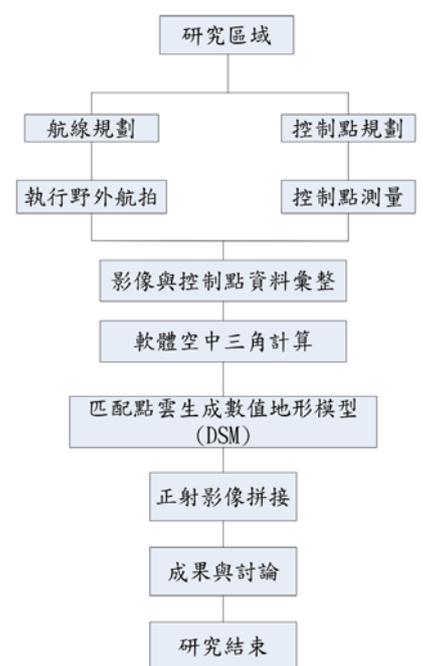


圖 2 研究流程圖

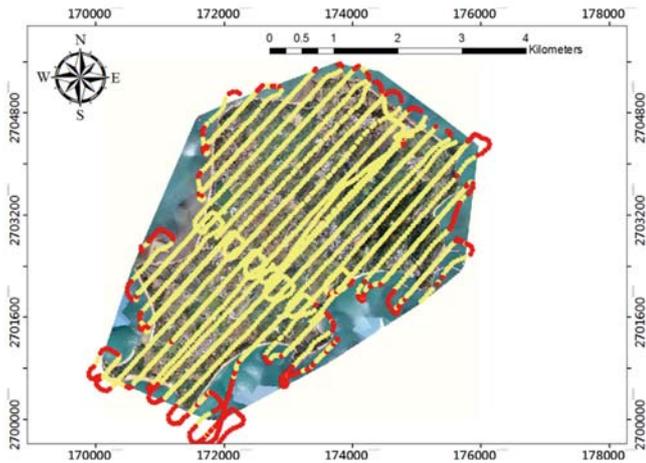


圖 3 小金門任務航線執行成果

或人工高凸建物等都需再次確認評估，除此之外現場光線、風向、風速、周邊地形地物狀況與 GPS 接收狀態皆良好狀況下才能執行飛行任務，使整個飛行計畫與測量工作安全順利的進行！每一航次的航拍任務完成後，直接於現場初步比對拍攝像片數量與品質，並完成像片擷取。

## 現地測量

### 地面控制點

地面控制點 (Ground Control Point, GCP) 是指在地面上已知的平面座標 (X、Y) 及垂直高程的點位 (Z)，因此，GCP 依性質大致分為兩類，平面控制點、高程控制點；平面控制點僅有平面位置 XY 座標的控制點，高程控制點只有高程 Z 座標的控制點，兩者控制點兼具有的即是空間坐標 (X、Y、Z) 的控制點。

航空攝影測量選取地面控制是非常重要的，必須在明顯且易辨識的位置，及在影像和真實地面上都能判釋出之控制點。地面控制點盡量選取於與地面真實高程的位置，可避免點為高程誤差過大，導致建模效果不佳。圖面上清楚可見物之目標大概是以下舉例之項目：(1) 十字路口交叉點 (2) 消防栓、地下水溝蓋旁 (3) 道路的交角和轉折處 (4) GPS 量測點、航空標等。

尋找地面控制點的方法有三種，第一種方法是利用像片判識，在圖上找尋控制點的方式來獲得坐標的資訊。此方法會因像片或人為判識上的誤差，使精度也可能相對較差。第二種方法是點之距 (point of distance)，以現地測量方式配合空中三角計算，得知

像片中心點座標與位態後，再均勻推算配置於像片上明顯點位同時也是連接點之座標，而這些推算的點即為點之距，使用上精度較單用像片基本圖來的高。第三種方法是現地量測，利用測量儀器到目的地去量測航照上找到的外方位點位的資料，精度也比上述兩種方式提高不少，本研究控制點數量為 12 個，飛行任務之前直接先於地面上上漆，並以 e-GPS 現地測量而測得。先行於地面布設，可方便航拍過程中，影像上直接可視，並方便人工點選。本研究之控制點分布位置如圖 4 所示，布置情形示例如圖 5，各點位之坐標列如表 1。

