財團法人中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS,INC.
中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

應用無人載具航拍及非常規攝影量測進行土石流三維地形重構

王天佑*　蕭震洋**

摘　要

土石流潛勢區域上游料源區與堆積區之實際狀況，為判斷未來是否會再度發生類似災害之重要參考，然而，由於安全顧慮，常無法取得良好之地形與影像資料可供判釋時參考。本社過去數年來，應用慣性量測（IMU）技術，開發半自主飛行之無人載具，針對土石流潛勢溪流進行航拍作業，並利用航拍所得之影像，以非常規攝影量測組建三維地形，使工程師能進一步掌握潛勢區域上游之實際狀況。本文即針對土石流潛勢區域之航拍重點、本社無人航拍載具之發展過程、應用技術與三維地形重構等實例進行介紹。

關鍵字：無人載具、航空攝影、慣性量測單元、非常規攝影量測

一、緣　起

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊邊緣，先天地質條件普遍不佳，再加上每年平均受三至四個颱風直接襲擊，暴雨、洪澇等氣象災害發生頻率亦高。近年來由於全球氣候變遷之影響，氣象災害愈演愈烈，在可見的將來，臺灣地區劇烈氣候之發生強度與頻率僅會繼續增加，伴隨著來的山崩、土石流等現象，亦將成為臺灣山坡地區域未來潛在之重要威脅。

有鑑於此，本社 2004 年起於大地工程研究中心增設防災科技組及水文地質組，專司地震、土石流等天然災害之致災因子與防治技術之開發研究，後獲經濟部中央地質調查所及農委會水土保持局之肯定，於 2006 年起陸續委託進行『易淹水區域集水區水文地質對坡地穩定之影響』、『土石流潛勢地區易致災因子調查』等工作，逐年進行臺灣各地區之坡地穩定與土石流之研究與調查。2012 年起，亦因相關業務之擴增，將原來之防災科技組擴增為防災科技研究中心。

在崩塌地、土石流潛勢區域之現場調查、風險評估與防災規劃等系列工作中，潛勢區域之影像為十分重要之紀錄。災害剛發生時，災區之影像可作為救災及災區重建之依據；料源區與堆積區之實際狀況，更為判斷未來是否會再度發生類似災害之重要參考。惟山崩、土石流等災害發生時，常因道路中斷，現地探勘之困難度甚高，尤其是影響最鉅的土石流上游料源區、堆積區等，更因土石鬆軟等安全顧慮難以取得良好之全景照片進行整體狀況評估。

*　中興工程顧問社大地工程研究中心高級研究員
**　中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員

中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

拜遙測（Remote Sensing）技術之賜，衛星影像與傳統飛行器航空攝影照片可提供相當具有說服力的參考實證。但即使目前影像品質較佳的IKONOS、Quick Bird 等衛星，其解析度也僅能達到 50~70 公分左右，對於研判土石流料源區岩體破裂狀態、風化程度等，仍嫌不足；傳統飛行器航空攝影之影像解析度雖較一般衛星影像為高，但成本亦相對高昂，遇較狹窄峽谷亦有安全高度上之限制。因此，通常係以購買既有之遙測影像資料，針對過去歷史變遷進行比較研究的方式為之，除非重大緊急災害（例如莫拉克風災等），才可能出動航空器進行空拍攝影。對於土石流潛勢區域之常態性調查、災後即時影像資料之蒐集以及歷史變遷資料之累積作業，利用較低成本，機動性高的無人載具空拍，似為唯一可行之路。

水保局為國內土石流之主管機關，自 2007 年起，藉由委託本社執行的『土石流潛勢地區易致災因子調查』工作，每年選取 20 處土石流潛在區域，進行無人載具航空攝影工作，其目的在藉此航拍工作，嘗試發展高機動性、低成本之航拍用無人載具，以及航拍影像資料之可能應用方向。本文綜整過去數年之無人載具開發過程、控制技術、空拍成果經驗以及未來發展方向等主題，逐一進行說明。

