



空載光達技術 應用於 環境地質 與 崩塌判釋

謝有忠／經濟部中央地質調查所 技正

費立沅／經濟部中央地質調查所 前組長

隨著測繪技術演進，數值地形應用也逐漸蓬勃發展，空載光達技術為獲取廣域高密度與高解析度數值地形資料的最有效工具。本文介紹地調所在莫拉克颱風之後，進行的臺灣全島數值地形資料測製與相關應用成果，包括應用於地質製圖、山崩、土砂體積變化及地形變遷等方面，說明了空載光達數值地形資料可以提供國土保育、地形變遷、坡地土地利用與管理、科學研究等多領域之重要基本資料，在未來更可搭配後續更多的調查研究，讓此技術及成果能夠發揮更大的加值效益。

空載光達技術

光達 LiDAR (Light Detection And Ranging) 或稱激光雷達，是利用雷射光束進行測距、或量測物體物理特性的一種光學遙測技術。雷射光束可依照使用目的，選擇不同波段的紫外光、可見光或近紅外光等進行包含地表、岩石、水氣、化學分子等特性之量測。依其載具，可分為衛載光達、空載光達、無人機光達、車載光達、船載光達以及地面光達等。在地形測量方面，空載光達 (Airborne LiDAR) 技術為獲取廣域高密度與高解析度數值地形資料的最有效工具之一，因為整個系統具有大面積、高精度、快速測製、濾除植被等特性，且單位成本較傳統測量方式低。目前空載光達在臺灣已經成功應用在地理、地質、測量、水土保持、森林、水利等各領域。

空載光達系統包含三個主要的次系統：(1) 雷射測距儀 (Laser ranging)；(2) 全球定位系統 (GPS)；與 (3) 慣性系統 (IMU)。雷射測距儀為系統的核心設備，主要藉由雷射脈衝產生波長 1,064 nm 之近紅外光波

段，以發射後到接收回波的時間差來計算距離，進而產出實際之數值地形資料。國內數值地形資料之蒐集方法，在 2010 年以前，除地調所使用於大臺北地區，進行較長期且大範圍之空載光達測製計畫外，大部分仍以航空攝影測量之技術間接取得為主。2005 年第一版全臺高精度及高解析度數值地形模型測製 (測製成果為 5 米網格間距數值地形)，即是以航空攝影測量技術執行測製的成果。數值航測與空載光達兩者技術差異大致列如表 1。

實際獲取地形資料作業時，空載光達技術可以更快速有效地獲取地形資料，其地形表現取自雷射光束直接反射得到之觀測量 (地面點) 加以內插而得，而航空攝影測量之地形需經過人為約化萃取地形特徵後，再加以內插取得，比較兩者最終之數值地形，空載光達成果可得到較為細緻而正確之地形呈現。

雖然空載光達儀器成本高昂，但是考量時程、人員訓練門檻及後處理電腦硬體設備成本時，則相對較低。臺灣於莫拉克風災後地形劇烈改變，考量在短時間內，

表 1 航空攝影測量與空載光達技術差異^[1]

測繪技術	原始資料來源	測製環境	測製方法	主要測繪目的	人員訓練	地形測製
航空攝影測量	航拍影像	立體觀測設備	以人工方式描繪特徵點、線、面 → 內插生成 DEM	測繪地形圖	入門門檻高、不易上手	耗時
空載光達	光達掃瞄 → 點雲 (同時可拍攝影像)	效能好之電腦	點雲分類 取得地面點 → 內插生成 DEM	測製數值地形	人員訓練相對容易	相對較快

需投入大量的人力重新測繪已變動的地形，空載光達應是較佳的選擇，這也是地調所評估後最終決定採用空載光達測製全島地形的原因。此外，光達飛航掃瞄時，亦可同步進行影像拍攝並後處理製作成正射影像，以配合地形成果進行判釋分析，此部分亦可補足單純只用光達技術測製時，於地貌影像資訊上的不足。

如果暫時不論臺灣氣候條件影響飛行安全、山區地形起伏變化大、植被茂密、飛航限制及國防安全等因素影響外，空載光達成果最終是否能細緻呈現地形，最大的關鍵還是在於雷射點之穿透能力。當雷射點能夠有效穿過植被縫隙達到地面，再反射並被儀器所記錄到，則該點才可視為有效之地形表現點，我們稱之為地面點雲。由此可知，當山區有效地面點越多、越密集時，可預期的，其地形表現將會越理想越細緻，反之，當雷射點無法有效穿透達到地面時，則該區域之地形描述將會越粗糙，且數值高程模型（DEM, Digital Elevation Module）越不精確。

臺灣地區數值地形測製

臺灣大區域的數值地形測製主要皆由政府機關所執行，大區域的測製計畫所獲取的資料，均需依據國土測繪法、數值地形資料供應辦法等規定，於完成後交付給內政部，再由內政部依法統一供應給各界使用，因恐涉及機密，故有限制條件。

