行政院農業委員會水土保持局

**109 年度創新研究計畫**

**109 保發-11.1-保-01-06-001(27)**

---

# 無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用
# UAS Multi-temporal High-resolution Geoinformatic Data Acquisition, Validation and Application

---

【成果報告】

執 行 單 位：國立臺北科技大學

執 行 期 間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：張國楨 教授(姓名、職稱)

**中華民國 109 年 12 月**

# 無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用

## 摘要

臺灣位處於環太平洋地震帶上及西太平洋颱風路徑範圍及季風交會區，地震跟颱風頻繁的影響，導致山崩、土石流災害頻傳，地表面貌變化快速。高精度數值地形模型資料可以提供災害前後的地形對比依據，針對地表變異分析，提供災後防範設置之參考。隨著電子、感測器以及電腦技術的快速發展，全球衛星定位系統、光達、慣性姿態量測系統等觀測儀器的輕量化，無人飛行載具在遙測的應用上日益成熟。無人機加上光達系統正好能夠提供上述所要求，經濟性且具時效性的快速產製地形資訊，做為將來防災、國土測繪上的可行之選項。

本研究以寶來村歷經八八風災造成的大型山崩滑為例，常期以來持續不斷的監測本山崩區。研究使用無人單旋翼直升機 VAPOR55 搭載光達 UVX-1 UAV 與 VZ2000i 地面光達，蒐集了五個時期的點雲資料(五個時期無人機光達與三個時期的地面光達)，以分析崩塌量變化，並經由後續處理計算數值地形差異，探討其在不同時間的變化量、變化模式並評估其運動及災害潛勢。使用無人單旋翼直升機 VAPOR55 搭載光達 UVX-1 UAV 於高雄市寶來地區進行無人機載光達掃描任

務。航線以離地高約 100~250 公尺來進行任務規劃，每一測區、每一期掃描任務，均以三個航次，每一航次數個航帶來進行，以完整覆蓋測區之全部範圍。測區設計其點雲密度可達每平方公尺四百點以上。研究區域進行兩次不同時期的飛行掃瞄及地面光達測量任務，以探討區域的兩期資料所呈現之地形變化，以及資料內精度。基於現地控制點測量資料，來評估分析各種航帶平差法之成效及平差之改正參數探討，比較兩期資料在不同平差法的測量精度。另外，本計畫所使用之無人機光達因具備多重回波，故能夠穿透植被而獲取有效地面點，資料用以產製出數值高程模型及數值地表模型，相關空間資料再用以分析整體山區的崩塌量及崩塌範圍，以討論崩塌之活動性。本團隊另嘗試整合不同演算法及技術，來克服數值地表模型建置成果之品質及空間資料庫之空間上對位統一，相關技術可運用於地形變異監測分析，及變異量之計算，提供更精確之地形變化數據。

**關鍵詞：無人飛機系統、光達、數值高程模型、山崩、監測**

# UAS Multi-temporal High-resolution Geoinformatic Data Acquisition, Validation and Application

## Abstract

Due to high annual rainfall and high seismicity, numerous landslides have been triggered frequently and caused severe impacts in Taiwan. The high-resolution and high-precision geospatial dataset play as a one of the most essential information not only for hazard investigation and mitigation, but also for geological hazards and tectonic activities evaluation, and for national scale planning. Because of the advent of remote sensing tools, Unmanned Aerial System (UAS) and sensors, and the demand of sub-metric to cent metric spatial information, the UAS-associated LiDAR technology is becomes as the most powerful tools for geoinformation data acquisition in terms of the efficiency, precision and resolution. The accurate ground information can help better characterize and evaluate geohazards and tectonic activities. This project we integrate autonomous unmanned helicopter Pulse Aerospace Vapor 55, carrying Riegl VUX-1 UAV LiDAR with Trimble AP20 for the surveying mission. Based on the drone and instrument capacity, adjusted by the terrain landform, the optimal drone mission planning and scanning parameters are thus assigned, thus capable to acquire dense point clouds by 159 points/$m^2$ in nadir direction for a single fly line. Finally, the density of the ground point is higher than points/$m^2$, thus the spatial resolution of digital elevation model (DEM) is about 10 by 10cm. In

order to overcome the shadow effect from UAS LiDAR, we try to integrate Terrestrial Laser Scanning (TLS) (synonym as Ground Light Detection and Ranging, ground LiDAR). Based on the purpose of combination of two different laser scanners and two different periods data acquisition, different data adjustment algorithm have been evaluated. The UAS and terrestrial LiDAR used in this project with multiple reflecting pulse, so the sorting of vegetation and DEM extracting become possible. The micro-morphotectonic analysis, displacement and volume estimation have been evaluated, so as to assess the landslide activity and for hazard mitigation. Meanwhile, we integrate different algorisms of photogrammetry to improve digital surface model construction and orthomosaic photos, and are feasible to applied to environment change detection and monitoring.

**Keywords: Unmanned Aircraft System (UAS), Light Detection And Ranging (LiDAR), Digital Elevation Model (DEM), landslide, monitoring**

# 目次

**摘要.....I**

**Abstract..... III**

**目次..... V**

**表次..... VII**

**圖次..... VIII**

**第一章　計畫緣起 ..... 1-1**

第一節　擬解決問題 ..... 1-5

第二節　計畫目標 ..... 1-7

第三節　研究區域 ..... 1-16

第四節　研究流程 ..... 1-19

**第二章　研究工具及方法 ..... 2-1**

第一節　無人飛機系統 ..... 2-1

第二節　雷射測距 ..... 2-3

第三節　無人機光達掃瞄系統 ..... 2-5

第四節　地面光達 ..... 2-8

第五節　無人機影像空拍及建模 ..... 2-10

第六節　無人機光達掃瞄及資料處理 ..... 2-11

第七節　無人飛行系統影像拍攝建模及分析 ..... 2-14

第八節　三維影像製作及呈現 ..... 2-16

第九節　無人機影像點雲生成 ..... 2-18

第十節　點雲融合 ..... 2-19

**第三章　進行步驟與進度 ..... 3-1**

第一節　無人機光達資料 ..... 3-5

第二節　無人機影像空拍及建模 ..... 3-9
**第四章　研究成果 ..... 4-1**
第一節　現地測量 ..... 4-1
第二節　航帶軌跡解算 ..... 4-8
第三節　航帶平差成效 ..... 4-9
第四節　光達系統平差精度 ..... 4-11
第五節　DSM 成果..... 4-12
第六節　平差精度評估 ..... 4-13
第七節　無人機數值地形模型 ..... 4-14
第八節　點雲融合數值地表模型產製 ..... 4-17
第九節　大區域航拍建模成果 ..... 4-18
**第五章　討論 ..... 5-1**
第一節　光達系統精度評估 ..... 5-1
第二節　光達系統成果 ..... 5-2
第三節　無人機影像新演算法成果 ..... 5-11
**第六章　結論與建議 ..... 6-13**
第一節　結論 ..... 6-1
第二節　建議 ..... 6-2
**參考文獻..... 參-1**
**附錄..... 附-1**
附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....1
附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....3

# 表目錄

表 2-1 RIEGL VUX-1UAV 無人機光達設備諸元 ..... 2-6
表 3-1 本計畫進度排程表 ..... 3-4
表 4-1 E-GNSS 測量數據成果表 ..... 4-5
表 5-1 光達系統精度分析表 ..... 5-2
表 5-2 光達系統各期資料之點雲植被穿透率 ..... 5-5
表 5-3 2018/12/24 樹木滑動量變化表 ..... 5-7
表 5-4 2019/07/17 樹木滑動量變化表 ..... 5-8
表 5-5 2020/03/07 樹木滑動量變化表 ..... 5-8
表 5-6 滑動區內加積與虧損量體表 ..... 5-10

# 圖目錄


圖 1-1 總計畫計畫架構圖 ..... 1-14

圖 1-2 寶來研究區域(GOOGLE MAP) ..... 1-17

圖 1-3 研究區域位置計畫範圍圖 ..... 1-17

圖 1-4 寶來研究區域(無人機正射影像) ..... 1-18

圖 1-5 研究流程圖 ..... 1-19

圖 2-1 本計畫所使用之無人機 ..... 2-3

圖 2-2 脈衝式雷射測距方法(SHAN & TOTH, 2008) ..... 2-4

圖 2-3 相位差測距法示意圖 (SHAN & TOTH, 2008) ..... 2-4

圖 2-4 相位差示意圖 (SHAN & TOTH, 2008) ..... 2-5

圖 2-5 本計畫使用之無人機載具(UAS)-VAPOR 55 ..... 2-6

圖 2-6 地面控制站。左:地面控制設備圖，右:航線規劃畫面圖 ..... 2-7

圖 2-7 地面光達掃瞄工作之資料收集及補強 ..... 2-10

圖 2-8 本團隊之無人飛機系統機隊 ..... 2-11

圖 2-9 無人機光達掃瞄工作執行流程圖 ..... 2-13

圖 2-10 數值地形模型成果比較 ..... 2-16

圖 2-11 紅青立體影像製造流程示意及成果圖例 ..... 2-18

圖 3-1 無人機點雲進行資料航帶平差前 ..... 3-6

圖 3-2 無人機點雲進行資料航帶平差後 ..... 3-6

圖 3-3 測試區全區之不同數值地表模型成果 ..... 3-7

圖 3-4 測試區內同一區域之不同數值地形模型成果比較 ..... 3-8

圖 3-5 草嶺山崩區四時期無人機影像測繪成果 ..... 3-11

圖 3-6 斷魂谷崖線對比，左 2016 年，右 2017 年 ..... 3-11

圖 3-7 倒交山崩積區崖線對比，左 2016 年，右 2017 年 ..... 3-12

圖 3-8 草嶺山崩區地貌改變主要區域之高度差異 ..... 3-12

圖 4-1 現地控制點規劃布設位置 ..... 4-2

圖 4-2 現地檢核點規劃布設位置 ..... 4-3

圖 4-3 RTK 系統平均誤差 ..... 4-7

圖 4-4 RTK 系統平均標準差誤差 ..... 4-7

圖 4-5 RTK 系統平均均方根誤差 ..... 4-8
圖 4-6 始紀錄航帶軌跡示意圖 ..... 4-9
圖 4-7 紀錄航帶軌跡示意圖 ..... 4-9
圖 4-8 光達掃描資料平差前 ..... 4-10
圖 4-9 光達掃描資料平差後 ..... 4-10
圖 4-10 光達掃描資料平差示意圖 ..... 4-11
圖 4-11 掃描資料平差成果圖 ..... 4-12
圖 4-12 寶來地區各時期 DSM 建置成果 ..... 4-13
圖 4-13 寶來地區不同數量控制點之 DSM 差異。8(左)，17(右) ..... 4-16
圖 4-14 寶來地區地面光達 DSM 成果。2019(左)，2020(右) ..... 4-17
圖 4-15 寶來地區不同點雲融合後之 DSM 成果。 ..... 4-18
圖 4-16 竹林附近航拍任務規劃示意圖 ..... 4-19
圖 4-17 竹林附近航拍任務航線規劃高程剖面圖 ..... 4-19
圖 4-18 竹林地區無人機影像正射成果 ..... 4-20
圖 4-19 無人機影像數值地形模型建置成果 ..... 4-21
圖 4-20 寶來地區無人機影像三維實際模型成果 ..... 4-22
圖 4-21 寶來崩塌地三維地型模型側視 ..... 4-22
圖 5-1 寶來地區各時期 DEM 建置成果 ..... 5-3
圖 5-2 光達系統穿透率研究範圍 ..... 5-4
圖 5-3 2020/03/07 地面光達穿透率範圍 ..... 5-5
圖 5-4 2018/07/09~2020/03/07 期間滑動體內樹木滑動位置圖 ..... 5-7
圖 5-5 寶來崩塌區各時期地形高程變化圖 ..... 5-10
圖 5-6 某測區地形變異比較 (左 2019 年，右 2020) ..... 5-12
圖 5-7 地形變異比較(DoD) (區域位置同圖 5-6) ..... 5-12
圖 5-8 寶來研究區各時期間之地形變異 ..... 5-14

# 第一章　計畫緣起

台灣因為其特殊的地理位置、地形變化和地質條件，經常受到颱風、水災、土石流、山崩及地震等許多天然災害的侵襲，每每造成人民生命及財產的嚴重損失。近年來由於全球環境變遷問題所帶來的影響，地震、颱風等天然災害事件，使國際間愈來愈重視國土安全問題，也更強調預防與應變準備。2009 年 8 月莫拉克颱風極端強降雨以及長延時的特性，在台灣中南部造成許多生命財產的損失，為台灣近 50 年來最嚴重的颱洪災情之一。荖濃溪為高屏溪最大支流，全長 137 公里，流域面積 1373 平方公里，莫拉克颱風於本地區降下超過 2000 mm 之雨量，最大時雨量超過 100 mm/hr，如此豪雨所引致之崩塌土砂，隨著雨水流入河道，造成河床淤積或河岸沖刷，造成本溪流域內嚴重坡地災害。台灣南部聯絡東西兩側最重要的南橫公路，至今一直仍未修復，主要原因即為區內地滑仍一直持續，崩積物仍嚴重淤塞河道，而造成邊坡持續失穩。

在防救災上構造活動、山崩、土石流監測等科技的研發及應用是近年來災害整合分析的重要基礎。各國政府單位面臨天災頻率的增加，但在人力與財力緊縮的困境下，新科技的應用及資料的整合分析，一方面可節省大量人力及財力，並提升工作效率，二方面可達成情報與資訊分享、災害應變管理、國境管理之目的。

高雄市六龜鄉寶來村位在南部橫貫公路西段(台 20 線)上的小村莊，海拔高度約 400 公尺，周圍山巒最高海拔高度約 1300 公尺。自八八風災後，政府投入大量人物力於自然災害調查，本區鄰近高處邊坡亦已辨識出數個大規模崩塌潛區。若大量土砂往下運移，勢將造成

重大環境衝擊。崩塌主要多利用衛星影像、航空照片、現地調查及數值高程模型等基本資料來進行分析研究，目前水土保持局建置數個時期之歷史資料庫可供資料庫比對；加上目前國內無人載具小範圍航測技術，可在本區持續進行拍攝，以持續監測本區之地表變動。利用這些資料進行崩塌地之地貌分析、滑動土石體積分析、河道土砂運移等研究，有助於了解崩塌分布範圍及可能影響範圍分析，對後續潛在大規模崩塌地區劃為地質敏感區的工作也有所助益。

近年來由於遙測技術迅速發展，利用不同波段及不同探測技術與分析方法，可提供相關地形演化調查與地表變遷監測資訊，故針對區域性及個案型大規模崩塌要全面性地進行調查與監測，尤需利用多期序、高解析，且跨尺度的遙測技術方能全面性涵蓋所分析之區域與個案資訊，並可進一步加以整合及分析，以提供完整之大規模崩塌演化及滑移行為資訊。另一方面，大規模崩塌由於地質、構造及地形上的複雜性，且因破壞機制、破壞型態等不同的組合下，對於大規模崩塌之崩塌行為、滑動監測與潛勢分析有不同的活動性。為完整瞭解大規模山崩之滑移行為、活動性及可能影響範圍常需整合各種遙測技術，以完整建置多時期、高精度之空間資料庫及資料庫分析技術，各領域完整緊密的搭配，並結合細緻之現地調查結果，方能輔助進行大規模崩塌之潛勢分析，以及完整瞭解滑移行為及可能影響範圍。因此完整的大規模山崩研究，實需跨多重領域之合作。有鑑於此，本計畫邀集遙測、地質、大地、水文及防災等領域學者，針對高雄市六龜鄉寶來村為同一目標區，並以「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」為總計畫之主題，進行區域性大規模坡地崩塌先進遙測技術的整合，資料庫收集、建置，以及監測調查分析技術建立，

並彙整不同尺度多元資料及分析技術所得到之資料，進行潛勢分析方法研究。

本總計畫所整合之跨領域分析技術，一方面建置多時序、高解析、高精度數值地形、正射鑲嵌影像，以及實境三維模型，以完整涵括山崩區及下方堆積區及河道等區域不同時期之地形變異分析及滑動體位移量測，二方面，相關圖資可藉由結合高精度數值地型分析與地理資訊系統應用進一步進行分析比對崩塌及河床演化情形。本計畫將共同分享研究區域各項基本圖資，選定研究集水區內大規模崩塌，整合高精度地形之構造地形判釋、多元多尺度遙測監測技術、崩塌演化及潛勢、破壞機制分析與滑移行為模擬、以及坡面及河道之土砂運移等，探討集水區大規模崩塌地滑移整合監測與崩滑行為及集水區土砂運移等課題。

基於上述原因，因此本整合計畫集合了:無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用(子計畫一)、滑動塊體量體評估-以合成孔徑雷達資料分析為例(子計畫二)、無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究(子計畫三)、高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究(子計畫四)等四個子題，針對寶來山崩區進行完整的分析。

本子計畫「**無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用**」中之主要遙測技術為雷射測距。光達或雷射測距技術(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一種光學遙感技術，利用光來測量目標的距離，光達可快速取得局部範圍待測目標物詳細的三維坐標與表面反射強度的特性。這兩年，台灣引進無人機光達技術可產造十數公分解析度的精細地形資訊，並開始運用於坡地防災的運用。上

述的技術，在高陡地形的區域內，某些程度上仍然受限，因此結合地面光達技術勢將能更完整的克服地形地貌上的限制，精細而精確的達到坡地監測及防災的目的。臺灣位處於環太平洋地震帶上，從有歷史紀錄以來，每隔數十年就會發生一次災情嚴重的危害性地震。另一方面，因為臺灣在這一個極為活躍的地震構造環境中，地震會持續的對臺灣造成威脅，臺灣不僅會受到地震方面的威脅，臺灣亦處於西太平洋颱風路徑範圍及季風交會區，每年遭受到颱風豪雨侵襲的機率相當的大，加上臺灣本身地勢變化大且坡陡水急，還有長年地震的影響，山崩及土石流對臺灣造成危害是時有所聞。如果能夠在災難的前後有高精度且值得信賴的數值地形模型，就可以提供地貌的變動比較，迅速的找出受災地點，並進行疏濬河道、邊坡防治等工程，避免下一次更嚴重的災害。在這種迫切需要時效性的緊急時刻，傳統的航空攝影測量及近幾年發展良好的空載光達(Airborne LiDAR)都需要較多的時間、金錢成本以及人力，而無人飛機系統(Unmanned Aircraft System, UAS )在近年來蓬勃發展，在無人飛行載具的硬體方面已經足夠完善可以搭載高精密儀器，將光達設備(LiDAR)搭載於無人飛機上，便是目前在空拍方面的新產物無人機光達(UAS LiDAR)。無人機光達的特點是能夠將地表的地形資訊迅速的取得，在小範圍的區域所建製出的模型解析度及精度無人機光達都是高於空載光達的。

此套 UAS LiDAR 系統，目前在臺灣算是新穎的系統，因此在各方面還尚未開發完全的狀況下，會遇上各種不同的問題，具有研究價值，而經過本研究團隊的多方測試及探討，在這套系統上有一些相當不錯的成果。

本次飛行的區域都是植被茂密且地形起伏大的地形，考驗著無人

機光達掃描之成效，在此複雜的地形下，有賴 LiDAR 具有多重回波特性，能夠將植被濾除後得到整個區域的地表模型，進而能夠探討研判該區的地勢狀況以及光達的穿透能力。倘若 LiDAR 的穿透力足夠，我們就能夠獲取足夠的地面點雲來完整得到地表資訊，也就能依照點雲製成數值高程模型，判定此區域是否有潛在山崩的情況。

另外針對多時期掃描成果比對各種航帶平差方式，目的是為了研究各種航帶平差方式所產製的模型在精度上的差異，從中了解何種方式能獲得最接近真實地形狀況的模型，並利用所獲得精度良好的多時期數值地形模型相互比較，從而可以對坡地進行監測取得後續更多地表狀況，使無人機光達的應用能夠更加的廣泛。

本計畫預計蒐集本區附近崩塌地既有高解析遙測影像，如:航空影像及無人機航拍影像，藉由多時期、高解析度空間資料擷取技術，來建置本區之正射影像、數值地形模型及可互動之三維地形實境，以方便持續監測大型深層地滑之活動性，並用以評估大型山崩對環境造成的衝擊。藉由本案例的分析，可把相關的資料及經驗，做一綜整探討，本結果並可用災害規模評估、坡地防災策略擬定之參考，並達防減災最終的目的。

因整合計畫下，各子計畫有其專屬之計畫名稱及計畫執行之編號，為避免報告書內容趨於雜亂，並凸顯各子題之目標，本報告書僅針對子計畫一「**無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用**」進行相關工作內容及成果做說明，其他議題及成果，請詳閱其他各子計畫之各項報告書。

## 第一節 擬解決問題

本整合計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」擬解決之問題:

1. 研究區(寶來)多時期空間資訊之收集及建置，以及山崩量體、活動性等對環境影響。
2. 空間資訊擷取技術中不同感測器間存在精度不同、空間解析度不同，其資料整合、合併及資料處理方法。
3. 大規模地崩塌及鄰近區域、河道等崩移及堆積之遞移、時間關係之率定。
4. 基於 InSAR 技術多時序的崩塌量體評估方式。
5. 不同波段 SAR 影像在山區的適用性及使用限制。
6. 以 DInSAR 技術探討崩塌機制及影響範圍評估。
7. 應用無人機遙測技術於河床粒徑調查之可行性分析及成果驗證，評估及克服傳統調查受限於人力、時間及取樣之代表性等限制，以及作業手冊初擬。
8. 潛勢區活動性監測、影響範圍調查劃設、發生雨量分析等防減災關鍵課題。
9. 結合多期高精度地形於潛勢區進行分區分塊之分析。
10. 開發整合型數值模擬方法，評估崩塌之發生與流出過程，提供防減災工作門檻與影響範圍參考。

## 本子計畫擬解決問題:

1. 無人機光達、地面光達技術之整合，以及無人機影像密點雲之資料併接處理技術研發。
2. 大規模崩塌及周邊區域高精度精細微地形地貌資料庫之資料擷取技術。
3. 大規模崩塌區之多時序、高解析之數值地形及影像資料庫及

資料庫空間對位之資料平差技術。

4. 大崩模崩塌區地表變形及山崩活動性監測，水平及垂直變位分析量測技術的開發及整合。

5. 大規模地崩塌及鄰近區域、河道等崩移及堆積之遞移、時間關係之率定。

6. 大規模崩塌對環境衝擊之影響評估

## 第二節 計畫目標

台灣因為其特殊的地理位置、地形變化和地質條件，經常受到颱風、水災、土石流、山崩及地震等許多天然災害的侵襲，每每造成人民生命及財產的嚴重損失。近年來由於全球環境變遷問題所帶來的影響，地震、颱風等天然災害事件，使國際間愈來愈重視國土安全問題，也更強調預防與應變準備。2009 年 8 月莫拉克颱風極端強降雨以及長延時的特性，在台灣中南部造成許多生命財產的損失，為台灣近 50 年來最嚴重的颱洪災情之一。

荖濃溪為高屏溪最大支流，全長 137 公里，流域面積 1373 平方公里，莫拉克颱風於本地區降下超過 2000mm 之雨量，最大時雨量超過 100mm/hr，如此豪雨所引致之崩塌土砂，隨著雨水流入河道，造成河床淤積或河岸沖刷，造成本溪流域內嚴重坡地災害。台灣南部聯絡東西兩側最重要的南橫公路，至今一直仍未修復，主要原因即為區內地滑仍一直持續，崩積物仍嚴重淤塞河道，而造成邊坡持續失穩。

在防救災上構造活動、山崩、土石流監測等科技的研發及應用是近年來災害整合分析的重要基礎。各國政府單位面臨天災頻率的增加，但在人力與財力緊縮的困境下，新科技的應用及資料的整合分析，一

方面可節省大量人力及財力，並提升工作效率，二方面可達成情報與資訊分享、災害應變管理、國境管理之目的。現今繪圖應用的精度已可滿足現今商業運轉的需求，透過直接地理定位系統平台，成本和生產效率已大大提升。因此，直接地理定位平台可針對政府的規章、成本、與高流動性的小範圍調查或空間信息的快速蒐集所需的緊急反應，如救災與評估等，進行快速應用。

近年來由於遙測技術迅速發展，利用不同波段及不同探測技術與分析方法，可提供相關地形演化調查與地表變遷監測資訊，故針對區域性及個案型大規模崩塌要全面性地進行調查與監測，尤需利用多期序、高解析，且跨尺度的遙測技術方能全面性涵蓋所分析之區域與個案資訊，並可進一步加以整合及分析，以提供完整之大規模崩塌演化及滑移行為資訊。另一方面，大規模崩塌由於地質、構造及地形上的複雜性，且因破壞機制、破壞型態等不同的組合下，對於大規模崩塌之崩塌行為、滑動監測與潛勢分析有不同的活動性。為完整瞭解大規模山崩之滑移行為、活動性及可能影響範圍常需整合各種遙測技術，以完整建置多時期、高精度之空間資料庫及資料庫分析技術，各領域完整緊密的搭配，並結合細緻之現地調查結果，方能輔助進行大規模崩塌之潛勢分析，以及完整瞭解滑移行為及可能影響範圍。因此完整的大規模山崩研究，實需跨多重領域之合作。有鑑於此，本計畫邀集遙測、地質、大地、水文及防災等領域學者，針對同一目標區，進行區域性大規模坡地崩塌先進遙測技術的整合，資料庫收集、建置，以及監測調查分析技術建立，並彙整不同尺度多元資料及分析技術所得到之資料，進行潛勢分析方法研究。

本總計畫所整合之跨領域分析技術：包括合成孔徑雷達(InSAR)、

航空攝影測量、無人機及光學影像感測器、雷射掃瞄測距(LiDAR)等技術，一方面建置多時序、高解析、高精度數值地形、正射鑲嵌影像，以及實境三維模型，以完整涵括山崩區及下方堆積區及河道等區域不同時期之地形變異分析及滑動體位移量測。二方面，相關圖資可藉由結合高精度數值地型分析與地理資訊系統(GIS)應用進一步進行分析比對崩塌及河床演化情形。考量計畫整合及執行，本計畫將定期進行討論會議以達成資料共享及整合，並於視情況辦理小型研討會以達擴大成果交流之目標。本計畫將共同分享研究區域各項基本圖資、合成孔徑雷達(InSAR)、光達(LiDAR，含無人機及地面)，以及攝影測量所產製之高精度數值地形，提供相關判識與監測資訊。本研究從選定研究集水區內大規模崩塌，整合高精度地形之構造地形判釋、多元多尺度遙測監測技術、崩塌演化及潛勢、破壞機制分析與滑移行為模擬、以及坡面及河道之土砂運移等，探討集水區大規模崩塌地滑移整合監測與崩滑行為及集水區土砂運移等課題。各子計畫間之相關性及分工合作架構如圖 1 所示。

本整合型計畫之內容創新性有下列四項:

1. 全方位、高解析、多時序之的空間資料庫收集及建置:統合合成孔徑達、航空及近景攝影測量、無人機及光學影像感測器、雷射掃瞄測距等技術。

2. 建構多尺度大規模崩塌監測技術整合架構: 全面探討山崩區及下方堆積區及河道等區域不同時期之地形變異、活動性監測、影響範圍及風險評估。

3. 應用遙測技術於河床粒徑調查之可行性分析及成果驗證，克服傳統調查受限於人力、時間及取樣之代表性等限制。

4. 基於多時序、多尺度先進遙測技術應用於判釋分析與各階段監測及防

災:建立大規模崩塌分區分塊方法，並開發大規模崩塌發生、流出模擬方法，提供潛勢區活動性監測、影響範圍調查劃設、發生雨量分析等防減災關鍵課題。

本年度計畫之各參與子計畫間之分工情形、研究內容之關聯性及整合性，規劃子計畫項目與團隊分工如下：

**子計畫一：無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用** (即本子計畫) ─國立臺北科技大學土木工程系張國楨教授

在防救災上構造活動、山崩、土石流監測等科技的研發及應用是近年來災害整合分析的重要基礎工作。無人飛行載具適時的運用，因其具有機動力強、時效性快、經費較廉、及較寬鬆天氣條件即可操作，可方便取得災害地區即時、清晰、全面之中低空照片，相關優點、特性，使得無人機廣泛地運用於防災科技的用途上，以無人飛行系統載具拍攝影像，並用以建置空間資料庫，相關之資訊及技術已成為災害調查的研究重點。

光達或雷射測距技術 (Light Detection and Ranging, LiDAR)是一種光學遙感技術，利用光來測量目標的距離，光達可快速取得局部範圍待測目標物詳細的三維坐標與表面反射強度的特性。這兩年，台灣引進無人機光達技術可產製十數公分解析度的精細地形資訊，並開始運用於坡地防災的運用。上述的技術，在高陡地形的區域內，某些程度上仍然受限，因此結合地面光達技術以及基於傳統光學影像之攝影測量技術勢將能更完整的克服地形地貌上的限制，精細而精確的達到坡地監測及防災的目的。

本計畫擬透過上述技術的整合，結合無人機光達、地面光達及無

人機攝影測量技術，進行研究計畫區範圍內不同屬性、不同來源之空間資料庫收集及建置，提供多時期、多尺度，高解析度之空間資訊成果，用以評估研究區之坡地失穩、滑動體活動性，以及河道變遷，等土砂變異分析。相關資料庫亦將作為其他子計畫比對地表變形(子計畫二、三、四)，土砂運移及河道特性(子計畫三)，大規模崩塌之山崩促崩因子(子計畫二、四)，崩積物之堆積運移(子計畫三、四)，河道侵淤(子計三、四)，評估大規模崩塌對河道土砂及環境造成的衝擊(子計畫三、四)，以及提供未來防減災工作推動所需之發生門檻與影響範圍之參考(子計畫四)。藉由本案例的分析，可把相關的資料及經驗，做一綜整探討，本結果並可用於災害規模評估、坡地防災策略擬定之參考，以達防減災最終目的。

