

雷射掃描的原理和發展以及應用於地形研究、 國土監測與未來氣候變遷衝擊研究

任家弘

國立高雄師範大學地理學系助理研究員

摘要

雷射掃描是快速收集地表地形大數據的重要利器。傳統上，地表資訊是以地圖的方式呈現，而雷射掃描可以取代地圖，與其他遙測工具相類似，可以收集多高程與多時距地地表高程與光譜的大數據，使用者依據不同的任務與需求選擇適當的工具，包括地面型雷射掃描儀、車載（船載）式移動掃描儀與空載掃描儀。在面臨未來氣候變遷衝擊以及調適方面，政府應對於平原區與海岸的侵蝕、淹水與地層下陷等迫切需求，在不同區域可以運用不同類型的雷射掃描儀，著手生產大量高精度的高程資料，快速且準確地收集到大量地表高程資料，建立地形大數據庫，可用於配合不同情境之模擬，分析各種狀況下可能產生的影響，提供未來政府機構、專家、民眾與權益相關者進行研擬因應未來氣候變遷可能產生衝擊之策略的重要依據。

關鍵詞：雷射掃描儀、數值地形模型、大數據、地形變遷監測。

一、前言

雷射掃描 (laser Scanning) 是指運用雷射進行對地表的立體地形資料 (3D data)、土地利用與地表覆蓋 (land use and land cover) 進行資料收集, 以便建立基線 (baseline), 並可以進行相關變遷偵測 (change detection) 研究。事實上, 雷射掃描是1990年代以來發展的新技術, 主要是由傳統測量演進而來。傳統測量主要利用經緯儀, 其原理是配合已知的三角點或基準點, 利用後方交會法進行儀器所在位置的測定, 並利用標尺與距離、角度等參數, 引測未知地點的座標。而後引進距離測量的電子測距儀 (EDM, electric distance measuring instrument), 利用電磁波、光波或雷射進行精密距離的測量, 加上水平與垂直俯仰角度測量的電子化, 使經緯儀進化為全測站 (total station), 讓測量進入全新時代, 也增加測量的精度與效率。早期的全測站使用的電子測距儀能量較低, 需要配合稜鏡以進行距離與角度的測定, 而隨著儀器的進步, 開始具有無稜鏡模式 (reflectorless mode) 測距功能的儀器投入, 使測量的範圍與效能更進一步的提升, 也使大量地表點的精密測量更為可行。如Trimble的DR350+全測站, 可以在350公尺的範圍內進行無稜鏡模式測量, 在進行後方交會法設定後, 由全測站直接測量範圍內的地形點, 加上該儀器可以進行水平與垂直方向固定角度的移動與測量, 對於許多區域, 尤其是邊坡, 可自動進行位置資訊的收集, 是研究地表形貌特徵與變化的利器, 如Jen et al. (2009) 利用Trimble的DR350+全測站, 執行烏山頂泥火山地形的自動化測量, 並以Arc GIS進行內插 (interpolation), 建立區域的數值地形模型 (DEM, digital terrain model), 並計算不同時期的地形侵蝕與堆積的變遷。Wenske et al. (2012) 即利用Leica全測站 (如圖1) 進行台灣中部大甲溪德基水庫上游區域崩塌地的地形測量與數值地形模型之建立, 以計算和監測各時期崩塌量。顯示在邊坡上無稜鏡全測站測量以建立地形點資訊與數值地形模型是簡便、可行與高精度的工具。圖2即為以全測站進行泥岩邊坡無稜鏡測量建立地表資料點的3D模擬。