二、山坡地土石流調查之程序與目的

水保局自民國 80 年起即陸續開始進行土石流潛勢溪流之調查工作，2002 年將全省 1420 條可能致災之土石潛勢溪流公布並建檔管理。水保局之土石流現地調查程序如圖 1 所示。其主要之目的在於：

1. 基本資料之確認與更新：由於侵襲臺灣之颱風次數頻繁，各河川流域集水區地形地貌變化劇烈，為掌握土石流潛勢溪流之最新狀況，除確認已建置之基本資料正確性外，同時亦須將因近期各土石流潛勢溪流之變化予以更新。
2. 土石流潛勢溪流易致災因子描述：影響土石流發生之因素包括：潛勢溪流之溪流長度、集水區面積大小、區內地層與岩性描述、崩塌面積、崩塌區位上游區坡度、崩塌規模、流動段堆積材料破碎情形、植生生長狀況以及潛在災害類型等，這些資訊可協助估計土石流災害發生之可能性、規模及衝擊力。

圖 1　水保局土石流調查之流程

3. 保全對象、現有防治設施與災害現況：此部分調查內容包含崩塌地、溢流點之識別、定位、地形、警告標誌檢核、鄰近保全對象種類、可能受災方式及住戶檢核等。同時需將整治設施現況、整治成效及改善方法建議等做成紀錄，如發生坡地災害，則需記錄其區位、類型、植

被、規模、殘土狀況、災害現況描述等資訊。若現地需要進行整治，則需提出整治建議，依治理權責單位不同予以區分，並估算所需工程經費。

4. 防災資訊表建置及避難處所檢核：防災資訊表之目的在於當坡地災害發生時，採取應變措施所需之各種基本資訊，其內容包括村里聯絡人資料、避難處所、直昇機起降處、警消單位、醫療單位等之名稱、地址、聯絡電話、定位及照相等相關訊息，災害通報單位則有名稱及聯絡電話等相關資料。同時，各避難處所之便利性、空間大小、附屬設施、避難設備亦須加以檢核。

土石流潛勢溪流調查中，除蒐集衛星影像、航空器航照以及地質圖等基本資料外，利用無人載具空拍可取得之影像資料包括：

1. 土石流潛勢溪流集水區分布：集水區大小、傳輸路徑、保全對象、現有整治設施以及聯絡道路等較大尺度之位置關係影像。
2. 料源區：料源區坡面之形狀、尺寸、破壞形式、岩性、不連續面分布、風化狀況、植生狀態分布以及現有水位等資訊。
3. 流動段及材料堆積區：除非具明顯之谷地、窪地等地形區分，土石流動段與材料堆積段並不易區分，其拍攝重點包括材料種類、粒徑分布、流動斷面幾何條件、流動面及崩塌可能性等資訊。
4. 整治措施現況：整治措施位置是否合適、上游土石堆積狀況、結構物損壞情形等。
5. 災損情形：土石流衝擊、淹沒區與保全對象之關係、受損程度、淹沒範圍等。

依據上述需求，採用不涉及人員安全顧慮、機動性高、成本較低之無人航空載具進行拍攝工作，最佳拍照距離設定於距目標物約 50~500 公尺處，每處土石流潛勢溪流之全景可由多張相片進行後製合成，這些影像資料定義為中低空近景航拍影像，可提供後續研判、分析、整治措施改良與防救災策略研擬之重要參考與實證。

三、無人航拍載具之功能設定與選擇

無人航空載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）一詞出現於 1917 年，早期 UAV 之研製及應用範圍主要在軍事用途，作為戰場上偵查、連絡之用，後隨科技進步，成本降低，各種感測元件、動力及無線操控設備的不斷問世，民間才得以發展以遙測、廣告甚至休閒娛樂為目的之無人航空載具，目前世界各國已發展之各用途 UAV 類型已高達數百種之多，如以飛行機制區分，UAV 大致可分為定翼機及旋翼機兩大類。