**子計畫二：滑動塊體量體評估-以合成孔徑雷達資料分析為例**－暨南國際大學土木工程系王國隆副教授

坡地災害會為河川帶來大量土砂堆積，而土砂運移又造成河道變化引發後續的二次災害，因而評估坡地災害的土砂量體則是後續分析前的重要課題，雖然使用航拍或是光達測量可得到精準的數值地形，但需花費人力、受天候限制，資料取得頻率亦受限，因此本研究擬以差分干涉合成孔徑雷達技術(DInSAR)做為量體分析的遙測工具。合成孔徑雷達(SAR)有不受天候干擾、大面積、固定周期等優勢，能紀錄包含強度、極化、相位等資訊，DInSAR 技術分析兩次重複軌道的影像相位差，還原為地表變形量，理論上可得到毫米級的變形精度。

計畫針對高雄寶來的坡地災害區域，建立 DInSAR 技術建立評估流程，並進行多時序崩塌量體分析，以各時序的滑移情形探討邊坡滑動的破壞機制，而後運用光達與 UAV 產製的高精度數值地形進行崩

塌量體及範圍的驗證，確認此評估的準確性，以期建立完整且快速的崩塌量體評估方式。研究成果可供其他子計畫進行地表與滑動體之相關分析，亦可藉由其他子計畫之成果修正模型。

**子計畫三：無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究**—長榮大學土地管理與開發學系曾志民教授

目前河床粒徑資訊之調查仍依賴局部河段開挖進行篩分析，或進行現地表層粒徑調查，惟受限於人力及時間成本，現地調查分析仍僅限於部分局部河段，分析成果資訊無法有足夠之空間及時間頻率代表性。目前已有相關研究利用河床現地拍攝表層粒徑材料相片進行影像判釋獲得河床材料粒徑資訊，惟此種作法之仍無法有效克服作業時間效率問題。近年無人載具 UAV 航拍技術快速發展演進，目前已可高效率進行廣域航拍，利用航拍影像產置高階析度正射影像，也可進一步利用影像立體像對進行特徵點匹配產製三維密點雲，並進一步產製高精度數值地形。以航高 50 公尺為例，目前已可產製約 1~2 公分等級高解析度正射影像及同尺度高精度數值地形，以及超過 500 點/平方公尺之高密度三維密點雲，可有效兼顧高空間解析度及高作業時間效率之優勢。

因此，本計畫團隊 108 年度以高雄寶來茗濃溪河段作為研究區域，進行表層粒徑現場調查分析，並利用無人載具 UAV 於研究區域以不同航高進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用影像判釋表層粒徑分布，以及點雲糙度特性分析進而推估表層指標粒徑，並以現場調查成果驗證比較。本方法於 108 年度已取得初步成果，基於上述方法論，本計畫於 109 年度一方面擬持續精進無人機航拍產製成果在河床表層粒徑判釋之應用，另一方面基於子計畫一所

產製之影像點雲及無人機光達點雲為基礎，針對密點雲應用於指標粒徑的分析，在既有影像產製點雲優異之水平密度條件下，進一步結合垂直向度精度及植生穿透性更佳之無人機空載光達產製之密點雲，期能進一步提升密點雲在粒徑判釋分析之能力。

**子計畫四：高精度數值地形應用於整合型崩塌發生與流出數值模擬技術開發之研究**—國立成功大學水利及海洋工程系蔡元融助理教授

台灣受到氣候變遷持續的影響下，極端降雨事件引發的大規模崩塌災害已經不可避免，例如民國 98 年莫拉克風災引致小林村滅村的大規模崩塌事件。為降低未來相似災害的衝擊與損失，水土保持局依據災害風險管理相關業務的需求，開始推動長期的大規模崩塌防減災計畫，包含潛勢區活動性監測、影響範圍調查劃設、發生雨量分析等防減災工作推動所需要之關鍵課題。

但從目前相關計畫執行成果來看，因為缺乏大規模崩塌區的規模資料，在分析上僅能利用調查之潛勢區範圍進行分析，而此範圍通常偏大，因此各類分析成果多有高估之現象，為目前相關計畫推動之瓶頸。為改善分析成果之高估，將潛在大規模崩塌區進行分區分塊為首要工作，本研究希望透過邊坡穩定分析，配合 UAV 光達產製之多期高精度地形(子計畫一)，對潛勢區進行分區分塊之分析，並與雷達影像之分區分塊分析成果進行比對(子計畫二)，確認分析成果之一致性。針對分析後之塊體，再利用本計畫開發之整合型分析模式，量化崩塌之發生與流出過程，提供未來防減災工作推動所需之發生門檻與影響範圍之參考。

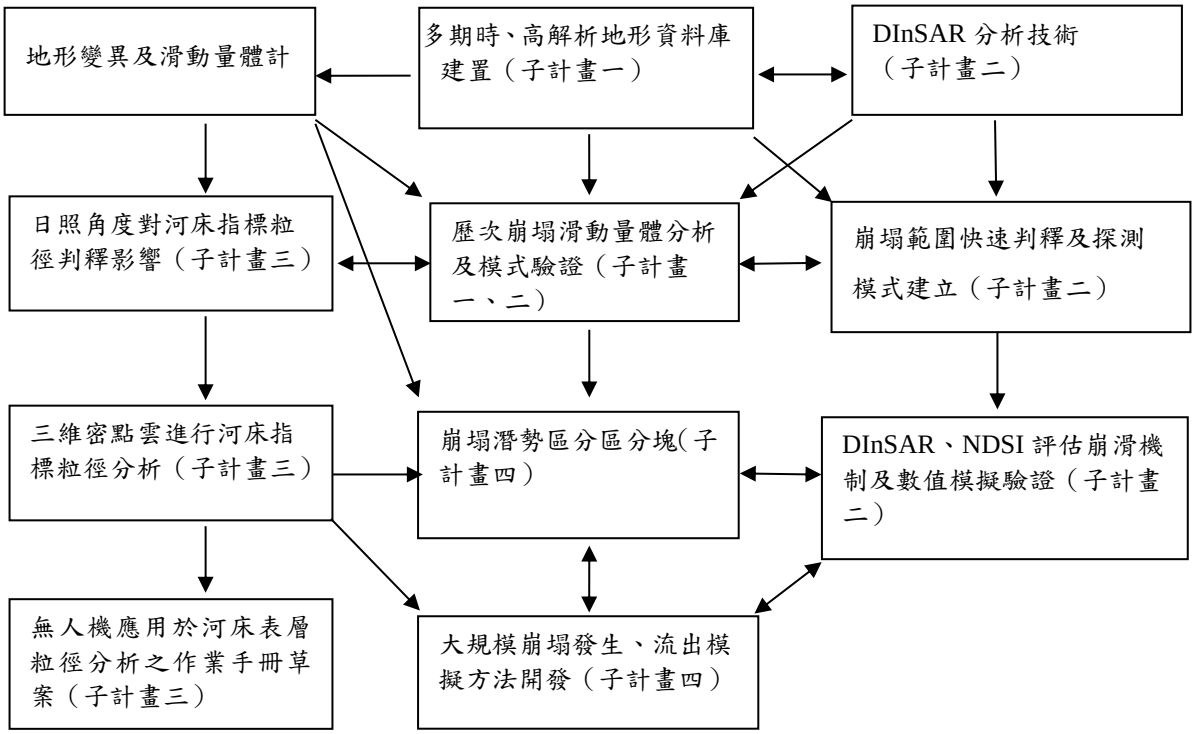



**圖 1-1 總計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」計畫架構圖**

## 一、全程目標

整合計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」之計畫總目標:

1. 研究區汛期前、後無人機高精度地形資料庫建置。
2. 山崩區地形變異分析及滑動量體計算
3. 建立 DInSAR 分析適用性的評估流程及使用限制
4. 運用 NDSI 技術建立崩塌範圍快速判釋技術及建立崩塌範圍探測模式
5. 結合 DInSAR 及高精度數值地形探討歷次崩塌滑動量體分析及模式驗證
6. 結合 DInSAR、NDSI 分析技術，評估崩滑機制，並經數值模

擬驗證。

7. 山區河段表層粒徑現場調查，並作為無人機調查之驗證比較依據。
8. 探討不同日照角度下 UAV 影像之地形及點雲產製成果對河川表層粒徑計算之影響。
9. 結合不同感測器產製三維密點雲進行河床指標粒徑分析
10. 研擬無人機應用於河床表層粒徑分析之作業手冊草案
11. 大規模崩塌潛勢區之分區分塊評估方法建立
12. 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發。

## 二、本子計畫目標

本整合計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」一共有四個子計畫。而其中本子計畫一「**無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用**」之計畫目標列如下:

1. 地質調查及現地控制測量區
2. 研究區汛期前、後無人機影像拍攝及資料庫建置
3. 研究區汛期前、後無人機光達高精度地形資料庫建置
4. 汛期前、後地面光達掃瞄之地形資料庫建置
5. 不同感測器之整合及同時期整體地形資料庫建置
6. 山崩區地形變異分析、塊體運動量及滑動量體計算
7. 河道之土砂侵淤量體計算
8. 大區域範圍之地形資料庫建置

## 第三節　研究區域

本計畫研究區域之寶來地區位於高雄市東北方寶來山與四社山之間、南橫公路西段上、荖濃溪流域旁海拔高度約在 500 公尺間，為本研究室長期監測區域，寶來區域易受地震颱風影響，長年持續崩塌，因此利於使用無人機光達多時期資料比對，來針對山區崩塌狀況進行分析。針對無人機光達掃瞄區域，本計畫內之飛行掃瞄區域面積，單一作業區域不小於 50 公頃。

此區域主要的研究範圍是在六龜區的寶來村，寶來村位於荖濃溪縱谷中上游段六龜河階上，南橫公路西段(臺 20 線)，海拔高度大約 400 公尺。圖 1-2~1-3 指示本計畫進行之調查範圍，其中圖 1-3 中之黃色多邊形指示進行無人機影像空拍及建模範圍，面積不小於 20 平方公里。調查範圍內航拍影像含雲率應低於 5%。崩塌地範圍內已裸露不含植生、及河道範圍不得有雲遮覆。圖 1-3 中紅色之多邊形則為計畫之主要核心區，亦為計畫需求之特定範圍，將進行無人機光達掃瞄。主要掃描區域為寶來村莊及荖濃溪對岸的山坡地，此山坡地易受地震及颱風影響，加上降雨集中在夏季，導致山坡地時常出現嚴重的崩落，本研究團隊長時期監測此處崩塌狀況，加上無人機光達有多時期的掃描監測，能夠利用前後期的資料建成多筆數值地形模型，來比較前後期差異，進而對整個崩塌狀況能夠更加的了解。圖 1-4 呈現研究區崩塌區之現地樣貌。

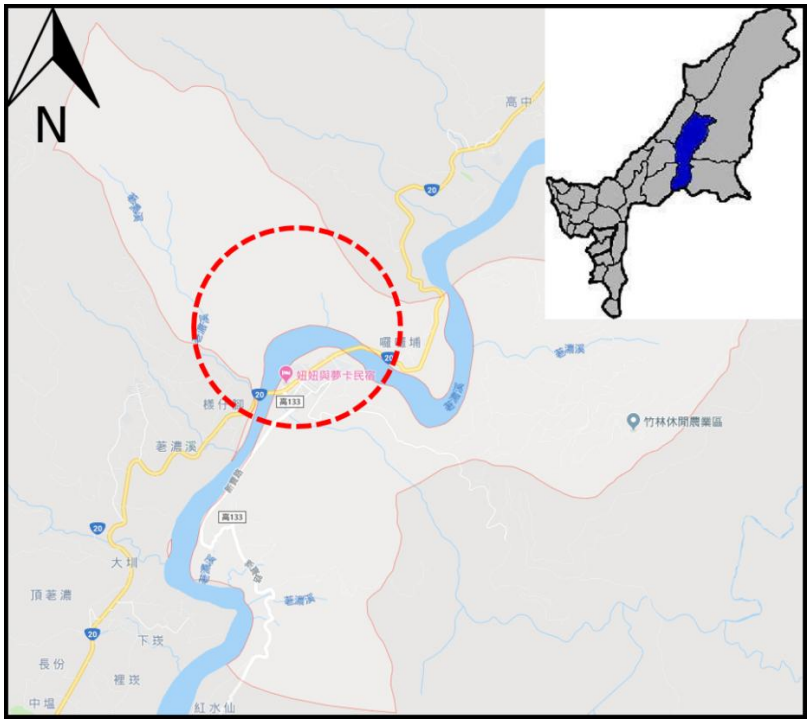



**圖 1-2 寶來研究區域(Google Map)**

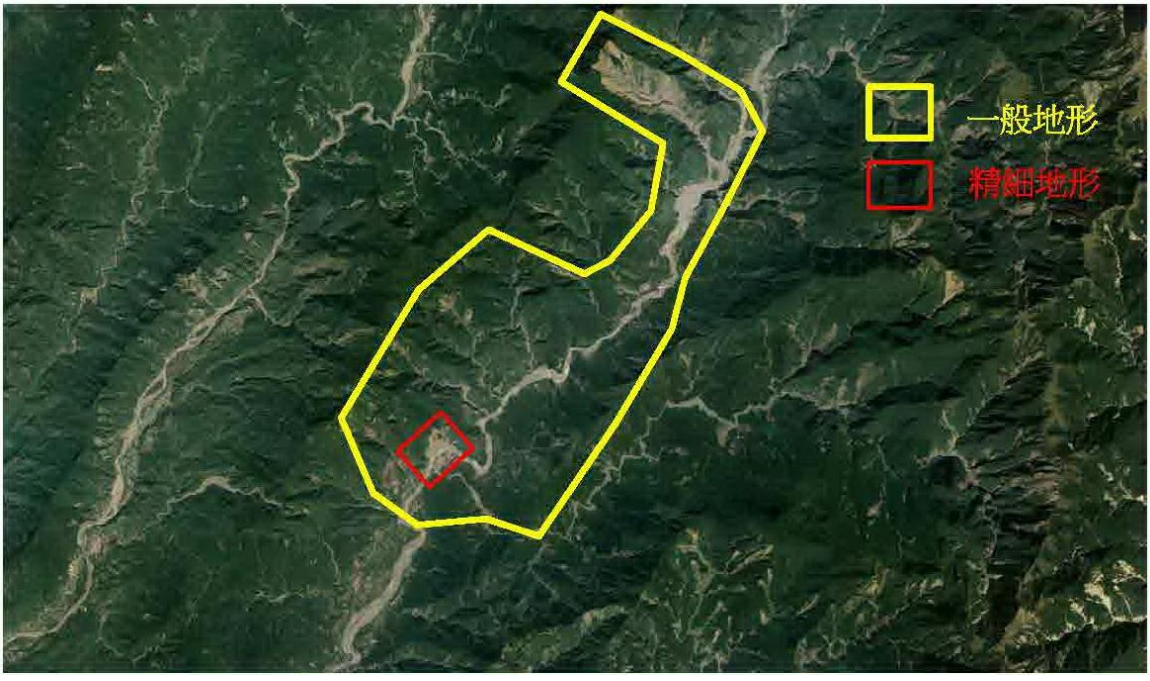



**圖 1-3 研究區域位置計畫範圍圖**

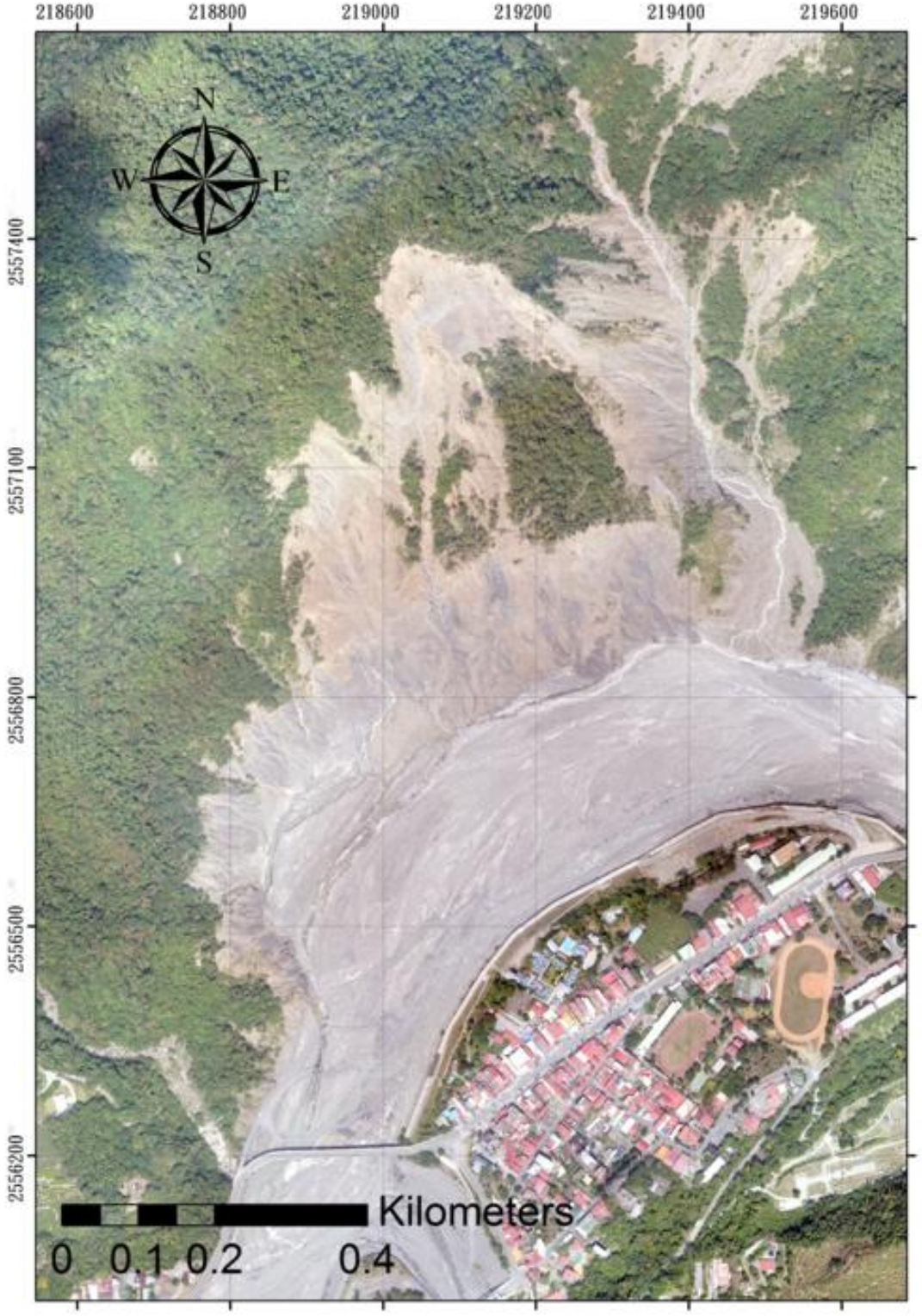



**圖 1-4 寶來研究區域(無人機正射影像)**

# 第四節　研究流程

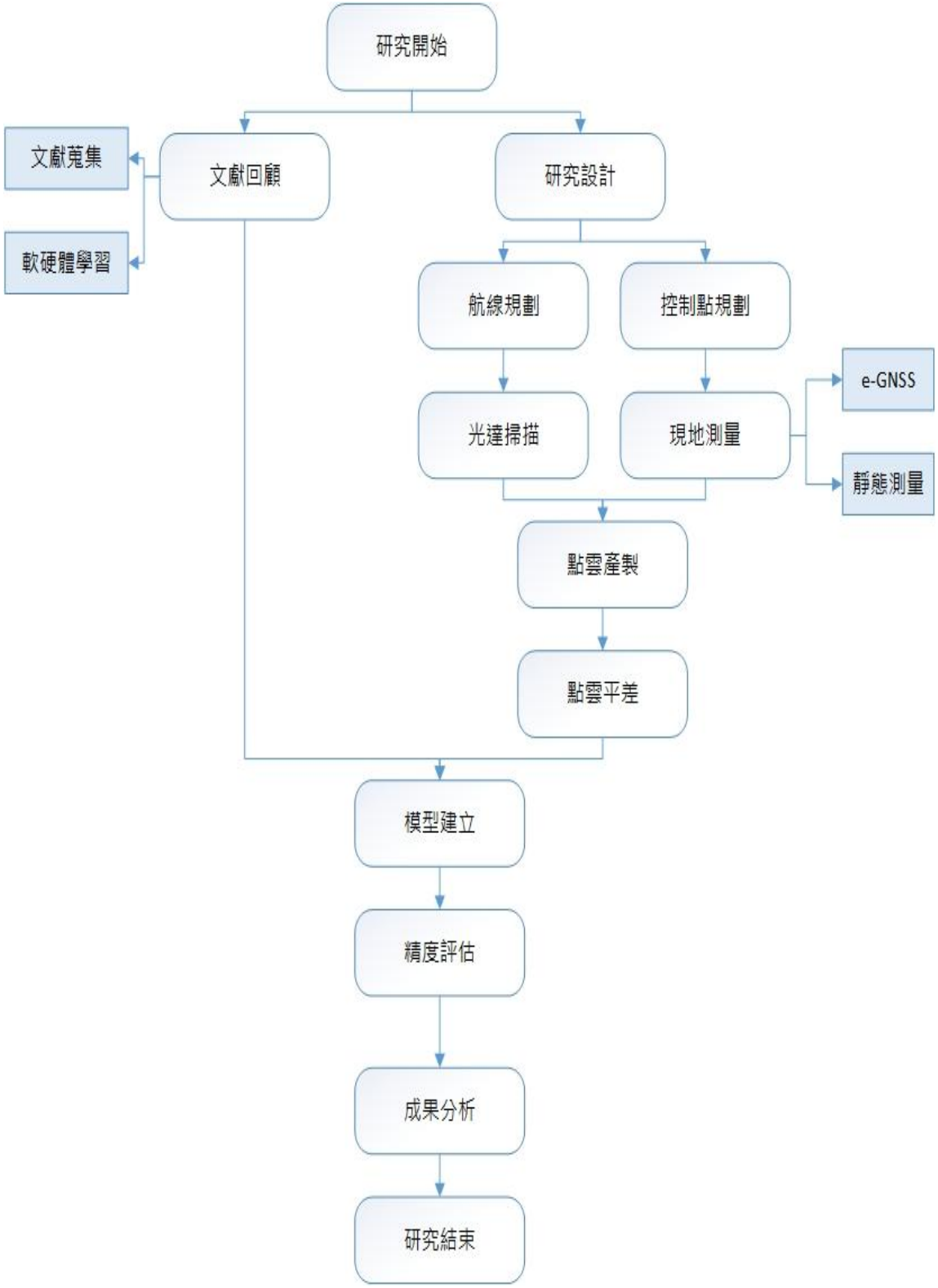



**圖 1-5 研究流程圖**

# 第二章　研究工具及方法

本計畫整合無人飛行載具及航空影像、野外地質調查、GPS 等技術，提供多解析度空間資料擷取技術於山崩潛勢區域附近精細之構造地形特徵分析；結合地表地質調查，各種已有之遙測影像的運用，精細地形資訊及三維數值地形模型的建置，以討論山崩及鄰近區域之構造及地形特徵。藉由本案例的分析，可把相關的資料及經驗，做一綜整探討，並提供未來研究時資料收集及分析方法，甚至是構造活動中及地質敏感區分析及劃定之參考，以達防救災等目的。

針對本計畫所提出之天然災害問題，將選取數個潛在大規模崩塌區來進行研究工作。本研究計畫之分析方法及工作內容包括：(1)野外地質調查、構造分析，以及現地控制點量測；(2)無人飛機系統影像拍攝建模；(3)無人機光達掃瞄；(4)三維立體影像建置及分析；以及(5)GIS 圖資建置。相關工作內容分述如下：

## 第一節　無人飛機系統

無人飛機系統 (Unmanned Aircraft System , UAS），一般人稱無人飛行載具、無人機、無人飛機，在廣義上為不需要駕駛員登機駕駛的各式遙控飛行器，利用自動駕駛技術或是遠程遙控來操作無人飛機進行飛機任務，最早的無人機是開發在一戰後，登場於二戰時作為軍事用途，在近代政府及民間推廣下無人機可用於災難應變、警備巡防、環境監測、地形測繪、農業、影像、運輸各方面。加上全球衛星定位系統(Global Positioning System , GPS)以及慣性測量裝置（Inertial Measurement Unit, IMU）這兩個領域的蓬勃發展，將原本龐大且笨重

的物體精進改良到數個晶片就能作業,UAS 在這兩大助力的推進下，發展空間大幅提升，日後的經濟效益欣欣向榮，發展前景看好。

無人飛機載具的種類非常眾多，分類可從微小型、小型、大型到軍用型這幾種分類，再根據機體的飛行方式與機體的構造，大致可分為固定翼型以及自轉旋翼型兩大類，而自轉旋翼型又可以分為單旋翼系統與多旋翼系統。固定翼型的載重量及續航力都較自轉旋翼型佳，航行速度與飛行距離也都大於自轉旋翼型，拍攝的範圍也較廣，但是起飛與降落容易受地形的限制。自轉旋翼型的機動性強，不需要跑道就能夠垂直起降，操作也較固定翼型簡單，具有停懸，適合小區域的定點拍攝，而多旋翼型比起單旋翼型有許多優點，多旋翼型的旋翼角度固定，結構簡單，旋翼的葉片較短，所以發生碰撞時衝擊力小，不容易損壞，對人也更加的安全。

UAV 與過往使用的衛星與飛機不同，能以較低的成本與快速取得資料，且範圍小距離研究範圍近故精度與解析度較高為優勢，但缺點是研究範圍較小，若要取得大範圍的資料時，較無法在短時間內蒐集完成。

本研究使用無人直升機 VAPOR 55 HELICOPTER UAS (圖 2-1)，最大承載起飛重量可達 25 公斤，搭載 RIEGL VUX-1 UAV 重量約為 3.5 公斤。




**圖 2-1 本計畫所使用之無人機**

## 第二節　雷射測距

雷射測距其基本原理是，朝向物體發射雷射脈衝，透過接受脈衝光來回之後，將光信號轉變為電信號記錄下來，同時由搭配的計時器，記錄同一個脈衝光信號由發射到被接收的時間。這段時間即可以轉換為雷射器與目標之間的距離。

測距方式因光束結構的不同可分為脈衝式(Pulsed Ranging)以及連續波式(Continuous Wave, CW)。脈衝雷射測距透過已知光速與量測光束發射至接收的時間，計算脈衝行經之距離，測距公式如(2.1)式

$$R = \frac{1}{2}ct \tag{2.1}$$

$R$=雷射脈衝光束所行經的距離

$c$=光速

$t$=發射到接收所經過的時間

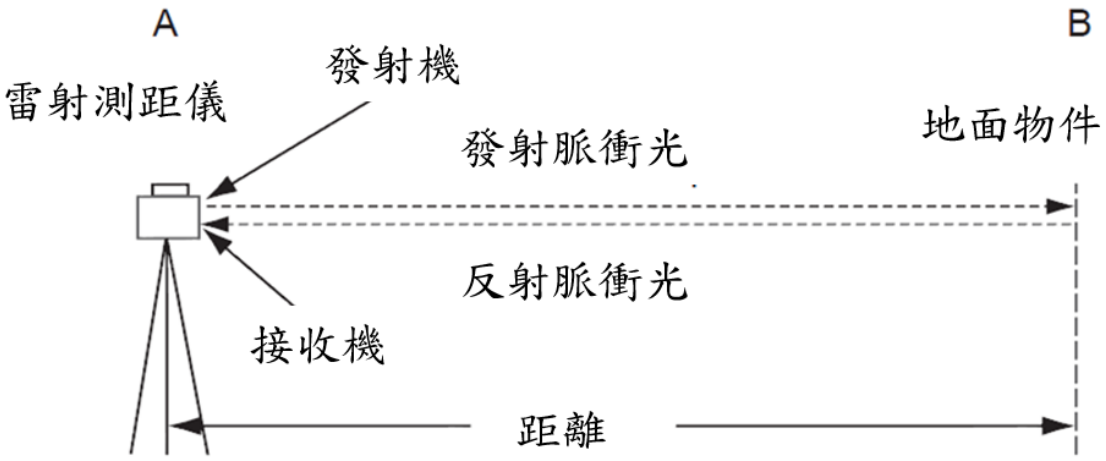



**圖 2-2 脈衝式雷射測距方法(Shan & Toth, 2008)**

連續波雷射測距:利用連續光波發射計算相位差得到距離的方式，稱為相位差測距法，其測距公式如(2.2)式

$$R = (M\lambda + \Delta\lambda) \div 2 \tag{2.2}$$

其中

$$\Delta\lambda = (\phi/2\pi)\lambda \tag{2.3}$$

R=距離

M=波長數量

$\Delta\lambda$=相位差

$\phi$=相位角

$\lambda$=波長

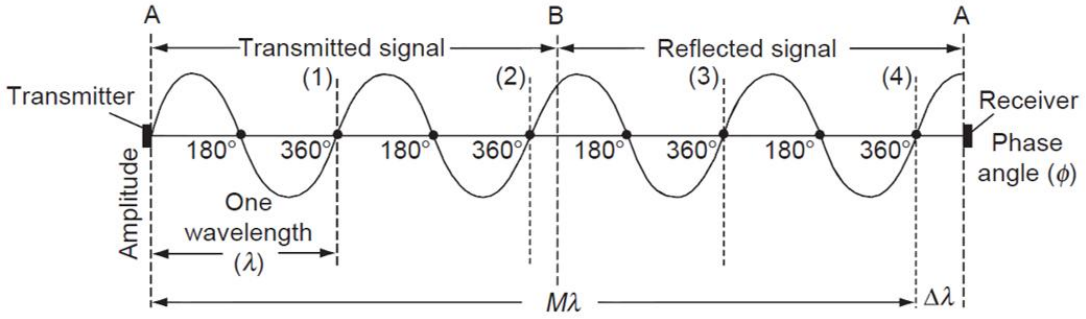



**圖 2-3 相位差測距法示意圖 (Shan & Toth, 2008)**

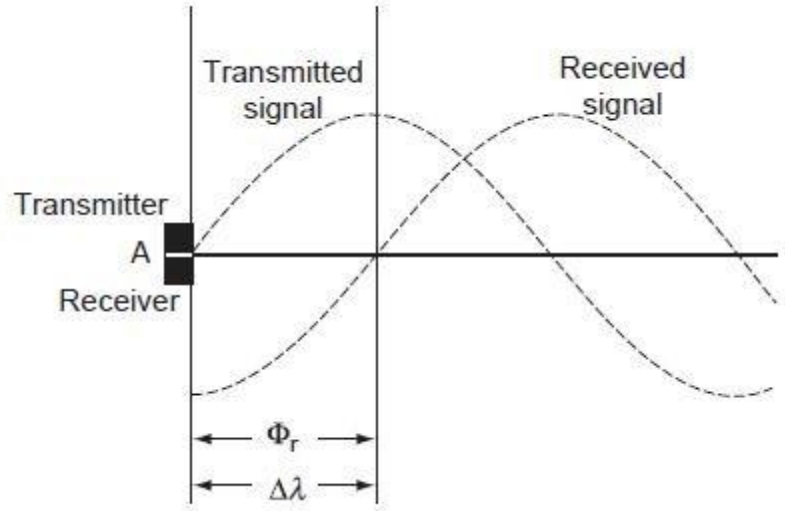



**圖 2-4 相位差示意圖 (Shan & Toth, 2008)**

本研究所使用的雷射掃描儀 RIGEL VUX-1 採用脈衝式之雷射測距方式。

## 第三節 無人機光達掃瞄系統

本計畫使用無人機光達掃瞄(UAS LiDAR)獲取資料，儀器具有高精度、高解析度且高效率之特點，雷射掃瞄多重反射回波之特性，可同時獲取地面及覆蓋物之精確三維坐標，已成為精細三維地表資訊測製之主要方式(Ackermann, 1999; Wehr and Lohr, 1999)。本團隊購置專為 LiDAR 所設計的直昇機型無人飛機系統(UAS)-Vapor 55(圖 2-5)，此無人機具有：高安全性(含:自動航線、航點飛行，自動熄火降落(auto-rotation)，自動正反 8 字飛行，斷訊自動航點返航等)，並具高載重、高穩定性、易操作等特點，以完整勝任本計畫之執行。

