

計畫編號：SWCB-108-229

**整合光達技術於寶來溫泉區之多時序高解
析坡地監測**

**Integration of LiDAR technology for
multi-temporal high-resolution landslide
monitoring- example of Paolai, southern
Taiwan**

執行單位：國立臺北科技大學

執行期間：108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人：張國楨 教授(姓名、職稱)

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 108 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)

整合光達技術於寶來溫泉區之多時序高解析坡地監 測

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描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。。

關鍵詞：無人飛機系統、光達、數值高程模型、山崩、監測

Integration of LiDAR technology for multi-temporal high-resolution landslide monitoring- example of Paolai, southern Taiwan

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/m² in nadir direction for a single fly line. Finally, the density of the ground point is higher than points/m², 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.

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
第一節 擬解決問題	4
第二節 計畫目標	4
第三節 研究區域	5
第四節 研究流程	8
第二章 研究工具及方法	1
第一節 無人飛機系統	1
第二節 雷射測距	2
第三節 無人機光達掃瞄系統	4
第四節 地面光達	7
第五節 無人機影像空拍及建模	9
第六節 無人機光達掃瞄及資料處理	10
第七節 無人飛行系統影像拍攝建模及分析	13
第八節 三維影像製作及呈現	16
第三章 進行步驟與進度	1
第一節 無人機光達資料	4
第二節 無人機影像空拍及建模	8
第四章 研究成果	1
第一節 現地量測成果	1

第二節	航帶平差成效	5
第三節	多重回波成果	18
第四節	空中及地面光達掃瞄資料合併	21
第五章	成果討論	1
第一節	崩塌地形變化	1
第二節	兩期資料空間對位	4
第三節	崩塌量體計算	7
第四節	歷年崩塌位移計量	10
第五節	山崩區水平位移分析	17
第六章	綜合效益	1
第一節	科學研究成果	1
第一節	民生與經濟效益	1
參考文獻		1
附錄		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		5

表次

表 2-1 RIEGL VUX-1UAV 無人機光達設備諸元	5
表 3-1 本計畫進度排程表	3
表 4-1 土木館屋頂 E-GNSS 平均值	1
表 4-2 土木館屋頂靜態平均值	2
表 4-3 E-GNSS 六次測量成果比較	2
表 4-4 靜態 3 次測量成果比較	2
表 4-5 寶來區檢核點測量	5
表 4-6 2019/07 航帶平差模型整體高程誤差	15
表 4-7 寶來區 2019/07 掃描之航帶平差(加控制點)模型 整體高程	17
表 4-8 寶來區穿透率計算結果	20
表 5-1 兩期不變動區域樹木位移量	6
表 5-2 寶來山崩區之量體計算	10
表 5-3 寶來區歷年崩塌面積	15

圖次

圖 1-1 寶來研究區域(GOOGLE MAP).....	6
圖 1-2 寶來地區計畫範圍圖	6
圖 1-3 寶來研究區域(無人機正射影像)	7
圖 1-4 研究流程圖	8
圖 2-1 脈衝式雷射測距方法(SHAN & TOTH, 2008).....	3
圖 2-2 相位差測距法示意圖 (SHAN & TOTH, 2008)	4
圖 2-3 相位差示意圖 (SHAN & TOTH, 2008)	4
圖 2-4 本計畫使用之無人機載具(UAS)-VAPOR 55.....	5
圖 2-5 地面控制站.....	6
圖 2-6 地面光達掃瞄工作之資料收集及補強	9
圖 2-7 本團隊之無人飛機系統機隊.....	10
圖 2-8 無人機光達掃瞄工作執行流程圖	12
圖 2-9 數值地形模型成果比較.....	15
圖 2-10 紅青立體影像製造流程示意及成果圖例.....	17
圖 3-1 無人機點雲進行資料航帶平差前	5
圖 3-2 無人機點雲進行資料航帶平差後.....	5
圖 3-3 測試區全區之不同數值地表模型成果.....	6
圖 3-4 測試區內同一區域之不同數值地形模型成果比較	7
圖 3-5 草嶺山崩區四時期無人機影像測繪成果.....	10
圖 3-6 斷魂谷崖線對比，左 2016 年，右 2017 年	10
圖 3-7 倒交山崩積區崖線對比	11
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	11

圖 4-1 寶來區檢核點分佈圖	4
圖 4-2 寶來區檢核點誤差	5
圖 4-3 寶來區點雲模型展示	7
圖 4-4 寶來區平差前	8
圖 4-5 寶來區平差後	8
圖 4-6 寶來區平差前-道路.....	9
圖 4-7 寶來區平差後-道路.....	9
圖 4-8 寶來區平差前-建築.....	10
圖 4-9 寶來區平差後-建築.....	10
圖 4-10 寶來區平差前-河堤.....	11
圖 4-11 寶來區平差後-河堤	11
圖 4-12 寶來區 2019/07 航帶平差建製數值模型	14
圖 4-13 2019/07 航帶平差模型與測量檢核點高程誤差	15
圖 4-14 2019/07 航帶平差(加控制點)建製數值模型	16
圖 4-15 2019/07 掃描航帶平差(加控制點)模型與測量 檢核點高程誤差	17
圖 4-16 本研究探討穿透率所選定之植被覆蓋區	19
圖 4-17 寶來區植被覆蓋區總點雲狀況.....	20
圖 4-18 寶來區植被覆蓋區之地面點雲.....	21
圖 4-19 地面光達掃描工作之資料收集及補強	22
圖 4-20 寶來區無人機光達點雲資料.....	23
圖 4-21 寶來區所有光達點雲資料.....	24
圖 4-22 寶來山崩區坡面上無人機光達點雲資料.....	24
圖 4-23 寶來山崩區坡面上所有之光達點雲資料.....	25
圖 4-24 寶來村及河堤上無人機光達點雲	25

圖 4-25 寶來村及河堤上所有之光達點雲資料.....	26
圖 5-1 研究區無人機光達數值地表模型(DSM)	2
圖 5-2 研究區無人機光達數值高程模型(DEM).....	3
圖 5-3 寶來區所選取之特徵樹木位置	5
圖 5-4 寶來山崩區域	8
圖 5-5 研究區域內之山崩加積區	9
圖 5-6 研究區域內之山崩虧損區	9
圖 5-7 寶來區崩塌歷年監測 2015/02/01.....	11
圖 5-8 寶來區崩塌歷年監測 2015/11/09	11
圖 5-9 寶來區崩塌歷年監測 2016/06/06.....	12
圖 5-10 寶來區崩塌歷年監測 2016/11/18.....	12
圖 5-11 寶來區崩塌歷年監測 2017/07/08.....	13
圖 5-12 寶來區崩塌歷年監測 2017/09/24.....	13
圖 5-13 寶來區崩塌歷年監測 2017/11/15.....	14
圖 5-14 寶來區崩塌歷年監測 2017/11/17	14
圖 5-15 寶來區崩塌歷年監測 2018/01/18.....	15
圖 5-16 寶來區 2017 至 2018 崩塌趨近於穩定	16
圖 5-17 寶來區 2019/07 崩塌範圍	17
圖 5-18 地物點位位移示意圖 2017/07/08.....	18

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 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。

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，目前本所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。

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。

第一節 擬解決問題

- 一、大規模崩塌區之多時序、高解析之數值地形及影像資料庫的收集及建置
- 二、大規模崩塌區高精度精細微地形地貌資料庫之資料擷取技術
- 三、無人機光達及地面光達技術之整合、點雲資料拼接處理技術的研發
- 四、大規模崩塌區地表變形及山崩活動性監測
- 五、坡地崩塌及河道堆積之遞移關係率定

第二節 計畫目標

本計畫範圍包括寶來村及鄰近區域，針對既有航空或無人機影像資料，可利用此原始影像再進行加值，加上目前國內無人載具小範圍航測技術，可在本年度進行拍攝。本計畫一方面預計不同時期歷史航照影像進行加值處理，並在本年度進行無人載具航空影像拍攝，期能獲取 2015 年以後至少 3 期的地理資訊系統資料庫，二方面開發無人機光達及地面光達之資料整合及點雲平差技術。透過既有資料的收集，

以及新技術的資料擷取，以能完整獲取研究區完整空間資訊，以了解坡地塊體運動的機理，以上的資料及技術的整合，預期將有助於貴局後續崩塌地相關研究方法論的開發及技術整合。本計畫符合施政主軸之積極研發地質災害調查分析技術，亦有助於部份集水區及河道土砂生產及運移提供新銳之調查技術。

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。針對無人機光達掃描區域，本計畫內之飛行掃描區域面積，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 1-1~1-2 紅色多邊形範圍為本計畫擬調查範圍，面積約 6 平方公里，為計畫需求之必須範圍，無人機航拍計畫執區域為圖 1-2 區域外擴後，面積不小於 10 平方公里。

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 1-3 呈現研究區崩塌區之現地樣貌。

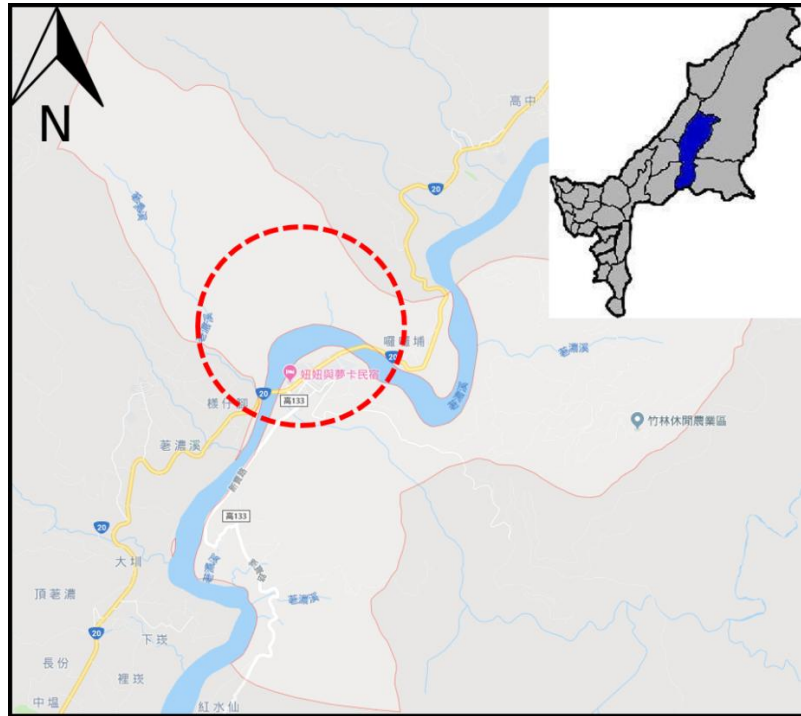


圖 1-1 寶來研究區域(Google Map)



圖 1-2 寶來地區計畫範圍圖

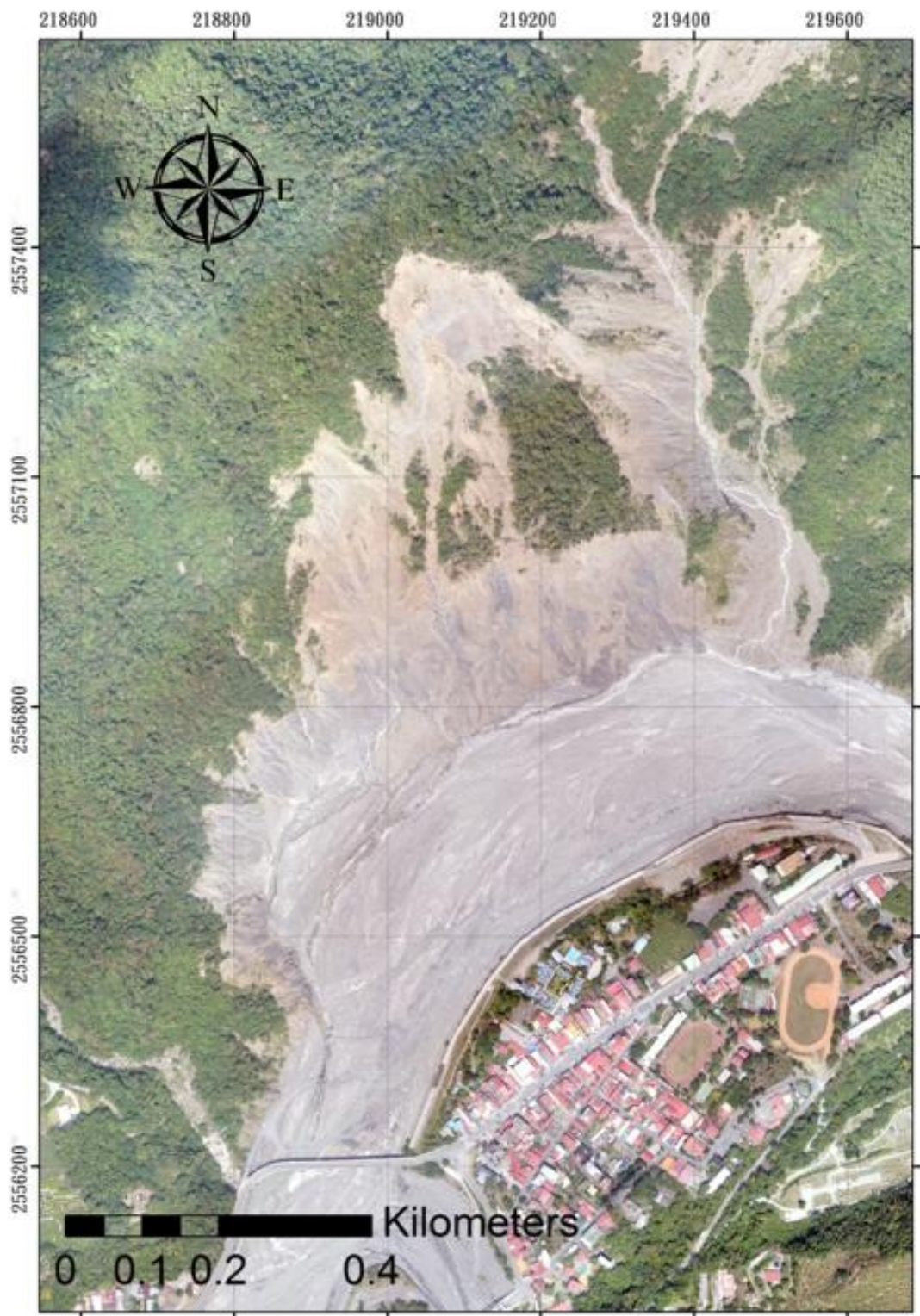


圖 1-3 寶來研究區域(無人機正射影像)

第四節 研究流程

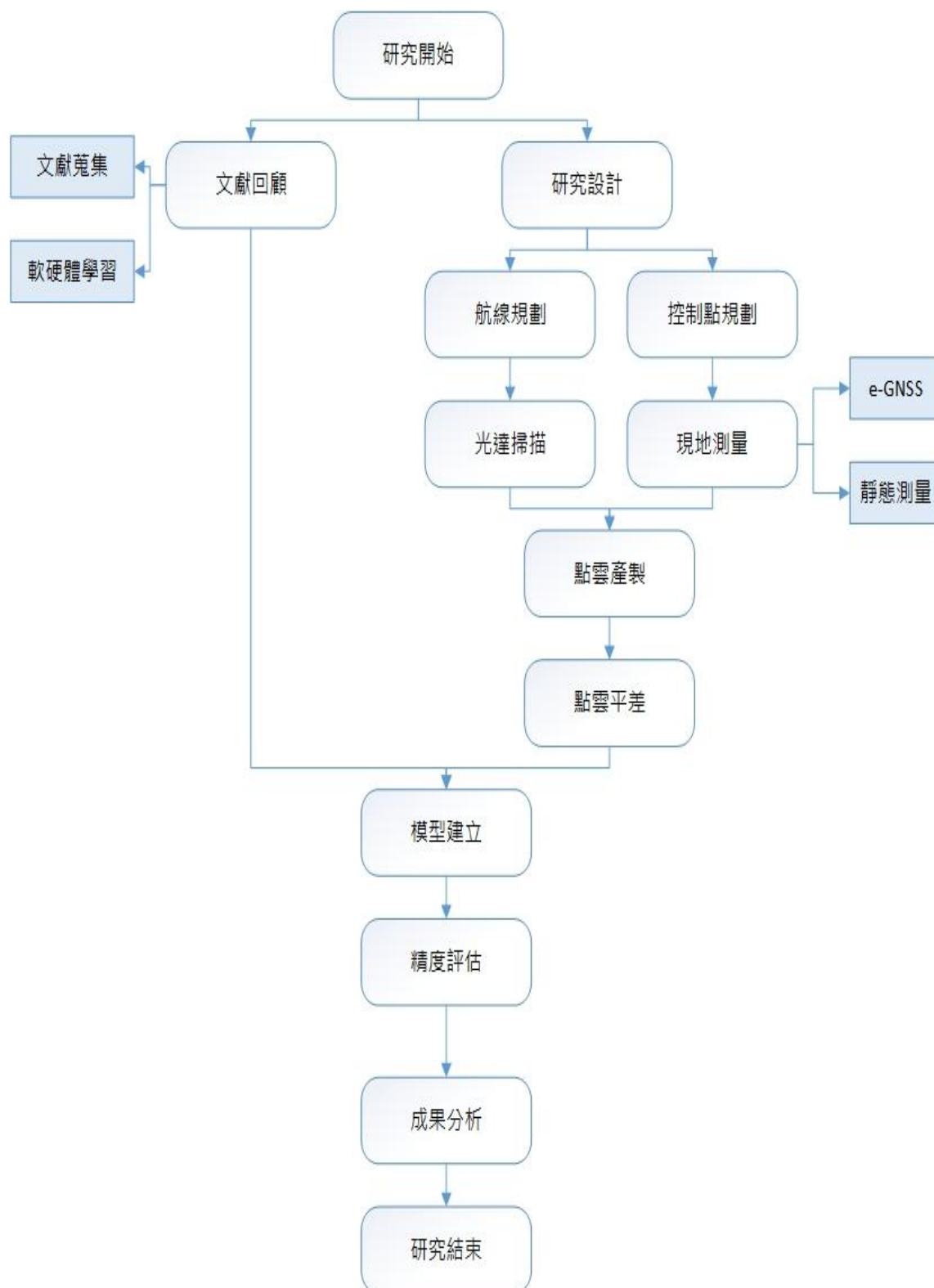


圖 1-4 研究流程圖

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)無人機光達掃描；(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。

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

$$R = \frac{1}{2} ct \quad (2.1)$$

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

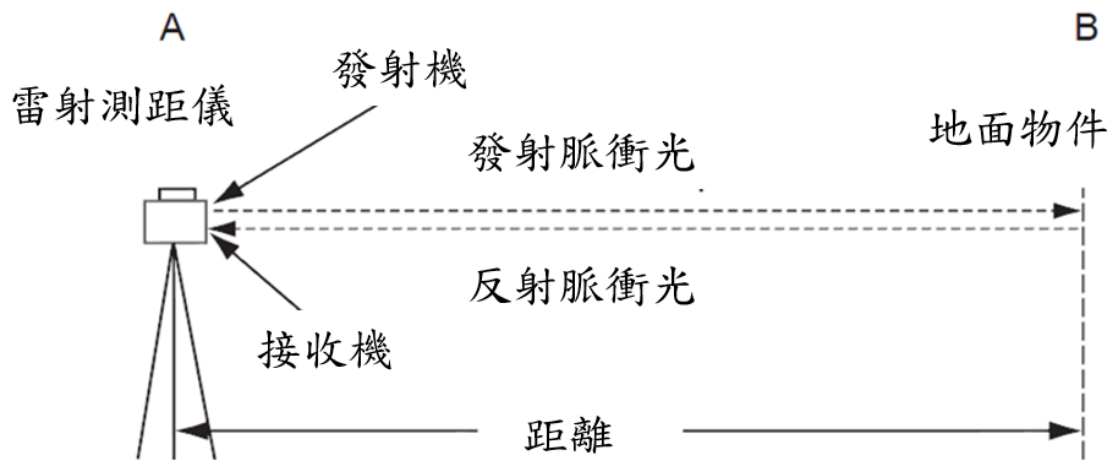


圖 2-1 脈衝式雷射測距方法(Shan & Toth, 2008)

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

$$R = (M\lambda + \Delta\lambda) \div 2 \quad (2.2)$$

其中

$$\Delta\lambda = (\phi/2\pi)\lambda \quad (2.3)$$

R =距離

M =波長數量

$\Delta\lambda$ =相位差

ϕ =相位角

λ =波長

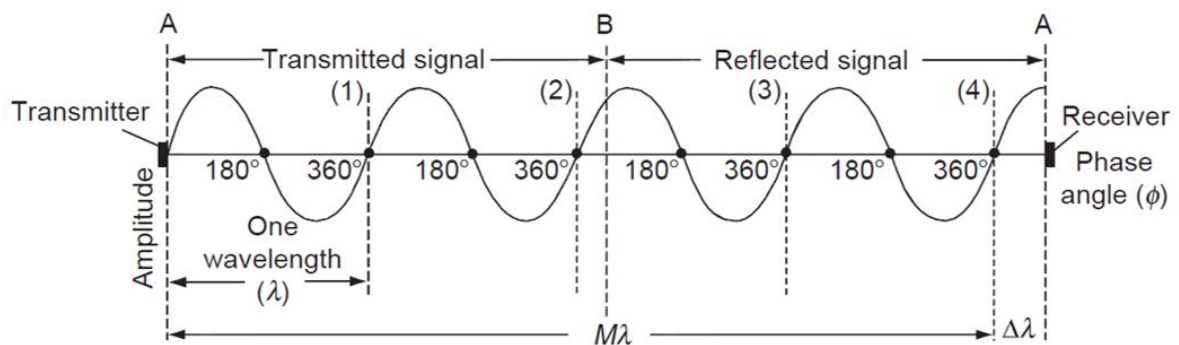


圖 2-2 相位差測距法示意圖 (Shan & Toth, 2008)

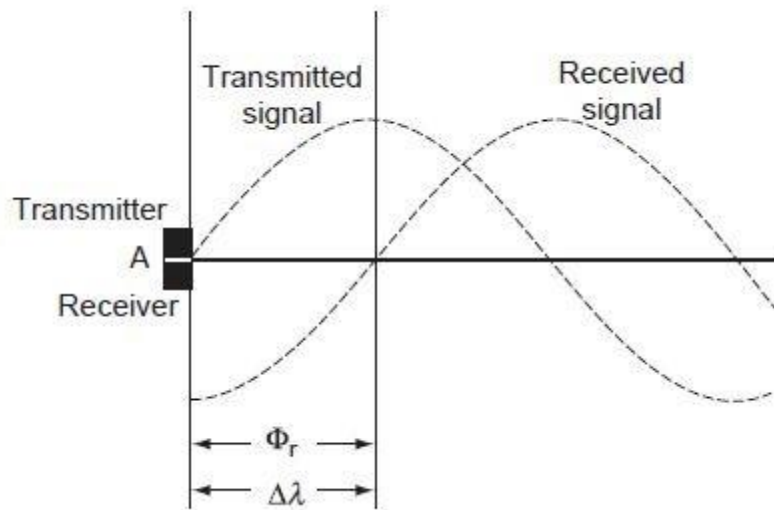


圖 2-3 相位差示意圖 (Shan & Toth, 2008)

