

快速多時的空間資料獲取科技

高機動性雷射掃描儀

張哲豪／國立臺北科技大學土木工程副教授

鍾明格／國立臺北科技大學工程科技研究所博士班

空間資料線上運用已經深入我們日常生活中。地圖伺服器所帶來的全球資訊，搭配上各種具有定位功能的行動裝置，以及穿戴式科技的發展，不難想像到，一個現場實景與數位資訊的整合內容，即將在我眼前展開。在相關技術中，即時獲取超高解析度空間資料，無疑地會是其中主要議題之一。特別在土木工程應用上，配合著變遷或災害議題，在空間或時間的尺度上，都必須考慮具有更高彈性的作業需求。本文將以空間資訊收集上，具有高機動性的雷射掃描儀為主題，說明土木工程面上的應用與結合。

空間資料獲取技術

『空間資訊』一詞雖在近十多年才廣泛地被大家所認知與使用，實際上人類開始使用『空間資訊』，可追溯至公元前 2700 年時由蘇美人所繪製的地圖，為人們提供定位與辨識方向的功能。爾後隨著測量技術與科技發展，地圖的精度與品質亦隨著提高。當電腦問世後，地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）也開始蓬勃發展。GIS 即為針對空間資料進行處理、分析與應用的資訊系統，從地圖的繪製、國土調查規劃、導航、災防分析應用等，都屬於 GIS 的範疇，如圖 1 為政府與 Google 所合作的『台灣防災地圖』，整合中央氣象局、水利署所提供與颱風相關的及時資訊於 Google Map 上。

GIS 提供處理空間資訊的技術與工具，而空間資料的精度與內容則決定了 GIS 分析與應用的範疇。空間資料來自於各式的測量工具儀器，如地形測量以往使

用水準儀與經緯儀，近年來由於雷射掃描儀（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。因雷射掃描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。而透過雷射掃描儀所儲存下來的資料，具有完整空間的三維資料，可永久保存使用，可促進未來相關領域的研究發展。如在颱風預報或豪雨特報前、後期，快速將邊坡崩場地掃描，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。

針對高解析度與機動特質的需求，目前常用的空間資料獲取技術可簡單分為攝影測量與光達，而這兩種技術都可再細分為空中與地面形式，因此可取得空間資料的解析度也有所差異，如一般空載光達高程解析度可至 30 cm，地面光達則可達到公釐等級。掃描或拍攝的涵蓋範圍也有很大的差距，空載光達多在 2000 m 左右的高度進行掃描，比起地面光達可一次取得更大範圍的資料；此外飛機受限飛行限制與天氣影響，地面作業則易受交通條件所限制，因此各種空間資料獲取技術各有其適用限制的條件。針對雲層限制，空載部份還可以有微波遙測的應用，可以穿透雲層，克服天候不佳的應用困難。

目前五種常見的快速空間資料獲取技術可分述如

後，其中，航空攝影測量與密集點雲屬被動式測量，需利用可見光反射；空載 InSAR、空載光達與地面光達則為主動式測量，發射微波或雷射量測目標物。

1. 空載光達：將雷射掃描儀裝設至飛機上，飛機上裝置 DGPS 精密動態定位裝置與 INS 慣性系統取得慣性姿態，以此求解每一條掃描航線的瞬時三維坐標與姿態參數，以解算大量的空間座標，稱為點雲資料，如圖 2 所示。而空載光達系統會以雷射光進行掃描，會接收到目標物的多重反射訊號，藉此測距。而第一回波 (First return) 為地表最上層的反射，如 DSM；而在有植被覆蓋的區域，掃描光波可能穿透至地表物，而產生接近地表的最後回波 (Last return)，但也可能無法穿透而沒有最後回波，如圖 3 所示。藉由此項的特性，空載光達的點雲資料，可透過程式與人工的編修，將地表物與地面分隔出來亦即產生地形與植被的三維空間資訊。大面積 高精度 高解析度 穿透能力佳
2. 地面光達：雷射掃描儀可以不用接觸測量物本身，利用遠距離且非破壞方式實施掃描，並且可以快速並精確的獲得目標的點雲資料，因此取代了傳統測

量且被廣泛應用在不同領域。例如：評估岩石邊坡之穩定、古蹟調查及維護、調查災損的管線掃描、森林樹木的生長狀況監測評估。目前地面雷射掃描儀每秒的掃描速度可多達數萬點，依規格不同距離可從數十公尺到上千公尺，近距離精度可達公釐等級，掃描效果如圖 4 所示為例。

