



結合雷射掃描影像與 BIM 技術 進行隧道安全與管理

張嘉峰／財團法人臺灣營建研究院 博士

廖惠菁／財團法人臺灣營建研究院 工程師

彭念豪／程昱科技有限公司

莊子毅／國立臺灣大學土木工程研究所 博士

隧道襯砌變形監測為評估隧道穩定及安全性的程序之一。然而，除了設置感測器進行長期監測之外，隧道定期巡檢多採取人工目視，繪製襯砌損傷區域、損傷屬性並拍攝照片進行後續比對處理。對於規模較大的隧道，維護工作的執行與數據儲存往往需耗費大量時間、人力與成本。有鑑於此，本文說明以主動式感測的光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）掃描技術進行非接觸式的三維數據蒐集，在不受光源侷限下快速獲得隧道襯砌的幾何資訊，並透過適當處理獲致雷射掃描影像，進行直覺化展示與空間資料處理，提升自動化作業之程度。此外，基於永續經營的目的，對於隧道施工階段的設計、工法、地質與岩體評分等資料，以及營運階段的歷年檢測報告、維修補強紀錄等龐大資訊皆應完整地記錄。因此，運用建築資訊模型（Building Information Modelling, BIM）技術於隧道工程設計、建設、營運之全生命週期的管理儼然成為必要趨勢。因此，本文著重在建構可整合於 BIM 模型中的隧道襯砌掃描影像資料庫管理系統，基於光達掃描資料，提供隧道襯砌掃描的目視檢查及非破壞檢測量化成果，並可與多時期既有襯砌損傷資料進行比對，掌握襯砌損傷的分布現況與劣化情形，促進隧道結構安全檢測之成效。

簡介

考量台灣地質環境結構複雜，隨著都市開發與基礎建設的發展，隧道工程在國道、鐵路及捷運等民生交通建設中皆扮演重要的環節^[1,2]。隧道結構的安全性除了與施工品質直接關聯外，周圍岩體地質特性、地下水分布及地震外力均可能造成結構體的擠壓變形、襯砌裂縫、剝落、滲水、混凝土劣化等影響。因此，營運中隧道安全檢測通常著重於調查隧道襯砌潛在的異狀並同時追蹤既有異狀變化，以確保隧道安全性與耐久性^[3-5]。其中，非破壞檢測技術為基於襯砌表面及其剖面幾何資訊進行隧道的診斷與評估。國際隧道協會

隧道營運小組將非破壞檢測技術區分為光學技術、導電與電子技術、物理波動技術與放射性技術四大類。其中，唯有光學檢測技術乃基於三維的空間資訊，包含目視、影像（光學或熱影像）拍攝、雷射掃描等檢測方式。其中，瑞士 Amberg 集團子公司 Spacetec 於 1981 年發展之 TS360 隧道掃描系統，結合影像掃描儀、紅外線熱像掃描儀及雷射掃描儀，大幅度地提升隧道檢測之技術水準。該掃描系統可放置於沿隧道前進之移動載具，隨著載具行駛穿越受測隧道斷面時，可獲得隧道全斷面灰階影像、溫度分佈影像及淨空剖面。另外，近年來光達雷射掃描系統發展迅速，可在