定翼機為最常見的航空器形式，基本構造如圖 2 所示，機身兩側分置一對固定式主翼，動力設備提供向前的推力；機翼提供浮力；升降舵控制機身俯仰角度；方向舵控制左右方向；機身之左右平衡則由副翼控制。定翼機係人類模仿鳥類飛行所設計出之型態，係自然界中最符合空氣動力學的飛行方式，具有耗能小、巡航半徑大等先天優勢，即使在無動力狀況下，也具有優異的滑翔能力，除此之外，尚有製作容易，成本低廉等優點，惟其缺點為必須不斷前進，不能滯留於空中、飛行速度受航向順逆風之影響甚大、降落時須適當之場地以及體積較大等等。

圖 2　定翼機構造示意圖
（摘自模型飛機之空氣動力學）

旋翼機則以直升機為主要之代表，傳統直升機之飛行操控主要靠主旋翼之攻角及轉速作升降控制，並藉主旋翼旋轉面的前後左右傾斜，控制機身移動之方向。其優點為可垂直升降，不受地

中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

形限制以及可滯留於空中定點等，但耗能較大，巡航範圍受限、機械傳動方式複雜（圖 3）、維修不易及操作困難等問題，係其揮之不去之缺點。

圖 3　模型直升機之機械傳動部件

四軸機（Quadrocopter）或多軸機等形式（圖 4）即為克服傳統直升機機械傳動複雜及操作方式不易之缺點所發展。多軸機基本上係以由機身突出之各軸上馬達馬力輸出之差異來控制機身之姿態及前進方向，由於全機除馬達、螺旋槳外無任何可動機械元件，控制及維護相對容易。配合裝置於機身之自動控制系統，除可大幅降低操作難度外，可進行位置鎖定甚至自動導航等能力。

圖 4　Microdrone 四軸機（摘自原廠網站）

目前在國際上已投入商業生產之多軸機，包括德國 Microdrone 公司、加拿大 Draganfly 公司等，國內亦於 2011 年推出第一套由國人自行開發設計之多軸機 AI-Rider，惟其售價均為台幣近百萬甚至數百萬之等級。

針對土石流中低空近景航拍作業，對於 UAV 之需求大致可歸納為：

1. 經濟性：依據過去數年來，本社承辦水保局土石流調查之經費核算，每條土石流潛勢溪流平均調查經費，包含人員差勤、交通、住宿等僅約在數萬元之譜，如航拍費用過高，將不敷調查成本。
2. 機動性：土石流常發生於較偏遠的山區，通常僅有產業道路通達，有時甚至需溯溪數小時才能抵達崩塌區域，考慮到山谷地區氣流不穩定，機體耗損難免，因此適用之 UAV 體積不宜過大，應以一般小型車輛即可運送二組 UAV 機體以及所有相關設備為宜。
3. 拍攝目標及品質：UAV 在空中拍攝時，需配合無線視訊監控設備，在地面控制載具姿態以瞄準拍攝目標，相機應具有基本防震及高速快門，解析度以八百萬像素以上為宜。
4. 飛行條件：定翼機飛行時空速宜低，以爭取較多拍攝時間。定翼機拍攝一目標時，通常須循航道迴轉數次拍攝，故迴轉半徑宜小，滯空時間宜長，每次飛行不得少於 20 分鐘；旋翼機由於無需迴旋即可拍攝任何角度，故滯空時間可較短，但亦不應低於 10 分鐘。
5. 操控技術門檻及維修：山區氣流常不穩定，對飛行操控技術要求甚高，即使熟手操作，亦常有耗損發生，因此 UAV 維修宜便捷，並可加裝適當之電子設備以保持飛行穩定性。

定翼機與旋翼機適用時機不同，在不同目的之應用上各有優劣，本社開發無人載具初期，係選用飛行穩定性高，製作及維修相對較容易之後推式高翼機（圖 5）。其上搭載相機、姿態以及 GPS 等感測器，以遠端遙控方式操作，同時將飛