臺灣地區早期完整的數值地形資料乃由農林航空測量所，在 1983 年間以人工在解析測圖儀內，將預先以 40 m 間距網格點設定之坐標上，直接量測該點之地表高程值所產製之 40 m 解析度的規則網格資料，經過陸續修測、提升精度後，由中央大學太空及遙測中心管理，供各單位申請使用，此 DTM (Digital Terrain Module) 資料為目前最廣泛、普遍應用的數值地形資料。隨著技術演變及使用需求，內政部於 2004 年使用農航所拍攝之航空影像，以航測技術產製間格 5 m 之數值地形資料，並於 2006 年完成全島測製範圍。

自 2005 至 2011 年間中央地質調查所在「大臺北

地區特殊地質災害調查與監測」計畫中，開始利用空載光達技術，獲取高解析度與高精度數值地形資料。針對山腳斷層、大屯火山、龜山島海域火山及海岸山脈等區域，挑選特定的地質議題，進行活動性調查與監測。本計畫測製 2 m × 2 m 數值地形資料，歷年施測範圍包括大臺北地區、宜蘭地區、花東縱谷以及海岸山脈地區等。2009 年 8 月莫拉克颱風重創臺灣，在臺灣中部、南部及東部地區造成極多處之地質災害，地形地貌亦有大幅度的改變，考慮國內舊有的地形資料，對後續的土地管理、莫拉克災區重建、未來的防救災及國土復育等相關工作已不敷使用，中央地質調查所於莫拉克特別預算中提出全新的國土測繪計畫，國內測繪業宣稱這是臺灣歷年最大金額的測繪業務，也因為此一契機，引領國內測繪業技術的重大突破。自 2010 年起地調所開始執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」，採用空載光達技術測製全島數值地形資料，於 2016 年完成全島 1 m × 1m 高解析度 DEM 及 DSM (Digital Surface Module) 數值地形資料及正射航照影像 (圖 1、2)。

全島空載光達數值地形資料成果

空載光達數值地形製作主要產製 1 米解析度之數值地形資料 DEM/DSM 及解析度 25 釐米的正射影像，以供後續地質敏感特性分析使用，並建置高解析度數值地形資料庫。主要工作包含下列六大項，(1) 空載光達飛航計畫規劃與申請；(2) 地面 GPS 基地站控制測量；(3) 空載光達施測資料獲取；(4) 光達點雲資料處理；(5) 數值高程模型 (DEM) 與數值地表模型 (DSM) 製作、正高改算、人工檢核與編修及圖幅鑲嵌處理等；(6) 正射影像製作。

在全島光達數值地形資料測製部分，原規劃分為莫拉克災區 LiDAR 高解析度數值地形製作 (執行年度：2010 ~ 2012 年) 與非莫拉克災區與特定事件 (颱風豪雨或地震等事件) 後 LiDAR 高解析度數值地形製作 (執行年度：2013 ~ 2015 年) 等 2 項計畫。都是利



圖 1 全島 1 m × 1 m 高解析度數值地形
(白色區域為無資料的限航區)



圖 2 全島正射航照影像
(白色區域為無資料的限航區)

用空載光達技術獲取高解析度之數值地形模型 (DEM & DSM)，再利用前述結果，以山區之聚落與具有保全對象之範圍者為優先分析對象。在計畫中使用國內測繪廠商所擁有的 5 台空載光達設備，包含 Optech ALTM 系列、Leica ALS 系列及 Riegl LMS-Q680i 等廠牌之雷射掃瞄儀。由於短時間要完成全島 36,000 平方公里的施測，其困難度極高，故規劃由國內 4 家具有能力的測量廠商分工測製，於 6 年計畫時間內，將全島分為 23 個作業區（每家廠商每年執行 1 個計畫區範圍），每個計畫區再依其地形特性劃分不同的子測區，共計 53 個子測區，共產製 5,380 幅 1/5,000 圖幅範圍之成果，測製面積約達 37,929 平方公里（設定於低潮位前後 1 小時施測，故範圍較陸域稍廣），主要成果資料包括 LAS（光達點雲資料）、1 米解析度數值地形資料網絡成果 (DEM&DSM)（圖 1）、水域範圍及正射影像（圖 2）等。

空載光達數值地形資料在環境地質之應用

利用空載光達技術所獲取得的全島數值地形資料，地調所已於完成後，依國土測繪法將資料交付內政部供應國內使用，目前已有許多政府機關利用內政部供應平台取得此資料，包括測量、水利、水土保持、森林、資訊、防災等單位都有申請，並妥善在各領域應用。地調

