

研究以 VLP-16 感測器結合自動升降台掃描環景影像

林彥均 吳鎮宇 蕭宇伸* 卓宥瑄 林冠仲

摘要 本研究利用 Velodyne VLP-16 光達感測器，結合自動升降平台以建置 3D 環景影像。本團隊嘗試將 VLP-16 儀器架設於相機腳架、並放置於可自動且緩慢升降之機械平台來增加掃描空間解析度、以完成三維點雲模型。相較於傳統靜態與動態技術，本方法在設備成本上大幅減低。實驗地點分為國立中興大學與橫嶺山隧道兩個區域。國立中興大學包括空間資訊應用研究室 (AGL) 室內與小禮堂中庭，研究項目包括本方法之模型空間解析度與點雲精度等；橫嶺山隧道則嘗試利用本方法監測隧道漏水之可行性。

本研究結果如下：(1) 以人為方式辨識點雲所造成之誤差為本實驗點雲誤差之主因；(2) 點雲距離與點雲誤差的關係非呈現正相關；(3) 在遠距離處由於點雲密度較低，特徵物點雲較難辨識，而在近距離處雖然點雲密度高，但人為選點所造成的影響程度也越大；(4) 本方法顯示可有效監測隧道漏水。本研究期望能持續精進此技術，進而對水土保持構造物監測作出貢獻。

關鍵詞：VLP-16，點雲，隧道。

Panoramic Image Scanning Using the VLP-16 LiDAR Puck with an Automated Lifting Platform

Yan-Jyun Lin Zen-Yu Wu Yu-Shen Hsiao* Yu-Hsuan Cho Kuan-Chung Lin

ABSTRACT We used the LiDAR sensor VLP-16 LiDAR Puck with an automatic lifting platform to capture surrounding scenes in 3D. The VLP-16 LiDAR Puck was mounted on a camera stand and placed on a portable automatic lifting platform to increase spatial resolution and complete a 3D cloud point model. Compared with traditional static and dynamic techniques, this method used equipment of considerably lower expense. The study areas included (1) indoor space of the Applied Geomatics Lab and the courtyard of the auditorium at National Chung Hsing University, and (2) the Henglingshan Tunnel. For the test area at the university, this study focused on spatial resolution, point cloud accuracy, and practicality; for the Henglingshan Tunnel, this study attempted to monitor the feasibility of monitoring tunnel leakage.

The results revealed the following. (1) The main reason for point cloud errors was artificial point cloud identification (human error). (2) Distance and error were not positively correlated. (3) The feature objects were difficult to identify from a long distance due to the lower point cloud density. Although high cloud density occurred at a short distance, the effect of human error was stronger. (4) Our method for monitoring tunnel leakage can be effective. We expect to continue improving this VLP-16 technology and hope this method can contribute to the monitoring of soil and water conservation structures.

Key Words: VLP-16, point cloud, tunnel

一、前言

臺灣地區山坡地所占面積廣大，坡陡流急，加上時常受到颱風、豪雨及地震等天然災害影響，常有山崩、地滑、土石流、坡面沖蝕等災害發生，為了保障人民的安全，即時性地形建置與構造物監測顯得相當重要。若以即時性地形建置為目的，常以航空攝影測量、無人飛行載具或空載光達測量技術獲得點雲，再將相關資料進行內業處理，以比對災害前後的地形變化趨勢；若以構造物監測為目的，則常使用地面光達技術進行掃描。近年來由於科技進步快速，三維雷射掃

描技術（又稱光達技術）發展非常蓬勃，高精度度且即時性的三維空間點雲資料已可快速獲得。

光達技術可分為靜態與動態掃描。靜態掃描可以快速且精確地完成掃描工作，但其造價相對昂貴，對於個人以及小型研究團隊取得不易，且應用於大範圍地區時需考慮架設測站的位置與數量，確保不同測站點雲坐標系統能夠成功套合並涵蓋目標物範圍，才能節省時間成本與人力資源。以近十年之國內研究而言，呂曜宇 (2008) 探討 Optech ILRIS-3D 地面光達點雲資料特性及分類應用；蔡佳琳 (2011) 以不同共

軌規標尺寸對於三維點雲模型套疊精度之影響，實驗利用 FARO Photon120 地面光達為例；王中平 (2012) 應用傳統地面光達 RIEGL VZ-400 於古蹟建物多期監測，包括牆壁裂縫長度、體積計算，透過點雲模型中的特徵點與全站站所量測之特徵點進行誤差比較後，可得知建築模型可達 1cm 精度等級；吳建廷 (2013) 分析地面光達進行掃描作業時常受到外在環境與人為因素影響；陳煜文 (2015) 應用 FARO LASER SCANNER FOCUS 3D 光達監測自行搭建之橋梁模型構造，以獲得橋梁受外加載重後的變形狀況，結果顯示光達掃描成果與位移計變位量測成果相近；吳孟姍等 (2016) 應用地面光達於防砂壩淤砂量估算與監測，在防砂壩上、下游進行掃描，以全波形回波即時分析記錄不同回波特性，可自動分類，方便地表點位與植被的分離與辨識，並以掃描獲得之淤沙坡度來計算淤沙量，以進行後續計算分析；黃立信等 (2018) 以傳統地面光達 RIEGL VZ-1000 監測橋梁裂縫，配合 e-GNSS 定位技術獲得之控制點坐標，以減少點雲坐標系統套合的誤差，相較於過去空載光達資料之結果，精度更準確且成本相較便宜；林老生與施宇鴻 (2019) 以三維共軌規標提昇光達掃描建物之效益，其方法在較佳掃描作業下則可節省相當多掃描時間。

在動態掃描方面，近年來以發展輕型且移動方便之雷射掃描儀為趨勢，如本研究所使用的之 VLP-16 儀器，儀器可利用空載、車載或手持之方式進行掃描。雖然相對於靜態地面光達，儀器價格便宜許多，但通常需搭載 GPS/GNSS 系統、慣性測量單元 (IMU) 等裝置。近年來動態光達掃描國內外研究也非常成熟，例如紀延璋 (2016) 以手持式雷射掃描儀觀測小規模土砂沉陷量模擬實驗，可藉由疊合前後的點雲圖來得知土砂變動量，成本低、作業時間短、資料取得性容易且精度佳；Filgueira et al. (2016) 利用 VLP-16 光達與 IMU 系統裝置在背包上進行室內景物 3D 建模，並與 FARO FOCUS 地面光達結果比較；Jozkow et al. (2016) 嘗試利用無人飛行載具搭載微型光達進行三維地形建模之可行性評估，他們分別使用 Velodyne HDL-32E 與 VLP-16 光達來完成掃描作業，並與 Nikon 相機建模成果比較；G'alai 和 Benedek (2017) 嘗試以 VLP-16 與 HDL-64 光達分析動態活動特徵的辨識度，研究後發現影響辨識結果的主要因為量測距離遠近與點雲密度高低，點雲密度主要受雷射光數量影響，而 HDL-64 在動態活動中的辨識度也較 VLP-16 來的佳；Vlaminck et al. (2017) 研究出一種以 VLP-16 完成 3D 建模之機器人，透過他們的方法，可以自動進行室內建模，並提高掃描匹配的速度並保持點雲模型的精度準確性；洪翎嘉等 (2018) 以 DPI-8 手持掃描儀進行坑道測量之可行性分析，相關結果與傳統地面光達 Focus3D 之結果作對照，獲得不錯之成果；Zhang et al. (2018) 提出一種新的演算法應用於重建大規模區域點雲模型，並且可以獲得更好的表面重建效果與即時性點雲重建，且可大幅度減少內業所需的時間，也滿足機器人移動式建模的需求。

