

3D 雷射掃描應用於鐵路隧道空間資訊與檢測之 案例探討

邱顯晉¹、林金成²

摘要

維護環島鐵路沿線約百餘座營運中隧道安全及提升電氣化功能，隧道檢測極其重要。因此，為瞭解營運中隧道整體空間是否滿足電氣化要求及檢測襯砌異狀範圍等課題，本文以某營運路線隧道群為例，應用高解析且快速之主動式 3D 雷射掃描(GRP5000)分別探討沿線隧道內空間資訊、襯砌掃描影像判釋等實務技術，以及嘗試運用 Google Earth 整合應用隧道掃描影像及隧道淨空三維圖資，以瞭解影響電車線架設之分布區域。同時，根據雷射反射強度取得掃描影像與前期影像比較，以掌握隧道異狀的變化情形。再經由現場目視檢核隧道襯砌裂縫及滲水等異狀與掃描影像分別比對，綜合探討作為輔助隧道檢測評估之參考。

關鍵詞：鐵路隧道、雷射掃描、淨空測量、GRP5000、Google Earth

A Case Study on the Applications of 3D Laser Scanning in Railway Tunnel Spatial Information and Inspection

S. J., Chiou¹ and C. C. Lin²

ABSTRACT

The inspection on tunnel lining is an extremely important technology for the maintenance of operational tunnel safety. Furthermore, inspection results may facilitate the feasibility assessment of railway tunnel function improvement by electrification installation. Various inspections, including 3D laser scanning using GRP5000, GIS query system with Google Earth, and spatial information integration performed in the operational railway tunnels in Taiwan are introduced in the paper to demonstrate the practical application of the spatial image technology in tunnel maintenance.

Keywords: Railway Tunnel, 3D Laser Scanning, Clearance Measurement, GRP5000, Google Earth

¹ 財團法人中興工程顧問社副研究員

² 財團法人中興工程顧問社高級研究員

一、前言

三維雷射掃描以激發雷射光來偵測目標之空間資訊屬主動式光波量測技術，近年來，隨著此類型技術測量速度及精度等效能提昇，商業化的三維雷射掃描儀如雨後春筍般推出，各種應用案例及需求也快速增加(曾義星、史天元，2004)。目前所稱的光達(LiDAR, Light Detection And Ranging)是利用雷射光對目標物進行高密度的掃描以獲取目標物三維形貌的技術，大致可分為三種：空載光達(Airborne LiDAR)、測深光達(Bathymetric LiDAR)及地面型光達(Terrestrial LiDAR)(徐偉城，2007)。此外，雷射掃描技術又可分為靜態和動態等兩類，靜態將雷射掃描儀放置於固定點(如 Terrestrial Laser Scanner; TLS)；動態則將掃描儀安裝在移動式平台上(如 Airborne Laser Scanner; ALS 及 Mobile Laser Scanner; MLS)(Van Genechten, 2008)。其中，瑞士 Leica 與 Amberg 公司合作發展之 GRP 5000 隧道影像掃描系統，即具上述主動式、動態及地面型雷射掃描等特性。且主動式光源可於黑暗中觀測，有利於隧道工程的量測(曾義星、史天元，2004)。

由於鐵路電氣化為我國經濟建設重要一環，更是鐵路快捷化的關鍵要素。因應早期鐵路的老舊隧道已營運多年，為維護環島鐵路沿線營運中隧道安全及隧道現況能否滿足電氣化工程之要求，現有隧道襯砌狀況檢測、軌道及淨空測量極其重要。一般鐵路為維持正常營運下，隧道內檢測及量測作業常需於無光源且短暫的深夜辦理。根據與鐵路營運相似的捷運系統辦理全線隧道檢測經驗，軌道運輸系統因全年無休且每日運營時間經常達 18 小時以上，僅夜間時段可供檢測作業，扣除通報、斷電保護與安全措施所需時間，實際可用時間每次約 3 小時，故宜採用快速、高精度的檢測設備，以爭取時效(洪銘遠等，2012)。且營運中隧道早年以目視觀察記錄為主，精度差且費時費力，隧道攝影、掃描等檢測技術陸續應用，具有快速與相當程度的可靠性(劉世琳、陳俶季，2005)。

因此，本文以鐵路某營運路線隧道群為例，採用自走式且掃描快速之主動式 3D 雷射掃描系統(GRP5000)，在預定期限內取得隧道內之空間資訊、高解析襯砌掃描影像，透過工程實務技術之應用，分別瞭解營運中隧道之整體空間現況是否滿足電氣化工程的要求，以及檢核 GRP5000 掃描影像襯砌異狀現象、劣化位置，經由現場目視比對隧道襯砌滲水及裂縫等異狀，綜合探討及分享 3D 雷射掃描作為輔助鐵路隧道內檢測技術等成果。

