出版編號:SWCB-105-113

歷史 UAV 影像之三維坡地資訊產製
3D Information Generation of Landslide Using Historical UAV Images

執 行 單 位 ：國立中興大學環境保育暨防災科技研究中心

執 行 期 間 ：105 年 04 月 01 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：楊明德 特聘教授

行政院農業委員會水土保持局　　編印

中華民國 105 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

歷史 UAV 影像之三維坡地資訊產製

摘要

本研究旨在建立一套修補優化 UAV 影像之流程，以提升歷史 UAV 影像之品質及應用價值。本研究利用水保局現有之歷史無人載具(UAV)空拍影像資料，透過影像處理包括影像增顯、修復、修補及建模等技術，改善優化 UAV 影像並產製高品質之二維鑲嵌正射影像與三維坡地模型。本研究以 10 個實際案例說明影像增顯所產製之高品質二維鑲嵌正射影像可應用於影像判釋、植被分析、監測等方面；影像修補可去除不必要之物件，還原影像資訊；影像建模可建立三維坡地模型及地表高程模型(DSM)，作為坡地崩塌之驗證資料，進行崩塌範圍、面積、土方量估算或土砂堆積等分析。未來可利用本研究建立之流程，建立水保局歷史 UAV 影像坡地監測資料庫，提供相關單位進行管理監測應用。

關鍵詞: UAV、影像處理、地表高程模型(DSM)、坡地崩塌

3D Information Generation of Landslide Using Historical UAV Images

ABSTRACT

The purpose of this study is to establish a set of standard procedures to repair and optimize the UAV images to enhance the quality and broaden the range of applications of historical UAV images. In this study, UAV images collected by the Soil and Water Conservation Bureau were used as the study material. Couple image processing techniques include image enhancement, repair, and image-based modeling were applied to produce high-quality two-dimensional mosaics image, 3D model, and digital surface model (DSM). Additionally, 10 case studies were included for demonstration purposes. High-quality two-dimensional mosaic images can be used for applications such as image interpretation, vegetation analysis, and landslide monitoring. Repaired images without unnecessary objects can provide necessary image information. Image-based modeling can establish a 3D model and digital surface model (DSM), which can be used on landslide monitoring as the validation data, assessing the scope and area for landslide, or estimating soil and sand accumulation, etc. In the future, the proposed procedure can be utilized to establish a historical UAV image slope monitoring database and provide relevant agencies for management and monitoring purposes.

Keywords: UAV, image processing, digital surface model (DSM), landslide

目次

摘要 ..... **I**

ABSTRACT ..... **II**

目次 ..... **III**

表次 ..... **V**

圖次 ..... **VI**

第一章　計畫動機 **1-1**

第二章　計畫目標 **2-1**

第三章　研究方法 **3-1**

第一節　影像擷取 3-2

第二節　影像增顯 3-5

第三節　影像還原 3-9

第四節　影像修補 3-10

第五節　IBM 影像建模 3-12

第六節　影像分析 3-15

第七節　分析應用 3-17

第四章　成果與討論 **4-1**

第一節　陰影區域之影像修補 4-1

第二節　雲層遮蔽之影像修補 4-4

第三節　遮蔽物移除與影像修補 4-6

第四節　拍攝不全之 3D 模型修補 4-7

第五節　霧霾去除及 3D 建模 4-9

第六節　土砂變異分析 4-11

第七節　UAV 影像分類 4-12

第八節　崩塌地量體分析(凌雲山莊)..... 4-13
第九節　崩塌地量體分析(多也部落)..... 4-19
第十節　崩塌地量體分析(樂野村)..... 4-21
第五章　結論與建議..... 5-1
參考文獻 參-1
附錄.....附錄-1
附錄一　期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄-1
附錄二　期末聯合審查會議紀錄暨回覆辦理情形..... 附錄-3

表次

表 3-1　衛星影像與無人飛行載具影像之特性比較 3-3

表 3-2　定翼型與旋翼型 UAV 比較表 3-4

表 4-1　土砂變異量分析.....4-11

圖次

圖 3-1　本計畫研究流程圖.....3-1

圖 3-2　影像色彩直方圖.....3-5

圖 3-3　紅、綠、藍三原色直方圖 3-6

圖 3-4　直方圖亮度比較.....3-6

圖 3-5　直方圖均化.....3-7

圖 3-6　影像去霧霾成果.....3-7

圖 3-7　影像去光成果.....3-8

圖 3-8　EBI 計算示意圖(1)~(4) 3-11

圖 3-9　SFM 三維重建 3-13

圖 3-10　Visual-Hull 演算法 3-14

圖 3-11　前後期地形變化之體積計算示意圖.....3-17

圖 3-12　土砂變異量之矩柱體計算法示意圖 3-18

圖 4-1　本計畫之分析案例.....4-1

圖 4-2　屏東率芒溪崩塌地 UAV 原始影像 4-1

圖 4-3　多時期屏東率芒溪崩塌地 UAV 正射影像 4-2

圖 4-4　率芒溪影像修復成果 4-3

圖 4-5　待修復影像.....4-4

圖 4-6　計算雲層範圍.....4-5

圖 4-7　修補後成果.....4-5

圖 4-8　移除遮蔽物及影像修補及建模 4-6

圖 4-9　橋下無拍攝影像之原始模型 4-7

圖 4-10　橋下模型破圖情形 4-7

圖 4-11　移除模型破損部分.....4-7

圖 4-12　模型修補成果-往上游看 4-8

圖 4-13　模型修補成果 2.....4-8
圖 4-14　影像去霧霾前後對比 1 4-9
圖 4-15　影像去霧霾前後對比-2 4-9
圖 4-16　去霧後影像重建模型 4-10
圖 4-17　屏東率芒溪土砂分析(深度).....4-11
圖 4-18　NDVI 分析-嘉義縣六腳鄉.....4-12
圖 4-19　土地利用判釋.....4-13
圖 4-20　南投凌雲山莊崩塌地 UAV 原始影像 4-14
圖 4-21　南投凌雲山莊崩塌地 UAV 正射影像 4-14
圖 4-22　南投凌雲山莊崩塌地模型-凌雲山莊崩塌地.....4-15
圖 4-23　南投凌雲山莊崩塌地模型-台 14 49K 崩塌地.....4-15
圖 4-24　南投凌雲山莊崩塌地模型-1 4-15
圖 4-25　南投凌雲山莊崩塌地模型-2 4-16
圖 4-26　南投凌雲山莊崩塌地 DSM.....4-16
圖 4-27　凌雲山莊周圍崩塌地 4-17
圖 4-28　凌雲山莊崩塌地量體分析 4-17
圖 4-29　台 14 線 49K 崩塌地量體分析 4-18
圖 4-30　植株量測.....4-18
圖 4-31　樂野崩塌 A 崩塌地位置.....4-19
圖 4-32　樂野崩塌地 A 三維模型.....4-20
圖 4-33　樂野崩塌 A 地量體分析.....4-20
圖 4-34　樂野崩塌 B 航拍正射影像.....4-21
圖 4-35　樂野崩塌地 A 三維模型.....4-22
圖 4-36　樂野崩塌 B 量體分析 4-22

第一章　計畫動機

UAV(Unmanned Aircraft Vehicle)無人載具系統最初由美國使用於軍事用途，近年來隨著 UAV 技術的開發與普及，運用領域愈來愈廣，無人飛行載具的用途已為社會大眾所認同，且這方面的應用潛力一直不斷地被開發出來，例如在環境監測、國防安全、商業應用等方面，其重要性與不可取代性受到矚目。台灣已開發出多樣式定翼及旋翼型的無人載具(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)，具備全球定位、導航、自動飛行控制、即時影像及資訊傳輸等功能，已可達到監測、監控及搜索等需求。事實上，國內各研究機構包括水保局本身即擁有上百份無人載具所空拍之影像，以往皆採用影像鑲嵌或直接進行照片目視判釋。本研究欲利用水保局之歷史無人載具空拍影像，加入影像增顯提升影像清晰度，如影像有雜訊過高與影像模糊的狀況，研究亦將進行影像修復、影像修補之動作，藉以提升影像品質，優化鑲嵌及建模之成果。因此本研究提出以下四項擬解決之問題：

一、收集歷史UAV影像，藉以獲得不同時期之數值地表高程模型。不同時期之地表高程模型可供其他研究進行預測崩塌土方量之驗證資料，或進行其他加值 分析供相關單位進行有效利用。

二、因所收集UAV影像品質不一，因此研究欲發展一套修補及優化影像之研究流程，藉以提升影像品質。研究加入影像增顯、影像修復以及影像修補等影像處理流 程來優化影像。

三、因航拍影像經費高昂無法頻繁拍攝，利用無人飛行載具可以迅速在災後進行影像拍攝、鑲嵌、建模並產出分析成果。

四、其他加值處理，例如三維模型建置、NDVI、DVI、植株高度及土地利用分類。 並針對崩塌地進行崩塌土體體積評估。

第二章　計畫目標

本計畫為單一年度計畫，為解決上述問題，規劃以下六個研究項目處理以上四個問題，分述如下：

一、歷史影像擷取：利用所收集之影像分析出各UAV影像所拍攝時期之現地地表模型。此數值地表高程模型，做為預估崩塌區域試驗之前期地表三維資訊或作為崩塌模式之初始資料。

二、影像增顯：本研究所使用之高解析無人載具影像增顯技術對於特徵萃取的正確性及增顯後的清晰均可大幅提升，可有效輔助後續判釋作業。

三、影像修復：利用影像處理方式去除UAV影像上之雜訊及解決影像模糊現象之演算法，預估還原出與呈現原始影像，功用為去除影像模糊與噪聲。

四、影像修補刪除影像中不需要之物件(如雲遮、霧霾、雜訊等)，並進行修補以利後續 影像鑲嵌，還原影像完整性。

五、二維、三維影像建置及加值：正射影像鑲嵌、三維模型建置、NDVI、DVI、體積估算、植株高度及土地利用分類等加值應用。

六、崩塌土方計算：利用UAV影像所產出之高解析度DSM可做為單一崩塌區域崩塌土方量之研究材料。

第三章　研究方法

本研究將所收集之UAV影像，恢復拍攝時現地之三維模型及正射影像，並進行後續分析。在進行IBM影像建模前，本研究將加入影像增顯、影像還原及影像修補等工作以提升影像品質，可有效優化所建置之模型，實施方法與步驟如圖3-1所示。

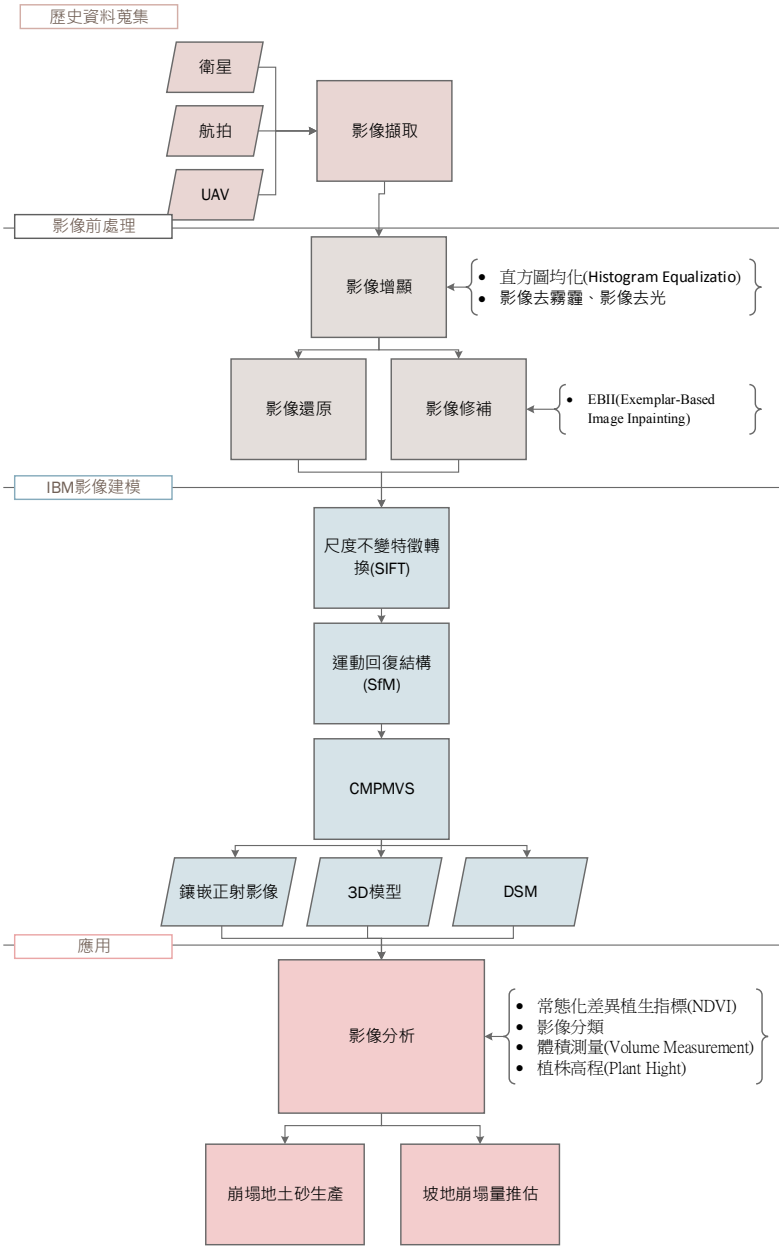


圖 3-1　本計畫研究流程圖

第一節 影像擷取

遙測影像範圍涵蓋非常廣，其適用的範圍亦隨著研究的目標與經費等情況而有所差異，表 3-1 分別針對衛星影像、無人載具影像與近景攝影測量影像特性加以比較。由於觀測不同地表現象及其變遷會影響觀測內容分類系統、觀測方法、觀測工具、以及觀測頻率與精度，故需根據不同業務需求(如：經常性或即時性之業務)、不同面積大小、不同精度需求等應用目標，選取衛星影像、近景攝影測量影像或無人載具影像等資料進行觀測，以作為擬定作業規劃之依據。