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 無人機光達掃描系統

本計畫使用無人機光達掃描(UAS LiDAR)獲取資料，儀器具有高精度、高解析度且高效率之特點，雷射掃描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 2-4)，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。



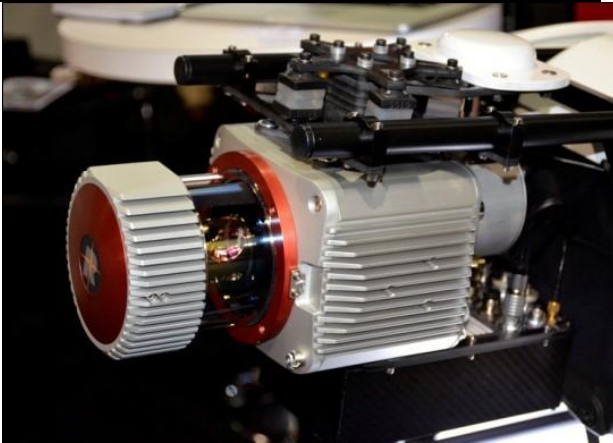
圖 2-4 本計畫使用之無人機載具(UAS)-Vapor 55

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 (目反射率%)	920m(60%) 550m(20%)	
工作海拔	5500m	
儲存容量	240G SSD	
環境溫度	-20°C~50°C	

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 2-5 所示。

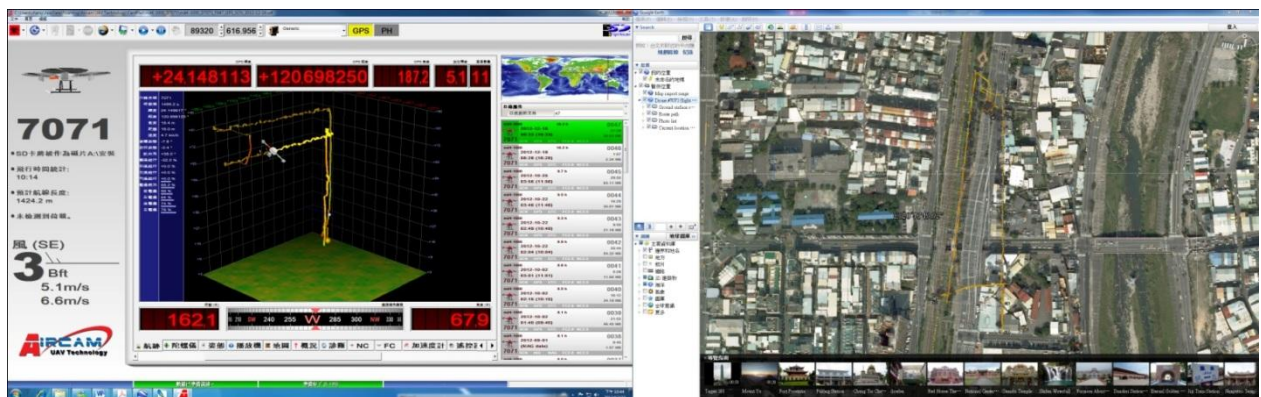


圖 2-5 地面控制站。左圖為地面控制設備圖，右圖為航線規劃畫面圖。

空載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像機互補技術，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描，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 2-6 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（或稱共軌點）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軌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拼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拼接問題，本計畫擬引進及使用最新地面光達自動拼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拼接，可方便快速的進行後續資料的分析工作。

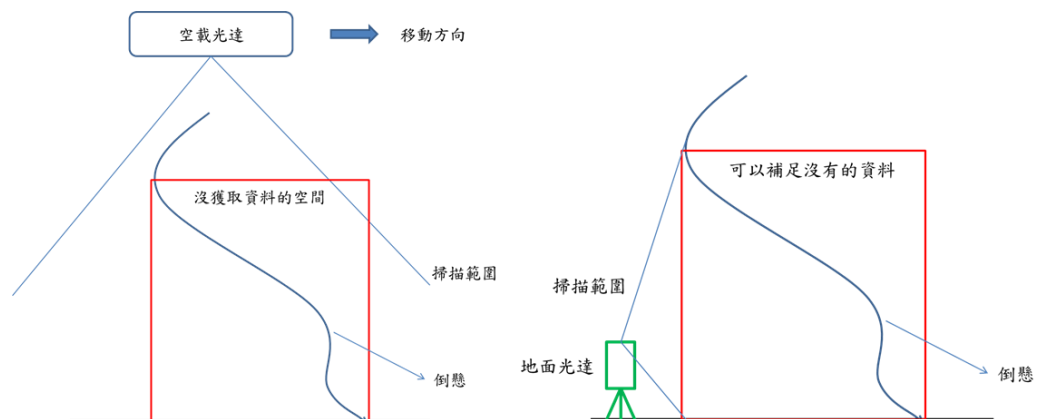


圖 2-6 地面光達掃瞄工作之資料收集及補強

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。

本計畫之目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 2-7)。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 2-7 本團隊之無人飛機系統機隊

第六節 無人機光達掃描及資料處理

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 2-8 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。

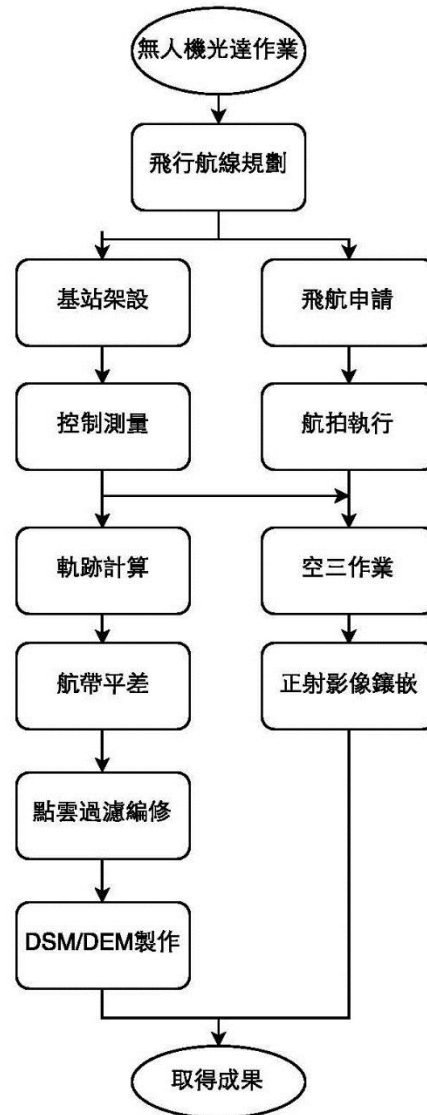


圖 2-8 無人機光達掃瞄工作執行流程圖

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像片上量測影像座標。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。之後再進行數值地形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，可方便快捷取得影像，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 2-9 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。

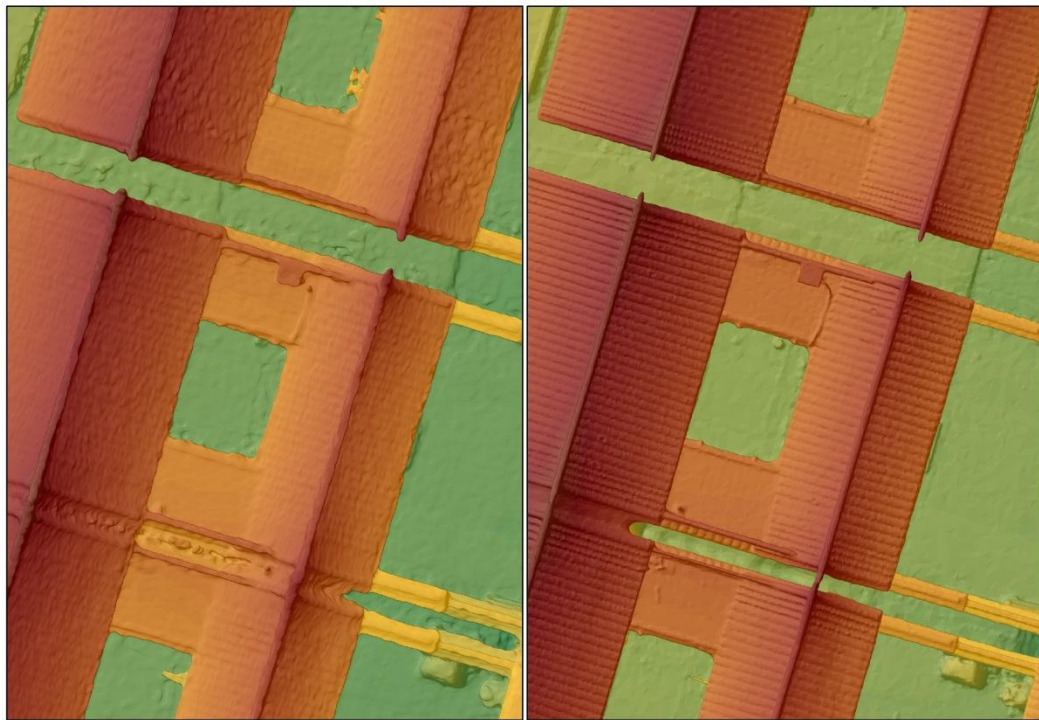


圖 2-9 數值地形模型成果比較（左：一般研究單位；右：本團隊建模效果）

第八節 三維影像製作及呈現

隨著電腦科技的日新月異，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 2-10a 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 2-10b 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 2-10c 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。

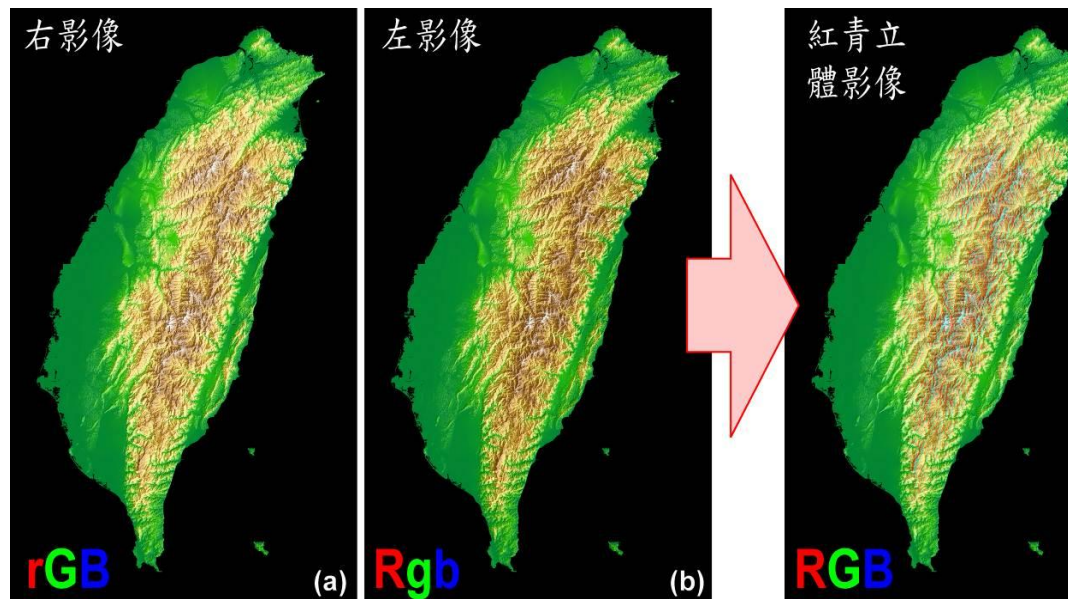


圖 2-10 紅青立體影像製造流程示意及成果圖例

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)地面光達高陡邊坡掃瞄；(3)無人飛機系統影像拍攝建模；(4)無人機光達掃瞄；(5)三維立體影像建置及分析；以及(6) GIS 圖資建置。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。針對全區飛行掃描工作，針對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掃描區域總面積約 10 平方公里，無人機光達及地面光達掃瞄資料總面積 100 公頃。

本研究計畫依下述方式進行各個研究步驟，來完成預定之研究目標。本計畫之工作項目包含：既有資料收集、無人飛機系統汛期前、後地形資料建置、無人機光達及地面光達掃瞄地形資料，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。二方面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。

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：

- 一、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。

二、野外地質調查、構造分析，以及現地控制點量測

三、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。

四、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。

五、地形資料精度、解析及誤差分析，地形對比及構造地形分析。

六、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掃描區域總面積約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河流域)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。

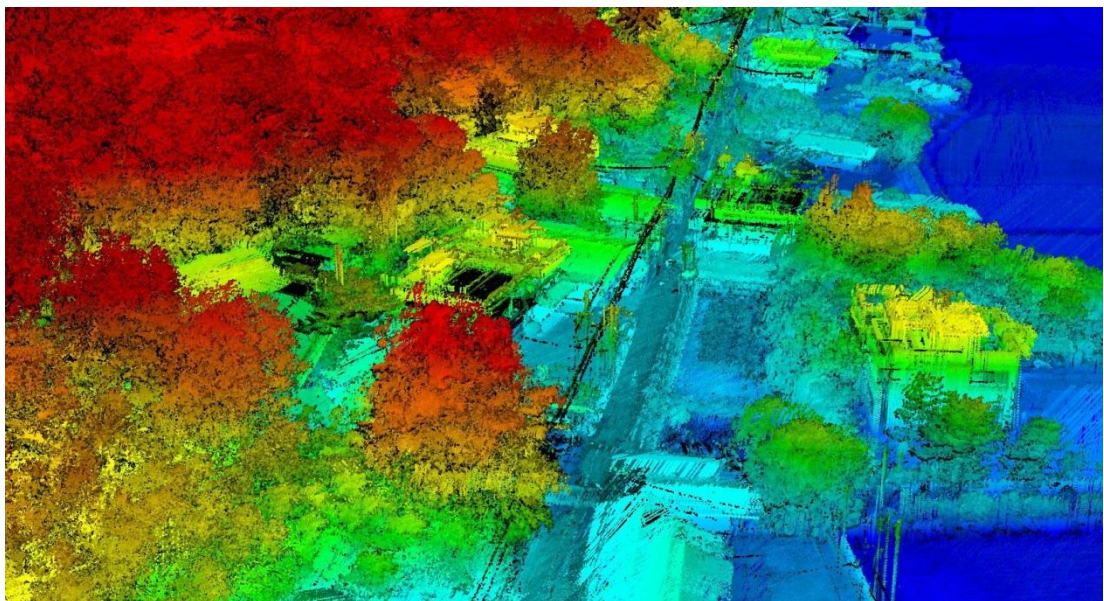


圖 3-1 無人機點雲進行資料航帶平差前

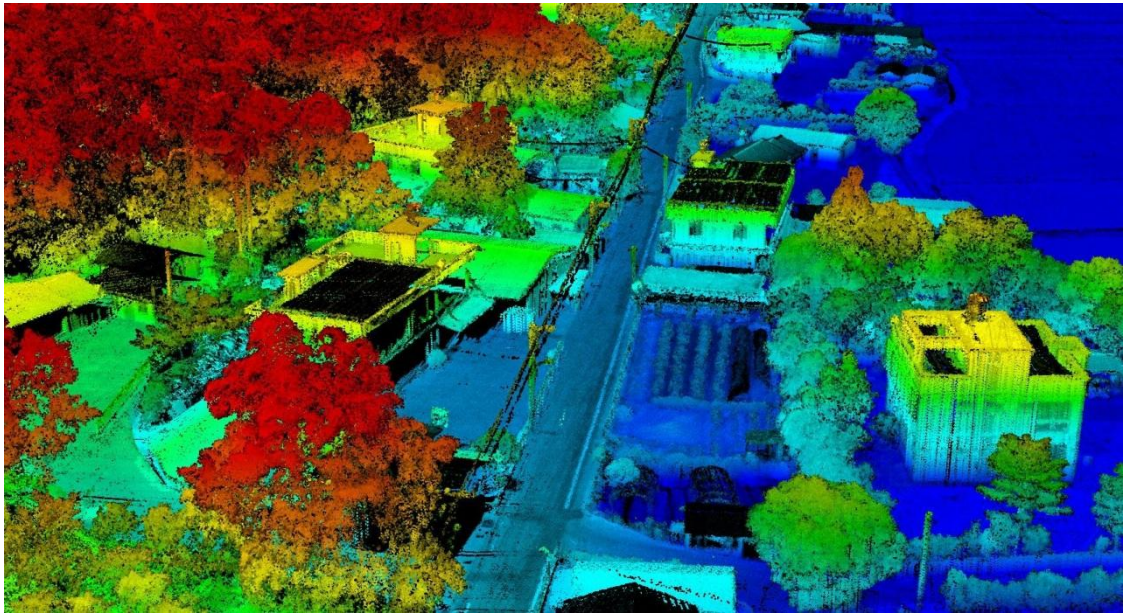


圖 3-2 無人機點雲進行資料航帶平差後

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描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。

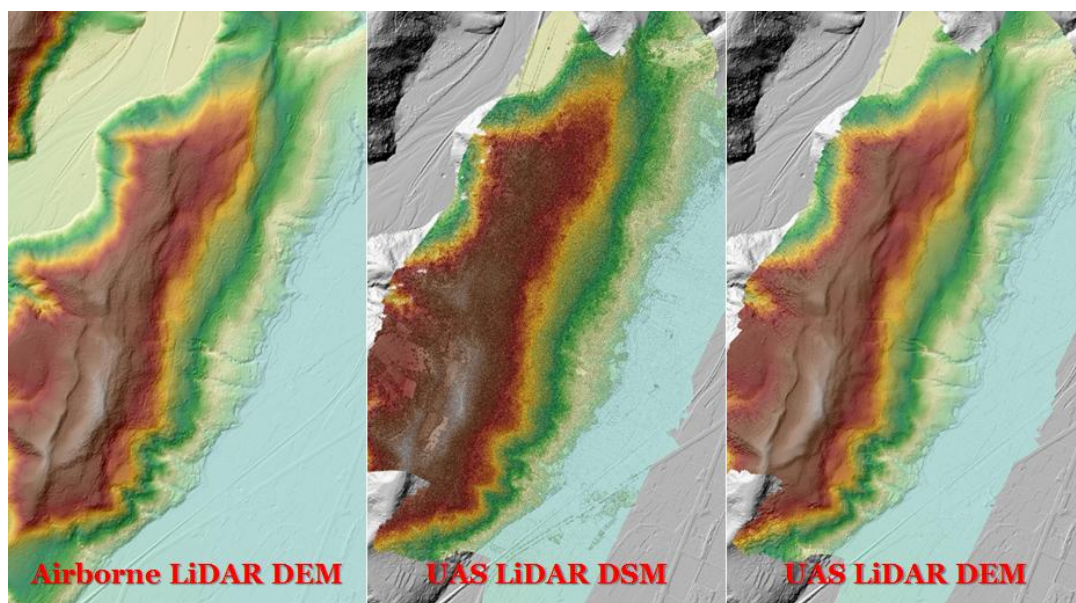


圖 3-3 測試區全區之不同數值地表模型成果

(由左而右各為空載光達 DEM，無人機光達 DSM 及無人機光達 DEM)

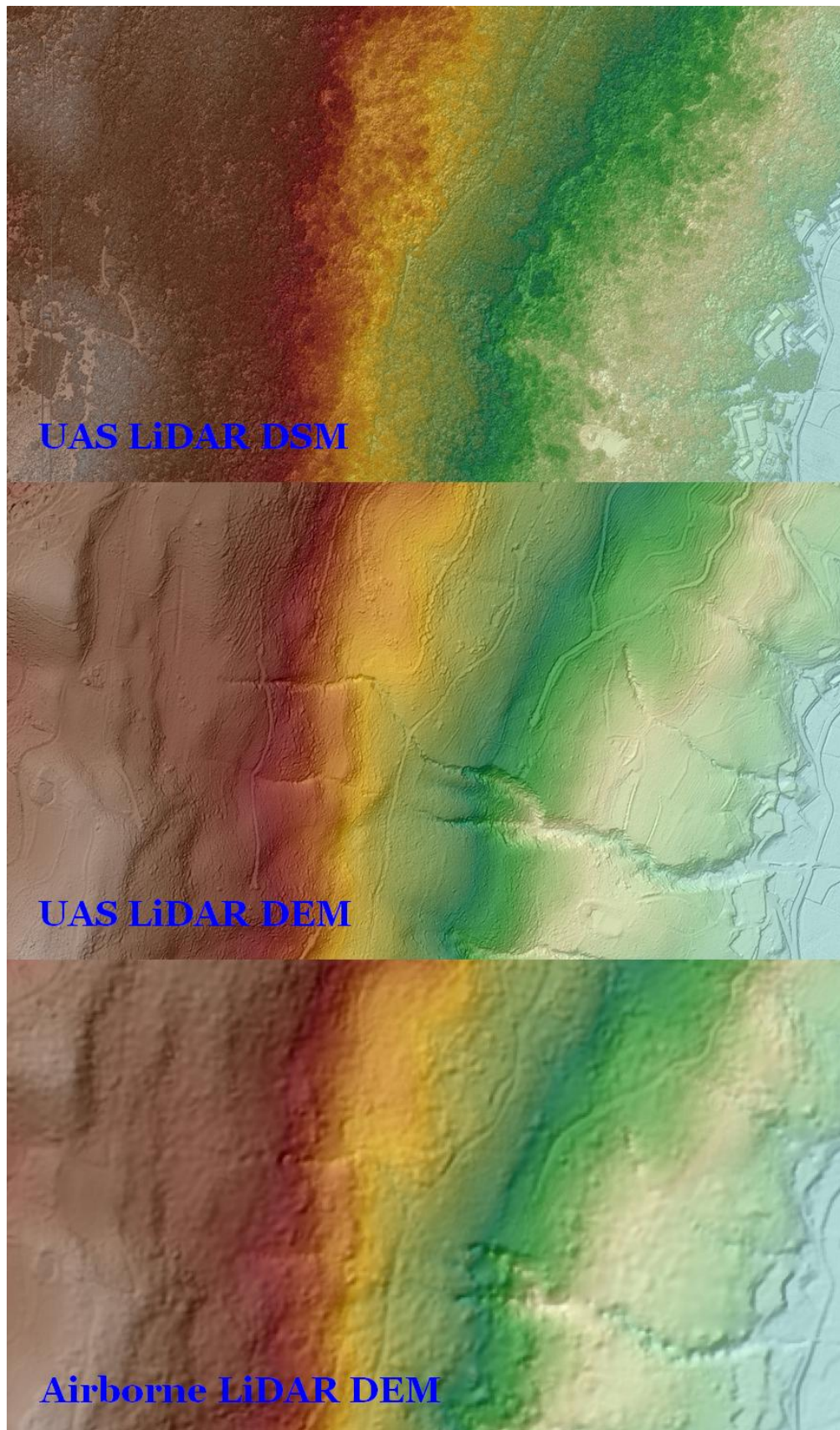


圖 3-4 測試區內同一區域之不同數值地形模型成果比較

(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建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 3-6、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 月間之主要地貌改變則發生於倒交山崩積物的再崩塌為主，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。