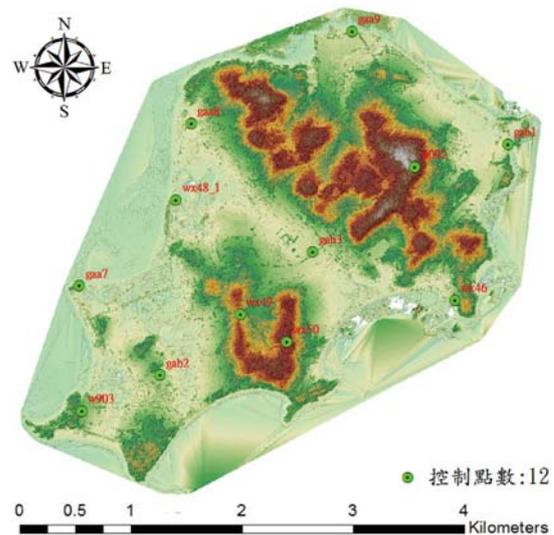


圖 4 控制點分布



圖 5 本研究中現地控制點布設示例

表 1 本研究之控制點坐標 (TWD97/TM2 zone 119)

點位	N	E	Z
GAB3	173391.011	2702791.183	37.197
WX46	174997.461	2702238.605	22.088
GAB1	175592.592	2704019.889	16.841
GAA9	173837.356	2705311.404	20.435
W092	174542.214	2703759.91	97.112
WX48_1	171845.808	2703382.347	14.67
GAA7	170755.909	2702401.832	14.455
W903	170780.250	2700969.419	27.9
GAB2	171663.392	2701381.668	22.298
WX49	172576.778	2702078.39	45.178
WX50	173098.398	2701761.428	62.744
GAA8	172023.11	2704260.761	18.398

### 檢核點測量

檢核點在本研究主要目的為分析無人飛行載具所建置出數值地形模型與現地真實測量的誤差，並藉以分析誤差原因，本研究檢核點分為剖面測量與離散點位測量。剖面測量採用水準測量與 e-GPS 測量，由於水準測量觀測誤差較大，故同時也採用 e-GPS 測量方法，本研究檢核點剖面使用逐差水準測量施測，利用前後視關係求得現地高程資料。離散點則完全採用 e-GPS 方法進行量測。檢核剖面及離散檢核點分布位置各如圖 6 及圖 7 所示。

現地測量結果為確認其精度及誤差、並考慮可接受的人力，本研究一共進行兩次剖面測量與離散點 e-GPS 的現地量測，兩次的測量成果，其平面與高程誤差都在 ± 10 公分以內。



