

110年度內政部建築研究所 研究成果發表講習會



論文集

場次E 建築資訊整合應用

- 國內建築工程推廣應用預鑄技術及獎勵機制研究-楊智斌
- 數位雙生(Digital Twin)-建築資訊建模 (BIM)
與人工智慧(AI)整合應用可行性研究-王炤烈
- 收存運用建築資訊建模 (BIM) 與物聯網(IOT)
之建築數據中心開發策略研擬-陳志賢
- 結合建築資訊建模 (BIM)、辨識技術與人工
智慧(AI)技術於建築物預鑄工法應用-曾仁杰

主辦單位：內政部建築研究所
中華民國111年5月

國內建築工程推廣應用預鑄技術及獎勵機制研究

主講人簡歷

姓名：楊智斌

服務單位：國立中央大學土木工程學系

職稱：教授/總務長

聯絡電話：03-4227151#34040

傳真：03-4257092

電子信箱：jyhbin@ncu.edu.tw

學歷：國立中央大學工學博士

經歷：國立中華大學營建管理研究所教授

主要著作：

1. 楊智斌、何明錦、厲妮妮、周宏宇、李侑學，2021.12，「國內建築工程推廣應用預鑄技術及獎勵機制研究」，內政部建築研究所研究報告。
2. 楊智斌、林子軒、謝宗興、周宏宇、劉飛翎，2020.12，「建築工程應用 BIM 所需資源共享平台規劃研究」，內政部建築研究所研究報告。
3. 楊智斌、謝宗興、周宏宇、魏玚芯、許家瑄，2019.12，「地方政府建築資訊建模(BIM)圖資交付平台規劃研究」，內政部建築研究所研究報告。
4. 王安強、楊智斌、白景富、謝宗興、厲妮妮、周宏宇、吳怡娟、陳信佑，2018.12，「建造執照應用 BIM 技術增進圖資交付與審查模式之研究」，內政部建築研究所研究報告。
5. 楊智斌、周慧瑜、邱垂德、王翰翔、周宏宇、朱美憶、廖靜雅、蘇柏仰、劉心慧、范姜逸珊、吳怡娟、陳信佑，2018.6，「鐵道工程 BIM 作業指引研訂」，交通部鐵道局委託技術服務案成果報告書。
6. 陳瑞鈴、楊智斌、王翰翔、李軒豪、謝宗興、白景富，2017.12，「我國建築工程 BIM 應用分類之評估選用方法研究」，內政部建築研究所研究報告。

中文摘要

楊智斌¹ 何明錦² 周宏宇³ 李侑學⁴

關鍵字：預鑄技術、建築工程、建築資訊建模、推動策略、獎勵機制

預鑄工法在國內已在業界使用多年，但並未受到應有的持續性重視。本研究在研究過程中分析國內預鑄工法在建築工程的產業現況，研擬國內預鑄工法推動策略及獎勵機制，以利未來預鑄技術之發展能夠更加蓬勃，營建產業的技術水準提升更加快速。

然而近年來由於勞動人口減少，民眾環保意識高漲，建築工程品質與工期要求日益嚴謹及高層建築日增，傳統工法的使用日漸受到挑戰，因此採用高品質、高效率之預鑄工法理念再次受到重視。可以預見，未來預鑄工法亦將因時代的潮流所趨而成為營建產業不可或缺之一環。

本研究執行建築工程推廣應用預鑄技術及獎勵機制研究，主要透過國內外相關文獻，瞭解目前國內外預鑄技術及獎勵機制之資訊，並透過國內相關公會及預鑄廠商之訪談及座談，了解目前國內執行預鑄技術所面臨的問題。此外，依據招標文件內容，本研究參考先進國家，分析其預鑄工法、執行方式及獎勵/補助機制，以提供後續政策擬定時之參考。

¹國立中央大學土木工程學系 教授

²中華大學建築與設計學院 院長

³國立中央大學土木工程學系 博士後研究員

⁴國立中央大學土木工程學系 碩士生

ABSTRACT

Keywords : Precast Construction Technique; Building Construction; Building Information Modeling; Promotion Strategy, Incentive Approach.

