

第三十卷第三期
中華民國一十四年九月

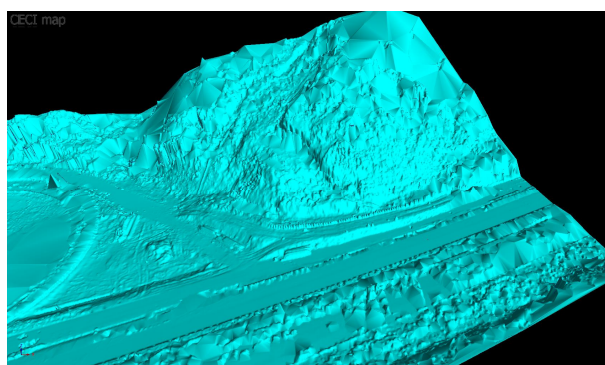
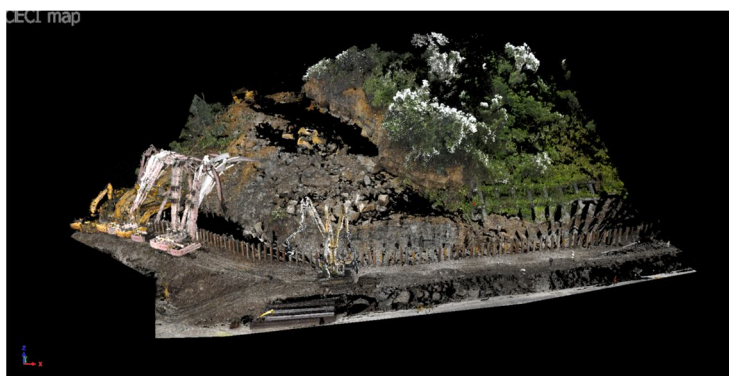
ISSN 1021-8661
DOI: 10.6574/JPRS



航測及遙測學刊

中華民國航空測量及遙感探測學會出版

航測及遙測工程應用特刊



Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

Volume 30 No.3

September

2025

Published by Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

航測及遙測學刊

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

發行人：蔡富安

出版者：中華民國航空測量及遙感探測學會

地址：台北市文山區羅斯福路五段 113 號三樓

電子信件：csprsmail@csprs.org.tw

網址：http://www.csprs.org.tw

PUBLISHER: Fuan Tsai

PUBLISHED BY: Chinese Society of Photogrammetry and Remote Sensing

Address: 3F, No.113, Sec.5, Roosevelt Road, Taipei, Taiwan

E-mail: csprsmail@csprs.org.tw

WebSite: http://www.csprs.org.tw

總編輯：楊明德

國立中興大學土木工程學系

電話：886-4-2285-2168

電子信件：jprssubmit@gmail.com

EDITOR-IN-CHIEF: Ming-Der Yang

Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

Tel: 886-4-2285-2168

E-Mail: jprssubmit@gmail.com

編輯委員(依中文姓氏筆劃排列)

王素芬 (國立彰化師範大學)

王聖鐸 (國立臺灣師範大學)

史天元 (國立陽明交通大學)

何宗儒 (國立臺灣海洋大學)

林玉農 (中央研究院)

林昭宏 (國立成功大學)

林唐煌 (國立中央大學)

邱式鴻 (國立政治大學)

洪榮宏 (國立成功大學)

徐百輝 (國立臺灣大學)

張智安 (國立陽明交通大學)

莊永忠 (逢甲大學)

郭俊麟 (國立東華大學)

陳偉堯 (國立臺北科技大學)

陳國華 (國立臺北大學)

陳朝圳 (國立屏東科技大學)

曾國欣 (國立中央大學)

黃倬英 (國立臺灣大學)

蔡富安 (國立中央大學)

蔡榮得 (國立中興大學)

蘇東青 (國立金門大學)

C. Stewart (The Ohio State University) (USA)

M. Matsuoka (Tokyo Institute of Technology) (Japan)

T. Kim (Inha University) (South Korea)

EDITORIAL BOARD

S. F. Wang (National Changhua University of Education)

S. D. Wang (National Taiwan Normal University)

P. T. Y. Shih (National Yang Ming Chiao Tung University)

C. R. Ho (National Taiwan Ocean University)

Y. N. Lin (Academia Sinica)

C. H. Lin (National Cheng Kung University)

T. H. Lin (National Central University)

S. H. Chio (National Chengchi University)

J. H. Hong (National Cheng Kung University)

P. H. Hsu (National Taiwan University)

T. A. Teo (National Yang Ming Chiao Tung University)

Y. C. Chuang (Feng Chia University)

C. L. Kuo (National Dong Hwa University)

W. Chen (National Taipei University of Technology)

K. H. Chen (National Taipei University)

C. T. Chen (National Pingtung University of Science and Technology)

K.H. Tseng (National Central University)

C. Y. Huang (National Taiwan University)

F. Tsai (National Central University)

J. D. Tsai (National Chung Hsing University)

T. C. Su (National Quemoy University)

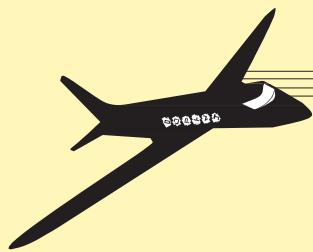
C. Stewart (The Ohio State University) (USA)

M. Matsuoka (Tokyo Institute of Technology) (Japan)

T. Kim (Inha University) (South Korea)

封面照片說明 About the Cover

使用地面光達設備於邊坡進行光達掃描，原始光達點雲經拼接、清除雜訊及雜點後，能提供高精度且細緻的地表地形資訊(包括 DSM 及 DEM)。本計畫於高速公路邊坡坍塌災區共計架設 18 處掃描站，掃描原始有效光達點雲超過 18,000 萬點，將原始光達點雲分類並濾除非地面點及植被後計算 DEM 成果，利用不同時期的點雲 DEM 成果進行套疊比對，能有效監看工程搶修過程中邊坡土方的變化情形。



特刊引言

航測及遙測工程應用特刊

鄭宏達

台灣世曦工程顧問公司資深協理

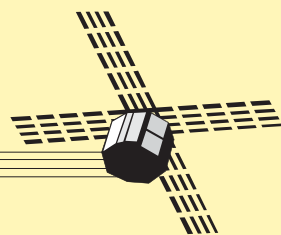
航遙測及空間資訊科技的發展日新月異，空間資訊是各項工程建設的重要基礎資訊，也是發展智慧國土不可或缺的重要基礎元素，正確及完善的空間資訊可以提升都市建設與工程規劃、設計、建設、及經營管理之效用，並可作為支援決策參考。空間資訊的內容主要包含位置、圖形及屬性等資訊，其資料來源可以從測量、調查、拍照…等各種方式得到，但後續要達到有效的應用則須透過輸入、建檔、繪圖、系統化處理後方能提供最佳的使用效果，所以空間資訊技術涵蓋所有測繪學的內容，以及計算機運算對空間數據和資訊處理的過程。

隨著測繪技術的發展及電腦科技的應用，航遙測資料使用日趨多元。過往因使用需求層面較低，加上軟體與儀器設備之限制，工程使用上多以採用二維地形圖資為主。現今資訊數位科技發展，地形圖資已導向三維空間資訊的方式呈現，包括三維地形圖、城市模型、建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)、三維管線模型(3D Utility Pipeline Model)、三維地理資訊系統(3 Dimensions Geographic Information System, 3D GIS)、自駕車高精地圖(High Definition Map, HDmap)等，因此測繪產業面對的環境有很大的改變。

筆者很高興於2024年10月接到中華民國航空測量及遙感探測學會的邀請，客編航測及遙測工程應用，隨後立即開始著手進行邀稿，本學刊總編輯收錄6篇論文(學術論著2篇、技術短文4篇)，內容包括：應用InSAR技術監測大地變位、多視角車載影像匹配之研究、公共設施管線BIM之養護管理、自來水智慧化管理及水理分析、整合多元遙測技術於高速公路邊坡救災、高精度圖資及三維實景於數位孿生之應用等，歷時近1年，本特刊終於完成。

回顧近50年來隨著測繪科技進步，測量工作從傳統地測發展到多元遙測技術的空間測繪。又鑒於資訊產業快速發展，通訊網路已由5G邁向即將到來6G，以及大數據(Big data)、物聯網(IoT)、雲端平台、人工智慧(AI)、虛擬實境(VR)及擴增實境(AR)等技術整合應用，發展數位孿生(Digital Twin)對於空間資訊使用將更為廣泛，而資料使用量亦將暴增，因此使用端的應用效益將是未來發展重點，展望6G及大數據時代來臨，空間資訊應用發展將不可限量。

期待經由本期航測及遙測工程應用特刊的出版，能夠讓國內產官學界瞭解臺灣在航遙測工程應用與防救災等相關技術的發展現況，並希望未來能有更多人能夠投入航遙測及空間資訊於工程應用行列，提升國家工程建設品質。



應用深度特徵於多視角車載影像匹配之研究

張智安^{1*} 陳沛丞² 陳亭霓³ 楊軒⁴ 林展慶⁴ 李冠毅⁴
洪愷頡⁴ 呂振永⁴

摘要

隨著移動測繪技術的進步，多視角車載影像逐漸成為道路觀測的重要資料來源，但傳統方法難以克服畸變與視角差異。為了提升影像匹配的精度和泛化能力，本研究探討基於深度學習的深度特徵匹配技術 (Deep Feature Matching, DFM)，利用 VGG19 預訓練模型與 CNN 卷積神經網路萃取特徵，並結合兩階段匹配策略與 RANSAC 演算法過濾錯誤點以確保可靠性，達成多視角車載影像的精確匹配和物空間三維定位。實驗採用三相機車載影像，以交通標誌作為定位目標。結果顯示，DFM 在尺度差異、畸變與遮蔽等情境下，匹配成功率與精度均優於 SIFT，特別在畸變與遮蔽下表現更佳。交通標誌定位成功率約 70%，平均誤差小於 0.5 m，證實 DFM 具備多視角三維定位的應用潛力。

關鍵詞：深度學習、深度特徵、影像匹配、多視角影像、交通標誌

1. 前言

1.1 研究背景與動機

隨著移動測繪載具技術的發展，以車載相機獲取多視角影像成為重要的道路觀測資料來源，這些車載影像可以提供大量觀測資料，且可應用於建構環景的道路環境，並可進一步從空間前方交會得到三度空間的坐標，因此多視角影像的影像匹配是一項重要的議題。

傳統的影像匹配方法通常依賴人工設計的特徵進行匹配，例如 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004)、SURF (Speeded-up robust features (SURF) (Bay *et al.*, 2008) 或 ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) (Rublee, *et al.*, 2011) 等。然而，傳統方法在光線變化和視角較大變化的情境中，可能有所限制。為了提升影像特徵於匹配過程的泛化能力，從深度學習模型中萃取深度特徵 (Deep Features)，有助多視角影像匹配。深度特徵對光線變化和視角較大的場景擁有更強的抗變能力，

可提高配對的精確度與突變性 (Dusmanu *et al.*, 2019)。

1.2 相關研究

傳統的影像匹配方法主要分為以區域為基礎 (Area-based Methods) 的方法和以特徵為基礎 (Feature-based Methods) 的方法。在以區域為基礎的方法中，這類方法最具代表性的是相關係數法，也就是 Normalized Cross-Correlation (NCC) (Zitová & Flusser, 2003)。NCC 依賴影像區域之間的相似性來轉換成相關係數值，以判斷影像視窗的匹配情況。在以特徵為基礎的方法中，特徵基礎的方法通過萃取影像中的特徵，如角點、或線段，其中，最為代表的是 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004)，SIFT 是一種廣泛應用於影像匹配的方法，主要目標是從影像中提取出具有尺度不變性和旋轉不變性的關鍵點特徵符 (Keypoint Descriptor)，以便在不同視角、尺度變化、旋轉的情境下，依然能夠可靠地進行影像匹配。演算法核心流程為計算局部影像像素的灰階直方圖分佈產生

¹ 國立陽明交通大學土木工程學系 教授

² 國立陽明交通大學土木工程學系 博士候選人

³ 國立陽明交通大學土木工程學系 碩士生

⁴ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 工程師

* 通訊作者, E-mail: tateo@nycu.edu.tw

收到日期：民國 114 年 01 月 10 日

修改日期：民國 114 年 04 月 23 日

接受日期：民國 114 年 05 月 09 日

影像梯度，並將此梯度分佈組合成關鍵點特徵符。此類人工設計的特徵萃取方式後續催生了例如 SURF 等演算法，廣泛應用於攝影測量領域。

近年來深度學習廣泛應用在影像處理領域(He *et al.*, 2016)，在使用深度學習進行影像匹配的方法中，影像匹配通常需要依賴大量的資料集來訓練模型。此類方法有兩種主要策略：一個重要方向是使用 Siamese Network 來完成影像匹配。Siamese Network 的核心是將兩張影像分別擺入兩個一樣的模式結構中，通過其中的層層轉換，將影像的特徵向量轉換成一個更具代表的特徵表示。之後，將兩個特徵向量作差異或雙輪模型來判斷影像之間的相似度。如果兩張影像為相似影像，那麼其差異就較小，通過此分類器來判斷影像是否相似，進而達成影像匹配之目的。使用 Siamese Network 的重要優勢是可以直接利用影像之間的相對關聯來進行判識 (Melekhov *et al.*, 2016)，這類深度學習的影像匹配方法，對於與資料特性相似的影像具有良好的表現能力，適用於與訓練資料特性相似的影像，但如果預測影像特性與訓練資料集有明顯差異，模型的表現能力可能會下降。使用深度學習進行影像匹配的另一個策略是使用預訓練模型計算深度特徵 (Efe *et al.*, 2021、Zagoruyko & Komodakis, 2015)，與需要重新訓練深度學習模型的方式不同，該方法利用預訓練模型計算深度特徵，充分應用遷移學習 (Transfer Learning) 的概念。在這種策略中，常使用的預設模型包括 VGG16、ResNet 和 Inception 等預訓練模型。這些預訓練模型使用如 ImageNet 這類的大規模訓練資料集上進行訓練，得到的特徵表示能力，對於多種遷移學習的任務均有良好的表現能力。從預訓練模型得到深度特徵後，經由特徵比對，可達成影像匹配之目的。這類方法的另一大優點是免去重新訓練模型，因不需要重新訓練，故有較佳的使用彈性。

比較 SIFT 演算法及深度學習匹配方法，SIFT 使用人工設計的關鍵點特徵符，而深度學習使用 CNN 架構透過大量訓練資料進行資料導向 (Data Driven) 建立深度特徵萃取方式，SIFT 適用在相同感測器的資料，而深度學習影像匹配方法經由模型

訓練與學習，可應用在異質感測器的匹配中，例如 Hughes *et al.* (2018)，使用 Pseudo-Siamese CNN 深度學習架構，克服光學影像與雷達影像的差異性，達成異質資料間的匹配。

近年來深度學習技術的快速發展，大幅提升了影像匹配的準確性，成功應對如視角變化、光照差異與旋轉等挑戰。傳統上，局部特徵匹配方法可分為基於偵測器 (Detector-based) 與非偵測器 (Detector-free) 兩大類 (Xu *et al.*, 2024)。兩者差異在於是否直接使用特徵萃取偵測器提供之特徵，基於偵測器之特徵點匹配是先進行特徵萃取，再對兩影像之特徵進行匹配，例如 Superpoint (DeTone *et al.*, 2018) 使用單一特徵點萃取 CNN 網路架構進行匹配，Merkle *et al.* (2018) 則是利用條件式生成對抗網路 (cGANs) 匹配光學影像與雷達影像。而非偵測器則是直接比對兩圖片特徵。近年來的趨勢逐漸有許多基於影像特徵匹配的技術發展完善如 NCNet (Rocco *et al.*, 2018) 基於 CNN 特徵並使用共識網路進行匹配、LoFTR (Sun *et al.* 2021) 將 CNN 特徵以 Transformer 技術進行編碼後匹配。

針對遙測影像匹配，MU-Net 提出一種無監督多尺度架構，可有效處理多模態影像對間的大幅視角變形 (Ye *et al.*, 2022)。在旋轉不變性的挑戰上，SE2-LoFTR-4*相較於傳統 LoFTR 展現更佳的旋轉影像匹配效能 (Bökman & Kahl, 2022)。Neighbourhood Consensus Network 採用端對端可訓練架構，透過半區域約束與弱監督策略，強化影像間的密集對應能力 (Rocco *et al.*, 2018)。Deep-Image-Matching 為一開源工具箱，整合傳統與深度學習方法，針對高解析度多視角影像匹配提供不同的匹配方案 (Morelli *et al.*, 2024)。綜合上述技術的發展，導入深度學習技術可提升了影像匹配在多樣化場景下的精度與表現。

1.3 研究目的

本研究之目的為探討深度特徵在多視角車載影像匹配的應用，由於車載相機常使用較廣角的相機，影像間有較大的變形，因此，本研究選擇基於深度學習的影像匹配技術，通過深度學習預訓練模

型提取的深度特徵。影像的深度特徵為 CNN 演算法經大量複雜資料集 (MS COCO 1K) 訓練而來，其含有 100 多萬張影像 1000 個類別，在訓練過程中會自行學習最佳影像特徵萃取卷積核，對於不同光線和視角的變化擁有更強的泛化能力，因此可提高多視角車載影像匹配成功率及可靠性。由於車載前視相機的影像中，道路兩側的交通標誌會出現在靠近影像邊緣的兩側區域內，該區域通常有比較大的畸變，SIFT 的尺度不變特性不易吸收畸變造成的差異。又者本研究鎖定路側的交通標誌為匹配目標，影像尺寸約為 500×500 像素以內，SIFT 演算法在交通標誌的小影像匹配是可行的 (Ren *et al.*, 2009)，以深度特徵進行影像匹配大多數研究著重於整幅完整影像匹配，而非針對物件框選後局部影像間之匹配，應進一步實做驗證此方法的效益。

2. 研究資料

本研究實驗範圍位於宜蘭縣羅東鎮北城橋，測區道路長度約為 750 m。研究中使用三台 GoPro11 相機立多視角車載影像 (車頭三相機)，左右相機基線長度約 0.88 m，取樣資料格式為 5K 畫質的影片，5K 影片像幅大小為 5312×2988 pixels，取樣頻率每秒 29.97 幅，後處理以車載軌跡間隔 1 m 為相片取樣間距，每台相機取得 1479 張相片，三台相機共取得 4437 張相片，多視角影像間具有高重疊率，有利後續方位求解作業，三重疊之相片如圖 1 所示。

收集車載往返軌跡長度約為 1.5 km，資料獲取時，同時使用 eGNSS 記錄汽車載體的軌跡，以軌跡提供相機初始值進行方位求解 (Teo, 2015)，每間隔 200 m 至少佈設 1 個控制點，測試區共佈設 9 個控制點及 3 個檢核點，檢核點的平面及高程之均方根誤差分別 0.514 m 及 0.195 m，可滿足公尺(m) 等級的定位要求，解算後的相機位置、控制點及檢核點如圖 2 所示。



(a) 左側相機



(b) 右側相機

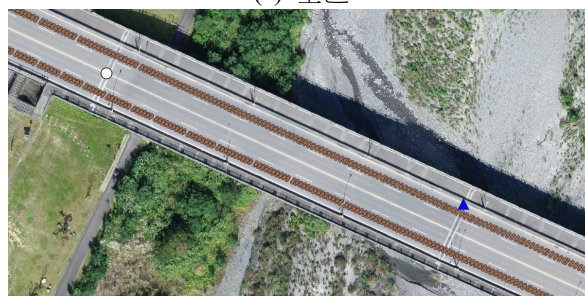


(c) 中間相機

圖 1 三重疊相片展示



(a) 全區



(b) 局部放大

圖 2 研究區域：相機位置 (紅色圓形)、控制點 (三角形) 及檢核點 (白色圓形)

3. 研究方法

本研究深度特徵影像匹配方法採用 Deep Feature Matching (DFM) (Efe *et al.*, 2021) 演算法，取得立體像對之間的共軛點後，接著，使用影像的內、外方位參數及共軛點坐標進行空間前方交會，以獲得影像點對應的三維坐標。

3.1 萃取深度特徵

由於行車影像採用的 GoPro 相機具有較大的畸變，影像存在較大的畸變差，使用傳統影像特徵萃取及匹配方式可能會造成匹配錯誤。因此本研究使用基於深度學習的影像匹配 DFM 技術，以提高匹配的準確性和可靠性。輸入兩張影像分別做為目標影像與待匹配影像，經過 DFM 演算法計算並後處理，得到兩張影像的共軛點影像座標。

DFM (Efe *et al.*, 2021) 演算法使用 VGG19 (Simonyan & Zisserman, 2014) 預訓練模型，VGG19 是一種深度卷積神經網路 (Very Deep Convolutional Networks)，該模型使用 ImageNet 訓練資料集訓練而得，含有 1.44 億個參數，VGG19 的可訓練層 (卷積層和全連接層) 總數為 19 層，經由多個卷積層的堆疊使網路能夠學習到更豐富的影像特徵，因此 VGG19 的卷積層可作為其他深度學習或影像處理的特徵萃取器。由於 VGG19 已從 ImageNet 1400 萬張影像學習影像特徵萃取，故 DFM 直接採用 VGG19 預訓練模型萃取影像深度特徵，優點是不需要對輸入影像進行訓練，同時，VGG19 架構可萃取不同尺度下的影像特徵，以利由粗到細 (Coarse-to-fine) 的影像匹配架構。

3.2 深度特徵匹配

在萃取出深度特徵後，DFM 演算法使用 DNNS (Dense Nearest Neighbor Search) 進行特徵匹配，DNNS 在目標影像及待匹配影像的特徵圖中，以相互最近鄰搜尋法進行特徵匹配，透過計算向量之間的 L2-norm 歐幾里得距離 (Euclidean distance) 來衡量相似性，若兩特徵圖中的某一對匹配點滿足給定的 L2-norm 距離門檻且為雙向滿足條件，則視為

成功匹配。

由於僅依賴最近鄰可能會導致錯誤匹配，為了提高匹配的準確性，進一步同時使用比率檢測 (ratio test) (Lowe, 2004) 篩選匹配對。比率檢測的步驟如下：

- (1) 對於目標影像中的每個深度特徵，找到待匹配影像中最近的鄰近(d_1)和次近的鄰近(d_2)距離。
- (2) 檢查(d_1/d_2)是否小於設定的門檻值 t (例如 $t=0.75$)。
- (3) 只有當(d_1/d_2) 小於該閾值時，才認為匹配是可靠的。

由於匹配的點中仍可能包含錯誤點(Outliers)，需要進一步使用隨機採樣一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 過濾錯誤點，研究中以 Homography matrix 建立初始共軛點間的轉換，通過隨機選取一部分匹配點，估計這個轉換矩陣；再檢查其餘的匹配點是否滿足該轉換矩陣，計算殘差；若殘差大於門檻值 (如 3 pixels)，不符合轉換的點被視為錯誤點，經由迭代計算統計可能的錯誤點，以找到最優解。

3.3 兩階段匹配策略

DFM 為兩階段式 (Stage-0 及 Stage-1) 深度學習式匹配技術，此架構中先以 VGG19 預訓練模型萃取不同尺度的影像深度特徵，再以由粗到細 (Coarse-to-Fine) 策略進行精密影像匹配。在第一階段 (Stage-0) 中，首先會進行一次深度特徵萃取，然後以 DNNS 進行特徵匹配。匹配結果將用於粗略估計待匹配影像及目標影像間的幾何轉換，如此可將待匹配影像進行初步幾何轉換，以提高兩張輸入影像的相似度，以利後續精密匹配，如圖 3 所示。

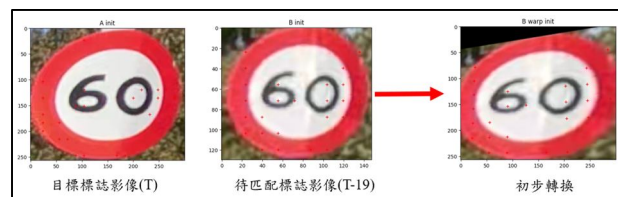


圖 3 Stage-0 初步匹配轉換

在第二階段 (Stage-1) 中，模型將分別萃取四個不同尺度 (Levels 3,2,1,0) 的深度特徵 (圖 4) 的深度特徵圖 (Dense Feature Maps)，並由粗至細逐層進行 DNNS 匹配，由粗至細縮小搜尋範圍，精化匹配成果。四個尺度下的匹配成果如圖 5 所示，從 Level 3 至 Level 0 的匹配成果可以發現，隨著階層的提升匹配的數量減少，但其精密度較佳。

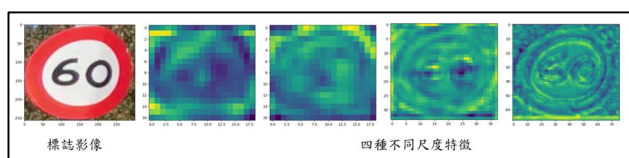


圖 4 Stage-1 初步匹配轉換

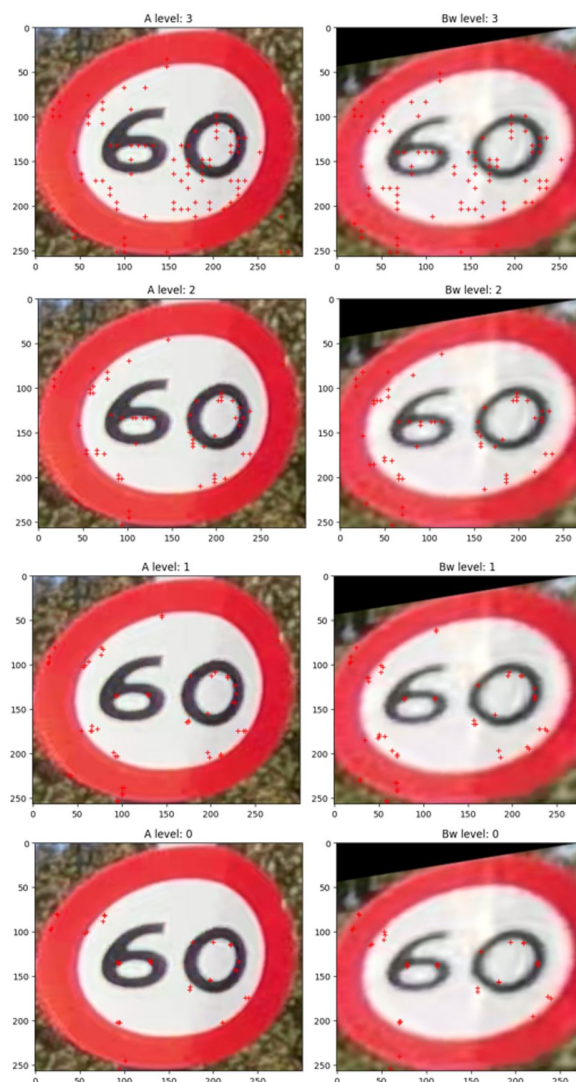
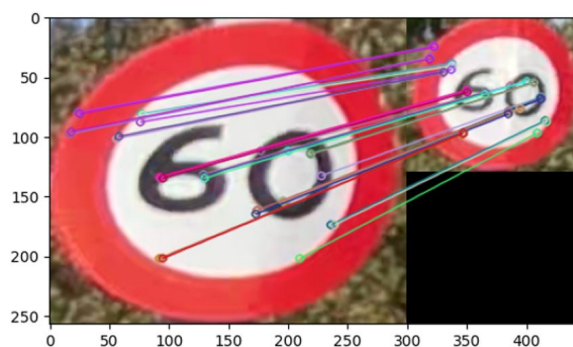
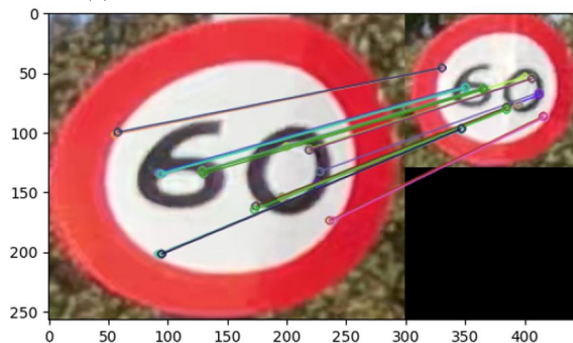


圖 5 由上到下展示四種尺度下特徵匹配成果，左圖為匹配目標影像，右圖為待匹配影像經過 Stage-0 初步轉換後的影像，紅點為兩幅影像的匹配點位置

最後，在完成 DFM 匹配完成後，再利用隨機抽樣一致 (Random Sample Consensus, RANSAC) 演算法，以幾何約制過濾錯誤匹配點。整合四種尺度下的匹配成果後，可得到圖 6(a) 的匹配，此時的匹配多數正確，但為了進一步提高精確度，使用 RANSAC 進行過濾幾何一致性較差的點位，成果如圖 6(b) 所示。



(a) 幾何約制前共有 33 組匹配成功圖



(b) 幾何約制後共有 22 組匹配成功圖
圖 6 比較 RANSAC 過濾錯誤匹配點

4. 實驗成果

本研究應用深度特徵於多視角車載影像匹配作業，實驗分析包含兩個部份，第一部份比較 DFM 深度特徵與 SIFT、SURF、ORB 特徵於影像匹配的表現；第二部份則針對研究區域的交通標誌進行匹配及定位，以標誌的定位成功率及誤差進行分析。

4.1 匹配方法比較

為了探討深度特徵影像匹配的成效，本研究設計三種多視角車載影像差異情境以比較 DFM、SIFT、SURF 及 ORB 方法在不同影像條件下的匹配效能。為了確保模型匹配對比的一致性，四種方法的匹配

參數和幾何約制參數均設置相同，唯影像匹配的特徵不同。影像匹配結果應用於建立六參數轉換，再用於產生套合影像。為了量化評估影像匹配的精度，採用人工量測的真實共軛點分析六參數轉換的精度。這三種影像差異情境如下：

Case 1 (Scale)：影像間存在覆蓋縮放差異，不同影像之間的覆蓋縮放比例差異對影像匹配的對應能力進行分析。

Case 2 (Distortion)：影像間存在形變差異，分析當影像在形變時的匹配效果。

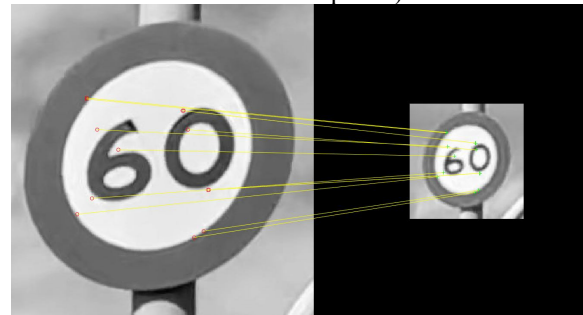
Case 3 (Occlusion)：影像間存在部分遮蔽，分析在一張影像被遮蔽一部分的情境下，不同匹配能力的表現。

Case 1 尺度差異的影像匹配成果比較如圖 7 所示，影像 1 的空間解析度較高，而影像 2 的空間解析度僅有影像 1 的 1/3，故實驗中兩張輸入影像的尺度差異大約 3 倍。圖 7(c) 是使用 DFM 深度特徵的匹配成果，使用 DFM 的匹配點對影像 2 進行幾何校正得到套合後影像，將影像 1 及套合影像 2 疊合並分別使用紅綠波段進行展示，圖 7(g) 呈現以深度特徵進行匹配的影像套合成果具有高一致性。SIFT、SURF 及 ORB 的影像匹配成果如圖 7(d)~(f) 所示。與 DFM 影像匹配成果相比，DFM 的匹配成功點數較 SIFT 及 SURF 多。SIFT、SURF 及 ORB 幾何校正之套合後影像如圖 7(h)~(j) 所示，四種特徵匹方法都能克服尺度的差異，但由於 DFM 的匹配成功的可靠點數較多，有較多可靠的套合點可應用在建立轉換參數，故 DFM 呈現的匹配及套合成果較其他三種方法佳。

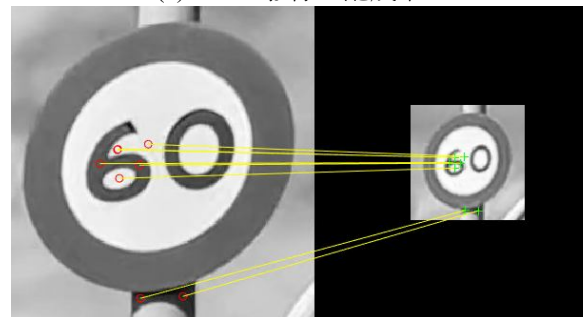
Case 1 尺度差異的影像匹配量化成果整理如表 1 所示，使用匹配點的六參數轉換均方根誤差在 1.1 pixels 左右，使用人工量測 5 個共軛點進行精度評估，DFM 的均方根誤差較低，代表精度略高於 SIFT 演算法。比較 DFM 及 SURF、ORB 的精度，SURF 及 ORB 檢核點的均方根誤差在 6.4~6.6 pixels，在尺度差異的情況下，SURF 及 ORB 有較佳的表現，表示在尺度差異的情況下，四種方法有良好的表現。



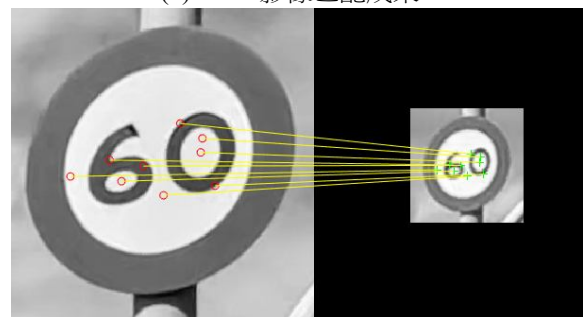
(a) 影像1 (ID 3876FR2, 300×289 pixels) (b) 影像 2 (ID 3833MLA, 109×108 pixels)



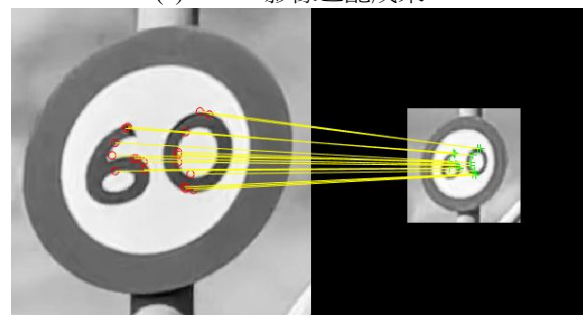
(c) DFM 影像匹配成果



(d) SIFT 影像匹配成果



(e) SURF 影像匹配成果



(f) ORB 影像匹配成果

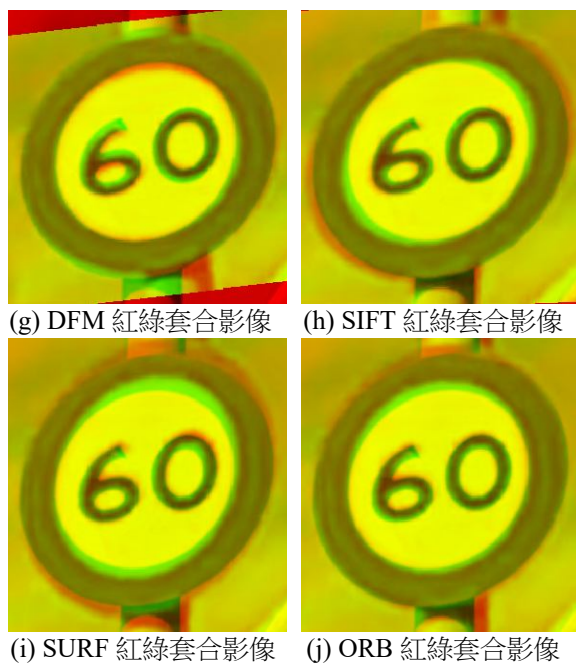


圖 7 不同匹配方法之比較 (Case 1)

表 1 精度評估比較

		DFM	SIFT	SURF	ORB
Case1 尺度 差異	匹配成功點	10	7	9	19
	匹配點 MeanError(pixel)	1.041	1.022	2.366	2.216
	匹配點 RMSE(pixel)	1.127	1.104	2.624	2.878
	人工檢核點	5	5	5	5
	檢核點 MeanError(pixel)	6.691	7.660	5.724	5.573
	檢核點 RMSE(pixel)	7.620	8.116	6.695	6.475
Case2 形變 差異	匹配成功點	281	9	6	12
	匹配點 MeanError(pixel)	3.333	1.743	0.578	0.609
	匹配點 RMSE(pixel)	3.992	2.005	0.684	0.676
	人工檢核點	5	5	5	5
	檢核點 MeanError(pixel)	2.231	3.488	2.312	3.556
	檢核點 RMSE(pixel)	2.392	3.882	2.655	4.563
Case3 遮蔽 差異	匹配成功點	67	5	13	8
	匹配點 MeanError(pixel)	4.338	1.693	3.916	0.834
	匹配點 RMSE(pixel)	4.885	2.370	4.643	0.958
	人工檢核點	4	4	4	4
	檢核點 MeanError(pixel)	5.304	9.163	3.344	2.632
	檢核點 RMSE(pixel)	5.919	11.249	4.120	2.942

Case 2 形變差異的影像匹配成果比較如圖 8 所示，此形變主要是由影像視角及畸變差造成，影像內容為一圓形交通標誌，影像 1 的形變較低仍呈現圓形，而影像 2 中的圓形變形為橢圓形，故實驗中

兩張輸入影像存在相對較大的形變。圖 8(c)~(f)分別是四種方法的匹配成果，實驗結果顯示，DFM 提取的深度特徵能成功匹配形變差異較大的影像，而其他三種方法萃取的特徵在匹配的成效較差，DFM 匹配成功的點數遠多於其他三種方法。四種方法個別進行幾何轉換，得到的套合影像如圖 8(g)~(j) 所示，DFM 則能達成較佳的成果，其他三種方法之套合影像的偏差量明顯較大。經由此實驗可知，雖然其他三種方法能應對尺度差異，但在面對形變差異時具有局限性。針對車載廣角影像的交通標誌的局部特性，使用深度特徵可得到更佳的匹配成果。

Case 2 形變差異的影像匹配量化成果整理如表 1 所示，此案例，DFM 的匹配成功點數達高於其他三種方法，有利於前方交會產生三維點雲，使用匹配點的六參數轉換均方根誤差在 4 pixels 左右；SURF 及 ORF 的匹配點均方根誤差小於 1 pixel，代表匹配成果分佈較為集中，不利後續套合轉換。使用人工量測 5 的個共軛點進分精度評估，DFM 的均方根誤差約為 2.4 pixels，較其他方法有更佳的幾何轉換精度，表示 DFM 的量化精度較佳。

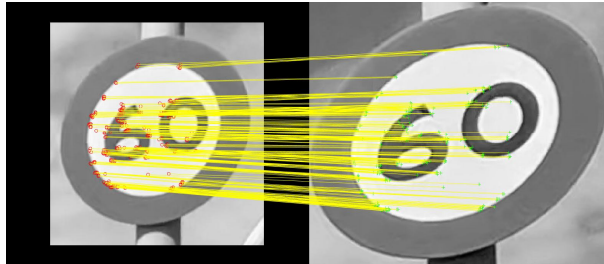
Case 3 使用具有部份遮蔽的影像對進行匹配，成果比較如圖 9 所示，影像 1 呈現一完整的圓形交通標誌，而影像 2 中的交通標誌有一半被切除，完整性較低。圖 9(c)~(f)是四種方法的匹配成果，此實驗成果顯示，DFM 深度特徵在完整性較低的情況下仍能達成成功匹配，而其他方法萃取的特徵在匹配的成效較差，DFM 匹配成功的點數遠多於其他方法。可能的原因是 SIFT 需要計算影像金字塔的 DoG，在影像維度較小時，鄰近邊界區域的特徵較少，故無法匹配。四種方法個別進行幾何轉換，得到的套合影像如圖 9(h)~(j)所示，DFM 則能達成較佳的成果，其他方法受套合點數數量之影響，套合影像有明顯偏差。經由此實驗可知，匹配目標完整性較低的區域，深度特徵有更好的匹配表現。

Case 3 形變差異的影像匹配量化成果整理如表 1 所示，此案例中，DFM 的匹配成功點數比較多，基於匹配點的六參數轉換，均方根誤差約為 4 pixels 左右，使用人工量測 4 的個共軛點進分精度評估，DFM 的均方根誤差約為 5.9 pixels，而 SIFT

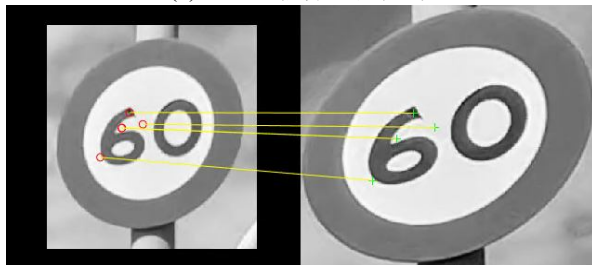
均方根誤差為 11 pixels 較大，表示 DFM 的量化精度較 SIFT 佳。SURF 及 ORB 有較低的均方根誤差，主要原因是人工可量測的 4 個共軛點是坐落在交通標誌的數字 6 的角點上，SURF 及 ORB 僅有成功匹配到數字 6 的匹配點，故轉換誤差較小，但套合影像成果有明顯偏差。