傳統的衛星遙測，適合做長期的監測工作，雖然其空間解像力最低，但由於衛星遙測具有涵括範圍廣大，資料更新快速，可信度高，資料格式適合電腦分析與成本低廉之諸多優點，但是受制於雲層天候阻礙及無法對於災損情況及面積作明確分析，對於目標物搜索亦有其限制。

有人飛機裝載航空相機拍攝，其飛機單價高、專業飛行員及攝影設備操作員要求高、飛行距離遠、航空拍攝相機等設備精度高、飛行高度高等特點，並且其飛行安全要求高、購買及操作成本高。其操作性強、專業設備和攝影載重攜帶多，但是需要機場跑道起飛降落，因此與正常航線飛機相同飛行航線、高度及共用機場跑道，更由於其飛機及航空拍攝設備單價高，故有人航拍機數量稀少。

無人飛行載具與偵察衛星相比，具有低執行成本、能靈活的偵查特定區域及高地面目標辨識率等特點。就無人飛行載具與近景攝影測量而言，具有高機動性和高時間解像力與較不受天氣影響等優勢，如在風災過後，在人力無法進入且雲層較厚的情況下，無人飛行載具仍可執行監測的工作，在道路搶通後配合近景攝影測量儀器，便可取得更多的相關資訊。

表 3-1　衛星影像與無人飛行載具影像之特性比較

遙測影像來源	主動式衛星影像	被動式衛星影像	無人載具飛行器	近景攝影測量	機載航照影像
單位面積成本	低	低	中	高	最高
涵蓋範圍	大	大	小	最小	大
空間解像力	低	低	高	最高	高
時間解像力	固定	固定	任務週期	任務週期	任務週期
機動性	低	低	最高	高	高
受天氣影響	低	高	最低	低	低
影像處理	易	難	難	難	難
特定或小區域應用	中	不適合	最適合	適合	適合
載具高度	高	高	低	最低	中

資料來源：本計畫

UAV 的類型大致上可依飛行滯空時間或以飛行方式分類，其所提出兩大分類：依飛行滯空時間進行分類：透過不同的飛行時間與飛行大氣大小可依略分為微型(Micro Aerial Vehicle, MAV 或 MUAV)、迷你型(Mini UAV)、近距離(Close- Range UAV)、短距離(Short - Range UAV)、中距離(Medium - Range UAV)、中高長滯空型(Medium-Range High-Endurance, MALE)、高高空長滯空(High-Altitude Long-Endurance, HALE)。依照飛行方式分類：主要可分成定翼型(Fixed wing)及旋翼型(Rotary wing)兩種。定翼型具有續航力較好、飛行範圍廣、穩定性高等特性，但大部分需有足夠範圍的起降跑道，在地型變化大或地物多的地區不適合飛行；相較之下旋翼型可垂直起降、停懸於空中拍攝的優點，適合於地勢起伏大、障礙物多地區飛行，兩者比較如表 3-2。

表 3-2　定翼型與旋翼型UAV比較表

UAV 種類	定翼型	旋翼型
圖片		
飛航範圍	較廣	較小
續航力	較長	較短
氣候及風力影響	相對穩定	相對較差
起降方式	跑道	垂直起降
飛行模式	持續航行	可定點停懸
震動	較小	較大
適合地區	空曠地區	都市或地形起伏較大區

資料來源：本計畫

以遙控無人載具（UAV）快速及機動性、可低空雲下作業之特性，應用於災害發生初期影像資料獲取具有即時性之優勢，且遙控無人載具（UAV）航拍影像解析度較高，對於災情判釋亦相當有幫助。所拍攝之影像後製處理，雖像片邊緣部分從檢核的部分可看出變形較大，但崩塌地區周圍誤差約在 5 公尺左右，此誤差範圍於緊急災害情況分析使用時，可切除周圍變形之區域進行分析。另利用前期成果之地物特徵點坐標作為控制點，節省至傳統地面控制點須實地進行地面控制量測所耗費之時間與人力，此作法符合緊急時影像快速後製處理需求。此影像產製時間自相機率定至完成數值表面模型 (DSM) 製作並扣除飛機航拍之時間產製時間約 12 ～ 24 小時，此產製之成果可快速且完整瞭解災害發生地區之即時地形資訊，提供相關救災單位於緊急災情研判及救援使用。據以分析集水區崩塌演變以

及追蹤後續土砂運移情況。

第二節 影像增顯

一、直方圖均化

本研究所使用之高解析度無人載具影像增顯技術對於特徵萃取的正確性及增顯後的清晰度均可大幅提升，可有效輔助後續判釋作業。為了進行特定的影像處理，有時須對影像內容進行分析，其中忽略每一個像素的座標資料只針對色彩出現的次數或頻率進行統計，並將統計結果以直條圖的方式呈現就是影像色彩直方圖，如圖 3-2。

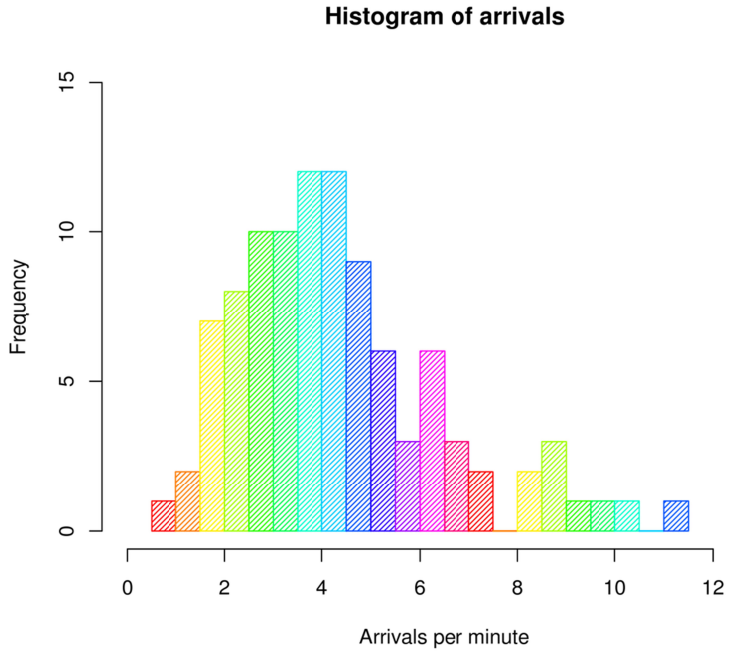


圖 3-2　影像色彩直方圖

在色彩統計上以灰階影像為例，所出現的色彩有 0-255 共 256 種灰階值，因此對灰階影像進行運算分析式的，但對彩色影像而言可能出現 224 種不同的色彩值，將會造成運算困難，所以彩色影像進行色彩統計時會以紅、綠、藍三原色取代來進行統計。

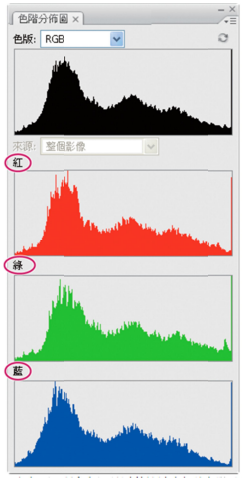


圖 3-3　紅、綠、藍三原色直方圖

當影像是高亮度或是低亮度或是低對比，影像的基本色分析圖表內的分布圖會聚集在某一邊，如圖 3-3 所示。

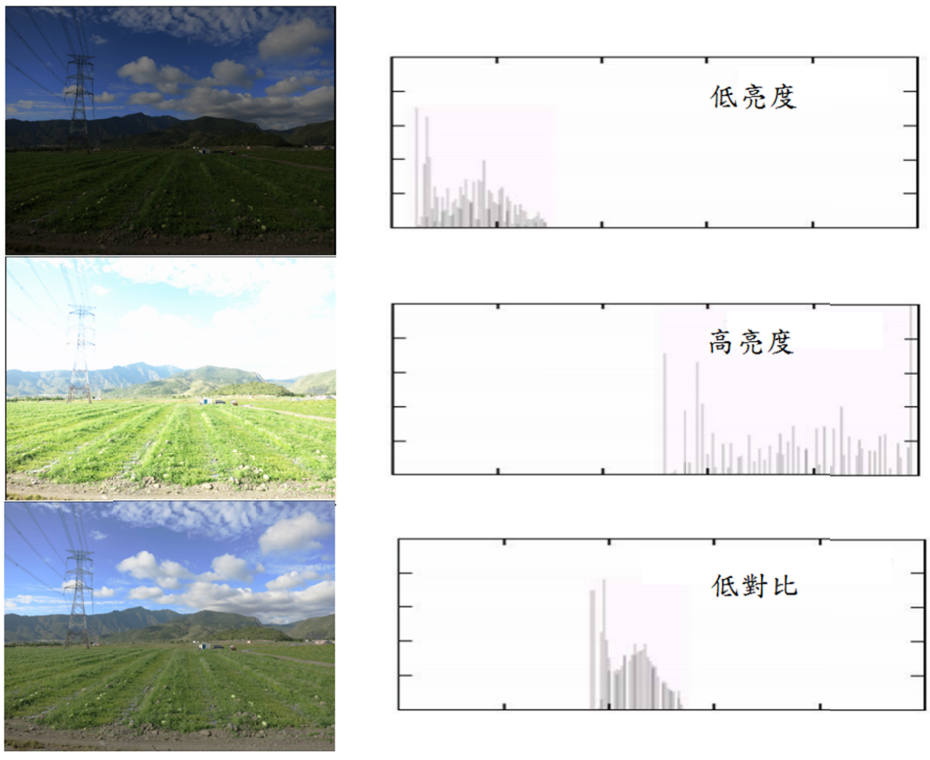


圖 3-4　直方圖亮度比較

直方圖均化(Histogram Equalization)是通過機率分佈的變換，將原始影像轉換為另一影像使其具有均佈直方圖，將原先亮度分佈重新均勻等化到新亮度值。使不同地物間之光譜特性造成各種不同的統計分布，經過處理後高對比看的清晰影像，如圖 3-5。

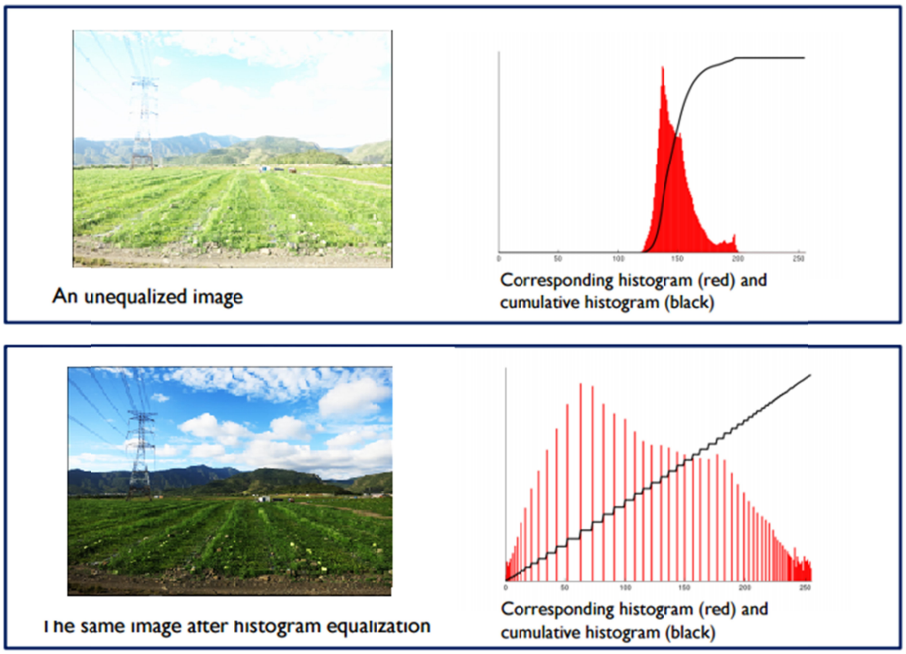


圖 3-5　直方圖均化

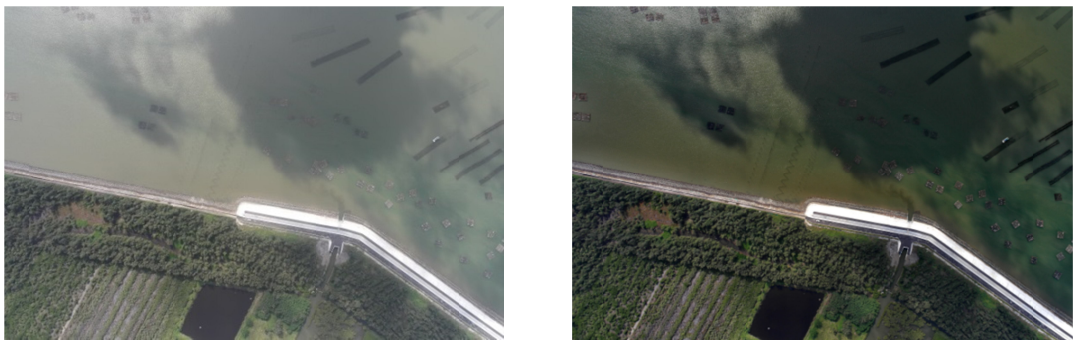
直方圖均化公式如下：

$$S_\kappa = c(\gamma_\kappa) = \sum_{j=0}^{\kappa} \mathcal{P}_\gamma(\gamma_j) = \sum_{j=0}^{\kappa} \frac{n_j}{n}$$