所自 2005 年大臺北特殊地質災害調查與監測計畫開始使用空載光達數值地形資料，應用於火山地質、構造地形、活動斷層、山崩及土石流調查等方面，皆已有豐碩之應用成果，本章節係節錄近年來利用全島數值地形，地質或其他方面之新發現應用。

地形計測方法

地形計測方法 (Geomorphometric analysis) 是將地表地形量化分析的科學方法，隨著現代測量技術演進，因為資料品質提升至近期空載光達產製之 1 米解析度資料，使得地形計測方法得以精進發展與應用，更能有效地降低複雜地形研究的困難度，並解決過去無法判釋或解讀的資訊，對於地形學研究具有很大的助益。

以車心崙地區為例^[2]，利用各類地形計測方法分析比較，其中坡度分析 (Slope angle)、日照陰影計算 (Hillshade)、坡向 (Aspect)、透空度 (Openness) 等結果，可以得到具有視覺化效果的影像，讓非專業人員的雙眼也可以直接判讀地形起伏與變化，對於曲率 (Curvature)、地表粗糙度 (Surface roughness)、特徵比值 (ER) 等可以得到數值化的分析成果，此項成果需要利用後續資料統計分析配合或再萃取，始可獲得。因此在數值地形資料的分析處理上，可以依據欲分析之目的，選擇適用的方法來進行。當瞭解每種地

形計測方法的原理和計算過程後，可以選擇最適用或最有效率的方法，則有助於後續應用分析，也不會有誤用或錯用之情形。

大規模崩塌判釋

空載光達技術所測製之數值地形資料，以網格式的數值資料格式和空間資料之地形計測，其已將地表植被完全去除，故能夠清楚呈現出地形特徵紋理，因為地形資料的解析度高，可以很清楚的顯現出山崩的小崖（Scarplet）、崩崖（Scarp）、多重山脊、坡頂緩斜面與趾部隆起（Convex landslide foot）等崩塌地細微地形特徵。尤其是在大規模崩塌的判釋方面，空載光達高精度數值地形資料提供比航空照片立體像對更多的崩塌細微地形特徵 [2-4]，亦成為判釋大規模崩塌最直接且有效的工具。

莫拉克風災後中央地質調查所在「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」之子計畫 99~101 年「莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析」、102~104 年「非莫拉克颱風受災區域之地質敏感特性分析」以及 106~110 年「潛在大規模崩塌精進判釋暨補充調查」5 年期計畫中，陸續完成潛在大規模崩塌之判釋與調查，判釋範圍如圖 1，主要係配合逐年完成之全島光達數值地形資料，再以此資料配合航照正射影像、現地調查等，判釋分析莫拉克災區（及非災區）範圍之潛在大規模崩塌分布區域，並初步探討崩塌滑動機制。在 99 至 104 年的 6 年期間判釋出 1,207 處潛在大規模崩塌地區，其中 113 處鄰近 103 個聚落。截至 2019 年底完成之資料統計如表 2，目前在全島已初步判釋超過 2 千餘處（圖 3）。

