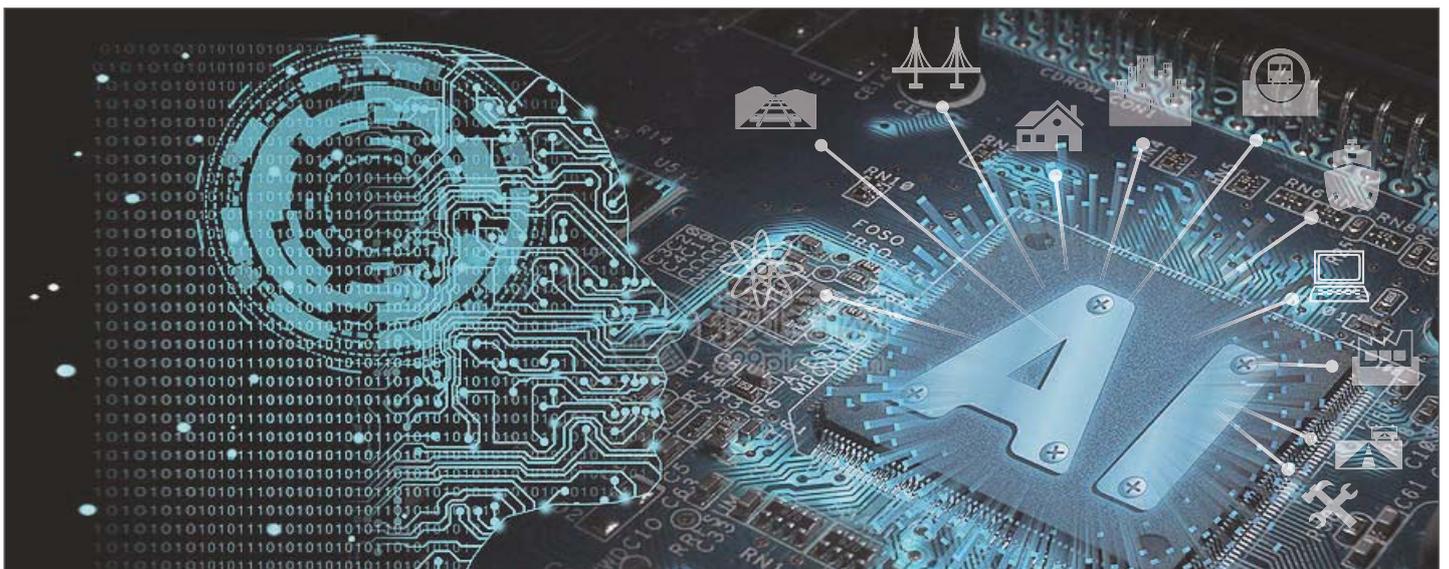


土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

April
2021



ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 48, No. 2

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

人工智慧於
土木水利工程之
發展與應用

專 輯

工程技術及發展

光復大橋
耐震評估後之
基礎補強設計與施工

公共工程技術服務
費用編列建議
(B)

特別報導

- 刊行工程科技技術書刊 / 專題研究、工程技術書刊編撰、翻譯
- 工程科技及學術交流活動 / 專題演講、參訪交流
- 工程建設研參活動 / 工程技術現地觀摩活動、海外重要工程現地見習活動
- 提供獎助學金 / 國內研究生獎助學金及其他具體贊助、培養本國高階工程建設人才

科普 / 獎學 / 工程交流

Sinotecf



◆ 創設宗旨

中興工程科技研究發展基金會係由中興工程顧問社
捐助成立之非營利、經濟事務財團法人。
以提升我國工程科技水準、配合國家政策
促進經濟建設之發展及科技之普及推廣為宗旨。



財團法人
中興工程科技研究發展基金會
SINOTECH FOUNDATION FOR RESEARCH & DEVELOPMENT
OF ENGINEERING SCIENCES & TECHNOLOGIES

10595臺北市松山區南京東路四段186號4樓之9
電話:(02) 2577-4567 傳真:(02) 2577-3667

E-mail: sinotecf@ms32.hinet.net http://www.sinotecf.org.tw





光復大橋墩柱基樁補強現場

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



土木水利半月集

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠管建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木工程學刊
- 土木水利半月集

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：劉格非（國立臺灣大學土木學系教授、編輯出版委員會主任委員兼總編輯）

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元（航郵另計）

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十四屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：宋裕祺

常務理事：李順敏 高宗正 張荻薇 楊偉甫

理事：王宇睿 余信遠 林呈 林曜滄 邱琳濱 胡宣德 胡湘麟

高銘堂 張政源 許泰文 陳仲賢 陳彥伯 黃慧仁 壽克賢

廖學瑞 鄭燦鋒 賴建信 謝啟蕙

常務監事：王昭烈

監事：呂良正 李建中 沈景鵬 林其璋 楊永斌 謝佳伯

中國土木工程學會任務

1. 研究土木工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

「人工智慧於土木水利工程的發展與應用」專輯 (客座主編：陳俊杉教授、汪立本助理教授)

📖 專輯序言：人工智慧於土木水利工程的發展與應用	陳俊杉／汪立本	3
📖 人工智慧與高精地圖於道路資產管理之實務應用	鄭錦桐／黃梓育／王選仲／林玉梅／鄧澤揚／黃意筌／賴穎萱／王禹翔	4
📖 以深度學習與數位孿生打造工地鋼筋查驗新法	陳翊翔／莊仕杰／張鈞程／羅昱恆／黃琮煒／邱永全／林冠成／黃志民／周頌安／陳俊杉	15
📖 電腦視覺技術於自動化工程進度管控	林之謙	22
📖 利用深度學習進行訊號異常識別之方法比較及在線識別	周肇昱／黃謝恭／張家銘	32
📖 影像分析方法應用於構造物外觀異狀自動化偵測之發展	張庭維／許筠曼／吳亭諺／許舜翔／張家銘	40
📖 應用 AI 學習技術於坡地崩塌預測分析 — 以高雄市小林村為例	林彥廷／顏筱穎／張乃軒／林宏明／韓仁毓／楊國鑫／陳俊杉／鄭宏遠／徐若堯	48
📖 人工智慧在都市淹水預測之應用與展望	汪立本／Susana Ochoa Rodriguez／Yuting Chen／Christian Onof	56
📖 人工智慧平臺淺析與硬體效能測試	張慰慈	64

工程技術及發展

📖 光復大橋耐震評估後之基礎補強設計與施工	詹榮鋒／馮兆麟／簡必琦／黃春田／張英發／蔡建民／黃振榮／池華偉	70
-----------------------	---------------------------------	----

公共工程技術服務費用編列建議 (B)

社團法人中國土木工程學會與業界共同研議

社團法人中國土木工程學會、中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、
泰興工程顧問股份有限公司、康城工程顧問股份有限公司、台聯工程顧問股份有限公司、
邑葛工程顧問有限公司、林同棧工程顧問股份有限公司、亞新工程顧問股份有限公司、
國立臺北科技大學土木工程系宋裕祺研究室

📖 四、公共工程（技術服務）現行不合理契約（或錯誤執行）之說明及建議	85
📖 五、採用基本費率進階法計算設計服務費用	94
📖 六、監造服務費用之預算編列及計價	102
📖 七、技術服務費用應定期檢討	111

廣告特搜

台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 用心 做好每一件事情	封底
財團法人中興工程科技研究發展基金會 — 科普・獎學・工程交流	封面裡
創建建築科技有限公司 — 自我鞭策・日益成長・品質保證	封底裡
中華民國土木技師公會全國聯合會 — 土木技師 國之棟樑	31
亞新工程顧問股份有限公司 — Integrated Solutions For Global Impact	112
交通部鐵道局・鐵道技術研究及驗證中心 — 110 年法人成立・進駐啟用	112
安固工程股份有限公司 — 建築修復結構補強	113
聯合大地工程顧問股份有限公司 — 調查・規劃・設計・監造・專案管理	113
華光工程顧問股份有限公司 — 專業・人本・樂活	114
達欣工程股份有限公司 — 智慧・創新・務實・勤奮	114



人工智慧於 土木水利工程 的發展與應用

專輯序言

專輯客座主編 陳俊杉／國立臺灣大學土木工程學系 教授、國震中心與台大土木合設AI研究中心 主任
汪立本／國立臺灣大學土木工程學系 助理教授、國震中心與台大土木合設AI研究中心 副主任

以數據驅動為核心的機器學習相關人工智慧技術這幾年來蓬勃發展，為各領域注入一股豐沛的創新活水。機器學習是人工智慧的分支，以常用的監督式學習為例，機器學習透過訓練數據擬合模型，這些模型包括簡單的線性模型或高度複雜的非線性模型，如類神經網路等。訓練好後，我們再將此模型拿來預測新的數據。這在概念層次上相對單純的方式帶來的不是我們所認知的智慧，而是精準又快速的預測力。機器學習所帶來的預測力持續不斷顛覆各領域，以簡單的價格經濟模型類比，機器學習所帶來的預測力逐年成本不斷下降、品質不斷提升，跟過去電腦因為電晶體與半導體技術進展所帶來的計算力實有異曲同工之處。電腦的影響無遠弗屆，而人工智慧亦然，甚至猶有過之。

土木水利領域對數據收集並不陌生，從衛星遙測影像到工地現場拍攝，在實務上工程師已經都積極透過數據協助工程管理，提升工程品質與安全。然而如何將數據轉化為有用的機器學習模型，如何善用機器學習所帶來的預測力提升競爭力，如何有效克服技術、文化與領域的摩擦，都是目前與未來導入人工智慧將面臨的重要挑戰。數據導向的機器學習也將產學合作提升到另一層次，產學的鏈結已不再是單方向的人才供給，企業與法

人如能與研究型大學進行更深層、更有效的價值共創，將會是這一波趨勢下的贏家。有鑑於此，財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心（國震中心）與國立臺灣大學土木工程學系（台大土木）於2018年7月正式成立「國震中心與台大土木合設AI研究中心」，由陳俊杉教授擔任中心主任，也央請韓仁毓教授、陳柏華副教授、張家銘副教授、張書瑋副教授、汪立本助理教授、林之謙助理教授、林偲妘助理教授擔任中心副主任，國震中心也積極投入相關研究人員，包括張慰慈博士等。我們希望能集眾人之力，做出世界頂尖的研究，並或企業與法人共創這些頂尖研究、或將研究成果及人才與企業與法人快速接軌，產生重要的經濟與社會影響。我們也相信會有愈來愈多組織循此模式，共創雙贏。

本專刊除了邀請部分國震中心與台大土木合設AI研究中心的成員分享團隊最新的研究成果外，我們也很榮幸邀請到興創知能公司的鄭錦桐總經理與他的研發團隊分享人工智慧與高精地圖於道路資產管理之應用。在此非常感謝此專輯文章所有作者的貢獻，也期待此專輯能拋磚引玉，刺激與提升未來人工智慧相關技術在土木水利工程領域的創新應用，創造更多對臺灣甚至對全球經濟與社會的影響。



人工智慧 與 高精地圖 於 道路資產管理 之實務應用

鄭錦桐／興創知能股份有限公司 總經理
 黃梓育、王選仲／興創知能股份有限公司 AI 工程師
 林玉梅、鄧澤揚／興創知能股份有限公司 GIS工程師
 黃意筌、賴穎萱／興創知能股份有限公司 專案經理
 王禹翔／興創知能股份有限公司技術研發部 課長

本文探討人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 與高精地圖 (High Definition Map, HD Map) 應用於道路資產管理之實務可行性。訓練資料的質與量攸關 AI 模型的成效，必須邀請具備道路資產養護與管理領域知識 (Domain know-how) 者，針對相關數據資料進行標籤 (Label)，因此十分費時才能累積充足的訓練樣本；另一方面建議採用三維高精度地圖 (1/500 比例尺) 標記各項道路資產之坐標建置其地理空間資訊系統，即利用 HD Map 的檔案格式儲存道路資產與養護管理資訊，以解決目前道路資產設施圖層坐標系統不一而無法套疊問題。

「數位道路」是為「數位國家基礎建設」之首要，透過 AI 技術與 HD Map 製圖技術能加速建置以成功推動智慧基礎建設相關應用，例如分析道路服務性能與生命週期，以支援智慧道路之決策系統，讓道路資產設施增加其韌性與延壽、降低維護與管理之成本，以鞏固「國家數位基礎建設」之營運安全性及永續性為目標。

The feasibility of applying artificial intelligence (AI) and high-definition maps (HD Map) to road asset management practice is discussed in this article. To develop a robust AI model, the quality and quantity of training data are the most critical factors. It is necessary to invite people with domain know-how of road asset maintenance and management to label the relevant data. Thus, the accumulation of sufficient training sample is considerably time-consuming; on the other hand, it is recommended to extract the coordinates of various road assets from 3D HD Map (1/500 scale), and embed them into geospatial information system(GIS); that is, adopting the existing HD Map file format to store the information of road assets and maintenance management. This is to solve non-overlapping issue of various road assets a with inconsistent coordinate systems,

“Digital Road” is of top priority in the establishment of “National Digital Infrastructure”. AI and HD mapping technology can facilitate the process and thus promote related applications of smart infrastructure. For example, to analysis road service performance and life cycle in order to support “Smart Road” decision-making system. For road assets and facilities, this indicates an advanced resiliency, life-span and reduction in the cost of maintenance and management. Overall, the goal is to secure a safe and sustainable operation environment for “National Digital Infrastructure”.

前言

人工智慧應用於高精三維地圖產製

人工智慧已逐漸普遍應用於智慧交通領域，例如：車裝的先進駕駛輔助系統 (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)、車流時間預測進而控制交通號誌、

人流預測與大眾運輸之排班規劃 …，而近期因為自駕車技術受重視，人工智慧已廣泛利用於三維高精度的製圖與自駕車自動控制輔助系統之商品開發，如歐美有大型導航圖資公司如 HERE (荷蘭) 和 TomTom (荷蘭)、Waymo (美國)，日本則有 Increment P 和

Zenrin，紛紛與自駕車業者攜手合作搶佔來自駕車導航系統開發。另外，Intel 投資 Mobileye 公司，其原為以色列以電腦視覺（Computer Vision, CV）為核心發展自駕系統的指標性公司，亦是國際上輔助駕駛系統（ADAS）的最大供應商，未來發展上更強調群眾外包（crowd sourcing）的方式快速產製三維高精度地圖，不只是提供自駕車系統使用，更強調於道路駕駛安全與道路資產維護相關應用。

國際與我國高精度地圖格式內容

上述自動駕駛所使用的三維高精度地圖，目前通稱為高精地圖（high definition map, HD Map），內容屬於三維向量格式，相較於二維道路導航地圖，三維高精地圖精度要求更高（一般誤差 20 cm 內），圖資可分辨各車道。國際自駕車相關組織已規範 HD Map 格式包含：Navigation Data Standards (NDS)、Advanced Driver Assistant Systems Interface Specifications (ADASIS)、OpenDRIVE、SIP Automated Driving for Universal Service (SIP-adus)，其定義的 HD Map 屬性符合道路自動駕駛控制需要，且格式必須可輕易被機器讀取為原則。簡言之，HD Map 是給機器讀的格式非給人視覺讀取的。

我國內政部地政司採用以「OpenDRIVE + Extension」作為我國發展高精地圖製作之官方格式，以其為中間交換檔轉換，不失其圖資精度下，未來將其轉換為不同廠商需求的高精地圖格式，其描述道路的網路邏輯是開放的格式規範，易促進不同駕駛模擬器之間的數據交換。OpenDRIVE 初始版本是 2005 年的 0.7 版本，截至 2019 年 4 月是 1.5 版。我國內政部地政司已制定「高精地圖圖資內容及格式標準」採用 OpenDRIVE 文件格式提供 XML 格式，特性包括：有層次結構、道路幾何的分析定義（平面要素，高程，橫坡，車道寬度等）、各種類型的車道、車道的邏輯互連、標誌和信號、路面屬性、縱斷面與橫斷面坡度、道路和路邊物體等。未來 HD Map 應用上希望可以根據資料更新之頻率分為動態與靜態高精地圖內容，於本文後續「高精地圖延伸應用於道路資產維護與道路安全」之章節中再說明。

台灣目前自駕車發展業者仍以 Autoware 格式製作 HD Map 為主。2018 年成立 Autoware 基金會，致力

於發展和資助日本自動駕駛開源協作軟體 Autoware，國內研發自動駕駛車之團隊優先採用 Autoware 定義的 HD Map 的開放格式，先以沙盒計畫在封閉場域發展自動駕駛車技術。內政部地政司目前公布的「OpenDRIVE + Extension」格式，預計將於 2022 年前發展可轉換為 Autoware 格式的 HD Map 圖層。

高精地圖延伸應用於道路資產管理

日本自動駕駛系統的研究和開發，由內閣府啟動跨部門的經濟戰略，推動創新促進計畫（SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program），其子計畫中 SIP-adus: (SIP adus: Innovation of Automated Driving for Universal Services) (<http://www.sip-adus.go.jp/>) 針對 SIP-adus 的動態地圖推動議題方面，將動態數據隨時間變化的資訊整合於高精度三維地圖中，HD Map 中的道路物件坐標精準，故可作為車載自我估計位置與行進路線識別的補充訊息。日本政府單位促成三菱、Zenrin 已主導產業整合一些測繪業、導航地圖商、車廠，2017 年共同成立動態交通地圖公司（Dynamic Map Planning, DMP），與日本政府 SIP-adus 合作。日本 DMP 產製高精度 3D 地圖（比例尺優於 1/500），並非只強調高精度地圖用於自駕車產業，而是廣泛應用於道路上的汽車駕駛安全提升，道路設計與設施維護改善，具體應用於防災減災規劃。

道路資產管理橫跨許多管理單位，道路鋪面、交通號誌設施、地下維生管線、人行設施與各項道路附屬設施的維護品質與用路人之安全息息相關。道路工程之營建管理必須歷經設計、施工、監造至營運維護管理等階段，以上各階段皆需要投入大量人力與經費，若能掌握其服務性能的生命週期，並適時提出道路資產設施延壽以及降低維護成本且提升安全性之計畫方案。另外，這些設施、工程皆分屬不同管理單位部門，權責分散不一，要能有效的管理維護道路資產，盤點是必須執行的。由於蒐集道路資產準確的位置資訊和其相關屬性，會是管理成敗的關鍵，在目前空間資料採集與三維製圖技術，包含三維地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）和全球衛星定位系統（Global Positioning System, GPS）已奠定了資產盤點的基礎^[1]。然而，隨著經濟發展，交通往來流量越趨頻繁，老舊道路設施與維護工程數量也越來越多，加上天災發生頻率增加，故道路資產管理將會面

臨許多困難與挑戰。如何有效加速道路資產管理與跨中央與地方各單位的協調與合作，利用人工智慧與三維高精度圖資，將是未來政府進行智慧治理發展之關鍵課題。本文將依據我國實務製作高精地圖以及應用人工智慧於道路物件影像辨識之應用經驗，提出未來道路資產管理之實務案例與建議。

高精地圖內容產製與道路資產維護與道路安全

高精地圖製圖流程

高精地圖之製作，首先需先透過行動測繪車（Mobile Mapping System, MMS）進行外業施測，再進行高精地圖向量圖資萃取與檔案轉換，並完成品質檢核與管理，製圖流程如圖 1 所示。

外業施測係指行動測繪車進行車載光達掃描與環景作業，以取得高精度點雲，提供道路物件之坐標資訊，並進行控制點之布設與測量，提供後續內業進行定位與檢核。資類處理部分可分為：

1. 定位定向資類後處理。
2. 軌跡與點雲融合平差：將掃描軌跡既有交叉 / 往返 / 多次之成果進行平差。
3. 點雲坐標絕對精度品管。
4. 點雲成果密度分析：將所有點雲進行分類，分為地面點雲與非地面點雲，以便後續萃取圖資使用。

原始測繪資料取得後，再透過幾何特徵、輻射特徵、拓樸資訊與空間資訊等，以點雲資料為基礎以半

自動或手動方式，藉由參考線以及內政部「圖資內容標準」所規範與定義於不同圖層中之各要素和物件的相對坐標，進行圖資之三維數值化，完成靜態高精地圖所需之三維點、線、面圖形資料之萃取，創建具有拓撲結構的無縫路網。

透過此方式製作之高精地圖，越趨面臨挑戰。由於 MMS 所採集資料相當龐大，每秒高達 70 萬個以上之點雲，MMS 測繪車一天採集原始資料量約可達 1TB。再者，於向量特徵萃取作業需有大量熟練製圖人力投入，製作速度相對緩慢。整體投入成本居高不下。今，在人工智慧技術漸趨發展下，使用人工智慧、機器學習等方式進行半自動或自動萃取道路物件，不僅是未來加速製圖之關鍵，且更能降低成本。

高精地圖延伸應用於道路資產維護與道路安全

近年來為發展自動駕駛，高精地圖（high-definition Map）成為自動駕駛重要之輔助基礎。高精地圖具有準確性高之特性，依據內政部「高精地圖圖資內容及格式標準」^[2]，平面精度須達致至少 20 公分，垂直精度須達致至少 30 公分。

此高準確性之地圖除自駕車使用外，道路設施資產盤點與履歷維護可以基於高精度地圖的圖資架構，記載於對應道路物件 ID 的屬性表格中，多時期的巡檢與維護內容可以進行大數據分析，並且提出生命週期營運維護之建議。採用高精度地圖技術進行道路巡檢，確認道路鋪面、橋梁、隧道、人工邊坡、自然邊

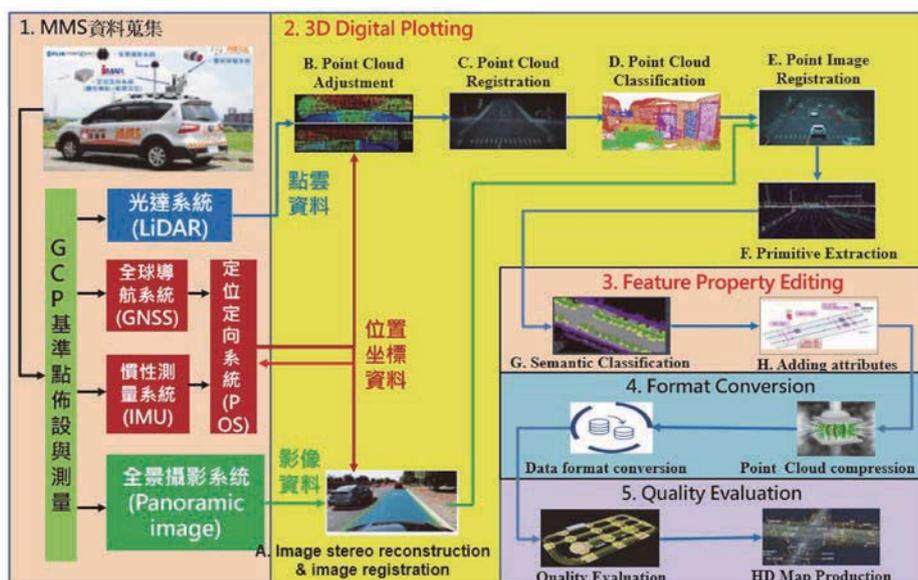


圖 1 高精地圖製作流程

坡、路燈、號誌...等設備之功能性與安全性，可依具風險排序並且具體養護維護與減災之建議。

高精地圖共可包含四層圖層^[3]，分別為永久靜態圖層、瞬時靜態圖層 (Transient Static Layer)、瞬時動態圖層 (Transient Dynamic Layer)，以及高度動態圖層 (Highly Dynamic Layer) (圖 2)。

1. 第一層永久靜態圖層 (Permanent Static Layer) 為所有應用之地圖骨幹高精地圖，比例尺優於 1/500。此圖層共記錄了道路上三維之拓樸結構^[3]，以及屬於較不需要即時更新之道路資訊，包含車道線、斑馬線、路上標記、停止線、道路邊緣、安全島、停車格、號誌、標誌、橋梁、隧道等，並記錄此些設施結構之屬性資料，如圖 3 所示。
2. 第二層為瞬時靜態圖層 (Transient Static Layer)，此層圖層包含之道路資訊有交通管制、道路工程，和廣域的天氣情況等。
3. 第三層為瞬時動態數據 (Transient Dynamic Layer)，其包含的資訊有車禍、交通堵塞，和局部區域的天氣狀況等。
4. 第四層為即時動態數據 (Highly Dynamic Layer)，包括了道路上行駛車輛的資訊、行人、以及交通信號狀態等。

以上四層資訊來源分別屬於中央與地方不同工務管理與交通管理單位，若有高精地圖為基礎底圖 (大比例尺 1/500 以上)，將能整合資訊於一套管理架構，能有效率提升道路治理。若各層分別由不同政府單位維護，

並提供具地理空間坐標之地圖情資分享與即時更新，同時又可以權責橫向溝通協調，累積歷史道路各設施養護履歷之空間數據，甚至交通事故與犯罪發生之空間數據，也可以進行空間數據統計，依據量化出道路交通安全與品質指標，可實現智慧城市治理之決策效率。

這些道路上的豐富基礎資料，加上高精地圖坐標準確性高之特性，其將可用於量測道路規劃之合理性，目前日本國土交通省已經利用高精地圖之成果，檢討改善道路設計提升用路人於道路之安全性。例如：道路轉彎處之路線曲率、斷面坡度，綜合易肇事路段之車速與交通流量等資訊，檢討道路設計與交通號誌設置；另外，道路交通標誌標線劃設，根據道路交通標誌標線號誌設置規則第一百八十八條，指示線係用於指示車輛行駛方向，以白色箭頭劃設於車道上^[4]。指示線繪製規準為圖 4 所示。因此，於高精地圖上便可針對此些指示線，量測其與實際法規規定設置是否一致，並列入道路資產盤點管理資料庫中。

除本身高精地圖已有之道路資訊，為完整盤點道路資產，更能於地圖中加入其他道路資產資訊。例如道路地下公共設施維生管線，若須建立管理此公共管線數據資料庫，定位精確度則相對重要。因此，於此高精地圖的應用上，可先透過人孔蓋精準定位其位置，將此資訊繪製於高精地圖上，再加上必要之屬性資料，便可依此作為地下管線的定位依據。

一般採用 BIM (Building Information Model) 的模型建構主要關注於建築結構體的營建管理，張家瑞

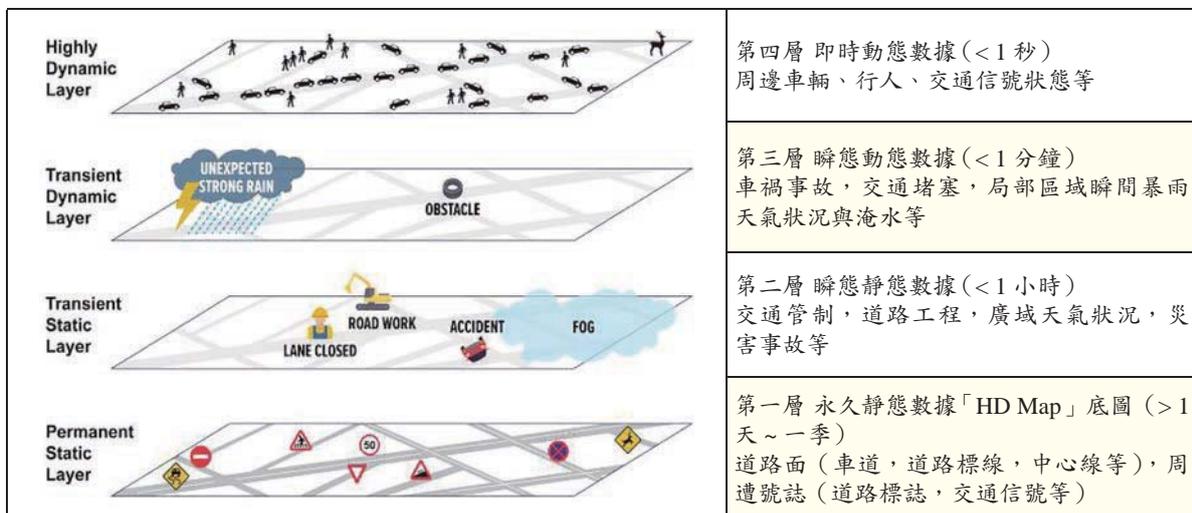


圖 2 高精地圖四類圖層 (改繪自 AECC^[3])

7. 內政部警政署與地方政府維持交通安全，針對交通事故則由警察機關所管轄。易事故與犯罪路段之提醒，並積極進行道路設計改善。
8. 交通部氣象局則因為強降雨以及強震也提供情資，提供公路養護與行車安全性參考，必須依據「公路橋梁檢測及補強規範」進行巡檢。道路阻斷與歷年的損失維護記錄。
9. 農業委員會水土保持局防災中心、水利署防災中心、交通部公路總局防災中心，目前各有災害應變機制分別發布土石流與坡地災害、淹水，道路封阻決策...等。針對道路路廊面對天災之安全預警機制，提供災害管理。

AI 演算法輔助高精地圖製作與道路資產物件辨識

MMS 將道路資產數位化之挑戰

道路資產盤點工作傳統上仰賴人力逐一沿道路紀錄與盤點相關設施，拍照記錄所在位置並登錄目前設施現況。目前已有移動式製圖系統（Mobile Mapping System, MMS）採集光達（LiDAR）點雲與環景影像，可獲得三維高精度地圖資訊，有助於進行道路資產分類與空間數位化；另一方面，也因應自駕車快速發展需求，三維高精度地圖儼然成為一項必要的基礎圖資，即 HD Map。然而在 MMS 精密的測繪要求下，地圖製程相當繁瑣，人工作業時效不佳，居高不下的製圖成本，若不積極導入 AI 技術將影響道路資產管理的效率，且限制了國內自駕車技術的應用發展。目前 MMS 採集點雲資料與環景影像，是由人工半自動操作 GIS 軟體繪製必要的道路物件、線型以及對應的屬性資訊，然後再透過人

工檢核重複修正、測試與驗證。繁瑣的製圖流程、數化規則、格式轉換與檢核流程，目前全球的測繪業已面臨繪製圖的勞動力不足以致於作業時效無法提升的困境。故本文依據內政部制定的道路「圖資內容標準」並歸納出 10 類道路物件（如表 1）所示，並依據台灣常用之自駕車 Autoware 圖層格式所定義各類有子項目圖層。

透過 MMS 採集環景影像與點雲資料兩種資料，考量運算速度以及運算資源之軟硬體投資，以及處理程序以及正確率，本研究建議各道路物件子項目圖層辨識或萃取建議採用之圖層，先分別歸納為本研究初步建議點雲資料萃取物件採用 DBSCAN、PVCNN 兩種演算法最適當；影像辨識則採用 YOLO4 方法最適用，並且針對兩種資料進一步透過攝影測量原理，將道路物件進行空間對位。

AI 模型建立之前，標籤資料品質以及具結構化的資料至為關鍵，以下分別針對 MMS 採集點雲以及環景影像說明利用初步建構之 AI 模型辨識各項道路資產設施，未來將再持續增加標籤樣本以增加正確率。而後再說明 HD Map 之三維圖資結構與道路資產管理之應用關係。

AI 演算法於點雲資料之道路物件萃取

本節針對點雲資料特性與物件萃取需求，回顧相關可應用之三維數聚演算法，包含 (1) DBSCAN（Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise）是一個相當合適的聚類方法，它基於資料密度來進行空間上點雲聚類方法；(2) 3D U-Net 則是基於二維 U-Net 所擴充的立體網格三維模型；(3) PointNet 是以對稱函數為基礎的高效率三維點雲模型；而 (4)

表 1 道路物件對應 Autoware 圖層

類別	道路物件	Autoware 圖層定義子類別
1	道路	Roadedge
2	車道	Lane / dtlane
3	標線	Line / whiteline / road_surface_mark / stopline / crosswalk
4	物體	Object [Opendrive] / RoadAttachment
5	隧道	Tunnel
6	橋梁	Bridge [Opendrive]
7	標誌	Roadsign
8	號誌	Signaldata
9	燈面	Signaldata
10	桿	Pole / poledata / streetlight

PVCNN (Point-Voxel CNN) 則融合了 PointNet 以高效率的優點以及網格化 3D 模型高準確率的優點。

Liu *et al.* [7] 針對點與點之間的空間關係，提出了點雲資料結構結合過往網格化的作法找出鄰近點的空間特徵，該方法被稱為 PVCNN 在 Liu *et al.* [7] 的三個測試案例中，比較了 PointNet、3D U-Net 與 PVCNN 的訓練成效。PVCNN 與兩者有更優勢成果 (表 2)，另外針對使用不同的網格尺寸進行測試，當空間網格切的越細小準確率提升，但是卻相當消耗計算硬體資源與計算時間，則也是後續研究上必須研究取捨之處。

AI 演算法於影像資料之道路物件萃取

快速演進的 YOLO 在 2020 年有了突破性的發展 [8]，由義隆電子與中研院資訊科學研究所的合作計畫中，由所長廖弘源博士、王建堯博士與俄羅斯學者 Alexey Bochkovskiy 等人 [8] 共同研發的 YOLOv4，一舉成為當前全世界最快、最高精準度的物件偵測系

統之一。整體而言，YOLOv4 是現行即時運算影像辨識演算法中表現最亮眼的演算法，如圖 5 所示，是 YOLOv4 使用 Nvidia V100 顯示卡在微軟 (Microsoft) 的 MS COCO 資料集上面的表現，縱軸表示平均精度 (AP, Average Precision)，橫軸表示每秒可以判斷的幀數 (FPS, Frames Per Second)，也代表著影像辨識的速度。觀察統計結果可知，即便使用 Google 最新研發的高效率二階段演算法 EfficientDet，在高速運算的狀況下表現仍不如 YOLOv4，以每秒 67 幀的狀況為例，EfficientDet 僅能達到 34% 的平均精度、YOLOv4 可以達到 43% 以上的平均精度。面對高幀數 (Frames Per Second, FPS) 之情形下，目前其他演算法 EfficientDet、ATSS、ASFF、CenterMask 皆無法提供如 YOLO4 穩定且準確率高的計算結果。預期未來幾年內實務應用上，仍以 YOLO4 演算法進行影像資料辨識道路物件仍為主流。

表 2 PVCNN 三維模型訓練成果與效能分析 (修改自 Liu *et al.* [7])

模型名稱	Input Data	mAcc	mIoU	Latency	GPU Mem.
PointNet	Points (8 × 4096)	82.54	42.97	20.9 ms	1.0 GB
3D U-net	Voxels (8 × 4096 ³)	86.12	54.93	574.7 ms	6.8 GB
PVCNN (0.125 × C)	Points (8 × 4096)	82.60	46.94	8.5 ms	0.6 GB
PVCNN (0.25 × C)	Points (8 × 4096)	85.25	51.93	11.9 ms	0.7 GB
PVCNN (1 × C)	Points (8 × 4096)	86.66	56.12	41.1 ms	1.3 GB

- * mAcc (mean Accuracy): 平均準確度
- * mIoU (mean Intersection over Union): 平均交併比，意即兩個區域的交集與聯集的比值，是人工智慧常見的模型評價方法。
- * Latency: 運算時間，以毫秒 (ms) 為單位。
- * GPU Mem.: GPU 內存記憶體用量。
- * C: Channel 數目。

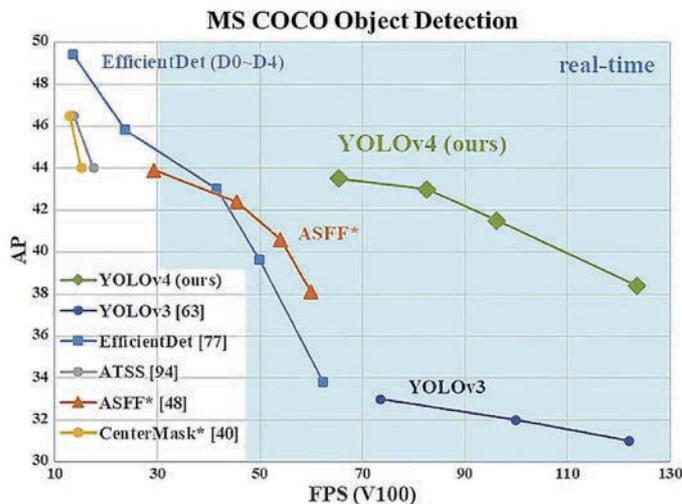


圖 5 YOLOv4 物件辨識效能比較 (幀數 (FPS, frames per second); 平均精度 (AP, Average Precision) 摘自 Bochkovskiy *et al.* [8])

人工智慧應用與道路資產辨識初步成果

由上述高精地圖製圖流程可知過程繁瑣，當高解析度相機以及光達點雲設備普及之後，巨量的影像與點雲資料將成為生產與應用的瓶頸，並須利用人工智慧輔助高精度的三維地圖製作增加效率。人工智慧技術亦應用於辨識並萃取出道路物件，利用前後期之三維地圖特徵之差異比對，將有助於定期盤點道路資產的破損、變形以及增加與移除，巡檢與調查之成果可以更新於各項道路設施的屬性上，並且以高精度的三維地圖呈現。以二維圖資進行道路資產盤點已無法滿足目前道路各項設施之安全巡檢之需求，必須要提高解析度與提升精度為比例尺為 1/500 ~ 1/250，才能清楚標記出道路各項設施的位置。

實務上應用上建議建立第一版的道路上的高精度三維地圖（優於 1/250 比例尺），後續搭載 GPS 之攝影設備與光達設備可以依據此高精度三維地圖進行比對差異，以台北市為例有路平專案，用路人十分重視道路鋪面品質狀況，所以採用人工智慧快速辨識影像提出鋪面缺失位置，並且進一步量測出坑洞深度與龜裂尺寸，將可直接計算出 PCI (pavement condition index) 指標，長期累積各道路段的鋪面品質狀態，並且提出 PCI 指標變化與道路設計、氣候條件、交通當量（各車款流量）的關係，有至於生命週期的管理。

人工智慧技術發展為產業帶來巨大的變革。巨量的空間數據經由人為判讀或數值化，相當耗時耗力，導入 AI 進行自動或半自動化程序將有助於地圖產製單位提升生產與品管效率。

點雲和影像是高精地圖製圖過程的關鍵原始資料，AI 演算法近年對該兩項資料處理已取得關鍵性的突破與進步。例如道路上桿狀物的辨識，需先將原始點雲資料進行分類（圖 6），再經過分類得出道路兩側物件之點雲（圖 7）。

再透過分群演算法，萃取出桿狀物（圖 8），邊界的萃取將可加速道路物件數值化的流程。另一方面，加上 AI 影像辨識，如圖 9 所示，透過影像辨識，AI 可萃取影像中資訊，並將之分類。此快速辨識模型，可協助道路物件屬性填寫。

另一方面，例如地面上之標線，可透過點雲分類出地面點雲，再將點雲做俯視投影（圖 10），得出地面標線之投影點後，經由分群演算法（圖 11），和方程式線性耦合（圖 12），則可萃取出地面標線之拓樸結構。此三維特徵拓樸結構，可再經由轉檔程式，便可取得其向量特徵。

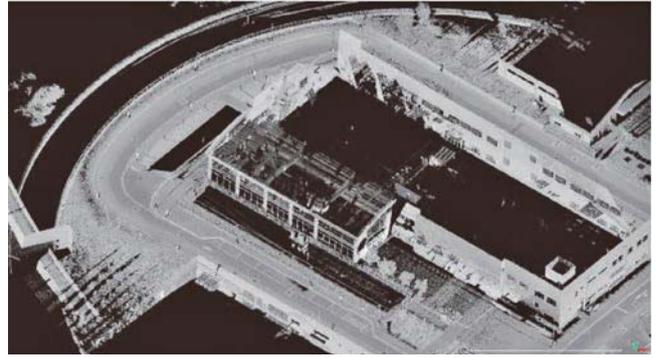


圖 6 原始點雲資料

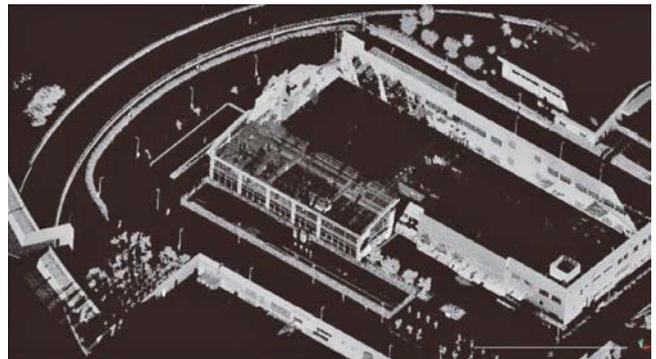


圖 7 萃取出道路兩側之物件點雲



圖 8 點雲萃取之桿狀物

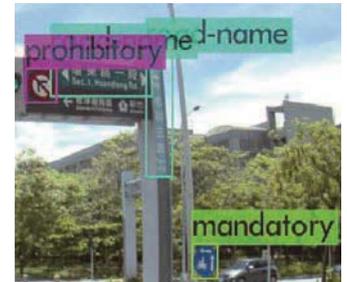


圖 9 標誌影像辨識

透過高精地圖製作流程，配合高精地圖擁有之精確性高之特性，再加上運用 AI 人工智慧方式，將環景影像物件辨識後透過攝影測量進行物空間匹配，如圖 13 結果所示，同一個路口下的標誌號誌，即經過影像的空間匹配可以清楚的顯示在點雲物件附近。人工智慧持續發展之趨勢下，可以加快高精度三維地圖的產製速度，快速萃取出道路上標線、標記、和物件等，已可將可提升整體道路資產盤點與管理精確性與效率。

利用 AI 與高精度地圖於道路資產管理實務案例

台北市工務局應用 AI 於道路鋪面破損之辨識

近年道路品質提升與養護為各縣市及公路機關重點施政項目，傳統投入大量人力及時間成本的人工巡檢方



圖 10 點雲俯視投影

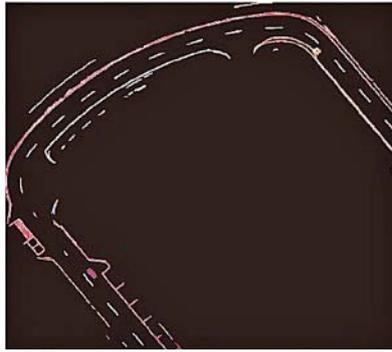


圖 11 分群演算法

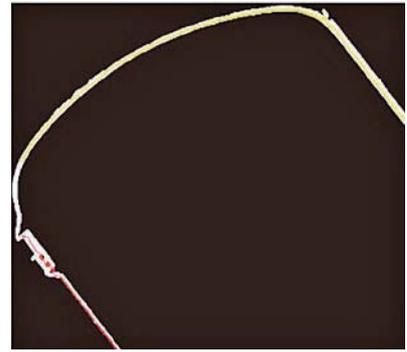


圖 12 方程式線性耦合

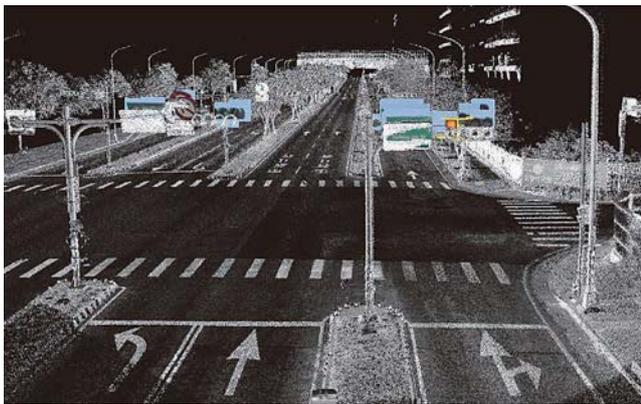


圖 13 環景影像物件經 AI 辨識後再經過攝影測量計算與物空間匹配結果



圖 14 即時拍攝影像辨識道路鋪面破損類型，並且登錄於 GIS 圖台中顯示路網各處之道路鋪面 PCI 指標（台北市政府工務局提供）

式，已無法因應高頻率與成效式的作業需求，各地方養護單位因而陸續嘗試導入國外移動式測繪系統（MMS, Mobile Mapping System）做為自動化鋪面巡檢車，即透過攝影機或光達等影像擷取設備、POS 定位系統及邊緣運算偵測分析鋪面缺失類別，將影像及空間屬性資訊同步回傳雲端道路品管圖台，計算鋪面狀況指數（PCI, Pavement Condition Index）做為道路檢修排序依據^[9]，以提升行政及養護作業的效率。

台北市政府工務局已將 AI 影像辨識及攝影量測技術整合，利用高解析度攝影機動態拍攝道路鋪面，多個視角重疊的攝影鏡頭設計，可再結合近景攝影測量（Close-range photogrammetry）技術可產製道路鋪面之三維點雲資訊，其三維點雲成果可與光達（LiDAR）成果相近，讓鋪面破損類型之影像辨識成果可以獲得尺寸量化成果（ex: 坑洞深度、車轍...），預期將可取代光達以降低 MMS 硬體成本，讓道路巡檢 AI 更為普及與處理資料迅速。目前台北市工務局於巡檢車上（圖 14），已搭載 AI 模型 YOLOv4 演算法，提升移動載具上 edge-AI 演算效率，可在巡檢車上即時辨識各類型之破損，並持續擴充日常巡檢標註破損之影像庫，

以滾動式精進 AI 模型判釋準確度，以達到自動化的 PCI 破損嚴重等級進階分析，可大幅降低養護成本，並擴展應用至道路設施及其他基礎設施巡檢的管理。

英國利用 AI 建立快速更新道路資產服務 RoADS

英國地形測量局（Ordnance Survey）有感於每年需投入大筆道路資產維護預算，發展出以人工智慧，輔以車輛感測載具和地理定位工具之萃取道路設施、公共資產之技術服務（圖 15）。此項服務被命名為 RoADS（roadside asset data service），其往快速更新道路資產資訊，並分享給客戶方向繼續發展技術^[10]。

此技術採用電腦視覺演算法，訓練模型以辨識道路設施與資產，並且評估設施之現況^[10]。目前此演算法能辨識出路上標誌、號誌、標線、路燈、郵筒、人孔蓋、變電箱、安全柱、排水孔等。此外，更包含檢測道路鋪面，達到早期發現、早期施工，以降低對道路品質的影響。而在評估設施方面之應用，例如排水孔於大雨後容易雜草叢生，可透過此項技術服務快速更新排水孔狀況，使維護管理者能快速了解情況，整理排水孔，以防後續淹水問題發生。



圖 15 英國地形測量局製作之道路資產盤點地圖^[10]

美國 AI 鋪面檢測技術發展

底特律為美國第一等級都市中，第一個使用人工智慧鋪面檢測技術於道路上之都市。此鋪面檢測技術，使用深度學習和機器學習技術分析影像每一個像素，透過神經網絡模型偵測不同形式的路面缺失。此影像的蒐集，可由智慧型手機攝像鏡頭和定位系統等裝置進行錄影，再將資料上傳雲端，經由此神經網絡模型，執行分析與紀錄。

分析紀錄結果展示於地圖平台上（圖 16），此平台包含一基礎地圖，記錄 3 米寬道路上各種類型的鋪面品質。綠色代表品質優良之鋪面，反之紅色代表鋪面品質差，有缺失且需修補之位置。

此流程改善，底特律地方政府不僅可根據資料分析與紀錄結果，建立數據資料庫，評估所需求之維護資源，大幅降低維護預算，並且有效的改善鋪面品質，提供用路人可靠之道路環境^[11]。

日本道路設施盤點資料庫化與路況安全 AI 判識

早於 2017 年日本 DMP 成立以前，已產製高精度 3D 地圖（比例尺優於 1/500）用於道路資產的盤點以



圖 16 道路鋪面品質分級紀錄資訊^[11]

及道路路側設施的都市規劃，例如都市市容與人行道無障礙設施規劃，設施巡檢與養護管理，而三維空間資訊於海嘯與淹水的模擬，進而用於防災避難規劃使用設備規劃，如圖 17 可見道路上的許多設施已經編號並且記錄其空間位置與維修紀錄。

於 2015 年日本國土交通省（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism）調查了因大雪造成交通堵塞所受影響之車輛數，結果顯示每年約有 500 台車輛受到影響，道路封閉路段長達 1,670 公里，道路封閉時間共約 1,100 小時。因此，日本為了改善道路交通狀況，提供安全的道路給予用路人，使用了感測器和人工智慧技術，擷取道路狀況後，回傳至道路監控端，監控端便可配合地圖上回傳資訊，針對道路事件做出相對反應^[12]。

此道路偵測系統，共安裝了 13,000 個監測錄影機於高速公路上，提供道路監控端監控使用。隨著監測器越來越多，管理人員地監控越感困難。2018 年起，日本國土交通省便開始導入人工智慧技術，自動偵測道路意外事件。除外，目前此人工智慧技術可偵測停止車輛和塞車情況，然後自動通知監控人員^[12]。

此偵測系統，便符合高精地圖第二層靜態圖層與第三層即時動態圖層之概念，結合動態資訊，提供用路人道路資訊。

以色列 Mobileye 的「路書」(Roadbook)

Intel 子公司 Mobileye 原為以色列以電腦視覺（Computer Vision, CV）為核心發展自駕系統的指標性公司，亦是國際上輔助駕駛系統（ADAS）的最大供應商，其以價格相較光達低廉的攝影機作為主要感測器，並透過 AI 深度學習及影像辨識技術，將高精度地圖的快速產



圖 17 日本利用 MMS 產製 1/500 比例尺地圖利於道路資產盤點與管理

製以及眾包 (crowd sourcing) 繪製模式做為其成本及擴散性上的優勢，藉此提升動態圖資更新的頻率並以每日 800 萬公里之進程建置其全球雲端地圖資料庫「路書」(Roadbook)。

Mobileye 因而成為國際高精地圖的主要供應商，全球 28 個汽車大廠中，目前有八成以上使用 Mobileye 的系統，例如福特、BMW、日產等，而其影像式 ADAS 產品已裝配在超過 100 萬輛汽車上，協助繪製了近 10 億公里的街道地圖之餘，Mobileye 更積極取得合作車廠配備感測器的第一手即時道路資訊，與 AI 識別的各式標號誌、道路周邊設施物件圖資整合，建立道路經驗管理 REM (Road Experience Management) 系統，將自駕技術及高精度地圖的商業模式佈局到即時路況、駕駛行為研究、物流車隊管理、「交通即服務」MaaS (Mobile-as-a service) 等 to B (Business)、to C (Customer) 的數據服務市場。

近年 Mobileye 亦積極聯合各國 OEM 廠商拓展各大城市 To G (Government) 的服務，初期以 Mobileye ADAS 的高頻率更新圖資切入日常道路資產管理需求，例如將其 ADAS 應用於自動化道路設施盤點更新、道路鋪面品質狀況、坑洞搶修警示、標線或號誌缺失通報等，同步將眾包模式導入加速當地高精度數位道路圖資的建置，後續透過各城市合作車廠或公務車 (如自駕公車) 籌劃自駕先導場域，此策略已成功導入在慕尼黑、底特律上路行駛及今年的上海、東京、巴黎等，預期在 2023 年即可實踐機器人計程車隊，使公私車隊皆能成為採集、數化、建置、養護國家道路資產且為數位雙生 (Digital Twins) 的一環。

結語

國際上各國產製高精度 3D 地圖 (比例尺優於 1/500)，並非只強調高精度地圖用於自駕車產業，而是廣泛應用於道路上的汽車駕駛安全提升，道路設計與設施維護改善，具體應用於防災減災規劃。隨著空間資料採集的解析度與精確度增加，且採集手段多元，而道路資產數據量將越來越大，加上老舊道路基礎設施之養護維護需求案量增加，目前使用人力進行資產盤點已不敷成本，導入人工智慧技術辨識道路資產的空間位置與數量，並編列成冊以利持續進行道路巡檢，將辨識出的道路資產損害狀態可以更新履歷與建

檔，因為人工智慧導入可增加道路巡檢頻率，以及降低人力成本，已是國際發展趨勢。

道路資產位置之精確度有較高之需求，採用三維高精度的圖資 (高精地圖) 建立道路資產的資料庫，讓道路資產之定位精準度提高，將其空間位置與設計幾何特性，一併與交通壅塞、交通事故、天災風險進行關聯分析，可探討用路人之道路安全問題。總言之，人工智慧與高精地圖的技術導入道路資產管理已是世界趨勢，可降低道路資產之營運維護與管理成本，唯有先有規劃完成數位道路，才能實現智慧道路應用，以及城市的智慧治理。

參考文獻

- Sairam, N., Nagarajan, S. and Ornitz, S. (2016), Development of Mobile Mapping System for 3D Road Asset Inventory, Sensors, Vol. 16, No.3:367.
- 高內政部高精地圖研究發展中心 (2019), 高精地圖圖資內容及格式標準。
- AECC. (2020), "Operational Behavior of a High Definition Map Application White Paper".
- 交通部 (2021) 道路交通標誌標線號誌設置規則 (修正)。
- 張家瑞、康仕仲、林鶴斯 (2013), 導入 BIM 技術強化道路養護管理, 營建知訊, 第 369 期, 58-61 頁。
- Chang, J.R., Lin, H.S. (2016), Underground Pipeline Management Based on Road Information Modeling to Assist in Road Management, Journal of Performance of Constructed Facilities, American Society of Civil Engineers (ASCE) Vol. 30, No. 1., 40140011~401400114.
- Liu, Z., Tang, H., Lin, Y., and Han, S. (2019) Point-Voxel CNN for Efficient 3D Deep Learning, Cite as: arXiv:1907.03739 (cs), Available at: <https://arxiv.org/abs/1907.03739>
- Bochkovskiy, A., Wang, C.Y., Liao, and Liao, H.Y.M. (2020), YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, Cite as: arXiv:2004.10934, Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- 曾志煌、張家瑞、鄭錦桐、巫柏蕙、黃萬益 (2004), 國內外鋪面管理系統評估比較之研究, 交通部運輸研究所。
- Navin, Simon (2021), Automated mapping of utility assets can save you time and money [Online]. Available at: <https://www.ordnance-survey.co.uk/business-government/innovation/happens/articles-ehs/automated-mapping-utility-assets>.
- Frost, A. (2019), Detroit first major US city to use RoadBotics' new pavement assessment tool [Online]. Available at: <https://www.traffictechnologytoday.com/news/asset-management/detroit-first-major-usa-city-to-use-roadbotics-new-pavement-assessment-tool.html> (Accessed: 09 March 2021)
- Fujitsu Blog Editor. (2019), How Fujitsu is using AI to make Japan's roads and rivers safer [Online]. Available at: <https://blog.global.fujitsu.com/fgb/2019-11-20/how-fujitsu-is-using-ai-to-make-japans-roads-and-rivers-safer/> (Accessed: 09 March 2021)
- 鄭錦桐、車文韜、岡田泰征、廖玲琬, 高精地圖製作與交通運輸商業應用趨勢, 土木水利 46 (2), 51-58。 



人工智慧 與 高精地圖 於 道路資產管理 之實務應用

鄭錦桐／興創知能股份有限公司 總經理

黃梓育、王選仲／興創知能股份有限公司 AI 工程師

林玉梅、鄧澤揚／興創知能股份有限公司 GIS工程師

黃意筌、賴穎萱／興創知能股份有限公司 專案經理

王禹翔／興創知能股份有限公司技術研發部 課長

本文探討人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 與高精地圖 (High Definition Map, HD Map) 應用於道路資產管理之實務可行性。訓練資料的質與量攸關 AI 模型的成效，必須邀請具備道路資產養護與管理領域知識 (Domain know-how) 者，針對相關數據資料進行標籤 (Label)，因此十分費時才能累積充足的訓練樣本；另一方面建議採用三維高精度地圖 (1/500 比例尺) 標記各項道路資產之坐標建置其地理空間資訊系統，即利用 HD Map 的檔案格式儲存道路資產與養護管理資訊，以解決目前道路資產設施圖層坐標系統不一而無法套疊問題。

「數位道路」是為「數位國家基礎建設」之首要，透過 AI 技術與 HD Map 製圖技術能加速建置以成功推動智慧基礎建設相關應用，例如分析道路服務性能與生命週期，以支援智慧道路之決策系統，讓道路資產設施增加其韌性與延壽、降低維護與管理之成本，以鞏固「國家數位基礎建設」之營運安全性及永續性為目標。

The feasibility of applying artificial intelligence (AI) and high-definition maps (HD Map) to road asset management practice is discussed in this article. To develop a robust AI model, the quality and quantity of training data are the most critical factors. It is necessary to invite people with domain know-how of road asset maintenance and management to label the relevant data. Thus, the accumulation of sufficient training sample is considerably time-consuming; on the other hand, it is recommended to extract the coordinates of various road assets from 3D HD Map (1/500 scale), and embed them into geospatial information system (GIS); that is, adopting the existing HD Map file format to store the information of road assets and maintenance management. This is to solve non-overlapping issue of various road assets with inconsistent coordinate systems,

“Digital Road” is of top priority in the establishment of “National Digital Infrastructure”. AI and HD mapping technology can facilitate the process and thus promote related applications of smart infrastructure. For example, to analysis road service performance and life cycle in order to support “Smart Road” decision-making system. For road assets and facilities, this indicates an advanced resiliency, life-span and reduction in the cost of maintenance and management. Overall, the goal is to secure a safe and sustainable operation environment for “National Digital Infrastructure”.

