

無人飛行載具應用於防救災圖資供應之研究— 以北二高崩塌地為例

摘要

近年來無人飛行載具（UAV，Unmanned Aerial Vehicles）載重能力及飛行穩定性大幅提升，配合內部空間定位元件如 GPS 及 IMU 微型化，應用越來越廣。無人飛行載具最大的特點在於機動快速反應、可低空雲下作業，恰可彌補傳統航拍或衛星遙測受限於雲遮影響且無法快速獲取影像資料之缺點，進一步爭取緊急防救災應變的時效性。利用無人飛行載具輔助應用在災區空間資訊獲取，可快速即時了解因天然災害所造成影響，以因應災害急迫性，快速提供決策者災情判斷與分析使用。本文以北二高崩塌走山為例，應用旋翼型無人飛行載具航拍崩塌地區影像，進行快速影像後製處理之研究，產製立體模型並進行 3D 空間量測與災區判釋分析，並對立體模型精度、災區 3D 空間量測與展示做一探討與分析。

關鍵詞：無人飛行載具、防救災應用、立體模型

一、前言

無人飛行載具 UAV (Unmanned Aerial Vehicles) 是空載遙測的一種重要方式，並且日益成為一項空間數據獲取的重要技術。近年來，由於無人飛行載具酬載及飛行穩定性大幅提升，搭配空間定位元件微型化，使 UAV 充分發揮續航時間長、影像即時傳輸、高危險地區探測、成本低、機動靈活等優點 (王聰榮, 2006)，亦成為衛星遙感與傳統空載遙測的有力輔助工具。無人飛行載具遙測在國外已得到廣泛應用，包括應用在海難搜救、山林保育、水土保持、風災、水災土石流道路破壞等災難應變災情調查、道路交通監視、商業空中攝影以及邊境巡邏、海域漁場巡視保護等工作 (王聰榮、李繼泓, 2006)。瑞士利用旋翼型 UAV 產製 Randa 滑坡的 2 公分無縫正射影像、三維向量地圖及數值地表模型 (Digital Surface Models, DSMs) 資料而其產製結果資料具有 10~20cm 高分辨率及精度 (Haarbrink, R. B., Eisenbeiss, H, 2008)。另外，中國在四川汶川大地震後，亦運用 UAV 對崩塌地、堰塞湖等進行高分辨率、低空遙感的災害訊息獲取和災情評估 (何磊、苗放、唐姝姪、李玉霞, 2010)。

99 年 4 月 25 日高速公路國道 3 號北區 (以下簡稱北二高) 南下 3 公里處七堵路段發生嚴重走山崩塌意外，為測試當災害發生時，UAV 執行空拍任務之效益，遂以無人飛行載具 (UAV) 取得崩塌區航拍影像，並進行快速後製處理，產製立體模型，使能進一步於模型上進行量測與評估災害情況，以利災害判釋與救援規劃。現階段利用旋翼型 UAV 航拍影像已產製出北二高崩塌地立體像對，並可製作數值地形模型 (DTM)、正射影像鑲嵌、3D 地表模型與 3D 飛行模擬，且能快速展示崩塌地地表情況及資訊，亦能量測計算出崩塌範圍面積、崩塌土方等實用資訊，幫助決策者評估擬定更快速精準的救災策略。

二、使用設備、作業流程與方法

無人飛行載具主要分為定翼型與旋翼型，兩者各具不同的特點與優勢，定翼型具飛控電腦可全自動飛行且飛行穩定、航程時間長、酬載量大；旋翼型無須跑道即可起飛，機動性高，可隨時改變速度高度與拍攝角，亦可定點停懸拍攝。無人飛行載具最大的優勢在於無人駕駛，安全性高且成本低、機動性亦比傳統航拍要好，可彌補傳統航拍或衛星影像資料獲取空隙，藉著利用兩種不同型態的無人飛行載具，未來輔助應用在空間資訊獲取勢必將成為主要趨勢。本次災區範圍小且位於交通便利地區，適合使用旋翼型 UAV 進行航拍任務。因此在北二高七堵路段發生崩塌災害後，在不影響救災工作進行情況下，由旋翼型 UAV 進行災區航拍作業。

(一) 使用設備

1. 旋翼型UAV基本規格

本案是採用旋翼型UAV所拍攝之影像進行後製處理，機型為日本京商60級直升機（KYOSHO 60級），外觀如圖1，基本規格如表1。



圖 1 旋翼型 UAV-KYOSHO 60 級

表1 旋翼型UAV基本規格表

項目	說明
旋翼直徑	1.6公尺
最大起飛重量	7公斤
酬載重量	1.5公斤
巡航速度	50 km/hr
續航時間	0.25小時
飛控電腦	有，但無自主導航飛行能力。
特色	可滯空停懸

2. 相機基本規格

傳統UAV並非以航測為主要目標，因此大多搭載數位攝影機或一般消費型相機（非量測型相機），航測專用之量測型相機因UAV酬載重量及其他技術面限制，尚未整合裝載至UAV上；而消費型相機選擇，則因UAV酬載限制、影像解析力、空拍影像數量及經濟面等因素，以重量、像素、價格為主要考量。本次在旋翼型UAV上所搭載相機為數位單眼相機-Sony α350（如圖2），相機基本規格如表2。



圖2 Sony α350數位相機

表2 Sony α350數位相機規格

相機型號	焦距 (mm)	WL 像數	感測器尺寸 (mm)	感光元件尺寸 (μm)	總像數 (萬)
Sony α350	18	4592	23.5	5.117595818	1403.3152
		3056	15.7	5.137434554	