圖 6 檢核剖面分布

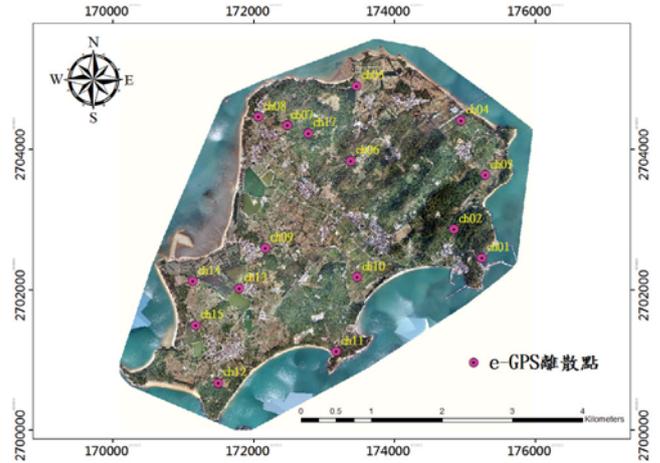


圖 7 離散點位分布

## 研究成果與討論

### 數值地形模型建置成果

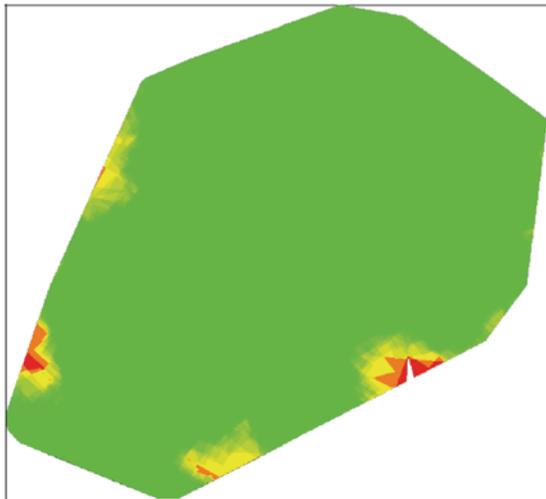
本研究使用 UAS 搭載 Sony QX100 相機拍攝。影像之空間重疊度，為一航拍任務規劃及成果的指標之一，圖 8 指示研究區域內之影像重疊度，全區內每一小區內，其影像數均大於 5 張，局部區域少於 3 張者，均為陸域範圍以外之區域，不在本研究範圍。全區之數值地面模型 (DSM) 建模之解析度約 10 公分，圖 9 指示本研究之 DSM 建模成果，局部區域之水體有較大之三角網格的區塊，不在研究範圍內。圖 10 為小金門地區所拍攝影像建置之全區正射影像。模型基本資料列如表 2 所示。

表 2 模型基本資訊

影像數量	2735 張
航高	450 m
地面解析度 (GSD)	0.1016 m
相機類型	Sony QX100
坐標系統	TWD97/TM2 zone119
涵蓋面積	34.1589 km <sup>2</sup>
特徵點 (keypoint)	57620 per image
匹配點 (matching)	1457.6 per image

### UAS 與衛星影像建模成果比較

本研究因小金門地區之空間資訊 (如 1/1000 地形圖或空載光達資料) 取得不易，故使用 UAS 所建置之 DSM 與衛星影像所建置之 DSM 比較，其中 UAS 建置出來的 DSM 解析度為 0.1016 公尺，衛星影像為



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

圖 8 區域重疊照片數量

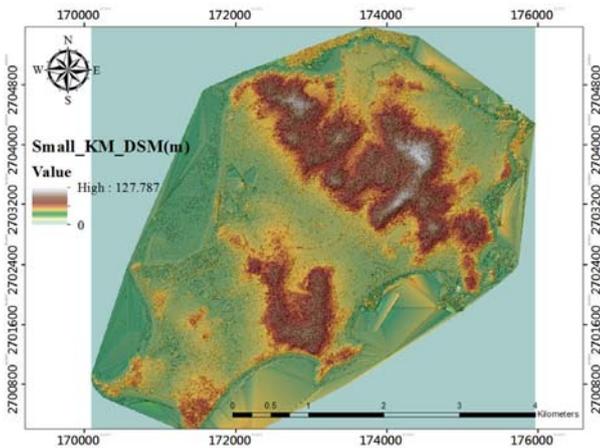


圖 9 小金門 DSM

0.61 公尺，影像解析度上有六倍之差距。兩種影像建模成果如圖 11 所示，在全區的尺度上，兩者似無差異，但細部放大後，清楚呈現兩者在空間的解析度及精確度的極端差距。圖 12 為小金門地區垃圾掩埋場，衛星影像匹配出來的模型在掩埋場邊緣輪廓上不是規則的逐層堆疊，已不是真實現況，而 UAS 建置出來之模型輪廓與真實狀況雖有些許錯誤但整體來看是貼近真實狀況的。圖 13 為小金門西南方上歧市區，在衛星匹配模型上明顯無法判斷是居住的市區，只有不規則的起伏，UAS 建置出模型由於屬低航高飛行因此解析度提升，建物等輪廓清楚。圖 14 則呈現 UAS 影像建置出來的模型在不同幾何形狀下，忠烈祠四周圍、邊界處、台階都可清楚判斷出來，呈現資料建置之合理性。