綜合上述研究，若是以靜態傳統地面光達進行測量，空間解析度高、量測範圍廣、點雲精度佳，但掃描易受限於光

達系統昂貴的價格與不同測站點雲資料結合等問題，取得上較困難；若是以動態光達系統進行測量，在未搭載任何 GPS/GNSS、IMU 等裝置下，由於相鄰雷射線間隔大，目標物形狀也較難清楚呈現，無法建置完整點雲模型，而且相關外加裝置在價格上也不便宜。

本研究以 VLP-16 儀器本身為研究主軸，搭配機械式平台與自行開發之程式來處理掃描之點雲資料，發展一套有別於傳統之靜態掃描技術，可大幅減少掃描成本。研究流程圖如圖 1 所示。VLP-16 光達裝置於相機腳架上，並利用可穩定且緩慢升降之機械平台來進行掃描以建置建築物之三維空間模型，後續再利用捲尺與 GPS 等實際量測長度與坐標值來驗證模型精度，另外本文也利用此技術掃描隧道，嘗試監測隧道漏水狀況。希望此方法未來能應用於水土保持構造物之之掃描與監測。

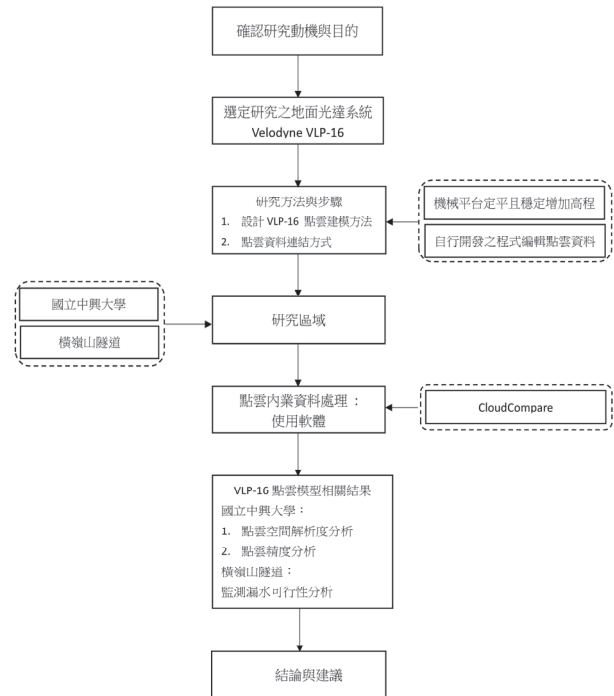


圖 1 研究流程圖

Fig.1 The study flowchart

二、理論基礎

1. VLP-16 儀器與相關配備

VLP-16 為 Velodyne 所開發之光達儀器，在過去幾乎都應用在動態掃描。VLP-16 儀器非常輕便 (約 830 g) 且單價相對低 (約 4,000 USD)，儀器最大測程可達 100 m，並且以垂直角 30°(±15°) 進行水平 360°度全景掃描，每秒可獲得 300,000 筆點雲資料，包括點雲強度、距離、方位角、垂直角、雷射線名稱、時間等。儀器基本掃描頻率為 5 Hz，但可設定調整增加每秒鐘掃描點雲數量。而根據過去研究 (Glenie et al., 2016)，VLP-16 之掃描觀測精度介於 2.2 cm~2.7 cm。由於 VLP-16 在掃描時僅有 16 條雷射線，雷射線間距也會隨著距離增加而變大，再加上雷射光水平旋轉掃描，水平方

向點雲密度高，但在垂直方向雷射光線不連續使得點雲數量不足，若要利用 VLP-16 完成三維空間點雲模型則必須克服此相關問題。為了克服掃描範圍與雷射光線不足等問題，本研究藉由相關輔助工具嘗試完成三維空間之建模，如圖 2 所

示。相關輔助工具主要包括機械式升降平台，其他為相機腳架、相機雲台、外接行動電源、筆電等，組裝後實際掃描示意圖如圖 3 所示，如此可增加垂直方向之點雲密度。



圖 2 VLP-16 結合相機腳架與升降平台之外觀 (左) 與示意圖 (右)

Fig.2 The appearance and schematic of the VLP-16 combining with the camera stand and the lifting platform

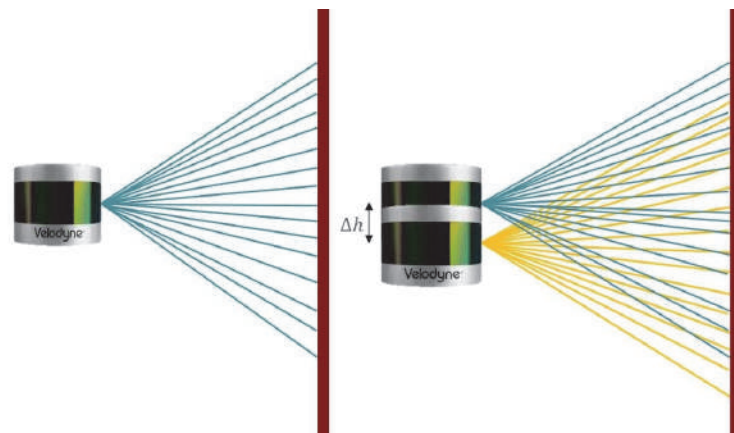


圖 3 VLP-16 利用升降平台改變儀器高度以提升點雲密度示意圖

Fig.3 The schematic of changing the height of the VLP-16 using the lifting platform to increase the point cloud density

2. 內業點雲資料處理

本次實驗主要使用 CloudCompare 軟體來檢視點雲資料與完成 3D 立體建模，另外亦使用自行編寫之 Fortran 程式來改正掃描點雲資料的高程，將掃描點雲資料選擇以 XYZ 三維坐標值與強度值的方式輸出完成建模。CloudCompare 為一款取得較方便且操作容易之開源軟體，可由網路上免費下載，其功能主要包括點雲資料編輯與量測 (距離、角度)、不同測站間點雲資料的拼接、坐標轉換、平滑或分割網格、評估點雲之粗糙度與曲率等。本團隊利用機械式平台改變儀器高程，但由於光達三維坐標是依據儀器本身為中心點建

立，所以必須修正每一筆點雲資料高程值，才可獲得隨時間變化之高程值。本研究發展之 Fortran 程式，可將 VLP-16 儀器所記錄的點雲時間，以內插方式分配至每個點雲，以獲得每個點雲之改正後高程值，其公式如下：

$$z' = z + \left(\frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \right) * \Delta h \quad (1)$$

其中 z' 為改正後點雲高程值； z 為原始點雲高程值； t 該點雲之記錄時間； t_{\min} 第一個點雲之記錄時間， t_{\max} 為最後一個點雲之記錄時間； Δh 為機械平台之總升降揚程 (本研究之升降平台揚程固定為 0.54 m)。

本研究另外自行編寫開發一 Fortran 程式，可將 VLP-16 掃描所獲得的點雲強度資料做線性對比拉伸 (Linear contrast stretch)，以增加點雲模型特徵點的辨識度。以國立中興大學空間資訊應用研究室 (Applied Geomatics Laboratory,