圖1 以Leica全測站進行崩塌地的地形測量來偵測崩塌地變遷。

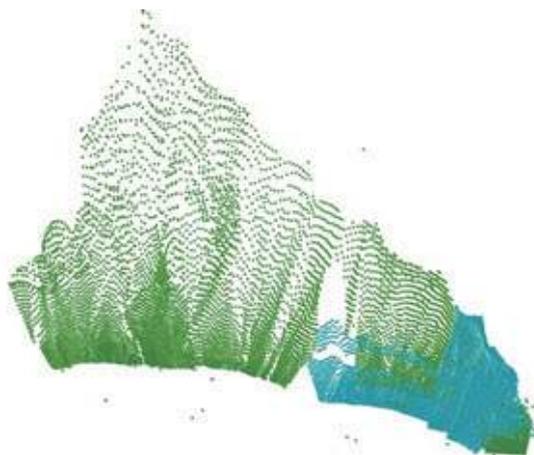


圖2 以全測站進行泥岩邊坡無稜鏡測量建立地表資料點的3D模擬（測量標的為高雄田寮月世界裸露泥岩邊坡）。

在全測站廣泛使用之後，雷射測距儀器的發展速度持續加快，因此也發展出速度更快的雷射掃描儀器，運用於地表的調查。事實上雷射的發展早在1960年代，依據其發光介質不同分為氣體、液體與固體三大類。在1965年時砷化鎵雷射裝置於飛機上，運用於實驗性的航空地表高度測量，自此之後有許多雷射剖面儀（laser profiler）被運用於測繪的任務，其原理是飛機沿著設定航線與高度飛行，由雷射剖面儀測量行

帶下地表高程。但由於當時GPS全球定位系統尚未完善，還是屬於美國軍方的機密，因此無法結合兩者提供精密的定位與地表高度測量，其航高還是依據傳統方式以水平面大氣壓和飛機所在位置壓力差進行計算。在精密GPS全球定位系統與飛航姿態儀與雷射掃描結合之後，才使其大量運用於地表測繪與監測方面的任務，成為目前非常重要的地表測繪與監測系統。

二、雷射掃描儀工作原理

以工作方式來分類，雷射掃描儀可概略分為地面型雷射掃描儀（或稱為「光達」，terrestrial or ground LiDAR）與移動式雷射掃描儀。許多研究與應用都利用雷射掃描進行地表資訊收集，例如：Pereira & Janssen(1999)以雷射掃描獲取荷蘭之地表地形模型（DSM），應用於道路規劃與設計；楊濟豪等（2014）以地面雷射掃描研究地質露頭的工程部連續面與其岩石工程特性；蕭國鑫等（2006）以空載雷射掃描與航測高程資料應用於地形變化偵測；許海龍等（2006）以雷射掃描進行崩塌地變遷的監測與研究。顯示地面型與空載雷射掃描有廣泛的應用領域和需求。

其中，地面型雷射掃描儀主要由雷射發射接收與影像收集兩大部分所組成，雷射發射接收是進行距離與角度測量的主要工具，以使用者設定的角度間距進行掃描，設定的角度間距愈小則空間採樣點愈密集，所需的時間也隨之遞增。而儀器與標的物之間的距離也會影響採樣點空間的密度，兩者距離愈遠則採樣點密度會減少，反之愈近則採樣點密度會增加。因此使用者在外業時設定角度必須考量地表的起伏度、複雜度與儀器和標的物之間的距離，以及掃描所需時間等因素，來選擇適當的掃描角度。一般而言，設定掃描角度會略小於最適合的角度參數，這樣一方面可以增加採樣點避免陰影區缺乏資料的情形，另一方面資料多可以有更多的彈性，避免資料量低於需求的狀況發生。

地面型雷射掃描儀另一個重要的部分是影像收集，大致上可以分為數位相機與CCD兩大類型。圖3的地面型雷射掃描儀即是配置數位相機

進行地表光譜值收集，在每一次掃描完成後地面型雷射掃描儀會重新歸位，對各方向進行數位影像拍攝，而這些數位影像在資料處理的過程中會賦予各點的光譜值，以三原光的形式記錄，也就是紅光、綠光與藍光，分別以強度的資料呈現，每個波段都可以256階（8 bit）或1024階（10 bit）紀錄。未來可以進一步轉換成具有座標的網格式資料，可提供輸入GIS軟體進行進一步的分析。而CCD形式的影像光譜紀錄與掃描同時進行，大部分CCD的光譜與空間解析度都比數位相機型的為低，因此可以就不同需求選擇不同的儀器進行外業任務。

圖3中的地面型雷射掃描儀在數位相機下的是雷射發射與接收器部分，掃描進行時雷射由玻璃部分發出，碰到物體後有部分被反射回來，進入接收器被記錄。每完成一道下方機構就轉動設定的角度，直至360度都完成為止。在地面型雷射掃描儀下方有一個區域是雷射與數位相機都無法記錄的區域，也就是無資料區，在執行雷射掃描外業任務時有些工作人員會利用這個陰影區躲藏，避免被記錄在點雲資料中。