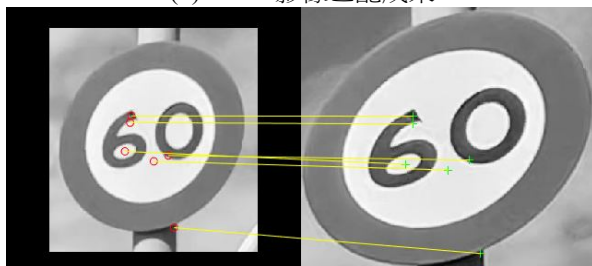
(a) 影像1 (ID 3876FR2, 300x289 pixels) (b) 影像2 (ID 3879MLA, 357x411 pixels)



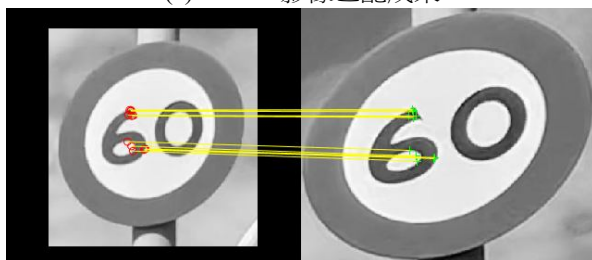
(c) DFM 影像匹配成果



(d) SIFT 影像匹配成果



(e) SURF 影像匹配成果



(f) ORB 影像匹配成果



(g) DFM 紅綠套合影像



(h) SIFT 紅綠套合影像



(i) SURF 紅綠套合影像



(j) ORB 紅綠套合影像

圖 8 不同匹配方法之比較 (Case 2)

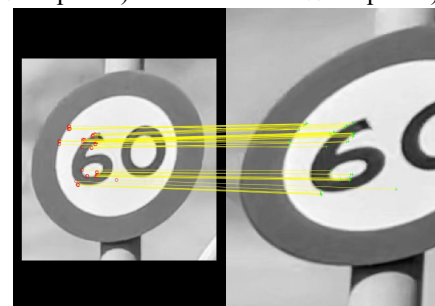
此三組案例中使用 SIFT、SURF、ORB 尋找到的匹配共軛點數量與 DFM 相比差距甚大並且有分佈不均勻的現象。在影像匹配任務中若只是需要判定兩張影像存在同一物件，四種演算法都能做到；若是利用匹配共軛點進行幾何轉換甚至進行前方交會定位則會須要考慮點位分佈與數量，DFM 使用深度特徵進行匹配具有優勢。



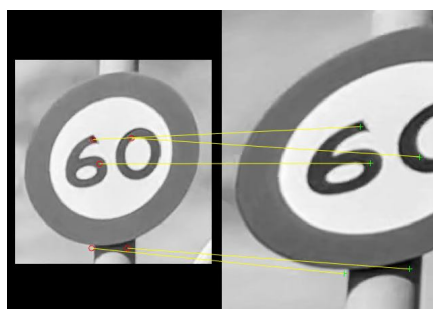
(a) 影像1 (ID 3876FR2, 300x289 pixels)



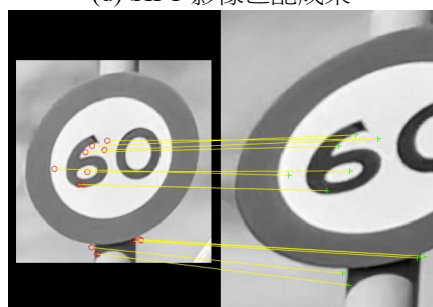
(b) 影像2 (ID 3876FL1, 453x318 pixels)



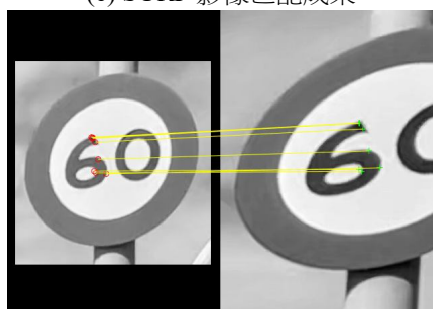
(c) DFM 影像匹配成果



(d) SIFT 影像匹配成果



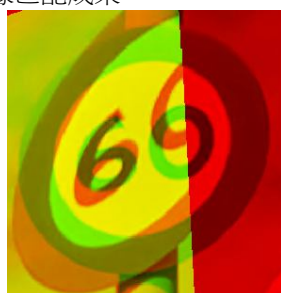
(e) SURF 影像匹配成果



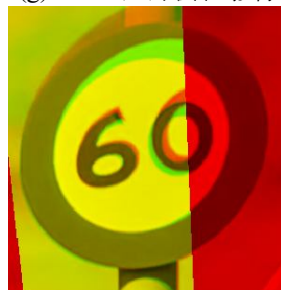
(f) ORB 影像匹配成果



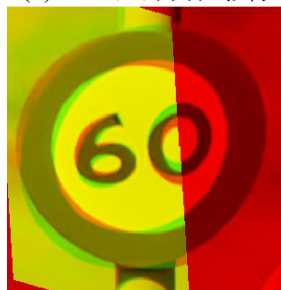
(g) DFM 紅綠套合影像



(h) SIFT 紅綠套合影像



(i) SURF 紅綠套合影像



(j) ORB 紅綠套合影像

圖 9 不同匹配方法之比較 (Case 3)

4.2 定位成果分析

使用車載多視角影像進行交通標誌的挑戰是

多視角影像的短基線僅有 0.88 m，影像匹配的誤差，加上短基線會造成三維定位在軌跡行徑方向有弱交會幾何的問題，需要仰賴大量的影像重複觀測交通標誌，經由統計分析得到交通標誌的位置，因此可經由交通標誌定位分析影像匹配之效益。

本項實驗鎖定交通標誌進行定位分析，研究中使用 Mapillary Vistas Dataset (Neuhof *et al.*, 2017) 交通標誌資料集訓練完成之 YoLo v4 深度學習模型 (Wang *et al.*, 2020) 進行交通標誌偵測 (Chen & Teo, 2019)，僅針對交通標誌區域進行深度特徵的匹配，取得共軛點後，配合影像內外方位參數進行前方交會取得物空間三維坐標點雲，最後以 DBScan 對物空間相鄰的點雲進行聚類分析，以聚類成果的中心點代表交通標誌三維坐標位置。

精度分析使用的參考資料為人工量測地面光達點雲的交通標誌坐標，此路段人工量測得到 26 個可視的交通標誌。交通標誌匹配及定位共得到 72 個交通標誌位置，由於匹配及前方交會帶有誤差，造成真實世界的一個交通標誌可能被重複定位，因此匹配及定位的交通標誌數量會比人工量測的數量多。

精度分析以地真資料為基準，以地真位置為圓心，半徑 1 m 內是否有成功被偵測的點位，圖 10(a) 套疊人工量測交通標誌位置及自動化定位點，其中，白色是人工量測點，綠色是偵測及定位正確，紅色是定位錯誤。圖 10(b) 局部放大以說明重複定位的問題，左側一個標誌(白色)被重複定位兩次(綠點)。實驗顯示，在 1 m 範圍內有成功偵測資料的點數量為 49 點，顯示使用車載影像進行標誌定位成功率約 68% ($=49/72$)；其餘 23 個點中，有 17 點為錯誤偵測及 6 點為錯誤定位，錯誤偵測是指所得到的定位點屬是條紋色護欄或三角錐，而錯誤定位是指有偵測成功，但影像匹配及交會之標誌定位失敗。

最後針對正確定位的點位進行定位誤差分析，統計這 49 個點與人工量測點的誤差，得到距離平均誤差為 0.395 m，顯示正確偵測與定位的點位可達到 0.5 m 內的定位精度。圖 11 展示交通標誌定位案例，影像匹配與定位的點雲與地面光達點雲具有高的一致性；圖 12 展示兩個錯誤案例，分別是紋色

護欄及三角錐被錯誤偵測為交通標誌。



(a) 全區



(b) 局部放大：重複定位

圖 10 比較人工數化及自動化定位點位：人工數化點（白色圓形）、正確定位（綠色圓形）、錯誤定位點（紅色圓形）

5. 結論與未來工作

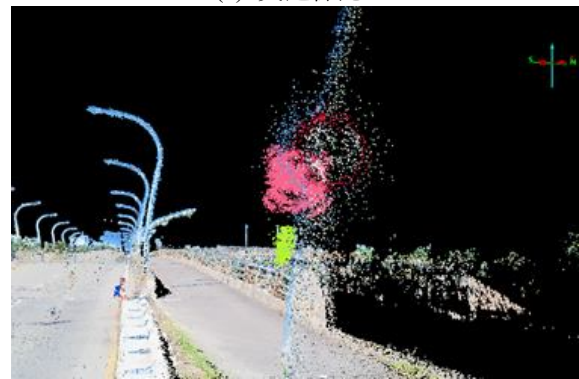
本研究採用卷積神經網路 (CNN) 的預訓練模型來提取深度特徵，並利用這些特徵進行影像匹配。有別於傳統影像匹配採用人工設計的 *handcrafted features* 進行匹配作業，深度學習採用卷積神經網路自行萃取深度特徵，這些深度特徵具有更好的泛用性，能有效應對立體影像間的尺度和形變差異，達成可靠的影像匹配。

研究中針對多視角車載影像進行實驗分析，由於車載廣角影像有較大的形變，採用深度特徵進行匹配可獲取物空間三維點雲，以達成物空間三維定位之目的。實驗中分別針對交通標誌的尺度差異、形變差異及完整性進行比較分析，實驗證明，與傳統演算法相比，DFM 演算法具有更多的成功匹配

點。此外，並針對橋樑路段之三重疊影像進行交通標誌定位，交通標誌定位成功率可接近 70%，且成功定位點之絕對誤差小於 0.5 m。



(a) 交通標誌



(b) 影像定位成果套疊光達點雲
圖 11 交通標誌定位成功偵測案例



(a) 錯誤偵測（條紋上色護欄）



(b) 錯誤偵測（三角錐）

圖 12 交通標誌偵測錯誤

未來研究將進一步探索影像特徵的選擇，探索適合特定場景的多尺度深度特徵提取方法，並優化匹配策略以進一步提高匹配成功率。此外，考慮在匹配過程中使用對比學習 (Contrastive Learning) 和強化學習 (Reinforcement Learning) 技術，以自動優化匹配過程中的關鍵參數，減少手動調參的成本，並進一步提升影像匹配的效率和準確性。為精進交通標誌的偵測及定位，在影像匹配過程中融入交通標誌類別屬性，以提升交通標誌定位的成功率及精度。

參考文獻

- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., and Van Gool, L., 2008. Speeded-up robust features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3): 346-359, DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014.
- Bökman, G., and Kahl, F., 2022. A case for using rotation invariant features in state of the art feature matchers, in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, New Orleans, LA, USA, pp.5110–5119, DOI: 10.1109/CVPRW56347.2022.00559.
- Chen, P.C., and Teo, T.A., 2019. Mapping traffic signboards from mobile mapping systems using a deep learning approach, in *Proceedings of the 40th Asian Conference on Remote Sensing*, October 14–18, Daejeon, Korea.
- DeTone, D., Malisiewicz, T., and Rabinovich, A., 2018. Superpoint: Self-supervised interest point detection and description, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Salt Lake City, UT, USA, pp.337-349, DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00060.
- Dusmanu, M., Rocco, I., Pajdla, T., Pollefeys, M., Sivic, J., Torii, A., and Sattler, T., 2019. D2-net: A trainable cnn for joint description and detection of local features, in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Long Beach, CA, USA, pp.8084-8093, DOI: 10.1109/CVPR.2019.00828.
- Efe, U., Ince, K.G., and Alatan, A., 2021. DFM: A performance baseline for deep feature matching, in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Nashville, TN, USA, 4279–4288, DOI: 10.1109/CVPRW53098.2021.00484.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, pp.770–778, DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
- Hughes, L.H., Schmitt, M., Mou, L., Wang, Y., and Zhu, X.X., 2018. Identifying corresponding patches in SAR and optical images with a pseudo-siamese CNN, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(5): 784–788, DOI: 10.1109/LGRS.2018.2799232.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- Melekhov, I., Kannala, J., and Rahtu, E., 2016. Siamese network features for image matching, in *Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Cancun, Mexico, pp.378–383, IEEE, DOI: 10.1109/ICPR.2016.7899663.
- Merkle, N., Auer, S., Mueller, R., and Reinartz, P., 2018. Exploring the potential of conditional adversarial networks for optical and SAR image matching, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6) : 1811-1820, DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2803212.

- Morelli, L., Ioli, F., Maiwald, F., Mazzacca, G., Menna, F., and Remondino, F., 2024. Deep-image-matching: A toolbox for multiview image matching of complex scenarios, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48(2/W4): 309–316, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-309-2024.
- Neuhof, G., Ollmann, T., Rota Buló, S., and Kotschieder, P., 2017. The Mapillary vistas dataset for semantic understanding of street scenes, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, Italy, pp.5000–5009, DOI: 10.1109/ICCV.2017.534.
- Ren, F., Huang, J., Jiang, R., and Klette, R., 2009. General traffic sign recognition by feature matching, in *Proceedings of the 24th International Conference Image and Vision Computing New Zealand*, Wellington, New Zealand, pp. 409–414, DOI: 10.1109/IVCNZ.2009.5378370.
- Rocco, I., Cimpoi, M., Arandjelović, R., Torii, A., Pajdla, T., and Sivic, J., 2018. Neighbourhood consensus networks, in *Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'18)*, Montréal Canada, Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, pp.1658–1669.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., and Bradski, G., 2011. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Barcelona, Spain, pp.2564–2571, DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
- Simonyan, K., and Zisserman, A., 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
- Sun, J., Shen, Z., Wang, Y., Bao, H., and Zhou, X., 2021. LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers, in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, TN, USA, pp.8918–8927, DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00881.
- Teo, T.A., 2015. Video-based point cloud generation using multiple action cameras, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(4/W5): 55–60, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-55-2015.
- Wang, C.Y., Bochkovskiy, A., and Liao, H.Y.M., 2020. Scaled-YOLOv4: Scaling cross-stage partial network, *arXiv Preprint, arXiv:2011.08036*, DOI: 10.48550/arXiv.2011.08036.
- Xu, S., Chen, S., Xu, R., Wang, C., Lu, P., and Guo, L., 2024. Local feature matching using deep learning: A survey, *Information Fusion*, 107: 102344, DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102344.
- Ye, Y., Tang, T., Zhu, B., Yang, C., Li, B., and Hao, S., 2022. A multiscale framework with unsupervised learning for remote sensing image registration, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5622215, DOI: 10.1109/TGRS.2022.3167644.
- Zagoruyko, S., and Komodakis, N., 2015. Learning to compare image patches via convolutional neural networks, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, MA, USA, pp.4353–4361, DOI: 10.1109/CVPR.2015.7299064.
- Zitová, B., and Flusser, J., 2003. Image registration methods: A survey, *Image and Vision Computing*, 21(11): 977–1000, DOI: 10.1016/S0262-8856(03)00137-9.

Deep Feature Matching for Multi-View Images in Mobile Mapping Systems

Tee-Ann Teo^{1*} Pei-Cheng Chen² Ting-Ni Chen³ Hsuan Yang⁴
Zhan-Qing Lin⁴ Kuan-Yi Lee⁴ Kai-Chieh Hung⁴ Chen-Yung Lu⁴

Abstract

With the advancement of mobile mapping technology, multi-view imagery has become an important source for road observation. However, traditional matching methods struggle to overcome the challenges posed by distortions and variations in viewing angles between images. To enhance the precision and reliability of image matching, this study investigates a deep feature matching technique based on deep learning. By utilizing convolutional neural networks (CNN) to extract deep features, accurate matching and 3D spatial positioning of multi-view images can be achieved. The study employs Deep Feature Matching (DFM) technology, which is based on the pre-trained VGG19 model. Through a two-stage matching strategy and the RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm, erroneous matching points are filtered out to ensure the reliability of the matching results. The experimental data consists of multi-view images, with traffic signs serving as the target objects for image matching and positioning. The research results reveal that, compared with the traditional SIFT method, DFM demonstrates a higher success rate and improved positioning accuracy in various image scenarios, including scale differences, shape distortions, and occlusion conditions. Notably, DFM achieves significantly more matching points than SIFT in distortion and occlusion scenarios. Furthermore, the analysis of traffic sign positioning indicates that the success rate of traffic sign positioning reaches 70%, with an average error of less than 0.5 m for successfully located points. This finding highlights the practical application potential of DFM in 3D positioning using multi-view images in complex scenarios and confirms that it achieves higher success rates and accuracy.

Keywords: Deep Learning, Deep Features, Image Matching, Multi-View Images, Traffic Signboard

¹ Professor, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University Received Date: Jan. 10, 2025

² Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University Revised Date: Apr. 23, 2025

³ Master Student, Department of Civil Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University Accepted Date: May 09, 2025

⁴ Engineer, Department of Geomatics, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

* Corresponding Author, E-mail: tateo@nycu.edu.tw

PSInSAR 技術監測臺灣乾旱與地層下陷相關性之研究

張耘僑¹ 曾國欣^{2*} 戴于恒³

摘要

臺灣西部平原長期依賴地下水，加上氣候變遷造成的降雨不均與乾旱，易引發地層下陷。2021 與 2023 年嚴重乾旱更使沉陷情形加劇。本研究運用永久散射體干涉合成孔徑雷達技術(PSInSAR)，分析 2019-2023 年 Sentinel-1 影像，並結合降雨資料，探討乾旱對下陷速率的影響。結果顯示，乾旱期降水量大幅減少，與沉陷速率高度相關，最嚴重地區乾季下陷速率達 7.8 cm/year。為驗證結果，引入 GNSS 站點進行多重參考點克利金內插校正，並以獨立站比對，相關係數達 0.98；另與水利署公告之顯著下陷面積比較，差異約 $\pm 10\%$ 。顯示 PSInSAR 在監測細部地表形變具良好精度與穩定性，未來可作為水資源管理及地層下陷防治之重要依據。

關鍵詞：永久散射體干涉合成孔徑雷達差分干涉、地層下陷、降水

1. 前言

1.1 研究動機及目的

地層下陷是全球多國面臨的重要課題，例如美國加州聖華金谷(San Joaquin Valley)、伊朗德黑蘭西南部平原、越南湄公河流域、墨西哥 Aguascalientes 谷地及印尼雅加達等地區皆有相關案例(Mahmoudpour *et al.*, 2016、Minderhoud *et al.*, 2017、Cigna & Tapete, 2021、Tzampoglou *et al.*, 2023)。在臺灣，地層下陷現象同樣廣泛存在，尤以雲林、嘉義及屏東地區最為顯著。主要成因來自於人為活動，其中過度抽取地下水是最關鍵的因素，造成含水層之水壓降低，在支撐力不足的情況下導致結構鬆動與壓密現象。為了減緩地層下陷問題，我國政府自民國 84 年(1995 年)起，陸續推動第一期(1995 – 2000)與第二期地層下陷防治執行方案(2001 – 2008)，針對宜蘭、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄及屏東等地區進行管理，對於減少全臺顯著下陷面積已頗具成效。隨後於民國 109 年(2020 年)推動第三期地下水保育管理暨地層下陷防治計畫(2021 – 2024)，進

一步整合地下水保育、監測預警、抽水管理與地下水補注等策略，以持續減緩地層下陷並防止海水入侵(節錄自水利署 2023 年統計書刊)。

然而在 2021 年初，臺灣西半部經歷了自 1947 年以來最嚴重的乾旱，此一「百年大旱」事件導致停耕面積與比例達近十年來最高(表 1)。此次乾旱與 2020 年梅雨季及颱風季降雨量異常偏低及短促有關，造成水庫蓄水量大幅下降，水資源供應面臨嚴峻挑戰。由於缺水情形嚴重，需水量大的西南部地區更加依賴地下水，使地層下陷控制難度顯著提高，政府原訂每年 3 cm 的沉陷速率控制目標亦面臨挑戰。此外，在 2023 年世界各地多處遭逢數十年來最嚴重的乾旱與氣溫異常上升，導致水資源缺乏至歷史新低(WMO, 2023)，同年在臺灣也有觀測到降雨異常，而呈現地層下陷幅度增加的情形。

為探討這兩次乾旱事件對地層下陷的潛在影響，本研究以雲林縣作為研究區域，在縣境內有為數不少的穩定結構體(如建物及農舍)，提供了適合雷達衛星觀測應用的條件，以進行長期地表變形監測。因此，本研究聚焦於乾旱前後地表變形的時空變化，量化 2019 – 2023 年乾旱期間降雨量與地層

¹ 國立中央大學土木工程學系 碩士生

² 國立中央大學土木工程學系 教授

³ 國立中央大學太空及遙測研究中心 助理工程師

* 通訊作者, E-mail: khtseng@csrsr.ncu.edu.tw

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 04 月 14 日

接受日期：民國 114 年 09 月 22 日

下陷的關係，並分析地表變形空間分布與速率變化。透過合成孔徑雷達衛星(Synthetic Aperture Radar, SAR)的永久散射體(Persistent Scatterer)差分干涉技術(Interferometry)(合稱 PSInSAR)，結合時序數據與地層下陷之關聯性進行探討，期望為未來的水資源管理、地下水使用策略及土地利用規劃提供科學依據，並減少地層下陷對環境與基礎設施的長期衝擊。

1.2 文獻回顧

臺灣西南部廊道以雲林面臨最嚴重的地層下陷問題 (Tung & Hu, 2012、Hsu *et al.*, 2015、Huang *et al.*, 2016、Ku & Liu, 2023)，尤其在民國 91 年地下水管制辦法發布前，該地區的下陷速率曾高達每年 10 cm (圖 1)。近年根據經濟部水利署公布的數據，雲林最嚴重的區域仍達到每年 6 至 7 cm，且多集中於元長鄉、土庫鎮與虎尾鎮等地區。前人研究亦指出，地層下陷與乾季期間的第一期稻作密切相關。由於秋冬降雨稀少，隔年初農民需大量抽取地下水以灌溉稻田，導致地層下陷進一步加劇 (Yang *et al.*, 2019、Chen *et al.*, 2023)。過去在全國尺度上，已有多項研究試圖統整臺灣地區的地層下陷分布特性，例如 Ching *et al.* (2011) 利用全臺水準測量與全球衛星導航系統 (GNSS) 連續站資料，推估 2000 至 2008 年間的垂直變形速率，並將其與區域造山運動及地下水變化趨勢進行連結。

以 InSAR 技術進行地表變形監測與分析逐漸受到廣泛運用，例如 Franklin & Huang (2022) 結合 InSAR 與 GNSS 資料，更新臺灣地區的地殼應變場與垂直變形場，進一步證實多元衛星融合資料在長期地表運動監測上的應用價值。Yang *et al.* (2019) 利用 Sentinel-1A InSAR 資料，分析雲林及彰化地區的季節性變形，並指出地層下陷高峰與乾季及低降雨量密切相關。Yeh *et al.* (2025) 則發展結合 GNSS 精密定位與 InSAR 資料的新方法，以提升資料融合的準確性，加強對長期地表變形的監測效能。傳統的地表變形監測方法，如水準測量與 GNSS 雖具備高精度且可提供垂直及平面等三維變形資訊，但受限於布設密度低、人力需求高、成本昂貴、測量週期長以及無法自動大範圍更新等問題 (仝云霄等, 2024)。此外，在環境變動劇烈的地區，基準點的長期穩定性亦難以維持。隨著合成孔徑雷達干涉技術 (InSAR) 近年快速發展，地表變形監測精度已可達毫米(mm)等級，且能以高空間解析度、低成本及無需地面控制點的方式，進行大範圍且高頻率的觀測 (Yusiyanti *et al.*, 2023)。其中，永久散射體雷達差分干涉技術(PSInSAR)，相較於傳統差分干涉方法，能更有效地克服同調性不足及大氣延遲等誤差問題，並針對穩定反射點提供高精度的長期形變時序結果，非常適合應用於大範圍地層下陷監測。

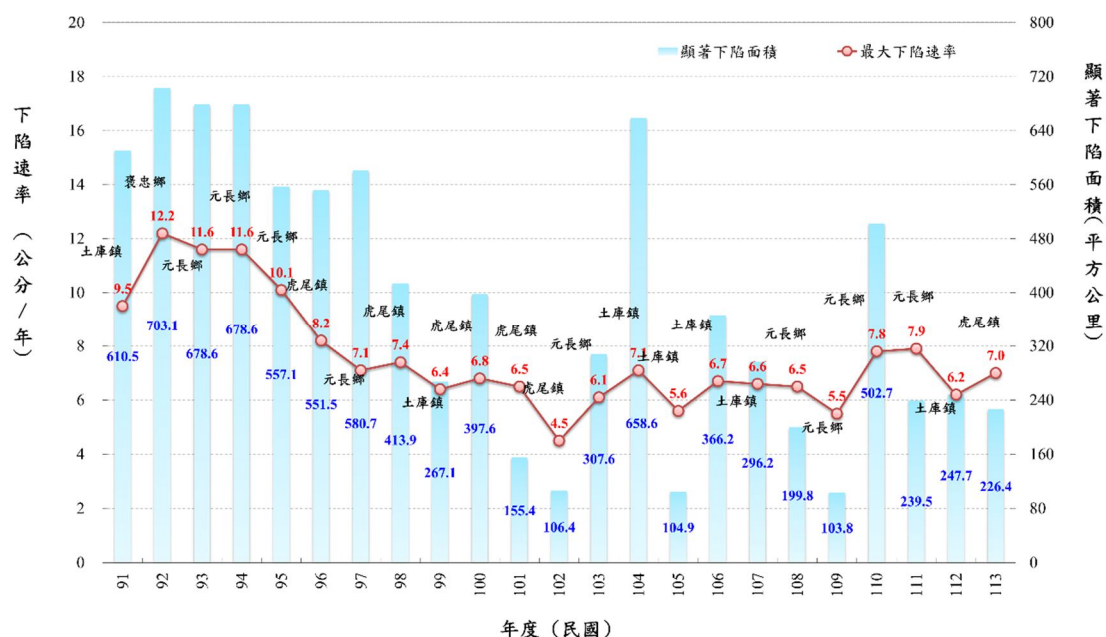


圖 1 雲林地區近年最大下陷速率 (資料來源：經濟部水利署，2025)

表 1 2014 至 2023 年全臺總計農田停灌面積 (資料來源：經濟部水利署，2025)

年分(民國/西元)	灌溉面積(公頃)	公告停灌面積 (公頃)	實際停灌面積 (公頃)	實際停灌占 灌溉面積百分比(%)
民國 103 年/2014	368,419	-	-	-
民國 104 年/2015	364,052	43,659	31,931	8.77
民國 105 年/2016	363,351	-	-	-
民國 106 年/2017	363,277	-	-	-
民國 107 年/2018	365,468	1,175	779	0.21
民國 108 年/2019	365,643	-	-	-
民國 109 年/2020	369,991	19,000	13,600	3.68
民國 110 年/2021	382,853	74,370	46,662	12.19
民國 111 年/2022	396,680	-	-	-
民國 112 年/2023	415,798	19,162	17,222	4.14

然而，目前針對乾旱事件與地層下陷之間的動態關係，相關文獻多著重於統計年均變化或特定區域下陷潛勢，較少有研究結合 PSInSAR 提供的時間序列變形結果與短期且極端的季節降雨資料進行綜合分析。因此，本研究嘗試彌補此一研究缺口，結合 2019 至 2023 年的衛星形變時序與雨量資料，探討 2021 及 2023 年乾旱事件對雲林地區地層下陷的影響，進一步建立極端氣候與地表變形之間的時空關聯性。

2. 研究資料與方法

2.1 研究資料

2.1.1 雨量資料

本研究雨量資料由交通部中央氣象署的 CODIS 平台取得(交通部中央氣象署，2025)，涵蓋的時間範圍為 2019 至 2023 年，可用於分析不同時期及年份的降雨，圖 2 綠色長條圖所標記的月份為本研究定義之乾季月份，即 12 月至隔年 5 月。這段時間為臺灣中南部縣市的乾季，降水量相對較少，此時間區間也同時是雲林地區第一期稻作的生長月份，表 2 則為各年份乾季的雨量總和，在百年大旱發生的 2021 年，其乾季雨量僅有 189 mm，大約為往年的三分之一，其次在 2023 的另一波乾旱事件，其降雨量約為往年的六成，故後續將討論這兩次事件相較於常年雨量所造成地表沉陷的差異性。

2.1.2 衛星影像資料

本研究使用的影像來自歐洲太空總署 (ESA) Sentinel-1A 衛星拍攝的雷達影像。該衛星搭載波長為 5.6 cm 的 C 波段合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，具備穿透雲層、不受天氣影響的特性，時間解析度為 12 天。根據衛星運行方向，影像可分為由南向北運行的升軌(ascending)和由北向南運行的降軌(descending)。由於降軌影像在 2022 年 2 月至 7 月間因故障無法取得，因此本研究採用升軌影像。研究期間為 2019 年 10 月 8 日至 2023 年 8 月 24 日，共使用 110 張影像。

近年來，Sentinel-1 衛星已廣泛應用於全球多地的地層下陷監測研究。例如，Rateb & Abotalib (2020)結合 Sentinel-1 與 GPS 資料，探討尼羅河三角洲的地層下陷現象；Morishita (2021)則利用 LiCSAR 與 LiCSBAS 進行日本全國都市地區形變監測；Ramirez *et al.* (2022)應用 PS-InSAR 分析韓國唐津市因隧道工程引起的地表變形；Novellino *et al.* (2017)評估使用 Sentinel-1 製作英國地面形變全國圖資的可行性；而 Cian *et al.* (2019)利用 SNAP 與 StaMPS 的方法，應用於非洲沿海城市的地層下陷監測。這些研究顯示 Sentinel-1 提供大量且高品質的開源資料，在不同地區與應用情境下皆具備高度可行性與準確性。

表 2 乾季月雨量總和

時間	乾季累積雨量(mm)
2019/12-2020/05	576
2020/12-2021/05	189
2021/12-2022/05	543
2022/12-2023/05	337

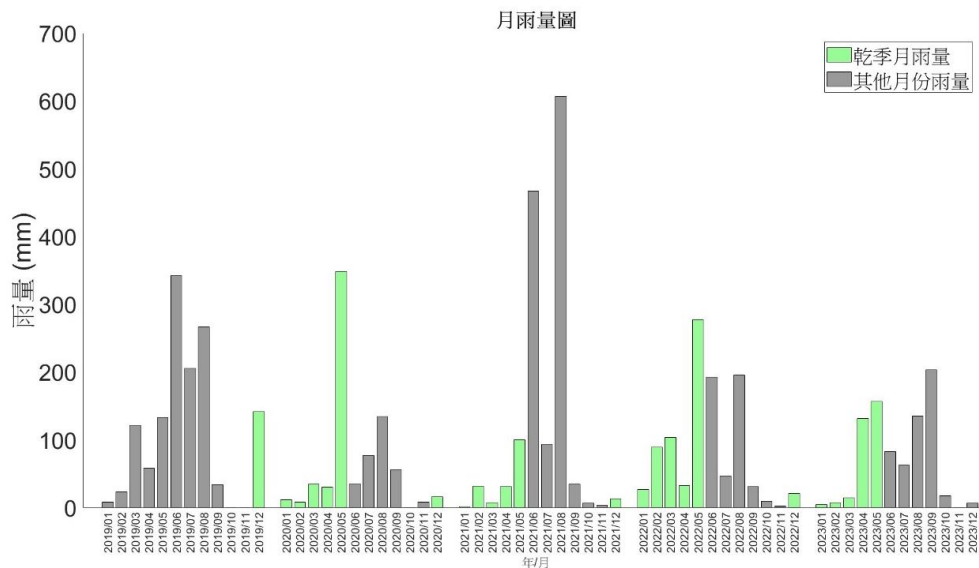


圖 2 2019 至 2023 年雲林月累積雨量圖，綠色長條為乾季期間(12 月至隔年 5 月)，灰色長條為其他月份雨量

2.1.3 GNSS 輔助資料

本研究使用雲林縣 20 個 GNSS 站作為驗證資料，其分布如圖 3 所示。這些 GNSS 站點能夠持續提供高精度的 E(東西)、N(南北)及 V(垂直)方向的位移數據，每日進行坐標解算，記錄地表的細微變動，為地層下陷的監測提供關鍵的參考數據。由於 GNSS 能達到毫米(mm)等級的測量精度，這些數據能夠準確反映地層的長期變化趨勢及局部的下陷情況。在本研究中，這些 GNSS 站點的資料將作為 PSInSAR 結果的約制與驗證使用。PSInSAR 技術雖然能夠大範圍監測地表變形，但其觀測屬於一維的視衛星方向(Line of Sight, LOS)距離改變量，且變形量為相對於單一不動點之相對變形，化算至特定基準之實際變形不明且難以進行工程面的解釋。因此需仰賴地面測站進行校驗，而 GNSS 連續站的資料不論在準確性和時效性上，都有助於提高 PSInSAR 的實用性。

2.2 研究方法

2.2.1 PSInSAR

PSInSAR(永久散射體合成孔徑雷達差分干涉)是一種利用合成孔徑雷達(SAR)影像來進行地表變形監測的技術(Ferretti *et al.*, 2001)。透過分析長時間序列的 SAR 影像，選擇一張主影像(master image)

與其他副影像(slave image)建立干涉對(圖 4)，並尋找地面上穩定且同調性高的目標物。這些穩定的目標物被稱為永久散射體(PS)。永久散射體通常是一些能夠提供穩定反射信號的物體或結構，如建築物、橋樑、角反射器等。這些結構在長時間的觀測中能保持穩定的反射強度，因此非常適合用來檢測地表與衛星重複軌道間的微小距離變化。

本研究的影像及 PSInSAR 處理可分為兩個主要階段，如圖 5 所示。第一階段為影像前處理，採用歐洲太空總署(ESA)提供的軟體 SNAP(Sentinel Application Platform)。該階段首先讀取多時期的 Sentinel-1 影像，接著選定主影像後進行配準與干涉處理，進一步產生干涉圖，並去除平地與地形效應，最終輸出可供 PSInSAR 處理的資料集。

在進入第二階段處理前，需先設定 Amplitude Dispersion Index(ADI) 的門檻值，以篩選潛在穩定散射點。ADI 是一項評估像素相位穩定性的指標，透過判斷一組影像序列中每個像素相較與整體像素的標準差穩定性，數值越低代表該點的相位越穩定(式 1)，也意味著地表覆蓋與散射特性未有時間去相關的問題(Esmacili & Motagh, 2016)。為了同時顧及 PS 點的數量及品質，本研究採用過往文獻中常用的 0.3 作為篩選門檻，以保留足夠點位進行後續評估。

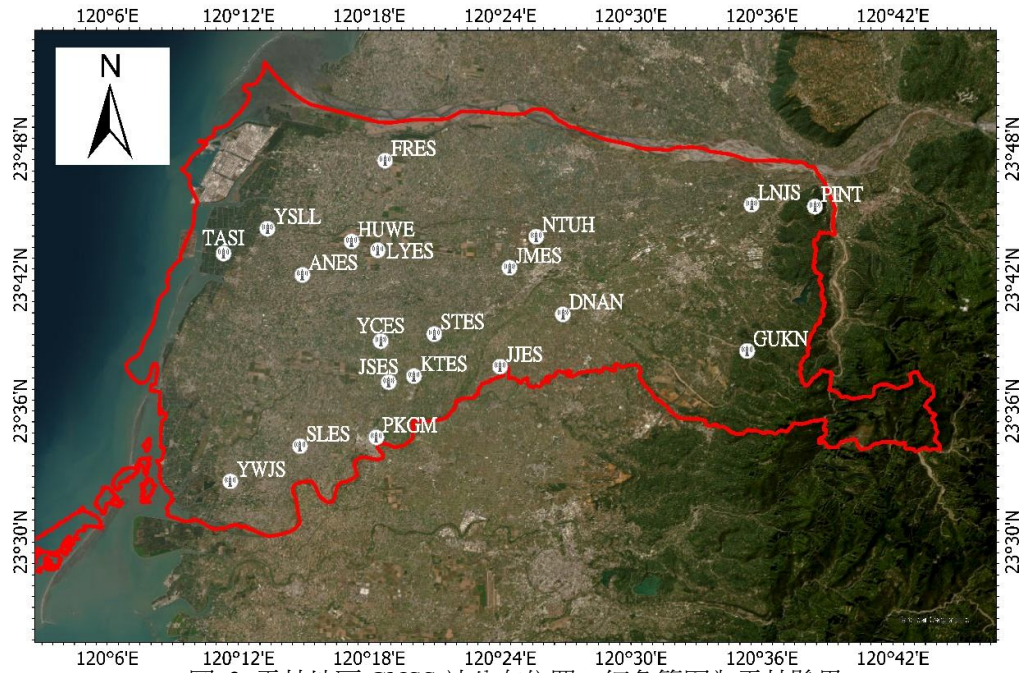


圖 3 雲林地區 GNSS 站分布位置，紅色範圍為雲林縣界

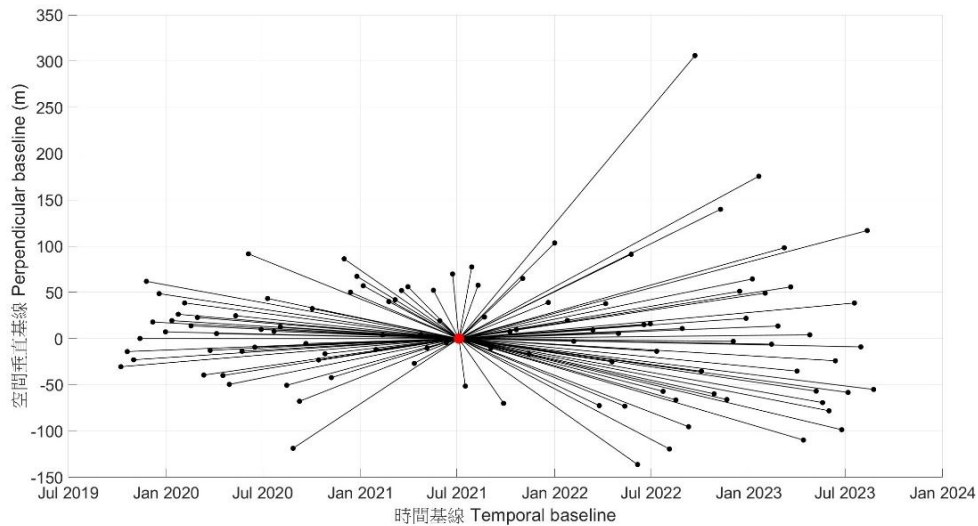


圖 4 本研究的時空基線圖，中間的紅點為主影像，其餘黑點為副影像

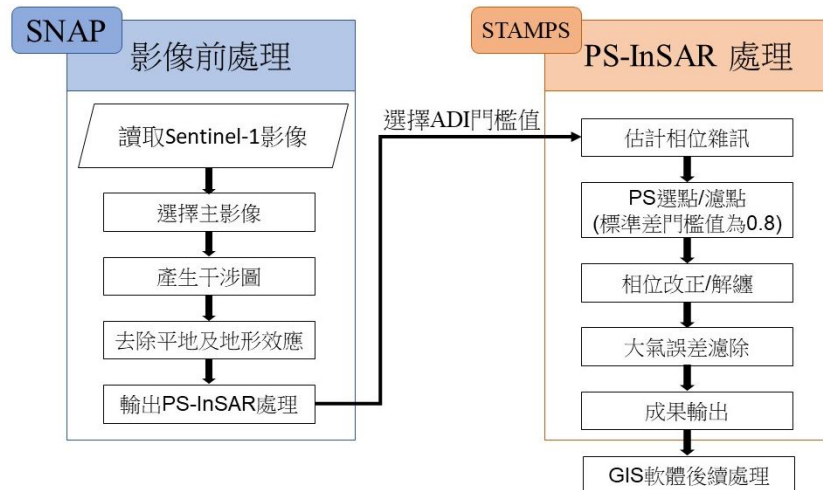


圖 5 本研究 PS-InSAR 處理流程圖

第二階段則使用 STAMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers) 進行 PSInSAR 的處理 (Hooper *et al.*, 2004、Hooper *et al.*, 2010)。此階段包括相位雜訊估計、PS 選點及濾點、相位改正與解纏、大氣誤差濾除等步驟。在 PS 點選點/濾點階段，本研究進一步設置了 0.8 的標準差門檻值，以剔除相干性較低、不利於後續分析的點，提升分析精度與穩定性。最後輸出時間序列形變結果，並透過 GIS 軟體進行視覺化與空間分析，以利後續的地表變形解釋與應用。

$$D_a = \frac{\sigma_a}{a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|S_i| - \bar{|S|})^2}{N \sum_{i=1}^N |S_i|}} \dots\dots\dots (1)$$

σ_a ：反射強度的標準差

S ：SLC 像素的複數值

$|S_i|$ ：第 i 影像中像素強度值

$\bar{a}, \bar{|S|}$ ：反射強度平均值

3. 成果與分析

3.1 PSInSAR 成果

經由 STAMPS 產出之地表變形速率僅為沿視衛星方向(line of sight, LOS)的相對形變速率。若能在觀測期間透過一個或數個被認為地表穩定或已知相對基準變形速率的位置作為參考點，則可利用其作為形變計算的基準點，並將變形量由相對轉換成絕對。為選擇合適的參考點，本研究透過 GNSS 站點資料，先測試利用位於雲林縣的 LNJS 站作為單一參考點(圖 6)。圖 6 所示為該站點自 2019 至