行時之數據及影像以無線方式回傳至地面站。任務執行時由兩人協同作業，操作手負責飛行操控，拍攝手則依據回傳之影像，提供操作手飛行路徑、姿態調整建議以及掌握拍攝時機。

圖 5　定翼機近景航拍系統示意圖

由定翼機進行航拍之結果顯示，土石流災害發生後之上游料源區（圖 6）照片可清楚辨識植被分布、岩盤位態、風化程度及土石料堆積狀況；全景照片（圖 7）亦可清楚表示土石流流徑、崩塌面與保全對象、整治措施間之相對關係，這些影像均表現出中低空近景航拍之特色。

然而，定翼機飛行時之穩定性決定了相片品質；是否能順利降落回收載具更為耗損成本控制之主要因素，因此操作手之操控技術扮演了十分重要的地位。開發初期低估了飛行操控技術之困難度，負責操作之同仁於河濱公園完成飛行起降訓練後，即開赴現場作業。但土石流航拍工作多在地形多變之險峻峽谷內進行，山區氣流非常不穩定，不甚熟練的操作常造成飛機及器材之損毀，不得已下僅能外聘飛行技術熟練的操作手與社內人員搭配作業，即使如此，仍因氣流、機械等因素，每年耗損約 1~2 套空拍載具。由這些經驗可知，飛行操控為航拍成本控制之關鍵，如能降低對操作手技術要求之門檻，應能大幅提升無人載具航拍之經濟效益。

適逢多軸機於市場上逐漸出現，機上搭載之感測器及自動飛控設備，在毋須人為操作下，即能停滯於空中定點，似為解決之道，為測試此方式是否能有效降低操作門檻，本社於 2009 年向加拿大採購 Draganfly X6（圖 8）半自主旋翼式載具，藉以評估其在中低空近景航拍之適用性。

圖 6　屏東好茶村土石流料源區（2007/8/7）

圖 7　那瑪夏鄉瑪雅村（2008/10/7）

圖 8　向加拿大採購之 Draganfly X6

中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

Draganfly X6 之機身折疊後可由單人攜行所有設備（圖 8 右上），2010 年 9 月份在完成基本飛行適應訓練後，即赴神木村上游崩塌地進行實地測試，測試結果發現，該機在側風較小時（6~8m/s 以下）確能發揮自動穩定之功能，操作亦十分容易；但因其馬達動力偏低，在風速較大時，馬達輸出之動力差即無法將機身繼續維持水平而傾覆。該問題其實以更換動力較大之馬達並調整韌體控制參數即可解決，但因該機之零件、韌體、調整等技術完全由原廠掌握，無法自行修改，且國內無法取得維修零件，輕微故障即須送回原廠整修，單運費即高達數萬元，且至少耗時數週以上。此種後勤模式使該機不適於作為土石流常態性調查航拍作業之載具。為解決後勤維修問題，本社亦曾多次與國內 AI-Rider 等廠商合作進行現場測試，雖證實了多軸機在影像取得及操作方面的優勢，但因成本高昂、商用產品無法依本社計畫之需求進行功能修正，應用範圍受限等問題，使外購航拍用載具一途，停留在功能堪用但應用彈性及經濟性均不甚理想之地步。

近期隨著智慧型手機之蓬勃發展，微機電（Micro Electro Mechanic System, MEMS）感測器及其應用技術之精度及功能提高且價格不斷下滑，本社電子試驗室亦曾以微控制器（Micro Controller Unit, MCU）及 MEMS 技術開發了系列土木工程監測設備（王天佑等，2010），為解決多軸機之應用彈性限制等問題，亦於 2011 年起，投入多軸機飛航控制系統之研究。

四、飛航控制及導航系統

懸浮在空中的直升機或多軸飛行器，可進行三軸平移及旋轉等六個自由度的運動，但在空中隨時受到側風、慣性力等影響，如欲保持其於固定位置懸浮，必須隨時修正其推力方向與姿態，使其維持在巧妙的平衡狀態，如以手動操作，操作手必須隨時調整機身之動態平衡，困難程度可想而知，若交由高速運算之 MCU、感測器及適當的演算法來維持此動態平衡，操作之難度即可大幅降低。為達此目的，正確地姿態偵測及回饋控制為不可或缺之關鍵技術。