由於本次UAV所搭載之數位相機為非量測型相機，與量測型相機比較，兩者主要的差異在於前者內方位不穩定且無框標可以決定影像坐標，但價格經濟、操作方便，於使用前必需先進行相機率定，以求解數位相機內方位及透鏡畸變參數，在後續進行三維坐標量測時可自動修正其系統誤差。本次所採用之數位相機-Sony $\alpha 350$ 已預先使用Photometrix iWitness Pro軟體進行相機率定，此軟體提供了48個特殊設計的人造標(Cronk, S., Fraser C. S., Hanley H., 2006; Fraser & Cronk, 2008)，如圖3所示。率定過程中可將48個人造標佈置在任意的三度空間場所中，範圍約5x5平方公尺，並使用相機拍攝大量含有均勻分佈人造標影像，再使用軟體進行自動化判識以完成量測大量共軛影像點，毋需人工量測連結點即可完成相機率定工作，其相機率定結果如表3。

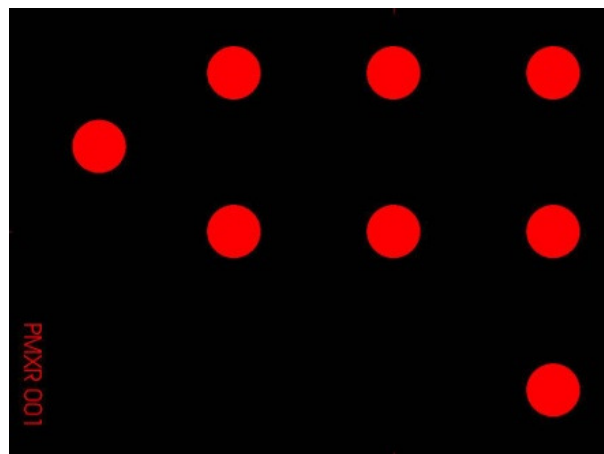


圖3 相機率定使用之人造標

表3 Sony α 350相機率定參數

焦距	Principal distance	$c = 18.8218\text{mm}$
像主點偏移	Principal point offset in x-image coordinate	$x_p = -0.0423\text{mm}$
	Principal point offset in y-image coordinate	$y_p = 0.3123\text{mm}$
透鏡輻射畸變參數	3rd-order term of radial distortion correction	$K1 = 4.74330\text{e-}004$
	5th-order term of radial distortion correction	$K2 = -9.71174\text{e-}007$
	7th-order term of radial distortion correction	$K3 = -1.02817\text{e-}009$
透鏡切線畸變參數	Coefficient of decentering distortion	$P1 = -4.1645\text{e-}005$
	Coefficient of decentering distortion	$P2 = -9.4521\text{e-}005$

(二) 作業流程及理論基礎、方法

1. 作業流程

作業流程如下圖4：

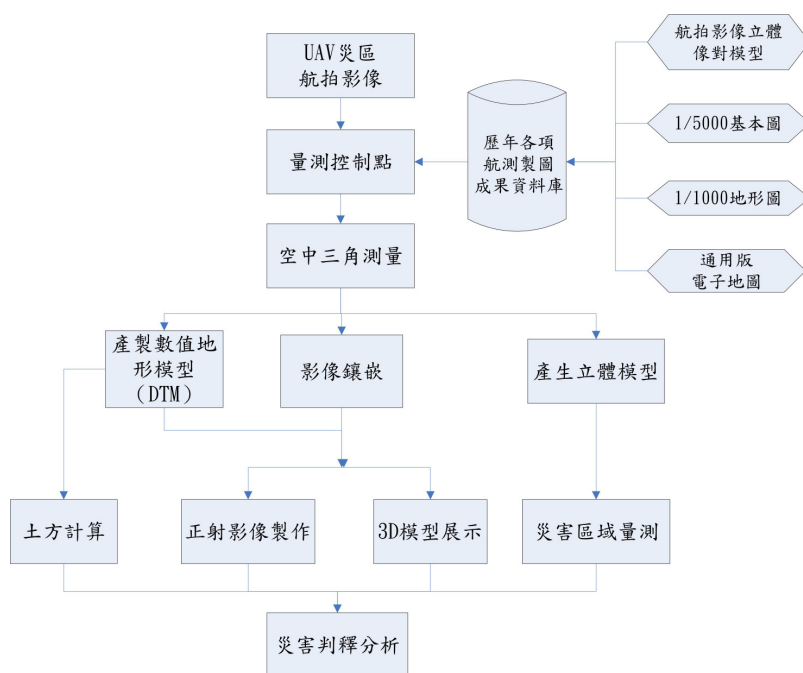


圖4 防救災UAV緊急航拍影像處理作業流程

2. 理論基礎

(1) 空中三角測量

空中三角測量目的在求得攝影站的外方位參數，透過地面控制點及共軌影像坐標之量測，以間接求解得相機透視中心位置及姿態，即攝影站位置參數 X_L, Y_L, Z_L 及攝影站 X, Y, Z 三軸之轉角 ω, ϕ, κ 等姿態參數，用以產生立體模型，方能進行後續製作正射影像及測繪製圖作業。

理論上，像主點應與像坐標原點重合，但因相機本身內部構造影響，使像主點與像坐標原點略有偏移，因此光束法空中三角測量共線方程式如下〔Wolf and Dewitt, 2000〕：

$$\begin{aligned} x_p - x_0 &= -f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_L) + m_{12}(Y_p - Y_L) + m_{13}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \right] \\ y_p - y_0 &= -f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_L) + m_{22}(Y_p - Y_L) + m_{23}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \right] \end{aligned} \quad (1-1)$$