其中 K=0 to n-1 and 0≤γ_κ≤1

二、影像去光及去霧

UAV 拍攝影像受天氣影響甚大，在進行水面上拍攝時常見問題如水波反射強烈及水氣導致之霧霾將影響影像品質，故應避免陽光導致影像全反射太過強烈。可採用之影響去霧霾之演算法為 Dark Channel Prior，去霧前後影像如圖 3-6。



(a)原始影像　　(b)去霧霾後影像

圖 3-6　影像去霧霾成果

侵蝕(erotion)運算為求局部最小值之運算，可利用適當之結構元素消除小而不具特性之像素，使物體邊界向內收縮，以下為膨脹(dilation)判斷式：

$$\mathrm{dst}(x,y) = \min_{(x',y'):element(x',y')\neq 0} src(x+x', y+y')$$

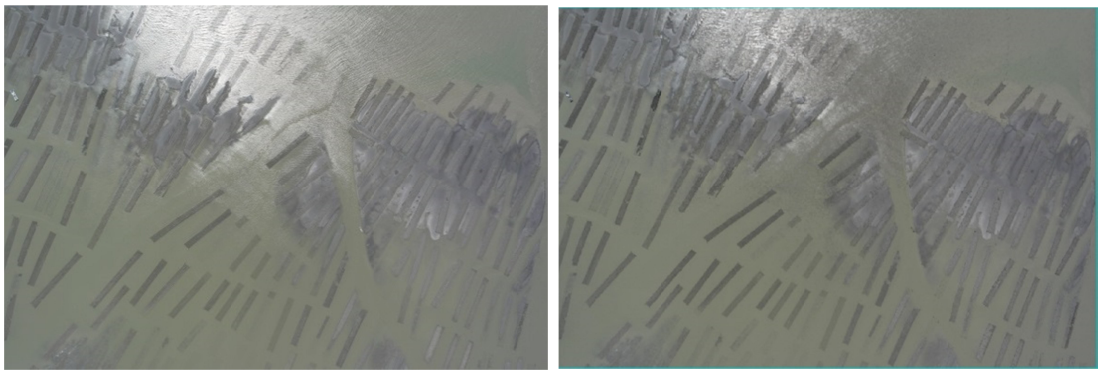
膨脹運算為求局部最大值之運算，將物體附近之像素合併到物體中，使物體邊界向外延伸，最後物體會擴大，可利用適當之結構元素補齊影像之空洞處，以下為膨脹之判斷式：

$$\mathrm{dst}(x,y) = \max_{(x',y'):element(x',y')\neq 0} src(x+x', y+y')$$

影像去光前後如圖 3-7：



(a) 原始影像　　(b) 去光後影像



(c) 原始影像　　(d) 去光後影像

圖 3-7　影像去光成果

第三節　影像還原

去除雜訊或腐化現象之演算法，預估還原出與呈現原始影像，功用為去除影像模糊與雜訊

一、Lucy-Richardson 演算法

當影像被記錄在相機上數位化時，如果有模糊現象發生，該顯示的地方沒有正確顯示而產生分散、模糊的狀況，即為點擴散。在影像中觀察到的像素資料可以表示成點擴散函式，而潛像如下所示：

$$d_i = \sum_j p_{ij} u_j$$

其中：

p_{ij}為點擴散函數(光線進入影像之真實位置j結果在i被觀測到)。u_j是在位置 j 觀測到之像素值中的潛像d_i是在像素位置 i 的觀測值。在影像資料中的光子雜訊在u_j是泊松分佈的假設下進行統計數據。計算的方法為u_j給定了觀測值d_i以及已知的p_{ij}，以下為u_j計算疊代式：

$$u_j^{(t+1)} = u_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i}{c_i} p_{ij}$$

其中：

$$c_i = \sum_j p_{ij} u_j{}^{(t)}$$

二、維納濾波器(Wiener filter)

維納濾波器去模糊法與非遞迴式有關，尋找與模糊圖像有著最小均方誤差的圖片做重構，維納濾波器利用了線性化方式代替非線性最小化之問題，雜訊如果為高斯雜訊，則維納濾波器相當適用。首先給

定一系統參數：

$$y(t) = (h * x)(t) + n(t)$$

其中*表示卷積。x(t)一些輸入信號（未知）的時間 t。h(t)是一個線性時不變(linear time-invariant)脈衝響應(impulse response)的系統。n(t)為一些未知的附加噪聲。y(t)為圖像觀察到的信號。最後目標是要找到可以估算 x(t)的 g(t)，公式

$$\hat{x}(t) = (g * y)(t)$$

其中$\hat{x}(t)$是 x(t)最小化均方誤差的估計值。

維納濾波器提供 g(t)，演算式如為：

$$G(f) = \frac{H^*(f)S(f)}{|H(f)|^2 S(f) + N(f)}$$

其中上標*表示共軛，以及 G(f)和 H(f)是分別在頻率 f 進行傅立葉變換的 g(t)和 h(t)。S(f)是輸入信號 x(t)的功率譜密度的平均值。N(f)是噪聲 n(t)的平均功率譜密度。維納濾波器既可以在時域或頻域中進行：

$\hat{x}(t) = G(f)Y(f)$

其中，$\hat{x}(f)$和 Y(f) 分別是的傅立葉變換後的$\hat{x}(t)$和 y(f)，然後執行傅立葉逆變換$\hat{x}(f)$獲得$\hat{x}(t)$。

第四節 影像修補

本計畫使用之影像修補法為 EBI(exemplar-based image inpainting)快速影像修補演算法，此法欲刪除影像中不需要之物件，並且補齊刪除後之毀損區域，使影像看似與真實影像相似，修補需選取欲刪除之物體，圖 3-8(1)表示演算法可以找出附近之結構與紋理來恢復刪除後區域之資訊，圖 3-8(2)表示Ψ_p內點 p 介於 Ω 與φ之間，圖 3-8(3)中Ψ_p,與$\Psi_{p''}$蒐集資訊以用於修補

Ψ_p，圖 3-8(4)即為計算後之修補成果。其中 P 為欲修補之像素點，Ω 為欲刪除區域，δΩ 為邊界輪廓，Φ 為原始影像結構及紋理資訊區域，Ψ_p,與$\Psi_{p''}$為修補資訊來源位置示意，Ψ_p 為選取之修補區域。

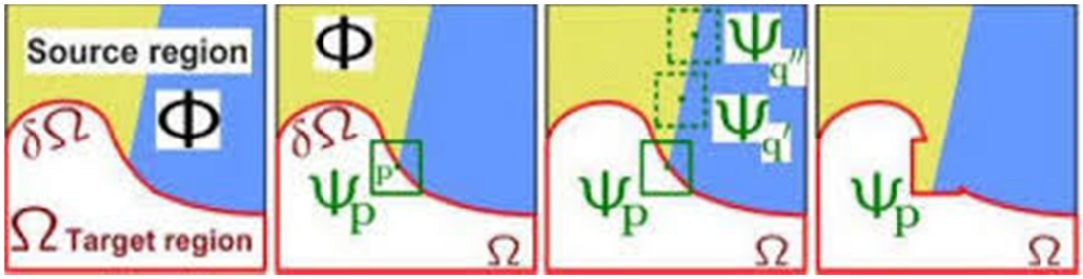


圖 3-8　EBI計算示意圖(1)~(4)

EBI 之計算公式，首先須計算優先權，補齊先後順序決定之數值：

$$P_{(P)} = C_{(P)} \times D_{(P)}$$

其中$C_{(P)}$表信心度或置信度(confidence)

$$C_{(P)} = \sum q \in \Psi_p \cap \bar{\varphi} - \frac{C_{(q)}}{\left|\Psi_p\right|}$$

$D_{(P)}$表數據群(data term)

$$D_{(P)} = \frac{\left|\nabla I_p^{\perp}\right| \cdot n_p}{\alpha}$$

$\left|\Psi_p\right|$：Ψ_p 的面積。α為正規化因子，等同於灰階圖像中的 8-bit 的 255。$\nabla I_p^{\perp}$為點 p 的等光強度。n_p為 p 點沿著 δΩ 的正交單位向量。

以下為 EBI 修補步驟：

步驟 1：選取欲修補或移除之區域。

步驟 2：優先權$P_{(P)}$計算比較。

步驟 3：得出最高的$P_{(P)}$的待修補區域Ψ_p。

步驟 4：計算具有最短距離之最佳修補材料Ψ_q。

步驟 5：以修補材料Ψ_q取代Ψ_p。

步驟 6：執行步驟 2 到步驟 5 直到修補結束。

第五節 IBM 影像建模

本計畫應用電腦視覺影像處理領域多種演算法進行三維模型重構，此種非常規攝影量測與一般的攝影測量或 Lidar 不同，一般攝影測量或 Lidar 在量測時需先得知儀器上的參數，而非常規攝影量測不需先得知儀器上的各個參數，而是利用多種演算法計算儀器上的參數，便可基於影像建模透過 SIFT、SFM、CMPMVS 等多種演算法進行影像拼接與 3D 建模(Yang et al. 3013)。

一、尺度不變特徵轉換(SIFT)

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)是一種找出圖像特徵點的演算法，主要是利用金字塔分層的方式，把計算量相對大的工作在初期步驟完成，使計算量可以降低以方便後續的步驟計 算，也提高了 SIFT 演算法的效率。SIFT 演算法在資訊量豐富的影像中具有提取大量特徵點且均勻分佈的能力，此演算法提供足夠的能力去完成物件匹配與識別的工作。將圖片上每個 pixel 值，與其相鄰之八個 pixel 之值，乘以高斯分布的數值，將不同σ值之圖片相減，取其高斯差分函數 DoG，取其特徵點後，找出極值，然後做不同圖片之特徵點匹配其公式如

$$D(X,Y,\sigma) = \big(G(X,Y,k\sigma) - G(X,Y,\sigma)\big) * I(X,Y)$$

$$= L(X,Y,k\sigma) - L(X,Y,\sigma)$$

二、運動回復結構(SfM)

SFM (Structure of Motion,SfM)則藉由 SIFT 從多張重疊影像部分匹配相同的特徵點位，以核幾何(Epipolar Geometry)原理反算出相機拍攝

與物體的相對關係，恢復相機在不同拍攝位置的內外方位參數，並推算出物體明顯邊界結構的稀疏三維點雲，獲取場景的三維空間坐標，如圖 3-9。簡而言之， SFM 主要目的有三項：(1)分析相機拍攝的位置姿態與影像；(2)恢復相機拍攝影像時的移動軌跡；(3)重建影像中的三維場景。

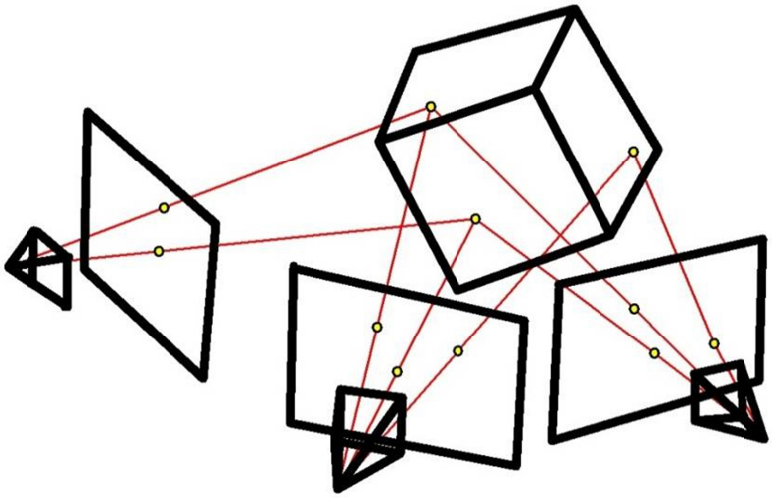


圖 3-9　SFM三維重建

三、CMPMVS

前述 SfM 可計算相機拍攝參數並萃取稀疏點雲，而多視角立體(Multi-View Stereo, MVS)則透過 SfM 計算成果(相機位置、焦距、方位，影像畸變差)進行遞迴計算，可衍伸像素在空間中三維位置，產生密集點雲。但若缺少紋理特徵、透明或者易反射光線等物體(如白牆、玻璃、水)，則難以建立完整的點雲，具備這種特性的部分稱之為弱面(Weakly-supported surfaces)。本計畫為加強模型的完整性，採用 CMPMVS 這套軟體改善難以重建弱面的問題。