前言

人工智慧應用於高精三維地圖產製

人工智慧已逐漸普遍應用於智慧交通領域，例如：車裝的先進駕駛輔助系統 (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)、車流時間預測進而控制交通號誌、

人流預測與大眾運輸之排班規劃...，而近期因為自駕車技術受重視，人工智慧已廣泛利用於三維高精度的製圖與自駕車自動控制輔助系統之商品開發，如歐美有大型導航圖資公司如 HERE (荷蘭) 和 TomTom (荷蘭)、Waymo (美國)，日本則有 Increment P 和

Zenrin，紛紛與自駕車業者攜手合作搶佔來自駕車導航系統開發。另外，Intel 投資 Mobileye 公司，其原為以色列以電腦視覺（Computer Vision, CV）為核心發展自駕系統的指標性公司，亦是國際上輔助駕駛系統（ADAS）的最大供應商，未來發展上更強調群眾外包（crowd sourcing）的方式快速產製三維高精度地圖，不只是提供自駕車系統使用，更強調於道路駕駛安全與道路資產維護相關應用。

國際與我國高精度地圖格式內容

上述自動駕駛所使用的三維高精度地圖，目前通稱為高精地圖（high definition map, HD Map），內容屬於三維向量格式，相較於二維道路導航地圖，三維高精地圖精度要求更高（一般誤差 20 cm 內），圖資可分辨各車道。國際自駕車相關組織已規範 HD Map 格式包含：Navigation Data Standards (NDS)、Advanced Driver Assistant Systems Interface Specifications (ADASIS)、OpenDRIVE、SIP Automated Driving for Universal Service (SIP-adus)，其定義的 HD Map 屬性符合道路自動駕駛控制需要，且格式必須可輕易被機器讀取為原則。簡言之，HD Map 是給機器讀的格式非給人視覺讀取的。

我國內政部地政司採用以「OpenDRIVE + Extension」作為我國發展高精地圖製作之官方格式，以其為中間交換檔轉換，不失其圖資精度下，未來將其轉換為不同廠商需求的高精地圖格式，其描述道路的網路邏輯是開放的格式規範，易促進不同駕駛模擬器之間的數據交換。OpenDRIVE 初始版本是 2005 年的 0.7 版本，截至 2019 年 4 月是 1.5 版。我國內政部地政司已制定「高精地圖圖資內容及格式標準」採用 OpenDRIVE 文件格式提供 XML 格式，特性包括：有層次結構、道路幾何的分析定義（平面要素，高程，橫坡，車道寬度等）、各種類型的車道、車道的邏輯互連、標誌和信號、路面屬性、縱斷面與橫斷面坡度、道路和路邊物體等。未來 HD Map 應用上希望可以根據資料更新之頻率分為動態與靜態高精地圖內容，於本文後續「高精地圖延伸應用於道路資產維護與道路安全」之章節中再說明。

台灣目前自駕車發展業者仍以 Autoware 格式製作 HD Map 為主。2018 年成立 Autoware 基金會，致力

於發展和資助日本自動駕駛開源協作軟體 Autoware，國內研發自動駕駛車之團隊優先採用 Autoware 定義的 HD Map 的開放格式，先以沙盒計畫在封閉場域發展自動駕駛車技術。內政部地政司目前公布的「OpenDRIVE + Extension」格式，預計將於 2022 年前發展可轉換為 Autoware 格式的 HD Map 圖層。

高精地圖延伸應用於道路資產管理

日本自動駕駛系統的研究和開發，由內閣府啟動跨部門的經濟戰略，推動創新促進計畫（SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program），其子計畫中 SIP-adus: (SIP adus: Innovation of Automated Driving for Universal Services) (<http://www.sip-adus.go.jp/>) 針對 SIP-adus 的動態地圖推動議題方面，將動態數據隨時間變化的資訊整合於高精度三維地圖中，HD Map 中的道路物件坐標精準，故可作為車載自我估計位置與行進路線識別的補充訊息。日本政府單位促成三菱、Zenrin 已主導產業整合一些測繪業、導航地圖商、車廠，2017 年共同成立動態交通地圖公司（Dynamic Map Planning, DMP），與日本政府 SIP-adus 合作。日本 DMP 產製高精度 3D 地圖（比例尺優於 1/500），並非只強調高精度地圖用於自駕車產業，而是廣泛應用於道路上的汽車駕駛安全提升，道路設計與設施維護改善，具體應用於防災減災規劃。

道路資產管理橫跨許多管理單位，道路鋪面、交通號誌設施、地下維生管線、人行設施與各項道路附屬設施的維護品質與用路人之安全息息相關。道路工程之營建管理必須歷經設計、施工、監造至營運維護管理等階段，以上各階段皆需要投入大量人力與經費，若能掌握其服務性能的生命週期，並適時提出道路資產設施延壽以及降低維護成本且提升安全性之計畫方案。另外，這些設施、工程皆分屬不同管理單位部門，權責分散不一，要能有效的管理維護道路資產，盤點是必須執行的。由於蒐集道路資產準確的位置資訊和其相關屬性，會是管理成敗的關鍵，在目前空間資料採集與三維製圖技術，包含三維地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）和全球衛星定位系統（Global Positioning System, GPS）已奠定了資產盤點的基礎^[1]。然而，隨著經濟發展，交通往來流量越趨頻繁，老舊道路設施與維護工程數量也越來越多，加上天災發生頻率增加，故道路資產管理將會面

臨許多困難與挑戰。如何有效加速道路資產管理與跨中央與地方各單位的協調與合作，利用人工智慧與三維高精度圖資，將是未來政府進行智慧治理發展之關鍵課題。本文將依據我國實務製作高精地圖以及應用人工智慧於道路物件影像辨識之應用經驗，提出未來道路資產管理之實務案例與建議。

高精地圖內容產製與道路資產維護與道路安全

高精地圖製圖流程

高精地圖之製作，首先需先透過行動測繪車（Mobile Mapping System, MMS）進行外業施測，再進行高精地圖向量圖資萃取與檔案轉換，並完成品質檢核與管理，製圖流程如圖 1 所示。

外業施測係指行動測繪車進行車載光達掃描與環景作業，以取得高精度點雲，提供道路物件之坐標資訊，並進行控制點之布設與測量，提供後續內業進行定位與檢核。資類處理部分可分為：

1. 定位定向資類後處理。
2. 軌跡與點雲融合平差：將掃描軌跡既有交叉 / 往返 / 多次之成果進行平差。
3. 點雲坐標絕對精度品管。
4. 點雲成果密度分析：將所有點雲進行分類，分為地面點雲與非地面點雲，以便後續萃取圖資使用。

原始測繪資料取得後，再透過幾何特徵、輻射特徵、拓樸資訊與空間資訊等，以點雲資料為基礎以半

自動或手動方式，藉由參考線以及內政部「圖資內容標準」所規範與定義於不同圖層中之各要素和物件的相對坐標，進行圖資之三維數值化，完成靜態高精地圖所需之三維點、線、面圖形資料之萃取，創建具有拓撲結構的無縫路網。

透過此方式製作之高精地圖，越趨面臨挑戰。由於 MMS 所採集資料相當龐大，每秒高達 70 萬個以上之點雲，MMS 測繪車一天採集原始資料量約可達 1TB。再者，於向量特徵萃取作業需有大量熟練製圖人力投入，製作速度相對緩慢。整體投入成本居高不下。今，在人工智慧技術漸趨發展下，使用人工智慧、機器學習等方式進行半自動或自動萃取道路物件，不僅是未來加速製圖之關鍵，且更能降低成本。

高精地圖延伸應用於道路資產維護與道路安全

近年來為發展自動駕駛，高精地圖（high-definition Map）成為自動駕駛重要之輔助基礎。高精地圖具有準確性高之特性，依據內政部「高精地圖圖資內容及格式標準」^[2]，平面精度須達致至少 20 公分，垂直精度須達致至少 30 公分。

此高準確性之地圖除自駕車使用外，道路設施資產盤點與履歷維護可以基於高精度地圖的圖資架構，記載於對應道路物件 ID 的屬性表格中，多時期的巡檢與維護內容可以進行大數據分析，並且提出生命週期營運維護之建議。採用高精度地圖技術進行道路巡檢，確認道路鋪面、橋梁、隧道、人工邊坡、自然邊

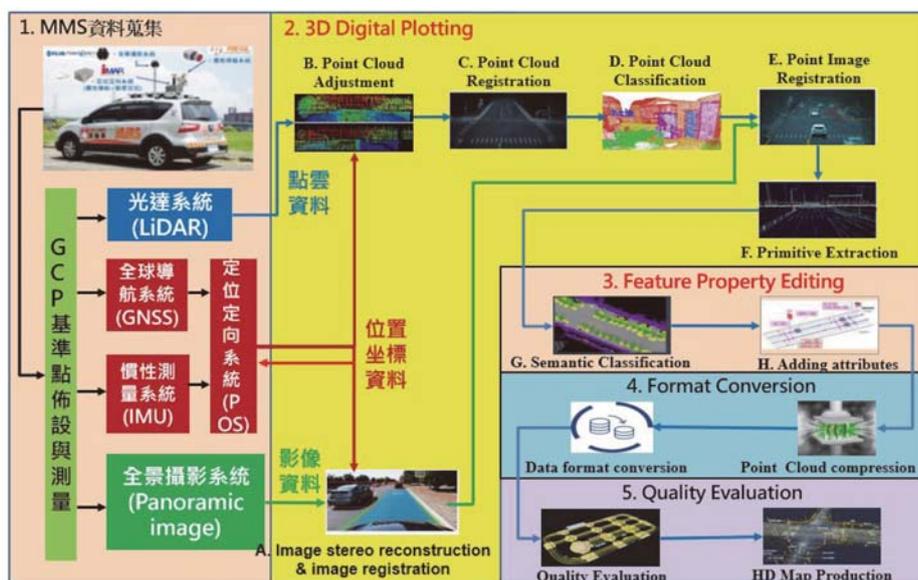


圖 1 高精地圖製作流程

坡、路燈、號誌... 等設備之功能性與安全性，可依具風險排序並且具體養護維護與減災之建議。

高精地圖共可包含四層圖層^[3]，分別為永久靜態圖層、瞬時靜態圖層 (Transient Static Layer)、瞬時動態圖層 (Transient Dynamic Layer)，以及高度動態圖層 (Highly Dynamic Layer) (圖 2)。

1. 第一層永久靜態圖層 (Permanent Static Layer) 為所有應用之地圖骨幹高精地圖，比例尺優於 1/500。此圖層共記錄了道路上三維之拓樸結構^[3]，以及屬於較不需要即時更新之道路資訊，包含車道線、斑馬線、路上標記、停止線、道路邊緣、安全島、停車格、號誌、標誌、橋梁、隧道等，並記錄此些設施結構之屬性資料，如圖 3 所示。
2. 第二層為瞬時靜態圖層 (Transient Static Layer)，此層圖層包含之道路資訊有交通管制、道路工程，和廣域的天氣情況等。
3. 第三層為瞬時動態數據 (Transient Dynamic Layer)，其包含的資訊有車禍、交通堵塞，和局部區域的天氣狀況等。
4. 第四層為即時動態數據 (Highly Dynamic Layer)，包括了道路上行駛車輛的資訊、行人、以及交通信號狀態等。

以上四層資訊來源分別屬於中央與地方不同工務管理與交通管理單位，若有高精地圖為基礎底圖 (大比例尺 1/500 以上)，將能整合資訊於一套管理架構，能有效率提升道路治理。若各層分別由不同政府單位維護，

並提供具地理空間坐標之地圖情資分享與即時更新，同時又可以權責橫向溝通協調，累積歷史道路各設施養護履歷之空間數據，甚至交通事故與犯罪發生之空間數據，也可以進行空間數據統計，依據量化出道路交通安全與品質指標，可實現智慧城市治理之決策效率。

這些道路上的豐富基礎資料，加上高精地圖坐標準確性高之特性，其將可用於量測道路規劃之合理性，目前日本國土交通省已經利用高精地圖之成果，檢討改善道路設計提升用路人於道路之安全性。例如：道路轉彎處之路線曲率、斷面坡度，綜合易肇事路段之車速與交通流量等資訊，檢討道路設計與交通號誌設置；另外，道路交通標誌標線劃設，根據道路交通標誌標線號誌設置規則第一百八十八條，指示線係用於指示車輛行駛方向，以白色箭頭劃設於車道上^[4]。指示線繪製規準為圖 4 所示。因此，於高精地圖上便可針對此些指示線，量測其與實際法規規定設置是否一致，並列入道路資產盤點管理資料庫中。

除本身高精地圖已有之道路資訊，為完整盤點道路資產，更能於地圖中加入其他道路資產資訊。例如道路地下公共設施維生管線，若須建立管理此公共管線數據資料庫，定位精確度則相對重要。因此，於此高精地圖的應用上，可先透過人孔蓋精準定位其位置，將此資訊繪製於高精地圖上，再加上必要之屬性資料，便可依此作為地下管線的定位依據。

一般採用 BIM (Building Information Model) 的模型建構主要關注於建築結構體的營建管理，張家瑞

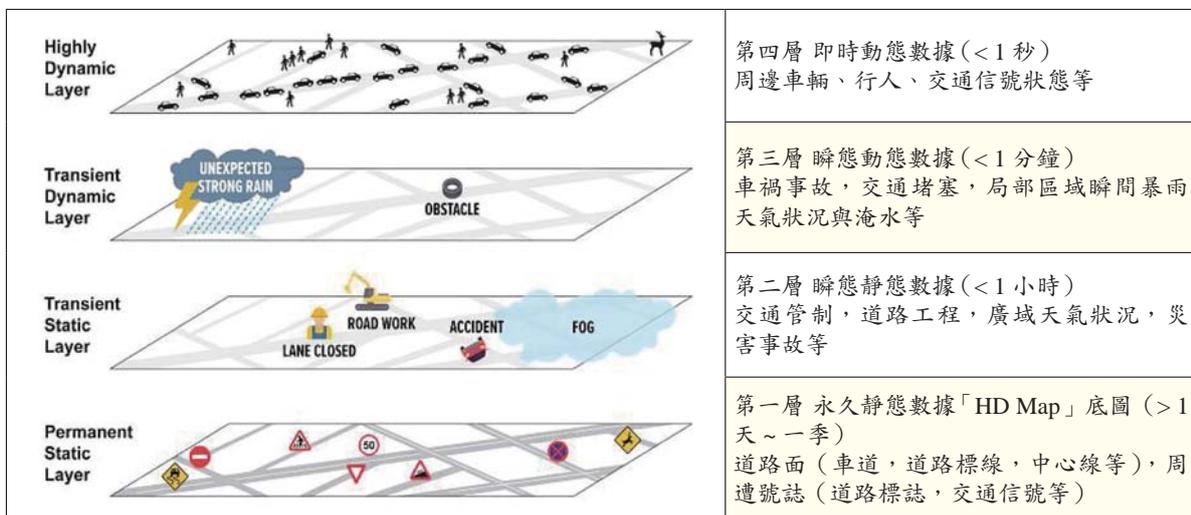


圖 2 高精地圖四類圖層 (改繪自 AECC^[3])

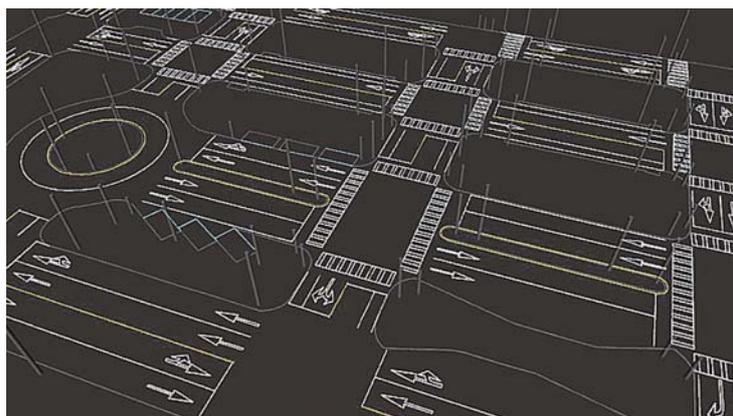


圖 3 沙崙自駕場域高精地圖部分圖資內容三維展示

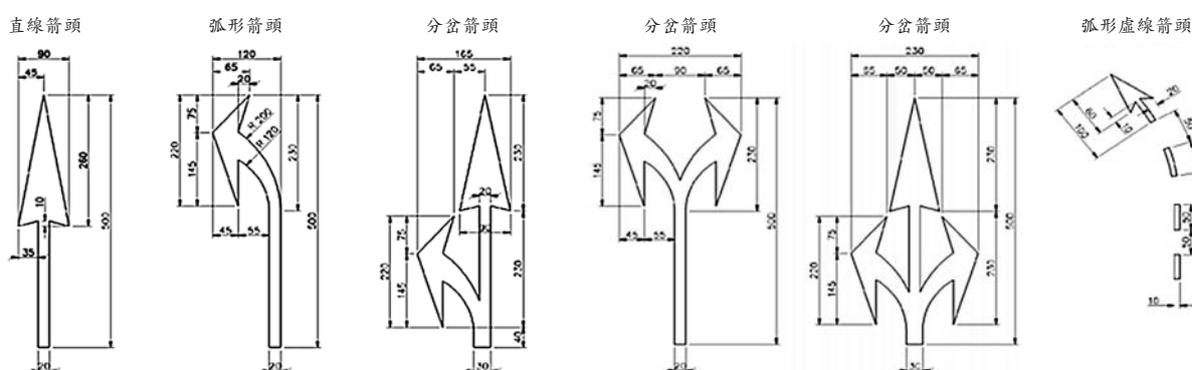


圖 4 指示線繪製原則

等人^[5]與 Chang and Lin^[6]提出 RIM (Road Information Model) 是指在道路及附屬工程的生命週期中，建立與管理道路相關空間資訊的過程，通常 RIM 使用三維、即時、動態的建模軟體，以提升道路設計、施工、維管以至於城市整體建設的生產力，RIM 不僅只是 3D Model，其涵蓋道路上方及下方相關元件的數量、幾何性質、空間關係、地理資訊等。承上 RIM 之概念與 HD Map 嚴謹的圖形結構以及概念可以相輔相成，若將此道路的路面上與地下各項道路與附屬設施以及地下管線之公共設施模型建構出 RIM，對於道路資產維護管理能提供更有效率的政府智慧治理決策。

本文以台北市政府所管轄的路網為例，思考高精地圖由靜態至動態圖資的四層次，本文提出高精地圖不僅使用於自駕車產業發展而已，而是可以設計用於調適與因應氣候變遷下遭遇短延時強降雨引發坡地災害與淹水災害，以及強震威脅的複合災害環境。將高精地圖結合道路工程營運維護之品質管理以及行車用路人安全之相關圖資資訊，若能將過去道路養護維護與災害防治決策之相關記錄有系統的彙整，可透過 AI 技術建立可預測

之 AI 模型，可輔助制定出維持道路設施品質、降低交通事故與節能減碳之交通安全相關措施之規劃。以台北市政府為例，其各單位與中央單位的職掌，與其所對應的即時資訊更新與組織協調之合作可能性，簡述如下：

1. 交通局掌管交通號誌、標線、標誌維護與道路資訊服務等，規劃不善交通事故比例高，甚至道路交通壅塞。
2. 工務局水利工程處淹水區域標記，尤其近期地下道淹水事件頻繁。
3. 工務局公園路燈工程管理處負責路燈與路樹，損壞影響治安與行車安全。
4. 工務局衛生下水道工程處負責人孔與地下水道，避免道路挖掘施工破壞。
5. 大地工程處則負責人工邊坡與邊坡安全問題，行車用路人遭落石擊中。
6. 工務局新建工程處則負責道路與橋樑養護以及道路維修現況則必須與交通部公路總局以及高速公路局協調。道路下邊坡路基流失、道路上邊坡坍塌、橋樑斷裂。

7. 內政部警政署與地方政府維持交通安全，針對交通事故則由警察機關所管轄。易事故與犯罪路段之提醒，並積極進行道路設計改善。
8. 交通部氣象局則因為強降雨以及強震也提供情資，提供公路養護與行車安全性參考，必須依據「公路橋梁檢測及補強規範」進行巡檢。道路阻斷與歷年的損失維護記錄。
9. 農業委員會水土保持局防災中心、水利署防災中心、交通部公路總局防災中心，目前各有災害應變機制分別發布土石流與坡地災害、淹水，道路封阻決策...等。針對道路路廊面對天災之安全預警機制，提供災害管理。

AI 演算法輔助高精地圖製作與道路資產物件辨識

MMS 將道路資產數位化之挑戰

道路資產盤點工作傳統上仰賴人力逐一沿道路紀錄與盤點相關設施，拍照記錄所在位置並登錄目前設施現況。目前已有移動式製圖系統（Mobile Mapping System, MMS）採集光達（LiDAR）點雲與環景影像，可獲得三維高精度地圖資訊，有助於進行道路資產分類與空間數位化；另一方面，也因應自駕車快速發展需求，三維高精度地圖儼然成為一項必要的基礎圖資，即 HD Map。然而在 MMS 精密的測繪要求下，地圖製程相當繁瑣，人工作業時效不佳，居高不下的製圖成本，若不積極導入 AI 技術將影響道路資產管理的效率，且限制了國內自駕車技術的應用發展。目前 MMS 採集點雲資料與環景影像，是由人工半自動操作 GIS 軟體繪製必要的道路物件、線型以及對應的屬性資訊，然後再透過人

工檢核重複修正、測試與驗證。繁瑣的製圖流程、數化規則、格式轉換與檢核流程，目前全球的測繪業已面臨繪製圖的勞動力不足以致於作業時效無法提升的困境。故本文依據內政部制定的道路「圖資內容標準」並歸納出 10 類道路物件（如表 1）所示，並依據台灣常用之自駕車 Autoware 圖層格式所定義各類有子項目圖層。

透過 MMS 採集環景影像與點雲資料兩種資料，考量運算速度以及運算資源之軟硬體投資，以及處理程序以及正確率，本研究建議各道路物件子項目圖層辨識或萃取建議採用之圖層，先分別歸納為本研究初步建議點雲資料萃取物件採用 DBSCAN、PVCNN 兩種演算法最適當；影像辨識則採用 YOLO4 方法最適用，並且針對兩種資料進一步透過攝影測量原理，將道路物件進行空間對位。

AI 模型建立之前，標籤資料品質以及具結構化的資料至為關鍵，以下分別針對 MMS 採集點雲以及環景影像說明利用初步建構之 AI 模型辨識各項道路資產設施，未來將再持續增加標籤樣本以增加正確率。而後再說明 HD Map 之三維圖資結構與道路資產管理之應用關係。

AI 演算法於點雲資料之道路物件萃取

本節針對點雲資料特性與物件萃取需求，回顧相關可應用之三維數聚演算法，包含 (1) DBSCAN（Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise）是一個相當合適的聚類方法，它基於資料密度來進行空間上點雲聚類方法；(2) 3D U-Net 則是基於二維 U-Net 所擴充的立體網格三維模型；(3) PointNet 是以對稱函數為基礎的高效率三維點雲模型；而 (4)

表 1 道路物件對應 Autoware 圖層

類別	道路物件	Autoware 圖層定義子類別
1	道路	Roadedge
2	車道	Lane / dtlane
3	標線	Line / whiteline / road_surface_mark / stopline / crosswalk
4	物體	Object [Opendrive] / RoadAttachment
5	隧道	Tunnel
6	橋梁	Bridge [Opendrive]
7	標誌	Roadsign
8	號誌	Signaldata
9	燈面	Signaldata
10	桿	Pole / poledata / streetlight

PVCNN (Point-Voxel CNN) 則融合了 PointNet 以高效率的優點以及網格化 3D 模型高準確率的優點。

Liu *et al.* [7] 針對點與點之間的空間關係，提出了點雲資料結構結合過往網格化的作法找出鄰近點的空間特徵，該方法被稱為 PVCNN 在 Liu *et al.* [7] 的三個測試案例中，比較了 PointNet、3D U-Net 與 PVCNN 的訓練成效。PVCNN 與兩者有更優勢成果 (表 2)，另外針對使用不同的網格尺寸進行測試，當空間網格切的越細小準確率提升，但是卻相當消耗計算硬體資源與計算時間，則也是後續研究上必須研究取捨之處。

AI 演算法於影像資料之道路物件萃取

快速演進的 YOLO 在 2020 年有了突破性的發展 [8]，由義隆電子與中研院資訊科學研究所的合作計畫中，由所長廖弘源博士、王建堯博士與俄羅斯學者 Alexey Bochkovskiy 等人 [8] 共同研發的 YOLOv4，一舉成為當前全世界最快、最高精準度的物件偵測系

統之一。整體而言，YOLOv4 是現行即時運算影像辨識演算法中表現最亮眼的演算法，如圖 5 所示，是 YOLOv4 使用 Nvidia V100 顯示卡在微軟 (Microsoft) 的 MS COCO 資料集上面的表現，縱軸表示平均精度 (AP, Average Precision)，橫軸表示每秒可以判斷的幀數 (FPS, Frames Per Second)，也代表著影像辨識的速度。觀察統計結果可知，即便使用 Google 最新研發的高效率二階段演算法 EfficientDet，在高速運算的狀況下表現仍不如 YOLOv4，以每秒 67 幀的狀況為例，EfficientDet 僅能達到 34% 的平均精度、YOLOv4 可以達到 43% 以上的平均精度。面對高幀數 (Frames Per Second, FPS) 之情形下，目前其他演算法 EfficientDet、ATSS、ASFF、CenterMask 皆無法提供如 YOLO4 穩定且準確率高的計算結果。預期未來幾年內實務應用上，仍以 YOLO4 演算法進行影像資料辨識道路物件仍為主流。

表 2 PVCNN 三維模型訓練成果與效能分析 (修改自 Liu *et al.* [7])

模型名稱	Input Data	mAcc	mIoU	Latency	GPU Mem.
PointNet	Points (8 × 4096)	82.54	42.97	20.9 ms	1.0 GB
3D U-net	Voxels (8 × 4096 ³)	86.12	54.93	574.7 ms	6.8 GB
PVCNN (0.125 × C)	Points (8 × 4096)	82.60	46.94	8.5 ms	0.6 GB
PVCNN (0.25 × C)	Points (8 × 4096)	85.25	51.93	11.9 ms	0.7 GB
PVCNN (1 × C)	Points (8 × 4096)	86.66	56.12	41.1 ms	1.3 GB

- * mAcc (mean Accuracy): 平均準確度
- * mIoU (mean Intersection over Union): 平均交併比，意即兩個區域的交集與聯集的比值，是人工智慧常見的模型評價方法。
- * Latency: 運算時間，以毫秒 (ms) 為單位。
- * GPU Mem.: GPU 內存記憶體用量。
- * C: Channel 數目。

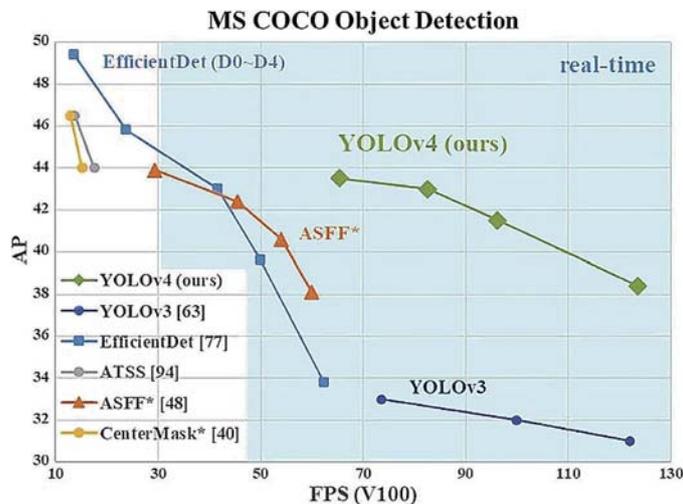


圖 5 YOLOv4 物件辨識效能比較 (幀數 (FPS, frames per second); 平均精度 (AP, Average Precision) 摘自 Bochkovskiy *et al.* [8])

人工智慧應用與道路資產辨識初步成果

由上述高精地圖製圖流程可知過程繁瑣，當高解析度相機以及光達點雲設備普及之後，巨量的影像與點雲資料將成為生產與應用的瓶頸，並須利用人工智慧輔助高精度的三維地圖製作增加效率。人工智慧技術亦應用於辨識並萃取出道路物件，利用前後期之三維地圖特徵之差異比對，將有助於定期盤點道路資產的破損、變形以及增加與移除，巡檢與調查之成果可以更新於各項道路設施的屬性上，並且以高精度的三維地圖呈現。以二維圖資進行道路資產盤點已無法滿足目前道路各項設施之安全巡檢之需求，必須要提高解析度與提升精度為比例尺為 1/500 ~ 1/250，才能清楚標記出道路各項設施的位置。

實務上應用上建議建立第一版的道路上的高精度三維地圖（優於 1/250 比例尺），後續搭載 GPS 之攝影設備與光達設備可以依據此高精度三維地圖進行比對差異，以台北市為例有路平專案，用路人十分重視道路鋪面品質狀況，所以採用人工智慧快速辨識影像提出鋪面缺失位置，並且進一步量測出坑洞深度與龜裂尺寸，將可直接計算出 PCI (pavement condition index) 指標，長期累積各道路段的鋪面品質狀態，並且提出 PCI 指標變化與道路設計、氣候條件、交通當量（各車款流量）的關係，有至於生命週期的管理。

人工智慧技術發展為產業帶來巨大的變革。巨量的空間數據經由人為判讀或數值化，相當耗時耗力，導入 AI 進行自動或半自動化程序將有助於地圖產製單位提升生產與品管效率。

點雲和影像是高精地圖製圖過程的關鍵原始資料，AI 演算法近年對該兩項資料處理已取得關鍵性的突破與進步。例如道路上桿狀物的辨識，需先將原始點雲資料進行分類（圖 6），再經過分類得出道路兩側物件之點雲（圖 7）。

再透過分群演算法，萃取出桿狀物（圖 8），邊界的萃取將可加速道路物件數值化的流程。另一方面，加上 AI 影像辨識，如圖 9 所示，透過影像辨識，AI 可萃取影像中資訊，並將之分類。此快速辨識模型，可協助道路物件屬性填寫。

另一方面，例如地面上之標線，可透過點雲分類出地面點雲，再將點雲做俯視投影（圖 10），得出地面標線之投影點後，經由分群演算法（圖 11），和方程式線性耦合（圖 12），則可萃取出地面標線之拓樸結構。此三維特徵拓樸結構，可再經由轉檔程式，便可取得其向量特徵。

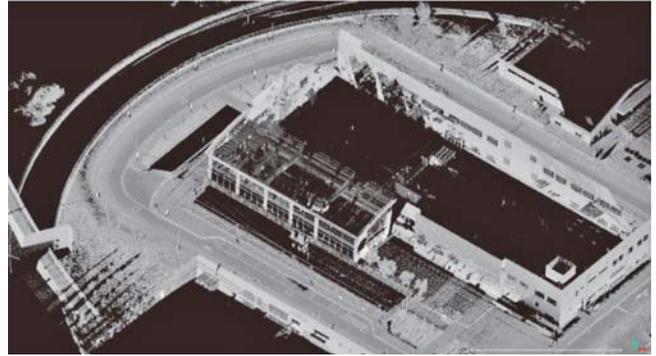


圖 6 原始點雲資料

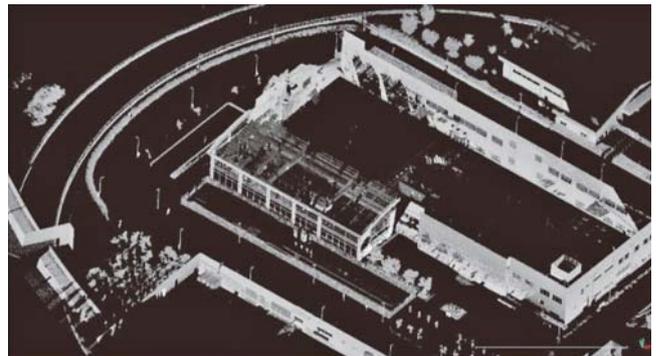


圖 7 萃取出道路兩側之物件點雲



圖 8 點雲萃取之桿狀物



圖 9 標誌影像辨識

透過高精地圖製作流程，配合高精地圖擁有之精確性高之特性，再加上運用 AI 人工智慧方式，將環景影像物件辨識後透過攝影測量進行物空間匹配，如圖 13 結果所示，同一個路口下的標誌號誌，即經過影像的空間匹配可以清楚的顯示在點雲物件附近。人工智慧持續發展之趨勢下，可以加快高精度三維地圖的產製速度，快速萃取出道路上標線、標記、和物件等，已可將可提升整體道路資產盤點與管理精確性與效率。

利用 AI 與高精度地圖於道路資產管理實務案例

台北市工務局應用 AI 於道路鋪面破損之辨識

近年道路品質提升與養護為各縣市及公路機關重點施政項目，傳統投入大量人力及時間成本的人工巡檢方

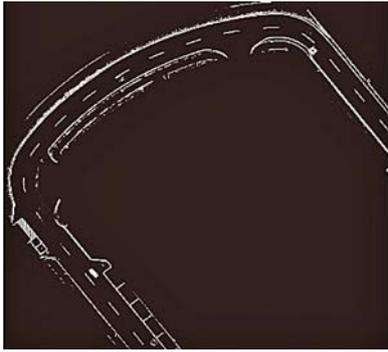


圖 10 點雲俯視投影

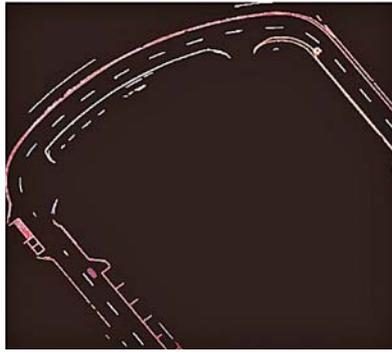


圖 11 分群演算法

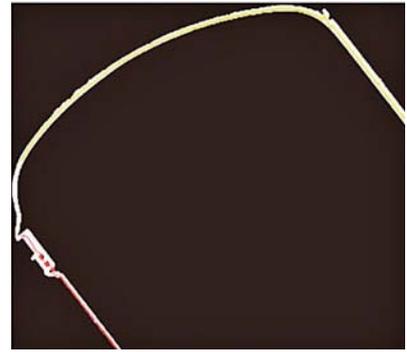


圖 12 方程式線性耦合

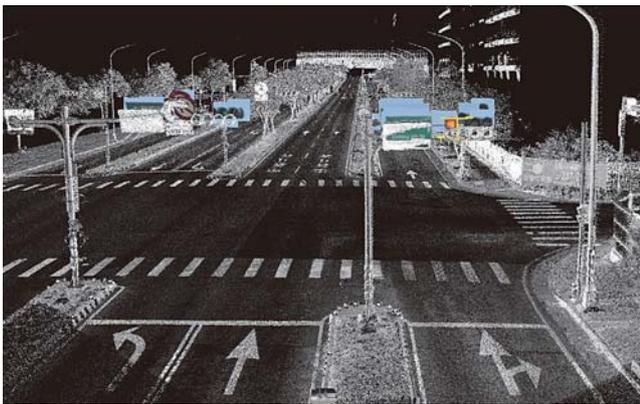


圖 13 環景影像物件經 AI 辨識後再經過攝影測量計算與物空間匹配結果



圖 14 即時拍攝影像辨識道路鋪面破損類型，並且登錄於 GIS 圖台中顯示路網各處之道路鋪面 PCI 指標（台北市政府工務局提供）

式，已無法因應高頻率與成效式的作業需求，各地方養護單位因而陸續嘗試導入國外移動式測繪系統（MMS, Mobile Mapping System）做為自動化鋪面巡檢車，即透過攝影機或光達等影像擷取設備、POS 定位系統及邊緣運算偵測分析鋪面缺失類別，將影像及空間屬性資訊同步回傳雲端道路品管圖台，計算鋪面狀況指數（PCI, Pavement Condition Index）做為道路檢修排序依據^[9]，以提升行政及養護作業的效率。

台北市政府工務局已將 AI 影像辨識及攝影量測技術整合，利用高解析度攝影機動態拍攝道路鋪面，多個視角重疊的攝影鏡頭設計，可再結合近景攝影測量（Close-range photogrammetry）技術可產製道路鋪面之三維點雲資訊，其三維點雲成果可與光達（LiDAR）成果相近，讓鋪面破損類型之影像辨識成果可以獲得尺寸量化成果（ex: 坑洞深度、車轍...），預期將可取代光達以降低 MMS 硬體成本，讓道路巡檢 AI 更為普及與處理資料迅速。目前台北市工務局於巡檢車上（圖 14），已搭載 AI 模型 YOLOv4 演算法，提升移動載具上 edge-AI 演算效率，可在巡檢車上即時辨識各類型之破損，並持續擴充日常巡檢標註破損之影像庫，

以滾動式精進 AI 模型判釋準確度，以達到自動化的 PCI 破損嚴重等級進階分析，可大幅降低養護成本，並擴展應用至道路設施及其他基礎設施巡檢的管理。

英國利用 AI 建立快速更新道路資產服務 RoADS

英國地形測量局（Ordnance Survey）有感於每年需投入大筆道路資產維護預算，發展出以人工智慧，輔以車輛感測載具和地理定位工具之萃取道路設施、公共資產之技術服務（圖 15）。此項服務被命名為 RoADS（roadside asset data service），其往快速更新道路資產資訊，並分享給客戶方向繼續發展技術^[10]。

此技術採用電腦視覺演算法，訓練模型以辨識道路設施與資產，並且評估設施之現況^[10]。目前此演算法能辨識出路上標誌、號誌、標線、路燈、郵筒、人孔蓋、變電箱、安全柱、排水孔等。此外，更包含檢測道路鋪面，達到早期發現、早期施工，以降低對道路品質的影響。而在評估設施方面之應用，例如排水孔於大雨後容易雜草叢生，可透過此項技術服務快速更新排水孔狀況，使維護管理者能快速了解情況，整理排水孔，以防後續淹水問題發生。

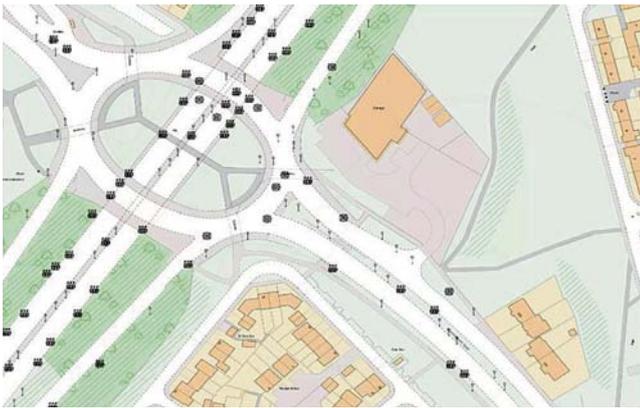


圖 15 英國地形測量局製作之道路資產盤點地圖^[10]

美國 AI 鋪面檢測技術發展

底特律為美國第一等級都市中，第一個使用人工智慧鋪面檢測技術於道路上之都市。此鋪面檢測技術，使用深度學習和機器學習技術分析影像每一個像素，透過神經網絡模型偵測不同形式的路面缺失。此影像的蒐集，可由智慧型手機攝像鏡頭和定位系統等裝置進行錄影，再將資料上傳雲端，經由此神經網絡模型，執行分析與紀錄。

分析紀錄結果展示於地圖平台上（圖 16），此平台包含一基礎地圖，記錄 3 米寬道路上各種類型的鋪面品質。綠色代表品質優良之鋪面，反之紅色代表鋪面品質差，有缺失且需修補之位置。

此流程改善，底特律地方政府不僅可根據資料分析與紀錄結果，建立數據資料庫，評估所需求之維護資源，大幅降低維護預算，並且有效的改善鋪面品質，提供用路人可靠之道路環境^[11]。

日本道路設施盤點資料庫化與路況安全 AI 判識

早於 2017 年日本 DMP 成立以前，已產製高精度 3D 地圖（比例尺優於 1/500）用於道路資產的盤點以

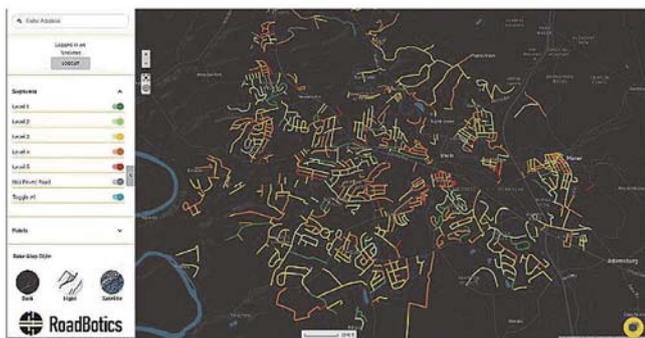


圖 16 道路鋪面品質分級紀錄資訊^[11]

及道路路側設施的都市規劃，例如都市市容與人行道無障礙設施規劃，設施巡檢與養護管理，而三維空間資訊於海嘯與淹水的模擬，進而用於防災避難規劃使用設備規劃，如圖 17 可見道路上的許多設施已經編號並且記錄其空間位置與維修紀錄。

於 2015 年日本國土交通省（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism）調查了因大雪造成交通堵塞所受影響之車輛數，結果顯示每年約有 500 台車輛受到影響，道路封閉路段長達 1,670 公里，道路封閉時間共約 1,100 小時。因此，日本為了改善道路交通狀況，提供安全的道路給予用路人，使用了感測器和人工智慧技術，擷取道路狀況後，回傳至道路監控端，監控端便可配合地圖上回傳資訊，針對道路事件做出相對反應^[12]。

此道路偵測系統，共安裝了 13,000 個監測錄影機於高速公路上，提供道路監控端監控使用。隨著監測器越來越多，管理人員地監控越感困難。2018 年起，日本國土交通省便開始導入人工智慧技術，自動偵測道路意外事件。除外，目前此人工智慧技術可偵測停止車輛和塞車情況，然後自動通知監控人員^[12]。

此偵測系統，便符合高精地圖第二層靜態圖層與第三層即時動態圖層之概念，結合動態資訊，提供用路人道路資訊。

以色列 Mobileye 的「路書」(Roadbook)

Intel 子公司 Mobileye 原為以色列以電腦視覺（Computer Vision, CV）為核心發展自駕系統的指標性公司，亦是國際上輔助駕駛系統（ADAS）的最大供應商，其以價格相較光達低廉的攝影機作為主要感測器，並透過 AI 深度學習及影像辨識技術，將高精度地圖的快速產



圖 17 日本利用 MMS 產製 1/500 比例尺地圖利於道路資產盤點與管理

製以及眾包 (crowd sourcing) 繪製模式做為其成本及擴散性上的優勢，藉此提升動態圖資更新的頻率並以每日 800 萬公里之進程建置其全球雲端地圖資料庫「路書」(Roadbook)。

Mobileye 因而成為國際高精地圖的主要供應商，全球 28 個汽車大廠中，目前有八成以上使用 Mobileye 的系統，例如福特、BMW、日產等，而其影像式 ADAS 產品已裝配在超過 100 萬輛汽車上，協助繪製了近 10 億公里的街道地圖之餘，Mobileye 更積極取得合作車廠配備感測器的第一手即時道路資訊，與 AI 識別的各式標號誌、道路周邊設施物件圖資整合，建立道路經驗管理 REM (Road Experience Management) 系統，將自駕技術及高精度地圖的商業模式佈局到即時路況、駕駛行為研究、物流車隊管理、「交通即服務」MaaS (Mobile-as-a service) 等 to B (Business)、to C (Customer) 的數據服務市場。

近年 Mobileye 亦積極聯合各國 OEM 廠商拓展各大城市 To G (Government) 的服務，初期以 Mobileye ADAS 的高頻率更新圖資切入日常道路資產管理需求，例如將其 ADAS 應用於自動化道路設施盤點更新、道路鋪面品質狀況、坑洞搶修警示、標線或號誌缺失通報等，同步將眾包模式導入加速當地高精度數位道路圖資的建置，後續透過各城市合作車廠或公務車 (如自駕公車) 籌劃自駕先導場域，此策略已成功導入在慕尼黑、底特律上路行駛及今年的上海、東京、巴黎等，預期在 2023 年即可實踐機器人計程車隊，使公私車隊皆能成為採集、數化、建置、養護國家道路資產且為數位雙生 (Digital Twins) 的一環。

結語

國際上各國產製高精度 3D 地圖 (比例尺優於 1/500)，並非只強調高精度地圖用於自駕車產業，而是廣泛應用於道路上的汽車駕駛安全提升，道路設計與設施維護改善，具體應用於防災減災規劃。隨著空間資料採集的解析度與精確度增加，且採集手段多元，而道路資產數據量將越來越大，加上老舊道路基礎設施之養護維護需求案量增加，目前使用人力進行資產盤點已不敷成本，導入人工智慧技術辨識道路資產的空間位置與數量，並編列成冊以利持續進行道路巡檢，將辨識出的道路資產損害狀態可以更新履歷與建

檔，因為人工智慧導入可增加道路巡檢頻率，以及降低人力成本，已是國際發展趨勢。

道路資產位置之精確度有較高之需求，採用三維高精度的圖資 (高精地圖) 建立道路資產的資料庫，讓道路資產之定位精準度提高，將其空間位置與設計幾何特性，一併與交通壅塞、交通事故、天災風險進行關聯分析，可探討用路人之道路安全問題。總言之，人工智慧與高精地圖的技術導入道路資產管理已是世界趨勢，可降低道路資產之營運維護與管理成本，唯有先有規劃完成數位道路，才能實現智慧道路應用，以及城市的智慧治理。

參考文獻

- Sairam, N., Nagarajan, S. and Ornitz, S. (2016), Development of Mobile Mapping System for 3D Road Asset Inventory, Sensors, Vol. 16, No.3:367.
- 高內政部高精地圖研究發展中心 (2019), 高精地圖圖資內容及格式標準。
- AECC. (2020), "Operational Behavior of a High Definition Map Application White Paper".
- 交通部 (2021) 道路交通標誌標線號誌設置規則 (修正)。
- 張家瑞、康仕仲、林鶴斯 (2013), 導入 BIM 技術強化道路養護管理，營建知訊，第 369 期，58-61 頁。
- Chang, J.R., Lin, H.S. (2016), Underground Pipeline Management Based on Road Information Modeling to Assist in Road Management, Journal of Performance of Constructed Facilities, American Society of Civil Engineers (ASCE) Vol. 30, No. 1., 40140011~401400114.
- Liu, Z., Tang, H., Lin, Y., and Han, S. (2019) Point-Voxel CNN for Efficient 3D Deep Learning, Cite as: arXiv:1907.03739 (cs), Available at: <https://arxiv.org/abs/1907.03739>
- Bochkovskiy, A., Wang, C.Y., Liao, and Liao, H.Y.M. (2020), YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, Cite as: arXiv:2004.10934, Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>
- 曾志煌、張家瑞、鄭錦桐、巫柏蕙、黃萬益 (2004), 國內外鋪面管理系統評估比較之研究，交通部運輸研究所。
- Navin, Simon (2021), Automated mapping of utility assets can save you time and money [Online]. Available at: <https://www.ordnance-survey.co.uk/business-government/innovation/happens/articles-ehs/automated-mapping-utility-assets>.
- Frost, A. (2019), Detroit first major US city to use RoadBotics' new pavement assessment tool [Online]. Available at: <https://www.traffictechnologytoday.com/news/asset-management/detroit-first-major-usa-city-to-use-roadbotics-new-pavement-assessment-tool.html> (Accessed: 09 March 2021)
- Fujitsu Blog Editor. (2019), How Fujitsu is using AI to make Japan's roads and rivers safer [Online]. Available at: <https://blog.global.fujitsu.com/fgb/2019-11-20/how-fujitsu-is-using-ai-to-make-japans-roads-and-rivers-safer/> (Accessed: 09 March 2021)
- 鄭錦桐、車文韜、岡田泰征、廖玲琬，高精地圖製作與交通運輸商業應用趨勢，土木水利 46 (2), 51-58。





以深度學習與數位學生 打造工地鋼筋查驗新法

陳翊翔／國震中心與台大土木合設AI研究中心 研究助理

莊仕杰、張鈞程、羅昱恆／國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 碩士班研究生

黃琮煒／國立臺灣大學土木工程學系 大學部學生

邱永全／國震中心與台大土木合設AI研究中心 研究助理

林冠成／中興工程顧問股份有限公司三鶯捷運工程處 經理

黃志民／中興工程顧問股份有限公司研發及資訊部 協理

周頌安／中興工程顧問股份有限公司 總工程師

陳俊杉／國立臺灣大學土木工程學系 教授

現行工地鋼筋混凝土工程常因工程量體龐大、施作與查驗工程人員經驗不足、影像紀錄侷限性與高風險場域可及性等問題，而常有鋼筋綁紮組立品質難確保、工程查驗紀錄難運用於後續缺失改善與工程人員涉足高風險場域之工安問題等。本研究以深度學習與數位學生打造一工地鋼筋查驗新法，深度學習模型以中興工程顧問公司監造的三鶯捷運工程為實施案例，配合預鑄梁場與施工現場工程進度，取得大量鋼筋綁紮實際彩色影像與深度影像，並標註鋼筋組立查驗特徵作為模型的輸入資料，來訓練鋼筋特徵影像實例分割的深度學習模型，此模型於驗證集與測試集中皆有良好表現，再應用無人飛行載具執行鋼筋查驗作業。數位學生部分以運動回復結構（Structure from Motion, SfM）與多視角立體視覺（Multi-View Stereo, MVS）建立鋼筋組立的三維點雲，透過數位學生空間資訊投影、鋼筋影像間距特徵實例分割、影像像素與數位學生點雲的轉換關係，將鋼筋混凝土構件之鋼筋組立數位學生分割為具鋼筋間距特徵識別的「智慧學生」，此一智慧學生，將能透過自動化的真實尺度計算與相關統計數值應用於工地實務，以提升工程效率與品質。

關鍵字：深度學習、數位學生、工地查驗、鋼筋、影像實例分割、無人飛行載具

簡介

大型建物與公共工程多為鋼筋混凝土結構（Reinforced Concrete Structures），而影響鋼筋混凝土結構安全品質的關鍵則是鋼筋組立的施工品質。鋼筋組立是依照施工圖說所繪製的鋼筋號數、尺寸、形狀、間距及位置組合而成的框架。每個構造物依照其功能，或為結構安全、或為配合大型機電管線，所需組合之鋼筋數量及類型都相當繁雜。在工地現場進行澆注混凝土前，

查驗鋼筋框架是否符合設計圖要求與施工規範的規定，是件繁瑣但必要的步驟。以下分就工地鋼筋查驗現況、本研究所提出之鋼筋查驗新法、深度學習應用於工地與數位學生應用於工地，做一簡述。

工地鋼筋查驗現況

現行鋼筋查驗因工程量體龐大，僅能以人工進行目視檢查或是抽樣量測來確保鋼筋組立綁紮是否合乎規範，無法執行全面性地查驗；此外查驗品質的好壞

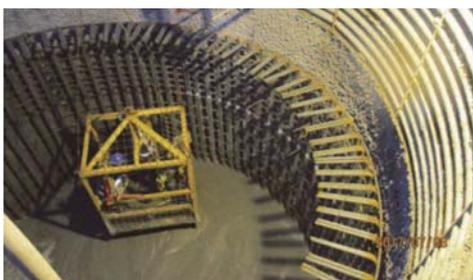
也相當仰賴現場查驗工程師的經驗，從以使查驗品質難以穩定；而現行查驗的紀錄影像雖能作為查驗結果的參考，但往往只能記錄鋼筋組立其中一角，無法掌握鋼筋組立全貌，不易於連結後續的鋼筋組立修正作業與查驗議題追蹤；另外大型建物與公共工程的施工現場往往相當複雜且具高風險，如深基礎開挖（如井基）可達數十公尺深，高架橋墩柱可達數十公尺高，在此高風險工作環境中，查驗人員常需吊掛繩索或進入吊箱至待檢核區段以目視或抽樣量測進行查驗作業（如圖 1），從業人員的安全實須獲得關注與改善。綜前所述，工地鋼筋查驗現況的痛點包含以下四項，無法全面性完成鋼筋查驗、鋼筋查驗品質難以穩定、查驗影像無法釐清鋼筋組立查驗全貌與從業人員於高風險環境的查驗作業安全。

工地鋼筋查驗新法

鑒於工地鋼筋查驗現況中所遭遇的困難，本研究提出以深度學習與數位孿生技術所打造的工地鋼筋查驗新法，能為現行工地鋼筋查驗現況所帶來的改變如圖 2 所示。深度學習模型的即時運算提供穩定的查驗品質並使全查驗成為可能，數位孿生則記錄工地鋼筋組立的細節並呈現全貌，使工地鋼筋查驗作業的議題追蹤得以實現。以下分別簡述深度學習與數位孿生於工地鋼筋查驗新法中扮演的腳色與作用。



(a) 查驗人員繫上安全繩執行鋼筋查驗的抽樣量測



(b) 查驗人員進入吊箱以目視執行鋼筋查驗作業

圖 1 工地鋼筋查驗的高風險作業環境

本研究使用 Mask Region-based Convolutional Neural Network（以下簡稱 Mask R-CNN）^[1] 實現深度學習中的影像實例分割技術，學習工地現場鋼筋組立的影像與深度影像中與查驗規範相關的鋼筋特徵，包含鋼筋組立的間距、搭接長度、彎鉤角度與彎鉤延伸長度，從而建立具鋼筋特徵識別能力的深度學習模型，並透過影像其相對應的空間資訊進行真實尺度計算，完成查驗作業。此深度學習模型即使在含有數量以百計的鋼筋間距的影像都能即時完成運算得到結果，使工地現場鋼筋組立的全查驗成為可能。深度學習可透過數據量增加而增強模型表現，經訓練完成後能提供穩定的鋼筋查驗品質。深度學習於本研究中作為鋼筋特徵識別的影像實例分割模型，將查驗所需的鋼筋重要特徵辨識後，與鋼筋組立數位孿生結合。深度學習相關細節將於第 2 章深度學習應用於鋼筋組立辨識進行詳述。

本研究透過電腦視覺中的運動回復結構（Structure from Motion, SfM）^[2-4] 與多視角立體視覺（Multi-View Stereo, MVS）^[5] 從工地鋼筋二維影像建立工地鋼筋組立的數位孿生，並利用數位孿生的空間資訊進行再投影取得鋼筋二維影像所對應的深度影像，並將影像與深度影像作為前述之深度學習模型之輸入進行鋼筋特徵識別，識別結果再透過影像像素與數位孿生的空間資訊關係進行轉換，完成鋼筋組立數位孿生的特徵識別，數位孿生在本研究中作為資訊載體，並提供深度學習模型所需的空間資訊。數位孿生相關細節將於第 3 章鋼筋組立數位孿生建立進行詳述。



圖 2 現行工地鋼筋查驗與本研究所提出的工地鋼筋查驗新法的比較

深度學習於工地應用現況

深度學習於工地的應用如圖 3 所示，所使用的深度學習架構以深度神經網路 (Deep Neural Network, DNN)、卷積神經網路 (Convolution Neural Network, CNN) [6]、循環神經網路 (Recurrent neural network, RNN) [7] 與生成對抗網路 (Generative Adversarial Network, GAN) [8] 等為主，透過對工程影像進行分類與描述、對機具或是工程人員進行偵測、追蹤與行為識別、對營建相關產業的歷時訊號或數據進行預測等，應用有工地安全 [9-12] 與建物破壞程度分類 [13]、路面檢測分類 [14] 與大型機具狀態識別 [15] 與營建成本預測 [16]。其中應用於影像相關的卷積神經網路是最廣泛應用的深度學習模型架構 [6]，多以物件的方框偵測 [17] 為主，像素等級的影像分割技術 [1,18] 則少有於工地的應用。

數位孿生應用於工地

數位孿生因具備自動、開放且可追蹤的特性，本研究將其納入成為實現工地檢核系統的工具。數位孿生在工業中一般被定義為三部分：實體資產、數位模型與兩者之間的同步連結，目的為進行實體資產的管控。根據 Sacks 等人於 2020 年發表之研究 [20]，數位孿生於工地之工作流程可分為四個面向討論，分別為實體 - 虛擬 (physical-virtual)、產品 - 流程 (product-

process)、意圖 - 狀態 (intent-status)、數據 - 資訊 - 知識 - 決策 (data-information-knowledge-decisions)，如圖 4 所示。實體 - 虛擬維度即數位孿生之基本定義，由實體資產與數位模型構成；產品 - 流程維度說明了數位孿生可用於紀錄施工階段的兩個狀態，第一為產物，即結構物，第二為施工的過程；意圖 - 狀態則代表了時間的維度，不同階段會有不同的產物，如 as-designed model (設計模型) 與 as-built model (現地模型)、as-planned process (計畫流程) 與 as-performed process (實際流程)；最後數據到決策的維度，傳達了數位孿生引入的核心意義，乃由大量的數據走向準確且迅速的決策。在 2020 年 Lin [21] 等人發表之最新研究引入數位孿生的概念於工地建造過程，透過自動比對 4D 建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM) 與 4D 現地點雲模型，達成自動、即時且主動的工程進度管控與圖資管理，並於兩個實際工地驗證此方法能有效改善既有營管架構。

深度學習應用於鋼筋組立辨識

用於影像像素等級分割的深度學習技術包含語意分割 (semantic segmentation) [18] 與實例分割 (instance segmentation) [1]，語意分割試圖在語意上理解圖中像素點的作用，描繪出物體的邊界與密集的程度，但實例分

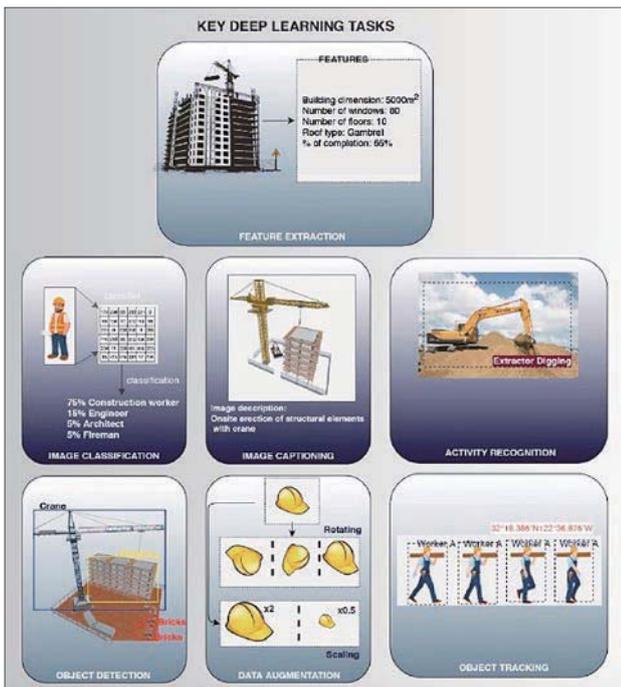


圖 3 深度學習於營建工程之應用 (摘自 [19])

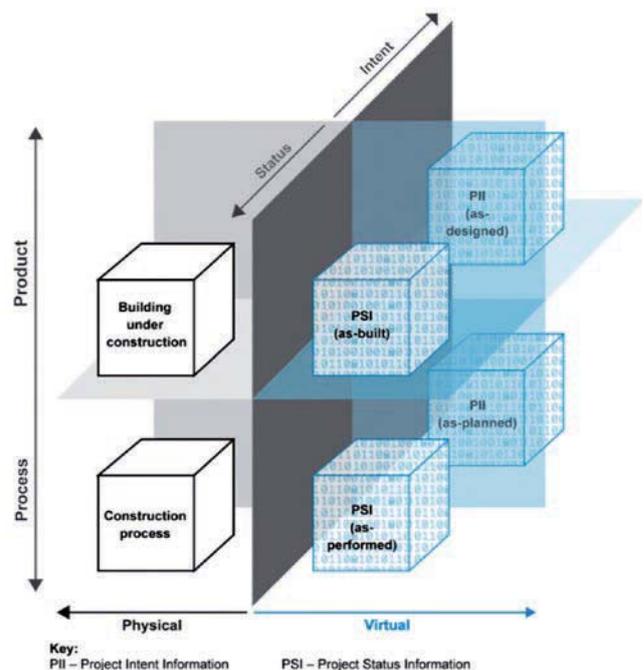


圖 4 數位孿生於工地應用之三個面向：實體 - 虛擬、產品 - 流程、意圖 - 狀態 (摘自 [20])

割技術可將類別相同之重疊實例 (instance) 進行獨立預測，為目前深度學習於電腦視覺技術中困難的任務之一。本研究使用 Mask R-CNN [1] 模型進行實例分割，其模型流程架構如圖 5。Mask R-CNN 使用了兩個階段來完成影像的實例分割。第一階段為使用 Region Proposal Network (以下簡稱 RPN) 來生成可能包含目標的區域。RPN 的運作原理為使用不同尺寸與長寬比的 anchor box 在特徵圖上掃描，藉此找到感興趣的區域 (Region of Interest, 以下簡稱 RoI)。第二階段首先將第一階段生成的 RoI 池化 (pooling)，模型經過 RoIAlign 使每個 RoI 的尺寸相同，才能夠快速地進行分類的預測，並調整 anchor box 的位置，使其更為準確。再使用卷積神經網路對調整完後的 RoI 生成遮罩 (mask)，在影像中以像素的等級對目標物進行分割預測。

本研究所辨識的對象為工地現場的鋼筋組立，由不同排列方式的鋼筋框架層層綁紮而成，僅靠 RGB 彩色圖像進行影像分割時，模型通常難以分辨複雜場景下的前景與背景，以及類似顏色像素的物品，再者 RGB 彩色圖像不具備能與真實尺度接軌的空間資訊，即使能正確識別出鋼筋特徵，但對於鋼筋組立的間距、搭接長度無法提供資訊進行計算。先前研究以深度影像與語意分割技術為主用於鋼筋間距查驗 [22]，本研究延續其脈絡，將模型輸入改為彩色與深度影像以增加其影像特徵，並以影像實例分割的模型 Mask R-CNN 取代原有的語意分割模型進行鋼筋組立的間距特徵預測，透過重疊的實例資訊可改善鋼筋間距計算上的表現，以下就彩色影像與深度影像的蒐集方式與資料處理作一簡要說明。

在深度感測器的迅速發展下，可攜帶式的彩色影像與深度影像 (RGB-Depth Image, 以下簡稱為 RGB-D) 相機逐漸普及，如 Microsoft Kinect 與 Intel RealSense，

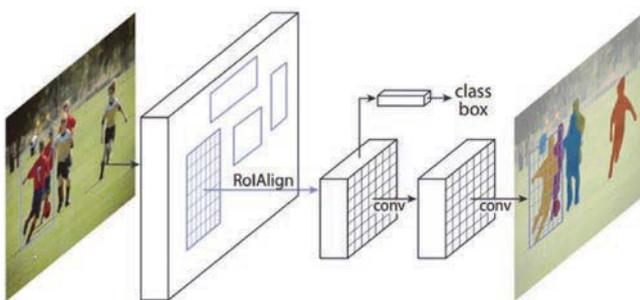


圖 5 Mask R-CNN 的流程架構 (摘自 [1])

搭載主動紅外線感測器，並可將深度影像與 RGB 影像同步顯示，藉此提供了大量的 RGB-D 資料集。目前 RGB-D 影像分割方法眾多，大致可分為三類。其一為將深度資訊以水平差異、對地面高度與表面法向量的角度 (horizontal disparity, height above ground, and the angle the pixel's local surface normal makes with the inferred gravity direction, 以下簡稱為 HHA) 編碼 [22]，並從 HHA 與 RGB 透過完整的 CNN 提取特徵 [23]；其二為將 RGB 影像與深度影像各自提取特徵後，將深度特徵與 RGB 特徵以交換網路 (transformation network) 學習 [24] 或融合 [25]，接著以反卷積層 (deconvolutional layers) 與反池化層 (unpooling layers) 重建標籤圖；其三為使用循環神經網路架構將 RGB-D 影像中的資訊循環學習以改善影像分割 [26]。本研究透過前述的第一種方法，將深度資訊以 HHA 編碼後與 RGB 影像作為訓練完成的 Mask R-CNN 模型輸入，來提取鋼筋組立特徵。

鋼筋組立影像實例分割模型訓練與成果

本研究以 Intel RealSense 深度相機於中興工程顧問公司監造的三鶯捷運工程的預鑄梁場與施工現場蒐集鋼筋組立的 RGB-D 影像，在鋼筋組立特徵識別中，本研究使用開源軟體 LabelMe [27] 一共標註了 248 張鋼筋組立影像裡的鋼筋框架結點與間距，結點意指鋼筋與鋼筋重疊交錯之處，以多邊形 (Polygon) 沿著交錯處邊界進行標註，間距則指結點與結點之間的連線，以線段進行標註，並將其中的 200 張影像作為模型的訓練集，28 張作為驗證集，20 張作為測試集。模型訓練曲線如圖 6 所示，本研究選取訓練過程中，訓練集的損失函數 (Loss function) 最低點的模型參數作為最終模型參數。

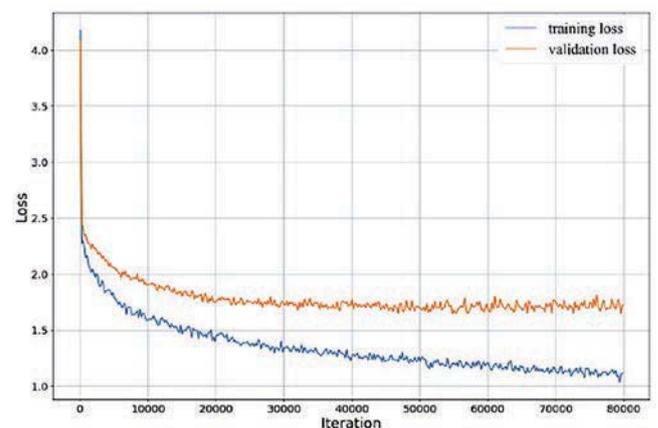


圖 6 鋼筋組立間距特徵影像實例分割模型訓練曲線

模型於測試集中的鋼筋組立間距特徵預測成果如圖 7(a) 所示，能成功將鋼筋框架的結點與間距特徵以像素等級進行實例分割。透過實例分割的結點與間距資訊結合深度影像中的空間資訊，就能完成鋼筋間距的真實尺度計算，計算結果如圖 7(b) 所示。

無人飛行載具執行鋼筋組立查驗

本研究以 DJI 的無人飛行載具 (Phantom 4 Pro V2) 搭配 Intel RealSense 深度相機 D415 與 Nvidia Jetson Nano 邊緣計算核心打造用於工地鋼筋查驗的無人飛行載具原型，以高為 160 公分的鋼筋混凝土構件之鋼筋組立為對象蒐集 RGB-D 影像，並透過前述的鋼筋組立間距特徵模型提取特徵，完成鋼筋間距真實尺度計算，實驗情形與計算結果如圖 8。



(a) 鋼筋組立結點與間距的實例分割結果



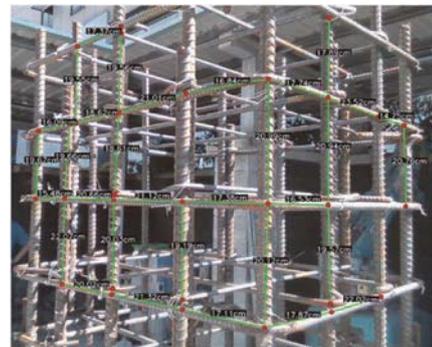
(b) 鋼筋間距真實尺度計算結果

圖 7 鋼筋結點與間距影像實例分割與間距計算結果

鋼筋組立數位孿生建立與深度投影

數位孿生建立與深度投影流程

本研究使用開源軟體 Colmap [4,28,29] 以 SfM [2-4] 與 MVS [5] 技術從鋼筋組立二維影像重建鋼筋組立的三維點雲，步驟如圖 9，先透過相機收集鋼筋組立的二維影像，經由 SfM 提取影像與影像間的特徵，建立鋼筋組立的稀疏點雲與二維影像在空間中對應的姿態，再藉由 MVS 配對影像像素點與影像姿態建構密集點雲模型，最後將密集點雲對應的空間資訊進行投影，取得每個鋼筋組立二維影像姿態所對應的深度資訊。



(a) 無人飛行載具執行鋼筋查驗實驗的鋼筋間距真實尺度計算結果



(b) 無人飛行載具執行鋼筋查驗實驗的側拍影像

圖 8 鋼筋組立間距特徵識別深度學習模型應用於無人飛行載具執行鋼筋查驗

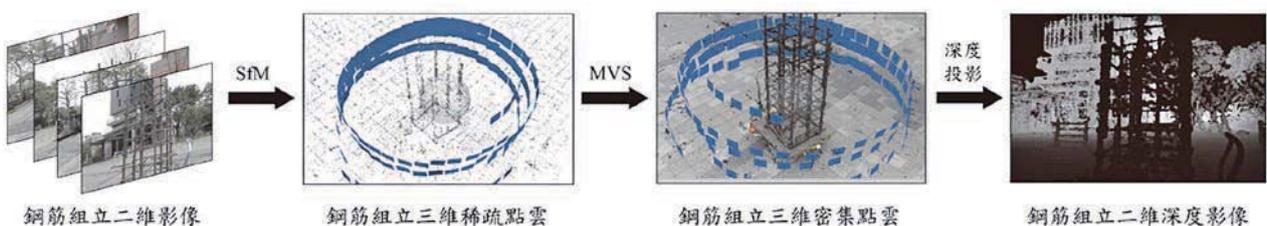
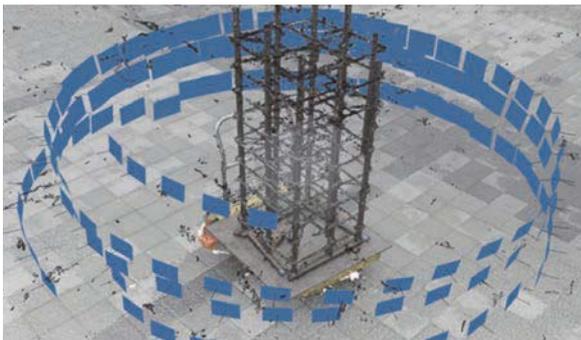


圖 9 鋼筋組立數位孿生與深度投影流程圖

本研究以高為 160 公分高的鋼筋混凝土構件鋼筋組立為目標物進行數位孿生的建立，如圖 10(a) 所示，拍攝人員離目標鋼筋組立距離約為 2 公尺處進行環繞拍攝，一共取得 176 張鋼筋組立二維影像，再依前述所提的 SfM 與 MVS 方法取得影像姿態與密集點雲，完成此鋼筋混凝土構件鋼筋組立的數位孿生建置，如圖 10(b)。



(a) 鋼筋組立數位孿生拍攝實驗影像



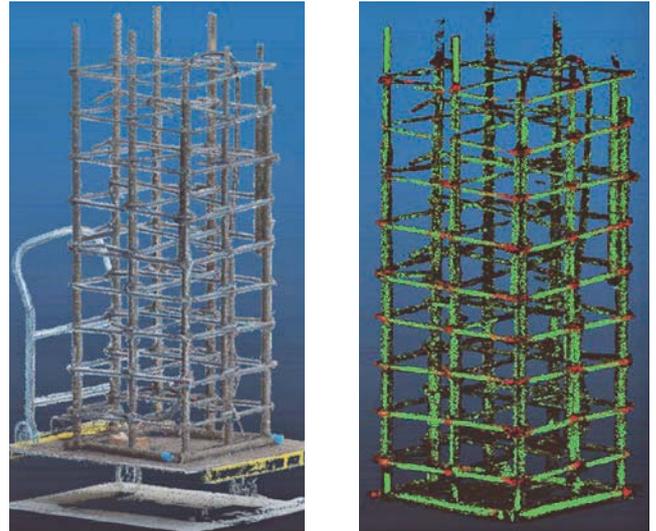
(b) 鋼筋組立數位孿生結果，藍色方框為所使用的影像姿態

圖 10 鋼筋組立數位孿生建立實驗照與結果

鋼筋組立數位孿生間距特徵識別成果

利用此鋼筋混凝土構件的鋼筋組立數位孿生的空間資訊，對 176 張的二維鋼筋組立影像的像平面進行投影，取得對應的 176 張二維鋼筋組立的深度影像，組成此鋼筋混凝土構件鋼筋組立的 RGB-D 資料集。並將此資料集作為第 2 章所述的鋼筋組立間距特徵深度學習模型的輸入進行特徵識別，識別結果透過 MVS 所建立的二維影像像素與數位孿生的點雲座標的關係進行轉換，完成此鋼筋混凝土構件的鋼筋組立數位孿生的特徵識別。

數位孿生與數位孿生特徵識別成果比較如圖 11，透過鋼筋組立二維影像所建立的數位孿生，雖可完整涵蓋此鋼筋組立的完整資訊，但資訊量過於龐大如以人工進行識別則過於耗時而無實益，欲以傳統演算法設計自動化處理流程則易淪為個案處理，難以廣泛應用。因此本



(a) 透過鋼筋組立二維影像以 SfM 與 MVS 所建立的數位孿生 (b) 將原始數位孿生透過間距特徵深度學習模型識別後的特徵數位孿生，紅色代表鋼筋與鋼筋交會的結點，綠色則為鋼筋間距。

圖 11 鋼筋組立原始數位孿生與特徵識別之數位孿生

研究透過鋼筋組立的 RGB-D 資料的影像實例分割技術，以像素等級識別影像特徵，並透過數位孿生建立流程中影像像素與點雲座標的關係，自動化完成數位孿生的特徵識別。與僅以影像進行識別相比，數位孿生特徵識別可改善影像識別由於空間資訊不足無法將識別特徵於整體鋼筋組立中進行定位的缺點。本研究所發展之特徵識別之數位孿生，可根據查驗項目自動進行特徵識別與真實尺度計算與相關統計數值應用於工地鋼筋查驗，將於鋼筋查驗自動化發展具重要貢獻。

結論與展望

本研究透過鋼筋組立的 RGB-D 資料收集與間距特徵標註，成功完成鋼筋組立間距特徵識別影像實例分割的深度學習模型訓練，於驗證集與測試集中皆有良好表現。本研究並以鋼筋混凝土構件之鋼筋組立為目標進行拍攝，透過 SfM 與 MVS 技術建立此鋼筋組立的數位孿生。後續透過數位孿生空間資訊投影、鋼筋間距特徵實例分割、影像像素與數位孿生點雲的轉換關係，成功將鋼筋混凝土構件之鋼筋組立數位孿生分割為具鋼筋間距特徵識別的「智慧孿生」，此一智慧孿生將能透過自動化的真實尺度計算與相關統計數值應用於工地鋼筋查驗。此一由深度學習與數位孿生所打造的查驗新法，僅需工地鋼筋組立影像就能以穩定查驗品質提供工地鋼筋組立的全面查驗，搭配數位孿生

確立查驗位置來實現鋼筋組立修正作業與查驗議題追蹤，搭配無人飛行載具則可輔助高風險場域的鋼筋查驗作業，增進工地安全。

本研究於後續規劃中，將完成其他重要鋼筋查驗特徵之深度學習識別模型，並搭配數位孿生技術打造出各式鋼筋查驗特徵識別之智慧孿生。並發展此一智慧孿生與設計（建築資訊模型、設計圖或是施工圖說）直接進行比對的查驗方法來邁向工地查驗自動化，此一技術帶來的革新後續將能搭配精實營建作法，創造產業的真實利基以驅動營建產業的數位轉型。

誌謝

本研究感謝科技部與中興工程顧問公司在「以人工智慧輔助工地鋼筋查驗」產學合作研究案（MOST 109-2622-E-002-016-CC2）的研究經費贊助，並感謝國立臺灣大學土木工程系的韓仁毓教授、張書瑋副教授、張家銘副教授、陳柏華副教授、林之謙助理教授與國立臺灣科技大學營建工程系紀乃文專案助理教授對本研究的指導。

參考文獻

- He, K., G. Gkioxari, P. Dollar, and R. Girshick, Mask R-CNN. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2020. 42(2): p. 386-397.
- Lowe, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. 1999.
- Bay, H., A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. 110(3): p. 346-359.
- Schönberger, J. and J.-M. Frahm. Structure-from-Motion Revisited. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016.
- Goesele, M., B. Curless, and S.M. Seitz. Multi-View Stereo Revisited. in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. 2006.
- Krizhevsky, A., I. Sutskever, and G.E. Hinton, ImageNet classification with deep convolutional neural networks, in *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1*. 2012, Curran Associates Inc.: Lake Tahoe, Nevada. p. 1097-1105.
- Mikolov, T., M. Karafiát, L. Burget, J. ernocký, and S. Khudanpur. Recurrent neural network based language model. in *Eleventh annual conference of the international speech communication association*. 2010.
- Goodfellow, I.J., J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, Generative adversarial networks. *arXiv preprint arXiv:1406.2661*, 2014.
- Nath, N.D., A.H. Behzadan, and S.G. Paal, Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment. *Automation in Construction*, 2020. 112: p. 103085.
- Fang, Q., H. Li, X. Luo, L. Ding, H. Luo, T.M. Rose, and W. An, Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos. *Automation in Construction*, 2018. 85: p. 1-9.
- Yang, K., C.R. Ahn, and H. Kim, Deep learning-based classification of work-related physical load levels in construction. *Advanced Engineering Informatics*, 2020. 45: p. 101104.
- Yu, Y., H. Li, X. Yang, L. Kong, X. Luo, and A.Y.L. Wong, An automatic and non-invasive physical fatigue assessment method for construction workers. *Automation in Construction*, 2019. 103: p. 1-12.
- Chi, N.-W., J.-P. Wang, J.-H. Liao, W.-C. Cheng, and C.-S. Chen, Machine learning-based seismic capability evaluation for school buildings. *Automation in Construction*, 2020. 118: p. 103274.
- Gopalakrishnan, K., S.K. Khaitan, A. Choudhary, and A. Agrawal, Deep Convolutional Neural Networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection. *Construction and Building Materials*, 2017. 157: p. 322-330.
- Rashid, K.M. and J. Louis, Times-series data augmentation and deep learning for construction equipment activity recognition. *Advanced Engineering Informatics*, 2019. 42: p. 100944.
- Rafiei, M.H. and H. Adeli, Novel machine-learning model for estimating construction costs considering economic variables and indexes. *Journal of construction engineering management*, 2018. 144(12): p. 04018106.
- Redmon, J. and A. Farhadi, Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*, 2018.
- Chen, L.-C., Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. in *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*. 2018.
- Akinosho, T.D., L.O. Oyedele, M. Bilal, A.O. Ajayi, M.D. Delgado, O.O. Akinade, and A.A. Ahmed, Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. *Journal of Building Engineering*, 2020. 32: p. 101827.
- Sacks, R., I. Brilakis, E. Pikas, H.S. Xie, and M. Girolami, Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 2020. 1.
- Lin, J.J. and M. Golparvar-Fard, Visual and Virtual Production Management System for Proactive Project Controls. *University of Illinois at Urbana-Champaign*, 2020.
- Gupta, S., R. Girshick, P. Arbeláez, and J. Malik. Learning Rich Features from RGB-D Images for Object Detection and Segmentation. in *European conference on computer vision*. 2014. Cham: Springer.
- Long, J., E. Shelhamer, and T. Darrell. Fully convolutional networks for semantic segmentation. in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015.
- Wang, J., Z. Wang, D. Tao, S. See, and G. Wang. Learning Common and Specific Features for RGB-D Semantic Segmentation with Deconvolutional Networks. in *European Conference on Computer Vision*. 2016. Cham: Springer.
- Hazirbas, C., L. Ma, C. Domokos, and D. Cremers. FuseNet: Incorporating Depth into Semantic Segmentation via Fusion-Based CNN Architecture. in *Asian conference on computer vision*. 2016. Cham: Springer.
- Abdulnabi, A.H., B. Shuai, Z. Zuo, L. Chau, and G. Wang, Multi-modal Recurrent Neural Networks With Information Transfer Layers for Indoor Scene Labeling. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018. 20(7): p. 1656-1671.
- Russell, B.C., A. Torralba, K.P. Murphy, and W. Freeman, LabelMe: a database and web-based tool for image annotation. *International journal of computer vision*, 2008. 77(1-3): p. 157-173.
- Schönberger, J.L., E. Zheng, J.-M. Frahm, and M. Pollefeys. Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo. in *European Conference on Computer Vision*. 2016. Springer.
- Schönberger, J.L., T. Price, T. Sattler, J.-M. Frahm, and M. Pollefeys. A vote-and-verify strategy for fast spatial verification in image retrieval. in *Asian Conference on Computer Vision*. 2016. Springer.