3. 空載 InSAR：合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR) 為利用雷達微波方式，於不同時間或不同位置獲取同一地區兩幅以上的影像，藉由相位 (Phase) 值的差量獲取地表的空間資料。大面積，因雷達具有穿透雲層的特性，故 InSAR 較不受天候雲層的影響，可快速獲取大面積高精度的空間資料。
4. 航空攝影測量：將量測型相機裝置於飛機上，利用航線規劃拍攝重疊的立體相片，配合地面控制點量測與空中三角平差計算，完成立體製圖、數值地形模型 (DTM) 或正射影像。可快速拍攝大範圍面積，不受測區交通影響，但需事先申請空域，且受限於需被動接收可見光，易受天候與雲層所影響。
5. 密集點雲：隨電腦計算能力大幅增進，與計算機視

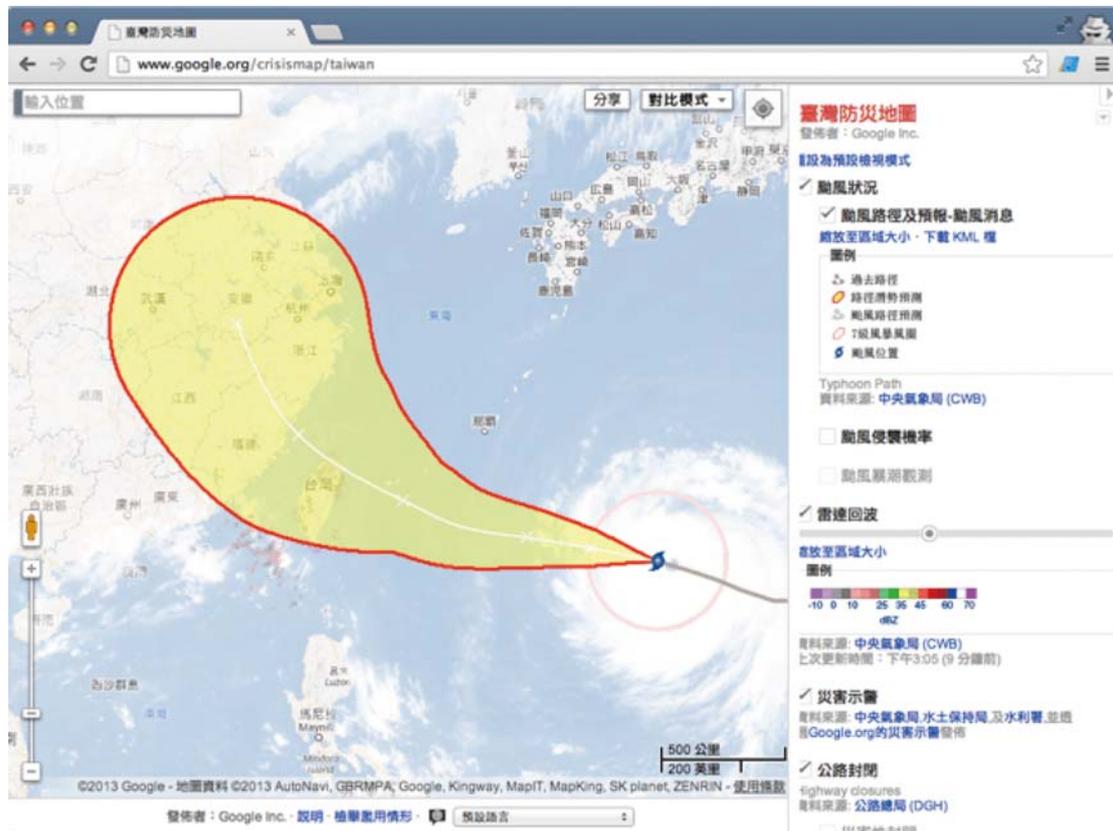


圖 1 台灣防災地圖

覺及演算法的進步下，利用高解析度的重疊影像重建空間資料，可程式自動化產生高密度的點雲資料，如圖 5。其點雲密度依據影像解析度而有所差異，可獲得比光達點雲資料密度更高的結果，且因由影像解算，點雲資料具備影像顏色資訊，對於視覺化呈現相當有幫助，如圖 6。

由於現場安置容易，作業程序也很能夠配合傳統土木工程場址，本文將以雷射掃描儀為主題，以實務案例的呈現，說明新型空間資訊獲取技術，如何與土木工程對應結合，發揮其高精度與多時性的特點。



圖 5 密集式點雲 3D 模型資料 (acute3D)