2023 年間的垂直位移時序結果，其每日解在時間序列中垂直方向(Z 值)的變動穩定維持在 ± 2 cm 以內，顯示出良好的穩定性，因此被視為理想的基準位置。

PS-InSAR 高度依賴穩定的參考點，藉此計算所有觀測點相對於該點的變形速率 (Hussain *et al.*, 2022)，成果如圖 7 所示，可看出雲林地區在有多處顯示明顯下陷趨勢，然而，圖中部分區域呈現黃色至橘紅色的抬升現象，與實際地表變形情形略有不符。

因此本研究嘗試利用多重參考點進行校正，透過公式(2)的轉換公式，將 GNSS 站的三維變形量轉成 LOS 方向變形量，並將兩者差值透過 Kriging 空間內插形成校正面，再將這個殘差加回 PSInSAR LOS 結果中，作為校正後 LOS，校正後的結果如圖 8 所示，雲林地區多數地區呈現下陷趨勢，亦符合水利署及其他參考資料之空間分佈，顯示地層下陷現象具一定空間延續性，尤以紅框所示的元長鄉最為明顯，年下陷速率超過每年 5 cm。與初步結果相比，經過參考點校正後的成果為據 GNSS 橢球高程基準意義之絕對變形量，可正確反映地表相對於穩定點的實際變化量，進而提升結果的準確性與可比較性，有助於後續進行地層下陷程度評估與不同資料源(如 GNSS)間的對應分析。

$$D_{LOS} = D_U \cos \theta + D_E \sin \theta \sin \phi + D_N \sin \theta \cos \phi \dots\dots\dots (2)$$

D_{LOS} ：LOS 方向上的位移量

D_U 、 D_E 、 D_N ：三方向的位移分量

θ ：衛星入射角

ϕ ：衛星對地方位角

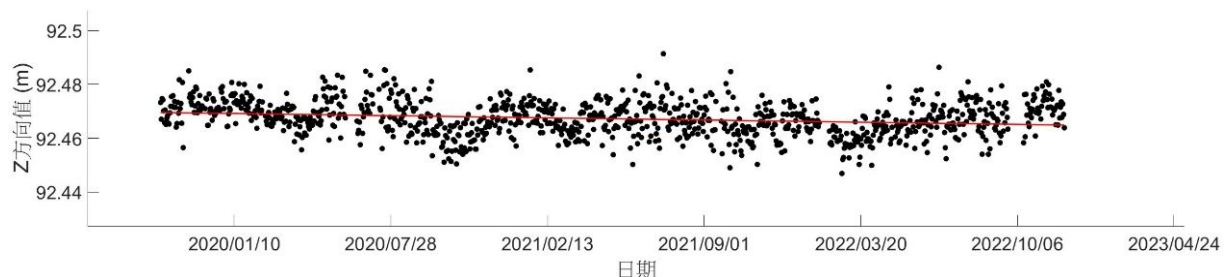


圖 6 LNJS 站點時序資料

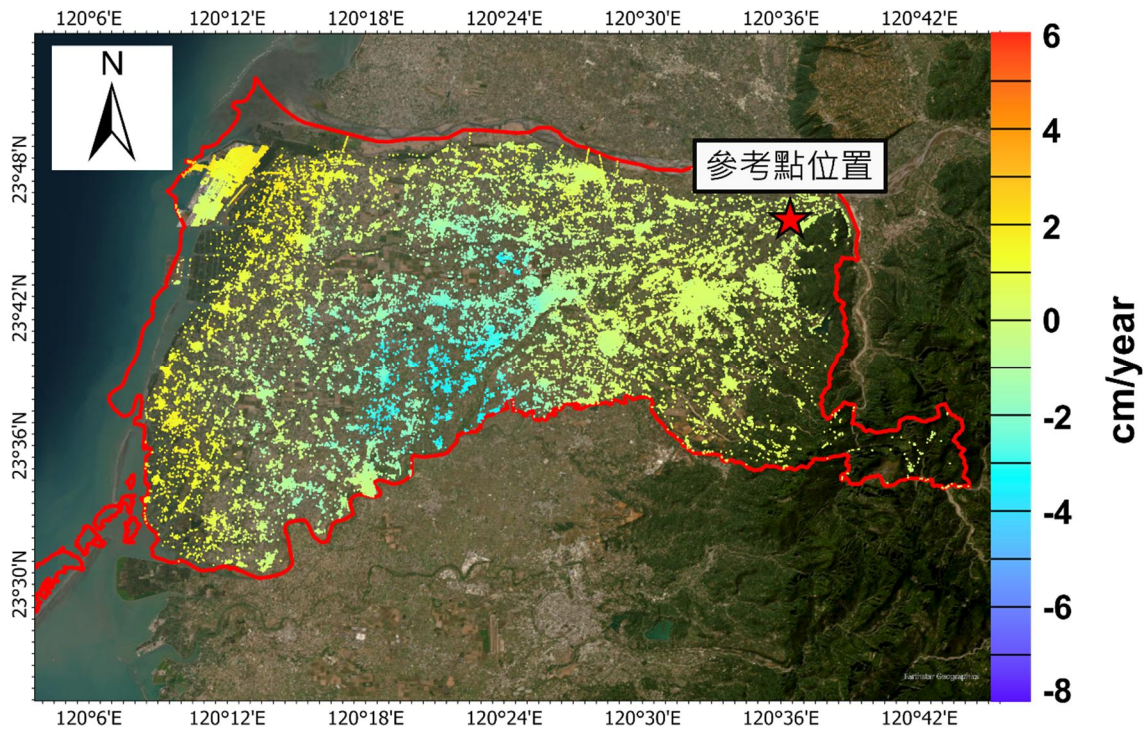


圖 7 單一參考點之 PSInSAR 結果

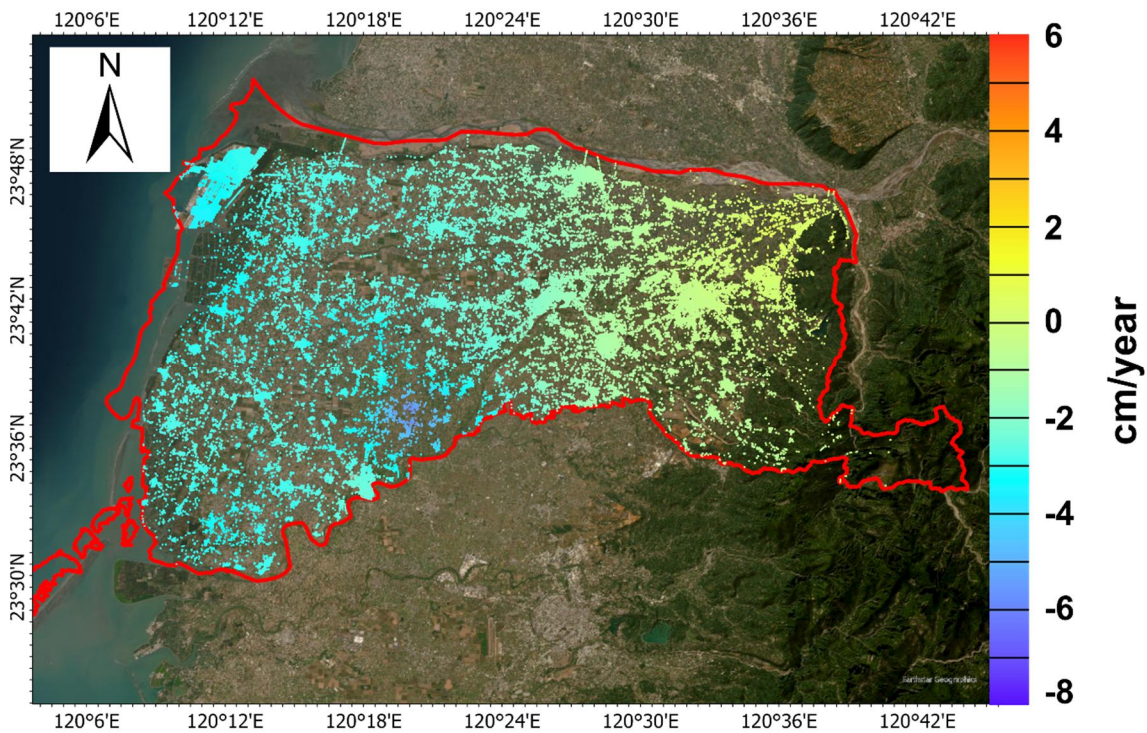


圖 8 經多重參考點校正後之成果，紅框範圍內為元長鄉

3.2 GNSS 驗證成果

為了驗證 PSInSAR 的結果，本研究使用了由國立中央大學地球科學系地殼形變實驗室提供的 GNSS 監測資料，總共選取 20 個 GNSS 站點並透過留一驗證(leave-one-out cross validation)流程以獨

立站進行驗證，計算這些站點自 2019 年至 2023 年間的垂直下陷速率，與 PSInSAR 所得到的 LOS 方向速率，為進行比較，先以式(2)進行反投影，將 PSInSAR 所得到的 LOS 方向變化量除以上方衛星對各 GNSS 站所對應的入射角(incidence angle)，轉換為垂直方向位移量，雲林地區對應的入射角分

布如圖 9 所示。進行比較。其結果如表 3 所示，列出了各站點的位置資訊、建置單位、PSInSAR LOS 方向速率與 GNSS 垂直監測速率的對比資料(單位為 cm/year)。大部分站點的 PSInSAR 與 GNSS 結果非常接近，顯示出兩種技術的監測結果具有良好的一致性。而圖 10 展示了 PSInSAR 速率與 GNSS 速率的對比關係，散布點多數分布於基準線附近，若針對 20 個站點速率數據進行的相關係數分析顯

示，兩者的相關係數 R 達到 0.98。

儘管整體呈高度相關，仍可觀察到部分站點在速率上存在些微差異，最可能的原因是 PSInSAR 量測的是沿衛星視線方向(LOS)的變形，與 GNSS 所提供的三維位移資訊不同，因此在轉換為垂直速率的過程中可能因入射角與軌道方向估算誤差而產生偏差，進一步導致兩者速率出現差異。

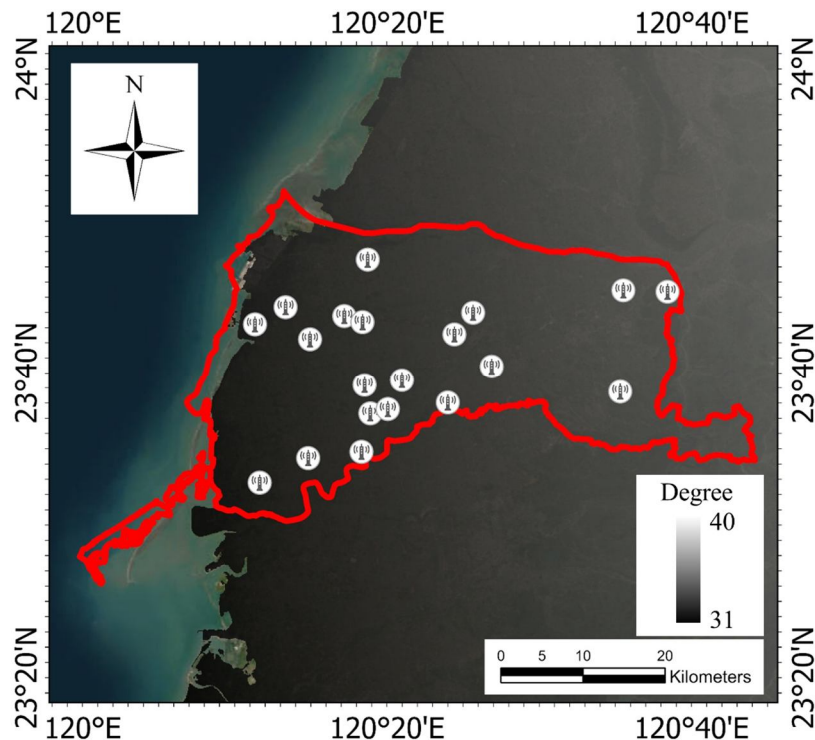


圖 9 雲林地區雷達衛星影像之入射角差異

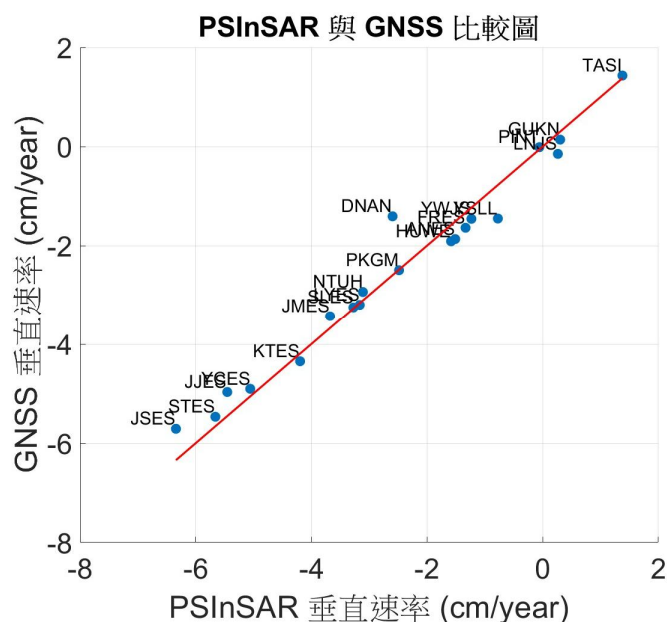


圖 10 PSInSAR 與 GNSS 結果散布圖，兩者相關係數為 0.98

表 3 PSInSAR 與 GNSS 結果比較

測站名稱	測站代號	經度	緯度	建置單位	PSInSAR 垂直方向速率 (cm/year)	GNSS 垂直速率 (cm/year)
安南國小	ANES	120.2491	23.70389	經濟部水利署	-1.5	-1.9
斗南	DNAN	120.4480	23.67381	交通部中央氣象署	-2.6	-1.4
豐榮國小	FRES	120.3122	23.79113	經濟部水利署	-1.3	-1.6
虎尾	HUWE	120.2866	23.72940	交通部中央氣象署	-1.6	-1.9
舊庄國小	JJES	120.4000	23.63393	經濟部水利署	-5.5	-5.0
拯民國小	JMES	120.4072	23.70933	經濟部水利署	-3.7	-3.4
忠孝國小	JSES	120.3150	23.62199	經濟部水利署	-6.3	-5.7
客厝國小	KTES	120.3343	23.62662	經濟部水利署	-4.2	-4.3
龍巖國小	LYES	120.3067	23.72271	經濟部水利署	-3.2	-3.2
中科虎尾	NTUH	120.4276	23.73302	經濟部水利署	-3.1	-2.9
北港	PKGM	120.3055	23.57989	內政部	-2.5	-2.5
水燦林國小	SLES	120.2472	23.57316	經濟部水利署	-3.3	-3.3
秀潭國小	STES	120.3498	23.65870	經濟部水利署	-5.7	-5.5
元長國小	YCES	120.3089	23.65331	經濟部水利署	-5.1	-4.9
新興國小	YSLI	120.2223	23.73917	經濟部水利署	-0.8	-1.5
宜梧國中	YWJS	120.1940	23.54623	經濟部水利署	-1.2	-1.5
古坑	GUKN	120.5888	23.64585	交通部中央氣象署	0.3	0.1
林內國中	LNJS	120.5922	23.75745	經濟部水利署	0.3	-0.1
坪頂	PINT	120.6406	23.75607	中央研究院 地球科學所	-0.1	-0.01
台西	TASI	120.1888	23.72027	內政部 國土測繪中心	1.4	1.4

3.3 時間序列分析

我們接著計算了在元長鄉中下陷量最高的 PS 點時間序列平均(圖 8 紅框範圍,約 3000 個 PS 點),把超過兩個標準差的 PS 點視為離群值並移除,重複至無離群值為止,其最終的時間序列如圖 11 所示,由圖上能看出此地區有著長期下陷的趨勢,平均下陷速率為每年 5.2 cm,圖上也同時顯示了不同年份於乾季第一期稻作期間的地層下陷速率。從圖中可以看出,這段期間內各年份均出現地層下陷的情況。2020 年與 2022 年的下陷速率分別為每年 10.2 cm 及 8.9 cm,雖然程度不一,但都顯示出一定的下陷趨勢。值得注意的是,2021 及 2023 年乾季第一期稻作期間的下陷速率顯著高於其他年份,達到了每年-16.1 及 15.8 cm,這與當年雨量極少的情況相符。由此可見,降雨不足對於地層的穩定性影響深遠,尤其是在農業用水需求高的乾季時期,容易因地下水抽取增加而導致地層大幅下陷。綜合以上結果,顯示出乾季第一期稻作期間的地層下陷速率與

當地降水情況和地下水使用密切相關。特別是在降雨不足的年份,應加強地下水管理,以減少地層下陷的風險。

4. 討論

為探討缺水事件對地層下陷的潛在影響,本研究選取 2020 至 2023 年間的 PSInSAR 時序結果,計算各年在 LOS 方向年下陷速率超過政府所訂「顯著下陷」標準(>3 cm/year)的空間分布情形與面積,結果如圖 12 及表 4 所示。從圖中可明顯觀察到,2021 年期間高下陷速率點位大量集中於雲林縣中西部平原地區,分布範圍與密度皆遠超 2020 與 2022 年。為了估算受影響區域的空間範圍,本研究將篩選後的經緯度點資料賦予值 1,並透過自然鄰近插值(griddata)生成連續空間分布,進一步利用 alpha shape 演算法限制插值區域的外部邊界。最終僅保留在 alpha shape 範圍內、且插值值大於 0 的網格,將其視為受影響區域,以估得受影響面積,結果顯示 2021 年超過年下陷速率 3 cm 的區域高達 514.8

km²，顯著高於 2020 年的 112.1 km² 與 2022 年的 235.4 km²。整體而言，2020 至 2022 年間 PS-InSAR 推估結果與水利署公告之下陷面積相近，顯示本研究方法在空間上具有良好的下陷偵測能力與一致性。然而，2023 年的估算面積(222.9 km²)與公告值

(247.7 km²)之間差距相對較大，推測主因可能來自於本研究所使用之 2023 年 Sentinel-1 影像僅涵蓋至當年 8 月，未能納入完整年度的觀測資料，導致估算結果呈現偏高，顯示影像時間涵蓋範圍對下陷面積估計具一定影響。



圖 11 整體下陷速率及各年缺水時期下陷速率

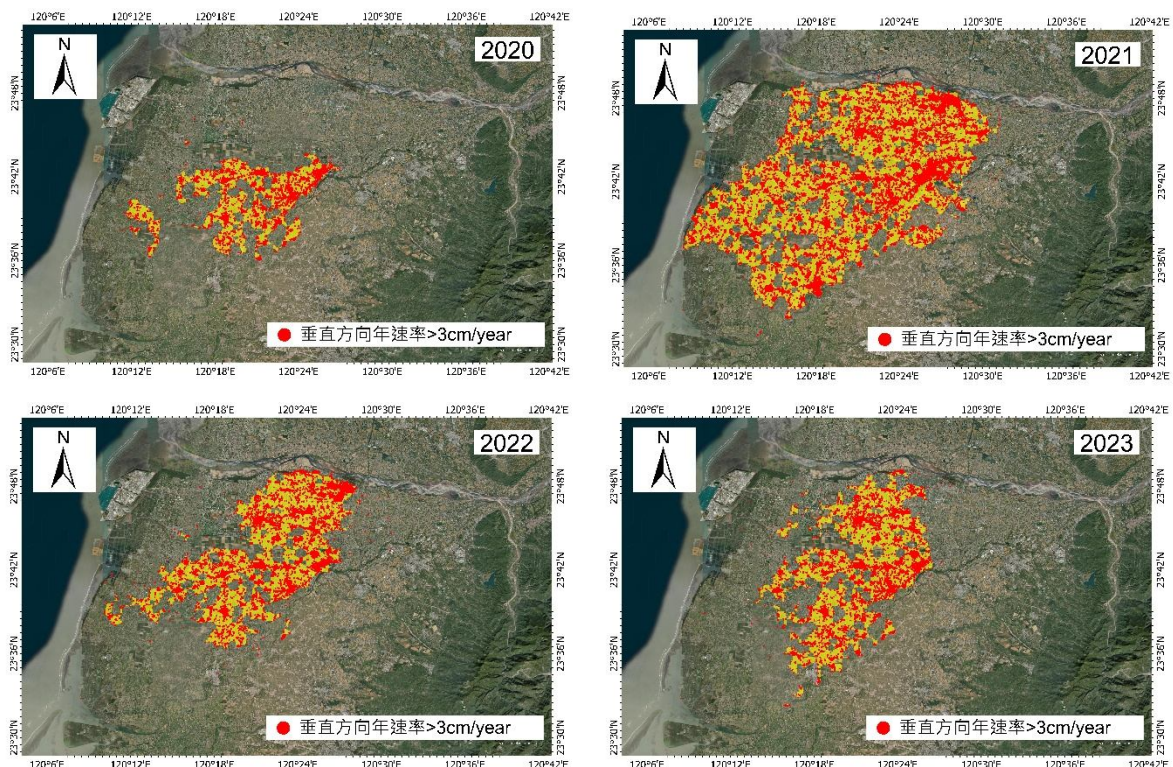


圖 12 各年年速率超過 3 cm 之點分布(紅點)及範圍(黃區)

表 4 各年下陷估算面積

年份	本研究估算面積 [km ²]	水利署公告面積 [km ²]	差異百分比 [%]
2020	112.1	103.8	8
2021	514.8	502.7	2
2022	235.4	239.5	-2
2023	222.9	247.7	10

5. 結論

本研究探討雲林縣在 2021 年與 2023 年乾旱期間面臨的嚴重地層下陷問題，特別是在降水量顯著減少的情況下，地下水的過度抽取進一步加劇了地層的下陷速率，某些區域的年下陷速率甚至超過每年 5 cm。透過運用永久散射體合成孔徑雷達差分干涉(PSInSAR)技術，結合 GNSS 站的數據，提供了更為準確的下陷速率數據。研究結果顯示，乾季期間的降水量與地層下陷之間存在密切的關聯，特別是在 2021 年，極低的降水量直接導致了地下水的過度抽取。基於這些發現，建議相關單位在水資源管理上應更加謹慎，特別是在乾季期間，考慮限制地下水的抽取，以減少地層下陷的風險。此外，應加強對地層下陷的監測與研究，並制定相應的政策以應對未來可能出現的乾旱與地層下陷問題。總之，本研究不僅揭示了雲林縣地層下陷的現狀及其與降水量的關聯，還為未來的水資源管理提供了重要的科學依據，期望能夠促進更有效的土地利用規劃與環境保護措施。

然而，PS-InSAR 技術主要依賴穩定散射體，在農田或建物稀疏區域可能存在監測覆蓋不足的限制。未來研究可考慮結合分布式散射體干涉技術(DSInSAR)，以補足低相干的區域，提升整體沉陷監測的完整性與可靠性。

參考文獻

- 全云霄、楊俊泉、胡曉佳、孟中璵，2024。基于 D-InSAR 技術的礦區地表沉陷監測研究，地球學報，45(3)：410-422，DOI：10.3975/cagsb.2023.122501。[Tong, Y., Yang, J., Hu, X., and Meng, Z., 2024. Monitoring land surface subsidence of coal mines using D-InSAR technology, Acta Geoscientica Sinica, 45(3): 410–422, DOI: 10.3975/cagsb.2023.122501. (in Chinese)]
- 經濟部水利署，2025。地層下陷監測資訊整合服務系統，https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/SubIndex/10009，引用 2025/04/28。[Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2025. Integrated information system for land subsidence monitoring, Available at: https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/SubIndex/10009, Accessed April 28, 2025. (in Chinese)]
- 交通部中央氣象署，2025。氣候觀測資料查詢服務，<https://codis.cwa.gov.tw/>，引用 2025/04/28。[Central Weather Administration, 2025. Climate observation data inquire service, Available at: <https://codis.cwa.gov.tw/>, Accessed April 28, 2025. (in Chinese)]
- Chen, K.H., Hwang, C., Tanaka, Y., and Chang, P.Y., 2023. Gravity estimation of groundwater mass balance of sandy aquifers in the land subsidence-hit region of Yunlin County, Taiwan, Engineering Geology, 315: 107021, DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107021.
- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M., 2011. Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B8): B08406, DOI: 10.1029/2011JB008242.
- Cian, F., Blasco, J.M.D., and Carrera, L., 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and StaMPS, Geosciences, 9(3): 124, DOI: 10.3390/geosciences9030124.
- Cigna, F., and Tapete, D., 2021. Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico, Remote Sensing of Environment,

- 254: 112254, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112254.
- Esmacili, M., and Motagh, M., 2016. Improved persistent scatterer analysis using amplitude dispersion index optimization of dual polarimetry data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117: 108-114, DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.018.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20, DOI: 10.1109/36.898661.
- Franklin, K.R., and Huang, M.H., 2022. Revealing crustal deformation and strain rate in Taiwan using InSAR and GNSS, *Geophysical Research Letters*, 49(21): e2022GL101306, DOI: 10.1029/2022GL101306.
- Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M.C., Arkan, M., and Oyen, A., 2010. StaMPS/MTI manual, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg, 1, 2629.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23611, DOI: 10.1029/2004GL021737.
- Hsu, W.C., Chang, H.C., Chang, K.T., Lin, E.K., Liu, J.K., and Liou, Y.A., 2015. Observing land subsidence and revealing the factors that influence it using a multi-sensor approach in Yunlin County, Taiwan, *Remote Sensing*, 7: 8202-8223, DOI: 10.3390/rs70608202.
- Huang, M.H., Bürgmann, R., and Hu, J.C., 2016. Fifteen years of surface deformation in Western Taiwan: Insight from SAR interferometry, *Tectonophysics*, 692: 252-264, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.02.021.
- Hussain, M.A., Chen, Z.L., Zheng, Y., Shoaib, M., Ma, J.W., Ahmad, I., Asghar, A., and Khan, J., 2022. PS-InSAR based monitoring of land subsidence by groundwater extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan, *Remote Sensing*, 14(16): 3950, DOI: 10.3390/rs14163950.
- Ku, C.Y., and Liu, C.Y., 2023. Modeling of land subsidence using GIS-based artificial neural network in Yunlin County, Taiwan, *Scientific Reports*, 13(1): 4090, DOI: 10.1038/s41598-023-31390-5.
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M.R., and Ghassemi, M. R., 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran, *Engineering Geology*, 201: 6-28, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.12.004.
- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H., and Stouthamer, E., 2017. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam, *Environmental Research Letters*, 12(6): 064006, DOI: 10.1088/1748-9326/aa7146.
- Morishita, Y., 2021. Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1): 6, DOI: 10.1186/s40645-020-00402-7.
- Novellino, A., Cigna, F., Brahmi, M., Sowter, A., Bateson, L., and Marsh, S., 2017. Assessing the feasibility of a national InSAR ground deformation map of Great Britain with Sentinel-1, *Geosciences*, 7(2): 19, DOI: 10.3390/geosciences7020019.

- Ramirez, R.A.A., Lee, G.J., Choi, S.K., Kwon, T.H., Kim, Y.C., Ryu, H.H., Kim, S., Bae, B., and Hyun, C., 2022. Monitoring of construction-induced urban ground deformations using Sentinel-1 PS-InSAR: The case study of tunneling in Dangjin, Korea, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102721, DOI: 10.1016/j.jag.2022.102721.
- Rateb, A., and Abotalib, A.Z., 2020. Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019, *Science of the Total Environment*, 729: 138868, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138868.
- Tung, H., and Hu, J.C., 2012. Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR, *Tectonophysics*, 578: 126-135, DOI: 10.1016/j.tecto.2012.08.009.
- Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., and Chen, W., 2023. Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal, *Water*, 15(6): 1094, DOI: 10.3390/w15061094.
- WMO, 2023. State of the Global Climate 2023, Available at: <https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023>, Accessed May 20, 2025.
- Yang, Y.J., Hwang, C., Hung, W.C., Fuhrmann, T., Chen, Y.A., and Wei, S.H., 2019. Surface deformation from Sentinel-1A InSAR: Relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in Central Taiwan, *Remote Sensing*, 11: 2817, DOI: 10.3390/rs11232817.
- Yeh, T.K., Lee, T.Y., Lee, I.H., Shih, H.C., Chen, C.H., Yen, J.Y., and Ni, C.F., 2025. Combination on GNSS precise point positioning and InSAR data fusion to monitor the land subsidence in Taiwan, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1): 2445632, DOI: 10.1080/19475705.2024.2445632.
- Yusiyanti, I., Prajardi, T.W.K., Saputri, Y.I., and Pratama, C., 2023. Vertical deformation model on postseismic phase using exponential and logarithmic function based on InSAR, *Geodesy and Geodynamics*, 14(4): 392-400, DOI: 10.1016/j.geog.2023.01.003.

Monitoring Drought and Land Subsidence with InSAR Technology

Yun-Chiao Chang¹ Kuo-Hsin Tseng^{2*} Yu-Heng Tai³

Abstract

The western plains of Taiwan have long relied on groundwater, and combined with uneven rainfall and droughts caused by climate change, land subsidence is easily triggered. Severe droughts in 2021 and 2023 further intensified subsidence during those years. This study applies the Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) technique to analyze Sentinel-1 images from 2019 to 2023, integrated with rainfall data, to examine the impact of drought on subsidence rates. Results indicate that precipitation decreased sharply during drought periods and showed strong correlation with accelerated subsidence, with seasonal subsidence rates reaching up to 7.8 cm/year in severely water-stressed areas. To validate the results, GNSS stations were incorporated using multi-reference kriging interpolation, with independent stations used for comparison, yielding a correlation coefficient of 0.98. Furthermore, comparisons with significant subsidence areas published by the Water Resources Agency revealed differences of about $\pm 10\%$ between 2020 and 2023. These findings demonstrate that PSInSAR provides high accuracy and stability in monitoring detailed surface deformation and can serve as a valuable scientific basis for future water resource management, groundwater regulation, and land subsidence prevention.

Keywords: Persistent Scatterer InSAR, Land Subsidence, Precipitation

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, National Central University

² Professor, Department of Civil Engineering, National Central University

³ Assistant Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research,
National Central University

* Corresponding Author, E-mail: khtseng@csrslr.ncu.edu.tw

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: Apr. 14, 2025

Accepted Date: Sep. 22, 2025

整合多元遙測技術於高速公路邊坡救災之應用

鄭宏達¹ 李魁士² 姜興華^{3*} 闕文鏈³

摘要

臺灣地區因地形環境因素，常有天然災害發生並造成環境損害，對民眾生命財產造成影響，故災害搶救具有急迫的時效性，對於災區的受害資訊須立即掌握，且對於潛在可能發生的二次災害更是不可忽略，所以對於災區空間資訊收集是非常重要的工作，資訊收集越完整對於救災任務越是有幫助。而如何能有效的針對不同的使用需求，採取因應的技術做法，提供可用的資訊實為一項重要的課題。本案例應用無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)進行空拍及 3D 建模、光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)掃描點雲(Point Cloud)建模及經緯儀等多元遙測技術獲取災區空間資訊，提供災區搶修及復建使用。

關鍵詞：無人機、光達、3D 建模、點雲

1. 前言

臺灣位居環太平洋地震帶，也處在西北太平洋地區颱風侵襲的主要路徑上(國家災害防救科技中心，2020)，所以經常會有地震、颱風等災害發生，往往造成山崩、土石流、洪水、房屋傾倒、道路中斷、農田毀損等災害，其衝擊十分巨大，對民眾生命財產造成影響。由於災害發生可能無法避免，但於災害發生後如何能快速救災、搶修、復建等實為災後處置的重要議題。

近年無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、光達(Light Detection and Ranging, LiDAR)掃描儀等設備已被廣為應用於工程建設、防救災等任務上。由於不同的設備及測量技術均各有其優點及使用特性，若能應用這些不同的設備技術互相搭配彌補不足，使資料更臻於完善且具有可用性，應對救災任務更有幫助，例如藉由 UAV 載具搭載攝影裝置或 LiDAR 掃描儀，除可快速的對災區進行資訊蒐集，亦可彌補地面人員無法到達區域之空間資訊取得；而光達掃描儀之雷射光其具有對植被穿透的能力，不論是地面式或空載式掃描儀透過其對植被之穿透能力，能更完整有效地蒐集地表現況，增加資訊

的可用性。

UAV、LiDAR、全測站儀等多元遙測技術用於邊坡災害勘查及監測作業目前已為廣泛應用。無人機技術在山坡地開發監管、地形測繪、危險公路崩塌復建工程等方面的應用已趨成熟，無人機智慧技術具有廣泛的潛力。以山坡地水土保持監管業務、山區公路邊坡因災害崩塌，河川野溪土砂淤積土方收方，水土保持計畫地形測量為例，探討無人機智慧技術在減少工程從業人員人力負荷及降低危險方面的應用，彙整典型案例，無人機搭載 RTK 結合 GNSS 全球衛星定位系統，進行測繪，獲取地形資料如正射影像、DSM(Digital Surface Model)、DEM(Digital Elevation Model)、點雲資料與 3D 模型等，利用 GIS 地理資訊系統與 CAD 數位化軟體，快速處理解析，建立地形資料，提供設計、施工端解決關鍵問題(鍾鳴峰，2024)。遙感探測利用不同的感測器及載具可以全面且有效地探索及調查不同區域的各種地物、地貌、資源、與現象等的變化。在災害發生時，遙感探測更是災害調查、監測、與評估的有效工具，並可提供決策者更廣泛與全面的資訊，以利災害防救等之決策支援(蔡富安，2020)。交通部運輸研究所「UAV 結合深度學習輔助公路

¹ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 資深協理

² 台灣世曦工程顧問股份有限公司防災工程技術整備中心 主任

³ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 副理

* 通訊作者, E-mail: chsh@ceci.com.tw

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 05 月 19 日

接受日期：民國 114 年 09 月 15 日

局「邊坡災防應用探討」可知欲進行 AI 深度學習影像辨識或目標偵測及分類等任務，除利用邊坡高解析度影像外，尚加入邊坡空間特徵資料(例如：點雲模型、DSM)，並配合環境因子(例如：邊坡坡度、坡向、地質等)共同分析，以達較好之判識效果(黃宇謙等，2025)。高解析度數值地形於山崩、土石流與淹水災害應用之重要性與日俱增，相較常用之航空攝影測量產製空間解析度 40 m (75 年林務局農航所測)與 5 m (94 年內政部測) DTM (Digital Terrain Model)，經濟部地質調查及礦業管理中心於 99 年起執行「國土保育之地質敏感區調查分析計畫」運用空載光達測製全台 1 m 高解析度之 LiDAR/DEM，在土石災害模擬及多尺度崩塌量體評估等皆有顯著之應用成效(李璟芳等，2015、謝有忠，2016)。地面光達對於量測胸徑、枝下高及樹冠幅相當準確；空載光達對於量測樹高、枝下高、樹冠幅及活冠長相當準確。地面光達對於樹高、樹冠幅及活冠長量測不準確因素來自於掃描範圍的限制或因遮擋而無法有效正確掃描至樹冠，而造成測量不準確而產生低估誤差(劉鎮毅等，2024)。

Ghorbanzadeh *et al.* (2019) 利用 UAV 蒐集邊坡空拍影像並搭配 CNN(Convolutional Neural Network)來進行邊坡穩定性檢測。該研究以 UAV 搭配全球導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)拍攝印度北部喜馬拉雅山靠近恆河地區之高度破碎和風化的岩層邊坡之影像，並擇定一範圍 3.7 km² 之邊坡為訓練影像(共拍攝 338 張影像)，另一範圍 2.45 km² 之邊坡為測試影像(共拍攝 169 張影像)，並利用空拍影像拼接成正射鑲嵌影像(Ortho-mosaic Image)及生成 DEM，再從取得坡度數據。再利用 CNN 模型進行學習，其比較 CNN 在不同取樣範圍、模型深度、資料集僅皆為空拍影像或納入坡度數據等情況，結論為使用空拍影像結合坡度數據之資料集，可大幅提高精度約 20~40%，取樣範圍則無太明顯優劣(Ghorbanzadeh *et al.*, 2019)。UAV LiDAR 能夠有效穿透樹冠，捕捉地形細節，與全站儀測量結果相比，UAV LiDAR 的垂直與水平誤差在可接受範圍內，適用於複雜地形的測繪(Tamimi & Toth, 2024)。在道路表面和平坦地形上，移動地面 LiDAR

與 UAV 攝影測量的高程與傳統測量結果相近；空載 LiDAR 在整體地形上提供了最接近傳統測量的高程數據(Khanal *et al.*, 2020)。

本文即針對高速公路邊坡救災任務使用 UAV、LiDAR、全測站儀等多元遙測技術進行邊坡災害勘查及監測作業之整合應用彙整說明，期能為未來相關工作應用參考。

2. 作業內容及方式

111 年 11 月間，歷經 918 地震及北臺灣連續降雨，國道 1 號南向 10.1k 汐止交流道南向出口集散道上方邊坡，於 11 月 1 日上午出現土石坍滑現象，並影響該路段正常通行。高速公路局北區養護工程分局隨即展開緊急搶修作業，台灣世曦工程顧問股份有限公司防災中心及地理空間資訊部(以下簡稱「台灣世曦」)亦隨即動員配合協助救災，於 11 月 2 日第一次由高速公路限飛區外先以 UAV 空拍取得工址影像(如圖 1)，供初步判識致災規模與狀況。11 月 2 日晚發生第二次邊坡坍滑，坍滑區更為擴大，更嚴重影響該路段南下車輛通行，坍滑現況如圖 2。為協助救災，台灣世曦於 11 月 3 日向高公局及民航局申請緊急 UAV 空拍，於 11 月 4 日開始針對災害現場展開關聯調查測量工作，以持續收集監測掌握現地災情，提供搶修工程及後續復建作業運用(高速公路局北區養護工程分局，2023)，期能協助搶修工程能順利執行，使國道盡早復通。

本案為高速公路邊坡坍滑事故，災害區土石鬆動且地表濕滑泥濘，而部分區域又位於高速公路車道雖有部分進行交維管制，但搶救工程車輛不斷進出，以致測量作業非常不便。為能在不影響搶修作業及維持高速公路正常運行之情況下，且能完整收集災區現況地形資料，實為本案調查作業執行方式須思考之重點。無人機、光達、全測站經緯儀等先進遙測設備為目前普遍運用於工地踏勘、工程監看、型變監測及地形測繪等作業使用，惟各項設備仍有其使用限制及不足處，如無人機空拍或無人機空載光達掃描，其雖有全面鳥瞰視角之優勢，但其對於遮蔽處如樹冠、屋棚或倒懸地形等地區即無法獲取

有效的資訊，而地面光達則可彌補前述遮蔽區之資訊；另全測站經緯儀則對於特定位置有快速取得數據之優勢，其對於立即的變化有很好的監測效果。彙整前述相關儀器設備之優缺點如表 1。

本案採用多種測量作業方式進行現場地形資料收集，包括利用 UAV 空拍獲取災區即時影像；UAV 光達掃描快速掌握大範圍地表之地形變化，並

作為各期土方清運量之估算；地面光達則針對崩塌區不規則地形(包括懸浮石塊等)進行掃描以有效掌握地形現況，並用以與空載光達資料比對；全測站經緯儀則用於有潛勢坍滑之特定地點進行監測，以避免二次坍滑造成災害。配合現場搶災及陸續動員之遙測監測作業紀要如表 2，作業方式及相關成果如表 3，各項遙測作業內容及應用如後述。



圖 1 國道 1 號南向 10.1k 邊坡第一次坍滑(111.11.02 拍攝)

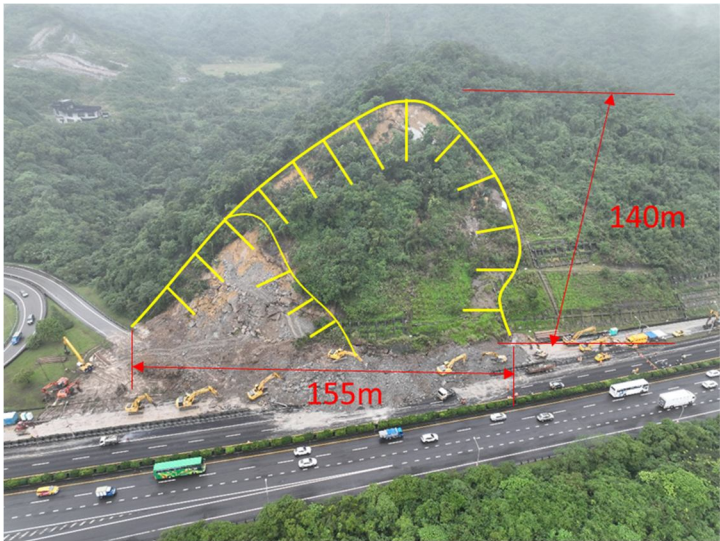


圖 2 國道 1 號南向 10.1k 邊坡第二次坍滑(111.11.03 拍攝)

表 1 使用儀器設備優缺點

設備	無人機空拍	無人機光達	地面光達	全測站經緯儀
優點	1. 機動性高 2. 快速收集地貌影像資訊 3. 鳥瞰影像視覺感受佳，地物易於判釋 4. 減少人員進入災區之危險	1. 機動性高 2. 快速獲取大量三維資料 3. 精度佳，地形較細緻 4. 減少人員進入災區之危險	1. 快速獲取大量三維資料 2. 精度佳，地形較細緻 3. 彌補空拍遮蔽區之資訊	1. 作業直接單純 2. 直接量取目標物之三維坐標 3. 固定目標監測效果佳
缺點	1. 空中視角易受地面物遮蔽 2. 空域管制 3. 空拍影像須後處理	1. 空中視角易受地面物遮蔽 2. 空域管制 3. 點雲成果須後處理 4. 資料量龐大	1. 缺乏物體頂部資訊 2. 點雲成果須後處理 3. 資料量龐大	1. 資訊獲取量少 2. 通視問題