地面型雷射掃描儀的工作進行方式與傳統測量非常類似，是以三至四個以上已知精密位置資訊的點為基準，將所有掃描的點資料轉換為具有正確與精密座標資訊的大量點資料，這些點就是「點雲」（point cloud）。在這些點雲的座標資料主要是利用基準點上放置反射標或反光貼紙進行雷射訊號反射，讓儀器與軟體可以輕易辨識，並且在轉換點雲座標時提供計算與檢核的基準。地面型雷射掃描儀運作的方式與經緯儀和全測站類似，是以儀器裝置在腳架上對360度進行掃描，其中包含已知精密位置資訊的點。在掃描作業中，可能進行數個測站的作業，這些掃描包含重複的區域，在完成外業後於室內進行資料轉換、點雲拼接與濾除雜訊，完成處理以後的點雲資料可以輸出成座標點的文字檔或者是LAS格式的點雲檔案，成為可以輸入地理資訊系統（GIS）或者是其他軟體（如Autocad）的原始資料。這些獲取的點雲資料是以三維座標的資訊為主，在不同領域有各自的運用，例如在地理與環境方面，可以轉換為數值地形模型（DEM），成為研究環境、地形與水文的重要資訊；也可以建立精密的數值地形模型，監測地表地形的變遷與崩塌地變化和河道變遷與演育等；而建築物或構造物的掃描資料則可以運用於3D建



圖3 地面型雷射掃描儀 (Riegl VZ400) (攝影：胡子威)。



圖4 地面型雷射掃描儀外業作業。

模、設計與檢核，甚至是建築與構造的安全監測等，這些大量的點雲資料應用的範圍非常寬廣。

在完成地面型雷射掃描之後，任務由外業轉至內業，也就是由野外收集的掃描資料與控制點資料，進行點雲的座標轉換和光譜值的獲取，並且將所有測站的資料加以平差與拼接，成為三維立體資料。不同的硬體系統有不同的軟體搭配組合，主要的處理軟體包括Cyclone

與Riegl scan等。完成內業後可獲得立體點雲資料，這就是地表或建築物表面的3D資訊，也就是點雲資料。可直接於軟體內進行展示與旋轉點雲，或者是輸出至其他地理資訊系統加以加值或呈現。在點密度高的情形下這些立體有光譜值的點雲資料看起來會有如數位相機拍攝的影像，下列圖5至圖7即為金門縣烈嶼重要地景玄武岩海岸的柱狀節理以及過去部隊的海防設施，圖8是完成拼接與平差後的點雲資料。由輸出的點雲影像來觀察，非常接近實地拍攝的相片，但事實上這是由許多具有三維座標與光譜值的點雲所組成，非常適合用於電腦輔助設計與地理資訊系統分析用途。在完成拼接與平差後的點雲資料，可以轉成為LAS格式的資料輸出，或者將X、Y、Z座標資訊與R、G、B等光譜資訊轉存成數值資料（DAT或TXT格式）進行輸出，提供ARC GIS或其他軟體輸入處理。ARC