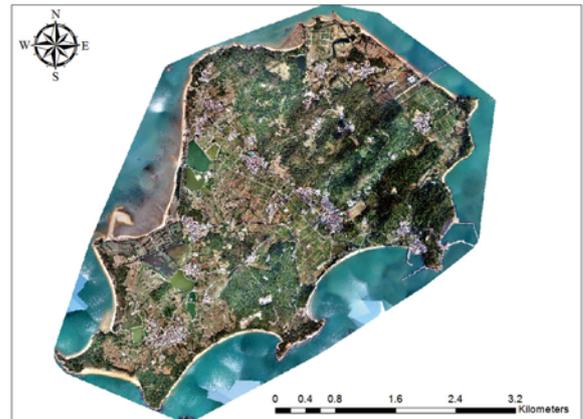


圖 10 小金門地區全區正射影像成果

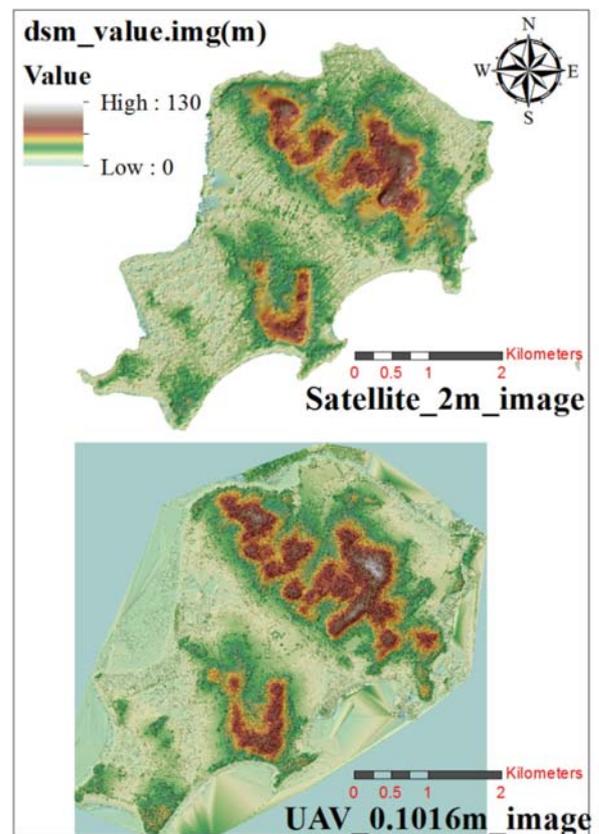


圖 11 衛星影像與 UAV 影像 DSM 比較

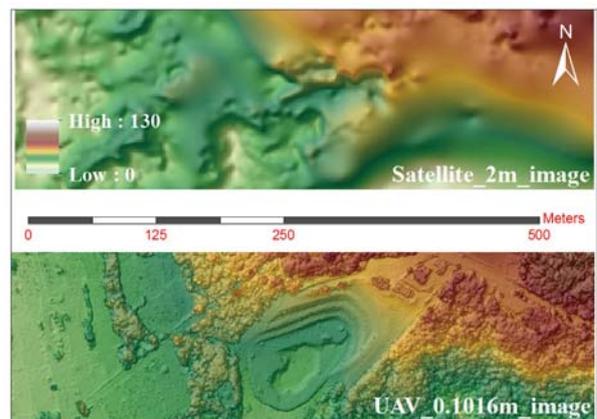


圖 12 垃圾掩埋場附近 DSM 成果對比

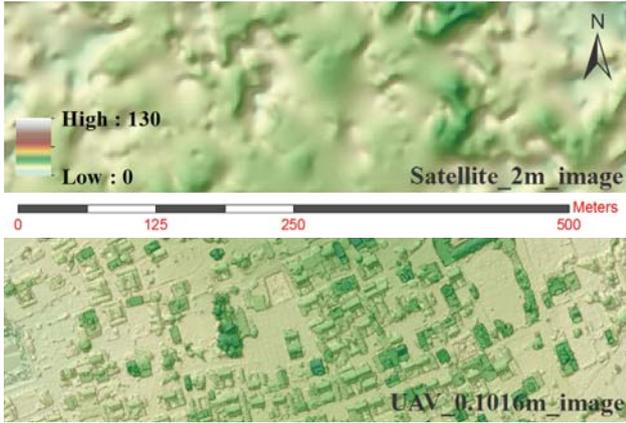


圖 13 小金門上歧市區附近 DSM 成果對比

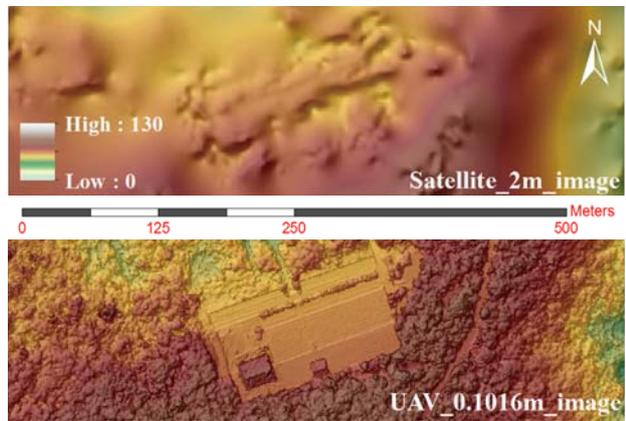


圖 14 小金門忠烈祠附近 DSM 成果對比

### 控制點本身測量誤差

DSM 需要搭配控制點來提高整體精度，前提是控制點精度也要夠高才能比較模型精，本研究利用兩次不同時間之 e-GPS 測量結果進行控制點測量誤差評估，雖然針對同樣的點位進行量測，兩次控制點之高程標準差為 0.121 公尺，雖然對於 DSM 建模精度分析之要求或已然足夠，但就檢核點之高程檢核對比，表示已先可能存在 12.1 公分以上誤差，因此若檢核之結果高於 0.121 m，則指示了模型建模的真正誤差。