（一）姿態及位置偵測

載人或無人飛行載具通常係藉由慣性量測單元（Inertial Measurement Unit, IMU）進行姿態、運動與位置之偵測，IMU 之主體通常由三軸加速度計（Accelerometer）以及陀螺儀（Gyroscope）所構成。

加速度量測之方法很多，較簡單之設計為應用壓電效應（Piezoelectricity）原理（圖 9 左），當感測器受到加速度時，慣性力使重物向壓電晶體施加垂直應力，壓電晶體即輸出隨該應力線性變化之電壓，如此，三組相互垂直之壓電晶體即可量測三軸向之加速度，而各軸向之速度及位移量亦可藉由量測所得之加速度積分求得。另外，假設載具靜止或成等速運動時（無額外加速度），僅有重力加速度作用其上，當機體呈特定角度傾斜，則可由（1）式求解其傾斜角度。

$$\begin{pmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{Xx} & \cos\alpha_{Xy} & \cos\alpha_{Xz} \\ \cos\alpha_{Yx} & \cos\alpha_{Yy} & \cos\alpha_{Yz} \\ \cos\alpha_{Zx} & \cos\alpha_{Zy} & \cos\alpha_{Zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad \ldots(1)$$

上式中 $(a_X, a_Y, a_Z) = (0,0,g)$；$g$ 為重力加速度；a_x, a_y, a_z 為量測到之各軸加速度，α_{Ii} 為世界坐標系 (X,Y,Z) 與機身坐標系 (x,y,z) 各軸夾角，亦即載具之傾斜角度。

（摘自維基百科）

圖 9　壓電加速度計（左）及傳統陀螺儀（右）

早期的陀螺儀由高速自轉的輪子所構成（圖 9 右），基於角動量守恆原理，該轉輪之轉軸將維持恆定，藉由量測轉輪與機身之相對角度變化量，即可推算機身之角速度。傳統轉輪式陀螺儀因體積大、機械複雜等因素而式微，現代之 MEMS 陀螺儀改採傅科擺（Foucault Pendulum）、光纖、共振或轉動離心力等原理進行設計，大幅減少了體積及造價。

傳統 IMU 設計理念係以提高各感測器之精密度來降低誤差，惟精密度之提高通常意味著高昂的造價，除軍事或載人航空器等用途外，通常難以負擔。UAV 用小型 IMU 則採取另一策略，整合多組精度較低之感測器數據，透過演算法降低其誤差量，卡爾曼濾波（Kalman Filter, Kalman R.E.,1960）演算法即為箇中翹楚。

卡爾曼濾波演算法利用兩組以上，含噪訊但彼此獨立之輸入訊號，這些訊號可藉由線性方程求取相同輸出物理量，該演算法假設在有限時間範圍內，造成各訊號誤差之原因不同且隨機常態分布，則其大部分誤差均可透過比較兩者之物理量預測值予以消弭，進而推測最佳之輸出物理量。例如機身之傾斜角度可分別以陀螺儀角速度積分以及加速度計以（1）式求解計算之，陀螺儀之飄移（Drift）誤差主要肇因於積分；而加速度計之誤差係由機體當時所受之外力造成，兩者誤差原因不同，發生時機不一，透過卡爾曼濾波演算法比較其計算結果，即可求出誤差較小之傾斜角度估計值。該估計值之精確度，可隨感測器、誤差來源之獨立性、取樣精度與頻率之增加而提高。藉由卡爾曼濾波演算法，UAV 即可在其 IMU 上裝設多個平價感測器，推求相對高精度之動作資訊。例如本社所開發之航拍載具，即整合三軸加速度計、陀螺儀、氣壓式高度計、超音波高度計、電磁羅盤以及 GPS 等 14 個頻道之感測器，以多層卡爾曼濾波演算法推求機身之三軸傾斜角度、速度、位移以及坐標等資訊，配合 20Hz 之量測頻率，其推算之位移精度即可維持在大約數十公分等級，足以提供作為飛航控制之用。