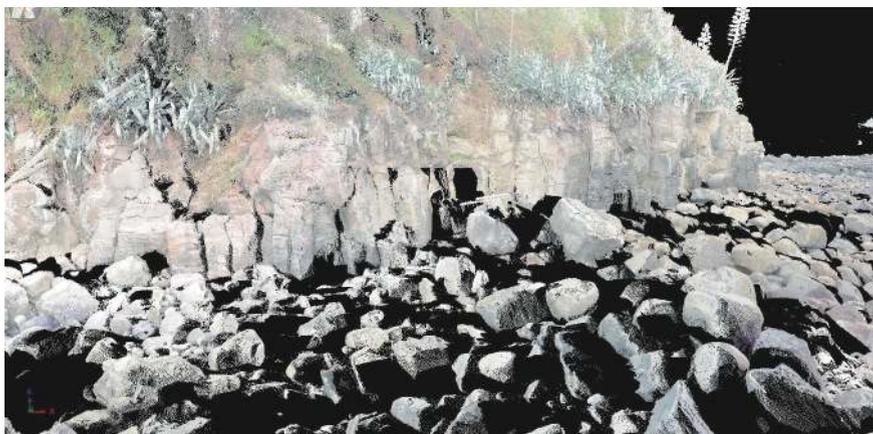


圖5 烈嶼南山頭海岸玄武岩節理和風化後崩落堆積於海岸的玄武岩巨礫。



圖6 烈嶼南山頭海岸東側陷落碉堡。



圖7 烈嶼南山頭海岸機槍堡。

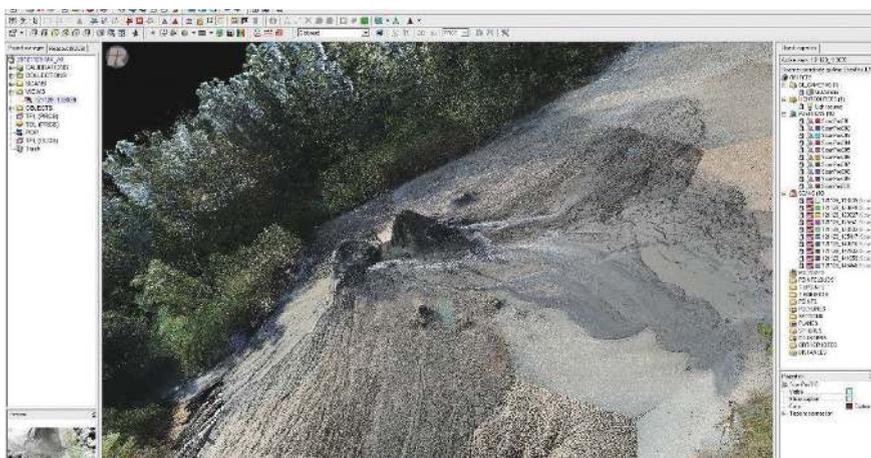


圖8 完成拼接與平差後的點雲資料。

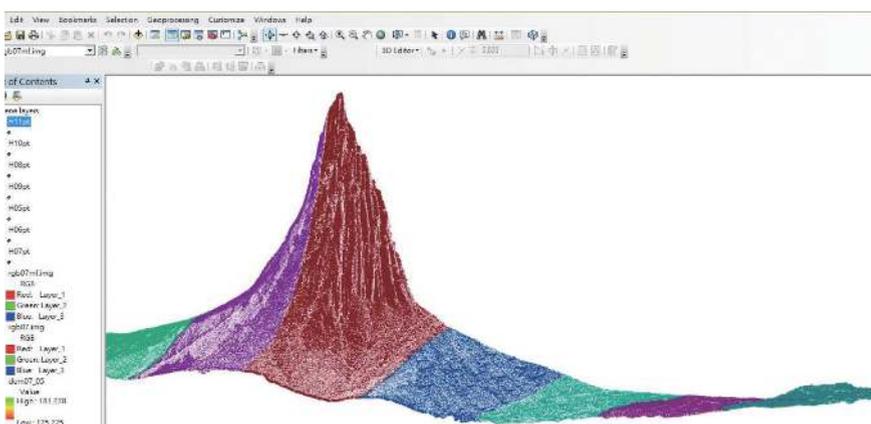


圖9 以ARC SCENE展示立體點雲資料。

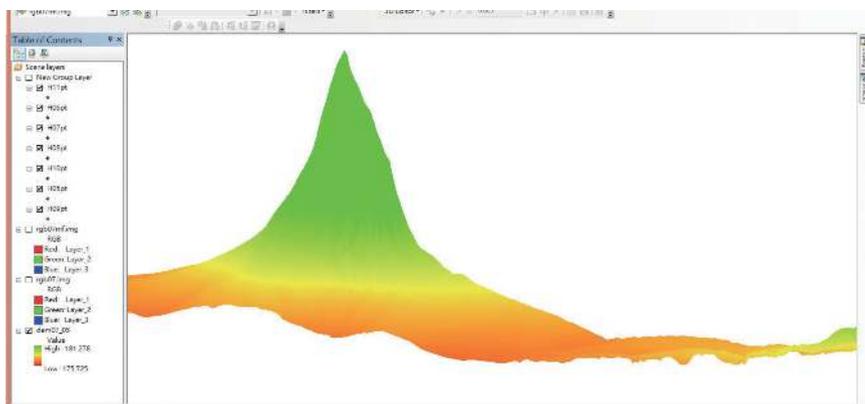


圖10 以ARC SCENE展示DEM網格式資料。



圖11 以ARC SCENE展示地表光譜網格式資料。

GIS可以將點資料以向量式的資料格式讀入，轉換為網格式資料，在圖9中點資料以ARC SCENE呈現立體地形，也可以進一步轉換為網格式的數值地形模型（如圖10所示），或疊合表面光譜的網格式資料，呈現出立體的地形（如圖11所示）。