The construction industry in Taiwan gradually encounters the problems of manpower shortage and low construction productivity. Other developed countries solve similar problems by the approaches of promoting construction automation and precast construction (PC) methods, which are valuable for developing necessary solutions in Taiwan. Different PC methods have been adopted in the construction industry in Taiwan for many years. By the way, the government has issued a clear policy on urban renewal and urban dangerous and old buildings reconstruction. This makes the problem encountered by the construction industry be more severe than before. Therefore, it is clear that to adopt PC methods for building construction sector is the necessary way for the construction industry in Taiwan in the further.

This research targets on exploring the status of PC methods for building construction sector in Taiwan, and then developing promotion strategies and incentive approaches for adopting PC methods. Also, the lessons learned from other developed countries in promoting PC methods and building information modeling (BIM) technique as an aid to improving PC methods are discussed in this research.

The major research outcomes include: (1) current practice of PC uses in Taiwan, (2) promotion approach of PC methods integrated with the regulations of bulk reward for urban renewal and urban dangerous and old buildings, (3) a draft of the government's common budgeting standards of PC methods for building construction, and (4) a strategy plan of promoting PC methods for building construction. The research outcomes will be helpful to provide solid promotion strategies and incentive approaches for PC methods in the practice.

壹、緒 論

一、研究動機與目的

依據行政院核定之「社會住宅興辦計畫」，政府預訂於 113 年前直接興建 16 萬戶社會住宅及包租代管 12 萬戶。然而國內為了在短期內興建大量的社會住宅建築，隨著少子化趨勢、勞動人口減少、環保意識高漲等，建築工程品質與工期要求日益嚴謹及中高層建築日增，傳統工法的使用日漸受到挑戰，因此採用高品質、高效率之預鑄工法理念再次受到重視。參考國外的經驗，可以預見的未來，預鑄工法亦將因時代的潮流所趨，而成為國內營建產業不可或缺之一環。

目前政府正積極推動舊有建築進行都市更新，以及危險老舊建築進行重建，間接造成營建產業面臨缺工現象更加嚴重，對於政府政策的推動造成阻礙，而預鑄工法的應用便是解決缺工問題的重要途徑之一。整體而言，為解決國內營建產業發展困境，建築工程導入預鑄技術是必走的路徑，而長期的政策引導則是必須採用的務實作法之一，如此方能使產業正常發展，同時強化國內營建產業朝向建築 4.0 發展的力道。本研究預計研擬國內預鑄工法推動策略以及獎勵機制，以利國內未來預鑄技術之發展能夠更加蓬勃，營建產業的技術水準提升更加快速，乃至於經濟建設或社會發展亦有實質效益。

為推廣建築工程應用預鑄工法，並能有效掌握國內現今預鑄工法於建築工程結構體應用之產業現況與趨勢，本研究透過國內各式預鑄工法基礎資料分析、國外案例探討，以及專家訪談與座談，研擬執行策略、政策、計畫構想，以利本研究之成果能夠達到實質獎勵以及提供誘因，為國內推動預鑄工法提供驅動力。

貳、研究內容

為推廣建築工程應用預鑄工法，並能有效掌握國內現今預鑄工法於建築工程結構體應用之產業現況與趨勢，本研究透過國內各式預鑄工法基礎資料分析、國外案例探討，以及專家訪談與座談，研擬執行策略、政策、計畫構想，以利本研究之成果能夠達到實質獎勵以及提供誘因，為國內推動預鑄工法提供驅動力。