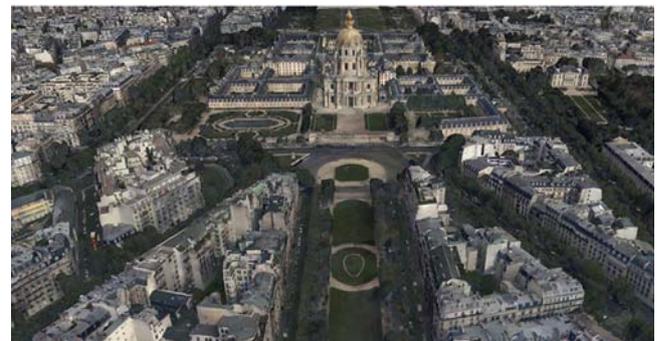


圖 6 密集式點雲 3D 模型資料 (acute3D)

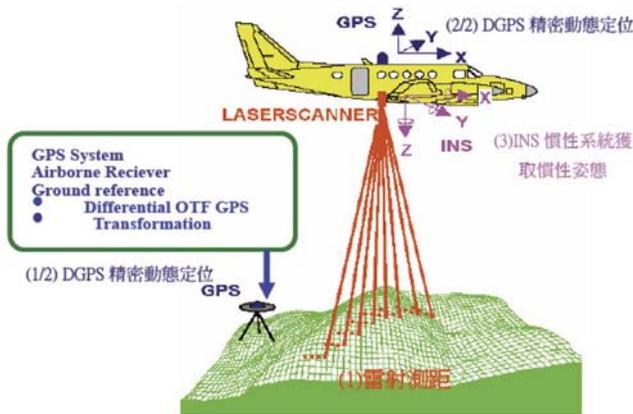


圖 2 空載光達裝置示意圖 (史天元, 2004)

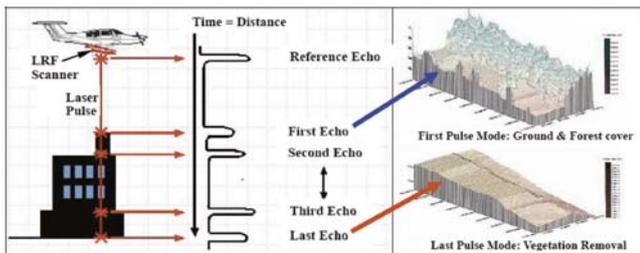


圖 3 空載光達接收目標物多重反射訊號示意圖 (史天元, 2004)



圖 4 地面光達掃描苗栗街道圖 (LinkFast Technology Co., Ltd)

高機動性雷射掃描儀工程特點

地面 3D 雷射掃描儀 (Terrestrial Laser Scanner)，亦即光達 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 為近年來大量應用的三維空間資料掃描技術，雷射掃描儀可以非接觸式且遠距離的測量目標物，並快速準確的獲得目標物的三維空間資料 (Rottensteiner, Trinder, & Clode, 2005)，稱為點雲 (Point Cloud)。目前地面光達已廣泛應用在不同的領域，如使用地面雷射掃描儀測量邊坡後，使用點雲資料量取地層的傾角與傾向，結果顯示點雲量測結果較現地量測來得準確，且雷射掃描儀可以遠距離對目標物測量，而現地因地形因素無法測量的地點，在點雲上皆有機會量取結果 (Yiu & King, 2009)。利用光達的非接觸式測量特性於古蹟調查與維護 (Palombi, Cecchi, Lognoli, Raimondi, & Masotti, 2007)。或利用演算法從點雲資料中將樹體萃取出，以評估樹木的生長狀況及監測評估 (Thies, Pfeifer, Winterhalder, & Gorte, 2004)。點雲資料也被使用於橋樑監測，道路設計規劃 (Lee, Park, & Ru, 2008) 等。

而在水利領域也有許多相關的應用，如使用點雲資料的高精度高密度特性評估地表的摩擦係數，以供模式使用 (Smith, Cox, & Bracken, 2011)。

地面雷射掃描儀為地面測量上一項相當大的突破，相較於傳統地面測量的儀器及測量技術上有著明顯的不同。以繪製山區等高線為例，葉怡成 (2004) 於書中提到在傳統地面測量中等高線的繪製，必須由測繪人員由水準儀、全測站等儀器施測地形測量，於現場測取高程點並標記於圖上，然後利用線性內插的方式繪出等高線。或。若要求山區之等高線完整且高精度，在測量外業上必須逐一架設多次測站，耗費相當人力、時間及成本等，才能完整測量出整各山區之地形。另一種方式則採取航空攝影測量來製作等高線。航空攝影測量雖然具有涵蓋面積寬廣的優點，但拍攝時間受天氣影響，內業資料處理也相對較為龐大，小區域地形測量成本不夠經濟等。