表 2 遙測監測作業紀要表

日期	緊急施工搶災處理	台灣世曦團隊遙測科技監測作業
11/1 (二) (雨)	封閉汐止交流道南下出口匝道，拆除受損護欄燈具。	赴現場協助提供工程技術支援。
11/2 (三) (雨)	土石清理。 18:50 現場第二次坍滑。	1. 研討救災復舊作業。 2. 限飛區外 UAV 影像拍攝。 3. 收集衛星影像/LiDAR DEM/InSAR 等歷史資料，評析致災因子與範圍。
11/3 (四) (雨)	自南北兩側同時施作 H 型鋼樁等擋土設施、穩固坡趾及截排水，採日夜施工加速工進。	1. 啟動後續遙測監控作業。 2. 申請緊急 UAV 空拍。
11/4 (五) (雨)	06:00 完成第一階段主線內側車道搶通。	1. 地面 LiDAR 第 1 次掃描地形測繪。 2. 取得 UAV 許可，緊急啟動 UAV LiDAR 測量地形，受工址航高、塔台許可時段、天候降雨條件，11/4 僅能拍攝影像。
11/5 (六) (雨)	高公局、世曦、弘義營造廠商討復舊設計對策。	1. 11/5 UAV LiDAR 第 1 次掃描地形測繪，DEM 製作。 2. UAV 持續監控空拍。
11/7 (一) (雨)	03:30 完成主線 2 車道搶通，並完成第一排 H 型鋼樁。	評析事故前後 LiDAR/DEM，掌握受災環境與受損狀況與範圍，推測岩層滑動深度與量體，供復舊設計與施工運用。
11/8 (二) (雨)	施作 H 型鋼樁等擋土設施、穩固坡趾及截排水，清理土石之作業。	1. 地面 LiDAR 第 2 次掃描地形測繪。 2. 地面 LiDAR 即時現場解算(11/8~11/10)、雷射經緯儀(11/8)監測即時、密集之遙測量化數據，監測關鍵岩塊。 3. 雷射經緯儀邊坡單點變動監測。
11/10 (三) (雨)	土石清理。	1. UAV 持續監控空拍。 2. UAV LiDAR 第 2 次掃描地形測繪，DEM 製作。

表 3 作業項目及主要成果

工作項目	執行日期	主要工作內容及成果
無人機 空拍	111.11.02 (雨)	正射影像
	111.11.03 (雨)	正射影像
	111.11.04 (雨)	俯瞰影像
	111.11.05 (雨)	正射影像、3D 模型
	111.11.10 (雨)	正射影像、3D 模型
無人機 光達掃描	111.11.05 (雨)	10cm 網格 DEM
	111.11.10 (雨)	10cm 網格 DEM
地面 光達掃描	111.11.04 (雨)	3D 點雲
	111.11.08 (雨)	3D 點雲
地面光達 掃描監測	111.11.08 (雨)	裸露邊坡斷面監測
	111.11.09 (雨)	裸露邊坡斷面監測
	111.11.10 (雨)	裸露邊坡斷面監測
雷射經緯儀監測	111.11.08 (雨)	裸露邊坡單點變動監測

3. 測量作業

3.1 作業規劃

本次調查測量共執行五大項目，包括「UAV 空拍」、「UAV 光達掃描」、「地面光達掃描」、「地面光達掃描監測」及「經緯儀單點監測」等工作，即時且快速地收集現況資訊分別提供不同資訊於災區

搶救、復建工程設計及施工參考使用。因屬緊急動員作業，作業期間天候不佳持續下雨，且搶修工作人員機具不斷進出影響作業順暢，故相關測量作業均於惡劣環境情況下進行。

針對不同設備應考量其設備特性及精度於，避免於成果解算時相互影響。UAV 光達主要係使用無人載具掛載光達掃描設備由空中向下進行掃描，為行進間同時進行掃描，故其影響精度來源來自於設

備本身的包括有 IMU 誤差(慣性測量單元)、GNSS 誤差、雷射發射角度誤差、時間同步誤差等，目前高階酬載設備及掃描儀均已將此類誤差降至級低。本次使用設備為 RIEGAL Mini-Vux-1-UAV，儀器精度可達 15 mm。而來自於外部因素的包括有氣候(晴/雨)、地面控制點、點雲後處理等，該等則為主要影響點雲成果精度的重要因素。地面固定站光達掃描主要為固定式掃描作業，其影響精度來源來自於設備本身的包括有掃描器校準誤差、鏡頭/雷射光軸偏移、雷射測距系統的誤差等，所使用的設備在定期校正保養的形況下可排除此類誤差，本次使用設備為 RIEGL VZ-400i，儀器精度可達 3 mm。而來自於外部因素則包括有氣候(晴/雨)、站點規劃、目標球或反射標籤位置、控制點測量、點雲後處理等則為主要影響點雲成果精度的重要因素。所以在作業規劃時須特別注意控制點的布設及量測作業，避免造成系統上的差異，影響成果的可靠性。而點雲處理則採分別計算 DEM，並套疊比對檢核是否有系統性偏差。

另由於本作業區位於民航局無人飛行載具之禁限航區(如圖 3)，同時為松山機場飛機起飛航線範圍及高速公路局管轄限制範圍，於執行空拍任務前，除須洽民航局申請許可外，亦另須獲得管轄單位(交通部高速公路局)同意，並藉由民航局災防需求規定申請緊急飛行許可，並於執行任務期間，派駐一名聯繫員親赴近場塔台，與塔台督導人員當場確認 UAV 起飛與降落時間，以確保飛航安全。

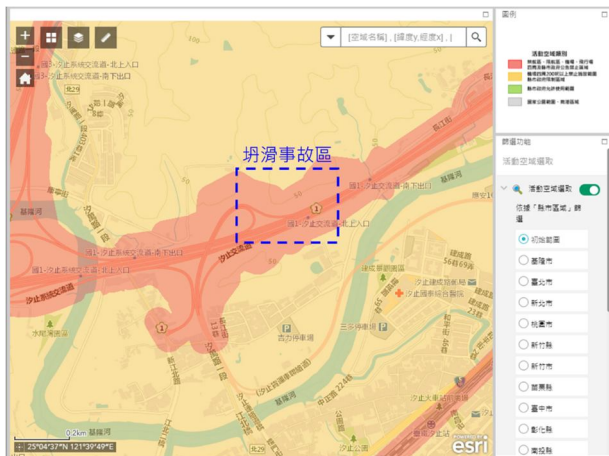


圖 3 本案作業範圍禁限航區

3.2 UAV 空拍

本計畫使用無人機執行空中影像拍攝作業，主要用於災害現況影像收集，並透過 3D 影像建模作為災區影響範圍初判，以及救災任務之作業規劃，並以多時期的持續空拍以掌握災區的變化，本案共分別於 111 年 11 月 2、3、4、5、10 日執行五次空拍作業，其中 11 月 4 日為坍滑區取景拍照，其餘四次均為垂直正拍製作正射影像及 3D 建模，UAV 正射影像產製流程如圖 4，作業過程說明如下。

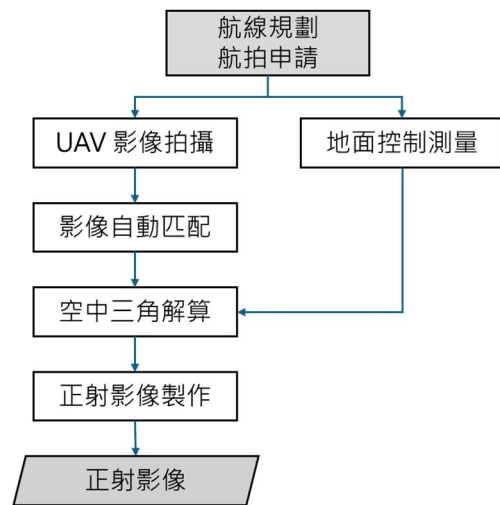


圖 4 UAV 正射影像產製流程

3.2.1 控制測量

- (1) 平面坐標使用內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態坐標系統，坐標系統為內政部公佈之 TWD97[2010]國家坐標系統；高程系統依據內政部公告之大地起伏轉換高程至 TWVD2001 正高系統。
- (2) 採內政部國土測繪中心 VBS-RTK 即時動態定位技術測量方式，收斂筆數大於 180 筆，計算每次觀測之平均坐標值作為控制測量成果。
- (3) 共測量 2 個現地特徵點位 ST01 以及 ST02 作為臨時基地站，坐標成果如表 4，現地測量作業照片如圖 5。
- (4) 基地站：無人飛行載具執行期間，為了能獲得準確的空中姿態與外方位，同時於測區鄰近位置架設基地站，並於無人機啟動與紀錄期間蒐集 GNSS 資料，用於後解算精密軌跡。



圖 5 控制測量作業

3.2.2 UAV 空拍及影像處理分析

採用 Zenmuse P1 相機執行 UAV 空拍作業，相機規格詳如表 5。於 111 年 11 月 2、3、4、5、10 日共執行五次空拍作業，其中 11 月 4 日為坍滑區取景拍照，側拍像片成果如圖 6，其餘四次均為垂直

正拍製作正射影像，影像地面解析度(GSD)為 2cm，正射影像成果如圖 7。

將無人機空拍影像使用 ContextCapture 軟體進行正射影像拼接處理及 3D 影像模型建置，利用正射影像評估坍滑區影響範圍，概估坍滑影響範圍約 6,800 m²(如圖 8 紅色虛線範圍)；另利用空拍影像產製之 3D 影像模型來產製數值地形 DSM，與崩塌前 DEM 套疊進行高程差異比對，透過兩種不同色系的變化代表土石崩塌及堆積的程度(如圖 9 紅色虛線範圍)，圖 9 紅色虛線範圍暖色系代表土石崩塌；冷色系代表土石堆積，然後分別標出紅區及藍區，分別以後期 DEM 值減去前期 DEM 值估算各區土方量，依此概估坍滑土方量約 4,600 m³；坍滑之土方堆積至下邊坡及高速公路路邊，其產生之堆積土方(鬆方)約 6,900 m³ (高速公路局北區養護工程分局，2023)。

表 4 控制點成果

單位：公尺(m)

點號	橫坐標	縱坐標	橢球高	正高	類型
ST01	316419.405	2774333.101	42.959	22.446	自然特徵點
ST02	316237.386	2774244.915	43.489	22.979	自然特徵點

表 5 Zenmuse P1 相機規格參數 (摘錄自：先創國際股份有限公司，2024)

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	尺寸	198 × 169 × 129 mm
	重量	800 g
	IP 保護等級	IP4X
	感測器尺寸	35.9 × 24 mm (全片幅) 34 × 19 mm (影片)
	影像尺寸	8192 × 5460 pixels；4500 萬畫素
	像素大小	4.4 μm
	鏡頭	FOV 63.5°；焦距 35 mm FOV 84°；焦距 24 mm
	GSD	2.5 cm (35 mm，航高 200 m)
		3.7 cm (24 mm，航高 200 m)



圖 6 111 年 11 月 04 日空中側拍取景照片



圖 7 空拍正射影像



圖 8 坍滑影響範圍(紅色虛線範圍)

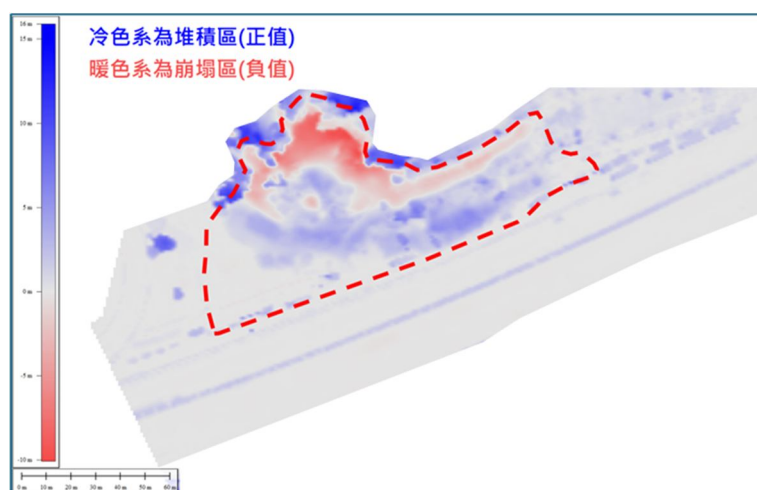


圖 9 3D 影像模型 DEM 與崩塌前 DEM 套疊比對

3.3 UAV 空載光達掃描

本計畫同時使用無人機執行空載光達(LiDAR)進行掃描作業，藉由光達對植被穿透的能力，取得分類後地表回波之三維點雲(Point Cloud)，獲得更真實之地表資訊，可更精準的估算土方量，並瞭解邊坡上是否仍有裂縫、孤石等，故分別於 111 年 11 月 5、10 日執行二次空中掃描作業，作業流程如圖 10，作業過程說明如下。

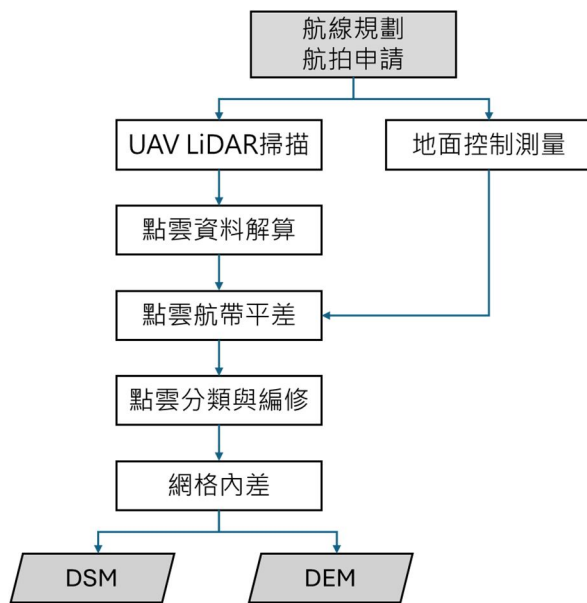


圖 10 UAV 光達產製 DEM 作業流程

3.3.1 控制測量

採內政部國土測繪中心 VBS-RTK 即時動態定位技術測量方式，收斂筆數大於 180 筆，計算每次觀測之平均坐標值作為控制測量成果。以自行車架設之臨時基地站(Base Station)作為無人載具軌跡算依據。

3.3.2 UAV 光達掃描及點雲處理

採用 Riegl Mini-VUX-1 UAV 雷射掃描儀，搭配 Applanix APX-15 慣導系統進行無人載具光達掃描，掃描儀規格如表 6。

(1) 掃描作業

針對邊坡坍塌區分別於 11 月 5 日及 11 月 10 日各進行一次坍塌區邊坡 UAV 光達掃描作業，現場飛航掃描任務執行依照所採用的定位定向系統

之校準程序進行，同時架設靜態衛星接收儀(或採用距離測區 10 km 半徑以內之衛星追蹤站資料)，據以進行定位定向系統後處理，以確保成果點雲品質。接續利用軌跡解算軟體檢核軌跡分布以及解算精度。

(2) 無人機光達掃描點雲處理

使用 RIEGL 原廠建議之套裝軟體 RiPROCESS 融合定位定向資料進行後處理以及點雲平差計算，解算後輸出 LAS 格式點雲資料，並保留點雲的地面三維坐標值、反射強度值、回波順序、GNSS 時間戳記等資料。

(3) 點雲分類與編修

採用 Microstation 進行點雲自動化分類，再以人工編修方式全面確認點雲分類成果，點雲人工分類畫面如圖 11。經濾除植被後之點雲資料，如圖 12。

(4) 數值模型 DEM 製作

利用編修後的地表點雲，以 QTM LiDAR 點雲處理軟體進行規則化網格內插為 10cm 解析度 DEM，111 年 11 月 05 日及 111 年 11 月 10 日 DEM 成果如圖 13。

3.4 地面光達掃描

本計畫使用 UAV 空載光達進行上部地形點雲資料收集外，由於 UAV 係由空中向地面正向之掃描，其對於側向的資訊如地形倒懸情況則無法獲得點雲資訊，故本案同時使用地面固定式光達掃描儀(RIEGL VZ-400i)進行全區邊坡的側向掃描，期能更全面完整的收集現況地形資訊，亦希望透過不同時期對坍塌區邊坡的掃描比對以確認是否仍有整體坍塌的情況，並作為邊坡土方清除作業之參考。故分別於 11 月 4、8 日二日進行坍塌邊坡掃描，11 月 8、9、10 日三天進行邊坡變異監測，作業統計如表 7。

3.4.1 坐標系統

平面坐標使用內政部國土測繪中心 e-GNSS 即時動態坐標系統，坐標系統為內政部公佈之 TWD97[2010]國家坐標系統；高程系統依據內政部公告之大地起伏轉換高程至 TWVD2001 正高系統。

並依據本案於現地布設之 2 個現地特徵點 ST01 以及 ST02 作為點雲成果之坐標轉換基準點。

3.4.2掃描作業

使用 RIEGL VZ-400i 地面光達掃描儀進行掃描作業，儀器參數規格如表 8。針對邊坡坍塌區分別於 11 月 4 日及 11 月 8 日各進行一次坍塌區邊坡地

面光達掃描，掃描作業如圖 14。

(1)11 月 4 日坍塌區掃描：

共計架設 28 處掃描站，掃描站分布如圖 15，原始光達點雲約 15,000 萬點，掃描點雲須經拼接、清除雜訊及雜點，以及濾除非地面點及植被等保留地面點，光達點雲成果如圖 16。

表 6 RIEGAL Mini-Vux-1-UAV 規格參數 (摘錄自：迅聯光電有限公司，2020)

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	尺寸 (mm)	243×111×85
	重量 (g)	1600
	IP 防護等級	IP64
	最大測量範圍(m, 物體反射率)	170, 20
	掃描模式	旋轉鏡
	掃描速度 (轉/秒(等於次/秒))	10-100
	點雲資料率(點/秒)	100,000
	測距準確度(Accuracy) (mm)	15
	測距精確度(Precision) (mm)	10
	最多回波數	5, 全波形
	FOV (°)	360

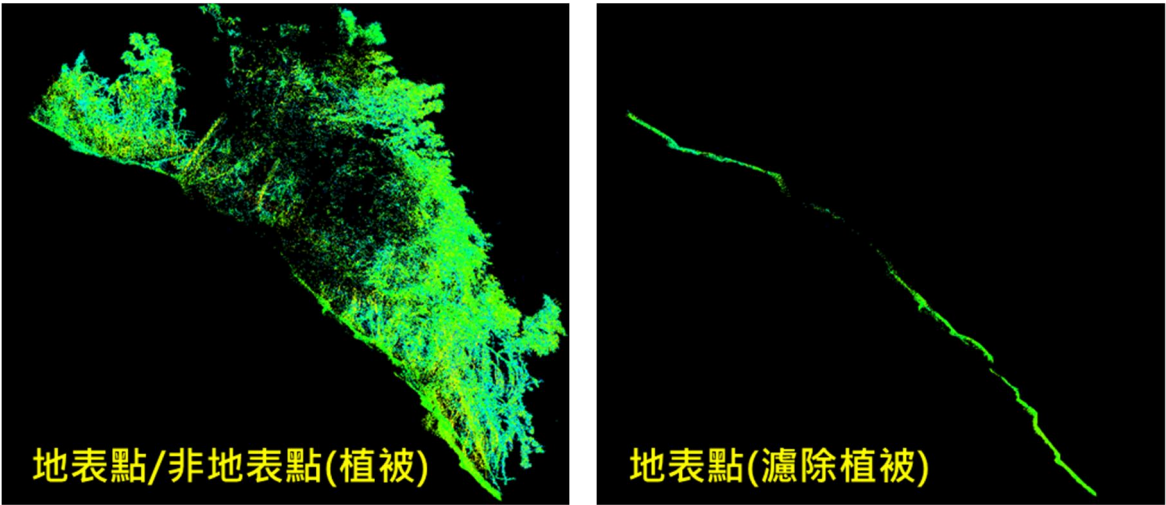


圖 11 點雲編修分類成果示意圖

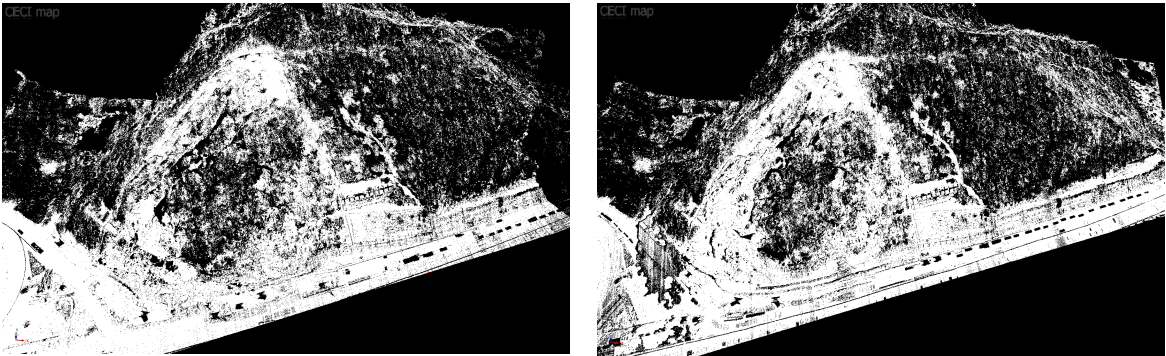


圖 12 濾除植被後之點雲成果

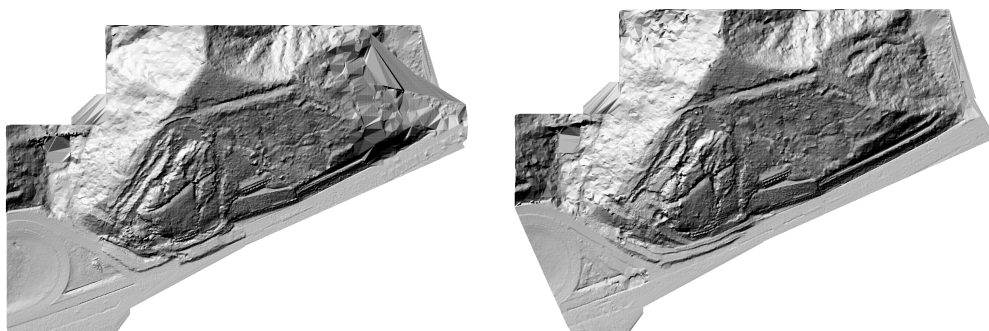


圖 13 UAV 光達 DEM 模型



圖 14 地面光達掃描作業

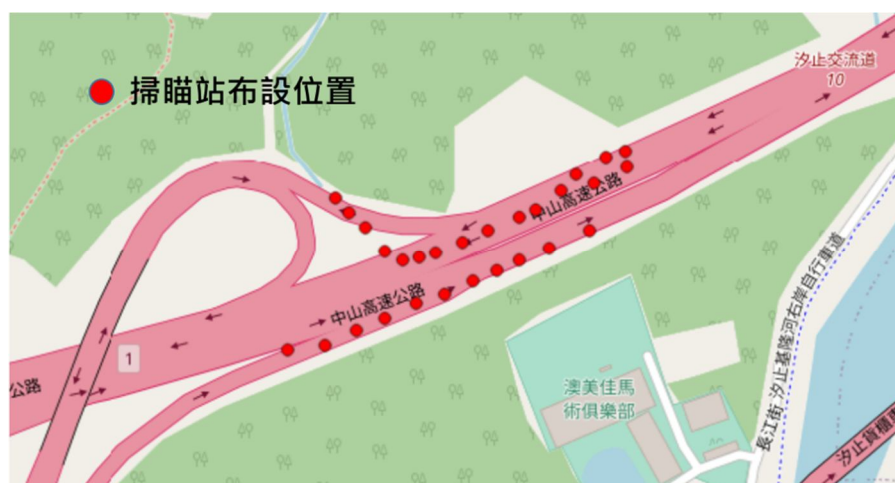


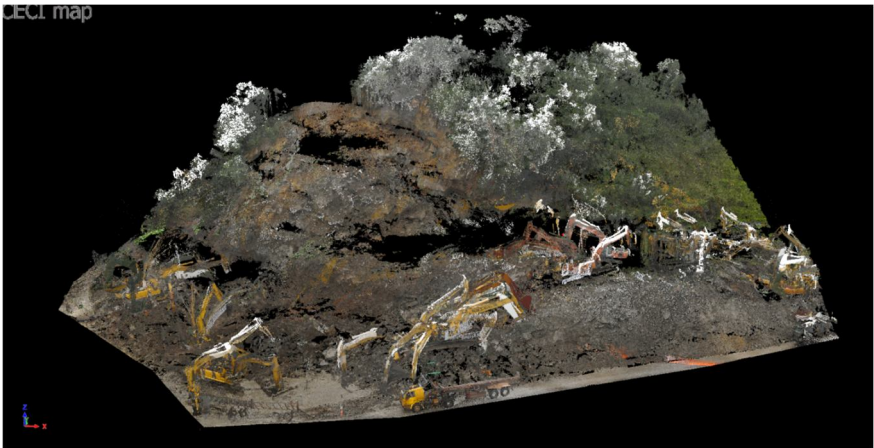
圖 15 光達掃描站分布圖(111.11.04)

表 7 地面光達作業項目及主要成果

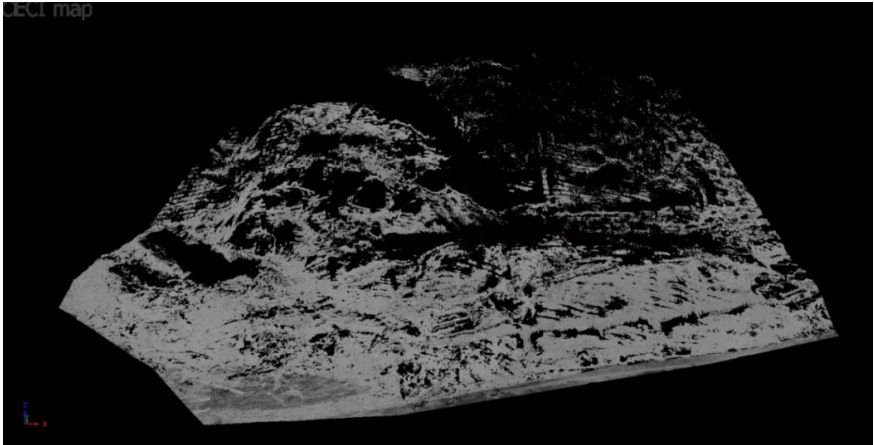
執行日期	主要工作內容及成果
111.11.04	土石坍滑區掃描，3D 點雲
111.11.08	土石坍滑區掃描，3D 點雲
111.11.08	裸露邊坡斷面監測，12:00~15:30(單站@30min)，共 6 筆
111.11.09	裸露邊坡斷面監測，10:00~15:30(單站@30min)，共 12 筆
111.11.10	裸露邊坡斷面監測，10:30(單站)，共 1 筆

表 8 RIEGL VZ-400i 基本規格參數

儀器圖片	參數名稱	規格參數
	掃描型式	脈衝式
	測量速率	42,000~500,000 (meas./sec)
	最大測量範圍	1.5m~800m
	精度	3mm
	視野範圍 (FOV)	100° 垂直 360° 水平
	數位相機	Nikon D850 (4,575 萬畫素)



(a) 原始光達點雲



(b) 濾除非地面點及植被後
圖 16 地面光達點雲成果(111.11.04)

(2)11 月 8 日坍滑區掃描：

共計架設 18 處掃描站，掃描站分布如圖 17，原始光達點雲約 18,000 萬點，掃描點雲須經拼接、清除雜訊及雜點，以及濾除非地面點及植被等保留地面點，光達點雲成果如圖 18。

3.4.3地面光達點雲分析

掃描資料後處理使用 RIEGL 原廠建議之套裝軟體 RiSCAN PRO 進行點雲拼接、雜點清除及植被濾除等工作；另使用 Global Mapper 軟體進行點雲分類及萃取地面點雲資料。原始點雲資料經濾除非地面點及植被後計算 DEM 資料(如圖 19)，並將二期之 DEM 成果套疊後，可明顯看出工程進行中邊坡斷面土方的變化情形(如圖 20)。

3.5 地面光達掃描監測

於搶修期間因考量邊坡土石仍有滑動之風險(如圖 21)，滑動將可能影響清運之作業人員與機具

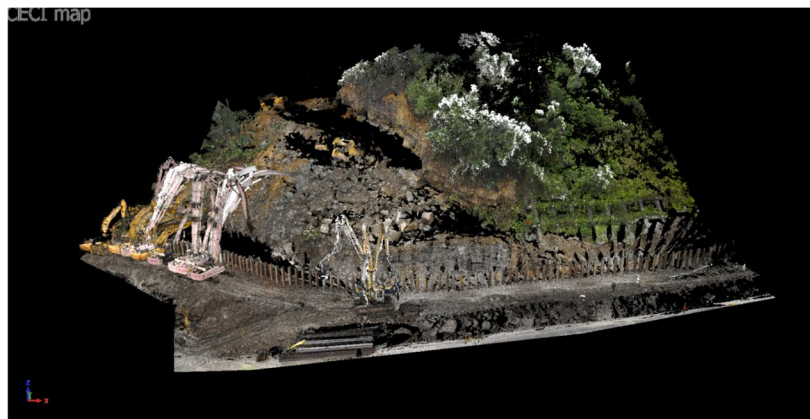
安全，故於現場選定該處可能坍滑之坡面位置使用地面固定式光達掃描儀(RIEGL VZ-400i)進行定時定點之斷面掃描監測。於 11 月 8 日 12:00 開始監測，並以此次掃描之資料作為初始值，提供後續變異之比對，以每隔 30 分鐘掃描一次作比對，掃描作業時間彙整如表 9，掃描坡面以及初始基準點雲成果(如圖 22)。

表 9 邊坡光達掃描作業日期與時間

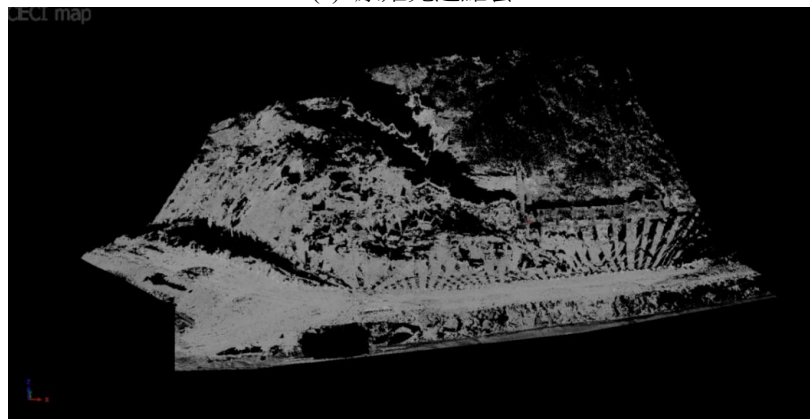
日期	時間	日期	時間
11/8	12:00	11/9	12:00
11/8	13:00	11/9	12:30
11/8	13:30	11/9	13:00
11/8	14:00	11/9	13:30
11/8	14:30	11/9	14:00
11/8	15:30	11/9	14:30
11/9	10:00	11/9	15:00
11/9	10:30	11/9	15:30
11/9	11:00	11/10	10:30
11/9	11:30		



圖 17 光達掃描站分布圖(111.11.08)



(a) 原始光達點雲



(b) 濾除非地面點及植被後

圖 18 地面光達點雲成果(111.11.08)

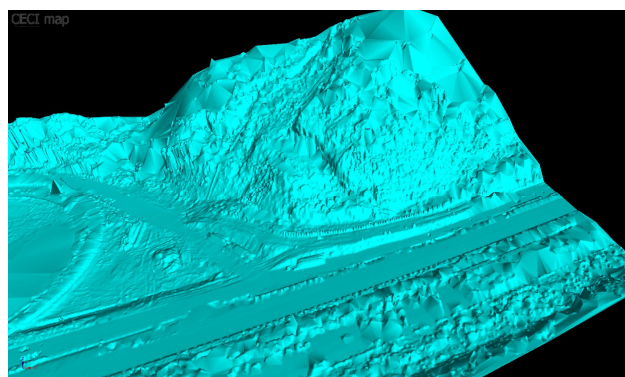


圖 19 地面光達 DEM 模型



圖 20 邊坡斷面土方變化情形



圖 21 地表岩屑隨時掉落之裸露危險岩面



圖 22 地面光達掃描坡面位置與基準面點雲(111.11.08)

3.5.1 監測作業方式

於固定時間掃描同一坡面(如圖 22)，並取 3 條斷面(A1、A2、A3)進行比較(如圖 23)。

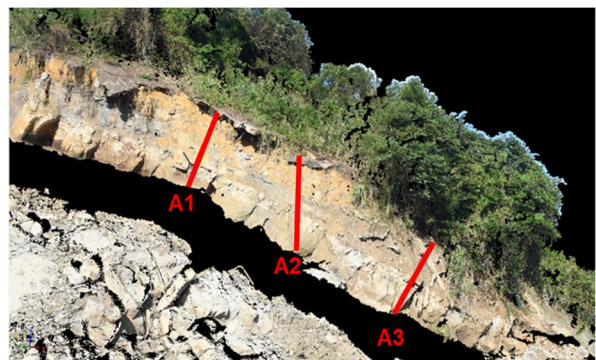


圖 23 斷面取樣位置

3.5.2 監測結果

(1) A1 斷面：

各期斷面資料比對如圖 24，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 4.2 cm。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

(2) A2 斷面：

各期斷面資料比對如圖 25，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 7.7 cm。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

(3) A3 斷面：

各期斷面資料比對如圖 26，最後一筆(11.10 AM10:30)監測資料與初始值資料(11.08 AM12:00)比較，最大差值約 7.2 cm。由於監測期間邊坡仍持

續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

3.6 全測站雷射經緯儀監測

由於災區作業在邊坡尚未穩定之情況下，對於搶修人員機具仍有存在一定的風險，為使工作人員在安全無虞的情況下安心作業，應確保各項監測數據之正確可靠，故本案針對地面光達監測的同一坡面，另選擇 5 處特定位置同時以全測站雷射經緯儀施測該等特定位置之三維坐標，以作為光達掃描監測結果之雙重確認。於 111 年 11 月 08 日每 5~10 分鐘施測該等特定點 1 次絕對坐標，執行時間分別為 11:42~12:20 及 13:23~15:11，計施測 5 個位置，共 26 筆資料，將各點每次施測成果均與第一次初測值比對，比對結果如表 10。由於監測期間邊坡仍持續有挖掘或堆積之作業，故監測結果亦須將此因素列入考量分析。

表 10 特定點位測量結果比較表

單位：公尺(m)

項次	點號-時間	N 坐標	E 坐標	ΔN	ΔE	Z	ΔZ
1	A1-11:42	2774306.687	316240.569			42.132	
2	A1-11:45	2774306.690	316240.568	0.003	-0.001	42.133	0.001
3	A1-11:50	2774306.691	316240.569	0.004	0.000	42.132	0.000
4	A1-11:55	2774306.687	316240.567	0.000	-0.002	42.139	0.007
5	A1-12:00	2774306.689	316240.569	0.002	0.000	42.135	0.003
6	A1-12:05	2774306.688	316240.571	0.001	0.002	42.136	0.004
7	A1-12:10	2774306.688	316240.573	0.001	0.004	42.134	0.002
8	A1-12:15	2774306.688	316240.574	0.001	0.005	42.133	0.001
9	A1-12:20	2774306.690	316240.576	0.003	0.007	42.127	-0.005
10	A2-13:23	2774304.175	316242.638			41.002	
11	A2-13:29	2774304.176	316242.638	0.001	0.000	41.004	0.002
12	A2-13:34	2774304.170	316242.633	-0.005	-0.005	40.991	-0.011
13	A2-13:39	2774304.171	316242.634	-0.004	-0.004	40.992	-0.010
14	A2-13:44	2774304.171	316242.635	-0.004	-0.003	40.993	-0.009
15	M1-14:10	2774311.653	316232.195			42.43	
16	M1-14:20	2774311.645	316232.195	-0.008	0.000	42.435	0.005
17	M1-14:29	2774311.672	316232.234	0.019	0.039	42.435	0.005
18	M1-14:38	2774311.673	316232.235	0.020	0.040	42.435	0.005
19	M2-14:10	2774310.603	316234.369			42.384	
20	M2-14:20	2774310.613	316234.377	0.010	0.008	42.386	0.002
21	M2-14:29	2774310.608	316234.380	0.005	0.011	42.389	0.005
22	M2-14:38	2774310.620	316234.380	0.017	0.011	42.381	-0.003
23	K1-14:41	2774302.607	316246.798			42.733	
24	K1-14:56	2774302.600	316246.793	-0.007	-0.005	42.727	-0.006
25	K1-15:01	2774302.598	316246.792	-0.009	-0.006	42.725	-0.008
26	K1-15:11	2774302.606	316246.796	-0.001	-0.002	42.729	-0.004

(高速公路局北區養護工程分局，2023)

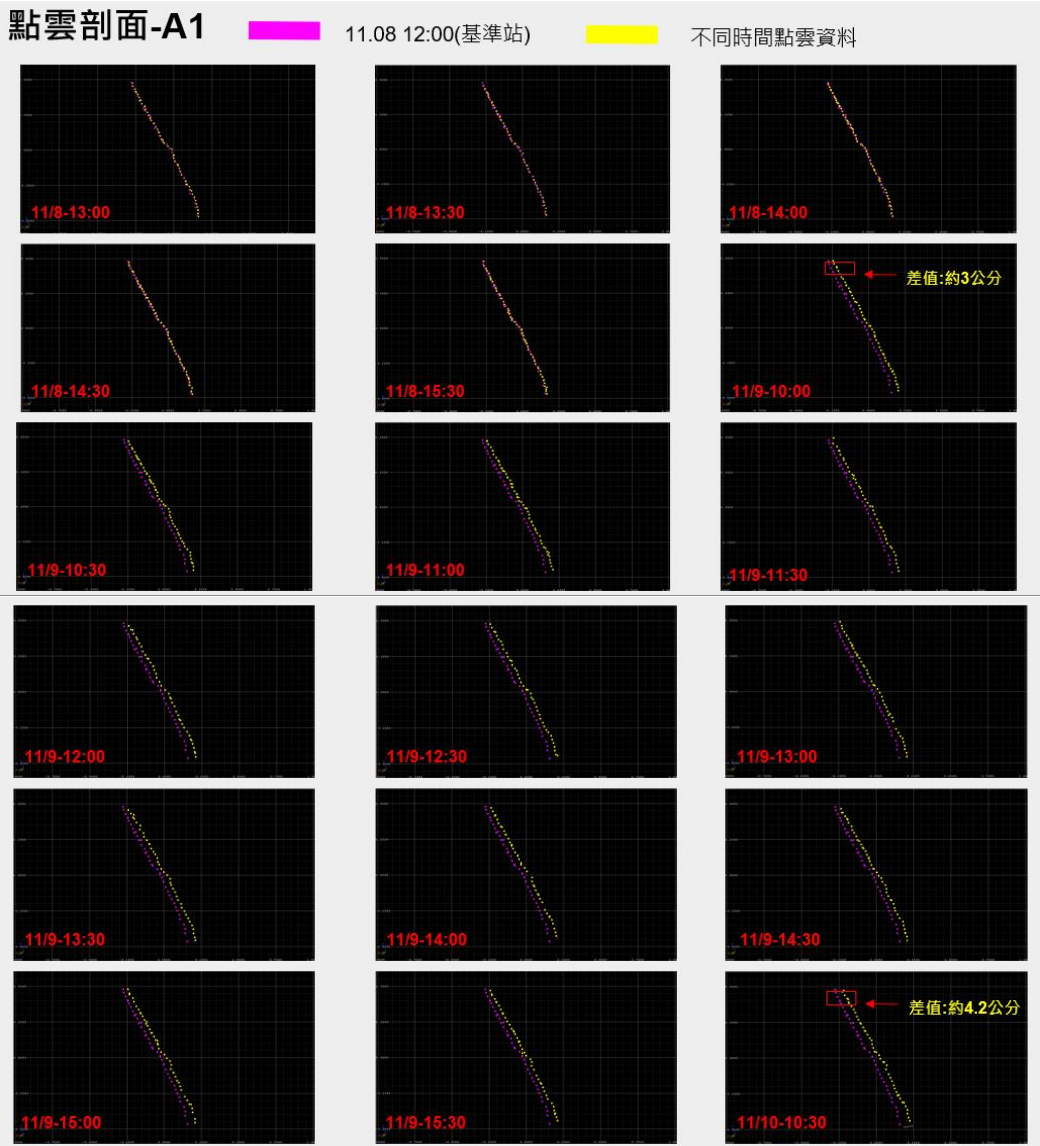
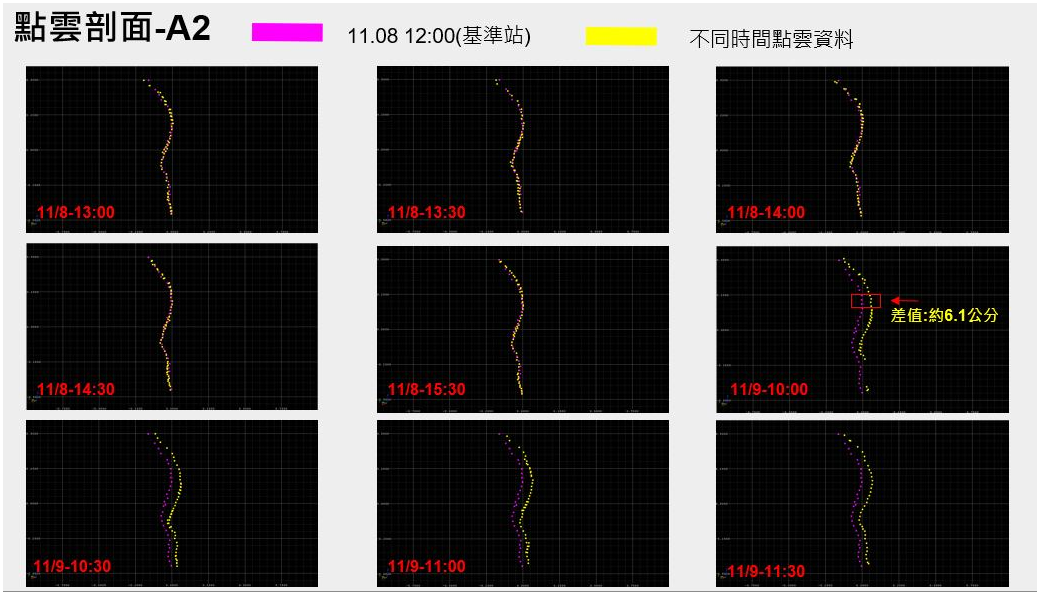