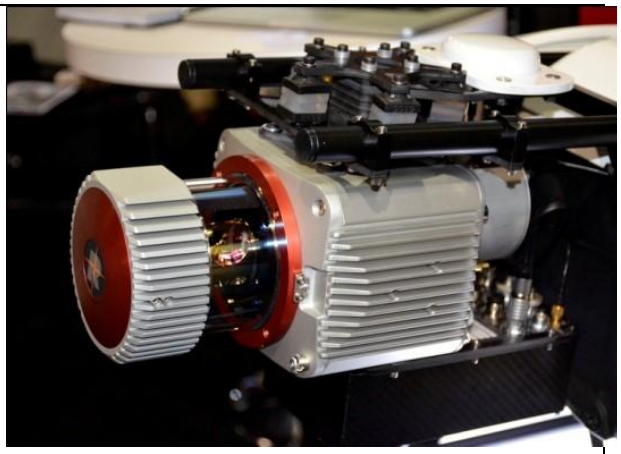



**圖 2-5 本計畫使用之無人機載具(UAS)-Vapor 55**

本計畫採用 RIEGL VUX-1UAV 輕量型光達，為一專門設計用來搭載於多種無人機平台上，係目前市面上雷射光束傳遞距離最遠之輕量型光達儀器，其優點為提高地形資訊之完整性，並方便進行樹種的判釋及地面點雲資料的萃取(Chauve et al., 2007; Mallet et al., 2009)。表 2-1 為 VUX-1UAV 光達儀器設備性能諸元介紹。

**表 2-1 RIEGL VUX-1UAV 無人機光達設備諸元**

| 儀器重量 | 3.75Kg | 儀器照片 |
|---|---|---|
| 儀器大小 | 227x209x129 mm | |
| 精度 | 10mm | |
| 重複測量精度 | 5mm | |
| 雷射發射功率 | 550khz | |
| 視場角(FOV) | 330° | |

| | | |
|---|---|---|
| 最大測量範圍<br>(目反射率%) | 920m(60%)<br>550m(20%) |  |
| 工作海拔 | 5500m | |
| 儲存容量 | 240G SSD | |
| 環境溫度 | -20℃~50℃ | |

本計畫 UAS 工作流程是採取無人飛行載具可經由地面控制站透過人工操控外，設定預定之飛行航線、航高與拍照頻率，使其按照設定進行自動飛航、自動攝影及掃瞄等飛行任務之規劃，如圖 2-6 所示。




**圖 2-6 地面控制站。左:地面控制設備圖，右:航線規劃畫面圖。**

光達應用雷射波脈衝進行掃瞄，記錄各反射訊號回波值，藉以求出反射訊號之距離，搭配飛行載具上之 GPS 及掃瞄儀上之 IMU，以動態定位方式求得姿態參數，並獲取掃瞄點位之三維坐標。因此定位系統(GPS)與定向系統(IMU)之效能將影響光達系統掃瞄精度。為了確保光達掃瞄品質，儀器每隔一段時間皆需進行率定校正作業以消除系統誤差。校正程序以內政部「LiDAR 測製數值高程模型及數值地表

模型標準作業程序(草案)」(內政部，2005)或 Riegl 原廠技師建議，率定作業分為兩個部份，1.GPS 天線位置與 IMU 的偏差量(lever arm)率定；2.雷射掃描投影中心與 IMU 中心的三軸旋轉角差值(bore sight angle)校正。

## 第四節　地面光達

一般傳統的測量步驟繁雜，尤需耗費大量人力、時間及成本，無法在短時間內蒐集災害現場的空間資料，而受限於天氣的因素也難以在災後即時提供資料供救災與復舊使用。近年來由於雷射掃瞄儀(光達)技術不斷進步，其掃描精度準確且快速，不但可以提高工作效率還可減少成本耗費等優點，逐漸取代傳統測量趨勢。因雷射掃瞄儀結合數位相機互補技術，不再只是侷限於傳統測量之 2D 展示，並賦予掃描點雲之實況顏色，可呈現 3D 模型展示，大大提升了測量物辨識度，因而在測量技術上更是一項突破，也讓成果更多了附加價值之參考依據。而透過雷射掃瞄儀所儲存下來的資料，具有完整空間的三維資料，可永久保存供更多研究團隊使用，可促進未來相關領域的研究發展。

本計畫將透過地面光達獲取三維點雲資料，完成災害應變製圖攝影測量工作。傳統的測量技術僅能提供有限點位的資訊，而地面光達則能提供大量的點位資訊。另外，在儀器設計上，地面光達有許多不同於傳統測量儀器的特性，如不具有定心定平之設備，故資料結構上有其特殊設計以利於不同測站間之點雲資料疊合及座標轉換之用。雷射掃描儀是利用雷射測距儀發射雷射光，並同時接收目標物反射的訊號以測量儀器至目標物的距離；而藉由有效距離或標準範圍內之測站至掃描點的斜距，推求掃描點與測站的三度空間相對坐標差。

由於本計畫之地面光達係採取三維雷射掃描儀器，其主要原理為雷射光，因此透過地面光達之工作，除了不受天候狀況影響即可實施測量外，對於獲取三維點雲資料之特性，除了可自動化建立模型，配合電腦繪圖軟體，繪製立體建物等三維景象以外，對於災害的現況重建與地質地形等資料輔助分析，具有相當大之助益。

本計畫區內，因邊坡高陡且延長，無人機光達水平之飛行掃瞄，一部份區域受限於地形特性而不易完整取得，本團隊預判此區段可能會有無人機光達點雲資料漏失之情形，是故計畫擬施作地面光達測量，進行補強之作業(圖 2-7 所示)，應計畫內需求若有其他處，有不完全之點雲資料，也會增加補強，依照規定取得此計畫區域範圍之完整點雲資料與模型。

傳統上地面掃描作業易受遮蔽物影響，因此通常需架設多個測站依序掃描，不同測站之間掃描所得點雲透過相同的參考點 (或稱共軛點) 拼接，以取得完整的三維資料。而坐標系統以雷射測距儀機身右方定義為 x 軸方向，掃描方向定義為 y 軸方向，再依右手定則定義 z 軸方向，應用時必須將磁北與 x 軸或 y 軸進行對正作業，以取得正確的空間方向資料。另外亦可於光達測站或是共軛點位置實施測量取得三維坐標值，提供後續套疊掃描結果求得絕對坐標的依據。但上述測站間之點雲併接為地面光達資料處理之最大困難所在，並往往需求大量的人力工作。

為克服上述傳統地面光達測站資料併接問題，本計畫擬引進及使用最新地面光達自動併接技術於本計畫之資料掃瞄工作。Riegl VZ-2000i 其最大測量距離 2600m，機器內已內建 GPU 及高階 IMU，並直接外接雙頻 GPS，故於測量過程中各站間之相對關係已完整記錄，

不必再另外進行各測站資料之併接，可方便快速的進行後續資料的分析工作。

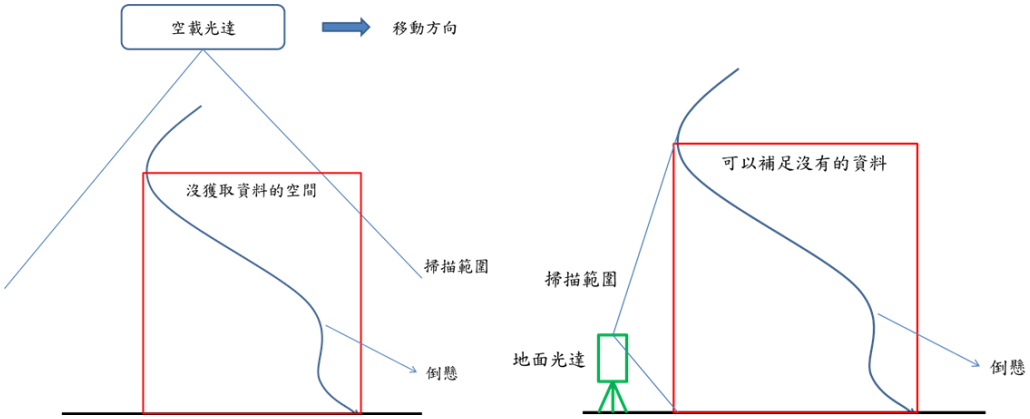



**圖 2-7 地面光達掃瞄工作之資料收集及補強**

## 第五節　無人機影像空拍及建模

針對坡地災害的調查研究中，尤其是坡地潛移區域，進行研究區現地勘察時，常因崩塌地或土石流料源堆積不明顯、無道路可通達之處，因而無法取得良好照片以進行整體狀況之評估。藉由無人飛行載具適時的運用，因其具有機動力強、時效性快、經費較廉、及較寬鬆天氣條件即可操作的優點等特性，可取得災害地區即時、清晰、全面之中低空照片，透過航拍可清楚鳥瞰災害土石流災害全景，明確辨識災害範圍，以彌補地面勘災「見樹不見林」之不足，並作為後續分析災害原因與災後整治之用。

本計畫之研究區域施測之面積較小，為取得並比較不同高解析度之影像及模型，故使用多種不同載具及不同相機來進行測區影像之蒐集。本計畫規劃了旋翼型無人機，小型定翼機及大型定翼等不同載具來執行飛行任務，以比較不同載具之特性及成果。

本團隊現有之 Microdrones MD4-1000，以及自行研發之

NTUT-1000 及 NTUT-3000 型等不同類型之測量用 UAS，共有三十餘台，另有二十餘台其他類型非測量用無人機(圖 2-8)。就本團隊之工作能力，現在可支援海拔 4500 公尺以下，道路可達或鄰近區域，支援機動性空拍，亦可依任務需求不同，提供多角度之空照圖，可機動、快速提供各種不同地區之空拍服務，以及可依需求提供動態影像、靜態照片等資料。就山崩研究，因常位於高山之山岳稜線附近，故長航程、長滯空之長時性無人飛行載具，本團隊另可以提供更遠距之災害監測研究，以及防救災即時資訊之運用。



**圖 2-8 本團隊之無人飛機系統機隊**

## 第六節　無人機光達掃瞄及資料處理

光達技術具有快速取得局部範圍待測目標物詳細的三維坐標與表面反射強度的特性，常見的掃描系統可分為脈衝式及相位式兩種，皆採雷射光束自發射至返回接收器的時間差來計算光束發射點與物體間的距離，得到光束發射點與待測目標物之間的距離後，即可計算待測目標物在坐標系統的空間位置。

本計畫使用無人機載雷射掃瞄獲取資料，儀器具有高精度、高解析度且高效率之特點，雷射掃瞄多重反射回波之特性，可同時獲取地

面及覆蓋物之精確三維坐標(Ackermann, 1999; Wehr and Lohr, 1999)。本工作項目包括拍攝作業所使用之儀器設備、飛航計畫與航拍申請、地面 GPS 基站控制測量、光達掃瞄資料獲取、光達點雲資料處理、數值地表模型與數值高程模型製作、正射影像以及資料接邊處理。相關作業流程如圖 2-9 所示。

本團隊光達儀器採用 RIEGL VUX-1UAV 為一輕量型空載光達，專門設計用來搭載於多種無人機平台上，係目前市面上雷射光束傳遞距離最遠之輕量型光達儀器，並一同搭載 Trimble AP20 慣性測量元件(Inertial Measurement Unit, IMU)，方能得到正確參數以進行航跡計算，以及後續的點雲後處理及資料的產製。

一、飛航規劃

飛航規劃可利用 RIEGL 公司提供的輔助圖表做為飛航參數設定的參考，像是脈衝重複率、點雲密度以及飛航速度等。航線設計的部分則由航高、航帶寬度、航帶重疊率，設計出航線間距、數目、起終點。此外還需考慮天氣與區域環境因素，將脈衝重複率、航高與視野(FOV)進行部分的調整。

二、資料獲取

飛航規劃完成且確認無誤後，即可著手進行飛航掃瞄的任務，透過無人飛行載具搭載的光達、GPS、IMU，獲取大量的原始點雲、GPS 時間、飛行位置、飛行速度、飛行姿態等數據，將其儲存於載具上的固態硬碟中，並於日後進行系統的率定以及點雲的解算。

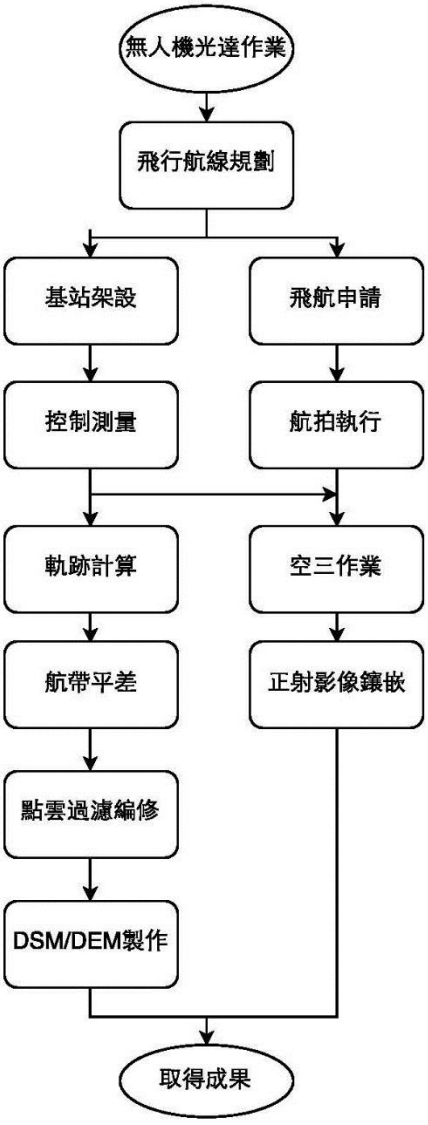



**圖 2-9 無人機光達掃瞄工作執行流程圖**

三、點雲解算

本研究使用 RiPROCESS 來進行點雲解算，解算點雲之前，須先求出無人機的飛航軌跡，軌跡解算則使用 POSPac MMS。解算飛航軌跡所需資料有地面靜態 GPS 參考站資料以及無人機 POS(動態 GPS 及 IMU)資料。使用 POSPac MMS 解算飛航軌跡時，解算 GPS 所需之星曆並非一定要使用精密星曆，因此能在飛航任務結束後立即進行

飛航軌跡的解算，無須等待數星期後的精密星曆。

## 第七節　無人飛行系統影像拍攝建模及分析

運用無人飛行載具影像立體對，可產生數值地形模型(digital elevation model)。此數值地形模型亦為地質構造分析及地理資訊系統(geographic information system)資料庫建置不可或缺的元素之一。遙測影像建製數值地形模型及影像正射等基本圖資之流程，其主要步驟為下列五點：

一、選點及佈標

計算所需要之控制點之個數，並尋找控制點之地點，預備先行佈標工作及 GPS 控制測量。

二、空中三角點整體平差作業

空中三角測量之量測是以精密立體測圖儀或影像工作站於每一相片上量測影像座標。再運用前後兩張重疊 60%的每一航空相片立體像來進行數值影像自動匹配。一般採用數值影像工作站之『影像自動匹配』技術，快速獲取大量之高程點資料，再輔以詳細之『人工編修』，並配合『地形資料』(例如：斷線、山脊線、山谷線等地形特徵線、獨立標高點) 合併重新計算數值地形模型成果。之後再進行數值地型模型之編修及多模全區拼接工作。

三、平面改正

為修正不同時期地圖上平面誤差，所以選擇適當的參考點，來處理平面高程的改正，以使兩時期地形圖的高程差異減至最小。

四、地形分析

所得數值地形模型直接使用地理資訊系統中空間分析模組求得坡度、坡向等網格式資料，加上數值地形模型本身即是高程資料，即可進行地形變化之比較與分析。

五、地表高程變化之計算

DEM 代表地表真實高度，由不同時期之數值地形模型資料即可以使用地理資訊系統中的空間模組網格計算功能來運算，即可獲得該區高程變化的資訊。

現階段因無人機做為工具，可方便快速取得影像，因此載具用於影像拍攝已蔚為風氣。但本團隊一方面自主研發並自行製作自用之無人機，以取得更高解度之影像，二方面本團隊針對影像之建模，多年來亦投入大量人物力進行研究，因此無論在數值地形模型產製，亦或在三維模型建置，均有獨到之處。以圖 2-10 為例，於金門民俗文化村之建模及地形萃取上，圖中左側為一般高解析之建模成果，而圖右則為本團隊以同一影像資料所建置之成果，圖中可清楚呈現各資料庫的品質及精度上的差異,，尤其於屋頂瓦片特徵之萃取與呈現。此技術可以解析高精度地貌及地物特徵，並將之應用於地質、地形等構造特徵析，並可應用於山崩區及河道等變遷等環境監測之防救等的目。

以無人飛行載具進行航空攝影測量，由地表特徵物的辨識，再反求特徵點的空間所在位置；經由大量的特徵點的計算後，即可建置大量三維座標（點雲），並同時透過數位攝影機記錄取樣點顏色，測量結果可以建構數位地表高程模型來精確記錄地貌，可用於記錄地形變遷、地圖製作或是產生地面模型，此一精確的三維座標，可做為土地建築都市規劃、自然地貌河床地形測量、以及山坡監測等用途之應用。如在颱風預報或豪雨特報前、後期，快速將邊坡崩塌地掃描，以便能

提供後續量測、建置 3D 數位模型及點雲資料處理分析等運用。當空間的資料具備了時間性，即可利用不同時間點的空間資料進行比對分析，如颱風後的土石崩坍量，甚至不同處的滑動量都可透過分析得知。結合已有之影像資料，針對局部重點區域，因高山地區航空相片拍攝頻率不高，故本研究將運用已購之無人飛機，做定點，高密度、高頻率的拍攝，就目前的使用情形，其空間上的解晰度優於 5 cm；在此解晰度下，完全可以清楚呈現山崩滑動塊體之地表特徵，如地表裂隙...等，尤其在野外地區人員不易、甚至無法到達的區域，提供了極重要的地現之三維近景資訊。

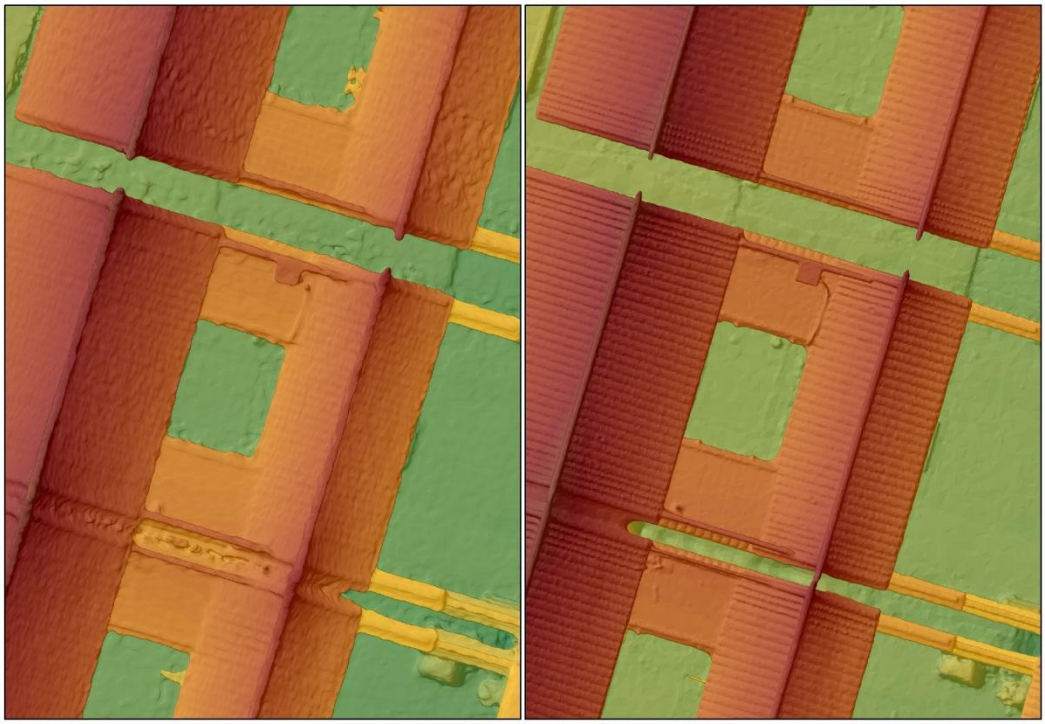


**圖 2-10 數值地形模型成果比較（左：一般研究單位；右：本團隊建模效果）**

## 第八節　三維影像製作及呈現

隨著電腦科技的日新月益，各學門的發展也獲得長足進步。在地

質科學領域，尤其是地形學及構造地形學，因數值地形模型的運用而急劇躍進。就影像的辨識與運用，單一張傳統能解析地面特徵，然而立體影像因供地形上高程視覺，更能突顯地質、地形資訊。就現在技術來說,雖然已有不少方法可以提供立體視覺;但考量多人同時使用，自然的視覺、成本、所需儀器設備，以及製程等等因素後，紅青立體像對(anaglyph image)，無疑地將是最好的方法，也最被廣泛使用。

紅青立體像對：是由一對特製的單色圖像通過不同的顏色通道（通常是紅和青、或紅和綠）混合而成。觀察者通常需要佩戴立體眼鏡。這種立體眼鏡的鏡片是兩塊濾光片，濾光片的類型由圖像決定。比如觀察一幅通過紅色和青色通道混合的圖像,觀察者需要佩戴帶有紅色濾光片和青色濾光片的立體眼鏡,紅色濾光片使一隻眼睛只能看到圖像上的紅色部分,而青色濾光片則使另一隻眼睛只能看到圖像上的青色部分,從而模擬了觀察者觀察立體景物時的雙眼立體視覺的情況，形成空間中的立體視覺。

本計畫針對所要分析之研究區域，運用紅青立體影像技術，首先建立一立體投影中，某一特殊觀察位置、距離及角度，製作單一彩色影像（如圖 2-11a 所示），之後再於保持同一位態及距離，但從另一角度,同樣再建立另一張彩色影像（如圖 2-11b 所示）;此兩張影像，從一張取出紅色段影像,再以影像融合方式取代另一張影像上的紅色段之圖像，即建立成一紅青立體影像（如圖 2-11c 所示），以供後續之構造地形分析時，加速人工判讀異常地形之區域，並數化構造之線形。另外於最後成果呈現及成果繳交時，亦以相同之技術來展現研究之成果，以後續其他分析之應用。

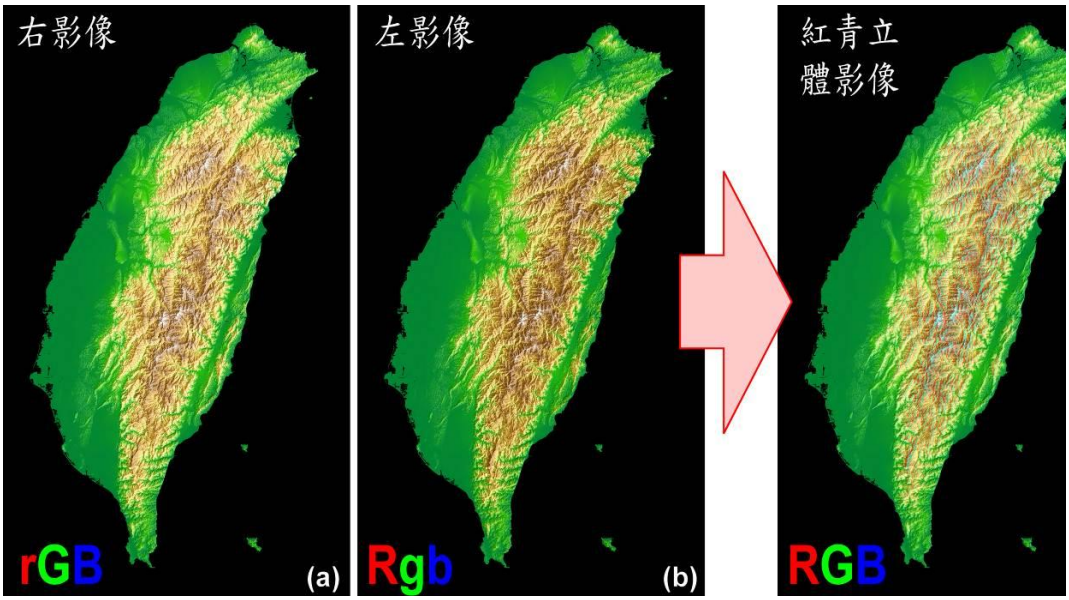



**圖 2-11 紅青立體影像製造流程示意及成果圖例**

## 第九節　無人機影像點雲生成

無人機航拍任務完成後，內業點雲資料處理的部份，本研究使用的為 Pix4D 公司的產品 Pix4Dmapper 軟體來進行資料處理，Pix4Dmapper 軟體為影像處理軟體，能處理各式影像資料。Pix4Dmapper 軟體透過拍攝的影像資料，具有高重疊率的相片，經由點選地面控制點給予三維空間約束，再經由影像上的 RGB 元素，透過空中三角測量，產製出彩色點雲；產製出點雲資料後經由 Pix4Dmapper 軟體內建過濾分類功能，可過濾分類出 DSM 模型；再使用 Pix4Dmapper 軟體內建正射糾正功能 orthomosaic，正射糾正後產出正射影像。產出的成果可供本研究後續分析所用。

無人機影像點雲資料處理步驟如下:

1. 資料匯入

首先建立新的專案，匯入含有座標資訊(X,Y,Z)、飛機姿態角(ω,φ,κ)的相片檔案,設定 TWD97 座標系統,接著視需求匯入控制點、

點選控制點。

2. 初始化處理

初始化處理是運用匯入的原始影像內方位參數、外方位參數、座標資訊、地面控制點，通過自動空中三角測量計算、光束法平差，進行影像重新匹配、區域網平差自動校準影像，同時還初步產出點雲。

3. 點雲密集化

初始化處理後，有了初步的點雲處理，接著進行點雲密集化，先依據研究需求調整設定參數，有影像比例、點位密度、最小匹配數、最大三角網格數、網絡模型材質解析度，設定完成後 Pix4Dmapper 軟體就會自動進行點雲加密，加強點雲的質量密度。

4. 生成數值地表模型及正射影像鑲嵌

完成上面步驟後，接著 Pix4Dmapper 軟體會藉由生成的加密點雲，產製出數值地形模型；及利用重新匹配的影像，鑲嵌產出正射影像。

## 第十節　點雲融合

本研究使用 RiSCAN PRO 軟體，進行地面光達點雲系統及無人機影像點雲系統的融合，欲進行兩套點雲系統的融合，首先必須要將兩套系統各自處理好，無法在兩套系統未處理的情況下，進行同步一起融合。

兩套點雲系統融合處理步驟如下:

1. CloudCompare 座標資訊獲取

無人機點雲系統資料 LAS 檔匯入 RiSCAN PRO 軟體前，必須要先經過 CloudCompare 軟體獲取座標，即 XYZ 值，否則於 RiSCAN PRO 軟體內會造成旋轉移動問題產生。

2. 無人機影像點雲資料匯入

獲取影像點雲座標資訊後，接著便可於 RiSCAN PRO 軟體內新建專案，此時將獲取的座標資訊輸入軟體設定中，而後匯入無人機影像點雲資料，匯入時座標系統選擇本研究是使用 TWD97 座標系統，點雲資料方能置於正確三維空間位置。

3. 轉換格式

無人機影像點雲成功匯入 RiSCAN PRO 軟體後，接著要將匯入的資料轉換成展示格式，此步驟可將大量點雲資料進行有效的展示格式，轉換完成後即可開啟點雲資料進行讀取與檢視。

4. 確認融合成果

此時僅需打開先前處理好的地面光達系統點雲，同時再打開剛才轉換完格式的無人機影像點雲，此時若兩套系統各自處理得當，再加上點選的都是同一套控制點，兩套點雲系統將會融合於一體，若沒有融合於一體則很有可能是兩套系統各自處理時出了問題，又或是兩套點雲系統使用了不同的控制點。