二、研究內容概述

為掌握目前隧道異狀現象、淨空是否影響電車線架設、劣化範圍等關鍵課題，本研究先經由 GRP5000 技術取得隧道襯砌影像及隧道淨空測量等基本空間資訊。另期能透過 Google Earth 結合相關空間資訊來整合應用，經由上述感測技術取得之隧道襯砌影像及橫剖面測量圖資後，再透過 CAD 及 QGIS 等工具，整合隧道空間資訊及中央地調所 WMS 等開放圖資於 Google Earth。此外，本研究範圍屬營運中

鐵路，預定全線量測時間期能於 30 個工作日完成，因此其量測效能及成果比對至為重要。針對本研究範圍、應用方法及技術分別概述如后。

2.1 研究範圍概述

目前台灣地區環島鐵路沿線約有百餘座營運中隧道，隧道總長度約 150 公里左右。本研究案例即為鐵路某營運路線隧道群(含明隧道共 42 座隧道)，隧道總長約 39 公里左右，其中隧道長度超過 1,000 公尺之隧道共有 12 座。沿線除了雙軌鐵路隧道 6 座外，其餘主要均為單軌鐵路隧道。既有隧道依鐵路電氣化標準施工，一般單軌隧道高為 5.5 公尺、起拱線淨寬為 4.96 公尺；雙軌隧道淨高為 6.72 公尺、起拱線淨寬為 9.1 公尺。因沿線隧道完工至今已逾 20 年，除少部份隧道曾因岩體外力致襯砌劣化與滲水等情況外，少數區間經補強加固後淨空略有縮減現象。

2.2 應用 3D 雷射掃描方法及技術概述

2.2.1 地面型雷射掃描基本原理簡介

三維雷射掃描儀是快速準確的雷射測距儀加上一組可導引雷射光以等角速度掃描的反射稜鏡所組成。主動發射雷射光同時接收自反射之訊號，可測得測站至每一掃描點的斜距，配合稜鏡的水平與垂直方向角，可推求得掃描點與測站之三度空間坐標(曾義星、史天元，2004)。三維雷射掃描所獲得大量的點雲資料除了 XYZ 坐標外，也包含反射強度值(Return intensity)，依據點雲反射強度值更可製作成高解析度的灰階影像(Greyscale-image)。

一般地面型雷射掃描測距基本原理大致可分為三大類(Schulz, 2007):干涉測量法(interferometry)、時間差法(time of flight, TOF, 又稱飛行時間)及三角法(triangulation)等。地面型雷射掃描最常用的時間差法又可分為直接時間差法及調幅連續波法(Amplitude Modulated Continuous Wave, AMCW)；前者稱又為脈衝式(pulse)，後者稱為相位式(phase-shift)。相位式的主要好處是可以比脈衝式的儀器有較高的取樣頻率、掃描速率及精度(Newnham *et al.*, 2012; Feng, 2012)。上述時間差法之測距基本公式(Shan & Toth, 2008)為：

$$R = c t/2 \quad (1)$$

其中， c 為光速； t 為雷射往返時間。當連續波波長為 λ ，藉計算雷射光往返 M 個整數週期及相位角 ϕ 的波長(λ)， $\Delta\lambda$ 為波長的分數部份= $(\phi/2\pi)\lambda$ ，可測得距離：

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

再者，靜態掃描是掃描儀設於固定點位，其雷射光束以水平及垂直向(2D)轉動對目標物量測；動態掃描則將掃描儀設於移動式平台，在量測過程改變其位置，雷射光束僅垂直前進方向(法向/1D)轉動，利用平台前進量測目標物之距離及角度獲得點雲資料，其 3D 點雲為螺旋條狀所組成(圖 1)。因此，點雲密度(dP 及 dL)受掃描儀上鏡面轉速及平台移動速率所決定(Mettenleiter *et al.*, 2008)。