圖 24 A1 斷面各時期比對結果



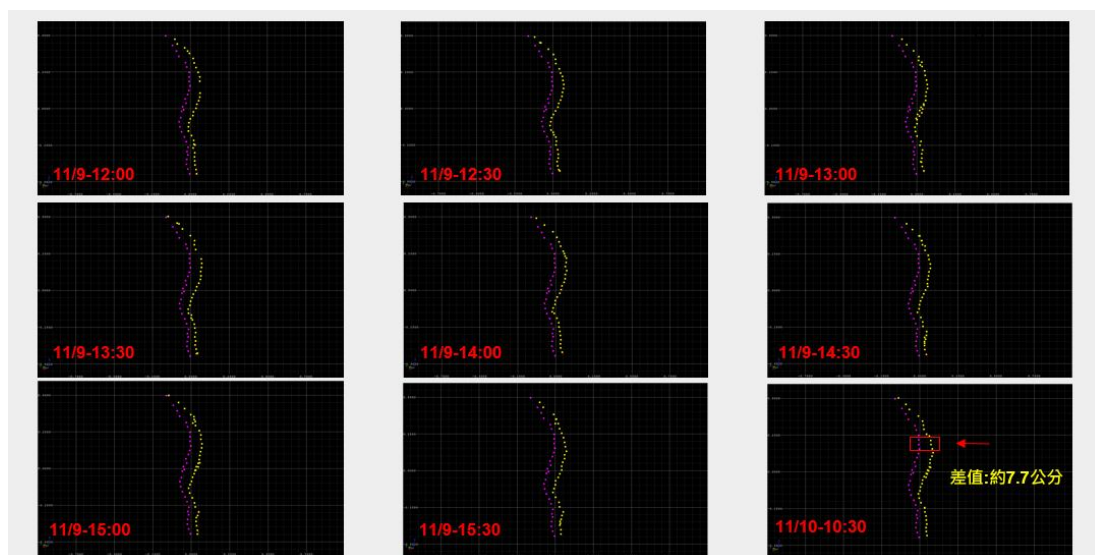


圖 25 A2 斷面各時期比對結果

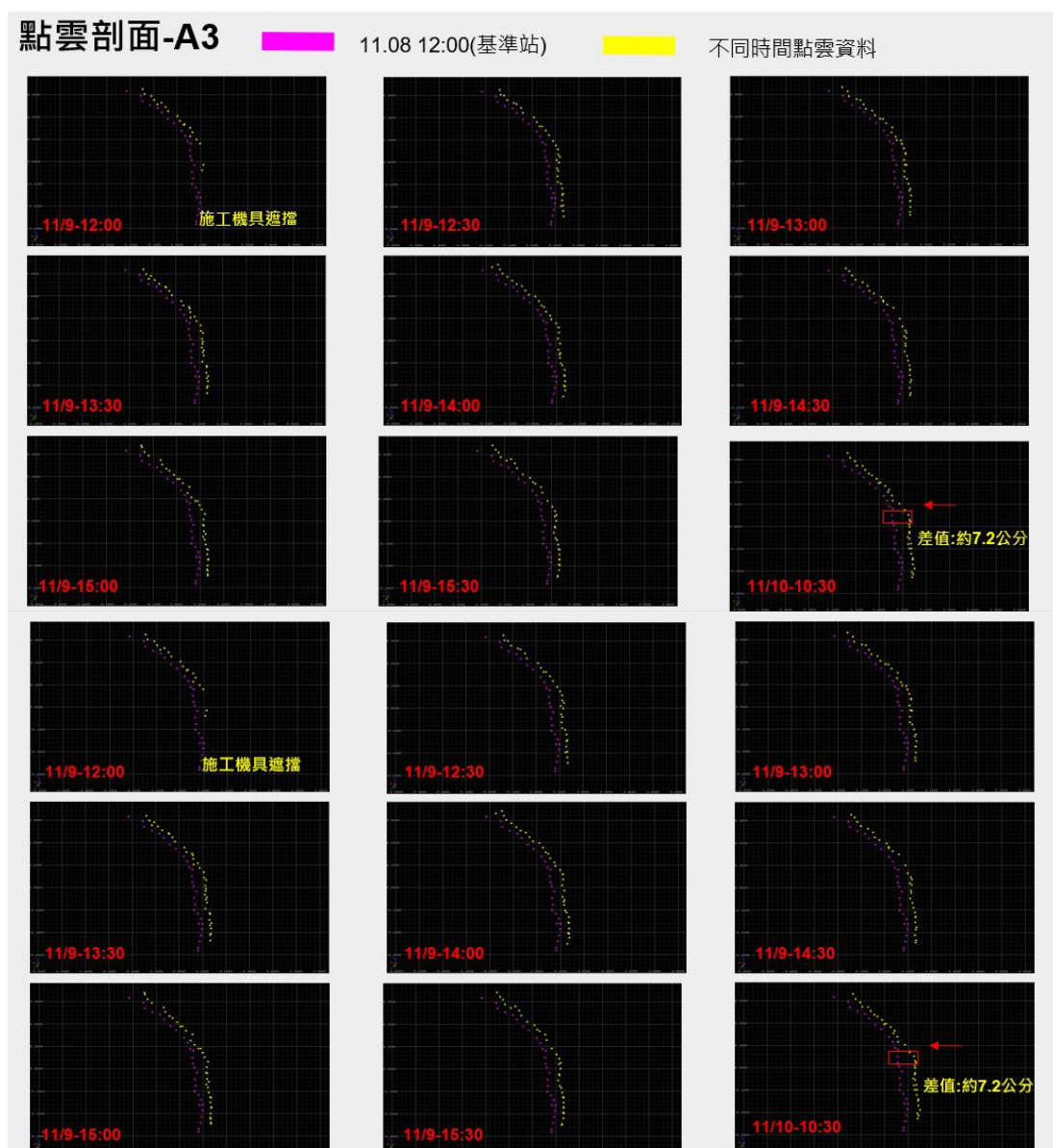


圖 26 A3 斷面各時期比對結果

4. 結論與建議

本項救災階段測量調查作業，作業期間為 111 年 11 月 2 日至 111 年 11 月 8 日，作業目的主要為因應緊急搶修需求，迅速提供災害現地地形情況和即時的訊息輔助搶修，並利於現地指揮中心作業及突發狀況之即時應變以確保救災安全，故相關測量成果皆為當下階段性或臨時性的成果。本文僅針對災害區空間資訊收集之遙測技術探討說明提供參考，而對於邊坡、地質或工程等專業評析議題，則可藉由本遙測技術所收集到之相關地形資訊作為後續評析及復健等工程設計參考。

由於緊急搶修作業時間緊迫，整體作業流程由第一時間緊急動員 UAV 進行空拍及光達掃描、建立地面控制點，快速取得災區地形現況，建立 3D 地形模型，標註災害範圍，並利用內政部 5 m DEM 資料概估坍塌範圍土方量，提供救災人員進行動線安排及清運規劃。於搶修期間為避免其他未坍塌處因土石鬆動而再次坍塌，應用地面光達及全測站經緯儀進行定點定時監測，隨時掌握地形變化，提供搶修決策並確保搶修人員安全。各項作業過程順暢，有效的收集地形資訊協助救災作業。針對本次任務執行結果所遭遇困難限制及建議，提出以下幾點供未來遭遇此類災害搶修作業時參考：

(1) 作業限制：

- A. 天候影響：天候情況不佳連續下雨，影響測量作業進行。
- B. 二次災害：災害區土石鬆動且地表濕滑泥濘，邊坡有再次坍塌的可能，作業安全風險高。
- C. 測量精度：在產製災區 DEM 的過程，由於作業時程緊迫，對於測量控制點之來源及分布、共同基準點之引用、天候環境、測量方式等均不能等同一般正常作業，故在精度評估上難有一可靠的基準；又加上對比既有資料的來源基準不一(如災前地形資料等)，此方面也可能會造成成果些許差異。
- D. 測量與搶修工程同時進行：工程機具不斷進出，影響測量作業之效率。

(2) 未來建議：

- A. 應即時彙整對於測量的需求：因緊急搶修作業時間緊迫，針對不同的需求綜合評估、搭配使用相應的測量技術，使測量資訊能發揮效用。
- B. 審慎評估選用測量設備：多項設備一起作業或多次作業，測量設備的資訊整合及資料的一致性須事先審慎評估，以避免無效作業。
- C. 多項技術同時應用須考量成果界面銜接：應優先布設共同使用之控制點，以利相關測量作業能有一致的控制基準，亦可作為後續施工之依據。
- D. UAV 空拍作業須掌握時效即刻進行：如按民航局一般程序申請航飛，恐將緩不濟急，建議對於緊急救災之無人機空拍能有特許程序，以掌握救災時效。
- E. 本文主要說明災害緊急搶修作業所作之監測應用，對於未來邊坡穩定之監測，建議可應用合成孔徑雷達(SAR)技術進行廣域之監測，藉由定期監測數據進行潛勢分析，達到預警之效果。

本文僅針對災害區空間資訊收集之遙測技術探討說明提供參考，而對於邊坡、地質或工程等專業評析議題，則可藉由本遙測技術所收集到之相關地形資訊作為後續評析及復健等工程設計使用。

致謝

另由於本次任務作業時程急迫，緊急動員，也感謝自強工程顧問公司配合緊急調度支援 UAV 光達，經緯儀，地面光達等人力設備。本次作業動員無人機空拍、無人機光達掃描、地面光達掃描、全測站雷射經緯儀等多項先進設備技術共同作業，各項遙測監測技術確實對災區搶修復建作業發揮實質效用，使搶修行動能在安全監測情況下進行，順利完成。

參考文獻

- 先創國際股份有限公司，2024。DJI 禪思 Zenmuse P1 全片幅鏡頭，
<https://www.esentra.com.tw/product/dji-zenmuse-p1/>，引用 2024/09/20。[SENTRA, 2024. DJI Zenmuse P1 integrates a full-frame sensor,

- Available at: <https://www.esentra.com.tw/product/dji-zenmuse-p1/>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 李璟芳、黃韋凱、曹鼎志、張玉萍、冀樹勇，2015。微地形判釋應用於土石流災害之三維數值模擬，中華水土保持學報，46(2)：96-105。[Lee, C.F., Huang, W.K., Tsao, T.C., Chang, Y.L., and Chi, S.Y., 2015. A study of the numerical simulation of debris flow hazard combined with micro-photography interpretation, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 46(2): 96-105. (in Chinese)]
- 迅聯光電有限公司，2020。RIEGL UAV 光達，<https://www.linkfast.com.tw/?action=product&id=17>，引用2024/09/20。[LinkFast Technology Co., Ltd., 2020. RIEGL UAV LiDAR, Available at: <https://www.linkfast.com.tw/?action=product&id=17>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 高速公路局北區養護工程分局，2023。國道 1 號南下路段 10.1 K 邊坡坍塌緊急遙測科技監測報告。[Northern Region Branch Office, Freeway Bureau, Ministry of Transportation and Communications, 2023. Guo dau 1 hau nan shia lu duan 10.1 K bian po tan hua jin ji yau tse ke ji jian tse bau gau. (in Chinese)]
- 國家災害防救科技中心，2020。臺灣歷史天然災害統計，<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/Cli mateDetail/BAL00000005>，引用 2024/09/20。[National Science and Technology Center for Disaster Reduction, 2020. Taiwan li shr tian ran tzai hai tung ji, Available at: <https://dra.ncdr.nat.gov.tw/Frontend/Disaster/Cli mateDetail/BAL00000005>, Accessed 2024/09/20. (in Chinese)]
- 黃宇謙、胡啟文、闕嘉宏，2025。UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡災防應用探討，交通部運輸研究所。[Huang, Y.C., Hu, C.W., and Chueh C.H., 2025. Exploring the Application of UAV Combined with Deep Learning for Slope Disaster Prevention in Highway Bureau Operations, Institute of Transportation Ministry of Transportation and Communications. (in Chinese)]
- 劉鎮毅、陳建璋、魏浚紘，2024。結合地面與無人空中載具光達推估大葉桃花心木人工林林分材積，航測及遙測學刊，29(2)：91-114，DOI：10.6574/JPRS.202406_29(2).0003。[Liu, C.Y., Chen, J.C., and Wei, C.H., 2024. Integrating terrestrial and airborne laser scanning to estimate stand volume of *Swietenia macrophylla* king plantations, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(2): 91-114, DOI: 10.6574/JPRS.202406_29(2).0003. (in Chinese)]
- 蔡富安，2020。多元遙測災害調查評估與分析，臺灣研究亮點，https://trh.gase.most.ntnu.edu.tw/tw/article/content/158?utm_source=chatgpt.com，引用 2025/05/19。[Tsai, F., 2020. Versatile remote sensing and spatial analysis for hazard investigation, Taiwan Research Highlight, Available at: https://trh.gase.most.ntnu.edu.tw/tw/article/content/158?utm_source=chatgpt.com, Accessed 2025/05/19. (in Chinese)]
- 謝有忠，2016。以多期數值地形資料評估山崩區及河道地形之變遷，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，DOI：10.6342/NTU201603713。[Hsieh, Y.C., 2016. Evaluation of landslide area and fluvial changes using multi-period digital elevation models, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC, DOI: 10.6342/NTU201603713. (in Chinese)]
- 鍾鳴峰，2024。無人機智慧技術於山坡地水保工程

- 與工程災害復建地形測繪精進應用，水保技術，18：32-45。[Chung, M.F., 2024. Advanced applications of smart drone technology in slope land soil and water conservation engineering, *Journal of Soil and Water Conservation Technology*, 18: 32-45. (in Chinese)]
- Ghorbanzadeh, O., Meena, S.R., Blaschke, T., and Aryal, J., 2019. UAV-based slope failure detection using deep-learning convolutional neural networks, *Remote Sensing*, 11(17): 2046, DOI: 10.3390/rs11172046.
- Khanal, M., Hasan, M., Sterbentz, N., Johnson, R., and Weatherly, J., 2020. Accuracy comparison of aerial lidar, mobile-terrestrial lidar, and UAV photogrammetric capture data elevations over different terrain types, *Infrastructures*, 5(8): 65, DOI: 10.3390/infrastructures5080065.
- Tamimi, R., and Toth, C., 2024. Accuracy assessment of UAV LiDAR compared to traditional total station for geospatial data collection in land surveying contexts, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-2024, 421–426, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-421-2024.

Integration of Multi-Remote Sensing Technologies for Slope Disaster Recovery on Highways

Hong-Kuei Cheng ¹ Kweishr Li ² Hsing-Hua Chiang ^{3*} Wen-Liang Chueh ³

Abstract

Taiwan's unique topography and environmental conditions make it highly susceptible to natural disasters, which often result in significant environmental damage and pose threats to human lives and property. Given the urgent nature of disaster response, it is imperative to obtain timely and accurate information regarding affected areas. Furthermore, the risk of secondary disasters must not be underestimated, underscoring the importance of comprehensive spatial data collection in disaster-stricken regions. The completeness and accuracy of such data directly influence the efficiency and effectiveness of emergency response and recovery operations. This study presents a case in which a combination of remote sensing technologies—including Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for aerial imagery and 3D reconstruction, Light Detection and Ranging (LiDAR) for point cloud modeling, and total stations for geodetic surveying—was employed to rapidly acquire spatial information in disaster areas. The integrated approach provided critical support for emergency repair and post-disaster reconstruction, demonstrating the value of adopting diverse technologies to meet varying operational requirements.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Light Detection and Ranging(LiDAR), 3D Modeling, Point Cloud

¹ Associate Vice President, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

² Director, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

³ Deputy Manager, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

* Corresponding Author, E-mail: chsh@ceci.com.tw

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: May 19, 2025

Accepted Date: Sep.15, 2025

從公共設施管線之養護需求探討竣工圖資建置管理 -以桃園航空城區段徵收案為例

藍士堯¹ 李元良² 黃于峰³ 劉新達⁴ 林秋芬^{5*} 陳竣璿⁵

摘要

道路施工常因圖資不準確導致管線挖損，主因為施工單位以設計圖代替竣工圖，主要多為管線空間位置、埋設深度等資訊的不正確，其原因為施工單位使用設計圖當作竣工圖提交給養護單位，導致管線位置及埋深等資訊與現場狀況不相符。

為克服以上問題，桃園市航空城工程處導入 3D GIS 系統，整合 BIM 設計圖、管線實測點位及 GML 交換格式資料，藉以提升圖資準確性。

為確保圖資的品質，竣工圖資需通過系統合理化檢核機制的驗證，確保上傳資料合理性，並由監造單位以人工檢核管線圖資之「連續性」、「完整性」、「正確性」三個面向，再將竣工圖資匯入至三維公共管線資料庫，以有效提升圖資品質，完善未來航空城計畫區域管線養護需求，減少挖掘時管損機會及生命財產損失。

關鍵詞：三維地理資訊系統、竣工圖資源頭管理、公共管線圖資品質

1. 前言

桃園航空城計畫區區段徵收工程幅員廣大，總開發面積達到 1,756 公頃 (ha)，為因應大範圍工程開發，將其施工範圍分為十個分標範圍，分別由十個施工範圍進行工程開發，過程中參與角色眾多，包含主管機關、專管、監造、統包商，工程內容包括整地、鋪設道路、埋設公共管線、新建橋梁等公共建設。

因應整個航空城範圍諸多且繁雜之管理需求，桃園市政府航空城工程處(以下簡稱航工處)在專案管理系統中導入三維空間資訊概念，於航空城工程資訊系統 (Aerotropolis Construction Information System, ACIS) 中，整合三維地理資訊系統 (3D Geographic Information System, 3D GIS) 以完善空間資訊管理工作。隨工程推進逐步紀錄建物拆遷、樹

木移植、施工品質、進度推展等作業，提供管理人員瞭解各分標工作執行細節，同時整合設計 BIM 立體工程圖說、各時期衛星影像、實測點位、管線竣工圖、工地現場之施工影像(CCTV)、IOT 設備等圖資，並於三維地理資訊系統平台展示，提供管理單位更加視覺化的 3D 管理介面(藍士堯等，2023)，如圖 1。

為發揮 3D GIS 優勢，航工處以施工進度的角度出發，隨著工程的進行，要求各標統包商將現地實際測量的管線設施資料透過資訊圖台上傳，同時設定相關的資料格式及檢核規則，確保蒐集的管線測量資料合理且正確。考量到未來航空城所建置的竣工管線圖資完工後，將移交予桃園市政府養護工程處(以下簡稱養工處)維護及管理，故於施工契約內管線資料建置的工項納入養工處之「三維公共設施管線資料格式與作業規範」，將管線測量工作納

¹ 桃園市政府航空城工程處 副處長

² 桃園市政府航空城工程處工程管理科 科長

³ 桃園市政府航空城工程處工程管理科 聘用技術師

⁴ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 經理

⁵ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 工程師

* 通訊作者, 電話: 02-87973567 轉 3148, E-mail: fen@ceci.com.tw

收到日期: 民國 114 年 02 月 13 日

修改日期: 民國 114 年 05 月 09 日

接受日期: 民國 114 年 09 月 15 日

入工程契約中，並依據國土管理署之「公共設施管線資料標準」以地理標誌語言(Geography Markup Language, GML)交換格式建立管線竣工圖資，並根據養工處之規範，要求各廠商須一併提供施工後的管線設施測量資料、施測點位照片及 GNSS 測量儀器照片等作為佐證資料以提升圖資的正確性。

本文主要說明航工處蒐集各標施工廠商之設計 BIM 工程圖說，並透過三維地理資訊系統展示設計 BIM 模型、實測點位及竣工圖資 GML 後，將設計 BIM 模型及竣工管線圖資於三維場景中進行套疊確認施工廠商是否按圖施工，以及將竣工管線圖資與現地實際測量的點位進行疊合確認圖資正確性。

2. 公共設施管線維護管理遭遇課題

過往大範圍工區的資訊不易整合與掌握，原本繳交之工程竣工圖為 CAD 檔，不符合養護單位的需求，故導入養工處之「三維公共設施管線資料格式與作業規範」，並依國土署「公共設施管線資料標準」建立 GML 圖資，惟建置完成的圖資尚無一致的標準確保其品質，故綜整出三大課題。

2.1 管線資訊完整性

以往在工程契約中雖有規範施工完畢後，施工

單位須繳交竣工資料，但檔案格式多為 CAD 檔或 PDF 檔，且使用光碟或硬碟等離線儲存裝置，繳交完畢後雖符合契約規定，但以養護單位於管理上來說相當不便，且容易造成多種版本的問題，而實務上的使用也不容易，其中 PDF 雖容易檢視，但並無法與其他管線進行套疊，而 CAD 檔則要有特定軟體才能檢視。工程圖說上管線屬性標註的方式多以專業人士的角度進行記錄，一般人無法輕易閱讀及理解，且雖提交的檔案為竣工圖，但大多為示意圖，無法完整且正確的紀錄管線編號、空間位置、建置日期及埋深，如圖 2，導致於後續維護及管理上會相當的困難。

2.2 管線圖資品質正確性

因管線主要埋設在地底下，且埋設時間大多已超過 10-20 年以上，且依照當時的技術，易造成圖面模糊或不清楚的問題，且大多數為了讓圖面容易閱讀，會以示意圖的方式繪製，導致管線的位置並不是正確的，就容易造成後續維護上的困難，也容易造成管線挖損，危害到人民安全。現在要確認已埋設管線之正確位置及深度，需藉由現地開挖調查、透地雷達或開孔等作業方式來確認及提高管線的正確性，但費用上會相當的可觀，故為了避免後續再花時間花錢來確認管線資料，不如在埋設後覆土前就先定位管線位置，並用測量結果來建置管線資料，以確保每筆管線都是正確的。

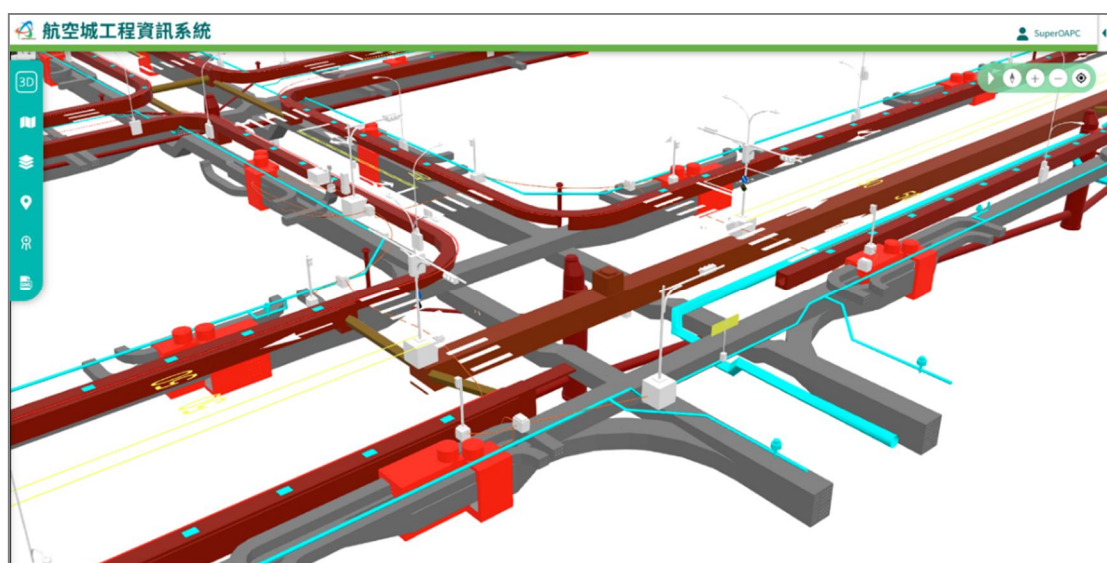


圖 1 桃園市航空城三維地理資訊系統

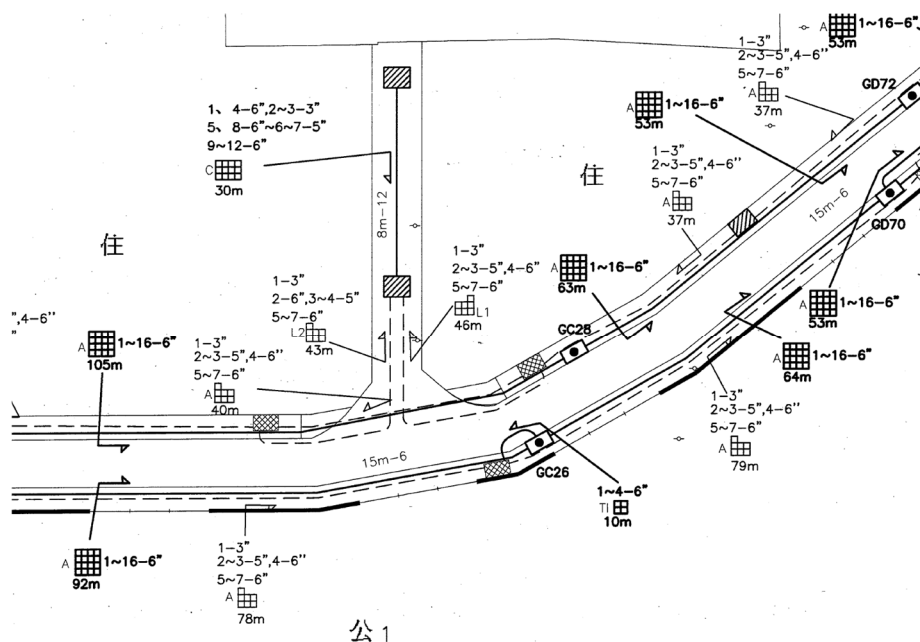


圖 2 桃園市早期區域開發電力管線竣工圖 CAD 檔

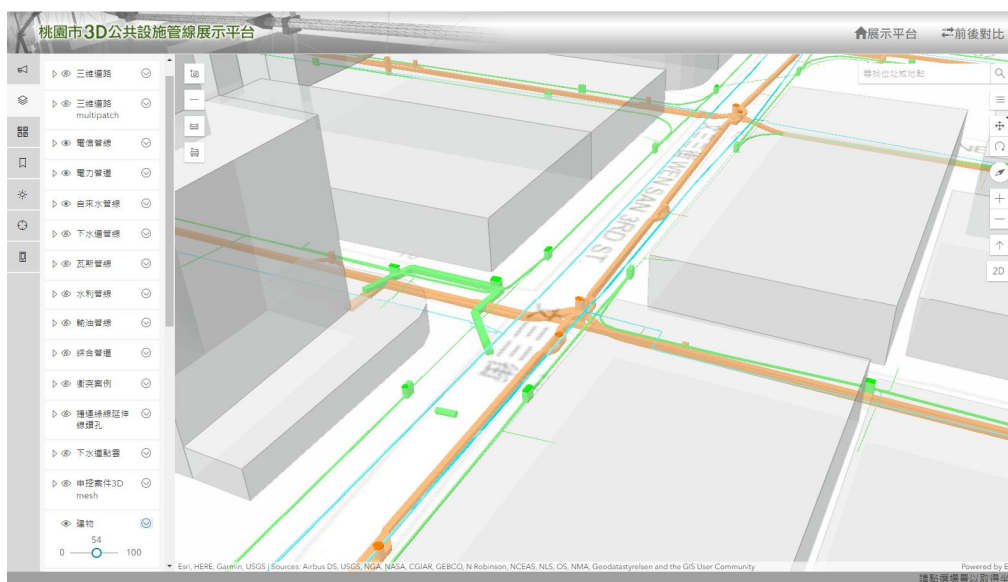


圖 3 桃園市道路挖掘管理系統 3D 圖台

2.3 管線圖資品質正確性

因 CAD 主要應用於施工圖說繪製，但在空間資訊管理上並不適合，故各縣市政府皆建置 GIS 系統來管理並建立公共管線資料庫，以往多為 2D GIS 系統，目前大多數都已經轉為 3D GIS 系統，如桃園市、台北市、新北市等道路挖掘管理系統，如圖 3。目前因資料標準的關係，管線圖資均為 GIS 格式，CAD 已無法使用，需藉由人工方式轉檔為 GIS 格式後方可使用，這往往需要耗費大量人力，且因 CAD 主要是以設計、施工單位的角度去繪製的平面

圖，相對會較為專業，一般人無法輕易閱讀及理解。

3. 運用 3D GIS 建置公共設施管線竣工圖

3.1 可視化三維管理平台

現有的資訊系統結合二維的 GIS 技術，搭配各種空間地理資訊達成業務管理需求已相當成熟。隨著科技的進步，硬體基礎設施不斷的完善，網路傳輸速度越發快速，GIS 的應用逐漸朝向三維立體、

視覺化的方向發展。相較於二維的 GIS 平台，三維的場景及資料更貼近真實世界複雜的空間資訊，其資料的發展及格式亦配合三維化邁進，現已有諸多單位推行與建置三維地理資訊系統，如：桃園市 3D 公共設施管線展示平台、臺北市地下管線 3D-GIS 平台。

以桃園市 3D 公共設施管線展示平台為例，將電力、電信、瓦斯等公共管線設施，區域開發 3D Mesh、BIM 模型等三維圖資放置於三維圖台進行展示與應用，供養工處進行道路挖掘申請時，申請的管線單位可透過該平台查看地下三維管線狀況，以降低管線誤挖的機率與風險，如圖 4。

3.2 GML 介紹

地理標記語言(Geography Markup Language, GML)為 GIS 領域之開放標準，亦為 109 年內政部國土管理署「公共設施管線資料標準」中所規定之格式，主要用於表示和交換公共管線相關的地理空間數據，統一格式是為了讓管線資料能在不同單位或是機關交換時，可以免去格式不一致、或是於轉換時造成資料的遺失等問題，故而提出 GML 檔做為交換格式。

3.2.1 資料庫架構一致性

「公共設施管線資料標準」將公共設施管線分

為八大類型，包含電信、電力、自來水、下水道、供氣、水利、輸油及綜合管線，亦於 109 年將「工業用管線」納入，依據資料標準之規定設計並建置管線資料庫，將每種設施的屬性名稱及填寫型式制式化，如表 1 (內政部國土管理署，2020)，以確保所有管線相關數據在結構、格式和定義上保持一致，以便於數據的整合、交換與分析。

表 1 公共設施管線資料標準人手孔屬性資料表

中類	01					02				03	04			05	06	07	08	09
小類	01	02	03	04	05	01	02	03	04	01	01	02	03	01	01	01	01	01
屬性項目	● 一般電信	● 軍訊系統	● 警訊系統	● 有線電視系統	● 交通號誌系統	● 配電系統	● 路燈電力系統	● 交通號誌電力	● 輸電系統	● 自來水系統	○ 污水系統	○ 雨水系統	○ 合流系統	● 供氣系統	▲ 灌排系統	○ 輸油系統	● 共同管道	● 寬頻管道
類別碼	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
識別碼	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
管理單位	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
作業區分	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
設置日期	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
人手孔編號	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
孔蓋種類	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
尺寸單位	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
蓋部寬度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
蓋部長度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
閘門名稱															✓			
地盤高	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
孔深	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
孔蓋型態	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
使用狀態	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
資料狀態	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
內容物										✓					✓			✓
備註	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

符號說明：✓ 表有此屬性；● 表此小類 02 細類為「人手孔」、○ 表此小類 02 細類為「人手孔或人手孔及清除孔」；▲ 灌排系統 02 細類為「閘門」。

*下水道管線資料之小類 03 細類為「陰井」適用人手孔屬性項目。

*孔深欄位可由各機關利用地盤高及孔底高(舊)之差值換算得之，以利系統整體運用。



圖 4 桃園市 3D 公共設施展示平台

3.2.2 精度規範

依據國土管理署「公共設施管線資料庫系統建置案共通規格」第參點「公共設施管線孔蓋及設施物位置測量定位作業」規定公共設施管線及固定設施物調查，可採用全測站(Total Station)法，或實施 GPS 全球衛星定位測量。在測量定位精度部分，訂定設施物及孔蓋之精度要求分別為 30 公分(cm) 及 20 公分(cm)，以提供「公共設施管線資料庫」之相關應用。

3.3 管線實測作業流程

3.3.1 作業流程

航空城區段徵收工程現正於施工範圍內進行管線埋設、鋪設道路、新建橋梁等作業，其中進行管線埋設作業前，測量人員會依據設計圖對施工位置進行測量放樣，無誤後才於開挖位置進行下管作業，並對尚未覆土的管線設施進行管頂中心位置測量坐標，如圖 5，將收測的點位資料匯入 CAD 圖進行比對以確保按圖施工，無誤後才進行控制性低強度回填材料 (Controlled Low Strength Material, CLSM)澆灌及土方回填作業，整體作業流程如圖 6。

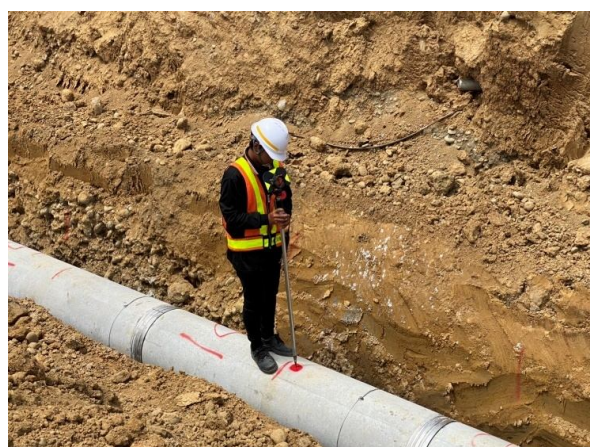


圖 5 管線測量照片(以污水管為例)

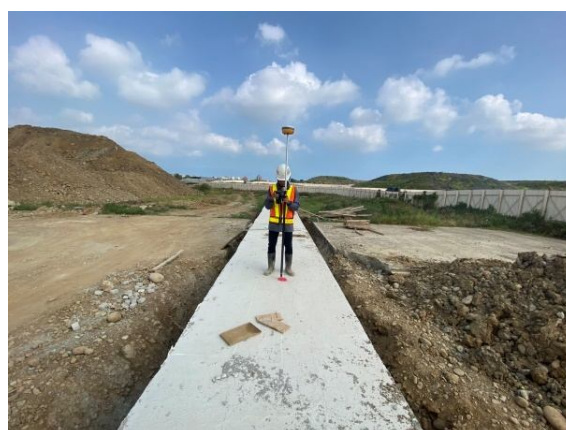


圖 6 管線實測作業流程

3.3.2 管線測量規範

實測點位為管線施工單位於施工過程中，對管線設施(如管線、人孔、箱涵等)以經認證之測量儀器進行測量作業所取得的點位資料，坐標系統採用 TWD97，高程為正高 TWVD2001，並依據國土署「公共設施管線資料庫系統建置案共通規格」進行管線埋深、人手孔深度、地盤高等高程及深度之統一測量。辦理公共設施管線及固定設施物調查，可採用全測站(Total Station)法，或實施 GPS 全球衛星定位測量。

根據國土署的規範，規定各施工廠商於管線施工後即測量管線坐標、拍攝施測點施工照片、GNSS 儀器測量結果畫面等資訊(如圖 7、圖 8)，以確保後續管線竣工資料的真實性及正確性，有助於提升桃園市公共設施管線資料正確性。



(a) 管線測點遠照



(b) 管線測點近照

圖 7 3D 管線實測點位照片範例



圖 8 3D 管線實測點位照片範例(GNSS 測量儀器畫面截圖)

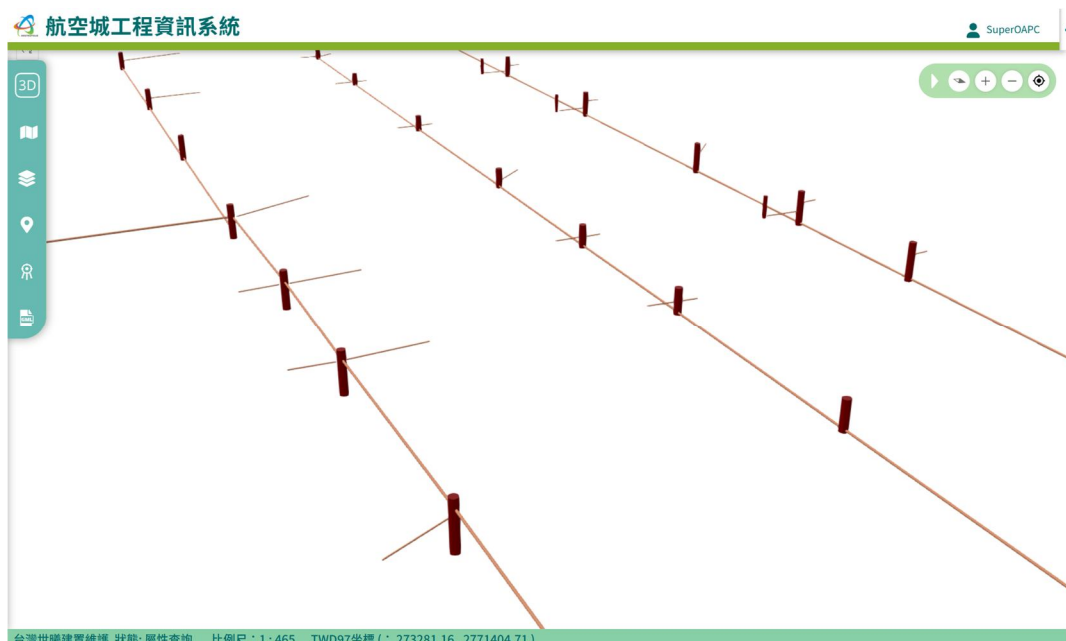


圖 9 三維地理資訊平台之三維竣工管線

3.4 管線竣工圖資建置

為符合後續公共管線設施養護的需求，在現地管線埋完成土方回填之後，管理單位即要求施工廠商須依公共設施管線資料標準建立 GML 圖資，經由航工處三維地理資訊系統所提供的 GML 管理模組將竣工圖資上傳至三維公共管線資料庫，從施工之初即建立完整的管線資料，減少日後挖掘作業造成管損的機會。如圖 9 所示，施工單位上傳的竣工圖資匯入三維公共管線資料庫後，即可從 3D GIS 平台中檢視與瀏覽。

3.4.1 無人載具(UAV)航測技術建置數值地表模型(DEM)

因目前區段徵收土地開發作業為放管完成後，直接量測管頂高，如圖 10 所示，因地盤高需待竣工後瀝青鋪設完成後才能取得，其過程產製之 GML 依養工處規定須提供管頂高，非國土署資料標準規定之地盤高。為利後續申挖應用需提供管線埋深資訊，且為建置符合國土署規範之 GML 格式，需取得區段徵收範圍內所有施測點之地盤高。因此建議廠商於竣工階段提交 DEM 資料，藉以快速取得施

測點之地盤高，並依據管頂高推算管線埋深資訊。
(台灣世曦工程顧問股份有限公司，2025)



圖 10 管頂高直接量測

一般無人機影像式的航拍作業，僅能蒐集到地表的資訊，在有植被覆蓋的區域，會受到植被影響，故需藉由空載光達進行拍攝，空載光達的特點在於其能夠穿透植被取得林下地形地貌。當光達的雷射光束碰到建築或樹木的頂部，會傳回第 1 次回波，其餘未被反射的光束繼續行進，直到地表傳回最後一次回波。

空載光達掃描時，必須在半徑 10 公里(km) 範圍內架設 GNSS 基站蒐集靜態資料，如圖 11 所示，且蒐集靜態資料期間必須完整涵蓋點雲掃描時間，該靜態站坐標則以虛擬基準站即時動態定位測量 (VBS-RTK)方式施測。