相對這些方法，地面雷射掃描儀具有下列優點：

- (1) 移動容易：架設在一般腳架上，重量多在 5 ~ 12 kg 內，容易攜帶與安置；
- (2) 取得三維空間資料快速：掃描速度可達將近每秒百萬點，可以大量獲取空間點雲資料；

因此，在山區中，地面雷射掃描儀器執行地形測量運行移動較為快速，且獲取三維點雲資料密度較傳統方法密集；經由內業處理三維點雲資料，可以得到較傳統測量之高精度的等高線資訊，也較為節省人力、時間及成本。特別是在較為困難的山區陡坡地形上，不需要人員直接到達，減少了許多風險。

圖 7 為山區 345KV 高壓電塔下方邊坡滑動，正是這樣的案例：包含地形困難，植被覆蓋，人員難以接近等等因素。以土木工程關注角度而言，後續該邊坡的所有可能處理與維護，都需要考量到現況地形的空間資訊，例如邊坡上任一指定方向的高程剖面線；指定位置的坡度與坡向等，這些物理量都要從地形空間資訊上來推求。如何在人員安全考量下，又能夠以高效率作業得到地形，又或是識別濃密植被下的真實地面，便成空間地形空間資訊獲取時的主要需求與挑戰。

比較圖 7 而言，圖 8 則為使用雷射掃描儀掃描後之現場點雲資料，凸面中的每一個點，都具有三維空間坐標，以及相對應的顏色。因此，透過人為識別，

可以認定邊坡各項特徵，進而在一個符合現場的模型中，量取必要的空間資訊，包含剖面線與特定位置的坡度，如圖 9 中，69KV 電塔邊坡與其剖面圖所示；甚至於改變視角，觀察各個角度的影像。

以目前常見的雷射掃描儀 Riegl VZ-400 而言，掃描儀的電子測距模組如圖 10 所示，主要針對需要高速掃描而設計，擁有高速的雷射掃描、快速及高精度的訊號處理，以及多樣高速的資料傳輸介面。掃描儀本身的掃描動作是利用雷射光束及內部一個反射鏡，垂直掃描的範圍為 100 度 (水平向上 70 度，水平向下 30 度)，在高速掃描或是垂直方向的掃描下，反射鏡是持續以可調整的速度進行旋轉，但在慢速的掃描或是很小的掃描角度，它就只會上下擺動；而水平方向的掃描動作，就是利用機體本身，作環場 360 度旋轉完成整個掃描動作，利用快速且準確的脈衝雷射，將待測物以多個測站進行完整掃描。

掃描模式又分為以下兩種，高速模式 (High Speed, 縮寫 HS) 和長距模式 (Long Range, 縮寫 LR)；在高速模式下，掃描儀的測距範圍約為 350 米，掃描速度為每秒發射 122,000 點，掃描精度為 5 mm；而長距模式，掃描儀的測距範圍約為 600 米，掃描速度為每秒發射 42,000 點，掃描精度為 5 mm，詳細規格如表 1 所示。

上述 Riegl VZ-400 雷射掃描儀可歸類為長距離型，非常適合野外現地掃描作業，掃描距離可長達數百公尺，其掃描點雲密度對於現地景況記錄已十分足夠。但若掃描目標的尺度較小，譬如隧道裂隙或建築物裂縫，VZ-400 的掃描精度與點雲密度便可能無法完全記錄這些細節。因此，另一種近距離、高密度類型的雷射掃描儀，也許較為適合用來記錄較為細節的目標，如 FARO 的 FOCUS 3D (圖 11)，其規格如表 2，可明顯看出掃描作業距離較近，約在百米左右，但掃描速度與精度皆高於 VZ-400，標準差達到 2 mm，非常適合近距離高精度的掃描作業，如圖 12 所示。因應精度需求與現場距離的限制，是選擇適當工具的最主要考量方向。

目前地面雷射掃描儀通常會搭配相機，目的在掃描的同時拍攝現場的實際影像，而相機與雷射掃描儀會經由原廠的率定，確定其相對關係。因此經過計算後，雷射掃描儀的點雲可對應至相機影像的顏色，也就賦予點雲色彩，使展示更加擬真。