三、雷射掃描儀搭配不同載具的應用

在地面型雷射掃描儀之外，就是移動型雷射掃描儀，也就是在儀器移動的過程中進行掃描作業。在不同任務中以不同載台搭載雷射掃描儀進行作業，例如在道路作業中使用的車載式雷射掃描儀（圖12），海岸岸際調查使用的船載掃描儀（圖13，成果點雲如圖14），以及飛機或直升機搭載的空載掃描儀（air-borne LiDAR）（圖15）。



圖12 設置於車輛頂部之車載掃描儀（攝影：胡子威）。



圖13 設置於船上之船載掃描儀（攝影：胡子威）。

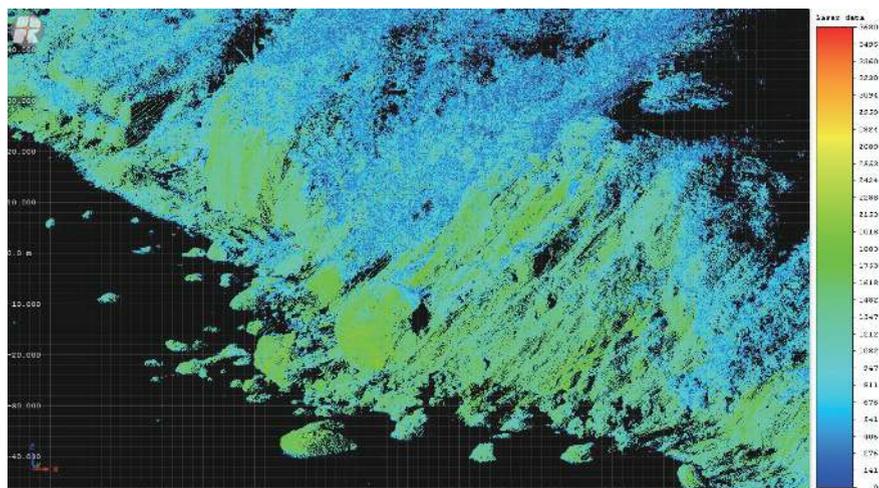


圖14 以船載掃描儀進行海岸岸際調查成果點雲。



圖15 設置於機翼下來艙內之空載掃描儀（攝影：胡子威）。

埤以廣泛使用的空載掃描儀而言，主要的次系統包括以下幾項（Petrie & Toth, 2008）：

1. 雷射測距次系統：與地面型雷射掃描儀一樣，空載雷射掃描儀具備雷射元件進行雷射的發送與反射波接收，以便進行掃描作業。
2. 光學接收次系統：與地面型雷射掃描儀一樣，空載雷射掃描儀具備光譜資料接收與紀錄元件，進行地面光譜資料紀錄，包含中尺幅120數位相機（圖16）、航拍全尺幅數位相機（圖17）或掃描式數位相機（圖18）。
3. 電子控制單元：包含軟硬體設備，用於控制與操作整個系統進行掃描作業。
4. 定位與姿態紀錄次系統：這是空載掃描儀進行作業的重要次系統，包含定位的差分全球定位系統（differential GPS），以及慣性儀（IMU, inertial measurement unit）測量與紀錄載台的三維姿態和加速度等資訊，用以進一步計算掃描儀的位置和姿態資訊。這樣的資訊對於推算掃描點的位置非常重要，如果這些資訊不夠精確或者是誤差過大，則所獲得的掃描點位置也會不準確，因此對空載掃描儀而言是重要的次系統。