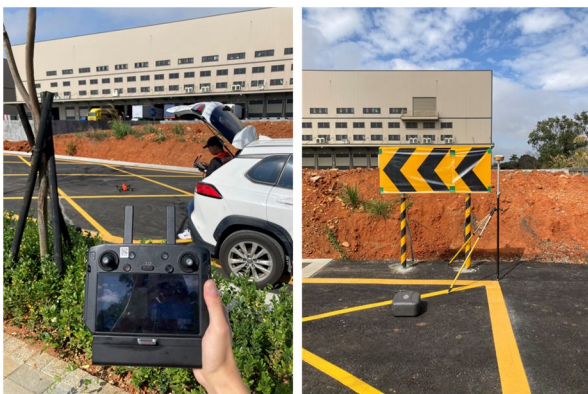


圖 11 無人機空載光達掃描作業照片

外業蒐集空載光達掃描資料、GNSS 靜態資料及該站坐標後，以動態後處理差分技術 (Post Processed Kinematic, PPK)賦予空載光達點雲絕對坐標。接著以點雲處理軟體 TerraScan 濾除植被並

分類出地面點，以地面點建置之 DEM，如圖 12 所示。

3.4.2 實測點位資料應用

實測點位是施工管線的測量成果，可與設計 BIM 模型進行套疊比對，確認設計與竣工圖說是否吻合，並於不一致之處進行檢視，如圖 13 所示，現地埋管時測量所得的實測點位與提交的設計污水設施 BIM 出現差異，以利檢核施作位置是否正確，並做及時調整修正，或設計圖有經變更設計，須修正設計 BIM 模型。管理單位及監造單位可以藉由管線實測點位套疊 BIM 模型確認施工單位的施工精度，確保管線正確埋設。

此外，監造單位及管理單位可藉由管線實測點位套疊 BIM 模型來確認實際施工狀況與進度，實測成果包含測量成果及現地相片，若出現管線實測點位與設計 BIM 模型不符合的狀況時(如圖 14)，即可針對狀況進行檢討，是否是設計變更或 BIM 模型遺漏該筆資料，相關資料亦可作為 BIM 模型修正之參考。藉由管線實測點位之驗證，可提升竣工圖資之正確性，以減少未來管線維護施工時發生誤挖的可能。

3.5 竣工圖資品質檢核

航工處雖要求施工廠商於工程竣工後需建置竣工管線 GML，圖資亦順利通過合理化檢核並將資料上傳至三維地理資訊系統進行保存，但施工廠商製作的 GML 正確性仍應由監造單位進行檢核，檢核項目可從資料的「完整性」、「連續性」、「正確性」三個面向著手，確保竣工圖資品質。

3.5.1 完整性

隨著施工進度的推進，管線單位應將每階段所埋設的管線設施完整的製作成竣工圖資 GML 後上傳至系統，故於三維地理資訊系統展示時，管線圖資的組成及走向應為完整無缺漏的狀態，藉由實測點位圖層來驗證，如發現該批竣工圖資僅有實測點位而未有對應管線，則可向施工單位確認該批圖資的完整性，如圖 15。

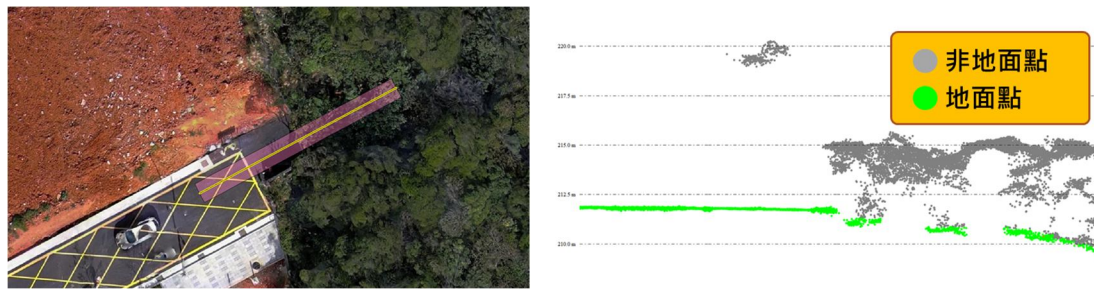


圖 12 地面點分類及 DEM 建置



圖 13 竣工實測點位與設計圖說檢討分析

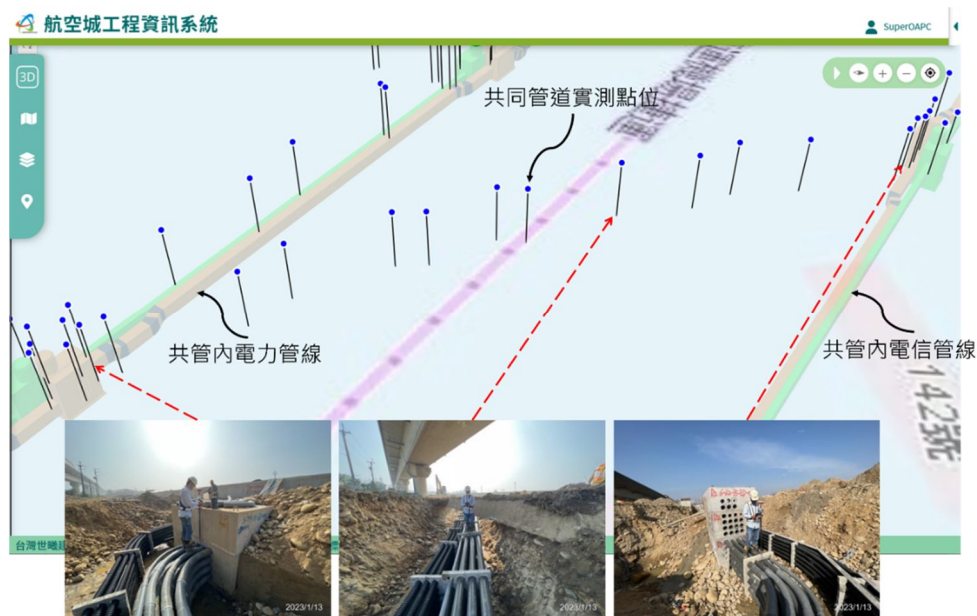


圖 14 藉由管線實測點位確認施工與設計圖是否一致

3.5.2 連續性

實務上管線的走向與接合應是連續且不中斷的位相關係，如於 3D GIS 上檢視竣工管線時，發

現管線中斷或未與人孔、閘、栓等設施正確連接等現象時，如圖 16，發現共同管道缺少主幹管，導致管網不連續，並開啟設計 BIM 模型比對確認後，的

確缺少一段主幹管，此時需進一步向施工單位進行確認並要求修正。

3.5.3 正確性

管線竣工 GML 之空間坐標資訊均應依實測點位的坐標資訊建置而成，每個坐標點均應附上測量遠、近照及儀器讀數照片作為佐證，於三維地理資訊圖台開啟竣工圖資 GML 圖層與實測點位圖層時，每筆 GML 管線圖資均應有對應的實測點位資料方符合圖資之正確性，如圖 17 示。

資料的「可信程度」，以利後續在進行設計、道路開挖施工或維護作業時，能有效判斷管線資料的使用風險，不同等級的資料，適用於不同用途。(台灣世曦工程顧問股份有限公司，2024)

桃園市於 107 年訂定圖資品質指標，依圖徵屬性及其坐標之正確性共訂定四級品質指標，以屬性及其坐標可劃分為四個象限進行示意如圖 18，包含：

- (1) **第一級：屬性及其坐標皆正確**，表示屬性經調查正確，且坐標經測量正確資料。
- (2) **第二級：坐標正確**，表示屬性合理，僅坐標經測量正確資料。
- (3) **第三級：屬性正確**，表示坐標合理，僅屬性經調查正確資料。
- (4) **第四級：屬性合理**，表示屬性及其坐標二者皆合理之資料。

4. 桃園市養護現況

4.1 管線正確化分級

管線正確化分級主要是用來標示每一條管線



圖 15 竣工圖資未符合圖資完整性

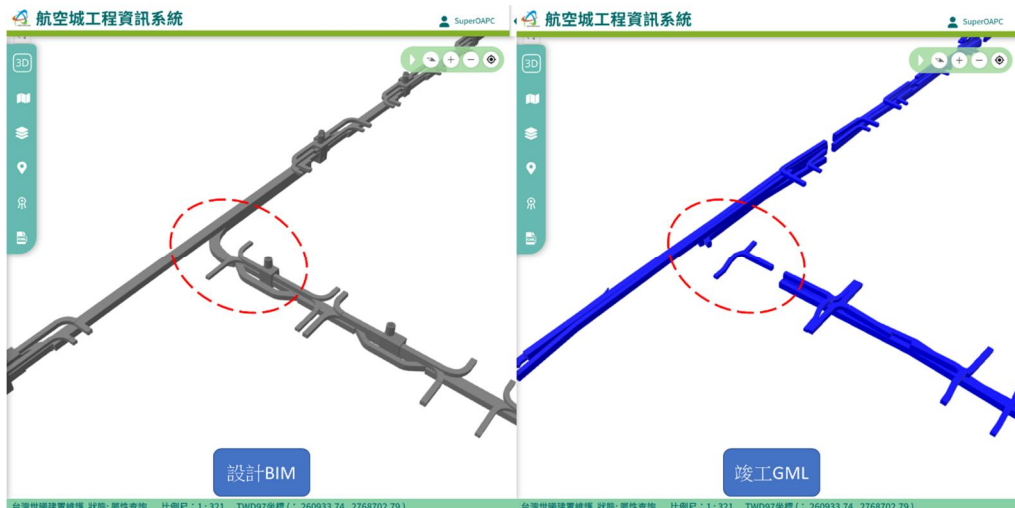


圖 16 共同管道缺少主幹管，導致管網不連續



圖 17 竣工圖資正確性驗證

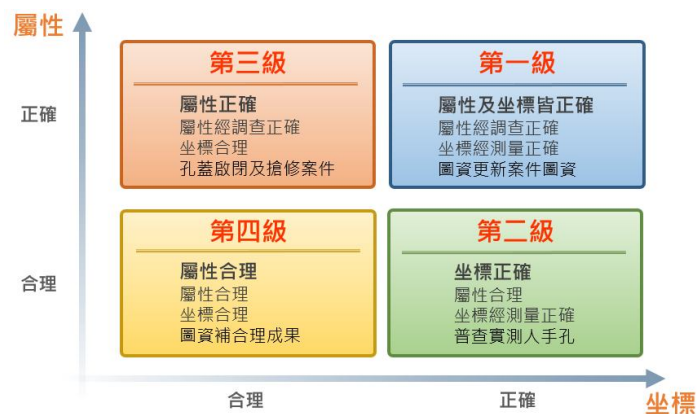


圖 18 桃園市圖資品質指標示意圖

4.2 桃園市管線正確率說明

目前透過申挖案件、孔蓋啟閉、道路普查、人手孔開孔等方式提升圖資正確性，但因管線資料龐大，藉由以上方式每年第一級圖資能提升約 1-2%，如圖 19，經過多年努力管線正確率仍低，要如何突破是一大難題，故將目標轉移至挖掘面積較大的重劃工程，期望藉由重劃工程能有效的提升管線正確率，但因航空城區段徵收目前仍在施工中，單以自來水為例，目前預估完工後可得到 95% 的第一級圖資品質資料，可有效地提升桃園市的管線第一級圖資品質。

表 2 桃園市管線第一級圖資品質總覽

年月	總數	百分比(%)
111/12	1,046,131	6.27
112/12	1,058,786	8.35
113/12	1,084,032	9.80
114/5	1,278,217	10.28

4.3 效益說明

對於道路挖掘工程帶來以下效益（桃園市政府市政新聞，2017），包括：

- (1) 瞭解改善管線衝突，避免工程中挖到不明管線，導致工程延宕。
- (2) 降低管線挖損情況，避免工程挖損瓦斯、自來水等管線影響民生。
- (3) 提升公共安全，避免管線資訊掌握不全，導致發生如 103 年 8 月的高雄氣爆事件，降低公安危害。

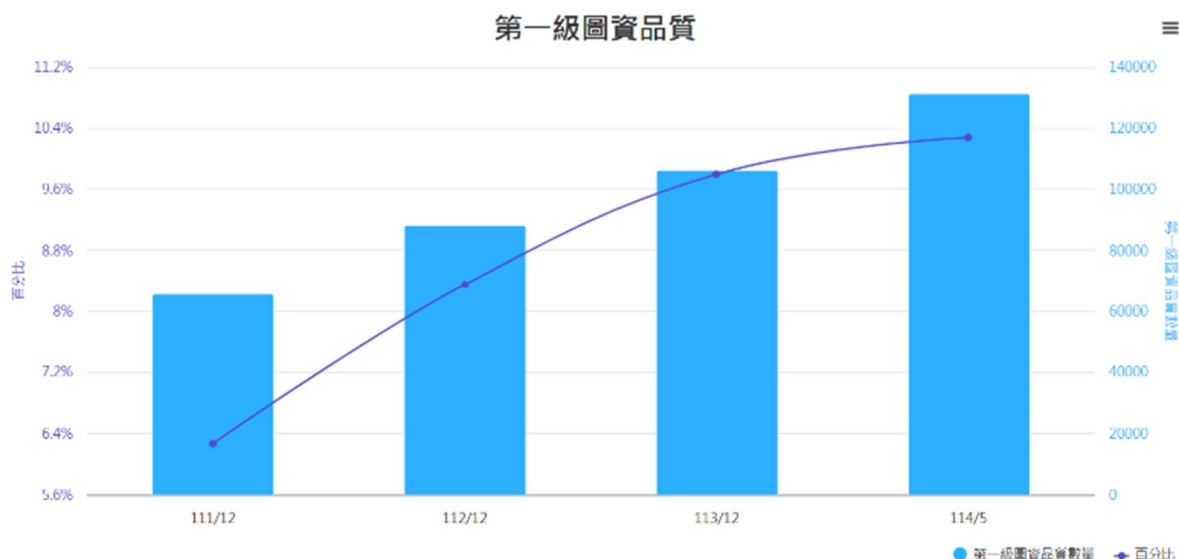


圖 19 111 年至 114 年 5 月桃園市管線第一級圖資品質

5. 結語與未來展望

桃園航空城於 2021 年建置專屬之航空城工程資訊系統，導入工程表單電子化、填寫對應施工日誌、估驗計價線上作業、土方媒合管理等功能，並結合三維地理空間資訊平台，發展 IOT 於工程之相關應用，施工現場影像監控等以強化工程資料在空間化、視覺化的應用，本文從圖資源頭管理的角度出發，闡述航工城區段徵收從工程施工之初，管理單位即要求施工廠商須將埋管所進行測量的資料上傳至三維地理資訊平台，並隨著工程進度的推進，依循「公共設施管線資料標準」建立竣工圖資，並由竣工資料的「完整性」、「連續性」、「正確性」三個面向來提升圖資品質。綜合上述歸納出數點結語與未來展望如下：

- (1) 桃園市政府航工處伴隨資訊科技進步的趨勢建置航空城工程管理資訊系統並導入三維地理資訊系統，同時發揮 3D GIS 的優勢，將設計 BIM 模型、竣工管線實測點位及 GML 圖資匯入於平台展示，透過設計與竣工圖資的比對檢討是否按圖施工，同時改善過往繳交的竣工圖資與現場不符及不符合養護需求的問題。
- (2) 為能確實取得施工廠商埋設管線的測量資料，管理單位檢視施工廠商從申請開挖位置開始，經放樣後進行開挖、下管、管線測量點位收測，無誤後進行 CLSM 澆灌及土方回填的整體流程，要

求施工廠商於管線回填作業前取得現地設施測量資料並上傳到三維地理資訊系統，建立由工程進行時即取得管線測量數據機制。

- (3) 已規劃由監造審查，並在考量經驗不足的情形藉由定期檢討及教育訓練完善檢核品質。
- (4) 竣工圖資審查作業中，三維地理資訊平台將扮演重要的角色，繁雜的竣工圖資審查作業勢必對監造單位造成操作上的負荷，開發如距離量測、剖面、雙 GIS 視窗比對、自動化檢核等輔助功能，可簡化審查的流程並提升審查的方便性與易用性。
- (5) 廠商繪製 BIM 模型，都使用各自習慣的繪圖軟體，但往往因為版本問題，衍生檔案無法相容困擾，整合各分標製作的模型，需花費許多時間，未來試圖透過本次航空城大範圍面積使用 BIM 模型的整合經驗，整理出一套可行的檔案格式繳交規範，以期增進整合效率。

參考文獻

內政部國土管理署，2020，公共設施管線資料標準第二版，pp.29-36。[National Land Management Agency, Ministry of the Interior, 2020. Gung gung she shr guan shian tz liau biau juen di er ban, pp.29-36. (in Chinese)]

台灣世曦工程顧問股份有限公司，2024。桃園市公共設施管線位置調查(監驗)暨系統建置第十三

- 期計畫，桃園市政府工務局委託建置服務工作
期末報告書，pp.58-59。[CECI Engineering
Consultants, Inc., Taiwan, 2024. Tau yuan shr
gung gung she shr guan shian wei jr diau cha (jian
yan) ji shi tung jian jr di shr san chi ji hua, The
Final Report for Department of Public Works,
Taoyuan, pp.58-59. (in Chinese)]
- 台灣世曦工程顧問股份有限公司，2025。桃園市公
共設施管線位置調查(監驗)暨系統建置第十四
期計畫，桃園市政府工務局委託建置服務工作
正式報告書，pp.58-61。[CECI Engineering
Consultants, Inc., Taiwan, 2025. Tau yuan shr
gung gung she shr guan shian wei jr diau cha (jian
yan) ji shi tung jian jr di shr sz chi ji hua, The
Report for Department of Public Works, Taoyuan,
pp.58-61. (in Chinese)]
- 桃園市政府市政新聞，2017。游副市長：建置 3D 公
共設施管線平台，完善桃園市管線資訊，
https://www.tycg.gov.tw/NewsPage_Content.aspx?n=10&s=635916，引用 2024/12/2。[Taoyuan
City Government, City Government News, 2017.
You fu shr jang: Jian jr 3D gung gung she shr guan
shian ping tai, wan shan tau yuan shr guan shian tz
shiun, Available at:
https://www.tycg.gov.tw/NewsPage_Content.aspx?n=10&s=635916, Accessed December 2, 2024.
(in Chinese)]
- 藍士堯、李元良、劉新達、柯婷玟、林秋芬，2023。
PMIS 導入 3D GIS 之整合應用—以航空城區段
徵收案為例，中華技術，138：112-125。[Lan,
S.Y., Lee, Y.L., Liu, H.T., Ke, T.W., and Lin, C.F.,
2023. Integration application of PMIS and 3D GIS
– Taking zone expropriation of aerotropolis as an
example, CECI Engineering Technology, 138:
112-125. (in Chinese)]

Exploring As-Built Data Management for Maintenance Needs of Public Utility Pipelines: A Case Study of the Taoyuan Aerotropolis Zone Expropriation Project

Shih-Yao Lan¹ Yuan-Liang Lee² Yu-Feng Huang³ Hsin-Ta Liu⁴
Chiu-Fen Lin^{5*} Jun-Xuan Chen⁵

Abstract

Road construction often results in utility damage due to inaccurate mapping data, primarily because contractors submit design drawings as-built drawings. This leads to discrepancies in pipeline spatial location and burial depth, as the submitted data does not accurately reflect on-site conditions.

To address this issue, the Taoyuan Aerotropolis Engineering Office has implemented a 3D Geographic Information System (3D GIS) that integrates BIM design models, surveyed pipeline points, and data in Geography Markup Language (GML) format to enhance the accuracy of utility mapping.

To ensure data quality, the as-built drawings must pass a system-based rationality verification process. In addition, supervising engineers manually inspect the pipeline data for continuity, completeness, and accuracy. The validated data is then integrated into a 3D public utility database to improve overall mapping quality, meet future utility maintenance needs within the Aerotropolis project area, and reduce the risk of utility damage and associated threats to life and property during excavation.

Keywords: 3D Geographic Information System (3D GIS), As-built Data Source Management, Public Pipeline Data Quality

¹ Deputy Director, Office of Aerotropolis Public Construction, Taoyuan

² Division Chief, Engineering Management Division, Office of Aerotropolis Public Construction, Taoyuan

³ Engineer, Engineering Management Division, Office of Aerotropolis Public Construction, Taoyuan

⁴ Manager, Department of Geomatics, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

⁵ Engineer, Department of Geomatics, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

* Corresponding Author, Tel: 886-2-87973567 ext.3148, E-mail: fen@ceci.com.tw

Received Date: Feb. 13, 2025

Revised Date: May 09, 2025

Accepted Date: Sep. 15, 2025

自來水智慧化管理及水理分析於工程實務應用

黃裕泰¹ 黃欽稜² 李承鴻^{3*} 許家成⁴ 陳勳融⁵

摘要

都市水資源管理的重要性日益提升，為協助維運管理與分析決策，需導入人工智慧、水理模型與地理資訊技術。以自來水管線為例，本研究結合水理分析與空間分析，克服過去無法精準評估受影響用戶的缺點，並提出優化建議。應用面向包含三階段：第一，施工影響分析，透過模型找出受影響區域與用戶；第二，管網規劃設計，藉智能斷水與邊界閥啟閉，找出最佳進水點；第三，多時段溯源分析，掌握節點水源比例與主要流量路徑。此模式能動態量化影響用戶，並將結果精準反饋至各管線，為臺北自來水事業處提供專屬管理方案，不僅提升維護效率，亦強化管線汰換決策支援，實現精細化與永續管理。

關鍵詞：水理分析、地理資訊系統(GIS)、溯源分析、管網規劃設計、智慧化管理

1. 前言

台灣的自來水普及率已突破 90%，六都地區更高達 95% 以上，自來水管網的供應已和民眾生活息息相關，尤其在人口密集的都市區，維持自來水管網的正常運作是非常重要的工作。當發生重大災害時，自來水管線能否正常運作，不會引發二次災害，有效降低災損範圍及協助救災更是自來水管理單位的重責大任。由於目前天然災害難以預測，因此加強重要管線的管理及建立風險管理評估，才能有效抑止災害的擴大。因此本章節將說明結合自來水智慧化管理及水理分析於工程實務應用模式，這種模式將有助於改善供水系統的穩定性，以防止災害發生時，救災單位無水可用的情形，避免二次災害，並期望此研究成果可做為未來相關研究之參考。

評估管線損壞風險的最主要目的是要能有效地分配資源，將資源投入在高風險區域。以確保資源有效利用，避免在低風險區域進行不必要的支出。通常風險的計算是透過將損壞的嚴重程度與發生損害的可能性相乘來衡量的，而管道破裂或損壞，在老化的供水管網系統中是常見的事件。導致這個

問題發生的因素：包括管道老化、地震活動、管道壓力變化等(Rezaei *et al.*, 2015)。然而，儘管不斷努力期望能解決問題，在全球的供水系統中，仍然損失了大量的水資源。因此，供水管道的維護、管理和管線汰換，對水資源管理單位而言是至關重要的責任。

近年來，許多新的研究提出了以新演算法或模型為基礎的風險評估策略(Cen *et al.*, 2023、Henriques-Silva *et al.*, 2021、Ullah *et al.*, 2018)。隨著監測設備在物聯網架構下已逐步發展成熟，這些監測設備能夠即時地收集流量和壓力數據(Li *et al.*, 2015、Page *et al.*, 2019、Creaco *et al.*, 2019)。水理感測器技術和即時數據收集系統的進步(例如：監控數據，SCADA)，可快速取得水壓即時資訊，促進了各種以水理分析元件為方法的即時分析。這些方法利用水理建模、統計分析和人工智能(Wang *et al.*, 2020、Zhou *et al.*, 2019)。以數據驅動(Data-Driven)的風險評估方法不僅在成本上更具效益，而且在人力使用和時間上更加地有效率。管網若完成校正、優化和驗證程序，即可以使用風險評估演算法進行分析，並可持續監測管網系統，過程幾乎不需要手動干預。

¹ 臺北自來水事業處技術科 科長

² 臺北自來水事業處技術科 一級工程師

³ 臺北自來水事業處供水科 三級工程師

⁴ 台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 副理

⁵ 台灣世曦工程顧問股份有限公司水與環境工程部 計畫工程師

* 通訊作者, E-mail: paradise1271@water.gov.taipei

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 05 月 29 日

接受日期：民國 114 年 09 月 15 日

目前，在管線的定性評估研究上，研究者主要都是利用以機器學習為基礎的風險評分方式(Vanitha *et al.*, 2023)進行計算。然而，這種研究方法僅考慮管道的屬性和環境因素，而沒有考慮到受影響用戶的數量(Mehr *et al.*, 2020、Vanitha *et al.*, 2023)。

水力模型分析的目標是模擬水壓、流量，並預測供水分區管網內的變化。水力分析對於自來水的傳輸、配送及管理維護，是一項重要的技術或工具(Pietrucha-Urbanik & Tch'orzewska-Cie'slak, 2018)。美國環境保護署所開發的(EPANET)則是目前全球最常使用的水理分析工具，是一項免費提供的軟體元件。主要使用的方向在模擬水配管系統的水質和水理行為(Shiu *et al.*, 2022 及 2023)。EPANET 可計算受影響的節點，再利用管網連接關係將用戶數據分配給節點，即可得到受影響的用戶。可以進行更詳細的評估管道損壞的影響範圍，為管道風險評估提供了額外的模式(Boryczko *et al.*, 2021)。

本研究主要將水力分析應用於三個工程實務面向，第一階段：施工影響分析以臺北自來水事業處現有自來水管網架構為基礎，惟該基礎管網未涵蓋壓力與流速資訊，需透過水力分析以獲取相關數值，進一步藉由分析施工前後壓力差異，辨識施工期間可能受影響之區域與用戶範圍，以作為後續管理與調度之依據。第二階段：管網規劃設計應用，依據小區範圍，先利用智能斷水的空間計算，找出封閉該小區所需關閉的邊界閥，再依據其邊界閥位置的啟閉，來找出最佳進水點位置。第三階段：透過多時段模型資料進行時序性分析，可模擬管網水齡分布及物質擴散行為，以評估管網水質狀況，進而確保供水範圍內用戶用水之安全。利用自來水智慧化管理、水力分析及地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)於工程實務的應用，這不僅能動態量化自來水管線可能影響的用戶規模，還能將複雜的分析結果精準反饋到每條管線，提供專為臺北自來水事業處量身定制的管理方案。這一模式不僅能大幅提升維護管理效率，還可為管線汰換決策提供可靠的數據支持，從而實現精細化管理。

2. 水力分析

2.1 水力模型定義

(1)靜態(Static)模型

又稱 Single-Period Analysis Model(單時段分析模型)，本階段模型僅針對單一瞬間值模擬，如於某一時間點固定水壓及流量資料(最大、最小或平均值)以模擬供水分區對應時間點的演算結果。

(2)動態(Dynamic)模型

又稱多時段模型 Extended-period analysis model(多時段分析模型)，本階段動態模型即針對連續時段(至少 24 小時)之模擬，如以至少 24 小時供水量、水壓及供水分區內各點需水量等資料模擬系統內各點長時間連續性的水壓、流速、流量或水質等結果。

(3)擬真(Live)模型

又稱為 Simulation modeling，具有離線批次輸入歷史數據進行仿真及優化演算功能，本階段係北水處為達即時模型之階段性模型，以多時段(動態)模型為架構研究如何介接北水處資料，並模擬試作介接後之成果(介接資料可為預設非即時)。

(4)即時(Real-time)模型

又稱為 On-line predictive modeling，具有介接 SCADA 在線數據，演算當下及預測未來的系統功能，此階段模型將自動化於每隔固定時段即擷取北水處系統場站水壓及流量資料後，自動運算出各時段監測值所應有的正常值，若偏離正常值的時間及數量超過一定的值時，系統即自行發出通知，並配合此模型以運用在自來水管網於北水處圖台界面上(WebGIS)即可進行各種自動及人工智慧化行為，如即時或計畫性施工停水影響區域分析、漏水警示、規劃、設計及調配方案等加值模擬應用。

2.2 水力分析原理

本研究在水理分析應用上，因管徑突縮突擴、彎曲段、閘門段屬水頭次要損失，其影響性遠小於水頭主要損失，因此本研究將次要損失內化至管壁磨擦係數 C 值一併考量，並隨著管齡老化而下降。

操作關閥時產生水錘造成之損失，屬於短時間之水頭振盪(5~30 分鐘內)並且屬小範圍之影響，多於高程落差較大之區域以特例方式研析，本研究主要係針對小區封閉後長時間水力分析，故暫不納入考慮。如現場採閥開度控制，則以管徑、開度與之關係換損失係數代入模型中。相關原理說明如下。

(1)壓力管線能量守恆定律

根據能量守恆定理，對於不可壓縮流體(如水)在壓力管網中的流動，若考慮理想條件，流體在系統中的總能量應保持不變。

如圖 1 流體在管內輸送過程中，從上游 A 點到下游 B 點，其總水頭(包含壓力水頭、速度水頭和位置水頭)理論上應相等。然而，實際情況中，由於管道內壁的摩擦力以及局部阻力(如閥門、彎頭等)會消耗部分能量，導致能量損失。這種能量損失表現為水頭的降低，即沿管線流動時水頭呈現出逐漸下降的趨勢，形成能量坡降。能量坡降曲線顯示出流體在管網中傳輸的能量損失大小，曲線的斜率由摩擦係數、流速和管道材料等決定。

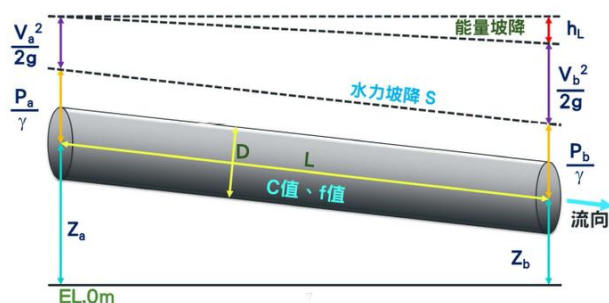


圖 1 壓力管線能量坡降示意圖

(2)海森-威廉公式

當水在管線中流動時，由於水與管壁之間的摩擦作用，會導致部分能量轉化為熱能或其他形式的損耗，造成水頭能量的損失。這種現象在工程中被稱為水頭損失，尤其是在長距離管線中特別顯著。在自來水壓力管網的水力分析中，準確評估水頭損失對於管網設計和運行效率具有關鍵作用。其中，海森-威廉(Hazen-Williams)公式是最常用的經驗公式之一，用於估算由管道摩擦引起的水頭損失。該公式依賴於管道的內徑、流速以及管材摩擦係數(海森-威廉係數)，後者與管道材質及內壁光滑程度有

關。公式形式為：

$$h_f = \frac{10.66 L Q^{1.85}}{C^{1.83} D^{4.87}} \dots\dots\dots (1)$$

h_f ：管道長度上的水頭損失(以 m 為單位)

Q ：體積流量(SI 單位為 m^3/s)

C ：管線粗糙係數(依照 Hazen-Williams formula 標準)

L ：管長(以 m 為單位)

D ：管徑(以 m 為單位)

(3)管材摩擦係數(海森-威廉係數 C 值)

管材摩擦係數是評估管線內水流摩擦損失的重要參數，其數值需通過實驗測得，並根據不同管線材料的特性而異。一般而言，管材摩擦係數越高，表示管內壁越光滑，所引起的摩擦損失相對較小；反之，摩擦係數越低，則代表管內壁粗糙度增加，造成更大的能量損失。以鑄鐵管為例，全新鑄鐵管的摩擦係數約為 130，表現出較好的水力性能。然而隨著使用年限的增加，管內壁會逐漸因腐蝕、沉積物堆積以及結垢等因素變得粗糙，使得摩擦係數降低。由研究顯示，30 年以上的鑄鐵管經過實驗測得摩擦係數平均約為 82.5，這種變化對水頭損失影響較大，需在管網設計與運行管理中加以考量，特別是在老舊管線的維護與管理時，摩擦係數的變化將直接影響系統的輸送效率和壓力分佈，如表 1。

表 1 海森-威廉係數 C 值隨管齡變化

使用年限	C 值
全新	130
5 年	120
10 年	110
20 年	90~110
30 年	75~90
30 年以上	82.5

(4)管線及閥損失係數計算結果

以下列出於流量 10,000CMD 的條件下，輸水管線管徑 500 mm 在不同海森-威廉係數 C 值之單位管長損失係數，以及制水閥閥徑 500 mm 在不同開度下計算損失係數如表 2 所示。

表 2 管線及閥損失係數計算結果

輸水管線 500mm 管徑		制水閥閥徑 500mm	
C 值	單位管長損失係數(m/km)	開度	損失係數(m)
130	0.70	90 度	0.00
120	0.81	80 度	0.01
110	0.95	70 度	0.02
100	1.14	60 度	0.05
90	1.38	50 度	0.12
82.5	1.62	40 度	0.30
		30 度	0.93
		20 度	5.92
		10 度	456.30

2.3 水力分析工具

EPANET 是由美國環境保護署 (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) 開發的一款開源水力分析計算軟體，免費提供公眾使用。該軟體具備基本的水力分析功能，並採用開放式架構設計，允許使用者根據個別應用需求開發額外的套件與功能。EPANET 可讀取的 INP 格式檔案以純文字形式儲存，其內容結構分為五大類，共包含 27 種屬性。五大類內容簡述如下：

- (1) 管網組件：表示模型中構成水力系統的基本元件。
- (2) 系統運行參數：用於控制管網組件在模型中的操作行為。

(3) 水質相關參數：僅在進行水質模擬分析時需要設定的屬性。

(4) 選項與報表：定義模擬類型(如單時段或多時段模擬)的設定參數，並描述分析結果的輸出格式。

(5) 地圖與標籤：提供節點坐標、標籤坐標與描述內容，以及背景底圖的資訊。

根據 EPANET 之文件說明，如表 3 所示，為將空間資料轉換為 INP 檔案，管網組件構成水力模型的基本元件，其內容說明如下。

INP 檔案主要包含的基本元件包括管線(Pipes)、節點(Junctions)、閥(Valves)、水庫(Reservoirs)、水池(Tanks)以及標籤(Labels)。這些元件構成水力模型的核心結構，並支持用戶進行水力與水質模擬分析。此外，模型的基本屬性與水力資訊設定採用 EPANET 的預設值，其中：

- (1) 水量單位：立方公尺/天(Cubic Meters per Day, CMD)。
- (2) 水頭損失公式：採用 Hazen-Williams 公式進行計算。

以下圖 2 和圖 3 為 INP 檔案的結構與內容，提供了模型定義的實際範例。這些範例展示了如何在 INP 檔案中組織與儲存模型元件及其相關參數，為進一步的水力模擬與分析提供基礎。

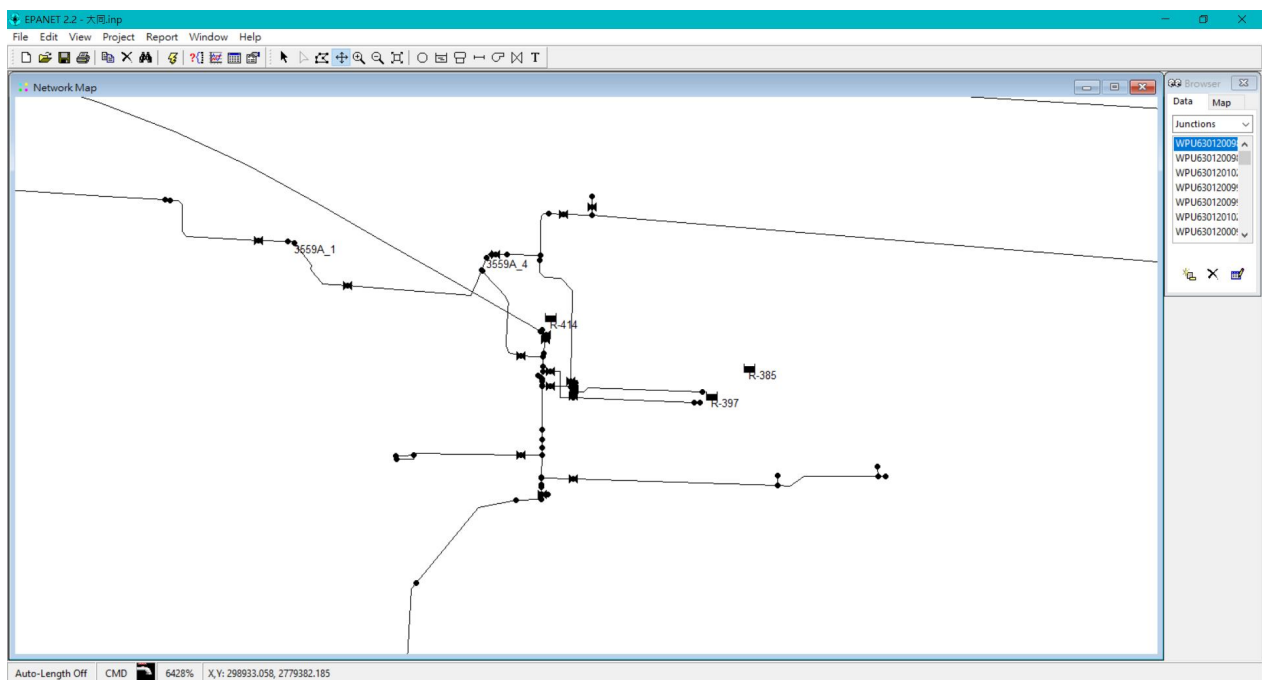


圖 2 INP 檔開啟示意圖

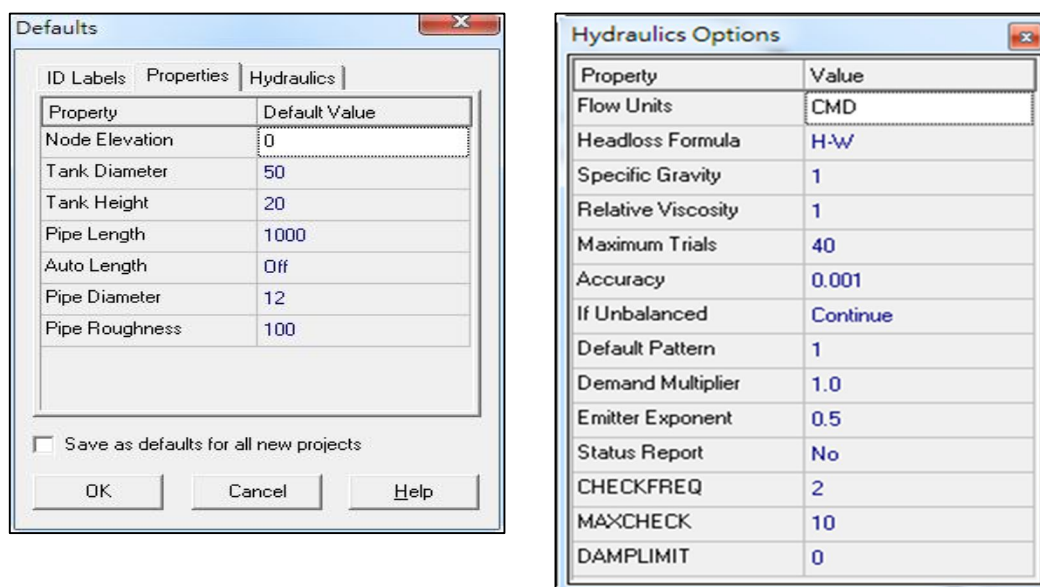


圖 3 INP 檔基本設定範例圖

表 3 INP 檔案結構分類表

管網組件	系統運算	水質	選項/報表	管網地圖
TITLE JUCTIONS RESERVOIRS TANKS PIPES PUMPS VALVES EMITTERS	CURVES PATTERNS ENERGY STATUS CONTROLS RELES DEMANDS	QUALITY REACTIONS SOURCE MIXING	OPTIONS TIMES REPORT	COORDINATES VERTICES LABELS BACKDROP TAGS

復水操作閥之順序，使用說明如下。

A. 選擇管線

使用者可於平台介面上針對欲修復之管線進行圖面點選，以作為後續分析與模擬之輸入資料來源(如圖 4 所示)。

B. 啟動智能斷水作業

智能斷水分析功能可提供完整之斷水方案模擬，並自動建議分階段應關閉之制水閥位置，以協助現場人員於最短時間內完成關閉作業，作為應變處置及管網管理之參考依據，如圖 5 所示。

C. 計算壓力變化

於決定關閉之制水閥位置後，因基礎管網資料未涵蓋壓力與流速資訊，需透過水力分析自動計算各節點壓力變化值，或進一步分析施工前後之壓力差異，以界定施工期間可能受影響之區域與用戶範圍。此結果可用以判別受影響之路段範圍，並統計停水影響用戶數量，作為停水管理及應變調度之依據，如圖 6 所示。

3. 實務應用

3.1 施工影響分析

(1) 方法說明

目前於臺北自來水事業處的自來水智慧化管理中，已有智慧斷水追蹤功能，使用者選取停水之管段後，可自動追蹤所須關閉之閥類，惟關水區域外水壓、水流方向的變化，則無法立即掌握，在供水分區模型建置完成後，可將水力分析成果套入，應用水力分析函式庫，自動運算關閉相關閥類後之節點壓力變化，可計算出影響路段及用戶數量，亦可於水力分析平台上顯示水流方向。在進行計畫性施工案件或突發性事件時，使用者可於水力分析平台點選欲施工或搶修之管段後，系統自動分析產出影響範圍內外的水壓及水流方向，透過分析結果，系統自動比對關閉前後差異，亦可匯出相關統計資料，以利分處同仁預先了解影響範圍及先行研判停