三維地質製圖

傳統地質製圖主要以野外調查成果為主，受限於地形底圖之比例尺，以及野外工作之諸多限制，例如植生茂密、交通難以抵達及露頭稀少等條件，使得傳統製圖

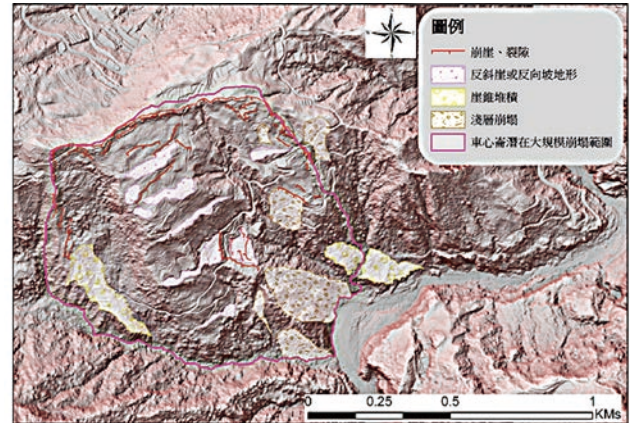


圖 3 以車心峯地區為例，使用的底圖係整合坡度及開闔度之紅色立體模型圖，再疊加地形陰影圖，此有助於視覺化判釋 [2]。

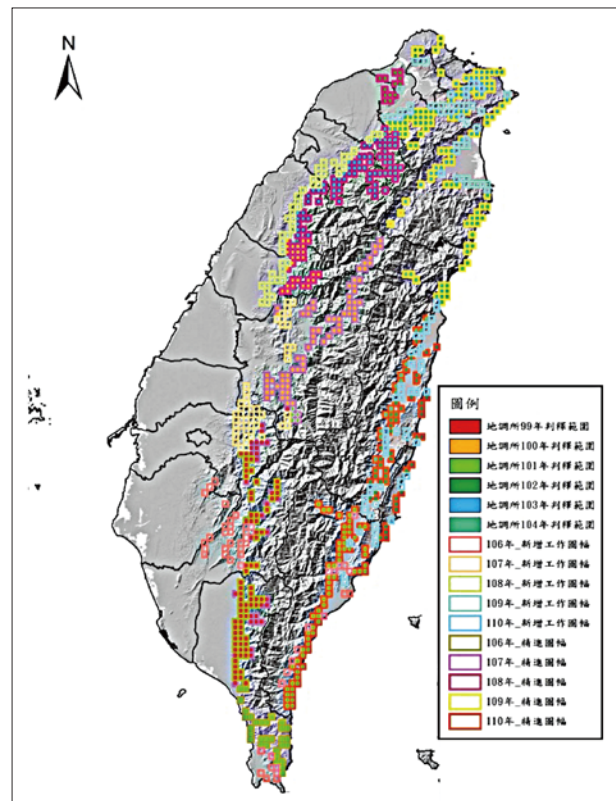


圖 4 莫拉克風災後中央地質調查所已完成之潛在大規模崩塌判釋範圍。

表 2 莫拉克風災後中央地質調查所判釋之潛在大規模崩塌資料統計

	莫拉克災區			非莫拉克地區			精進判釋暨補充調查					
	南部 99	中部 100	東部 101	北部 102	東部 103	東部 & 北部 104	106		107		108	
潛在大規模崩塌 數量(處)	185	225	192	116	279	210	新增 543	精進 63	新增 515	精進 293	新增 106	精進 348
鄰近聚落崩塌地(處)	13	27	16	16	22	19	128		185		191	
鄰近聚落潛在大規模崩塌地面積(公頃)	987	1,310	858	1,386	886	1,317	2,517		3,549		1,837	
影響聚落(處)	11	13	18	18	24	19	34		72		52	

在有限的露頭與位態資料下，需依靠地質學家的專家調查研判及作圖方法，建構出區域地質之可能模式；如今已有高解析度數值地形資料後，除可獲取大比例尺之地形底圖外，目前中研院利用本所資料，嘗試建立一套使用3維立體化地質製圖的技術（圖5），已分別試用於沉積岩地區及變質岩地區，看起來有機會補足與克服傳統地質製圖之限制，而能重新檢視構造幾何之合理性，試圖精進現有之地質圖，應有助於大比例尺地質圖的應用。

大規模崩塌事件土砂體積估算

高解析度數值地形資料不僅可以判釋大規模崩塌的地貌特徵及分布範圍，而遙測技術的發展也使得山崩的調查研究也快速演進中。隨著精度和解析度的提高和不同時期資料的比對，多元多期的數值地形資料也提升了山崩機制的相關研究，例如地表活動性觀測、山崩量體計算及量體變化，災害規模評估及數值模擬等。

藉由其產製資料及比對過程之誤差分析，可合理應用至山崩之地形變遷比對。經由多期數值地形資料比對，可以解算出大型山崩事件所發生的土方量，以及山崩後之土方量搬移變化（圖6）。未來多期航空攝影測量（含無人機）和光達數值地形資料，可以在坡地災害後有效地應用於下游河道地形變遷及其潛在影響。