電腦視覺技術 於 自動化工程進度管控

林之謙／國立臺灣大學土木工程學系 助理教授

工程進度管控為維持工程如期如預算完成的基石，然而目前工地現場仍較常採用傳統人力密集方式進行，過程耗時且易產生錯誤及溝通問題，進而影響工程整體工期及成本。近年來，隨著工地中越來越大量的影像資料蒐集，BIM (Building Information Modeling) 的發展普及至 LoD 350-400，以及工地現場施工細節排程，以影像為基礎的自動化工程進度管控越來越有機會發展，而其應用範圍主要以可以分為工項及施作監測。但現今自動化進度管控方法仍未有效發揮，並受到許多限制。在工項監測上，受限之一大主因為單就幾何模擬之方法無法分析施工細節，如模板工程及水泥灌漿工項皆在相同空間進行，但為完全不同的施工進度，進度結果無法單純利用空間幾何判斷。而針對施工材料針對影像分析的方法，則通常受限於無法同時處理空間幾何特性而影響到偵測結果準確率。再者，目前所有方法均針對室外建築處理，而忽略工程中同樣重要的室內環境。在施作監測上，雖然越來越多物件、姿態辨識應用，但缺乏各種資源間的關係互動的整體系統討論。本文從檢討土木工程進度監測現況，介紹電腦視覺技術之機會，輔以其基礎技術介紹，討論其在進度監測上各面向的應用，並再以實際應用案例總結其發展前景。

前言

近年來，工地影像資料的蒐集成指數型成長，各式影像由手機、無人機、固定式攝影機、機器狗、雷射掃描儀、360 相機等各種不同載具蒐集而來，除了紀錄建築過程外，更提供了營建智慧化、自動化的基礎。為了有效應用這些數量、容量龐大的影像資料，許多研究開始運用先進電腦視覺技術進行分析，如，建立建物興建過程中的三維點雲模型，並自動透過特徵點匹配進行時間軸整理、定位所有影像。而隨著建築資訊模型 (BIM, Building Information Modeling) 的普及，其與三維點雲模型的結合，更開啟這些影像資料在工程管控、工地安全、品質管理、工程進度、生產力分析及設施維護管理的應用。

電腦視覺為跨領域的學科，主要研究如何使電腦可以解釋、了解影像資訊。而如今電腦對空間三維資訊的感知，已經越來越趨近人類所看見、了解的視界。這些技術從過去的累積，包括數位影像處理、計

算三維模型，到今天的物件偵測、辨識。這些技術也已經在我們生活周遭有所應用，如自動駕駛、停車場車牌辨識、體育賽試分析、醫學影像分析等。同樣地，在建築、土木、營建的領域中，近幾年電腦視覺應用相關研究的投入也越來越多。其中主要關注在自動化、智慧化的監控以提昇原本勞力密集、重覆性高、耗時的工作 (圖 1)。包括，透過比較現地模型與 4D BIM 的自動化工程進度監控、依工程活動分析進行生產力評估、環境安全衛生工程安全研究等。再過去五年中，電腦視覺研究也因深度學習的技術突破，更加快速地發展。而深度學習中由電腦自動分析出分類所需的特徵之特性，也提供在不同工程環境中擴大應用的可能性。這些電腦視覺技術的應用也並不僅止於研究，世界各國營建相關新創公司也在近幾年來達到高峰。然而我們必須先了解這些技術，同時針對目前營建工程中的問題進行深入討論，才能對症下藥，更有效的蒐集有意義的影像資料，應用這些先進技術。



圖 1 目前進度監測過程往往耗時，資料紀律簡略缺乏一致性，呈現及更新方式不直覺。

目前許多工程仍然面臨工期延宕、預算追加等問題。近期研究報告也指出，超過 35% 的工程，在營建過程中，會發生大型變更造成工期展延及預算問題。這些問題在巨型開發案中更為嚴重，98% 的工程有工期及預算相關問題^[1]。這些都是自動及智慧化可以改善的目標，而電腦視覺、機器學習、影像資料分析皆為可用之利器。

在本文中，我們將先從工程進度管控的角度討論目前工程界的現況、及實務根本問題，並討論影像資料在這之中所能夠扮演的角色。接下來將討論電腦視覺技術中，深度學習、運動恢復結構、BIM 與排程，如何結合並應用於工程場域，分析排程工項到實際施作階段的工程進度監控。其中將包括如何透過比較實際模型及 4D BIM 進行工程管控分析，並以實際案例及文獻加以討論，亦將針對技術及方法深入探討。

各國營建業生產力狀況

時至今日，營建工程仍然時常與工期展延、預算追加連結。相較於其他產業在過去三十年的發展，營建產業的生產力停滯不前，一來一往與製造業等的差距已有三倍之大。根據美國過去三年間，針對工商業相關建案調查指出，僅有四分之一保持原訂時程 10% 的誤差範圍，另外僅有 31% 的建案能夠保持在原訂預算的 10% 內^[2]。即使應用提昇效率之營建管理方法如精實營建，仍有 22% 及 13% 之專案有工期及預算相關問題。影響生產力的因素同時也包含了工人、機具、材料的資源的應用。研究指出工人一天內僅有 52% 的時間直接面對工作，其中更只有 34% 停留超過十分鐘，高達 50% 的時間工人並不在工作執行的區域^[3]。這些工人生產力相關問題則主要是由於，材料擺放位置及工項案排的變更所導致。即使工期、成本一直以

來皆為業主的首要重點，上述不同的因素錯綜複雜的關係仍直接或間接造成營建產業的發展瓶頸。作者透過幾項報告，及研究團隊過去十年間的觀察，總結以下生產力停滯之根本因素：(1) 缺乏溝通：排程、施工日誌等相關文件紀錄對於工程進度的不一致，造成業主、包商、下包商無法即時了解工程時程；(2) 有瑕疵的績效管理：往往因缺乏系統性方法溝通工程進度、檢討協調責任歸屬，工程問題常積累（圖 1）；(3) 無法連結實際工進：負責排程者非直接參與工程的人；(4) 缺乏風險管理：短期時程的可靠性及風險並沒有系統性的預估；以及 (5) 不即時有效的決策：決策常因對於工程進度缺乏掌握而延遲。

工地影像資料的成長及機會

現今許多消費性電子產品都已內建相機，其中在工地上常見的包括手機、平板電腦、行車記錄器、穿戴裝置、空拍機及地面機器人等。這些產品的廣泛應用也造就了現今工地影像資料指數型成長。除了營造單位每日紀錄工程問題、進度外，也常有專業攝影人員受雇於業主或營造單位，有系統性的拍攝照片及影片。這些專業攝影公司指出，在一般商業建築工程案件中（大約 70,000 sq-m），目前估算總計每天有 325,000 張工地照片由專業攝影師拍攝紀錄，95,400 張影像由工地攝影機紀錄，以及 2,000 張由營造單位自行拍攝（圖 2）。除了這 400,000 張照片外，另有 18% 的公司開始運用無人機進行拍攝，並運用雷射掃描儀^[4]。這些影像紀錄提供許多工程全生命週期的分析及自動化機會。

影像資料的應用由前期設計階段、營造到後期交接都可以見到。影像資料可以具象化的體現工程實際進行狀態，將工地、建築物、結構物的現狀直接呈現，以用來溝通、協調、規劃。在工程前期規劃工地空間

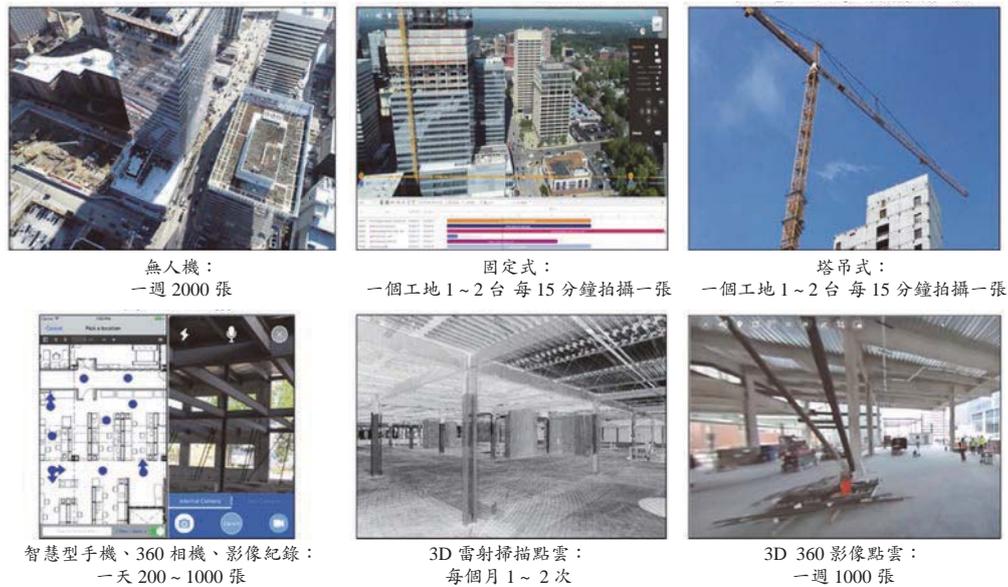


圖 2 目前工地平均影像蒐集量

佈置時，影像可以用來協助工程師研擬不同佈置方式並模擬工地車輛人員動線管理。在工程進行中，工地進度紀錄、圖資化、品質管控、環境安全檢測，皆可有效提昇溝通及管理效率。而至後期營運管理階段，除設施維護管理應用外，也可作為法律訴訟中具體事實證據。這些影像資料除建築工程外，也常應用於土木工程上，如橋樑檢測、破壞檢測、土方計算等。而近期研究中，除單純影像資料外，與 BIM 模型之結合更可相輔相成，有效提昇其設計、營造、維護管理之效率。總結影像資料主要提供：(1) 透明度：直接具體

的呈現；(2) 效率：清楚完全的資訊；(3) 可及性：容易跨平台分享；(4) 儲存性：容易儲存整理。而目前主要的應用也可以分為下列幾類：(1) 圖資化：紀錄工程進度、環境安全衛生問題、品質問題；(2) 影像分析：自動分析土方量、安全問題、進度等；(3) 檢測：在人力限制下在虛擬環境檢測；(4) 設施維護管理：影像資料提供現實狀態以區別圖紙中以過期之資料。下圖為影像資料用於設施維護管理、工地動線規劃及土方容量檢測（圖 3）。接下來將介紹目前電腦視覺技術應用影像資料分析工程進度管控之方法。



圖 3 應用影像進行進度、品質管控，也可利用影像重建點雲製作高解析度正射投影圖進行土方量測、動線規劃、等高線比對。

電腦視覺技術應用影像於工程進度管控

近幾年來，工程領域相關學界有許多電腦視覺技術的應用及發展，其中少數更擴展維新創公司，並在業界直接應用。接下來的幾個章節中，將介紹目前學界及業界，相關技術在工程進度管控中的應用，其中除了應用及實際案例外，也將提及其理論基礎。其中主要可以分為工項及施作兩方面的監測技術，工項主要討論工程中之產出即建築物、機電元件的本體監測；而施作則為工程之輸入，如人、機、料應用相關之分析。

電腦視覺技術應用於工程進度工項監測

目前工程進度管控中最直接的電腦視覺應用為實境建模 (Reality Capture)。實境建模將現實世界中的物體，如，建築物、工地、機具等，透過影像或掃描方式以三維點雲或網格 (mesh) 模型數位化呈現。透過此技術，工程師可以取代以往傳統測量方式進行快速及準確的量測及紀錄。其中以影像式三維重建及雷射掃描最為常見，而其中影像式三維重建即使用電腦視覺方式利用所蒐集的影像資料，建立數位點雲及網格模型。

工程進度工項監測主要針對構件在影像或點雲模型中之實際物理位置或空間進行電腦視覺分析，而其中工項構件位置或空間則是由排程中的工作分解架構 (Work Breakdown Structure, WBS) 取得。如，排程中「A 區域柱」可以由點雲模型中定義的區域 A，分析空間之容量以取得進度。

目前常見的兩種方法為：

1. 正射影像圖：透過建立大範圍之正射影像圖，並與 2D 圖紙、地圖疊合比較。此類型影像提供高解析度照片，但並無發進行三維空間相關分析，如面積、容量測量，亦無排程相關整合分析。
2. 三維重建點雲模型：業界目前廣泛應用無人機拍攝建立三維點雲模型，然而主要應用仍侷限於土方面積、容量之測量。其中主要原因為，大部分商用軟體皆僅支援正射影像蒐集，缺乏自動蒐集側向影像資料的方法。同時，因為沒有自動偵測有效視角的方法，點雲模型中也常見不完整或有誤差之結果。傳統之三維重建方法常產生角度及距離誤差 (圖 4)。

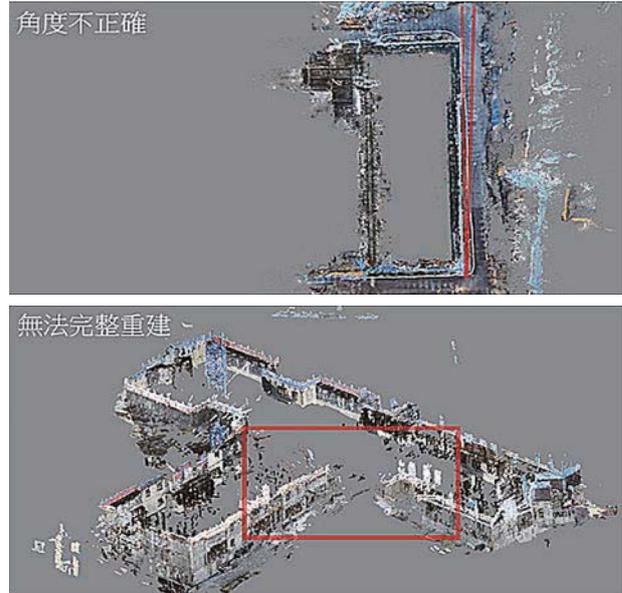


圖 4 目前三維重建點雲仍會有再大範圍影像蒐集時，仍會有角度、準確率、完整度的問題。

近期開始有相關商用軟體提供不同角度之影像蒐集方法，在研究上也有解決這些問題的方法及理論，接下來將針對這些方法的基礎及近期研究進行介紹。其中包括影像式三維重建進行介紹，以及相關延伸發展提高其準確度的方法。

影像式三維重建點雲模型

近十年來，利用影像建立三維點雲模型的技術愈趨成熟，其中主要分為兩種技術主流：(1) 傳統運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 及多視立體 (Multiview Stereo) 途徑 (SfM-MVS) 之場景重建；(2) 運用 BIM 模型作為已知資訊以限制多視立體及運動恢復結構之三維場景重構。

在運動恢復結構的過程中，演算法主要透過偵測影像中的特徵點，並透過與其他影像中的相似特徵點進行匹配，計算出三維座標點位。這之中我們將使用 SIFT 及其一與黑塞矩陣 (Hessian Matrix) 結合之變異形式進行特徵點偵測。這兩種方法皆透過位置、旋轉、大小、亮度等相關資訊進行匹配。三維座標點位則是透過 Nister's 5-point 演算法及線性轉換理論 (Direct Linear Transform) 來擷取相機的外方位、內方位、位置參數 (圖 5)，最後由隨機抽樣一致 (RANDOM SAMPLE Consensus, RANSAC) 演算法剔除錯誤的匹配。整個過程中，需要先由眾多匹配的特徵點中挑出一對擁有最高百分比正確率開始計算基礎矩陣 (Fundamental

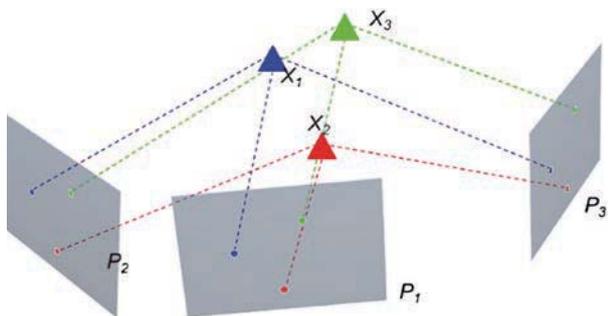


圖 5 影像三維模型重建過程，其中 X1、X2、X3 為從影像 P1、P2、P3 反投影出之三維點位。

matrix)。影像依序加入三維重建模型中，整個過程在無法加入任何三維點位後停止，其中在加入影像的過程中，我們將運用光束平差法 (Bundle Adjustment) 將影像中的反投影誤差最小化 (式 (1))。

$$\operatorname{argmin}_{\mathbb{P}, \mathbb{P}_i, t} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{u \in \text{tracks}_i} \|\text{project}(\mathbb{P}_i, X_u(t_u)) - u\| \right] \quad (1)$$

此三維重建模型過程的輸出為稀疏點雲 (Sparse Point Cloud)，為下一步多視立體的輸入。

透過傳統運動恢復結構所建立的稀疏點雲可以再由 BIM 模型之已知資訊約束最後的光束平差法過程，增加點雲的完整度以及減少誤差。此方法主要將 BIM

模型與影像事先對齊整合，如此可以將三維模型與二維影像之間的關係建立約束關係，並在加入其他影像時將相機之位置及旋轉方位更有效的計算。

在稀疏模型建立後，多視立體演算法可以將點雲密度提高，並生成三維網格模型。目前三種方法皆可在不同情況下建立高密度點雲模型，包括 PMVS [5]、MVE [6] 及 COLMAP [7,8]。這三種方法運用之技術各有不同。其中 PMVS 透過運動恢復結構過程中推算的相機模型，推估出每一點雲區塊中相對應的所有相關影像。在稀疏點雲的基礎下，PMVS 推估周圍三維點位並由相關影像填補像素顏色資料，同時也由最初區塊之匹配特徵點過濾出錯誤的資料，確保填補之三維點位及顏色正確性。MVE 不同之處在於應用各個不同影像之重疊處的深度資訊建立網格模型，並填補像素。其輸出則同時包括一全點雲模型表面網格模型。而 COLMAP 則是更進一步將像素深度及估算的法向量嵌入點雲，並以空間模型約束期影響選擇。其中多視立體由四個方向、深度及法向量迭代式的運算，並計算出最後的高密度點雲。這三個方法各適合不同場景之應用，可以在確定應用的場域決定演算法。此結果生成工程現場實際進度點雲模型。此技術之發展即可應用於工地進度監測，或是自動化機器人工地巡檢 (圖 6)。

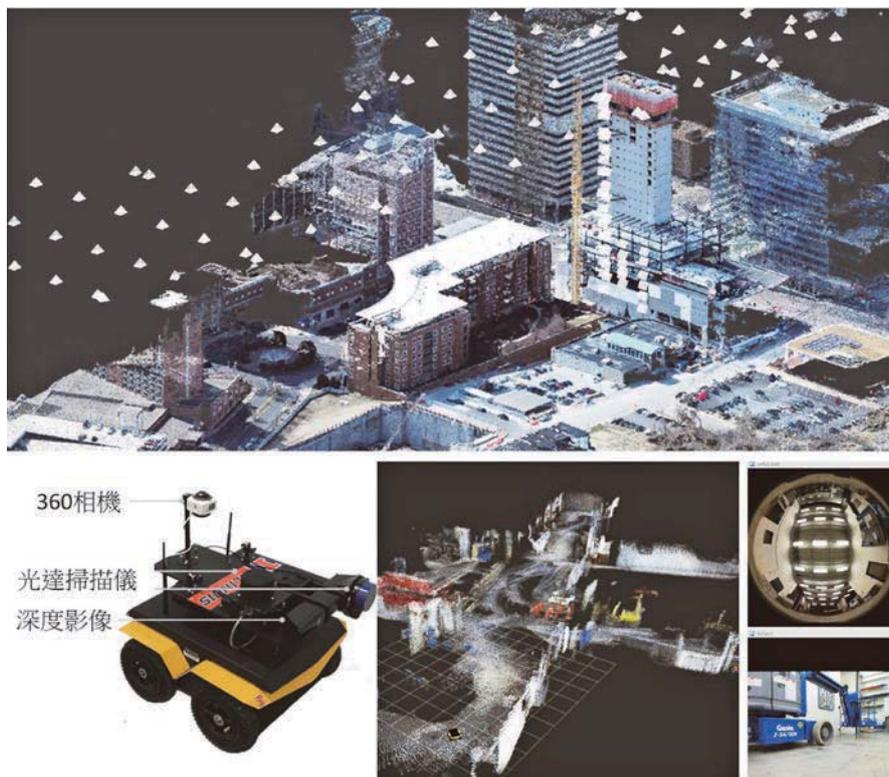


圖 6 工地影像點雲可應用無人機 [9] 或工地自動巡檢機器人 [10]

BIM 於工程進度工項監測

為直接比較點雲模型及 BIM 模型以進行進度分析，必須將點雲模型及 BIM 模型結合。由上述運動恢復結構及多視立體所建立之點雲，並無單位及空間系統。為進行有意義之比較，可以利用 BIM 模型結合點雲，並賦予點雲模型相同單位，並移位至正確空間系統中。此過程可以使用相似轉換 (Similarity Transform) 進行 (方程式 2)，此方法至少需要三個相對應的點位建立空間關係，計算出轉換矩陣。除手動方法外，亦可運用自動偵測方式進行，如圖 7 所示，運用 QR code 式之條碼，可以部設於工地中，並在 BIM 模型中標注，如此即可自動計算出對應關係。在結合後之模型資訊包括：所有工地影像資料、由影像資料建立之點雲模型、影像位置、BIM 模型 (圖 8)。

$$\sum_{i=1}^N \|d_i - \hat{s}Rm_i - \hat{T}\| \quad (2)$$

近期亦有研究針對自動比對 BIM 及點雲模型進行疊合。自動疊合的方法在營建工程中尤其困難，主因為許多建築構件樣式雷同、外觀近似、並具對稱性質，在自動疊合過程中，容易出現錯誤匹配。目前的研究仍需要建立許多先決條件^[11]，應用半自動的方法^[12]，提供對稱構件相關資訊^[13]，或者預先處理雜訊點雲模型^[14]。故目前主流方法仍以手動疊合為主，以達到點雲模型與 BIM 模型疊合後，進行進一步的進度相關分析。相關方法將在後續章節介紹。以下將針對工項施作之進度管控進行討論。

結合電腦視覺與 BIM 進行工程進度工項監測

應用上述之技術，自動化工程進度之監測之執行似乎非常直覺，可以由直接比較呈現實際進度的點雲模型與預期進度的 4D BIM 模型開始 (圖 8)。然而工程進度之自動化監測目前仍未成熟，主要肇因於下列方法之限制：(1) 當運用空間幾何分析工項施工物件是否存在於



圖 7 應用 QR Code 方式自動對應 BIM 模型及點雲模型

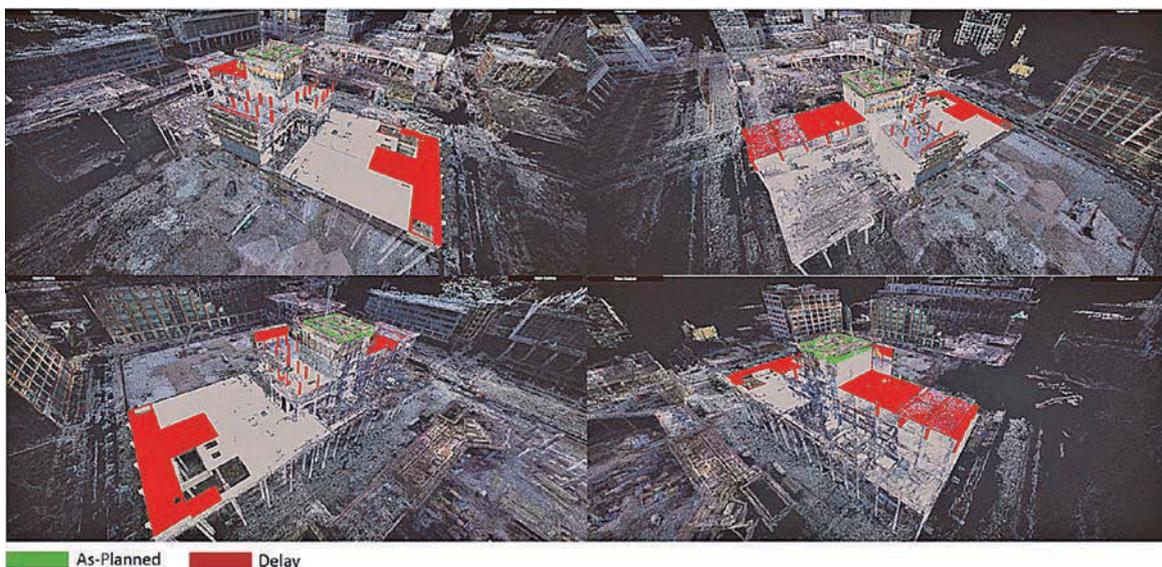


圖 8 透過結合點雲、4D BIM 模型可以分析工地之進度。

三維重建模型時，無法監測施工中針對同一物件的施作步驟細節，如拆裝模板、箍筋與灌漿；(2) 單純就施工物件之材質檢討時，影像識別往往無法涵蓋空間幾何特性。以下針對目前相關研究方法做介紹。

空間幾何分析

空間幾何分析中，Golparvar-Fard *et al.* [15,16] 將影像式點雲模型分割為三維空間單位體素 (Voxel) 與 BIM 模型比較，並就每一單位中的容量、點雲分佈、相機可識範圍、影像分割範圍等，發展出以支援向量機 (Support Vector Machine, SVM) 之監督式學習 (Supervised learning) 模型判斷物件的存在與否。另外，Bosché *et al.* [17] 則就機電模型與雷射掃描點雲模型進行比較，討論較為精細的物件進度監測方法。Turkan *et al.* [18] 進一步針對施工施作步驟細項進行空間幾何分析，並加入實獲值 (Earned Value) 以成本分析進度。這些方法仍無法完全分析施作細節以及處理遮蔽及點雲可視度的問題。

物件材質分析

為解決施工細節等空間幾何分析之限制，Han and Golparvar-Fard [19] 提出應用電腦視覺方式反投影 BIM 模型中的元件至相機影像分割出施工物件，透過這些分割影像進行材質分析達到施作細節步驟判斷，如木作材質

為模板裝設中、水泥材質為完成灌漿。其中更在後續研究中混合應用空間幾何特型及影像來分析材質，而這一系列研究中也建立了針對工程相關的材質資料庫 (圖 9)。然而由於應用範圍限制於簡單結構、資料庫的侷限性、4D BIM 模型的細節缺乏、點雲模型的可視性問題，自動化進度監測仍有很大的進步空間。

深度學習綜合分析

近期深度學習的應用也延伸至工地進度監測，其特性在於不需仰賴以往特別針對工程所設計的特徵進行學習，而由電腦自行發展相關特徵進行辨識。Braun and Borrmann [20] 透過上述反投影之機制，將 BIM 模型以 IFC (Industry Foundation Class) 格式將各物件類別反投影至相機中取得大量物件分割影像進行訓練。並同時透過 4D BIM 中各物件的相依性特質，分析排程先後順序之邏輯，最後透過 Mask-RCNN 深度學系架構判斷結構物件之進度。然而此方法仍侷限於簡單結構務之分析，Lin *et al.* [21] 則透過 360 影像、深度影像等相關特性進一步應用至營建過程中室內環境之監測，並針對材質分析進行加強，加入虛擬環境中所建立的材質以提昇整體效能。這一節所討論的主要是工項進度的監測，並沒有討論相關資源 (人、機、料) 投入，在下一節終將針對工項施作的進度監測、資源應用進行討論。

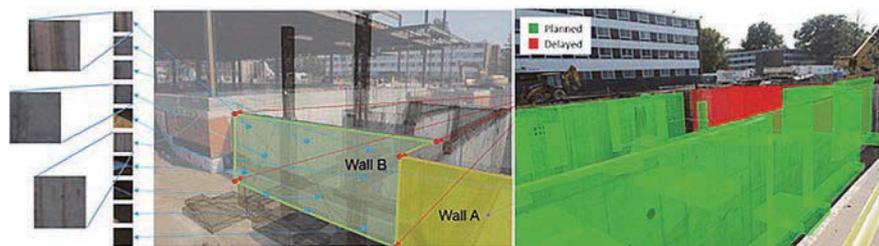


圖 9 透過反投影的方式分析障礙物、材質並分析工程進度。

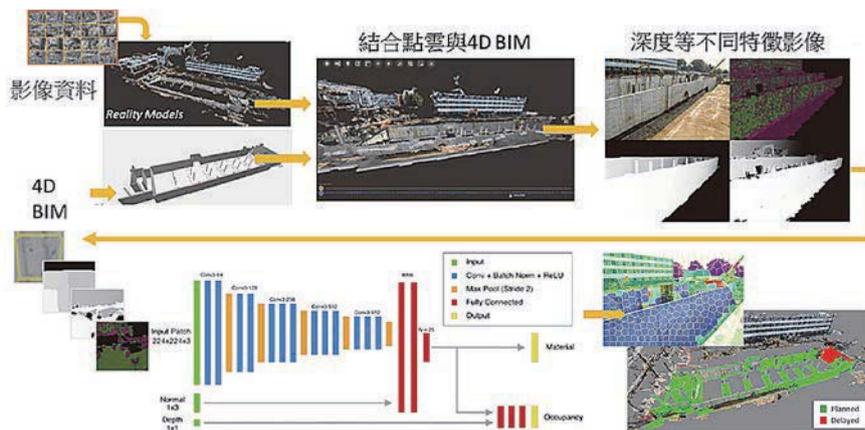


圖 10 應用深度學習分析工程進度架構 [21]

電腦視覺技術應用於工程進度工項施作監測

工項施作討論工程中輸入之進度管控及生產力分析，原來通常是藉由工地中架設的固定式攝影機拍攝影片，並由人工方式檢驗人、機、料相互關係及利用。然而，人為檢驗的過程非常耗時，常須耗費影片時間的數倍長度完成。近期研究透過電腦視覺的方式，自動化影像資料分析，以促進生產力及安全相關檢驗之效率。以下將針對其中如何運用物件偵測、追蹤、人體姿態估術追蹤資源、工項進度、工人施作方法。

物件偵測原為電腦視覺中最困難的問題之一，其難度在於物件在不同環境下的外觀、顏色、亮度、樣態甚至遮蔽都會有所不同，故使用直接與資料庫中影像比對的方式很難成功偵測。早期研究透過手工的特徵點匹配（如，Bag of words）、分割相對位置並賦予語意進行比對，均相當依賴鄰近物件及環境狀態。也因為這些特性，使得機器學習方法更加有所發揮。從應用傳統 Boosting，支援向量機到如今的捲積神經網路，物件偵測仍為電腦視覺的基礎應用。而物件追蹤則是輸入連續影像後，能夠追蹤、預測不同幀之間相同的物件。

而在工程上，工項施作進度的監測，主要由追蹤工程相關資源進行，如，偵測工人位置及姿態、工程機具運作姿態、物料擺放位置、以及各物件之間的關係等。由此可直接分析工人、機具的生產力，以及是否有相關工程安全問題。針對工程機具，過去已有針對挖土機及卡車分析土方挖掘、運送之週期^[22,23]，並用以驗證工項之生產力。另外，也有將工程機具生產力資料與點雲土方容量預測結合以預測個工項之完成時間^[24,25]。針對工人類別及姿態（圖 11），則有分析鐵工、木工等 16 種不同工項分析^[26]。同樣應用工人姿態與操作工具之相互關係也可以進行工程安全相關之分析^[27]。Tang *et al.*^[28,29] 對於工人行走軌跡進行預測並作為與工程機具安全距離之分析，同樣也可以作為分析工人分佈狀況預測以及是否與施工中的工項位置有確切連結關係（圖 12）。許多研究及商用軟體則透過熱圖方式進行分析。

案例討論

應用點雲進行工程進度管控案例在美國越來越多，在此節中將討論過去作者實際參與之專案。此專

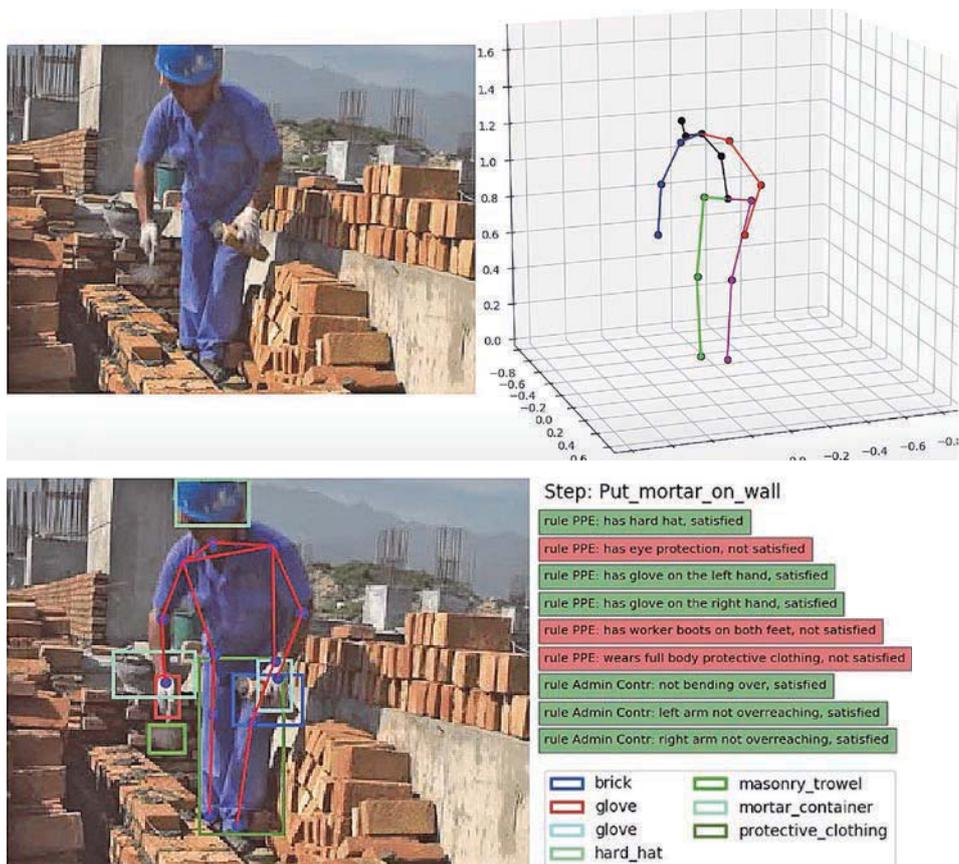


圖 11 運用深度學習偵測砌牆工人生產力及安全^[27]



圖 12 運用深度學習偵測及預測工人、機具移動方向以分析生產力及安全^[29]。

案應用點雲及 BIM 模型進行工程之溝通、協調及規劃，其中包括工程例會中各包商施工範圍動線檢討、施工進度於排程分析、工程進度紀錄、品質管理等。應用之資料包括：每週蒐集之無人機影像資料、室內 360 影像、影像建立之點雲、BIM 模型、實際施工項目排程及主專案排程（Master Schedule）、實際施工 4D BIM、施工日誌等。案例為美金五百萬之飯店及多功能運動館，在執行專案的過程中，施工團隊實際應用整個流程，從每週二工程檢討例會前的週末影像資料蒐集、建立點雲、4D BIM 更新、與點雲模型結合分析，到例會中實際應用分析結果檢討排程、動線等。施工團隊與下包商之溝通，透過點雲及 4D BIM 檢討中更有效率（圖 13）。而排程則在因在工程例會前已有所分析，在實際協調工項時，下包商更能夠直接承諾時間，並提出問題，如此在會議進行中，可以花更多時間積極解決未來的工項，而不是檢討過去的問題。總體在導入系統後工項完成率有 30% 的提昇，並在工項延誤及重複上皆有顯著提昇。



圖 13 工程例會中應用點雲、4D BIM 等檢討進度規劃排程。

結論

此論文討論電腦視覺目前在工程進度監測上的研究及產業上的應用，其中主要針對工項及施作量方面有詳細的評估及分析。目前研究所提出的方法，有些已經實際有應用及導入，如應用點雲促進規劃、動線分析、工人熱圖生產力分析；也有些則尚未完全成熟至實際應用，如自動化進度監測等。但其潛在的價值皆以在研究、產業應用、新創發展上獲得證實。在現在越來越多相關研究的產出中，仍應注意的是，以實際貼近產業中會發生的問題及資料進行驗證，才可以在未來工程實際執行中獲得與研究發表中的相同價值。同時，目前仍有許多發展之機會，如建立規模相當於電腦視覺領域中的影像資料庫。現階段研究所應用之工程影像資料庫皆有所侷限，並無針對工程影像的大規模資料庫，而其內容可包括工人安全影像、施工品質影像、施工日誌。但在營建工程中這些資料難免涉及公司名聲及內部分析資料如施工品質、排程邏輯等，這必需在產業及學界的互相合作下才能有效促成，才能最大化應用電腦視覺技術於工程之價值。

參考文獻

1. Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., Ribeirinho, Maria Joao Sridhar, M., Parsons, M., Bertram, N., and Brown, S. (2017). Reinventing construction through a productivity revolution.
2. Armstrong, G., and Gilge, C. (2017). Global Construction Survey: Make it, or break it - Reimagining governance, people and technology in the construction industry.
3. Dodge Data and Analytics. (2017). Optimizing Owner Organizations The Impact of Policies and Practices on Performance for All Building Owners. Hamilton, NJ.
4. Budiach, D. (2018). "Construction Technology Trends - 2018 Report." <<https://softwareconnect.com/construction/technology-trends-2018-report/>> (Apr. 21, 2019).

5. Furukawa, Y., and Ponce, J. (2010). "Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 32(8), 1362-1376.
6. Fuhrmann, S., Langguth, F., and Goesele, M. (2014). "MVE: A Multi-view Reconstruction Environment." *Proceedings of the Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, GCH '14, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland*, 11-18.
7. Schönberger, J. L., Zheng, E., Frahm, J.-M., and Pollefeys, M. (2016). "Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo." *Springer, Cham*, 501-518.
8. Schonberger, J. L., and Frahm, J.-M. (2016). "Structure-from-Motion Revisited." *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE*, 4104-4113.
9. Lin, J. J., and Golparvar-Fard, M. (2016). "Web-Based 4D Visual Production Models for Decentralized Work Tracking and Information Communication on Construction Sites." *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress, CRC 2016, American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 1731-1741.
10. Ibrahim, A., Sabet, A., and Golparvar-Fard, M. (2019). "BIM-driven mission planning and navigation for automatic indoor construction progress detection using robotic ground platform." 182-189.
11. Nahangi, M., Yeung, J., Haas, C. T., Walbridge, S., and West, J. (2015). "Automated assembly discrepancy feedback using 3D imaging and forward kinematics." *Automation in Construction, Elsevier*, 56, 36-46.
12. Bosché, F. (2012). "Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models." *Advanced Engineering Informatics, Elsevier*, 26(1), 90-102.
13. Son, H., Bosché, F., and Kim, C. (2015). "As-built data acquisition and its use in production monitoring and automated layout of civil infrastructure: A survey." *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 172-183.
14. Bueno, M., Bosché, F., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P. (2018). "4-Plane congruent sets for automatic registration of as-is 3D point clouds with 3D BIM models." *Automation in Construction, Elsevier*, 89, 120-134.
15. Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., and Savarese, S. (2015). "Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models." *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, 29(1), 4014025.
16. Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., and Savarese, S. (2010). "D4AR--4 Dimensional augmented reality-tools for automated remote progress tracking and support of decision-enabling tasks in the AEC/FM industry." *Proc., the 6th Int. Conf. on Innovations in AEC*.
17. Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C. T., and Haas, R. (2015). "The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components." *Automation in Construction, Elsevier*, 49, 201-213.
18. Turkan, Y., Bosché, F., Haas, C., and Haas, R. (2012). "Toward Automated Earned Value Tracking Using 3D Imaging Tools." *Journal of Construction Engineering and Management, American Society of Civil Engineers*, 139(4), 423-433.
19. Han, K. K., and Golparvar-Fard, M. (2015). "Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs." *Automation in Construction, Elsevier*, 53, 44-57.
20. Braun, A., and Borrmann, A. (2019). "Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning." *Automation in Construction, Elsevier*, 106, 102879.
21. Lin, J. J., Lee, J. Y., and Golparvar-Fard, M. (2019). "Exploring the Potential of Image-Based 3D Geometry and Appearance Reasoning for Automated Construction Progress Monitoring." *Computing in Civil Engineering*.
22. Golparvar-Fard, M., Heydarian, A., and Niebles, J. C. (2013). "Vision-based action recognition of earthmoving equipment using spatio-temporal features and support vector machine classifiers." *Advanced Engineering Informatics, Elsevier*, 27(4), 652-663.
23. Kim, J., Chi, S., and Seo, J. (2018b). "Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks." *Automation in Construction, Elsevier*, 87, 297-308.
24. Bügler, M., Borrmann, A., Ogunmakin, G., Vela, P. A., and Teizer, J. (2017). "Fusion of Photogrammetry and Video Analysis for Productivity Assessment of Earthwork Processes." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, John Wiley & Sons, Ltd (10.1111)*, 32(2), 107-123.
25. Kim, H., Bang, S., Jeong, H., Ham, Y., and Kim, H. (2018a). "Analyzing context and productivity of tunnel earthmoving processes using imaging and simulation." *Automation in Construction, Elsevier*, 92, 188-198.
26. Luo, X., Li, H., Cao, D., Yu, Y., Yang, X., and Huang, T. (2018). "Towards efficient and objective work sampling: Recognizing workers' activities in site surveillance videos with two-stream convolutional networks." *Automation in Construction, Elsevier*, 94, 360-370.
27. Dominic, R., Wilfredo, T. C., Shuai, T., and Mani, G.-F. (2020). "Vision-Based Construction Worker Activity Analysis Informed by Body Posture." *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, 34(4), 4020017.
28. Tang, S., Roberts, D., and Golparvar-Fard, M. (2020b). "Human-object interaction recognition for automatic construction site safety inspection." *Automation in Construction*, 120, 103356.
29. Tang, S., Golparvar-Fard, M., Naphade, M., and M. Gopalakrishna, M. (2020a). "Video-Based Motion Trajectory Forecasting Method for Proactive Construction Safety Monitoring Systems." *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, 34(6), 4020041. 

土木技師 國之棟樑

逢山開路，遇水架橋
高樓擎天，資源再造



 中華民國土木技師公會全國聯合會
CHINESE UNION OF PROFESSIONAL CIVIL ENGINEERS ASSOCIATIONS

理事長 洪啓德

地址：(105) 台灣台北市東興路26號9樓
Address: 9th Fl., 26, Tung-hsing Rd.,
Taipei, Taiwan 105, Republic of China
電話: 02-2748-1699
傳真: 02-2748-1038
網址: <http://www.cupcea.org.tw>
E-mail: cupcea@tpce.org.tw



利用深度學習進行訊號異常識別 之方法比較及在線識別

周肇昱／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 博士班研究生

黃謝恭／國立中興大學土木工程研究所結構工程組 助理教授

張家銘／國立臺灣大學土木工程學系 副教授

於各種民生基礎建設中，為確保結構的可靠性與安全性，常安裝有各式監測系統，以獲得相關之當前狀態。在長期的監測過程中，這些監測系統會生成大量的數據，其中亦包含許多異常訊號，最終會對結構健康監測（Structural Health Monitoring, SHM）與其應用（例如系統識別和損傷檢測）造成挑戰。因此，了解與探索結構健康監測系統之異常訊號至關重要，需研發仰賴高效自動檢測並分類異常訊號之技術。本研究嘗試、探索且比較了幾種常見的機械學習（Machine Learning）技術，結合數種不同的資料類型為輸入，訓練各式淺層和深層神經網絡，包括使用統計資訊的模式識別（Pattern Recognition，或稱圖形識別）網路、基於時間歷時的圖像式卷積神經網絡（Convolutional Neural Network, CNN）與基於圖像式時頻混合卷積神經網絡。為測試上述自動檢測與分類技術，使用中國一座大跨度斜張橋之一個月中所量測真實加速度訊號，透過不同模型訓練參數進行模型效能的相互比對。測試結果顯示，三種深度學習模型皆可以成功地檢測和分類六種不同的訊號異常。在這些方法中，經過重新訓練的 GoogleNet 能在準確性方面優於其他模型，並且可進行在線的自動化訊號異常識別，作為施行結構健康監測前檢查訊號品質不可或缺的工具。

簡介

在長期結構健康監測的應用中，監測系統通常需要感測器與監測網能自主運作的，並由量測民生基礎建設的反應有效地評估結構的損傷或狀態；然而，因監測元件老化、惡劣環境或校準錯誤等問題，訊號異常很可能經常會發生並影響結果^[1,2]。這些訊號異常通常在依據訊號繪製的圖表中，可被人工檢查出來；由於該工作高度人力仰賴，若能採用機械學習技術分析，則可直接對感測反應進行特徵繪製，並直接、自動檢討訊號之正確性。具體來說，感測器訊號異常通常分為：遺失資料（Missing）、微弱資料（Minor）、反常資料（Outlier，亦或稱突波資料，Spike）、方波資料（Square）、偏移資料（Trend）、漂移資料（Drift）、高雜訊資料（Excessive Noise）、非線性資料（Non-linearity）等。在進行結構健康監測前，必須先確保其量測數據品質並盡可能排除訊號異常的可能，以獲得較準確的結構健康結果。

訊號異常的出現可直接影響結構健康監測的結果。研究人員發現，由於感測器異常而量測得到的數據會使訊號處理（Signal Processing）失真，例如，功率譜密度（Power Spectral Density, PSD）的計算錯誤、系統識別性能下降（尤其是用於模態形狀的估計）及結構損傷檢測的指示失真^[3]。因此，開發高效的前置技術來自動檢測與分類不同類型的異常訊號，發展可靠的結構健康監測應用為當務之急。

異常訊號的處理與判別在過去已有學者進行了廣泛的研究^[4]。Chang 等人^[5]利用自迴歸（Autoregressive, AR）建模技術開發了一組 Kalman 估測器來預測感測器的輸出，計算預測與量測的反應之殘差，並應用於檢測三種類型的感測器異常，包括加性、乘性和緩慢漂移之訊號異常。另外，機械學習技術已被應用來直接對感測器故障進行分類^[6-9]，最近，Bao 等人^[10]開發了一種基於深度學習的策略，利用生物視覺和邏輯思維，將原始量測數據通過數據可視化（Data

Visualization) 進行轉換，然後憑藉深度神經網絡進一步分類，並透過一座大跨度橋樑所量測的真實數據進行驗證。Fu 等人^[3] 在無線監測系統中，探討監測訊號之異常，其中反常資料、漂移資料和偏差資料 (Bias) 是三種主要的異常類型，該研究開發了一種三階段策略，進行分佈式相似性測試 (Distributed Similarity Test) 檢測異常，並使用人工神經網絡對異常進行分類，最終應用校正函數 (Correction Function) 或使用估計值替換異常訊號來解決問題。Mao 等人^[11] 開發了生成對抗網絡 (Generative Adversarial Network)，結合無監督方法 (如自動編碼器, Autoencoder) 檢測感測器異常，減少傳統的監督式學習中標記階段所需的大量人力成本，將原始量測數據轉換為格拉姆角場 (Gramian Angular Field) 圖像，使用來自全尺寸橋樑的兩組數據集來驗證所提出的方法。這些方法都證實了機器學習於訊號異常識別的可行性以及其可有效將低使用的人力成本。然而，鮮少研究針對不同模型交互比對，且透過模型進行在線的訊號異常識別。

在本研究中，將使用三種方法來檢測和分類異常訊號，包括基於統計資訊的模式識別 (Pattern Recognition, 或稱圖形識別) 網路、基於時間歷時轉換圖的卷積神經網絡 (Convolutional Neural Network, CNN) 和圖像式時頻混合的深度神經網絡，本研究中使用的量測資料由位於中國的一座大跨度斜張橋於一個月中所量測的加速度資料來驗證上述三種方法，透過比較不同訓練參數如：輸入資料維度、訓練速率和 epoch，試圖找尋最適合訊號異常識別之模型以及探討其參數對於模型的影響。並透過準確性最高之模型進行在線識別的可行性分析。從結果得知，每種方法皆能有相

當令人滿意的識別結果，並且利用圖像式時頻混合資料進行 GoogLeNet 模型訓練有著最高的識別精度。該模型也展現其高精度的在線自動化識別能力。爾後可直接應用於實際工程案例，在進行結構健康監測前針對量測資訊進行快速的故障篩選。

訊號異常介紹

結構健康監測系統為了確保高準確性的判別結果，對於感測器量測訊號的品質有相當高的要求。在現地量測中，常常會發生異物撞擊、感測器老化、抑或訊號線損壞，導致量測訊號異常。因此，在實施結構健康監測前，進行訊號異常識別為維持高效能之監測系統首要工作。此外，訊號異常分類有助於工程師更好地了解感測器的使用狀況，並提升維修的效率。本研究中，將集合探討三種深度學習模型針對檢測與分類訊號異常之應用，模型包含：(1) 模式識別 (Pattern Recognition, 或稱圖形識別) 網路；(2) 基於時間歷時的圖像式 CNN；(3) 基於圖像式時頻混合 CNN。在以下介紹中，將簡要闡述本研究所使用的量測資料，包括訊號的種類、分佈以及如何進行資料擴增；接著，針對各模型的特徵、資料結構、輸入資料型態、訓練精度和識別結果進行進一步的討論及介紹。

本研究使用的量測資料由 IPC-SHM (International Project Competition for Structural Health Monitoring) 協會提供，針對中國一座大跨度斜張橋長期監測之加速度數據，包括 38 顆加速規之反應，其中採樣頻率為 20 Hz^[12]。圖 1 為本研究所考慮的七種訊號種類，包括正常資料、遺失資料、微弱資料、反常資料、方波資料、偏移資料、及漂移資料。在該資料中，統計各類異常訊號的數

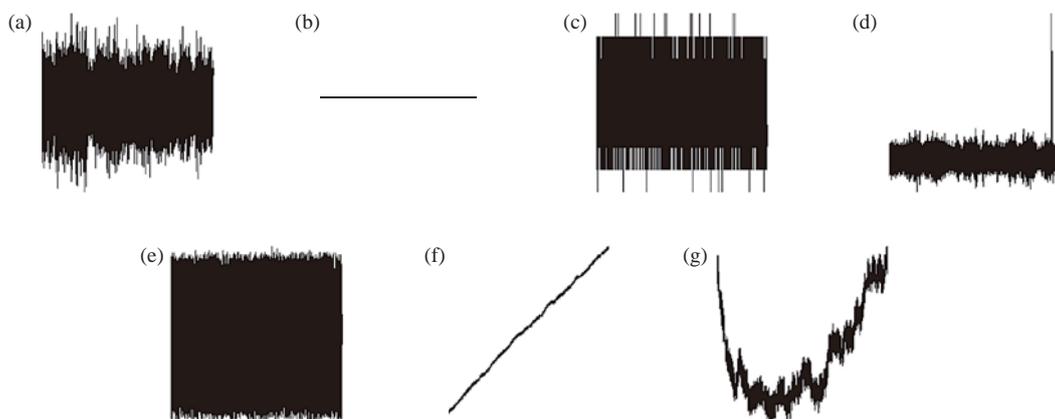


圖 1 訊號種類：(a) 正常資料，(b) 遺失資料，(c) 微弱資料，(d) 反常資料，(e) 方波資料，(f) 偏移資料，(g) 漂移資料

量得知，感測器故障的種類分佈並不平衡，如圖 2 所示，其中數量最多的大約有 12000 組（正常資料），最少則到 523 組（異常資料）。為了強調該資料庫在分佈上的不平衡性，可以以圓餅圖的形式表示，其中包含與完整資料庫相比的百分比，如圖 2(b) 所示。為了調整資料庫的不平衡以降低可能影響訓練成果的比重（例如，正常訊號的學習遠多於異常訊號的偏差學習），訓練資料庫的數量均以反常資料的總數作為基準。在訓練過程中，一些標記不明確的訊號已人工刪除，確保模型不考慮可能誤導的特徵。為了提高訓練模型的精度，且確保訊號異常標記不會因訊號翻轉而改變，因此，本研究嘗試將每小時的歷時資料進行調整，使得資料庫數量擴展為兩倍，如表 1 顯示，透過擴展後所使用訓練和驗證資料庫的數量，使得資料量能被模型有效訓練。

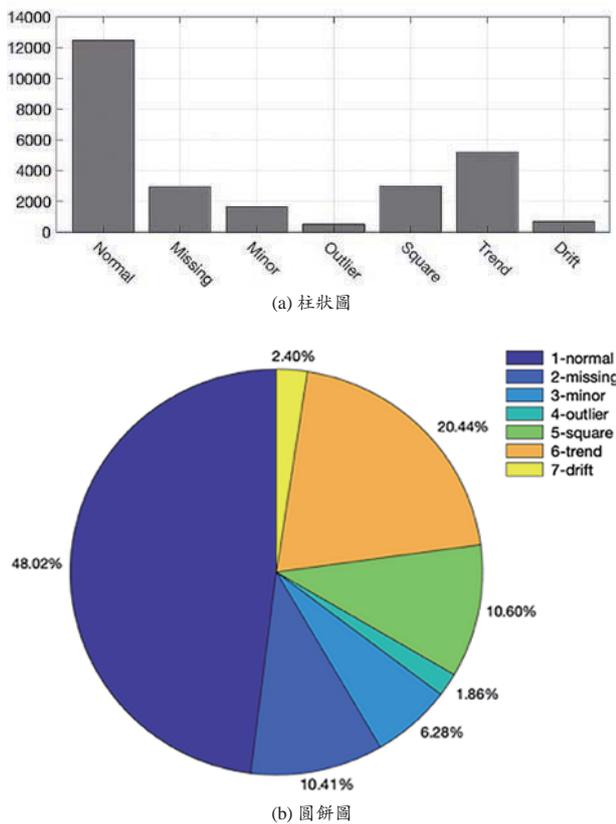


圖 2 訊號異常資料庫種類數量統計

表 1 所使用之訓練和驗證資料庫各異常種類數量

/種類	正常	遺失	微弱	反常	方波	偏移	漂移
訓練資料庫	800						
驗證資料庫	24136	5076	2512	224	5168	9506	554
總和	24936	5876	3312	1024	5968	10306	1354

深度學習模型介紹

模式識別網路

類神經網路架構

模式識別網路可用來分辨六種訊號異常，其是由多層前饋（Multi-Layer Feedforward, MLF）類神經網路進行資料訓練，根據目標標籤來對輸入資料的分類進行學習。在本研究中，透過運算而得的 64 個參數作為輸入，包含機率分佈、算術平均值、數值範圍與標準偏差。神經網路由四層組成：輸入層、輸出層以及兩層隱藏層，如圖 3 所示。四層網路的神經元皆互相連接，並以雙曲切線（Hyperbolic Tangent）作為激勵函數，透過平方誤差（Mean Squared Error, MSE）計算模型的損失。

訓練模型之初，透過 Nguyen-Widrow 初始化演算法計算各神經元的初始權重和偏差值，接著，MLF 會根據誤差與反向傳播法更新各神經元的權重和偏差值。最佳化時透過 Levenberg-Marquardt 演算法，也稱為阻尼最小平方（Damped Least-squares, DLS）演算法，來提升模型精度，並在達到最小梯度或最大自適應值時終止訓練，以期達到最佳化模型。為了避免過度擬合（Overfitting）現象，使用獨立的參考資料庫來驗證訓練結果，確保原始資料庫精度增加時亦提升參考資料庫的精度。換句話說，如果訓練模型的準確性增加，但驗證資料庫的精度反而保持不變或下降，則模型會提前終止（代表過度擬合）來保持泛用性。這種方法與曲線擬合（Curve Fitting）有著類似且皆不可避免的問題，即近似函數的自由度越高，靈活性越

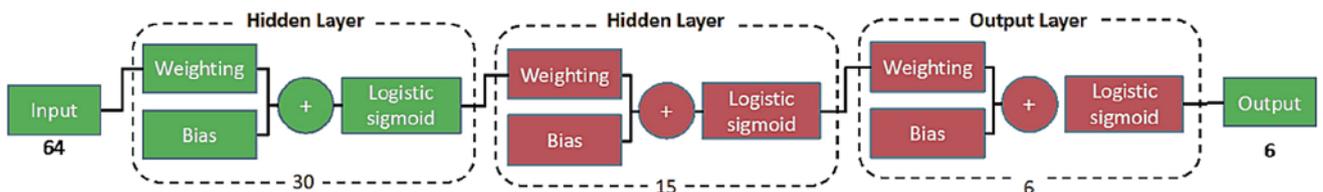


圖 3 模式識別網路架構

大，輸入數據的擬合性越強；然而，考慮到真實訊號可能受到雜訊的影響，使用較泛用的模型是有助於表現實際情況的。

輸入層

若要直接以加速度數據做為輸入，則以單一加速規採樣頻率 20 Hz 計算，一小時資料量為 72,000 筆，而本研究所使用資料包含 744 小時以及 38 顆加速規，巨大資料量無法達到快速的識別以及訓練。因此，若直接使用加速規數據，不如改採用一些統計上的參數作為輸入來降低資料維度，為了有效區分七個不同的訊號種類，本研究採用的統計參數包含機率分佈、算術平均值、數值範圍和標準偏差，如圖 4 所示。

如前所述，除了上述三個統計參數外，還採用機率分佈來區分不同的訊號異常種類，機率分佈是一種函數用來描述不同數值在整個訊號中出現的次數，在本次研究中，負兩個標準偏差與正兩個標準偏差之間的機率分布被用來訓練模型，並總共分配了 61 個部份來描述訊號，換句話說，每個部份的範圍為：

$$r_s = \frac{\sigma_x}{30} \quad (1)$$

其中 r_s 是每個部份的範圍， σ_x 是訊號的標準偏差。如圖 4 所示，不同的訊號種類表現出非常不同的機率分

佈，例如，標記為正常資料應具有常態分布，如圖 4(a) 所示，標記為偏移資料應具有類似均勻分佈，如圖 4(c) 所示，並且標記為微弱資料應具有很多呈現零的分佈（資料僅重複數個特定數字），如圖 4(b) 所示。根據上述統計參數，可以輕鬆地分類訊號種類，因此，這些統計參數用作後續神經網路的輸入。

然而，由於部分訊號異常具有獨特的特性，因此可以在模式識別網路之前就進行分類。在資料庫中，只有兩種訊號被標記為遺失資料，一個是充滿 NAN (Not A Number) 的資料，這種資料不能生成任何統計參數，但可以在訊號輸入訓練模型之前就輕易識別。另一個是具有固定值的資料，此類資料具有單調的統計參數，最重要的是，數據範圍始終為零，因此在準備輸入時也能夠輕易識別。通過佈置一些檢查邏輯，在將輸入到模式識別網路之前，可以方便地標記遺失資料，因此，由模型分類的訊號種類從七個減少到六個。