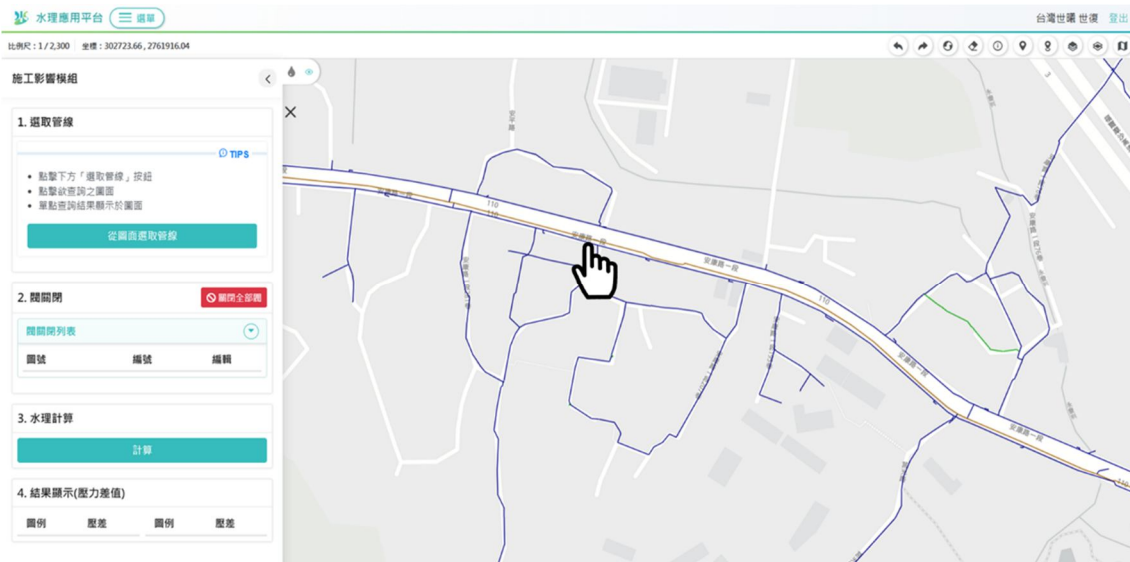


圖 4 選取管段圖



圖 5 智慧化找出閘關閉位置圖



圖 6 顯示施工影響水壓變化成果圖

(2)案例情境

112 年 9 月 7 日，臺北市大直地區因基泰建設工程「連續壁強度不足」，導致鄰近民宅地基掏空，引發建物沉陷，原二層樓住宅瞬間下陷成一層樓高度，造成重大公共安全事件。利用智慧斷水功能及水力分析分析結果研判，為控制漏水狀況，緊急關閉相關制水閥進行止漏，如圖 7 所示，且當地將產生無水的情形，造成大直街 94 巷 1 弄 1 至 29 號及 3 弄 12 至 30 號共計 219 戶停水，並調派水車供應居民臨時用水。事件顯示施工安全管理與公共管線保護之重要性，亦凸顯都會區施工對周邊基礎設施及民生用水影響之風險。

(3)結果驗證說明

當現場發生漏水或爆管事件時，智能斷水分析功能可提供完整之斷水方案模擬，並自動建議分階段關閉之制水閥位置，協助現場人員在最短時間內完成關閉作業，以縮小停水影響範圍並降低民眾不便。同時，可依據水力分析成果統計受影響用戶，未來得以主動推播停水訊息予用戶，使民眾即時掌握停水資訊，提升供水單位服務效率與資訊透明度。

3.2 網管規劃設計

(1)方法說明

北水處目前已規劃 834 個小區，但由於都市快速發展及部分小區建置時間較久，原先設置的進水點已無法完全滿足當前需求。因此，規劃人員可藉由管網規劃設計功能，針對小區內的不同進水點進行多種設定組合，並通過水力分析結果，協助評

估小區劃設的可行性以及進水點的最佳位置。

在實際操作中，當發現單一進水點無法滿足小區的供水需求時，規劃人員可在該小區的水理模型中新增進水點，進行模擬分析，以提升供水能力並確保系統穩定性。同時，系統還可針對選定的小區範圍及進水點位置進行自動化分析，評估小區內外的壓力與流速變化。這些數據可用來判斷小區封閉的可行性，並有效降低小區封閉失敗的風險。

透過上述規劃與分析方法，不僅能提高小區供水能力和系統穩定性，還能大幅提升工作效率，確保規劃決策的精確性，從而更好地滿足城市供水需求的多樣化挑戰。

(2)案例情境

A.選擇小區

本研究以 E12002 小區為示範案例進行方法驗證。首先，依據小區範圍進行區域邊界辨識，並透過智能斷水分析自動篩選需封閉該小區時應關閉之邊界閥位置，以確保在停水作業中能有效隔離目標區域，降低對周邊供水範圍之影響，作為後續水力模擬及受影響用戶統計之基礎，如圖 8 所示。

B.計算邊界閥

將 E12002 小區作為示範案例導入系統後，系統將依據小區範圍進行區域邊界辨識，並透過智能斷水分析自動篩選封閉該小區時應關閉之邊界閥位置。本案例共識別出 8 筆應關閉之閥件，包括：4551C-5、4451D-15、4451D-16、4451A-10、4452B-1、4452B-13、4452C-25 及 4551C-38(如圖 9 所示)。



圖 7 施工影響水壓變化案例圖

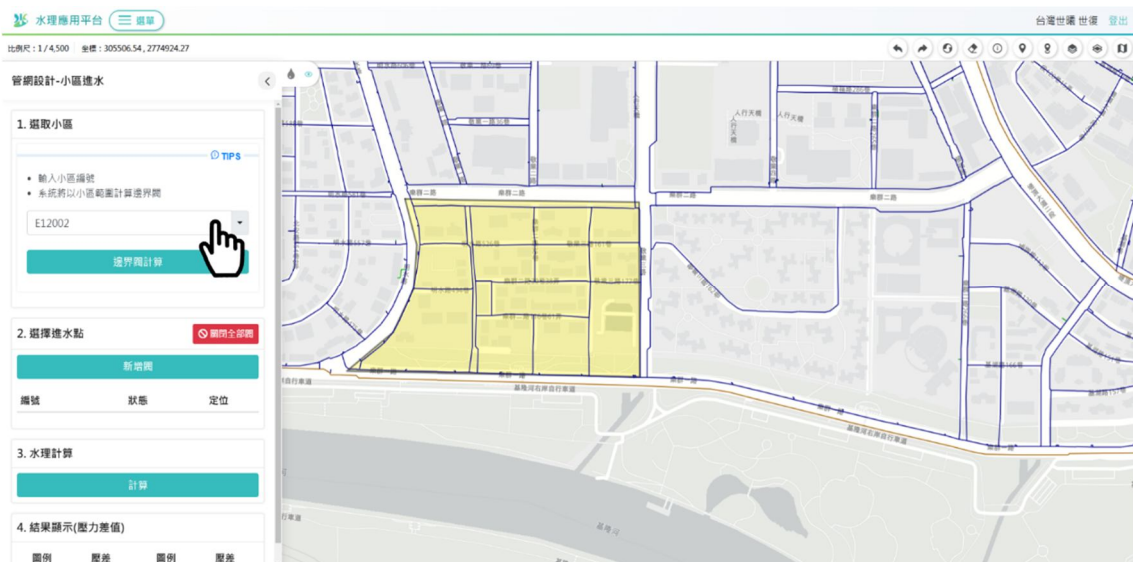


圖 8 以小區範圍找出閘關閉位置圖

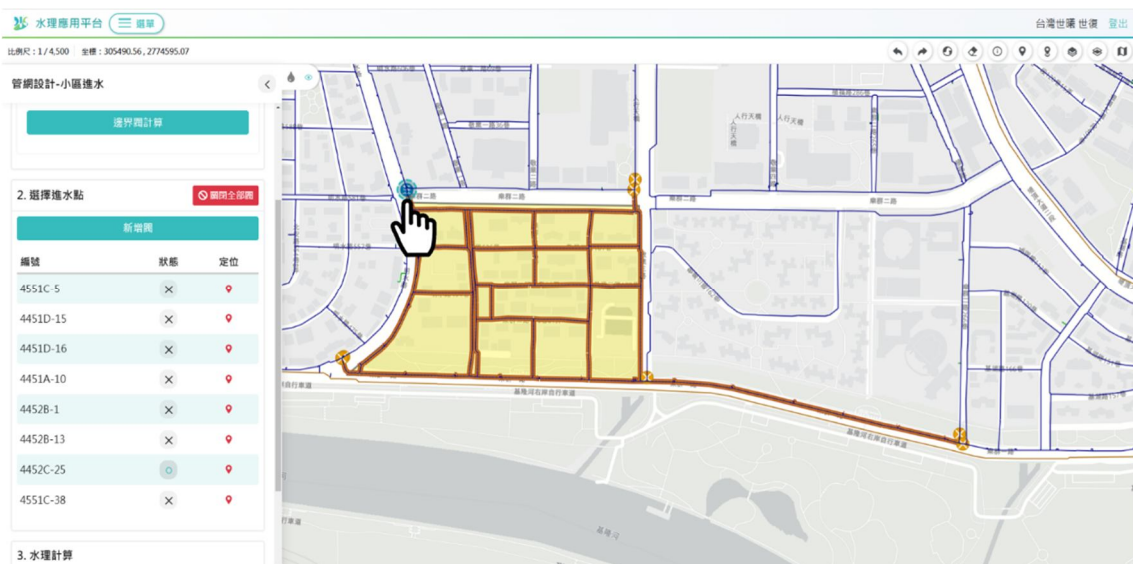


圖 9 設定進水點位置圖

C. 設定進水點

選擇特定閘件進行開啟後，系統可即時執行線上水理計算，並於平台介面上顯示進水點開啟後之水壓變化情形，以供使用者即時掌握系統恢復供水後之壓力分布狀況(如圖 10 所示)。

並可利用供水恢復前後條件進行比較，以顯示各節點壓力差異變化情形，如圖 11 所示。

(3) 結果驗證說明

以 E12002 小區為例，藉由表 4 各進水點的結果顯示，如採 4551C-5 制水閘位置進水，則供水小區內壓力為最差，其次為 4451A-10 制水閘位置；最佳進水點位置為 4451D-16 制水閘，有 26%以上之

節點壓力可達 2 kg/cm^2 以上。

3.3 節點溯源分析

為深入了解各節點的水源比例，可利用水理分析計算出每個節點中來自不同加壓站的混合比例，並進一步追溯水源的路徑。系統不僅能自動分析水流的來源，還可生成水流路徑的可視化足跡圖，並將結果顯示於即時水理監控平台上，方便操作人員快速查閱與分析。該方法對於提升水理系統的管理效率和透明度具有重要意義。具體作業方法簡述如下：利用 EPANET 提供的溯源分析(Trace Analysis)功能，該功能可精確計算各節點或管段的水源比例。分析中，來源可以被指定為單一的特定節點(如加壓

站或水庫)，也可以是多个水源節點的組合。溯源分析結果不僅能幫助辨識各節點的水源貢獻度，還能協助追蹤可能的污染來源或進行水質改善策略的規劃，如圖 12 所示。

此外，透過結合即時水力平台，分析結果可動態更新並以圖形化方式呈現，包含水源分布、流向

路徑與混合比例等資訊，進一步提高操作的便利性與精確性，如圖 13 所示。

同時透過隨時間變化的多時段分析，模擬管網水齡分布、物質擴散預測，可評估管網水質情形，確保供水範圍內用戶用水安全，如圖 14 所示。

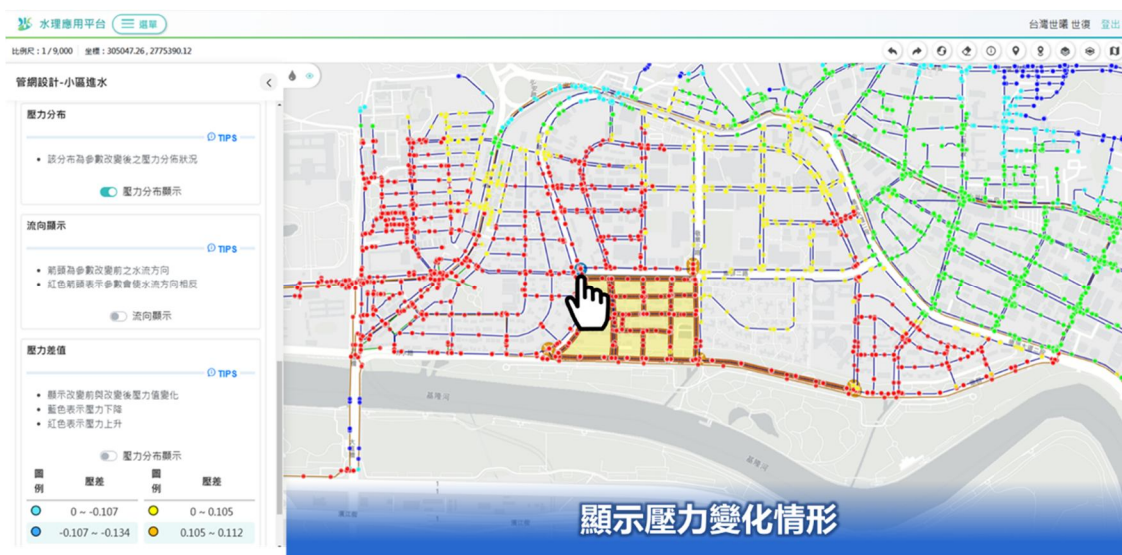


圖 10 顯示設定進水點後壓力變化情形



圖 11 顯示設定進水點壓力前後變化情形

表 4 E12002 小區最佳化進水點的結果分析比較表

閘位置	<1.6kg/cm ²	1.6~1.7kg/cm ²	1.7~1.8kg/cm ²	1.8~1.9kg/cm ²	1.9~2.0kg/cm ²	≥ 2.0 kg/cm ²
4551C-5	29%	71%	0%	0%	0%	0%
4451D-15	0%	0%	0%	45%	55%	0%
4451D-16	0%	0%	0%	1%	73%	26%
4451A-10	26%	74%	0%	0%	0%	0%
4452B-1	0%	0%	65%	35%	0%	0%
4452B-13	0%	6%	78%	15%	0%	0%
4452C-25	0%	0%	54%	46%	0%	0%
4551C-38	0%	28%	72%	0%	0%	0%



圖 12 顯示最大流量路徑圖及水源百分比



圖 13 顯示管段內水流行經方向

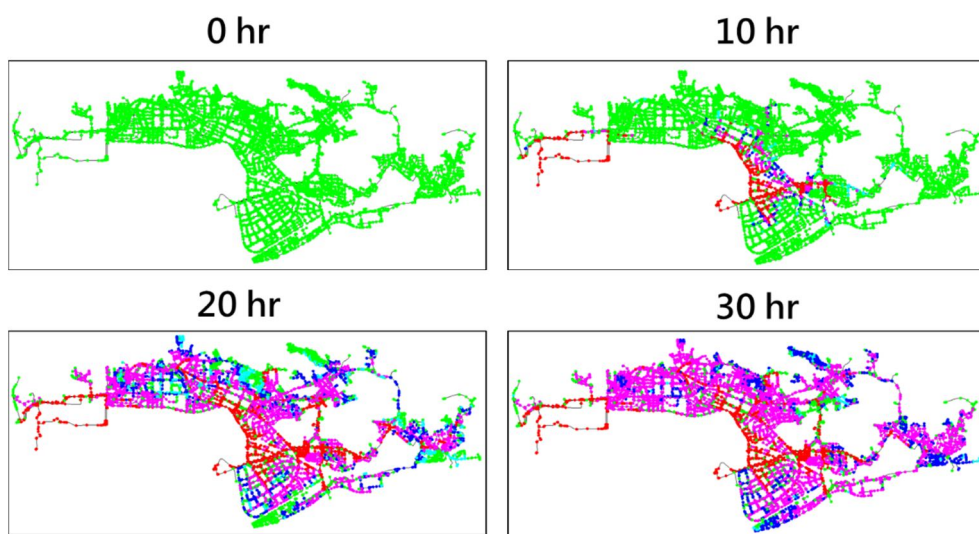


圖 14 管網餘氣隨時間擴散示意圖

3.4 與航遙航測資料整合應用

傳統水力分析系統多以平面二維圖資為主要呈現方式，雖能提供一定程度之操作資訊，然在複雜事件情境下，其空間解析與視覺輔助能力仍有限。隨著三維建模技術與遙航測資料處理之進展，包含正射影像、LiDAR 點雲與建物模型等高精度資料之取得與應用日益成熟，現今已具備整合三維模型與水力分析成果之條件，可有效強化災害應變與營運管理的即時判斷力。

在颱風期間或其他突發事件發生時，臺北自來水事業處會立即啟動緊急應變中心(Emergency Operation Center, EOC)，並依據實際狀況發佈相關通報案件。此期間，可能因管網調度需求出現區域性加壓或減壓的情形。過往此類事件之呈現主要仰賴二維圖面與文字描述，對於空間變化與立體環境理解較為抽象。

未來透過結合三維城市模型(如 CityGML 或 BIM)、水力模擬成果(如壓力場分佈、流量變化模擬)、以及遙航測資料(例如 LiDAR 所建構之地形與建物模型)，可建構出立體化、動態化的視覺操作介面。此一整合平台不僅能即時展示管線壓力變動與異常熱區，亦能結合時間序列動畫模擬供水行為，輔助 EOC 人員進行空間決策與風險評估，有效提升

災害應對之效率與準確性，如圖 15 所示。

4. 結論與建議

本研究結合自來水智慧化管理技術與水力分析模型，並應用 GIS 技術導入工程實務應用，為北水處提供了一套高效且精準的工具，用於支援工程施工的精緻化智能管理。透過智慧化管理系統，北水處能夠即時監控管網的運行狀態，並利用水力分析進行深入的數據解析，預測工程施工對供水系統的潛在影響。

北水處自民國 106 年起建立臺北自來水智慧化資訊管理系統(Water Intelligent System of Enterprise, WISE)，藉由 GIS 資訊技術導入及圖資拓模連結性的重整，可即時轉出水理模型所需基礎資料，利於水力模型建立、校正、模擬及分析作業，獲得良好成效。且當有數據異常時，可即時於地圖顯示，結合追蹤分析，讓監控中心同仁於系統可瞭解影響所及範圍，進行輔助決策，同時若有發生水壓不足時，亦可即時預警，降低災害風險。該系統的應用範圍涵蓋施工期間的供水模擬、壓力分布預測，以及水質可能受影響的範圍評估。同時，系統能自動生成最佳化的施工方案，並提供多種進水點組合模擬，以確保在施工過程中仍能維持穩定的供水服務。



圖 15 水力分析與航遙航測資料整合應用示意圖

此外，智慧管理系統還具備即時預警功能，當施工引起的壓力或流速異常達到預設門檻時，系統將立即發出警示，協助管理者快速調整方案，減少供水中斷或水質異常的風險，當發生爆管漏水時，監工透過行動裝置，結合智能斷水追蹤功能，自動計算停水影響範圍，可確認需關閉開關及受停水影響用戶統計，加速漏水處理，避免災情擴大。這種智能化的管理方式不僅提升了施工期間的作業效率，也顯著降低了供水系統因施工而導致的運行風險，為自來水工程的現代化管理樹立了新的標竿。

參考文獻

- Boryczko, K., Piegdoń, I., Szpak, D., and Żywiec, J., 2021. Risk assessment of lack of water supply using the hydraulic model of the water supply, *Resources*, 10(5): 43, DOI: 10.3390/resources10050043.
- Cen, H., Huang, D., Liu, Q., Zong, Z., and Tang, A., 2023. Application research on risk assessment of municipal pipeline network based on random forest machine learning algorithm, *Water*, 15(10): 1964, DOI: 10.3390/w15101964.
- Creaco, E., Campisano, A., Fontana, N., Marini, G., Page, P.R., and Walski, T., 2019. Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review, *Water Research*, 161: 517–530, DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.025.
- Henriques-Silva, R., Duchesne, S., St-Gelais, N.F., Saran, N., and Schmidt, A.M., 2021. On-line warning system for pipe burst using bayesian dynamic linear models, *Water Resources Research*, 59(4): e2021WR031745, DOI: 10.1029/2021WR031745.
- Li, R., Huang, H., Xin, K., and Tao, T., 2015. A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems, *Water Supply*, 15(3): 429–441, DOI: 10.2166/ws.2014.131.
- Mehr, A.D., Tas, E., and Kahya, E., 2020. Risk assessment of fuel supply pipelines: Kalecik power plant case study, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(4):05020005, DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000496.
- Page, P.R., Zulu, S., and Mothetha, M.L., 2019. Remote real-time pressure control via a variable speed pump in a specific water distribution system, *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(1): 20–28, DOI: 10.2166/aqua.2018.074.
- Pietrucha-Urbanik, K., and Tch'orzewska-Cieślak, B., 2018. Approaches to failure risk analysis of the water distribution network with regard to the safety of consumers, *Water*, 10(11): 1679, DOI: 10.3390/w10111679.
- Rezaei, H., Ryan, B., and Stoianov, I., 2015. Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks, *Procedia Engineering*, 119: 253–262, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.883.
- Shiu, C.C., Chiang, T., and Chung, C.C., 2022. A modified hydrologic model algorithm based on integrating graph theory and gis database, *Water*, 14(19): 3000, DOI: 10.3390/w14193000.
- Shiu, C.C., Chung, C.C., and Chiang, T., 2023. Enhancing the epanet hydraulic model through genetic algorithm optimization of pipe roughness coefficients, *Water Resources Management*, 38(1): 323–341, DOI: 10.1007/s11269-023-03672-0.
- Ullah, I., Fayaz, M., and Kim, D., 2018. Analytical modeling for underground risk assessment in smart cities, *Applied Sciences*, 8(6): 921, DOI: 10.3390/app8060921.
- Vanitha, C.N., Easwaramoorthy, S.V., Krishna, S.A.,

- and Cho, J., 2023. Efficient qualitative risk assessment of pipelines using relative risk score based on machine learning, *Scientific Reports*, 13(1): 14918, DOI: 10.1038/s41598-023-38950-9.
- Wang, X.T., Guo, G.C., Liu, S.M., Wu, Y.P., Xu, X.Y., and Smith, K., 2020. Burst detection in district metering areas using deep learning method, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(6): 04020031, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001223.
- Zhou, X., Tang, Z., Xu, W., Meng, F., Chu, X., Xin, K., and Fu, G., 2019. Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks, *Water Research*, 166: 115058, DOI: 10.1016/j.watres.2019.115058.

Integration of Smart Water and Hydraulic Models in Construction Management

Yu-Tai Huang¹ Chin-Ling Huang² Cheng-Hung Li^{3*} Chia-Cheng Shiu⁴
Hsun-Jung Chen⁵

Abstract

The importance of urban water resource management is increasing, requiring advanced tools to support operations and decision-making. This study integrates artificial intelligence, hydraulic modeling, and geographic information systems to enhance analysis and overcome the limitations of traditional approaches in assessing affected users. Focusing on Taipei's water distribution network, the framework applies three key practices. First, construction impact analysis identifies service areas and households affected by pipeline replacement, enabling accurate planning and communication. Second, network planning and design use smart isolation techniques by controlling boundary valves to determine the optimal inflow point and improve water distribution efficiency. Third, multi-period source tracing applies dynamic hydraulic modeling to quantify water source proportions at each node and track major flow paths across time. This integrated methodology provides a powerful means to dynamically evaluate user impacts and precisely map results to individual pipelines. For the Taipei Water Department, it offers tailored management strategies that improve maintenance efficiency, strengthen decision support for pipeline renewal, and advance sustainable, data-driven water management.

Keywords: Hydraulic Model, Geographic Information System, Trace Analysis, Network Planning and Design, Smart Water

¹ Division Chief, Taipei Water Department

² Executive Engineer level 1, Taipei Water Department

³ Executive Engineer level 3, Taipei Water Department

⁴ Assistant Manager, Department of Geomatics, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

⁵ Planning Engineer, Department of Geomatics, CECI Engineering Consultants, Inc., Taiwan

* Corresponding Author, E-mail: paradise1271@water.gov.taipei

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: May 29, 2025

Accepted Date: Sep. 15, 2025

綠島高精度圖資及三維實景於數位孿生之應用

沈碧恕¹ 王明楠² 李良輝³ 林宏麟⁴ 賴澄漂⁵

邱俊榮^{6*} 簡睿怡⁷

摘要

臺東縣政府配合中央國土資訊系統基本地形資料庫建置政策，辦理「綠島鄉高精度數值地形圖資精進暨 3D 數值實景建模測製計畫建置案」，採用有人航攝飛機同時搭載空載光達及傾斜攝影系統，製作綠島 6 cm 真實正射影像、50 cm 數值高程模型、6 cm 3D 實景模型、10 處 LOD3 精緻建物模型，及使用真實正射影像繪製之一千分之一地形圖為全國首創，其成果驗證精度均符合規範，達到「影像即地圖」的目標，將綠島打造成為數位孿生(Digital Twin)空間資訊開放數位創新實驗區及 3D GIS 示範場域，高精度圖資可應用於地籍測量、土地規劃、土木建築、旅遊路線及防災救難等。

關鍵詞：數值地形圖、3D 數值實景建模、數位孿生、全波形空載光達、傾斜攝影系統

1. 前言

109 年為配合國家重大建設，推動臺東縣縣政發展，完成蘭嶼地區現況之正射影像及地形圖資料，加速建置臺東縣政府國土資訊基本資料庫，以作為地籍測量應用與土地規劃之基礎參考圖資，成效非常卓越。

本作業係臺東縣政府於 112 年延續前期計畫，並配合中央國土資訊系統基本地形資料庫與地理資訊系統建置政策，以及 TWD97 系統之國土測繪標準，滿足縣政規劃與推動、地理資訊便民服務系統建置及民間套繪參考等實際使用需求，爰辦理「綠島鄉高精度數值地形圖資精進暨 3D 數值實景建模測製計畫建置案」。測製範圍為綠島風景特定區陸域部分(應包含沿岸島礁區)面積約為 1,500 公頃(ha)(臺東縣政府，2022)，採用有人航攝飛機同時搭載空載光達與大像幅傾斜攝影系統，以傾斜攝影

測量和電腦視覺理論所發展的 MVS / SfM (Multi-View Stereo / Structure from Motion) 影像處理技術，能有效改善建物重建的完整性與精度(Rothermel *et al.*, 2012)，提供品質更好的三維密點雲、三維影像模型和真實正射影像等成果(李怡蓁，2014、張立穎，2017)，並經實際驗證所產製的圖資已能滿足數值地籍測量及土木工程地形資料的精度要求(李欣宜，2019、顏港龍，2019、林獻章，2020、張庭榮，2019)。

綠島高精度數值地形圖資和三維實景成果證實符合航測精度規範，更可簡化圖資製作工序，減少人力設備，大幅提升航測效率，並可應用於數位孿生技術結合水文分析模型，進行精確的淹水模擬與災害風險評估；以及高精度的三維地形模型為坡地穩定性分析與土石流預警系統提供重要基礎資料；同時視域分析與避難路線規劃等應用，為城市防災管理提供科學決策支援(Liu *et al.*, 2009)等多目標應用。

¹ 臺東縣政府地政處 處長

² 臺東縣政府地政處 科長

³ 中國測量工程學會 監審案計畫主持人

⁴ 中國測量工程學會 監審案協同主持人

⁵ 自強工程顧問有限公司 董事長

⁶ 自強工程顧問有限公司 副總經理

⁷ 自強工程顧問有限公司 專案組長

* 通訊作者，電話: 02-22252200 轉 221, E-mail: 221@st2200.com

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 04 月 14 日

接受日期：民國 114 年 09 月 22 日

2. 工作方法

2.1 工作流程

工作流程如圖 1 (沈碧恕等, 2022)。

2.2 航測標布設

依據內政部一千分之一數值航測地形圖測製作業規定之航測標布設原則, 使用測區內使用既有

「主控制點」、「圖根點」以及「新布設鋼標」, 於航空攝影前在選定點位上設置對空標誌, 做為空中三角測量(以下簡稱空三)控制之用, 布設分布及現場照片如圖 2 所示。

為檢核成像品質, 測區內至少布設一處幾何解析度及色彩平衡檢定標為檢核成像品質, 檢測標大小為 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 之正方形, 黑白雙色各為兩塊 1 m^2 的正方形, 如圖 3 所示。

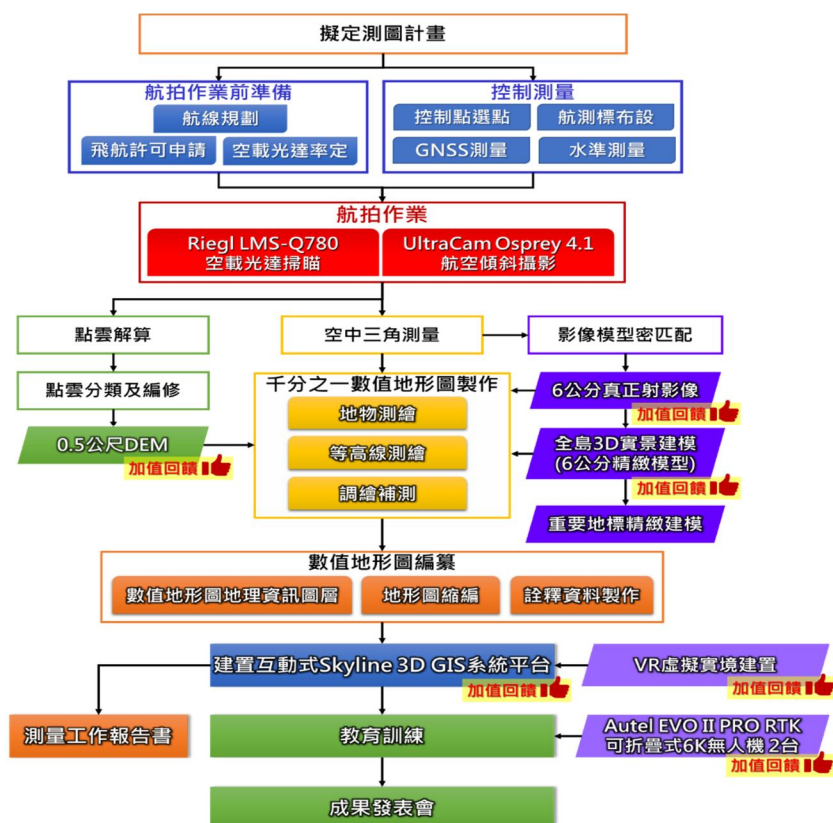


圖 1 工作流程圖



圖 2 航測控制點、檢定標控制點及檢核點分布

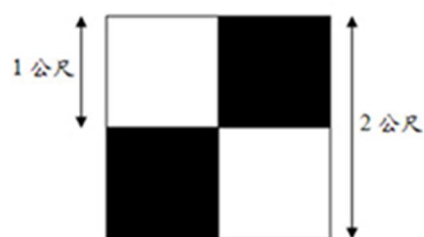


圖 3 檢定標規格及現場照片

2.3 控制測量

2.3.1 平面控制測量

依據內政部「一千分之一數值航測地形圖測製作業規定」，採用內政部國土測繪中心「107 年離島一等水準點測量成果」及「107 年離島衛星定位測量 TWD97【2010】成果」之 TWD97【2010】坐標系統成果作為已知平面控制點，以 GNSS 靜態進行測量坐標。

2.3.2 高程控制測量

高程控制系統採用內政部國土測繪中心「107 年離島一等水準點測量成果」之正高成果，以直接水準測量方式引測至航測控制點，作為測區高程控制資料之依據。

2.3.3 方塊標檢核點布設及測量

於既有「主控點」及「圖根點」上布設 20cm 方塊標，使用 RTK 連測「107 年離島一等水準點測量成果」-已知一等水準點(TWD97【2010】、正高)為基準站，取得移動站-方塊標檢核點之平面及高程位置。

2.4 航空攝影

2.4.1 使用儀器

使用 UltraCam Osprey 4.1 大像幅傾斜像機如圖 4 所示，擁有多方向動態補償技術 (Adaptive Motion Compensation)，可同時兼顧精緻模型紋理獲取與高精度製圖需求，以及垂直與傾斜航拍影像解析度一致。此外，20,544 像素的橫向覆蓋範圍搭配高解析的 3.76 μm 像元尺寸，大幅度提升飛航執行效率，



圖 4 UltraCam Osprey 4.1 大像幅傾斜攝影機儀器照

2.4.2 航線規劃

依據作業規定規劃測區航線相關資訊如表 2，共 31 條航線，總長為 212 km，航線規劃成果以及計畫範圍套疊如圖 5。

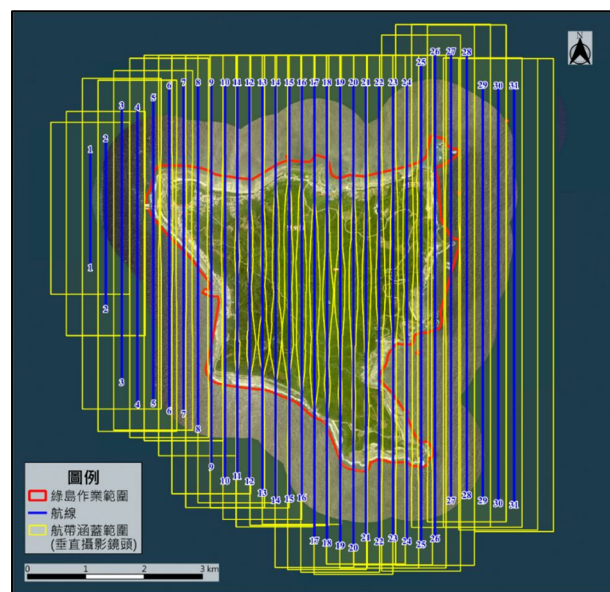


圖 5 航線規劃成果圖

2.4.3航空攝影作業方法

航空攝影全程以 GNSS 輔助導航，並以高精度 GNSS 及高頻率 IGI IMU 輔助航拍，計算出每張航片之定位姿態(position and orientation system, POS)，

以提高空中三角平差及立體測圖精度。
採用雙引擎有人專業航攝飛機(BN2-B69896)於臺東機場執行綠島航拍計畫，執行任務照片如圖 6 所示。

表 1 UltraCam Osprey 4.1 大像幅傾斜攝影機規格表

垂直攝影主像機		傾斜攝影像機	
影像大小	20,544 × 14,016 pixels	影像大小	14,144 × 10,560 pixels
像素大小	3.76 μm × 3.76 μm	像素大小	3.76 μm × 3.76 μm
焦距	79.6 mm	焦距	123.38 mm
動態範圍	> 83 db	動態範圍	> 83 db
連拍時間	0.7s	連拍時間	0.7s
鏡頭畸變	<0.002mm	鏡頭畸變	<0.002mm

表 2 航線規劃資訊

項次	項 目		規劃資訊	備 註
1	飛航高度		1400 m	
2	航拍測線		31 條	
3	飛航長度		212 km	-
4	UltraCam Osprey 4.1 影像	垂直及傾斜影像解析度(GSD)	6 cm	全面 6 cm 高解析影像
5		左右重疊	80 %	符合規範 製作三維網格模型
6		前後重疊	80 %	
7	Riegl LMS-Q780	左右重疊	83 %	-
8		發射頻率	190 kHz	-
9		光達強度	100 %	-
10		密度	6 點/m ²	產製 0.5m DEM/DSM



圖 6 BN2-B69896 執行航拍實照

2.5 數值高程模型及等高線測繪

採用全波形空載光達 Riegl LMS-Q780(如圖 7 所示)與大像幅航空傾斜攝影機 UltraCam Osprey 4.1 同步拍攝掃瞄，完整獲取相應航拍影像之地形資訊，如圖 8 所示，能記錄 1ns 取樣之波形資料，需包含發射脈衝(transmitted pulse)與接收回波之波形，以及 8bit(含)以上之反射強度資訊，掃瞄成果需能輸出回波波形相關屬性資料，如波形寬度(width)、振幅(amplitude)值等。

於空載光達點雲航帶平差工作完成，利用 Terrascan 模組進行點雲自動分類，其演算法原理主要利用選取範圍內的低點組成三角網模型，形成初始地表，接續以人工設定三角網垂直距離(iteration distance)，判定其餘點是否為地表點，自動分類地表點雲與非地表點雲。藉由點雲自動分類完成初步地表分類，接續以人工編修獲取完整地表資料。

使用 SCOP++軟體將分類後點雲成果內插為 0.5 m 之 DEM/DSM，以空載光達測量得到之 DEM

產製等高線，等高線間隔，首曲線為 1 m，計曲線為 5 m。

2.6 真實正射影像製作

2.6.1 真實正射影像製作

採用多視點立體(Multi-View Stereo)視覺攝影測量方式進行真實正射影像(True-Ortho Images)製作，使用 Metashape 軟體製作真實正射影像，匯入 GNSS+IMU 精密解算外方位(POS)數據，採用 SfM 原理進行影像自動匹配，並採用局部優化空三方式進行解算，製作示意畫面如圖 9 所示。

使用影像密匹配稠密點雲(如圖 10 所示)製作之 DSM 用於真實正射影像投影糾正，如圖 11 所示。

數值真正射影像以彩色影像表示，並進行無接縫鑲嵌及調整全區影像之色調、亮度一致，整張正射影像之色調應均勻，接邊處色調需一致，不應有人眼可辨識之邊緣線，製作 6 cm 真實正射成果如圖 12 所示。



圖 7 空載光達 Riegl LMS-Q780 實機照

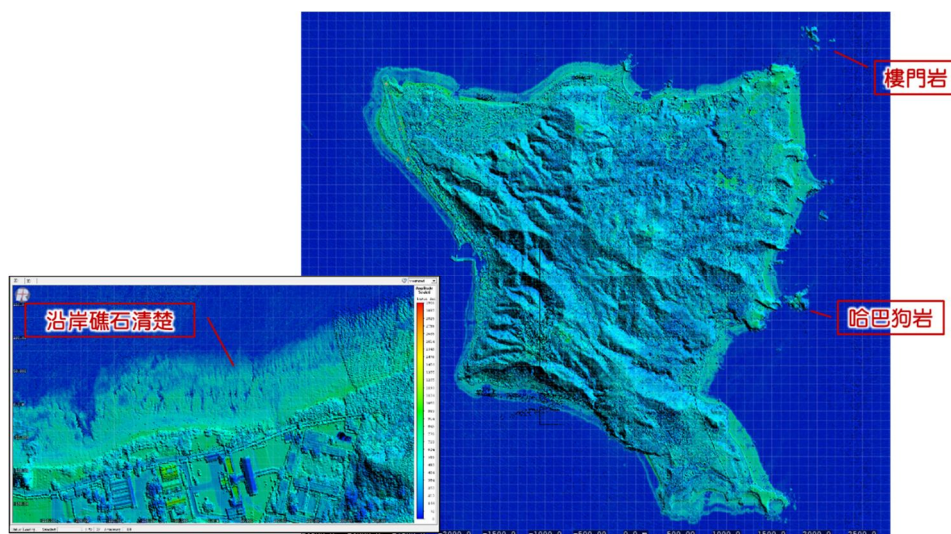
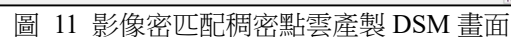
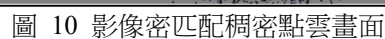
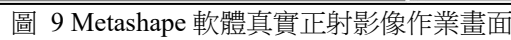


圖 8 綠島空載光達掃瞄點雲成果初步展示



2.6.2 真實正射影像精度比對

(1) 航測標與真實正射影像平面位置比對

量測 20 個航測標坐標與真實正射影像上航測標中心點平面位置均方根誤差為 4.3 cm，符合作業規定不得大於 50 cm。

(2) 檢核點與真實正射影像平面位置比對

量測 37 個檢核點坐標與真實正射影像上平面位置均方根誤差為 4.9 cm，符合作業規定不得大於 50 cm。

2.7 三維模型

2.7.1 綠島三維網格模型

(1) 使用軟硬體及作業方法

使用 UltraCam Osprey 4.1 全面航拍垂直及傾斜均達 6cm 原始影像，UltraCam Osprey 4.1 垂直及傾斜五台像機為同時、同曝光點、同軸、同解析度獲取影像資訊，高準確獲取測量成果且毫無時間差，並為確保綠島地物側邊資訊完整獲取，外擴增加綠島

四周航線，使綠島達到垂直及傾斜影像前、後、左、右全覆蓋。

以 ContextCapture Center 軟體進行 3D 地貌重建，ContextCapture Center 具有高性能影像解譯及平行處理能力，僅依靠影像資料，即可以創建逼真的 3D 建模場景，在精度、自動化、適應性及流暢性等方面都有著相當高的優勢，作業畫面如圖 13 所示。

(2) 綠島三維網格模型成果

節錄綠島具代表性地標的三維網格模型成果如圖 14~16 所示。

2.7.2 三維網格模型成果精度分析

量測 20 個航測標控制點平均精度高達 3 cm，航測標控制點坐標與三維網格模型差值比較如表 3，量測畫面如圖 17。

2.8 重要地標精緻建模

(1) 選擇 10 處重要地標、古蹟、機關、商業設施，製成 LOD3 精緻建物模型，擇訂建置地標如表 4 所示。

表 3 航測標與三維網格模型差值

序號	點名	航測標控制點坐標		三維網格模型
		X(m)	Y(m)	距離差值(m)
1	ST001	297894.655	2508565.342	0.00
2	ST002	301890.572	2504047.157	0.03
3	ST003	300435.781	2508707.850	0.01
4	ST004	299402.196	2508395.612	0.02
5	TTC260	301987.742	2507413.724	0.01
6	TTC261	301947.269	2507311.201	0.02
7	TTC280	301273.526	2505283.771	0.05
8	TTC293	301121.974	2504307.778	0.04
9	TTC294	300984.711	2504318.690	0.04
10	TTC301	299906.426	2505029.687	0.02
11	TTC343	300430.862	2508050.595	0.01
12	TTC344	300603.052	2508115.105	0.05
13	TTC370	299155.274	2507154.976	0.04
14	TTC387	299725.202	2505650.244	0.01
15	TTC388	299703.312	2505737.487	0.03
16	BA111	301292.003	2505356.554	0.07
17	BA24	298129.642	2507596.527	0.05
18	BA25	298181.524	2507555.370	0.06
19	BA54	298687.603	2505295.990	0.02
20	BA55	298750.952	2505269.406	0.01
3D 模型與航測標平均精度				0.03