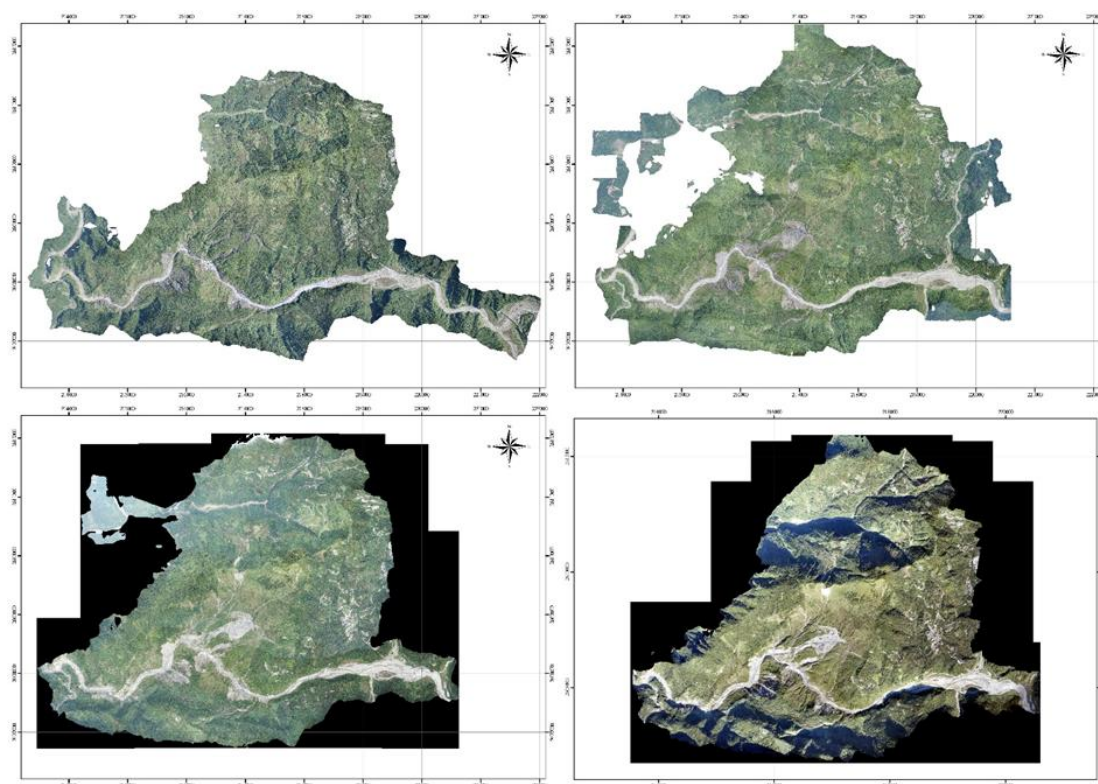


圖 3-5 草嶺山崩區四時期無人機影像測繪成果

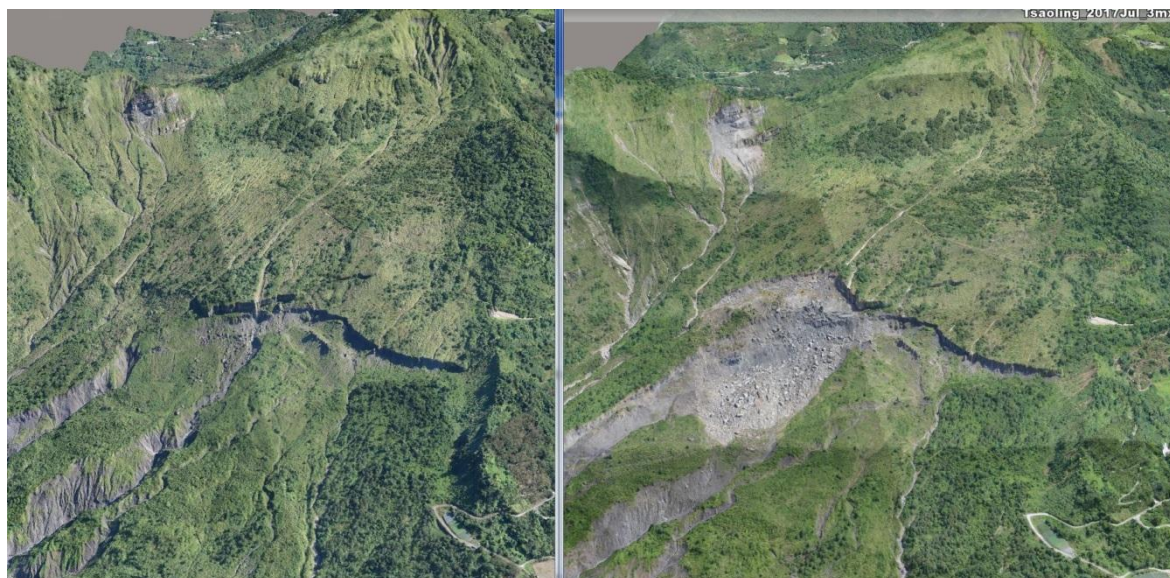


圖 3-6 斷魂谷崖線對比，左 2016 年，右 2017 年



圖 3-7 倒交山崩積區崖線對比，左 2016 年，右 2017 年

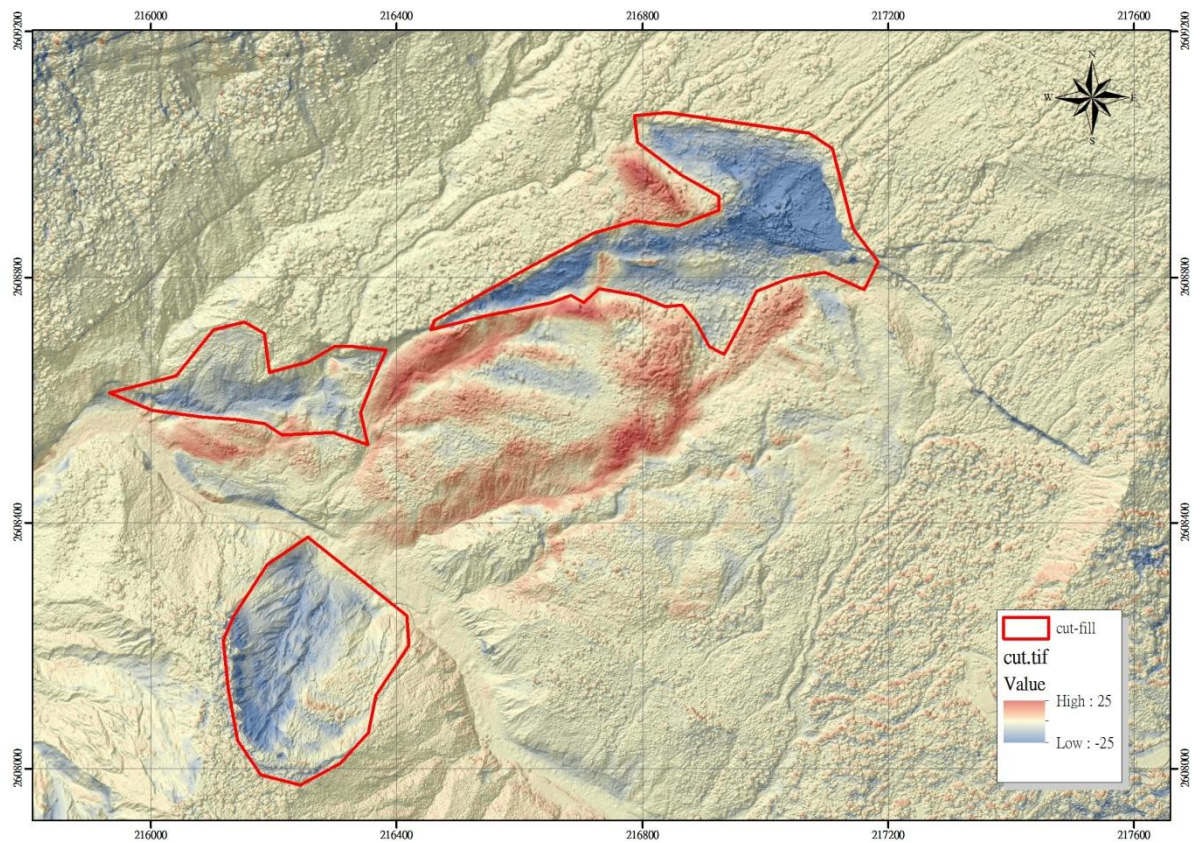


圖 3-8 草嶺山崩區 2017 年六月豪雨期間地貌改變主要區域
之高度差異

第四章 研究成果

第一節 現地量測成果

一、衛星儀器精度檢測

在進行現地測量前，須先針對衛星儀器的精度進行檢測，確認儀器的座標系統設定正確，及所求得座標資訊誤差為可接受值，才能開始後續現地測量。

首先在空曠且無障礙物的本校土木館頂樓佈設七個點位，檢測 e-GNSS 與靜態測量的精度誤差，經多次測回計算出平均值與均方根誤差來判定精度。e-GNSS、靜態測量的結果(表 4-1)，e-GNSS 測量對同一點位所求得精度，相對於靜態所獲取精度高，因此本研究設定主要控制點由 e-GNSS 所得數據控制。而 e-GNSS 所得平面均方根誤差為 3.6 公分，高程均方根誤差為 4.4 公分。靜態所獲取平面均方根誤差為 12.7 公分，高程均方根誤差為 7.2 公分。

表 4-1 土木館屋頂 e-GNSS 平均值

點位	北座標	東座標	高程
Pt1	2770689.153	303836.307	45.743
Pt2	2770690.547	303827.315	45.727
Pt3	2770691.870	303817.923	45.717
Pt4	2770689.223	303800.431	45.786
Pt5	2770674.301	303799.834	45.767

Pt6	2770685.308	303811.427	45.777
Pt7	2770680.593	303827.896	45.780

(單位:公尺)

表 4-2 土木館屋頂靜態平均值

點位	北座標	東座標	高程
Pt1	2770689.145	303836.291	45.764
Pt2	2770690.532	303827.304	45.756
Pt3	2770691.870	303817.914	45.734
Pt4	2770689.210	303800.400	45.810
Pt5	2770674.310	303799.830	45.779
Pt6	2770685.308	303811.427	45.777
Pt7	2770680.582	303827.894	45.811

(單位:公尺)

表 4-3 e-GNSS 六次測量成果比較

e-GNSS	平面	高程
標準差	0.026	0.032
均方根誤差	0.036	0.044
平均絕對誤差	0.023	0.036

(單位:公尺)

表 4-4 靜態 3 次測量成果比較

靜態測量	平面	高程
標準差	0.008	0.038
均方根誤差	0.127	0.072
平均絕對誤差	0.007	0.029

(單位:公尺)

二、寶來區現地測量成果

寶來區使用 e-GNSS 以及靜態測量方式進行控制點與檢核點的量測作業。此區域佈設之檢核點為 7 個。其測量點位分佈如圖 4-1 所示：

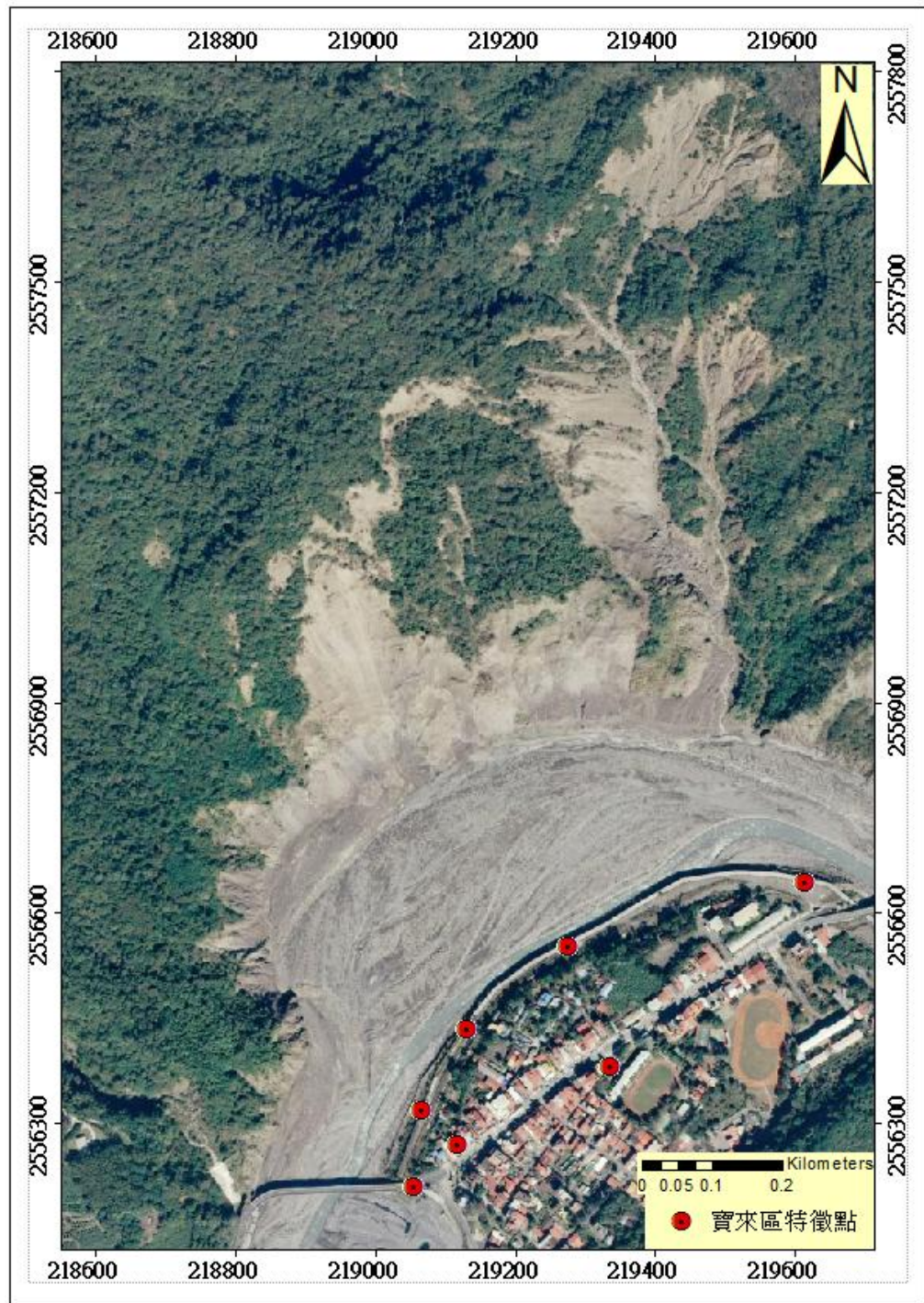


圖 4-1 寶來區檢核點分佈圖

寶來區域在光達掃描範圍內檢核點共 7 個點位，測量成果如表 4-5 所示，經過統計與計算後可得到(圖 4-2)誤差圖表，能夠計算出平面標準差為 3.8 公分，高程標準差為 3.2 公分，而平面均方根誤差為

3.9 公分，高程均方根誤差為 3.7 公分。

表 4-5 寶來區檢核點測量

點位	北座標	東座標	高程
base0	219118.894	2556268.208	436.105
pt1	219056.631	2556208.062	418.993
pt7	219068.169	2556317.823	416.593
pt8	219132.338	2556434.038	418.036
pt9	219276.817	2556552.201	419.937
pt10	219615.743	2556643.498	427.300
pt16	219337.453	2556380.501	428.020

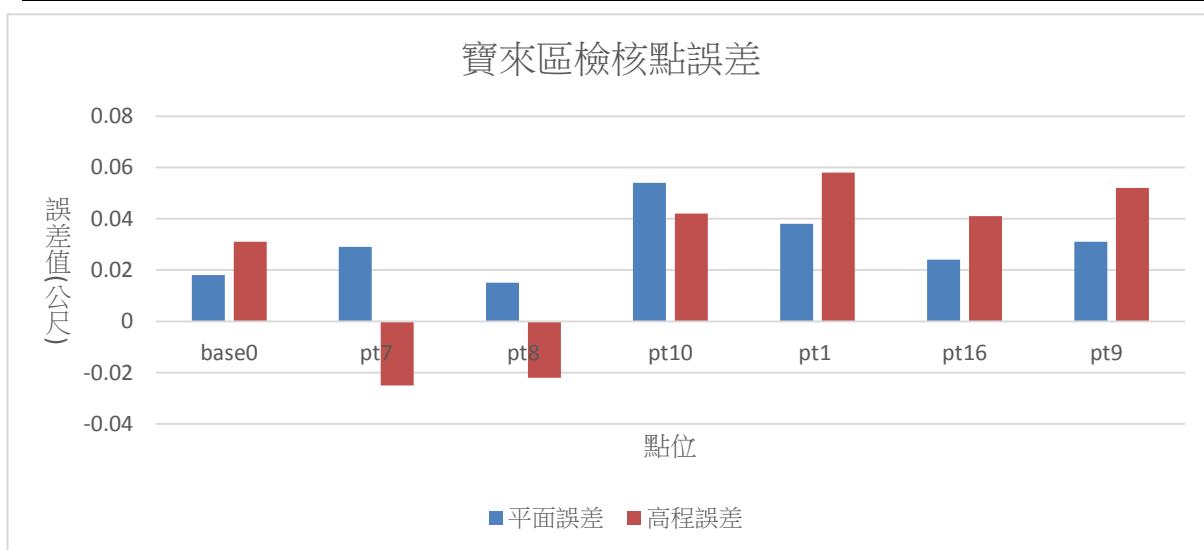


圖 4-2 寶來區檢核點誤差

第二節 航帶平差成效

解算出的點雲資料，因會受到 IMU、GPS 與 LiDAR 間不確定的系統誤差與偶然誤差影響，導致點雲輸出時，容易產生航帶間的系統

誤差，造成航帶間點雲在平面及高程上有些許差異，而為了降低航帶點雲的系統誤差，需要針對點雲進行航帶平差，才能產製完整的數值模型。

在本研究中，除了探討航帶平差的成效，另進行航帶平差後是否添加控制點的差異，以及將多時期的航帶合一平差，比較其與單時期航帶平差模型精度的差異。

一、以點雲模型檢視航帶平差成效

以點雲模型來檢視航帶平差成效是最直觀也是最簡易的方法，透過觀察模型平差前後的整體狀況，主要比較道路及地形是否分層來做為判斷依據。

正確的點雲模型位置不會是有分層狀態的點雲，分層狀態的點雲會造成轉換數值地形模型時，點雲的三維座標並非現地的三維座標，因此在航帶平差後先使用點雲模型來檢視航帶平差的成效，能有助於在判斷點雲模型是否分層，是否尚未航帶平差完成。