(1-1) 式中， x_p, y_p ：為點位像坐標。 x_0, y_0 為像主點像坐標。

X_p, Y_p, Z_p ：為對應物點之物空間坐標。

X_L, Y_L, Z_L ：為透視中心之物空間坐標。

f ：為焦距。

$m_{11}, m_{12}, \dots, m_{33}$ ：為一個3x3旋轉矩陣之元素。

共線式內，旋轉矩陣元素的組成如下，其中 ω 、 ϕ 、 κ 表示像片方位系統之旋轉角度：

$$m_{11} = \cos \phi \cos \kappa$$

$$m_{12} = \sin \omega \sin \phi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa$$

$$m_{13} = -\cos \omega \sin \phi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa$$

$$m_{21} = -\cos \phi \sin \kappa$$

$$m_{22} = -\sin \omega \sin \phi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa$$

$$m_{23} = \cos \omega \sin \phi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa$$

$$m_{31} = \sin \phi$$

$$m_{32} = -\sin \omega \cos \phi$$

$$m_{33} = \cos \omega \cos \phi$$

每觀測一個點，可由(1-1)共線式組成兩個觀測方程式，如果觀測的是已知點（地面控制點），則式中有6個未知數（外方位參數）。

本次研究使用2張UAV航拍影像，為產製立體像對以供後續量測之用，

需同時解算立體像對的二張像片的外方位。立體像對之空中三角解算，在控制點部分至少需要二個平控點及三個高控點方可解算，而且三個高控點不可位於一條直線上，而檢核及提升空三成果可靠度，必須使用至少三個平控點及四個高控點（如圖5）。

$$(X_i, Y_i, Z_i, \omega_i, \phi_i, \kappa_i) \quad (X_j, Y_j, Z_j, \omega_j, \phi_j, \kappa_j)$$

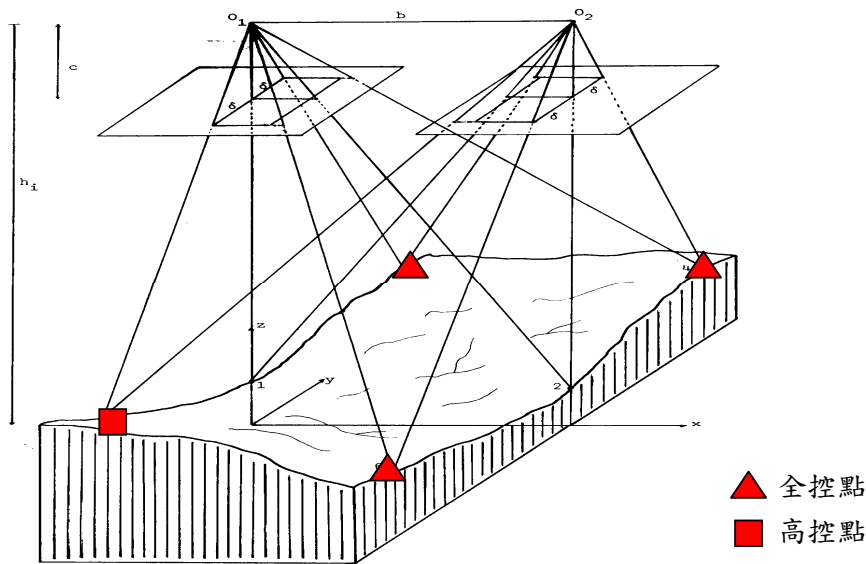


圖 5 立體像對空中三角測量示意圖

(2) 數位相機率定方式

本次相機率定方法採用附加參數自率光束法平差方式進行相機率定，係將相機內方位參數及透鏡畸變參數所引起之影像坐標修正量，利用三維空間中均勻分佈之未知點坐標，以多張影像同時求解的方式，於平差時與影像內外方位參數一同解算，亦即將相機系統誤差當作附加參數來求解 (Fraser, 1997)。因此可將 (1-1) 共線方程式加入用以消除相機系統誤差之附加參數 Δx , Δy ，其公式可改寫成如 (1-2) 所示。

$$x_p - x_0 + \Delta x = -f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_L) + m_{12}(Y_p - Y_L) + m_{13}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \right]$$

$$y_p - y_0 + \Delta y = -f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_L) + m_{22}(Y_p - Y_L) + m_{23}(Z_p - Z_L)}{m_{31}(X_p - X_L) + m_{32}(Y_p - Y_L) + m_{33}(Z_p - Z_L)} \right] \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{x} + P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 xy + b_1 x + b_2 y \\ \Delta y &= \bar{y} + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \bar{y} + P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2P_1 xy \end{aligned} \quad (1-3)$$

上式中，

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

(x, y) ：像點像空間坐標。

K1, K2, K3 用以描述透鏡輻射畸變 (Radial Lens Distortion) 係數；

P1, P2 用以描述透鏡切線畸變 (Decentering Lens Distortion) 係數；

b1, b2 用以描述像平面變形係數。

3. 作業方法

(1) UAV 航拍影像

崩塌地影像拍攝時間為崩塌發生次日 (99年4月26日)，天氣狀況為薄霧，UAV 飛行離地高度約為500公尺，航向為西北往東南方向飛行，飛行速度約50Km/hr，圖6為崩塌地側拍圖，圖7、8為崩塌前後影像比較 (崩塌前影像係行政院農業委員會林務局農林航空測量所航拍影像，崩塌後影像係本次UAV航拍影像)。本次採用旋翼型UAV航拍影像 (如圖9) 製作立體像對，影像地面解析度約17公分，像片重疊率達80%以上。