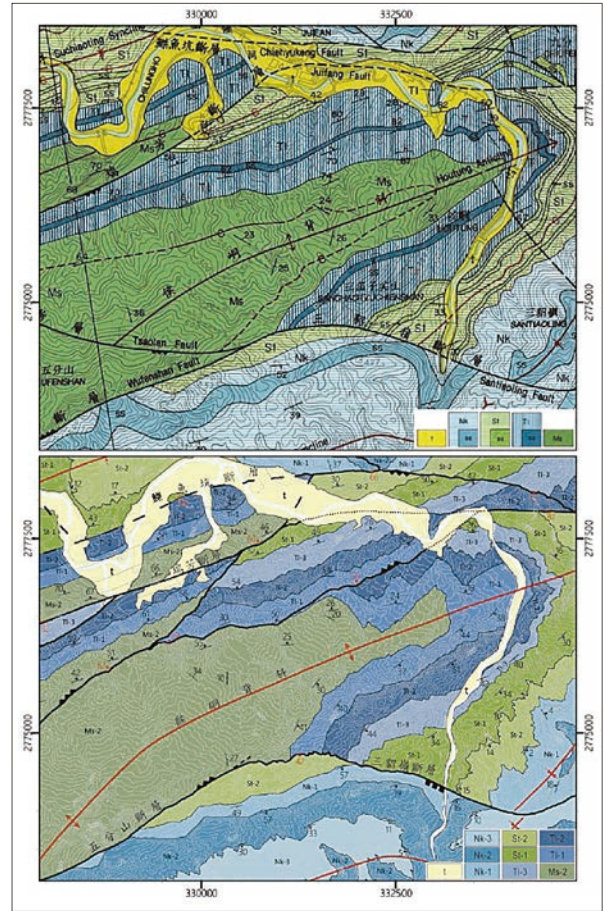


圖5 以猴硐地區為例，上圖為本所出版五萬分之一雙溪圖幅，下圖即為利用3維立體地質製圖所產製之新版雙溪地質圖 [5]。

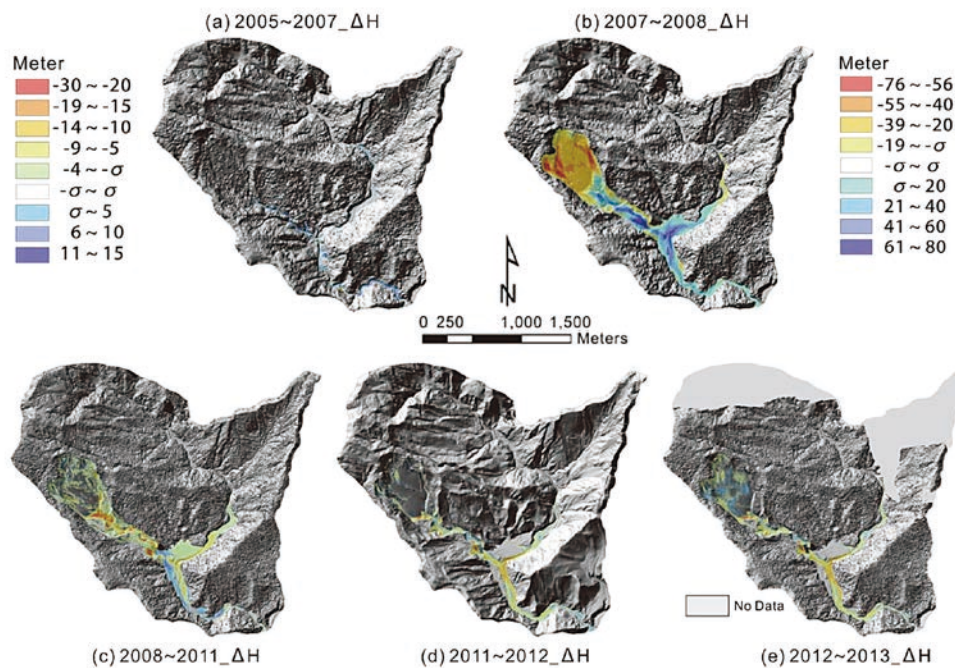


圖6 藉由6個不同時期的數值地形資料所產製之地形高程變化圖，可以分析大型山崩事件的土石體積量及事件後土石量體與下游河道的地形變遷 [6]。

河流地形與輸砂

在河流地形研究上，以往數值地形資料可以應用在河道地貌、河流橫剖面、縱剖面等變化之分析，隨著資料品質提升，不僅地形變化的位置及範圍能有效量化，更多細微之地形變化也有機會判釋出；有關輸砂量的分析多以實測懸浮載觀測資料、水文站流量，配合河床質粒徑分析及水文分析資料，利用經驗公式或理論公式進而推算出河床總輸砂量，鮮有實測值驗證。在颱風、豪雨等事件發生時，並無法有實際觀測之懸浮載或粒徑分析等，容易造成推估上的誤差。

地調所曾選擇蘭陽溪為例，以颱風季節前後產製之不同時期高解析度數值地形資料，應用高程差值之地形計量方法，計算在颱風季節前後地形之變化，結果顯示河道搬運輸砂的主要影響控制因素應為河道坡度，當河道坡度越大，侵蝕作用越明顯；局部則受河道寬度及河流曲率的影響，而岩性分布也影響包含受限河谷及河道兩岸侵蝕、搬運之特性，另藉由範圍內河道體積變化量，也能推估颱風事件期間的河道輸砂量。

蝕溝侵蝕與地形變化

評估侵蝕速率為瞭解地質演化的一個重要研究課題，不論河道斷面量測、侵蝕釘、沉積物放射性定年法、河道懸浮質推估輸砂量、樹根年輪定年法、地形測製技術（合成孔徑雷達影像干涉技術（InSAR）、地面或空載光達、航測數值地形資料）等，各種技術都有其可以應用的最佳尺度和範圍，但也都有無法完全涵蓋之處，這些技術都是地質研究，應用在複雜時空尺度變化影響下的困難處。

經由多期空載光達數值地形資料比較，直接量測地形變化所求得之蝕溝下切深度，顯示利用前述之蝕溝侵蝕分析技術，可以減少費時且大量的侵蝕釘或斷面測量等野外工作。多期數值地形資料的比較，更可以直接呈現範圍內不同時期的地形演化。