# 第三章　進行步驟與進度

本計畫之工作內容及分析方法包括：(1)野外地質調查、構造分析，以及現地控制點量測；(2)無人飛機系統影像拍攝建模；(3)無人機光達掃瞄；(4)三維立體影像建置及分析；(5)地面光達高陡邊坡掃瞄；以及(6) GIS 圖資建置。計畫以南橫寶來村對岸之大型山崩為例，首先進行既有影像收集及資料庫建置等初期工作; 另再以無人飛行系統，進行航拍、影像正射及地形建置等工作，並同時進行無人機光達的掃瞄工作。預計進行汛期前、後一共進行兩次的全區飛行掃描工作，針對及荖濃溪主河道附近及大規模崩塌區進行汛期前、後期的資料庫收集及建置，預計無人飛機系統光學影像之飛行掃描區域總面積約 25 平方公里，無人機光達及地面光達掃瞄資料總面積 100 公頃。一方面以無人機光達掃瞄方式收集地形資訊；二方面針對汛期後之荖濃溪主河道附近及大規模崩塌區，進行無人機影像資料的收集及資料庫建置，另針對荖濃溪中上游段，以及支流超大規模山崩區(如布唐布納斯溪及拉克斯溪流域)附近，進行無人飛行系統之影像及資料庫建置，預計飛行掃描之域之總面積約 50 平方公里；另外，並分析河道內土砂生產及運移分析，並進行河道內人工結構物對沉積物影響評估；並針對大規模崩塌區及河道內之人工結構物，進行離散元數值模擬，以分析評估山崩機制、運動及堆積特性。

針對總計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」之實施方法與步驟列如下:

1. 現地測量、河床表層粒徑及地質調查
2. 無人機感測器空間資訊資料庫收集、對比、整合及建置。

3. 評估 DInSAR 分析技術之適用性
4. 建立崩塌範圍及滑動量體探測技術
5. 評估崩塌機制及影響範圍
6. 基於影像判釋法來分析河床指標粒徑
7. 結合影像點雲及光達點雲分析河床指標粒徑
8. 建立大規模崩塌潛勢區分區分塊之評估方法
9. 整合型大規模崩塌發生、流出模擬方法開發。

其中本子計畫一「無人載具多時序高解析空間資訊擷取技術整合、精度評估及應用」之子計畫執行方法與步驟:

1. 研究區附近荖濃溪流域暨有航空影像及無人機影像之影像收集及資料庫建置。
2. 現地控制點量測,山崩區之野外地質調查及構造地形分析。
3. 汛期前、後寶來村對岸大型山崩區之無人機的影像拍攝,以建置解析度高於之 10 公分數值地面模型。
4. 汛期前、後寶來村對岸大型山崩區之無人機光達及地面光達之光達地形掃瞄以資料處理,用以建置解析度高於之 10 公分數值高程模型。
5. 無人機光達、地面光達,以及無人機影像匹配之密點雲等不同點雲之資料整合、併接及分類自動化技術之開發
6. 地形資料精度、解析及誤差分析,地形對比及構造地形分析。
7. 總計畫「先進遙測技術於大規模山崩之活動監測、土砂運移及模擬分析」之相關工作綜整、協調。

本研究計畫擬逐次進行各個研究步驟,來完成預定之研究目標。工作項目含資料收集、無人飛機系統汛期前、後地形資料建置,以分

析及證據崩塌區及下方河道之地形變異，並評估及監測山崩區活動性。

針對本計畫預期完成之工作項目列如下，另進度排程列如表 3-1 所示：

1. 無人機的影像運用及傾斜攝影測量開發整合,提供有別於傳統垂直下拍的傾斜拍攝影像，以建置地上較無地形、地物遮蔽的數值地面模型。
2. 野外地質調查、構造分析，以及現地控制點量測
3. 汛期前、後寶來村對岸大型山崩區之無人機的影像拍攝，以建置解析度高於之 10 公分數值地面模型。
4. 汛期前、後寶來村對岸大型山崩區之無人機光達及地面光達之光達掃瞄地形資料收集，建置解析度高於之 10 公分數值高程模型。
5. 地形資料精度、解析及誤差分析，地形對比及構造地形分析。
6. 期刊計畫撰寫及投稿

計畫以南橫寶來村對岸之大型山崩為例,首先進行既有影像收集及資料庫建置等初期工作; 另再以無人飛行系統，進行航拍、影像正射及地形建置等工作,並同時進行無人機光達以及地面光達的掃瞄，一共進行兩次的全區飛行掃描工作。針對及荖濃溪主河道附近之大規模崩塌區進行汛期前、後期的資料庫收集及建置，預計無人飛機系統光學影像之拍攝區域總面積約 5 平方公里,無人機光達掃瞄資料面積 50 公頃。另一方面，首先於汛期後針對前幾年度之地形資料，以無人機光達掃瞄方式收集地形資訊;二方面針對汛期後之荖濃溪主河道附近及大規模崩塌區，進行無人機影像資料的收集及資料庫建置，另

針對荖濃溪中上游段，以及支流超大規模山崩區(如布唐布納斯溪及拉克斯溪流域)附近，進行無人飛行系統之影像收集及資料庫建置，並用以分析河道內土砂生產量及運移分析，分析評估山崩機制、運動及堆積特性。

本研究計畫之研究步驟及工作項目包含:資料收集、無人飛機系統汛期前、後地形資料建置，以分析及證據崩塌區及下方河道之地形變異，並評估及監測山崩區活動性，汛期前後寶來村對岸大型山崩區之無人機光達掃瞄地形資料收集，針對汛期後之荖濃溪主河道附近，以及支流超大規模山崩區大規模崩塌區，進行無人機影像資料的收集及資料庫建置，評估及檢核崩塌區活動，以及集水區內之土砂生產及河道淤塞等土砂量體計算。

**表 3-1 本計畫進度排程表**

| 月次 / 工作項目 | 第1月 | 第2月 | 第3月 | 第4月 | 第5月 | 第6月 | 第7月 | 第8月 | 第9月 | 第10月 | 第11月 | 備註 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 既有及 UAV 影像收集及資料庫建置分析 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| 野外地質調查及現地測量 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| 汛期前無人機影像拍攝及光達資料掃瞄 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| 數值地形模型建置 | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 三維立體影像建置 | | | | | | | | | | | | |
| 構造野外核實 | | | | | | | | | | | | |
| GIS 資料庫建置 | | | | | | | | | | | | |
| 汛期後無人機影像拍攝及光達資料掃瞄 | | | | | | | | | | | | |
| 成果撰寫及投稿 | | | | | | | | | | | | |
| 預定進度累計百分比 | 15.0 | 30.0 | 43.0 | 55.0 | 60.0 | 70.0 | 77.0 | 83.0 | 90.0 | 95.0 | 100 | |

# 第一節　無人機光達資料

無人機光達點雲解算完成後，即可獲得初始點雲，以瑞穗測試區為例，掃瞄區域內共有 59,004,565 個點雲，平均點雲密度約為 200 points/m2。圖 3-1 為航帶平差前點雲，可以發現在圈選的區域內，點雲顏色出現不連貫的情形，這表示點雲資料可能出現錯誤，進一步將點雲放大查看，可以清楚看到點雲發生錯移的現象，因此需要對點雲進行航帶平差，將航帶對點雲錯移的影響降到最小。點雲經航帶平差後，即可降低航帶對點雲的影響，圖 3-2 為航帶平差後的點雲，與平差前的點雲進行比對，圈選出來之區域點雲顏色以連續或是漸層的方式呈現，這表示點雲資料已經過修正，再將點雲放大進行查看，可以發現無論是房屋或者是電線杆，點雲都已修正至同一個平面，並且能清楚的將地物輪廓(植被、人工構造物)完整呈現，得到較為正確且精準的點雲資料。

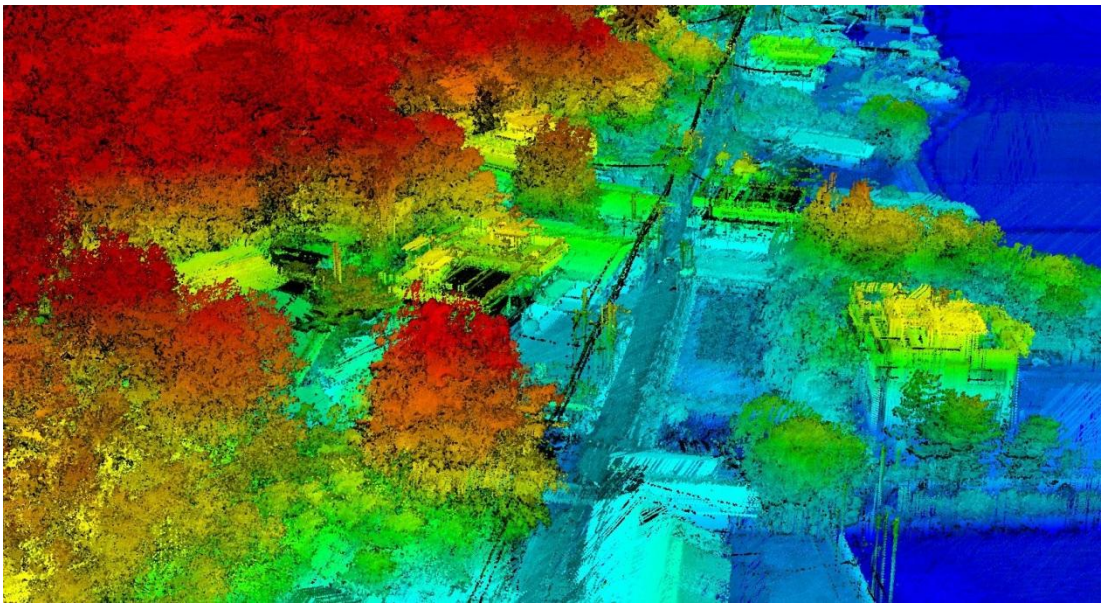


**圖 3-1 無人機點雲進行資料航帶平差前**

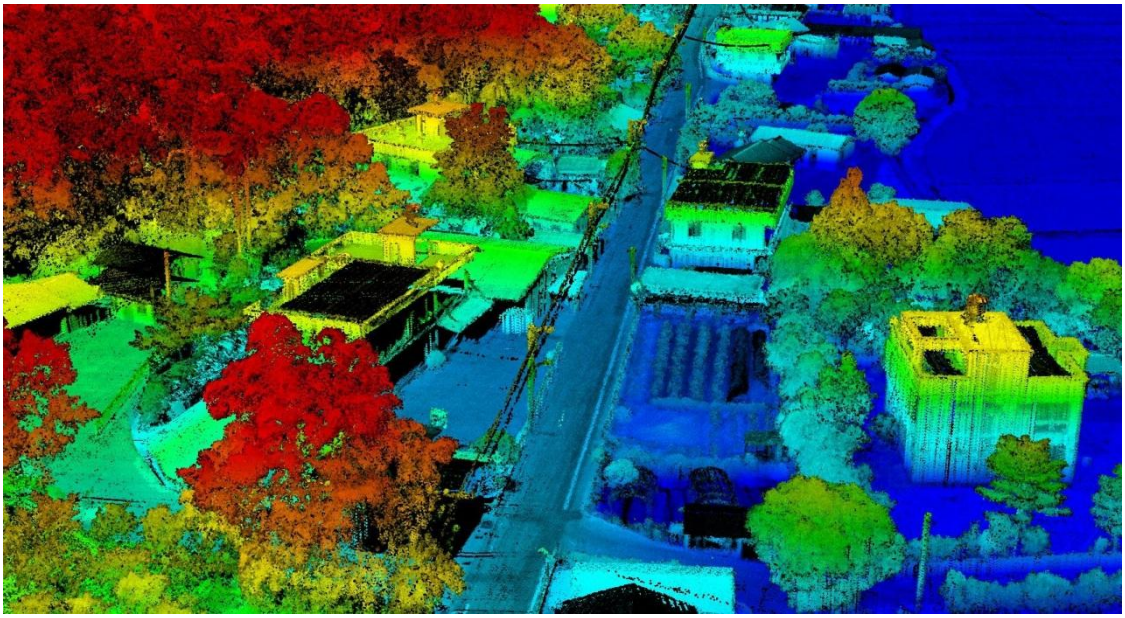


**圖 3-2 無人機點雲進行資料航帶平差後**

點雲分類處理完成後，即可將不同屬性的點雲來建置數值地形模型。其中將測點分類成地面點(Ground)；非地面測點(Non-ground)；不合理點(Noise)等三類。地面點及非地面點共同合併外差 (或內差)成數值地表模型 (digital surface model, DSM)，地面點則外差 (或內差)

成數值高程模型(digital elevation model, DEM)。圖 3-3 為本團隊於花蓮瑞穗地區之大規模山崩潛勢區所進行之無人機光達掃瞄技術測試區之測繪產製成果，圖 3-3 中由左而右各為空載光達 DEM，無人機光達 DSM 及無人機光達 DEM，三者指示同一區域。針對空載光達 DEM，及無人機光達 DEM，圖中皆清晰可見數個山崩圓弧型冠部之地形崖。圖 3-4 則為各類成果之空間解析度差異比較，其中空載光達空間解析度 2m，無人機光達資料空間解析度 15cm，圖中可清楚呈現在精細的地形資訊上，空載光達資料未能完整呈現及未能有效的作為山崩區精細微地形分析。

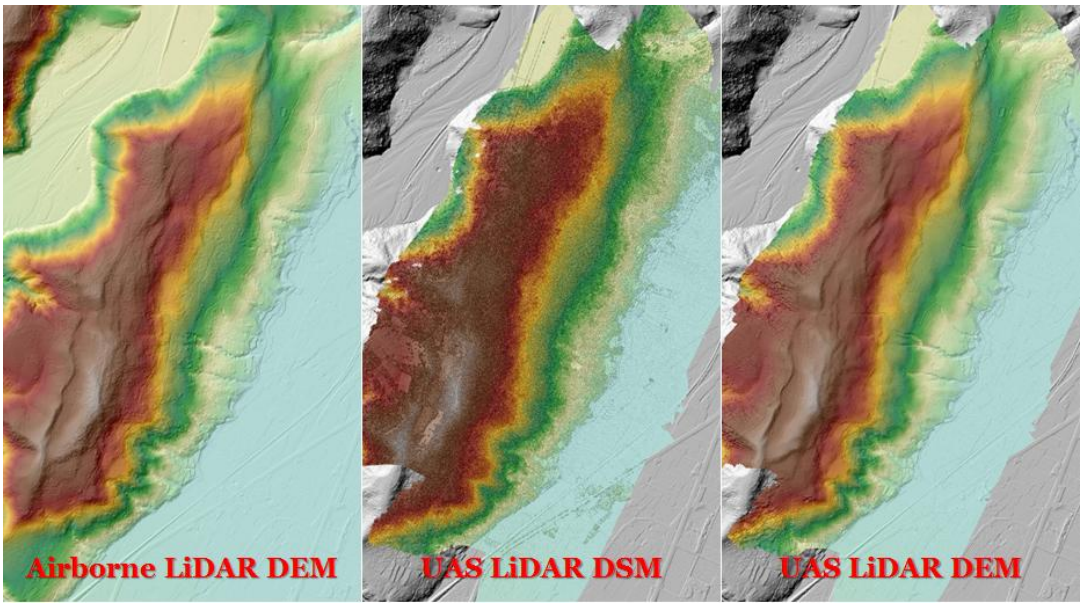



**圖 3-3 測試區全區之不同數值地表模型成果**

(由左而右各為空載光達 DEM，無人機光達 DSM 及無人機光達 DEM)

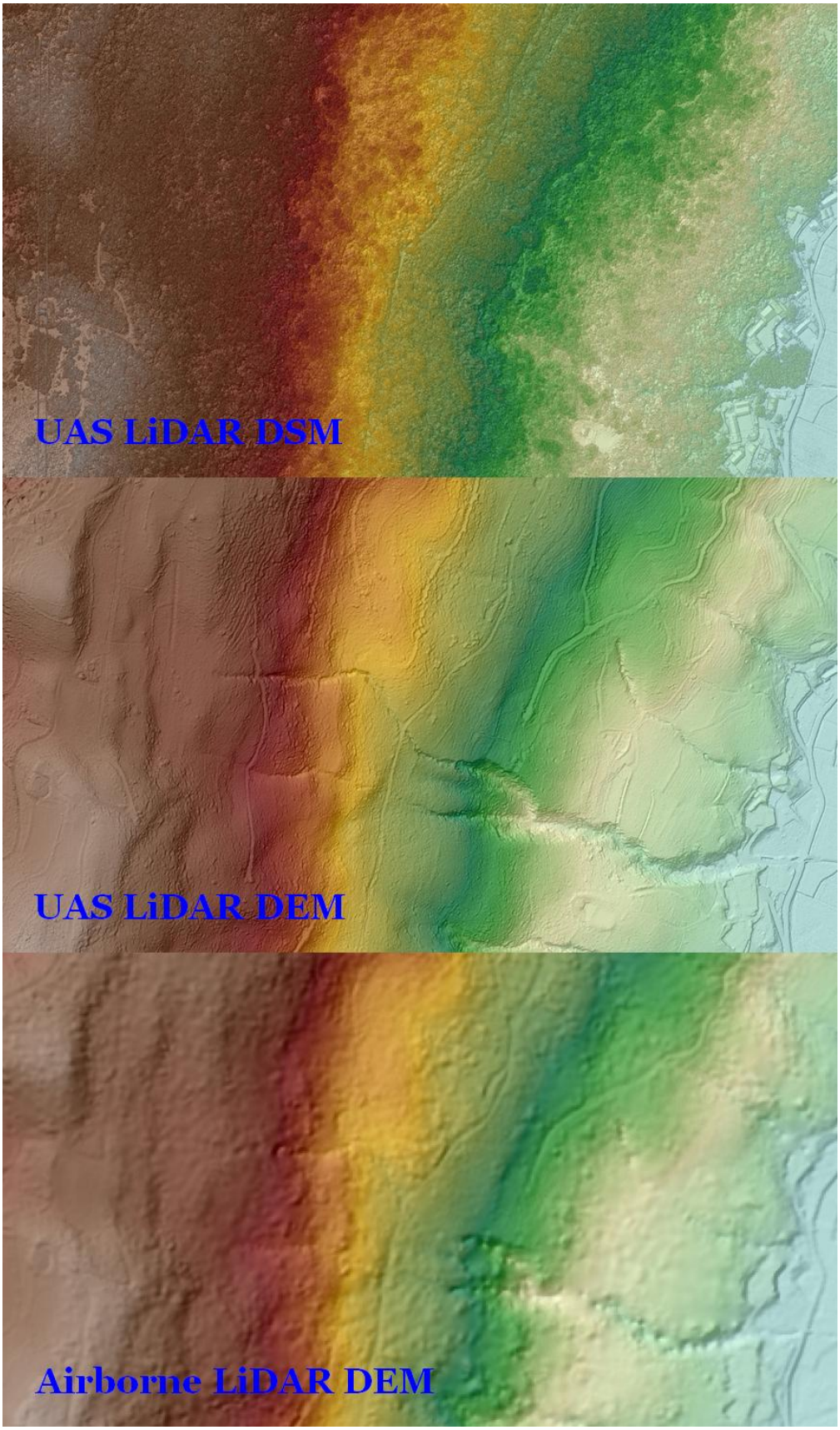



**圖 3-4 測試區內同一區域之不同數值地形模型成果比較**

(由上而下各為無人機光達 DSM 及無人機 DEM，空載光達 DEM)

## 第二節 無人機影像空拍及建模

針對坡地災害的調查研究中，尤其是坡地潛移區域，進行研究區現地勘察時，常因崩塌地或土石流料源堆積不明顯、無道路可通達之處，因而無法取得良好照片以進行整體狀況之評估。藉由無人飛行載具適時的運用，因其具有機動力強、時效性快、經費較廉、及較寬鬆天氣條件即可操作的優點等特性，可取得災害地區即時、清晰、全面之中低空照片，透過航拍可清楚鳥瞰災害土石流災害全景，明確辨識災害範圍，以彌補地面勘災「見樹不見林」之不足，並作為後續分析災害原因與災後整治之用。

以本團隊其他研究區域為例:草嶺地區之無人機影像擷取，一共執行四次飛行任務，其任務執行之時間各為 2016 年 8 月，2017 年 7 月、11 月及 12 月，相關成果中之影像正射成果資料庫指示如圖 3-5。草嶺地區汛期中及汛期後兩次地形分析則另以拍攝之影像進行三維地形模型建置。扣除雲霧及無人機轉彎時側拍之區域後，全區每一飛行任務之建模區域面積均大於 22 平方公里，其模型之解析度高於 18 公分。

2017 年六月兩次梅雨造成全台多處高土砂災害，相關新聞多所報導，但針對草嶺地區，則未見相關之分析。本團隊針對草嶺地區長期建行山崩區之監測，故於 2016 年八月及 2017 年七月進行兩次無人機空拍，對比兩期之地形、地貌特徵，發現草嶺山崩區滑動面上有重大地貌改變，例舉地表變異最大之區域，如下:

一、斷魂谷

斷魂谷為草嶺山崩區滑動面最重要之階面，長期以來的觀測紀錄本崖線一直持續而緩慢的後退。由圖 3-6 之三維地形真實模型的比較結果，可以清楚崖線於 2016 年八月至 2017 年七月間有重要的後退現象，其後退距離至少超過 70 公尺。筆者於 2017 年三月曾帶學生至本區野外教學，並於崖線上觀測，當時印象所紀錄之崖線尚和 2016 年影像及三維模型內之位置一致，故合理推論本次之後退事件，當為六月份之梅雨季豪雨所致。

二、倒交山

倒交山為草嶺山崩後堆積所堆積形成，因主要組成物質為山崩崩積物，故長久以來物質一直遭受下方河道側移侵蝕，而漸次下移，並產生新的滑動。2017 年六月豪雨，似仍造成不小土方侵蝕。兩時期之真實三維模型如圖 3-7 所示。對比 2016 年八月、2017 年七月及十一月等三期無人機影像，充份呈現出地形的變化。其中山崩區中段之地貌改變最為明顯，可再細分為三處，指示如圖 3-8。本三處之量體計算結果，其中斷魂谷之地形改變量之量體達 154 萬方，為最大者。倒交山崩積物再次崩塌量達 69 萬方，另河道側移亦產生 25 萬方之量體。以上量體估算，顯見 2017 年六月豪雨對本區造成重大地貌改變。2017 年七月至 11 間之主要地貌改變則發生於倒交山崩積物的再崩蹋為主，尤其是崩崖往上發育後退。斷魂谷崖線所產生之崩移、倒交山崩積物再次崩塌，以及河道側移所產生之侵蝕等三區域之量體計算成果指示如圖 3-8 所示。

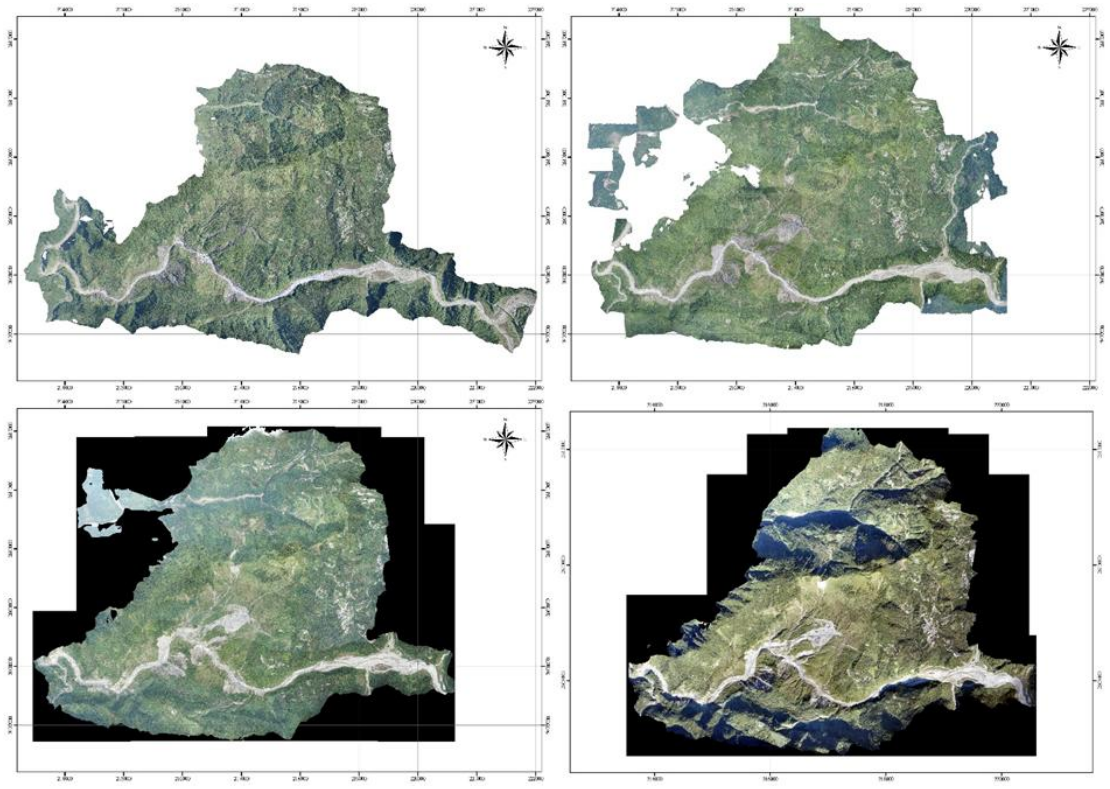


**圖 3-5 草嶺山崩區四時期無人機影像測繪成果**



**圖 3-6 斷魂谷崖線對比，左 2016 年，右 2017 年**



**圖 3-7 倒交山崩積區崖線對比，左 2016 年，右 2017 年**

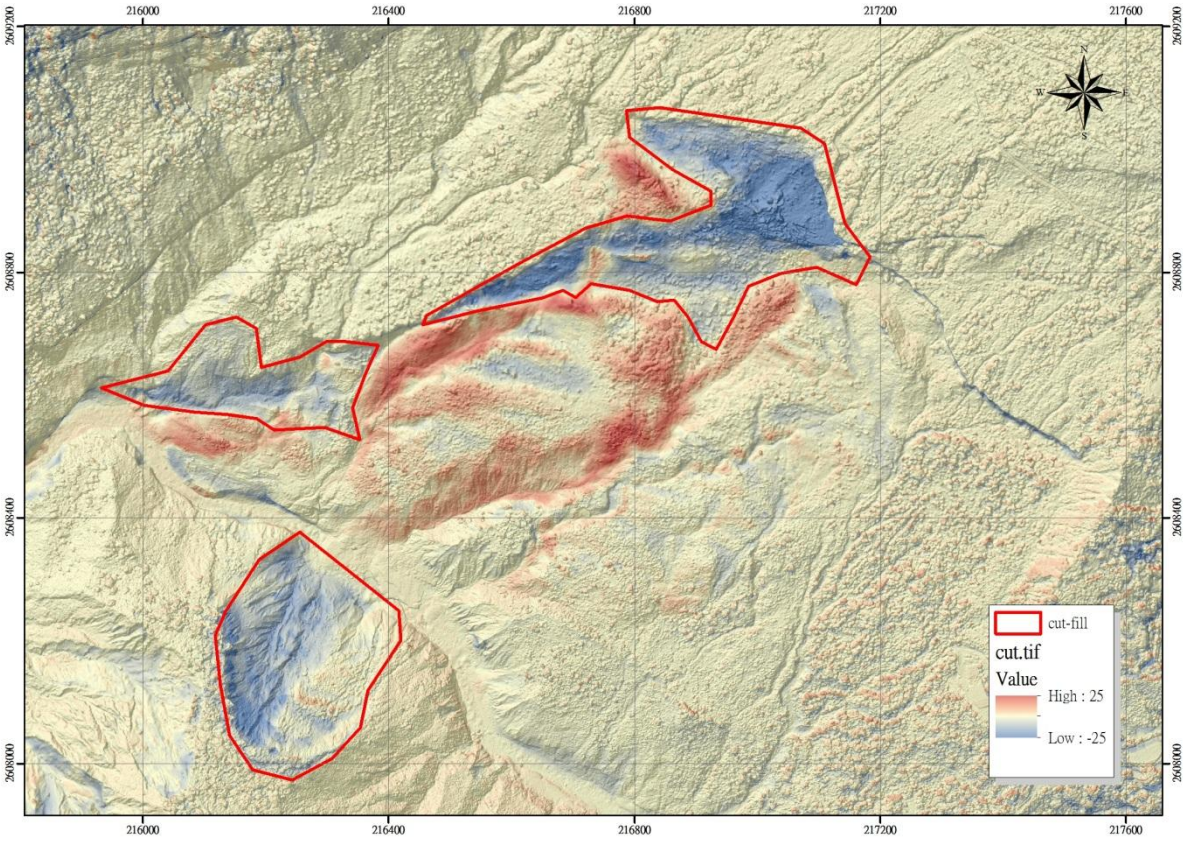



**圖 3-8 草嶺山崩區 2017 年六月豪雨期間地貌改變主要區域之高度差異**

# 第四章　研究成果

## 第一節　現地測量

本研究在測量前規劃了(圖 4-1)的測量點，分為檢核點與控制點，在光達系統中給予控制點是重要的，我們利用 VBS-RTK 與 RTK 進行測量比較後，再選擇誤差較小得測量方式做為光達點雲絕對座標轉換時的準則。

蒐集了範圍內的一點水準點，對此檢核測量數據是否正確，也就是測量儀器檢核，因為在本團隊過去都無法確認儀器是否跟內政部所設置點位座標之差值，所以本研究特別針對這個部份去探討並比較。

在研究範圍內無法通行，所以測量點無法設置在邊坡上，故設置在離邊坡最近的道路上，一共十六個點位平均設點，但由於地面上所擺設的反光標因角度關係，未掃描到地面點，故最後使用四個控制點與七個檢核點，距離研究範圍約 300m~800m，考量到可能會有因距離而產生誤差，所以本研究也會針對不同的距離探討控制點距離是否影響到光達點雲的精度。