5. 控制整個系統的軟體，包含運作、儲存與初步資料解算等能。實際的資料解算是在飛航與資料收集任務結束後再進行，其成果就是解算與平差後的點雲資料。

6. 在資料解算處理過程中，影像光譜資料也進一步整合，以獲取各點雲的光譜資訊，因此在最後成果中，點雲除了位置的座標資訊（X、Y、Z）以外，也會包含光譜資訊（R、G、B）。

在各項次系統中，定位與姿態紀錄次系統對空載雷射掃描儀的任務最為關鍵，因為所有的後續資料處理都需要位置、三維姿態與加速度資料，以獲取點雲的正確位置。其中，位置資訊是由差分全球定位系統獲取，這是結合載台搭載的GPS與地面基站的GPS同步紀錄全球定位衛星訊號，經由後處理方式消除誤差而獲得高精度的載台與雷射掃描儀位置資訊，可以控制在公分級的精度。此外，載台的三維姿態與加速度則由慣性儀加以測量，包含三個軸的位置與加速度（roll、pitch、azimuth）。這兩者能提供直接定位（direct georeferencing），也是空載雷射掃描的關鍵技術。其中慣性儀的經度是由其陀螺飄移（gyro drift）來決定，也就是短期間內測量產生角度誤差量來決定，陀螺飄移量愈低則精度愈高，定位資訊也愈準確。慣性儀根據其陀螺飄移的程度可分為四個等級，分別是下列幾種（El-Shiemy, 2008）：

1. 戰略等級（strategic gyros）：每小時角度飄移量是0.0005至0.0010度，約為每個月1度。
2. 導航等級（navigation-grade gyros）：每小時角度飄移量是0.002至0.015度，約為每個星期1度。
3. 戰術等級（tactic gyros）：每小時角度飄移量是0.15至10度，約為每小時1度等級。
4. 雙精度等級（two-accuracy gyros）：每小時角度飄移量是100至10000度，約為每秒1度等級。

慣性儀在軍事上有廣泛的用途，尤其是導航或飛彈方面使用的機率高，因此在世界上主要生產的國家都有進行出口管制，避免敏感科技外流造成安全與國防疑慮，所以高等級的慣性儀不僅價格極高且受出口

管制不易取得。在空載雷射掃描儀中所使用的慣性儀大多是「導航等級」或「戰術等級」，其精度方可應用於直接定位。在空載雷射掃描儀中，進行掃描作業時，雷射測距次系統、光學接收次系統與定位與姿態紀錄次系統同時運作，分別收集個別資料。而定位與姿態紀錄次系統同時記錄航空器之位置、三維姿態和加速度值，其中位置資訊來自於差分全球衛星定位系統，約2至10hz，但飛機的移動速度很快，單獨以差分GPS進行定位會造成很大的誤差，因此慣性儀所記錄的三維加速度資料加入，可以輔助計算定位，加上慣性儀中姿態的資訊，就可以將點雲的確實位置轉換，賦予其精密座標。這些作業都是在完成飛航與掃描的外