CMPMVS 是改良 Visual-Hull 演算法，如圖 10 Visual-Hull 演算法所示，假設立方體在兩張影像 I、I’、I”、I”’中能夠切割為前景與背景，而相機中心則視為剪影圓錐體(silhouette cone)的尖端 V、V’、V”、V”’，

由相機發射光線切割物體剪的邊緣，圓錐包覆整個物體，多個不同角度圓錐的交會處即為 Visual-Hull，據此推算物體在三維空間的位置，並在計算出來的三維點雲上加入了門檻值，使 Visual-Hull 再判斷是否正確點更加精確。

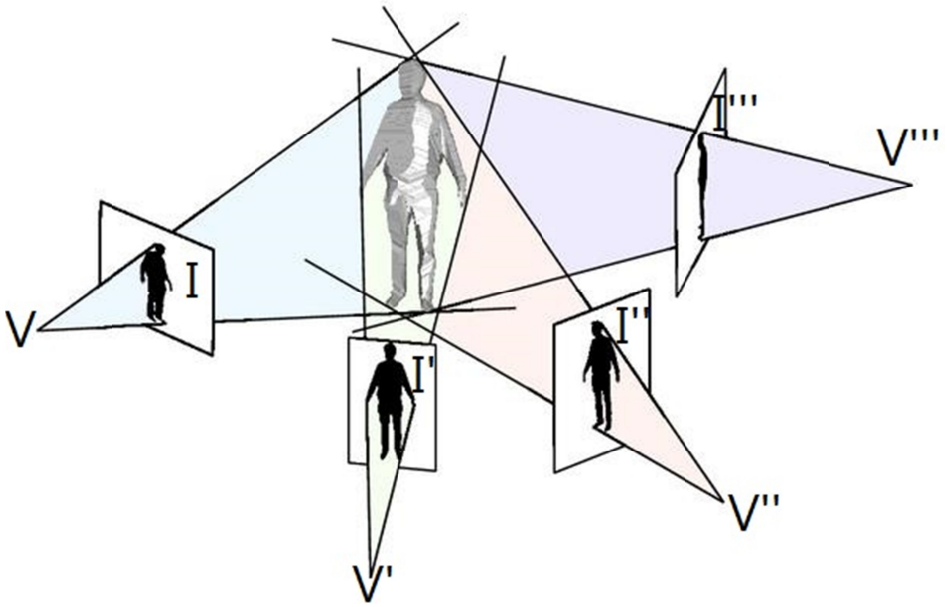


圖 3-10　Visual-Hull演算法

在建置出大量的點雲後，點雲與點雲之間並無任何的連結，都是單獨的一點，無法製作出一個完整的 3D 模型，因此本研究使用三角網格面(Mesh Triangles)製作許多個網格，網格會以一系列的連接線段顯示，此為模型紋理的最小單位，由於物體的三維模型形狀規格不一定，因此選用三角網格製作出大小不同網格，三角網格優點在於三角網格一定為平直面，四邊網格大部分為平直面但是有一部分不為平直面，因此選用三角網格。

Delaunay 三角測量表面重建為製作網格的方法，本計畫使用 CMPMVS 這套軟體，CMPMVS 使用了 Minimum cuts for optimal surface reconstruction 演算法改善了 Delaunay 的表面重構法，其 Minimum cuts for optimal surface reconstruction 優化了 Delaunay 的四面體，主要增加

一個判斷式，判斷面(E(S))是否為正確地的面，如 Minimum cuts for optimal surface reconstruction 判斷是否正確面，其公式如：

$$E(S) = E_{vis}(S) + \lambda_{qual} E_{qual}(S)$$

其中$E_{vis}(S)$為偏差錯誤總和

Equal(S)為可能不出現在正確的面

λ_{qual}為判斷是否出現在正確面的權重

第六節 影像分析

經由前述方法可進行影像分析，本研究將進行影像之 NDVI 分析、DVI 分析，分析植生分布狀態，使用 DSM 分析體積及植株高程，並進行影像分類，以供後續進行分析應用。

一、常態化差異植生指標(NDVI)

常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1973)將近外光波斷與紅光波段數值之差與兩波段數值之和的比值定義為常態化差異植生指標，該指標為一波譜直線式組合因具有規整之效果，可減少地區間與季節間因光能量不同所造成之波譜反射差異，因此在使用衛星影像進行植被研究及植物物候現象研究中廣泛被應用，是植物生長狀態及植被空間分佈密度的最佳指標，且與植物分佈密度呈線性關係，又可稱為生物量指標。NDVI 值落在-1.0~1.0 之間，小於 0 的值通常為非植生之雲層、水域、道路及建築物等，反之指數值越大代表綠色生物量之增加。

$$NDVI=\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

二、影像分類

最大概似法為監督式分類的一種，透過選取訓練樣區分析屬性之數值後，用來判讀待分類樣本，決定屬於何種類別，其原理為以待分類樣本的數值去分析其所在機率密度函數值在何類別最大，做為其判釋結果。

一般母體的參數α皆未知，從母體抽出一組隨機的樣本，此樣本之可能性無法得知，因此若找到一估計值$\hat{\alpha}$，且使這組樣本發生可能性為最大時，則稱估計值$\hat{\alpha}$為之最大概似估計值α。定義為：

假設(X1,X2,……,Xn)為抽自母體 f(x,α)的一組隨機樣本，其概似函數(likelihood function)即為此 n 個隨機變數(X1,X2,……,Xn)的聯合機率分配 f(x1, x2,……,xn；α)，因為參數α未知，故此概似函數為α的函數，一般將其寫成

$$L(\alpha)= f(x1, x2,\ldots\ldots,xn；\alpha)= f(x1；\alpha)\cdot f(x2；\alpha)\cdot\ldots\ldots\cdot f(xn；\alpha)$$

$$=\prod_{i=1}^{n} f(xi；\alpha)$$

若 L(α)為概似函數，今有一個估計式$\hat{\alpha}$(X1,X2,……,Xn)可使 L(α)為最大時，則估計式$\hat{\alpha}$(X1,X2,……,Xn)即稱為參數α的最大概似估計式(MLE)，而當獲取樣本資料值(x1, x2,……,xn)代入上式的估計式$\hat{\alpha}$(X1,X2,……,Xn)可知$\hat{\alpha}$，而$\hat{\alpha}$即為參數α之最大概似估計值。求 MLE 的步驟如下：

(1) 先找概似函數，即$L(\alpha)= f(x1, x2,\ldots\ldots,xn；\alpha)= \prod_{i=1}^{n} f(xi；\alpha)$

(2) 令$\frac{d\ln L(\alpha)}{d\alpha}=0$，解α，可獲得$\hat{\alpha}$

(3) 再檢查$\left.\frac{d^2\ln L(\alpha)}{d\alpha^2}\right|_{\hat{\alpha}}<0$

則此估計式$\hat{\alpha}$即為α之最大概似法估計式。

三、體積測量

三維點雲資料多包括植被與其他物體(如挖土機及 電線桿等)，故應先進行點雲移除或降低高度等人為編 修，再使用三維空間科學繪圖軟體 Surfer 比較土方清 運前後數值地形，估算崩塌土方量。圖 3-11 為前後期地 形變化之體積計算模擬示意圖。經後期高精度數值地形減去前期高精度數值地形，所得網格內數值若為負 值代表土方移出、正值為土方移入，再乘上高精度數 值地形網格面積大小，即為單一網格之地形變化量，故崩塌清運土方量為地形變化量之體積總和。

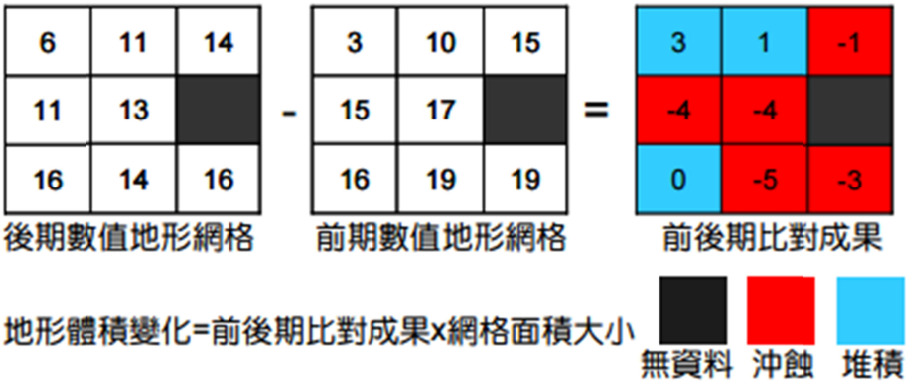


圖 3-11　前後期地形變化之體積計算示意圖

第七節 分析應用

本計畫利用前述分析成果進行崩塌地分析，進行土砂生產量分析，以供相關單位參考。

土砂生產與侵淤變化分析乃針對崩塌區及河道裸露地區，利用數值地表模型 DSM，配分析任兩期地表高程之變異，以定量獲得崩塌土砂生產量、坡面土砂殘留量及河道侵淤量之土方量變化。

將後期 DSM 減去前期 DSM 後，即可定量獲得坡面及河道區域之地形高程變異值，再進行分區統計，可進一步獲得各子集水區之土砂生產及堆積等變異量。由於數值高程模型不包含地物或其他屬性，因此若欲估算一坡面之崩塌量，則利用不同時期之數值高程模型進行估算比對最為合理，數值表面模型及數值高程模型兩種高程數值模式估算結果供比較。

針對不同區位的土砂體積變異估算方法,本計畫係採用矩柱體計算法，又可稱為方格法或網格法，將地表區域劃分為等面積之方塊，每一個柱狀體代表一個矩形方塊之侵淤體積，累計全區之矩柱體則為一個區域的土砂變異體積，如圖 3-12 所示。估算公式如下：

$$V = A\left(\sum_{i=1}^{n} h_i\right)$$

其中n為區域網格總數；A為每一個柱狀體之平面面積(平方公尺)，h_i為每一個柱狀體之侵蝕或淤積深度(公尺)。利用數值高程模型 DEM 進行高程相減，其中每一個柱狀體之平面面積為 4 平方公尺(=2 公尺 x 2 公尺)，每一個柱狀體之高度則為兩期數值地形之高程差值。

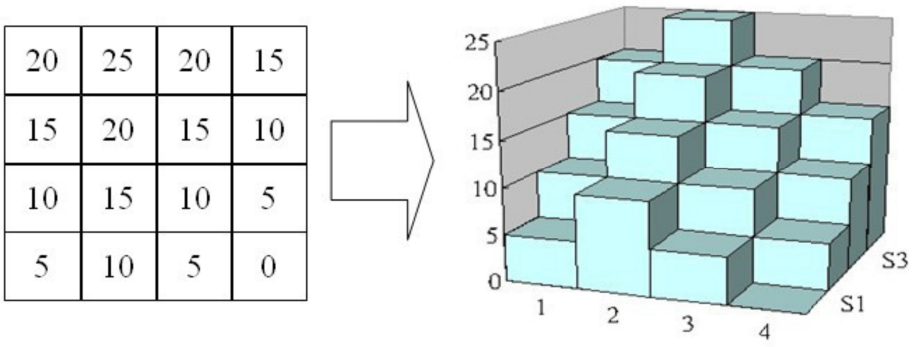


圖 3-12　土砂變異量之矩柱體計算法示意圖

第四章　成果與討論

本研究收集歷史無人載具空拍影像，使用遙測技術進行影像修補，以利後續影像分析及應用，進行山坡地監測以提升遙測資料價值。已拍攝 UAV 資料常發生的缺陷包括，陰影、雲層遮蔽、遮蔽物、拍攝不全、霧埋等，經蒐集的影像進行影像修復、影像處理、影像分析、崩塌地量體分析等，以下利用十個案例說明修補成效，如圖 4-1。

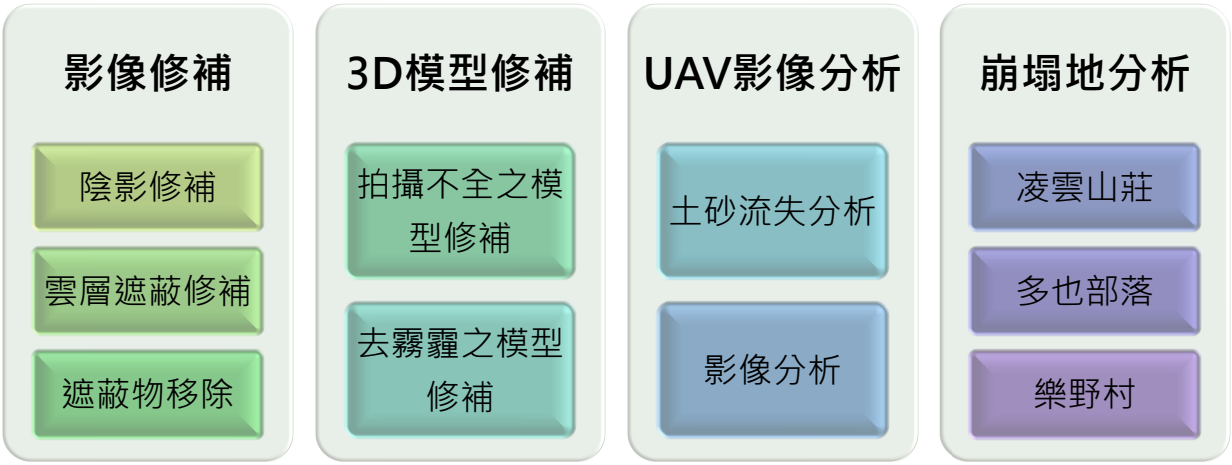


圖 4-1　本計畫之分析案例

第一節 陰影區域之影像修補

本研究擷取歷史 UAV 空拍影像，屏東縣率芒溪之崩塌地資料，該集水區常因豪雨過後的崩塌現象可能影響居民安全。UAV 原始影像如圖 4-2，鑲嵌後之正射影像如圖 4-3 所示。