基於時間歷時的圖像式卷積神經網路

CNN 是最常見的物件分類技術之一，主要包括卷積層 (Convolution Layer)、池化層 (Pooling Layer) 和子採樣層 (Subsampling Layer)，然後是完全連接的層。這些分層旨在從圖像中提取微小特徵，並在選定的標籤中對圖像進行評分，最終對象根據所有標籤中的最佳分數進行分類。

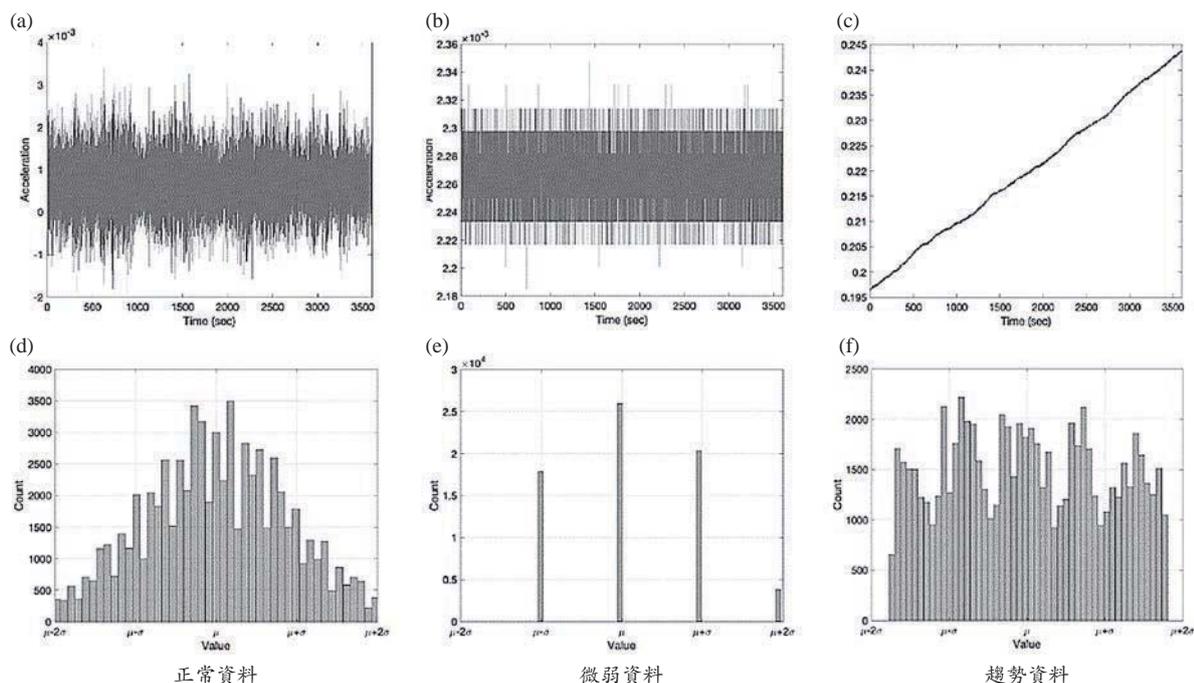


圖 4 訊號以及統計參數之比較

類神經網路架構

本研究中使用一個簡單的卷積神經網路，用於分類由異常訊號直接轉換成之圖像，以下簡稱為 CNN-1。在此模型中，圖像解析度首先被縮小為 28×28 ，以加快訓練過程，值得一提的是，圖像解析度對應之電腦運算量是相對的，解析度越高則運算時間也會增加。本模型共使用三個組合層，如圖 5 所示，每層包含一卷積層和一正規層（用以批次正規化與池化），此外，每個神經元的激勵函數採用修正線性單位（Rectified Linear Unit, ReLU）函數，在萃取圖像特徵後，模型末端包含全連接層（Fully Connected Layer）、softmax 層和分類層，以便對七種不同標籤分數進行排名。訓練過程中，每次輸入 128 張圖像做訓練，當其誤差降低至閾值，則表示模型收斂。而分數最高的標籤即為訊號異常識別的種類。

輸入層

訊號異常可透過人眼輕易識別，表示每種類型的異常在視覺上皆有獨特之處，因此，一個最簡單的想法是直接將訊號轉換為圖像，如圖 1 所示。七種類型的訊號異常首先由

$$y_{\text{normalize}} = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (2)$$

其中是正規後的訊號、是輸入歷時、和是輸入歷時中最大和最小值，在模型訓練中，正規化訊號可以消除數值大小對於模型的影響，並只捕捉訊號特徵。在正規化訊號至區間 $[-1, 1]$ 後，將轉換為圖檔作為資料庫，由於圖像的解析度對於模型訓練甚為重要，過低之解析度會造成圖像部分特徵遺失，如反常的峰值會消失。因此，在本研究中採解析度為 256×256 像素的圖像。經測試，該解析度為人工可識別訊號異常之最小解析度，並且不會造成嚴重的資料特徵遺失。

基於圖像式時頻混合卷積神經網路

為了進一步提高模型精度，本研究使用混合資訊作為輸入並建立更複雜的機器學習模型架構^[13]，嘗試利用 GoogLeNet 的模型架構進行資料的重新訓練。GoogLeNet 對於物件分類有很好的訓練成果，在 2014 年 ILSVRC (ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge) 比賽中，它針對 1000 種類型的物件進行分類獲得第一名^[14]，與 ZFnet 和 AlexNet 相比，其效能有了顯著的提升，此外，與 VGGNet 相比，它的錯誤率更低。因此，本研究利用 GoogLeNet 進行模型訓練，並通過快速的傅立業轉換，將時間歷時和頻譜進行影像的疊合。

類神經網路架構

在本研究中，首先將圖像解析度縮放為 224×224 像素，以減少電腦運算量。GoogLeNet 的架構由 22 層網路組成，包括卷積層、最大池化層、inception 層、平均池化層、線性層、softmax 層和全連接層，更詳細的模型架構建立說明可參考^[14]。為了使模型吻合資料庫，本研究將最後一個分類層和全連接層的維度替換成 1×7 ，以便單獨識別七種訊號種類，每次訓練的數量為 10 張圖片，並且初始學習速率為 0.001。為了讓訓練的資料皆使用資料庫資料，本研究未使用遷移學習 (Transfer Learning)，而是重新訓練 GoogLeNet 模型。

輸入層

為了提取更多的訊號特徵，而不僅僅是考慮訊號本身的時間歷時，本研究先是使用上一小節由式 (2) 求得的時間歷時，並將之與頻率資訊重合。其頻率反應可由^[15]

$$Spec_k = \left| \sum_{s=1}^t e^{jks} x_s \right|^2 \quad (3)$$

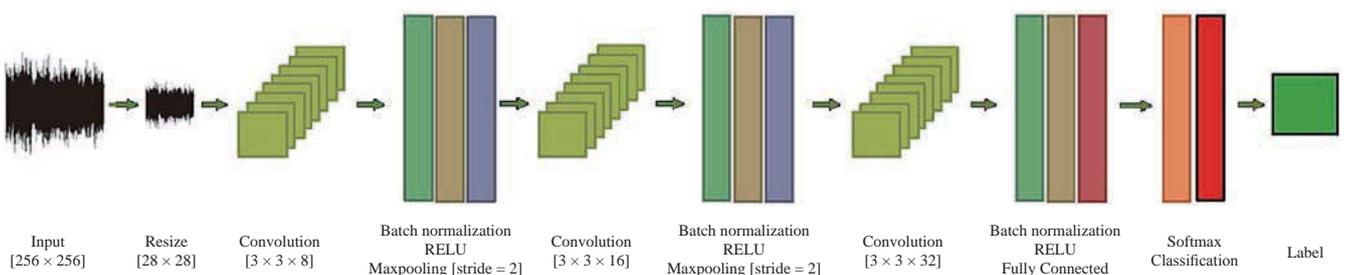


圖 5 簡單卷積神經網路模型架構

其中表示於頻率點的頻率反應，是於時間的訊號 x 。透過頻率反應轉換成熱圖 (Heat Map)，並與時間歷時的圖疊合，完成混合輸入資訊，影像解析度為 512×512 像素的圖像。值得一提的是，由於熱圖對於解析度極其敏感，因此降低解析度可能會造成圖片過於模糊而無法得到精度高的模型。圖 6 為基於七種不同訊號異常所繪製出的混合資訊輸入影像，如圖所示，可以同時在時間域及頻率域觀察到這些訊號異常的特性。

訓練模型結果與比較

為了確保資料庫中不同標籤之間的平衡性，每種標籤使用的數量為 554 筆，其中訓練的資料庫佔總資料庫的 70%，驗證資料庫佔總資料庫的 30%，圖 7(a)

顯示經過多次試訓後 MSE 的最佳結果。很明顯，在權重持續更新後，訓練資料庫和驗證資料庫的 MSE 同時減少；然而，驗證資料庫的 MSE 在 53 次迭代後開始略有增加，這意味著模型趨勢與訓練資料庫不再吻合，在經過驗證資料庫的 MSE 連續 6 次增加後停止迭代，並選擇了第 53 個迭代的結果作為訓練完成的模型。圖 7(b) 為利用該訓練完成模型計算的誤差矩陣 (Confusion Matrix)。總體而言，準確性良好，各式標籤的最低精度高達 90%，從該矩陣得知，微弱資料和反常資料相互誤判的機率較高，這是由於該兩種訊號異常的機率分佈非常相似，且透過算術平均值和標準偏差區分兩者也相對困難。

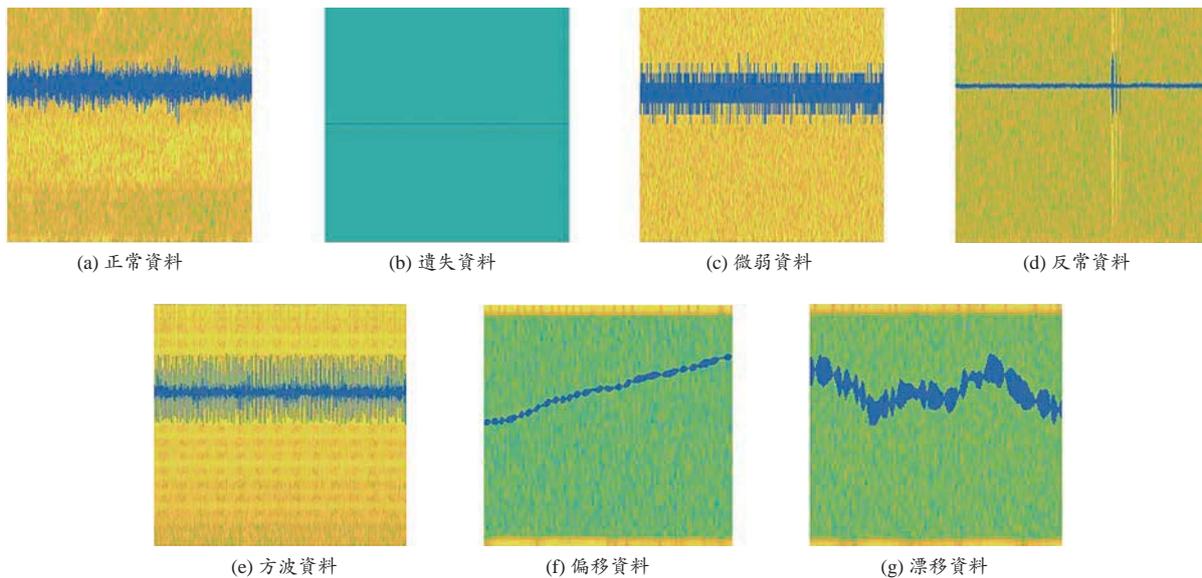
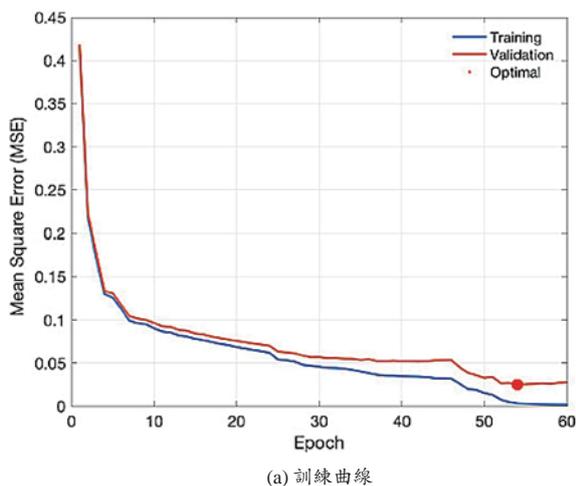


圖 6 混合資料輸入影像



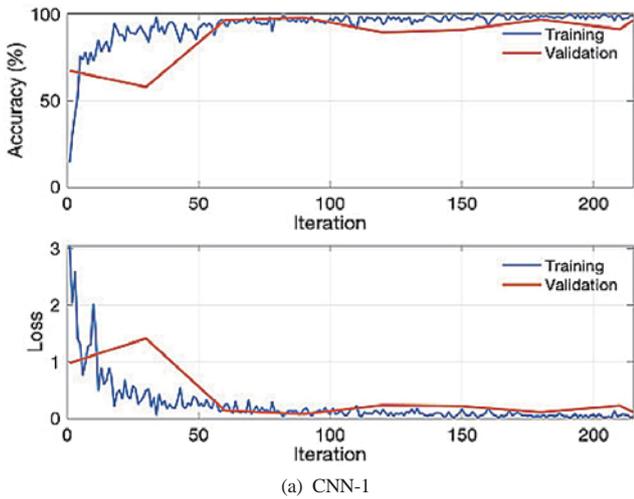
(a) 訓練曲線

	Normal	Missing	Minor	Outlier	Square	Trend	Drift
Normal	97.7%	0.0%	0.8%	1.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Missing	0.0%	100%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Minor	2.3%	0.0%	92.4%	7.6%	0.0%	0.0%	0.0%
Outlier	0.0%	0.0%	5.8%	90.7%	0.2%	0.0%	0.0%
Square	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	99.8%	0.0%	0.0%
Trend	0.0%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	100%	0.0%
Drift	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	100%

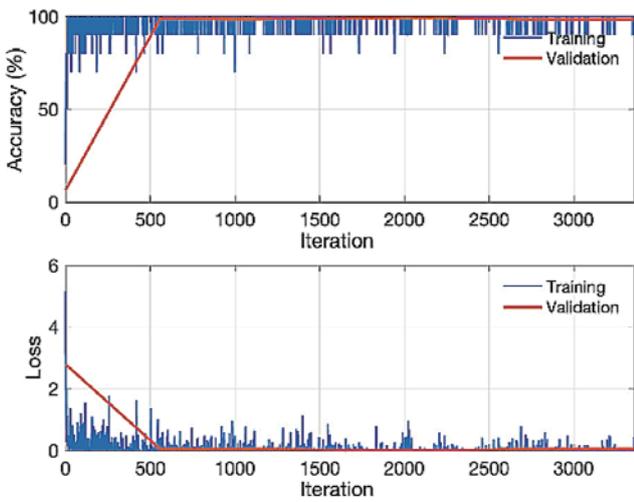
(b) 誤差矩陣 (confusion matrix)

圖 7 透過模式識別模型的訓練及驗證成果

圖 8 表示基於 CNN-1 模型和 GoogLeNet 模型的學習曲線，分別如圖 8(a) 及圖 8(b) 所示，藍線表示透過訓練資料庫進行訓練的的誤差和準確性，而紅線表示驗證資料庫的誤差和準確性，對於兩種模型，都可以觀察到誤差收斂於極低點，表示成功的找到最佳



(a) CNN-1



(b) GoogLeNet

圖 8 模型的訓練曲線

訓練模型。此外，兩模型準確度也表示模型有著非常高的識別率。

接著，調整了不同的參數（例如輸入影像解析度、epoch 和訓練速率），以獲得最佳訓練模型，表 2 為利用一小時訊號作為輸入資料對應不同參數的精準度比較，儘管每個模型的訓練時使用訓練資料庫數量不盡相同，但其使用的驗證資料庫一致。如本表所示，增加解析度對模型的準確性有良好的影響，此外，通過增加 epoch 和降低訓練速率也可以增加精度；然而，當訓練速率降低時有可能會造成模型找到局部最佳解，而無法獲得全域最佳解，此外，通過 GoogLeNet 等結構較為複雜的模型，可以更有效地捕捉每個訊號異常種類，從而產生更好的精準性。比較不同類型的訓練模型，本研究得到透過 GoogLeNet 模型進行混合資訊輸入的訓練，可獲得最佳的識別結果，其最佳的參數配置如表中紅色螢光所示。

由於一小時進行一次識別，對於即時監測系統而言無法靈活運用，因此本研究也透過輸入的一小時資料轉換為十分鐘資料，並基於該資料訓練一個可用於在線（On-line）偵測的系統的模型。基於以上述研究結論得出 GoogLeNet 模型為精度最高之模型，在線偵測系統中也採用該模型。圖 9 為該在線偵測系統所進行的識別結果，從圖中所示，每十分鐘的資料將轉換成圖片，並透過已訓練好之模型進行即時識別，不同顏色來標示其訊號異常的種類。以本圖為例，綠色表示該訊號為微弱資料，而藍色則表示為反常資料。表 3 為圖 9 識別訊號異常結果所對應的偵測時間，該識別結果充分展現了該訓練模型的準確性，以及可運用於在線系統之中，達到高精度自動化的訊號異常識別。

表 2 基於不同參數設定之模型精度

參數						訊號異常種類精度 (%)						
#	原始解析度	變更解析度	模型名稱	Epoch	訓練速率	1	2	3	4	5	6	7
1	256256	28	CNN-1	4	1e-2	97.2	99.8	77.0	89.0	99.4	84.8	99.8
2	256256	64	CNN-1	4	1e-2	95.3	99.9	91.9	86.8	99.2	94.3	93.7
3	256256	64	CNN-1	5	1e-2	97.9	99.8	93.3	93.6	99.8	98.6	99.1
4	256256	224	GoogLeNet	4	1e-3	99.6	99.7	99.6	87.7	99.9	99.5	98.0
5	256256	224	GoogLeNet	6	1e-3	98.5	99.7	99.1	97.0	99.9	97.1	100
6	256256	224	GoogLeNet	6	1e-5	97.8	100	98.9	94.9	99.4	98.1	99.6
7	651	-	模式識別	60	1e-3	99.7	100	98.1	75.0	99.5	99.0	88.2

(註:1. 正常、2. 遺失、3. 微小、4. 反常、5. 方波、6. 偏移、7. 飄移)

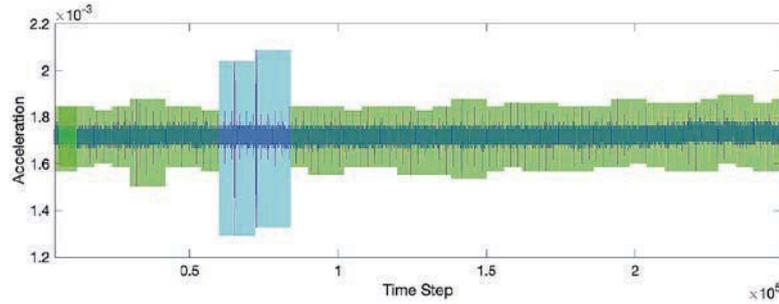


圖 9 利用資料庫進行之訊號異常識別結果

表 3 基於即時偵測系統所判別出訊號異常時間及種類

#	偵測異常時間	訊號異常種類
1	2020-01-01-00:05:00 – 2012-01-01-00:45:00	微弱資料
2	2012-01-01-00:50:00 – 2012-01-01-01:05:00	反常資料
3	2012-01-01-01:10:00 – 2012-01-01-03:20:00	微弱資料

結論

在本研究中探索並比較了幾種常見的深度學習技術，並用其來檢測與分類不同類型的異常訊號，使用位於中國的一座大跨度斜張橋之一個月中所量測的真實加速度資料，進行訓練和測試這幾種深度學習模型，包含使用訊號統計資訊的模式識別網路、基於時間歷時的圖像式卷積神經網路和基於圖像式時頻混合卷積神經網路。測試結果顯示，三種模型皆可以成功檢測和分類六種不同的訊號異常（包含遺失資料、微弱資料、反常資料、方波資料、偏移資料和漂移資料）。此外，本研究比較了三種不同類型的神經網路模型，包含模型複雜度、輸入資料類型以及模型訓練參數。由本研究顯示，透過時頻混合資料進行 GoogLeNet 模型訓練最能有效的將訊號異常分類。此外，在提高訓練圖片的解析度及訓練的 epoch 下，模型能夠有更高的識別精度。雖然降低學習速率在大部分情況能改善模型精度，但過低的學習速率會增加其找到局部解的可能，反而造成模型識別精度的衰減。同時，在大多數情況下，感測器的訊號異常種類有很大機率會再次出現在同一個感測器上，倘若能夠將該特性加入訓練，勢必能夠獲得更精確的模型。最終，本研究透過 GoogLeNet 模型針對時頻混合資料成功進行十分鐘的訊號異常識別。該識別可由加速度資料中自動地將訊號異常捕捉，並提供可視化以及異常時間資訊。從結果而知，本研究所提出之 GoogLeNet 模型能夠精準的判別訊號異常種類，並且可進行在線的自動化訊號異常識別，確保有效的結構健康監測使用數據。

參考資料

- Sharma, A.B., Golubchik, L., and Govindan, R (2010). Sensor faults: Detection methods and prevalence in real-world datasets. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 6(3), 23.
- Mahapatro, A., and Khilar, P.M (2013). Fault diagnosis in wireless sensor networks: A survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(4), 2000-2026.
- Fu, Y., Peng, C., Gomez, F., Narazaki, Y., and Spencer Jr. B.F (2019). Sensor Fault Management Techniques for Wireless Smart Sensor Networks in Structural Health Monitoring, *Structural Control and Health Monitoring*, e2362.
- Bao, Y., Chen Z., Wei, S., Xu, Y., Tang, Z., and Li, H. (2019). The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring, *Engineering*, 5, 234-242.
- Chang, C.M., Chou, J.Y., Tan, P., and Wang, L (2017). A sensor fault detection strategy for structural health monitoring systems, *Smart Structures and Systems*, 20(1), 43-52.
- Zhao, C., Sun, X., Sun, S, and Jiang, T (2011). Fault diagnosis of sensor by chaos particle swarm optimization algorithm and support vector machine, *Expert Systems with Applications* 38, 8: 9908-9912.
- Yu, C.B., Hu, J.J., Li, R., Deng, S.H., and Yang, R.M (2014). Node fault diagnosis in WSN based on RS and SVM, In 2014 International Conference on Wireless Communication and Sensor Network (pp. 153-156). IEEE.
- Dragos, K. and Smarsly, K (2016). Distributed adaptive diagnosis of sensor faults using structural response data, *Smart Materials and Structures*, 25(10), 105019.
- Smarsly, K. and Law, K.H (2014). Decentralized fault detection and isolation in wireless structural health monitoring systems using analytical redundancy, *Advances in Engineering Software*, 73, 1-10.
- Bao, Y., Tang, Z., Li, H., and Zhang, Y (2019). Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring, *Structural Health Monitoring*, 18(2), 401-421.
- Mao, J., Wang, H., and Spencer Jr, B.F (2020). Toward data anomaly detection for automated structural health monitoring: Exploiting generative adversarial nets and autoencoders. *Structural Health Monitoring*, 1475921720924601.
- Tang, Z., Chen, Z., Bao, Y., and Li, H (2018). Convolutional neural network-based data anomaly detection method using multiple information for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, e2296.
- Singla, A., Yuan, L., and Ebrahimi, T (2016). Food/Non-food image classification and food categorization using pre-trained GoogLeNet Model. *MADiMa 16: Proceedings of the 2nd International Workshop on Multimedia Assisted Dietary Management*, October 2016 Pages 3-11
- Christian, S., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., and Rabinovich, A (2015). Going deeper with convolutions, In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 1-9.
- Grchenig, K (2013). *Foundations of Time-Frequency Analysis*. Springer Science + Business Media, LLC.



影像分析方法 應用於 構造物外觀異狀 自動化偵測 之發展

張庭維／國立臺灣大學土木工程研究所結構工程組 碩士班研究生

許筠曼、吳亭諤／國立臺灣大學土木工程學系 大學部學生

許舜翔／國立臺灣大學土木工程學系 專任研究助理

張家銘／國立臺灣大學土木工程學系 副教授

構造物外觀異狀自動化偵測為結構檢測之重要發展方向，結構巡檢通常需花費大量的人力與時間對資料進行判釋，為降低巡檢所花費之資源，目前工程領域積極發展自動化偵測技術，而影像分析方法為其中重要的研究方向，利用影像分析來快速且客觀地得到檢測結果。於本篇文章中將介紹影像分析方法於於結構外觀檢測，以及應用人工智慧影像分割於構造物外觀異狀偵測之案例。人工智慧能夠快速有效的進行構造物外觀異狀偵測，藉由經人工標註後的影像資料，深度學習模型能夠針對欲辨識之類別的特徵進行學習，配合不同的資料組合以及模型微調方式，能夠處理困難的檢測任務。在本文我們利用實際訓練深度學習模型，進行隧道裂縫以及橋梁之異狀檢測任務，探討模型於不同檢測任務所需採取的技巧以及資料集的微調方針，進而分析人工智慧於構造物外觀異狀自動化偵測之成果，以及實務上較佳的模型訓練方式，並歸納提出目前發展的潛力與挑戰。

介紹

影像分析方法為結構檢測中的一個重要研究方向，利用影像資料檢測構造物異狀，本文將介紹異狀偵測於目前結構檢測上的重要性，以法規中橋梁檢測方法做舉例，並介紹影像分析方法於結構檢測之優勢。本文亦針對純粹影像分析方法及人工智慧影像分析方法做介紹，分析各自的優勢及限制。

異狀偵測於結構檢測

裂縫、破損等構造物外觀異狀為結構安全的重要指標之一，藉由分析構造物外觀異狀之樣態，能夠初步評估構造物的安全性。結構之安全性監測建立在各項安全性指標的觀測，其所需觀測項目於法規皆有明確規範，

如《公路橋梁檢測及補強規範》中明定公路橋梁於定期檢測所需觀測項目，如橋面版、橋墩等，並規範特定的檢測方式，以及其損壞評估指標。以橋梁目視檢測為例，規範中明訂檢測方法以及其評分標準，根據規範即可評估各個橋梁構件的 DERU 值，將外觀上可視的裂縫、破損經規範中的量表給予客觀之評分，求出橋梁的總體評分，進而評估橋梁的安全是否無虞。

異狀偵測為非破壞性檢測的重要方法^[1-2]，構造物的外觀因經年劣化或是外力破壞而發展出裂縫、破損，導致部件發生非預期的變形或破壞，對構造物安全造成疑慮，為了確保結構的安全性，必須定期進行檢測作業。異狀偵測不需精密儀器，以相機等輕型影像蒐集儀器即能運作，也能夠針對不同的檢測任務擴

充發展設備以及偵測方式，異狀自動化偵測技術於結構健康檢測上為極具發展潛力之研究方向，隨著未來硬體及運算資源之整合，能夠輔助巡檢系統，增進行效率與準確度。

影像分析方法於結構外觀異狀辨識

結構外觀異狀偵測為辨識構造物劣化於影像中的特徵，來定位其外觀上所呈現的異狀。在過去的研究中，影像分析方法應用於異狀檢測被廣泛研究^[3-4]，以裂縫為例，由於裂縫於影像中的成像具備一定的特徵，可以藉由特定的影像濾波器來擷取影像中屬於裂縫的像素。

影像分析應用於結構外觀異狀辨識有多種方式，在前人的研究中，常見的為基於影像梯度的分析方法，在構造物的外觀影像上，由於裂縫的梯度變化較大，能夠經由影像處理方法萃取其特徵，再處理其鄰近像素使影像中的裂縫特徵得以被完整識別。Adhikari 等人^[5]利用裂縫於影像中呈現線型的特徵，以影像形態學、霍夫變換等一系列的影像處理程序，並結合影像後處理方法，於橋梁試體影像中，識別出混凝土表面的裂縫，並對其進行尺寸的測量。Salman 等人^[6]則是利用 Gabor 濾波器針對路面影像進行裂縫辨識，其使用的影像資料為單一材質的路面影像，Salman 等人以多層的濾波器輔以不同的閾值對影像進行處理，最後輸出裂縫的二元值影像。

影像分析方法應用於結構外觀異狀辨識，能夠針對特定檢測任務進行辨識，以往大多數的研究都是處理近照的影像資料，針對具有複雜背景的影像多需人工將背景去除，或是利用其他演算法擷取目標材質，大多數的研究並未同時進行消除背景以及辨識異狀之複合研究，為目前純粹影像分析方法之限制。

人工智慧應用於結構外觀異狀辨識

結構安全性可經由外觀異狀作為判斷依據，例如裂縫、壁癌、鋼筋外露等常見的外觀異狀，根據不同異狀的分布、位置及大小，進行不同的後續補強程序，因此辨識這些外觀異狀為檢測結構安全性不可或缺的一環，但目前實務上檢測方式多為拍攝影像後，再經由工程師人工標註異狀區域，此程序費時且需要大量的人力成本，因此基於深度學習影像辨識的外觀異狀檢測方式近年來被廣為研究，根據不同的工程問

題，訓練出合適的深度學習模型，經由模型去辨識結構外觀異狀，除了可大幅降低時間及人力成本，也能大幅降低人為的判釋誤差。

運用不同的深度學習模型可以針對不同工程情況解決問題，常見的作法為利用開源深度學習模型，並以自定義的資料集進行訓練，如 Chai 等人^[7]訓練 Faster R-CNN 模型以辨識鋼鐵及混凝土上的裂縫，又或是自行串建模型以達到辨識的效果，如 Zhang 等人^[8]設計同樣基於卷積運算的模型 - CrackNet，主要目標為辨識出瀝青鋪面上的裂縫，上述兩者皆可達到相當的分割準確度。隨著人工智慧方法的演進，模型高效且準確的辨識成效，將有機會於未來改變目前經由人工判釋結構異狀的方式，而如何提升判釋的精確度與模型的泛化性，同時整合至實務操作的標準流程，則是未來產學界應努力的方向。

本文將從人工智慧應用於結構外觀異狀檢測著手，介紹影像分割模型的種類以及其各自的特色，並且說明研究中實際被應用的模型訓練技巧，最後以隧道裂縫檢測以及橋梁劣化檢測此兩個實際案例，探討模型的檢測成果以及其限制。

人工智慧模型

影像辨識為人工智慧之主要研究領域之一，而依據其架構，又能更細分為多項不同技術，本文將介紹常用於異狀偵測之不同影像分割模型，介紹其偵測方式以及特色，並簡介相關模型微調之方法，以及微調方法對模型造成之影響。

影像分割模型

卷積神經網絡 (Convolutional Neural Network, CNN)，為深度學習應用於影像辨識中最被廣泛使用的模型架構，也是現今許多影像辨識模型的延伸基礎。CNN 模型在影像辨識上，藉由卷積運算提取保留重要影像特徵，並以梯度傳播更新模型權重，使模型具良好特徵提取能力，能夠有效完成影像辨識之任務。根據不同影像辨識任務，須採不同影像分割 (Image Segmentation) 技術，依照不同規則將圖片像素分成若干部分，並標記其類別，以下將介紹三種影像分割方式 - 語義分割、實例分割、全景分割。

語義分割 (Semantic Segmentation)：為像素級的圖像處理方法，將圖片中每一個像素標註為某一類別，可以識別物件存在的範圍，但無法區別同一類別的不同個體，見圖 1(b)。

實例分割 (Instance Segmentation)：先利用目標檢測 (Object Detection) 獲得目標物件框，再於框內分割出目標位置，目標種類採目標檢測之結果。此影像分割方式相較於語義分割，可標註出圖上同一類別之不同個體，見圖 1(c)。

全景分割 (Panoptic Segmentation)：為語義分割與實例分割之結合，將圖像中每個像素分配給一個語義標籤和一個實例編號，其中語義標籤為物體類別，實例編號為同類物體對應的不同編號。目前分割任務依照不可數目標和可數目標進行單獨分割。此方式與實例分割相比，由於全景分割要求每個像素只能有一個類別和一個編號，因此不能出現實例分割中的重疊現象，見圖 1(d)。

不同的影像分割方式著重的特色不盡相同，語義分割較注重「類別之間的區分」，而實例分割更注重「個體之間的區別」，而全景分割則是「圖像整體分類區別」，對於不同影像辨識目的，應採取影像分割方式也不同，方能凸顯辨識任務之重點，使模型訓練能符合預期成果。

模型訓練方針

深度學習中，有許多微調技巧被應用於模型訓練過程，以改善模型的辨識能力，而本文將針對研究中實際

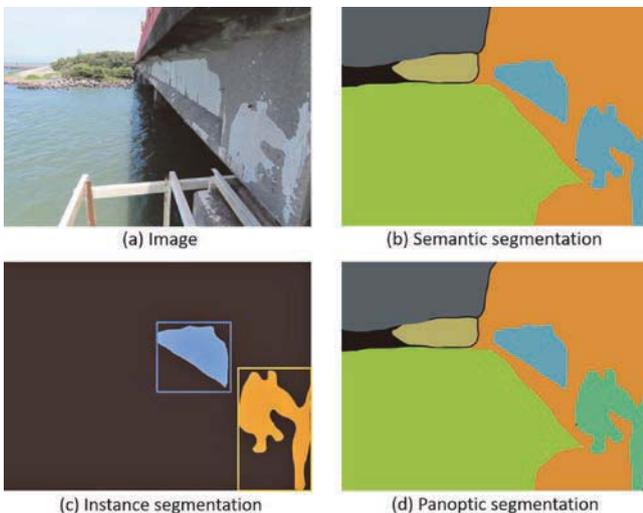


圖 1 影像分割方式^[9]

使用的訓練技巧進行解說，介紹其目的以及操作手法，包含針對資料集進行之調整以及模型權重之調整等。

資料前處理

資料獲取不易，資料品質常參差不齊，因此資料的前處理相當重要，例如影像的大小不一，但由於每個模型輸入層所能處理的維度固定，因此訓練前大多需要進行尺寸調整，通常利用裁切或縮放來滿足模型輸入層可處理之維度大小。再者，為確保梯度能穩定反向傳播，普遍作法為對像素資訊進行標準化，而常用的標準化手法為 Z 分數標準化。

資料增強

資料增強主要功能包含「彌補資料不足」和「避免過擬合」。為訓練一準確性高、泛化性佳的模型，除模型架構外，最關鍵的就是資料，然而要蒐集大量、完整資料費時又不易達成，透過資料增強可彌補資料之不足，而適當的圖像增強也能降低模型過擬合之可能性，為幫助模型訓練常見的手段。資料增強即是在既有的資料集中去產生新的資料供模型學習，經過增強後的影像對於模型而言都是新的樣本，其中資料增強常見的方法包含翻轉、旋轉、裁切、高斯模糊、飽和度及亮度調整等，透過增加資料的多元性，避免模型過擬合，以提高辨識精度。

超參數調整

深度學習中，模型參數會隨著訓練過程尋找最佳解，而不同於模型參數，超參數為人為自訂且影響模型訓練方式，例如訓練時的學習率 (Learning Rate)、批次數量 (Batch Size) 都是常見的超參數，學習率為反向傳播時應修改值的折減係數、批次數量則為每次輸入模型進行訓練的影像張數。模型超參數會對於模型的收斂效果產生影響，大多只能透過試誤法或經驗來尋找最適合的超參數組合，在訓練的過程中觀察損失函數變化，也能做為調整超參數的依據。

遷移式學習

為實現不同的辨識目標，訓練過程中常會遇到資料不足的困境，若原來模型複雜度相對太高時，容易產生過擬合的現象，為解決此問題，在建立模型時，僅改變最後的輸出層，並在模型主要提取特徵的結構

中，載入其他人利用公開資料集訓練的模型權重，作為初始值再對模型進行訓練，得到更為泛用的模型，減少過擬合發生的機會。

人工智慧模型於結構檢測

人工智慧模型能夠針對不同的檢測任務進行構造物外觀異狀檢測，利用影像蒐集設備蒐集構造物影像，經訓練後產出之模型，能夠應用於辨識出不同構造物之外觀異狀。本文著重隧道裂縫以及橋梁劣化進行實際案例探討，實作模型於不同檢測任務上的辨識成果，並針對辨識結果進行討論，並且探討模型微調方針對於辨識成果之改善。

模型應用於隧道裂縫檢測

裂縫為隧道安全的重要指標之一，若能在隧道生命週期內定期檢測，將能及早發現隧道的潛在風險，並對其進行改善，進而避免潛在的危害以及消除對安全的疑慮，本文實作由 Google 開發之開源 Deeplabv3+ 以及 Facebook 開發之以 Detectron2 部署之 Mask R-CNN 模型，進行隧道影像之裂縫辨識，Deeplabv3+^[10] 屬於語義分割模型，能夠針對影像各個像素進行分類，Mask R-CNN^[11] 屬於實例分割模型，相對於語義分割，實例分割能夠區分同一類別之不同個體。

本文使用之裂縫影像資料來源分兩部份其一為雷射掃描之點雲產製而成之隧道襯砌灰階影像，另一為過往研究者之公開裂縫影像資料，公開資料集的影像包含了混凝土表面、路面等資料，加入不同於目標隧道之影像，除了可以增加模型之泛用性之外，也可避免模型於訓練過程中發生過度擬合之情形，資料經由裁剪後，進行人工標註影像中的裂縫像素後作為訓練及驗證資料，組成之資料集即可用以訓練與驗證模型。標註後的影像裁剪成固定尺寸後，輸入所試驗的

兩種深度學習模型進行訓練，並調整適當的模型超參數。對於模型訓練過程進行調整，並以驗證資料集驗證模型的辨識成果，流程如圖 2。研究中使用之資料集由公開資料以及目標隧道之影像資料組成，於研究中測試了不同資料集組成對於模型辨識效果之影響，藉由調整公開資料集以及檢測目標之影像比例，驗證模型於不同訓練資料的辨識能力，資料集名稱及詳細內容見表 1，分為三種資料集，分別測試完全由公開資料組成之模型，以及加入 43 張以及 73 張之目標隧道影像之模型。

研究使用的深度學習模型為 Deeplabv3+、Mask R-CNN 兩種，將經過人工標註過的影像進行影像前處理後匯入深度學習模型內進行訓練，並經由模型於 Intersection-over-Union (IoU) 的表現，評估裂縫辨識的好壞，IoU 的計算如下所示。

$$IoU = \frac{(x \cap y)}{(x \cup y)}$$

由於一個模型可能辨識多種類別，因此在深度學習上以 mIoU 作為指標，mIoU 即為各類別之 IoU 之平均，以裂縫辨識為例，mIoU 為裂縫與背景之 IoU 的平均。各模型之 mIoU 見表 2，辨識輸出影像見圖 3。

表 1 資料集名稱和內容介紹

資料集名稱	資料集組成
10k	即完全由公開資料集組成，包括路面等不同構造物的裂縫特徵，由 90 張隧道影像作驗證，不經過資料增強
CC183	由公開資料集挑選出的 140 張影像，結合目標隧道影像資料集中的 43 張影像而組成，僅由剩下的 47 張作驗證，訓練資料再經過資料增強處理擴大張數
CC213	同 CC183，惟放入目標隧道影像資料集中的 73 張隧道影像，僅由剩下的 17 張作驗證，訓練資料再經過資料增強處理擴大張數

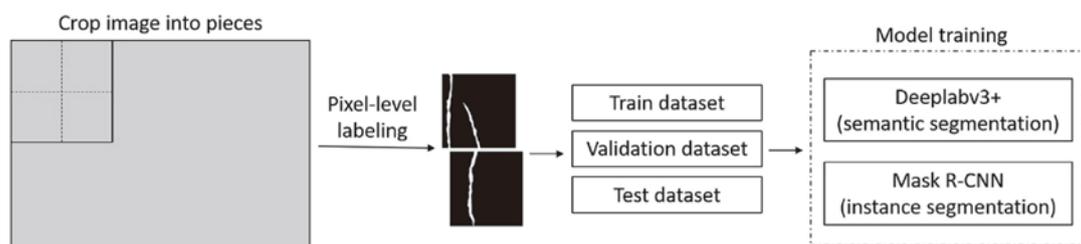
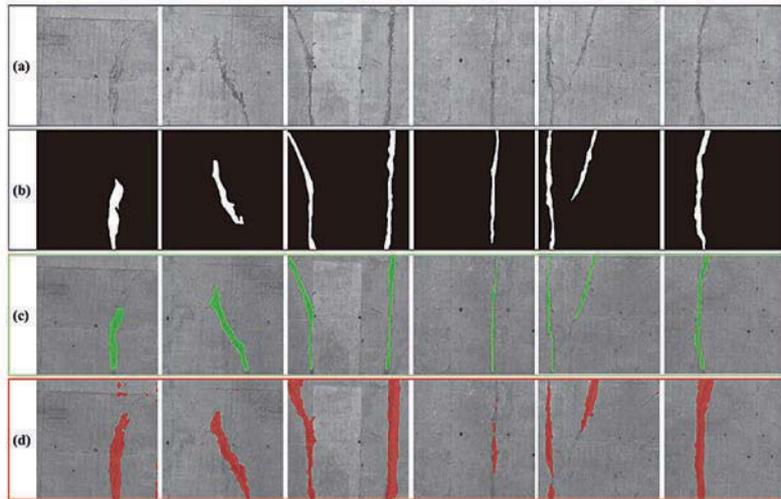


圖 2 隧道裂縫試驗步驟示意圖



(a) 原始資料截圖、(b) 遮罩標註、(c) Mask R-CNN 辨識結果、(d) Deeplabv3+ 辨識結果

圖 3 模型於驗證資料之裂縫辨識成果

表 2 Deeplabv3+ 以及 Mask R-CNN 模型 mIoU

資料集	Mask R-CNN			Deeplabv3+		
	10k	CC183	CC213	10k	CC183	CC213
mIoU	0.5537	0.7135	0.7426	0.4917	0.6602	0.6719

由試驗結果得知 Mask R-CNN 之模型辨識結果優於 Deeplabv3+，推論其原因為 Mask R-CNN 屬於實例分割模型，是基於物件框的結果，再生成物件遮罩，因此針對影像占比極小之裂縫，具有較佳的辨識能力。而在加入較多目標隧道影像之資料集的深度學習模型，裂縫辨識效果較佳，模型最高之 mIoU 可達 0.74，表示加入較多目標影像資料集可以使模型對於隧道的學習成果較佳。

於本文中，除了針對單一目標隧道，亦進行了對不同隧道之影像辨識研究，依深度學習模型訓練原

理，資料集主導了模型的辨識能力，若以未加入不同檢測目標影像之資料集訓練出的模型，將難以完成不同之檢測任務，但僅以該目標影像訓練之模型，雖能夠達成特定辨識任務，但其可能為資料量不足之模型過擬和結果，模型的偵測能力泛用性不足，考量實務需求，研究中將少量其他隧道影像加入資料集中，使模型也能學習到其他隧道之特徵，即能夠達成不錯的辨識成效，見圖 4，此方式能夠避免重新標註大量資料的時間、勞力，也能夠使模型掌握裂縫泛化特徵的辨識能力，若要進一步提高模型於特定目標的辨識準確度，則增加該目標之標註資料即可強化模型辨識能力。

模型應用於橋梁劣化檢測

人工目視巡檢為目前橋梁檢測之最主要採行之方式，傳統的巡檢方式仰賴於工程師專業判釋，由於受

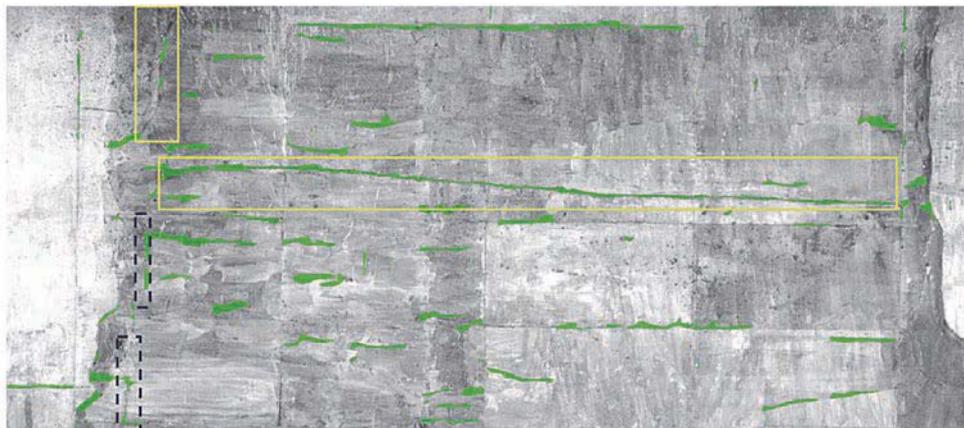


圖 4 另一隧道之模型辨識結果

主觀判斷影響，不同工程師對於同樣建物的填表結果會有所差異，且需會花費大量時間，而傳統人工巡檢過程亦伴隨風險，為檢視特定構件，可能需利用繩索攀附其上，對巡檢人員之人身安危造成風險。人工智慧模型可以針對橋梁影像進行辨識，識別出橋梁的劣化樣態，能夠較全面的對劣化情形進行辨識，而利用無人機等影像蒐集工具也能夠安全的對橋梁影像資料進行收集。

本案例之影像資料包含兩部分，實際橋梁巡檢之劣化樣態影像以及無人機拍攝之橋梁側面影像，針對橋梁之劣化樣態進行辨識，將標註而得之資料組成訓練及驗證資料集，匯入模型進行訓練，並以試誤法調整模型之超參數，最佳化模型的辨識能力。試驗流程見圖 5。

本研究中的辨識目標為多種橋梁劣化樣態，為了能夠將每個劣化樣態清楚分割，研究採用 Mask R-CNN 模型，Mask R-CNN 模型為實例分割模型，相對語義分割及全景分割模型，能夠處理辨識物件重疊現象，能夠得到各別劣化物件的辨識結果，利於後續的分析進行。

於此案例中，檢測類別分為裂縫、噴漿剝落、混凝土破損、鋼筋外露等四類，資料經像素級標註後，組成資料集進行訓練，辨識成果見圖 6 至圖 8。由於該模型資料集中包含橋梁巡檢影像以及無人機拍攝影像，因此能夠學習到兩種資料集之特徵，於兩種類型之測試影像皆能有相當的辨識能力。相較於上一章對隧道裂縫此單一類別的預測，在此多類別辨識的案例中，特徵相近的類別模型有較高機率分類錯誤，其物件框的信心值也可能較低，以噴漿剝落及混凝土破損為例，兩者特徵較為相近，因此分類結果也發生不少誤判情形。

本文測試的模型辨識成果，大多數的劣化都能夠被成功辨識，而研究過程中，也發現影像占比極低的裂縫類別其辨識成果最差，於橋梁巡檢資料中，由於影像資料屬於近照，因此模型尚能辨識出裂縫位置並生成物件框，但 Mask R-CNN 的遮罩可能無法完整涵蓋裂縫像素，而針對無人機之影像，由於影像中裂縫的占比更為低，因此辨識成果較差。

於橋梁檢測案例中，整體而言，Mask R-CNN 具有

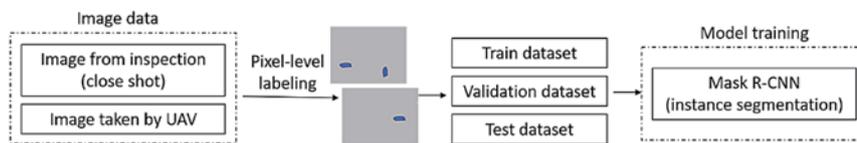


圖 5 橋梁異狀檢測試驗步驟示意圖



圖 6 模型於橋梁巡檢劣化樣態影像辨識結果

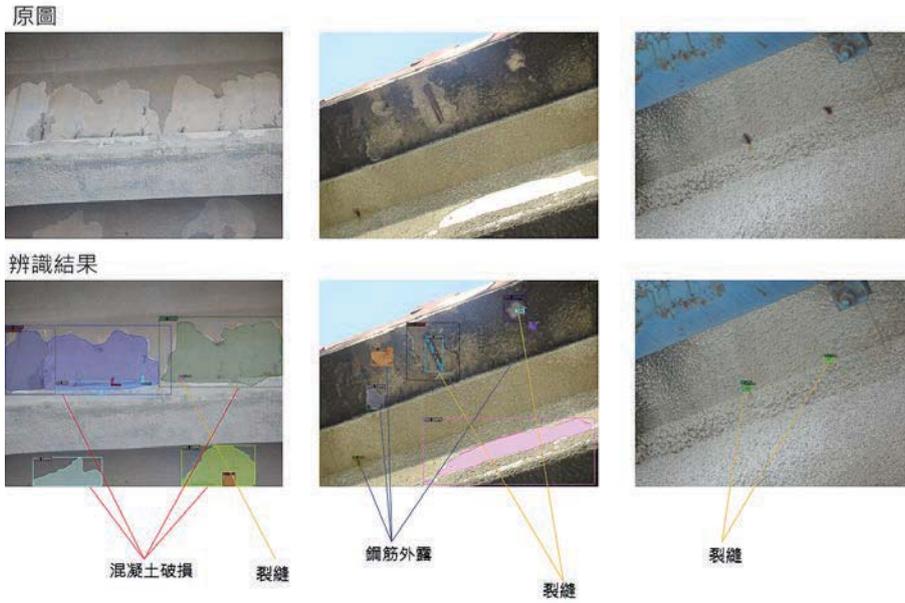


圖 7 模型於橋梁巡檢劣化樣態影像辨識結果



圖 8 模型於無人機拍攝影像辨識結果

良好的辨識能力，針對噴漿剝落以及混凝土破損此較大面積之類別，辨識效果最佳。模型之辨識能力與辨識目標之特徵相關，相近特徵的類別，則偶有誤判以及辨識之信心值相對較低。辨識目標之影像占比也影響模型辨識成果，影像占比極低之裂縫類別需特別進行模型微調，處理裂縫類別影像占比最直觀之方式為將輸入影像裁剪，並增加含裂縫影像進行模型微調，依實驗結果，此微調方式可使模型改善學習裂縫特徵之成效，並增進辨識能力，模型影像辨識成果見圖 9。



圖 9 裁剪影像之模型辨識成果

人工智慧於結構檢測之挑戰及展望

基於影像分析的人工智慧模型辨識成果會受限於影像資料的品質，若是以較低解析度的影像進行分析，會影響模型的分析成果，同時低解析度的影像也可能無法完整記錄部分構造物異狀，過於細小的異狀將無法被辨識，針對不同的檢測任務需搭配相對應的影像蒐集硬體。

於實際案例分析中，研究發現資料集之特性會強烈影響模型的辨識成果，以隧道裂縫檢測為例，以 A 隧道影像資料訓練之模型無法直接套用於 B 隧道案例上，但藉由將少量 B 隧道影像加入訓練資料集對模型微調，即得以運用於 B 隧道案例上，依文獻回顧與試驗結果分析，目前若要訓練單一人工智慧模型使用於不同的檢測案例是非常困難的事情，較可行的方式為針對不同的檢測目標，在既有的模型上加入部分檢測目標的資料，深度學習模型即可學習到該檢測目標的特徵，使其能夠應用於不同的檢測目標，可以減少為訓練泛用模型所需的龐大資料，也能使模型能於檢測目標上達到最佳成果。

目前人工智慧應用於結構檢測能夠達到約七成的準確率，針對不同的檢測任務以及欲判釋之異狀類別，準確率也有所不同，針對像是裂縫此類影像像素占比極小的類別，辨識效果較差，而影像特徵相似的類別則是可能有誤判的發生。人工智慧模型具備應用於構造物外觀異狀初步快速檢測之發展潛力，目前的辨識準確度已足以應用於異狀檢測上，但模型泛用性仍受限於案例本身資料特性，由於訓練資料主導了模型的辨識能力，因此為滿足實務上準確性的要求，還是需藉由半自動的調整過程，透過加入少量目標案例資料來微調模型權重的方式，使其能夠套用於不同檢測任務，此外，由於影像分割模型僅能判釋構造物外觀異狀，進行較初階之檢測任務，後續辨識結果如何延伸至安全性分析將為應用面上之挑戰。未來之研究發展方向為如何發展不同資料蒐集方式，將更多種類資料加入系統，使其能夠得以進行更深入之判斷，並且能夠擴充相關硬體以及結合資料庫科學等技術，有效建立構造物之結構健康病歷表，以最佳化巡檢流程與設施管理，使未來構造物巡檢更為精確且有效率。

參考資料

- 交通部，「公路橋梁檢測及補強規範」，公路工程部，民國 109 年。
- 蕭牟淵、游本志、王泰典、蕭興臺，「台灣公路隧道安全檢測及評估之研究」，臺灣公路工程第 36 卷第 5 期，民國 98 年。
- Liu, Y. F., Cho, S., Spencer Jr, B. F., and Fan, J. S. (2016). Concrete crack assessment using digital image processing and 3D scene reconstruction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 04014124.
- Mohan, A., & Poobal, S. (2018). Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 787-798.
- Adhikari, R. S., Moselhi, O., and Bagchi, A. (2014). Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection. *Automation in construction*, 39, 180-194.
- Salman, M., Mathavan, S., Kamal, K., & Rahman, M. (2013, October). Pavement crack detection using the Gabor filter. In *16th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC 2013)* (pp. 2039-2044). IEEE.
- Cha, Y. J., Choi, W., Suh, G., Mahmoudkhani, S., and Büyüköztürk, O. (2018). Autonomous structural visual inspection using region based deep learning for detecting multiple damage types. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(9), 731-747.
- Zhang, A., Wang, K. C., Li, B., Yang, E., Dai, X., Peng, Y., and Chen, C. (2017). Automated pixel level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep learning network. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(10), 805-819.
- Kirillov, A., He, K., Girshick, R., Rother, C., and Dollár, P. (2019). Panoptic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 9404-9413.
- Chen, L. C., Zhu, Y., Papandreu, G., Schroff, F., and Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 801-818.
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., and Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2961-2969. 

110 年 3 月 29 日 資訊委員會工程參訪

本學會資訊委員會於 110.3.29 舉辦臺北市政府工務局「臺北市共同管道建設與智慧營運現況」工程參訪，感謝李惠裕副處長親自介紹及曾俊傑科長簡報。當天出席合計 22 人。





應用 AI 學習技術 於 坡地崩塌預測 分析 — 以高雄市小林村為例

林彥廷／財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 專案助理研究員

顏筱穎、張乃軒、林宏明／國立臺灣大學土木工程學系 碩士生

韓仁毓、楊國鑫、陳俊杉／國立臺灣大學土木工程學系 教授

鄭宏達／台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 協理

徐若堯／台灣世曦工程顧問股份有限公司地理空間資訊部 工程師

在極端氣候影響條件下，現今人們對於災害的應變觀念已大幅轉變，過去為當災害發生時思考如何全力救災以降低生命財產的損失，而現今已經轉化成災害的預防為各界最努力的目標之一，故本研發針對地表變位高潛勢的區域進行預測，使人們得以提早預防因地表變位而造成生命財產的損害，也可以對於工程選址上有所幫助。研究使用新式遙測技術 InSAR 地表變位資料，加上近年來最流行的人工智慧學習技術，利用時空因子與發生地表變位進行相關性分析，再將顯著性時空因子作為模型訓練資料，透過 AI 模型預測高潛勢斜坡單元變位區域。本研究以高雄市小林村里為測試案例，經由混淆矩陣比對預測成果和歷史發生崩塌斜坡單元，成果以優於 80% 正確率證實其預測分析技術之可行性。未來將能提供工程在不同階段上之應用，像是工程地點的選址、施工時之周遭坡地的防護治理、以及針對公共設施周遭持續進行邊坡面變位分析，以提供防災等計畫研擬之策略。

關鍵字：時空因子、機器學習、斜坡單元、崩塌預測、小林村

前言

台灣島造山帶地殼抬升速率與年平均降雨量幾近世界之冠，且台灣位處環太平洋地震帶上，不僅地震常發生，更因為近年的氣候變遷關係造成極端氣候加劇，地震及豪雨造成台灣山區崩塌、土石流、河道淤積等土石災害頻繁，加上地表的侵蝕速率高，造成河流地形與集水區變化劇烈，使得水災、山崩、土石流、地滑等大規模災害發生的頻率與對於人們生命財產安全的衝擊也日益增加。其中，坡地災害常因強烈的颱風豪雨或地下水位變化，產生不同規模的災情，如 2009 年莫拉克颱風，小林村里發生大規模崩塌，其崩塌土方量高達 2,500 萬立方公尺，造成 491 人罹難與

失蹤，因而不可輕忽坡地災害對於公共設施及人們生命財產安全帶來威脅。

複合自然災害普遍存在地狹人稠台灣這片土地，加上台灣國土 70% 以上皆屬山坡地，各項土地利用易與山坡地區域交集。因山坡地常位於地質敏感破碎之區域，當面臨強降雨或地震，便容易發生坡地崩塌等災害；坡地災害的發生成因除了地形演育的自然過程外，人為因素也會導致坡地災害的發生，且造成的災害規模與嚴重性更不容忽視。以坡地災害為例，發生邊坡崩塌的成因可以分成二大類，分別為環境條件（潛因）及促發因子（誘因），潛因為山坡地本身的自然條件，像是地形、地質材料、地質構造以及地下水等條件；而誘因

是指誘發地形災害發生的驅動因子，如降雨、地震、河流衝擊及人為等因素。其中，引發坡地災害的人為因素包含山坡地的過度開發、森林砍伐、集水區內濫墾及超限利用、工程選址或道路選線不當及邊坡排水系統與護坡工程維護不佳。上述各項因子由不同政府機關管理，像是雨量站資料為氣象局管理、全台灣數值高程模型為內政部地政司，而台灣地質資料管理單位為經濟部地質調查所等，故各種資料應予以整合以利進行時空上的綜合分析。環境影響因子利用統計分析的方法建立邊坡崩塌與影響因子的相互關係式，如簡李濱（1992）採用不安定指數法（Instability Index Method）^[1]，以及 Shou *et al.*（2018）採用邏輯回歸法（Logistic Regression Method）^[2]，最終獲取邊坡的崩塌潛勢值或是崩塌機率，以評估邊坡崩塌發生的潛勢。現行利用統計分析模式多適用於預算大範圍的邊坡崩塌潛勢，但其預測的準確度或是誤判率仍有改善的空間。

在現今豐富空間資訊觀測技術不斷演進及發展，從過去使用的單點量測方式，如經緯儀、水準儀等，隨著 GNSS 系統的發展，使人們可以針對特定區域進行長時間的地表監測，然而受限於測站的布設數量及位置故無法獲取大範圍的地表變化資訊。近年來廣域的遙測技術不斷進步，各式遙測資訊種類增加、取得的成本降低、遙測影像解析度與相關技術提升等，遙測技術於土木水利相關工程領域之應用層面也因此更加擴增。像是合成孔徑雷達干涉技術（InSAR）、光達（LiDAR）等遙測技術，可以大範圍的獲取地表的空間資訊。其中，InSAR 技術是利用衛星軌道重複觀測方式，獲取不同時間同一地區 SAR 影像，由相位值（Phase）來獲取出地表的三維資訊，精度可達公釐等級，現今廣泛應用於地表變形測量及地形

測繪等地球環境監測相關領域之中。InSAR 易受如：植被分布、土地利用情形、雨量、地質條件等變化影響所觀測變位資料數值，因此需透過其他上述邊坡崩塌影響因子之相關性分析，以釐清 InSAR 觀測值與邊坡崩塌影響因子的關係，並了解發生邊坡坡面變位的成因。

近年來加上人工智慧技術興起，針對大量的原始資料做訓練，建立網路模型架構，往後即可透過輸入的原始資料，進行未來事件的預測及推估。在土木工程領域中亦可結合人工智慧技術與空間觀測數據，以輔助人們進行決策及判斷，像是在構造物的安全性評估、河流水位預測提供橋梁預警性封橋等應用。故若能夠結合人工智慧技術與現代化遙測觀測成果，預期對於地表不穩定行為之分析與預測將會有顯著性的助益。本研究將應用 InSAR 資料與邊坡相關的各項環境條件與促發因子進行時空上相關性的研究與探討，並配合人工智慧之技術預測，以建立邊坡不穩定與各相關影響因子之間的相關性，預期能優化目前邊坡崩塌潛勢模式，提升其預測的準確度，提供後續工程設計與防災應變上之評估與應用。

研究方法

本研究基於斜坡單元為分析基礎，結合時空因子、InSAR 變位觀測及過去公告崩塌範圍，針對因子與地表變位進行相關性分析，找出顯著性的時空因子後，作為人工智慧模型之訓練樣本，整體研究方法與步驟流程如圖 1 所示。詳細研究方法共分成四大部分：(1) 依斜坡單元分割，(2) 環境時空因子指標分析，(3) 相關性分析 (4) 常見機器學習方法，以各時空觀測因子與地表變位之關係建構變位預測分析。最後，利用混淆矩陣驗證變位預測分析成果。

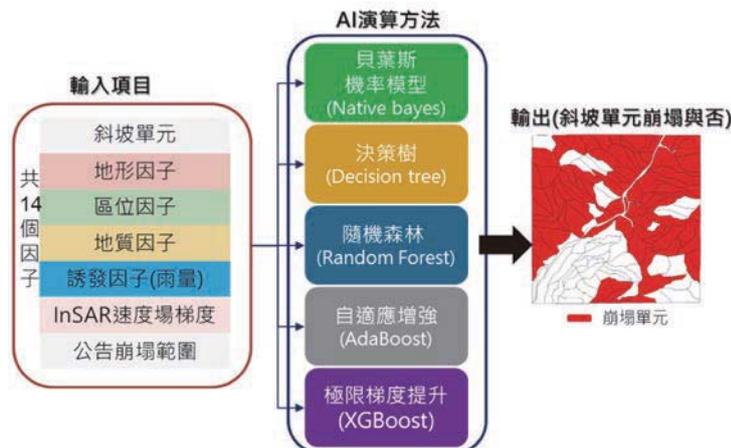


圖 1 應用 AI 學習技術於坡地崩塌預測分析研究方法流程圖

斜坡單元分割

為保留邊坡原本之地形特性，故使用斜坡單元作為分析單元基礎詮釋時空環境因子之數值。斜坡單元分割方法係參考 Xie *et al.* (2004) 所提出集水區重疊法^[3]，如圖 2 所示。以 ArcGIS 軟體中 Hydrology 模組進行數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 中集水區辨識，經反轉數值高程模型使水系線轉為稜線，分割為左右兩個斜坡單元。其中，在 Hydrology 模組進行集水區之辨識時，並以 Flow Accumulation 等於 500 作為劃分河道之門檻值，產出之斜坡單元面積皆小於 30 公頃。分割斜坡單元透過套疊陰影圖、坡向圖、坡度圖、水系圖及衛星正射影像等輔助，判釋各單元間是否重疊或密合。

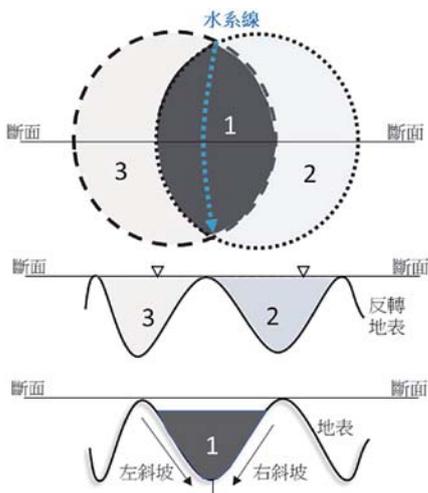


圖 2 集水區重疊法分割斜坡單元示意圖，修改參考^[3]。

環境時空因子指標化分析

環境時空因子共可分為地形因子、區位因子、地質因子、誘發因子等三大類別，其中地形因子能夠表現地表高程幾何變化及覆蓋分布，包括高程、坡度、坡向、地形粗糙度、剖面曲率、植生指標；區位因子顯示斜坡單元受到變動因素如道路、水系、斷層之距離影響性；地質因子反映區域岩層之強度、褶皺性及斜坡順向性；誘發因子為雨量。於下進行各因子及 InSAR 變位速度場梯度指標分析。

(1) 地形因子

● 坡度

依據水平面上的移動距離中所產生的高度變化以三角函數的正切 (tangent) 函數表示空間梯度 (gradient) 變化為坡度，以每九宮格網格為單位，依

均分雙向計算方式獲得九宮格網中心之坡度值，再以每斜坡單元中最顯著 (大) 坡度值作為表示 (圖 3)。

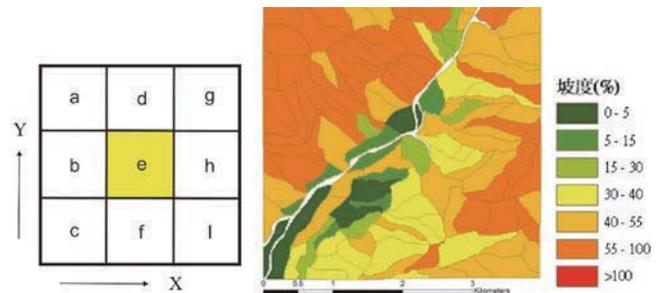


圖 3 以九宮格格網中心計算小林村斜坡單元之坡度指標

● 坡向

以地形高程為基礎，每九宮格網格為單位，計算九宮格網中心之主要坡度方向，主要坡度方向即是高程數值變化最大程度的方向，視為地表坡度方向。計算主要方向與正北方向之夾角 θ ，以正北方向為 0 度，隨順時針方向增加角度至 360 度，再以每斜坡單元中最顯著 (大) 坡向值作為表示 (圖 4)。