高山湖泊

臺灣中央山脈高山地形險峻且交通不易到達，也限制著高山湖泊的發現或記錄。隨著科技發展，險峻高山地形隨著遙測技術的進步，而能被完整且較準確

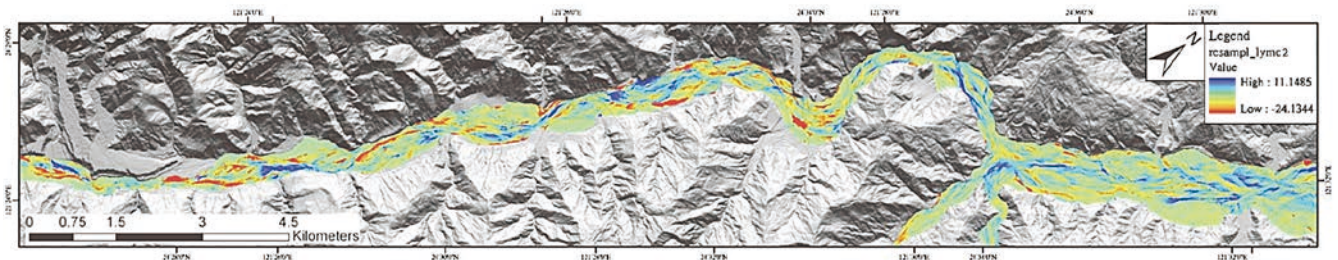


圖 7 颱風季節前後河道地形侵蝕與堆積變化之範圍，高程差值可計算出河道體積變化量^[7]。

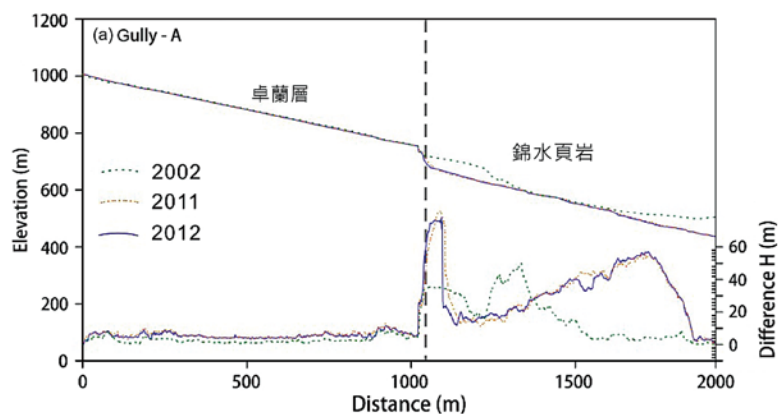


圖 8 以草嶺山崩坡面蝕溝為例，利用 3 期數值地形資料求出蝕溝高程剖面變化，進而直接計算蝕溝的下切速率，為目前可直接量測侵蝕速率的有效方法^[8]。

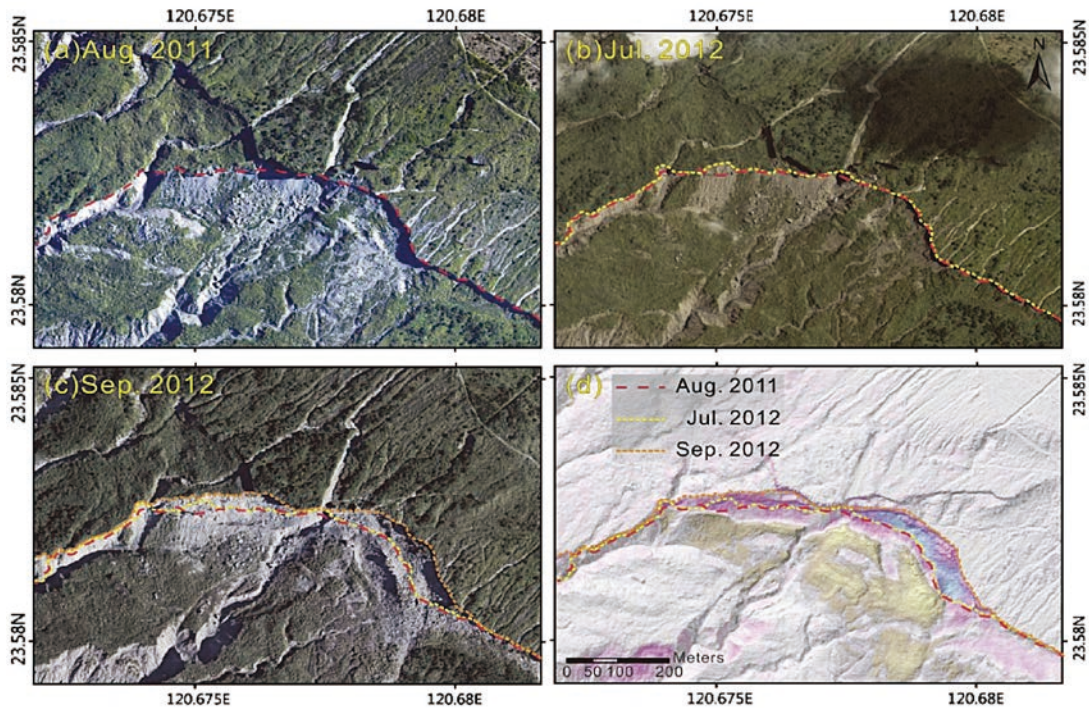


圖 9 利用數值地形資料與航照影像，觀察草嶺春秋斷崖崖坡後退的變化^[8]。

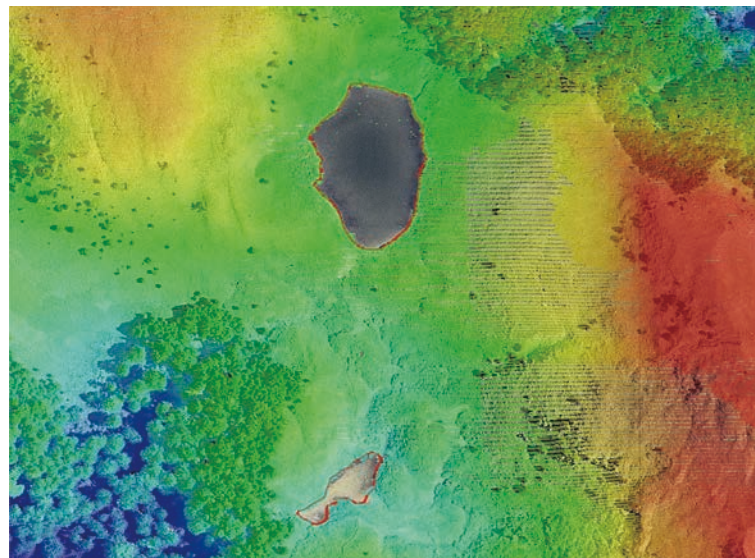


圖 10 本圖為屯鹿池（紅色框線）周圍區域航照影像疊加光達點雲資料之結果，可見屯鹿池水體範圍內出現較稀疏之點雲，水體中雖然仍有少數反射之點雲資訊，但受水體吸收雷射脈衝影響，造成點雲反映之位置可能為水體表面、水體中、或水體底層等不確定資訊，故處理程序中，需圈繪出實際水體範圍來排除受水體影響之資訊，以避免造成地形測繪之誤差。圖中藍至紅色之色階表示地表高程，藍色較低，紅色為較高之高程^[9]。

的測繪出。在光達資料處理程序中，由於近紅外光雷射不透水之特性，為求數值地形資料之精確，必須篩除施測區域內之水體覆蓋範圍，而此項資料卻非常有利於高山地區中水體範圍分布的判釋，故能進一步快速得到在中央山脈中所出現的湖泊、水池等分布的

範圍，使得這些隱匿於峰谷中不太明顯、乾濕季很容易出現變化的高山湖泊，很容易被新興科學技術所記錄。目前已判釋出超過兩百餘處之水體範圍，多數歸屬於中央山脈之高山湖泊，也為國內首次較完整呈現高山湖泊精確位置及範圍的資料。