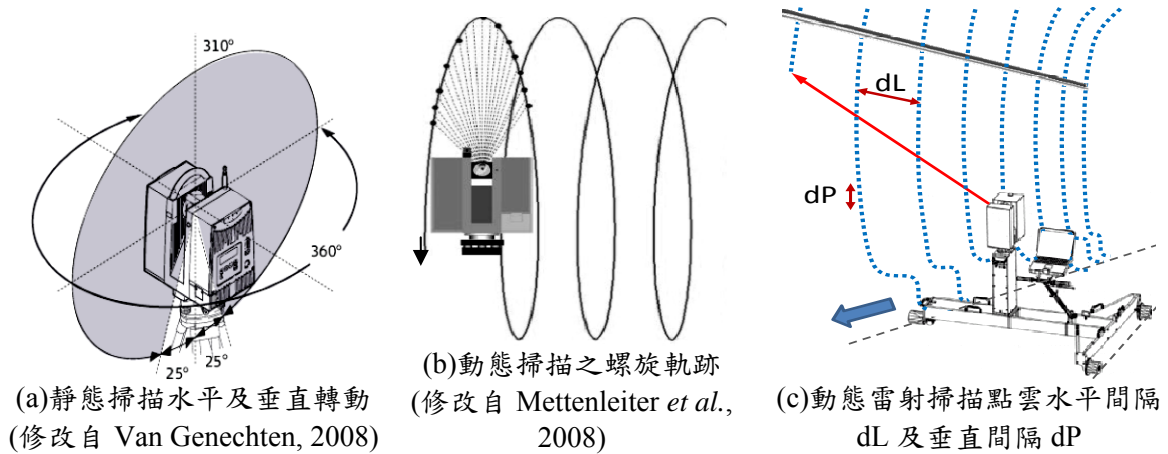
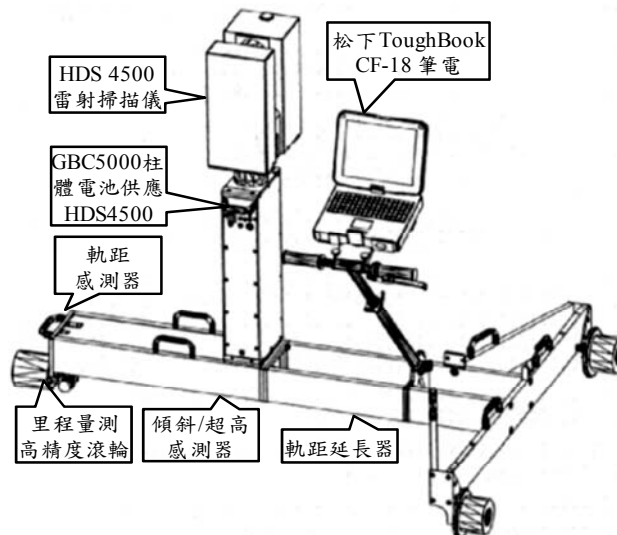


圖 1. 靜態及動態雷射掃描之方向、軌跡及點雲間隔



(a) GRP5000 隧道影像掃描系統現場組裝工作照片



(b) 軌道檢測車 TGS FX 及雷射掃描儀 HS4500 等 GRP5000 系統元件(底圖資料來源: Leica 公司網站 GRP 使用手冊)

圖 2. GRP5000 隧道影像掃描系統現場照片及組成元件

2.2.2 GRP5000 系統及功能概述

本研究採用 Leica 與 Amberg 公司合作發展之 GRP5000 隧道影像掃描系統(如圖 2), 係屬 Leica 與 Amberg 針對鐵路的通用軌道測量系統(GRP System FX)三合一解決方案(GRP1000、GRP3000、GRP5000)之一。此三項模組化產品均組裝在軌道檢測小車(Track Gauging Trolley, TGS FX)上, 且依所搭載的測量儀器來區別。軌道檢測小車本身就具有軌距(Gauge meter)、鐵軌超高/傾斜(Tilt meter)及里程(Odometer)等軌道基本量測功能, 且可搭載筆電即時監控。其中, GRP1000 為 GRP 系列的基本款, 搭載反射菱鏡 GPC100 提供坐標定位; GRP3000 搭載雷射測距儀 Profiler100 及菱鏡可量測淨空界線; GRP5000 則可搭載三維雷射掃描儀(如 Leica HDS 4500/6000/6100、Amberg Profiler 5002/5003/6012、Zoller Frölich Imager 5003/5006 等)及菱鏡, 提供隧道內襯砌影像掃描、淨空測量等功能。上述模組於國內均有實務之應用成果(沈聰益、王清銀, 2010; 洪銘遠等, 2012; Wang, 2010)。

GRP5000 系統之自走式 TGS FX 軌道檢測小車及雷射掃描儀 HDS4500 等基本資料如表 1。雷射掃描儀以紅光之連續光波(AMCW)動態掃描，於軌道法線方向 360°旋轉照射探測區，當前進速度 700m/hr 時點密度約 5×5mm，接收反射光束後可反映出探測區影像及隧道淨空資訊。因此，經由 GRP5000 系統可分別測得隧道里程、軌道軌距及超高、橫剖面點雲之相對坐標及反射強度、淨空分析等成果，以及配合全測站/軌道線型資料可取得絕對坐標系統。

表1. GRP5000 隧道影像掃描系統基本資料簡介(資料來源：Leica 公司網站型錄小冊)