圖 4-2　屏東率芒溪崩塌地UAV原始影像



(a) 2015/6月



(b) 2016/07月

圖 4-3　多時期屏東率芒溪崩塌地UAV正射影像

2016 年 7 月拍攝之率芒溪 UAV 影像中，皆在天氣良好且無雲遮蔽下進行拍攝，故影像中均無雲遮蔽。但受太陽入射角之影響，導致背光處有陰影形成，導致其難以進行判釋，本計畫對原始影像進行影像修補，以前一年影像修復其陰影處資訊，修復前後之拼接成果如圖 4-4，修復後影像可明顯看出河道及裸露地，並易於判釋。



(a) 原始影像



(b) 陰影之拼接影像



(c) 修復後拼接影像

圖 4-4　率芒溪影像修復成果

第二節 雲層遮蔽之影像修補

拍攝 UAV 影像進行分析及應用時，易受影像上雲層、陰影等干擾，本研究透過影像修補技術，去掉影像之雜訊與遮蔽，並利用歷史資料或周遭資訊進行缺失修補。研究選取受雲層遮蔽之 UAV 影像進行測試。

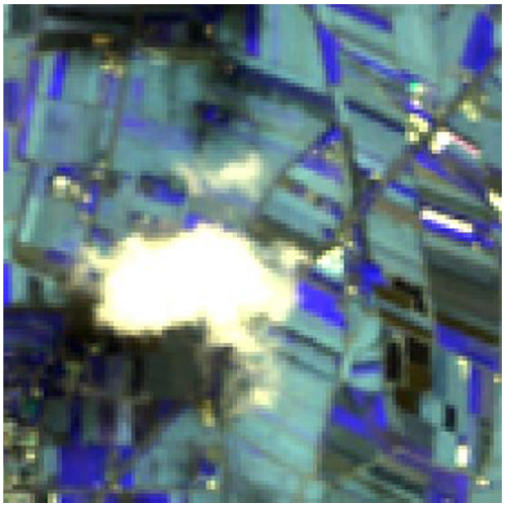
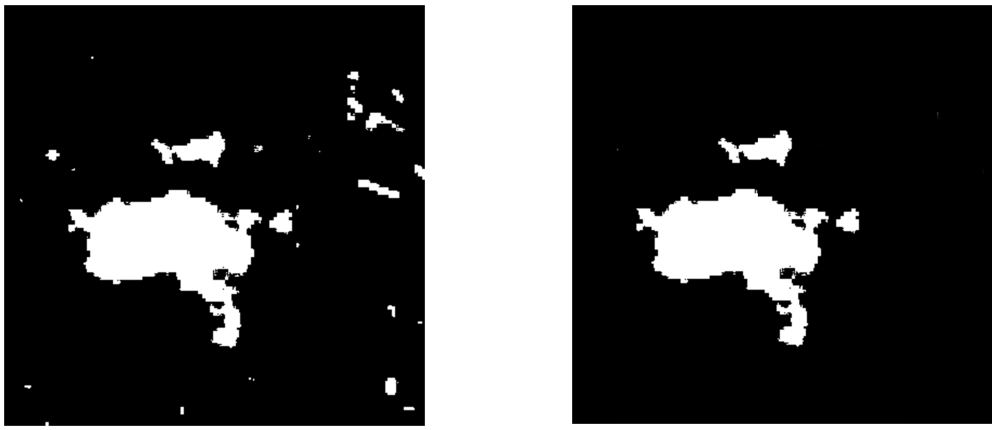


圖 4-5　待修復影像

利用灰階直方圖自動選定門檻值，對影像進行臨界值法，初步計算雲層範圍。其中仍然包含許多雜訊及非必要之資訊，故利用型態學方法，對二值化影像進行雜訊濾除。臨界值法利用影像中不同物件之特性表現於灰階值的差異，使用一門檻值(threshold value，或稱閥值)，將灰階值大於門檻值之像素點灰階值設為 255；灰階值小於門檻值像素點灰階值設為 0，此為二值化影像 (binary image)。二值化後結果即顯示待修復範圍，影像修復利用影像中的已知訊息填補缺失區域，本研究透過 EBI 影像修補針對雲層遮蔽範圍進行修復，成果如圖 4-7 所示。



(a) 初步計算雲層範圍　　(b) 型態學濾除雜訊

圖 4-6　計算雲層範圍

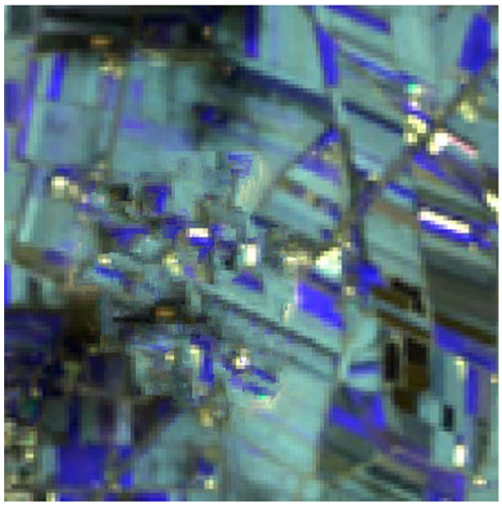


圖 4-7　修補後成果

第三節 遮蔽物移除與影像修補

若 UAV 影像上有遮蔽之地上物，如車子，在製作地形圖時會產生錯誤。如圖 4-8 須將道路中藍色車子移除後修補，進行影像修補測試，再進行影像建模。



(a) 原始影像　　(b) 修復後成果



(c) 3D建模成果

圖 4-8　移除遮蔽物及影像修補及建模

第四節 拍攝不全之 3D 模型修補

UAV 產製之 3D 模型，若因種種現地限制而拍攝不全對建模會造成破圖，本研究利用影像修補之技術將破圖之模型修補，模型復原方式依據破損類型可分兩種，模板法及其他資料填補，模板法針對於大範圍面積中尋找具相似的紋理的素材，填補在破損區域產生相似紋理修復；影像修復則是針對小範圍，使用歷史資料進行修補。本次使用惠蓀林場 UAV 拍攝，因橋下受陰影及橋面板遮蔽，導致橋體破損且橋下破圖之情形。故本次 3D 模型修補分為兩部分，橋體使用歷史影像進行修補，先刪除模型部分如圖 4-11 中紫色區域，即可進行修補作業。因橋下河道與其他河道並無太大差異，紋理特徵相同，故橋下則使用模板法，利用鄰近區域進行修補，修補後之 3D 模型如圖 4-12 及圖 4-13，由圖可見其修補後模型可清楚於橋下通視。



圖 4-9　橋下無拍攝影像之原始模型

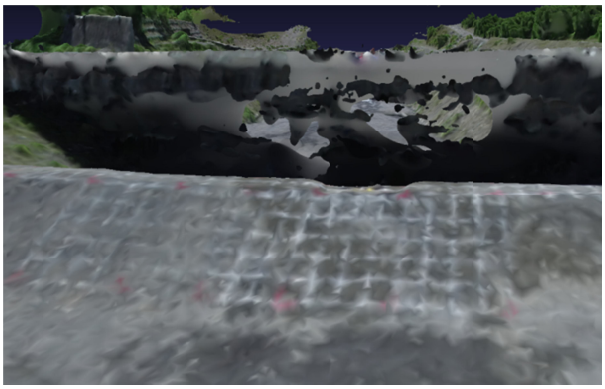


圖 4-10　橋下模型破圖情形

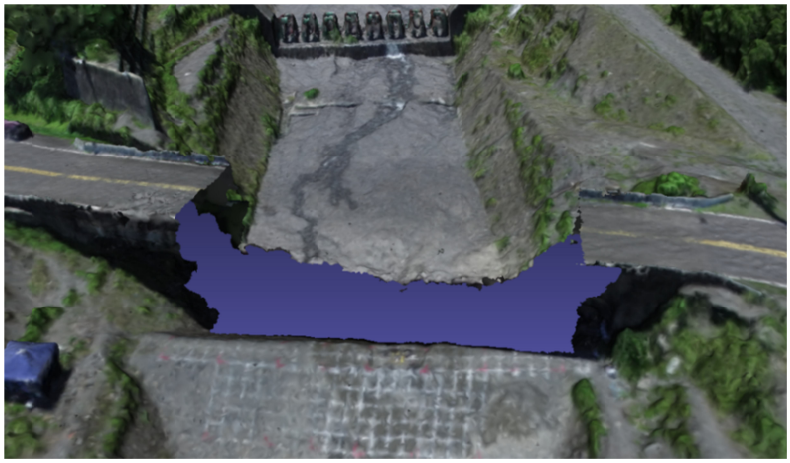


圖 4-11　移除模型破損部分

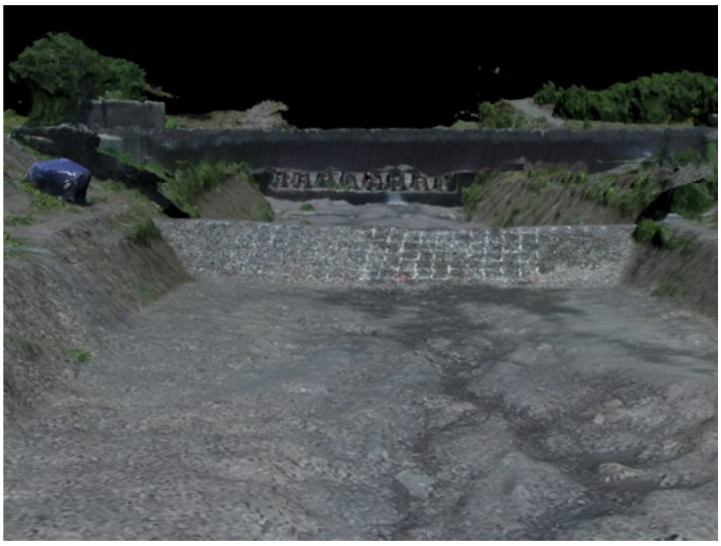


圖 4-12　模型修補成果-往上游看



圖 4-13　模型修補成果2

第五節 霧霾去除及 3D 建模

水土保持局於 2015 年 6 月南投茶山拍攝之影像 UAV 飛行高度約為 100 至 700 公尺，相較於衛星影像較少受到雲層覆蓋影響，但仍受雲霧或大氣光影響導致模糊，而遺失現地原始資訊或降低影像品質，無法有效進行後續的分析及應用，本研究利用 dark channel prior 進行影像去霧埋，可獲得品質良好且穩定之去霧埋後影像，如圖 4-14 及圖 4-15，由圖可看出去霧後影像並無降低影像品質，並完整還原地表資訊。將原始影像去霧後，利用 IBM 演算法重建模型如圖 4-16。



(a)去霧前影像　　(b)去霧後影像

圖 4-14　影像去霧霾前後對比1



(c)去霧後影像　　(d)去霧後影像

圖 4-15　影像去霧霾前後對比-2



圖 4-16　去霧後影像重建模型

第六節 土砂變異分析

利用案例一產製之前後期 UAV 航拍結果估算表面高程變異量，因山區高程落差較大之處人員無法進行量測，故利用 UAV 對研究區進行航拍作業，快速重建並全面性得到量測區內地形地貌資訊。對於大範圍地表保持原貌之地滑判釋分析，可快速劃界堆積區域與推估堆積量，將兩期 UAV 航拍所產製之 DSM 相互疊減的分析結果可看出表面高程變異情形，如圖 4-17。

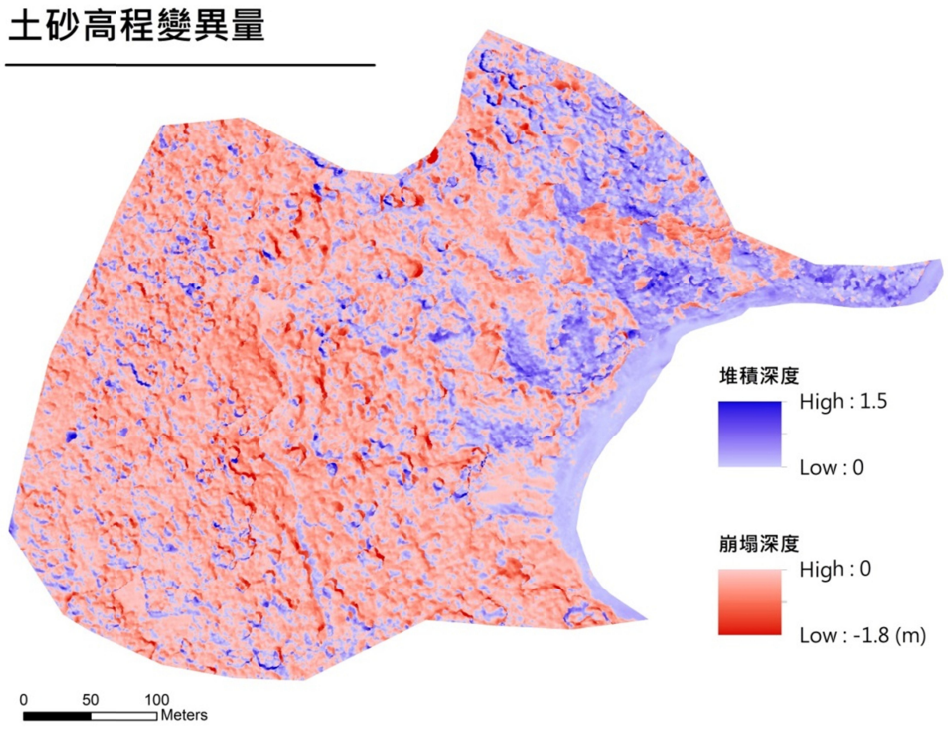


圖 4-17　屏東率芒溪土砂分析(深度)