（二）回饋控制與自動修正

多軸機之飛航控制遠較傳統單軸直升機單純，以具備前後左右四個馬達的四軸機為例，若四個馬達的總推力等於總重量時，恰可懸浮於空中，若總推力大於總重，高度即爬升，反之亦下降。若欲讓往前飛，則將前馬達轉速降低，後馬達轉速提高，使機身前傾，再回復四馬達之相等推力，即可保持該前傾角度向前推進，左右飛之原理亦相同。

當機身停懸空中定點時，理論上機體須維持水平狀態，若因外力作用使機身傾斜時，則須加快下傾端之馬達轉速，同時並降低上升端之轉速，但隨機身角度之變化，各馬達轉速亦須因應新的角度隨時調整之，在自動控制理論中，PID 控制器（Proportional - Integral - Derivative Controller）恰適用於此狀況。PID 控制器係根據感測器之讀值與目標值之差異量 $e(t)$、對時間之積分及微分值，分別乘上一個比例係數後之總和，作為輸出值，如（2）式所示。

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e(\tau)d\tau+K_d\frac{d}{dt}e(t)\ldots\ldots(2)$$

$e(t)$ 為特定時間 t 下，目標值減感測器之讀值，亦即差異量；$u(t)$ 為輸出值；K_p、K_i 及 K_d 則分別為針對差異量、差異量之積分及微分加權調整之比例係數。由（2）式可知，當差異量越大，K_p 所造成的影響越大，因此 K_p 可視為反向力調整係數；K_i 則考慮過去修正之綜合影響，其作用類似阻尼係數；K_d 則為依據上次時階（Time Step）調整值預測下次時階差異值之比例係數。

多軸機對飛航之控制，不外乎姿態、運動方向以及位置鎖定三者。利用 PID 控制姿態時，即利用 IMU 所測得之機身姿態角度作為輸入值及目標值，各馬達之轉速為輸出值；控制運動方向時，則利用各軸之速度作為輸入，機身傾角作為輸出；鎖定位置時，則利用三維坐標作為輸入，各軸之速度作為輸出，如此以 PID 控制器進行層

中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

疊式回饋控制，即可完成機身穩定、運動及自動導航之控制，各項控制均須獨立之 K_p 、 K_i 及 K_d 等比例係數，其數值則取決於各馬達及螺旋槳之推力、安裝位置以及轉速控制器之反應速度等特性，為適應各種應用目的所設計之不同機身尺寸、動力配置組合可透過對這些係數之調整，以相同的回饋演算邏輯，達到穩定控制之目的，使應用更具彈性。

（三）通訊及系統架構

慮及飛行之安全性，本社所製作之 UAV 選擇贅餘度（Redundancy）較高之六軸機為機身框架，IMU 及控制硬體則採用 ArduPilot Mega 模組為基礎，該模組具有完整的電路設計文件、韌體、免費開發工具、無線通訊協定以及地面站軟體等配套支援，整套系統如同 Linux 系統一般，遵循 GNU 的規範，在網路上公開所有技術資料及原始碼，容許使用者自行修改及應用，架構在此飛控系統上，即可依據不同應用需求進行機身、組件等硬體以及飛控韌體之修改，藉以解決前述商用空拍載具應用彈性不足之問題。

六軸航拍用載具系統架構如圖 10 所示，操作手透過遙控器輸入飛行動作，由機上之操作接收器接收該動作並傳輸至飛控模組，飛控模組依據此操作動作，配合 IMU、GPS 等感測器透過卡爾曼濾波法解算之訊號，再以 PID 控制器輸出各馬達之控制訊號，透過六個馬達之轉速控制器來控制飛行動作。