圖 4 以八方位分布角度計算小林村斜坡單元坡向圖

● 地形粗糙度

地形粗糙度代表邊坡上高度變化的程度，高度變化越大，代表其地形起伏變化越大，當邊坡材料不穩定時，其所受的重力作用越大，且抵抗力越小，邊坡崩塌的可能性越高。透過各斜坡單元的高程標準差 σ 來描述斜坡單元中高程變化程度 (圖 5)。

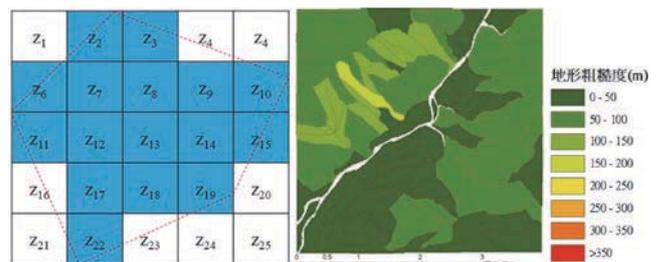


圖 5 以斜坡單元中格網高程標準差計算小林村斜坡單元地形粗糙度圖

● 剖面曲率

剖面曲率代表地面坡度沿最大斜率方向的高程變化程度，即坡的急緩程度。本研究利用 ArcMap 軟體的空間分析模組，在數值高程模型中以每九宮格網格為計算單位，求得中心剖面曲率，再以每個斜坡單元為基礎，計算出各單元之代表曲率，其中曲率負值代表凸坡，正值代表凹坡（圖 6）。

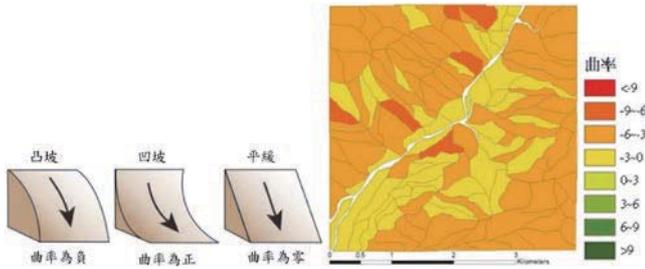


圖 6 斜坡曲率計算小林村斜坡單元剖面曲率圖

● 植生指標

因植物具吸收藍光、紅光及強列反射近紅外光的特性，因此能使用可見光（紅、綠、藍光）與近紅外光之比值或差值監測植生變化，常態化差異植生指標（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）能夠進行地表植生覆蓋分析，NDVI 之值介於 -1 至 +1 之間，因綠色植物生長愈旺盛，其吸收之紅光愈多，紅外光反射亦強因此 NDVI 值愈大^[4]。植生與非植生區域之判定，可藉由 NDVI 門檻加以設定區分，許多相關研究成果顯示門檻值並非單一特定值，隨著分析範圍、植生種類、衛星影像取樣角度、拍攝時間及大氣環境狀況等原因影響，根據亞洲地區植生進行 NDVI 門檻測試，建議其值可選用 0.15 進行篩選植生區域判定^[5]。本研究進而定義植生指標為斜坡單元內所佔植生地面積與斜坡單元面積之比值，如圖 7 所示。

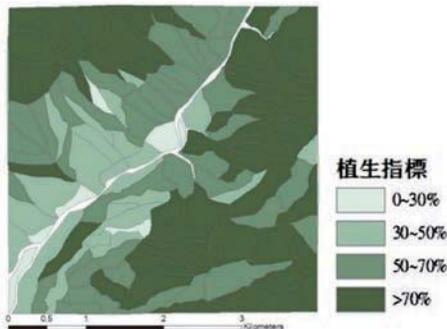


圖 7 利用 NDVI 指標計算小林村斜坡單元植生指標圖

(2) 區位因子

區位因子指該山崩潛因具邊坡的距離遠近，會對該邊坡造成影響之因子，本研究選定水系距、道路距、斷層距三個區位因子進行分析，依三個區位因子分別計算至斜坡單元形心的距離（圖 8）。

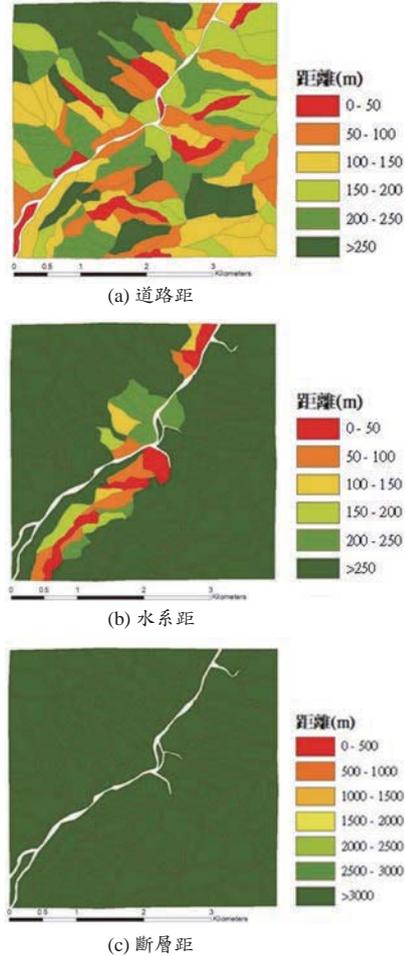


圖 8 計算至斜坡單元形心距離之小林村斜坡單元區位因子圖

(3) 地質因子

地質因子為描述不同地質材料特性，根據其岩性、沉積年代、沉積狀況、破碎程度等，導致不同邊坡特性而影響崩塌之可能性，本研究依岩體強度、褶皺度、順向坡指標進行分析。

● 岩體強度

岩體強度越弱，代表其抵抗外力擾動的能力越低，越容易發生崩塌。利用岩石結構的破碎程度及與岩石的單壓強度大小，可將岩體強度由大至小分為 I ~ VII 類，共七級^[6]。本研究利用二萬五分之一環境地質圖的岩體強度調查成果與斜坡單元進行套疊，繪製出各個斜坡單元的岩體強度（圖 9）。

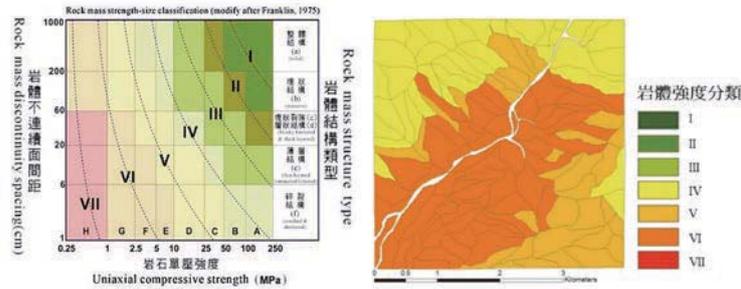


圖 9 利用中央地質調查所岩體強度分類計算小林村斜坡單元岩體強度指標圖

● 褶皺度

褶皺是岩石受力作用後，呈現波浪狀彎曲的狀態，褶皺所經的地方代表其受複雜的應力作用，進而造成該處邊坡岩層較為破碎，影響其抵抗外力擾動的能力容易發生崩塌，本研究將斜坡單元中所經過的褶皺數目定義為褶皺度（圖 10）。

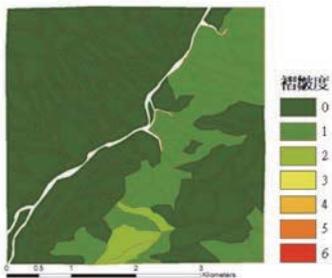


圖 10 以岩層類別計算小林村斜坡單元中褶皺度圖

● 順向坡指標

當地層的傾向與邊坡的坡向一致時，邊坡可能會沿著層面滑動，造成邊坡崩壞的可能性提高，稱為順向坡。本研究利用五萬分之一地質圖，繪製出區域位態圖，並參考水土保持技術規範地層傾向與坡面坡向一致，且交角在 20° 以內定義為順向坡，並輔以中央地質調查所所公告之順向坡圖資，確認本研究產製出之順向坡皆涵蓋公告資料。本研究進而定義順向坡指標為斜坡單元內所佔的順向坡面積與邊坡單元面積之比值，如圖 11 所示。

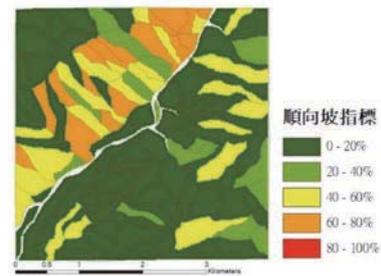


圖 11 以岩層類別及坡向計算小林村斜坡單元中順向坡百分比指標

(4) InSAR 變位速度場梯度指標

InSAR 利用兩期以上合成孔徑雷達觀測，根據回波相位差推估地表變位，為改善 InSAR 年變位於尺度及系統性誤差，並考量 InSAR 變位資訊具備正負數值分布，採用平均值正規化（mean normalization）將資料投放至 -1 至 1 區間。基於正規化處理後 InSAR 能夠反應地表相對性變位之特性，以年為分析單位計算獲得 InSAR 年變位速度。為了凸顯 InSAR 變位所在分布，透過 3 × 3 大小單窗於規則網格中執行梯度計算獲得 InSAR 年變位速度場梯度，如圖 12 所示。

(5) 年雨量內插模型

台灣雨量觀測來源為雨量站設站蒐集，山區雨量站分布密度遠小於都市區，相關雨量內插分析研究多以離雨量測站距離或高程等因素，單獨進行統計回歸建構內插模型；然而，台灣顯著降雨事件如

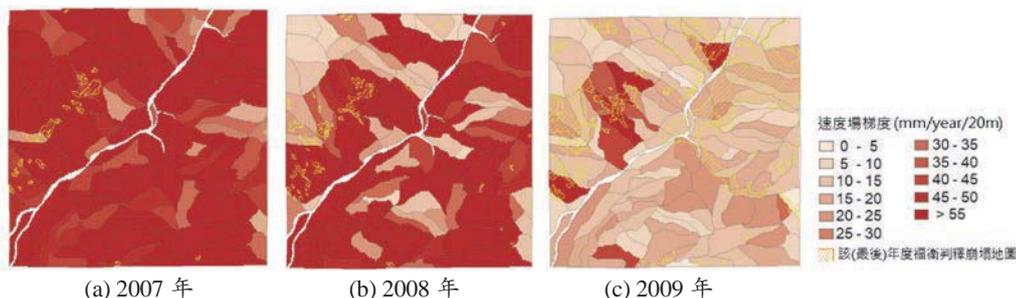


圖 12 小林村斜坡單元之 InSAR 變位速度場梯度指標圖

颱風及梅雨，雲系受地形抬昇，易於迎風背風兩側產生不均降雨情況，本研究除了考量測站距離及高程因素，並加入地勢坡向之影響因素，完成建構雨量觀測內插模型。

時空因子與地表變位相關性分析

針對時空因子與地表變位進行相關性分析，考量時空因子數值分布情形差異，未必能滿足母數統計（常態分佈）之嚴格假設，因此本研究採用無需分佈假設之統計方法，Spearman 相關分析僅需將資料依大小排列，以順序變數線性關係描述，其定義如式 1。相關係數 γ_s 分布於 1 和 -1，其正、負數值表示正、負相關性，當 γ_s 趨近於 0 代表兩者間不具有相關性。

$$\gamma_s = 1 - \frac{6 \sum \Delta_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

式中， γ_s 為 Spearman 相關係數， Δ_i 為兩等級之差異量、 n 為樣本數。

為了確立各時空因子與地表變位是否具備顯著相關性，使用 SPSS 統計軟體輸入時空因子 Spearman 相關係數，執行運算轉換等級尺度，再歸納各因子與地表變位之顯著相關性，其相關性是否顯著檢定如式 2。

$$t = 1 - \frac{\gamma_s - \rho_0}{\sqrt{\frac{1 - \gamma_s^2}{n - 2}}} \quad (2)$$

式中， ρ_0 為 0 時是虛無假設（Null hypothesis）表示「沒有相關」，由 P-value 檢核是否顯著，以 99% 之信賴區間為嚴格顯著相關條件下，當顯著水準 t 大於 0.99 代表拒絕虛無假設，表示因子與崩塌存在相關性。

機器學習變位預測分析與品質評估

透過相關性分析偵測顯著影響崩塌主要因子後，環境條件及誘發因子進而作為人工智慧機器資料學習訓練建立預測模型，應用於邊坡崩塌與變位潛勢預測。常見 AI 機器學習演算應用於分類預測包括貝葉斯機率（Naive bayes）、決策樹（Decision tree）、隨機森林（Random forest）、自適應增強法（AdaBoost）和極限梯度提升法（XGBoost），於下分別進行說明。

(1) 貝葉斯機率（Naive bayes）

決定崩塌分類為崩塌及非崩塌共兩種，依已知兩種類別斜坡單元中時空因子作為訓練樣本，並計算後續未知類別斜坡單元屬於各類別之機率密度函數，其中機率密度函數依貝葉斯法分類法^[7]。各斜坡單元經時空因子出現機率加總最大值者，預測為所屬崩塌或未崩塌類別。由於貝葉斯機率模型於每個輸入變量，假設相互獨立並符合高斯分佈，將有助於釐清大量複雜分類問題。

(2) 決策樹（Decision tree）

決策樹應用假設各時空因子間彼此獨立，依因子特徵定義決策樹每條路徑所屬類別機率分布，採用如同雙叉樹枝二分法方式，在節點以加總機率方式進行數值計算，再依最大加總值作為預測所屬類別^[8]。決策樹能避免如正規化節省資料預處理時間，同時以二分法快速判別，對於連續性資料或離散型資料皆能提出有效分類處理。

(3) 隨機森林（Random forest）

隨機森林為多個決策樹集合，並加入隨機挑選訓練資料（Bootstrap Aggregation, Bagging）方式，將原始觀測資料取出樣本 n 數量並訓練為 n 種分類器，依照每顆決策樹中樣本差異考慮了資料隨機不確性，在權重一致條件下分類器計以加總多數決定最佳分類樹作為預測分類成果^[9]。

(4) 自適應增強法（Adaptive Boosting, AdaBoost）

Boost 是針對已建立分類模型中錯誤資料提高權重，增加對錯誤資訊加強練習，並訓練衍生新的分類器降低先期錯誤機會的一種演算法。AdaBoost 演算疊代過程對於噪聲（noise）或異常數據極為敏感，容易聚焦於難以分類的特徵因子^[10]。

(5) 極限梯度提升法（eXtreme Gradient Boosting, XGBoost）

XGBoost 結合了決策樹和 Boost 兩種演算概念，透過特徵因子分類生成樹，每當完成一顆樹亦是擬合前一次預測殘差所建置學習新函數，透過計算預測與真實觀測之誤差，融合決策樹的複雜度，涵蓋了節點數量和節點機率數值^[11]。

實驗分析

研究測區擇選高雄市小林村實驗區域進行本研究方法驗證，該測區於 2009 年莫拉克風災後持續大量出

現崩塌事件，測區中台 29 線公路呈現南北縱向，測區面積總共為 15.8 平方公里，共涵蓋 129 個斜坡單元。各項因子觀測時間由小時至年等尺度不一問題，為了達到共同時間尺度，採用「年」作為單位基礎分析時間。實驗第一部份，以測區斜坡單元為分析基礎，透過時空因子和 InSAR 變位速度梯度指標，與各單元崩塌情況進行相關性分析，釐清偵測實驗區域崩塌之顯著影響環境因子；第二部分，利用先期（2007 年至 2009 年）時空因子、InSAR 變位速度梯度、雨量誘發因子等指標數值與崩塌與否進行學習演算，並以後期（2010 年）時空條件預估是否具崩塌情況，最後與經濟部中央地質調查所公告崩塌進行混淆矩陣比對分析，驗證本研究方法實際應用於地表變位預測分析之可行性。

時空因子顯著性分析

時空因子之數值分布範圍不一，透過數值標準化將因子尺度統一於 1 至 -1 間分布，再與各斜坡單元是否存在崩塌情況進行 Spearman 相關性分析。分析相關係數及顯著性如表 1 所示，相關係數值介於 -0.47 至 0.01 之間，顯著性數值分布由 0.1 至 1，以 99% 信賴度為檢定門檻設置要求，依顯著性排序通過檢定門檻時空因子包括岩性強度、年平均降雨量、坡度、坡向、地形粗糙度、順向坡指標、高程等共七項因子。

時空地形因子中岩性強度最具相關性 ($\gamma_s = -0.47$)、次之為年平均降雨量 ($\gamma_s = -0.37$)、再者為坡度 ($\gamma_s = 0.27$)、坡向指標 ($\gamma_s = -0.25$)、地形粗糙度指標 ($\gamma_s = 0.31$)、順向坡指標 ($\gamma_s = 0.24$)，最後為高程 ($\gamma_s = 0.22$)。

預測分析及成果驗證

以小林村測區共 129 個斜坡單元中 13 個環境時空因子、1 個誘發因子指標與崩塌情況作為分析基礎，其中 2007 ~ 2009 年共 3 年之作為機器學習演算學習對象，再由 2010 年時空因子及誘發因子條件，預測

表 1 時空因子相關係數及顯著性數值表

時空因子	相關係數 γ_s (依絕對值排序)	顯著性	通過檢定 (99% 信賴區間)
岩性強度	-0.47	1	是
平均降雨量	-0.37	1	是
坡度	0.27	1	是
坡向	-0.25	1	是
地形粗糙度	0.31	1	是
順向坡指標	0.24	0.99	是
高程	0.22	0.99	是
曲率	-0.12	0.81	否
InSAR 變位指標	0.08	0.62	否
褶皺度	0.07	0.57	否
植生指標	-0.06	0.49	否
河道距	-0.04	0.37	否
道路距	0.01	0.1	否
斷層距	0.01	0.1	否

各斜坡單元是否發生崩塌，比對 2010 年中央地質調查所公告崩塌位址所在斜坡單元計算預測正確率。透過常見五種機器學習預測崩塌成果如表 2 所示，其中以貝葉斯預測正確率最高為 82.95%；次之為隨機森林 79.84%；再者為自適應增強法為 77.52%、極限梯度法為 75.97%；最後決策樹為 62.02%。

以最佳學習演算（貝葉斯）預測成果，透過混淆矩陣交叉驗證並細部評估預測分類成果。由圖 13 顯示 129 個斜坡單元中，正確預測崩塌之斜坡單元以紅色標示（共 74 個）；正確預測未崩塌之斜坡單元以綠色標示

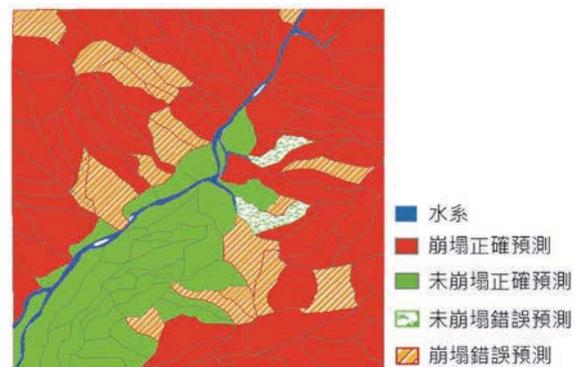


圖 13 與實際崩塌比較之正確及錯誤預測斜坡單元分布圖

表 2 機器學習法預測小林村崩塌斜坡單元之正確百分比表

方法	貝葉斯 (Naive Bayes)	決策樹 (Decision Tree)	隨機森林 (Random Forest)	自適應增強 (AdaBoost)	極限梯度 (XGBoost)
正確率 (%)	82.95	62.02	79.84	77.52	75.97

(共 33 個)；將實際崩塌斜坡單元錯誤預測為未崩塌者標示綠色斜紋 (共 2 個)；將實際未崩塌斜坡單元錯誤預測為崩塌者以橘紅色斜紋表示 (共 20 個)。表 3 以混淆矩陣比較顯示，崩塌預測正確率為 97.4%、非崩塌預測正確率為 62.3%，整體預測平均正確率為 82.9%。

表 3 以混淆矩陣驗證崩塌預測斜坡單元之正確百分比統計表

實際 \ 預測	崩塌	未崩塌	正確百分比 (%)
崩塌	74 	2 	97.4
未崩塌	20 	33 	62.3
整體準確率 (%)			82.9

結果與討論

本研究為了解斜坡單元隨著時序及空間演進造成地表崩塌之環境因子，透過時空環境觀測資料蒐集建構時空因子指標，選用了 InSAR 變位資料、雨量資料、地貌因子、區位因子與地質因子共 14 種時空因子指標，以斜坡單元為基礎，依序將時空因子與崩塌進行相關性分析，依相關性分析之結果可知，崩塌是由各種因子相互影響下而發生。由相關性分析發現，小林村測區 7 個顯著因子包括坡度、坡向、高程、地形粗糙度、岩體強度、順向坡指標及平均降雨量等。應用五種常見機器學習演算預測崩塌分類，其預測可達到六至八成分類正確率，其中貝葉斯法預測正確率為最高 82.95%，該種演算法能有效針對高維度多特徵進行相互獨立訓練，訓練中考慮因子特徵彼此影響性，最後凸顯重要特徵因子。實驗區域 129 個斜坡單元中，於 2010 年實際崩塌數量與非崩塌數分別為 74 個和 33 個 (近似 2:1 數量比)，透過混淆矩陣交叉比對預測崩塌成果，能獲得預測崩塌或非崩塌之正確性，其中實際崩塌誤判為未崩塌僅只有 2 處斜坡單元，顯示崩塌區域預測正確率高達 97.4%，能夠有效掌握崩塌區域之預測分析。後續研究除了可將現行年觀測之環境時空因子時間尺度精化為月或日，提升演算資料豐富性；亦可考量增加力學計算如流體沖刷力、滑動等相關因子，進一步提升預測準確度。針對易崩塌斜坡單元制定雨量誘發指標級距，依此分級發布即時警戒，可成為往後應用於邊坡養護及災害防救一項具前瞻性整合地表監測及預測方法。現行研究亦顯示誘發因子

(雨量) 為相關重要因子之一，除了需改善台灣山區雨量站分布密度較為稀疏問題外，亦須考量格網化降雨資訊提供即時性輔助崩塌預測，如雨量雷達回波觀測網格資訊將能可能成為加值分析與應用重要課題，配合本研究現行人工智慧預測技術開發，預期能優化邊坡崩塌潛勢模式，提升其預測的準確度，提供防災應變評估及預警模式建置。

參考文獻

1. 簡李濱 (1992)，應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法，國立中興大學土木工程研究所碩士論文：台中市。
2. Shou, K.J., Wu, C.C., and Lin, J.F. "Predictive analysis of landslide susceptibility under climate change conditions - a study on the Ai-Liao watershed in southern Taiwan," *Journal of GeoEngineering*, Vol. 13, No 1, pp. 13-27 (2018).
3. Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. "GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model," *Natural Hazards*, Vol. 33, No. 2, pp. 265-282 (2004).
4. Townshend, J.R., Goff, T.E., and Tucker, C.J. "Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, Vol. 6, pp. 888-895 (1985).
5. Wen, C.G., Tateishi, R., and Harahsheh, H. "Asian 30-Second Land Cover Dataset," *The Arab World Geographer*, Vol. 3, No. 2, pp. 132-140 (2000).
6. Franklin, J.A. "Safety and economy in tunneling," *In Proceedings of the 10th Canadian rock mechanics symposium*, Queens University, Kingston, Ontario, Vol. 1, pp. 27-53, (1975).
7. Rish, I. "An empirical study of the naive Bayes classifier," *In IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence*, Vol. 3, No. 22, pp. 41-46 (2001).
8. Safavian, S.R. and Landgrebe, D. "A survey of decision tree classifier methodology," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol. 21, No. 3, pp. 660-674 (1991).
9. Ho, T.K. "Random decision forests," *In Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition IEEE*, Vol. 1, pp. 278-282 (1995).
10. Freund, Y. and Schapire, R.E. "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting," *Journal of computer and system sciences*, Vol. 55, No. 1, pp. 119-139 (1997).
11. Friedman, J.H. "Greedy function approximation: a gradient boosting machine," *Annals of statistics*, pp. 1189-1232 (2001).

歡迎加入學會



www.ciche.org.tw

下載入會申請書



中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

e-mail: service@ciche.org.tw

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260



人工智慧 在 都市淹水預測 之 應用與展望

汪立本 / 國立臺灣大學土木工程學系 助理教授

Susana Ochoa Rodriguez / Rain++ Ltd. 資深水文氣象學家

Yuting Chen / 倫敦帝國理工大學土木與環境工程學系 博士研究員

Christian Onof / 倫敦帝國理工大學土木與環境工程學系 副教授

本文分享歐盟計畫 FloodCitiSense 於過去幾年，應用人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 相關技術以輔助都市淹水預測、預警 (urban flood forecasting and warning) 模型之發展。計畫執行期間，探索多種類型數據驅動 (data-driven) 淹水預測模式，從單純預測某場暴雨是否為致災暴雨事件，到近一步結合都市淹水水理模式以預測淹水的空間分布。本文將詳細說明其中二種模型。第一種為純粹資料驅動模型，僅使用歷史降雨資料及實際收集到的淹水報告，藉由學習過去致災暴雨事件之統計特徵，預測該暴雨是否可能造成淹水，再進一步預測可能的淹水空間分布。第二種為氣候類比 (analogue) 模型，該模型主要由歷史致災暴雨事件相關之大氣參數及雷達降雨影像驅動，藉由分析、分類暴雨事件大氣參數之相似性，以及雷達降雨影像之特徵，建立出致災暴雨類比模型，並結合都市淹水水理模式預先產出之空間淹水模擬地圖 (flood maps)，即時估算都市淹水機率之空間分佈圖。此計畫證明應用人工智慧於都市淹水預測之可行性，然而也發現僅依靠歷史淹水報告，在時間及空間上，無法提供完整及連續之淹水分布，造成模式訓練之困難；此外，隨著都市基礎建設發展，歷史淹水報告亦無法正確地反映現況。此缺點可以藉由傳統都市淹水水理模型之模擬結果改善。

In this article, we would like to share the main findings of an EU-funded research project, named FloodCitiSense, in developing data-driven urban flood forecasting and warning system. A range of data-driven approaches were explored throughout the project period; two of them were found to be feasible for the future operation and are further explained here. The first one is a purely data-driven model. It aims at predicting urban flooding relying merely on historical rainfall data, flood registry records and some hydraulic features of a given city. The result suggests that this model can well predict if a given storm may lead to flooding, but it could not further predict the spatial distribution of a flood. The second model is an analog model. This model characterises the features of the underlying atmospheric variables and rainfall patterns of historical flood-inducing events. By checking similar features of the current weather condition and rainfall data, this model can determine if there are similar flooding events in the history, and based upon them, flood and flood probability maps can be produced. The result suggests the analog model can predict spatial distribution of a flood with a more than 70% accuracy, which shows a great potential to be used operationally.

前言

歐洲、英國都市淹水模擬與預測之發展

英國及歐洲國家過去比較重視因河川溢堤所造成之都市 (外水) 淹水事件 (fluvial flooding)；然而，

近十多年來急遽之氣候變遷影響，短時間、高強度降雨所造成之都市 (內水) 淹水事件 (pluvial flooding) 的發生頻率逐年增加。英國在 2007 年夏天全國發生嚴重淹水事件，其損失、動員救援人數是第二次世界大

戰以來最大規模的一次，經濟損失達到 32 億英鎊（根據當時匯率，此金額超過 1,600 億台幣），而最重要的是，其中超過三分之二的損失來自於都市內水淹水事件^[1]。當時英國及多數歐洲國家，對於這類型由暴雨引起的都市淹水事件相當不熟悉，因此開始投入相當多研究及建設資源，來應對這種新型態的淹水模式。例如，英國因為 2007 年夏天的淹水損失，於 2009 四月，由英國氣象局（the Met Office, UKMO）及環境局（Environment Agency, EA）合力開設了國家級的淹水預測中心（Flood Forecast Centre, FFC），專責於建立中央和地方政府洪水管理、決策及訊息溝通之機制。此外，英國及歐盟也陸續支持了一系列的都市淹水研究計畫，希望藉由新科技、服務型態，幫助減少因為都市淹水造成的損失，並且加強一般民眾對於都市淹水的知識及警覺性（awareness）。其中幾個重點計畫包括：

1. Flood Risk Management Research Consortium Phase 2 (FRMRC2: 2008-2012)

此為英國國家級計畫，結合國內頂尖大學、研究及政府單位，引入新技術，共同開發更準確的都市淹水模擬工具。該計畫期間除了傳統的雨量站資料，也首次探索利用氣象雷達資料輔助都市淹水預測之可能性，結果顯示氣象雷達雖然能提供時間、空間上較為連續之降雨資訊，其準確度還不足以提供可靠之淹水預測^[2]。

2. Decentralised Integrated Analysis and Enhancement of Awareness through Collaborative Modelling and Management of Flood Risk (DIANE-CM: 2009-2011)

此歐盟計畫（ERA-NET CRUE programme）承襲 FRMRC2 的技術成果，結合互動式的 web-based 系統，建立地方政府官員及一般民眾的溝通管道，藉由工作坊（workshops）的方式，提高地方政府官員及一般民眾都市防災的相關知識及警覺性^[3]。

3. Advanced Observation and Rainfall Prediction for Urban Pluvial Flood Management (RainGain: 2011-2015)

此歐盟計畫（Interreg IVB NW Europe programme）延續 FRMRC2 的技術成果，引入最新的氣象雷達科技，並開發出多項雷達降雨估算、預測技術、工具，提高都市淹水模擬、預測之準確度及延長預測的延時（forecast lead time）。此外，此計畫也延續 DIANE-CM 的方式，辦理多次工作坊，分享、說明

最新開發之雷達資料處理、都市淹水預測技術給業界及政府單位，確保這些技術可以被實際使用^[4]。

4. Early Warning Service for Urban Pluvial Floods for and by Citizens and City Authorities (FloodCitiSense: 2017-2020)

此歐盟計畫（JPI Urban Europe）延續 RainGain 之技術成果，近一步探索利用數據驅動輔助都市淹水預測之可行性。此外，引入 urban living lab 的概念，將都市打造成科技試驗場所，藉由工作坊的形式，與一般民眾、地方政府官員共同開發（co-create）、設計都市淹水預測、預警服務，並實作手機 app，提供即時淹水預警及回報功能^[5]。

從這些計畫的發展脈絡，我們可以看出來，過去幾年無論是降雨觀測資料或是都市淹水水理模擬技術，其品質及處理技術都有了長足進步，搭配越來越高解析度之數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）及土地使用觀測資料（Land use），技術上已經可以提供可靠的淹水空間分布模擬。然而，高解析度資料也大幅提升了計算複雜度，需要相當長之計算時間，目前在實務上還無法在短時間完成模擬、即時提供高解析度之淹水預測。隨著人工智慧技術的快速發展，近年來越來越多的研究計畫（例如以上 FloodCitiSense）選擇探索應用人工智慧相關技術來建立以數據驅動之都市淹水模型，期望可以在實際運作上提供快速、即時之淹水預測及預警服務^[6]。

歐盟計畫 FloodCitiSense 簡介

FloodCitiSense 是由歐盟 Horizon 2020 的 JPI Urban Europe programme 所資助之計畫（計畫架構可參考圖 1），其主要目標是規劃並實作都市淹水預測及預警之服務（Early warning service, EWS），並且在三個歐洲城市（比利時的布魯塞爾、荷蘭的鹿特丹及英國的伯明罕）建立 urban living labs，與當地居民、地方政府官員共同設計、規劃 EWS 工具（例如，手機 app 服務）。此外，為了提高一般民眾之參與意願，該計畫也提供當地居民，可以在家後院簡易安裝之降雨感測器，及即時資料傳輸模組，讓居民可以隨時透過計畫 app 掌握當地的即時降雨狀況。

此計畫在三個城市分別依照不同需求、應用範圍，以及實際運作時能即時獲得的資訊，建立不同複雜度之

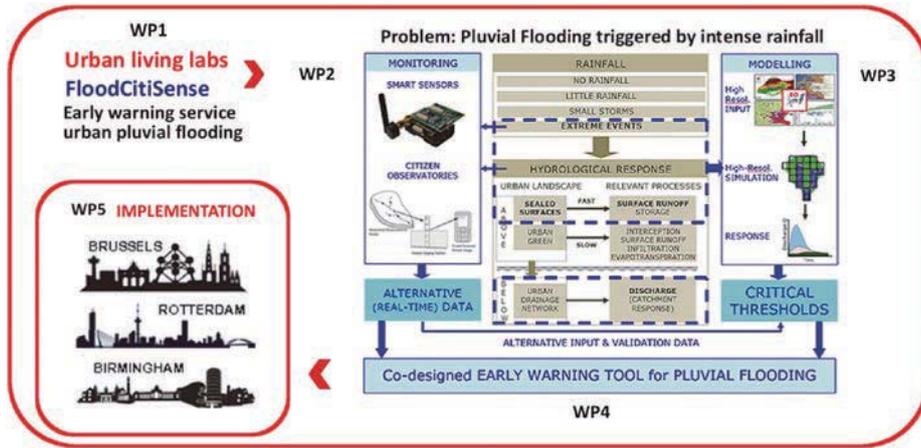


圖 1 FloodCitiSense 計畫架構

數據驅動淹水預警模型。其中荷蘭鹿特丹之模型，因為僅需提供某場暴雨事件是否造成城市發生淹水之預測，所以模型複雜度較低。該模型主要利用過去十年之歷史降雨資料及居民實際回報淹水之紀錄，以決策樹 (decision tree) 之架構 (參見圖 2 (左))，根據暴雨事件在不同延時的降雨強度，估算出造成都市淹水之機率 [7]。比利時布魯塞爾淹水模型之建立，則是利用過去二十年之歷史降雨及水位量測資料，以機器學習模型建立降雨及水位資料之關係，利用以預測城市特定位置之即時水位，藉此提供這些位置之淹水預警資訊；經過測試十種不同機器學習模型，以 Random Forest 技術建立的模型可以提供最好的預測結果 (參見圖 2 (右))。英國伯明罕之淹水模型則最為複雜，因為其目標為建立可以提供整個城市淹水空間分布之預警系統，計劃期間共開發出兩種空間淹水模式；第一種為純粹數據驅動淹水模型，主要利用歷史降雨資料及實際收集的淹水報告

(flood registry reports)，以及都市環境之水利特徵，經由機器學習來建立空間淹水預測模型。第二種則是氣候類比模型，假設致災暴雨事件之大氣環境、降雨特徵有很大的機率會重現，即時淹水預測時，會在事先訓練好的致災氣候環境、降雨特徵及都市淹水模擬資料庫，找出最類似的多場歷史事件，以估算出淹水機率之空間分布，作為淹水預警之依據。本文將利用下兩章節近一步說明英國伯明罕的兩個淹水模型。

純粹數據驅動淹水預警模型

模型架構、方法

此模型採用二階段 (2-stage) 架構 (參見圖 3)：第一階段主要是分析降雨資料之特徵，以預測是否為致災暴雨事件；若判斷是致災事件，第二階段則是近一步預測淹水之空間分布。

(a) Classification tree using rainfall intensities of nine temporal resolutions

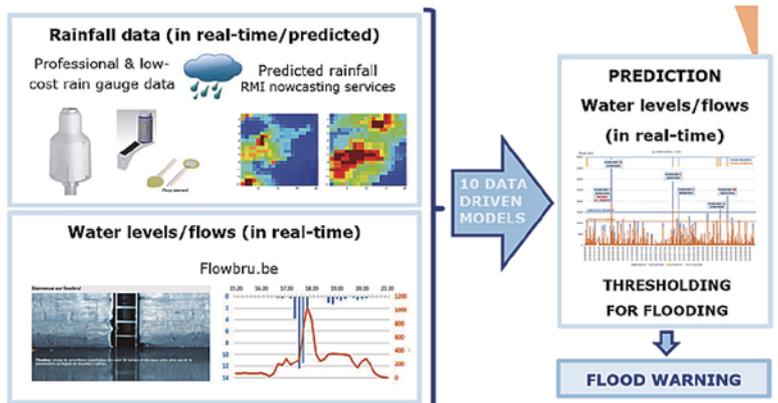
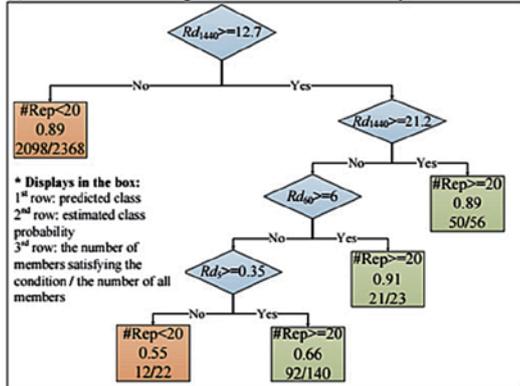


圖 2 荷蘭鹿特丹的決策數淹水預測模型 (左) 及比利時布魯塞爾的水位預測模型 (右)。

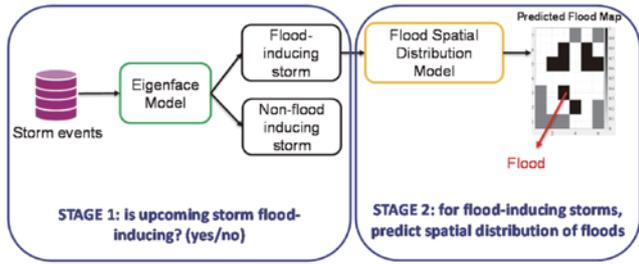


圖 3 純粹數據驅動淹水預警模型之二階段架構

第一階段在實作上採用 Eigenface 技術（參見圖 4），Eigenface 廣泛地應用在人臉辨識之技術，利用 PCA（Principle Component Analysis）擷取人臉之主要特徵並加以儲存。應用於降雨資料時，會先分析致災暴雨事件之雷達降雨影像，產生降雨之統計特性圖，做 Eigenface 計算時，這些特性圖就被當作人臉分析，進一步擷取事件之特徵，並建立致災降雨特徵資料庫。實際運作時，會即時擷取降雨之特定統計特性，與致災降雨特徵資料庫內容作比較，判斷是否為致災暴雨事件。這階段測試了 23 種不同降雨統計特性之組合，以確認最重要的降雨統計特性（參見圖 8）。

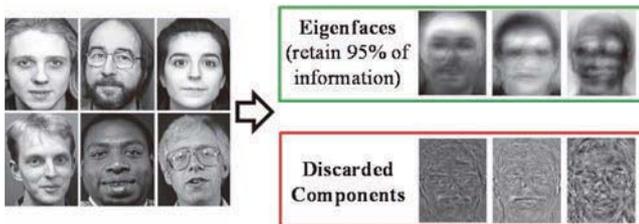


圖 4 Eigenface 方法示意圖

第二階段利用機器學習，建立降雨及都市環境之水利特徵（例如，地表高程、不透水層面積）與實際收集到的淹水報告之關聯性。這階段測試了多種機器學習模型，包括 Logistic Regression (LR)、Neural Network (NN) 以及 6 種不同 kernel 的 Support Vector Machine (SVM) 模型。

資料處理

本模型第一階段是用氣象雷達降雨影像作為主要輸入值，計算前會先由雷達影像推導出降雨之統計特性（參見圖 5、圖 8），包括暴雨事件之累積降雨（mm）、5 分鐘及一小時最大降雨（mm/h）、最大之回歸期距（year）及最大回歸期距對應之延時（min）。模型之第二階段，除了以上降雨統計特性外，也加入都市環境之水理特性參數（參見圖 6），包括地理位置高程（m）、經過河流的大小順序（Strahler order）、下水道網路之設計容量，以及不透水層之面積大小（m²）。淹水之空間分布則是依靠實際收集到的淹水報告，經後處理所產生之空間淹水地圖（參見圖 7）。

結果分析

模型第一階段的測試結果顯示（參見圖 9），Eigenface 模式的準確率大約為 70%，而大部分的降雨統計特性組合之準確度很類似，最佳的組合為累積降雨及一小時最大降雨之組合，其準確度達 72%。此外，可以發現最大回歸期距對應之延時為最不适合之統計特性，

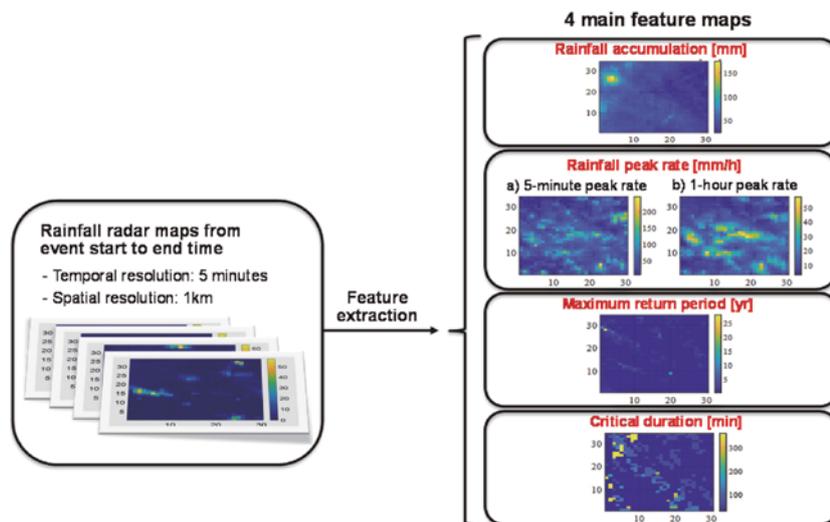


圖 5 純粹數據驅動模型第一階段，利用雷達降雨擷取、產生暴雨事件之統計特性空間分布圖。

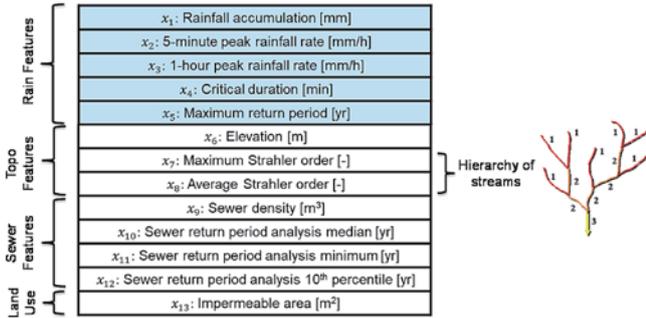


圖 6 純粹數據驅動模型第二階段所使用之降雨及都市環境水利特性參數。

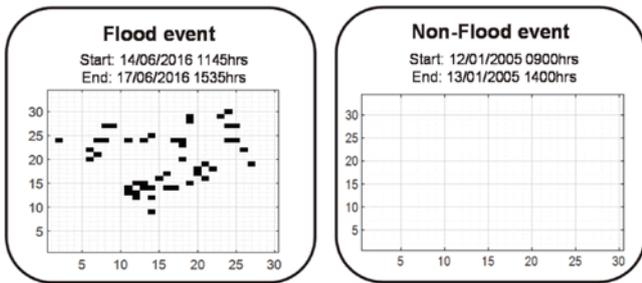


圖 7 根據實際收集之淹水報告，後處理產生之淹水空間分布圖。

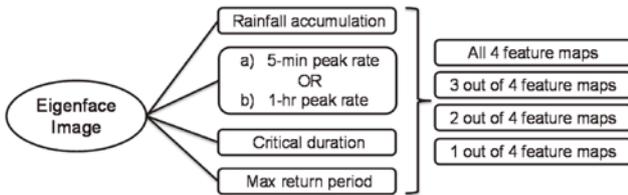


圖 8 降雨統計特性組合

使用此參數之模型，其準確度明顯低於其他特性組合。

模型第二階段之測試結果顯示，機器學習模型大多無法提供好的空間淹水預測，準確最佳的機器學習模型為 LR，其準確度大約為 50%。而分析個別降雨或是水利特徵對於空間淹水分布之鑑別度（參見圖 10），可以發現沒有任何一個特徵可以很好地分離出淹水和不淹水的狀態（藍線跟紅線混在一起，沒有明顯分離）。這代表純粹數據驅動模型可能不是最適合的淹水預測模式。另外，根據圖 11（左），可以發現當淹水範圍空間較大時，LR（及其他模型）通常都有較好的表現，然而當淹水空間範圍小的時候（參見圖 11（右）），LR 則會產生與實際收集到的淹水報告南轅北側之結果。不過當我們與實際降雨分佈做比對時，可以發現 LR 模式的預測結果似乎比較合理，因此也不能排除淹水報告有誤或是資料不全之可能。事實上，淹水報告是在淹水事件後，經由問卷及專家走訪的方式

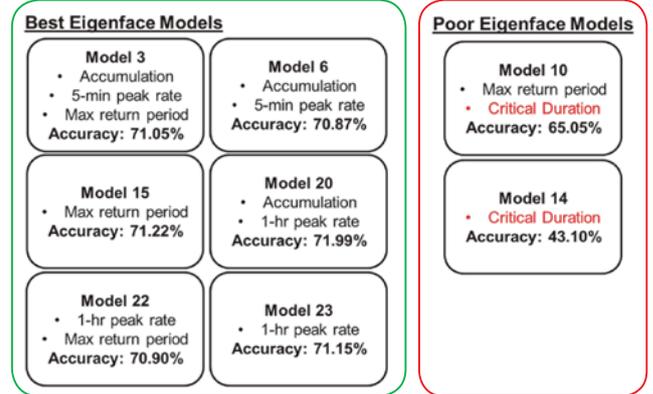


圖 9 利用 Eigenface 判斷是否為致災暴雨事件之結果分析、比較。

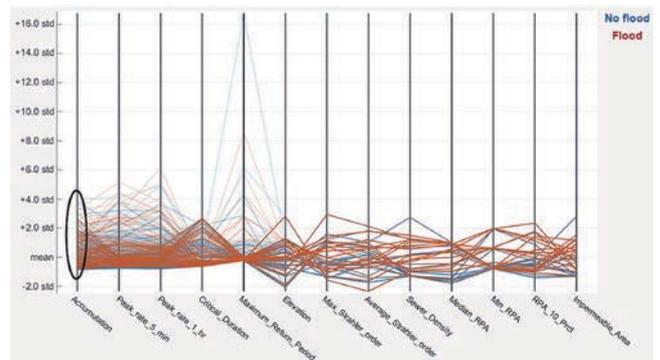


圖 10 降雨及都市環境水利特性對於空間淹水判斷能力之分析

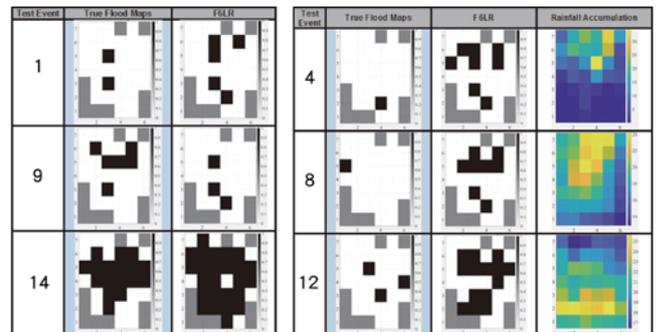


圖 11 Logistic Regression 模型成功預測出淹水事件 1、9 及 14 之空間分布（左）；但是於淹水事件 4、8 及 12 預測出與實際淹水事件相當不同之空間分布（右）。

所產生，其空間完整性不佳，有可能會低估或錯估實際淹水範圍。此缺點可以透過改用都市淹水水理模式所模擬出的淹水範圍，作為機器學習訓練之目標。初步測試結果顯示（參見圖 12），機器學習模型比較容易學習水理模式所產出之淹水空間分佈，主要是因為其空間分布通常較為連續、淹水範圍較大。此外，淹水報告僅能反映收集資料當下的淹水的狀況，無法隨著都市基礎建設之發展、動態地反映淹水現況，此缺點也是可以藉由使用都市淹水水理模式來反映現況。

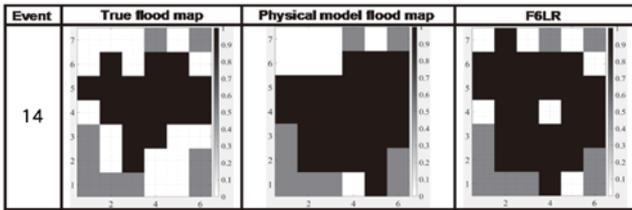


圖 12 分別根據實際收集淹水報告（左）、都市淹水水理模式（中）及 Logistic Regression 預測模式產出之空間淹水分佈圖。

氣候類比都市淹水預警模型

模型架構、方法

此模型發想於大氣領域常用之氣候類比技術（weather analog），其假設為類似的大氣環境會導致類似之區域降雨特性^[8]。然而，因為都市地理範圍較小，與大氣參數之觀測尺度差距太大，單純依靠大氣參數之相似性，不足以正確地反映小區域的真實降雨狀態，因此此模型進一步引入區域降雨類比模式，建立一兩層式類比短延時降雨預測模型^[9]（參見圖 13）。第一層模式是分析該區域之重要大氣參數，然後根據歷史淹水報告及淹水水理模式之模擬結果，建立致災暴雨事件之氣候特徵資料庫。第二層模式則是利用 PCA

及 kNN 技術，將歷史雷達降雨影響分類，建立致災暴雨事件之降雨特徵資料庫。此外，此淹水預警模型還包含預先利用都市淹水水理模式產出之都市淹水空間分佈圖，可以藉由套疊這些淹水分佈圖，即時預測淹水或是淹水機率空間分佈圖。

實際運作時，此模式會首先與致災暴雨事件之氣候特徵資料庫做比對，找出歷史上 120 個類似現在氣候條件之時間點；然後，至降雨特徵資料庫找出這 120 時間點之降雨特徵，並且與即時雷達降雨影像之特徵做比較，進一步找出最類似的 12 個時間點。最後，藉由套疊這十二個時間點對應的致災事件之淹水空間分佈圖，可以即時預測淹水及淹水機率之空間分佈圖。

資料處理

此模型使用之大氣參數包括近地面風向（U- and V-components of wind, m/s）、相對溼度（Relative humidity, %）、重力位高度（Geopotential height, m²/s²）、露點溫度（2 metre dew point temperature, k）以及平均海平面氣壓（Mean sea level pressure, Pa）。考量數據長度、品質，氣候特徵資料庫使用 ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）之 ERA5（ECMWF Reanalysis

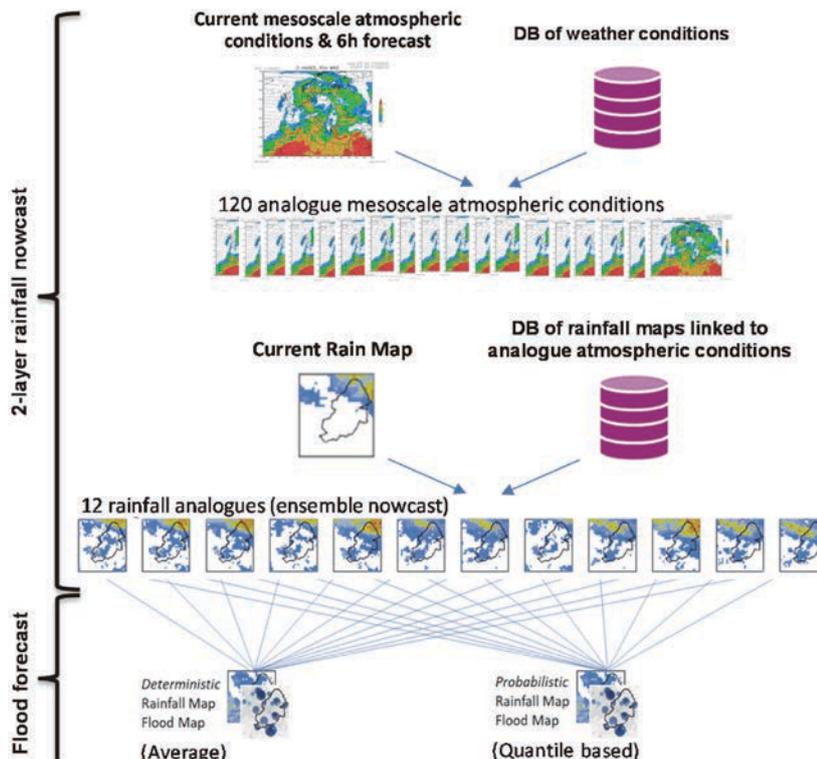


圖 13 氣候類比都市淹水預警模型之架構。此架構結合二層式短延時降雨預測模式，以及預先利用都市淹水水理模式產出之都市淹水空間分佈圖，即時產生淹水及淹水機率空間分佈圖^[9]。

version 5)^[10] 資料。ECMWF 之數值氣候模式為目前全世界最佳之模式，ERA5 資料集提供自 1979 年至今每一個小時、0.25° 之氣候模式資料。即時運作時，考量資料來源之近即時 (near real-time, NRT) 可及性，此模型則是採用美國國家氣象局之 GFS (Global Forecast System) 之預報資料。第二層之降雨特徵資料庫則是使用英國氣象局 (UKMO) 之氣象雷達降雨產品，該產品自 2004 年起，提供全英國每 5 分鐘、1 km² 之降雨資料。

都市淹水空間分佈圖則是由 2019 年初重新率定之都市淹水水理模式所產生，使用的水利模擬軟體為 InfoWorks ICM (參見圖 14 (左))。為了得到真實的模擬結果，採用了先進之雷達 - 雨量站降雨資料融合技術^[11,12]，以提供最好品質之降雨資訊，並重建自 2005 至 2017 共 157 場致災暴雨事件，而所產生之淹水空間分佈圖則當作參考，用來評估氣候類比都市淹水預警模型之預測能力。

結果分析

相較於純粹數據驅動模型，氣候類比都市淹水預警模型展現出較佳之淹水空間分佈預測能力。無論是圖 14 中預測的淹水空間分佈圖或是圖 15 中預測之淹水機率空間分佈圖，都和淹水水理模型的模結果有相當高之一致性。此外，利用交互驗證 157 場致災事件的方式 (cross validation) (參見圖 16)，可以得到此模型的平均預測準確度可以達到 70% 以上，相較於純粹數據驅動模型有大幅之進步。

結語

隨著氣候變遷，極端降雨事件的發生頻率逐年上升，都市淹水所造成之損失也在世界各地許多國家不斷地擴大。英國及歐洲在過去十多年投入相當多研究及基礎建設，希望能降低都市淹水所造成之損失。觀察過去幾年英國及歐洲主要相關的研究計畫，可以發

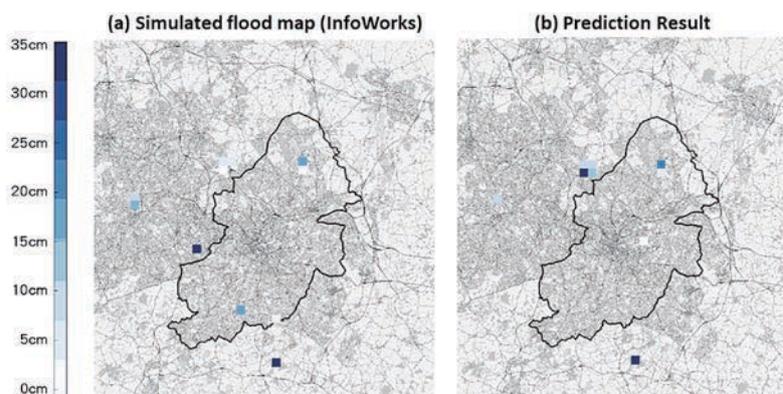


圖 14 都市淹水水理模式 (左) 及氣候類比都市淹水預警模型 (右) 所產生之淹水空間分佈圖

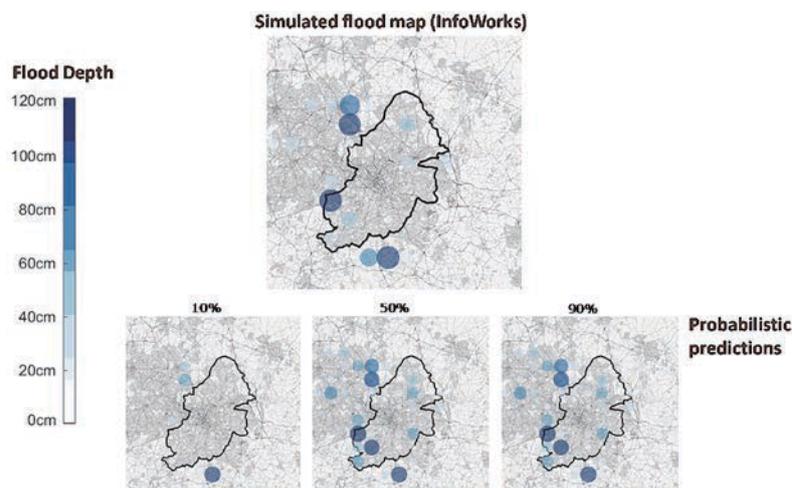


圖 15 都市淹水水理模式 (上) 所產生之淹水空間分佈圖，及氣候類比都市淹水預警模型 (下) 所產生之淹水機率空間分佈圖

		True conditions			
Predicted conditions	True Positive: 28.6% (14.3%–42.9%) Areas are correctly predicted as flooding	False Positives: 14.3% (0%–21.43%) Areas are incorrectly predicted as flooding area	Positive Predictive Rate: 63.6% (50%–75%) (63.6% of predicted flooding areas are truly flooding areas)		
	False Negatives: 0% (0%–7.1%) Flooding areas are incorrectly predicted as non-flooding area	True Negatives: 28.6% (28.6%–35.7%) Areas are correctly predicted as non-flood	Negative Predictive Rate: 99.9% (79.9%–99.9%) (99.99% of predicted non-flooding areas are truly non-flooding areas)		
	True Positive Rate: 85.7% (50.0%–99.9%) (85.7% truly flooding areas can be correctly predicted as flooding)	True Negative Rate: 75.0% (63.6%–99.9%) (75.0% truly non-flooding areas can be correctly predicted)	Accuracy Rate: 71.4% (57.1% ~ 78.6%) (The overall accuracy is 71.4%)		

圖 16 氣候類比都市淹水預警模型之預測準確度評估

現都市淹水模擬之準確度，以及降雨資料之品質，獲得了大幅提升，然而受限於計算之複雜度，目前實務上還不容易提供即時且高解析度之都市淹水預測。隨著人工智慧技術之發展，提供了新的可能，可以透過數據驅動的方式，快速提供淹水預測。本文分享歐盟 FloodCitiSense 計畫探索相關技術之成果，並深入說明其中兩種模型，其中純粹數據驅動模式，使用歷史降雨資料、實際收集之淹水報告，以及都市環境水利特徵等資料，企圖預測淹水之空間分佈。然而結果顯示，此種模型僅能有效預測某場降雨是否為致災降雨，無法有效預測出淹水之空間分佈。而氣候類比模式則能有效預測淹水之空間分佈，其準確度可以達 70% 以上，相當具有發展潛力。研究結果也顯示，淹水報告的資料分佈較為離散、缺乏連續性，往往無法呈現淹水空間分佈之全貌，造成學習上的困難，此缺點可以透過使用都市淹水水理模式的模擬結果來訓練人工智慧模型，以得到更好的學習效果。

參考文獻

- Pitt, M.: Lessons learned from the 2007 floods, Floods Review: Independent Chair's opening letter, 2008.
- Wang, L.-P., Simoes, N., Rico-Ramirez, M., Ochoa-Rodriguez, S., Leitao, J. and Maksimovic, C.: Radar-based pluvial flood forecasting over urban areas: Redbridge case study, *Weather Radar and Hydrology*, 351, 532-637, 2012.
- Evers, M., Jonoski, A., Maksimovič, Č., Lange, L., Ochoa-Rodriguez, S., Teklesadik, A., Cortes-Arevalo, J., Almoradie, A., Simões, N. E., Wang, L.-P. and Makropoulos, C.: Collaborative modelling for active involvement of stakeholders in urban flood risk management, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2821-2842, 2012.
- Ten Veldhuis, J. A. E., Ochoa Rodriguez, S., Bruni, G., Gires, A., vanAssel, J., Wang, L.-P., Reinoso Rodinel, R., Kroll, S., Schertzer, D., Onof, C. and Willems, P.: Weather radar for urban hydrological applications: lessons learnt and research needs identified from 4 pilot catchments in North-West Europe, *International Weather Radar and Hydrology Symposium*, Washington DC, USA, April 2014.
- Verbeiren, B., Dagnachew Seyoum, S., Lubbad, I., Xin, T., ten Veldhuis, J. A. E., Onof, C., Wang, L.-P., Ochoa-Rodriguez, S., Veeckman, C., Boonen, M., See, L., Nalpas, D., O'Brien, B., Johnston, J. and Willems, P.: FloodCitiSense: Early Warning Service For Urban Pluvial Floods For And By Citizens and City Authorities, *11th International Conference on Urban Drainage Modelling*, Palermo, Italy, September 2018.
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.-P., et al.: Surface water flood warnings in England: overview, assessment and recommendations based on survey responses and workshops, *Journal of Flood Risk Management*, 11 (S1), S211-S221, 2018.
- Tian, X., ten Veldhuis, J. A. E., See, L., van de Giesen, N., Verbeiren, B. and Wang, L.-P.: Crowd-sourced data: how valuable and reliable are they for real-time urban flood monitoring and forecasting? *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018*, Vienna, Austria, April 2018.
- Panziera, L., Germann, U., Gabella, M. and Mandapaka, P. V.: NORA—Nowcasting of Orographic Rainfall by means of Analogues, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 2106-2123, 2011.
- Onof, C., Chen, Y., Wang, L.-P. and Ochoa-Rodriguez, S.: A two-stage analogue model for real-time urban flood forecasting, *EGU General Assembly 2021*, Virtual, 19-30 April 2021.
- Hersbach, H., et al.: The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049, 2020.
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.-P., et al.: A review of radar rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications, *Water Resour. Res.*, 55 (8), 6356-6391, 2019.
- Wang, L.-P., Ochoa-Rodriguez, S., Onof, C., and Willems, P.: Singularity-sensitive gauge-based radar rainfall adjustment methods for urban hydrological applications, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 4001-4021, 2015.