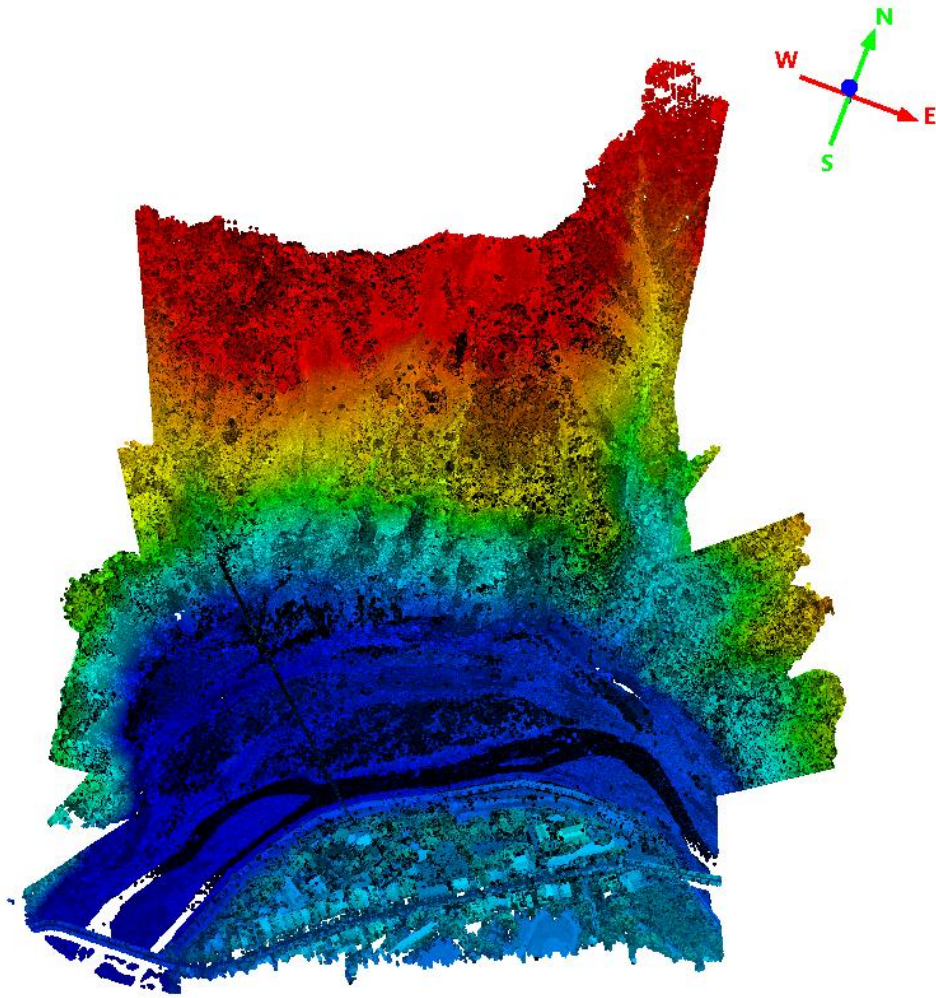


圖 4-3 寶來區點雲模型展示

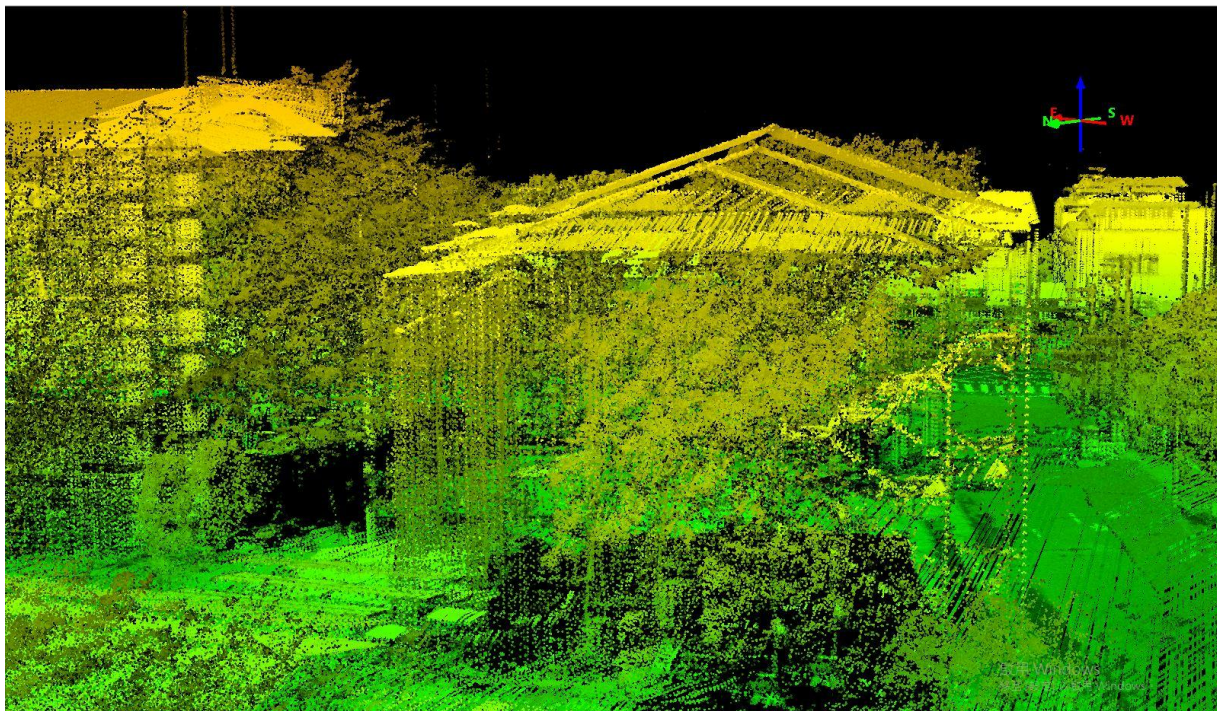


圖 4-4 寶來區平差前

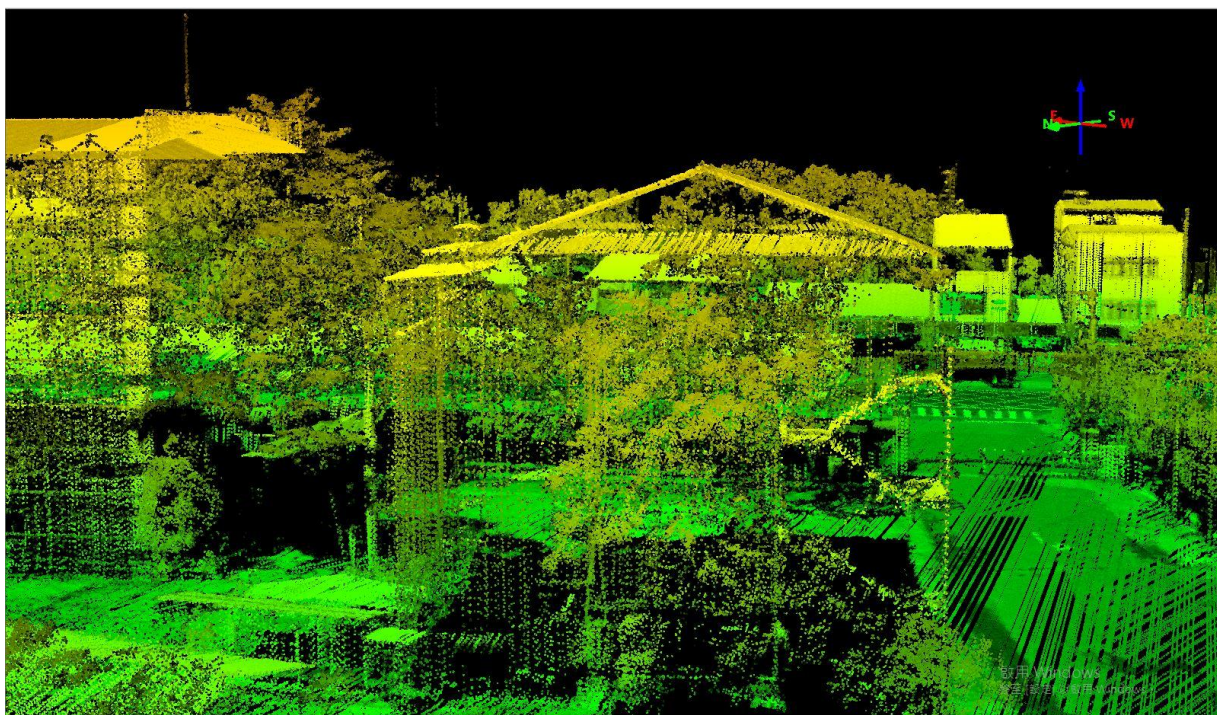


圖 4-5 寶來區平差後

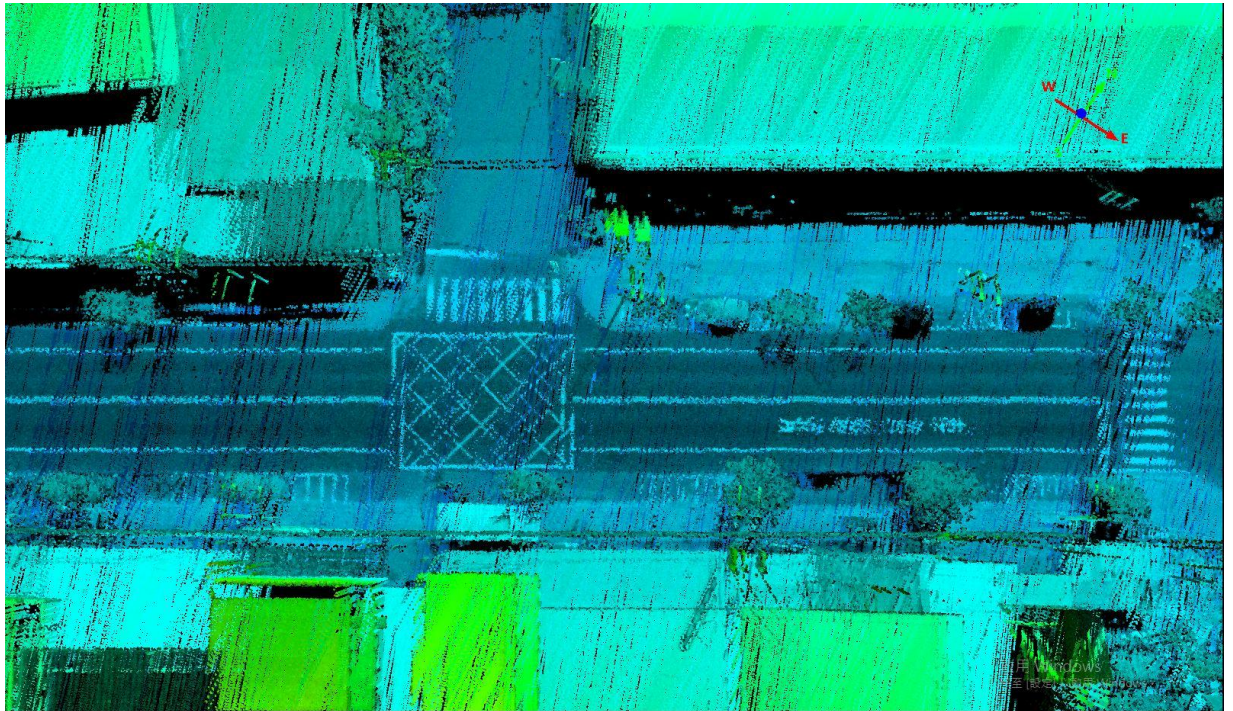


圖 4-6 寶來區平差前-道路

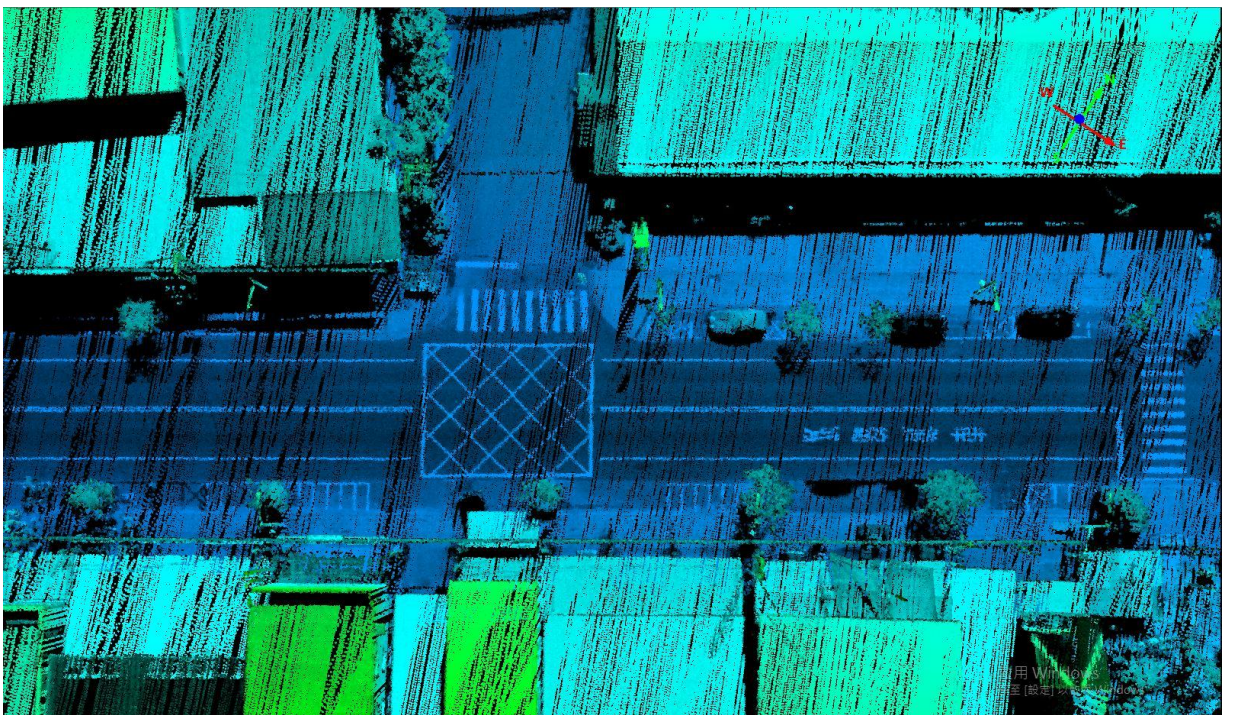


圖 4-7 寶來區平差後-道路

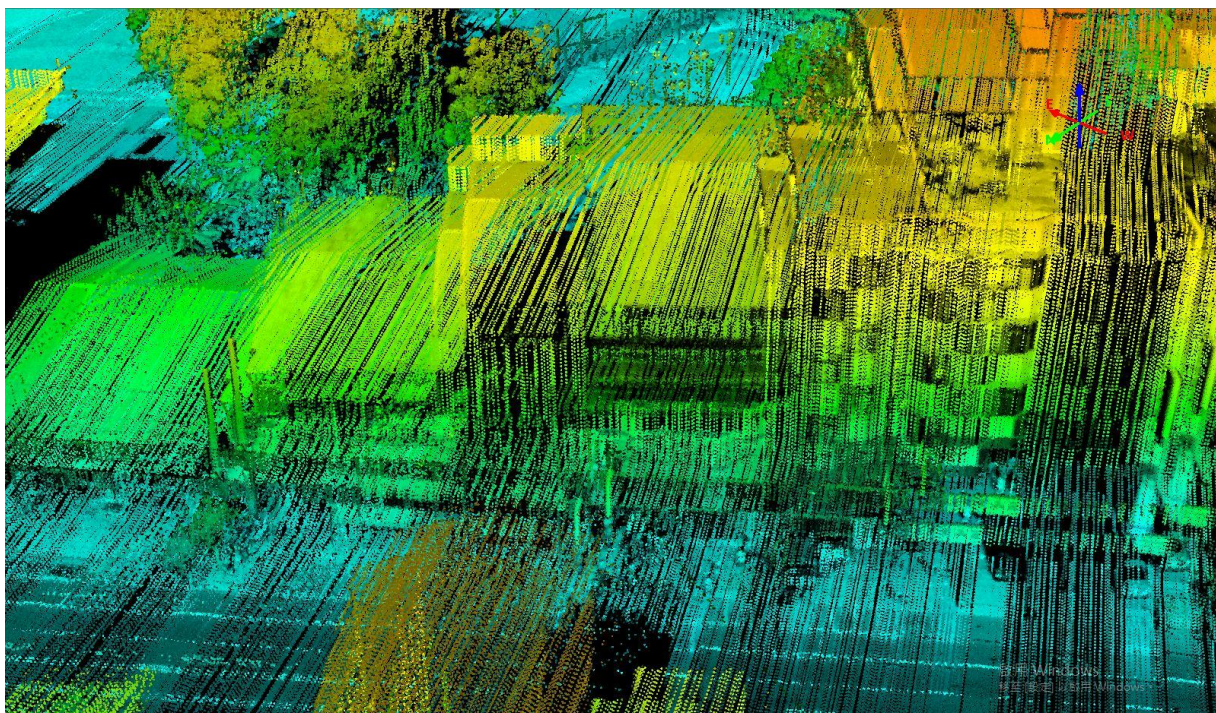


圖 4-8 寶來區平差前-建築

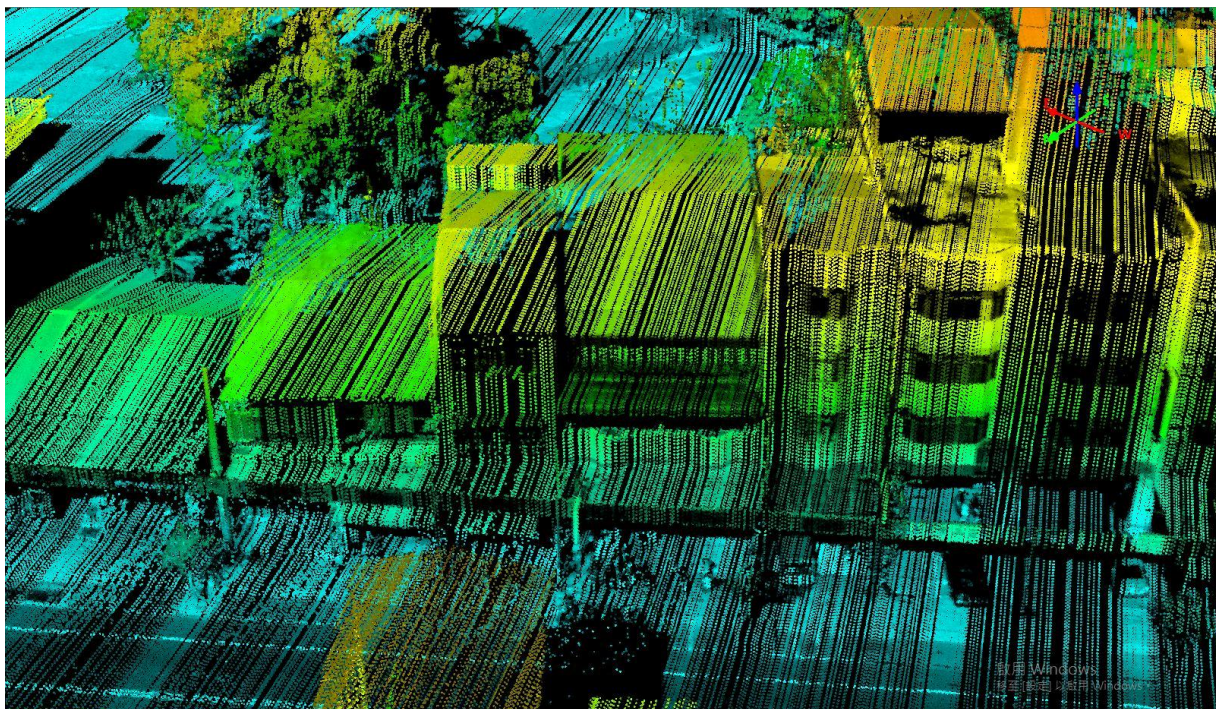


圖 4-9 寶來區平差後-建築

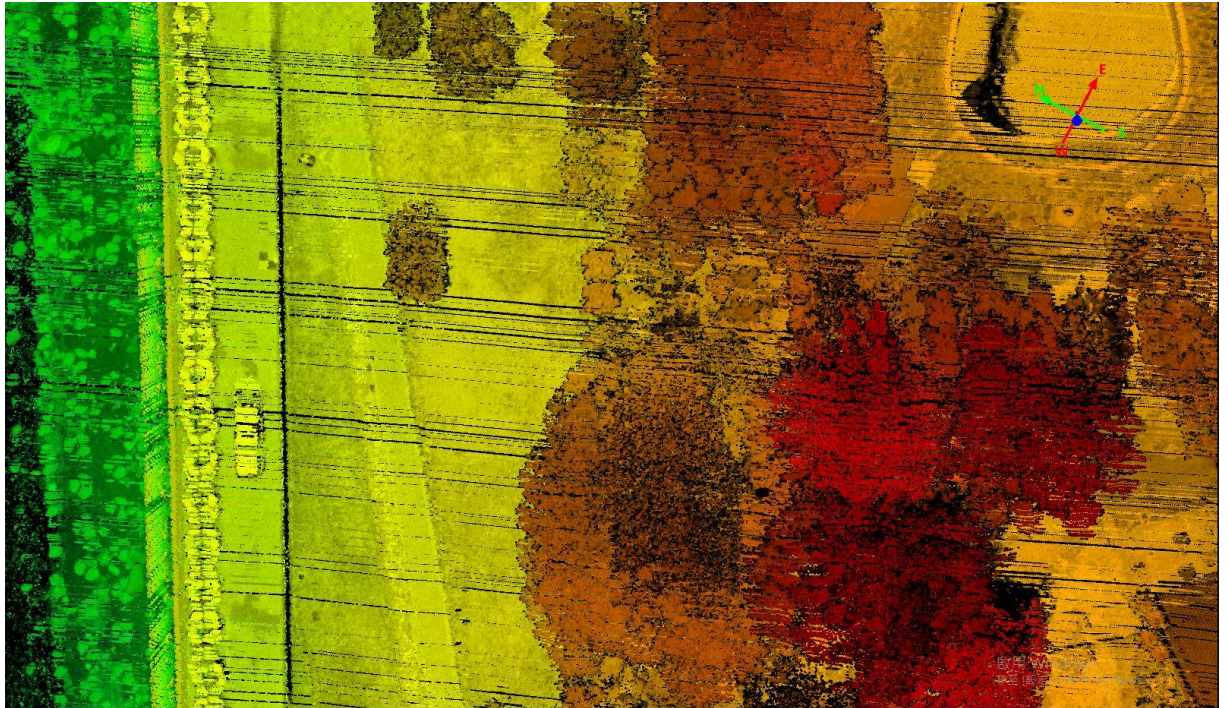


圖 4-10 寶來區平差前-河堤

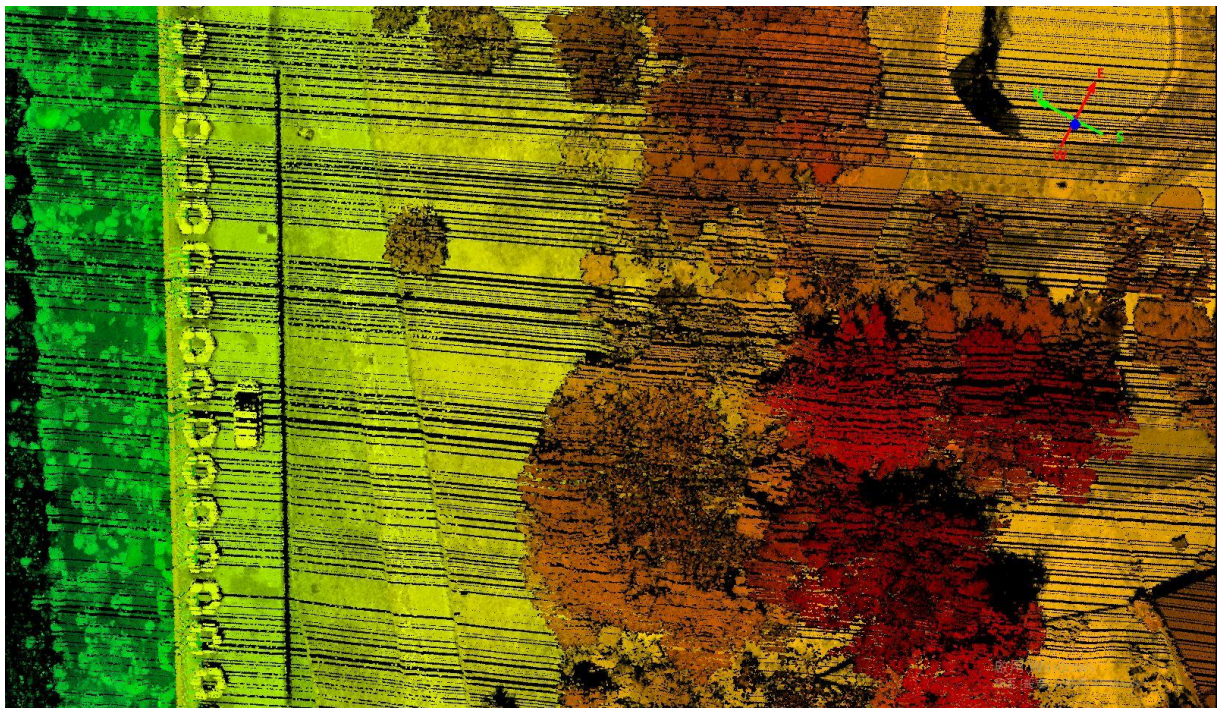


圖 4-11 寶來區平差後-河堤

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。

二、以現地測量檢視航帶平差成效

上面敘述以點雲模型來檢視航帶平差的效果，是僅能以主觀來快速判斷航帶平差是否良好，無法以數值量化出航帶平差的成效，因此要以量化且準確的方式是，則可利用現地量測之檢核點來進行評估。透過現地測量取出的檢核點座標與平差後模型上量測出的檢核點，兩資料庫之差異，可進行精度評估獲，來推論所建置之模型精度。

為評估數航次上不同航帶資料於平差後之資料因有無控制點之數值地形模型對模型精度的影響，故直接使用現地所量測的檢核點與各式航帶平差方法所製成的數值地表模型上的檢核點之座標進行比較，即可得出模型之粗略精度。但因研究點雲產製出之數值模型無法精確顯示出掃描當時所鋪設標的物(航空標)，加上測量上平面誤差小於解析度，在模型上無法展示出平面的差異，因此在檢視航帶平差成效只檢視各模型之高程差異。

寶來研究區範圍內一共設置七個現地測量點位，為探討寶來區在航帶平差後有無控制點對模型精度的影響，故先以各時期之個別單一期進行飛航資料之平差，之後再針對所產出模型精度進行分析。

本研究首先以 Applanix POSpac 藉由透過地面基站來無人機之軌

跡，再以 Riegl RiPROCESS 來進行光達掃瞄點雲資料中之特徵物萃取，並計算各航帶上之特徵物之差異及改正量，透過軌跡之改正來調整各航帶間之系統誤差，以減少航帶間點雲之平面及高程上的系統誤差，以消除各航帶間之點雲位置之差異。