短時間內自動獲取環景掃描資料，產製高密度、高精度的三維點雲以描述隧道襯砌之幾何^[6-8]。同時，可搭載光學感測鏡頭來提供目標物的色彩紋理資訊。

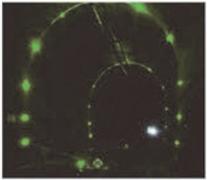
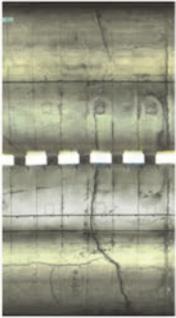
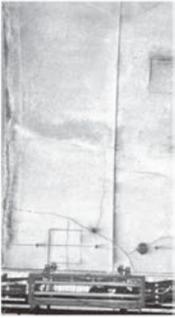
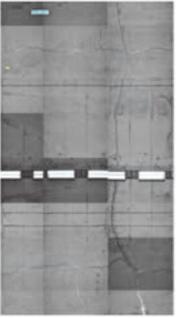
傳統隧道的安全巡檢仍是以目視檢測為主，並定期運用全測站進行導線測量，針對隧道單一襯砌剖面逐點進行三維量測^[9-11]。然而，為避免造成營運中隧道交通的衝擊，在有限的作業時間內往往只能對該剖面進行有限的取樣量測，因此可能造成未取樣處的變形訊號遺失。台灣自1993年起陸續辦理隧道結構安全檢測，採用目視測繪與全斷面掃描方式進行裂縫及滲水調查，並針對異狀顯著處進一步採用透地雷達實施襯砌厚度檢測，或採用混凝土強度錘進行襯砌局部強度調查，並針對嚴重處實施混凝土鑽孔取樣及強度試驗等必要補強措施。除此之外，地下捷運系統的結構可能因外在外力變化、襯砌材質劣化、漏水或其他因素而在結構弱位處產生外在或內在的異狀。因此，每5至6年可以隧道影像掃描技術進行隧道壁面異狀記錄，並配合現地詳細檢測作業，據以作為隧道安全評估與維修補強之依據。隧道影像掃描技術^[12,13]乃以照

相或攝影方式記錄襯砌表面影像，搭配高解析雷射掃描器快速記錄隧道壁狀態以進行襯砌表面異狀判釋。

隧道檢測作業所蒐集的數據，可能因採用不同的設備而產生不同的資料類型、格式以及不同的資料儲存及展示形態。早期之隧道影像掃描包括一般照相檢測、日本 CCD 隧道影像攝影系統、德國 Spacetec 公司 T2 與 T3 (TS360) 隧道影像掃描系統、瑞士 Amberg 公司 GRP5000 與 Tunnelscan 隧道影像掃描系統及日本 TIPS 隧道影像掃描系統等，而近年 GRP5000 與 TIPS 系統則被應用於國內地下捷運系統的全斷面隧道影像掃描。表 1 分別比較這兩系統、地面光達掃描 (Z+F Imager 5010) 及國內開發的影像量測技術之應用性。

然而，不論採用何種掃描技術，單次檢測作業即會產生龐大的資料量。因此，有效的隧道襯砌檢測管理系統對於定期檢測作業可有效地進行分析並且可與歷年的資料紀錄進行比對，來獲得合理的安全評估與適當的管理規劃，並亦可進一步將系統整合於管理隧道完整生命週期的建築資訊模型 (Building Information Modelling, BIM)^[14]。

表 1 隧道影像掃描技術比較

	GRP 5000	TIPS	Z+F Imager 5010	影像量測技術
系統設備				
作業速度	500 ~ 2000 (公尺/小時)	500 ~ 2500 (公尺/小時)	100 ~ 300 (公尺/小時)	100 ~ 200 (公尺/小時)
解析度	優於 1 公厘			
空間定位誤差	< 3°	< 5°	< 2°	< 5°
斷面淨空測量	同時進行	無法同時進行	同時進行	無法同時進行
影像展開圖				

隧道襯砌檢測管理系統

管理系統旨在整合展示不同時期同一區段內不同型態之資料，幫助管理者瞭解隧道特定區段之狀態，並藉由相關功能之設計，達成資料查詢、分析、比對、統計、警示等目的。考量不同時期隧道檢測作業可能產製不同類型、位置、用途且高度相關的龐大資料，因此系統自建資料庫以有效地儲存相關資料，提升查找資訊的便利性，並在資料匯入及匯出的同時維持資料的獨立性及完整性。此外，本系統除了展示平面影像及文字資料外，更透過環景影像的方式呈現隧道內的真實情況，使管理者可如同身歷其境一般，模擬現場作業人員身處隧道時的視角，提供更直觀的資料查閱方式。

系統架構

如圖 1 所示，為滿足上述各項需求，系統模組分為資料整合模組、全景影像展示模組、異狀資料管理模組、變形程度管理模組以及資料匯入／匯出模組。各資料模組分別說明如下。



圖 1 系統架構圖

系統模組功能

資料整合模組

如圖 2 所示，針對各個區段的檢測作業，系統將產生襯砌表面展開圖、異狀描繪圖、異狀套合成果圖、全景影像及異狀資料列表等資料。多種資料類型主要是用以描述襯砌在檢測時的狀態以及異狀區域於襯砌表面上分布的情況。藉由系統的資料整合模組，管理者不需要在不同的資料存放位置尋找特定檔案進行比對分析，進而大幅提升作業效率。