前後期 DSM 疊減之崩塌深度最大為 1.8 公尺，土砂變異量分析如表 4-1，堆積範圍占面積 66,592 平方公尺，堆積土砂量為 17998 立方公尺；紅色漸層為為崩塌區，面積約 166,001.1 平方公尺，崩塌土砂量為 6728 立方公尺。

表 4-1　土砂變異量分析

堆積土砂量	崩塌土砂量
17998 m^3	6728 m^3

第七節 UAV 影像分類

利用歷史之位於嘉義縣六腳鄉 UAV 影像(2014 年 10 月)，進行修補、去雜訊等優化後處理，並進行影像建模、拼接，可獲得模型資料及正射影像，即可進行後續分析判釋，常用的分析如 NDVI 及影像分類，可快速獲得地表資訊。常態化差值植生指標(NDVI)，是用於分析遙測所得到的資訊。NDVI 通常是用衛星遙感數據計算，以評估目標地區綠色植被的生長狀況，顯示出植物生長、生態系的活力與生產力等資訊。數值愈大表示植物生長愈多。



圖 4-18　NDVI分析-嘉義縣六腳鄉

利用正射影像進行最大概似法分類，此為監督式分類，透過選取訓練樣區分析屬性之數值來判讀待分類樣本之類別，其原理為以待分類樣本的數值去分析其所在機率密度函數值在何類別最大，做為其判釋結果。

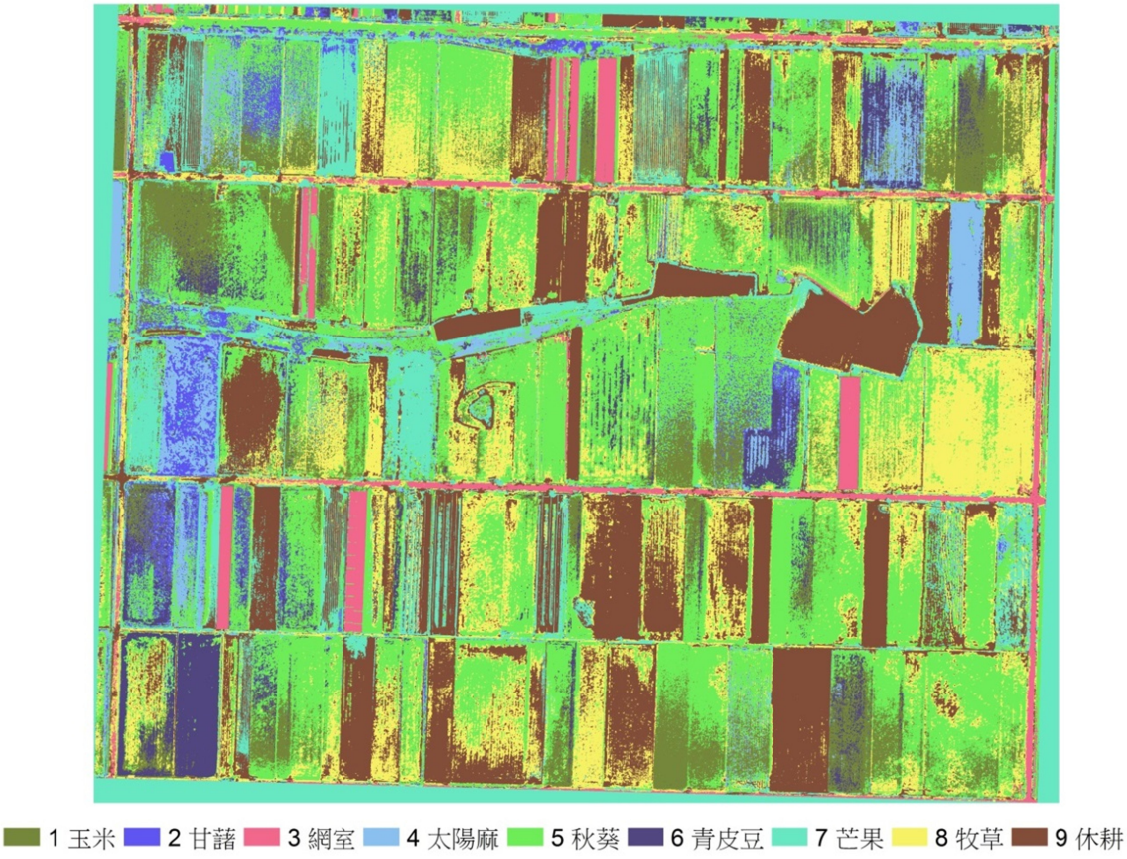


圖 4-19　土地利用判釋

第八節 崩塌地量體分析(凌雲山莊)

南投縣仁愛鄉，於台 14 線 79k 因 2006 年之 69 豪雨造成山溝崩塌，造成鄰近道路路基流失，鄰近路面造成斷裂及落差，並於幾年後位於附近(250 公尺)之凌雲山莊民宿也產生崩塌，本研究利用 UAV 影像進行崩塌調查，調查結果崩塌面積約為 3 公頃。UAV 拍攝時間為 2015 年 5 月，拍攝面積約為 13.05 公頃，總共拍攝 227 張影像，UAV 原始影像如圖 4-20，影像鑲嵌之正射影像如圖 4-21。崩塌面積約 2.19 公頃，影像之空間解析度為 0.049m/pix，UAV 飛行高度約為海拔 1160~1240M，離地約 43M。經 IBM 技術影像建模，影像模型如圖 4-22 至圖 4-25。



圖 4-20　南投凌雲山莊崩塌地UAV原始影像

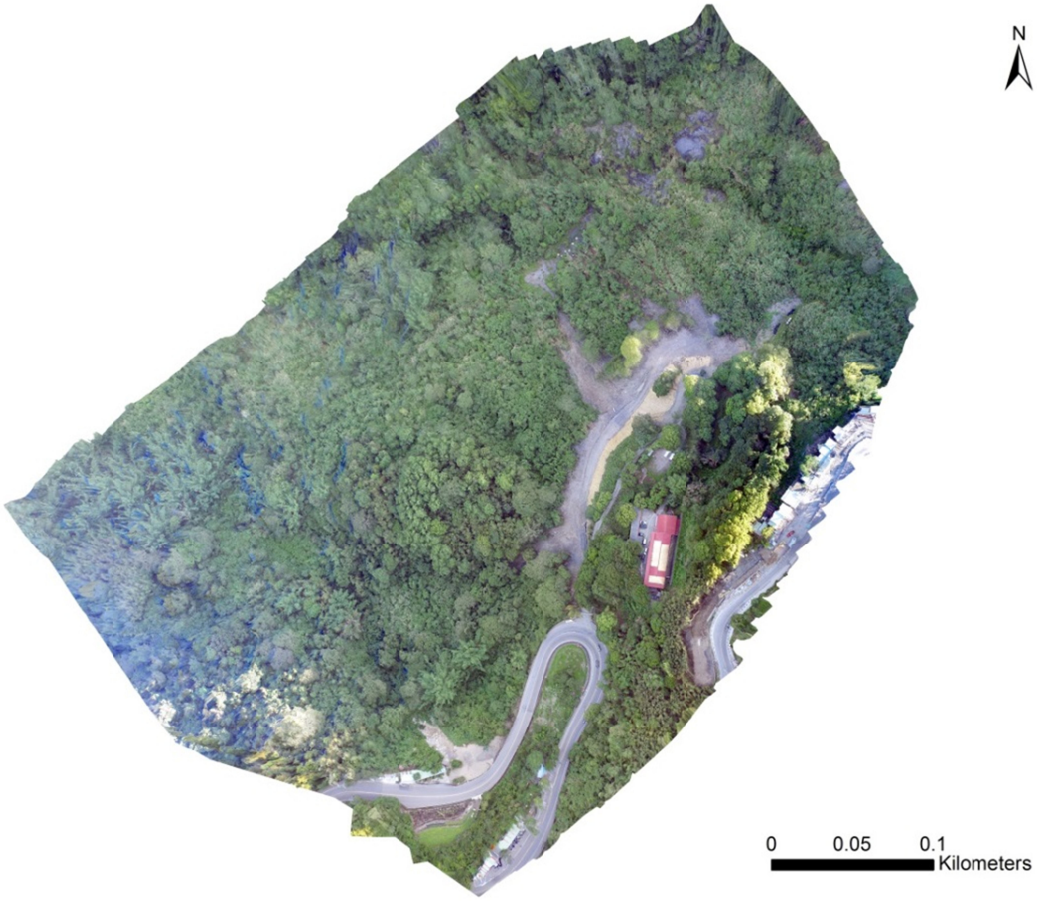


圖 4-21　南投凌雲山莊崩塌地UAV正射影像



圖 4-22　南投凌雲山莊崩塌地模型-凌雲山莊崩塌地



圖 4-23　南投凌雲山莊崩塌地模型-台14 49K崩塌地



圖 4-24　南投凌雲山莊崩塌地模型-1



圖 4-25　南投凌雲山莊崩塌地模型-2

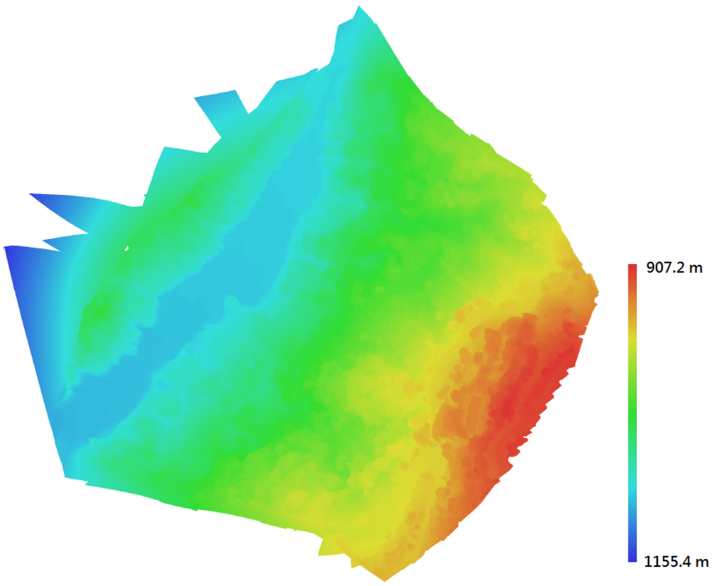


圖 4-26　南投凌雲山莊崩塌地DSM

利用模型成果，提取其點雲高程，進行不規則三角網(TIN) 建構方式，將區域範圍內的點雲資料建構成由諸多的 TIN 單元表示，其每三點相連成一三角面，此方法將點圖層成面圖層之模型，產製 DSM，二崩塌地之成果如圖 4-27 所示。經三維模型量得相關數據：凌雲山莊崩塌地，於圖 4-28 之藍色範圍，崩塌面積約 636.1 平方公尺，厚度約 8~11.5 公尺，崩塌體積約 5088 立方公尺，崩塌土體長度約 64.5 公尺，土體橫向最大寬度約 16.7 公尺。