具體而言，本研究透主要研究內容如下：

- 一、掌握國內現今預鑄工法於建築工程結構體應用之產業現況與趨勢，研擬執行策略、政策、計畫構想，以利本研究之成果能夠達到實質獎勵以及提供誘因，為國內推動預鑄工法提供驅動力。
- 二、為推廣建築工程應用預鑄工法，研提於共同性費用編列標準中增列預鑄工法的預算編列模式建議草案，以利後續供政府部門納入修改共同性費用編列表參考。
- 三、研提建築物在都市更新、危險老舊建築重建案採用預鑄工法之獎勵有關具體措施草案及模擬計算範例，以利後續供政府推廣預鑄工法時納入法規參考。
- 四、瞭解國外應用 BIM 技術強化預鑄工法之應用方式，供國內日後公、私部門參考。
- 五、辦理北、中、南部各 1 場推廣應用說明會，說明本案研究成果並推廣建築工程預鑄技術。

參、研究發現

一、國內外預鑄相關文獻探討

以國外導入預鑄技術而言，若是以營造商的角度來看，若不是市場驅使，要使其採用新的建築工法有一定之困難，在這當中勢必對其營造成本有一定之影響。然而，以學術研究角度來看，不僅僅是探討預鑄工法之優點，甚至更深入地工法之研究、碳排放、產能等亦有相當之成果；在實務面來看，市場也因應預鑄工法的成熟發展，而制定出相關之法規，更引進新式的預鑄工法。但唯獨目前在預鑄工法的推動上尚未有完整之策略，因此本研究期望在制度、獎勵等方面擬定出完整之策略，使得國內在推動預鑄工法上更加完善。

本研究透過相關文獻及訪談可發現，國內在預鑄相關研究上相當全面，國內的建築結構、外牆等預鑄產能以目前市場的需求程度，在執行預鑄工程的廠商都已經產能飽和的狀態，若未來國內要大量採用預鑄工法，則需要對水泥製品工業做更多的輔導轉型。然而建築採用預鑄工法可達成高品質、工期短、出工數減少等效益，各界普遍也認為國內缺工及工資高漲等問題，採用預鑄工法為國內當務之急之作法。此外，本研究透過前述文獻回顧，探究預鑄工法在各面向之優缺點，詳表1及表2所示，希冀透過此內容將有助於提升廠商的接受度及預鑄技術的推廣，並可釐清並逐步解決國內目前預鑄可能面臨之問題。

表 1 預鑄工法之優點

項目	說明	參考文獻
節省施工工期	<ul style="list-style-type: none"> • 預鑄工法有別於傳統場鑄工法，直接在工地以外的場域進行結構構件之生產，而後直接於施工現場將構件進行組裝，大幅縮短施工工期。 • 根據研究調查，約有 66% 之受訪者認為預鑄工法有效節省施工工期，甚至有 35% 受訪者認為，至少可以節省 4 週以上之施工工期。 • 預鑄工法相較於傳統場鑄工法可節省至少 20%~50% 之施工工期。 	<ul style="list-style-type: none"> • Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry, 2020 • 台灣地區預鑄技術發展與應用
混凝土品質優良	<ul style="list-style-type: none"> • 傳統場鑄工法在施工性不佳處，可能會有蜂窩、冷縫及孔洞等問題產生，需進行拆模後補強作業。 • 反觀預鑄工法所有構件，皆在廠房內生產，特別在其鋼筋之綁紮部分，直接以焊接方式固定、甚至發展出螺旋箍筋、一筆箍等技術，增強耐震能力，降低柱、梁構件在高強度地震下爆筋之風險，有效確保構件之品質。 	<ul style="list-style-type: none"> • Prefabrication and Modular Construction 2020 • (2007)台灣地區預鑄技術發展與應用，2007 • 預鑄混凝土工法應用於建築之優勢
節省人力成本	<ul style="list-style-type: none"> • 在預鑄工法施工階段上所投入之勞動力，明顯低於傳統場鑄工法，由於場鑄工法在每項施工項目中皆需投入大量人員，如鋼筋綁紮、模板架設等，使得預鑄工法在人力成本上有非常大之節省。 	<ul style="list-style-type: none"> • Prefabrication and Modular Construction 2020 • 台灣地區預鑄技術發展與應用，2007
提升施工安全性	<ul style="list-style-type: none"> • 由於預鑄工法在施工過程中，樓板可能尚未吊裝，為確保人員之安全，皆會事先安裝安全措施、或是在建築物周圍之梁體上安裝欄杆及安全母鎖，確保施工人員安全。 	<ul style="list-style-type: none"> • Prefabrication and Modular Construction 2020 • 台灣地區預鑄技術發展與應用，2007