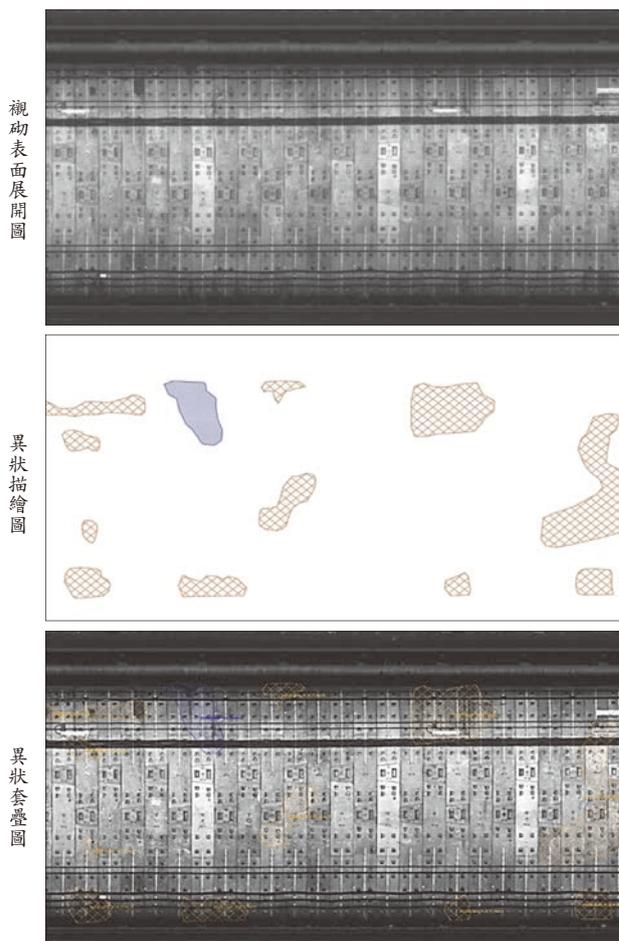


圖 2 系統所包含資料類型

同時，藉由圖形資料索引編輯介面（如圖 3 所示）可快速的在大量的原始資料中，搜尋並開啟特定區段的資料，提高資料查閱的效率，並降低檔案尋找錯誤的狀況。

全景影像展示模組

雷射掃描作業所獲得的原始點雲資料，基本上包含空間中各點位的三維坐標及其反射強度值，若有搭載光學鏡頭的設備則另包含每個點位上的紅、綠、藍三個色彩值。不同於二維平面圖資，點雲可清楚呈現空間中各點位的相對幾何關係。惟點雲的資料量龐大，即時展示對於系統運算會產生相當的負荷，因此本系統將點雲資料依據空間關係進行投影轉換，將資料由離散點轉換為全景影像，並以全景影像展示模組進行呈現（如圖 4 所示），透過模擬現場人員視角，使管理者有身歷其境的感受，可更快速地得知異狀區域在空間中分布的關係，並且可針對感興趣的區域進行放大檢視。



圖 3 圖形資料索引編輯介面



圖 4 掃描現場 720 度全景影像多角度視圖

除此之外，考量上述單一檢視區段所包含的資料，即襯砌表面展開圖、異狀描繪圖、異狀套合成果圖、全景影像及異狀資料列表。如圖 5 所示，系統提供一資料展示介面，將上述數種資料整合於畫面中，並提供隧道里程略圖來得知當前查看資料位於區段總長度內之相對位置，並可在略圖上點選右鍵，快速開啟平面圖資進行查閱。



圖 5 資料展示介面示意圖

異狀資料管理模組

隧道襯砌上的異狀與結構體的健康程度息息相關，因此系統除了以圖形化的方式展示襯砌異狀的資料型態外，亦可產製文字表格，紀錄異狀相關屬性資料（如圖 6 所示），如此方可系統性的管理掃描區段內的所有異狀。透過管理模組可根據特定異狀類型或特定里程區間等條件進行資料篩選，幫助管理者在龐大的原始資料中，擷取出感興趣異狀的數量及所在位置。此外，藉由觀察同一異狀之不同時期的變化，可推估隧道是否持續遭受破壞，對隧道安全性評估而言，是一重要資訊，因此，本系統開發襯砌異狀比對功能，藉由異狀名稱、大小、破壞型態等資訊，比對兩筆不同時期的異狀量化數據（如滲水面積之前後期差異量），並依據異狀坐標資訊，尋找並展示兩期異狀圈繪成果，讓管理者從文字數據及影像資料兩個層面，明確瞭解到異狀隨時間之差異與變化（如圖 7 所示）。