機身傾斜角度、空速、前進方向、爬升速率以及坐標等飛航資訊，另行透過飛航資料傳輸模組回傳至地面站，地面站軟體除負責顯示飛航資訊外，亦將載具之飛行軌跡及現在位置，顯示在以 GoogleMap 等服務為地圖來源之視窗上，使用者亦可透過此介面進行導航點設定等操作，達到全自動飛行之目的。

除此之外，透過對飛控模組韌體之修改，及相機架上加裝兩組可調整相機架角度之伺服機後，即可依據機身之傾斜角，即時反向調整相機之角度，使相機瞄準之影像，不因側風、震動或操作之影響改變，達到自動平衡之目的，亦可透過遙控器調整拍攝範圍為正前方至正下方內任何角度，使航拍時取景更為容易。

圖 10　本社開發之六軸空拍載具

五、非常規攝影量測及實例介紹

無人載具航拍作業除可獲得土石流上游料源區、堆積區等清晰影像以及與保全對象相對位置關係外。由於直升機或六軸機具有空中停滯及朝任何方向慢速移動之能力，可由多種角度對固定目標物進行觀察及攝影，應用非常規攝影量測中之多視幾何（Multiple-View Geometry）原理，藉由多幅不同角度且未事先標定之序列影像，對圖像資訊綜合分析，或稱為動景組構（Structure from Motion, SfM, Dellaert *et al*., 2000），組建三維數值地形。

動景組構假設拍攝目標靜止，其拍攝物坐標系（ M_i ）與兩張以上之相機坐標系（ K_1 、 K_2 ）（圖 11）必存在線性對應關係，可以坐標

轉換矩陣（T_1、T_2）描述之，且兩相機坐標系間亦必然存在平移（t）與旋轉（R）關係，如（3）式所示。

$$M_i = T_1 \times K_1$$
$$M_i = T_2 \times K_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$
$$K_1 = R \times K_2 + t$$

若能於照片中找到足夠數量之匹配點，則可由這些匹配點解算兩相機坐標系之坐標轉換矩陣（T_1、T_2），進而推求相機坐標系間之相對關係（R、t），再由相機位置與各匹配點在相機坐標系之坐標，計算目標物之相對坐標。匹配點的選取，則可利用 SIFT（Lowe, 2006）演算法，利用不同照片中顏色、對比及相對位置等變化，以影像辨識出相同之匹配點，因此，照片之清晰度、對比顏色鮮豔程度，將有利於匹配點之辨識，非常規攝影量測之詳細理論及演算流程，詳見（蕭震洋等，2011），於此不再贅述。

圖 11　拍攝目標與相機坐標系間關係

運用非常規攝影量測技術，以南投 2011 年 9 月份六軸機航拍之 415 張解析度 4320×3240 之照片，解算得有效坐標點 82400 點，其相機位置及目標物坐標點雲分布如圖 12 所示。由於 SfM 計算所得均為相對坐標，為求取其與地圖用 TWD97 坐標系統間之關係，該次航拍亦於現場佈設了 7 個覘標，運用高精度 DGPS 取得其 TWD97 坐標值，取其中三點計算轉換矩陣，藉以將解算之三維數值地形轉換為 TWD97 地圖用坐標系統，並計算量測誤差（如表 1）。

表 1　非常規攝影量測解算結果之坐標誤差估計

點別	誤差值（m）				備註
	X	Y	Z	距離	
1	-0.324	-0.004	-0.19	0.375	
2	0.319	0.248	0.049	0.407	
3	0.678	0.648	0.277	0.977	轉換點
4	0.319	-0.427	0.532	0.753	轉換點
5	-0.002	0.11	0.239	0.263	
6	0.37	0.234	0.209	0.485	
7	-0.617	0.028	-0.055	0.620	轉換點
均方根誤差				0.53	

由該 7 覘標之 GPS 坐標與解算所得坐標比較結果可知，此法誤差最大者約為 0.98 米，均方根誤差（Root Mean Square Error）約為 0.53 米，其精度已較衛星影像或傳統航拍高出許多。