(資料來源：本研究整理)

表 2 預鑄工法之缺點

項目	說明	參考文獻
產業的不普及性	<ul style="list-style-type: none"> 由於預鑄工法在其設計、施工上，更具有其技術性，因此在目前產業上來說，並不普遍用於施工上。甚至在國內市場來說，僅擁有少數廠商有用設計、施工之能力，因此在預鑄工法之推動或使用上，目前尚處於初起步階段。 	<ul style="list-style-type: none"> Prefabrication and Modular Construction 2020
運輸之可行性及運輸花費	<ul style="list-style-type: none"> 由於預鑄構件並非在施工場域進行生產，因此勢必須以板車載運之方式運送，而當中需考量每項構件之重量、尺寸，以決定該採取何種大小之運送車輛，因此，在其運送成本上勢必較傳統工法增加不少。 	<ul style="list-style-type: none"> Prefabrication and Modular Construction 2020 Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry, 2020
變更設計之困難	<ul style="list-style-type: none"> 執行預鑄工法之專案，若遇上變更設計等狀況，在其構件變更上非常之困難，由於構件皆事先在廠房生產完畢，若要大幅度調整整體結構，可能會造成構件生產之浪費，使得建築成本提高。 	<ul style="list-style-type: none"> Prefabrication and Modular Construction (2020) Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry, 2020
預鑄人才短缺	<ul style="list-style-type: none"> 由於目前廠商施作尚未普及，在預鑄技術設計及施工人才上相當缺乏，導致目前國內推動上的困難。 	<ul style="list-style-type: none"> Prefabrication and Modular Construction (2020)

二、國內預鑄技術基礎資料調查與分析

本研究已透過國內相關文獻及網路資料，蒐集國內目前有執行建築工程應用預鑄工法或生產預鑄產品之公司，可發現由於國內營建產業界應用預鑄技術案例並不多，除了公部門有少數幾個建築工程採用部分預鑄，而民間建築工程導入預鑄技術，也因為有諸多因素，無法蒐集到完整資料。此外，應用預鑄技術的廠商亦屈指可數，部分建材廠商也多為代工生產預鑄產品，因此，國內建築工程專案應用預鑄技術相當有限，進而影響在預鑄工法的研發與實際的應用。

本研究透過訪談及座談方式進行相關國內預鑄產業基礎資料調查，

瞭解國內目前應用預鑄技術目前遭遇的困難，除了可能會增加整體的建造成本外，目前廠商施作尚未普及，在預鑄技術及人才上相當缺乏，導致目前國內推動上的困難等。本團隊透過訪談，針對預鑄相關之利害關係人及工程階段進行問題解析，如表 3-3 所示，以作為後續擬定策略之基礎。