圖 6 異狀列表管理介面

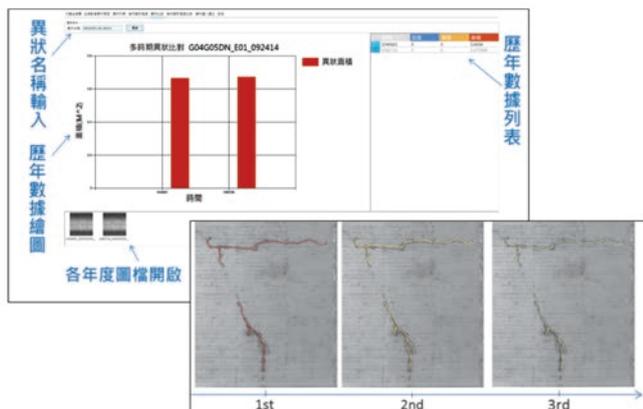


圖 7 異狀比對介面與前後期比對示意圖

變形程度管理模組

隧道結構體的健康程度除了可藉由襯砌上異狀的數量及變化程度來評判外，亦可對隧道進行斷面檢測，取得該斷面的形狀及尺寸，比對結構體設計參數，以得知結構體是否發生變形。變形程度之計算方法眾多，以點雲資料為計算基礎的方法，可擷取點雲資料中特定斷面的所有點位資料後，擬合該斷面的中心點位置，接著計算中心點到各特定角度點位的距離，或是擷取斷面中特定点位的坐標，並計算點與點之間的相對距離，藉由距離量的變化，來推估隧道是否發生變形。透過變形程度管理模組介面，管理者可以依據位置區間篩選變形程度資料，查看特定位置的變形程度分析成果。圖 8 為變形程度資料查看介面，管理者輸入里程起訖區間，系統會自動搜尋該區間內的變形資料圖表，並製作檔案列表呈現在畫面左方，

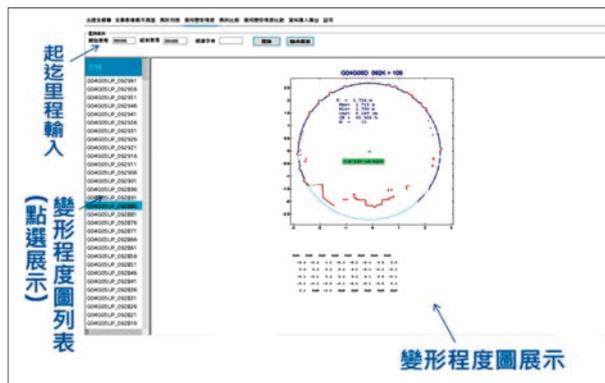


圖 8 變形程度查看介面

管理者點選左方列表內之欄位，系統會在畫面右方展示該變形程度檔案，供管理者查看。除了以點雲計算之變形程度資訊可供展示外，系統亦支援輸入既有之檢測報告，供管理者於查詢介面一併搜索展示，如圖 9 所示，在變形程度列表的欄位中按右鍵後，系統會搜尋符合此里程位置的既有資料，並提供按鈕讓管理者點選開啟，開啟檔案之示意圖如圖 10 所示。