另外，由於 WX46 點位選點不當，上方有樹木遮蔽，控制點測量較難收斂至固定值，導致高程誤差達到 0.27 公尺，故本點不列在討論之誤差。其他更高精度的測量結果，如靜態差分 GPS 量測，將是更高精度模型檢核的不二方法了。兩次測量成果差異比較如圖 15 及表 4 所示。

表 4 前後期控制點高程量測誤差（單位為公尺）

較差上限	較差下限	平均誤差 (MEAN)	均方根誤差 (RMSE)	標準差 (STD)
0.270	-0.136	0.007	0.124	0.121

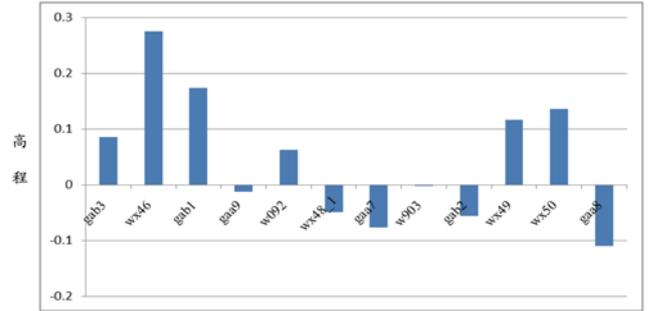


圖 15 控制點兩次 e-GPS 量測之高程差異

## 模型誤差分析

### 離散檢核點位

檢核 DSM 分為點、線，其中點的檢核共 16 個點位，均勻分散在整個測區，其分布位置如圖 6 及圖 7 所示。本研究之 DSM 建模成果與離散檢核點之高程標準差為 0.785 公尺。其中誤差最大的點位是 ch11，高於 e-GPS 測量 2.143 公尺，查核影像及模型後，因為該點位在很多林木間，所攝得之影像無法兼顧各角度，造成軟體匹配錯誤提高誤差的狀況，將此點濾除後標準差為 0.49 公尺。e-GPS 於固定解下測量時高程誤差為 ± 10 公分內，前後期控制點標準差為 12 公分，表示 12 公分以上的誤差量是可以被求出的，故進行離散點與剖面的檢核測量。