圖 7 台電 345KV 高壓電塔邊坡滑動情形



圖 8 台電 345KV 高壓電塔與邊坡點雲

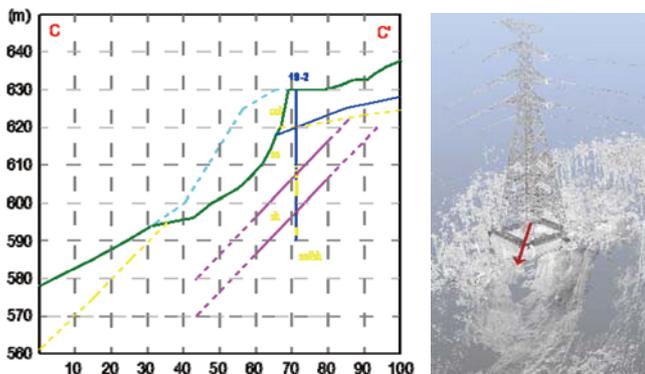


圖 9 台電 69KV 高壓電塔、平面圖、與邊坡剖面分析



圖 10 地面雷射掃描儀 RIEGL VZ-400



圖 11 地面雷射掃描儀 FARO FOCUS 3D

表 1 地面雷射掃描儀 RIEGL VZ-400 規格

儀器型號	RIEGL VZ-400	
	長距模式 (LR)	高速模式 (HS)
測距範圍	600 m	350 m
光束參數	100 kHz	300 kHz
掃描速度	42,000 點 / 秒	122,000 點 / 秒
重量	9.6 Kg	
內建記憶體	32 GB	
最大掃描角 (垂直 / 水平)	100° / 360°	
掃描精度	5 mm	
測角精度 (水平 / 垂直)	1.8" / 1.8"	
相機	外接式高階數位相機	

表 2 地面雷射掃描儀 FARO FOCUS 3D 規格

儀器型號	LASER SCANNER FOCUS 3D
測距範圍	0.6 m ~ 120 m
掃描速度	122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000 點 / 秒
重量	5 Kg
內建記憶體	32 GB
最大掃描角 (垂直 / 水平)	305° / 360°
掃描精度	10 m 和 25 m 時為 ± 2 mm
相機	內建相機解析度：最高 7000 萬像素

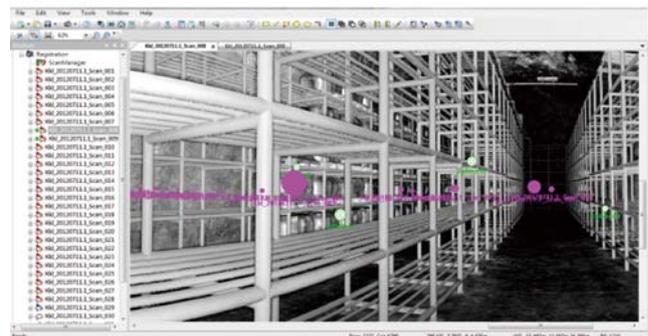


圖 12 FARO FOCUS 3D 掃描點雲示意圖

隧道基本參數分析

傳統隧道測量一直是難度相當高的挑戰，在工程上需求之下，需要能夠盡可能完整檢視與記錄坑道內的細節。然而，受限於經費與技術能力，傳統採用多個斷面記錄，依照其連結順序，以說明坑道隨著軸向距離的變化。雷射掃描儀在此案例中，可以突顯大量點雲所建構的連續坑道模型，可提供相關工程參數具體數據的量測能力。

隧道的基本工程參數中，包含了岩石節理的走向與傾角。透過這些參數的統計分類，以及空間資訊的協助判識，可以引導出具有潛在墜落與滑落問題的關鍵岩塊的可能位置，藉此確認坑道中的可能風險之處。

本案例地下坑道平面圖如圖 13，屬於狹窄的小型坑道，在地下坑道內架設儀器較不容易。本案例選擇前述地面雷射掃描儀 FARO FOCUS 3D 來執行，以其高精度，輕量，體積小為主要考量，比較適用於本案例之小型坑道。圖 13 中點位為測量站位，總數為 29 站，採用多測站位的方式補足所有視角，以記錄各岩石節理面向，避免有掃描的死角。圖 14 即該地下坑道點雲中，展示某部位之頂部模型。圖中 X 軸表示東西方向，Y 軸表示南北方向，Z 軸表示天頂方向。圖 14 的 Z 軸指向紙面，表示天頂方向即為指向紙面。