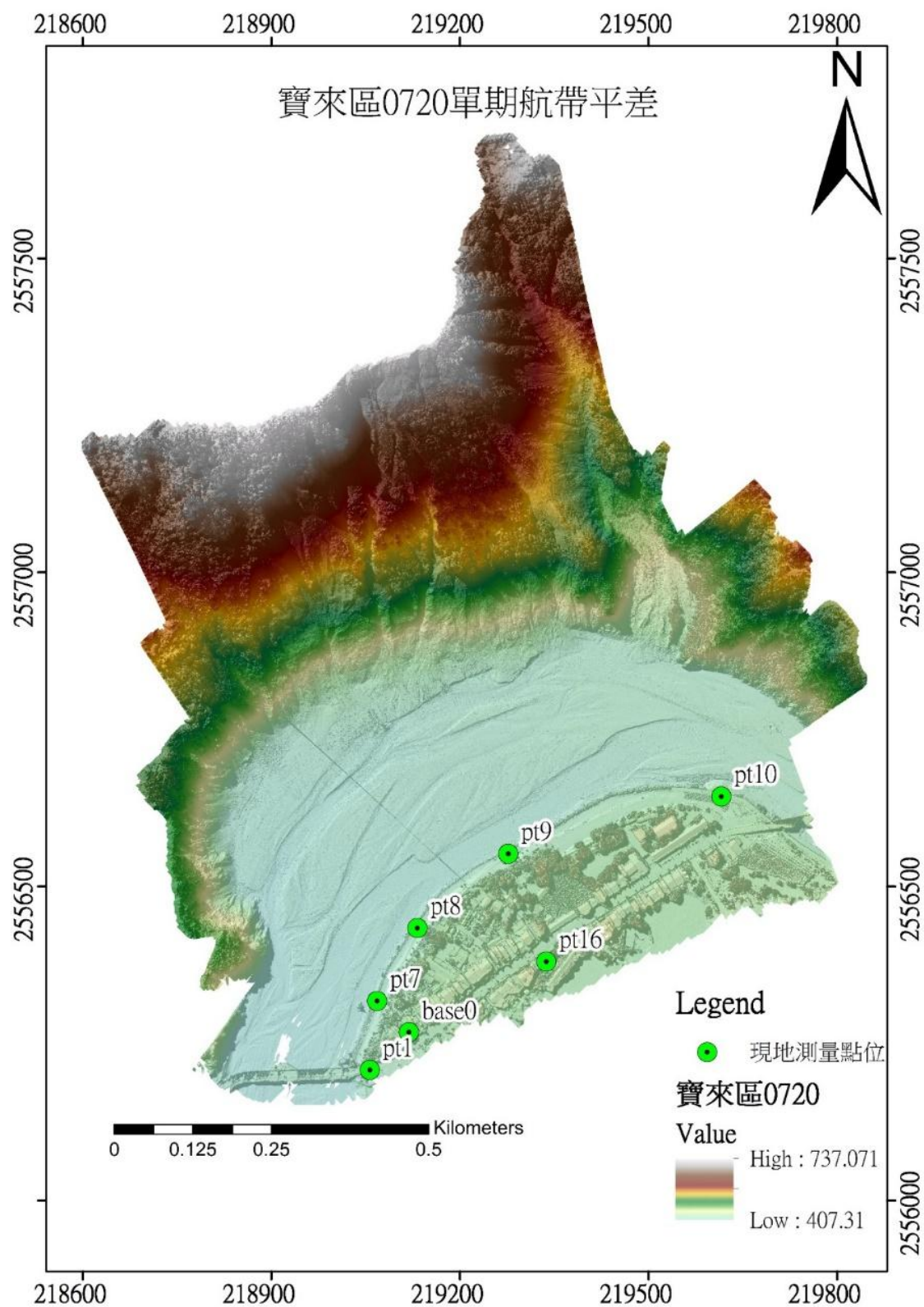


圖 4-12 寶來區 2019/07 航帶平差建製數值模型

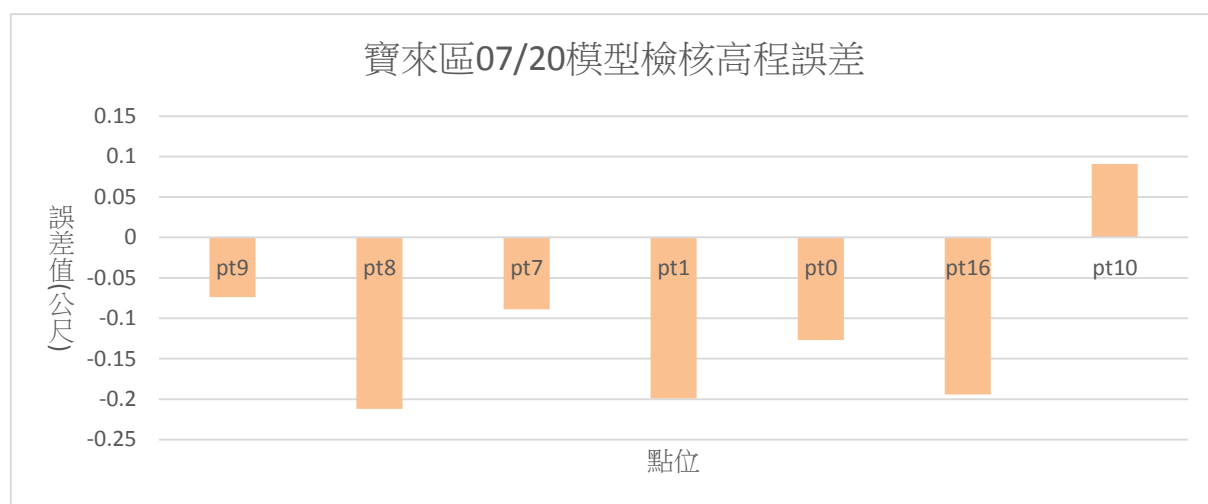


圖 4-13 2019/07 航帶平差模型與測量檢核點高程誤差

表 4-6 2019/07 航帶平差模型整體高程誤差

寶來區 2019/07	標準差	均方根誤差	平均絕對誤差
單一航帶平差	0.099	0.117	0.082

在寶來區，單期航帶平差方法中，2019 年 7 月所掃描的資料平差後，模型上檢核點與現地測量所得檢核點差異，標準差為 9.9 公分，均方根誤差為 11.7 公分。

(一) 寶來區(單期航帶平差後加控制點)

單期航帶平差後加控制點為點雲使用 RiPROCESS 進行航帶平差後，使用現地測量取得的數據做為控制點校正模型定位，藉此提高模型的精度。

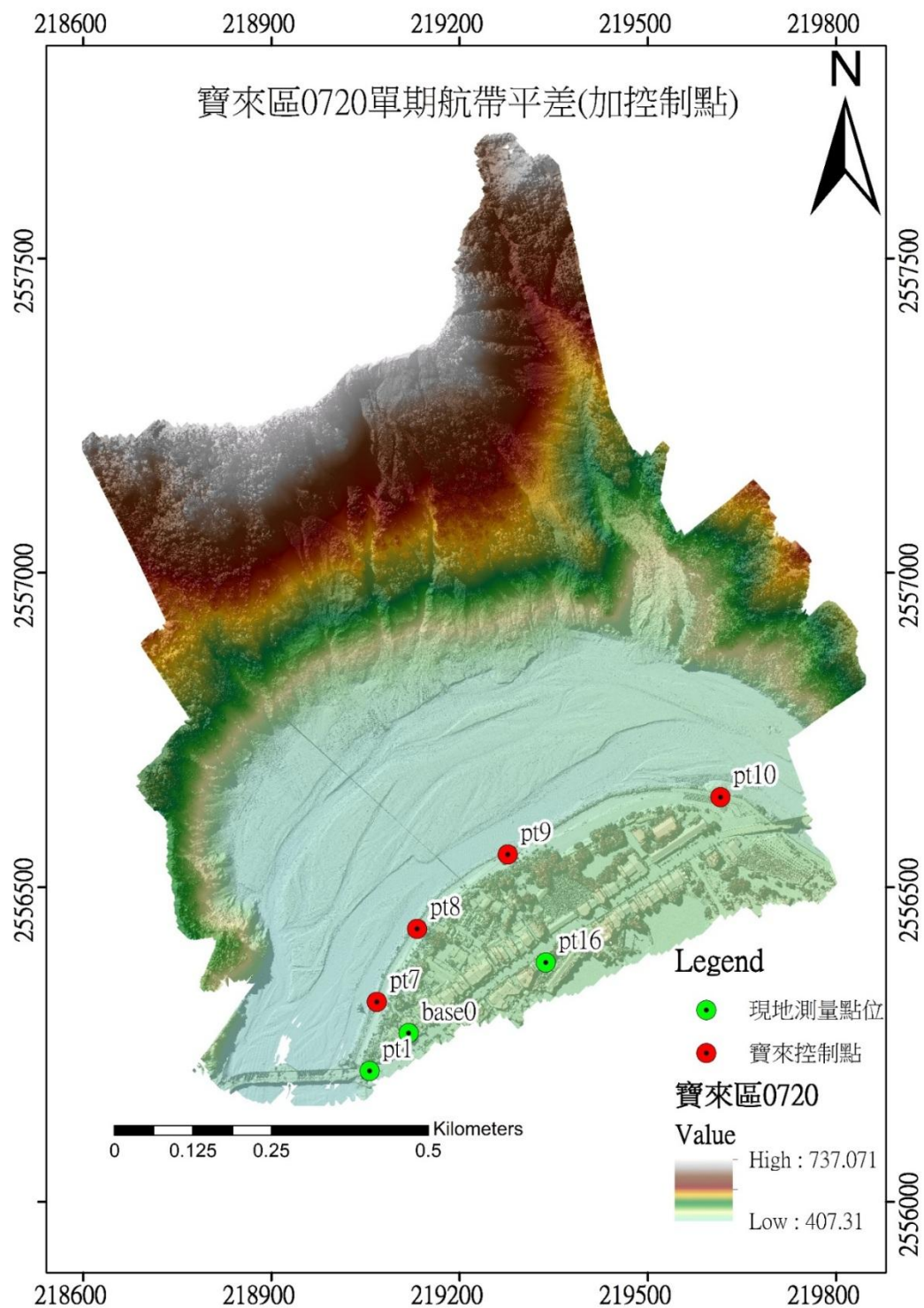


圖 4-14 寶來區 2019/07 航帶平差(加控制點)建製數值模型

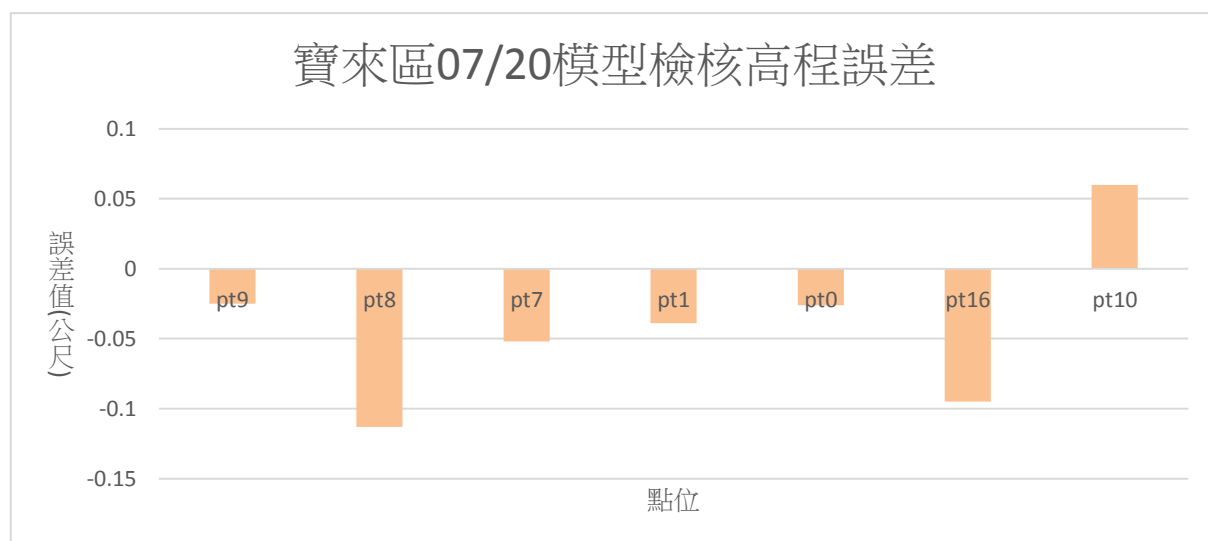


圖 4-15 2019/07 掃描航帶平差(加控制點)模型與測量檢核
點高程誤差

表 4-7 寶來區 2019/07 掃描之航帶平差(加控制點)模型整體高程

寶來區 07/20	標準差	均方根誤差	平均絕對誤差
單一航帶平差 (加控制點)	0.058	0.063	0.048

單位:公尺

寶來區單期航帶平差(加控制點)方法中，2019 年 7 月所掃描的資料平差後，模型上檢核點與現地測量所得檢核點差異，標準差為 5.8 公分，均方根誤差為 6.3 公分。

在將寶來區航帶平差的模型加入控制點後，可以看出原本標準差大約在接近 10 公分左右，而均方根誤差也大約 10 公分左右，變成了

標準差大約 5 公分，均方根誤差在 5 公分以下，添加了控制點幫助模型校正定位，可以將誤差縮減至一半以下。

第三節 多重回波成果

本研究的光達(RIGEL VUX-1 UAV)具有光達高價值功能多重回波性，但市售之無人機光達儀器大部份不具備多重回波之功能，彰顯本設備之獨特性。多重回波性具有更多穿透植被之訊號，可以直接取得地面之反射點。當能夠穿透植被獲取越多地面點，代表光達的穿透率越高，進而凸顯密林區的地表起伏狀況，產製出解析度更高之數值高程模型。

針對寶來植被覆蓋區進行穿透率的評估，本研究選擇植生茂密之植物覆蓋區，而穿透率主要探討光達掃描資料在植被覆蓋區下取得地面點數量的多寡，以準確的計算在此種植被覆蓋下的點雲穿透率。若以選擇全區域之點雲來進行穿透率的計算，因山崩裸露區中，並無植生覆蓋，故會增加地面點的數量，提高穿透率，而無法準確的獲得能穿透植被後取得地面點的穿透率。因此我們會計算比較觀察區在植被濾除前後點雲數量，並觀察其點雲模型狀況。

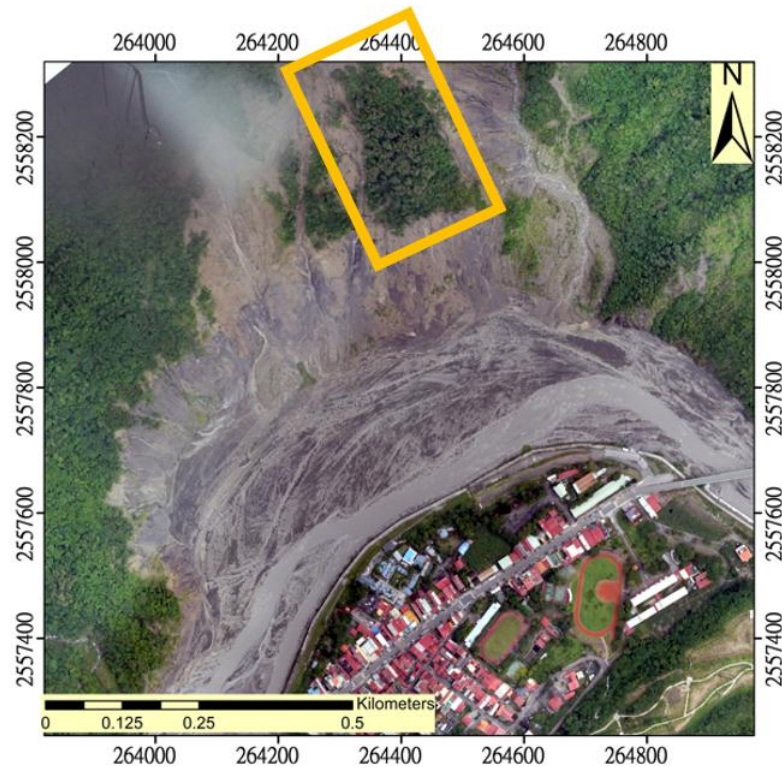


圖 4-16 本研究探討穿透率所選定之植被覆蓋區

要探討穿透率前，必須先進行點雲分類，透過軟體分出地面點之後，即可開始分析。本研究區域將兩個區域進行兩期的穿透率計算，而比較的地方是自行定義的植被覆蓋區，因主要探討在茂密植被地區獲取地面點狀況，為了避免其他正常裸露區域造成穿透率的影響，所以自行定義的植被覆蓋區整區皆為樹林沒有裸露地，讓穿透率的成果更接近真實狀況。造成穿透率差異的有光達的雷射入射角、樹林密度、飛行高度、覆蓋物高度、坡度皆有關。

本研究區植被覆蓋區域掃描所獲得總點雲數量為 5,221,451 個點，而分類出地面點點雲數量為 1,512,590，經由穿透率公式(式 4.1)計算穿透率為 28.97%。

$$\text{穿透率} = \frac{\text{地面點數量}}{\text{總點雲數量}} \times 100\% \quad (4.1)$$

表 4-8 寶來區穿透率計算結果

地區	總點雲數	地面點雲數	穿透率
植被覆蓋區	5,221,451	1,512,590	28.97%

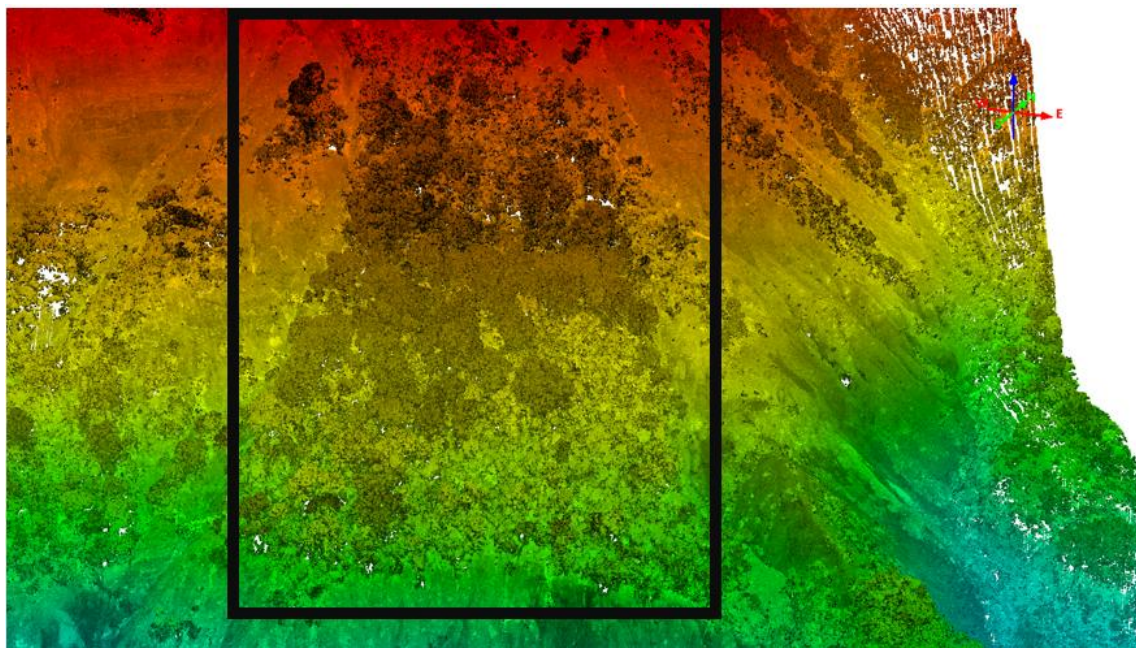


圖 4-17 寶來區植被覆蓋區總點雲狀況

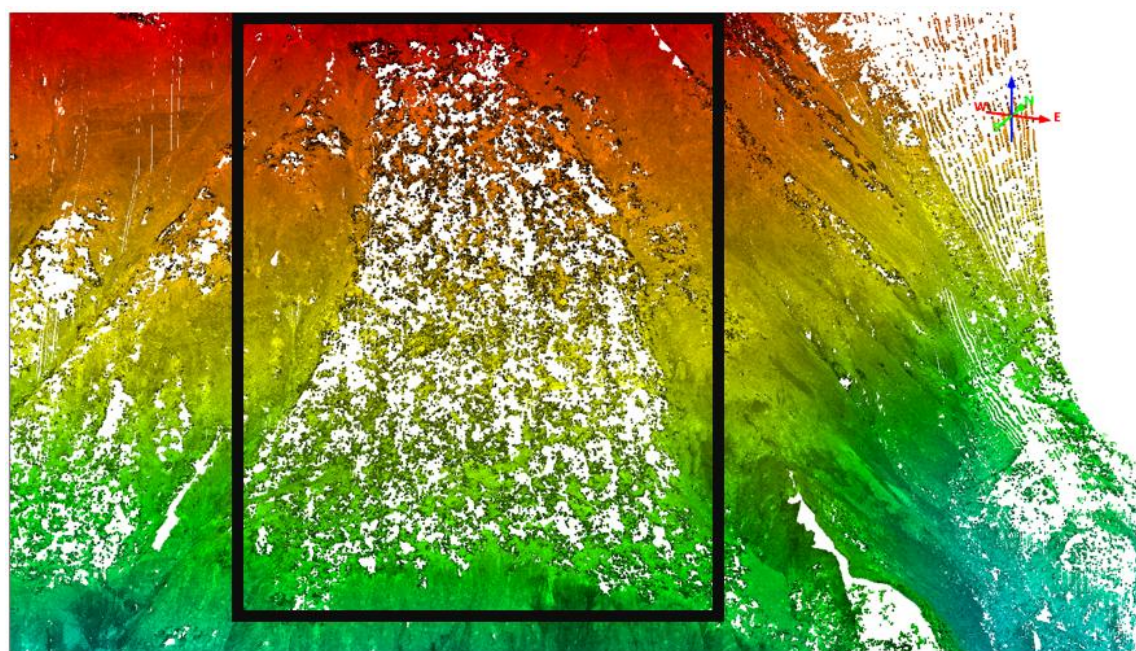


圖 4-18 寶來區植被覆蓋區之地面點雲

第四節 空中及地面光達掃描資料合併

本計畫區內，因邊坡高陡且延長，無人機光達水平之飛行掃描，一部份區域受限於地形特性而不易完整取得。反觀地面光達，因儀器架設於地面上，一方面不受載具於空中飛行之風險，二方面針對高陡(甚至倒懸之邊坡)，儀器及目標物間之掃描角度區域不致遭覆蓋遮蔽。因此結合空中及地面光達於測繪目的，推估可以有效解決植生覆蓋等透空度不佳的困境，如圖 4-19 所示。為評估本臆測之可行性，因此本計畫同樣針對寶來地滑區，於同一時間點上，進行兩種儀器之測繪工作，各自建模，之後再針對兩者所產製之光達點雲數據，進行資料之整合及合併，以評估本方法之可行性。此一方法當為學界首例，若可完成，對於高陡邊坡之災害評估及預警，提供新的資料收集法。

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(或稱共軌點) 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軌點位置實施測量

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拼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拼接問題，本計畫擬引進及使用最新地面光達自動拼接技術於本計畫之資料掃描工作。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拼接，可方便快速的進行後續資料的分析工作。