圖6 旋翼型UAV北二高崩塌地側拍圖（飛虎、智飛科技公司提供）



圖7 崩塌前航拍影像

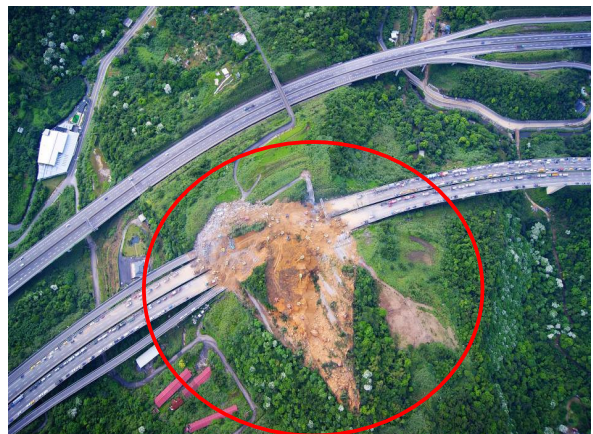


圖8 崩塌後航拍影像

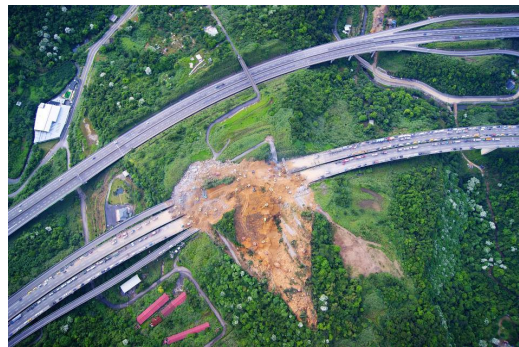
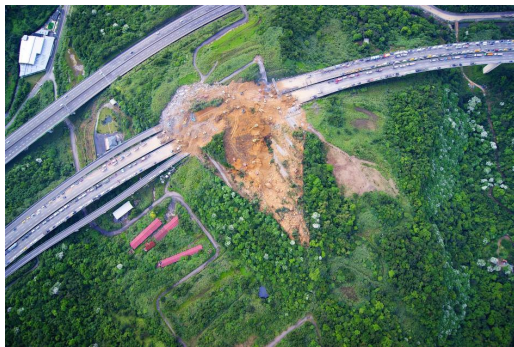


圖9 旋翼型UAV連續航拍圖（飛虎、智飛科技公司提供）

(2) 影像自動匹配、地面控制點量測及空中三角測量計算

為爭取時效快速產製立體像對，運用已產製98年度電子地圖成果(比例尺為1/2500)之立體模型，量測崩塌區域地物特徵點(如建物角、道路標線等)作為地面控制點，控制點選定儘可能分布於影像四個角落且需於重疊像片上皆能清楚辨識。本次為求得可靠外方位參數，共量測3個全控點及1個高控點，並以ERDAS LPS軟體進行影像自動匹配及空中三角測量計算，影像自動匹配連結點共25點，另外量測3個檢核點作為精度評估檢核使用。控制點、檢核點及自動匹配產生之連結點分布情形如圖10，控制點、檢核點及連結點於影像上的分布情形如圖11。

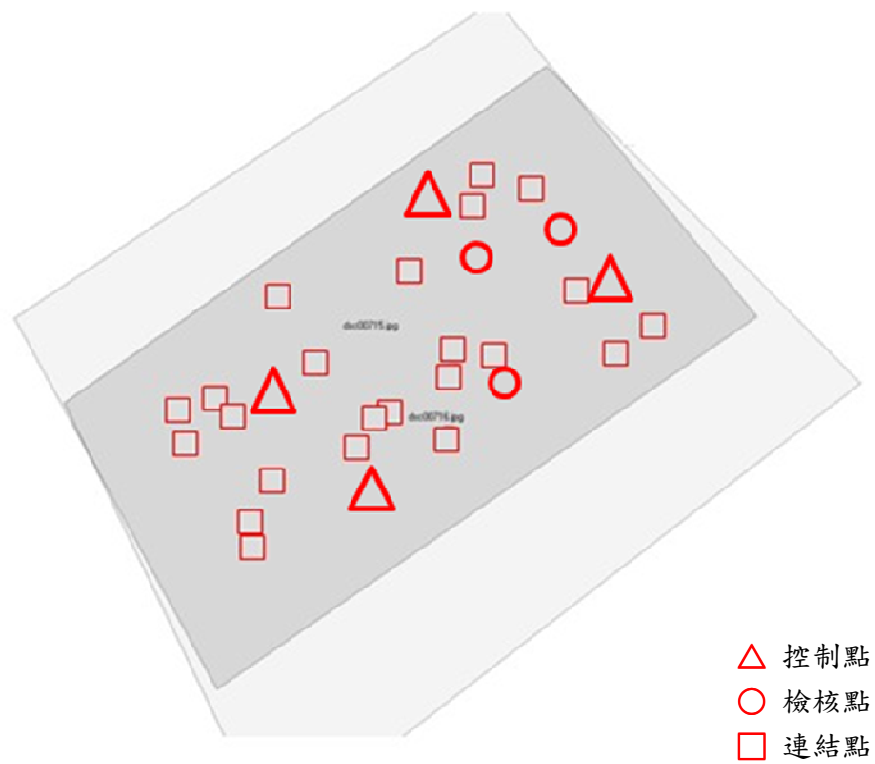


圖10 控制點、檢核點及連結點分布圖(深灰色為像片重疊部分)