AGL) 為例 (圖 4)，可發現經線性對比拉伸後的點雲強度分布相較於線性對比拉伸前平均，整體點雲模型外觀較明亮，周遭景物對比強烈，對於特徵物的辨識度也有所提升。

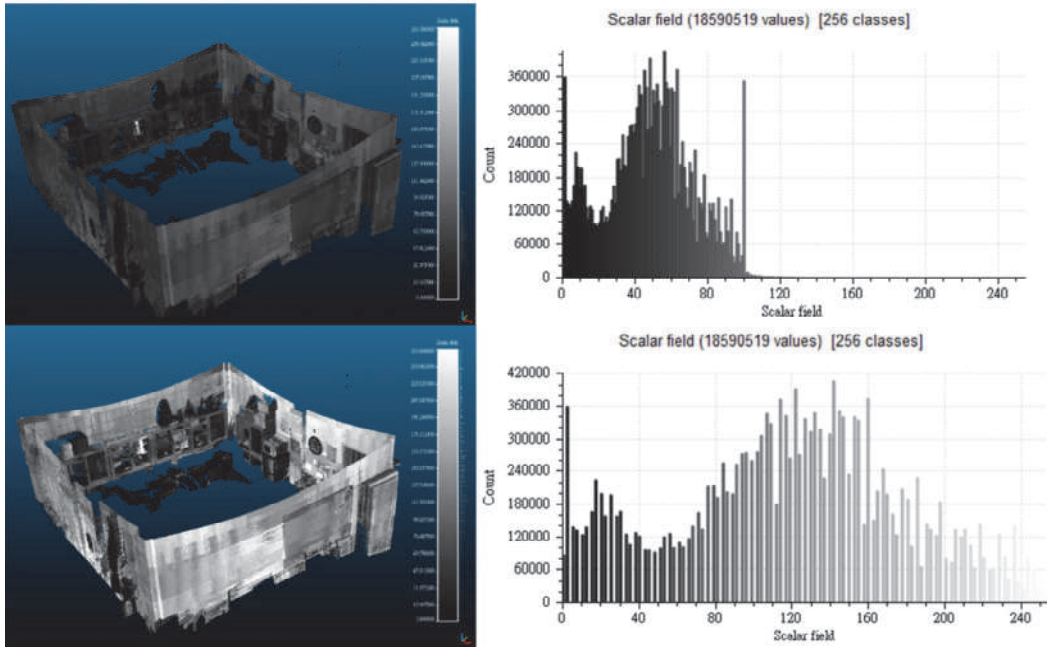


圖 4 點雲在使用線性對比拉伸前 (上圖) 與後 (下圖) 之結果 (以 AGL 研究室為例)

Fig.4 The results of the point cloud data processed by linear strength before (upper) and after (lower). (Take AGL for example)

三、研究區域與資料蒐集

1. 研究區域

本文實驗區域包括國立中興大學與橫嶺山隧道。在國立中興大學之選擇以易辨識之結構物以及掃描範圍相對較小之校內建築為主，地點分為兩處，第一處為室內區域，位於國立中興大學空間資訊應用研究室 (Applied Geomatics Laboratory, AGL)，面積約 40 m²；第二處為室外區域，位於國立中興大學小禮堂中庭，面積約 150 m²。掃描目標皆以構造物為主，研究區域之照片分別如圖 5(a) 與圖 6(a) 所示。而橫嶺山隧道實驗區域位於台中市大雪山林道 26.5 K 處，外觀如圖 7 所示。

2. 掃描作業與建置點雲模型

如前面所述，本研究以掃描作業以 VLP-16 儀器配合升降平台進行掃描作業，根據儀器所記錄每一個點雲的時間，將變化之高程值內插至每一個點雲，最後藉由結合不同高程值的點雲資料來完成環景點雲模型。整體而言，每個實驗區位之掃描時間約 30 秒，即可掃描完整之模型點雲。圖 4(b) 與圖 5(b) 為 AGL 研究室環景點雲模型成果 (將掃描點雲資料匯入 CloudCompare 軟體來檢視)，此結果皆為線性拉伸處理後之成果，由圖 5(b) 可發現部分區域點雲強度值呈條紋式水平分布，與實際物體材質不相符，推測主要原因為升降

平台上升與儀器晃動影響入射、反射角度以及距離，導致相同材質點雲強度之差異性，然而整體而言，點雲外觀與實際照片景象相符，就算室內空間存在較多掃描死角，在細部物件如電腦螢幕、櫃子、擺飾以及磁磚間隔等也都能完整呈現出形狀，在鐵櫃的部份能明顯發現雷射能穿透玻璃等材質，掃描出櫃內物品形狀。另一方面，點雲模型上下區域會受到 VLP-16 光達掃描範圍的限制，因此不會有完整之室內點雲模型成果，期望未來可望藉由提升儀器揚程、結合不同測站點雲資料、改變量測方式來改善此問題。整體來說 VLP-16 光達在中小範圍室內點雲模型的建置上有很大的潛力，對於小範圍的構造物監測或古蹟文物的保存應能有很好的效益。

圖 6 為小禮堂中庭照片與對應之點雲模型。受限於 VLP-16 掃描範圍的限制 (垂直角±15°)，可發現圖 6(b) 與(c) 點雲模型上下部分缺少掃描資料，儘管嘗試調整腳架高程來額外增加垂直掃描範圍與點雲密度，但由於升降平台揚程固定為 0.54 m，掃描角度的問題目前仍無法改善。除此之外，若由細部來看 (圖 6(c))，中近距離處點雲模型依然非常清晰，例如窗戶、階梯、柱子等均非常清晰，但若由整來看 (圖 6(b))，可發現遠距離處之點雲無法完整顯示目標物外觀，主要原因是受到儀器有效測量距離以及雷射光數密度不足等限制。整體而言，小禮堂中庭之掃描成果較 AGL 研究室為差。



圖 5 AGL 研究室照片與對應之點雲模型
Fig.5 The indoor pictures (a) and point cloud models (b) of the AGL