人工智慧 平臺淺析 與 硬體效能 測試

張慰慈 / 財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心 助理研究員

人工智慧 (Artificial Intelligence, 簡稱 AI) 已經成為近十年來的顯學, 專家學者無不思索這一波科技浪潮將帶來的衝擊和助益。雖然目前人工智慧的軟硬體技術都很容易取得, 入場門檻相對其他高速計算領域來得低上許多, 但一般使用者對人工智慧平臺架構和其最重要硬體設備 — 圖形處理器通用計算 (General-Purpose computing on Graphics Processing Units, 簡稱 GPGPU、GP2U 或 GPU) 卡 — 的瞭解都可能很有限。本文將淺析人工智慧平臺架構與軟硬體選擇的思維, 再由實際測試兩種 NVIDIA GPU 卡的加速 (speed up) 效益, 期能給予有志於人工智慧的研究人員有所助益。

背景

近十年來人工智慧 (Artificial Intelligence, 簡稱 AI) 的發展如火如荼, 已從剛開始的基礎技術發展轉移到個別領域應用, 目前各應用領域的至專家們無不思索這一波人工智慧浪潮將帶來的衝擊和助益。拜美商輝達 (NVIDIA) 所提出的圖形處理器通用計算 (General-Purpose computing on Graphics Processing Units, 簡稱 GPGPU、GP2U 或 GPU) 卡和美商谷歌 (Google) 在軟體開發上的努力, 現在即使是一般使用者也能輕易取得這些已經發展好的軟硬體資源。

由於人工智慧開始有機會真正在各應用領域做出貢獻, 有愈來愈多的研究中心或使用者需要建置自有的人工智慧平臺、又或需要以租賃的方式取得人工智慧計算資源。但人工智慧平臺的硬體有其獨特性, 並非純以中央處理器 (Central Processing Unit, 簡稱 CPU) 為主要計算資源的傳統高速計算平臺思維所能涵蓋。此外在人工智慧發展的道路上, NVIDIA 所提出的 GPU 卡產品線有 GeForce、Quadro、Tesla 三個系列, 除了專注在顯示加速的 Quadro 系列之外, 一般通用型 GeForce 系列和伺服器用 Tesla 系列的 GPU 卡都可應用於人工智慧加速之上。但頂級 Tesla 卡的取得價格約為頂級 GeForce 系列卡的八至十倍上下, 其效益差距則

眾說紛紜。本文即由人工智慧平臺的架構出發, 先討論平臺所需的架構設計、再評析 NVIDIA 的 GeForce 和 Tesla 系列 GPU 卡的效能差別, 以供欲建置自有人工智慧平臺或租賃設備的同好一個參考。

平臺架構

人工智慧平臺的架構一般而言是基於主從式架構 (client-server model) 拓展, 也就是經由一系列的「伺服器」(server) 和「客戶端」(client) 關係結合, 某一臺電腦可以為其他的電腦的「伺服器」, 也可以是另一臺電腦的「客戶端」。一個稍具雛型的人工智慧平臺架構如圖 1 所示。計算功能和任務相異的各電腦稱為「計算節點」(computing node), 首先需要一個中央行程控制電腦「管理電腦」(manager) 來管理這許多的計算節點; 管理人員 (administrator) 是唯一可以登入操控和設定「管理者」的角色, 而其他的用戶可能經由個人電腦 (personal computer) 或筆電、手機、平板等行動裝置 (mobile device) 間接經由一個權限較低的「前端電腦」(frontend) 登入人工智慧平臺; 而用戶們也可能需要一個「儀表板電腦」(dashboard) 來快速查看人工智慧平臺的使用狀況和附加資訊; 如果需要較大的儲存空間, 那便需要再新增一座「儲存設

施」(storage)，這座儲存設施除了連接「管理電腦」以存放資料外，也能同時提供不同的資料給「前端電腦」、「儀表板電腦」和其他「計算節點」，以確保資料存取的效率和安全性。這裡的「管理電腦」、「前端電腦」和「儀表板電腦」可以是同一臺電腦扮演該角色，但是為了安全性考量還是應當把「管理電腦」獨立出來，因為我們難以確保一般使用者的個人電腦裝置都有良好的防護，當他們的帳號密碼洩時，「前端電腦」便成為被攻擊的第一站；將「管理電腦」和「前端電腦」分開的設計就隱含了「壯士斷腕」但的思維——一旦「前端電腦」被攻陷，至少可以切斷「管理電腦」和「前端電腦」間的連結來確保後方電腦的安全。

過去曾發生過這樣的案例：一個使用者的個人電腦不幸被入侵，駭客用該使用者的帳號密碼登入「前端電腦」，但一般使用者的權限有限——既無法窺探其他使用者的資料、也不被允許跳到「管理電腦」上。雖然該次入侵並沒有危急到「管理電腦」和後方的其他「計算節點」，但是畢竟還是可以存取「計算節點」上的硬體計算資源——即原本一般使用者就擁有的權利，因此還是利用該人工智慧平臺去計算獲取虛擬加密貨幣「比特幣」(Bitcoin, BTC 或 XBT) 獲利，也是俗稱的「挖礦」(mining)，最終由管理人員監控該人工智慧平臺時察覺異狀才制止，可見駭客對人工智慧平臺的覬覦實在是防不甚防，也突顯出不厭其煩地為人工智慧平臺設能兼具效能和安全性的架構是如此重要。

軟硬體選擇

主機虛擬化

在前述的人工智慧平臺架構設計上，因為真正需要負責重量級 CPU、GPU 資源的都是後方的各計算節點，因此其他的「管理電腦」、「前端電腦」和「儀表板電腦」的硬體資源需求便相對來得低上許多。目前有許多虛擬主機的技術就已經可以滿足這三種電腦角色的需求，例如美商威睿 (VMware) 的各項產品就能提供建置人工智慧平臺「管理電腦」、「前端電腦」和「儀表板電腦」的良好的解決方案，最簡易的方法是在一臺數萬元等級起跳的電腦上安裝裸機虛擬化管理軟

體 VMware vSphere Hypervisor ESXi (或簡稱 ESXi)^[1]，免費版的 ESXi 具有「沒有官方支援」、「單一虛擬電腦最多只能使用 8 核心 CPU」、「不能由進階管理軟體 vCenter 控制」、「不支援高效能儲存管理介面 vStorage API」等限制，但這些恰恰都不是「管理電腦」、「前端電腦」和「儀表板電腦」所必要的部份，也就是選擇 ESXi 就可以節省管理軟體的開銷，而非計算節點也只需要一臺實體電腦即可 (如圖 1 的「VM」字樣所示)。

此外，因為外部連線的電腦只需要看到「前端電腦」和「儀表板電腦」，所以只有這兩種角色需要實體網路位址 (Internet Protocol Address, 簡稱 IP Address 或 IP)，甚至可以利用 ESXi 核發取得單一實體 IP、用虛擬 IP 轉發方式將使用者的連結方式分別導向到虛擬的「前端電腦」和「儀表板電腦」上即可，這樣一來就可以節省租賃網路實體 IP 的數量和成本 (如圖 1 的「IP」字樣所示)。而防火牆等安全防護也只需要設立在「管理電腦」、「前端電腦」和「儀表板電腦」的對外連線方面 (如圖 1 的火焰圖案所示)。

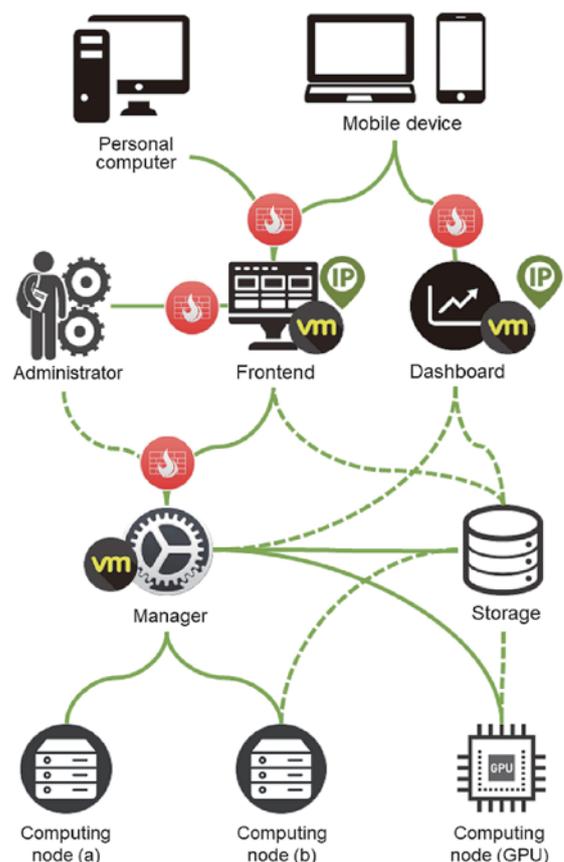


圖 1 人工智慧平臺架構示意圖 (虛線是非必要連接方式)

關鍵硬體

至於計算節點的硬體，最重要的是挑選 CPU、記憶體及 GPU 的規格。CPU 以美商英特爾（Intel）與超微半導體（AMD）兩家企業的產品為主，如果平臺使用情境需要著重 CPU 特定的科學計算，必須考量某些會用到的數值函式庫會針對 Intel CPU 特別設計加速；若是以 GPU 加速為主的使用情境則可以考慮「CPU 核心數：GPU 卡數」=「2：1」的搭配，這是因為一般 GPU 加速的人工智慧程式會使用約 1.6 至 2 核心量的 CPU，再增加 CPU 核心的加速效益便不顯著。舉例而言，如果單一計算節點安裝八張 GPU 卡，所需搭配的 CPU 總核心數最小值為 16 核心，但更多的 CPU 核心所能帶來的效益便很有限，關於 CPU 和 GPU 的加速效能測試將會在下一節再行說明。單獨考慮 CPU 時的考量重點為其時脈頻率（clock rate），而不同型號的 CPU 則可以很容易地搜尋到網路的評析報告得知其效能差異。

記憶體方面就較為難以仔細評估，必須由使用情境的程式資料量來計算，最好是先在一般電腦上測試使用案例取得初步記憶體需求量。但需要注意的是：大型程式並不會將所有的資料都同時載入記憶體中，比如說 100 GB 的資料並不會一次載入系統記憶體中，而可能是分批以 1 GB 方式讀入記憶體中使用；對以 GPU 為主的人工智慧計算程式更是如此，常常人工智慧訓練資料集是數百 GB，但是訓練時經常以批次（batch）的方式循序載入，使用者應該計算批次量來估計所需的記憶體量；此外，一張 GPU 卡的記憶體僅有數 GB 到 32 GB 不等，也就是說一次的計算量所會用到的記憶體上限為 32 GB，這時候單一程式對電腦系統的記憶體需求就不會高於 32 GB 多少。整體系統記憶體量的需求要計算多個程式的總量，某些更大型的程式可以再進階考慮串聯多張 GPU 卡的情境使用。

GPU 卡雖然有美商輝達（NVIDIA）和 AMD 兩家企業的產品為主，但是在人工智慧計算領域仍是以 NVIDIA 為主，這是因為 NVIDIA 有提出軟硬體整合技術 CUDA（Compute Unified Device Architecture）^[2] 以加速其自家產品的效能，目前世界上所發展的人工智慧軟體也多基於 CUDA 的環境開發，因此在 NVIDIA 的 GPU 卡上的效能便較 AMD 來得突出。此

外 GPU 需要考量其核心數，NVIDIA 的 GPU 卡核心又分為 CUDA 核心（即一般核心）和 Tensor 核心，後者對於張量計算表現更為重要。除核心數和記憶體量之外，另外需要考量的有記憶體介面頻寬（frequency of memory interface），NVIDIA 的 Quadro 系列 GPU 卡之所以較不適合人工智慧計算就是因為其記憶體量和介面頻寬較小，即使記憶體量與 GeForce 或 Tesla 系列的卡相若也無法發揮效能；至於所謂的光線追蹤（或稱光跡追蹤，ray tracing）就和人工智慧更沒有關聯。

作業系統

人工智慧程式運作的作業系統以自由和開放原始碼的作業系統 LINUX ^[3] 為大宗，一方面是因為開放原始碼作業系統可以省下作業系統費用，另一方面是系統的效能和安全性遠非美商微軟（Microsoft）的視窗作業系統 Microsoft Windows ^[4] 所能企及。Microsoft Windows 啟動時的記憶體佔用量為 1 至 2 GB，但人工智慧計算節點使用的 LINUX 一般並不會啟用圖形介面，其作業系統記憶體使用量最多僅有數 MB 而已，而 CPU 的使用量也是如此。

LINUX 的發行版主要考量為 Red Hat 與 Debian 系列。Red Hat 系列為美商紅帽（Red Hat）企業所發行，Red Hat 企業贊助自由軟體社群 Fedora，在匯集 Fedora LINUX ^[5] 測試的軟體後選擇穩定版本匯集為其企業版 RHEL（Red Hat Enterprise Linux）^[6]，發行後會將原始程式碼釋出給全世界供免費使用，著名的衍生發行版為 CentOS LINUX ^[7]、Scientific LINUX ^[8] 和 Oracle LINUX ^[9] 等三者，其中 CentOS 為 Red Hat 企業官方支援，但在 2020 年 12 月 8 日 Red Hat 企業宣佈停止發行 CentOS 穩定版，無疑是斷絕了 CentOS 的發展可能；而美國費米國立加速器實驗室（Fermi National Accelerator Laboratory，縮寫為 Fermilab 或 FNAL）和歐洲核子研究組織（European Organization for Nuclear Research，簡稱 CERN）合作開發的 Scientific LINUX 也已經在 2019 年 4 月宣佈停止開發，目前 Red Hat 系列免費發行版只剩下美商甲骨文（Oracle）企業的 Oracle LINUX 而已，但足以為取代 RHEL 的選擇。Debian LINUX 是由自由軟體 Debian 計畫（Debian project）所發行 ^[10]，其最著名的衍生版本為英商肯諾（Canonical）與 Ubuntu 社群所發行的 Ubuntu LINUX ^[11]，也有穩定版本 LTS（長期

支持版本，全名為 Long Term Support) 可為人工智慧平臺建置時選擇。

建置人工智慧平臺時應選擇穩定版 LINUX 為宜，同時應優先選擇使用者量大的發行版，在發生問題時才能夠較快速地在相關的網路社群找到解決方案。免費版本 LINUX 在 Oracle LINUX 與 Ubuntu LINUX 二者間的主要考量為是否會使用到僅支援特定系列 LINUX 的軟體，否則兩者的選擇上並無太多差別。

效能測試環境與評估指標

本文使用的 CPU 有 Intel Xeon E5 (2.6 GHz)、Xeon Gold (2.1 及 2.6 GHz) 等三種；而 GPU 卡則挑選 2020 年最頂級的 GeForce 卡 (RTX 2080 Ti) 和 Tesla 卡 (Tesla V100-16G 和 Tesla V100-32G)。作業系統為 64 位元版本的 CentOS Linux 7.3，對應之 Linux 核心版本為 3.10.0-1160.6.1.el7；執行 AI 測試的程式為 Python 3.8.7 搭配 Tensorflow 1.12 和 2.1 版。在測試案例與程式碼方面，本研究使用 Andrey Ignatov 所撰寫的 AI 測試套件 ai-benchmark^[12]，針對分類 (classification)、圖像映射 (image-to-image mapping)、圖像分割 (image segmentation)、圖像修復 (inpainting)、語句分析 (sentence sentiment analysis)、文本翻譯 (text translation) 等六種常見的 AI 案例進行測試，再以這些案例給予綜合評分。

加速效益的評比指標採用傳統的加速值 (speed up)：定義增加 N 核心 CPU 或 N 張 GPU 卡後的加速值 s_N 可以表示為：

$$s_N = \frac{T_{ref}}{T_N} < N \quad (1)$$

其中 T_{ref} 為未增加 CPU 或 GPU 時的計算時間 (wall-clock time)， T_N 為增加 N 核心 CPU 或 N 張 GPU 卡後的計算時間，其理想值為 N 。進一步可計算硬體使用效率 (efficiency) e_N ：

$$0 < e_N = \frac{s_N}{N} < 1 \quad (2)$$

其值介於 0 至 1 之間，愈高表示硬體獲得愈高的使用量，即閒置或冗餘的計算愈少，通常理想的線性代數 CPU 加速效率 e_N 相當接近 1，而科學或工程計算軟體的 e_N 值則多介於 0.7 至 0.9 之間。

測試與討論

CPU 的效益

首先是 CPU 的影響：分別在 Tensorflow 1.12 與 2.1 版測試由一核心 CPU (Intel Xeon E5，時脈 2.6 GHz) 增加至 24 核心時的加速效益 (表 1)，在分類、圖像映射、圖像分割、圖像修復、語句分析方面均確有助益，加速值 s_N 約在 3.6 至 10.2 倍之間，考量增加核心數為 24，硬體使用效率 e_N 落在 0.15 至 0.425 之間，和工程軟體相較都可說是相當低下，可見增加 CPU 對 AI 效率的提昇幫助很有限。再者文本翻譯的加速值 s_N 仍為 1.0，即增加 CPU 根本無法加速。

Tensorflow 版本的效率差異

再談 Tensorflow 1.12 和 2.1 的差異，分別在一與 24 核心 Intel Xeon E5 CPU (2.6 GHz) 環境下測試 2.1 版相較 1.12 版效能加速值 s_N 如表 2 所示。在分類、圖像映射、圖像分割、語句分析上 2.1 版的效能均較佳，文本翻譯則並無差異，而圖像修復上反而較差。但考慮將來 Tensorflow 2.1 版的持續革新，圖像修復演算法效能應該會持續增加，加之以程式開發的便利性與穩定性考量，還是建議 Tensorflow 1.x 的使用者儘快開始使用 2.x 的開發環境。

NVIDIA RTX 2080 Ti GPU 卡的效益

接著測試 NVIDIA 於 2020 年在 GeForce 2000 系列的頂級 GPU 卡 RTX 2080 Ti。在一與 32 核心 Intel Xeon E5 CPU (2.6 GHz) 的環境下增加一至兩張 RTX 2080 Ti GPU 卡的加速值 s_N 如表 3 所示，基本上增加 GPU 卡數並不會帶來額外的加速，推測這是因為測試的範例並沒有超過一張 GPU 卡的記憶體量 11 GB。一張 RTX 2080 Ti GPU 卡在分類和圖像分割的加速就可以達到 200 倍以上，而圖像映射更可加速約 460 倍，即使是圖像修復、語句分析和文本翻譯也都能帶來 14 至 32 倍的加速，和純粹增加 CPU (表 1) 的個位數加速明顯相差極鉅。

而 32 核心 CPU 環境下，也同樣看到一或兩張 GPU 卡的差異並不大；增加一張 RTX 2080 Ti GPU 卡的加速 s_N 便僅有 2 至 54 倍 (如表 3 所示)，這是因為 32 核心 CPU 已經有相當程度的加速效益，比較的基數

估計已經較高，因此 GPU 卡的效果便不如單核心 CPU 環境那樣出色；僅有文本翻譯因為 CPU 並不能帶來任何加速（由表 1 文本翻譯的加速值 $s_N = 1.0$ 可知 CPU 並無幫助），因此其加速值約為 13 倍，與單核心 CPU 的 14 倍為同一等級。

NVIDIA Tesla V100 GPU 卡的效益

緊接著測試 NVIDIA 於 2020 年在 Tesla 系列的頂級 GPU 卡 V100，此處測試有 16 GB 和 32 GB 記憶體兩種規格，其結果如表 3 所示。

同樣地，單張或兩張 Tesla V100 GPU 卡的差異並不明顯，推測也是測試的範例並沒有超過一張 GPU 卡的最小記憶體量 16 GB；且 28 乃至 32 核心 CPU 環境下添加 GPU 卡的加速也不如單核心 CPU 來得顯著，道理便和前述的 RTX 2080 Ti GPU 卡相同。

但值得注意的是：單核心 CPU 添加 V100 GPU 卡的加速值在分類可達到 186.2 至 197.2 倍，圖像分割可達到 95.7 至 137.2 倍，而圖像映射的加速值更高達 263.6 至 365.5 倍。一如 RTX 2080 Ti GPU 卡的測試結果，圖像修復、語句分析、文本翻譯的加速值 s_N 也都較低一約為 10.0 至 32.1 倍。

不同 CPU、GPU 環境下的綜合評分

由於測試不同 GPU 卡環境的 CPU 型號均不相同，且項目有分類、圖像映射、圖像分割、圖像修復、語句分析、文本翻譯等六種，其加速效益亦各有優劣，因此使用 ai-benchmark 的綜合評分來通盤比較，其分數愈多表示效能愈好，其結果如表 5 所示。

不借助 GPU 的幫助、單獨使用一核心 CPU 時的綜合評分分別為 123、214、170 分，增加至 8 至 32 核心 CPU 時的分數可達到 1,101、1,598、829，明顯可見 CPU 核心數增加時確實可以帶來數倍的加速。

但增加 GPU 時的加速效益又是另一種等級：RTX 2080 Ti GPU 卡的分數分別為 27,186、26,934、26,013、25,732 分；Tesla V100 GPU 卡的分數分別為 30,141、32,437、32,985、32,797 分（16 GB 記憶體）和 29,258、28,700、30,474、30,288 分（32 GB 記憶體），相較僅有 CPU 的環境再提昇了數十倍之多，可見一張 GPU 卡對 AI 的加速效益完全非多核心 CPU 所能企及。

比較 RTX 2080 Ti GPU 卡、V100 GPU 卡（16 GB 與 32 GB）三種型號的綜合評分，前者的分數介於 25,000 至 27,000 分等級，後者則介於 28,000 至 32,000 分之間。雖然看得出 Tesla V100 GPU 卡的效益確實較 RTX 2080 Ti 卡為高，但其領先幅度也僅約 12% 至 20%，就 Tesla V100 GPU 卡 8 倍 RTX 2080 Ti GPU 卡的價差來說便顯得後者要經濟得許多，足見當案例的記憶體用量在 11 GB 以下時仍應考量使用 RTX 2080 Ti GPU 卡，只有當記憶體量大的時候使用 Tesla V100 卡才能拉大差距。一般使用者常誤以為這裡所說的記憶體大小即為 AI 中的資料集（dataset）檔案大小，實際上 AI 訓練時會分批次（batch）將資料集載入 GPU 記憶體中，每批次的資料集可能只有數 GB，因此真正會達到 11 GB 記憶體用量的時機並不如想像中得多。

表 1 不同版本 Tensorflow，增加 23 核心 Intel Xeon E5 CPU（2.6 GHz）的加速值 s_N

Tensorflow 版本	分類	圖像映射	圖像分割	圖像修復	語句分析	文本翻譯
1.12	6.1	3.9	7.0	9.2	8.6	1.0
2.1	7.9	6.0	7.3	3.6	10.2	1.0

表 2 不同核心數 CPU 環境下，Tensorflow 1.12 升級至 2.1 版的加速值 s_N

CPU 核心數	加速值 s_N					
	分類	圖像映射	圖像分割	圖像修復	語句分析	文本翻譯
1	1.7	1.6	1.5	5.5	1.1	1.0
24	2.2	2.4	1.6	2.1	1.3	1.0

註：統一採用 Intel Xeon E5 CPU（2.6 GHz）

表 3 不同核心數 CPU 環境下增加 NVIDIA RTX 2080 Ti GPU 卡的加速值 s_N

CPU 核心數	GPU 增加數量	加速值 s_N					
		分類	圖像映射	圖像分割	圖像修復	語句分析	文本翻譯
1	+1	271.4	460.7	213.7	14.8	32.2	14.0
1	+2	271.0	458.2	211.2	14.6	31.8	13.8
32	+1	21.1	54.1	17.9	2.1	5.9	13.1
32	+2	20.4	54.1	17.3	2.2	6.0	13.5

註：統一採用 Intel Xeon E5 CPU（2.6 GHz）

表 4 不同核心數 CPU 環境下增加 NVIDIA Tesla V100 GPU 卡的加速值 s_N

環境				加速值 s_N					
CPU		GPU		分類	圖像 映射	圖像 分割	圖像 修復	語句 分析	文本 翻譯
核心數	時脈 (GHz)	數量	記憶體 (GB)						
1	2.6	+1	16	186.2	256.9	129.0	10.0	29.7	11.0
1	2.6	+2	16	189.6	263.6	137.2	16.5	43.7	16.6
28	2.6	+1	16	19.7	38.0	17.6	2.9	8.6	10.3
28	2.6	+2	16	19.6	37.9	17.5	2.9	8.8	10.6
1	2.1	+1	32	197.2	365.5	95.7	15.2	28.7	16.2
1	2.1	+2	32	187.5	353.9	101.2	15.2	32.1	15.7
24	2.1	+1	32	31.1	88.2	19.4	3.7	9.6	16.2
24	2.1	+2	32	31.3	86.4	20.3	4.3	9.8	16.7

註：統一採用 Intel Xeon Gold CPU

表 5 不同 CPU、GPU 環境下的 ai-benchmark 綜合評分

CPU (Intel Xeon)			GPU (NVIDIA)			評分
核心數	型號	時脈 (GHz)	型號	記憶體 (GB)	數量	
1	E5	2.6	—	—	—	123
1	E5	2.6	RTX 2080 Ti	11	1	27,186
1	E5	2.6	RTX 2080 Ti	11	2	26,934
32	E5	2.6	—	—	—	1,101
32	E5	2.6	RTX 2080 Ti	11	1	26,013
32	E5	2.6	RTX 2080 Ti	11	2	25,732
1	Gold	2.6	—	—	—	214
1	Gold	2.6	Tesla V100	16	1	30,141
1	Gold	2.6	Tesla V100	16	2	32,437
28	Gold	2.6	—	—	—	1,598
28	Gold	2.6	Tesla V100	16	1	32,985
28	Gold	2.6	Tesla V100	16	2	32,797
1	Gold	2.1	—	—	—	170
1	Gold	2.1	Tesla V100	32	1	29,258
1	Gold	2.1	Tesla V100	32	2	28,700
24	Gold	2.1	—	—	—	829
24	Gold	2.1	Tesla V100	32	1	30,474
24	Gold	2.1	Tesla V100	32	2	30,288

結論

本文介紹建置人工智慧平臺時的架構與軟硬體評析，同時測試三種 NVIDIA 卡對六種人工智慧案例的加速效益和綜合評比，希望能提供欲建置或租賃人工智慧計算平臺的使用者參考之用。使用者應先瞭解自己的 AI 計算需求才能避免購置過多的高價設備、但無法得到相應的研究效益。

參考資料

- VMware. (2001). VMware ESXi, <https://www.vmware.com/products/esxi-and-esx.html>
- NVIDIA. (2007). Compute Unified Device Architecture, <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>
- Linus Benedict Torvalds. (1991). LINUX, <https://www.kernel.org/>
- Microsoft. (1985). Microsoft Windows, <https://windows.microsoft.com/>
- Fedora Project. (2003). Fedora Linux, <https://getfedora.org/>
- Red Hat. (2003). Red Hat Enterprise Linux, <https://www.redhat.com/en/technologies/linux-platforms/enterprise-linux>
- Red Hat. (2004). Community Enterprise Operating System, <https://www.centos.org/>
- Fermilab and CERN. (2004). Scientific LINUX, <https://www.scientificlinux.org/>
- Oracle. (2006). Oracle Linux, <http://www.oracle.com/us/technologies/linux/index.html>
- Debian Project. (1993). Debian Linux, <https://www.debian.org/>
- Canonical. (2004). Ubuntu Linux, <http://www.ubuntu.com/>
- Andrey Ignatov. (2021). ai-benchmark, <https://ai-benchmark.com/>

版權聲明

本文中所提及之所有國內外產品與商品，為整體版面編輯考量，並未使用註冊商標符號與註冊商標標準字。但作者提及產品與商標只為促進廠商與用戶利益，絕無侵權意圖。內容所提及之商品、人像圖片、設計物與其圖片版權、商標、標準字等權利，皆屬於各廠商與註冊公司所有，特此聲明。



光復大橋 耐震評估後之 基礎補強 設計與施工

The Retrofit Design and Construction of GuangFu Bridge Foundation after Seismic Evaluation

詹榮鋒／新北市政府工務局 局長

馮兆麟／新北市政府養護工程處 處長

簡必琦／新北市政府養護工程處 副處長

黃春田／新北市政府養護工程處 副處長

張英發／台灣世曦工程顧問股份有限公司第一結構部 技術經理

蔡建民／台灣世曦工程顧問股份有限公司第一結構部 計畫經理

黃振榮／國裕建設工程股份有限公司 工務部經理

池華偉／邑葛工程顧問有限公司 監造主任

光復大橋為串連新北市與台北市的重要橋梁，銜接新北市板橋區光復里與台北市萬華區。本工程於民國 66 年竣工通行使用距今已達 43 年，跨河主橋為四跨連續斜張橋，造型簡潔但也引人著目。本橋因為往來台北市及新北市防災救災重要橋梁，交通通行量大、交通繁忙且使用年代較久，配合新北市政府政策進行橋梁耐震能力評估，耐震評估等級與目標方面係依據民國 98 年「公路橋梁耐震能力評估及補強準則（草案）」辦理，在耐震評估分析方面則參考民國 102 年「公路橋梁耐震性能設計規範（草案）複審成果報告書」及民國 105 年「公路橋梁耐震性能設計規範草案案例研究」進行分析評估。

主橋段原設計係採 60 cm × 60 cm 方形預鑄預力混凝土空心樁，經耐震評估後基樁彎矩強度無法滿足現有耐震規範需求，且基礎沖刷嚴重，爰經耐震分析評估後，建議辦理下部結構墩柱的鋼板包覆補強及基礎基樁補強。因此，本補強作業針對主橋段之橋墩進行基礎及基樁補強，每一橋墩新增設 12 支 1.5 m 直徑的場鑄混凝土基樁。其中，本橋橋墩（編號 P10）位於新店溪深槽區，基礎補強須考量其防洪需求外，仍應維持橋梁通行安全。同時在現有橋梁淨高受限下施工，使得基樁施工困難度高；本橋基樁採雙套管圍堰施工，基礎則採雙層鋼板樁圍堰施工，施工期間不僅面臨河道高低水位的來回衝擊外，部分圍堰亦遭遇河水沖刷造成局部淘空等可變環境因素影響，使得本橋墩耐震補強施工面臨很大的危機。所幸經由本團隊的密切合作及配合，克服相關問題後完成本橋的耐震補強施工。

本文將對光復大橋的耐震分析及補強方案作說明，同時針對深槽區的橋墩設計與施工所遭遇的困難進行探討及介紹，作為未來橋梁基礎及基樁補強設計之參考。

關鍵字：光復大橋、耐震評估、基礎補強、斜張橋

前言

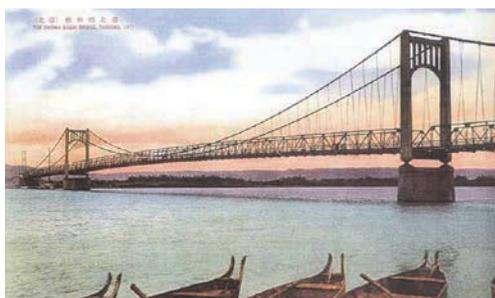
光復橋前身為昭和橋，與淡水河的臺北橋，和基隆河的明治橋（中山橋）、新店溪的川端橋（中正橋）並稱為「台北城四大名橋」。民國 22 年「昭和橋」竣工，為橋長 369 m，寬 4.5 m 之吊橋，民國 34 年 10 月 25 日，臺灣光復，改名為「光復橋」。民國 66 年 12 月 1 日光復橋重建通車，主橋 402 m，淨寬 20 m，包括 15 m 四線車道及兩側各 2.5 m 人行道，斜張式吊橋預力混凝土構造，是遠東地區首座採斜張式設計的橋梁，迄今橋齡超過 43 年^[1]。



第一代明治橋，1901（現名中山橋）



第二代台北橋，1925



昭和橋，1933（現名光復橋）



川端橋，1937（現名中正橋）

圖 1 台北城四大名橋相片
（相片參考自台灣土木史叢書）

光復大橋為銜接新北市板橋區光復里與台北市萬華區，跨河主橋為四跨連續斜張橋，跨徑配置為 67 m + 134 m + 134 m + 67 m，全長為 402 公尺。本橋橋面寬 20.4 m，上部結構主梁型式為預力 T 型梁，下部結構為框架式混凝土橋墩，橋墩基礎型式為預鑄預力混凝土樁基礎。



圖 2 光復大橋現況相片

本橋於 105 年委由台灣世曦工程顧問股份有限公司進行橋梁耐震能力評估後，耐震評估等級與目標方面係依據民國 98 年「公路橋梁耐震能力評估及補強準則（草案）」辦理，在耐震評估分析方面則參考民國 102 年「公路橋梁耐震性能設計規範（草案）複審成果報告書」及民國 105 年「公路橋梁耐震性能設計規範草案案例研究」進行分析評估。本橋段原設計係採 60 cm × 60 cm 方形預鑄預力混凝土空心樁，考量基礎冲刷下進行耐震分析評估後，發現基樁彎矩強度無法滿足現有耐震規範要求，下部結構須進行墩柱的鋼板包覆及基樁補強，故針對主橋段橋墩進行基礎及基樁補強。

考量為維持現有橋梁正常通車條件下進行本橋的補強施工作業，須考量基樁施工位於現有橋面板下方來執行，受橋下淨高限制。此外，本橋橋墩位於河道內，但有一橋墩（編號 P10）位於新店溪深槽區內，常年都有水且因地形因素，致河道遭遇水流局部淘刷嚴重，現有基樁已有懸露於河床面。同時考量因基礎掏空造成土壤結構鬆散，致基樁澆注混凝土無法成形之因素，全套管基樁施工須採用採雙套管施工工法予以克服。另其基礎施工則利用雙層鋼板樁圍堰工法將施工區域的水排除後，將新舊基礎結合在一起。

本橋係屬特殊的斜張橋橋型，於耐震分析時亦須進行較為詳實的分析後，為符合現有耐震評估規範的要求，大膽地採用較為特殊的施工工法完成本橋的補

強作業，過程中亦遭遇了許多困難並克服後，完成了本橋的補強作業。因此，特撰寫了本文章介紹本橋補強作業的構想、遭遇困難及克服艱難心路，並作為日後工程師的參考文獻。

耐震分析與評估結果

光復大橋台北端引橋係屬台北市政府管轄規範，已配合辦理相關補強作業完成，而新北端引橋部分已於 99 年由新北市政府改建竣工完成。因此，本橋分析結構耐震評估單元係光復大橋主橋（橋墩編號 P8 ~ P12）為主，其橋塔與橋墩為固接結構（R 為固接），斜張橋兩側則配置可動式支承（M 為可動式支承），而橋塔及橋塔之間橋面以外懸鉸接方式進行接合，其設計配置圖如圖 3，簡化後示意圖如圖 4，其中編號 P9 及 P11 為主橋段兩側橋塔，編號 P10 深槽區中橋塔。

本橋原設計圖說中之材料使用，預力梁及塔柱採用之混凝土強度為 350 kg/cm²，而橋墩及橋面採用之混凝土強度為 280 kg/cm²，鋼筋強度（fy）為 2,800 kg/cm²，鋼索最低極限強度為 19,000 kg/cm²。本橋工址介

於台北市萬華區至新北市板橋區光復里，分屬台北盆地之台北二區及一區，無斷層經過。為完成本橋的結構分析評估，建立整體結構模型係有其必要性，完成後之整體結構模型如圖 5 所示。其中，主塔墩柱為中空結構，其斷面以 SAP2000 進行斷面設定後，再採用 AutoCAD 進行斷面評估，確保兩者沒有太大的差異下進行分析及評估作業，如圖 6 所示。

經採側推分析後，其行車向及垂直行車向的塑性鉸分佈圖如圖 7 所示。另由面積相等原則，以「等降伏能量法」雙線性化技巧決定容量震譜之降伏點，獲得性能狀態之譜位移容量，其有效最大地表加速度（Effective Peak Acceleration, EPA）與譜位移關係圖如圖 8 所示。由圖所示，其上部結構的耐震能力尚符合耐震規範判斷標準要求之耐震性能。

考量現有橋墩為中空結構，鋼筋於墩底塑鉸區搭接並開設人孔，且現場橋墩已局部產生裂縫，建議於墩柱內部灌注部分混凝土及外部鋼板包覆，以避免大地震發生時，因施工細節而產生結構破壞。而 P8 橋墩鄰近現有堤防及防汛道路，因涉及堤防的防洪要

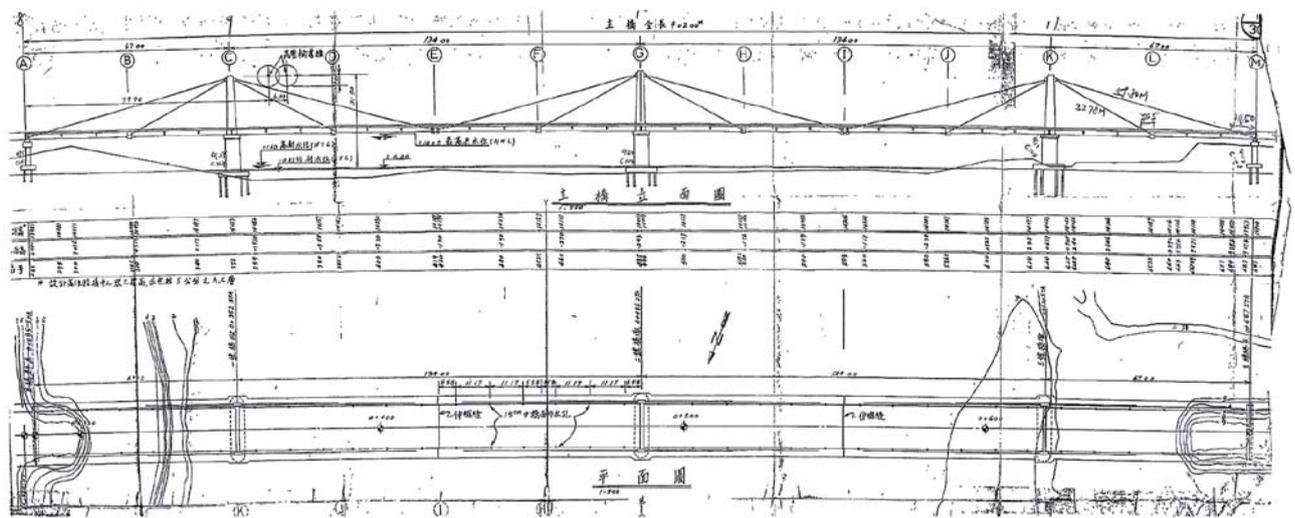


圖 3 光復大橋跨河主橋設計配置圖

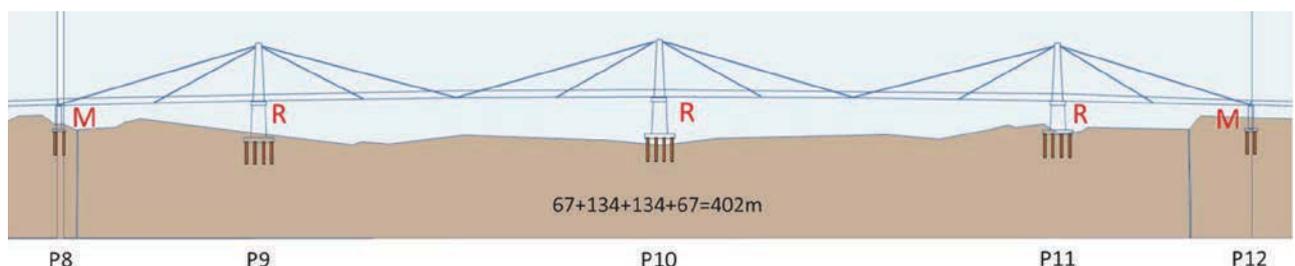


圖 4 光復大橋跨河主橋結構配置示意圖

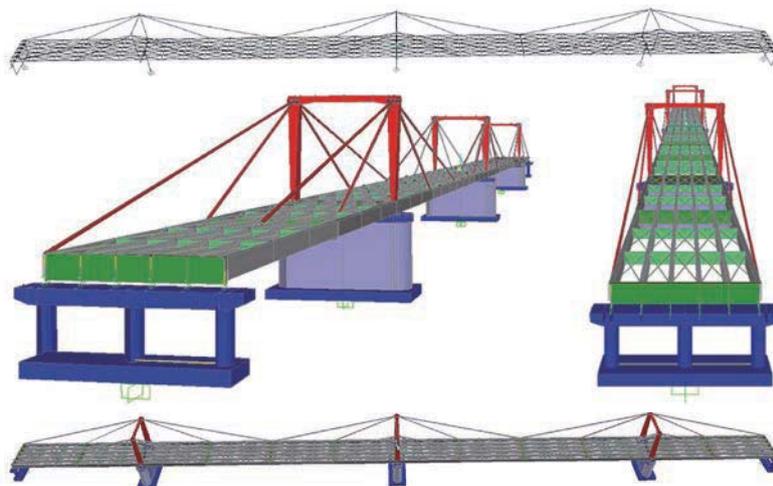


圖 5 光復大橋跨河主橋整體結構模型

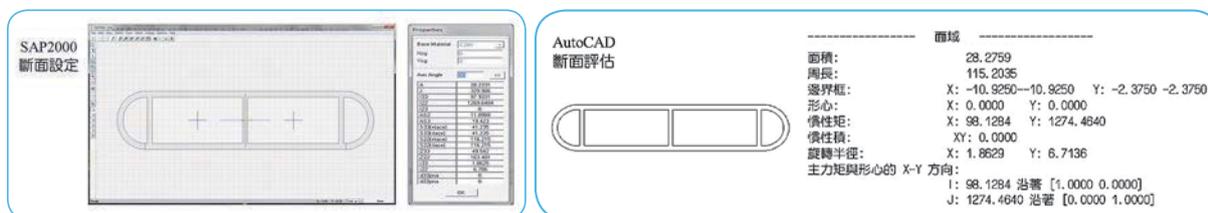


圖 6 主塔墩柱断面設定及評估



圖 7 側推分析下之塑性鉸分佈圖

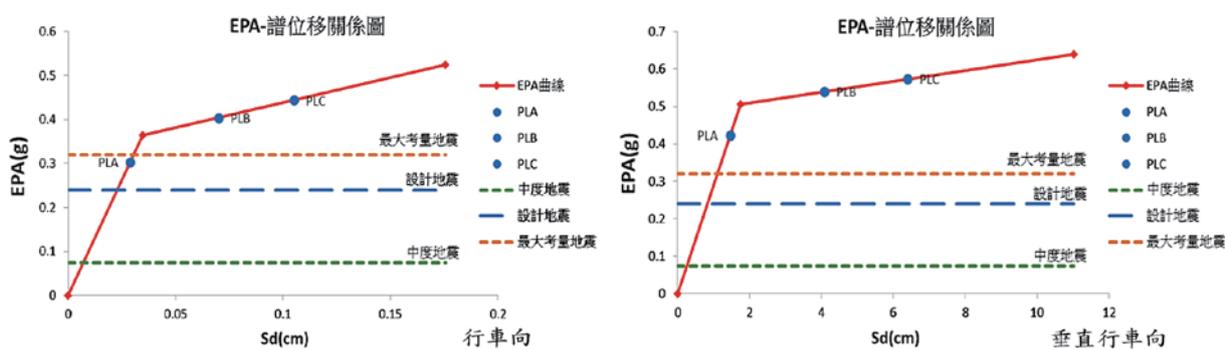


圖 8 有效地表加速度 (EPA) 與譜位移關係圖

求致補強作業成本高，且墩柱周遭均作為休閒空間使用，打設混泥土地坪使得基礎土層地質條件較佳。如此一來，經由主橋塔柱的勁度提升及分擔邊跨的橫向作用力，分析結果 P8 橋墩的基礎可不用補強作業。

本橋進行結構耐震分析時，在考量分析軟體的穩定性及結構週期、屬性的不同，原則上係採上部結構與下

部結構分開的二個個別結構模型進行分析，但為確認下部結構對上部結構的影響，將新增基樁等轉換成等值彈簧，於分析模式下進行結構分析，如圖 9 所示。

為求謹慎及比對不同柱底模式下的耐震評估成果，於結構分析過程中，考量柱底為固接或彈簧兩種模式進行分析，分析結果如圖 10 所示。由圖中結果

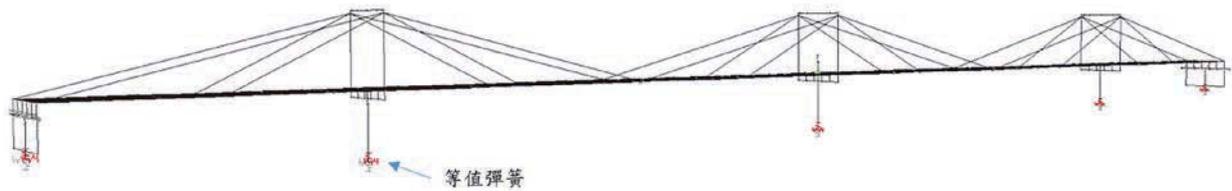


圖 9 下部結構採等值彈簧之分析模型

進行比對，其結果差異不大，表示採用柱底為固接模式，仍可符合本案耐震分析需求。

對於橋墩基礎的分析，考量柱底受力及基礎版上方長期穩定之覆土重或其它靜載重下，基礎版高度效應以 3 個節點及 2 個元素剛性桿件模擬，基礎版本體則以桿件元素模擬；樁以桿件元素模擬，節點可採上部較密、下部較疏方式，以減少自由度。對於土壤彈簧模擬，基礎版土壤模擬僅考慮水平變位前方土壤水平向效應，樁土壤彈簧考慮樁底鉛垂向、鉛垂向摩擦、水平向等效應。本工程各橋墩基礎耐震分析之結構模型如圖 11 所示。

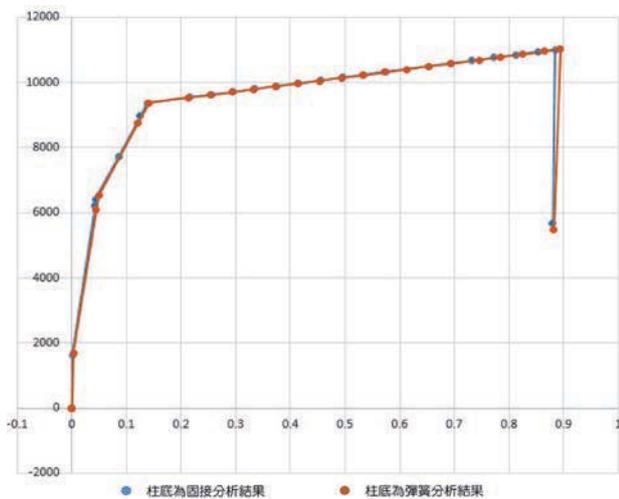


圖 10 考量柱底為固定及等值彈簧之分析比對圖

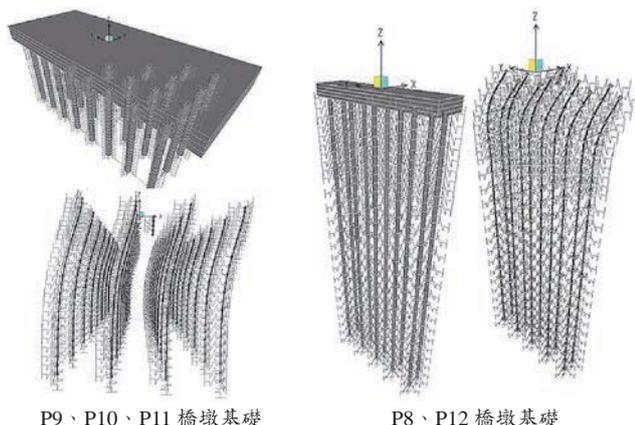


圖 11 各橋墩基礎耐震分析結構模型

橋墩基樁經耐震分析後，橋墩編號 P9、P10 及 P11 之樁頂設計地震力，經綜合橋軸向與橫向部分，其地震作用受力如表 1 所示。其中 P9 及 P11 基樁最大彎矩為 33.6 tf-m，而 P10 在考量河床沖刷下基樁最大彎矩為 154 tf-m。另參考 TL-500PC 基樁規格，本橋基樁採 42 根 5 mm 鋼線，其總面積為 8.23 cm²，其極限彎矩強度約為 25.1 至 39.1 tf-m。因此，在考量在沖刷深度最深時，當地震發生，基樁所能承受彎矩是有所不足，故配合進行補強作業。

表 1 補強前各橋墩基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-172 ~ -342	26.5 ~ 27.6	27.2 ~ 33.6
P10	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-319 ~ -386	38 ~ 39	138 ~ 154

綜上所述，橋墩基樁須進行基礎補強，因此配合於 P9、P10 及 P11 各增設 12 支 1.5 m 直徑場鑄基樁，其補強位置在橋墩行車向前後各 6 支；P12 增設 4 支 1.5 m 直徑場鑄基樁，其補強位置在橋墩垂直行車向各 2 支，其基樁位置示意圖如圖 12 所示。經考量補強基樁後重新進行耐震分析，各橋墩基礎耐震分析之結構模型如圖 13 所示。

其中，既有的上部結構及基礎載重須考量由既有基樁來承受其作用力外，其餘補強後之基礎及地震力可由補強基樁來分擔。補強後分析結果如表 2 所示，P10 既有基樁受力於補強後已大幅下降，而補強後新增補強基樁的受力如表 3 所示，整體可符合耐震需求。

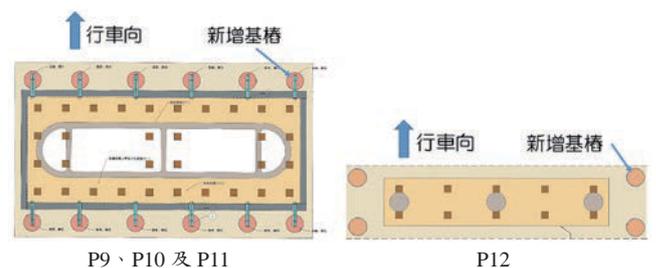
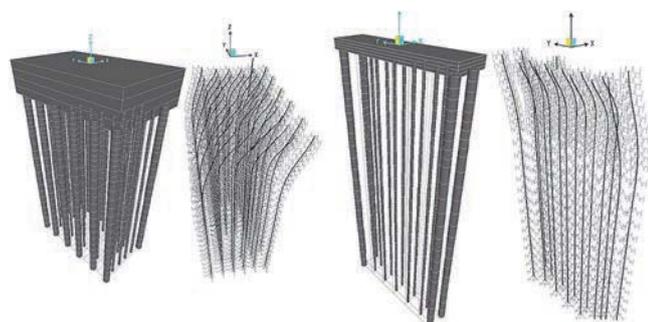


圖 12 各橋墩增設基樁位置示意圖



P9、P10、P11 橋墩基礎 P12 橋墩基礎

圖 13 各橋墩基礎補強後之耐震分析結構模型

表 2 補強後既有基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-222 ~ -252	4.9 ~ 24.9	19.1 ~ 43.2
P10	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-224 ~ -254	4.8 ~ 25.3	18.1 ~ 42.8

表 3 補強後新增補強基樁於設計地震力作用下之受力

P9、P11	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-652 ~ -626	22.9 ~ 149.7	164.1 ~ 423.5
P10	軸力 [tf]	剪力 [tf]	彎矩 [tf-m]
壓力樁	-644 ~ -617	22.5 ~ 149.4	158.5 ~ 411.0

補強設計與工程特色

本橋經耐震分析後，須進行本橋的基樁、基礎及墩柱進行補強作業，其中墩柱部須進行耐震能力補強。對於 RC 橋柱耐震能力不足之補強方式，國內常用的橋柱補強方法，大致可採用三種方法，分別為混凝土 RC 包覆工法、鋼板包覆工法及碳纖維材包覆工法。本橋因墩柱位處河道中，長期會與河水接觸，受

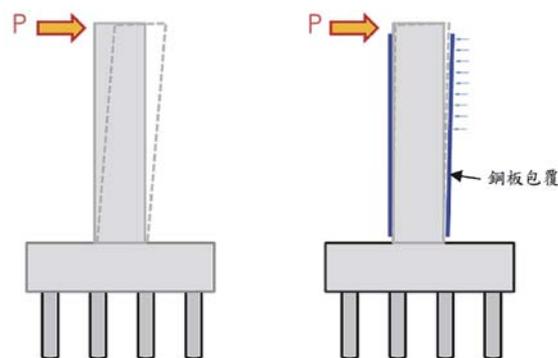


圖 14 墩柱鋼板包覆之補強前後受力與變形示意圖

限於碳纖維材料遇水會劣化，本處不適合採用包覆工法；另 RC 包覆工法須要較大的包覆空間與尺寸，恐會對河川水流造成阻礙與影響。因此本工程橋墩補強，主要係採鋼板包覆工法，以提供墩柱較好的圍束力，讓柱子有更好的韌性，就類似於橋墩外側穿上鐵衣，柱子要變形，外側的鐵衣可以提供橋墩束制且具較好的變形能力，如圖 14 所示。

本橋跨越新店溪，主橋段橋墩位於河道，如圖 15 所示。其中主塔墩柱編號 P9 及 P11 位於兩端的高灘地上，而 P10 位置處於深河槽，常年有水。本工程的墩柱基樁與基礎補強作業，為減少補強後基礎結構量體以維河中水流的通暢，同時要符合水理主管單位的要求，新舊基礎結合以不增加過多結構體造成阻水為原則。因此，新增基樁施築於基礎外側後，開挖至舊有基礎下方後再將新舊基樁結合成一體。為達到原設計目標，橋墩基礎採用托底方式來進行補強，其施工作業示意圖如圖 16 所示。



圖 15 墩柱基樁補強現場

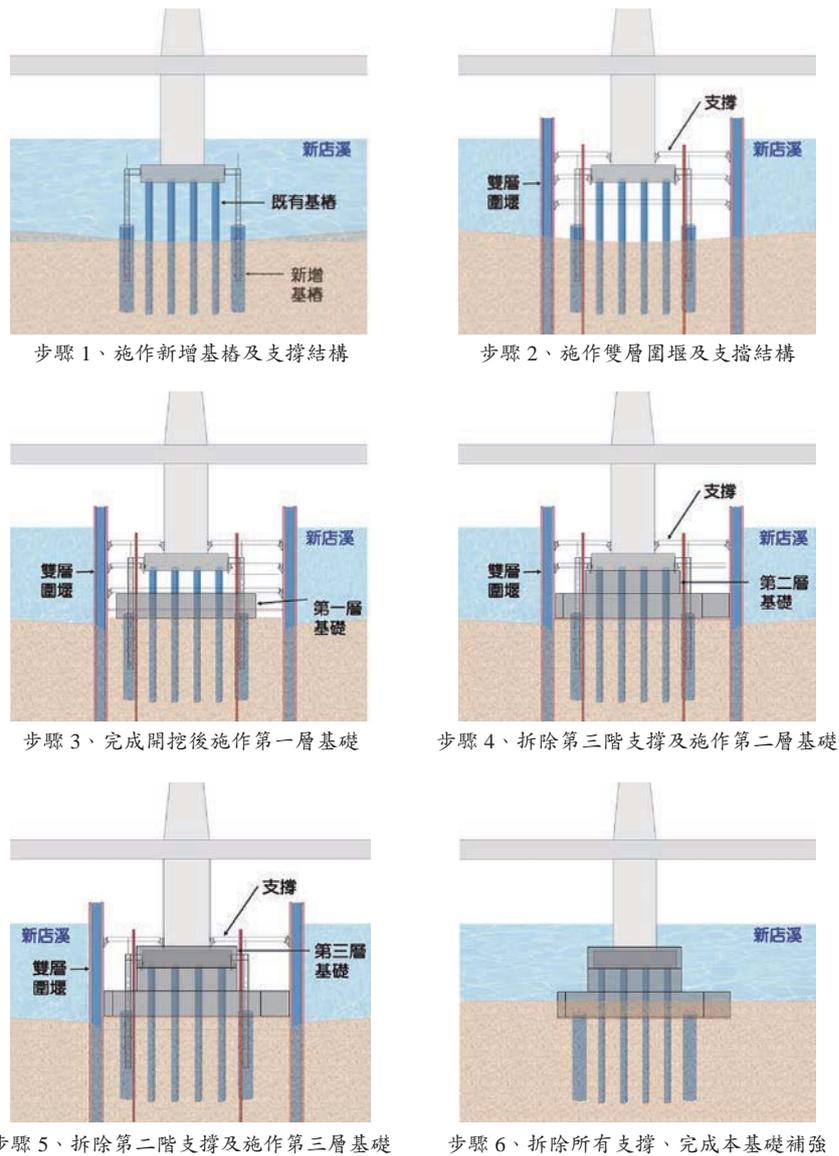


圖 16 基樁補強工步驟示意圖

顧名思義，補強工法是在既有結構物鄰近增設新的結構支撐，作為舊有結構補強需求。因此，補強施工時須考量現有結構體的存在，同時要顧及橋梁結構的安全並要維持原有營運，其施工困難度往往會較新建工程更為困難與複雜。對於本橋的基樁與基礎補強，主塔墩柱編號 P9、P10 及 P11 各新增 12 支 1.5 m 直徑場鑄混凝土基樁，墩柱編號 P12 新增 4 支 1.5 m 直徑場鑄混凝土基樁，並要將新基樁與既有基礎結合在一起。特別是墩柱 P10，該橋墩柱於補強施工作業時，不僅要先施作施工便橋外，同時亦需架設施工構台到河中，方可進行基樁施工及後續圍堰施工。

本工程於補強設計過程中，面臨不少困難點須加以克服，同樣也是本工程特色，包含了本橋施工作業

的淨高限制、雙層套管基樁施工、開挖階段安全支撐及基礎開挖雙層圍堰等。以下就本工程特色與克服工程困難作概要介紹與說明。

淨高限制下的基樁施工

本橋墩基樁增設於行車向橋下，其上方橋梁尚要維持正常車輛通行營運下，使得本墩柱基樁的施工淨高受限，增加施工困難度。考量其橋墩位置不同所產生的不同淨高限制，擬定其施工作業措施。如圖 17 所示，高灘地的高度受限時，可採降挖方式來增加其作業高度，便於施工。深河槽區的墩柱 P10，常時有水，須配合新店溪的河水潮位來調整施工便橋與施工構台高程，以利基樁施工。構台高程須避免於高潮位時遭



圖 17 墩柱 P10 之施工便橋及施工構台配置

淹沒，但也要顧及其施工淨高的最大需求。

考量橋下淨高受限下，除施工機器須配合採用合宜大小外，基樁鋼筋長度的搭接為設計時考量重點。設計時考量若以鋼筋搭接時，主筋搭接過長會減少其可施作長度，增加過多的搭接數，造成施工的困擾。因此本工程之基樁搭接係採鋼套環方式處理，其搭接方式如圖 18 所示。

雙層套管基樁施工工法

本次補強基樁採 1.5 m 直徑場鑄混凝土樁，原則上係採全套管基樁施工，為一般橋梁工程常被使用的基樁工法。該基樁施工大都是單層的套管，於完成套管內土壤挖掘，配置鋼筋籠並灌注混凝土後拔除套管，如圖 19 所示。然而，墩柱 P10 因位於深槽區中，水深達 12 公尺，配合橋墩處的河床高程及水位高度，無法採用一般的全套管基樁施工，其最上端的混凝土會遭遇河水水流衝擊流失無法成形。此外，若考量以築島圍堰後施作基樁，不僅施工法經費高，且因施工期長而長期佔據通洪面積，不易通過水理分析及水利主管單位的核可。因此，同時考量因基礎掏空造成土壤結構鬆散，致基樁澆注混凝土無法成形之因素，全套管基樁施工須採用採雙套管施工工法予以克服，如圖 20



圖 18 基樁鋼筋搭接施工相片

所示，並已全部施築完成。本墩柱所採用的雙套管施工，是於一般單層套管的外側再套一層外套鋼管，其深度深入土壤約 3 公尺深，讓外套鋼管可以達到止水效果，內部可以施作基樁，基樁澆注完成後保留至基礎施工時，於開挖後再切除。

開挖階段安全支撐

為確保橋梁於基礎開挖階段的整體安全性，設計時就考量增設臨時支撐作為開挖時的補償支撐。首先，於場鑄基樁施工階段內插入型鋼，以作為開挖時安全支撐使用，如圖 21 所示。當完成第一階支撐後，即開始進行安全支撐的安裝，將基礎可能承受之地震力傳遞至新的基樁。本項安全支撐於第二層基礎澆注完成後即可拆除，完成其負擔的安全任務。



圖 19 墩柱 P9 及 P11 基樁施工示意圖及相片



圖 20 墩柱 P10 雙層套管基樁施工示意圖及相片



圖 21 墩柱安全支撐示意圖及施工相片

雙層圍堰

為將新舊基礎結合在既有基礎下方，施工時須採雙層圍堰工法將施工區域的水排除後，以利於其下方施工，包含其配置鋼筋及灌注混凝土。本橋墩所使用的圍堰工法，即利用雙層鋼板樁、板樁間內填土壤的方式，將圍堰外側的水阻隔於外，俟內側的水抽乾後，於內側進行開挖、配置鋼筋、組模及澆注混凝土，讓基礎結構可以結合在一起，使達到橋墩耐震補強能力。

墩柱 P10 的雙層圍堰配置圖如圖 22 所示，其中雙層圍堰打設雙層 SP-IV 鋼板樁，長度 23 m、間距約為 1 m，中間填充土壤阻隔河中滲流至內部。除此之外，因本圍堰深度較深，為加強其勁度需求，於圍堰外側各加設長 30 m 的 H 型鋼樁 (H300 × 300 × 10 × 15)，以確保開挖的安全性。

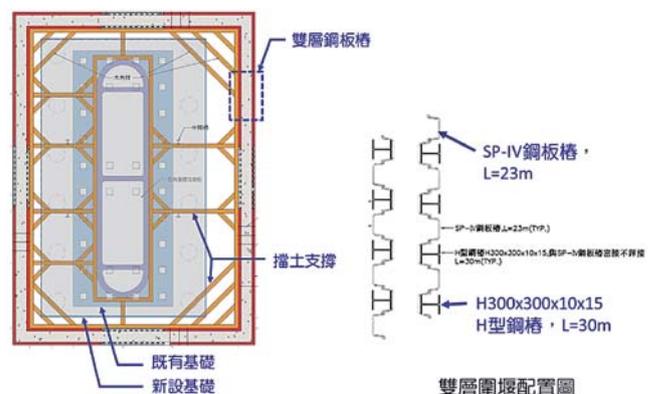


圖 22 墩柱 P10 雙層圍堰配置圖

施工經費受限的施工工法考量

本工程河中墩柱 P10 位於深河槽中，長年有水，雙層圍堰施工順利為本工程的關鍵點，因此於設計階段就要詳加考量及評估。設計階段亦針對表 4 所列的

表 4 設計階段各種圍堰工法評估比較表

No	圍堰工法	工期 [月]	經費 [萬元]
1	鋼板樁 + H 型鋼 (非複合) 雙層圍堰	6	3,300
2	鋼板樁 + H 型鋼 (複合) 雙層圍堰	7	5,000
3	鋼管樁圍堰	8	6,600
4	鋼板樁 + H 型鋼 (河中對拉) 雙層圍堰	7	3,500

各種圍堰工法進行工期及經費評估，在評估淨高受限條件及工址施工環境等因素，以方案 3 的鋼管樁圍堰安全度最高但費用高且工期長，而以方案 4 的 H 型鋼 (河中對拉) 須於採潛水夫於河中施工最具危險性。經討論及審查後，最終以工程經費最省的方案 1 為本墩柱圍堰工法。

施工困難與遭遇問題

本工程於 107 年 11 月發包，由國裕建設工程股份有限公司得標，監造廠商為邑菖工程顧問有限公司，並於 107 年 11 月開工。施工期間遭遇河中段施工的地質不確定風險、施工高度受限、施工困難及颱風來擊等問題，所幸經由施工團隊間的合作及配合，完成本工程之施工。

河中段施工的地質不確定風險

本工程於 107 年 7 月設計時，依據「橋梁維護管理系統資料」中河床測量大斷面數據作為設計時河床高程考量，故以該數據 EL-7.62 作為設計高程，如圖 23。後經施工廠商搭設施工構台於 P10 附近施築基樁時，察覺墩柱下方的地質條件略與設計參考時不同，經向業主反映後並

爭取於墩柱附近進行補充地質鑽探。經實際量測及於基礎版鄰近進行地質鑽探後，發現其河床高程於 108.07 時已下降至 EL-9.12，且於河床上的上層地質不佳，其 N 值都很低。因此，配合該地質條件及河床高程進行第一次雙層鋼板樁圍堰及擋土支撐之變更，採長 23 公尺的 IV 型雙層鋼板樁，並於其外側各加設長 30 公尺長的 H 型鋼樁 (H300 × 300 × 10 × 15)，經審查後據以施工。

依中央氣象局資料顯示，2019 年共有 3 個颱風發佈海上與陸上颱風警報，分別為利奇馬、白鹿及米塔等；同時期，新店溪也經歷多次的大水沖擊後，造成河床持續下陷，且本橋墩位處感潮帶，動床效應相當顯著。另依「新店溪中上游治理規劃報告」資料^[2]，新店溪計畫洪水位 Q200 年頻率因素下之平均流速在中正橋下流為 3.22 m/sec。而實際於光復大橋橋墩柱施工時，發現其深河槽橋墩四周的河水流速相當急，經現場實際量測，河水流速約為 3.1 m/sec。

本工程於 108 年 11 月完成基樁施工並進行雙層鋼板樁施作，並於 109 年 4 月完成雙層鋼板樁圍堰。本工程圍堰原係以鋼索辦理圍堰環梁圍束，惟於回填土時圍堰上游側因內側土壤回填造成局鋼索斷裂，後辦理圍堰環梁加強，改以鋼索加密配置辦理環梁圍束，惟繼續辦理圍堰土方回填後，發現鋼索鬆脫及上游側圍堰大變形，於是緊急徵調 36φ 預力鋼棒辦理圍堰環梁圍束。同時，施工廠商通報圍堰局部產生大變位，並邀集設計單位及專家學者至現場勘查與指導，以供日後補救參考。有關墩柱 P10 圍堰變形位置如圖 24 所示，其變形相片如圖 25 所示。

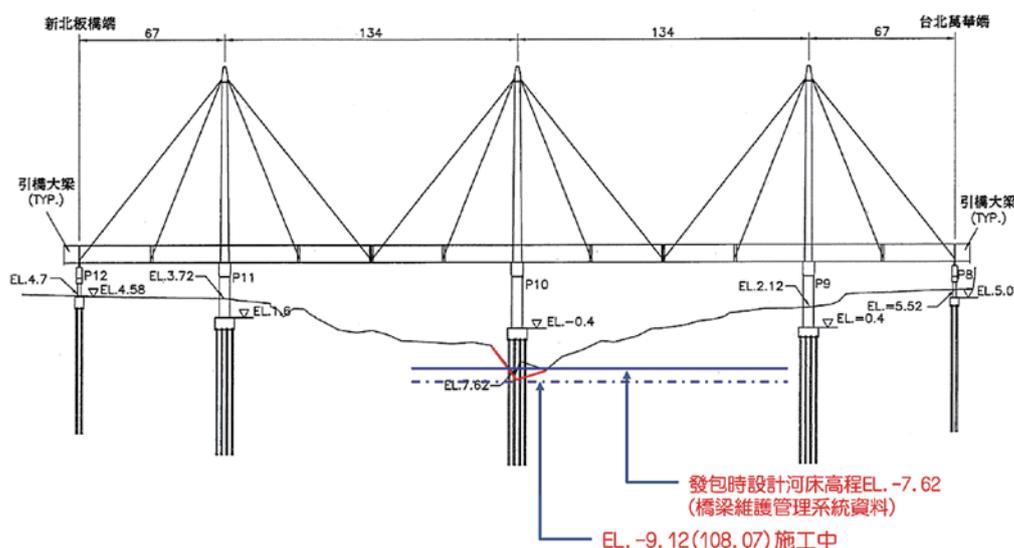


圖 23 河床高程示意圖

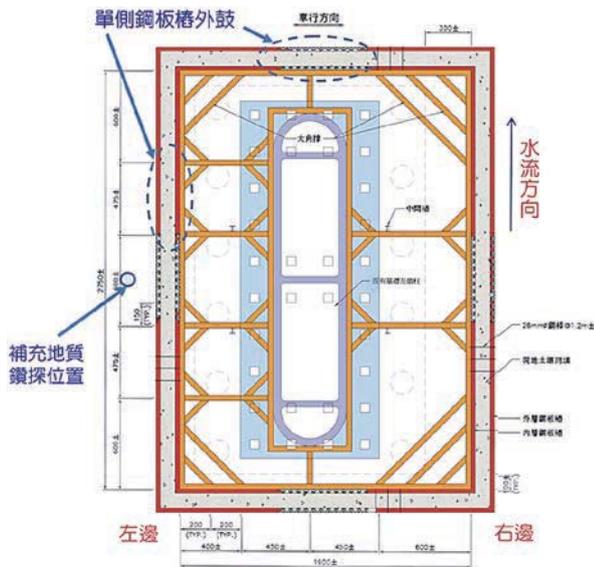


圖 24 墩柱 P10 圍堰變形位置示意圖



圖 25 墩柱 P10 圍堰變形相片

本案於雙層鋼板樁略有變位時，曾量測其河床深度到 EL -10.8 甚至更低。因此，推測應為圍堰設置完成造成水流流線變長，致流速變大掏挖圍堰周圍河床。同時，施工廠商於施工構台附近進行河床深度量測，其河床量測高程如圖 26 所示。其中，最低點位於圍堰鄰新北市側下游處（編號為 2 與 B 交叉點處），其高程為 EL -10.1，較前次河床測量值再往下降低 1 公尺以上。同時，據施工人員說明，P10 橋墩處曾進行部分拋石作業，以加強雙層鋼板樁圍堰外層河床高度及改善其地質條件。此外，施工廠商亦進行該橋墩處