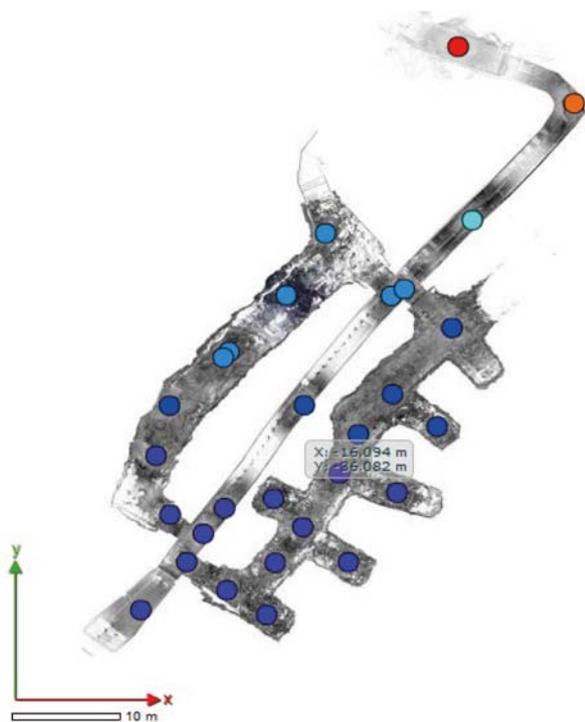


圖 13 地下坑道平面圖與測站分佈



圖 14 地下坑道頂部模型

經由現地觀測紀錄岩塊的分類繪製，以及後續的統計分析，可推論得到主要節理群之走向與傾角。在點雲處理中，透過作業軟體，是使用線條的方式，分別採用紅、黃、綠線，將所量測的主要節理群展示於坑道頂部的點雲模型之上，對照圖 14，圖 15 加註了各主要節理群的判識，以及可能弱面的組合位置，如圖中『1211』的標示。

圖 16 即是以此『1211』位置，將視角由垂直 XY 平面，略為傾斜，使得可以由側面觀察到，紅黃綠三個主要節理線，變成在空間中節理面的展示。這三個面向所交叉構成的關鍵岩塊，可能受到重力影響，而有潛在風險，據此辨識示意在圖 16 中。

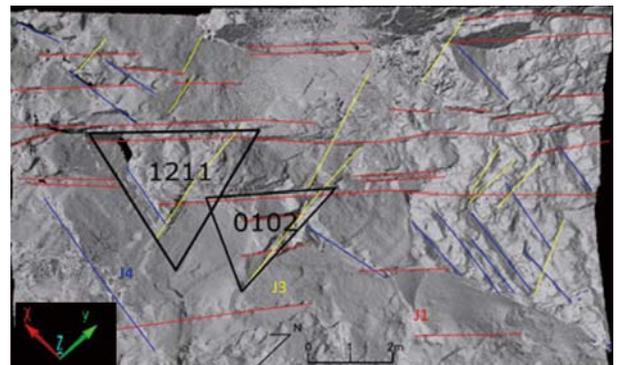


圖 15 地下坑道岩壁頂部弱面繪製

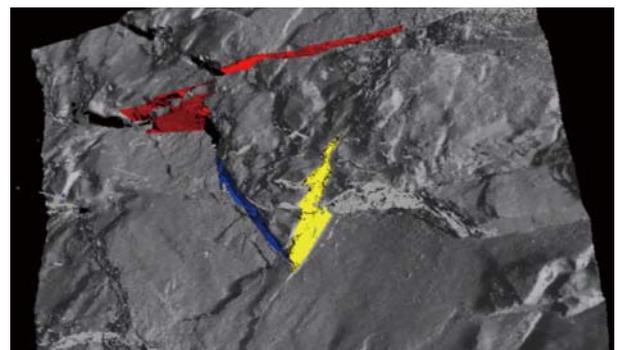


圖 16 地下坑道岩壁頂部關鍵研塊示意

歷史建物監測

松山菸廠文創園區位於台北市信義區內，緊臨光復南路與市民大道，佔地面積約 18 公頃。前身為臺灣省菸酒公賣局松山菸廠，地上建物於民國 26 年開始興建，民國 29 年全區完工，並於 90 年由台北市政府指定為第 99 處市定古蹟，其辦公廳、製菸工廠、鍋爐房與一至五號倉庫為古蹟本體，佔菸廠舊址約 8 公頃面積，其於 10 公頃則規劃為台北體育園區（又稱台北大巨蛋），因台北大巨蛋興建基地緊鄰園區內鍋爐房位置，基於保存古蹟，遂於台北大巨蛋興建期間，同步對鍋爐房及其煙囪等建物進行監測，以確保於施工期間古蹟免於遭受破壞。