TGS FX 軌道檢測小車		HDS4500 (25m)	
里程量測	光電記數器量測方式	雷射掃描方式	相位式(紅色可見光)
里程分辨率	±0.3mm (誤差<0.5%)	反射鏡旋轉速率	33Hz
可量測軌距	1000、1067、1435、1520/24、1600、1668/76 mm	視域角度 FOV (field of view)	360°(水平)x 310°(垂直)
軌距量測範圍	-25~65mm	量測距離	0.1~25.2m
軌距量測精度	靜態±0.3mm、動態±0.5mm	最大量測頻率	500,000 points/sec
超高量測範圍	-10~10°	平均量測頻率	125,000 points/sec
超高量測精度	靜態±0.5mm、 動態±1mm(軌距 1435mm)	測距精度	≤3mm (距 10m)
前進速度	~4 km/hr	坐標精度	≤6mm (距 10m)
		雷射安全等級	3R (波長 690/780nm)

三、應用成果綜合探討

3.1 GRP5000 執行成效率探討

由於本研究現場工時預期 30 工作日完成，依據隧道群總長約 39 公里計算，每日需完成約 1.3km，若每日實際量測 2 小時(不含封鎖往返、組裝與搬移等行程)，前進速率約需 650m/hr (約 0.18m/sec)。因此，應用 GRP5000 搭載筆電監控之現場設定速率約 0.17~0.18 m/sec，且每一橫剖面預定測得 10,000 點，現場控制畫面如圖 3。根據本研究現場實測工作日數約 29 日(2014/3/21~4/30 扣除週六日及清明節等例假日)，整體上現場量測作業於預估工作日數之前已大致順利完成。

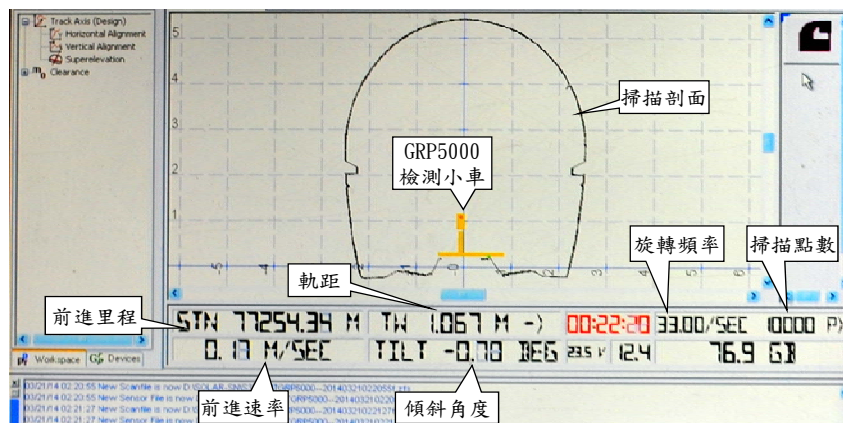


圖 3. GRP5000 軌道檢測小車上筆記型電腦現場操控畫面

在點雲密度效果方面，水平 dL 及垂直 dP 之間隔係由平台移動速率及掃描儀上鏡面轉速所決定。在雷射掃描儀鏡面垂直轉速 33Hz、前進速率約 0.17~0.18 m/sec 及 FOV=310°之條件下，可推估點雲水平間隔 dL 約 0.51~0.55cm。再以橫剖面點

每轉 1 萬點、最大及平均量測頻率，可推估在掃描距離 2.5、5 及 7m 測得點雲垂直間隔 dP，如表 2 所示。經本研究對點雲間隔距離隨機採樣之實測結果，如表 3 所示。根據比對預估值與實測值後，確可驗證 GRP5000 能大致符合預定之成效。

表 2. 掃描儀鏡面轉速 33Hz 於不同測距與量測頻率之點雲垂直間隔 dP

掃描距離	最大頻率約 13,047 點/轉	以 10,000 點/轉推估	平均頻率約 3,262 點/轉
2.5m	0.12 cm	0.16 cm	0.48 cm
5.0m	0.24 cm	0.31 cm	0.96 cm
7.0m	0.34 cm	0.44 cm	1.35 cm

表 3. 本研究現地實測取樣之點雲數量、水平間隔 dL 及垂直間隔 dP

橫剖面	軌道	測距範圍(m)	每轉橫剖面點數	實測 dP(cm)	實測 dL(cm)
隧道 A	單軌	2.3-4.3	10,800	0.18	0.5
隧道 B	單軌	2.5-4.2	10,368	0.20	0.5
隧道 C	雙軌	2.2-7.0	10,376	0.30(0.17-0.43)	0.5

3.2 隧道雷射掃描 3D 及 2D 影像

本研究區現場照片與 GRP5000 掃描之 3D 空間影像範例如圖 4。其 3D 影像能以平面方式展開為 2D 反射強度影像作為判釋及比對之用，展開之概念及影像如圖 5 及圖 6。再者，比較本研究區不同時期之隧道襯砌掃描影像如圖 6，於圓圈處即可發現前後期襯砌變化跡象，有助於現場查核及作為後續補強改善之參考依據。此外，統計 GRP5000 之雷射掃描反射強度如圖 7，可發現反射強度大致分布在約 5~30% 之間，其中反射強度較低者多為潮溼壁體及縫隙，極少部份小於 5% 者多屬黑色橡膠包覆的纜線、約 25~30% 以上則為碳酸鹽類白華及金屬材質管線。