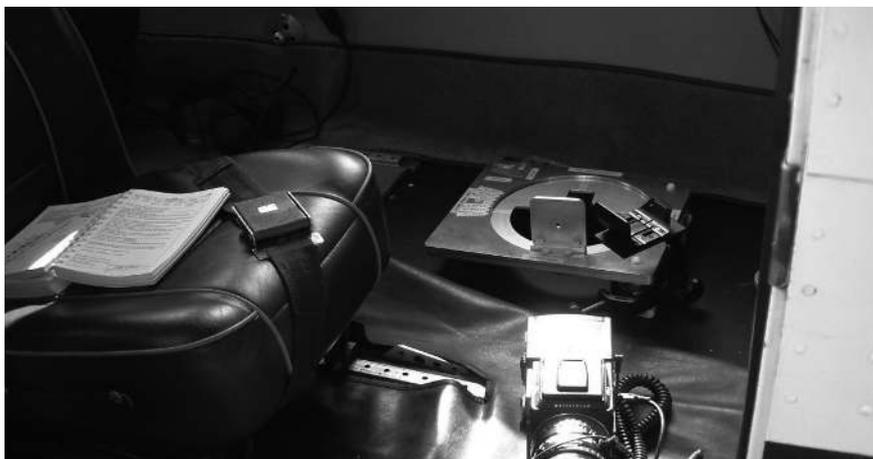


圖16 配合空載掃描儀之中尺幅120數位相機（HASSELBLAD相機）。



圖17 配置於飛機機鼻艙內之空載掃描儀與搭配全尺幅數位相機（微軟ULTRACAM），可同時進行雷射掃描與數位航空影像拍攝（攝影：胡子威）。



圖18 配合空載掃描儀之掃描式數位相機（萊卡ADS40）（攝影：劉時宏）。

業作業後所進行的內業作業，需要大量的轉換與計算才能使點雲能獲得精確位置座標，這也是空載雷射掃描的重要作業之一。

在空載雷射掃描作業進行時，除了點雲定位的挑戰之外，還有地表植被與人工建築物所造成的問題，也就是地表數值模型（DSM, digital surface model）與數值地形模型（DEM, digital elevation model）的差異。所謂地表數值模型是指地表包含所有植被與人工建築物所形成的表面，以網格式資料來表示。而數值地形模型與地表數值模型同樣是網格式的地表高程資料，但是剔除地表植被與人工建築物。過去以傳統航測作業中，製圖人員透過立體製圖儀將真實的地表高度製作成等高線，因此這些紀錄於地圖中的高程資料即是可轉換為數值地形模型的資料。在空載掃描儀的地面測繪作業中，雷射回波可以分為遇到地表植物便反射的一次回波與遇到植物下方地面才反射的二次回波，所以可以利用軟體的調整，採用二次回波以獲取地表的高程值。但是，人工建築物則無法利用這種方式移除，這些需要進行額外的作業以移除而獲得地表高程值，例如以外掛的程式或演算法進行人工建築的辨認，或者是以地表光譜值經過監督性或非監督性分類找出這些要剔除的區域，然後以人工輔助的方式賦予這些區域高程，這樣的後續處理可以確保由

空載雷射掃描所獲得的數值地形模型是具有資料量大與正確性高等雙重特性的高品質地形資料。對於國土監測、集水區經營管理、都市與非都市土地利用監測與變遷監測等領域的應用都無限寬廣。

事實上，在2010年起台灣政府單位已經開始引進空載雷射掃描進行台灣地區高密度數值地形模型的建立，初期是由經濟部中央地質調查所編列經費，將台灣分為數個區域進行1米解析度數值地形模型的建立。過去傳統的數值地形模型是由航空攝影測量資料獲取，解析度為40米與5米。但是，台灣屬於地表高程起伏度大且地形複雜度高的區域，加上有許多崩塌地與土石流的形成，地表地形變遷快速，因此引進空載雷射掃描可以大量提供地表資訊，對於其他地理、地質、森林、交通、都市計畫與環境的各種應用，可以提供最即時、精確與大量的數據，進行深入的計算與模擬，也是我國進入「環境大數據」最重要的基礎建設。未來空載雷射掃描也開始進入無人駕駛自動化領域，以自行導航的方式到預設的調查區域進行掃描等資料收集任務，如SCHIEBEL的無人系統（如圖19），可以大幅增加地表資料收集的彈性與效率，並且大量減少經費的支出，對於各種領域的應用都是非常值得期待的發展。



圖19 SCHIEBEL的無人雷射掃描系統（攝影：胡子威）。

四、結論與建議

以目前的趨勢來觀察，國土監測與氣候變遷方面的應用是雷射掃描重要的領域，因為雷射掃描可以建立大規模的地表位置與高程資訊，有非常廣泛的發展潛能。因為由氣候變遷所引發的海水面上升，對人口聚集的海岸平原區可能造成海岸侵蝕與海岸洪氾等風險。這些風險的正確評估有賴於精密且空間解析度的數值地形模型（DEM）方能有效進行，而建立精密且空間解析度高的數值地形模型可以應用空載或移動式雷射掃描來進行。其中，由氣候變遷所引發的海水面上升對高程較低的海岸區形成嚴重的威脅，因為這些區域不僅鄰近海岸線，且這些區域的海拔高度低，容易受到海水面上升造成海岸線後退的衝擊與影響，因此需要精確且大量的地形資料（即是「數值地形模型」，DEM），以正確評估在未來不同的海水面上升情境所可能對這些區域產生的影響，以及在「堅守海岸線」、「調適」與「撤退」等三種不同的海岸地區氣候變遷調適策略中，由政府、民間與各種權益關係人（stakeholder）共同選擇適合的方式進行氣候變遷海水面上升之應對。