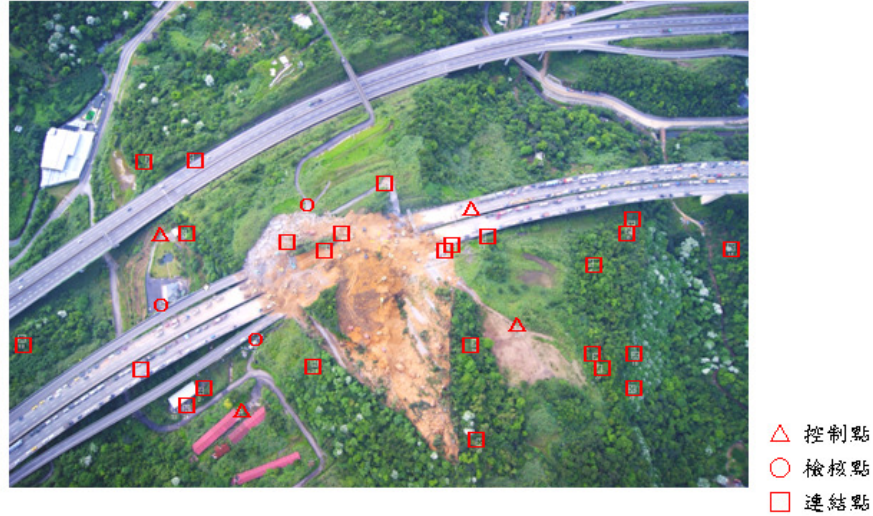


圖11 控制點、檢核點及連結點於影像上的分布圖

(3) 組成立體像對、自動產生數值地形模型 (DTM) 及影像鑲嵌

空中三角解算出攝影站外方位參數後，即可完成像片定位，並組成立體像對。本次除組成立體像對外，LPS軟體能自動內插產生數值地形模型 (DTM)，並自動產生正射影像鑲嵌圖。

(4) 崩塌地區土方量計算

沿著山坡地崩塌處邊緣線及北二高道路邊緣線，於立體模型上繪製崩塌區域邊界 (如圖12)，並利用崩塌前後期立體像對影像分別產製DTM資料，可使用ArcGIS軟體計算崩塌區域範圍的土方量。



圖12 崩塌區域邊界圖

(5) 崩塌地3D立體模型展示

為幫助決策者快速了解崩塌地區災損情況與擬定救災策略，利用UAV航拍產製的數值地形模型 (DTM) 及鑲嵌後影像，透過專業處理軟體展示崩塌地區3D立體模型及其他如等高線、坡度、坡向及TIN等各項地理資訊。

三、研究成果

(一) 空中三角計算結果

本次空三計算結果所得到的控制點平面精度約1公尺，高程精度約3公尺，程式執行結果如圖13，由空三計算結果（如表4）中可知控制點及檢核點各點位的地面坐標及像片坐標之改正量及精度，並可另外求得地面坐標與像片坐標的改正量，各控制點及檢核點精度指標如表5。

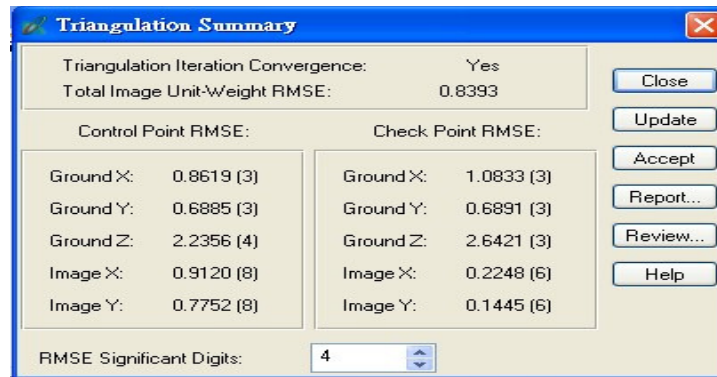


圖13 空三程式執行結果

表4 空三計算結果

控制點物空間坐標殘差			
點號	rX	rY	rZ
26	-0.0868	-0.0238	0.4813
27	-1.4822	0.0970	3.2405
28	0.1562	-1.1884	-2.9292
29			-0.8245

檢核點物空間坐標殘差			
點號	rX	rY	rZ
30	-0.0377	0.1656	-1.5788
32	-0.3721	-0.4417	0.5658
34	-1.8387	-1.0963	4.2578

控制點像空間坐標殘差		
左像		
點號	Vx	Vy
26	-0.613	0.471
27	0.270	0.860
28	-0.295	-0.538
29	1.799	-1.258
RMSE of 4 points: mx=0.971, my=0.841		
右像		
點號	Vx	Vy
26	0.793	-0.865
27	-0.711	-0.638
28	0.557	0.808
29	1.199	-0.410
RMSE of 4 points: mx=0.849, my=0.703		

檢核點像空間坐標殘差		
左像		
點號	Vx	Vy
30	0.280	-0.202
32	0.259	-0.161
34	-0.015	0.012
RMSE of 3 points: mx=0.221, my=0.149		
右像		
點號	Vx	Vy
30	-0.287	0.184
32	-0.274	0.157
34	0.015	-0.010
RMSE of 3 points: mx=0.229, my=0.140		