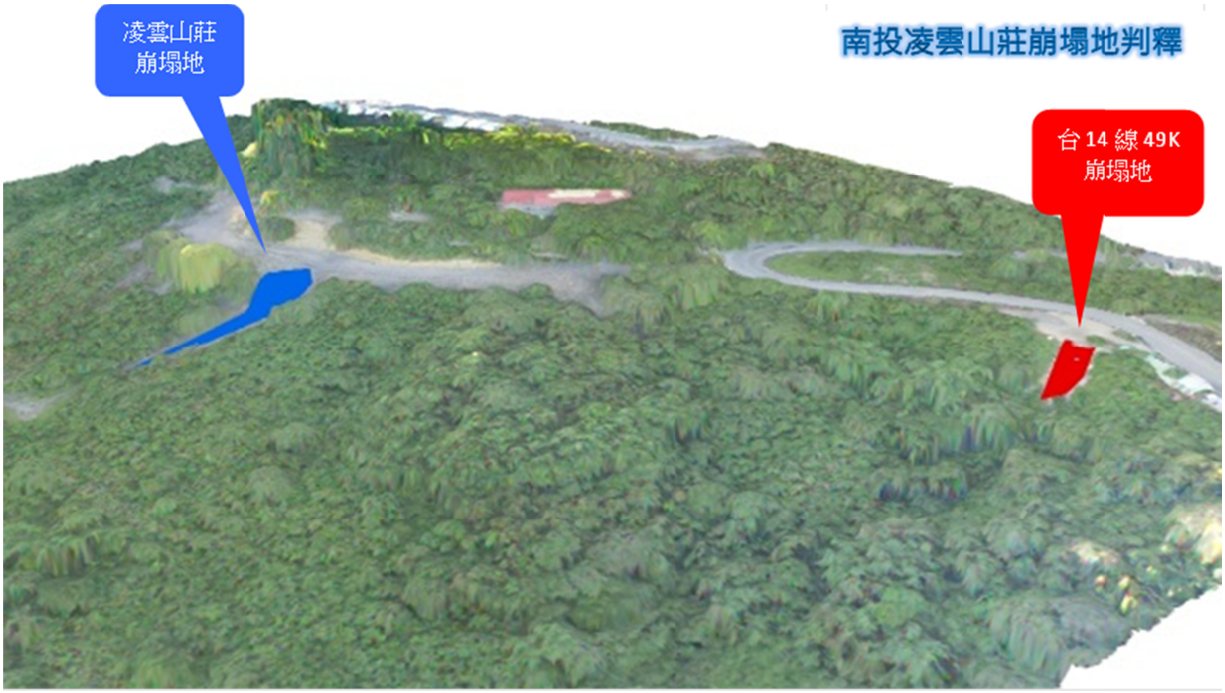


圖 4-27　凌雲山莊周圍崩塌地



圖 4-28　凌雲山莊崩塌地量體分析

台 14 線 49K 道路邊坡之崩塌地，位於圖 4-28 紅色範圍，經三維模型量得崩塌面積約 204.2 平方公尺，厚度約 4.2~2 公尺，崩塌體積約 857.64 立方公尺，崩塌土體長度約 27 公尺，土體橫向最大寬度約 8.2 公尺。

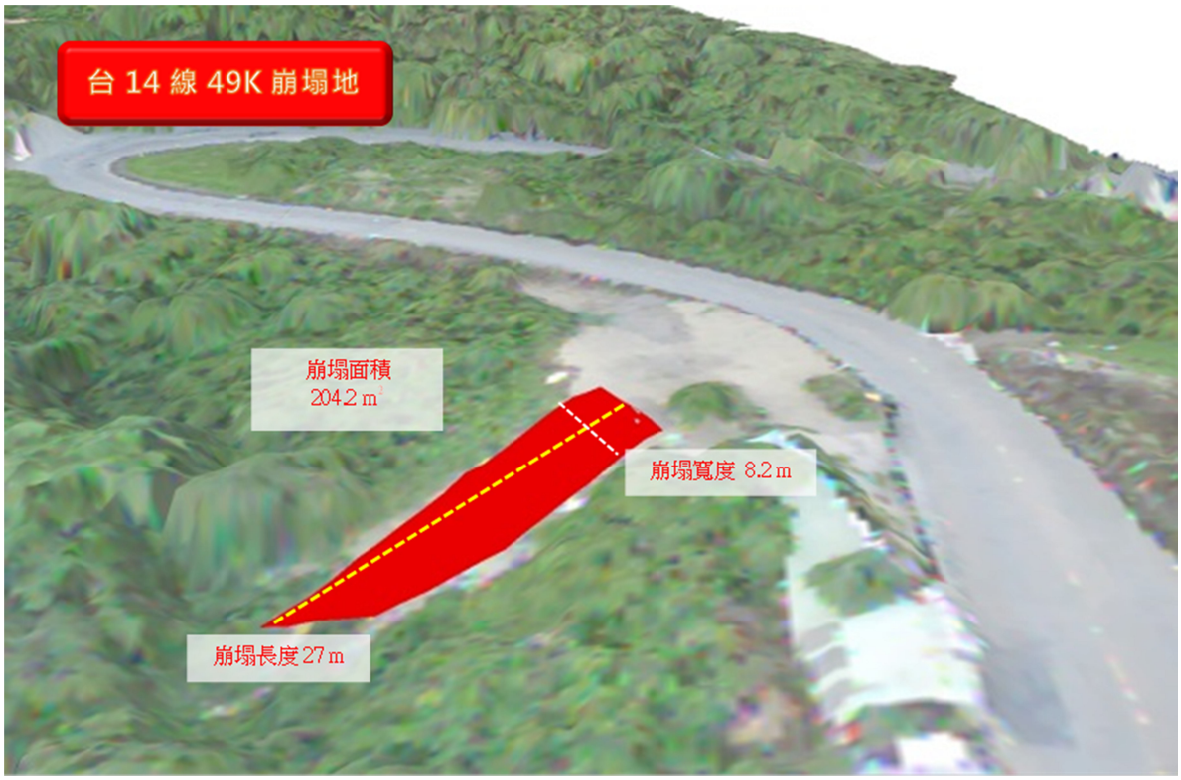


圖 4-29　台14線 49K 崩塌地量體分析

另外，植株高程可利用裸露地與周圍樹木之高差估計，如圖 4-30，該區植株約高 4 公尺。

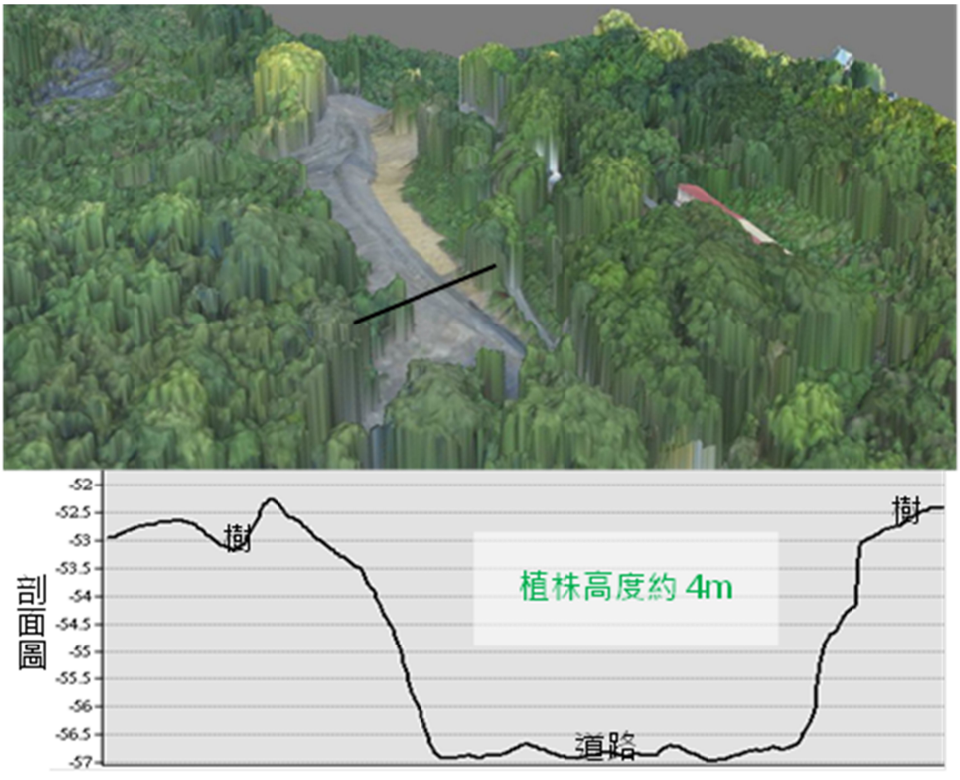


圖 4-30　植株量測

第九節 崩塌地量體分析(多也部落)

阿里山鄉往多也部落的產業道路因崩塌導致道路中斷，經本團隊利用 UAV 航拍影像進行影像建模，以預估其崩塌量體，UAV 拍攝時間為 2015 年 7 月 1 日，總共拍攝 70 張影像，拍攝面積約 200 公頃，崩塌面積約 15 公頃，影像之空間解析度為 0.12m/pix，UAV 航高約距地面 939M。大面積崩塌導致之道路中斷如圖 4-32，厚度約最深達 10 公尺，崩塌土體長約 682.4 公尺，土體橫向最大寬度約 342.5 公尺，高程差約 550 公尺，如圖 4-33。

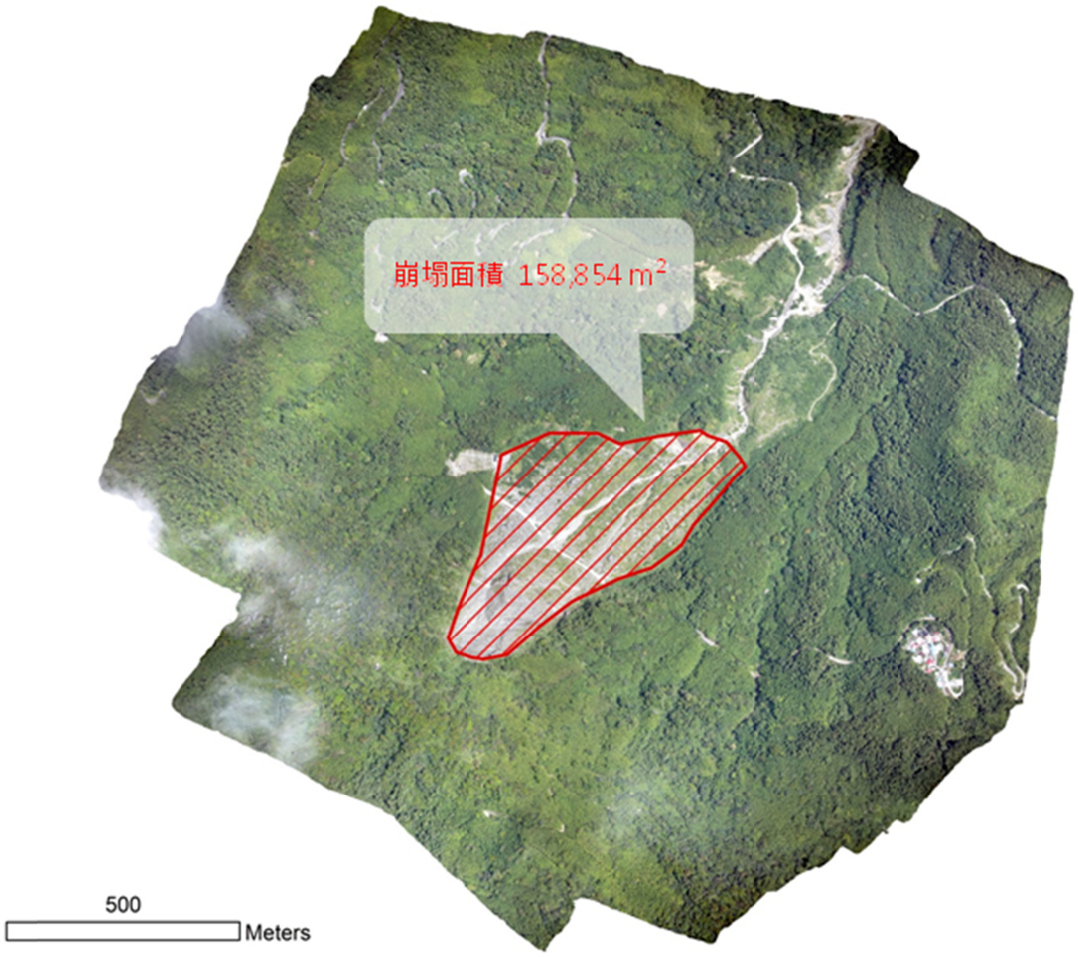


圖 4-31　樂野崩塌A崩塌地位置



圖 4-32　樂野崩塌地A三維模型



圖 4-33　樂野崩塌A地量體分析

第十節 崩塌地量體分析(樂野村)

阿里山鄉樂野村，曾文溪中游之河道邊坡曾發生崩塌，利用水土保持局拍攝之 UAV 影像並進行建模以進行崩塌量體分析，本次航拍時間為 2015 年 6 月 30 日，共拍攝 92 張影像，拍攝面積約 700 公頃，影像之空間解析度為 0.22 m/pix，UAV 航高約為海拔 1710 公尺，距地面約 450 公尺。UAV 航拍正射影像如圖 4-34，3D 模型如圖 4-35，崩塌地面積約為 7096 平方公尺，厚度約最深達 10 公尺，崩塌土體長約 377.9 公尺，土體橫向最大寬度約 251.9 公尺，高程差約 285 公尺，如圖 4-36。