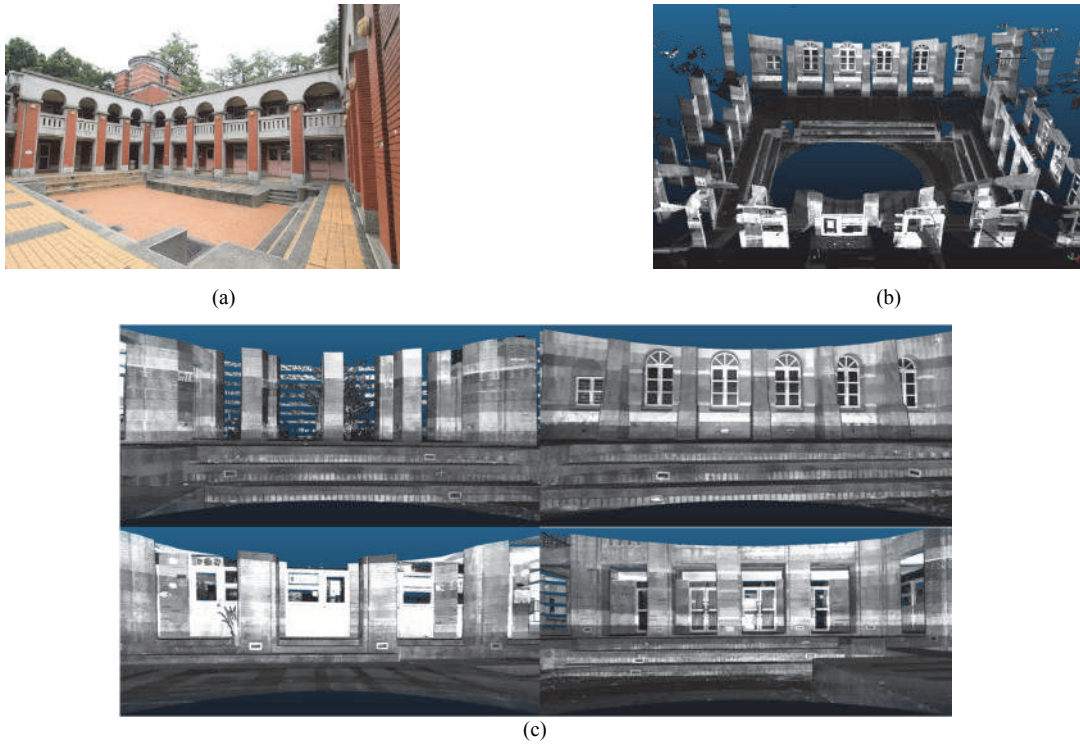


圖 6 小禮堂中庭照片與對應之點雲模型 (內部)
Fig.6 The picture (a), the entire point cloud model, and the partly point cloud models of the auditorium courtyard in NCHU campus



圖 7 橫嶺山隧道照片

Fig.7 The picture of the Henglingshan Tunnel

四、成果分析比較

1. 國立中興大學實驗區

(1) 控制點及點雲模型精度檢核

此部分之檢核方式僅實施於小禮堂中庭區域。本研究使用 Trimble R8s 接收儀，利用 e-GNSS 技術取得地面控制點（編號：A1~A3）與檢核點（編號：A4~A6）之 TWD97 坐標值，結果如表 1 所示，A1~A6 點位外觀如圖 8 所示。Trimble R8s 接收儀之定位精度頗高，水平精度均方根值約為 8 mm；垂直精度均方根值約為 15 mm RMS。本研究觀測時，每個點位之 PDOP 值均小於 6，符合內政部之一、二等衛星控制測量作業規範。



圖 8 小禮堂中庭地面控制點與檢核點位置照片

Fig.8 The picture of the locations the ground control and check points on the auditorium courtyard

接著將三個地面控制點 A1~A3 匯入點雲軟體 CloudCompare 來進行三維空間坐標轉換，由於 VLP-16 光達量測之三維坐標是以儀器為中心之坐標系統，需轉換至 TWD97 坐標系統後才能與現地量測之結果

進行比較，轉換完成後再以軟體選取相對應的特徵點坐標，最後與 Trimble R8s 量測之檢核點 A4~A6 進行比較，兩者坐標差值如表 2 所示。實驗結果顯示 X 方向最大差值為 2.8 cm，Y 方向最大差值為 2.8 cm，Z 方向最大差值為 2.4 cm；X 方向平均較差為 1.6 cm，Y 方向平均較差為 1.5 cm，Z 方向平均較差為 2 cm。在量測結果上都有符合 VLP-16 測距精度之規格 (± 3 cm)。

表 1 利用 GNSS 量測地面控制點與檢核點之 TWD97 坐標值 (單位：m)

Table 1 The ground control and check point coordinates measured by GNSS technique.

控制點A1~A3	X方向	Y方向	Z方向
A1	2668742.445	217245.540	78.218
A2	2668741.413	217244.310	78.255
A3	2668741.372	217235.008	78.209
檢核點A4~A6	X方向	Y方向	Z方向
A4	2668742.358	217233.818	78.228
A5	2668741.366	217242.030	78.222
A6	2668741.348	217236.729	78.236

表 2 VLP-16 光達與 GPS 所測之小禮堂中庭檢核點坐標的差值 (單位：cm)

Table 2 The coordinate differences between the VLP-16 LiDAR-derived and GPS-derived results in the auditorium courtyard.

標號	X方向	Y方向	Z方向
A4	2.8	2.8	1.8
A5	1.8	1.1	2.4
A6	-0.1	-0.6	-1.8
平均較差	1.6	1.5	2

(2) 特徵物量測

特徵物量測之檢核方式是利用 CloudCompare 軟體量測之特徵物長度，並與捲尺量測結果進行比較，該方法均實施於小禮中庭與 AGL 研究室，點雲量測以 CloudCompare 軟體 Point picking 功能選擇兩筆點雲資料，即可獲得兩點雲三維坐標、相對距離與點雲強度。在 AGL 研究室方面，量測之特徵物包括室內裝飾、物品等易辨識之構造，比較結果如表 3 所示。由表 3 可發現，10 組特徵物中最大差值為 11.02 mm，最小為 0.57 mm，平均差值為 3.47 mm，平均誤差百分比達 0.38%，誤差百分比計算為差值絕對值與捲尺量測值之比。

在小禮堂中庭方面，選取量測之特徵物包括小禮堂窗框、門框、台階、梁柱、燈罩等特徵物件，量測相關結果再以捲尺進行現地檢核，量測結果如表 4 所

示。整體而言，在誤差方面都有符合 VLP-16 儀器之規格 (± 3 cm)，10 組特徵物中最大差值為 14.24 mm，最小為 0.14 mm，平均差值為 5.93 mm，點雲平均誤差百分比達 0.97 %。

表 3 利用點雲量測與捲尺量測 AGL 特徵物長度之結果 (單位: mm)

Table 3 The results of the AGL feature object lengths measured by point cloud method and taping method. (unit : mm)

特徵物	距離 (m)	點雲量測	捲尺量測	差值	誤差百分比
牆面磁磚	3.49	808.21	803	5.21	0.65 %
鐵櫃1	2.92	1175.79	1179	-3.21	0.27 %
鐵櫃2	2.81	893.02	882	11.02	1.25 %
鐵櫃3	1.16	1184.42	1179	5.42	0.46 %
鐵櫃4	1.98	740.04	739	1.04	0.14 %
鐵櫃5	1.83	738.01	739	-0.99	0.13 %
白板	3.26	1199.36	1203	-3.64	0.30 %
窗框	3.62	1367.43	1368	-0.57	0.04 %
水泥牆	4.41	2562.89	2562	0.89	0.03 %
電腦螢幕	1.73	530.75	528	2.75	0.52 %
平均差值/誤差百分比				3.47	0.38 %

小禮堂中庭之檢核成果較 AGL 研究室差，其主因為人為選擇點雲產生誤差。在利用 CloudCompare 軟體選擇特徵點時，是先將目標物特徵區域縮放至適當大小，再針對特徵點位進行點雲尺寸調整，重複步驟直到能辨識點雲位置即可，如圖 9 所示。但以軟體放大檢視時，由於點雲模型密度不足容易造成人工辨識不易，導致人為選點上有一定的困難。距離較遠之特徵物由於點雲密度低，以軟體選擇點雲時較難準確找到實際特徵點位；反之，距離較近之特徵物，點雲密度較高，軟體選點時較容易。圖 10(a) 為兩個實驗區域內 20 組特徵物 (10 組屬於 AGL 研究室; 10 組屬於小禮堂中庭) 點雲至儀器距離與誤差百分比關係圖。由圖 10(a) 可發現，點雲距離與誤差呈現正相關。本文另外分析點雲強度與誤差關係，結果如圖 10(b) 所示，從圖中可看出兩者亦呈現正相關，這是由於點雲反射強度會隨著距離越長而衰減，而剛好長距離之點位由於點雲密度不足造成人為選點之誤差。