測量對於無人機光達的重要性在於，飛航時需要架設靜態 GNSS 基站，以供後續在航帶解算時，有效的利用後處理方式校正軌跡偏差，選擇架設的靜態點位距離飛行軌跡應盡量靠近為主，因無人機之起飛點位於點 BL01、BL11，故選擇 BL01、BL11 這兩點為主來進行資料

解算及查核，如果靜態站離飛行軌跡太遠會對於航帶解算產生較大的誤差。

一、測量點規劃

本研究主要範圍因無法通行到達，故將控制點位置設置於最靠近道路上(圖 4-1)，並於同樣點位上擺設，供無人機光達使用之地墊與地面光達使用之稜鏡，藉此取得點位資料於給予絕對座標時，能確定兩系統有共同的座標位置，本次測量所使用 RTK 方式，利用已知座標點位 BS02 為一等水準點，將其設置為基站，利用移動站引測至各測量點上，另外使用 e-GNSS 方式進行各個測量點上，此方法只需要接收國土測繪中心訊號，即可馬上取得此座標資料。

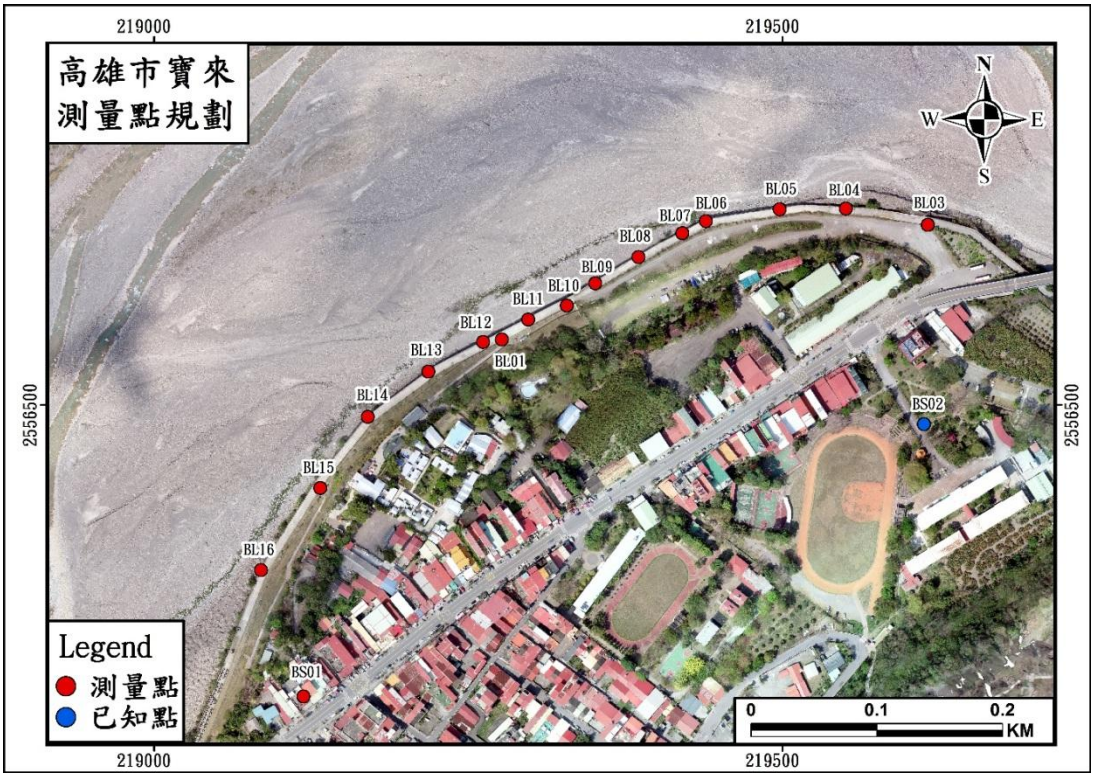



**圖 4-1 現地控制點規劃布設位置**

二、檢核點規劃

光達系統的精度檢核部分分為三種情形，一、兩種測量方法之差異，並選擇較精準的數據當作光達系統的控制點，二、特徵點在無人機光達與地面光達中點雲之差異，三、對於控制點對真實點雲中點選為非控制點的其他點位做檢核。

本研究在 2019 年 7 月 17 號測量 VBS-RTK 與 RTK 各三次測回，利用標準差與均方根誤差比較兩者之精度，選擇較佳的測量資料，並利用光達系統點雲檢核測量值是否正確，

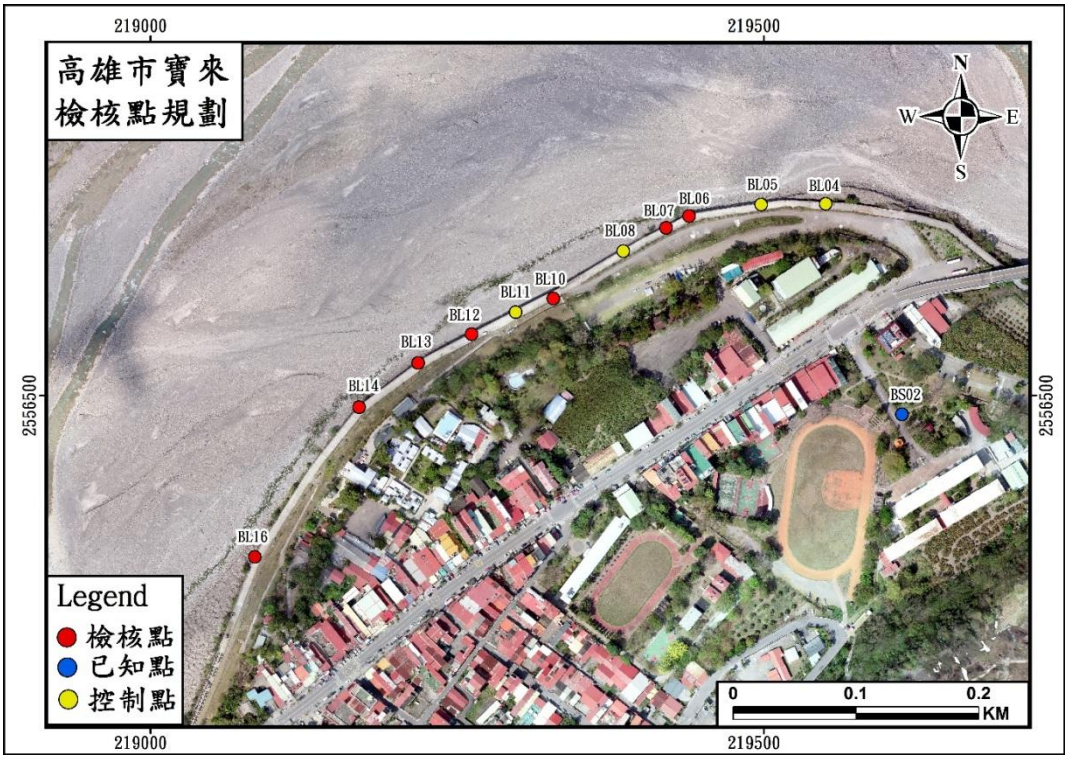



**圖 4-2 現地檢核點規劃布設位置**

本研究是使用 e-GNSS 與 RTK 測量進行三次測回，測量成果(表 4-1)、(表 4-2)，e-GNSS 接收訊號高程差較大，而使用 RTK 測量高程數據較為穩定，在光達系統中測量數據是最重要的環節，故使用 RTK 數值給予絕對座標，由(圖 4-3)中選擇平均誤差較小，以及在點雲中稜鏡較為清楚者，做為控制點最終選擇 BL04、BL05、BL08 與 BL11 點位，做為本系統絕對座標點位。

由(圖 4-4)測量成果中可以發現 RTK 方式，於測量系統誤差中平面平均誤差有 0.5cm~1.5cm，高程平均誤差有 1cm~2cm 的誤差，如果點選了四個控制點依照系統誤差累加來看，可能最大會造成 4cm 的誤差。

本系統中使用平差方法可將此誤差降低，因為於平差時只會鎖定一個測站做為固定站，可使其他測站改正其數值，可有效降低系統平均誤差，但依系統平均標準差誤差(圖 4-4)上來看依然會有約平面 1cm~2cm 與高程 1.5~2.5cm 的誤差。

## 表 4-1 e-GNSS 測量數據成果表

| 點位 | Xμ | Yμ | Zμ |
|---|---|---|---|
| BL01 | 2556552.208 | 219276.799 | 395.383 |
| BL03 | 2556643.498 | 219615.792 | 402.617 |
| BL04 | 2556656.495 | 219550.516 | 401.044 |
| BL05 | 2556655.842 | 219497.765 | 399.767 |
| BL06 | 2556646.476 | 219439.143 | 398.276 |
| BL07 | 2556636.910 | 219420.377 | 397.807 |
| BL08 | 2556617.925 | 219385.448 | 396.802 |
| BL09 | 2556597.034 | 219351.174 | 396.180 |
| BL10 | 2556579.203 | 219328.498 | 396.124 |
| BL11 | 2556568.120 | 219297.785 | 395.653 |
| BL12 | 2556550.284 | 219261.908 | 395.312 |
| BL13 | 2556526.767 | 219218.353 | 394.829 |
| BL14 | 2556490.697 | 219170.077 | 394.201 |
| BL15 | 2556434.071 | 219132.330 | 393.508 |
| BL16 | 2556368.731 | 219085.138 | 392.545 |

## 表 4-1 RTK 測量數據成果表

| 點位 | Xμ | Yμ | Zμ |
|---|---|---|---|
| BL01 | 2556551.952 | 219276.597 | 419.815 |
| BL03 | 2556643.248 | 219615.574 | 427.067 |
| BL04 | 2556656.220 | 219550.299 | 425.510 |
| BL05 | 2556655.567 | 219497.565 | 424.225 |
| BL06 | 2556646.191 | 219438.955 | 422.711 |
| BL07 | 2556636.631 | 219420.164 | 422.258 |
| BL08 | 2556617.641 | 219385.255 | 421.245 |
| BL09 | 2556596.776 | 219350.992 | 420.624 |
| BL10 | 2556578.960 | 219328.306 | 420.571 |
| BL11 | 2556567.861 | 219297.6 | 420.088 |
| BL12 | 2556550.017 | 219261.717 | 419.735 |
| BL13 | 2556526.509 | 219218.177 | 419.233 |
| BL14 | 2556490.427 | 219169.895 | 418.605 |
| BL15 | 2556433.786 | 219132.122 | 417.912 |
| BL16 | 2556368.462 | 219084.948 | 416.954 |

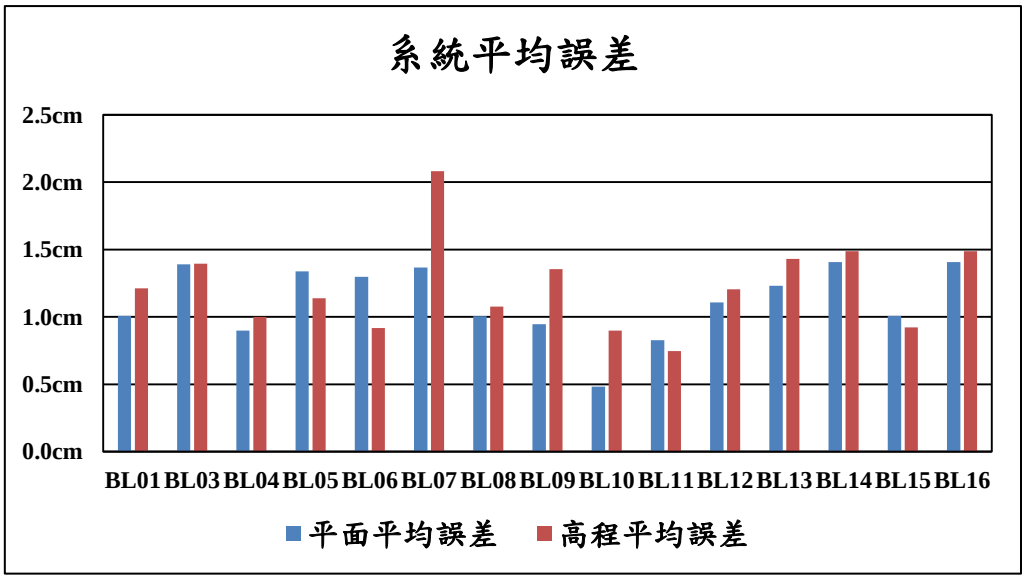



**圖 4-3 RTK 系統平均誤差**

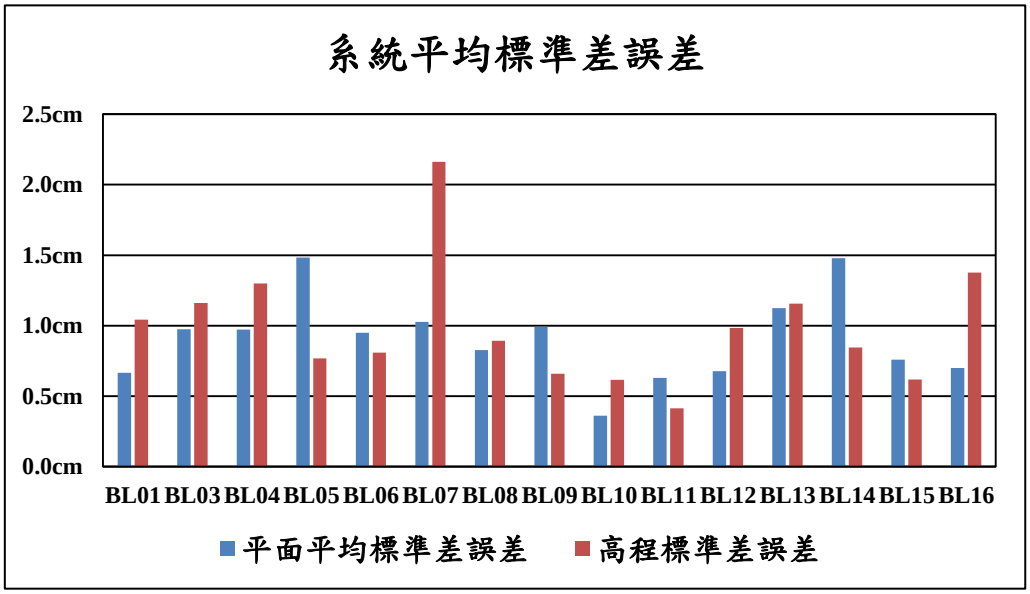



**圖 4-4 RTK 系統平均標準差誤差**

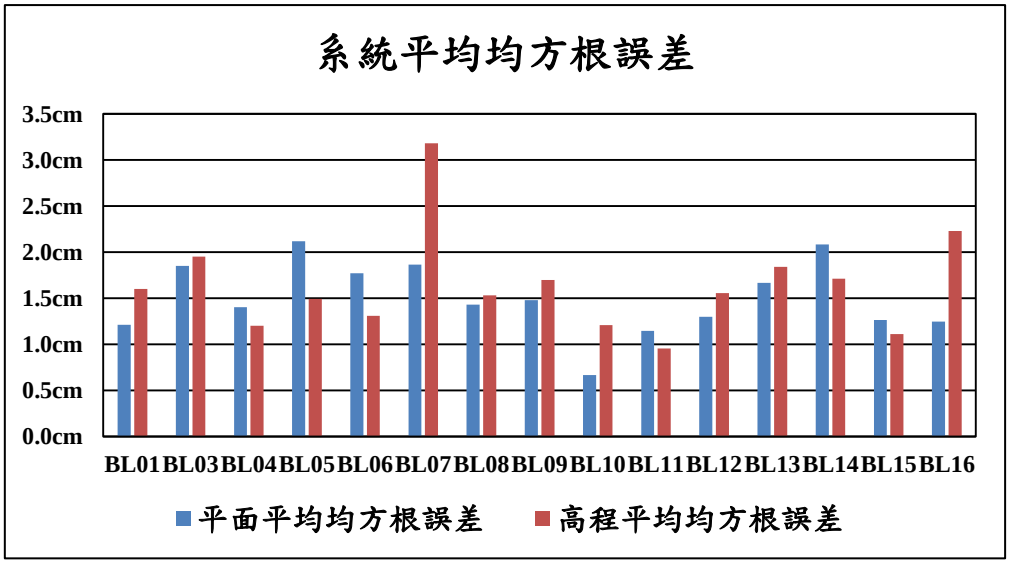



**圖 4-5 RTK 系統平均均方根誤差**

## 第二節　航帶軌跡解算

航帶是由無人機光達系統中紀錄軌跡，透過軟體給予靜態測量數據進行解算，一般而言架設的點位盡量靠近飛機飛行路徑(圖 4-6)，透過後處理的 DGPS (Different Global positioning system)方式校正航帶軌跡(圖 4-7)，紫色為原始航帶軌跡，綠色為解算後之航帶軌跡。

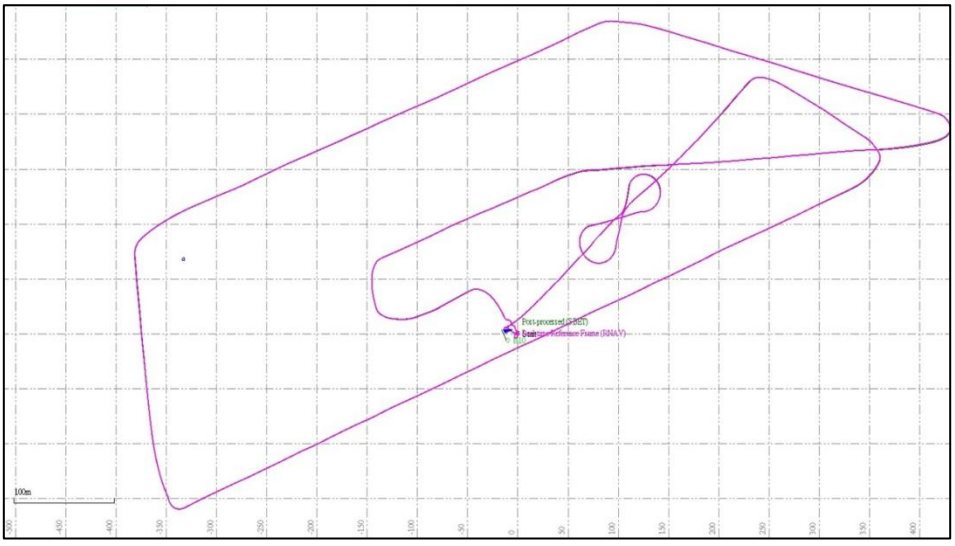


**圖 4-6 始紀錄航帶軌跡示意圖**

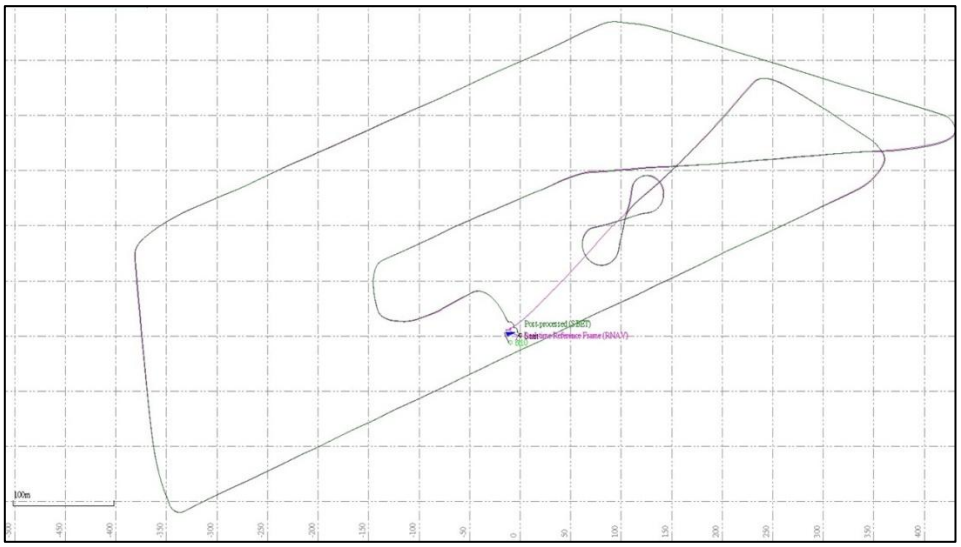


**圖 4-7 紀錄航帶軌跡示意圖**

## 第三節　航帶平差成效

本研究所使用平差方法為最小平方法在無數多個點中設置平面，利用參數找尋不同航帶但類似的平面，計算出改正數並加以改正航帶，計算出各航帶之間的標準差，更可以看出平面之間的誤差值。

在光達資料整合之前，必須確定無人機資料平差無誤，因為兩者處理系統並不同，而在本研究中有提到專案座標系統(Project Coordinate System)，在結合時如果資料處理不佳，將導致整合時兩者資料無法整合在一起，故需要十分確定資料的準確度，反覆觀看平差前後之差異，可以參考平差後所跑出的誤差值進行比較。本研究之平差成果詳如圖 4-8 及 4-9 所致。

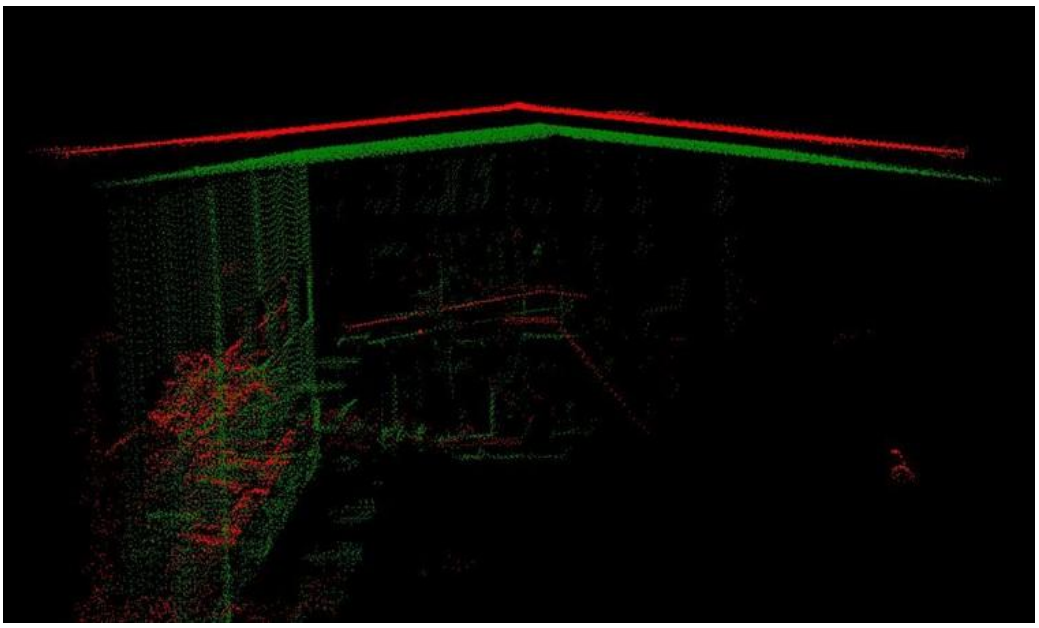


**圖 4-8 光達掃描資料平差前**

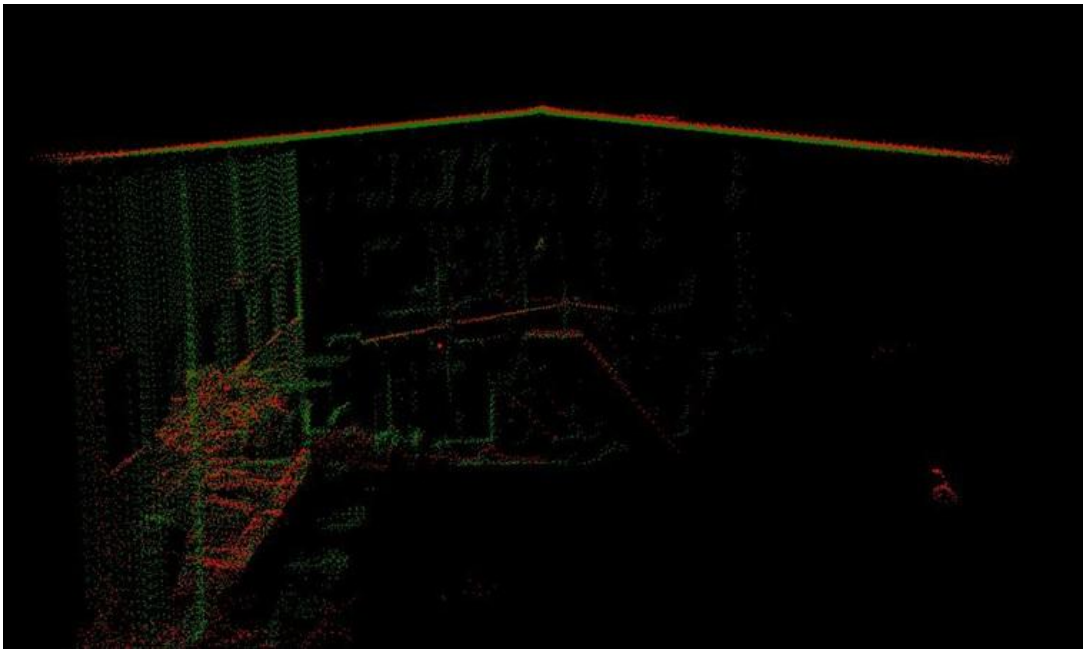


**圖 4-9 光達掃描資料平差後**

在以點雲模型來檢視的平差前後兩者模型差異，分別以觀察道路、建築以及植被，在航帶平差後，能明顯的看出航帶平差有效的將分層的航帶點雲，平差至同一平面，減少轉換成數值地形模型時取錯點雲

的誤差。

## 第四節　光達系統平差精度

平差方法是無人機光達與地面光達利用點雲計算出平面 (圖 4.10)，圖中可以看到不同掃描器所產製的平面，在最小平方法中給予參數，得出改正數在掃描器中的位置，是由 4X4 的矩陣所組成如圖，記載著 X、Y、Z、Pitch、Roll 與 Yaw。

依據建物高程差作為搜索範圍為 0.5m，最大偏差為 1m，最小偏差為 0.5m 為第一次平差，跑完誤差為 0.15m。之後跑第二次平差搜索範圍為 0.25m，最大偏差為 0.5m，最小偏差為 0.25m，跑完誤差為 0.1m。再跑第三次平差搜索範圍為 0.1m，最大偏差為 0.25m，最小偏差為 0.1m，誤差為 0.04m(圖 4-11)。

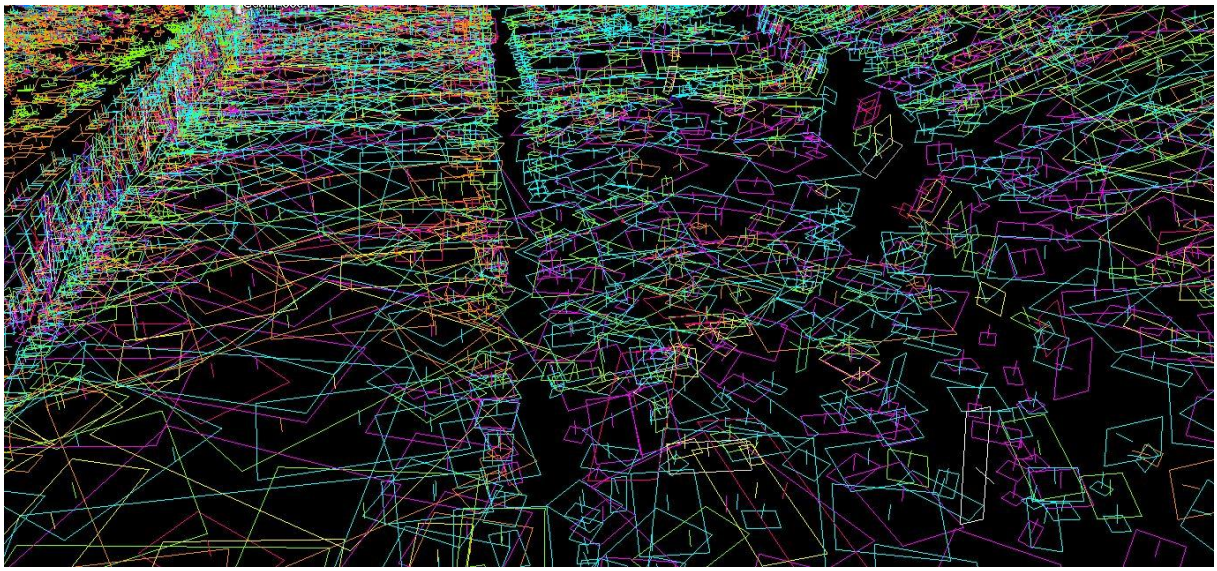


**圖 4-10 光達掃描資料平差示意圖**

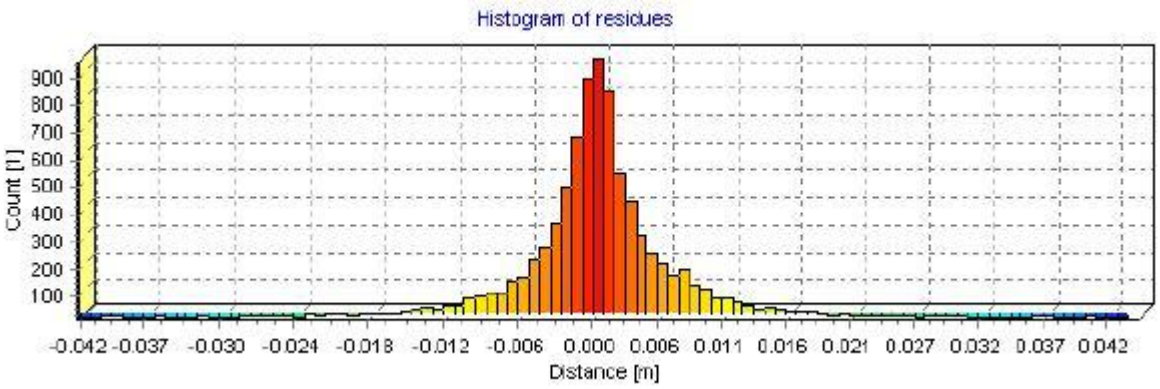
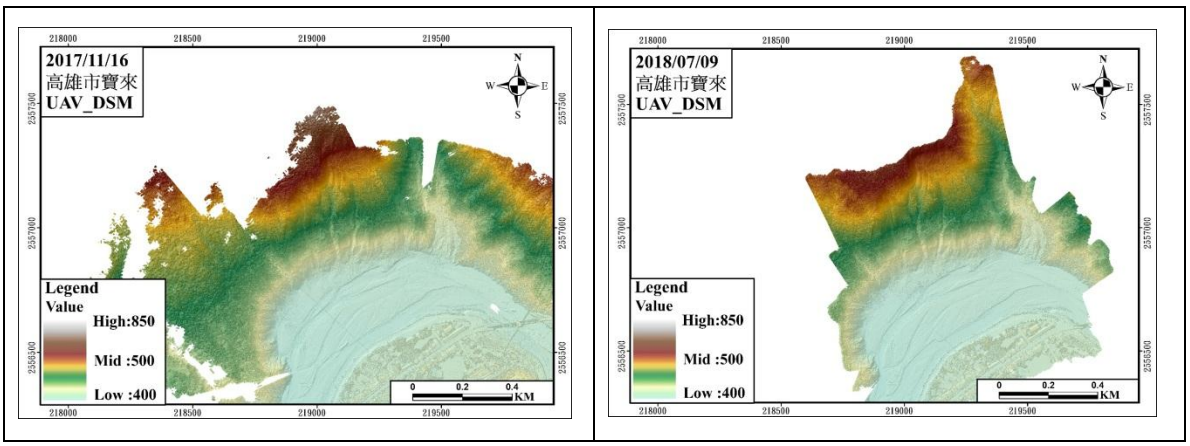