像空間 x, y 單位：pixels

角度單位：degrees

物空間 X, Y, Z 單位：meters

表5 控制點及檢核點精度指標

	控制點	檢核點
點數	4	3
物空間X坐標均方根值 [m]	0.86	1.08
物空間Y坐標均方根值 [m]	0.69	0.69
物空間Z坐標均方根值 [m]	2.24	2.64
像空間x坐標均方根值 [Pixel]	0.91	0.22
像空間y坐標均方根值 [Pixel]	0.78	0.14
像空間長度均方根值 [Pixel]	0.8393	

(二) 立體像對、正射影像鑲嵌與數值地形模型 (DTM)

以空三解算之外方位參數，組成立體像對紅綠影像 (如圖14)，並自動產製正射影像鑲嵌圖 (如圖15) 及數值地形模型 (DTM)。

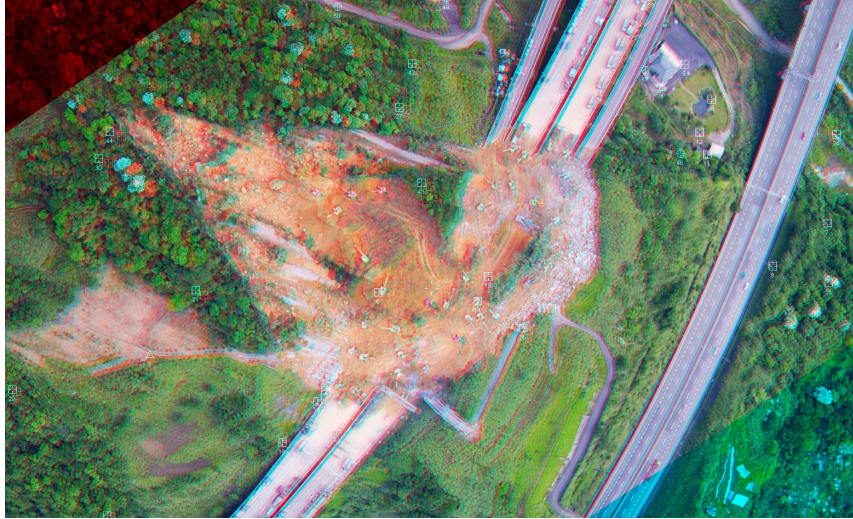


圖14 崩塌地紅綠影像

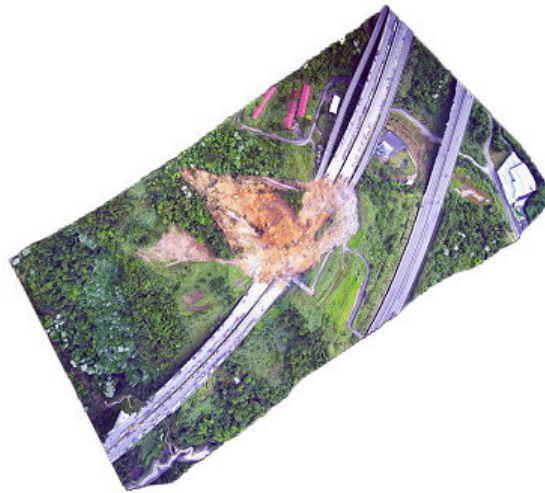


圖15 正射影像鑲嵌圖

(三) 崩塌地土方計算

利用崩塌區域邊界範圍及前後期DTM資料，計算出崩塌面積與土方量，結果如表6。崩塌範圍面積11,475平方公尺，總崩塌土方量約為137,571立方公尺，重量約30萬噸，如此可根據每輛卡車載運土石量來計算土石清理所需時間。

表6 崩塌範圍面積

崩塌範圍	數量
表面積	14,062 m ²
投影面積	11,475 m ²
崩塌土方	137,571 m ³

(四) 崩塌地3D立體模型展示

利用產製之數值地形模型 (DTM) 及正射影像鑲嵌圖等成果，可透過 ArcGIS 軟體來展示崩塌地各項地理資訊，如崩塌地縱斷剖面圖 (如圖16、圖17)、3D模型 (如圖18)、等高線、坡度圖、高程暈渲圖(如圖19、20)、TIN (如圖21、22) 等資訊，並可套疊至Google earth(如圖23、24)比較崩塌前後期地形變化，並製作崩塌地3D動態飛行模擬，有助於模擬及掌握崩塌區域最新情況。