為了確認點雲距離與空間解析度之關聯，本文亦針對本次實驗進行空間解析度分析，方法為分析點雲距離與點雲體積密度之關係。點雲距離為儀器至網格中心點距離，密度計算方式則是以網格內點雲數量除以點雲模型體積。圖 10(c) 為兩研究區域內 20 組特徵物點雲距離與密度之關係圖。由實驗結果可發現，點雲距離與密度呈現負相關，量測距離越遠處 (11.73 m) 點雲密度越低，每立方公分最低僅有 1.4 個點雲資料，而點雲密度在近距離處 (1.16 m) 每立方公分最高可達 114 個點雲資料，造成此差異的原因為儀器本身雷射光的間距與數量。圖 10(c) 可清楚說明遠距離處 VLP-16 點雲密度低，故人工選點誤差明顯較大。

表 4 利用點雲量測與捲尺量測小禮堂中庭特徵物長度之結果 (單位: mm)

Table 4 The results of the auditorium courtyard feature object lengths measured by point cloud method and taping method. (unit : mm)

特徵物	距離 (m)	點雲量測	捲尺量測	差值	誤差百分比
窗框	11.17	433.65	436	2.35	0.53 %
門框1	6.40	1985.24	1971	-14.24	0.72 %
門框2	12.03	844.01	855	10.99	1.29 %
台階1	8.19	7446.03	7457	10.97	0.15 %
台階2	4.19	154.69	151	-3.69	2.44 %
梁柱	6.70	574.63	571	-3.63	0.64 %
牆面1	6.92	1069.00	1072	3.00	0.28 %
牆面2	8.02	1064.86	1065	0.14	0.01 %
牆面3	5.67	1060.13	1061	0.87	0.08 %
燈罩	10.61	275.42	266	-9.42	3.54 %
平均差值/誤差百分比				5.93	0.97 %

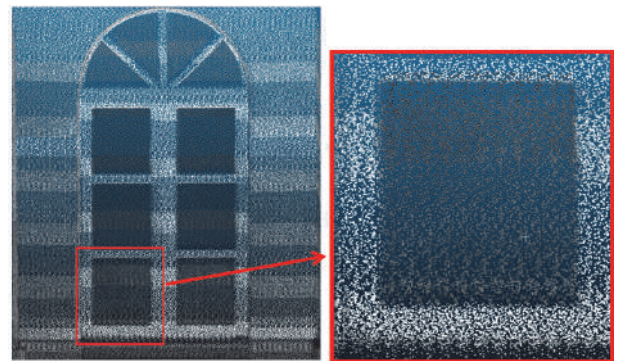
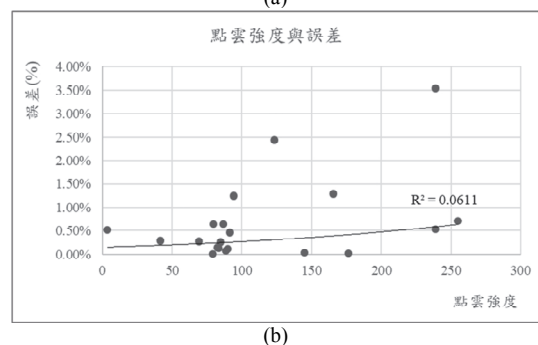
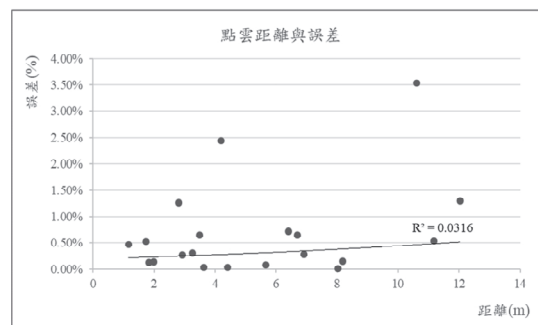


圖 9 局部點雲模型放大示意圖

Fig.9 The schematic showing the enlargement of the partly point cloud model



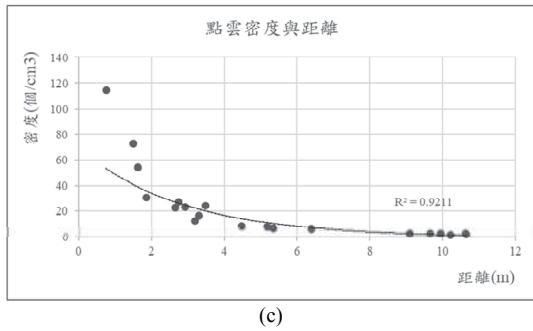


圖 10 (a) 點雲距離與點雲誤差關係；(b) 點雲強度與點雲誤差關係；(c) 點雲密度與點雲距離關係

Fig.10 The relationship between the point cloud distances and errors (a), the point cloud intensities and errors (b), and the point cloud densities and errors (c)

2. 橫嶺山隧道實驗區

橫嶺山隧道長度約 400 公尺，故 VLP-16 無法一次掃描完成，本研究為提高點雲空間解析度，每 20 公尺設一 VLP-16 掃描站，總共 20 個測站，每一站掃描時地面均放置數顆共軛球，待每一站分別掃描完成後，以共軛球作為連接點，將隧道模型拼接起來。圖 11 為橫嶺山隧道 VLP-16 掃描站與共軛球位置示意圖，每一個測站掃描時，前後共有 6 顆共軛球能被掃描到。圖 12 為橫嶺山隧道現場掃描照片，20 測站測站掃描點雲成果如圖 13 所示。圖 14(a) 為各模型拼接後之橫嶺山隧道點雲，若將橫嶺山隧道局部位置放大 (如圖 14(b) 所示)，可發現點雲之反射值有部分呈現較弱 (呈現暗紅色，即圖 14(b) 中藍色圈位置)，經查證後，這些位置為水痕，即明顯滲水之處。整體而言，利用本方法可有效偵測出隧道滲漏水之處，提供有關單位維護補強之重要參考。

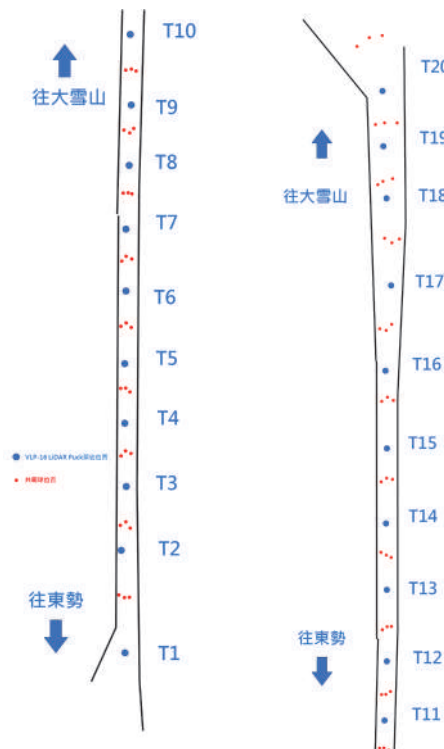


圖 11 橫嶺山隧道 VLP-16 掃描站與共軛球位置示意圖，其中藍色點位為 VLP-16 掃描站 (T1~T20)，紅色點位為共軛球位置

Fig.11 The locations of the VLP-16 stations and conjugate spheres for the Henglingshan Tunnel on-site scanning. The blue dots and red dots represent the VLP-16 stations (T1~T20) and the conjugate spheres, respectively