(a)現場照片 (b)隧道雷射掃描 3D 點雲 (c)雷射掃描 3D 影像外視圖

圖 4. 鐵路單軌與雙軌隧道現場照片及雷射掃描結果

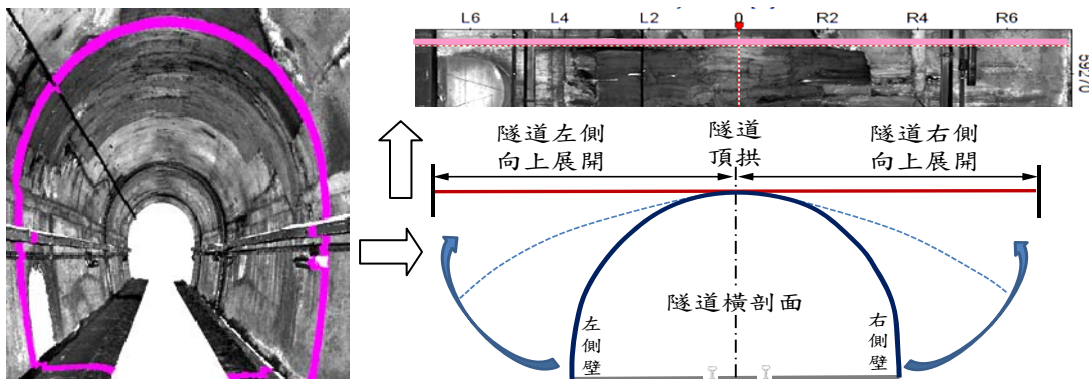
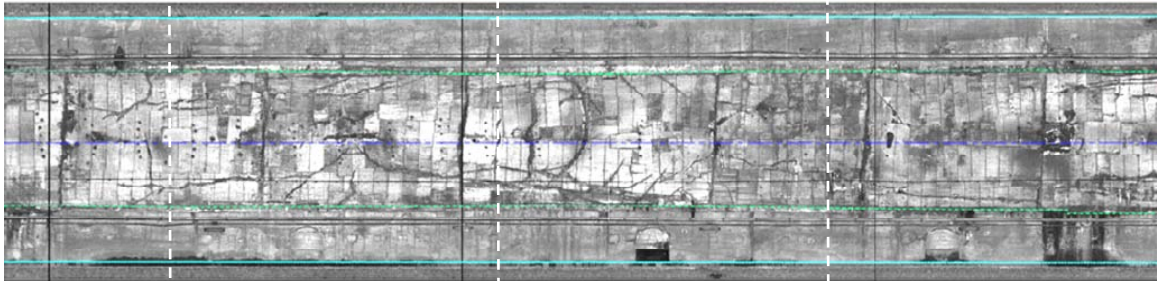
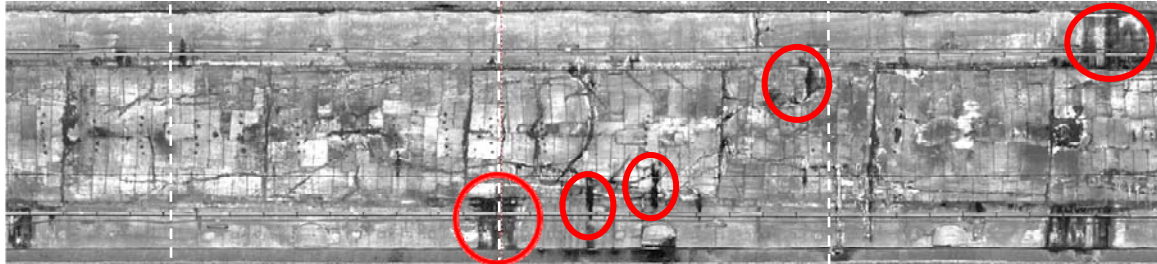