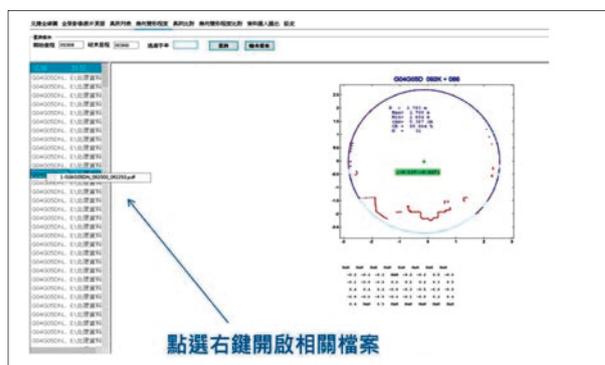


圖 9 既有資料開啟介面

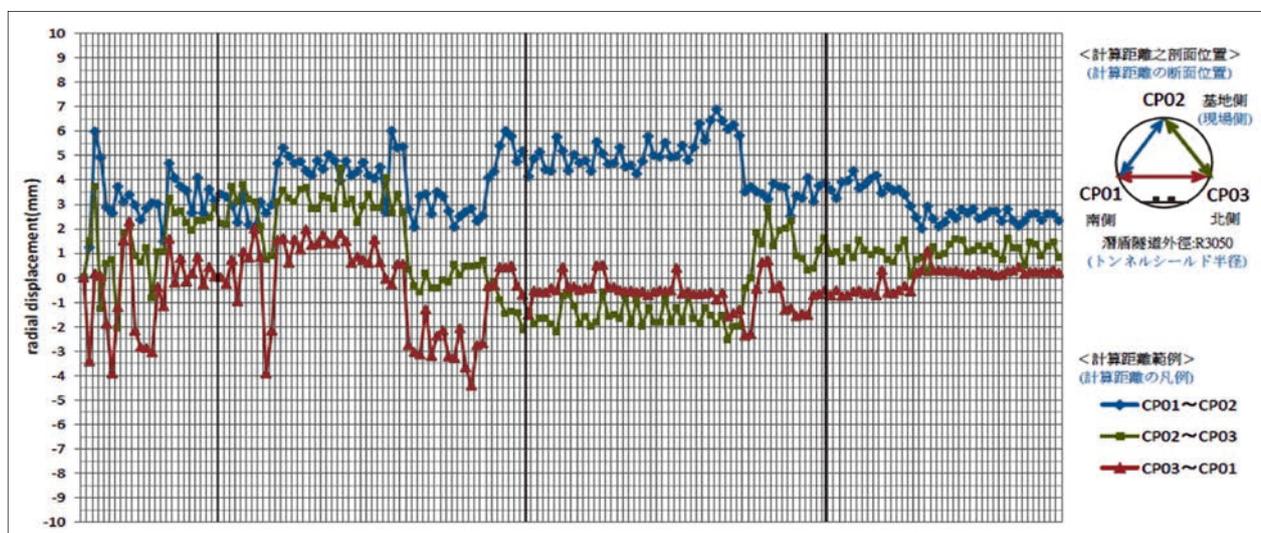


圖 10 既有資料展示

圖 11 為變形程度比對功能介面，管理者輸入段名及里程，系統自動搜尋各期資料，若有多期該里程之變形資訊存在，便會進行資料展示，繪製套疊圖表在畫面左方區塊，協助管理者快速辨別此里程變形程度的變化，並在畫面的右方區塊內繪製各期差異量折線圖表，告知管理者數據量的變化，下方則可點選開啟此變形程度之檔案，供管理者查閱。

由於圖 11 為單一里程的變形程度變化比較，無法描述大區域的整體變形，所以本系統亦提供區段變形程度之比對功能，提供管理者查看指定區段內的變形程度變化，圖 12 為區段變形程度比對介面，管理者可點選區段、基準期數及比較期數等三項資訊，系統會畫出如畫面右側的圖表，圖中由左至右是里程增加方向，最右側有各顏色代表的數值，越靠近藍色指的是凹陷越多，越靠近紅色指的是凸出越多，在此圖上可點選右鍵，開啟各里程位置的比對資料顯示於畫面右側，藉由查看畫面左側的圖，管理者可由顏色的變化，得知此區段內是否有區域變形發生，進而達到禁限建管理的使用目的。