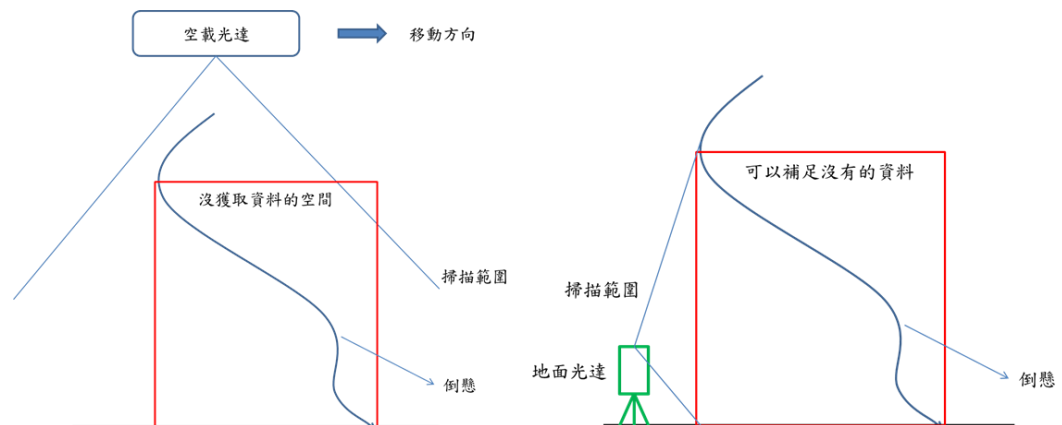


圖 4-19 地面光達掃描工作之資料收集及補強

針對本議題，本計畫結合空中及地面之光達資料，並基於現地之連接點、控制點，順利完整地接合空中及地面兩種光達資料。圖 4-20 指示測區之無人機光達測繪資料，而圖 4-21 則呈現兩者資料整合後

之成果，圖中清楚指出了結合兩者資料後，其點雲之覆蓋率大大提昇。而圖 4-22~4-25 則以低角度放大後點雲分佈情況來呈現兩者之差異，圖 4-22 及 4-23 呈現地滑區內植生受滑動影響而傾斜，比較兩圖，可以更清楚指示樹幹上之點雲密度差異，間接指示了倒懸邊坡之適用性。另圖 4-24 及 4-25 則另呈現寶來村及河堤邊之點雲密度差及資料之完整性，尤其於沿河之路燈燈柱上所呈現之資料差異，更能凸顯資料庫之空間解析度及視角上的差異。

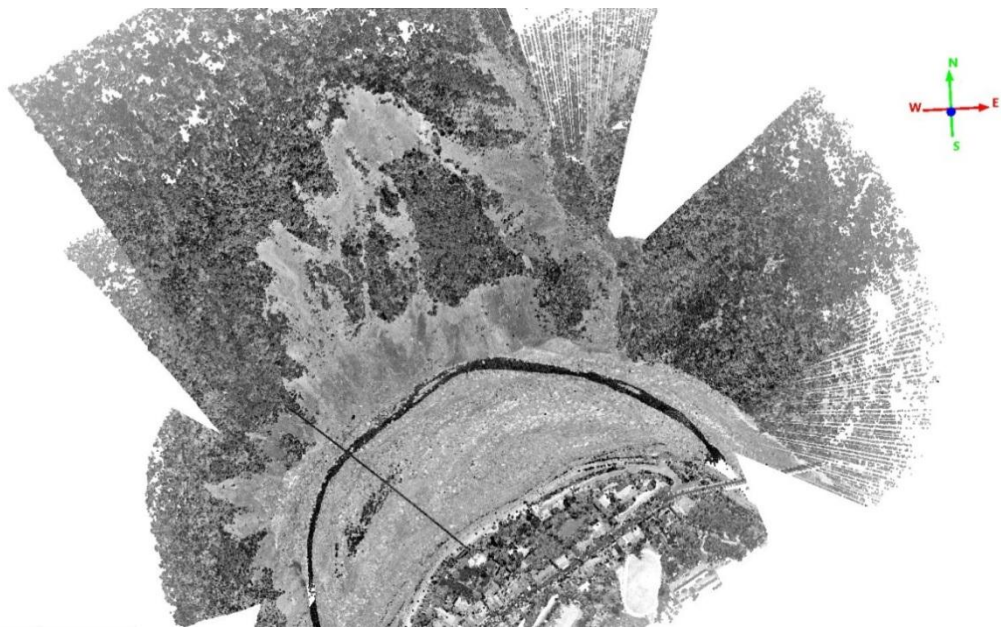


圖 4-20 寶來區無人機光達點雲資料

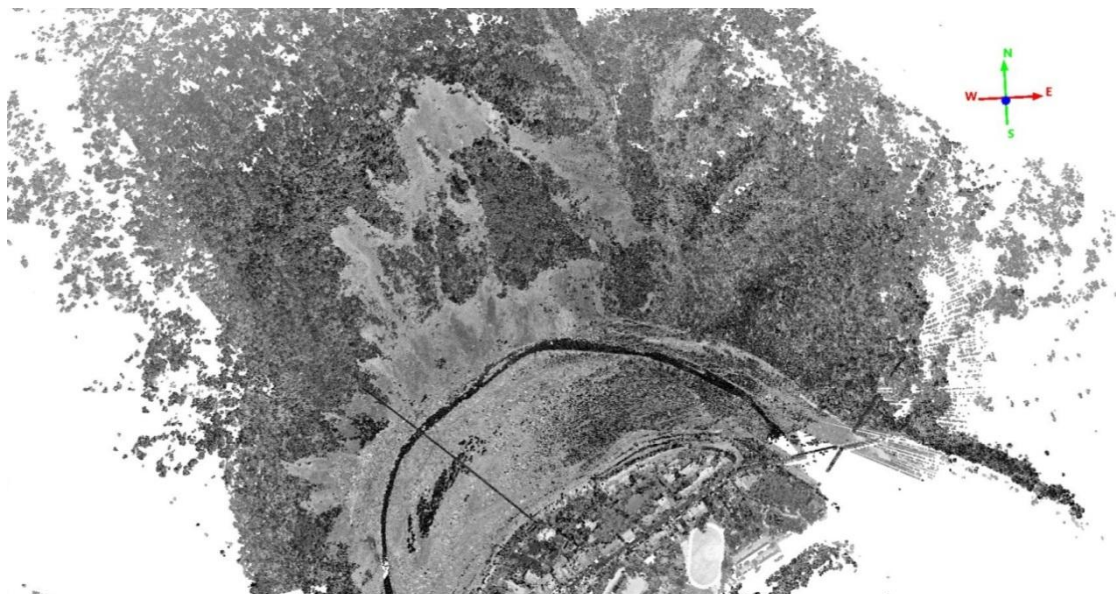


圖 4-21 寶來區所有光達點雲資料



圖 4-22 寶來山崩區坡面上無人機光達點雲資料



圖 4-23 寶來山崩區坡面上所有之光達點雲資料



圖 4-24 寶來村及河堤上無人機光達點雲

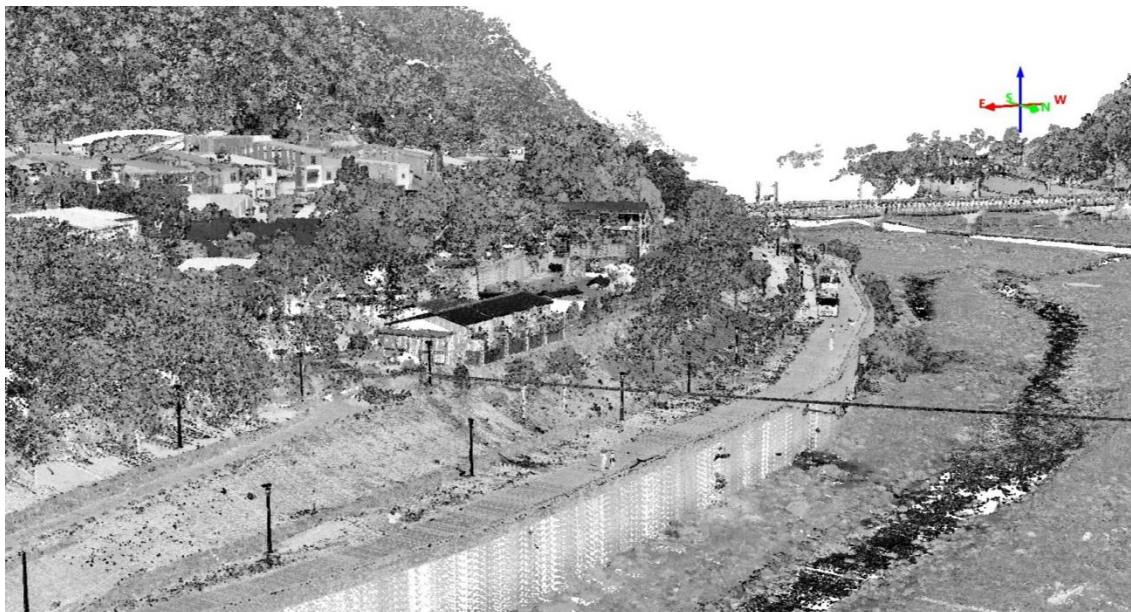


圖 4-25 寶來村及河堤上所有之光達點雲資料

第五章 成果討論

寶來區域的崩塌是持續發生，透過多時期光達所掃描的資料，選出平差成效最佳，精度最高的數值模型，將兩期的資料比較，探討坡地監測的應用，在本研究中預計寶來區域共進行兩期光達掃描，可以藉由兩次掃描的結果，探究兩期光達掃描作業期間之豪大雨(本年度之梅雨季期間)對坡地崩塌所造成的影響。

第一節 崩塌地形變化

將兩個時期光達掃描的點雲資料經航帶平差後，其光達點雲分類後可產製之各不同時期之數值地形模型，如圖 5-1 及圖 5-2 所示。若將兩期的數值地表模型相減，成果能清楚表示在這段時間內地形產生的變化。數值地表模型(digital surface model, DSM)相減取得的高程落差區域，結果顯系有明顯的奇怪落差區塊，研判主要受植被所影響。因此再使用數值高程模型(digital elevation model, DEM)來評估地貌變異，兩者相減取得 DEM 落差區，而 DEM 落差區因已經將剛剛產生影響的植被及建物濾除掉了，所以沒有那些特別的落差區塊，能夠正確顯示出這段時間內地表的變動情況，而能夠根據這些落差區域的變化狀況來推斷出山崩區域、範圍及地貌變化。

寶來地區光達資料所產製之數值地表模型解析度為 10 公分，在

地形上平面位置差異大於 10 公分以上的特徵，應都能展示出來。此類資料及解析度的成果，有助於對於山崩區整體變位的計算，透過兩期簡單的比較，即可了解變化之區域。

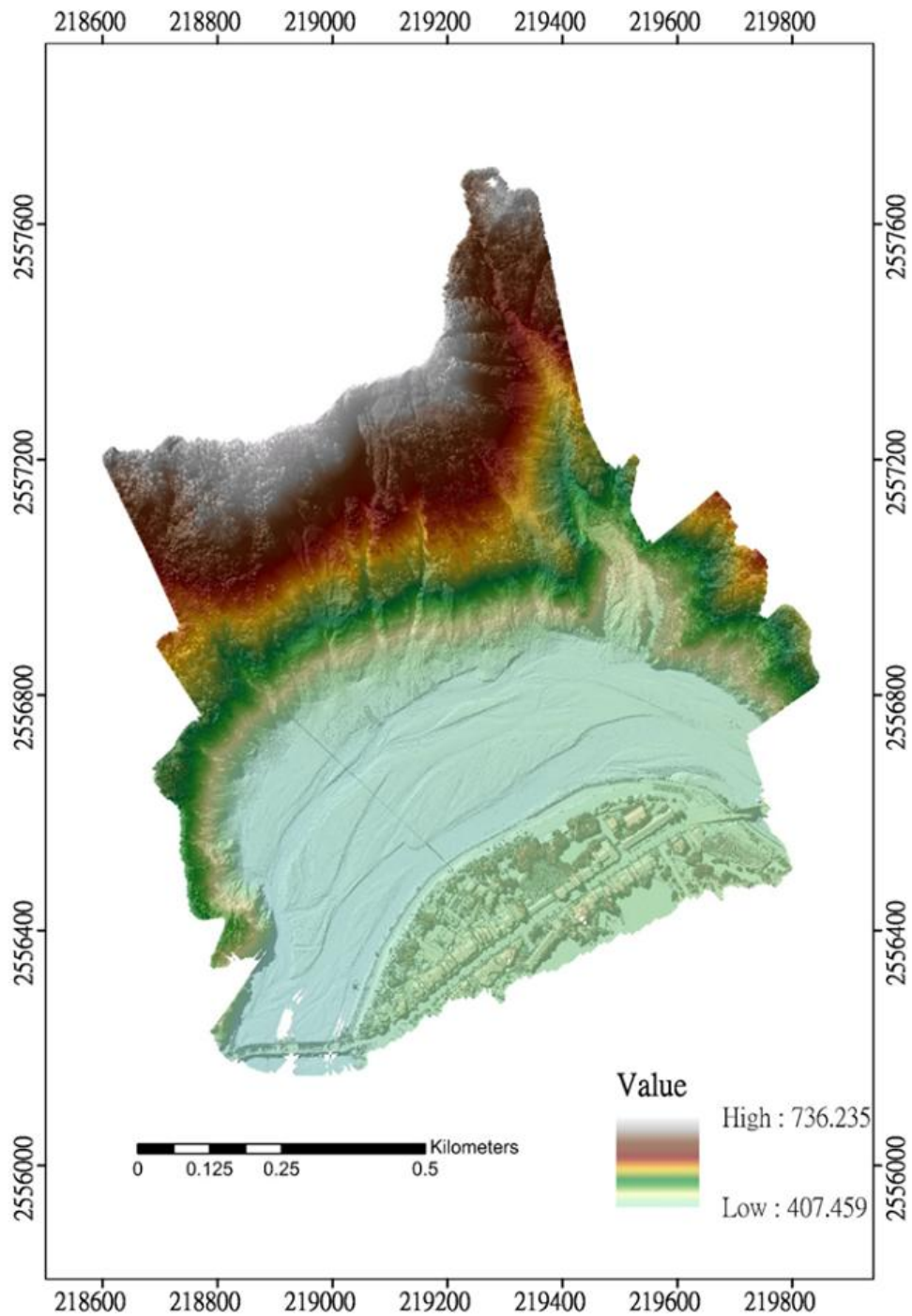


圖 5-1 研究區無人機光達數值地表模型(DSM)

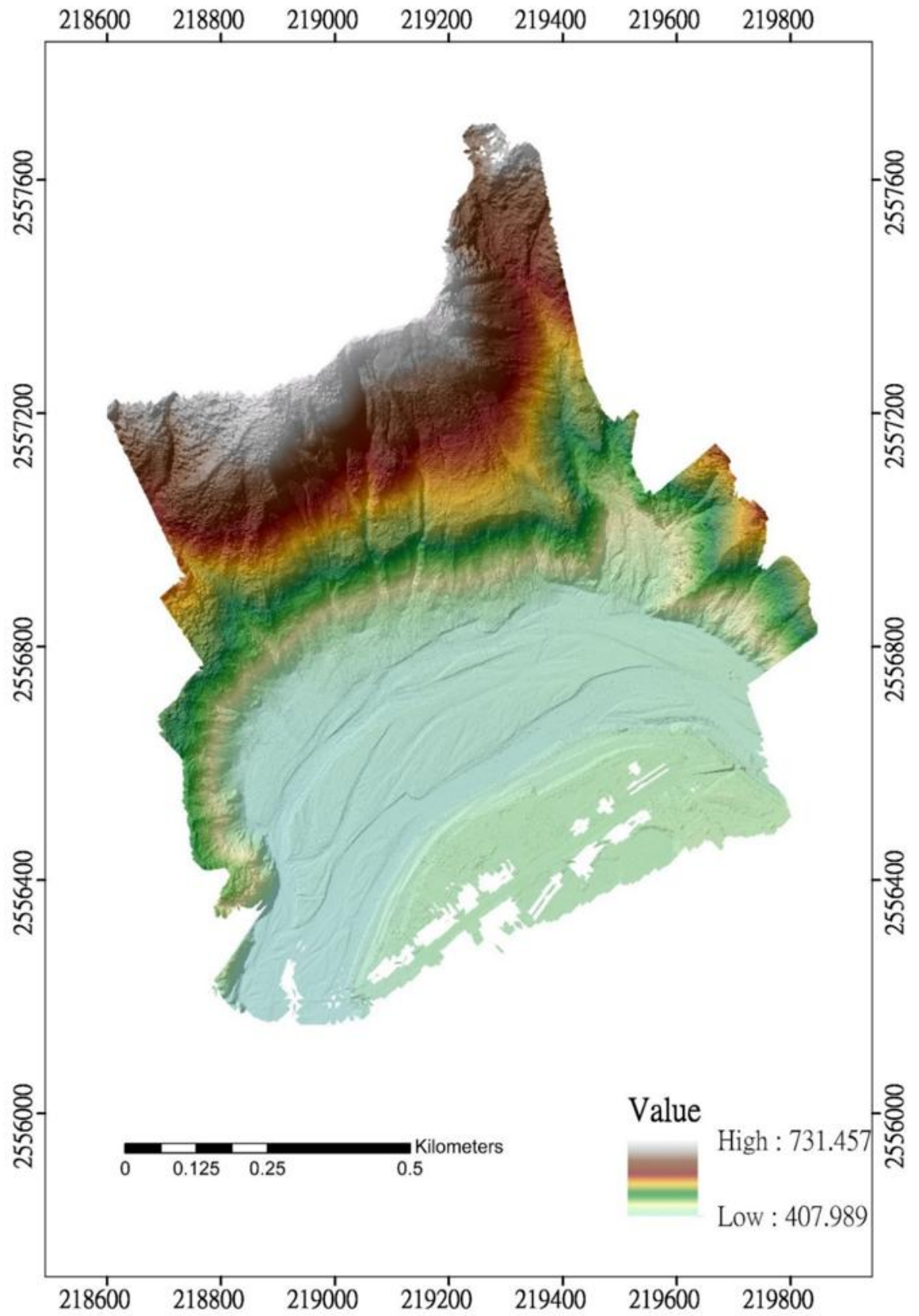


圖 5-2 研究區無人機光達數值高程模型(DEM)

透過第二次掃描資料使兩期的數值模型相減取得高程落差區，能夠有助於在判釋山崩時，能夠直觀的看出何處是崩塌，何處是堆積的，但在數值地形相減的高程落差區在山區上有明顯大量的紅點影響，研判應該是樹林所造成的影響，而後續使用濾除植被及建築的數值高程模型來進行相減，取得的落差區上就沒有這些影響，能更讓崩塌區域更加趨近於真實崩塌狀況。

第二節 兩期資料空間對位

由於主要崩塌區皆在河的對向，不易於跨過河流去進行 GPS 的現地測量，因此選擇了替代方案。在研究中透過數值模型在沒有變動的區域選取散佈的 15 棵樹(圖 5-7、圖 5-8)，比較兩個時期這 15 顆樹的座標，來推斷兩個時期的數值模型在沒有變動的區域是吻合的。

取得表 5-1 為在兩個不同時期的數值模型中沒有變動區域來點選樹的位移量，而根據計算取得這 15 棵樹在兩期的平面位移量為 8.3 公分、高程位移量為 17.4 公分，推斷為合理的位移量，判定此 15 棵樹在兩期的無變動區域是吻合的，且 15 棵樹為散佈在山區模型，以此證明此兩期模型的無變動區域位置是固定的。

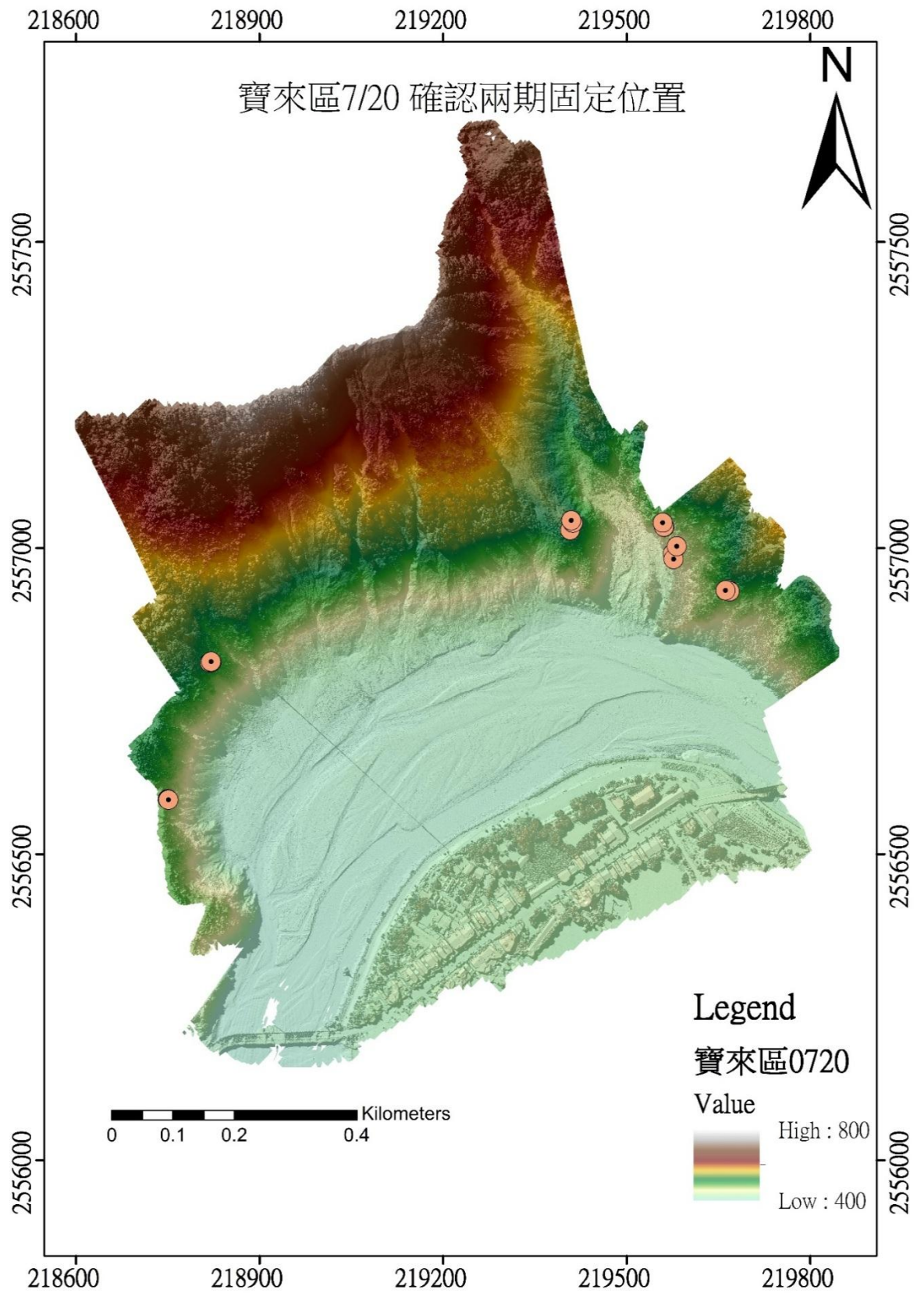


圖 5-3 寶來區所選取之特徵樹木位置

表 5-1 兩期不變動區域樹木位移量

樹	平面位移量	高程位移量
1	0.101	-0.143
2	0.106	0.341
3	0.086	-0.154
4	0.077	0.092
5	0.086	0.101
6	0.073	-0.117
7	0.070	-0.162
8	0.094	0.216
9	0.071	0.306
10	0.065	-0.128
11	0.077	0.105
12	0.066	0.083
13	0.091	0.122
14	0.099	-0.125
15	0.063	-0.182
標準差	0.068	0.169
均方根誤差	0.083	0.174
平均絕對誤差	0.055	0.151