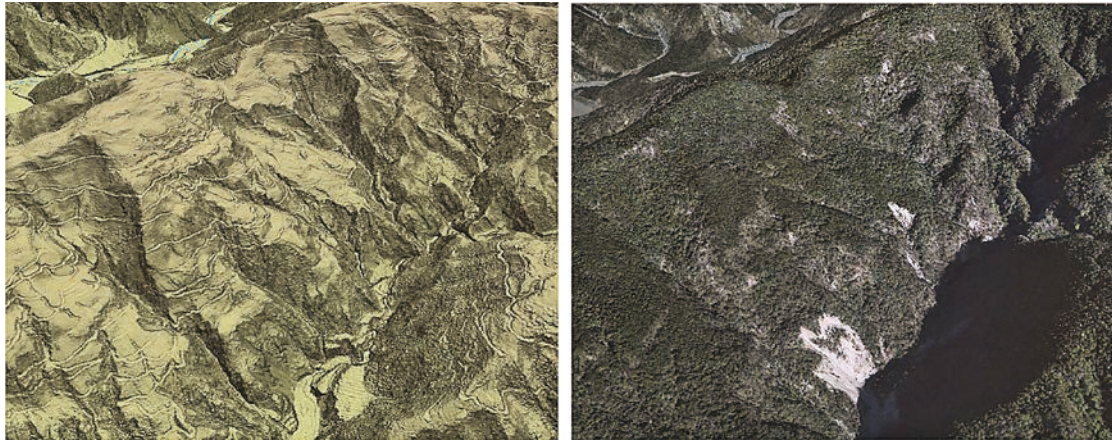


圖 11 以屏東縣獅子鄉外麻里巴社地區為例，地形陰影圖中可見到階梯狀、格狀殘跡平緩地及道路系統，但在航照影像上因植生茂密而不可見^[1]。

石板屋遺址

臺灣原住民族為南島民族之一支，地理分布在南島語族區域的最北端，在臺灣南部山區主要為魯凱族和排灣族兩族的傳統領域。以前原住民族之聚落，住宅以半穴居之石板屋為主，以房舍大小規模及半穴居開鑿特性，而有機會利用空載光達數值地形資料來判釋出這些舊部落遺址的位置。目前在臺灣南部茂密林相分布之山區中，可以找到超過 150 處無人居住之聚落及道路，這些聚落地貌上多呈階梯狀，部分點位在現場調查後，都發現殘存石板屋建築。對比近百年臺灣古地圖（中研院），這些古聚落多可以在古地圖鄰近位置中找到舊社的名稱，顯然空載空載光達數值地形資料也同樣地在臺灣茂密森林中，可以找到過去原住民生活所留下的石板屋遺址，並可提供真實且正確的點位。除留下確切位置記錄重建聚落遷徙歷史外，在近年氣候變遷下，也可提供原住民居住環境與氣候變化之關係，或可提供原住民居住防災規劃之參考。

結論

隨著測繪技術演進，數值地形應用也逐漸蓬勃發展，在數值地形資料的選擇考量方面，因資料取得和資料產製成本等因素下，可選擇適合使用目的之資料解析度等級，並非所有用途都需使用最高階解析度之資料，或較低階解析度都無其應用之價值。亦即在數值地形資料的使用上，隨著應用目的、比例尺大小的不同，而選擇適宜之解析度數值地形資料。藉由前述簡要介紹目前數值地形資料相關應用成果，此部分也說明了空載光達數值地形資料可提供未來國土保育、坡地土地利用與管

理、科學研究等之重要基本資料，在未來可搭配後續更多的調查研究也能發揮此資料更大的加值效益。臺灣受地震、颱風影響下，地形變遷快速，未來除政府機關應投入資源定期獲取此類有效國土基本資料外，相關應用單位也可利用新興測繪技術，獲取不同精度等級之數值地形資料而達成任務需求。

參考文獻

1. 謝有忠、郭麟霖 (2019)，臺灣光達數值地形資料測製成果及應用，地質，第 38 卷，第 3 期，第 40-45 頁。
2. 謝有忠、侯進雄、胡植慶、費立沅、陳宏仁、邱禎龍、詹瑜璋 (2016)，地形計測方法應用於潛在大規模崩塌之判釋：航測及遙測學刊，第 20 卷，第 4 期，第 263-277 頁。
3. Chen, R.-F., Lin, C.-W., Chen, Y.-H., He, T.-C., Fei, L.-Y. (2015), Detecting and characterizing active thrust fault and deep-seated landslides in dense forest areas of southern taiwan using airborne LiDAR DEM: Remote Sensing, Vol. 7, No. 11, pp. 15443-15466.
4. Lin, C.-W., Tseng, C.-M., Tseng, Y.-H., Fei, L.-Y., Hsieh, Y.-C., Tarolli, P. (2013), Recognition of large scale deep-seated landslides in forest areas of Taiwan using high resolution topography: Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 62, pp. 389-400.
5. 施乃慈 (2018)，在三維環境中繪製高解析度地質圖：以臺灣北部雙溪地質圖幅為例，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，第 145 頁。
6. Hsieh, Y.-C., Chan, Y.-C., Hu, J.-C. (2016), Digital Elevation Model Differencing and Error Estimation from Multiple Sources: A Case Study from the Meiyuan Shan Landslide in Taiwan: Remote Sensing, Vol. 8, No. 3, pp. 199.
7. 謝有忠、陳棋炫、曹恕中、李柏村、林書弘 (2009)，以數值地形資料探討颱風對地形特徵之影響－以蘭陽溪為例，經濟部中央地質調查所 98 年度研究發展專題，第 58 頁。
8. Hsieh, Y.-C., Chan, Y.-C., Hu, J.-C., Chen, Y.-Z., Chen, R.-F., Chen, M.-M. (2016), Direct Measurements of Bedrock Incision Rates on the Surface of a Large Dip-slope Landslide by Multi-Period Airborne Laser Scanning DEMs: Remote Sensing, Vol. 8, No. 11, pp. 900.
9. 謝有忠、陳勉銘、費立沅 (2016)，光達俯看中央山脈湖泊，科學發展月刊，第 524 卷，第 42-46 頁。