圖 5. 隧道雷射掃描 3D 點雲影像平面展開為 2D 反射強度影像圖方法

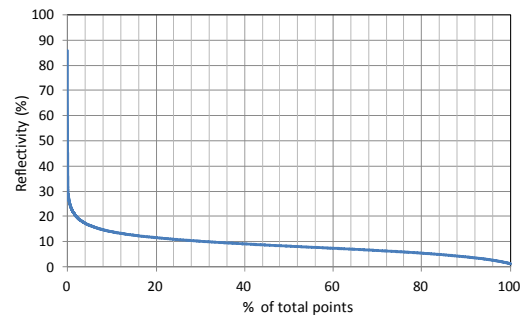
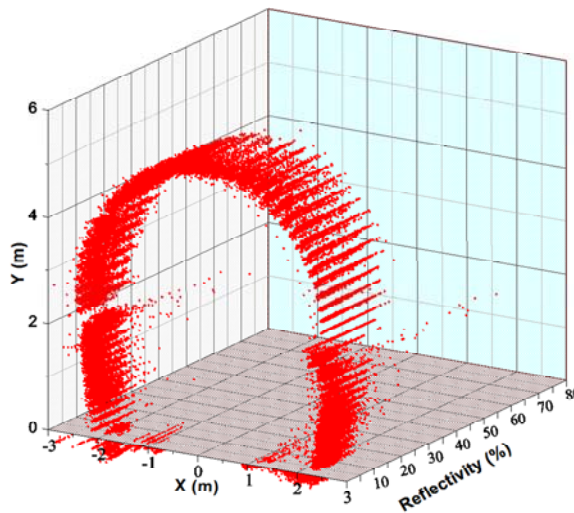


(a)2006 雷射掃描反射強度灰階影像 (摘錄自 Wang, 2010)



(b)2014 雷射掃描反射強度灰階影像 (本研究整理)

圖 6. 不同時期雷射掃描影像 2D 平面展開圖比較



(b)反射強度%統計圖



註：隧道內左右側壁具金屬材質保護管(右圖 c)，因此反應其雷射反射強度較高。

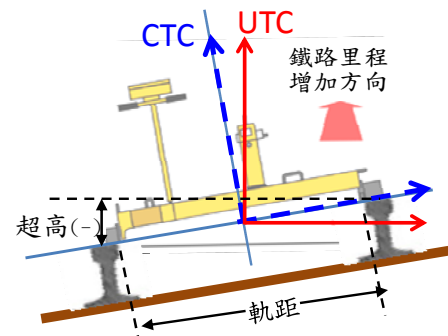
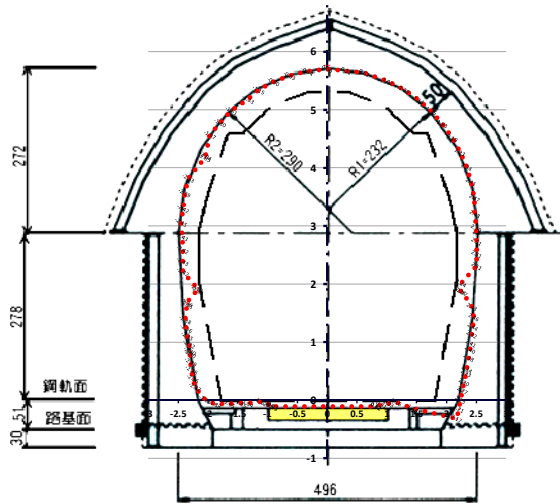
(a)隧道內雷射掃描反射強度空間分布

(c)隧道左右側壁金屬材質保護管道

圖 7. 隧道襯砌雷射掃描反射強度統計

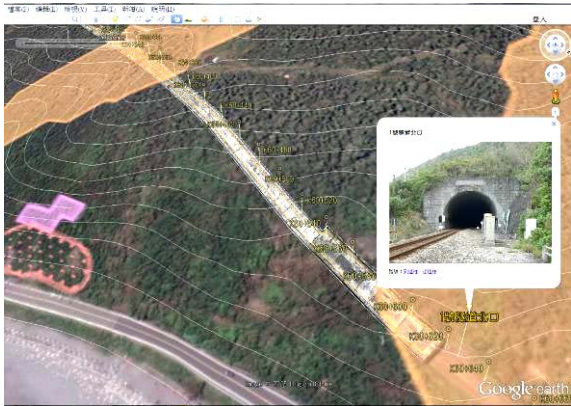
3.3 隧道橫剖面淨空分析與 Google Earth 結合

GRP5000隧道橫剖面測量結果輸出之點位，含隧道橫剖面、淨空測繪圖考慮軌道超高的 CTC 坐標(Canted Track Coordinate System)及 UTC 坐標(Uncanted Track Coordinate System)等空間資訊(圖 8)。由圖 8 可比對檢驗隧道目前淨空與原剖面、電氣化需求之狀況。此外，嘗試透過 QGIS 工具將隧道基本 GIS 資訊、橫剖面及雷射掃描影像結合於 Google Earth (圖 9)。其中圖 9 呈現有部份淨空略低於電氣化頂拱淨高(白線)可能影響電車線架設，有助於釐清隧道淨高不足之空間分布。其成果可整合運用 Google Earth 等開放圖資來輔助評估隧道異狀及其範圍，未來可作為鐵路隧道電氣化評估改善之參考。