**圖 4-11 掃描資料平差成果圖**

## 第五節　DSM 成果

將收集的點雲數據利用軟體進行不規則格點之規則網格內插(或外插)，亦即每個點雲資料都具有 X、Y、Z、強度資料，將點雲所代表的高程 Z 值，透過內插(或外插)方式製作出 DSM，將原始所全部收集的點雲，所產製網格資料。各時期之 DSM 建置成果指示如圖 4-12 所示。



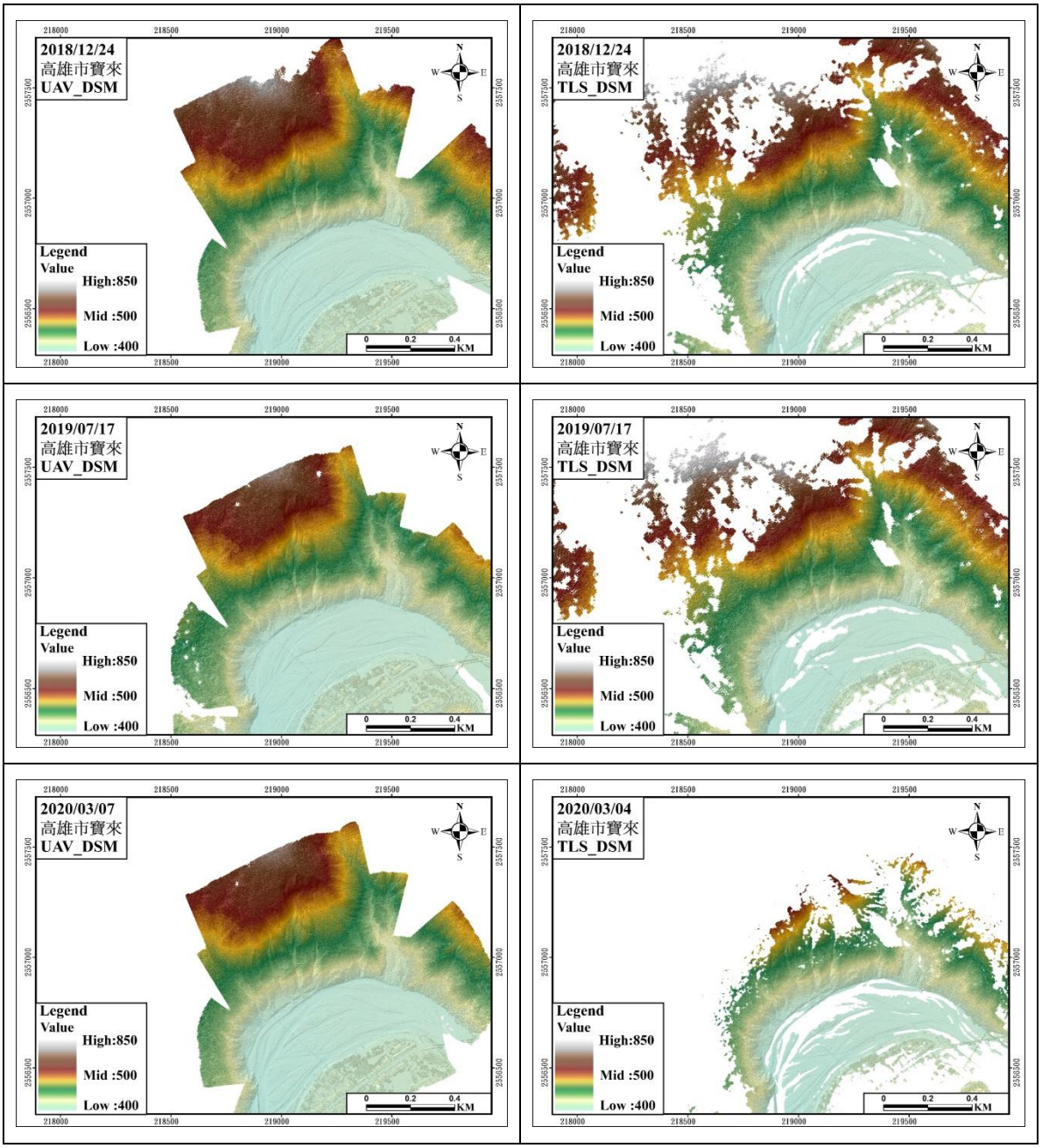



**圖 4-12 寶來地區各時期 DSM 建置成果**

## 第六節　平差精度評估

將地面光達點雲取七個點作為控制點，在將各時期之無人機點雲在同一個位置取得最近之點雲，作為檢核點做為兩者光達系統之誤差評估，結果指出 2017 年 11 月 16 日平均誤差值約為 0.055m、平均標

準差約為 0.045m 與平均均方根誤差約為 0.07m，而在處理資料時有發現，數據並不佳而由評估中也發現此時期之精度較為不精準，故在分析時將此時期排除。

由此可與整合後，最小平方法所顯示的誤差為 4cm 結果吻合，代表系統平差並無太大問題，如果在特徵物上誤差較大時，需檢查平差是否有問題、掃描時地面光達是否有晃動與無人機光達掃描時是否有過大的震動，確認地面光達站或無人機光達航帶是否符合本研究規範範圍，若距離整合後的平差後誤差值過大，則可能需把此站或航帶排除不使用，否則在點雲分類時，會導致分類到錯誤的地面點，由於本研究所使用的光達系統之點雲數量都十分足夠，寧可排除也不能使用到精度較差的資料。

## 第七節　無人機數值地形模型

數值地形模型不同於正射影像，有地形高程資訊，能透過數值地形模型分析整個研究地區的地形地貌，也是高程檢核重要的資料。本研究分別於兩時期 2019/07/17 時期、2020/03/07 時期，獲取地面光達點雲資料及無人機影像點雲資料，兩套點雲資料建置出來的數值地形模型成果，與兩套點雲系統融合之數值地形模型成果。

一、無人機影像點雲產製數值地表模型

本研究無人機影像點雲產製數值地表模型，應用 e-GNSS 測量及 RTK 測量兩種測量方法的測量成果點選控制點，控制點依範圍分佈來點選，e-GNSS 測量方法僅點選 2020/03/07 一期，且設計了兩種點選方法，一種為僅有河堤的 8 個控制點，另一種為除了河堤上的控制點，還加寶來鎮上及河床上共計 17 個控制點，擴大控制點的分佈範圍；RTK 測量則點選了 2019/07/17 及 2020/03/07 兩個時期，並設計了兩種方法，2019/07/17 時期點選的是河堤上的 8 個控制點，2020/03/07 時期點選了河堤上及寶來鎮上共計 12 個控制點，此控制點的 RTK 基站使用的有兩種座標資訊，一種是一等水準點的座標資訊，另一種為現地測量該一等水準點 e-GNSS 座標資訊。

本研究於 e-GNSS 測量方面設計了兩種 DSM 產製方式，兩個影像解析度皆為 5.50 公分，模型範圍為 2.403 平方公里，且同為 2020/03/07 時期拍攝所得，共拍攝使用 1806 張相片，一種如圖(4-13 左)為點選了 8 個控制點，此 8 個控制點僅分佈於最靠近坡面的河堤上；另一種如圖(4-13 右)點選了 17 個控制點，分佈於河堤上、河床上、寶來鎮上。主要想藉由控制點的分佈範圍大小、均勻性來比較成果的差異。

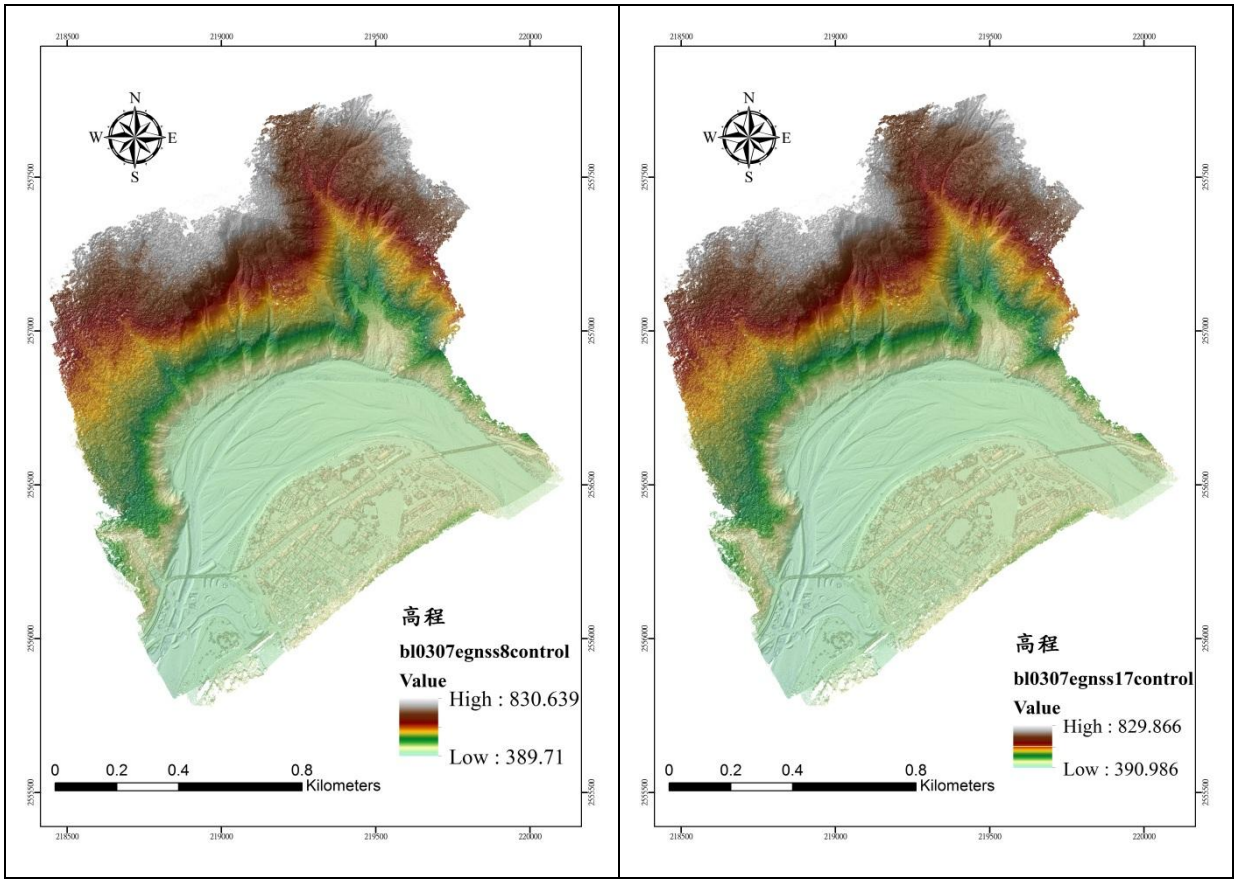



**圖 4-13 寶來地區不同數量控制點之 DSM 差異。8(左)，17(右)**

## 二、地面光達系統產製數值地表模型成果

本研究之地面光達系統產製數值地表模型如圖 4-14，共分為兩個時期，2019/07/17 時期(圖 4-14 左)與 2020/03/07 時期(圖 4-14 右)。兩個時期皆應用 RTK 測量方法的測量成果點選控制點，總共點選了四個控制點，四個控制點都分佈於最靠近坡面的河堤上。地面光達掃瞄站，2019/07/17 時期掃瞄了 14 站，掃瞄了 141,301,381 個點；2020/03/07 時期掃瞄了 33 站，掃瞄了 356,288,125 個點。

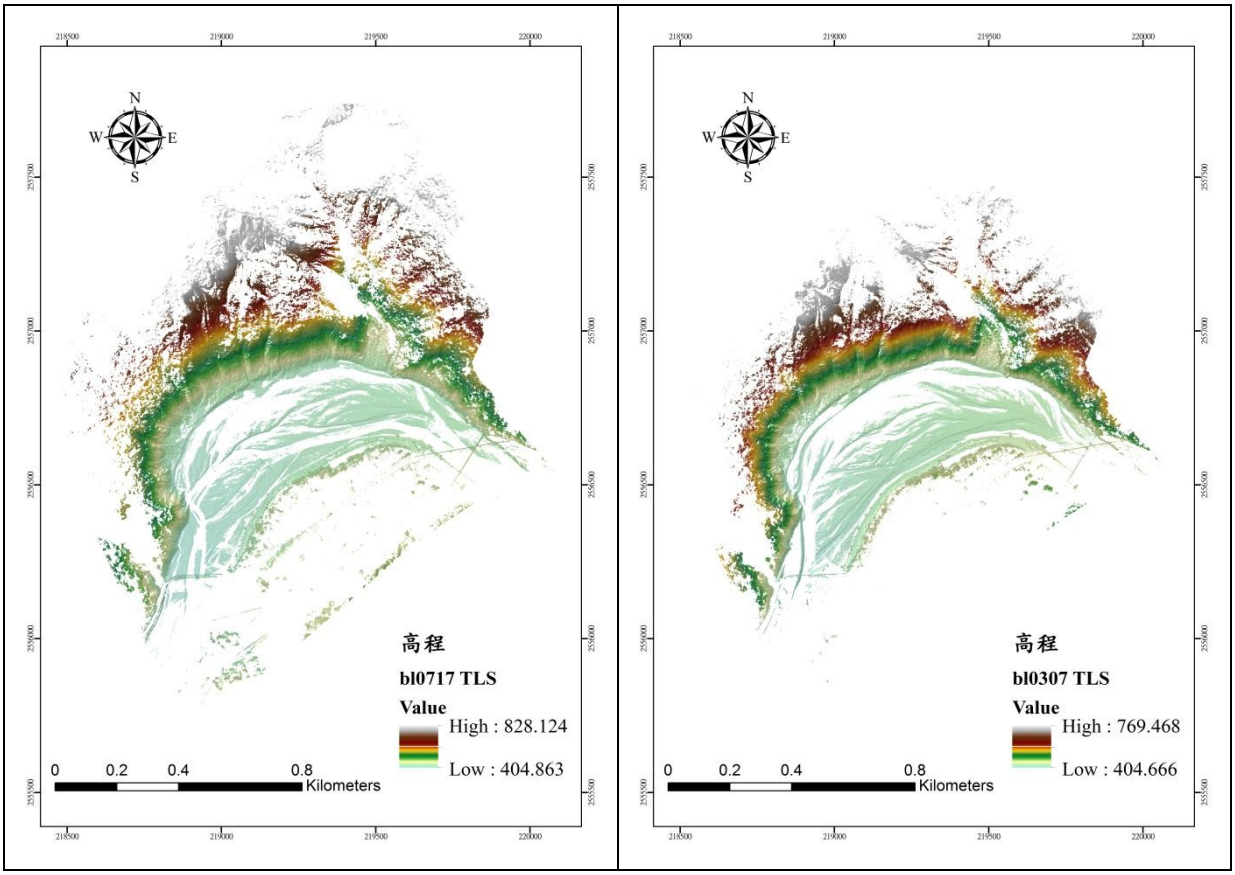



**圖 4-14 寶來地區地面光達 DSM 成果。2019(左)，2020(右)**

## 第八節　點雲融合數值地表模型產製

本研究之點雲融合產製數值地表模型如圖 4-15，共分為兩個時期，共分為兩個時期，2019/07/17 時期(圖 4-14 左)與 2020/03/07 時期(圖 4-14 右)，藉由不同時期的成果，可以發現經過一個時期的時間後，研究地區如何變化。

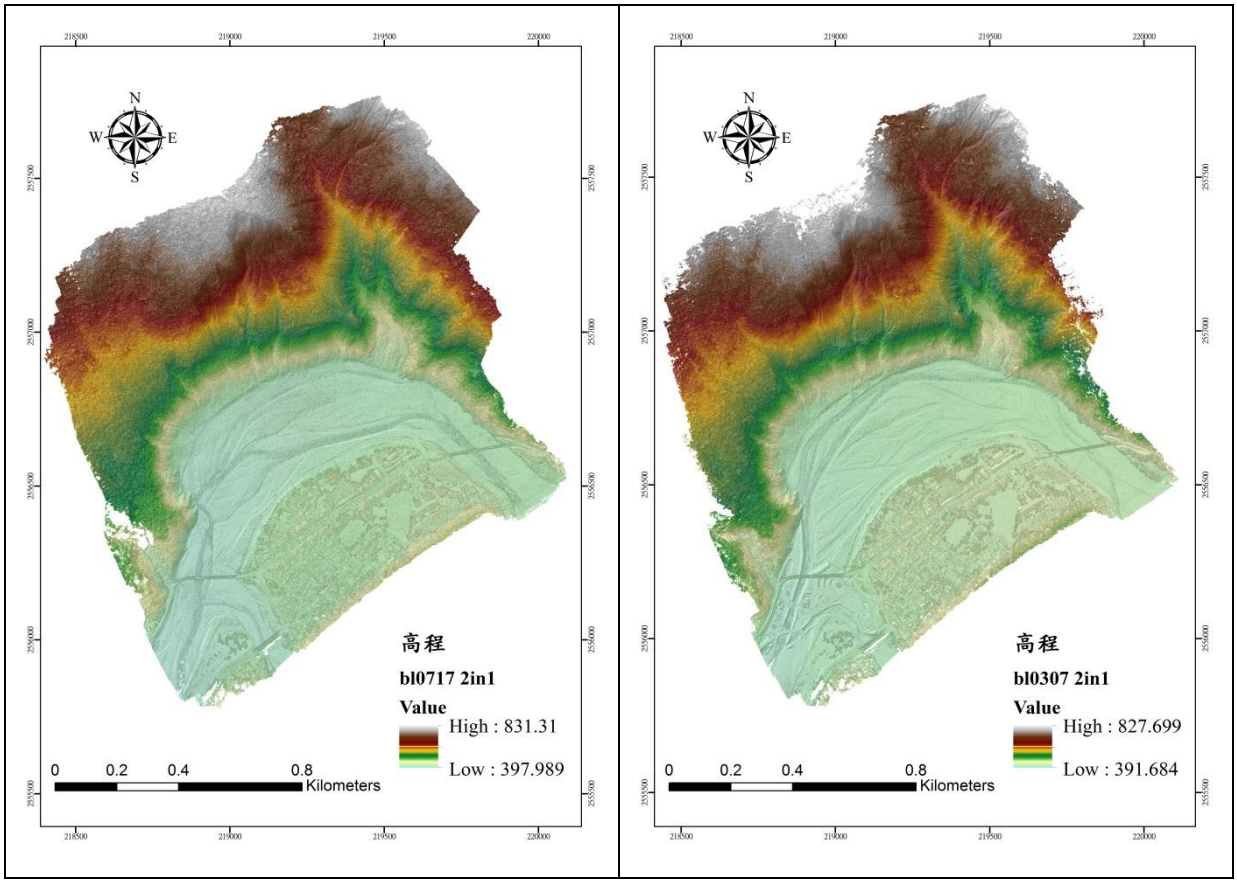



**圖 4-15 寶來地區不同點雲融合後之 DSM 成果。2019(左)，2020(右)**

## 第九節　大區域航拍建模成果

本計畫於 109 年 3 月 8 日於高雄市寶來村之河床上的高灘地附近為地降點，計畫執行之目標區有二：寶來山崩區及竹林地區，一共進行兩個飛行架次之航拍任務，全部航拍面積約 28 平方公里。其中寶來地區航拍面積約 18 平方公里，而竹林地區，航拍面積約 15 平方公里，均屬大區域之無人機航拍任務。以竹林地區之航拍任務為例，其範圍及航線規劃如圖 4-16 所示。本次飛航規劃之飛行區域之飛行總距離長度 66.7 公里，飛行之平均離地高度約 450 公尺，影像之地面

解析度約 12 公分。為達到航拍地形建模之目的及需求，考量飛行過程中航線間之影像重疊，故設計影像之航向重疊率至少為 85%，旁向重疊率至少為 45%。總航線之飛航高度剖面指示如圖 4-17。本次任務實際飛行作業時間 85 分鐘，完整完成測區之航拍任務。

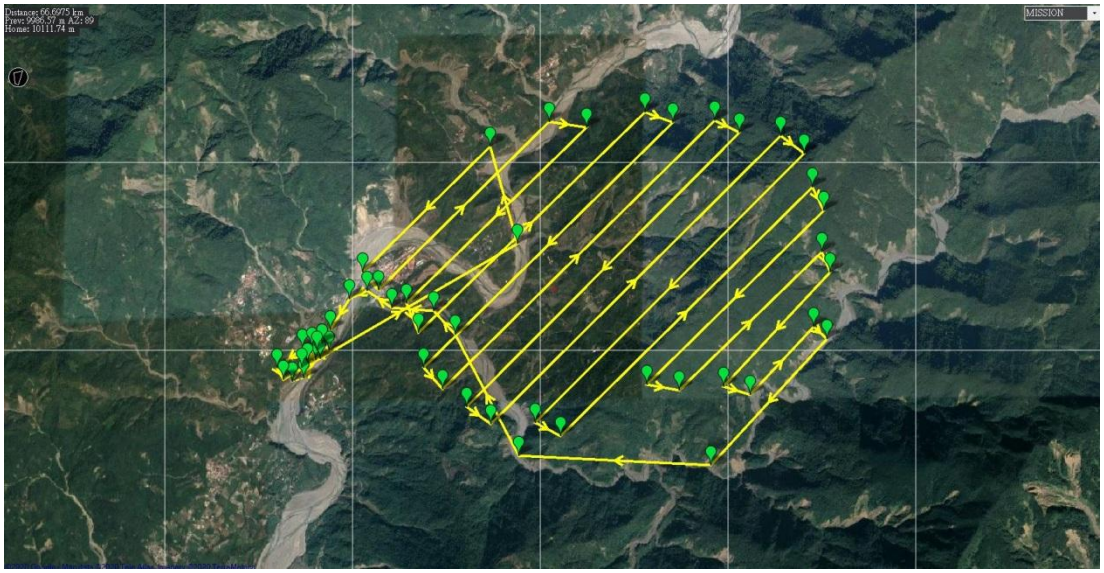


**圖 4-16 竹林附近航拍任務規劃示意圖**

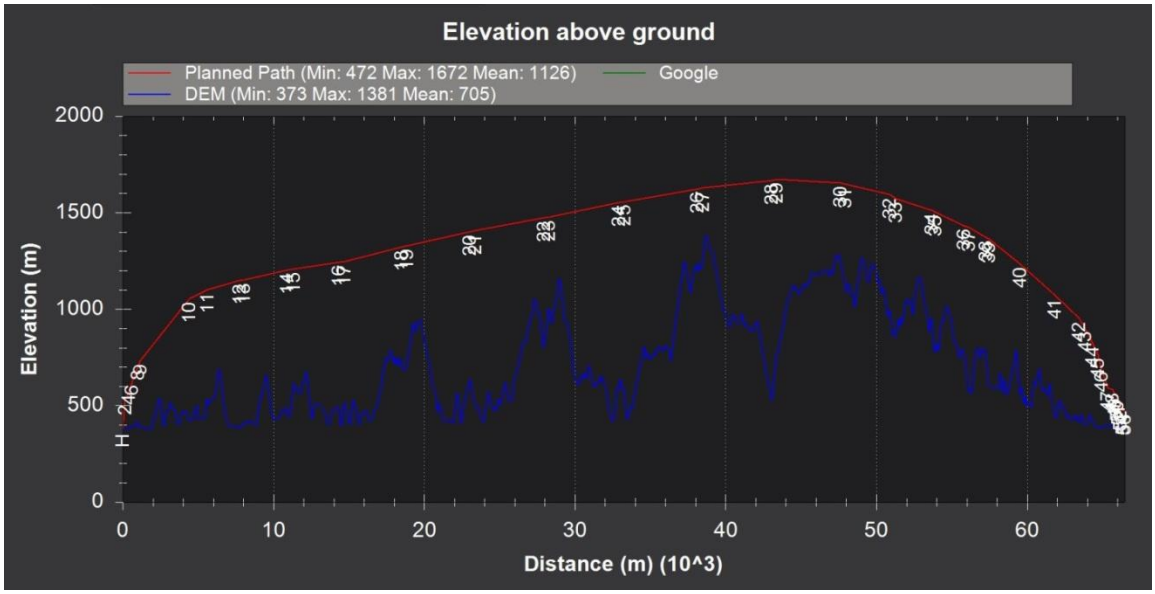



**圖 4-17 竹林附近航拍任務航線規劃高程剖面圖**

竹林區進行一個飛行架次，一共取得 904 張影像，除了 12 張影像為飛機轉彎過程中因橫滾角過大及局部雲覆的情形下，所拍攝的影像未能用於模型建置外，其他 892 張影像均用於實際建模。針對計畫區之 DSM 建模成果，全區域面積為約 27 平方公里。圖 4-18 及圖 4-19 呈現寶來地區竹林附近之正射影像成果及 DSM 建模成果。

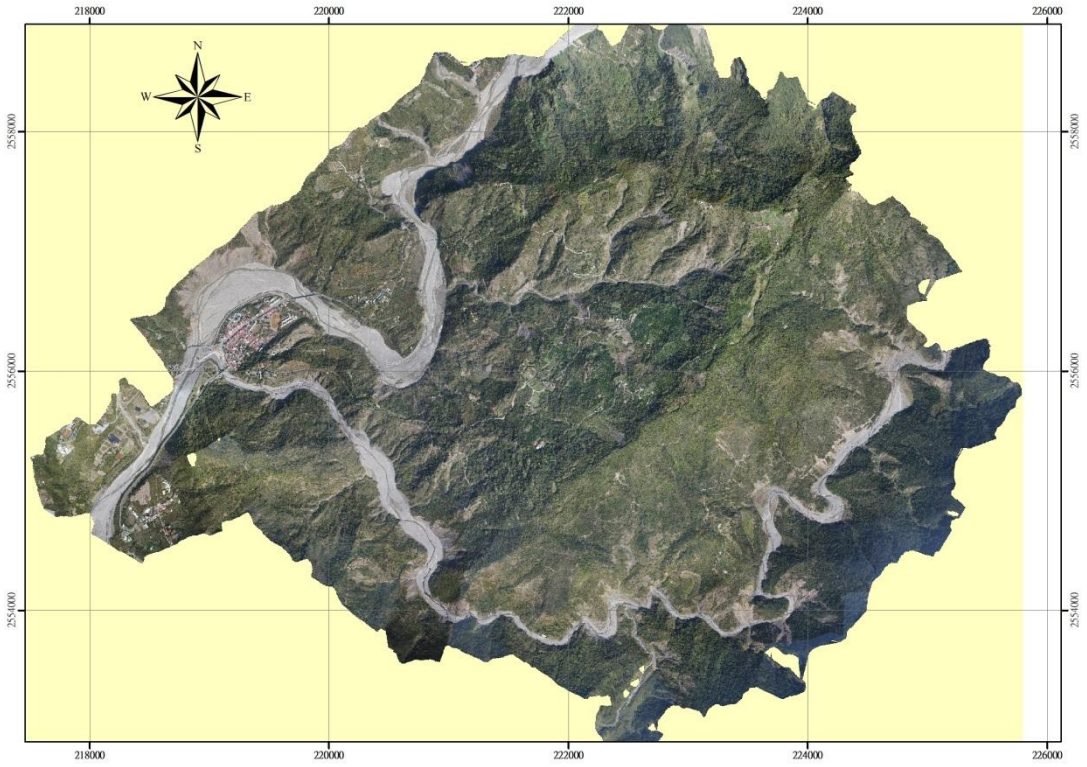



**圖 4-18 竹林地區無人機影像正射成果**

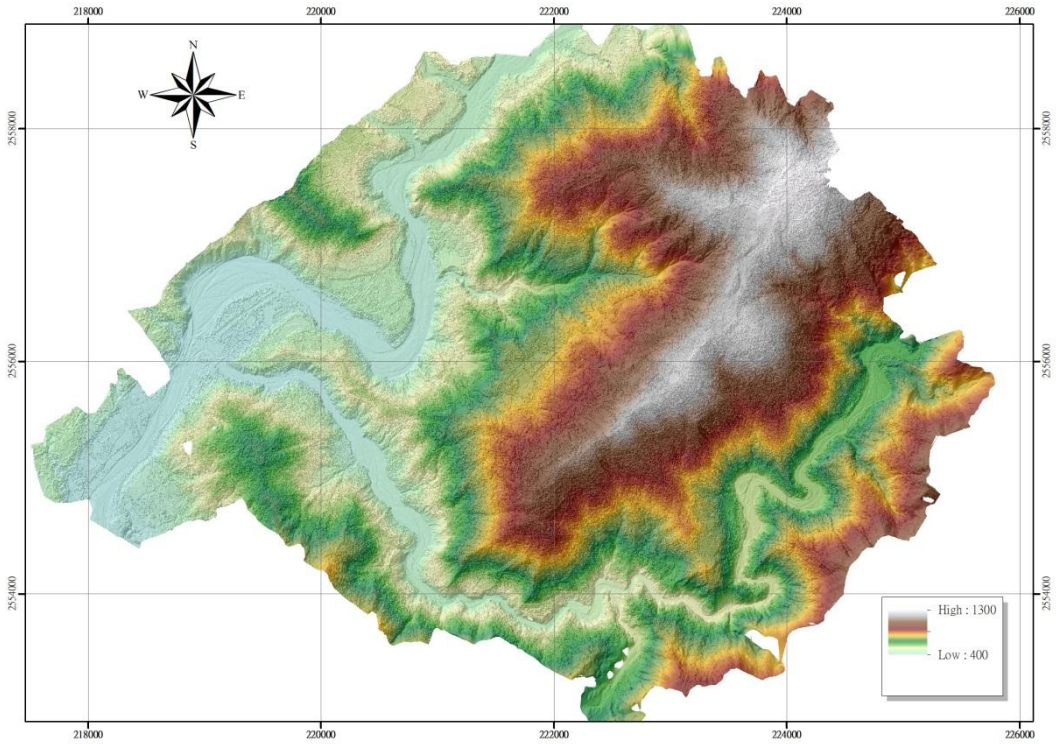



**圖 4-19 無人機影像數值地形模型建置成果**

針對寶來崩塌地及周圍附近區域無人機影像擷取，一共取得 899 張影像，除了 5 張影像為飛機轉彎過程中因橫滾角過大的情形下，所拍攝的影像未能用於模型建置外，其他 894 張影像均用於實際建模，三維模型成果如圖 4-20 及 4-21 所示。