（P10 橋墩）圍堰內之河床高程量測，其高程如圖 27 所示，其平均高程約為 EL -8.11。經了解，雙層鋼板樁圍堰內已配合施工需求，進行部分土壤回填，以減少其基樁裸露，其所量測的數據為已完成回填後之數據。相關數據經整理後，各高程示意圖如圖 28 所示。

為確保雙層圍堰的安全，經由業主召集各單位進行研商，除進行各時段點的河床深度監測外，並採取下列各項措施且於執行後獲得控制，順利完成各項作業。首先，為確保本墩柱雙層圍堰的安全，於雙層鋼板樁先行開孔，讓圍堰內外的水壓力先達到平均，以

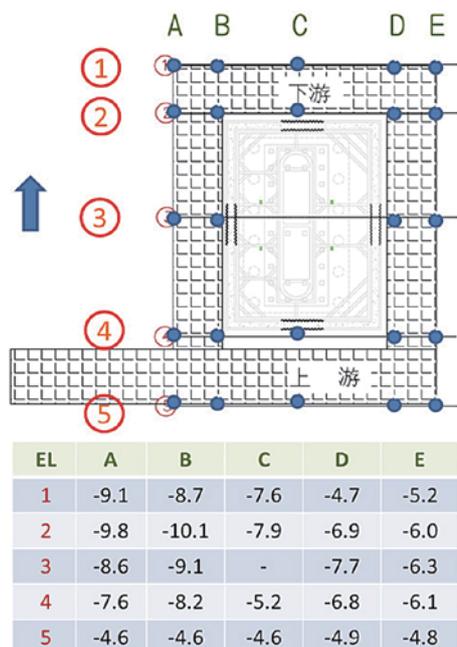
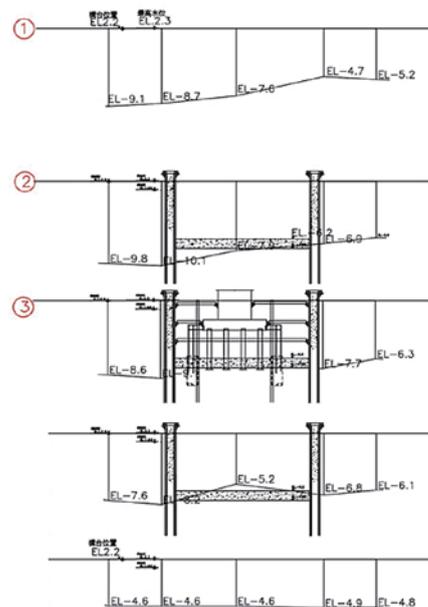


圖 26 墩柱 P10 圍堰外側河床量測高程



減少變形持續惡化，施工前後相片如圖 29 所示。

其次，進行雙層鋼板樁外側之加固作業，用以增加外側圍堰的穩定度。本項施工作業採太空包加混凝土方式，確實增加外層土壤壓力，加固鋼板樁以減少河水漲退對鋼板樁的影響，同時可減緩河水的淘刷；並於圍堰的上下流加設擾流支柱，以擾亂水流減緩水流流速及漲退潮的流速，以期降低水流流速作用於圍

堰的作用力，如圖 30 所示。

考量雙層鋼板樁圍堰基礎範圍內的穩定，改變原開挖支撐後之基礎灌注，改採先以水中混凝土灌注，使得圍堰底部有一層較大的支撐，可作為很好的支撐作用，將會使得後續處理更為方便。施工時須配合灌注作業，其灌注速度要慢，以降低水中混凝土於灌注之流動側壓力。誠如以上所述，經由多次颱風的吹襲及河床沖刷，

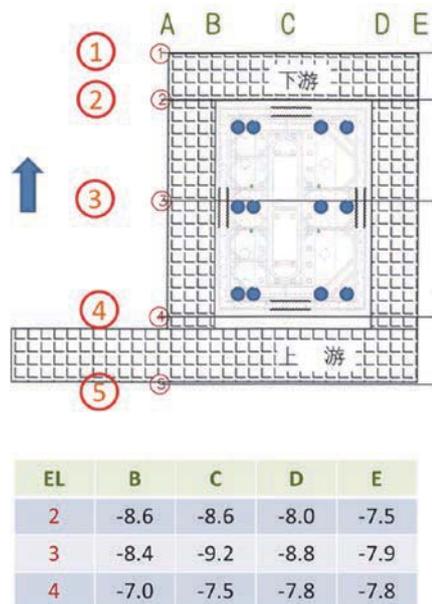


圖 27 墩柱 P10 圍堰內側河床量測高程

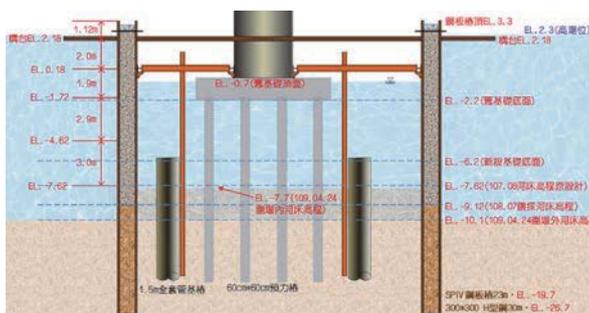
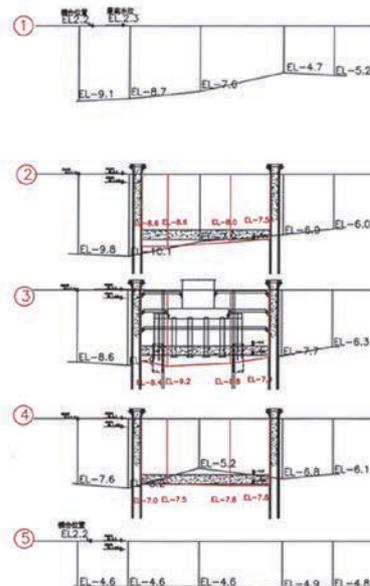


圖 28 墩柱 P10 圍堰量測高程示意圖



圖 29 雙層鋼板樁圍堰開孔現況相片



圖 30 圍堰前加設擾流支柱

使得既有基礎下方的沖刷深度加劇，且其位置位於基礎下方，無法事先探測知道。因此，本次施工時共澆注約 954 方水中混凝土，較原估算高程再下降約 1.5 公尺。

本橋墩柱 P10 位處新店溪深槽區中央，曾於 2019 年（108 年）遭遇多次颱風影響，造成該河段的河床沖刷加劇，而本橋段屬新店溪的感潮段，退潮時容易發生淘刷，而漲潮時容易迴淤，但迴淤時大都為沉泥地質，故造成其橋墩處之地質條件不佳。本工程於第一次變更設計時，已配合工址現況辦理補充地質鑽探，其地質條件及深度與原設計有所差異，然於事故發生後再經現場人員實際量測圍堰最嚴重的區域，其河床又再下降 2.0 公尺以上。

本橋墩圍堰變形發生，主要為局部河床土質變異性大，且因圍堰設置造成水流流線加長，流速加速致淘空基礎河床。另外，由於圍堰主要受潮汐影響大，尤其是漲退潮時，迎水面承受很大的作用力。由於河床的下降可能致圍堰的結構勁度減低，加上其角隅處因受力較大使得結構變形量較大，且受漲退潮之反覆力作用，致使圍堰有所變形。所幸經由上述相關措施施設後，結構之穩定性及安全性獲得確認，並順利施工完成。

淨高限制下的基樁施工

本工程高灘地的橋墩基樁尚可採用局部降挖方式來增加施工作业淨高，但墩柱 P10 位於深河槽中，常時有水，須配合本橋址新店溪的河水潮位來調整施工便橋與施工構台高程，以利基樁施工。構台高程須避免於高潮位時遭淹沒，但也要顧及其施工淨高的最大需求，詳如圖 31。由圖中可看出，施工便橋由墩柱 P11 高灘地河岸較高處往 P10 施工構台逐漸降低，而施工構台的高程不僅須考量河水潮位，同時也要考量施工空間需求。因此在這種情況下，若同時遭逢高水位及大潮時，部分較低的施工便橋會被河水淹沒至構台面。



圖 31 墩柱 P10 之施工便橋及施工構台配置

本橋橋下淨高約為 5 m，使得基樁原可採用 12 m 至 14 m 長的鋼筋，大幅縮短至現有的 4 m。在淨高受限下，施工機具須配合作高度調整，以利適用於本工程，避免損及上部結構及墩柱，其施工時相片如圖 32 所示；另主筋搭接雖採鋼套環方式續接方式處理外，搭接數較一般基樁多，使得工作量增加多、施工進度較為緩慢。本工程基樁施工相片如圖 33 所示。在施工廠商努力鑽趕下，本工程基樁已順利完成相關施工作业。

施工困難

本工程為基礎補強，與新建橋梁的最大不同點為新橋沒有任何的結構體阻碍施工作业，而補強工程存在既有基礎及基樁，不僅造成施工空間受限的施工困難外，同時須於各施工階段都要小心作業，注意並避免於施工過程中造成基樁或基礎的作何損傷而發生意外。

本工程在完成水中混凝土灌注及第一階支撐加強後，逐步完成第二階支撐及第三階支撐施工，開始進行打底混凝土灌注。其中，於第三階支撐施工時，其支撐構件不僅要架設於既有基礎的下方，同時須穿過基礎下方的基樁並不損及其結構。既有基樁係採用 60 公分的矩形基樁，根數高達 32 根，因此於支撐施作及基礎鋼筋綁扎的施工作业都顯相對困難。有關執行第一層基礎鋼筋施工及混凝土灌漿及養護，如圖 34 至圖 38 所示。另第一層混凝土施工澆置完成後，將遭遇原結構基樁之短柱效應，應予以考慮，爰採用保麗龍板隔離原有基樁，以防止短柱效應發生。



淨高受限之基樁挖掘施工作业

淨高受限下之基樁套管接合施工

淨高受限之鋼籠搭接施工

淨高受限下之基樁灌注混凝土作業

圖 32 基樁施工相片



圖 33 基樁鋼筋搭接施工相片

在完成第一層基礎施工後，接者進行第二層基礎施工及混凝土灌漿及養護，則會遭遇既有基礎的存在，高度受限，同時各鋼筋主筋都要避開原有基樁，造成施工作業的困難，其施工相片如圖 39 至圖 43 所示。第二層基礎施工完成後，大致上橋墩柱已達到耐震要求的安全，接下來為墩柱的水刀清洗及第三層基礎施工及鋼板包覆。

為達到如期如質完成的施工目標，縱使基礎下方空間受限，進行基礎鋼筋施工作業長，施工團隊全力以赴，努力不懈來進行，分為二班值並施工至凌晨，其用心值得肯定。



圖 34 墩柱 P10 第一層基礎底層鋼筋施工相片



圖 35 墩柱 P10 第一層基礎上層鋼筋施工相片



圖 36 墩柱 P10 第一層基礎組模施工相片



圖 37 墩柱 P10 第一層基礎混凝土澆注施工相片



圖 38 墩柱 P10 第一層基礎混凝土養護相片

結論

國內曾完不少座橋梁的基礎補強及換底工法案例，其補強經費都相當可觀，據統計每一墩柱的換底經費約在 2,500 萬至 8,000 萬間，與其橋梁跨徑之基礎尺寸、配置等有關，但更與其施工環境、施工困難度息息相關。於河道高灘地作之補強作業，因無施工便橋、構台及圍堰等措施，其費用將可大幅減少；而於深槽區辦理施工，其中施工便橋、構台及圍堰等措施就佔據大部分費用，特別是深開挖工程。本工程在最小工程經費下完成基礎及基樁補強，相較於以往所採用的換底工法，本次



圖 39 墩柱 P10 第二層基礎鋼筋施工相片



圖 40 墩柱 P10 第二層基礎組模相片



圖 41 墩柱 P10 第二層基礎基礎混凝土澆注施工相片



圖 42 墩柱 P10 第二層基礎基礎養護相片



圖 43 墩柱 P10 水刀清洗作業相片



圖 44 光復大橋完工相片

所花費的經額較少，但同樣達到橋梁耐震補強的效果。惟施工過程中經歷了圍堰變形及河床持續沖刷等大自然無法預測之變異現象，幸好各委員專家及長官提供了實戰經驗，經由施工團隊用心施工，順利完成本基礎補強施工。日後倘若遭遇類似本橋的深開挖案例，則建議可採用勁度高的鋼管樁圍堰工法，可以支撐較深的開挖深度且安全性較高，惟其費用較為昂貴。

光復大橋若採改建新橋方式辦理，約需 30 億元的經費，且會對現有交通造成較大的衝擊。目前上部結構看起來尚屬良好，承載能力亦符合規範要求，因此本次就下部結構耐震補強方式辦理，補強經費僅需約 2

億元，補強後亦可提供新北市民安全通行橋梁。

本工程施工期間在新北市府各級長官的督導，劉賢琳、陳賜賢及葉連發委員的寶貴意見，及參與本工程之所有工作夥伴們齊心努力下，順利安全完成了本工程之基樁與基礎補強作業，特撰文將本工程的設計與施工過程作一說明，以供工程師設計施工的案例參考。

參考文獻

1. 中國土木水利工程學會，台灣土木史叢書·交通工程誌 V – 橋梁工程篇。
2. 新店溪中上游治理規劃報告，民國八十七年四月，台灣省政府水利處。

110 年 3 月 22 日 蔡總統英文接見中工會及各專門工程學會理事長

宋裕祺理事長擔任各學會理事長代表發言第一位，發言內容略述如下。

總統閣下：

我是中工會理事與土木水利工程學會理事長宋裕祺。

政府近年來積極推動綠能產業，目前離岸風電相關產業國產化目標已逐漸落實在風力機支撐結構的製造與施工，但上游工業的規劃與設計業務仍主控在國外廠商，去年開始經濟部已著手推動訂定適用於台灣工程環境的離岸風力機之調查、設計、施工與運轉等規範，對國內工程界而言意義重大。經濟部制定相關規範的作法有助於將專業技術紮根台灣，未來國內離岸風電設計、施工與運維團隊將有實際工程業績，進而可以組成國家隊以承攬國外工程，工程界除感謝也會配合政府政策，繼續往前邁進。

土木水利工程學會是亞洲土木工程聯盟的五個創始會員國之一，積極參與國際工程聯盟事宜。學會在增進國際工程技術交流、提升亞洲基礎建設與永續發展以及培育亞洲青年工程人才多有努力。此外學會在協助政府訂定工程政策或解決工程問題也扮演積極的角色，學會是結合產官學研的平台，也是政府的民間幕僚機構，總統閣下若有需學會效力之處，敬請不吝吩咐。





四、公共工程（技術服務） 現行不合理契約（或錯誤執行） 之說明及建議

社團法人中國土木工程學會、中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、泰興工程顧問股份有限公司、康城工程顧問股份有限公司、台聯工程顧問股份有限公司、邑葛工程顧問有限公司、林同棧工程顧問股份有限公司、亞新工程顧問股份有限公司、國立臺北科技大學土木工程系宋裕祺研究室

政府採購法第 6 條第 1 項規定：「機關辦理採購，應以維護公共利益及公平合理為原則，對廠商不得為無正當理由之差別待遇。」揭示辦理採購應以維護公共利益及公平合理為原則。工程會並提供政府採購契約範本予各級政府、主辦單位作為公共工程相關採購之依循。惟在執行面上，採購機關常為降低自身風險，在既有契約範本上增加不適宜之契約條款，或是因對於法規或契約條款解釋不同，衍生錯誤行為態樣，進而造成履約爭議甚至政府採購爭議調解或訴訟。工程會之「政府採購錯誤行為態樣」令（最新修正 109 年 9 月 14 日）及官方網站內的「政府採購法常見問題 Q&A」（最新修正 100 年 7 月 21 日），雖已有相當案例，但仍有不足，建議應再予以補充。

本學會經綜整工程技術服務廠商參加機關採購實務經歷，對於不適宜之契約條款或錯誤行為態樣而造成對廠商之不合理待遇，特增列本章彙列各種問題態樣，並依照問題之原因與特性，分別提出：「建議修正法規、契約範本或列入錯誤行為態樣」（詳如表 4-1）及「列入政府採購法常見問題 Q&A」（詳如表 4-2）等建議。

契約內容係由工程主辦機關所擬定，建請工程會除採納並公告表 4-1 與表 4-2 之相關建議外，更應積極邀集各工程主辦機關之承辦人員、會計、稽核部門、承包廠商、甚至政府採購相關單位，辦理研討會或研討會以宣導正確的契約條款編列方法，方能有效解決營造產業長期面對不合理契約牽制的弱勢局面。

表 4-1 建議修正法規、契約範本或列入錯誤行為態樣

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約（或錯誤執行）態樣	說明	建議
A1	技服辦法第 9 條	專案管理招標文件勞務契約之需求計畫書第貳條一項(二)款 <u>測量、鑑界及地基等調查</u>	測量、鑑界及地基等調查工作非屬技服辦法第 9 條專案管理勞務服務工作。	建議於技服辦法「附表三」及「附表四」比照「附表一」及「附表二」之附註再加註：「本表所列百分比，不包括本辦法第四條、第五條、第六條第一項第一款第二目、第二款第一目及第八條第三款至第五款服務所含工作事項之服務費用。其費用應由機關依個案特性及實際需要另行估算。」

表 4-1 建議修正法規、契約範本或列入錯誤行為態樣（續）

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
A2	技服辦法第 29 條	部分機關之委託技術服務採建造費用百分比法辦理時，在計算建造費用時要求不計入品管、勞安、及管理費。	建造費用不包括規費、規劃費、設計費、監造費、專案管理費、物價指數調整工程款、營業稅、土地及權利費用、法律費用、主辦機關所需工程管理費、承包商辦理工程之各項利息、保險費及招標文件所載其他除外費用。 不應將品管、勞安、及管理費列入排除，變相造成廠商服務費用拆減，剝奪了監造服務廠商應得之服務費用，實非公平。	建議建造費用不包括之項目應僅限「機關委託技術服務廠商評選及計費辦法」第 29 條第 2 項之規定。第 29 條第 2 項應刪除「及招標文件所載其他除外費用」，以避免招標機關任意加入不符實際之排除項目。
A3	技服辦法第 29 條	部分機關之委託技術服務採建造費用百分比法辦理時，在計算建造費用時要求機關供給材料金額不可計入建造費用內。	工程材料不論是由機關供給或由廠商自行購買，除檢驗項目外，技術服務廠商工作並無不同，且機關供給材料供工程使用，現場施工時，技術服務廠商對於機關提供材料之領用、保管、數量清點及施工品質等，仍有對應的服務項目，材料金額不可計入建造費用內，造成廠商有服務而無服務費用情形發生，實非公平。	建造費用不包括之項目應僅限「機關委託技術服務廠商評選及計費辦法」第 29 條第 2 項之規定。機關有供給材料者供工程使用，應按營建物價併入建造費用計算。
A4	技服辦法第 29 條	部分機關之委託技術服務採建造費用百分比法辦理時，在計算建造費用時，計入土方有價料扣回價差款(單價為負值)。	工程挖除土方有價料扣回價差款(負值)，施工過程監造單位仍需辦理現場抽驗與文件製作，不應將此負值併入建造費用(正負相抵)，變相造成廠商服務費用拆減，剝奪了監造服務廠商應得之服務費用，實非公平。	工程挖除土方有價料扣回價差款(負值)，該有價料扣回單項金額不應計入建造費用。建造費用不包括之項目應僅限「機關委託技術服務廠商評選及計費辦法」第 29 條第 2 項之規定。若為有價料者，其相關處理費用應單獨列項，並應計入建造費用計算。
A5	工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第三條 工程會 93.3.3「研商以「總包價法」方式辦理委託研究計畫招標採購有關事宜會議」紀錄(工程企字第 09300132120 號函)	部分機關，如 OO 署，契約計價方式採總包價法，惟仍要求廠商應紀錄各項費用並備具憑証，甲方視需要得自行或委託專業第三人至乙方處所辦理查核。 另於結算時機關要求繳回節餘款。	工程會 93.3.3「研商以「總包價法」方式辦理委託研究計畫招標採購有關事宜會議」紀錄(工程企字第 09300132120 號函)說明三，載明：「三、機關辦理專業服務採購，其採總包價法計費者，除部分項目因工作範圍及內容，有另視實際履約情形計算服務費用，且已於招標文件(包括契約稿)或契約中預為載明者外，不應要求廠商繳回節餘款及檢附所有單證。」，如提供員工薪資核對除違反個人資料保護法外，亦已誤用計價方式。	建議契約明訂採總包價法計價方式者，不應誤用服務成本加公費法之計價方式，要求廠商檢附所有單證供查核；針對總包價法工作範圍及內容明確之議定價金，不應於竣工時有繳回節餘款之情事，若有變更工作範圍及內容者，則按實際履約情形計算服務費用。
A6	工程會公共工程專案管理契約範本(109.01.15 版)第五條	某機關招標文件之契約主文第五條第一項第(五)款 總包價法或建造費用百分比法之給付：監造技術服務費用(內含施工督導與履約管理之諮詢及審查服務費用)： 第 1 期：工程進度達 20%：15% 第 2 期：工程進度達 40%：20%	施工督導與履約管理之諮詢及審查服務契約要求常駐人力，施工期間含驗收完成長達約 4-5 年，服務費卻分次(含尾款)請領，有間隔約 10 個月方能請款一期款項之實務發生，已造成廠商執行成本壓力。	建議「公共工程專案管理契約範本」第五條第五款施工督導與履約管理之諮詢及審查服務費用比照「公共工程技術服務專案管理契約範本」第五條附件 1 或附件 2 之監造服務費用部分 ■ 依工程施工進度每月請款一次 ■ 依監造進度每月請款一次

表 4-1 建議修正法規、契約範本或列入錯誤行為態樣 (續)

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
A6	工程會公共工程專案管理契約範本(109.01.15版)第五條	第3期：工程進度達60%：20% 第4期：工程進度達80%：20% 第5期：工程進度達100%：20% 所有工程驗收合格，並協助廠商完成使用執照，取得綠建築標章、智慧建築標章及無其他待解決事項：5%。 某機關招標文件之契約主文第五條第一項第(八)款(PCM專案管理總包價法或建造費用百分比法之給付)施工督導與履約管理之諮詢及審查服務費用，占專案管理服務費用80%，第1至4期：依監造階段技術服務所定進度每達成25%，給付專管階段之技術服務費第1期為15%，第2、3、4期各為20%，專管尾款：5%於各工程均驗收合格及取得必要之許可及執照後，得申請甲方各支付施工督導與履約管理之諮詢及審查服務費用之餘款。		
A7	工程會公共工程專案管理契約範本(109.01.15版)第八條	某機關招標文件之契約主文第八條四項(一)款4.目 法律、財務專業人員：各1名，大專(含以上)法律、財務等相關科系畢業且有具工程契約經驗(得兼任)	提供法律、財務服務屬專業服務，非技服辦法第9條專案管理服務工作。	建議如機關確有法律或財務服務需求，應另加計該等費用；採總包價法者則應明列該計費項目。
A8	工程會公共工程專案管理契約範本(109.01.15版)第八條	某機關招標文件之契約主文第八條第四項第(六)款 乙方應於規劃設計階段至統包招標階段，依甲方需求經指派至甲方辦公處所上班之行政助理。 另於議約當下增列提供車輛(含租賃)及油料、設備之但書情事(公告招標文件未詳載)。	機關以建造費用百分比法或總包價法辦理採購，卻要求廠商提供駐機關行政助理、車輛及其他設備等，按行政院已經以101.7.24院授主預字第1010013056號函釋，於工程或勞務採購不得於合約項目納列提供機關學校使用之車輛(含租賃)、油料等情事。 提供行政助理，非屬技服辦法第9條專案管理服務工作。	建議如機關確有需求，應另加計該等費用；採總包價法者則應明列該計費項目。
A9	工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15版)第十四條第八項第三款	工程會十二種公共工程契約範本中，最近有十一種在「權利與責任」條款下新增條文：「前訂有損害賠償金額上限者，於法令另有規定(例如民法第227條第2項之加害給付損害賠償).....，不受賠償金額上限之限制。」	此新增條文使民法第227條第2項之加害給付損害賠償不受賠償責任上限的限制。此新增條文偏離工程顧問之國際標準慣例；英國土木工程師協會(NEC)或國際工程師協會(FIDIC)等國際契約範本中均無此條款或慣例。	建議將此新增條文：「前訂有損害賠償金額上限者，於法令另有規定(例如民法第227條第2項之加害給付損害賠償) ...，不受賠償金額上限之限制。」從該11份修訂契約範本中刪除。
A10	工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15版)第十五條第五項	工程會部分契約範本已增加廠商提交變更通知的條款，惟尚有其他十餘種契約範本未增加此條款。 且部分未納入甲方對於本款各目應辦事項怠於辦理時，乙方得主動向甲方提出變更契約之請求。	政府採購機關常有變更契約之事實，卻不提出契約變更，以致廠商無法獲得提供變更契約服務之合理報酬。目前工程會公共工程技術服務契約範本已納入「甲方對於本款各目應辦事項怠於辦理時，乙方得主動向甲方提出變更契約之請求」。	建議工程會各項契約範本應比照「公共工程技術服務契約範本」均增加「甲方對於本款各目應辦事項怠於辦理時，乙方得主動向甲方提出變更契約之請求」之條文。

表 4-1 建議修正法規、契約範本或列入錯誤行為態樣（續）

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
A11	工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第十條	<p>某機關招標文件之契約主文-13.「專業責任保險」規定： 乙方執行本契約應投保專業責任險，且須提送甲方核備，並以本契約服務費總價為保險金額，所需保險費已包含於服務費內。 投保範圍應包含乙方執行本契約工作項目，保險期間應自本契約生效日期起，至契約完成日止。 而甲方得視其需要而要求延長保險期限，乙方不得拒絕，但甲方應支付乙方因延長而增加之保險費用。</p> <p>部分標案契約要求乙方比照專業責任險投保雇主意外責任險。</p>	<p>除契約變更外，對於不可歸責於乙方之事由(例：展延工期、工程停工、計畫暫停或延遲履約等)，所衍生之保險展延費用，由乙方負擔並不合理。</p> <p>大型計畫(例如捷運或鐵路地下化計畫)，部分主體工程已完工營運，常因追加之零星工程尚未結案或因不可歸責於廠商之事由致須延長履約期限，廠商為符合契約約定，致必須延長專業責任險之投保，此延長投保常為全計畫之服務(包含已完工營運標案)，但其增加之保費，機關不願支付。</p> <p>「公共工程技術服務契約範本」第十條第二款並未分別載明二項保險之保險金額及自負額，業主常以契約約定之專業責任險保險條件，要求雇主意外責任險比照辦理，致產生履約爭議。</p>	<p>建議除甲方得視其需要而要求延長保險期限外，如有因延期或遲延履約以致保險須辦理順延者，且非屬乙方責任，保險展延所增費用亦由甲方負擔。</p> <p>建議修改「公共工程技術服務契約範本」第十條第八款為「本契約延長服務時間時，乙方應隨之延長專業責任保險之保險期間。因不可歸責於乙方之事由，致須延長履約期限或有工程停工、計畫暫停或遲延履約等情事，因而增加之保費，由契約雙方另行協議其合理之分擔方式。」</p> <p>另建議「公共工程技術服務契約範本」第十條增加第十一款「若工程各標案結算後，該標案之保險得予解除」，否則機關應給付增加之保費。</p> <p>建議修改「公共工程技術服務契約範本」第十條第二款，應分別提供各險種之保險內容，以供機關完整載明。</p>
A12	工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第二條及其附件	<p>某機關招標文件之契約「服務範圍」常見：「乙方辦理本技術服務工作範圍應涵蓋所有與本工程有關之基本設計及詳細設計...以下<u>乙方工作範圍項目說明時如有遺漏者，仍屬乙方服務範圍</u>」或「<u>乙方工作項目應包括但不限於下列各項：...</u>」。</p>	<p>契約『訂價清單』一般會詳細逐項羅列乙方工作項目及對應之服務費用；但甲方常要求乙方辦理不屬於契約「服務範圍」或『訂價清單』所列之工作項目，而乙方要求追加服務費用時，甲方有些承辦人員常以前述契約規定；「...如有遺漏者，仍屬乙方服務範圍」或「乙方工作項目應包括但不限於下列各項」為由，駁回乙方請求。</p> <p>甲方若未於契約明訂工作範圍，要求所有不確定風險(甲乙雙方簽約前均無法預知或契約未明載之工作項目)均要求由廠商承擔，有違契約公平合理原則，日後恐難避免履約爭議。</p>	<p>機關訂定契約工作項目時應參照工程會公共工程技術服務契約範本第二條之附件，均有明確勾選之服務項目，其他與規劃、設計及監造有關之技術服務均應於招標時載明。</p> <p>建議應將「以下乙方工作範圍項目說明時如有遺漏者，仍屬乙方服務範圍」或「乙方工作項目應包括但不限於下列各項」等不明確之工作範圍或工作項目列為錯誤採購態樣。</p>

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
B1	政府採購法常見問題 Q&A .一(共通性部分).十 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)	採購機關所公告之招標契約文件未依工程會核頒之契約範本逕自修改,且內容顯有不利於廠商之情形者。	工程會公共工程技術服務契約範本以外之契約要求。經招標階段之疑義澄清,採購機關仍未修改者。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」一(共通性部分).十之一： 【問題】採購機關所公告之招標契約文件,雖由工程會核頒之契約範本加以修改,惟廠商認為顯有不利於廠商且有違契約公平合理原則,經疑義澄清,採購機關能否堅持不合理之約定? 【答案】廠商向工程會申訴,若經判定確有不利於廠商且有違契約公平合理原則時,採購機關應暫停招標作業,重新修改及公告。
B2	政府採購法常見問題 Q&A .一(共通性部分).十一	招標文件規定主要部分不明確,甚至以概括方式將全標案名稱定為主要部分。	機關如於招標文件標示主要部分或應由得標廠商自行履行之部分過於空泛或廣泛,可能導致乙方自行履行困難,尤其將部分工作分包即有造成轉包之疑慮。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」一(共通性部分).十一之一： 【問題】機關於招標文件能否規定全標案名稱為主要部分? 【答案】為免造成轉包之疑慮,機關應以實際工作項目區分主要部分。如一般工程技術顧問公司不會具有鑽探、測量、檢測等設備與人力,不應將該等屬一般技術服務廠商非能力範圍內之工作列為主要部分。
B3	政府採購法常見問題 Q&A .一(共通性部分) 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第二條附件 2	招標文件規定工程監造廠商應辦理公共管線之會勘、遷移及規劃協調,並主動協商及提出解決辦法。	乙方於公共管線事務應是扮演協助會勘協調之角色,惟甲方往往責成乙方代為函文管線單位參與各項管線事務,因監造單位非主管公務機關,逕行函文予管線主管機關,常造成諸多協調不便。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」一(共通性部分).二十 【問題】公共管線之會勘、遷移及規劃協調係由機關辦理?亦或由廠商辦理? 【答案】公共管線之會勘、遷移及規劃協調本於權責,應由機關主辦,並請廠商協辦。
B4	政府採購法常見問題 Q&A .二(採購部分).二十 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第二條附件 2	招標文件規定驗收合格後,監造廠商應依承包商提交之竣工文件彙整製作完整竣工文件(含竣工圖原圖乙份、裝訂成冊之 A3 縮印圖 5 份、竣工圖數位資料 5 份(含圖目錄)、相關竣工數位資料 5 份(開竣工、變更、展期及驗收紀錄等文件)、竣工數量計算書數位資料 5 份)送甲方存檔。	依權責分工表,竣工文件彙整製作應屬承包商應辦事項,監造單位為審查責任。 若由監造單位製作竣工圖將成無審查機制,且違反權責分工表之約定,故應明確定義而非由採購機關自行規定。	建議修正「政府採購法常見問題 Q&A」二(採購部分).二十 【問題】工程竣工圖說係由施工廠商繪製?亦或由監造廠商繪製? 【答案】為落實審查機制,應依「公共工程施工階段契約約定權責分工表」之規定,由承包商負責製作,交由監造單位審查後提送工程主辦機關。
B5	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分).八 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第四條	招標文件契約工作範圍規定,招標階段如發生流標、廢標等重新招標或分標工作,廠商必須配合辦理招標文件重新修訂及相關工作,並不得要求增加額外服務費用,所需之費用已包含於本項技術服務工作總價內。(如非可歸責乙方之原因,並經甲方同意者除外。)	乙方所製作之預算及招標文件均經甲方審查同意後才會公告招標,流標或廢標原因會有多种,不應將責任僅歸責於乙方。由於重新招標或分標工作,廠商須投入大量人力重新辦理工程招標文件,若採購機關未能給付廠商此增加之工作費用,已違反「公共工程技術服務契約範本」第四條第七款第(三)目之約定。又若契約雖註明「非可歸責乙方之原因,並經甲方同意者除外」,但該原因仍須經採購機關同意,此單方面之認定也常造成履約爭議。	建議修正「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分).八： 【問題】機關委託技術服務廠商辦理工程之技術服務,已經設計完成,但因政策變更、招標階段發生如流標、廢標等重新招標或分標工作及其他不可歸責於廠商之事由,機關要求技術服務廠商依不同之條件重新設計,其服務費用如何處理? 【答案】依「機關委託技術服務廠商評選及計費辦法」第 34 條規定:「廠商因不可歸責於其本身之事由,應機關要求對同一服務事項依不同條件辦理多次規劃或設計者,其重複規劃或設計之部分,機關應核實另給服務費用。但以經機關審查同意者為限」。

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A（續）

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約（或錯誤執行）態樣	說明	建議
B6	政府採購法常見問題 Q&A 四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本 (109.01.15 版)第四條	設計完成後甲方遲遲不予核定，但仍要求繼續後一階段工作(例如：基本設計不核定但要求乙方進行細部設計工作，或細部設計成果不核定，卻依據設計成果辦理發包)。	此現象經常是甲方欲保留後續變更之彈性，卻不願支付於設計核准後再辦理變更之服務費用。此做法顯然是要避開公共工程技術服務契約範本」第四條第七款第(一)目之約定，但卻常造成履約爭議。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分).八之一： <u>【問題】機關對於階段性之設計成果遲遲不予核定，是否能要求廠商依據未核定之成果進行下一階段工作？</u> <u>【答案】當機關要求廠商依據設計成果進行後續工作時，無論機關是否行文正式核定，均應視為前面之設計成果已核定。</u>
B7	政府採購法常見問題 Q&A 四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本 (109.01.15 版)第四條	招標文件規定各分標工程因變更設計、展延工期所衍生之服務期限延長， <u>乙方不得要求增加任何費用。</u> 招標文件規定如增加監造服務期間，不可歸責於乙方之事由者，應依下列計算式增加監造服務費用： 甲：(超出『工程契約工期』之日數 - 因乙方因素增加之日數) / 工程契約工期之日數 × (監造服務費) × (增加期間監造人數 / 契約監造人數) 工程契約工期：指該監造各項工程契約所載明之總工期 招標文件規定各分標工程如增加契約工期之日數，不可歸責於乙方之事由者，應依下列計算式增加監造服務費用。 (超出工程契約工期之日數-因乙方因素增加之日數) / 工程契約工期之日數 × (監造服務費) × (增加期間監造人數 / 合約監造人數) × <u>【60】%</u> 超出工程契約工期之日數：係經甲方核定之展延日數， <u>不含停工、免計工期</u> 招標文件規定工期展延致監造期程增加： 增加之監造服務費總金額 = <u>【本契約第七條第一項原訂服務費總金額 × (監造展延人月數 - 原定監造期程人月數) / (服務建議書內總人月數) × (0.1) / 原定監造期程人月數 (服務建議書內總人月數)】</u>	工期展延非乙方所造成，不增加費用顯不合理。 部分機關依「增加監造服務費用」算式字面解釋，『工程契約工期』 = (工程契約履約工期日數 + 工程契約不計工期日數 + 甲方書面同意延長工程履約期限)分子跟分母的工程契約工期是一樣的，表示監造服務費無法因工期展延延長服務期限而增加，顯非合理。 1. 該條款之展延期間監造服務計算採 6 折計之規定，既非勞務契約範本制式條款，且展延期間所為監造作業(含人數)並無得縮減情形，故 6 折計算展延費用顯非合理。 2. 展延日數排除免計工期，亦屬不合理情形，因機關就因天候(如颱風或豪雨等素)所造成工地影響均採免計工期計，惟該期間，監造仍需就工地安全、防汛防颱巡檢等並無免責；就施工廠商所提免計工期申亦負查證及審查之責，故排除免計工期之監造服務費，顯非合理。 3. 監造服務並非以承攬方式工作，契約多規定工程進行中應駐地。故即便現場因故未施工，監造廠商人員仍須在現場工作，且亦有內業作業、工地巡查等工作須辦理，並非因此未有成本支出。 逾期完工之工期展延增加監造服務費用扣除原訂契約總人月數 10% 不合理。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分).二十一： <u>【問題】履約期間遇有不可歸責於乙方之情形，而有超出工程契約規定施工期限，其增加之監造及相關費用應如何計算？</u> <u>【答案】機關應恪遵「公共工程技術服務契約範本」第四條第九款之規定計算增加之監造服務費用。其中「工程契約工期」為該監造各項原工程契約所載明之總工期，不應將「停工」、「免計工期」、「甲方書面同意延長工程履約期限」計入；更不應將增加之監造服務費用予以打折計算。</u>

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A (續)

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
B7	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第四條	<p>招標文件規定逾期完工致監造期程增加： 增加之監造服務費總金額=$【本契約第七條第一項原訂服務費總金額 \times (監造工程標逾期增加之監造人月數 - 原定監造期程人月數) \times (0.3) / 原定監造期程人月數(服務建議書內總人月數) \times (0.3) / 原定監造期程人月數(服務建議書內總人月數)】$</p> <p>契約無規定因展延工期行增監造費用之條款。</p>	<p>逾期完工之工期展延增加監造服務費用扣除原訂契約總人月數 30% 不合理。</p> <p>應依照工程會勞務契約範本，明列有增加監造費用之條款或計算公式，方屬合理。</p>	
B8	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第五條附件 2	<p>招標文件規定契約價金之給付條件 (三) 監造服務費部分： 1.，且依各標工程施工估驗進度達 30%，並完成估驗付款，廠商得向機關申請給付該標工程監造服務費之 30%。 2. 依各標工程施工估驗進度達 60%，完成估驗付款，廠商得向機關申請給付該標工程監造服務費之 30%。 3. 並於本案完成結算驗收且無待解決事項後付清該標監造服務費用尾款。</p> <p>招標文件規定工程各分標工程核准開工後，以每 2 個月辦理 1 次估驗計價為原則，乙方依監造組織所述人員進駐工地執行監造工作，經甲方審定後(檢附指紋機差勤紀錄表)，撥付當期服務費。 當期服務費付款額度依下列公式計算：服務費 \times (各分標工程於該 2 個月中估驗計價核發金額合計金額(分拆成 2 項預算科目之估驗金額) / 服務範圍內 2 項預算科目所代表之各別施工費預算金額) $\times 90\%$。(若各分標工程有辦理部分驗收時得就已完成之部分驗收部分依上述規定辦理計價工作)。</p>	<p>三階段設門檻給付較容易受廠商延遲估驗而無法按預計時程請款，造成廠商現金流不足調度不及的困擾，改為按每月估驗乙次，可增加廠商現金流，減少虧損。</p> <p>契約條款內容所述為核發金額，為刮號內文字又為估驗金額。其核發金額為估驗金額之 95%，當期監造服務費又為該核發金額之 90%，故當期監造服務費為估驗進度 $= 0.95 \times 0.9 = 0.855$，故工程竣工後之監造保留款 $= 0.095\%$，將近 1 成保留款較不合理。</p>	<p>建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十二： <u>【問題】監造服務費之給付期程如何決定?若按施工估驗進度給付，每期給付是否均應扣除保留款?</u> <u>【答案】機關應按「公共工程技術服務契約範本」第五條附件 2 之規定，廠商得每月請款一次；若依工程施工進度請款，每期所扣保留款不應大於 5%。</u></p>
B9	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分) 工程會公共工程專案管理契約範本(109.01.15 版)第七條	<p>招標文件規定： 「本案履約期限自簽約日起，至機電系統竣工及結案報告經機關驗收合格且無待解決事項止。」</p>	<p>1. 甲方所訂之服務契約未明確註明履約期限，僅概略表示需迄至機電系統竣工及結案報告經機關驗收合格且無待解決事項止。 2. 鑑於影響履約期限因素當中非可歸責乙方之事由甚多，如統包工程用地取得延滯、民眾陳情造成無法進場...等 3. 為減少甲方對於履約期限之認定所造成之爭議問題，建議於契約中明訂「計畫案件或工程預估期程」，避免可能造成之履約爭議。</p>	<p>建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十三： <u>【問題】機關對於廠商履約期限如何訂定方屬合理?</u> <u>【答案】鑑於影響履約期限因素當中非可歸責乙方之事由甚多，如統包工程用地取得延滯、民眾陳情造成無法進場...等均會導致機關驗收合格日期延宕無期，為減少履約期限認定造成爭議，應於契約中明訂「計畫案件或工程預估期程」。</u></p>

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A（續）

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約（或錯誤執行）態樣	說明	建議
B10	<p>政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)</p> <p>工程會公共工程技術服務契約範本 (109.01.15 版)第八條</p>	<p>招標文件規定監造工作期間應派駐具公共工程品質管理訓練結業及工地主任結業證書之監造主任 1 名，專職常駐工地，綜理所有工程監造工作，應為大學以上土木、建築、營建、工程相關科系畢業，並具土木建築或相關工程設計、施工或監造工作，累積經驗至少 15 年以上，監造主任請假應派代理人。</p>	<p>應為機關承辦人員對於營造管理人員與監造人員之資格條件產生混淆所致，在營造業法第 30 條「營造業承攬一定金額或一定規模以上之工程，其施工期間，應於工地置工地主任」及第 31 條「工地主任應符合下列資格之一，並另經中央主管機關評定合格或取得中央勞工行政主管機關依技能檢定法令辦理之營造工程管理甲級技術士證，由中央主管機關核發工地主任執業證書，始得擔任...」，有工地主任之資格及設置之規定，而目前公共工程相關法規均無監造單位須由具有「工地主任」資格者擔任監造主管之規定，各顧問公司聘僱之監造人員也不會以具工地主任資格者為其條件。</p>	<p>建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十四： 【問題】機關對於廠商派駐工地之監造主任資格是否可以要求具有工地主任執業證書擔任？ 【答案】僅在「營造業法」第 30 條有工地主任之資格及設置之規定，而廠商之監造主任所賦予之任務與工地主任不同，監造人員資格不應以具工地主任資格者為其條件。</p>
B11	<p>政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)</p> <p>工程會公共工程技術服務契約範本 (109.01.15 版)第八條</p>	<p>招標文件規定監造駐地人員及建築資訊建模(BIM)作業負責人於施工監造及驗收期間專任常駐工地。</p>	<p>業主辦理驗收期間無法預估，且規模較大工程，驗收期間可能長達半年至 1 年間，該期間並無太多 BIM 模型檢討與建模作業，將造成人員閒置且亦無法調動。</p>	<p>建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十五： 【問題】工程竣工後之驗收期間，機關是否得要求廠商人員常駐辦理結算及驗收等相關事宜，直至工程驗收完成止？ 【答案】工程驗收時間，因工程性質及機關作業要求不同，實際所需時程難以確定；因此工程竣工後，廠商得以部分人力配合辦理工程結算，若機關有此人力常駐要求，則應依廠商實際駐地之人月數量，另按實給付服務費用。</p>
B12	<p>政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)</p> <p>工程會公共工程技術服務契約範本 (109.01.15 版)第八條</p>	<p>招標文件規定監造組織應與投標時所提服務建議書中所列之現場常駐監造負責人(或計畫經理)、監造副理、主任、專職常駐工地監造現場人員、專業技師、顧問等人員、資格相符；如經檢討必需調整時，乙方應於人員異動前 15 日曆天內，將人力調整計畫主動向甲方提報並經同意(或備查)後辦理；但變動總數以不超過服務建議書所列監造組織 [三分之一] 為原則(除有人員離職或經甲方通知撤換等不可抗力經甲方同意者不在此限)，否則依第二十二條罰則規定辦理。</p> <p>招標文件規定監造組織內人員應由原服務建議書所列人員依工程進度及監造需要編訂人力配置計畫，不得任意變更。但經甲方、乙方雙方在等同條件原則下協議變更者得調整之，該等同條件之認定，應以學經歷、證照、及人員月數條件為綜合衡量(依甲方所訂</p>	<p>服務建議書為競標階段所提資料，考量與工程發包時程差異甚久，服務建議書所列人員未必能夠配合工程發包時程進駐，甚且已經離職，且契約規定變動總數以不超過三分之一為原則，違者以契約罰則規定辦理，確有執行上之困難。</p> <p>契約規定變動總數不得超過監造組織人員之三分之一，較不合理。</p>	<p>建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十六： 【問題】機關能否限制廠商依服務建議書中所列之常駐監造人員，其變動總數不得超過監造組織之一個比例(如：1/3)，違者以契約罰則規定辦理？ 【答案】機關不得限制廠商更換監造人員及其數量，惟廠商監造人員經檢討必需調整時，可要求更替人員之條件不得低於原服務建議書所列人員，更不應以契約罰則處理。</p>

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A (續)

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
B12	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第八條	評分表做為評定標準，更替人員分數不得低於原服務建議書所列人員；離職或不可抗力及因甲方需求調整等因素除外(需檢附相關證明文件)；惟更替人員分數仍需達甲方要求標準。如經檢討必需調整時，乙方應於人員異動前 7 天內將人力調整計畫主動送交甲方審查，經核定後始得變更；但變動總數不得超過監造計畫所列監造組織人員之三分之一(離職或不可抗力及因甲方需求調整等因素除外(需檢附相關證明文件))		
B13	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分) 工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)第十六條	招標文件規定停工期間甲方不給付服務費用，乙方應視工地狀況留駐必要人員，連續停工超過 3 個月或累計停工超過 6 個月者，甲方得就超過部分核實給付【1】人薪資、監造辦公室租金、水電費及電話費。	依該條款，停工期間，乙方應視工地狀況留駐必要人員，惟須待連續停工超過 3 個月或累計停工超過 6 個月等情形，始得請領超過部份之實支款項，亦非合理條款。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十七： 【問題】 <u>停工期間，廠商監造人員是否仍應留駐工地？</u> 【答案】依據「公共工程技術服務契約範本」第十六條第九款，因非可歸責於廠商之情形而造成停工時，廠商得要求機關部分或全部暫停執行監造工作。但如機關要求廠商必須留駐監造人員時，甲方仍應依契約範本所訂增加監造服務期間之服務費用計算公式計算給付費用。
B14	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)	招標文件規定乙方辦理勘查、測量、協調及會勘...應使用甲方開發「工程管理 APP」對監造案件進行現況拍照(含督導及查驗項目)並立即上傳作為監造佐證資料，辦理所需費用已含於第四條第一項之服務費內；此外，倘若未依前述立即辦理拍照上傳且無適當理由者，應扣罰個案服務費(含勘測設計及監造)總額百分之十計處懲罰性違約金。	本項與工程品質無直接關聯，僅為工地訊息之回應，採取重罰總額百分之十，與契約目的無關聯性，明顯不合比例。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十八： 【問題】 <u>契約罰則或涉懲罰性違約金者其金額及比例應如何方屬合理？</u> 【答案】依工程會公共工程技術服務契約範本(109.01.15 版)或公共工程專案管理契約範本(109.01.15 版)針對違反項目有其對應之罰款金額，如未出席會議或主持會議，每人每次罰款新台幣 5 千元，惟應考量罰款之比例原則，及懲罰性違約金以其契約總額 20%為上限。
		某計畫招標文件規定施工廠商因違反環保、環評(差)、職安、水土保持、水利法及相關法規，致使甲方遭受相關主管機關罰款時，且屬可歸責為乙方之過失，或乙方未確實督導廠商執行工程契約規定工作所致者，乙方除督導施工廠商繳交罰款及辦理善後事宜外，每件扣款案件處以該扣款之 10%處分，並於當期計價中扣除。	該計畫之四標土建標總金額即超過 160 億，監造契約僅 3 億有餘，原罰則不符比例。	
		招標文件規定乙方執行監造工作，應督導施工廠商確實建立施工人員管制機制，並確實依工程契約規定督導， <u>施工廠商施工人員未參加勞保，經甲方或有關機關發現，乙方應受連帶處分</u> ，每次懲罰性違約金	監造對於承商職安衛事項應屬督導責任，如查監造確有督導缺失始受連帶處分。	

表 4-2 建議列入政府採購法常見問題 Q&A（續）

項次	依據法令或工程會發布招標相關文件及表格	現行不合理契約(或錯誤執行)態樣	說明	建議
B14	政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)	新臺幣 3,000 元；施工廠商使用非法外國籍勞工，經甲方或有關機關發現，乙方應受連帶處分，每次懲罰性違約金新臺幣 30,000 元。		
B15	公共工程施工階段契約約定權責分工表 政府採購法常見問題 Q&A .四(勞務採購部分)	招標文件規定乙方執行監造審查施工工程文件涉及疑義解釋、合約價金、工期等重要工程履約文件，應於 3 日內審查回覆，其餘文件亦應於 5 日內提出審查意見。乙方作業延滯經甲方通知改善次數逾 3 次者，自第 4 次起每次以新臺幣 2 仟元計算品質缺失懲罰性違約金。	1. 依工程種類、規模、工法難易度不同，工程技術文件所需審查時間差異甚大，若審查時間過短，恐無法確實審查，反造成品質及履約爭議。 2. 疑義澄清係需要與設計單位不斷溝通，若確實有窒礙難行之處，亦需討論改善方案，僅限 3 日回復，實務上難以達成。	建議新增「政府採購法常見問題 Q&A」四(勞務採購部分)二十九： 【問題】 廠商文件審查完成期限如何訂定方屬合理？ 【答案】 約定廠商審查文件之時間，應依工程規模及其特性合理訂定，並建議以工作天計算（即應扣除國定例假日）。例如：計畫書審查(10 天) / 審定(7 天)、解釋合約、圖說與規範(辦理 7 天) / 審查(5 天)，尚屬合理；惟亦應考量當次審查標的之內容與規模，合理放寬期限，如解釋合約、圖說與規範可視情形調整為(辦理 10 天) / 審查(10 天)。

社團法人中國土木水利工程學會與業界共同研議「公共工程技術服務費用編列建議」(B)

五、採用基本費率進階法 計算設計服務費用

各項公共工程合理設計人力與設計服務費用之編擬與討論

合理的設計服務費用取決於以下因素：

- (A) 合理的各級人月單價；
- (B) 對應的設計人月數量。

有關 (A) 各級人月單價部份應依上期（「土木水利」第 48 卷第 1 期第 65 頁表 5）所列數據為準；至於客觀估算 (B) 所需設計人月數量，實務上存在下列困難：

- (1) 規劃設計工作涉及作者之思考與判斷，所需實際人力與工時會依工作特性、工作者之經驗、公司以往投入的研發成本等因素而有所不同，亦即所需各級人力之人月數量會隨著廠商人力經驗、人力素質、

廠商以往投入在技術開發的成熟度等都會有所不同，各廠商之估算結果很難一致。

- (2) 除較大型計畫可採調專方式專案執行，設計人數量比較可以確認外，一般計畫服務期間設計工程師並非全時參與，而是配合進度需求適時提供服務，在編列設計預算時，若採用較詳細之工項及工作人時估算服務費，其難度較高。

本案所舉 36 個設計案例的合理設計服務費用與所需各級設計人力數量係由多家工程顧問公司彙整其曾經執行過的案例，儘量排除上述 (1) 與 (2) 之問題，並針對各個案例之特性與各公司的人力編制所編列，可以供為未來類似工程設計服務費用編列之參考。

建議五：設計服務費採用基本費率進階法計算並新增工程規模分級與對應的設計費率百分比

目前以人月單價計算設計服務費用的問題大致有下列數端：

- (1) 採人月計算之案例較常發生於世銀、亞銀、JEICA 等國際性貸款援助之計畫，契約中會規定各專業工程師之年資、經驗及有多少設計人月來完成應辦之設計。惟此類計畫執行的特色在於設計工作需於當地國執行，亦即設計工程師必須派赴於業主辦公室執行設計工作。由於業主提供之人月單價高且能實質掌握參與設計人員所用之人月數，故採此工作人月計算服務費方式確實能有效執行。
- (2) 人月單價法能成功執行之關鍵在於期程確定且設計工程師能專職在此計畫。但目前國內各設計計畫執行方式，除較大型計畫可採調專方式專案執行外，一般計畫服務期間設計工程師並非全時參與，而是配合進度適時提供服務；加上設計工作常有無法預期之工作量，如契約工作範圍有「其他相關工作」所衍生之工時，乙方均得承擔。因此機關在編列設計預算時，若採用較詳細之工項以工作人時估算服務費，其難度較高。
- (3) 有些標案在投標時，常會要求技術服務投標廠商提出人力估算表，於評選時評估其費用之合理性，但此一前提是以公告預算及技術服務廠商自己之組織及成本結構，依其提供之最佳服務所作之估算。若無此前提，估算出之費用將因工程師實務經驗不同而會有明顯之差異。
- (4) 就設計案件而言，主辦機關僅會要求某些特定資格人員參與設計及明定不同階段成果提交時間作為進度之管控，但不會限定全時投入設計工作，也不會盤點實際投入之人力，因此以工作人月法計算服務費確實有執行上之難度。
- (5) 對於尚未建造工程的設計預算編列，在未知合理執行費用的情況下，一來各廠商各級人力之人月單價並不相同，二來所需各級人力之人月數會隨著廠商人力經驗、人力素質、廠商以往投入在技術開發的成熟度等都會有所不同。此外在工程設計執行時，設計人員大多身兼數職，除其主辦案子外尚須支援其他案子，設計階段之人力浮動，

導致人時估算不易，此種實際執行過程是影響無法準確計算人月數的關鍵之一。因此在人月單價與人月數均為變數且無法精確掌握的情況下，廠商之報價資料會以其主觀經驗為基礎，無法符合普及通用之原則，此為以人月單價計算設計服務費用之困難點之一。

- (6) 對於同一件工程之規劃設計工作，不同廠商的編列基準與考量會有所不同，主辦機關對計畫需投入之人力與廠商之認知也會不同，若無參考預算，不同人所提供的報價資料有可能南轅北轍，工程主辦機關預算編列人員在從事初期預算編列工作時，將會無所適從。
- (7) 規劃設計工作涉及作者之思考與判斷，所需實際人力與工時絕對會依工作特性、工作者之經驗、公司以往投入的研發成本與公司人力薪資之差異等因素而有所不同，制式化的人力 break down 方式比較適用於勞務型人力之編列，對於設計人力無法完整達到準確預算編列的目的。

鑑於上述種種困難，以建造費用百分比法計算設計服務費，仍不失為一簡便快捷方式。惟設計服務之計費方式採用建造費用百分比法時，現行之基本費率並無法反映工程類別、期程、特殊性等產生之服務成本差異，實際使用尚有不足。為考慮實際工程狀況，本案提出**基本費率進階法**以建構符合各類型工程技術服務之費率，並就其中各項因子一一加以說明。

建議五：設計服務費採用基本費率進階法

(1) 設計技術服務費

$$= \text{建造費用} \times \text{基本費率} (\%) \\ \times A \times B \times C \times D \times E \times F$$

(2) 同時搭配新增工程規模分級與對應設計費率百分比。

以上，基本費率 $\times A \times B \times C \times D \times E \times F$ ，即所謂「**基本費率進階法**」。

此外，考慮現今工程越趨複雜，建造費用日益龐大，動輒數十億元，目前之建造費用百分比法費率在建造費五億元以上時採單一費率 3.2%，應再細分；若採用本案提出之基本費率進階法，經實際案例顯示，調整因子可能產生超大型工程過高之設計服務費，因此建議設計及協辦招標決標之服務費率，五億元以上

可再分割成兩個建造費用級別：超過五億元至二十億元部分、及超過二十億元部分，其分級及對應百分比法建議如表 5-1 所示。

表 5-1 增修公共工程（不含建築物工程）技術服務建造費用百分比法之基本費率（設計及協辦招標決標之服務）

建造費用（新台幣）	服務費用百分比（%）
	設計及協辦招標決標
五百萬元以下部分	五·九
超過五百萬元至一千萬元部分	五·六
超過一千萬元至五千萬元部分	五·〇
超過五千萬元至一億元部分	四·三
超過一億元至五億元部分	三·六
超過五億元至二十億元部分（新增）	三·二
超過二十億元部分（新增並調降）	二·九

設計基本費率進階法說明

機關編列工程技術服務費預算時，建議採用基本費率進階法計算，可依工程各項特性予以考量，以下提出進階法說明及各因子屬性與具體數值。

A = 工程類別調整因子

依據不同工程類別訂定調整因子如表 5-2：

表 5-2 設計基本費率工程類別調整因子：A

工程類別	A 因子	說明
橋梁工程	1.10	跨河海景觀橋，主跨徑大於 150 m
	1.00	其他
道路工程	1.05	含交流道之高、快速公路
	1.00	其他
隧道工程	1.00	
水利工程	1.10	堰壩工程
	1.00	其他
水土保持工程	1.00	
港灣、碼頭工程	1.00	
機場工程	1.10	塔台及附屬工程
	1.00	其他
捷運及鐵道工程	1.15	高架含車站
	1.15	地下含車站
	1.15	維修機廠
	1.00	地面及其他
環境工程	1.05	污水處理廠
	1.00	其他
電力工程	1.20 ~ 1.30	核能電廠，含除役、核廢料貯存或處置場
	1.10	離岸電廠、離岸變電站
	1.00	其他
結構補強	1.10 ~ 1.20	
特殊構造或用途	1.10 ~ 1.30	
小規模工程	1.10 ~ 1.30	
其他	1.00 ~ 1.10	依工程之複雜性或多樣性決定

B = 設計期程調整因子

工程技術服務之主要成本來自於人力成本、事務費及管理費等；工程有營建物價指數調整，但技術服務提供者之薪資亦隨年資與經驗之累積而增加，加上辦公租金、水電與物價每年均會增加，此變動因子與營建物價指數並無一定關係。以目前工程期限常達數年或十數年之久，所造成之計畫成本逐年增加，建議依計畫開始至所有工程標案發包完成之主要設計期程訂定調整因子，建議如表 5-3：

表 5-3 設計基本費率主要設計期程調整因子：B

主要設計期程 n（計畫開始至所有工程標案發包完成之時間，年）	B 因子	說明
1 年	1.000	考慮設計之工作量平均分配於主要設計期間，除第一年工作量之服務費不調整外，剩餘工作量之服務費每年調整 3%，計算公式如下： $B = 1 + 0.03 \left(n - \frac{\sum_{i=1}^n i}{n} \right)$ 其中 n 為主要設計期程（由計畫開始至所有工程標案發包完成之時間，以年為單位，取整數）
2 年	1.015	
3 年	1.030	
4 年	1.045	
5 年	1.060	
6 年	1.075	
7 年	1.090	
8 年	1.105	
9 年	1.120	
10 年	1.135	

C = 區位性調整因子

工區若位於都市計畫區因受都市計畫相關法規之要求，除需辦理都審外，設計期間配合各地區協調會、說明會均需額外人力辦理，加上周邊交通之維持計畫與地下管線複雜度等均會增加設計人力成本，因此區位性調整因子建議如表 5-4：

表 5-4 設計基本費率區位性調整因子：C

區位性	C 因子	說明
非都市計畫區	1.00	
都市計畫區	1.05 ~ 1.20	依工區所在位置參考下面兩點訂定：(1) 周邊建物或人口密集度；(2) 地下管線密度與施工困難度。密度高或困難度高者調整因子大、密度低或困難度低者調整因子小。
國家公園範圍內或區位偏遠之工程	1.05 ~ 1.10	

D = 專業整合性調整因子

不同專業間之協調整合是工程設計過程中常面臨最困難之事，工程專業愈多愈需要較多之介面整合人員，以目前工程技術服務契約常要求提供服務之廠商應具備不同類科之技師辦理簽證，所需技師類科愈多，顯示工程專業領域愈廣，整合困難度也將提高，因此以實際或契約要求簽證之專業技師類科數（不含測量工作與地質鑽探報告所需之簽證技師）即可決定專業整合之複雜性，建議專業整合之調整因子如表 5-5：

表 5-5 設計基本費率專業整合性調整因子：D

專業整合性 (專業技師類科需求)	D 因子	說明
1~3 類科	1.00	
4~6 類科	1.03	
7~9 類科	1.06	
10 類科及以上	1.10	

E = 特殊性調整因子

有些工程設計較為特殊，國內工程技術顧問公司或技師事務所較缺乏經驗與實績，需要國外顧問公司參與，以其契約要求參與程度訂定特殊性調整因子如表 5-6：

表 5-6 設計基本費率特殊性調整因子：E

特殊性 (國外廠商參與程度)	E 因子	說明
無此需求	1.00	
分包商 (不需實績證明)	1.05	
分包商 (需實績證明)	1.15	
共同投標廠商 (非代表廠商)	1.25 ~ 1.35	依國外廠商參與比例決定
共同投標廠商 (代表廠商)	1.40 ~ 1.50	依國外廠商參與比例決定

F = 機電工程佔比調整因子

由於機電工程之管線設計占比極大，且系統上下游互相影響、牽涉界面廣、數量繁多，設計工作耗時費工，又因管線單價偏低，僅以工程造價計算技術服務費無法反應實耗工時；另機電工程師之薪資往往高於其他領域之工程師，機電工程師參與人數愈多，提供技術服務廠商之成本也愈高，因此以機電工程費用所佔全工程費用之比例訂定工時與薪資差異之調整因子如表 5-7：

表 5-7 設計基本費率機電工程佔比調整因子：F

機電工程佔全工程之比例 (以工程費用計)	F 因子	說明
10% 以下	1.00	
10% ~ 30%	1.05	
30% 以上	1.10	

以 36 個設計實際案例分析比較

本節依據國內數家顧問公司聯合提供 36 個設計工程案例做統計及驗證。各案例簡要說明如表 5-8。

表 5-8 36 個設計實際案例簡要說明

工程編號	工程名稱	工程概述
設 1- 橋梁工程 A	舊寮溪丸山六路橋新建工程設計	冬山鎮轄內各道路橋梁改善、維修、補強等相關工程之設計、監造工作。災修案子小而多，付出之人力與服務費無法等量
設 2- 水土保持 A	豪雨災害修復工程	
設 3- 水利工程 A	抽水站擴建工程	
設 4- 橋梁工程 B	宜蘭林寶春與黃德記排水橋梁改建工程	本計畫配合護岸改善工程，拆除原有橋梁原地重建，黃德記排水共計改建七座橋梁，林寶春排水亦共計改建七座橋梁
設 5- 橋梁工程 C	台東開封橋新建工程設計	橋梁及排水工程
設 6- 橋梁工程 D	橫山鄉台 3 線銜接 120 線橋梁新建工程設計	橋型：鋼桁架橋 140 M 橋寬：10 M 引道長：18 M + 36 M 橋長：18 M + 140 M + 36 M 最大跨度：140 M
設 7- 橋梁工程 E	鳳山溪水月意象景觀橋新建工程設計	橋型：下路式鋼構桁架橋 橋寬：5.0 M 引道長：73 M + 300 M 橋長：288 M + 74 M 最大跨度：120 M
設 8- 電力工程 A	桃園市共同管道設備更新汰換工程設計	共同管道工程，幹支管與監測系統
設 9- 電力工程 B	北水公館變電站加壓設施遷建工程設計	自來水工程，變電設施與建築物遷建改善
設 10- 水利工程 B	頭前溪隆恩堰現址補強工程設計	堰體修復補強、增設魚道及下游固床工

表 5-8 36 個設計實際案例簡要說明 (續)