單位:公尺

第三節 崩塌量體計算

確認兩期模型的位置固定後，即可以進行後續崩塌量體的計算。為計算量體差異，首先確認資料庫空間位置一致。本研究首先以未變動之市區來進行控制點及檢核點資料及精度評估，並進行之整體測區之資料庫空間對位檢核。另因紅外光射線能量易為水體所吸收而無法進行河道水深測量。因此本研究之主要山崩量體觀測計算區之選定，在排除上述之市區及水體區後，針對主要崩塌區及鄰近之山區進行兩期高程差值進行計算(圖 5-4)，將所得結果將主要觀測的山崩區域依照崩塌行為分為山崩加積區(圖 5-5)以及崩塌虧損區(圖 5-6)，堆積區是根據前後兩期地形相減後，為正的判斷為堆積加積區域為負的則是判斷為崩塌虧損區域。

依兩期的高程差值所圈繪之崩塌及堆積區域，其高程差上乘以單位網格面積，即可計算這段時間內地形之變異，尤其是崩塌虧損量體及堆積加積量體，如表 5-2。計算所得堆積區的變動面積為 32.6 公頃，而變動體積為 0.52 百萬立方公尺，崩塌區的變動面積為 22.2 公頃，變動體積為 0.4 百萬立方公尺。至於變動體積在崩塌及堆積上並沒有相等，是由於掃描區域沒有涵蓋到整個崩塌區域，上部分的崩塌堆積到掃描區域，因此堆積的變動體積大於崩塌的變動體積。

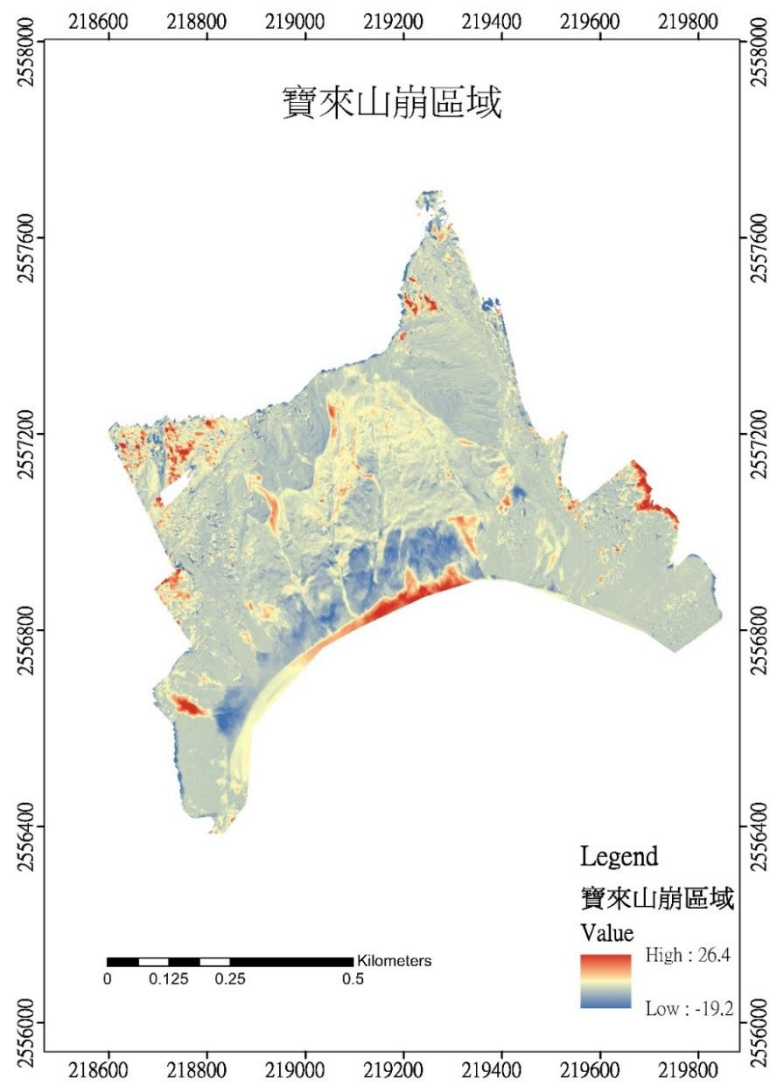


圖 5-4 寶來山崩區域

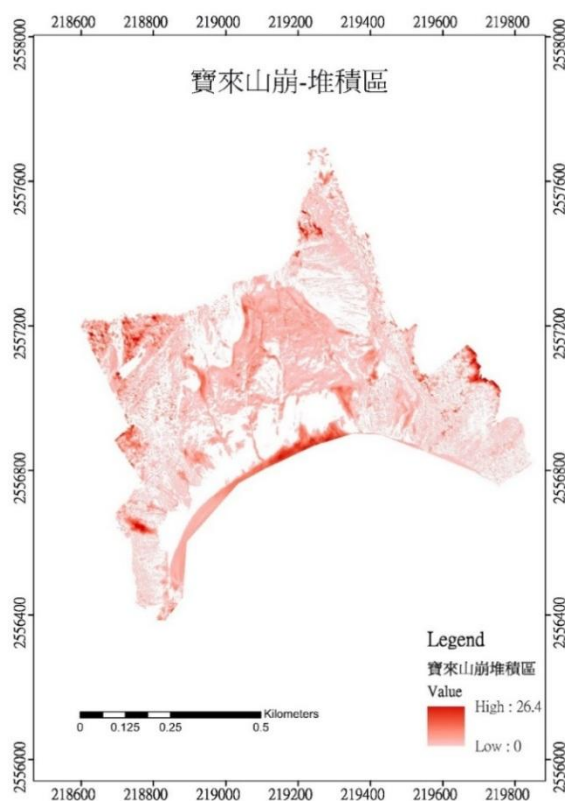


圖 5-5 研究區域內之山崩加積區

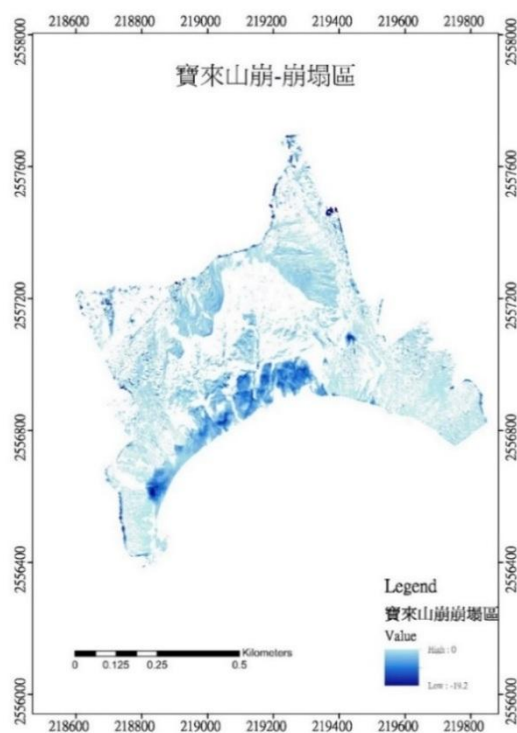


圖 5-6 研究區域內之山崩虧損區

表 5-2 寶來山崩區之量體計算

區域	堆積區	崩塌區
變動 面積	32.6 公頃	22.2 公頃
變動 體積	0.52 百萬立方公尺	0.4 百萬立方公尺

第四節 歷年崩塌位移計量

寶來區域的崩塌本研究團隊已長期監測寶來地區，在本研究進行無人機光達掃描寶來區域之前，都是使用無人機航空攝影測量來監測崩塌區域。根據團隊歷年來所做得監測，從 2015 年-2017 年之間是持續崩塌的崩塌面積持續擴大，而到了 2017 年 11 月 17 日至 2018 年 1 月 18 日間崩塌面積幾乎不再變動，判斷該時期此區域已呈穩定狀態。但在本研究無人機光達在 2018 年及 2019 年兩期掃描寶來區域發現，崩塌區域又開始擴大。以下成果為寶來區無人機攝影測量在歷年來崩塌區域的變化。

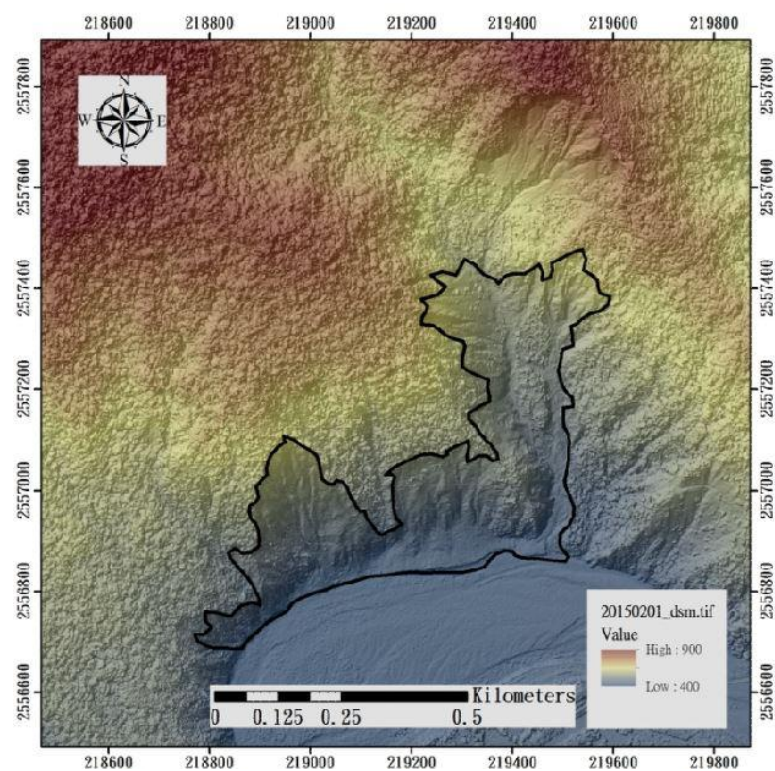


圖 5-7 寶來區崩塌歷年監測 2015/02/01

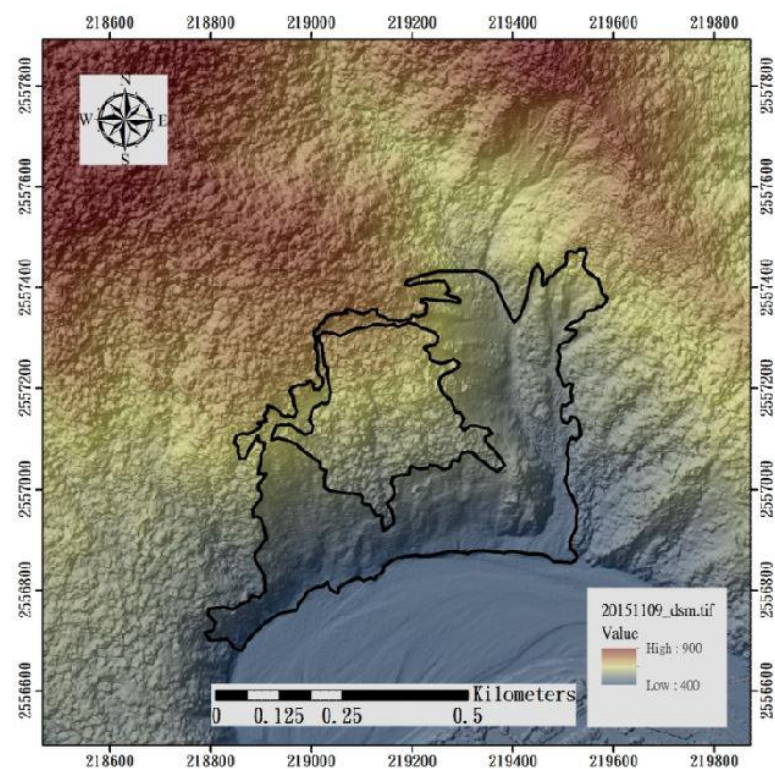


圖 5-8 寶來區崩塌歷年監測 2015/11/09

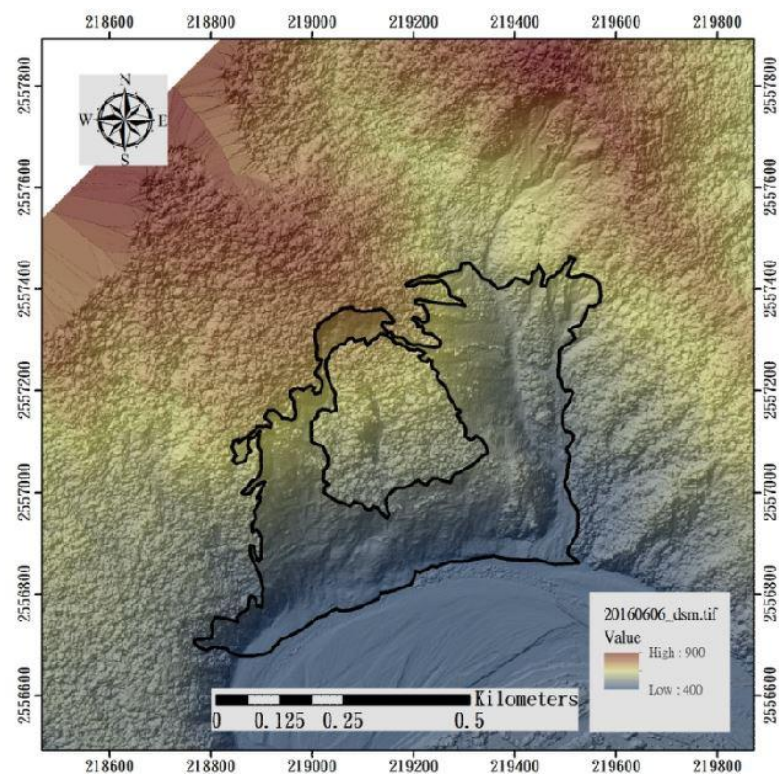


圖 5-9 寶來區崩塌歷年監測 2016/06/06

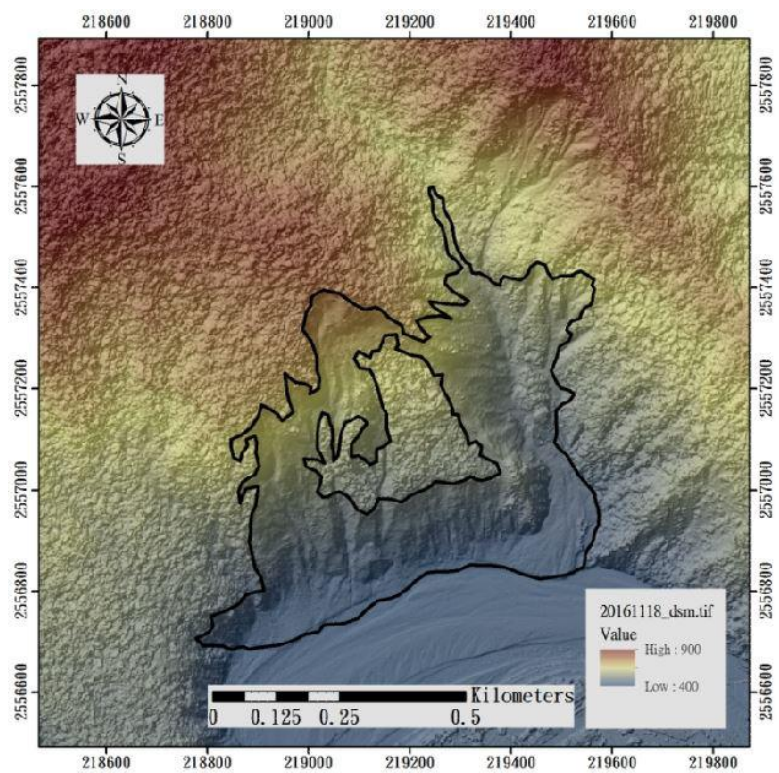


圖 5-10 寶來區崩塌歷年監測 2016/11/18

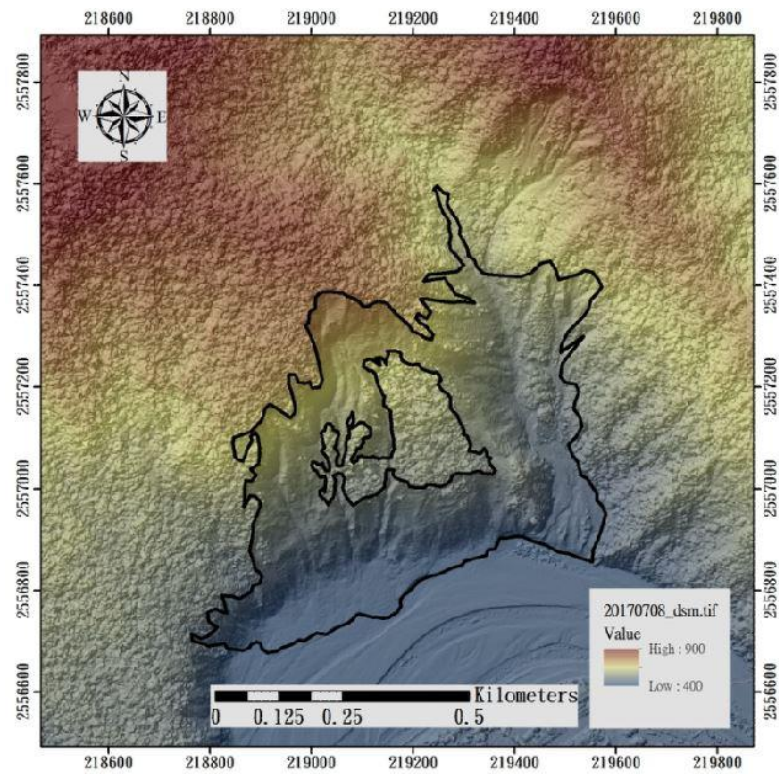


圖 5-11 寶來區崩塌歷年監測 2017/07/08

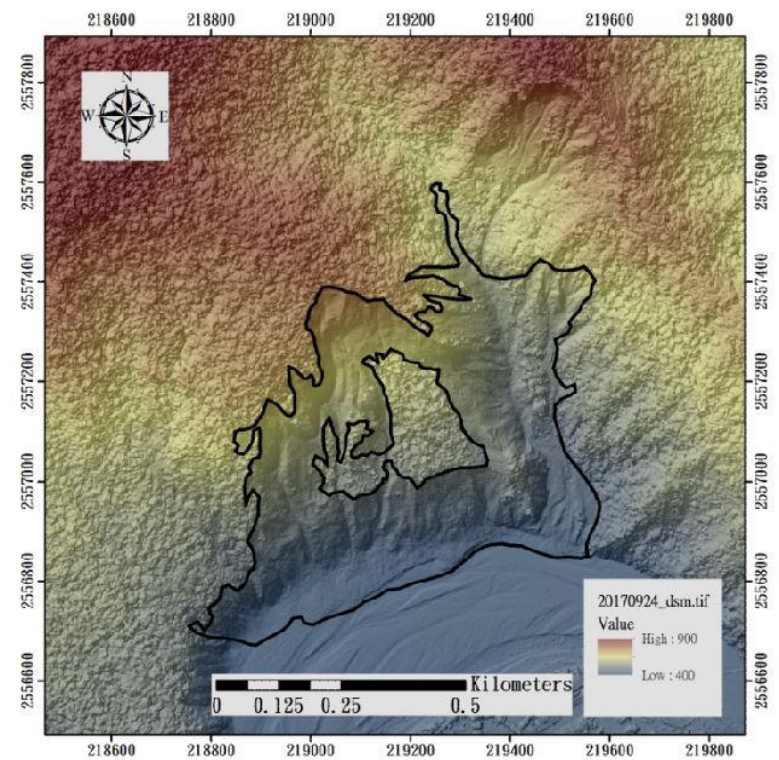


圖 5-12 寶來區崩塌歷年監測 2017/09/24

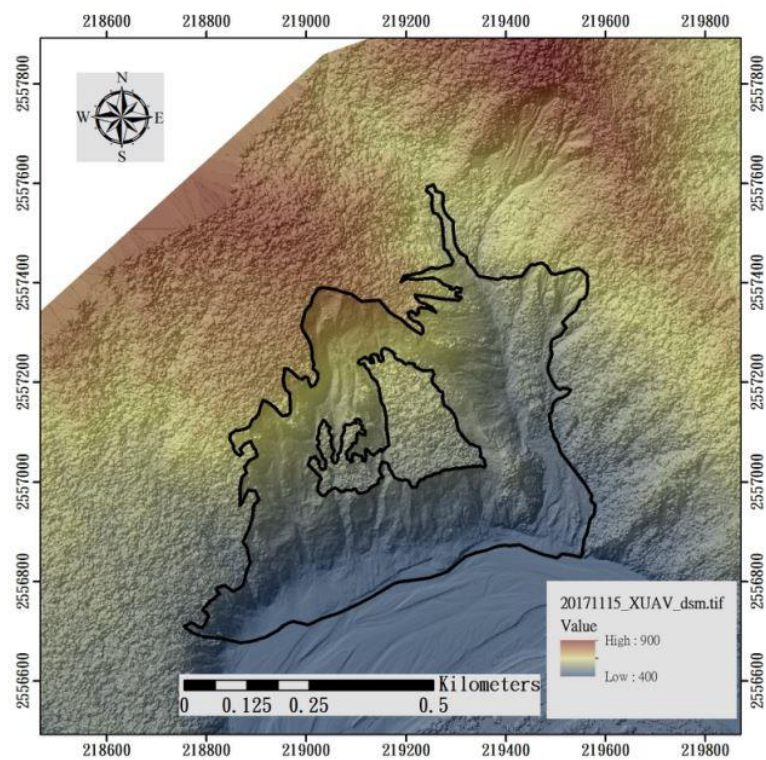


圖 5-13 寶來區崩塌歷年監測 2017/11/15

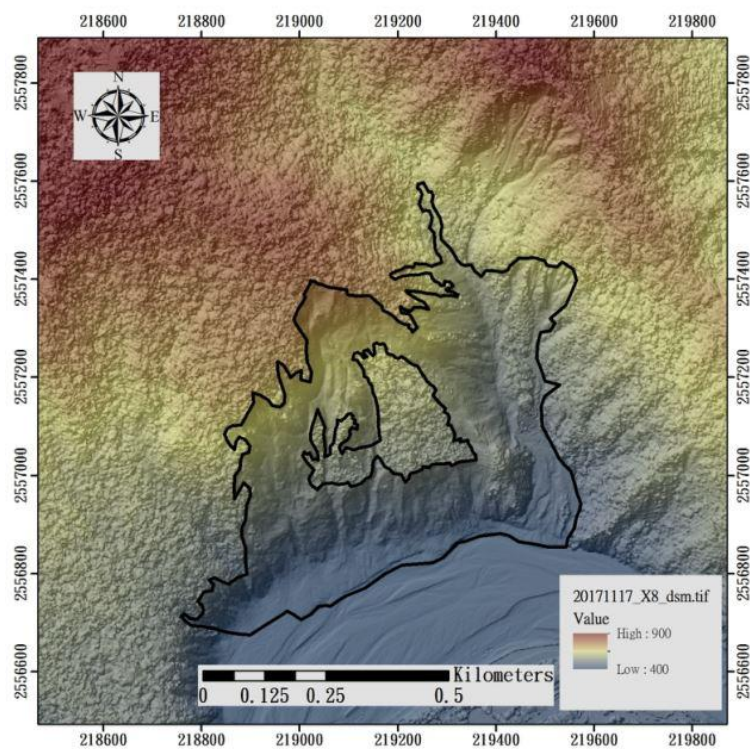


圖 5-14 寶來區崩塌歷年監測 2017/11/17

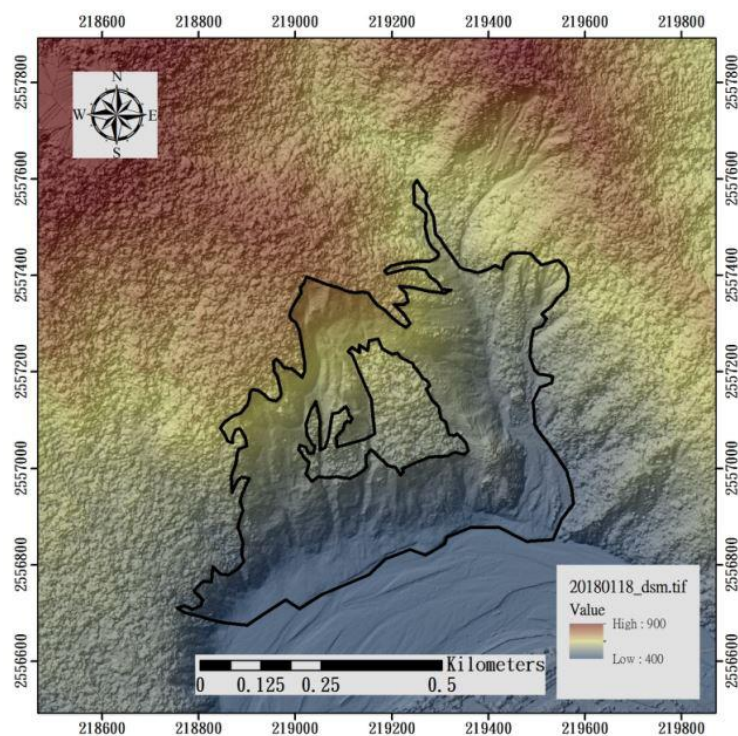


圖 5-15 寶來區崩塌歷年監測 2018/01/18

表 5-3 寶來區歷年崩塌面積

日期	全部崩塌面積(m ²)	區域崩塌面積(m ²)
2015/02/01	228500	-
2015/11/09	324600	87300
2016/06/06	339600	75700
2016/11/18	369200	60100
2017/07/08	371500	47300
2017/09/24	374500	47500
2017/11/15	374000	46000
2017/11/17	370400	46300
2018/01/18	370500	45600