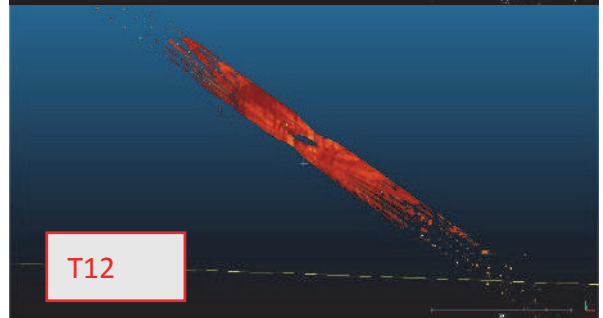
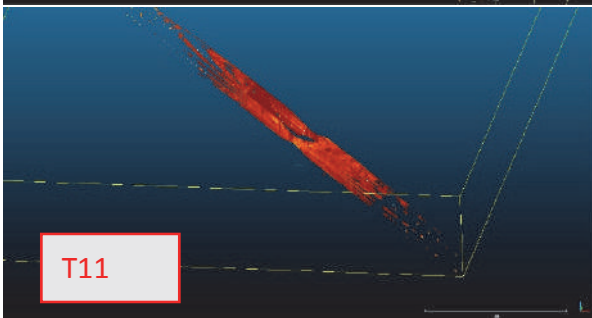
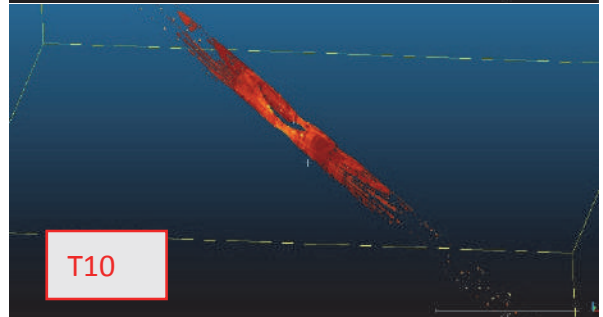
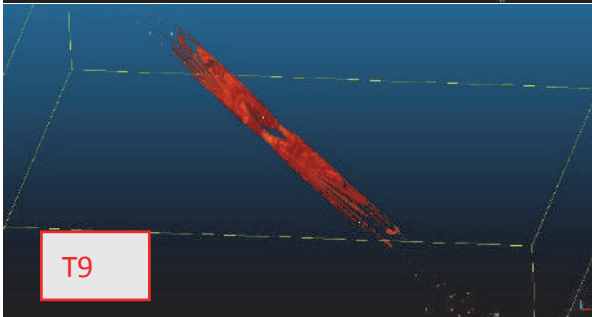
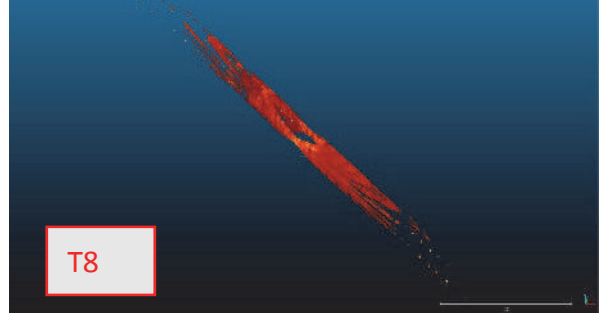
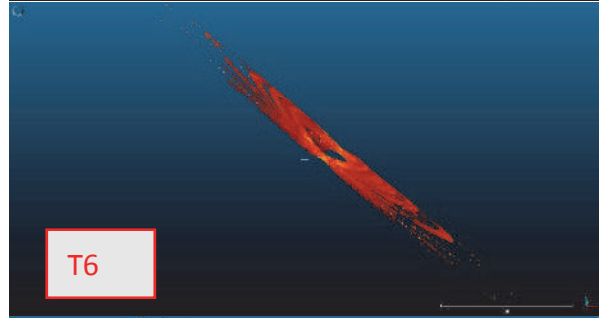
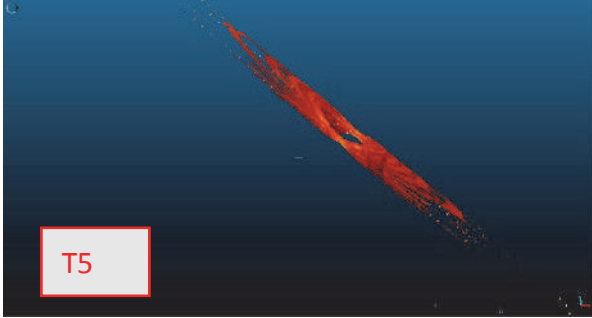
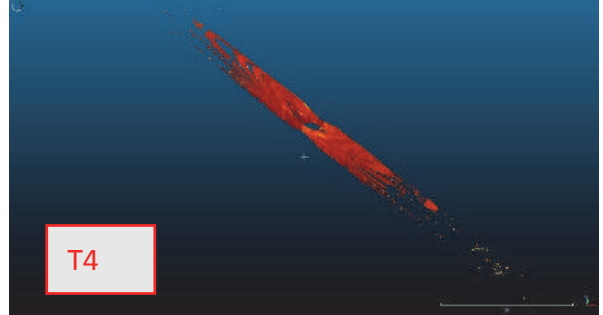
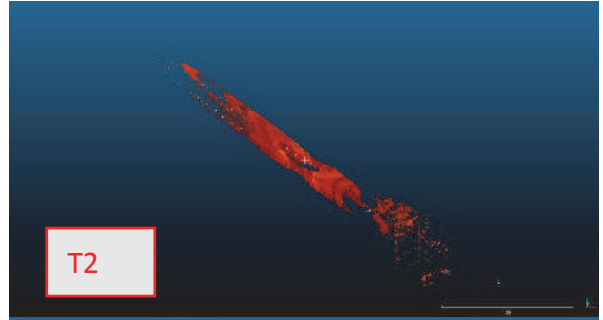
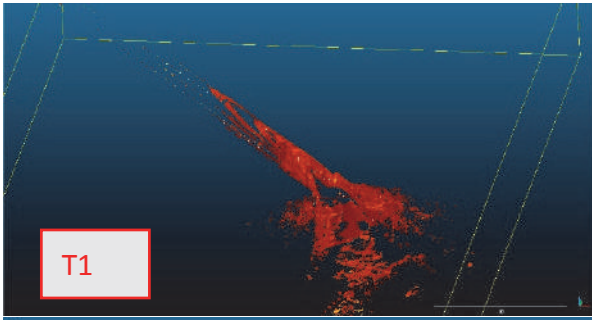
(a)



(b)

圖 12 (a) 橫嶺山隧道現場掃描照片；(b) 共軛球放置圖

Fig.12 The pictures of on-site scanning in the Henglingshan Tunnel (a), and the conjugate sphere locations (b)