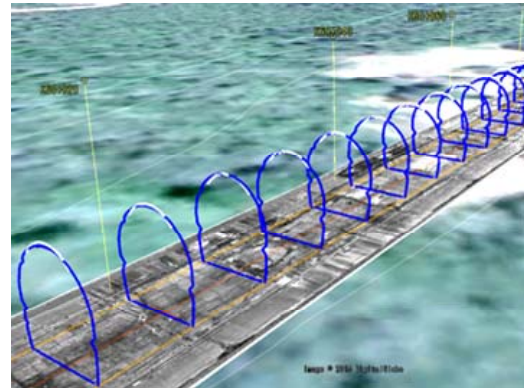


註：上圖為隧道橫剖面與軌道坐標系統。左圖黑實線為隧道原橫剖面；紅色圓點為隧道淨空雷射掃描成果；內部灰色虛線為電氣化車箱淨空需求。

圖 8. 隧道淨空測量成果套疊、軌道軌距超高及坐標系統

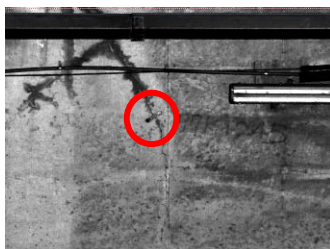


(a) 隧道影像與 Google earth 整合



藍線:現有淨空；白線:電氣化頂拱淨高需求
 (b) 以 Google Earth 呈現電氣化淨高不足區域

圖 9. 隧道襯砌掃描影像、淨空測量與電氣化界線整合於 Google Earth



(a) 裂縫寬 3mm 掃描影像



(b) 現場檢核之裂縫照片



(c) 左邊雷射掃描影像與透明度 50% 之現場照片完整套疊

圖 10. 隧道襯砌裂縫計之雷射掃描成果與現場檢核照片套疊比對

3.4 現場目視檢核與比對

為檢核隧道襯砌雷射掃描成果與實際狀況之正確性，本研究先利用掃描影像

分別判釋與數化隧道襯砌裂縫、滲水及鋼筋裸露等異狀，再逐一至現場目視確認。由圖 10 及圖 11 可知雷射掃描影像與現場檢核結果大致相符，將能有效利用雷射掃描建置大量隧道襯砌測繪成果，作為未來維護及評估之重要資訊。此外，圖 12 為圖 11(b)裂縫(寬約 0.5mm)之側壁處掃描影像全景及點雲微觀影像，可見其垂直點雲密集程度足以呈現約極細微裂縫之變化效果。