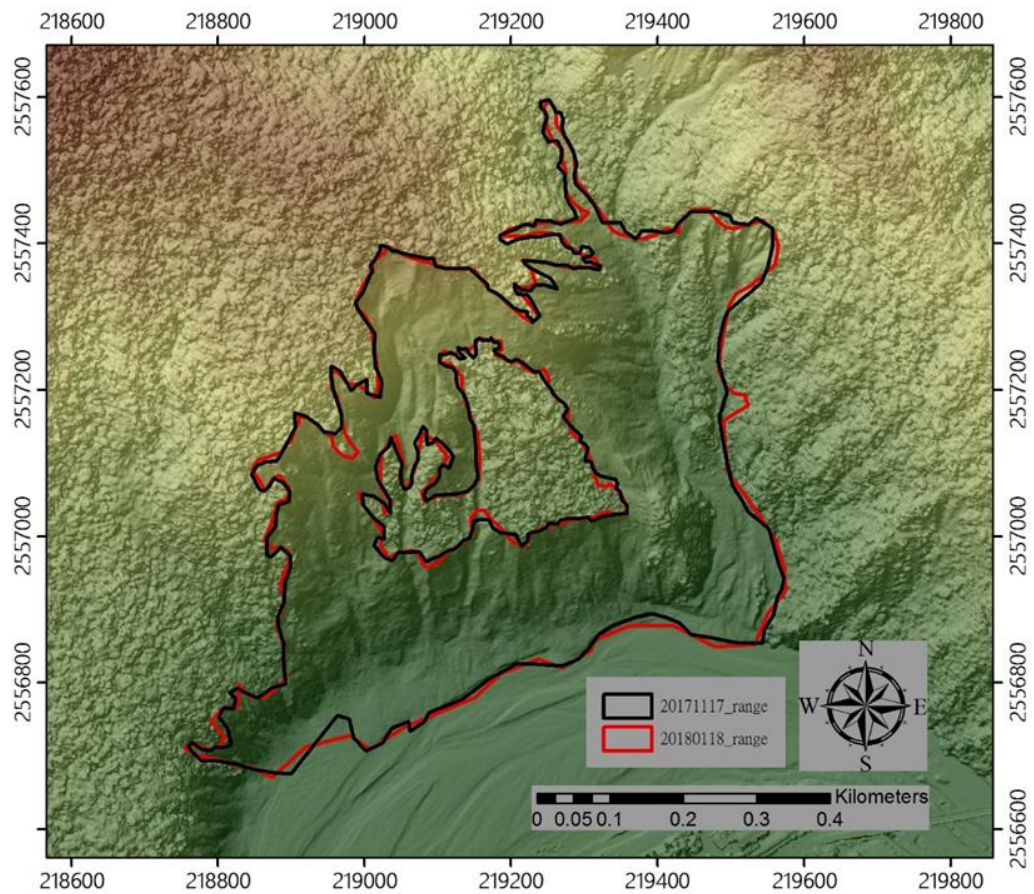


圖 5-16 寶來區 2017 至 2018 崩塌趨近於穩定

寶來地區歷年來的影像資料經正射及地形建模後，相關資料已建置出多時序的空間資訊。資料庫清楚的呈現在這段時間，寶來山崩區之崩塌變化狀況，從原先的持續崩塌一直到一段時間後，崩塌趨近於穩定。但在進行本研究無人機光達掃描後，崩塌又再次的發生、崩塌範圍擴大並再次下滑。

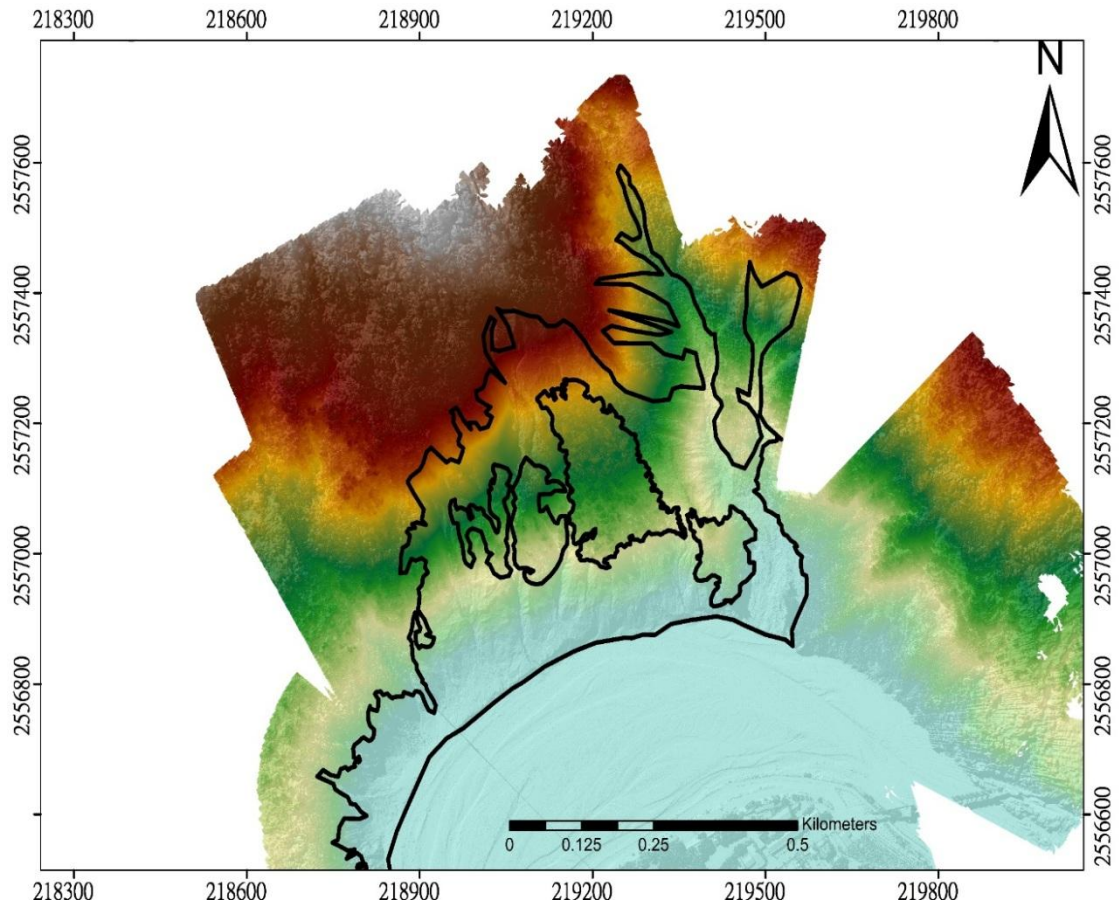


圖 5-17 寶來區 2019/07 崩塌範圍

原本判定穩定的 2017 年 11 月 17 日至 2018 年 1 月 18 日，與後續持續監測的 2019 年 7 月所掃描的崩塌範圍有增加的趨勢，因此此區域目前不再穩定，後續應該持續監測此區域。

第五節 山崩區水平位移分析

本研究為了探討寶來地區山崩地是否產生水平位移，利用正射影像將易判釋的地物，如樹木及建物點選出來與前後期影像作比對(如圖 5-18 所示)，探討點位之水平位移量。由正射影像比對後發現災前災後的相同樹木有明顯滑移改變，將前後期影像選取相同樹木，以此

方法計算前後期樹木之位移距離，藉由計算距離來推估當時寶來崩塌區域之地表位移，作為山崩地平面位移依據。由於各時期影像均有整體偏移的現象，因此在進行影像地物點選之前需要將研究區域外圍，建物或標線等不動的點位進行拉伸，將各期影像之水平調整到一致，再把不同時期同一地物因山崩造成位移的點位點選出來，對此比較點位之位移量。

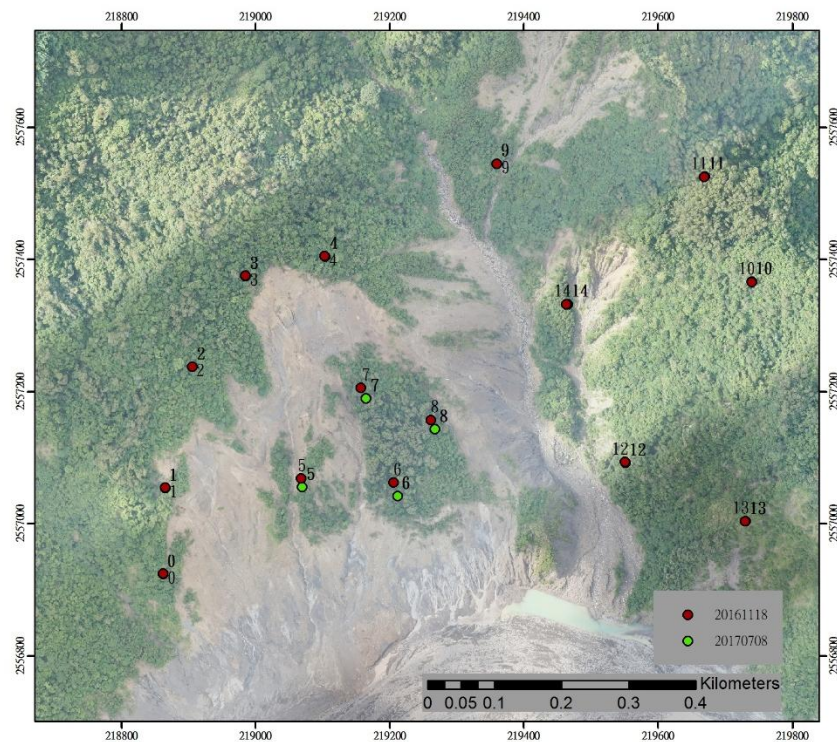


圖 5-18 地物點位位移示意圖 2017/07/08

由正射影像判釋得到各前後期影像的位移量，觀察後發現在 2015 年 02 月 01 日至 2017 年 07 月 08 日間各前後期影像的植被變化差異最大。由於各期影像所能判釋的樹木不盡相同，因此經挑選後選出

10 至 14 棵樹木比較，並逐一測量樹木的移動距離。發現中間崩落塊體位移量最大，多數位移量都超過 10 公尺，尤其是第一期比較之影像最為明顯，而山崩地外圍的點位移動距離小，較無位移現象，位移量都約略落在 3 公尺內。藉由一連串比較可約略觀察出滑動面的區域，僅額外分離的塊體有較顯著的位移量，且山崩地滑動的方向均呈現往下邊坡偏東一些。其餘超過崩塌區的外圍植被狀況，沒有太多位移的現象，表示無其他塊體下滑產生分離的情況。以正射影像上所圈繪之特徵樹冠，兩時期所見之的位移如圖 12 所示。表 5-4 呈現本區歷年正射影像計算所得之地表位移量變化情形，其中指示兩段期間，以及全部累積之地表位移量。

表 5-1 寶來山崩區之水平位移量(單位:公尺)

canopy number	171117- 180118	170708- 170924	total disp.
1	0.325	0.647	26.243
2	1.022	0.858	24.123
3	0.217	1.098	9.431
4	0.582	0.469	35.145
5	0.636	0.368	38.767
6	0.958	0.541	70.567
7	0.998	0.651	34.578
8	0.917	0.404	59.401
9	0.328	0.469	57.543

10	0.000	0.711	11.775
11	0.000	0.421	31.935
12	0.593	0.782	8.332
13	0.687	0.660	4.931
14	0.402	0.556	20.035
15	0.000	0.496	4.595
16	0.000	0.405	4.620
17	0.284	0.505	2.868
18	0.096	0.455	3.507

第六章 綜合效益

本計畫除了達到當初預期科學研究目標外，並提供重要技術—無人機光達測繪之開發及應用，這資料及技術相對於國際上，正處於領先地位。執行計畫過程中，配合國際學術合作促進國際交流，並將成果發表於國際研討會與國際期刊，提昇我國在山崩領域的能見度與知名度。本計畫屬基礎科學研究並且能針對國家防災整體性的規劃提供更多且更詳細的山崩資料與成果，作為評估大規模山崩潛勢災害之劃定、監測等的重要依據。配合防災減災及國土規劃策略之推行，其成果亦具有相當高的經濟效益。具體研究成果如下：

第一節 科學研究成果

完成以台灣案例為主的活動造山帶大型山崩發生、運移及堆積特性分析，瞭解其在地形演育中扮演的角色，相關成果正積極整理投稿中。另一方面，我們無人機技術之整合及應用亦獲得國際同儕之關注，故於今年 EGU 2019 子題 High Resolution Topography in the Geosciences: Methods and Applications 獲邀為會議子題之發言人 (Solicited speaker)。

第一節 民生與經濟效益

台灣處於歐亞板塊與菲律賓海板塊碰撞作用下的活動造山帶，是

世界上最重要的地體構造變動與地形快速演變區域之一。在全球暖化的壓力下，極端氣候及海水面上升會增加地質災害的規模與頻度，並進一步加速地形的演變。因此，本整合型計畫如能順利執行並達成上述預期之目標，其成果除了獲得國際學術界的重視與引用外，對國土計畫、山林保育、城鄉發展暨防災與減災皆會有明顯的助益，進而使人民能安居樂業，產業能穩定發展，達成整體的民生與經濟效益。

本計畫的研究成果計畫中同時運用到特定區域可能發生大型山崩之地點分析，可以掌握山崩與土石流災害於未然。本計畫建立的分析方法與應用實例將可轉移到政府相關之救災防護單位，提供相關研究成果及資源，對全國可能發生大型山崩之地點進行調查與分析，落實整體計畫成果。

參考文獻

1. 王麗英、宋偉東，機載 LiDAR 數據航帶平差研究進展，2012。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 內政部，發展高光譜與光達技術結合之應用工作案，2013。
6. 黃清美，空載光達點雲穿透率探討，2007。
7. 王星為，無人機光達系統整合與精度評估，2017。
8. 江晉霆，無人機光達系統率定及平差之精度評估，2018。
9. 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。
10. 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。
11. 陳馳，低空 UAV 激光點雲和序列影像的自動配準方法，2015。
12. 應用 LiDAR 與航照影像於崩塌地判釋之研究，2006
13. 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

14. 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。
15. 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
16. 楊善智，數值高程模型(DEM)之品質評估，2007。
17. 基于总体最小二乘匹配的机载 LiDAR 点云航帶平差方法，袁豹，2016
18. 机载 LiDAR 数据航帶平差研究进展，王丽英，宋伟东，孙贵博，2016
19. 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。
20. 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。
21. 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。
22. 謝有忠，地質百科-光達，<https://goo.gl/awYX4H>。
23. SKYLINE UAV, VAPOR55 UAV HELICOPTER, 2017,
<http://www.skylineuav.com.au/fleet/vapor-55-uav-helicopter/>
24. RIEGL, VUX-1UAV DATASHEET, 2016
25. Bisheng Yang ,Chi Chen, Automatic registration of UAV-borne

- sequent images and LiDAR data, 2015.
26. LIDAR Technology Co., Ltd., "The Traditional LiDAR and Full Waveform Technology", 2013.
 27. 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.
 28. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D., "Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory," Remote Sensing, 2012.
 29. Ryan A. Chisholm, Jinqiang Cui, Shawn K. Y. Lum and Ben M. Chen, UAV LiDAR for below-canopy forest surveys, 2013
 30. Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.), "Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing, " CRC press, 2008.

附錄

附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	P.34 四個時期的影像是否有一些分析比較可以呈現	謝謝委員意見。草嶺山崩區不同時期之地形變異量分析簡單論述於本節末段，另草嶺山崩區之地貌改變不在本計畫的討論範圍，故僅簡要說明。
二	P.47 是否增加說明邊坡在何種狀況要採用地面及空載光達一起運作的模式	謝謝委員意見。相關差異及整合之優勢於期末報告內比較及說明。
三	P.57 請補充以何種標準研判位移的情形，有無可能對上、中、下坡面物件加以探討說明	謝謝委員意見。其分析研判方式於期末報告內加強說明。針對上、中、下邊坡物件，因無法直觀區隔，故一起合併討論。
四	P.63 崩塌土方與堆積土方的差異應考量說明	謝謝委員意見，相關量體計算納入期末報告討論。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	P.63 至 P.67 除崩塌範圍演變外，上游是否有增加亦可補充	謝謝委員意見。本區上游之崩塌的確也在持續擴大，但上游區域的崩塌和本研究區內主要崩塌之邊坡單元並不相關、也不連續，故暫時無法加以討論。 本議題是一好議題，本計畫期末的崩塌地監測範圍已擴大，並著手進行資料收集，未來亦將持續監測。
六	P.10，「本”論文”研究區域…。」論文應改為”計畫”。	謝謝委員意見。相關用字已修訂。
七	報告書內之行距等排版請統一	謝謝委員意見。報告內之行距排版已本期末達告內統一。
八	報告書內提之計畫的”畫”使用上請統一	謝謝委員意見。相關用字已統一。

項次	審查意見	回覆辦理情形
九	4.2.1 之內文描述最後一段，請將圖置於文字描述之後以便閱讀	謝謝委員指導，已修訂。
十	P.52 文中提及”自行定義的植被覆蓋區”，請問如何定義？是否有選取該區域之依據或參考	謝謝委員意見。本文所指”自行定義的植被覆蓋區”，僅只是針對大崩塌體內整群之植生樹木而言，該植物群並未因滑動體之運移而死亡。另該區內之山崩位移量，亦可以正射影像上所呈現之特徵植被樹種來估算。相關內容詳期末報告之5.5 節。
十一	P.60 文中提及之圖 5.9、圖 5.10…。等與圖之編號無法對應	內文及圖號已修定

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	由於紅外線易被水體吸收，在山區常下雨或午後山崩之影響，是否會造成測量誤差增大。	水氣的存在確會影響紅外線的幅射能力，致使可測量的距離變短。但這種情況在光達的測量上較不易出現，因無人機在天候不佳的情況下，不太可能執行任務，且只是影響可量測的距離。
二	精度及實用性皆很高，若執行成本可降低值得大力推廣，特別是快速變化之崩塌場址。	謝謝委員意見。
三	無人機光達系統目前實際在運用上，費用如何？及目前可以執行的單位為何？	謝謝委員意見。無人機光達因為儀器單價高，故相對風險之成本亦高。考量無人機任務之執行主受場域之飛行條件所影響，故單價之成本得視計畫區

項次	審查意見	回覆辦理情形
		所在位置、地形等影響。因此不同區域其單價可能差異十倍以上，故若無法先確定任務區域將無法直接敘明費用。
四	工作成本(無人機光達)加地面光達的成本，與一般空載光達之比較，及精密度之比較？	謝謝委員意見。本計畫內未取得空載光達原始點雲資料，故無法進行兩者之比較。但就目前已有之案例成果來看，無人機光達點雲大概是空載光達的100 倍以上，其精度大概為 5 倍。
五	本計畫係應用無人機光達系統配合地面光達，獲取精細之地形資料，除提供監測崩塌地形變化計算崩塌量體等，拍攝週期多久一次？有無提供崩塌預警參考？	謝謝委員意見。無人機光達搭配地面光達，可以進行崩塌區之地貌變化及量體分析。本計畫著重於技術可之可行性評估。單就計畫之規模及人力成本，暫時未進行長期及定期之資料收集，相關資料能否用於

項次	審查意見	回覆辦理情形
		崩塌預警，或可於未來(或其他)計畫予以評估
六	新的地面光達雷射掃瞄儀是否會受地形限制？	謝謝委員意見。本儀器雖具多重回波，可穿透植被，但任何雷射掃瞄儀均會受地形、地物等視覺障礙等遮蔽物的影響，而出現掃瞄的死角。因此本計畫結合無人機及地面光達兩種掃瞄儀，其目的之一即為解決視覺死角的問題
七	無人機光達與地面光達整合依大尺度及小尺度不同，執行之成本考量，能提供參考。	謝謝委員意見。無人機光達之任務執行成受計畫區所在位置、地形等影響致使成本差異極大。地面光達之執行成本較不易影響，但視角易受影響。結合兩者，故其任務之執行成

項次	審查意見	回覆辦理情形
		本受場域的影響，無法直接敘明。
八	草嶺數次山崩前高精度 UAV Lidar DEM 是否能預測未來發生山崩之範圍？另可否看出較大崩塌區中，有數個較小的崩塌區塊，在傳統 1m lidar dem 所無法顯示的？	謝謝委員意見。UAS LiDAR 可提供更高解析度、更高精度之地形資料，方便山崩微地形的分析，傳統之空載光達解析度較為不足。就草嶺山崩，本區內未執行 UAS LiDAR 資料之掃描，其資料能否用於預測暫時無法評估
九	所謂「高解析」能解析到何種程度？能否用量化或質(項目)化來說明，可供參考應用。	謝謝委員指導。無人機光達資料目前空間解析度為 10-20 公分，空載光達為 1 公尺。因測區空載光達原始點雲資料未取得，相關量與質的比較，或可於下階段計畫內進行。