資料匯入／匯出模組

隧道掃描資訊展示系統內包含多種型態的資料，然而，隨著結構體使用時間增加，檢測成果亦會不斷產出，因此，新產出資料如何快速且正確的輸入至系統

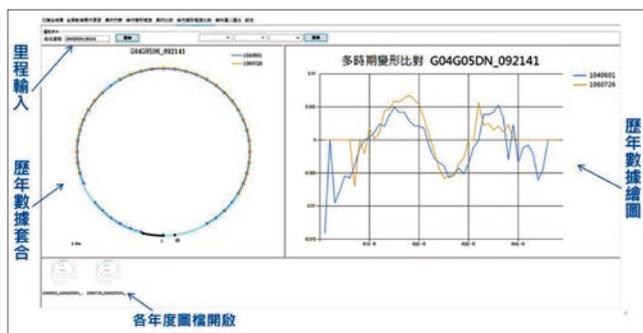


圖 11 不同期變形程度比較介面

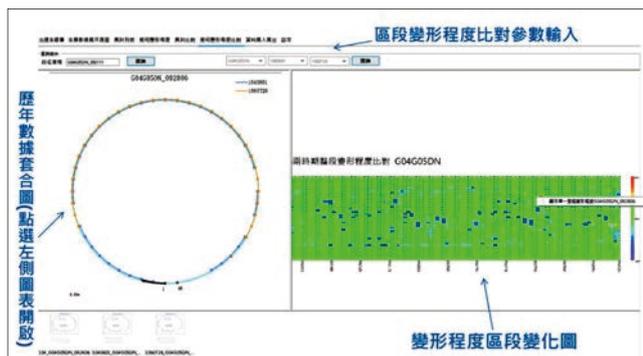


圖 12 區段變形程度比對介面

中，為一重要課題。藉由資料匯入／匯出模組之開發，管理者可透過系統功能新增檢測資料，在系統的介面設計指引下，確保管理者欲新增的資料被存放到正確位置，且符合系統展示需求之檔案規格。此外，此模組亦支援資料匯出功能，匯出之資料主要為存放在資料庫內各資料表的內容資訊，以做為資料備份之用。

結論與建議

本文介紹基於雷射掃描影像的隧道襯砌檢測管理系統，系統具備快速搜尋、展示、比對隧道多區段多時期的檢測資料，顯示系統進行實務數值分析與評估的功能性。藉由此管理系統可以大幅提升隧道檢測資料蒐集後的分析處理作業時間，並可進行不同時期資料之整合分析。同時，本研究開發的管理系統可被應用於以 BIM 技術進行隧道全生命週期管理的重要模組。

參考文獻

1. 中興顧問社 (2013), 國道隧道維護管理系統, 高速公路局北區工程處。
2. 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」, 中華技術, 第 93 期, 第 88-95 頁。
3. 何泰源、黃燦輝、鄭富書 (1999), 「隧道之維護管理方式—調查、安全評估及維修方式之探討」, 隧道自動化安全檢測、維修與補強技術, 31-54 頁。
4. Huang, K.P., Wang, T.T., Huang, T.H., Jeng, F.S. (2010), Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (3), 266-278.
5. Wang, T.T. (2010), Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes, *Engineering Geology* 115 (1-2), 80-95.
6. 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁 (2007), 「台灣隧道襯砌異狀類別之探討」, 隧道建設, 第 27 卷, 第 87-92 頁。
7. Han, J.Y., Guo, J., Jiang, Y.S. (2013), Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-D LiDAR point clouds. *Tunnelling and Underground Space Technology* 33, 186-192.
8. Zhou, Z., and Gong, J. (2018), Automated Analysis of Mobile LiDAR Data for Component-Level Damage Assessment of Building Structures during Large Coastal Storm Events. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 00, 1-10.
9. Kontogianni, V., Tzortzis, A., Stiros, S. (2004), Deformation and failure of the Tymfristos tunnel, Greece. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (10), 1004-1013.
10. Özbek, A., Türkmen, S., Gül, M. (2003), The deformation evaluation of Kızılac, T3A tunnel (Osmaniye, Turkey). *Engineering Geology* 67 (3), 309-320.
11. 李國榮、洪士勳、高憲彰、林賜忠、王進成 (2014), 「國道隧道維護管理系統之規劃與開發」, 中興工程, 第 124 期, 第 3-12 頁。
12. 葛文忠、俞旗文 (2005), 三維隧道影像掃描儀應用於老舊隧道安檢, 第 11 屆大地工程研討會。
13. 黃燦輝、林銘郎、王泰典 (2008), 隧道非破壞性檢測技術之開發總結報告書, 交通部鐵路改建工程局東部工程處。
14. Succar, B. (2009), Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction* 18, 357-375.