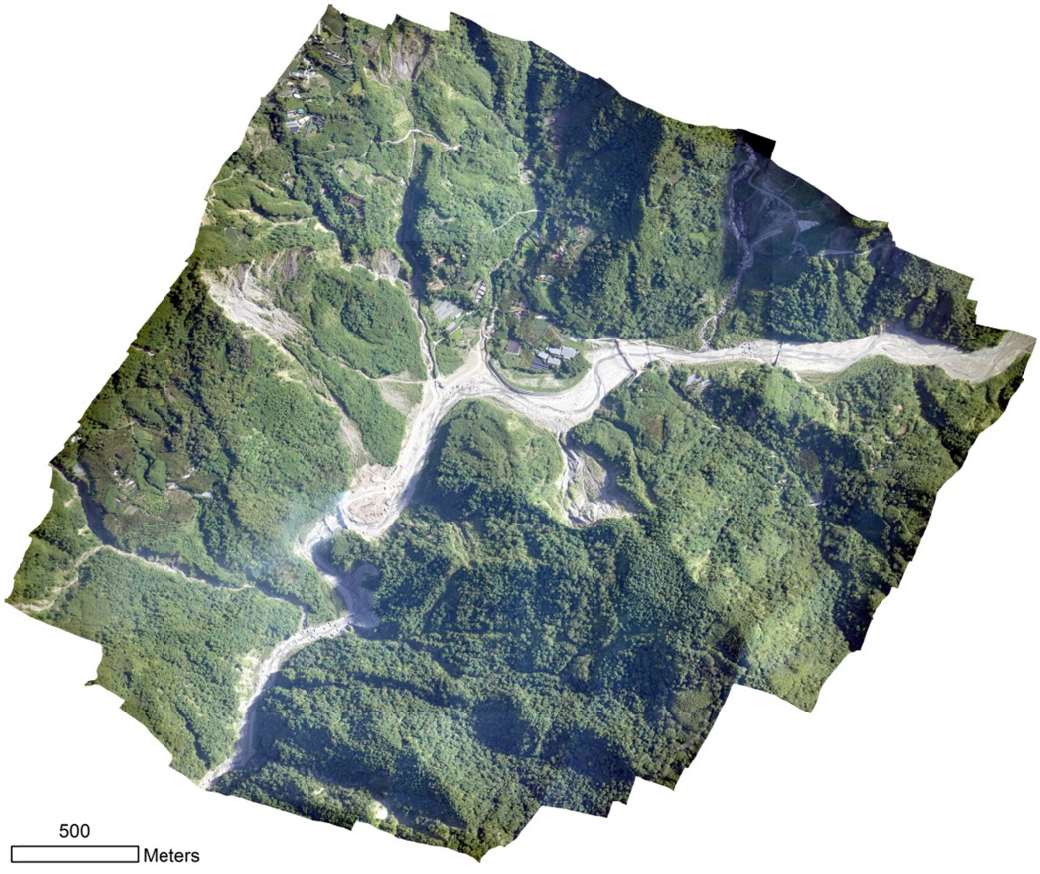


圖 4-34　樂野崩塌B航拍正射影像



圖 4-35　樂野崩塌地A三維模型

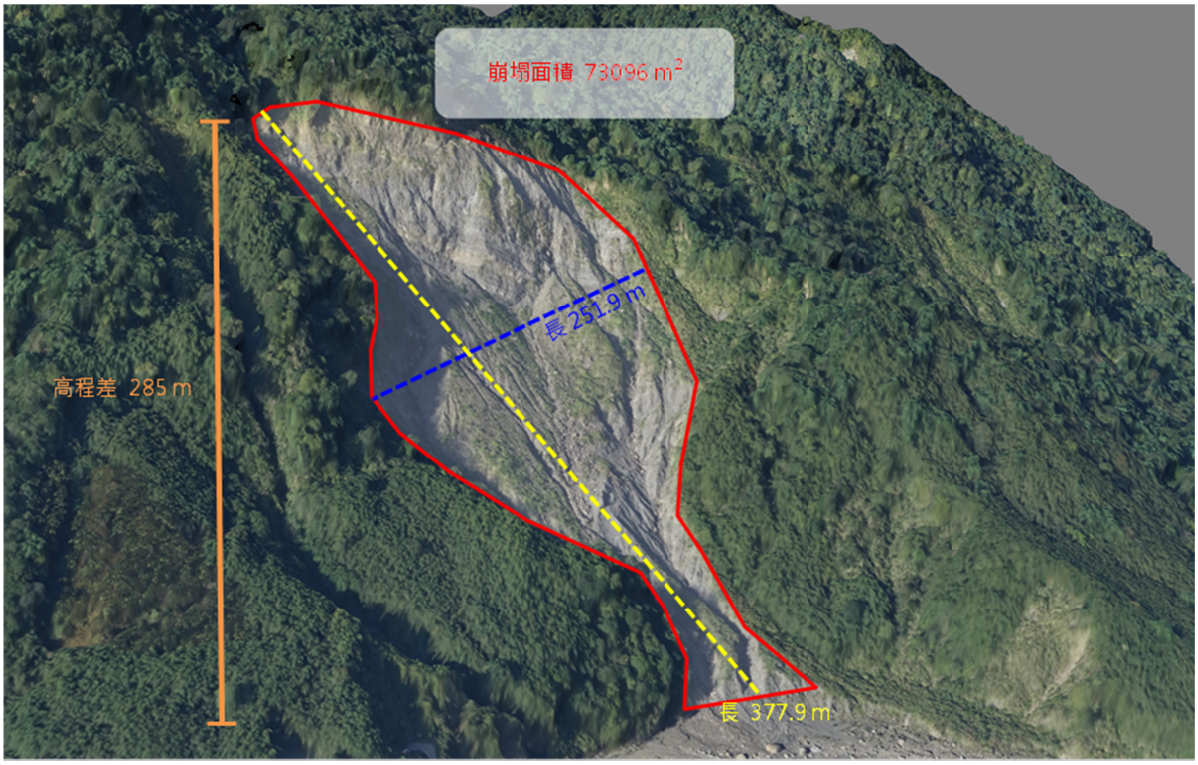


圖 4-36　樂野崩塌B量體分析

第五章　結論與建議

本計畫進行歷史 UAV 影像之擷取、加值、分析及應用，已完成之成果與後續建議如下：

1. 歷史UAV在坡地資訊產製流程:
   本計畫建立一套UAV在坡地資訊產製流程，利用所收集之UAV影像進行IBM影像建模，恢復拍攝時之三維模型及正射影像，加入影像增顯、影像還原及影像修補等工作來提升影像品質，有效優化所建置之模型，快速且有效的進行坡地監測及後續分析。
2. 歷史影像擷取:
   水保局本身擁有上百份UAV影像，本計畫已蒐集多時期屏東縣率芒溪集水區UAV影像、南投縣清境凌雲山莊UAV影像及阿里山樂野地區、多也地區之UAV影像，獲得之歷史資料，均可使用本計畫建立之流程，進行研究以利相關單位有效利用。
3. 影像還原、影像修復:
   本計畫利用影像處理技術，刪除或還原影像中不需要之物件，如陰影下、雲層遮蔽地區失去原始資料之修復，及遮蔽物如車、人之去除，經修復處理後之影像，再進行IBM影像建模，可產製正射影像、三維模型及數值地表高程模型(DSM)，即可進行後續分析研究。
4. 三維模型修補:
   因UAV航拍因覆蓋率不足、晃動、拍攝不全等因素，導致模型破損，使分析上受到限制，利用此修補技術進行模型修復，可獲得完整地形地貌資訊。
5. 影像分析:蒐集多時期UAV資訊，可進行前後期之土砂變異計算，本計畫已完成率芒溪UAV之土砂變異分析。崩塌區UAV模型，則可進行崩塌地之量體分析，對於大範圍地滑判釋，可快速劃界堆積區域與推估堆積量，本計畫已完成凌雲山莊、阿里山地區之崩塌地分析案例，可供其他區域之崩塌地分析參考。

參考文獻

1. Criminisi, P. P´erez and K. Toyama. “Object Removal by Exemplar-Based Inpainting,” IEEE Intl. Conference on Computer Vision, 2:II-721-728, 2003.
2. Lowe, D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision, 60(2): 91–110, 2004.
3. Jancosek, M. and T. Pajdla “Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces,” Journal of Computer Vision and Pattern Recognition, 121-3128, 2011.
4. Richardson, W. H. “Bayesian-based iterative method of image restoration,” JOSA, 62(1): 55–59, 1972.
5. Yang, M.D., C.F. Chao, L.Y. Lu, K.S. Huang, and Y.P. Chen. Image-based 3D scene reconstruction and exploration in augmented reality. Automation in Construction. 33:48-60, 2013
6. Yang, M.D., C.F. Chao, and K.S. Huang. 3D model construction on imagery shot by mobile devices, Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 45(3): 219-224, 2013
7. Zhou, K., Structure & Motion, Structure in Pattern Recognition, Vienna University of Technology, Faculty of Informatics, Institute of Computer Graphics and Algorithms, Pattern Recognition and Image Processing Group, 2010.

附錄

附錄一　期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

開會時間：105 年 9 月 6 日(星期五)下午 3 時 30 分

開會地點：水土保持局第三會議室

主持人：林簡任正工仕修

審查見及回覆辦理情形表：

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	本計畫立意甚佳，可以充分應用歷史 UAV 影像進行事件前、後地形變遷的相關分析，值得推動。	感謝委員肯定。
2	本計畫最大的問題在於歷史 UAV 影像的精度(平面及高程)如何確定？不同精度的 UAV 如何疊合分析。	因 UAV 的飛行高度較低，影像平面誤差不大，高程誤差可能相對較大，僅能回現場補測或以不同影像輔助，以降低誤差。另外，歷史 UAV 影像通常是提供輔助判釋參考，若是須量化歷史 UAV 影像的精度(平面及高程)，可至現場實測不變點以為真值做比較，但就經濟考量，通常不會在低成本的資料上花高成本之精度評估。 不同精度 UAV 仍可進行多元解析度影像疊合分析。
3	本計畫執行成果如何驗證？	本研究之三維模型產製成果，可使用光達產製之 DSM 進行驗證。
4	修補、修復的限制條件為何？	影像修補、修復可利用其他歷史資料或現場影像為修補材料。若蒐集不全或歷史資料仍破損，可用影像處理方式修補，惟此可能導致無法百分百還原現場環境。
5	由於 DSM 只能得到包括地貌的高程，而且在陡峭的崩塌面，高程的誤差很大，因此在作為原本即已裸露的溪床土砂沖淤變化，尚為合用，如作為新生崩塌地的崩塌土方	DSM 在無植生覆蓋之裸露地時與 DEM 相同，故在陡峭的崩塌面上誤差不大。新生之崩塌地，若舊有地形原有植生覆蓋，則須扣除植株高度，此將可降低高程誤差。

	量，則誤差量很大。	
6	為提昇 DSM 的高程精度，建議取光達 DEM 數值為高程中幾個參考點作為校正。	感謝委員建議，若研究地點有光達資料，以此數據當作 UAV 影像之參考點進行校正，在座標對位上沒有問題，只是大部分區域沒有同期光達 DEM 數值。
7	P3，計畫流程圖中衛星，航拍與 UAV 等不同來源不同解析度之遙測影像是否可將這些不同尺度影像整合運用。	不同來源及解析度之影像可作套疊更新，如衛星影像可展示較大範圍區域，而崩塌地則可由 UAV 影像進行較高解析度之更新。
8	P.22，表 3 建議述明體積估算之可能誤差。	體積估算之誤差來源為 DEM，故可參照所產製 DEM 之誤差估算體積誤差。
9	P.14，SR、MLE 請補充說明。	SR 為簡單比植生指標(Simple Ratio Vegetation Index)，其利用近紅外光與紅光兩波段相除之比值，常被應用於推估綠色植物之生物量。 MLE 為影像分類方法中最大概似法之最大概似估計式(MLE)，一般母體的參數皆未知，從母體抽出一組隨機的樣本，若找到一估計值，且使這組樣本發生可能性為最大時，則稱為之最大概似估計值。
10	P.15，DSM 精度說明；前期與後期 DSM 相減之精度?	前期與後期精度不同時，則以精度較大之為基準。
11	P.19，圖片及期中簡報有說明為何把汽車移除，可補充產製前不移除，可增加特徵點判釋原因。	以 IBM 影像建模時，特徵點愈明顯建模效果愈佳，而地面上汽車正是明顯特徵點，有助 3D 模型建置。
12	P.22 表格中高程變化為整體 DSM 平均值或是特定特徵點之高程變化?產製 DSM 邊界變型是否影響其高程?	表格中為兩期高程變化及體積，故為整體研究範圍之土砂變異量。DSM 邊界變型確實較大，固本研究皆去除邊緣覆蓋率較低之區域，進一步再計算研究範圍內之土砂變異量。

附錄二　期末聯合審查會議紀錄暨回覆辦理情形

開會時間：105 年 12 月 3 日(星期六)上午 11:05~11:35

開會地點：國立中興大學雲平樓一樓 F6 推廣教室

主持人：連主任秘書榮吉

審查見及回覆辦理情形表：

項次	審查意見	回覆辦理情形
1	本案創新性及技術性極高，現地實用性則較偏離工程實作性需求，故建議可作為機關科技創新型專案參考，IBM 影像建模須至少有 3 張以上相片較可精確呈現，則歷史影像數量上取得恐為困擾之問題。	如委員意見，IBM 影像建模須至少有 3 張以上相片較可精確呈現，歷史影像數量上取得恐為困擾之問題，並非所有歷史 UAV 皆可以達到 3D 建模的標準，但若現場無航空測量或 Lidar 資料，目前更無其他較經濟可行之方法可測得過去的地形與環境空間資訊，此計畫可將目前置於倉儲之歷史資料處理並加值，有其經濟與再利用之優點。
2	UAV 的影像平面誤差太大，但高程誤差大該如何改善準確性。	因 UAV 的飛行高度較低，影像平面誤差不大，高程誤差可能相對較大，若是新拍 UAV 影像可以事前做空標佈設及控制點測量，以降低誤差。若是歷史資料僅能回現場補測或以不同影像輔助，以降低誤差。
3	經過多範例分析後可歸納出常見圖資缺漏之部份，做為日後新圖資產製時注意參考。	遵照辦理，已列於報告 4-1 頁中。