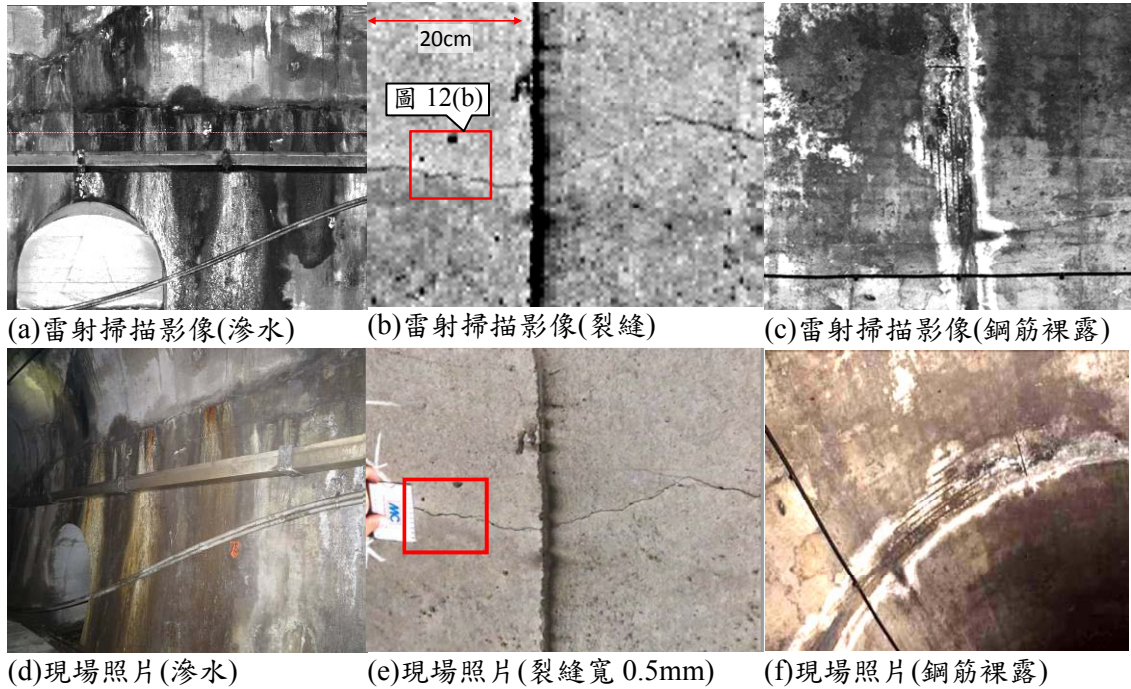


圖 11. 隧道襯砌雷射掃描影像與現場拍攝照片之檢核比對

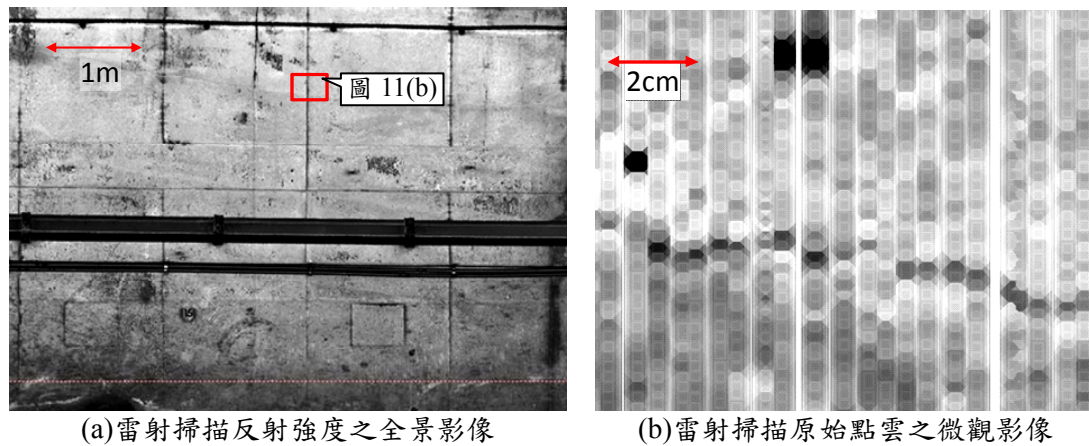


圖 12. 隧道雷射掃描(圖 11(b)裂縫處)點雲反射強度之全景及微觀影像

四、結論與建議

本文以環島鐵路某營運路線隧道群為例，運用 3D 雷射掃描建置沿線隧道雷射掃描影像及淨空測量等圖資，且應用 Google Earth 整合三維空間資訊。經由前後期隧道影像、現有淨空與電化頂拱界線之比較，以及現場檢核隧道襯砌裂縫、滲水、剝落等異狀影像之成果，確可輔助鐵路隧道襯砌異狀評估及釐清隧道淨高不足之

分布等應用實務。因應此類技術效能持續提昇及普及化，未來若能定期建置環島鐵路三維雷射掃描資訊，將有助於後續隧道安全評估及電氣化維護改善之參考。

參考文獻

- 沈聰益、王清銀，2010，絕對座標軌道量測儀於軌道工程之應用探討，*工程報導*，第 285-286 期，交通部鐵路改建工程局。
- 洪銘遠、李順敏、侯嘉松、周永川、林志權，2012，臺北捷運系統全線隧道維護檢測探討，第 93 期，*中華技術*，第 88-95 頁。
- 徐偉城，2007，LIDAR 與環境調查／監測／災害防救應用，*國土資訊系統通訊*，第 61 期，第 69-79 頁。
- 張文城、蘇宗寶、彭仁忠，2012，桃園機場聯外捷運軌道系統工程施工探討，*中華技術*，第 94 期，第 56-75 頁。
- 曾義星、史天元，2004，三維雷射掃描儀—新一代測量利器，*科學發展月刊*，第 365 期，第 28-38 頁。
- 劉世琳、陳俶季，2005，山岳隧道襯砌檢測與處理工法之探討—以北迴線隧道為例，*九十四學年度碩士專班研究成果發表會*，臺灣海洋大學，基隆。
- Engstrand, A., 2011. *Railway surveying - A case study of the GRP 5000*, Unpublished master's thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Feng, Q., 2012. Practical application of 3D laser scanning techniques to underground projects, BeFo Report 114, *Rock Engineering Research Foundation*, Sweden.
- Mettenleiter, M., N. Obertreiber, F. Härtl, M. Ehm, J. Baur, and C. Fröhlich, 2008. 3D Laser Scanner as Part of Kinematic Measurement Systems, *1st International Conference on Machine Control & Guidance*, ETH Zurich, Switzerland, June 24-26, 9 p.
- Newnham, G., J. Armston, J. Muir, N. Goodwin, D. Tindall, D. Culvenor, P. Püschel, M. Nyström, and K. Johansen, 2012. Evaluation of terrestrial laser scanners for measuring vegetation structure, *CSIRO Sustainable Agriculture Flagship*.
- Schulz, T., 2007. *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy*, Doctoral dissertation, Technical University of Berlin.
- Shan, J. and C. K. Toth, 2008. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*, CRC Press.
- Van Genechten, B., 2008. *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications*, Universidad Politecnica de Valencia Editorial.
- Wang, T. T., 2010. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes, *Engineering geology*, Vol. 115, No. 1, pp. 80-95.