工程編號	工程名稱	工程概述
設 11- 水利工程 C	洲美抽水站新建工程設計	土建工程、機電工程
設 12- 環境工程 A	污水處理廠	
設 13- 港灣及碼頭 A	外廓防坡堤工程	
設 14- 港灣及碼頭 B	港埠設施整建工程	
設 15- 橋梁工程 F	橋梁改建工程二	
設 16- 隧道工程 A	輸水幹管新設工程	
設 17- 橋梁工程 G	新發大橋改建工程設計	鋼桁架橋 (單跨徑 150 公尺) 及引道工程
設 18- 道路工程 A	道路新建工程	
設 19- 環境工程 B	高雄市岡山橋頭污水處理廠新建工程設計	污水處理廠新建工程
設 20- 環境工程 C	道路拓寬工程	
設 21- 結構補強 A	橋梁結構耐震補強工程	
設 22- 環境工程 D	高雄市臨海污水處理廠新建工程設計	污水處理廠新建工程
設 23- 橋梁工程 H	橋梁改建工程一	
設 24- 其他工程 A	台中園區擴建用地開發工程設計	山坡地園區開發之整地、道路、排水 (含滯洪池)、電力、電信、污水管線、自來水管線、配水池、加壓站、機房及景觀等工程
設 25- 環境工程 E	園區開發工程	
設 26- 水利工程 D	北水翡翠水庫專管	
設 27- 其他工程 B	雲林基地開發工程設計	整地、道路、排水 (含滯洪池)、電力、電信、污水管線、自來水管線、配水池、加壓站、機房及景觀等工程
設 28- 道路工程 B	增設系統交流道工程	
設 29- 其他工程 C	機場捷運 A7 區段徵收工程設計	山坡地市地重劃 - 整地、道路、排水 (含滯洪池)、電力、電信、污水管線、自來水管線、配水池、加壓站、機房及景觀等工程
設 30- 其他工程 D	四期銅鑼基地開發工程設計	山坡地園區開發之整地、道路、排水 (含滯洪池)、電力、電信、污水管線、自來水管線、配水池、加壓站、機房及景觀等工程
設 31- 捷運及軌道工程 A	花東鐵路電氣化第一標設計	鐵路平面段, 主要包含平面車站、路堤路塹及橋涵
設 32- 其他工程 E	台南園區二期開發工程設計	整地、道路、排水 (含滯洪池)、電力、電信、污水管線、自來水管線、配水池、加壓站、機房及景觀等工程
設 33- 捷運及軌道工程 B	捷運萬大線 DQ122 設計標	潛盾隧道、高架橋、高架車站
設 34- 捷運及軌道工程 C	台中捷運 DJ103 標設計	捷運高架段、高架車站
設 35- 捷運及軌道工程 D	台北捷運萬大 DQ124 標設計	捷運機廠、明挖隧道、地下車站
設 36- 電力工程 C	青山水力電廠復建工程設計	計畫履約時間 98-109 年, 設計時程 98-104 年。工程內容電廠土木、機電、出水尾水隧道、地下電廠通達道路、地面周邊道路、水土保持等工程。

統計 36 個案例建造費用區間分佈如表 5-9。

表 5-9 依建造費用區間統計 36 個設計實際案件

建造費用 (新台幣)	工程件數
五百萬元以下部分	0
超過五百萬元至一千萬元部分	1
超過一千萬元至五千萬元部分	0
超過五千萬元至一億元部分	4
超過一億元至五億元部分	12
超過五億元至二十億元部分	10
超過二十億元部分	9
合計	36 個案例

在此 36 個案例中, 有多案契約價金無法反應實際成本。現依據實際執行情形, 各顧問公司依據當時業主要求嚴謹程度及工程內容差異產生之工作量變動情況, 在確保設計品質無虞下, 重新估算設計服務費並設定為案例分析之「合理設計費用」, 作為費率合理性分析之比較基礎。各案例以不同費用區間分別計算基本費率之設計服務費用、進階法之設計費用及其與合理費用之分析比較, 如表 5-10 至表 5-14 及圖 5-1 至圖 5-8。各案例之合理設計服務費用係沿續第 94 頁之說明計算而得。

1. 超過五百萬元至一千萬元部分 (1 件)

表 5-10 五百萬元至一千萬元部分工程三種費用之比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理設計費用 (A)	以基本費率計算設計費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算設計費 (C)	C/A
設 1- 橋梁工程 A	7,135	508	415	0.816	415	0.816

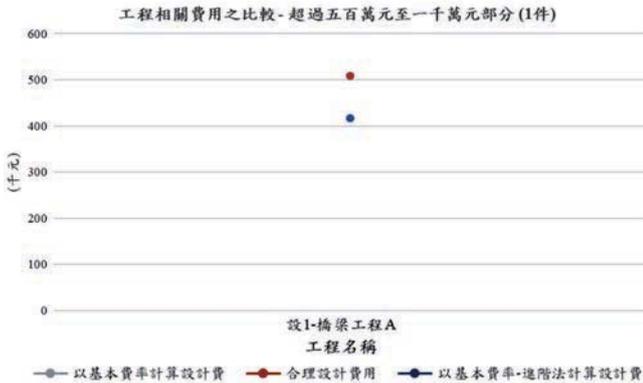


圖 5-1 五百萬元至一千萬元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

2. 超過五千萬元至一億元部分 (4 件)

表 5-11 五千萬元至一億元部分工程三種費用之比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理設計費用 (A)	以基本費率計算設計費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算設計費 (C)	C/A
設 2- 水土保持 A	62,000	2,828	3,090	1.093	3,739	1.322
設 3- 水利工程 A	69,320	3,063	3,410	1.113	5,100	1.665
設 4- 橋梁工程 B	94,618	6,027	4,494	0.746	4,531	0.752
設 5- 橋梁工程 C	95,500	6,408	4,532	0.707	4,667	0.728

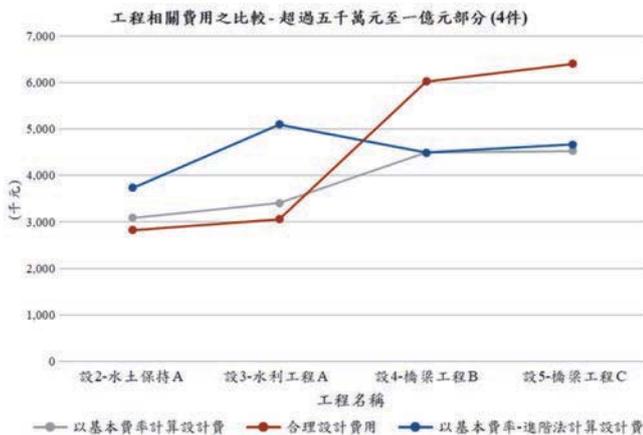


圖 5-2 五千萬元至一億元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

3. 超過一億元至五億元部分 (12 件)

表 5-12 一億元至五億元部分工程三種費用之比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理設計費用 (A)	以基本費率計算設計費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算設計費 (C)	C/A
設 6- 橋梁工程 D	158,364	6,783	6,826	1.006	6,826	1.006
設 7- 橋梁工程 E	163,645	6,777	7,016	1.035	7,016	1.035
設 8- 電力工程 A	166,597	8,586	7,122	0.829	8,600	1.002
設 9- 電力工程 B	208,804	10,326	8,642	0.837	10,435	1.011
設 10- 水利工程 B	234,000	9,558	9,549	0.999	10,981	1.149
設 11- 水利工程 C	297,000	13,781	11,817	0.857	14,017	1.017
設 12- 環境工程 A	316,070	13,602	12,500	0.919	18,263	1.343
設 13- 港灣及碼頭 A	355,100	15,398	13,910	0.903	16,219	1.053
設 14- 港灣及碼頭 B	399,830	17,268	15,520	0.899	19,167	1.110
設 15- 橋梁工程 F	405,470	17,406	15,720	0.903	20,225	1.162
設 16- 隧道工程 A	436,000	18,536	16,820	0.907	21,829	1.178
設 17- 橋梁工程 G	500,000	16,759	19,125	1.141	19,699	1.175



圖 5-3 一億元至五億元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

4. 超過五億元至二十億元部分 (10 件)

表 5-13 五億元至二十億元部分工程三種費用之比較 (單位：千元)

工程編號	工程建造費用	合理設計費用 (A)	以基本費率計算設計費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算設計費 (C)	C/A
設 18-道路工程 A	525,810	22,505	19,950	0.886	22,995	1.022
設 19-環境工程 B	531,000	26,395	20,117	0.762	25,129	0.952
設 20-環境工程 C	559,690	22,655	21,040	0.929	23,491	1.037
設 21-結構補強 A	727,660	31,102	26,410	0.849	29,487	0.948
設 22-環境工程 D	823,000	35,548	29,461	0.829	36,801	1.035
設 23-橋梁工程 H	879,470	37,718	31,270	0.829	33,643	0.892
設 24-其他工程 A	889,000	38,332	31,573	0.824	37,856	0.988
設 25-環境工程 E	1,405,620	60,100	48,110	0.800	66,072	1.099
設 26-水利工程 D	1,437,600	56,331	49,128	0.872	54,195	0.962
設 27-其他工程 B	1,859,000	64,728	62,613	0.967	77,139	1.192



圖 5-4 五億元至二十億元部分工程三種費用比較圖 (單位：千元)

5. 超過二十億元部分 (9 件)

表 5-14 超過二十億元部分工程三種費用之比較 (單位：千元)

工程編號	工程建造費用	合理設計費用 (A)	以基本費率計算設計費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算設計費 (C)	C/A
設 28-道路工程 B	2,880,000	123,028	95,290	0.775	120,489	0.979
設 29-其他工程 C	4,148,000	118,857	129,417	1.089	159,442	1.341
設 30-其他工程 D	5,840,000	195,735	178,485	0.912	219,894	1.123
設 31-捷運及軌道工程 A	6,875,000	220,069	208,500	0.947	217,976	0.990
設 32-其他工程 E	7,775,000	248,525	234,600	0.944	289,027	1.163
設 33-捷運及軌道工程 B	8,263,000	330,752	174,126	0.526	252,515	0.763
設 34-捷運及軌道工程 C	8,377,000	311,651	176,441	0.566	267,502	0.858
設 35-捷運及軌道工程 D	9,830,000	340,054	205,937	0.606	298,646	0.878
設 36-電力工程 C	11,212,000	360,339	334,273	0.928	370,124	1.027



圖 5-5 超過二十億元部分工程三種費用比較圖 (單位：千元)

6. 全部 36 個設計案件三種費用之比較

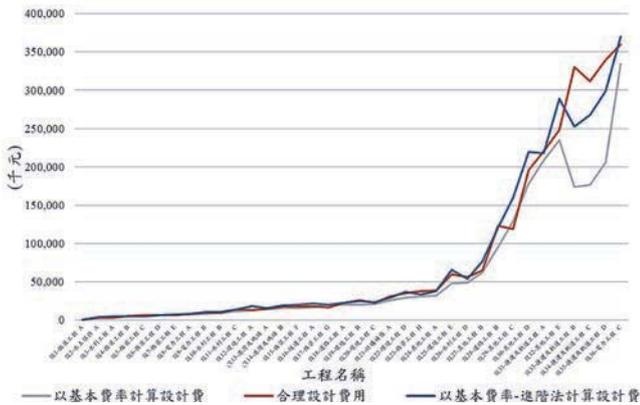


圖 5-6 全部 36 個設計案例三種費用比較圖 (單位:千元)

7. 全部 36 個設計案件以基本費率法計算設計費與合理設計費用之占比

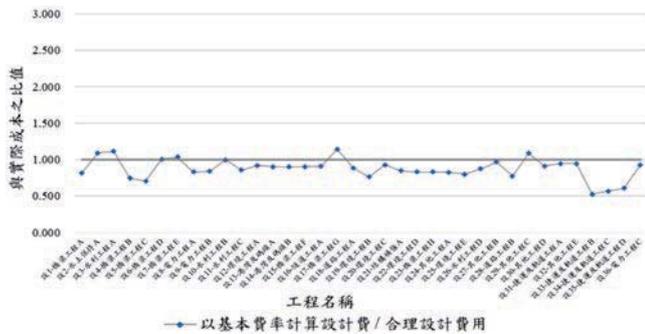


圖 5-7 全部 36 個設計案例以基本費率法計算費用與合理設計費用占比示意圖

8. 全部 36 個設計案件以基本費率進階法計算設計費與合理設計費用之占比

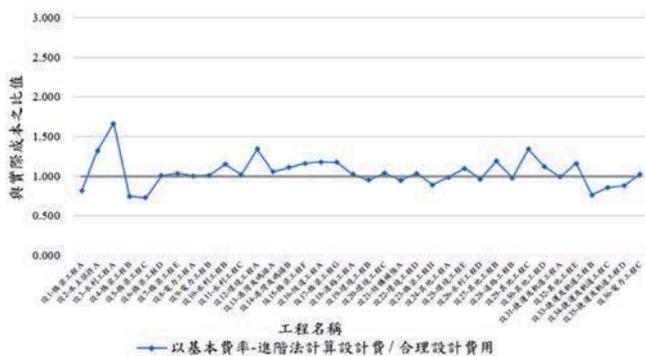


圖 5-8 全部 36 個設計案例以基本費率進階法計算費用與合理設計費用占比示意圖

小結

1. 由圖 5-1 至圖 5-8 可見，以基本費率法、基本費率進階法計算所得設計服務費用與執行案件所需之合

理設計費用之比較結果顯示：

- (1) 五百萬元至一千萬元部分工程 (1 件)：以基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用略低 (二者比值為 0.816)，二者費用差額為 -93 千元，詳表 5-10 與圖 5-1。
 - (2) 五千萬元至一億元部分工程 (4 件)：以基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用高低互見 (二者比值為 0.728 ~ 1.665)，二者費用差額在 -1,741 千元 ~ +2,037 千元，詳表 5-11 與圖 5-2。
 - (3) 一億元至五億元部分工程 (12 件)：以基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用略高 (二者比值為 1.002 ~ 1.343)，二者費用差額在 +14 千元 ~ +4,661 千元，詳表 5-12 與圖 5-3。
 - (4) 五億元至二十億元部分工程 (10 件)：以基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用高低互見 (二者比值為 0.892 ~ 1.192)，二者費用差額在 -4,075 千元 ~ +12,411 千元，詳表 5-13 與圖 5-4。
 - (5) 超過二十億元部分工程 (9 件)：以基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用高低互見 (二者比值為 0.763 ~ 1.341)，二者費用差額在 -78,237 千元 ~ +40,585 千元，詳表 5-14 與圖 5-5。
 - (6) 全部 36 個設計案件：以基本費率、基本費率進階法計算所得設計服務費用較合理設計費用差距與占比詳圖 5-6 至圖 5-8。
2. 值得注意的是，圖 5-7 為全部 36 個設計案例以基本費率法計算費用與合理設計費用之占比，圖中顯示絕大部分比值多小於 1.0，顯見目前所採用的基本費率有低估設計服務費用之現象。
3. 綜上，基本費率進階法計算所得設計服務費用與合理設計費用之差距應在工程可接受範圍，建議基本費率進階法可做為機關匡列設計案件預算之用。
4. 設計案件之服務費用建議可依據上述基本費率進階法之結果，以總包價法訂明於契約。

社團法人中國土木工程學會與業界共同研議「公共工程技術服務費用編列建議」(B)

六、監造服務費用之預算編列及計價

監造技術服務費用之預算編列

機關委託技術服務廠商評選及計費辦法（以下簡稱技服辦法）第二十五條明訂：機關委託廠商辦理技術服務，其服務費用之計算，應視技術服務類別、性質、規模、工作範圍、工作區域、工作環境或工作期限等情形，就下列方式擇定一種或二種以上符合需要者訂明於契約：

- 一、服務成本加公費法。
- 二、建造費用百分比法。
- 三、按月、按日或按時計酬法。
- 四、總包價法或單價計算法。

另，109年9月增訂技服辦法第25-1條：機關委託廠商辦理技術服務，其服務費用得就履約期間各種技術服務工作事項所需人力之類別、人數、工作時間、薪資，及人力以外之其他相關費用，合理估算後編列預算，並作為擇定前條服務費用計算方式之參考。

現行機關編列監造服務費預算時，最常採用「建造費用百分比法」，並參考技服辦法附表二、公共工程（不包括建築物工程）技術服務建造費用百分比參考表，如表6-1；亦有部分採用「服務成本加公費法之計算方式」編列預算。

表6-1 公共工程（不含建築物工程）技術服務建造費用百分比之基本費率（監造）

建造費用 (新台幣)	服務費用百分比(%)
	監造
五百萬元以下部分	四·六
超過五百萬元至一千萬元部分	四·四
超過一千萬元至五千萬元部分	三·九
超過五千萬元至一億元部分	三·三
超過一億元至五億元部分	二·八
超過五億元部分	二·四

為配合現況，本案建議監造技術服務費用之預算編列，可依實際情況採以下兩種方式之一為之：

(一) 基本費率進階法

基本費率進階法適用於：

採購單位對於技術服務類別、性質、規模、工作範圍、工作區域、工作環境或工作期限等無法明確掌握時之監造服務費用編列。

(二) 人月單價為基礎之單價計算法

（以下簡稱「人月單價法」）

人月單價法適用於：

- (1) 專案執行，參與團隊成員主要均在該項監造案件執行工作、不得跨標兼任，人月數投入較為精確時之監造服務費用編列；
- (2) 規模龐大、性質複雜或有特殊需求之工程預算，涉及派遣符合資歷（及証照）之人數及工程契約工期，擇定符合資格（及証照）之足額派遣人數及對等之職稱薪資時之監造服務費用編列。

茲將兩種方法說明如下：

監造費用預算編列建議一：基本費率進階法

機關編列監造技術服務費預算建議方法一：採用設計服務費用之概念，以「基本費率進階法」依工程特性等加計各不同因子調整基本費率，以編列預算。

建議六之一：監造服務採用「基本費率進階法」編列預算

$$\text{監造技術服務費} = \text{建造費用} \times \text{基本費率}(\%) \\ \times A \times B \times C \times D \times E \times F$$

其中，基本費率 $\times A \times B \times C \times D \times E$ ，即所謂「基本費率進階法」。

基本費率進階法各因子屬性說明及可用數值

A = 工程類別及複雜程度調整因子

表 6-2 監造基本費率工程類別及複雜程度調整因子：A

工程類別	A 因子	說明
橋梁工程	1.05	跨河海景觀橋，主跨徑大於 150 m
	1.00	其他
道路工程	1.05	含交流道之高、快速公路
	1.00	其他
隧道工程	1.15	
水利工程	1.10	堰壩工程
	1.00	其他
水土保持工程	1.00	
港灣、碼頭工程	1.00	
機場工程	1.10	塔台及附屬工程
	1.00	其他
捷運及鐵道工程	1.05	高架含車站
	1.05	地下含車站
	1.05	維修機廠
	1.00	地面及其他
環境工程	1.05	污水處理廠
	1.00	其他
電力工程	1.20 ~ 1.30	核能電廠，含除役、核廢料貯存或處置場
	1.10	離岸電廠、離岸變電站
	1.00	其他
結構補強	1.10 ~ 1.20	
特殊構造或用途	1.10 ~ 1.30	
小規模工程	1.10 ~ 1.30	
其他	1.00 ~ 1.10	依工程之複雜性或多樣性決定

B = 工程期程調整因子

表 6-3 監造基本費率工程期程調整因子：B (同設計費率之調整)

主要設計期程 n (計畫開始至所有工程標案發包完成之時間，年)	B 因子	說明
1 年	1.000	考慮設計之工作量平均分配於主要設計期間，除第一年工作量之服務費不調整外，剩餘工作量之服務費每年調整 3%，計算公式如下： $B = 1 + 0.03 \left(n - \frac{\sum_{i=1}^n i}{n} \right)$ 其中 n 為主要設計期程 (由計畫開始至所有工程標案發包完成之時間，以年為單位，取整數)
2 年	1.015	
3 年	1.030	
4 年	1.045	
5 年	1.060	
6 年	1.075	
7 年	1.090	
8 年	1.105	
9 年	1.120	
10 年	1.135	

C = 職安衛等級調整因子

配合職安主管機關要求，技服廠商責任加重，亦造成其職安衛管理成本加劇，針對工程符合丁類危險性工作場所者及特殊工程類，應對此有相關調整因子如表 6-4。

表 6-4 監造基本費率職安衛等級調整因子：C

職安衛等級調整	C 因子
未列入丁類危險性工作場所之工程	1.00
符合丁類危險性工作場所之工程	1.05
複雜性工程 (如海事工程、超高層建築、交維困難工程、管制區域)	1.10

D = 地域性調整因子

公共工程區位分佈影響技服廠商派駐人力成本，針對工程地域性如東部地區、離島及偏遠地區，應對此有相關調整因子如表 6-5。

表 6-5 監造基本費率地域性調整因子：D

地域性調整	D 因子
一般市區	1.00
東部地區	1.10
離島地區偏遠山區	1.15

E = 機電水環工程佔比調整因子

機電水環工程監造工程師人力難尋，且派駐成本相對較高，以機電水環工程費用所佔全工程費用之比例，應對此有相關調整因子如表 6-6。

表 6-6 監造基本費率機電水環工程佔比調整因子：E

機電工程佔比調整	E 因子
10% 以下	1.00
10% ~ 30%	1.05
30% 以上	1.10

以基本費率進階法分析比較 35 個監造實際案例

感謝由業界數家顧問公司聯合提供 35 個監造工程案例作為分析。案例基本資料及合理監造費用如下：

35 個案例依建造費用區間分佈數量如表 6-7。

表 6-7 依建造費用區間統計 35 個監造實際案例

建造費用 (新台幣)	工程件數
五百萬元以下部分	0
超過五百萬元至一千萬元部分	0
超過一千萬元至五千萬元部分	0
超過五千萬元至一億元部分	2
超過一億元至五億元部分	21
超過五億元部分	12
合計	35 個案例

以不同費用區間、三種計算方法比較監造服務費用，包含建造費用百分比法（即以基本費率計算）、合理監造費用與基本費率進階法，結果如表 6-8 至表 6-10、圖 6-1 至圖 6-6 所示。其中各案例之合理監造服務費用係依據後面第 110 頁所述內容計算之。

1. 超過五千萬元至一億元部分 (2 件)

表 6-8 五千萬元至一億元部分工程三種費用比較 (單位：千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算監造費 (C)	C/A
監 1- 橋梁工程 A	59,982	2,500	2,339	0.936	2,493	0.997
監 2- 道路工程 A	86,120	3,538	3,202	0.905	3,958	1.119

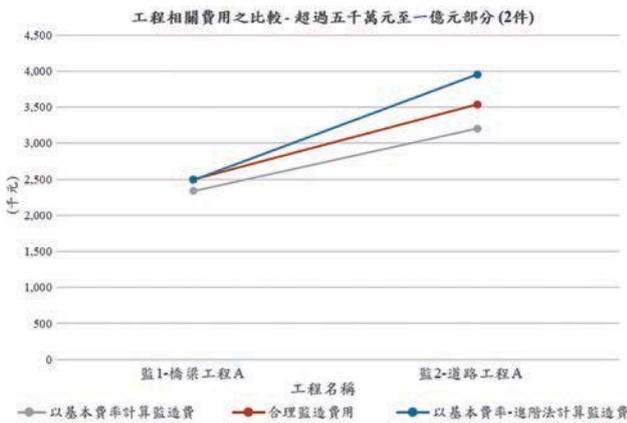


圖 6-1 五千萬元至一億元部分工程三種費用比較圖 (單位：千元)

2. 超過一億元至五億元部分 (21 件)

表 6-9 一億元至五億元部分工程三種費用比較 (單位：千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算監造費 (C)	C/A
監 3- 污水管線 A	123,970	7,132	4,331	0.607	6,424	0.901
監 4- 污水管線 B	135,230	7,651	4,646	0.607	6,891	0.901
監 5- 污水管線 C	144,880	8,096	4,917	0.607	7,293	0.901
監 6- 污水管線 D	161,660	8,869	5,386	0.607	8,105	0.914
監 7- 污水管線 E	178,100	9,627	5,847	0.607	8,799	0.914
監 8- 污水管線 F	178,980	9,668	5,871	0.607	8,708	0.901

表 6-9 一億元至五億元部分工程三種費用比較 (續)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算監造費 (C)	C/A
監 9- 道路工程 B	184,590	5,661	6,029	1.065	6,210	1.097
監 10- 污水管線 G	184,860	9,939	6,036	0.607	9,083	0.914
監 11- 環境工程 A	200,510	8,029	6,474	0.806	7,702	0.959
監 12- 水利工程 A	234,000	7,539	7,412	0.983	7,412	0.983
監 13- 道路工程 C	241,200	8,163	7,614	0.933	7,842	0.961
監 14- 環境工程 B	267,520	7,180	8,351	1.163	10,838	1.509
監 15- 環境工程 C	314,250	11,700	9,659	0.826	11,491	0.982
監 16- 港灣工程 A	356,536	11,441	10,843	0.948	13,402	1.171
監 17- 道路工程 D	402,339	12,684	12,125	0.956	12,671	0.999
監 18- 道路工程 E	428,350	11,100	12,854	1.158	13,432	1.210
監 19- 道路工程 F	432,585	12,908	12,972	1.005	14,029	1.087
監 20- 環境工程 D	438,800	13,670	13,146	0.962	15,345	1.123
監 21- 機場工程 A	451,600	12,962	13,505	1.042	15,524	1.198
監 22- 橋梁工程 B	462,230	14,000	13,802	0.986	14,423	1.030
監 23- 橋梁工程 C	499,590	18,077	14,849	0.821	19,271	1.066



圖 6-2 一億元至五億元部分工程三種費用比較圖 (單位：千元)

3. 超過五億元部分 (12 件)

表 6-10 超過五億元部分工程三種費用比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以基本費率進階法計算監造費 (C)	C/A
監 24-橋梁工程 D	526,500	14,400	15,496	1.076	18,166	1.262
監 25-道路工程 G	537,520	15,000	15,760	1.051	16,233	1.082
監 26-機場工程 B	653,330	33,505	18,540	0.553	21,414	0.639
監 27-環境工程 E	690,670	24,033	19,436	0.809	23,571	0.981
監 28-道路工程 H	914,430	24,000	24,806	1.034	26,828	1.118
監 29-道路工程 I	1,042,840	31,000	27,888	0.900	31,669	1.022
監 30-橋梁工程 E	1,508,000	36,420	39,052	1.072	42,235	1.160
監 31-環境工程 F	1,753,610	50,372	44,947	0.892	52,408	1.040
監 32-電力工程 A	2,693,132	117,330	67,495	0.575	121,197	1.033
監 33-隧道工程 A	7,200,000	341,620	175,660	0.514	329,759	0.965
監 34-橋梁工程 F	8,381,330	468,061	204,012	0.436	298,754	0.638
監 35-隧道工程 B	9,208,000	494,910	223,852	0.452	480,261	0.970

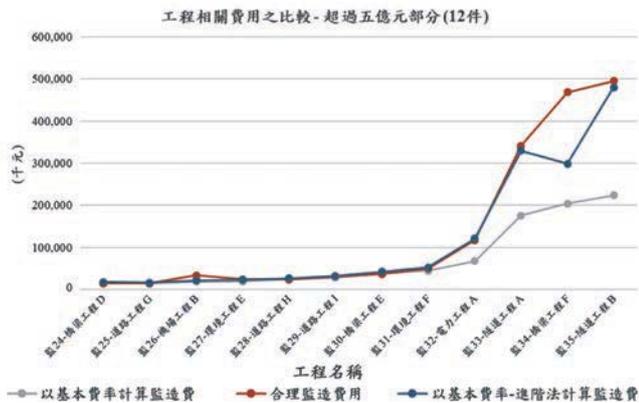


圖 6-3 超過五億元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

4. 全部 35 個監造工程案例三種費用之比較

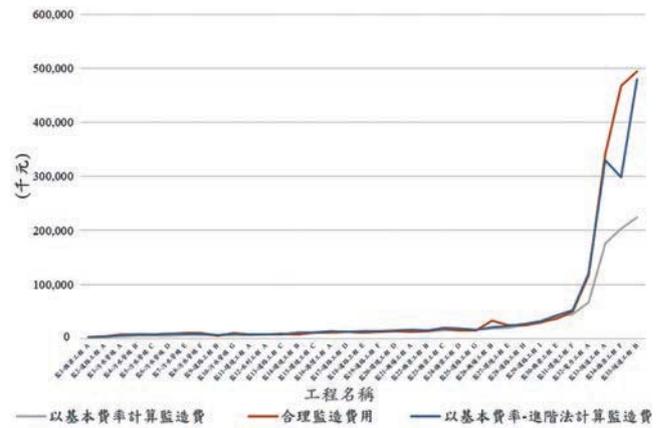


圖 6-4 全部 35 個案例三種費用比較圖 (單位:千元)

5. 全部 35 個監造工程案例以基本費率計算監造費與合理監造費用之占比

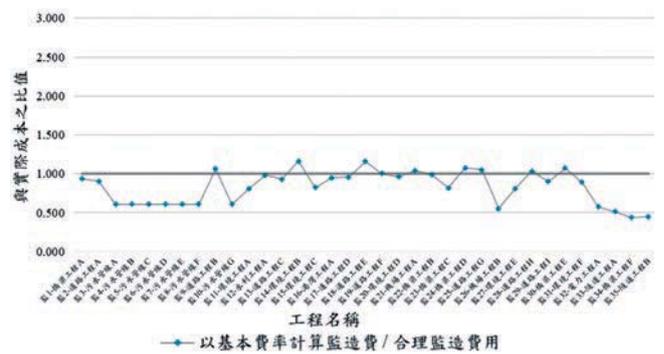


圖 6-5 全部 35 個監造案例以基本費率計算監造費與合理監造費用占比示意圖

6. 全部 35 個監造案件以基本費率進階法計算監造費與合理監造費用之占比



圖 6-6 全部 35 個監造案件以基本費率進階法計算監造費與合理監造費用占比示意圖

以基本費率進階法計算監造服務費用分析之結果

由圖 6-1 至圖 6-6 可見，以基本費率法、基本費率進階法計算所得監造服務費用與執行案件所需之合理監造費用之比較結果顯示：

- (1) 五千萬元至一億元部分工程（2 件）：以基本費率進階法計算所得監造服務費用較合理監造費用高低互見（二者比值為 0.997 ~ 1.119），二者費用差額在 -7 千元 ~ +420 千元，詳表 6-8 與圖 6-1。
- (2) 一億元至五億元部分工程（21 件）：以基本費率進階法計算所得監造服務費用較合理監造費用略高（二者比值為 0.901 ~ 1.509，其中 1.509 者應屬特例），二者費用差額在 -960 千元 ~ +2,332 千元，詳表 6-9 與圖 6-2。
- (3) 超過五億元部分工程（12 件）：以基本費率進階法計算所得監造服務費用較合理監造費用高低互見（二者比值為 0.638 ~ 1.262，其中 0.638 與 0.639 者應屬特例），二者費用差額在 -11,861 千元 ~ +5,815 千元，詳表 6-10 與圖 6-3。
- (4) 全部 35 個監造案例之費用比較如圖 6-4。以基本費率法計算費用與合理監造費用占比示意如圖 6-5。圖中顯示絕大部分比值多小於 1.0，顯見目前所採用的基本費率法有低估監造服務費用之現象。
- (5) 全部 35 個監造案例以基本費率進階法計算費用與合理監造費用占比示意如圖 6-6。圖中顯示該等比值於 1.0 附近呈現高低振盪，顯見基本費率進階法可以合理估算監造服務費用。

監造費用預算編列建議二：人月單價法

技服辦法第 7 條明訂機關委託廠商辦理監造，依採購案件之特性及實際需要明列服務項目，且派遣人員留駐工地，持續性監督施工廠商按契約及設計圖說施工及查證施工廠商履約。惟依如下各要點，均再明訂廠商辦理監造之服務項目涉及派遣人員之資格、人數、是否專任及留駐工地期間（涉及工程期限）。

一、依「公共工程施工品質管理作業要點（以下簡稱品管要點）」第九條明訂監造單位派遣現場人員之資格及人數，及第十條明訂設置受訓合格（品質管理人員，以下簡稱品管人員）之現場人員；每一標案最低人數規定如下：

- (一) 新臺幣五千萬元以上未達二億元之工程，至

少一人。

- (二) 新臺幣二億元以上之工程，至少二人。

二、依「加強公共工程職業安全衛生管理作業要點」第十二條明列機關辦理工程，應要求監造單位明定下列安全衛生監督查核事項：

- (一) 監督查核之管理組織、查核人員資格及人力配置。

各機關依如上要點第十七點規定訂定須知（如臺北市府所屬各機關公共工程施工安全衛生須知），其第三條（二）明訂監造單位應辦理下列事項：

- (一) 如屬委託監造，監造廠商應於開工前依法設置勞工安全衛生人員，並為其相關現場人員依法投保勞工保險，且依前款第七目規定辦理登錄及報核事宜。

綜上，機關編列監造服務費預算時，對派遣人數、派遣期間（工程期限）、派駐人力資歷（含証照）對等薪資及依實際需求單獨編列預算之工作項目等均需合理考量。

預算編列建議二之人月單價法如下所示：

建議六之二：監造服務採用「人月單價法」編列預算

監造技術服務費

$$= \text{派遣期間應配置人數 (A1)} \\ \times \text{派遣期間 (月) (B1)} \\ \times \text{人月單價 (元/月) (C1)}$$

人月單價法各因子屬性說明及可用數值

其各因子屬性及數值說明如下：

A1 = 派遣期間應配置人數

派遣期間平均分月應配置人數計算方式以工程預算（萬元）除以五千萬元之平方根採行四捨五入之整數，再加乘工程規模派遣人力係數，其計算如下：

$$A1 = \text{ROUND} \left(\sqrt{\left(\frac{\text{工程預算金額 (萬元)}}{5000 \text{ 萬元}} \right)} \right) \\ \times A11 \text{ (工程規模調整人力係數)}$$

A11 (工程規模調整人力係數) 公式如下 (數值詳表 6-11)：

$$1.0 \leq A11 = 1 + \text{ROUNDUP} \left(\frac{\text{工程預算金額 (億元)} - 20}{5} \right) \\ \times 0.125$$

表 6-11 工程規模調整人力係數：A11

工程預算費用	工程規模調整 人力係數	工程預算費用	工程規模調整 人力係數
20 億元以下	1.000	60 億元 ~ 65 億元以下	2.125
20 億元 ~ 25 億元以下	1.125	65 億元 ~ 70 億元以下	2.250
25 億元 ~ 30 億元以下	1.250	70 億元 ~ 75 億元以下	2.375
30 億元 ~ 35 億元以下	1.375	75 億元 ~ 80 億元以下	2.500
35 億元 ~ 40 億元以下	1.500	80 億元 ~ 85 億元以下	2.625
40 億元 ~ 45 億元以下	1.625	85 億元 ~ 90 億元以下	2.750
45 億元 ~ 50 億元以下	1.750	90 億元 ~ 95 億元以下	2.875
50 億元 ~ 55 億元以下	1.875	95 億元 ~ 100 億元以下	3.000
55 億元 ~ 60 億元以下	2.000	100 億元以上	3.000 以上

B1 = 派遣期間

依工程預估施工期間（以月為單位），以工程開工至竣工為原則，惟應適當額增驗收所需期程，另如果預估施工期限之派遣期間有考量限期竣工因素，派遣期間應調整為合理施工期間，以符合理預算編列。

C1 = 人月單價

由表 6-12 擇定需派遣人力之職稱 / 年資及其相對應之人月單價（未稅）。

例如 2 億元 ~ 4 億元以下：

派遣人力 2 位工程師（一）年資 6 ~ 8 年，薪資 188,262 元 / 月。

表 6-12 派遣人月各職級薪資：C1

職稱	經理	副理	組長	工程師 (一)	工程師 (二)	工程師 (三)	一般事務員
年資(年)	11~15	11~15	11~15	6~10	3~5	0~3	0~3
A							
A1							
每月人力價格 (元·工程會102年資料)	110,250	84,075	78,750	66,730	52,000	49,413	40,788
A2							
以中數<工程師(一)>為基準之各 類種職級的薪資相對比例值	1.652	1.26	1.18	1	0.779	0.74	0.611
B							
B1							
採計<主計處108年---建築、工 程服務及技術檢測、分析服務業 >於108年之實際薪資<62,754元 >為七種職級之中數(即“工程師 (一)·6~10年”)的實際薪資(元· 108年)				62,754			
B (= B1 * A2)							
每月實際薪資(元·108年)	103,670	79,070	74,050	62,754	48,885	46,438	38,343
C							
C							
加計間接費用之係數 (overhead cost coefficient)	3						
D =B*C							
人月薪資(未稅)	311,010	237,210	222,150	188,262	146,655	139,314	115,029

註：1. 以上為各職級每月薪資（未稅）；每年年薪為該數值乘上 12 月。

- 依〈工程會 2013 年工程顧問服務業人力價格調查〉，計算七種職級之薪資相對比例值，並以中數（即“工程師（一），6~10 年”）為 1.000。
- 採計〈主計處 108 年---建築、工程服務及技術檢測、分析服務業〉於 108 年之實際薪資 < 62,754 元 > 為七種職級之中數（即“工程師（一），6~10 年”）的「實際月薪資」。
- 表中「加計間接費用之係數（overhead cost coefficient）」之計算，係參考「機關委託技術服務廠商評選及計費辦法」第 26 條關於「服務成本加公費法」各款費用內容。
- 將「實際月薪資」乘上「加計間接費用之係數（overhead cost coefficient）」即為「人月單價」，此為各職級之合理成本。

以人月單價法分析比較 35 個實際監造案例

全部 35 個監造服務案例以不同費用區間分析比較三種監造服務費用，包含建造費用百分比法（即以基本費率計算）、合理服務費用與人月單價法，如表 6-13 至表 6-15 及圖 6-7 至圖 6-12。其中各個監造案例之合理服務費用計算於本節後面說明之。

1. 超過五千萬元至一億元部分 (2 件)

表 6-13 五千萬元至一億元部分工程三種費用之比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以人月單價法計算監造費 (C)	C/A
監 1- 橋梁工程 A	59,982	2,500	2,339	0.936	2,636	1.054
監 2- 道路工程 A	86,120	3,538	3,202	0.905	3,765	1.064

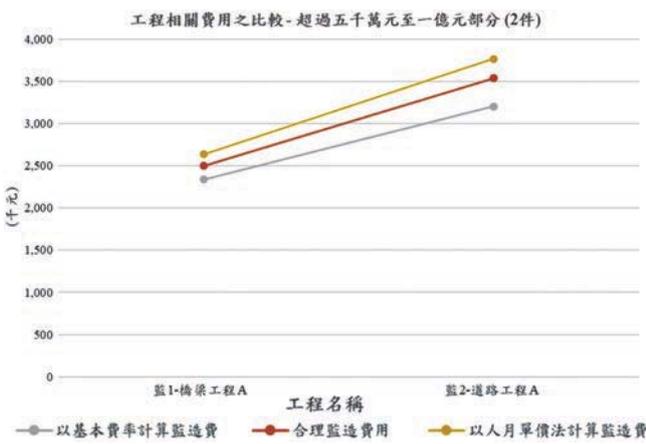


圖 6-7 五千萬元至一億元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

2. 超過一億元至五億元部分 (21 件)

表 6-14 一億元至五億元部分工程三種費用之比較 (單位:千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以人月單價法計算監造費 (C)	C/A
監 3- 污水管線 A	123,970	7,132	4,331	0.607	7,907	1.109
監 4- 污水管線 B	135,230	7,651	4,646	0.607	8,284	1.083
監 5- 污水管線 C	144,880	8,096	4,917	0.607	8,284	1.023
監 6- 污水管線 D	161,660	8,869	5,386	0.607	8,284	0.934
監 7- 污水管線 E	178,100	9,627	5,847	0.607	8,284	0.860
監 8- 污水管線 F	178,980	9,668	5,871	0.607	8,284	0.857

表 6-14 一億元至五億元部分工程三種費用之比較 (續)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以人月單價法計算監造費 (C)	C/A
監 9- 道路工程 B	184,590	5,661	6,029	1.065	7,530	1.330
監 10- 污水管線 G	184,860	9,939	6,036	0.607	9,037	0.909
監 11- 環境工程 A	200,510	8,029	6,474	0.806	8,284	1.032
監 12- 水利工程 A	234,000	7,539	7,412	0.983	7,530	0.999
監 13- 道路工程 C	241,200	8,163	7,614	0.933	8,284	1.015
監 14- 環境工程 B	267,520	7,180	8,351	1.163	7,530	1.049
監 15- 環境工程 C	314,250	11,700	9,659	0.826	12,425	1.062
監 16- 港灣工程 A	356,536	11,441	10,843	0.948	12,990	1.135
監 17- 道路工程 D	402,339	12,684	12,125	0.956	13,555	1.069
監 18- 道路工程 E	428,350	11,100	12,854	1.158	12,425	1.119
監 19- 道路工程 F	432,585	12,908	12,972	1.005	14,684	1.138
監 20- 環境工程 D	438,800	13,670	13,146	0.962	14,684	1.074
監 21- 機場工程 A	451,600	12,962	13,505	1.042	13,555	1.046
監 22- 橋梁工程 B	462,230	14,000	13,802	0.986	13,555	0.968
監 23- 橋梁工程 C	499,590	18,077	14,849	0.821	14,684	0.812

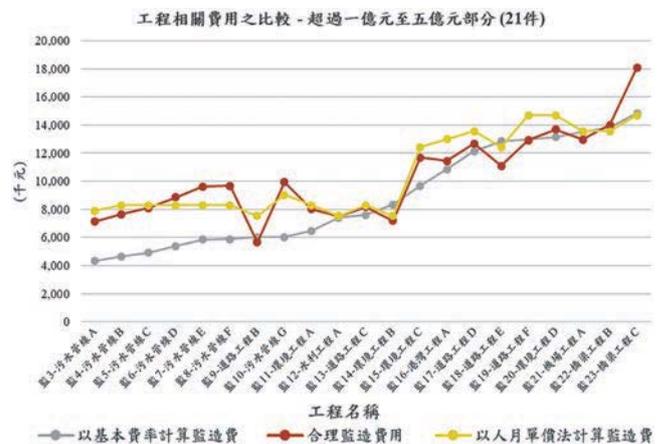


圖 6-8 一億元至五億元部分工程三種費用比較圖 (單位:千元)

3. 超過五億元部分 (12 件)

表 6-15 超過五億元部分工程三種費用之比較 (單位：千元)

工程編號	工程建造費用	合理監造費用 (A)	以基本費率計算監造費 (B)	B/A	以人月單價法計算監造費 (C)	C/A
監 24-橋梁工程 D	526,500	14,400	15,496	1.076	12,425	0.863
監 25-道路工程 G	537,520	15,000	15,760	1.051	12,425	0.828
監 26-機場工程 B	653,330	33,505	18,540	0.553	33,134	0.989
監 27-環境工程 E	690,670	24,033	19,436	0.809	25,604	1.065
監 28-道路工程 H	914,430	24,000	24,806	1.034	23,344	0.973
監 29-道路工程 I	1,042,840	31,000	27,888	0.900	31,063	1.002
監 30-橋梁工程 E	1,508,000	36,420	39,052	1.072	32,946	0.905
監 31-環境工程 F	1,753,610	50,372	44,947	0.892	56,479	1.121
監 32-電力工程 A	2,693,132	117,330	67,495	0.575	95,543	0.814
監 33-隧道工程 A	7,200,000	341,620	175,660	0.514	321,928	0.942
監 34-橋梁工程 F	8,381,330	468,061	204,012	0.436	385,466	0.824
監 35-隧道工程 B	9,208,000	494,910	223,852	0.452	474,420	0.959

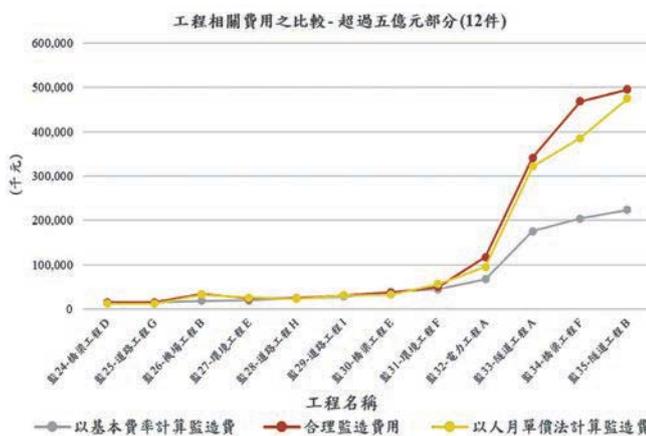


圖 6-9 超過五億元部分工程三種費用比較圖 (單位：千元)

4. 全部 35 個監造案件三種計算費用之比較

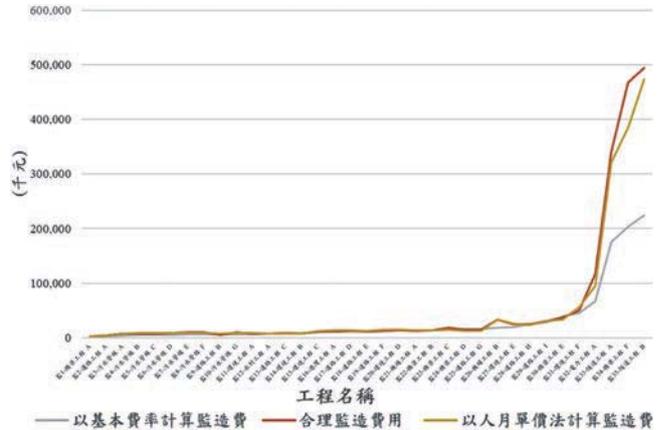


圖 6-10 全部 35 個案例三種費用比較圖 (單位：千元)

5. 全部 35 個監造案件以基本費率計算監造費與合理監造費用之占比

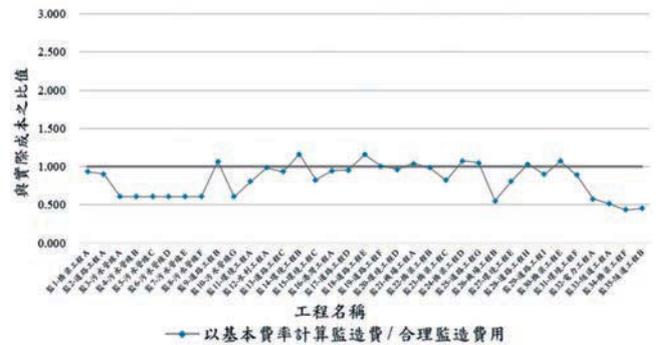


圖 6-11 全部 35 個監造案例以基本費率計算監造費與合理監造費用占比示意圖

6. 全部 35 個監造案件以人月單價法計算監造費與合理監造費用之占比

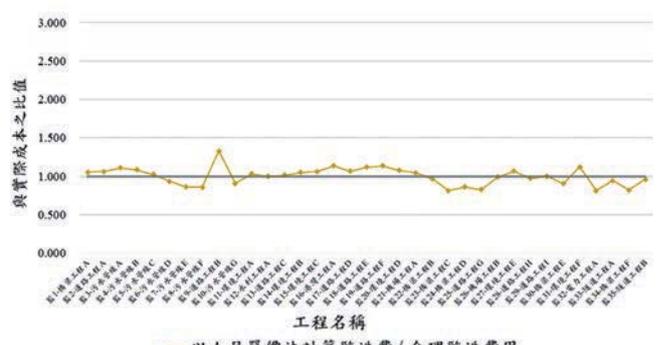


圖 6-12 全部 35 個監造案例以人月單價法計算監造費與合理監造費用占比示意圖

以人月單價法計算監造服務費用分析之結果

由圖 6-7 至圖 6-12 可見，以基本費率法、人月單價法計算所得監造服務費用與執行案件所需之合理監造費用之比較結果顯示：

- (1) 五千萬元至一億元部分工程（2 件）：以人月單價法計算所得監造服務費用與合理監造費用相當接近（二者比值為 1.054 ~ 1.064），二者費用差額在 +136 千元 ~ +227 千元，詳表 6-13 與 圖 6-7。
- (2) 一億元至五億元部分工程（21 件）：以人月單價法計算所得監造服務費用較合理監造費用略高（二者比值為 0.812 ~ 1.330），二者費用差額在 -3,393 千元 ~ +1,869 千元，詳表 6-14 與 圖 6-8。
- (3) 超過五億元部分工程（12 件）：以人月單價法計算所得監造服務費用較合理監造費用高低互見（二者比值為 0.814 ~ 1.121），二者費用差額在 -82,595 千元 ~ +6,107 千元，詳表 6-15 與 圖 6-9。
- (4) 全部 35 個監造案例的三種費用比較如圖 6-10。以基本費率計算費用與合理監造費用占比示意如圖 6-11。圖中顯示絕大部分比值多小於 1.0，顯見目前如採用基本費率編列預算，有低估監造服務費用之現象。
- (5) 全部 35 個監造案例以人月單價法計算費用與合理監造費用占比示意如圖 6-12。圖中顯示該等比值於 1.0 附近呈現高低振盪，顯見**人月單價法**可以**合理估算監造服務費用**。

監造技術服務費用之計價方式

有關監造技術服務費用之計價方式，目前部分機關已按實際執行使用人月數計量、並依各類資格人員之人月單價計價，大幅減少履約爭議，應為合理且可行方案。惟本案前述各項建議，包含單獨工項、不合理態樣、及人月單價等，均應落實後，方為合理的計費方式。建議無論採用本章所建議之任何一種方式編列預算，建議**計價**皆按**人月單價法**計算之。

監造技術服務合約在編列足額預算後，契約價金給付應於履約過程**分期（建議每二個月）給付**，不應以施工廠商估驗進度百分比為依據，否則將致廠商分月均需墊付人事巨額成本。

建議六之三：監造服務費計價採用人月單價法。且價金應分期以人月單價法計算給付之。

監造技術服務費價金分期給付方式
 = 分期實際派遣人月數 × 人月單價

此外，派遣期間若工程因不可歸責於廠商之事由，致展延工程期限及留駐工地期間超過約定人月數，契約價金之調整應依實際超過派遣人力數及本案所建議對應人月單價計算之。

小結

監造服務費用預算編列

以全部 35 個案例比較，**建議六之一「基本費率進階法」**及**建議六之二「人月單價法」**，相對於合理監造費用之占比如圖 6-13 所示。

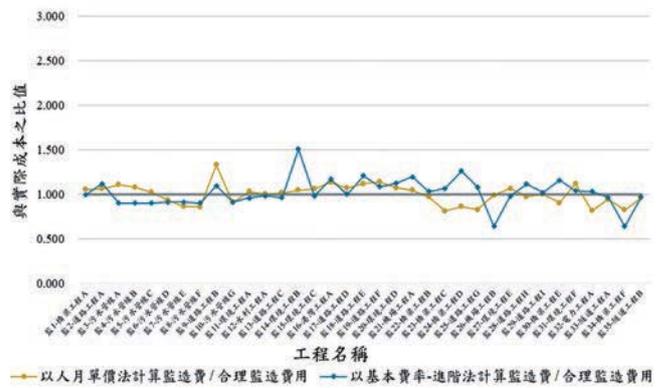


圖 6-13 35 個監造案例不同建議方案與合理監造費用占比之比較圖

兩種方案在不同狀況下均為可行，監造服務費用之預算編列建議如下：

- (1) 編列監造案件預算，如採購單位對於技術服務類別、性質、規模、工作範圍、工作區域、工作環境或工作期限等恐無法明確掌握時，為作業單純化及標準化，得以**建議六之一「基本費率進階法」**編列預算。
- (2) 如規模龐大、性質複雜或有特殊需求之工程預算，由於涉及派遣符合資歷（及証照）之人數及工程契約工期，擇定符合資格（及証照）之足額派遣人數及對等之職稱薪資，宜採用**建議六之二「人月單價法」**編列預算。

監造服務費用計價

監造案件之執行相似於專案執行，參與團隊成員主要均在該項監造案件執行工作、不得跨標兼任，故人月數投入較為精確，監造服務費用之**計價**建議採用「**人月單價法**」計價，並應考慮服務費價金分期給付及展延工期之依實計價，方為公允合理之做法。

社團法人中國土木水利工程學會與業界共同研議「公共工程技術服務費用編列建議」(B)

七、技術服務費用應定期檢討

我國技服辦法為工程會於 88 年 5 月 17 日所制定頒布，服務費率表係沿用 69 年 8 月 16 日行政院訂定之數值。過往服務費率表之修改均非常困難、曠日廢時、常緩不濟急。此外，自勞基法修正施行後，各人力相關成本均大幅增加，修勞基法之期程亦愈趨頻繁。凡此各類因素，均連帶影響技術服務費用之合理性。

建議七：技術服務費用應定期檢討。

技術服務費用長期未能符合實際工程環境之所需，承包廠商在低利甚至是無利可圖的窘境下，為求生存，轉而降低品質，不求精進，非但技術無法提升，延宕工

進、浪費公帑、甚而發生公共危害事件也層出不窮，此絕非社會民生之福。

建議政府應定期（建議不超過五年）檢討技術服務費用之合理性與適用性，並適時修正。若能藉由立法建立制度，則可建立與時俱進的技術服務費用編列機制，當能健全土木工程的工作環境，提供更優質的基礎建設。

誌謝

感謝技術顧問業各大公司，包括中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、泰興工程顧問股份有限公司、康城工程顧問股份有限公司、台聯工程顧問股份有限公司、邑菖工程顧問有限公司、林同棧工程顧問股份有限公司、亞新工程顧問股份有限公司等，鼎力相助。除無私地提出內部數據外，更耗費相當時日統計整理資料。同時感謝國立臺北科技大學土木工程系宋裕祺研究室開發自動化程式，不但提供研究期間案例分析與檢討，未來更可提供各級主管機關便於使用的工具。

此次本學會與業界通力合力，共同研議，求真求完善的堅持，是本案成功之處。更感謝主關機關，行政院公共工程委員會的信賴、託付與積極回應，建立政府與產業攜手合作之最佳範例。

願景

研議合理的技術服務費用不應被矮化是為廠商謀利，主要目的在於建構優質土木營建工程產業的永續環境，公共工程建設唯有在健康的工程環境下才能成長與茁壯，也才是國家長遠發展之福。

後記

自 109 年 3 月開始，歷經十一個月，十五次會議後，本學會與業界共同研議「公共工程技術服務費用編列建議」完整建議報告書，已於 110 年 1 月 29 日提送工程會。

本案為自發性研究，感謝多家顧問公司共同參與，花費無數精力，不吝提出經驗、數據及意見等等。有賴大家的攜手合作才能完成本案，在此特別致謝。

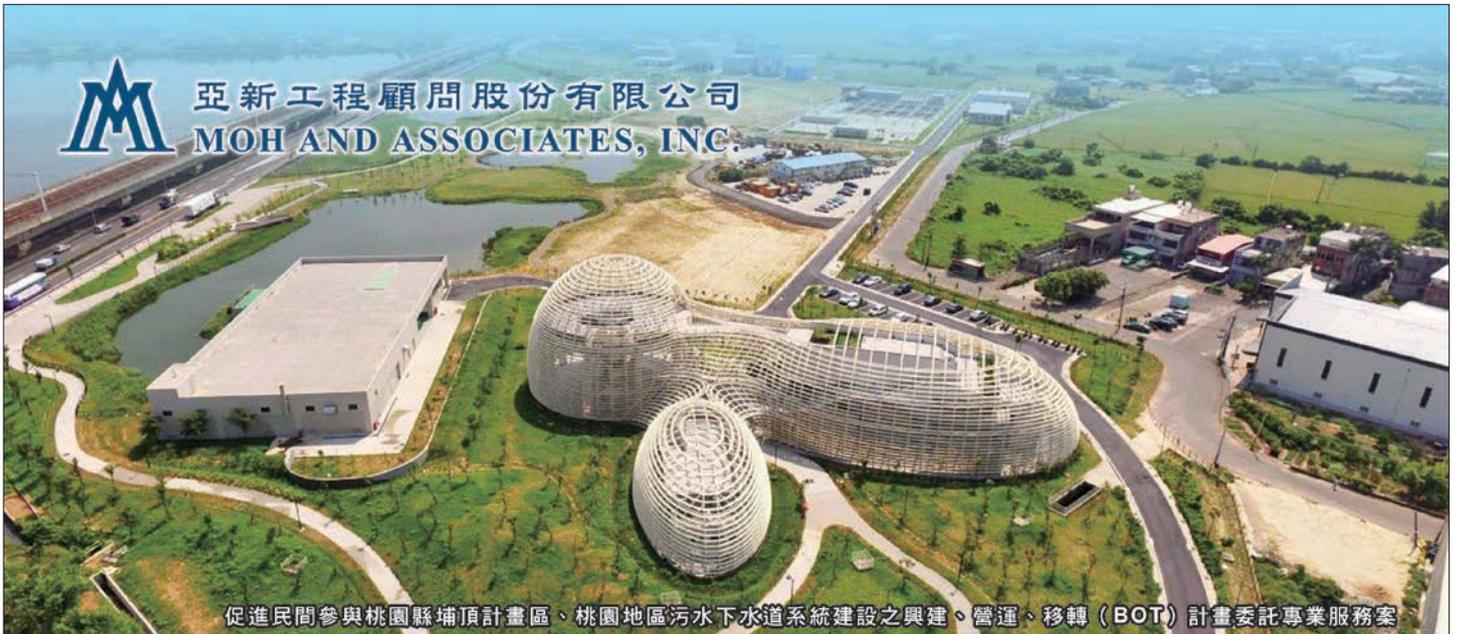
本案共提出技術服務費率相關之七大建議，前兩項均已獲工程會同意並即修改相關法令。工程會的積極作為，也讓研究團隊提振士氣、感謝工程會！本期土木水利刊登後四個建議內容，前面內容已於上期刊登。

本案核心目標在於兼顧政府單位、主辦機構、以及廠商的立場，提出客觀合理可行的公共工程技術服務費用建議。倘有疏漏，敬請會員及各界多多指教。





亞新工程顧問股份有限公司
MOH AND ASSOCIATES, INC.



促進民間參與桃園縣埔頂計畫區、桃園地區污水下水道系統建設之興建、營運、移轉 (BOT) 計畫委託專業服務案

大地工程 | 結構工程 | 運輸工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程 | 地表資訊科技 | BIM



地 址：221411 新北市汐止區新台五路一段 112 號 22 樓 (東方科學園區 A 棟)

Website: www.maaconsultants.com

電 話：(886-2)2696-1555

傳 真：(886-2)2696-1166

E-mail: maagroup@maaconsultants.com

鐵道技術研究及驗證中心

110年法人成立·進駐啟用



機械測試研發工廠

集電弓、轉轍器、車門等
設備機械性質試驗



電子測試研發工廠

牽引系統動力試驗及號誌
等電子設備之環境試驗

國家級鐵道技術研究機構

整合研發驗證能量

強化產業技術自主能力

提升營運維修安全

制定檢測驗證程序標準

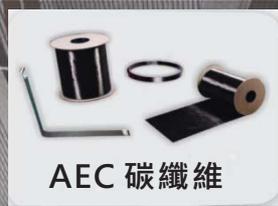
引導產業接軌國際



交通部鐵道局
RAILWAY BUREAU, MOTC 廣告

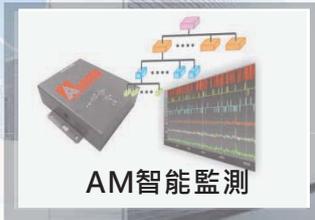


安得固



建築修復結構補強

STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw



UG 聯合大地工程顧問股份有限公司
UNITED GEOTECH, INC.

台北市內湖區瑞光路583巷21號5樓 <http://www.ugi.com.tw>
TEL : +886-2-27985198 · FAX : +886-2-26580958
E-Mail : services@mail.ugi.com.tw

大地工程之調查規劃設計與監造
Geotechnical Engineering

隧道設計、監造與檢測補強
Design、Construction Supervision &
Rehabilitation of Tunnels

工程地質與工址調查、地球物理探測
Engineering Geology、Site Investigation &
Geophysical Prospecting

水利水保工程之規劃設計與監造
Hydraulic Engineering、Soil & Water Conservation

土木運輸工程之規劃設計與監造
Transportation Engineering

專案管理
Project Management

調查·規劃·設計·監造·專案管理

Investigation · Planning · Design · Construction Supervision · Project Management



華光工程顧問股份有限公司
CECI Nova Technology Co., Ltd.
HTTP://WWW.CECI-NOVA.COM.TW

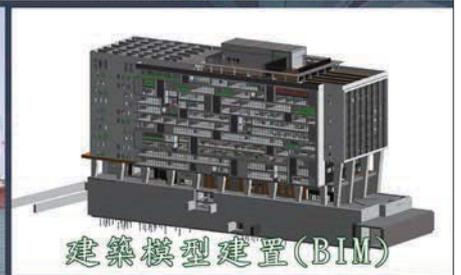
測務善驗
檢服改檢
設分析驗
規技分試
程工測料
工施監材
共商環建
公廠環營



工程規劃設計



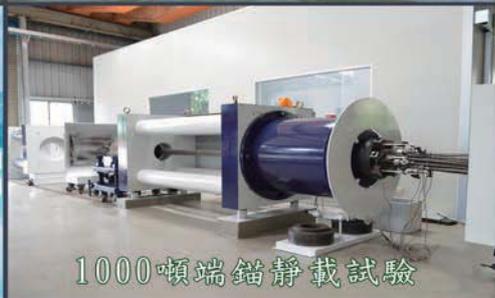
施工技術服務



建築模型建置(BIM)



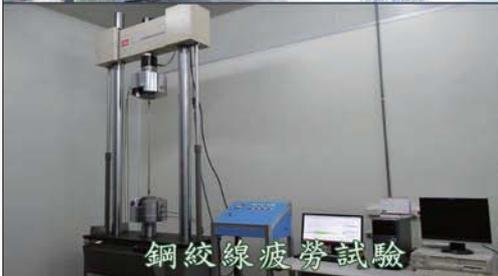
專案管理資訊系統(PMIS)



1000噸端錨靜載試驗



2000噸端錨動態疲勞試驗



鋼絞線疲勞試驗



鋼絞線彎折拉伸試驗



環境監測



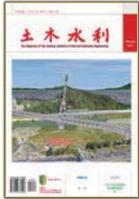
達欣工程
DACIN CONSTRUCTION

智慧、創新、務實、勤奮

Welcome To Join Us
歡迎加入達欣!

公司網站:<http://www.dacin.com.tw> 連絡電話:(02)2706-2929

地址:台北市敦化南路二段92號9樓



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3期9折, 4期以上8.5折	

刊登月份：

48.3 48.4 48.5 48.6 49.1 49.2 共 次
(6月) (8月) (10月) (12月) (2月) (4月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱：
商號 (請蓋公司印)

負責人：

地址：

廣告聯絡人：

電話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0 0 0 3 0 6 7 8	金額 新台幣 (小寫)	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元	
通訊欄 (限與本次存款有關事項)		收款戶名	社團法人中國土木工程學會								
繳納會費		寄款人		主管：							
<input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元		姓名									
<input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元		地址	□□□□—□□								
訂閱土木水利雙月刊，一年六期		電話	經辦局收款戳								
<input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣300元		虛線內備供機器印錄用請勿填寫									
<input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣1,800元											
自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份											
訂閱中國土木工程學刊，一年八期											
<input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣1,600元											
<input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣3,600元											
<input type="checkbox"/> 國外·個人 美金80元											
<input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金200元											
自第__卷第__期起__年期學刊__份											

◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款 別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 300元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 1,600元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 80元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 200元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡 別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		白天聯絡電話
信用卡卡號			通訊地址
信用卡末三碼			
信用卡有效期限	(月/年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)

創建建築科技有限公司

Chuang-Jian Architectural Tech. Ltd.

【專業服務項目】

- 特殊造型帷幕系統設計施工
- 無縫乾式複合外牆設計施工
- 3D曲面量體分析設計施工、合理化分析設計施工
- 節能斷熱外牆U值分析及設計施工
- 外牆都市更新規劃設計施工
- 藝術造型紋理塗裝系統設計施工
- 後製仿清水模系統設計施工



北醫癌症大樓



台中捷運G9站



廣興健嘉義廠房



台中高鐵站捷運通道



國立台中國書館

創建建築科技設立至今，不間斷的自我鞭策、日益成長茁壯。

組織配置有總管理部、工務部、規劃設計部、財務部，從工程開始的規劃建議、設計發展到實際的執行施工，我們都秉持著專業認真的態度，讓業主及建築師非常信任我們，放心把案子交給創建，完全不用擔心品質問題，因為創建建築科技就是品質的保證！

創建建築科技有限公司

總公司:台北市大同區哈密街159號一樓

Voice 02-2596-0399

Fax 02-2591-6405

Email: cjian.sto@gmail.com

http://www.cjsto.com.tw/





匯通藝文新地標／大港橋

全臺首座水平旋轉橋梁，串聯亞洲新灣、駁二、蓬萊商港區，完備港灣環鏈遊憩線，點亮港都海灣觀光新廊道。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

台北市11491內湖區陽光街323號

No. 323 Yangguang Street, Neihu District, Taipei City 11491, TAIWAN

Tel:(02)8797-3567 Fax:(02)8797-3568

E-mail:pr@ceci.com.tw

用心
做好每一件事情

匠心，才得以淬煉「專業」品質
誠心，才足以貫徹「人本」信念
悉心，才可以恢宏「關懷」情操
台灣世曦永遠以「一心」為出發
持續履行對土地、對人民不變的承諾
一個環境永續的生態樂園
一個幸福溫馨的生活家園