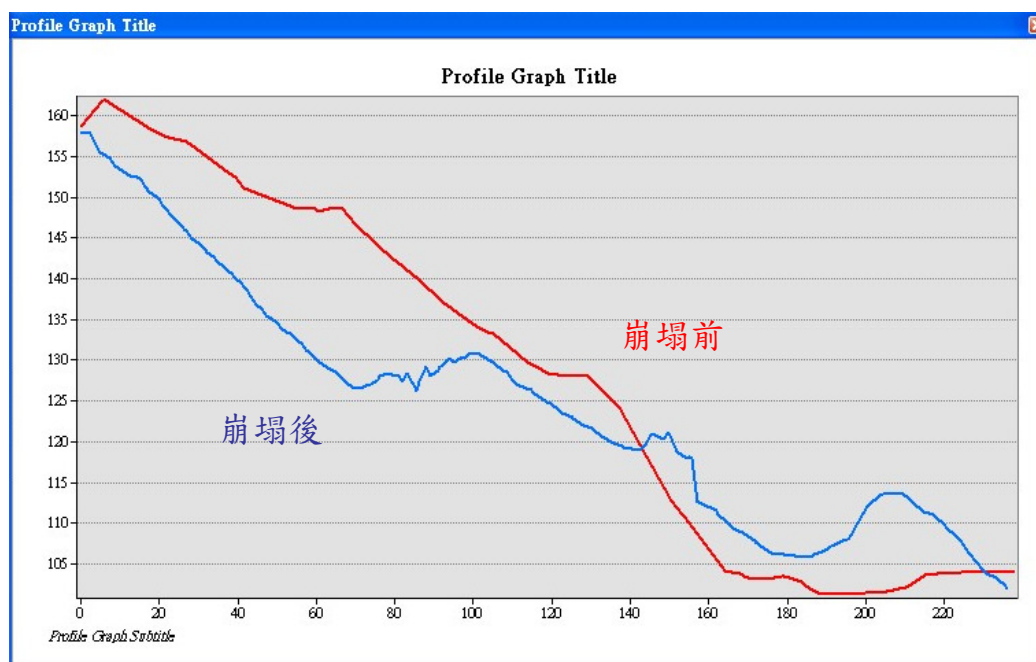


圖16 崩塌地縱斷剖面圖



圖17 崩塌地縱斷剖面線



圖18 不同角度崩塌地3D模型模擬展示

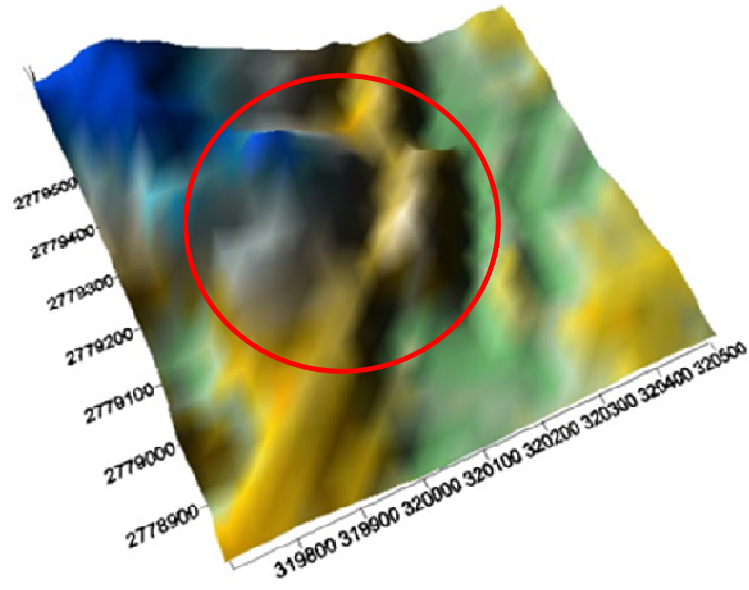


圖19 崩塌前高程暈渲圖

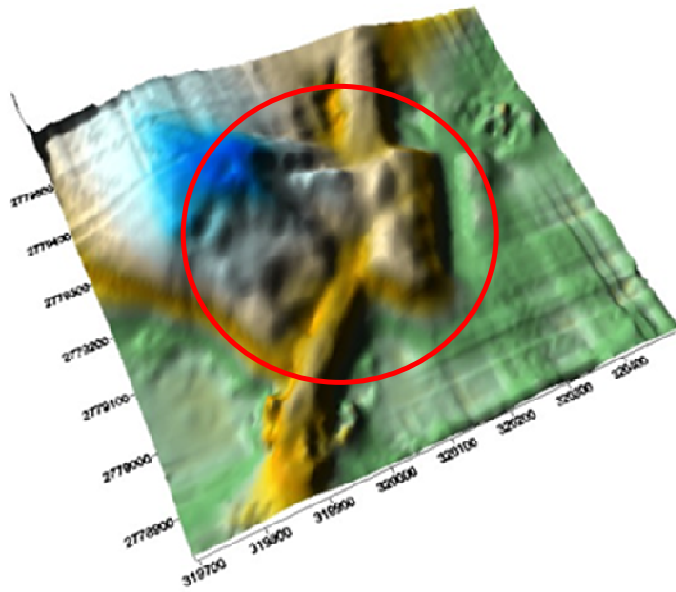


圖20 崩塌後高程暈渲圖

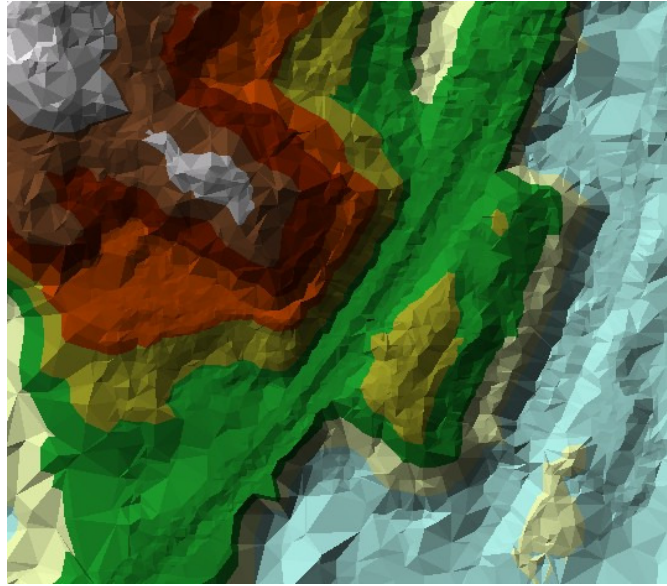


圖21 崩塌前TIN

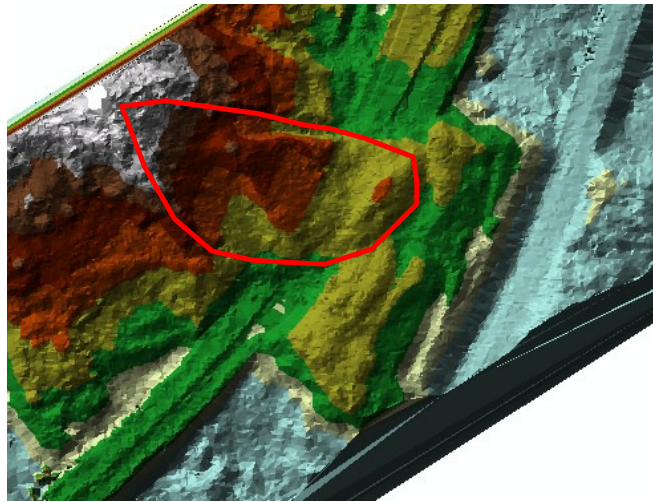


圖22 崩塌後TIN (紅框區域為地貌變動部分)



圖23 Google earth套疊分析(崩塌前Google earth影像)



圖24 Google earth套疊分析(套疊崩塌後UAV影像)

三、 結論

本次使用旋翼型UAV航拍影像地面解析度約17公分，利用前期的控制點或連結點成果作為本次控制點及檢核點使用，由空中三角測量結果中得到控制點平面精度約1公尺，高程精度約3公尺，並可即時於立體像對上進行3D空間量測及後續計算，以獲取崩塌面積及土方量。影像後製處理作業時間可於取得影像後約5小時內完成，透過專業處理軟體並能自動產製DTM、正射影像鑲嵌，並可使用專業軟體進行各種3D量測展示與分析。

綜合本次作業結果，驗證利用旋翼型UAV搭載非量測型相機可獲取高地面解析度之空拍影像，並可快速產製精度符合需求之立體像對資料以進行3D空間量測，用以計算崩塌範圍、土方量。此外，透過相關專業軟體可自動產生數值地形模型及正射鑲嵌影像，能進一步展示崩塌地各項地理資訊，如崩塌地3D模型及飛行模擬、崩塌範圍面積、崩塌土方計算、崩塌地形坡度與坡向分析、崩塌前後期剖面比較分析等資訊。

以UAV快速機動、可低空雲下作業的特性，應用於各項災害發生初期之影像資料獲取具有相當大的優勢，且UAV航拍影像解析度高，亦有助於災情判釋。本次作業之影像後製處理，係利用前期通用版電子地圖成果之地物特徵點坐標作為控制點，節省至實地進行外業控制測量時間，可符合緊急時影像快速後製處理需求。未來發展可朝建立相關影像處理標準作業流程，並應用於防救災緊急應變領域，預期可提供快速完整之災區地形資訊，如可量測三維模型及地理資訊展示，提供防救災領域更多元資料獲取模式，有利決策者能更即時研判災情與規劃救援行動。

參考文獻

- (1) 王聰榮 (2006): 無人飛行載具 2006 年發展趨勢, 航太工業通訊雜誌, 第 59 期。
- (2) 王聰榮、李繼泓 (2006): 無人飛機發展現況與展望, 機械工業雜誌, 281 期。 <www.itri.org.tw/chi/lib/DownloadFile.aspx?AttNBR=1550>。
- (3) Haarbrink, R. B., Eisenbeiss, H. (2008): Accurate DSM production from unmanned helicopter systems, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008。
- (4) 何磊、苗放、唐姝姪、李玉霞 (2010): 無人機遙感圖像及其三維視覺化在汶川地震救災中的應用, 物探化探計算技術期刊, 2 期 32 卷。
- (5) Cronk, S., Fraser C. S., Hanley H. (2006): Automated Metric Calibration of Colour Digital Cameras, The Photogrammetric Record, Vo. 21, No. 116, pp: 355–372。
- (6) Fraser, C.S. and Cronk, S. (2008): A Hybrid Measurement Approach for Close-Range Photogrammetry. Submitted to ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, March。
- (7) Wolf, P. R., and B. A. Dewitt, 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd Edition, McGRAW-HILL international edition。
- (8) Fraser, C. S. (1997): Digital Camera Self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 52, pp.149-159。

A Study on Unmanned Aerial Vehicles Applied to Disaster Prevention and Rescue: A Case of Landslide on Freeway Side

Abstract

In recent years, the loading capability and flying stability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has been improved substantially. Combining with internal orientation components such as GPS and miniaturized IMU, the UAV is gradually applied in forest conservation, soil and water preservation, disaster survey and so on. Along with the **improvement** of precision of various components, the UAV has more potential in mapping than before.

The main features of UAV are its fast response and ability of operation under clouds that can compensate the problem of traditional aerial photos or satellite images affected by clouds as well as time saving. Using UAV to assist in capturing special information in disaster areas, it is possible for policymakers to determine the situation of disaster real time and take action immediately. This article uses a case of landslide on freeway side as an example. A rotor-type UAV is utilized to take the images of collapse area, then study the possibility of rapid post-processing of these images, and produce 3D model for measurement and analysis, and at the same time discuss its precision together with a presentation of 3D model.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAV), disaster response, 3D model