本掃描監測作業以地面雷射掃描儀定期掃描松山菸廠文創園區內鍋爐房及其煙囪，檢視評估古蹟建物受損情形，並重建三維空間資料以利後續比對監測。掃描範圍為園區內煙囪及鍋爐房建築（描述時以“面對鍋爐房門口”為正面，煙囪於鍋爐房左側）俯視圖如圖 17。目的為完成指定範圍內建物掃描之整體模型，提供重點處量測數據，如裂縫寬度、位置等。

松山菸廠監測作業共於 101 年 4 月至 103 年 6 月掃描五次，圖 18 ~ 圖 23 為各期掃描作業時，煙囪及鍋爐房外觀建物狀況。第一期掃描作業時可以完整看到煙囪整體，如圖 18；第二期掃描時，可發現針對煙囪頂部裂縫區域及底部已有施作維護工程，如圖 19；第三期掃描作業進行時，後方台北大巨蛋工程地基部份完工，如圖 20；第四期掃描作業時，後方大巨蛋工程開始搭建塔樓鋼構，如圖 21；第五次掃描作業時，鍋爐房周架設鐵圍籬，後方大巨蛋塔樓低樓層處已完工，如圖 22、圖 23。

以第五次掃描作業為例，先於 103 年 5 月 31 日進行評估現場，鍋爐房建築長約 24 公尺、寬約 15 公尺。煙囪高度約 35 公尺、直徑約 2.5 公尺。現地觀察到煙囪實施維護工程作業：煙囪的上部分有鐵網包覆，底部有鐵架支撐，鍋爐房及煙囪的四周新增鐵圍籬。

將掃描資料與照片像素結合，可建立擬真的三維立體模型，如圖 24 為 2012 年 4 月份之掃描模型，圖 25 為 2014 年 6 月份之掃描模型。完成後之三維立體模型可進行測量，提供建物損壞情形測量與後續不同時期掃描資料監測比對等。



圖 17 鍋爐房及煙囪俯視圖（Google Map）



圖 18 煙囪及鍋爐房外觀（2012 年 4 月份建物情況）



圖 19 煙囪及鍋爐房外觀（2012 年 12 月份建物情況）

當各時期的資料經由完整的測量過程以點雲形式完整保留後，很容易可從點雲模型中量取各項資料，或比較不同時間建築物的變化狀態。如圖 26 為第一期與第三期之疊合資料，可明顯看出煙囪底部新增了防護設施。如圖 27，煙囪頂部的裂縫也可被保留於點雲模型中，在現場難以測量的裂縫長度與位置，可在點雲模型中利用內業的方式便可測得數據。



圖 20 煙囪及鍋爐房外觀 (2013 年 6 月份建物情況)



圖 21 煙囪及鍋爐房外觀 (2013 年 12 月份建物情況)



圖 22 煙囪及鍋爐房外觀 (圍牆外) (2014 年 06 月份建物情況)



圖 23 煙囪及鍋爐房外觀 (圍牆內) (2014 年 06 月份建物情況)

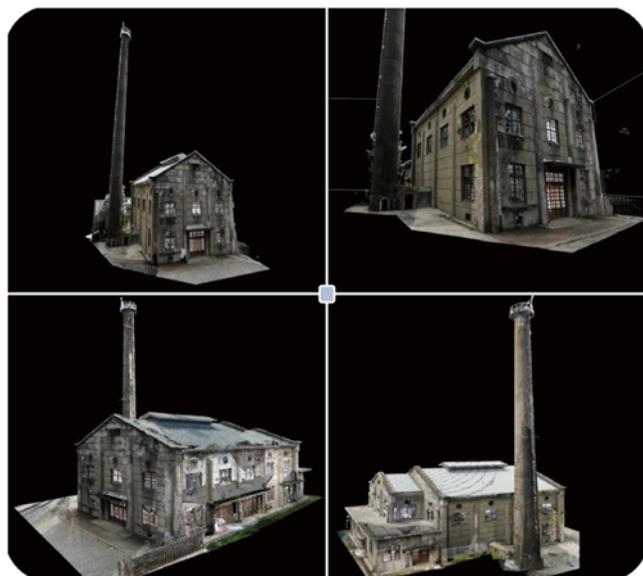


圖 24 點雲模型_2012 年 4 月份



圖 25 點雲模型_2014 年 6 月份



圖 26 第一期與第三期掃描點雲疊合 (藍色為第三期)