圖 12　相機位置及組成之點雲

非常規攝影量測所解算之三維數值地形，其格式僅為連串的三維坐標值，若配合多視角補點（Patch-based Multi-View Stereo, PMVS, Yasutaka, 2010）技術，擷取匹配點之色彩值，並以鄰近點

中興工程・第120期・2013年7月・PP. 3-12
http://www.sinotech.org.tw/journal/

之色彩，予以線性內插後，可組建視覺效果較佳之立體模型（圖 13），輔以如 3D-Studio 等三維動畫軟體處理後，亦可進一步建立諸如鳥瞰、飛行模擬等動畫短片進行展示。

圖 13　土石流三維數值地形重構補差點效果

六、潛在應用方向

無人載具航拍可取得以往不易取得之影像資料，配合非常規攝影量測等三維地形重構技術，更可將影像資料轉化為工程上實際可用之數值資料。其應用方向甚廣，例如：利用不同時期之三維數值模型，可用來計算土石方、植被等變遷；配合 GIS 軟體，可進行地形、坡度、坡向分析；更可直接用來組建三維網格，進行三維數值分析等等。目前雖僅應用於土石流潛勢溪流之三維地形建構，但因本社之定翼機及六軸機等航拍用無人載具，其機體、動力配備以及飛行控制之軟、硬體技術均已完全掌握，可依不同目的隨時調整並修改，可以相對經濟之成本，進行任何地形地貌之攝影工作，若將無人載具搭載紅外線攝影機後，更可用來拍攝溫度影像，在橋墩裂縫檢測、壩體滲水調查等工作，均可提供更多參考資訊。

除此之外，發展無人載具過程中所使用之慣性量測元件 IMU，可於無法收到 GPS 訊號處進行定位，在執行隧道監檢測時，可用於記錄裂縫、滲漏痕跡等位置資訊；地熱、二氧化碳封存所需之深鑽孔中，亦可應用 IMU 技術進行定位，以檢核是否有偏移現象；若將 IMU 安裝於可能的落石上，亦可記錄其崩落時之軌跡……。這些技術不啻開啟了工程師了另一扇視野，其潛在應用方向之開拓，則尚有賴吾輩工程師共同努力。

參考文獻

土木技師公會（2003）山坡地社區安全檢查表

中興工程顧問社（2007）土石流危險聚落易致災因子調查與整治對策，行政院農業委員會水土保持局委託研究報告

中興工程顧問社（2008）土石流潛勢區域易致災調查與整治對策研擬，行政院農業委員會水土保持局委託研究報告

行政院農委會水土保持局（2003）水土保持技術規範

模型飛機的空氣動力學（2002）http://junior.cyhs.tp.edu.tw/shuwd/Aircraft Dynamics/

沈哲緯、曹鼎志、鄭錦桐、王天佑、陳頎夫（2009）以 3S 技術進行屏東縣霧台鄉好茶村土砂災害調查與評估，中興工程，第 102 期，第 27-35 頁

王天佑、陳振宇、許振崑、簡榮興、張玉斧、冀樹勇（2009）無人載具於土石流災害調查之應用，98 年山坡地社區災害防治技術研討會，台北

王天佑、王峻德、楊黃政、盧三彥、高憲彰（2010）地工無線監測設備開發技術之研究，中興工程，第 106 期，第 102-106 頁

Kalman, R. E.（1960）A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering, Vol. 82, pp. 35-45

Lowe, D. G.（2006）Automatic Panoramic Image Stitching Using Invariant Features, International Journal of Computer Vision, 74（1）, pp. 59-73

F. Dellaert, S. Seitz, C. Thorpe, and S. Thrun（2000）Structure from Motion without Correspondence, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition

蕭震洋、謝寶珊、冀樹勇（2011）應用非常規攝影量測評估國道 3 號 3.1 公里崩塌事件之土方量，中華水土保持學報，第 42 卷，第 2 期，第 120-130 頁

Yasutaka Furukawa, Jean Ponce（2010）Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 8, pp. 1362-1376