在這種需求之下，海岸地區的數值地形模型資料不僅要具備高精度（即是指測量誤差在公分等級），更要有高解析度（即是指數值地形模型的網格大小要愈小愈好，也就是資料量非常龐大）。傳統的地形測量或水準測量不僅費時而且經費需求龐大，要取得適用於因應氣候變遷海水面上升衝擊的研究與行政用的資料有其困難度。在現在可以利用車載移動式或空載掃描儀進行大範圍高精度的測量，對於模擬與評估海水面上升可能產生的衝擊能獲得更精確的結果，對於地方居民與政府在討論氣候變遷衝擊調適策略時能有更充足與精確的資訊，也更能獲得較佳的策略。

其次，對於海拔高度低的人口密集精華區而言，由大量降雨造成的洪水是另一項需要關注的環境災害議題，尤其是在氣候變遷的情境

⁵ 「臺北宣言的」的10項內容請參見林俊全、蘇淑娟(2013)臺灣的地景保育, p. 16~20。

⁶ 北部海岸地質公園在2014年劃分成「北部海岸野柳地質公園」及「北部海岸鼻頭龍洞地質公園」，而「雲嘉南濱海地質公園」也在2014年10月加入，因此目前有8個臺灣公園網絡成員。請參見臺灣地景保育網：<http://140.112.64.54/main.php>。

下，未來出現大降雨量的可能性會增加，對於都市區排水與防洪壓力也隨之增加。目前經濟部水利署與各直轄市都有針對不同降雨情境模擬可能的淹水情境，也設置許多雨量計和水位計監測降雨、排水與淹水的狀況。對於這些模擬而言，也需要精確的都市區數值地形模型，以及更多的雨量站資料，來計算獲得可能的淹水情境，並且進行因應措施的擬定。例如高雄市為減少淹水，在愛河與其他淹水潛勢區設置滯洪池，使淹水的可能性大幅減少。未來更需要以模擬的降雨量增加情境，配合以車載移動式或空載掃描儀獲取之大範圍高精度的數值地形模型，了解未來可能的淹水潛勢，並且進行災害預防。

以台灣目前的狀況來看，在六大都會區由於地處鄰近海岸的平原區，可能會面臨較大的海平面上升衝擊，加上淹水潛勢可能會上升，因此更需要大量且精確的地形資料以進行未來可能情境之模擬與研判，因此需要持續進行地表雷射掃描以獲取必需的高精度大範圍地形資訊，這些任務應該列入政府施政的重點項目，編列架構的經費持續進行資料收集與監測。

參考文獻

1. El-Sheimy, N. (2008) Georeferencing Component of LiDAR systems, in Shan, J. & Toth, C. K. ed. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*, CRC press, NY, 195-214.
2. Jen, C. H., Chyi, S. J., Chiang, W. J. (2009) The active landscape in Taiwan- A cases from Wushandin mud volcano, southwestern Taiwan, 2009 *Present Earth Processes and Historical Environmental Changes in East Asia*, 49-50.
3. Pereira, L. M. G., Janssen, L. L. F. (1999) Suitability of laser data for DTM generation: a case study in the context of road planning and design, *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 244–253.

4. Petrie, G., Toth, C. K. (2008) Airborne and space laser profilers and scanners, in Shan, J. & Toth, C. K. ed. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing, CRC press, NY, 30-69.
5. Wenske, D., Jen, C. H., Böse, M., Lin, J. C. (2012) Assessment of sediment delivery from successive erosion on stream-coupled hillslopes via a time series of topographic surveys in the central high mountain range of Taiwan, Quaternary International, 236:14-25.
6. 許海龍、王偉群、陳立邦（2006）應用3D 雷射掃描技術於崩塌地地層滑動監測，2006 岩盤工程研討會論文集，377-386。
楊濟豪、曹孟真、詹尚書、李亮瑩、王泰典、許宗傑、柯承宏、陳怡頻（2014）地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討，中華水土保持學報，45(1)：1-18.
7. 蕭國鑫、劉進金、游明芳、陳大科、徐偉城、王晉倫（2006）結合空載 LiDAR 與航測高程資料應用於地形變化偵測，航測及遙測學刊，11(3)：283-295.