表 5 濾除錯誤點後之 DSM 成果高程誤差（單位為公尺）

較差上限	較差下限	平均誤差 (MEAN)	均方根誤差 (RMSE)	標準差 (STD)
0.568	-1.059	-0.414	0.647	0.495

### 剖面測量結果高程差

A-A' 剖面及 C-C' 剖面之 e-GPS 測量結果與 DSM 模型建模後之高程剖面可以明顯看出模型與 e-GPS 測量成果非常貼近，但模型略有些許雜訊或錯誤，差異較大處分別是雜訊、樹木遮蔽等影響，其中編號 88 點位車輛臨停在該點位上，故進行照片匹配時車輛高度

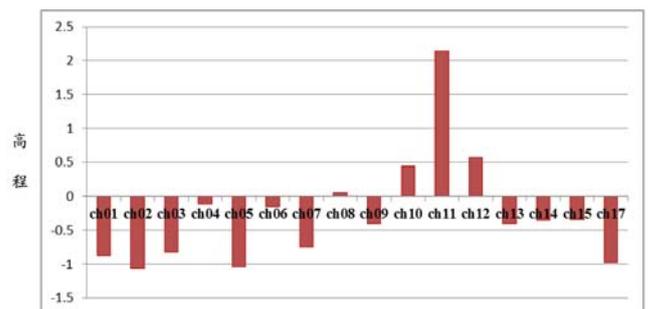


圖 16 DSM 成果之離散檢核點檢核高程誤差比較

已取代道路高程，故後期檢核點測量無事前規畫作業以避開點位而造成高程的錯誤，濾除錯誤點位後，剖面高程差值之標準差約在 0.261 公尺。C-C' 剖面有兩處高程起伏劇烈位置，亦分別是雜訊、車輛影響，同樣去除錯誤點位後，剖面高程差值之標準差為 0.246 公尺。兩剖面之差值分析各列如表 6 及表 7 所示。

表 6 A-A' 剖面測量與模型高程誤差 (單位為公尺)

較差上限	較差下限	平均誤差 (MEAN)	均方根誤差 (RMSE)	標準差 (STD)
0.239	-0.853	-0.113	0.284	0.261

表 7 C-C' 剖面測量與模型高程誤差 (單位為公尺)

較差上限	較差下限	平均誤差 (MEAN)	均方根誤差 (RMSE)	標準差 (STD)
0.583	-0.424	-0.052	0.252	0.246

## 結論

1. 本研究呈現以無人飛行系統可達一般測量之目的及需求。全區 DSM 高程誤差之標準差，於剖面檢核點為 0.25 m，離散檢核點為 0.495 m，以此精度，於少

量控制點的情形下，大面積的測量有其實用之處。

2. 正射影像與 DTM 品質取決於點雲進行三維匹配，建物與樹木邊緣垂直部分因較少不同角度像片造成邊緣有雜訊狀況。
3. 控制點的分布比起數量來的重要，均勻分布外，位於高程起伏較大區域也需布設控制點。
4. 控制點位置規劃需位於空曠無遮蔽地區，以免造成軟體匹配的錯誤。

## 建議

1. 可以依相機、航高等不同排列組合建置出不同解析度模型以利後續工程不同階段使用。
2. 大面積區域檢核測量應事先確認測量方法與誤差影響，以免造成成果不佳。
3. 由於缺少精確資料，本研究之高程資料為自行施測，並進行前後兩期的資料比較，但現地測量結果顯示了現在測量即存在不小的誤差。建議可以更精密的測量結果來確立控制點及檢核點本身的精度，以利更精確的建模精度評估。

# 超越

是我們的驕傲 臺中洲際棒球場多功能運動中心