圖 12 綠島真實正射影像製作成果

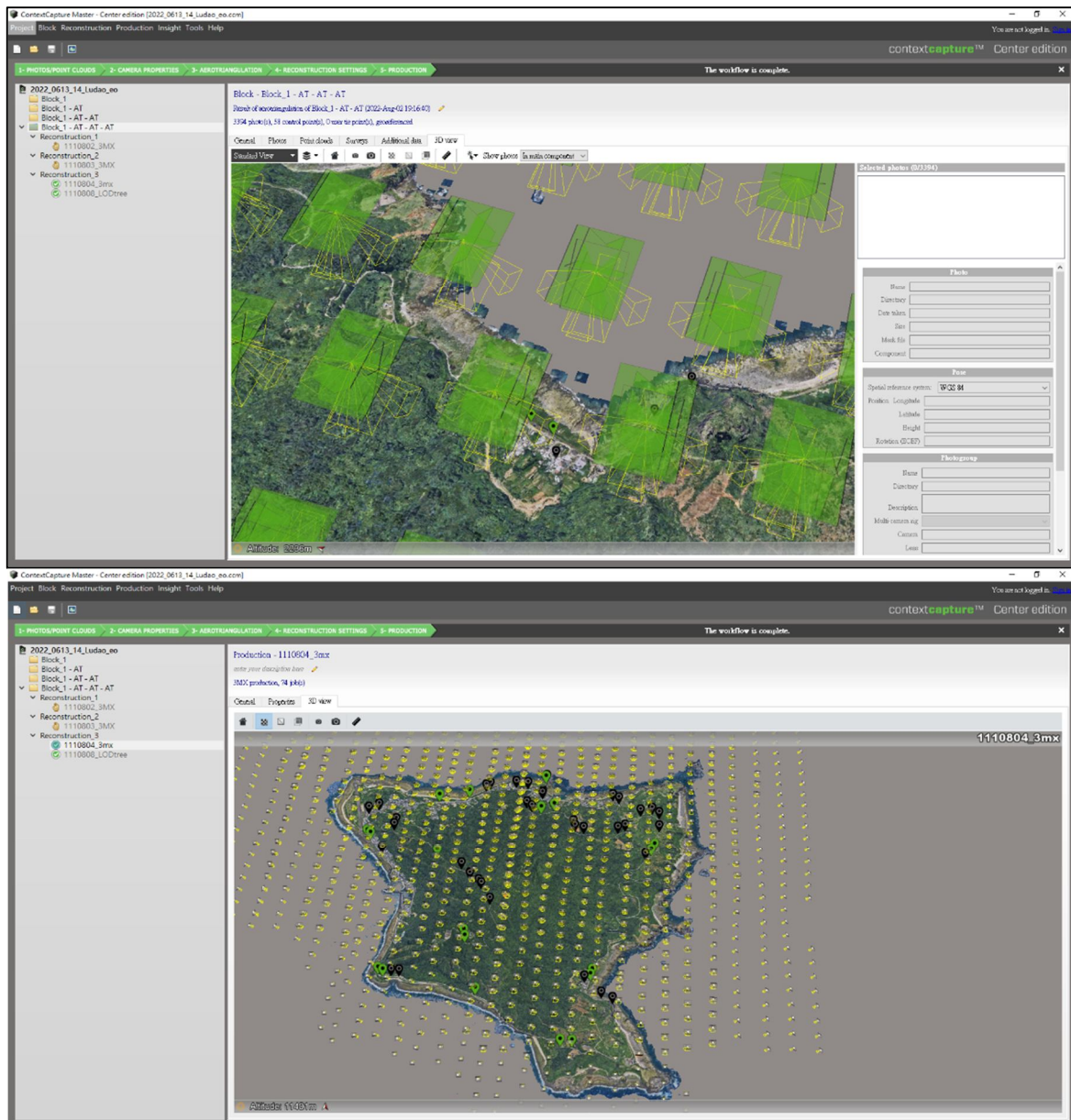


圖 13 ContextCapture Center 3D 建模作業畫面



圖 14 中寮漁港三維網格模型成果

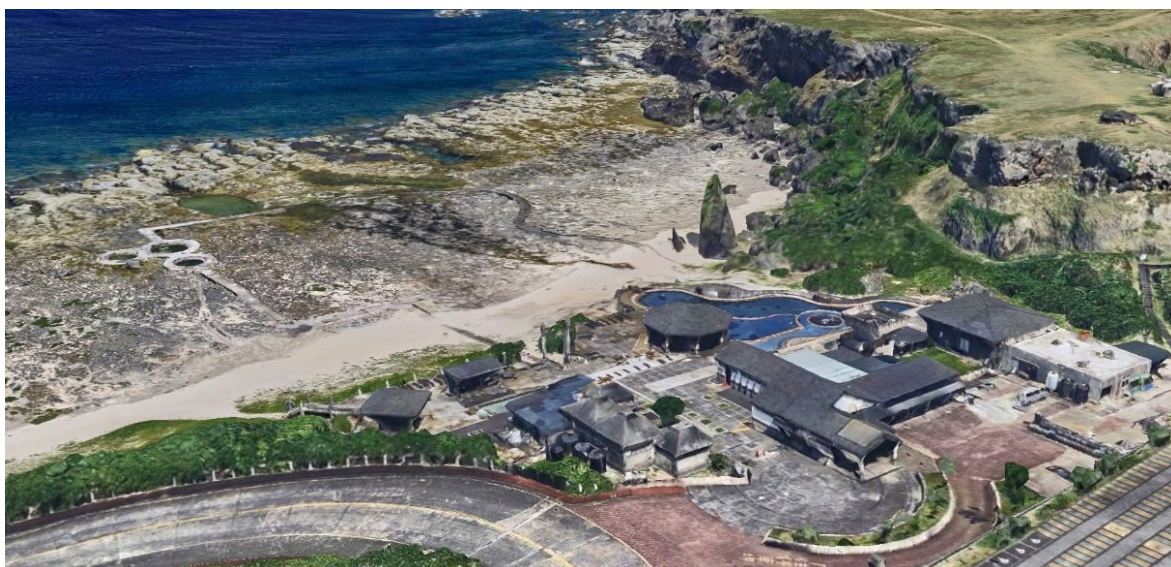


圖 15 朝日溫泉三維網格模型成果

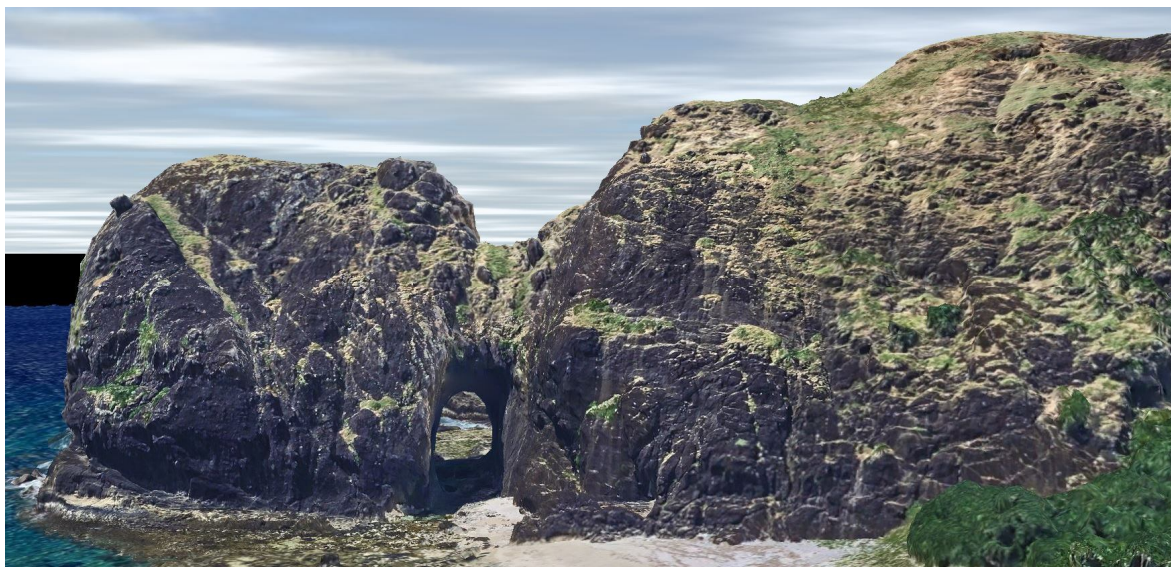


圖 16 睡美人岩三維網格模型成果



圖 17 三維建模成果與航測標量測畫面

表 4 10 處重要地標精緻建模一覽表

項次	地標	管理機關
1	綠島燈塔	交通部航港局
2	綠島燈塔園區	交通部航港局
3	綠島遊客中心	交通部觀光局東部海岸國家風景區管理處
4	人權紀念公園	國家人權博物館
5	國家人權博物館	國家人權博物館
6	綠島人權文化園區-八卦樓	國家人權博物館
7	中正堂	國家人權博物館
8	公館國小	臺東縣綠島鄉公館國民小學
9	綠島鄉公所	臺東縣綠島鄉公所
10	綠島免稅商店	臺東縣政府(財政及經濟發展處)

(2) 資料蒐集

在建 3D 立體模型之前，首先蒐集建置物件之各種角度像片、物體結構設計圖等各式資料。資料蒐集之完整性與否對之後 3D 立體模型的製作上會有相當顯著的直接影響，為得到最精緻的 3D 建模，特配合地面近景攝影及 UAV 空拍攝影，以蒐集最全方位建物特徵及最高解析建物材質資料(如圖 18 所示)。

(3) 模型建置

藉由現地量測及 UAV 航拍資訊中取得初步 3D 模型為比例依據，參考現地近景攝影及 UAV 空拍照片資料，逐步進行 3D 模型的建模工作，拉出立體形狀並且加以修飾。

將模型所有貼面作一標準化處理，使貼圖與骨架能夠完美對應，將修飾完成的貼圖置入原先做好的 3D 軟體中，分別將建物材質貼圖貼附在相對應的 3D 模型上，精緻 3D 模型成果完成如圖 19 所示。



圖 18 近景攝影及材質蒐集

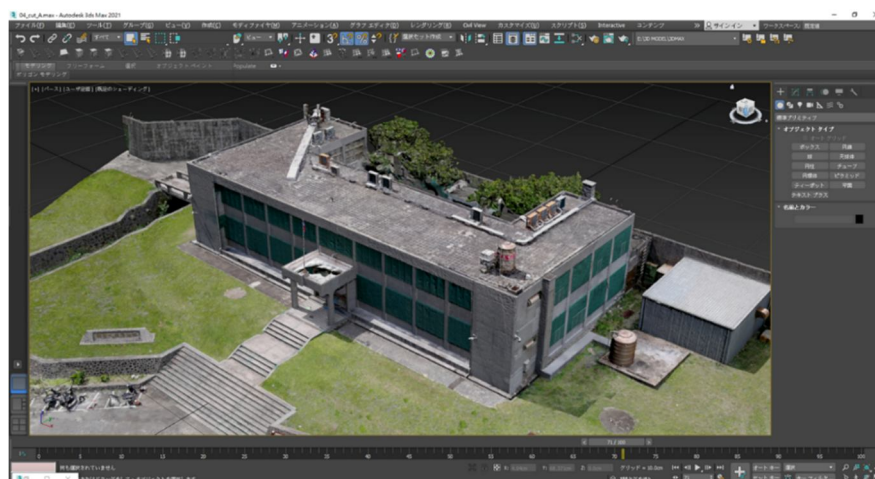


圖 19 重要地標精緻 3D 模型成果

2.9 一千分之一地形圖

2.9.1 地物測繪

- (1) 依據工作會議監審方所建議，採用真正射影像繪製平面圖，不足之處再以立體模型補繪，如此可以大幅減輕內業繪圖工作量，同時得到影像地形圖。
- (2) 使用傳統立體製圖與真實正射影像比對平面位置，於 7 ha 範圍內比對 23 個不同地類，平面均方根誤差為 3.3 cm，說明使用真實正射影像繪製地形圖精度符合地形圖作業規定(不得大於 25

cm)，且精度與傳統立體製圖旗鼓相當。傳統立體製圖與真實正射影像平面差值如表 5 所示。

- (3) 因真實正射影像僅呈現平面地物資訊，部分地形圖地物、地類、類別不容易辨別，使用同一時間取得傾斜影像產製之 3D 模型、同步空載光達點雲產製 50cm DEM 日照陰影圖及立體製圖輔助真實正射影像繪製地形圖，真實正射影像繪製困難類別及補助測繪之方法如表 6 所示，繪製畫面如圖 20 所示。
- (4) 採用編修完成的空載光達點雲，於道路上及平坦區、植物地區及地形變化等處，萃取適當位置的地面點作為地形圖獨立標高點。

表 5 傳統立體製圖與真正射影像坐標比對表

檢驗點		立體製圖坐標(m)		真正射影像坐標(m)		平面誤差(m)
		X	Y	X	Y	
1	建物 1	301222.585	2505133.921	301222.503	2505133.880	0.092
2	建物 2	301186.150	2505137.667	301186.150	2505137.667	0.000
3	建物 3	301181.743	2505181.228	301181.743	2505181.228	0.000
4	建物 4	301204.502	2505223.643	301204.466	2505223.635	0.036
5	建物 5	301224.108	2505247.813	301224.090	2505247.851	0.042
6	建物 6	301172.089	2505258.224	301172.085	2505258.290	0.066
7	建物 7	301220.640	2505282.851	301220.640	2505282.851	0.000
8	建物 8	301215.022	2505310.847	301215.012	2505310.890	0.045
9	建物 9	301240.550	2505351.218	301240.550	2505351.218	0.000
10	建物 10	301191.186	2505342.334	301191.154	2505342.388	0.062
11	道路 1	301205.915	2505248.597	301205.915	2505248.597	0.000
12	道路 2	301256.544	2505256.257	301256.544	2505256.257	0.000
13	道路 3	301216.355	2505146.988	301216.355	2505146.988	0.000
14	道路 4	301238.888	2505104.167	301238.888	2505104.167	0.000
15	道路 5	301274.853	2505064.424	301274.853	2505064.424	0.000
16	道路 6	301259.183	2505349.357	301259.183	2505349.357	0.000
17	道路 7	301225.131	2505322.040	301225.131	2505322.040	0.000
18	混凝土堤 1	301291.484	2505357.218	301291.484	2505357.218	0.000
19	混凝土堤 2	301252.909	2505215.397	301252.909	2505215.397	0.000
20	混凝土堤 3	301296.297	2505168.441	301296.271	2505168.494	0.059
21	混凝土堤 4	301254.500	2505130.619	301254.500	2505130.619	0.000
22	混凝土堤 5	301294.200	2505092.478	301294.200	2505092.478	0.000
23	牆 1	301202.553	2505270.067	301202.553	2505270.067	0.000
7 公頃(ha)範圍 檢核 23 個不同地物 均方根誤差						0.033

表 6 真正射影像繪製困難類別及補助測繪之方法

地形資料名稱	輔助測繪
土坎	同步傾斜影像產製之 3D 模型、 同步空載光達點雲產製 50 cm DEM 日照陰影圖
樓層註記	同步傾斜影像產製之 3D 模型
電桿、燈桿	傳統立體製圖
露岩	同步傾斜影像產製之 3D 模型
植被遮蔽之水線、結構線、道路、小徑	同步空載光達點雲產製 50 cm DEM 日照陰影圖



圖 20 使用 3D 模型輔助真正射影像繪製地形圖

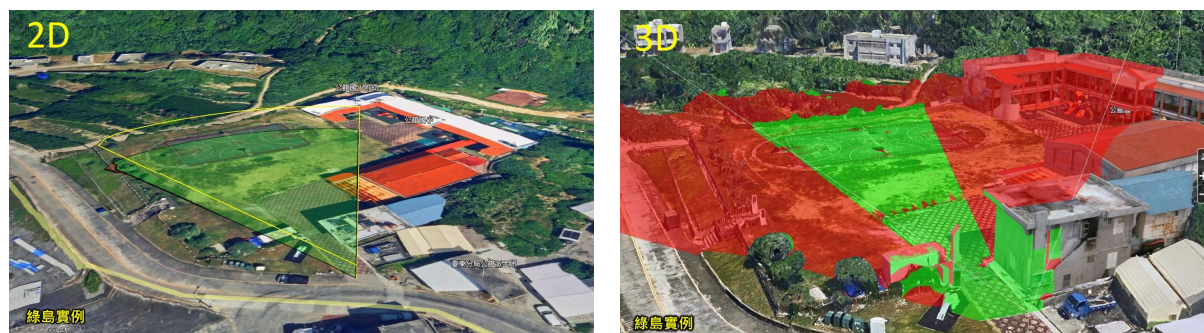


圖 22 視域分析及防災避難之應用



圖 23 淹水模擬之應用



圖 24 土地規劃及土木建築之應用

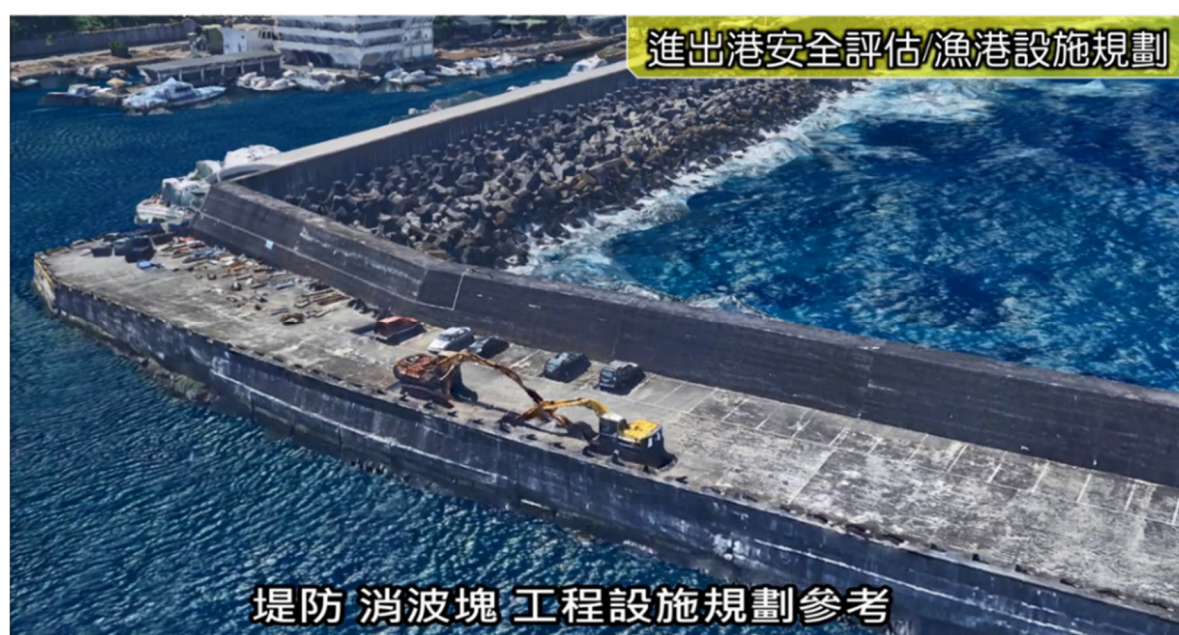


圖 25 港埠安全評估之應用



圖 26 VR 虛擬實境及旅遊路線規劃之應用



圖 27 文化資產保存之應用

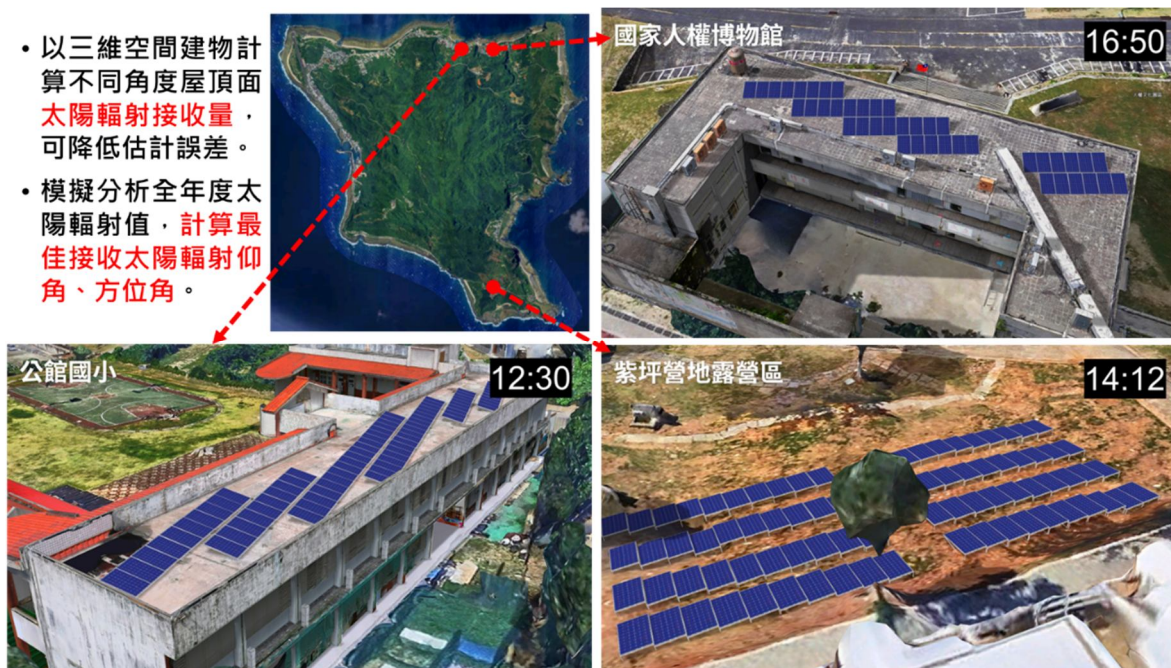


圖 28 太陽能光電潛力分析之應用

4. 結論與建議

4.1 結論

採用雙引擎有人專業航攝飛機，同步搭載全波形空載光達及大像幅航空傾斜攝影系統，以左右重疊率達 80% 方式執行光達掃描及傾斜攝影，獲得高密度光達點雲及高解析航拍像片，完成綠島全區 6 公分真實正射影像、50 cm 數值高程模型、6 cm 3D 實景模型、10 處 LOD3 精緻建物模型等成果，也採用 6 cm 真實正射影像繪製之一千分之一地形圖，成果驗證精度均符合規範，達到「影像即地圖」的目標，將綠島打成為數位孿生空間資訊開放數位創新實驗區及 3D GIS 示範場域，可應用於地籍測量、土地規劃、土木建築、旅遊路線及防災救難等，成為規劃、評估、展示、執行最佳利器。

4.2 建議

- (1) 內政部國土測繪中心於民國 112 年開始執行「多維度空間資訊基礎圖資測製工作」，推動測製一千分之一地形圖及建置三維網格模型，同時於範圍內選定適當地區及地標建置精緻化之建物模型，選定部分特色聚落、社區總體營造及地方創生地區測製 LOD2 建物模型屋頂結構，及針對重要地標建置 LOD3 建物模型等成果，建議內政部主管機關持續爭取預算，每年投入該計畫推動執行。
- (2) 於國土計畫內建議可採用高重疊高解析的航空傾斜攝影系統，產製的真實正射影像及三維網格模型；並同步執行全波形空載光達掃描，獲得高精度地面標高點及 1 m 等高線，輔助傳統立體製圖提高作業效率。
- (3) 針對無產製一千分之一地形圖的國土地區，以及未來已建置一千分地形圖地區之修測，建議可採用高重疊高解析的航空傾斜攝影系統，產製真實正射影像及三維網格模型作為地形圖資之應用。
- (4) 因應全球真正射製圖的潮流，建議相關單位也需要針對此項技術深入了解及研究，期能讓航測製圖操作過程更為簡便及大眾化，容易上手以利繪

圖人員訓練，相信將有助於航測製圖技術方向的發展。

誌謝

感謝臺東縣政府地政處沈碧恕處長、王明楠科長、吳太龍技正、黃盈彰技士，以及臺東縣臺東地政事務所張泓平課長等人的支持與協助，得以讓綠島案各項工作順利推展如期超值完成。

感謝監審案主持人李良輝老師及林宏麟老師的指導與建議，得以讓綠島案獲得高品質與超創新之各項成果。

參考文獻

- 玉山國家公園管理處，2020。玉山國家公園西北園區航空攝影與光達掃描作業暨圖資製作案，玉山國家公園管理處委託辦理成果報告。[Yushan National Park Headquarters, 2020. Yushan National Park shi bei yuan chiu hang kung she ying yu guang da sau miao tzu ye ji tu tz jr tzu an, The Final Report for Yushan National Park Headquarters. (in Chinese)]
- 李怡蓁，2014。基於多視立體視覺的三維重建與真正射影像製作，國立高雄應用科技大學土木系碩士論文。[Lee, Y.C., 2014. 3-D reconstruction and true orthophoto generation based on multiple view stereo, Master Thesis, National Kaohsiung University of Applied Sciences, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 李欣宜，2019。UAS 航測於地籍圖重測效率提升之研究 -以苗栗縣竹南鎮鹽館前段為例，嘉南藥理大學應用空間資訊系碩士論文。[Lee, X.Y., 2019. Efficiency improvement on the resurvey of cadastral map using UAS photogrammetry-Case study in Yanguanqian Section, dacuo subsection Zhunan Township, Miaoli County, Master Thesis, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 沈碧恕、王明楠、賴澄漂、邱俊榮、簡睿怡，2022。綠島鄉高精度數值地形圖資精進暨 3D 數值實

- 景建模測製計畫(建置案)，臺東縣政府委託勞務計畫測量工作報告書，共 109 頁。[Shen, P.S., Wang, M.N., Lai, C.P., Chiu, C.J, and Jian, R.Y., 2022. Liu dau shiang gau jing du shu jr di shing tu tzjing jin ji 3D shu jr shr jing jian mo tse jr ji hua (jian jr an), The Final Report for Taitung County Government, 1-109. (in Chinese)]
- 林獻章，2020。UAS 技術配合 CIVIL 3D 於河川疏濬設計之研究，嘉南藥理大學應用空間資訊系碩士論文。[Lin, H.S., 2020. Study on river dredging designing using UAS technology with CIVIL 3D, Master Thesis, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張立穎，2017。基於影像式稠密點雲之三維數值城市建模，國立高雄應用科技大學土木系碩士論文。[Chang, L.H., 2017. 3D digital city modeling from image-based dense point cloud, Master Thesis, National Kaohsiung University of Applied Sciences, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張庭榮、李良輝，2019。多視立體視覺三維重建技術於工程監測與變遷偵測應用，中國土木水利工程學刊，31(4)：337-350，DOI：10.6652/JoCICHE.201906_31(4).0005。[Chang, T.R., and Lee, L.H., 2019. Engineering monitoring and change detection for multi-view stereo 3D reconstruction technology, Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 31(4): 337-350, DOI: 10.6652/JoCICHE.201906_31(4).0005. (in Chinese)]
- 彭紹博，2022。推動智慧國土數位孿生之展望，T&D 飛訊，289：1-22。[Peng, S.B., 2022. Twei dung jr hwei guo tu shu wei luan sheng jr jan wang, Training & Development, 289: 1-22. (in Chinese)]
- 臺東縣政府，2022。綠島鄉高精度數值地形圖資精進暨 3D 數值實景建模測製計畫(建置案)服務建議徵求書，臺東縣政府委託勞務計畫，共 24 頁。[Taitung County Government, 2022. Liu dau shiang gau jing du shu jr di shing tu tzjing jin ji 3D shu jr shr jing jian mo tse jr ji hua (jian jr an) fu wu jian yi jeng chiou shu, Taitung County Government wei tuo lau wu ji hua, 1-24. (in Chinese)]
- 顏港龍，2019。UAS 航測輔助土地鑑界與分割之研究，嘉南藥理大學應用空間資訊系碩士論文。[Yen, K.L., 2019. Study or UAS photogrammetry assist survey of land boundary verification and division, Master Thesis, Chia Nan University of Pharmacy and Science, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- Liu, X., Zhang, Z., and Peterson, J., 2009. Evaluation of the performance of DEM interpolation algorithms for LiDAR data, in Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference, Adelaide, Australia, pp.771-779.
- Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., and Haala, N., 2012. SURE: Photogrammetric surface reconstruction from imagery, in Proceedings of the Low Cost 3D Workshop, Berlin, Germany.

Application of High-Precision Maps and 3D Mesh in Digital Twin for Ludao Township

Bi-Shu Shen¹ Ming-Nan Wang² Liang-Hui Li³ Hong-Lin Lin⁴
Cheng-Piao Lai⁵ Chun-Jung Chiu^{6*} Rui-Yi Jian⁷

Abstract

In order to align with the central government's policy on land Information System while to meet the needs of the county government's development and surveying in both official and private department, Taitung County Government promote the project of "High-Precision Digital Terrain Map Data Refinement and 3D Mesh in Ludao Township". This project deploy the surveying aircraft equipped with LiDAR system and nadir/oblique camera system. The result of this project includes 6 cm True Orthophotos, 10 sites of LOD3 mesh, 1/1000 mapping using the 6 cm True Orthophotos, which is the first attempt in nation, and the accuracy of these results exceeds standards, achieving the goal of "image as map". This project aims to transform Green Island into an experimental area of digital twin and 3D GIS. The high-precision, high-quality data produced can be applied to cadastral surveying, land planning, civil construction, tourist routes, and disaster prevention. It is sure to become the best tool for Taitung County Government in planning, evaluation, demonstration, and execution.

Keywords: Digital Terrain Map, 3D Modeling, Digital Twin, Full Waveform LiDAR, Oblique Camera System

¹ Director, Taitung County Land Administration Department

² Section Chief, Taitung County Land Administration Department

³ Supervision Project Leader, Chinese Society of Surveying Engineering

⁴ Supervision Project Co-Leader, Chinese Society of Surveying Engineering

⁵ Chairman, Strong Engineering Consulting Co, Ltd

⁶ Vice President, Strong Engineering Consulting Co, Ltd

⁷ Project Team Leader, Strong Engineering Consulting Co, Ltd

* Corresponding Author, Tel: 886-2-22252200 ext.221, E-mail: 221@st2200.com

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: Apr. 14, 2025

Accepted Date: Sep. 22, 2025

中文稿件投稿注意事項（英文稿件請參閱下頁 Author Guidelines）

本學刊定期出版攝影測量及遙感探測領域之學術論著、技術短文(按中文及英文摘要、關鍵字、前言、材料及方法、結果、討論、參考文獻等撰寫)及應用性報導。收錄之稿件 皆經本編輯委員會安排之專家學者審查程序，並由通訊作者簽署著作權讓渡書。作者可自行聲明文稿和所屬類別，本編輯委員會將依此及審查委員意見決定收錄 文稿之類別。本學刊不接受已經刊載過之文稿，於研討會發表過之論文，經適當增補其內容者為例 外。

投稿地址為 jprssubmit@gmail.com，請以附件寄送稿件之 WORD 檔及 PDF 檔各一份。為便利編審作業，請於 PDF 稿件中移除作者資料(如姓名、服務機關、電話、及電子郵件信箱等)。稿件撰寫要點如下：

1. 頁面：採用 A4 規格頁面。
2. 字體：(1) 中文均以**新細明體**橫式打字；(2) 英文均以 **Times New Roman** 字體橫式打字。
3. 單位：內文、圖表及符號中之度量單位皆採用 SI 公制單位。
4. 首頁：首頁應含內容依次為「題目、作者姓名、摘要、關鍵詞、及作者服務機關及職稱（置於頁尾）」，接續文稿內文。
5. 末頁：末頁應含內容與首頁相同，但皆以英文書寫。
6. 題目：論文題目宜簡明，字體大小為 20 粗體，英文題目每字第一位字母以大寫字體打印。
7. 作者：作者姓名列於題目之下方，字體大小為 14 粗體，其服務機關及職稱以^{1,2,...}上標編號註記於頁尾，字體大小為 9。
8. 摘要：摘要字數以 250 字為限，字體大小為 10 粗體。
9. 關鍵詞：列出三至五個關鍵詞，字體大小為 12 粗體。
10. 章節及標題：(1)章節標題置中，編號一律為阿拉伯數字，如 1, 2, ...，標題字體大小為 18 粗體；(2)小節標題靠左，編號一律為 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2.....，字體大小為 14 粗體。
11. 內文：內文之長度(含圖表)以不超過 22 頁為原則，各段落第一行應縮排，字體大小為 10。
12. 數學式：所有數學式均須標式號於圓括弧內，數學式內所有符號須於符號第一次出現時，應於數學式下方逐一加以定義。
13. 圖及影像：(1)圖及影像均須數位化置於文稿中適當位置；(2)所有圖及影像下方須附圖流水編號及說明；(3)本刊接受彩色圖及影像，但紙版印刷一律採灰階印刷；(4)結尾母加「。」及「.」。
14. 表格：(1)表格均須數位化置於文稿中適當位置；(2)所有表格上方須附表流水編號及說明；(3)本刊接受彩色表格，但紙版印刷一律採灰階印刷；(4)結尾母加「。」及「.」。
15. 參考文獻(中、日文須英譯)：(1)參考文獻應列於文末，文稿中未直接引用者不得列入；(2)中文文獻需加英文翻譯，於結尾加上(in Chinese)，日文書寫同中文文獻，於結尾加上(in Japan)。先排列中、日文參考文獻，再排列英文參考文獻，其他文字參考文獻列於英文參考文獻之後；(3)中文參考文獻以第一作者 姓名筆劃順序排列，英文參考文獻以第一作者之姓依英文字母順序排列。當作者相同時，依發表年代排列，作者及發表年代完全相同時，依日期在年代後加以 a, b, c 順序。第一作者姓名相同時，先排列單一作者之參考文獻，其次為多作者文獻；(4)參考文獻之格式如下列：
 - 期刊論文：作者姓名，年代。文章標題，期刊名稱，卷數(期數)：起始頁數－結束頁數。
 - 書籍：作者姓名，年代。書名，出版者，出版地。
 - 研討論文集：作者姓名，年代。篇名，論文集名稱，發表地點，卷(期)：起始頁數－結束頁數。
 - 網路引用：作者姓名，年代。篇名，取自網址，檢索日期。
16. 參考文獻引用：(1)作者為一人時，以作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如楊明德(2007)或(楊明德，2007)、Yang (2007)或(Yang, 2007)；(2)作者為二人時，以二作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)及發表年代，如楊明德及蘇東青(2014) 或(楊明德及蘇東青，2014)、Yang & Su (2014)或(Yang & Su, 2014)；(3)作者為多人時，以第一作者全名(中文文獻)或姓(英文文獻)，之後加「等」(中文文獻)或「*et al.*」(英文文獻)及發表年代，如(楊明德等，2016)或楊明德等(2016)、Yang *et al.* (2016)或(Yang *et al.*, 2016)，「*et al.*」請以斜體；(4)作者及發表年代完全相同時，依日期在年 代後加以 a, b, c 引用，如 Yang & Su (2008a)、Yang & Su (2008b)。

Author Guidelines

The Journal of Photogrammetry and Remote Sensing periodically publishes academic articles, technical short papers, and application reports addressing topics in photogrammetry and remote sensing. Acceptance of submitted manuscripts for publication is based on a peer-reviewing process arranged by the editorial board. A manuscript will not be formally accepted until a copyright agreement is received. Although authors can indicate their submitted manuscripts belonging to one of the categories of academic articles, technical short papers or application reports, the editorial board will make the final decision based on the suggestions of reviewers. This journal accept no paper ever been published, but a revised appropriately paper published in conference proceedings is an exception.

The manuscript submission address is jprssubmit@gmail.com. Please send your manuscript in both WORD and PDF formats via e-mail attachments. However, for blind reviewing, please eliminate author information in the PDF file. Instructions for authors to prepare a manuscript are as follows:

1. Typing format: Manuscripts should be typed single-column and double-space on A4 page size using font-type of 10pt **Times New Roman**. The pages should be numbered.
2. Units: Manuscripts must use SI (Metric) units in text, figures, or tables.
3. Cover page: The cover page should contain manuscript title, author names, abstract, key words, and author affiliations.
4. End page: The end page contains the same information as the cover page, but in Chinese.
5. Title: The title of the manuscripts should be concise and informative. Please use font size of 20pt,Bold and capitalize the initial letter of each word in the title.
6. Authors: Authors names (using font size of 14pt,Bold) are listed below the title, affiliations (using font size of 9pt,Bold) are listed at the end of the first page marked with ^{1, 2,...}.
7. Abstract: The abstract should be shorter than 250 words and typed using font size of 10pt..
8. Keywords: Keywords (no more than 5 words) should be given and placed below the abstract (using font size of 12pt,Bold).
9. Sections and Sub-sections: Section heading (using font size of 18pt,Bold) should be centered and numbered in 1, 2... etc. Sub-sections (using font size of 14pt,Bold) are justified to the left in 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2...etc.
10. Paper length: Published papers are limited to 22 pages.
11. Equations: Type formulae and equations clearly in black and numbered in curved brackets. All symbols in equations should be clearly defined when they firstly appear in the manuscripts.
12. Figures and Tables: Figures and tables are numbered and described in short. When papers are accepted, original figures, tables, and photographs are expected for reproduction. Color figures and tables are acceptable in digital version, but they will be printed in gray levels in hard copies.
13. References: Only works cited in the text will be included. References should be cited in the text by giving the last name of the author(s) and the year of publication of the reference, such as Yang and Su (2014) or (Yang and Su, 2014). With three or more names use the form “Yang *et al.* (2016) or (Yang *et al.*, 2016)” in the text. When two or more references have the same text identification, please distinguish them by appending “a”, “b”, etc., to the year of publication. References should include the complete title(s), the number of the volume and the page(s) of the information cited. References should be listed in alphabetical order, according to the last name of the first author, at the end of the paper.

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
(Special Issue on the Engineering Applications of
Photogrammetry and Remote Sensing)

CONTENTS

Introduction to the Special Issue

Engineering Applications of Photogrammetry and Remote Sensing
(Hong-Kuei Cheng)

Regular Papers

- Deep Feature Matching for Multi-View Images in Mobile Mapping Systems
(Tee-Ann Teo, Pei-Cheng Chen, Ting-Ni Chen, Hsuan Yang, Zhan-Qing Lin, Kuan-Yi Lee, Kai-Chieh Hung, Chen-Yung Lu)..... **139**
- Monitoring Drought and Land Subsidence with InSAR Technology
(Yun-Chiao Chang, Kuo-Hsin Tseng, Yu-Heng Tai) **153**

Short Papers

- Integration of Multi-Remote Sensing Technologies for Slope Disaster Recovery on Highways
(Hong-Kuei Cheng, Kweishr Li, Hsing-Hua Chiang, Wen-Liang Chueh)..... **167**
- Exploring As-Built Data Management for Maintenance Needs of Public Utility Pipelines: A Case Study of the Taoyuan Aerotropolis Zone Expropriation Project
(Shih-Yao Lan, Yuan-Liang Lee, Yu-Feng Huang, Hsin-Ta Liu, Chiu-Fen Lin, Jun-Xuan Chen) **187**
- Integration of Smart Water and Hydraulic Models in Construction Management
(Yu-Tai Huang, Chin-Ling Huang, Cheng-Hung Li, Chia-Cheng Shiu, Hsun-Jung Chen) **201**
- Application of High-Precision Maps and 3D Mesh in Digital Twin for Ludao Township
(Bi-Shu Shen, Ming-Nan Wang, Liang-Hui Li, Hong-Lin Lin, Cheng-Piao Lai, Chun-Jung Chiu, Rui-Yi Jian) **215**

航測及遙測學刊

(航測及遙測工程應用特刊)

目錄

特刊引言

航測及遙測工程應用特刊
(鄭宏達)

學術論著

- 應用深度特徵於多視角車載影像匹配之研究
(張智安、陳沛丞、陳亭霓、楊軒、林展慶、李冠毅、洪愷頡、呂振永) 139
- PSInSAR 技術監測臺灣乾旱與地層下陷相關性之研究
(張耘僑、曾國欣、戴于恒) 153

技術短文

- 整合多元遙測技術於高速公路邊坡救災之應用
(鄭宏達、李魁士、姜興華、關文鏈) 167
- 從公共設施管線之養護需求探討竣工圖資建置管理-以桃園航空城區段徵收案為例
(藍士堯、李元良、黃于峰、劉新達、林秋芬、陳竣璿) 187
- 自來水智慧化管理及水理分析於工程實務應用
(黃裕泰、黃欽稜、李承鴻、許家成、陳勳融) 201
- 綠島高精度圖資及三維實景於數位孿生之應用
(沈碧恕、王明楠、李良輝、林宏麟、賴澄漂、邱俊榮、簡睿怡) 215