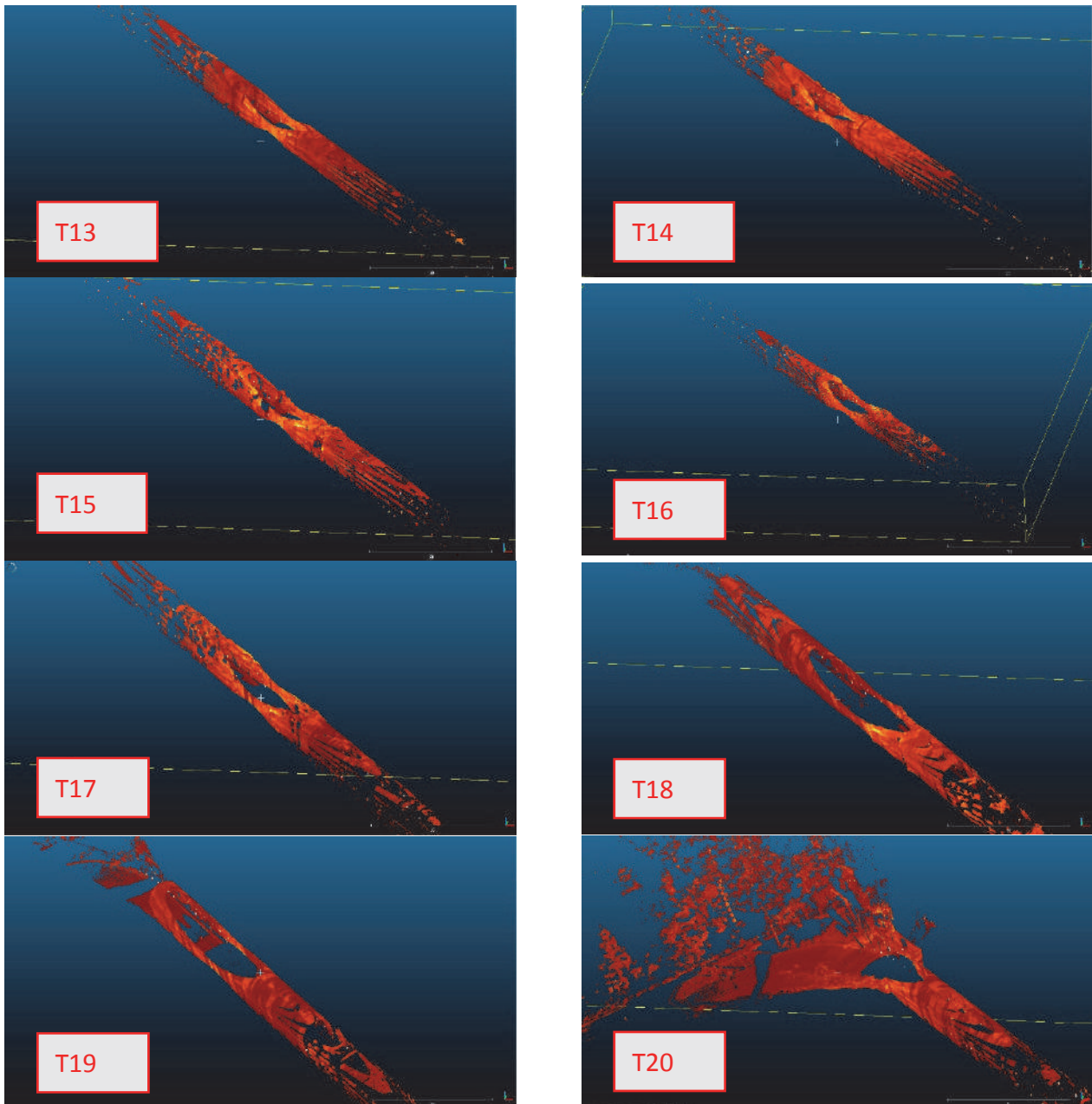
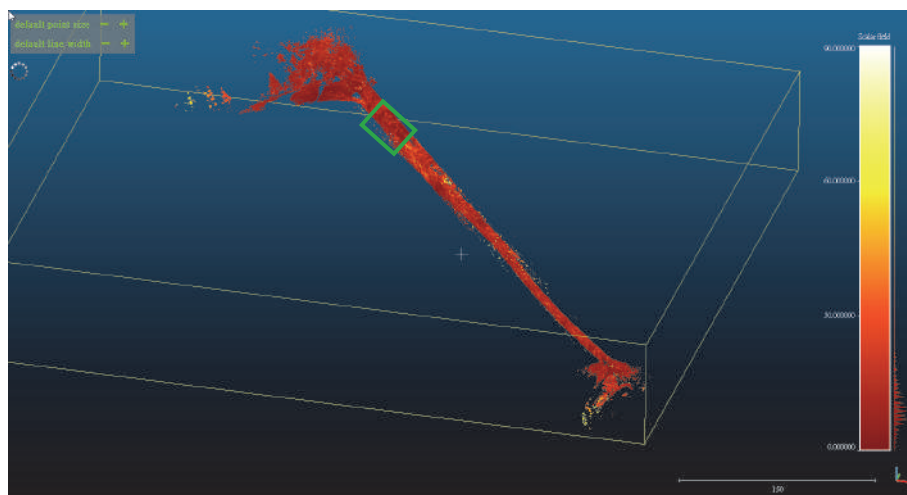
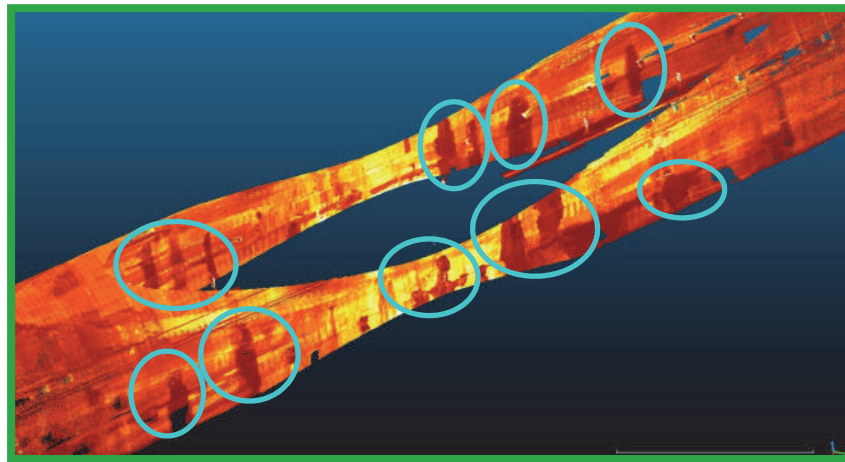


圖 13 橫嶺山隧道各測站 (T1~T20) 掃描成果

Fig.13 The respective results (T1~T20) of the Henglingshan Tunnel tunnel on-site scanning



(a)



(b)

圖 14 (a) 橫嶺山隧道各測站拼接成果。(b) 隧道滲水處 (藍色圈處)。圖 (b) 即圖 (a) 綠框處

Fig.14 (a) The fusing result of the Henglingshan Tunnel on-site scanning. (b) The positions of the tunnel seepage (blue circle). The location of Figure (b) is the green frame in Figure (a)