本子計畫所產製之成果，均可提供其他三個子計畫之用，以為子計畫比對地表變形(子計畫二、三、四)，土砂運移及河道特性(子計畫三)，大規模崩塌之山崩促崩因子(子計畫二、四)，崩積物之堆積運移(子計畫三、四)，河道侵淤(子計三、四)，評估大規模崩塌對河道土砂及環境造成的衝擊(子計畫三、四)，以及提供未來防減災工作推動所需之發生門檻與影響範圍之參考(子計畫四)。



**圖 4-20 寶來地區無人機影像三維實際模型成果**



**圖 4-21 寶來崩塌地三維地型模型側視**

# 第五章　討論

## 第一節　光達系統精度評估

航帶解算是由地面 GPS 精度與無人機 GPS 所組成，透過分析取得平面精度小於 2cm、高程精度為 4cm，依本研究團隊所制訂精度需小於 5cm 以內，若解算後發現大於此值時，需檢查地面站或無人機 GPS 紀錄數據是否有誤，否則解算出的點雲會有過多位置不正確。

兩系統給予絕對座標後需利用檢核點進行檢視，如果檢核點誤差過大，需檢查所點的控制點位置是否正確，或測量所得資料是否有問題。

本研究在平差精度(表 5-1)中是透過特徵物位置進行檢核，將兩系統於同一時期同一個特徵物位置點雲上，比較其座標可取得經過平差後之精度，如果此值大於平差結果則平差效果不佳，需要查看設定的平差參數是否有誤並調整參數重新進行平差。

將 2018/12/24、2019/07/17 與 2020/03/07 時期地面光達與無人機光達，經過點雲分類後取得地面點，並將其內插取得 DEM 模型後，將兩系統 DEM 進行互減，其高程精度為 7cm~16cm，發現地面光達因掃描角度問題，在邊坡上不易取得較為複雜地形的點雲，故如果進行分析時，需將兩系統整合取得地面點後內插取得 DEM 模型才可進行分析及應用。

**表 5-1 光達系統精度分析表**

| 光達系統各項誤差 | 平面精度 | 高程精度 |
|---|---|---|
| 測量系統 | <2cm | <3cm |
| 航帶精度 | <2cm | <4cm |
| 絕對座標精度 | <4cm | <4cm |
| 平差精度 | <4cm | <4cm |
| DEM 模型精度 | | 7cm~16cm |

## 第二節　光達系統成果

一、數值高程模型成果

本研究蒐集了 2017/11/16(無人機光達)、2018/07/09(無人機光達)、2018/12/24(無人機光達與地面光達)、2019/07/17(無人機光達與地面光達)與 2020/03/07(無人機光達與地面光達)時期的光達資料一共有五個時期，因 2017/11/16 資料上不符合精度評估，故並未將此資料處理討論。

將其中三時期同時具有無人機光達與地面光達資料進行整合後，與一期只有無人機光達資料進行點雲分類後，內插取得 DEM 模型，於分析時將會使用 2018 年 12 月 24 號無人機光達與兩系統整合之 DEM 分別分析並比較其差異。

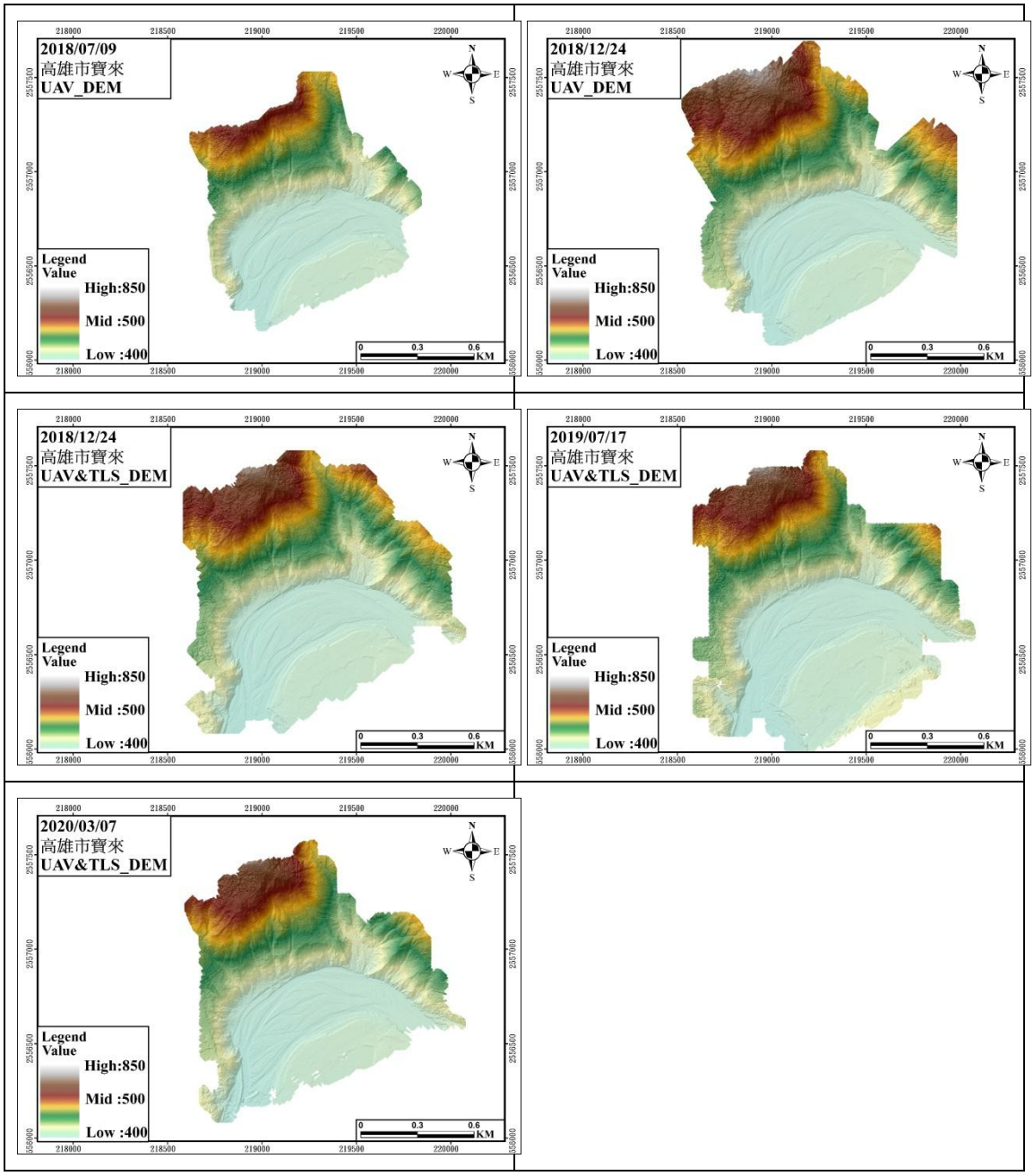



**圖 5-1 寶來地區各時期 DEM 建置成果**

二、點雲穿透率

本研究將各時期光達資料進行點雲分類後，圈選出研究範圍(圖 5-2)內樹木較多的地方，探討此區域內多重回波性效果，由(式 5.1)計算出各時期穿透率，由研究成果中(表 5-2)可以看出無人機光達在此

區域內穿透率為 11%左右，而加入地面光達後反而因為掃描角度關係，在複雜地形上，不像無人機光達可以取得較佳的角度，導致總點雲數量增加，雖然地面點也有增加但穿透率卻下降，而 2020/03/07 地面光達中(圖 5-3)在此次掃描中，與以往不同未能由較高的地方進行掃描，經過這次的經驗後，在未來如果要再次掃描此區域時，建議可以多利用城鎮內較高的房子屋頂架設地面光達。

$$穿透率 = \frac{地面點數量}{總點雲數量} \times 100\% \qquad (5.1)$$

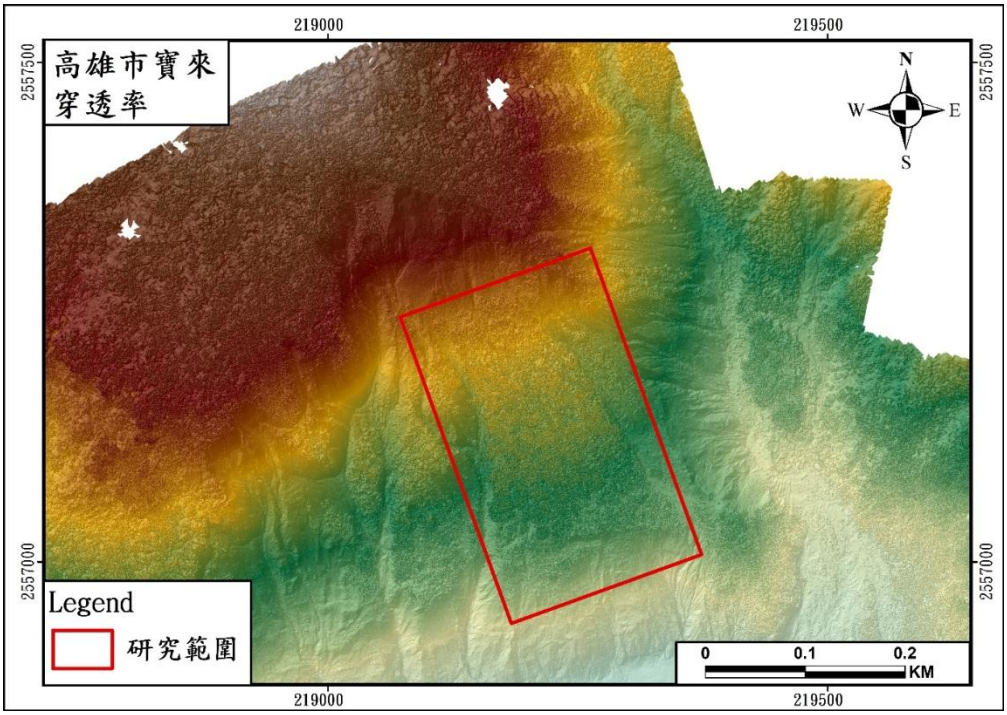



**圖 5-2 光達系統穿透率研究範圍**

**表 5-2 光達系統各期資料之點雲植被穿透率**

| 日期 | 總點雲數 | 地面點雲數 | 穿透率 |
|---|---|---|---|
| 2018/07/09 | 28,154,854 | 3,373,111 | 12% |
| 2018/12/24(UAV) | 31,855,320 | 3,369,103 | 11% |
| 2018/12/24 | 48,764,163 | 3,655,160 | 7% |
| 2019/07/17 | 51,021,577 | 4,471,044 | 9% |
| 2020/03/04 | 43,456,352 | 2,548,837 | 6% |

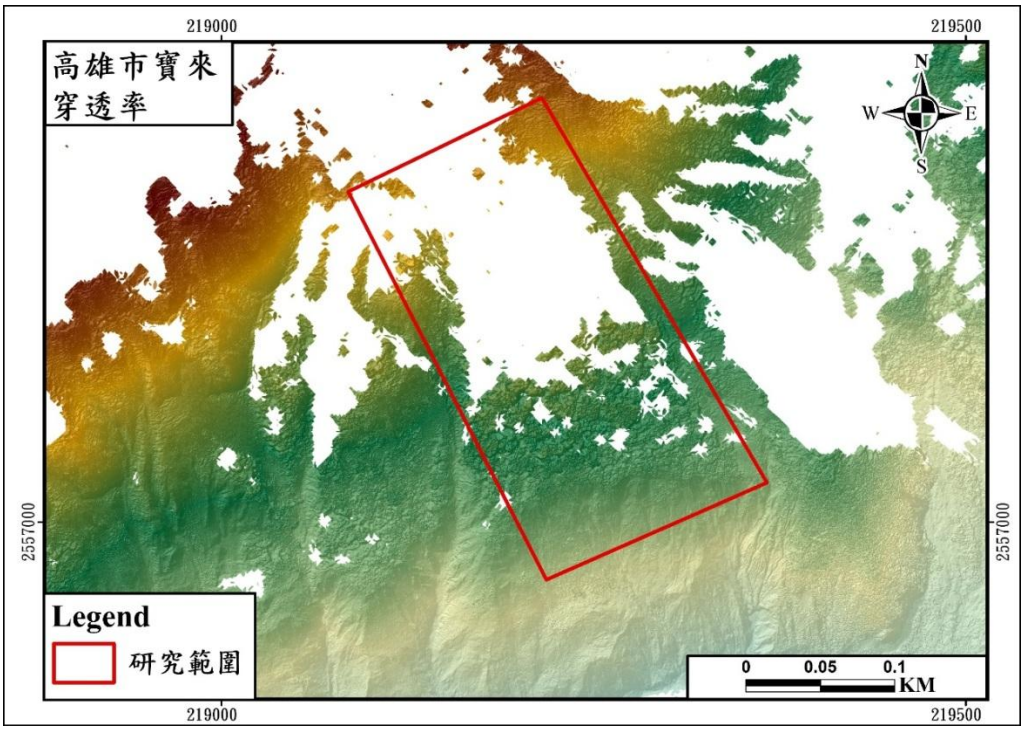



**圖 5-3 2020/03/07 地面光達穿透率範圍**

三、崩塌體滑動量分析

由 2018/07/09 至 2020/03/07 光達點雲資料中，本研究選用五顆樹木分散於邊坡上(圖 5-4)，藉此取得整體滑落方向與變化，以 Tree_3

與 Tree_4 為固定點，選擇固定點樹木主要目的在於，如果整個邊坡都未有固定位置的情況下，無法確定資料處理上是否有錯誤，故必須先找出哪些區域是未滑動的，有了固定位置的樹木才能進行滑落樹木的圈選。

由 2018/07/09 圈選樹木，再於 2018/12/24 圈選相同之樹木，從(表 5.3)可以看出除了 Tree_3 未滑動外，Tree_1 與 Tree_4 往東南方滑動，Tree_2 則是往下滑動，Tree_5 則有往西北方向滑動。

於 2018/12/24 至 2019/07/17 由(表 5.4)中看出 Tree_3 與 Tree_4 並未有滑動情形，而 Tree_1、Tree_2 與 Tree_5 在此時期往東南方滑動。

2019/07/17 至 2020/03/07 由(表 5.5)中看出 Tree_3 與 Tree_5 未有滑動，Tree_1 與 Tree_4 往東南方滑動，Tree_2 則往西南方滑動。

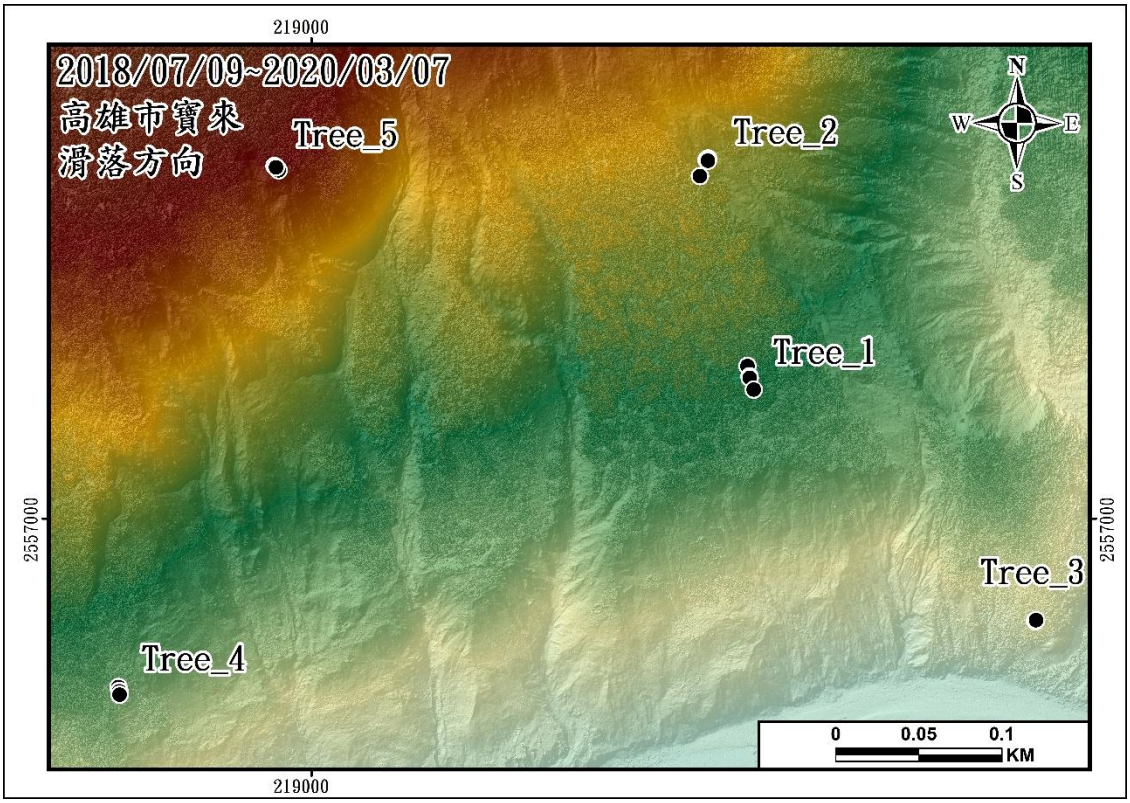



**圖 5-4 2018/07/09~2020/03/07 期間滑動體內樹木滑動位置圖**

**表 5-3 2018/12/24 樹木滑動量變化表**

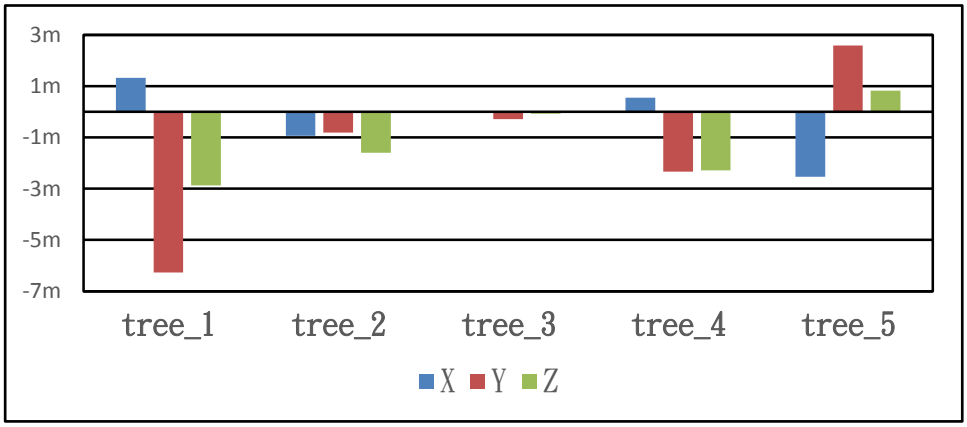


**表 5-4 2019/07/17 樹木滑動量變化表**

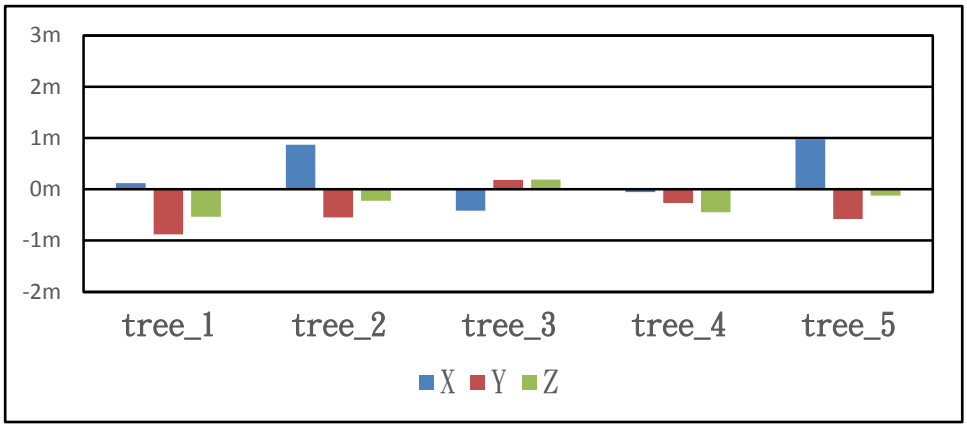
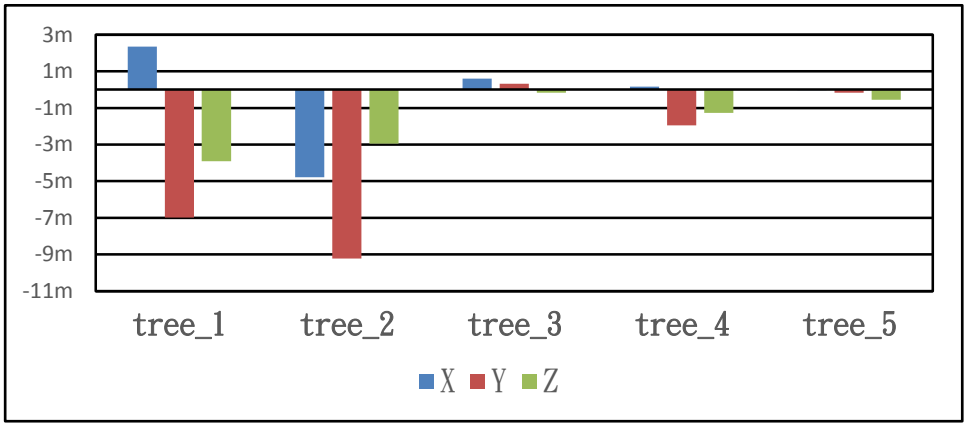



**表 5-5 2020/03/07 樹木滑動量變化表**



四、崩塌量體計算

本研究計算虧損量與加積量體計算是使用 ArcGIS 中 toolbox 工具裡的 Surface Volume 分析方法，因研究中所有控制點都位於城鎮區內，未取得邊坡上的控制點，故設定高程誤差在 20cm 以內為未變動區域，而大於 20cm 以上為加積區，小於 20cm 為虧損區。

由 2018/07/09 與 2018/12/24 無人機光達 DEM 模型互減之成果，而 2018/07/09 無人機光達 DEM 模型與 2018/12/24 無人機光達與地面光達整合 DEM 模型互減之成果，由表 5-6 可看出加入了地面光達後，在虧損量與加積量有些微的差距，由此可以得知在分類上有同時分類到地面光達與無人機光達，如果兩者整合後虧損量與加積量未變化或變化過大，可能是分類時只有分類到其中一種資料，此時期在研究範圍內虧損率占了 67%，虧損量體達到 0.7 百萬立方公尺呈現虧損情形。

2018/12/24 與 2019/07/17 無人機光達與地面光達整合 DEM 模型互減之成果，可以看出因研究範圍內上方有虧損區，故研究範圍上方較多區域形成加積區，從表 5-6 看出此時期加積率占了 74%，加積量體達到 1.18 百萬立方公尺，研究範圍轉變為加積狀態。

另於 2019/07/17 至 2020/03/07 期間無人機光達與地面光達整合 DEM 模型互減之成果，可看出在研究範圍中最靠近河床的區域依舊

在虧損，而上方則持續在虧損，加積量體達到 1.27 百萬立方公尺。

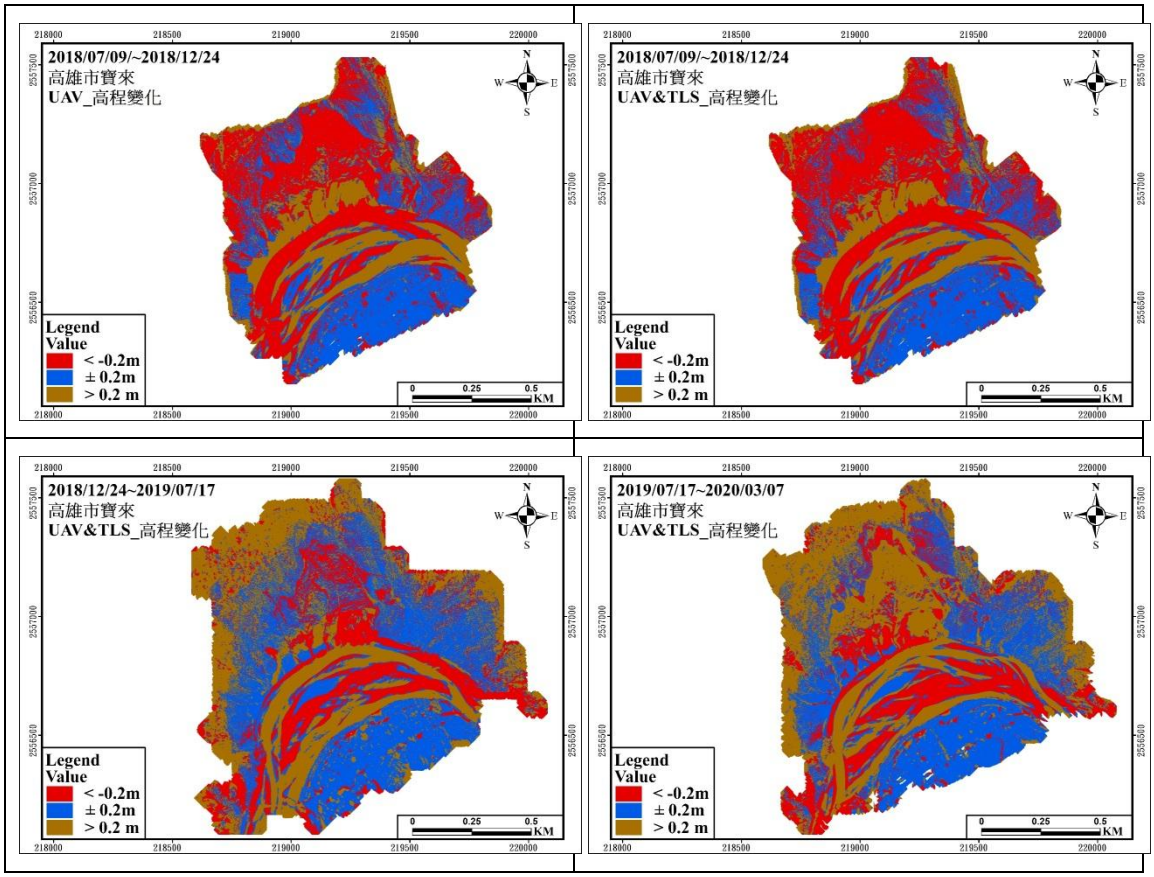



**圖 5-5 寶來崩塌區各時期地形高程變化圖**

**表 5-6 滑動區內加積與虧損量體表**

| 日期 | 虧損面積（公頃） | 虧損量（$Mm^3$） | 虧損率（%） | 加積面積（公頃） | 加積量（$Mm^3$） | 加積率（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2018/12/24(UAV) | 40.9 | 0.6 | 73% | 21.4 | 0.22 | 27% |
| 2018/12/24 | 45 | 0.63 | 74% | 20.9 | 0.22 | 26% |
| 2019/07/17 | 26.8 | 0.26 | 29% | 42.7 | 0.65 | 71% |
| 2020/03/04 | 48.1 | 0.9 | 79% | 25.3 | 0.24 | 21% |

## 第三節　無人機影像新演算法成果

無人飛行載具所拍攝之影像基於攝影測量之影像立體對，可計算出物體距離拍攝相機之遠近關係，因此無人機在航拍任務規劃中，仔細考量各影像間於地面特徵擷取之重疊率即可用計算地形，並建置所謂之數值地表模型(digital surface model)。遙測影像建製數值地形模型及影像正射等基本圖資之建置流程及地形分析等步驟主要有六點： a)地面控制點之選點、佈設及量測；b)無人機任務之規劃及執行，取得合乎地形建置需求之影像；c)各影像之空中三角計畫及整體平差；d)各時期地形及正射影像之平面及高程改正，以使兩時期地形圖的高程差異減至最小；e)地形分析，如:坡度、坡向等網格式二維資料或三維模型進行構造地形等比較與分析；f)由不同時期之數值地形模型進行地表高程差計算即可獲得該區之高程變化的資訊，此資訊或可指示為兩時期間之地形變異量。