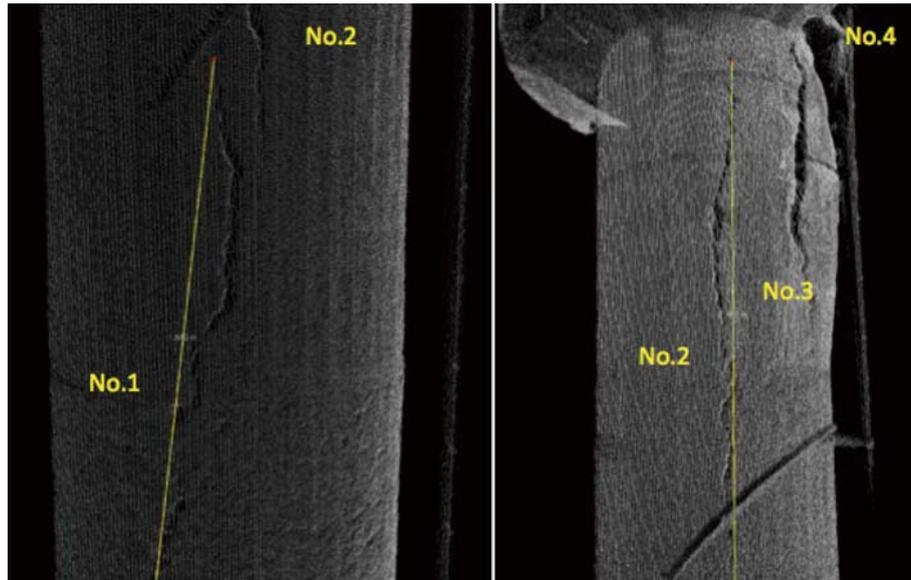


圖 27 煙囪裂縫點雲模型

從 101 年 4 月至 103 年 6 月五次掃描作業中，不同時期所測得的數據，便可比較分析，提供施工單位或政府單位參考。搭配現場佈設多種監測儀器，如傾斜儀，就可以相互比較，說明整個歷史建物的變遷結果。

結論

本文介紹了由航空攝影測量至光達系統的新式測量方法，其共同特色都是加快空間資料的擷取速度，並且具備更佳的精度與應用潛力。當可以短時間取得大範圍的空間資料後，測量的時間間隔便可以縮短，有機會完整紀錄各個時期地形地物的變化，對於國土規劃或特定目標的監測便十分有幫助。如本文以松山菸廠為例，不同時間的掃描結果便可比較其變化量，可作為施工單位與政府單位的參考。而不論空載或地面光達皆大幅縮短了測量外業的時間，幾乎可以完整將現地狀況以數值資料（點雲）的形式保留，外業的時間減少也代表成本的降低，許多原本需在現地完成的工作，現在都可在內業使用數值資料的後續處理來完成。如本文以地下坑道為例，現場由於空間與設備限制，在空間狹小的情況之下，要在現場完成對於岩塊的分析與判斷相當困難，或根本無法實際量取資料，也必須耗費相當的人力與時間，但利用雷射掃描儀對現場數值化後，後續判斷工作便可利用內業方式進行完成，可節省相當多的時間與外業耗損。未來透過新科技所獲取的空間資料會日益龐大，資料精度與

速度也會有所增進，如何從空間資料中分類、擷取土木工程各領域所需的基本參數，並加以分析，使空間資料轉化成各類工程資訊，將是未來重要的課題。

參考文獻

1. Lee, H. J., Park, E. G., & Ru, J. H. (2008). Practical use of LiDAR data for environment-friendly road design. *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, 26(3), 255-262.
2. Palombi, L., Cecchi, G., Lognoli, D., Raimondi, V., & Masotti, L. (2007). A fluorescence imaging lidar for the control of cultural heritage. Paper presented at the Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
3. Rottensteiner, F., Trinder, J., & Clode, S. (2005). Data acquisition for 3D city models from LIDAR. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
4. Smith, M. W., Cox, N. J., & Bracken, L. J. (2011). Terrestrial laser scanning soil surfaces: A field methodology to examine soil surface roughness and overland flow hydraulics. *Hydrological Processes*, 25(6), 842-860. doi: 10.1002/hyp.7871
5. Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D., & Gorte, B. G. H. (2004). Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 571-581.
6. Yiu, K., & King, B. (2009). Stereonet data from terrestrial laser scanner point clouds. *Survey Review*, 41(314), 324-338.