五、結論與建議

本研究結論與建議如下：

1. 以 VLP-16 結合機械式自動升降平台增加高程之方式, 3D 建模效果良好, 與實際影像符合, 量測精度也符合儀器規範, 然而受限於 VLP-16 掃描垂直角度過窄(僅 ± 15 度)與自動升降平台揚程有限(僅 54 cm), 建置之點雲模型無法完整呈現實際周遭影像。
2. 小禮堂中庭區域所建置之點雲模型, 由外觀上可以明顯辨識迴廊內部構造, 包括梁柱、階梯、地燈、圓拱窗框設計等, 在近距離處點雲密集且能夠完整呈現物體結構; 在遠距離處由於點雲數量稀疏使得模型呈現不連續狀態。以 GPS 技術檢核點雲成果, 其 X 方向平均差值為 1.6 cm, Y 方向平均差值為 1.5 cm, Z 方向平均差值為 2 cm。
3. 在小禮堂中庭區域 10 組特徵物量測結果中, 最大較差為 14.24 mm, 最小為 0.14 mm, 點雲平均誤差達 0.97%, 而 AGL 研究室區域點雲模型在 10 組特徵物中, 最大差值為 11.02 mm, 最小為 0.57 mm, 點雲平均誤差達 0.38%。人為選點為造成誤差之主因。
4. 點雲距離與誤差比較之結果顯示, 點雲距離與誤差呈現正相關, 點雲強度也與誤差呈現正相關, 因為點雲距離越遠, 點雲強度訊號越衰減, 點雲密度也會越稀疏, 造成人為選點之困難。
5. 利用本方法可有效掃描出橫嶺山隧道滲漏水之處, 提供有關單位維護補強之重要參考。
6. 未來本研究將著重於分析不同影像增揚方式、自動升降平台速度的調整等, 期望能持續精進此方法之掃描成果。

整體而言, 本研究之技術若應用於小範圍區域掃描將會不錯的效益, 例如: 室內建模、隧道掃描監測漏水等, 而大範圍長距離的量測由於點雲密度不足, 還有待後續相關研究來進行改善。未來若採用本方法對水土保持結構物(例如攔沙壩、擋土牆、護岸等)進行掃描, 應可得到完整良好的掃描成果, 但一般而言, 水土保持結構物重點在於監測其裂

縫、破損、變形等, 故是否真能應用於此部份, 後續還需相關實驗驗證。

參考文獻

- [1] 吳建廷 (2013), 「地面三維雷射掃描儀影響精度因子之研究」, 國立交通大學土木工程學系博士論文。Wu, J.T. (2013). *A Study on Influence Factors of the Terrestrial Lidar Accuracy*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University.
- [2] 呂曜宇 (2008), 「地面光達點雲資料特性探討及分類應用」, 國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。Lu, Y.Y. (2008). *Characteristics and Classification of Ground-Based Lidar Data*. Master Thesis, Department of Geomatics, National Cheng Kung University.
- [3] 蔡佳琳 (2011), 「不同共軛規標尺寸對於三維點雲模型套疊精度影響之研究—以 FARO Photon 120 地面光達為例」, 國立金門大學防災與永續研究所碩士論文。Tsai, C.L. (2011). *Diverse dimensions of targets for the model matching precision of 3D point cloud - A Case of FARO Photon 120*. Master Thesis, Institute of Disaster Prevention and Sustainability, National Quemoy University.
- [4] 王中平 (2012), 「應用三維雷射掃描儀於古蹟建物多期監測之評估」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。Wang, C.P. (2012). *A Multi Epoch Cultural Heritage Monitoring Inspection by 3D Laser Scanner*. Master Thesis, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Taipei University of Technology.
- [5] 陳煜文 (2015), 「應用地面光達監測結構物之精度分析」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。Chen, Y.W. (2015). *Precision Analysis for Laser Scanner to Structure Monitoring*. Master Thesis, Institute of Civil Engineering and Disaster Prevention, National Taipei University of Technology.

- [6] 黃立信、陳其沅、張嘉倫、邱建華 (2018), 「利用 3D LiDAR 技術應用於結構物監測及地形數化之研究」, 測量工程; 第 57 卷, 23-38。Hwang, L.S., Chen, C.Y., Chang, C.L., and Chiu, C.H. (2018). "Using 3D LiDAR Technique in Structure Monitoring and Terrain Modeling." *Journal of Surveying Engineering*, 57, 23-38.
- [7] 林老生、施宇鴻 (2019), 「以三維共軛規標提昇三維雷射掃描儀掃描建物效益之研究」, 國土測繪與空間資訊; 7(1), 15-32。Lin, L.S., and Shi, Y.H. (2019). "Study on Promoting the Efficiency of Scanning Buildings by 3D Laser Scanner Using Conjugated 3D Sphere Markers." *Taiwan Journal of Geoinformatics*, 7(1), P15-32.
- [8] 吳孟姍、胡子威、黃振全、洪政義、陳富明、程碧輝、郭展榮 (2016), 「應用地面式光達技術於防砂壩淤砂量估算與監測—以里仁溪整治二期鋼製自由樑防砂壩為例」, 105 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文。Wu, M.S., Hu, T.W., Huang, C.C., Hung, C.Y., Chen, F.M., Chen, B.W., and Kuo, C.J. (2016). "Terrestrial LiDAR Techniques Applied to Sediment Volume Estimation and Monitor -A Case of Open type steel dam at Liren Creek." *2016 general assembly and conference of The Chinese Soil and Water Conservation Society*.
- [9] 洪翎嘉、王聖鐸、黃傳楷 (2018), 「手持式三維掃描儀於坑道測量之可行性分析」, 航測及遙測學刊; 23(4), 257-271。Hung, L.C., Wang, S.D., and Huang, C.K. (2018). "Feasibility Analysis of the Handheld 3D Scanner in 3D Tunnel Survey." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 23(4), 257-271.
- [10] 紀延璋 (2016), 「應用近景手持式雷射掃描儀作模擬土石變動量測之研究」, 逢甲大學土木工程學系碩士論文。Jang, J.Y. (2016). *Study on using Close-Range Handhold Laser Scanner to simulate the measurement for volumes of Earth and rock Variation*. Master Thesis, Department of Civil Engineering, Feng Chia University.
- [11] Filgueira, A., Arias, P., and Bueno, M. (2016). "Novel inspection system, backpack-based, for 3D modelling of indoor scenes." *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 4(7).
- [12] G'alai, B., and Benedek, C. (2017). "Gait Recognition with Compact Lidar Sensors." *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 426-432.
- [13] Glennie, C.L., Kusari, A., and Facchin A. (2016). "Calibration and stability analysis of the VLP-16 laser scanner." *the European Calibration and Orientation Workshop, Lausanne, Switzerland*.
- [14] Jozkow, G., Toth, C., and Grejner-Brzezinska, D. (2016). "Uas topographic mapping with velodyne lidar sensor." *Isprs annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 3(1), P201-208.
- [15] Vlamincq, M., Luong, H. and Philips, W. (2017). "Liborg: a lidar-based robot for efficient 3D mapping." *International Society for Optics and Photonics, (SPIE), Applications of Digital Image Processing*, 103961G.
- [16] Zhang, J., Rao, A., Geng, C., Yu, Y., Zhou, Y. and Du, S. (2018). "Real-time Large-scale Surface Reconstruction of Lidar Point Cloud." *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

2019 年 10 月 10 日 收稿

2019 年 11 月 24 日 修正

2020 年 03 月 27 日 接受

(本文開放討論至 2020 年 06 月 30 日)