上述方法論及流程是地形分析及地貌變異之分析方法，但其中的關鍵為各時期間之數值地表模型建置成果之品質及空間資料庫之空間上對位。確保品質及空間為位統一後，此多時期之空間資料庫方可做為地形地貌變異之基礎。本計畫嘗試整合不同演算法及技術，用以克服上述難題，並將本區所有不同時期之影像重新建置。本方法論之初步成果，以某一測區為例，圖 5-6 及 5-7 指示兩時期之地表變異。

針對本計畫之研究區內寶來崩塌區之地形變化情況，圖 5-8 列表指出本區各時間地形變異量，圖中數字指示兩時間點。

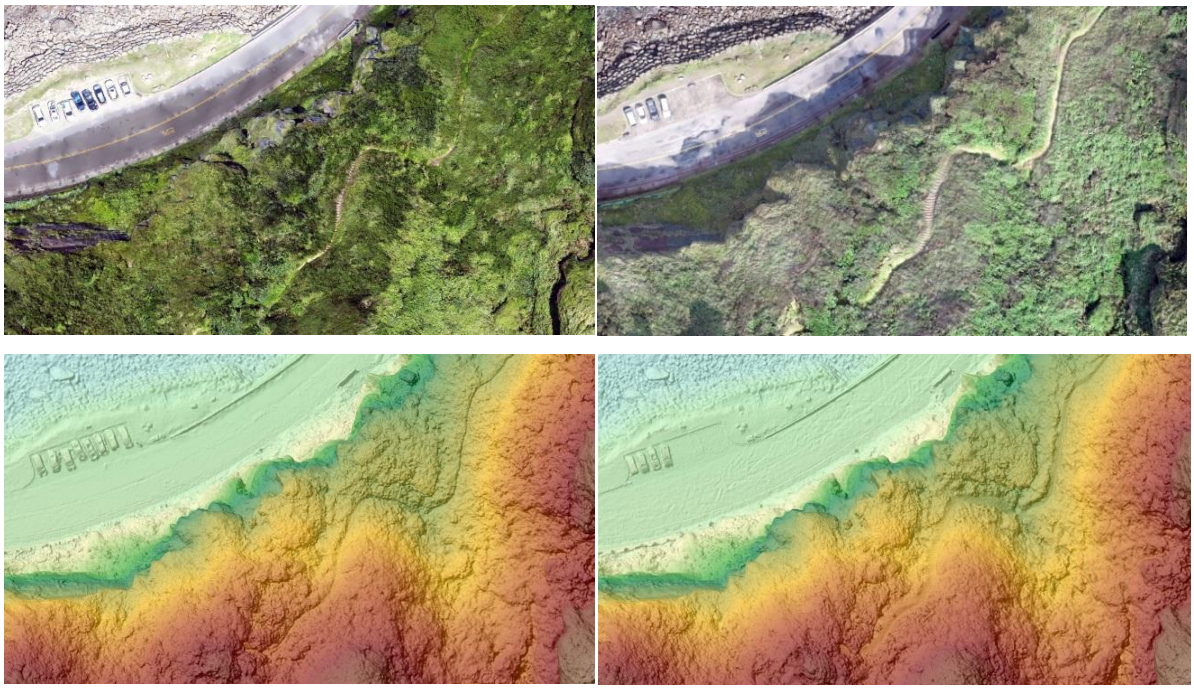


**圖 5-6 某測區地形變異比較 (左 2019 年，右 2020)**

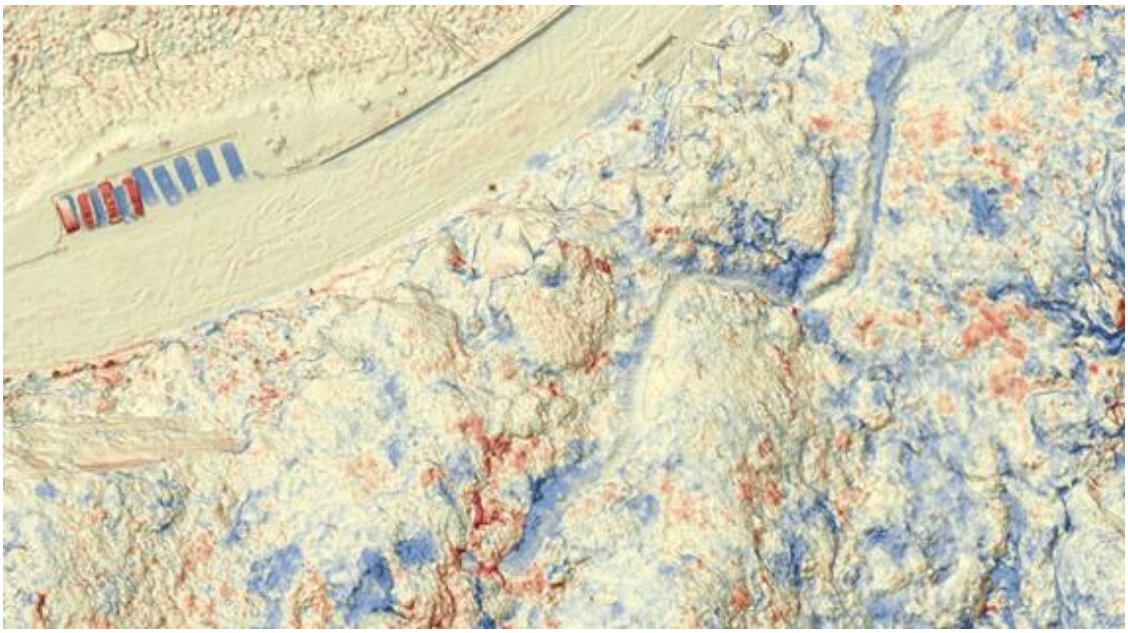
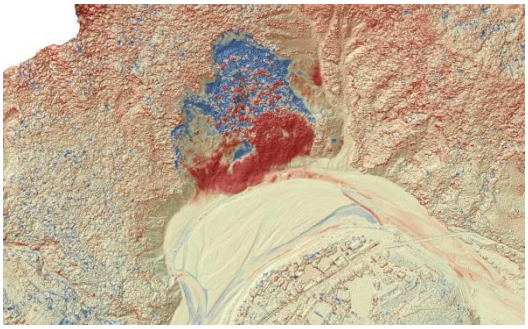
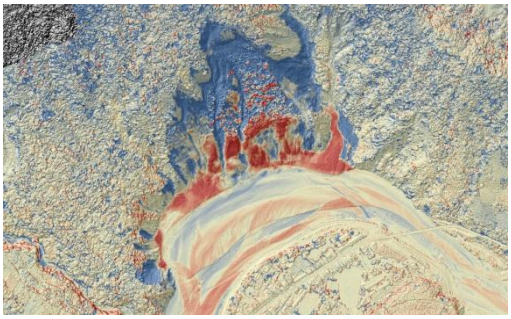
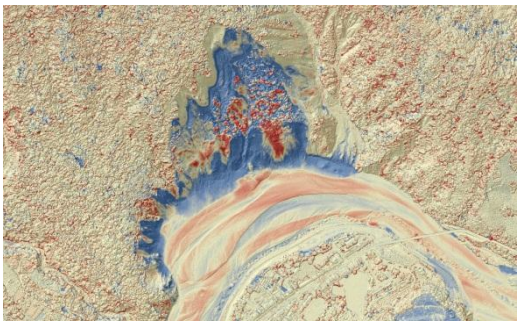
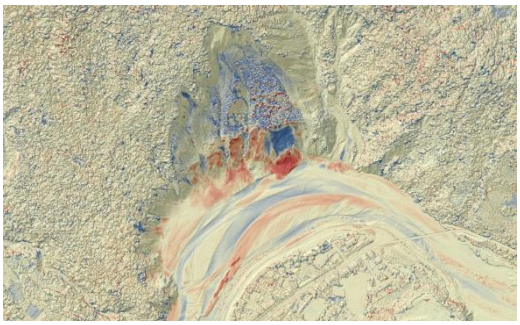
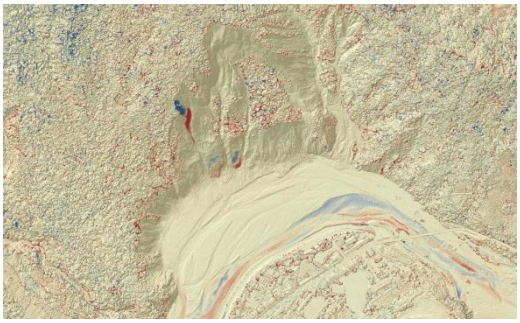
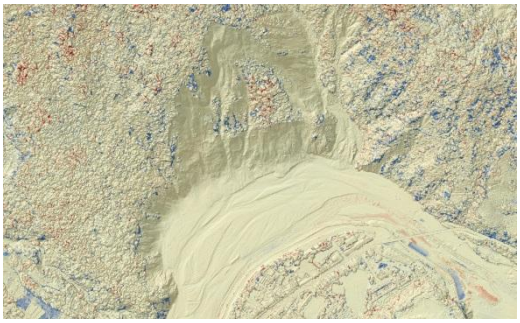
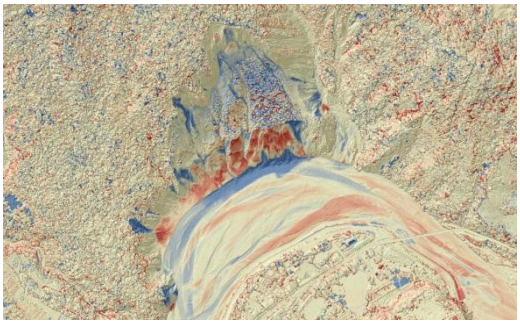
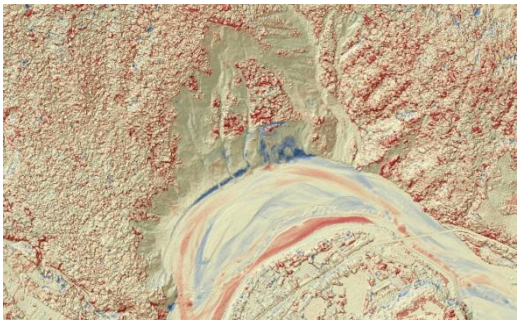
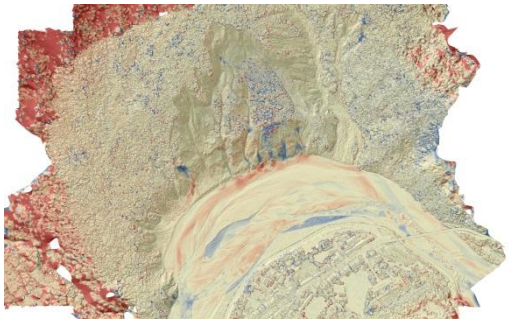
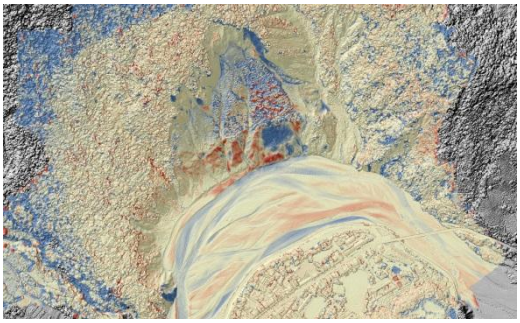


**圖 5-7 地形變異比較(DoD) (區域位置同圖 5-6)**

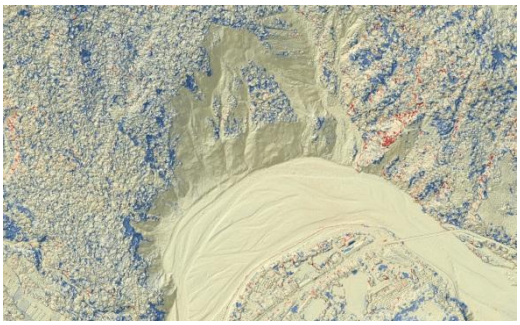
| | |
|---|---|
|  |  |
| **2016/06/03-2015/11/09** | **2016/11/18-2016/06/03** |
|  |  |
| **2017/07/08-2016/11/18** | **2017/09/24-2017//07/08** |
|  |  |
| **2017/11/15-2017/09/24** | **2018/01/18-2017/11/15** |
|  |  |
| **2018/12/22-2018/01/18** | **2019/06/09-2018/12/22** |



**2019/07/17-2019/06/09**



**2019/11/24-2019/07/17**



**2020/03/23-2019/11/24**

**圖 5-8 寶來研究區各時期間之地形變異**

# 第六章　結論與建議

## 第一節 結論

1. 本研究利用絕對座標將兩系統進行整合,透過 RIEGL 最小平方法進行平差，最終精度為 4 公分，將系統中各流程所產生的系統誤差一一檢視，在航帶解算、絕對座標與特徵物精度都符合標準下，統整出整體精度評估。
2. 由邊坡監測上針對兩系統適用坡度上,進行評估於 DSM 模型中，地面光達水平掃描適用於坡度 20°~40°，無人機光達垂直掃描適用 0°~90°並無太大差距，但在 DEM 模型中，地面光達依然於坡度 20°~40°效果較佳，無人機光達則於 60°~90°上效果不佳。
3. 地面光達系統於掃描距離中在 100 公尺以內為較佳的掃描範圍，而掃描的精度會隨著距離有所降低，但對於本系統於絕對座標點選時，能清楚的掃描出地面擺設的稜鏡，有助於整體精度提升，並能藉此檢視系統精度。
4. 從 2018 年 7 月 9 號至 2018 年 12 月 24 號寶來地區整體產生較大的虧損量，之後至 2020 年 3 月 7 號已轉變為加積區，在研究區域上半部都呈現加積區域，研判可能為上方崩塌區依然有崩塌地滑的狀況，此區域如有強、中度颱風或規模較大的地震，依然需要嚴加防範。
5. 將滑落方向、虧損區與坡向分析能觀察出，整體滑動是往東、東南與西南方向居多,能從成果中看出整體滑落、虧損與坡向，對於光達系統於邊坡監測上，有極大的助力，以此也能為做為邊坡監測示範案例。
6. 利用多時期資料能於 DEM 模型上，判釋出崩塌地形特徵與其變化，很清楚的了解此區域於不同時期整體滑動體、崩崖與蝕溝

變化，使用此系統解析度與精度更高，能夠更清楚的發現地形特徵。

7. 無人機影像及地面光達點雲,此兩套點雲系統融合於平面誤差、高程誤差、模型解析度成效，均差於地面光達系統但優於無人機影像系統，介於兩系統之間。
8. 本團隊嘗試整合不同演算法及技術，來克服數值地表模型建置成果之品質及空間資料庫之空間上對位統一，初步成果顯著。

## 第二節 建議

1. 經過光達系統精度評估，藉此制訂標準，如果整體成果未符合時，建議不使用此數據，否則於後續點雲分類或成果分析上，容易產生錯誤與誤差，於平差上需先確定給予絕對座標固定，如未固定則可能產生偏差。
2. 本系統於邊坡監測上，因此邊坡無法通行到達，故未有設置控制點，研究區域與控制點距離約為 400 公尺，在 DEM 模型精度評估中，只能將高程差小於 10cm 的區域，定義為固定區域加以評估，如未來能取的邊坡控制點，就能探討整體模型精度。
3. 本研究所使用的內插軟體為 Global Mapper，能選擇內插距離與其他軟體不同,但從中發現於成果上,模型邊角效果較為不佳，故在計算網格時容易產生誤差，希望未來能更佳的內插軟體解決這個問題。
4. 地面光達掃描中俯仰角度於 0°~20°效果較佳,於 60°~90°則較差,建議於擺設測站時，能考量所需範圍盡可能於 0°~60°之間，地面稜鏡則擺設於 0°~20°，能增加整體系統精度。
5. 本研究於邊坡監測上之應用，後續需選擇同樣為大規模崩塌區

域，進行精度分析與應用，方可驗證其實用與正確性。

6. 無人機影像整合不同演算法及技術，可克服數值地表模型建置成果之品質及空間資料庫之空間上對位統一問題，相關技術當可運用於地形變異監測分析，以及變異量之計算。建議可直接嘗試運用於兩時期河床推移質之搬運量計算。

# 參考文獻


1. Axelsson，Facet planes and angles to the nodes, 2000。
2. Bisheng Yang, Chi Chen, Automatic registration of UAV-borne sequent images and LiDAR data, 2015.
3. http://maps.nlsc.gov.tw/S_Maps/wms
4. http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/
5. http://www.nfa.gov.tw/main/history.aspx
6. LIDAR Technology Co., Ltd., "The Traditional LiDAR and Full Waveform Technology", 2013.
7. LIDAR Technology Co., Ltd., "The Traditional LiDAR and Full Waveform Technology", 2013。
8. RIEGL, VUX-1UAV DATASHEET, 2016
9. Ryan A. Chisholm, Jinqiang Cui, Shawn K. Y. Lum and Ben M. Chen, UAV LiDAR for below-canopy forest surveys, 2013
10. Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.),"Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, " CRC press, 2008.
11. SKYLINE UAV, VAPOR55 UAV HELICOPTER, 2017, http://www.skylineuav.com.au/fleet/vapor-55-uav-helicopter/
12. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D., "Error assessment and mitigation for hyper-temporal UAV-borne LiDAR surveys of forest inventory," SilviLaser 2011, Hobart, Australia, 2011.
13. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D.," Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory," Remote Sensing, 2012.

14. 中央氣象局，颱風資料庫

15. 內政部，LiDAR 測製數值高程模型及數值地表模型標準作業程序草案，2005。

16. 內政部，發展高光譜與光達技術結合之應用工作案，2013。

17. 內政部消防署全球資訊網，颱風歷年災害。

18. 內政部國土測繪中心，105 年度擴充航遙測感應器系統校正作業，2016。

19. 內政部國土測繪中心，e-GNSS 即時動態定位系統座標轉換最佳化研究，2013。

20. 尤瑞哲(R.J. You) 、王偉立(W. L. Wang)，光達點雲平面特徵自動化匹配魚航帶平差之應用，航測及遙測學刊, 14(3), 2009。

21. 王星為，無人機光達系統整合與精度評估，2017。

22. 王麗英、宋偉東，機載 LiDAR 數據航帶平差研究進展，2012。

23. 王驥魁，評估航高及雷射脈衝頻率參數對於森林光達穿透率之影響。

24. 光達點雲平面特徵自動化匹配與航帶平差之研究，王偉立，2008

25. 江晉霆，無人機光達系統率定及平差之精度評估，2018。

26. 高晨祐，多時期、高解析度山崩監測及地形變異分析-以寶來地區為例，2018。

27. 國土測繪圖資網路地圖服務系統。

28. 基于总体最小二乘匹配的机载 LiDA R 点云航带平差方法，袁豹，2016。

29. 陳馳，低空 UAV 激光點雲和序列影像的自動配準方法，2015。

30. 曾義星、林見福、蔡漢龍、陳鶴欽、曾耀賢，地面光達系統誤差分析及校正。

31. 黃鐘、詹瑜璋、胡植慶、李建成、史天元、陳于高 (2004) 空載雷射掃描技術製出之數值高程模型之簡介，地質，23(1)，43-54 頁。

32. 黃明江，無人飛行載具於大面積數值地形模型建置之精度評估-以池上斷層鄰近區域為例，2016。

33. 黃美甄，地面控制點對無人飛行載具數值地形模型精度影響之評估，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，台北，2014。

34. 黃清美，空載光達點雲穿透率探討，2007。

35. 楊善智，數值高程模型(DEM)之品質評估，2007。

36. 詹瑜璋 (2005) 見樹又見地：雷射測距掃描(LIDAR)，科學發展月刊，390，24-29 頁。

37. 蕭宇伸，蘇柏軒，莊大賢，陳樹群，2018 台中花博舉辦地環境地形先其調查：利用無人飛行載具與空載光達技術，2014

38. 應用 LiDAR 與航照影像於崩塌地判釋之研究，2006

39. 謝有忠，地質百科-光達，https://goo.gl/awYX4H。

# 附錄

## 附錄一、期初報告書審查意見暨回覆辦理情形

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|---|---|---|
| **報告內容審查意見：** | | |
| 一、報告格式 | 1. 本工作執行計畫書未標示目錄、頁碼等，應修正。<br>2. 文中之圖號與所示圖號有落差，請重新檢視圖號之順序與文內之圖號。<br>3. 請補充預定進度與實際進度之甘特圖。<br>4. 報告書之撰寫架構混亂不易讀，後續各期報告撰寫,請參照水保局之範本，並請加上頁碼等。<br>5. 歷次(含核定本)計畫審查之意見及回復情形,請增列於各期報告書之附錄。 | 謝謝。<br>1. 相關內容於期中及報末報告中修正<br>2. 期中、期末報告中重新修訂圖號，並依各章節排序<br>3. 各工作之進度將列於期中、期末報告中<br>4. 期中、期末報告各章節重新調整，以方便閱讀，並參考貴局範本及編列頁碼。<br>5. 相關內容增列於期末報告中。 |
| 二、報告工項及內容 | 1. 本計畫為整合型計畫之整合者，有關工作項目等請分為不同章節撰寫，以便釐清各計畫之關連性及工項。<br>2. 本子計畫兼有整合其他子計畫之工作，如何資源分配、共享及資料之彙整，宜有細項之規劃，以利推動。<br>3. 建議總計畫能夠彙整各子計畫之成果,說明目前空間資訊在防災應用上可以達到的分析能力以及限制或待提升之研究。<br>4. 報告書「三、擬解決問題-本子計畫擬解決問題」所列之4,5,6三點，如何進行、作法等，請於期中報告時完整補充；同時，第 1，2，3 點之內容與去年之差異為何，亦請說明。 | 謝謝審查意見。<br>1. 相關工作及分工，於期中及期末報告中強化。<br>2. 本子計畫一方面以無人機進行測區空拍及掃瞄,以監測本山崩區之活動性。二方面子計畫之相關測繪成果另提供其他子計畫之分析使用。<br>3. 本項目將於期末報告中強化及呈現。<br>4. 本子計畫，其方法論和前一年度之資料收集相似，唯以往之資料，同爲光達掃瞄成果,但資料相互間之成果整合尚有疑問及困難。本年度計畫之除了持續監測外,並加入了各式空間資訊之整合及合併。<br>5.本子計畫之目標、成果於期中、期 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
| --- | --- | --- |
| | 5. 報告書「四、計畫目標-本子計畫目標」，其中 7，8 點之作法等，亦請於期中報告補充。<br>6. 報告書「九、進行步驟與進度」，有關子計畫執行方法與步驟項，請於期中報告補充子計畫工作流程圖。<br>7. 本計畫今年度 Lidar 等拍攝位置，是否與去年相同，請說明。<br>8. 各項影像拍攝之氣象狀態宜掌握，汛期前、後之時間點應有正確之判斷，以獲得可用之影像資料。<br>9. 報告書「六、計畫範圍」「謂寶來村位於河階台地下」，宜修正；應是「上」而非「下」，請斟酌。 | 末報告中強化。<br>6. 本子計畫之執行方法與步驟項於期中報告補充並附工作流程圖。<br>7. 本計畫之區域範圍同上一年度之計畫範圍，唯方法論及資料收集法有所創新。<br>8. 謝謝審查意見。相關現地作業之天候掌握將納入考量。<br>9. 筆誤，謝謝指正。 |

# 附錄二、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|---|---|---|
| **報告內容審查意見：** | | |
| 1 | P.1-2，第 2 行，文中之”本所”所指為何? | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 2 | 文有總計畫、整合計畫、本計畫、本子計畫等名稱，宜釐清、說明，避免混淆。 | 謝謝委員意見。於期末報告中列明。 |
| 3 | P.1-5~P.1-6 擬解決問題何以有"本整合計畫"、”本子計畫”之分? ”本子計畫擬解決問題”非本子計畫擬各解決何等問題?宜修改編輯方式或內容。(P.1-14~P.1-15 亦是) | 謝謝委員意見。於期末報告中強化。 |
| 4 | P.4-1，倒數第 3 行，”效正”應是”校正”之誤植，請修正 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 5 | P.4-1，文中謂選 B101、BL011 未見在圖 4-1 內? | 點 B101 及 BL011 誤植，應為 BL01 及 BL11，其位置請詳圖 4-1。 |
| 6 | 圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5，何以 BL07 之誤差特大? | 研究區內之測量成果來自於多次冗餘觀測，BL07 其誤差稍大，結果產生於其中一次之觀測差異較大，但仍小於一般 GNSS 之觀測誤差，故仍予以保留。另 BL07 之誤差也仍<3.5cm。 |
| 7 | P.4-11，第 8 行”跑完誤差為 0,15m”數字是”,”或”.”? | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 8 | 控制點之平差分析方法可否應用至其他遙測影像分析之控制點平差，似可加以論述。 | 本方法論預期將可應用於其他資料之整合及分析上。相關論述將於期末報告中強化。 |
| 9 | 本報告係整合計畫報告，亦或其中 1 子計畫之期中報告? | 本報告係為本子計畫之報告，其他子計畫各有各的報告書。相關內容分野於期末報告中加以澄清。 |
| 10 | 期中報告未附上評審及期初報告之意見，期末報告時務請一併補上 | 報末報告中將一併補充。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|---|---|---|
| 11 | 本研究預計於本年度防汛期前、後，各拍攝無人機影像、無人機光達、地面光達資料，其原始資料及加值後成果(如 DEM、DSM、紅青立體影像等)請於期末時一併交付本局匯入本局資料平台，供日後相關應用 | 相關可提供之資料將儘可能提供。 |
| 12 | 依本研究所提之目標，本年度欲蒐集五個時期無人機光達及三個時期的地面光達，並拍攝汛期前、後各一次的無人機影像、無人機光達、地面光達。經檢視期中報告書前者似為圖 4-12 所列之成果，但後者(本年度汛期前後)之拍攝成果無法確認，請於期末報告時列表說明 | 本計畫之五時期資料收集，含暨有之資料。本年度新增者將一併納入分析，以完整呈現本區之活動性。 |
| 13 | 參考文獻一章，頁首應不是附錄再請團隊修正。另參考文獻項目編號重複，再請團隊修正格式 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 14 | P5-9，圖號及表號錯誤，請修正 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 15 | P.5-10，表 5-6 中，2018/12/24(UAV)及 2018/12/24 之分析資料虧損率與加積率總合不為 100%，而 2019/01/17 及 2020/03/04 資料加總為 100%，再請團隊補充解釋 | 本表內容有誤植，已更正相關數據。 |

# 附錄三、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|---|---|---|
| **報告內容審查意見：** | | |
| 1 | 攝影測量精度改善方式，能否提供本局同仁相關訓練。 | 針對飛航規劃對建模成效影響，我們可以提供一些經驗的分享 |
| 2 | 針對地形產製技術進行提升，產出成果可以提供未來各類分析技術之空間精度。 | 謝謝委員意見。 |
| 3 | 本計畫為整合型計畫之一，宜說明整合型計畫總體目標，以及本子計畫目標和其他子計畫間之相關性及貢獻。 | 謝謝委員意見。相關說明強化於成果報告內。 |
| 4 | 本研究似以技術提升精度為主軸，建議研究成果針對坡地防災的應用性加強說明。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 5 | P.1-4，第 5 行”活耀”應是”活躍”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 6 | 圖 1-1”崩塌範圍快速判釋及”後方文字為何? | 排版之行距過大，已修訂。 |
| 7 | P.2-8，第 11 行，”像機”應是”相機”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 8 | P.2-10，倒數第 5 行，”本計畫之目研究區域”，”目”字應為誤植，請修正 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 9 | P.2-14，第 13 行，”像片”應是”相片”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 10 | P.3-3，倒數第 6 行，”針對及苳濃溪主河道附近...”，”及”字之誤植， 請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 11 | P.3-3，預計無人飛機系統光學影像之掃描區域總面積，及無人機光達掃描資料面積與 P3-1 描述之面積大小不同? | 誤植，謝謝指正，已修訂如下: …預計無人飛機系統光學影像之”**拍攝**”區域總面積約 5 平方公里，無人機光達掃瞄資料面積 50 公頃。… |
| 12 | P.3-9，倒數第 9 行，”建行”應是”進行”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |

| 項次 | 審查意見 | 回覆辦理情形 |
|---|---|---|
| 13 | P.3-10，倒數第 10 行，”倒交山兩時期之真實三維模型如圖 3-6、圖 3-所示”，”圖 3-6”應是誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 14 | P.3-10，倒數第 6 行，”崩蹋量”應是”崩塌量”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 15 | P.4-1，第 2 行，”給於”應是”給予”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |
| 16 | P.4-1，倒數第 4 行，”飛航時需要架設靜態”應有漏字，請修正。 | 謝謝指正，漏字已補充修訂。 |
| 17 | 選擇架設的靜態點位距離需與飛行軌跡盡量靠近為主，為何選擇 BL01 與 BL11 這兩點，而非 BL01 與 BL12 這兩點? | 謝謝委員意見。因無人機之起飛點位於點 BL01、BL11，故選擇 BL01、BL11 這兩點為主來進行資料解算及查核。 |
| 18 | P.4-3，第 2 行，”二、特徵誤在無人機...”應有漏字，請修正。 | 謝謝指正，漏字已補充修訂。 |
| 19 | 第四章研究成果文中有”本研究”、”本論文”等名稱，再請團隊統一用詞。 | 謝謝指正，統一用詞為”本研究”。 |
| 20 | P.4-11，第 2 行，”圖 4.10”與文中其他圖示符號不同，宜統一格式。 | 謝謝指正，格式予以統一。 |
| 21 | P.4-11，倒數第 3 行，”最大偏差為 0.5”，應有單位漏字，請修正。 | 謝謝指正，漏字已補充修訂為 0.5m。 |
| 22 | P.4-15，第 5 行，”物差較大時”應是”誤差較大時”之誤植，請修正。 | 誤植，謝謝指正，已修訂。 |