表 3 推動預鑄技術各利害關係人所面臨之問題

利害關係人 階段	業主端	廠商端				
		規劃/設計 廠商	施工廠商	監造廠商	預鑄專業廠	混凝土製品 廠
規劃	<ul style="list-style-type: none"> 業主對於預鑄需求 預鑄預算編列 缺乏預鑄相關知識 缺乏預鑄推動政策(相關誘因、獎勵措施及作為) 	<ul style="list-style-type: none"> 顧問公司或建築師事務所少有預鑄專案之經驗(規劃設計構想) 	<ul style="list-style-type: none"> 預鑄專案之經驗不足 預鑄技術成本高 預鑄技術門檻高 	<ul style="list-style-type: none"> 監造廠商少有預鑄監造之經驗 	<ul style="list-style-type: none"> 業務來源不穩定 預鑄專業協力廠商資源不足 	<ul style="list-style-type: none"> 需以 OEM(代工)的方式進行 初期需投入較高成本 預鑄產品製造經驗不足
設計	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄設計規範 缺乏對預鑄設計的認知 	<ul style="list-style-type: none"> 預鑄建築設計經驗有限 需與預鑄專業廠商進行設計溝通 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄設計(及 BIM)整合人才 	<ul style="list-style-type: none"> 對於預鑄設計了解有限 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄設計(BIM)人才 缺乏預鑄標準圖說 缺乏預鑄設計規範 需與建築師進行設計之溝通 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄設計人才 缺乏預鑄標準圖說 缺乏預鑄設計規範 預鑄技術門檻較高
施工	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄施工規範 缺乏對預鑄施工的認知 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄施工監造之經驗 相關規範不明確，監造工作不易 	<ul style="list-style-type: none"> 預鑄施工費用高 缺乏預鑄施工人才 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄施工監造之經驗 相關規範不明確，監造工作不易 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄產品製造人才 缺乏預鑄現場施工人才 原物料上 	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏預鑄產品製造及施工人才 預鑄廠缺乏生產空間

					漲，預鑄產品成本較高	• 原物料上漲，預鑄產品成本較高
--	--	--	--	--	------------	------------------

三、建築工程應用預鑄技術預算編列建議草案

本研究已完成國內建築工程預算編列方式分析，了解實務上公共工程預算編列方式，並蒐集國內目前建築工程應用預鑄工法的案例，以訪談搭配案例分析與模擬，提出預鑄工法預算編列模式建議草案。本研究針對草案內容提出三種不同之建議作法，並進行優缺點分析，如表 4 所示。

本研究經分析後認為以作法二「以年度「共同性費用編列基準表」為基礎，參考目前調查完成的預祝與傳統 RC 的單價比例，利用直接加成方式進行編列，惟費用不應高於鋼骨構造」較適合國內初期推動預鑄技術的方法，以利未來實務操作之可行性。此外，若國內累積一定的預鑄實際案例後，建議可以回歸傳統利用歷史案例進行統計的共通性費用編列標準表的作法。

表 4 預鑄工法預算編列模式建議草案之方案比較表

方案	內容概述	優點	缺點
既有作法	以少數案例進行單價計算	1. 實際案例具說服力 2. 融合於既有作法中，使用者熟悉使用方式	1. 非共同性編列項目 2. 類型受限 3. 案例少，持續更新不易
作法一	以少數案例進行單價計算，但價格不低於同類型之傳統 RC 單價	1. 實際案例具說服力 2. 反應預鑄較傳統 RC 市場價格高	1. 非共同性編列項目 2. 類型受限 3. 案例少，持續更新不易

方案	內容概述	優點	缺點
作法二	以年度傳統 RC 單價為基礎，利用加成方式推估各類型參考單價	1.與既有作法雷同 2.適度反應市場價格 3.轉換為共同性編列項目 4.融合於既有作法中，使用者熟悉使用方式	1.加成的比例不易反應類型間實際差異 2.限制預鑄應用的類型
作法三	以廠商訪談方式進行各類別單價之推估	1.完全反應市場價格 2.可以提供多元類型	1.僅為市場端的價格 2.訪談產生價格說服力受限 3.需定期再行訪談更新價格

(資料來源：本研究整理)

四、建築工程採用預鑄工法獎勵機制與推動策略

本研究針對前面章節所彙整的國內推動預鑄工法面臨的問題與挑戰，嘗試研提可能的應對作法與策略，並具體歸納為五大面向，期望之後發展成為國內預鑄工法推動的策略地圖。初步概念如圖1所示之內容。

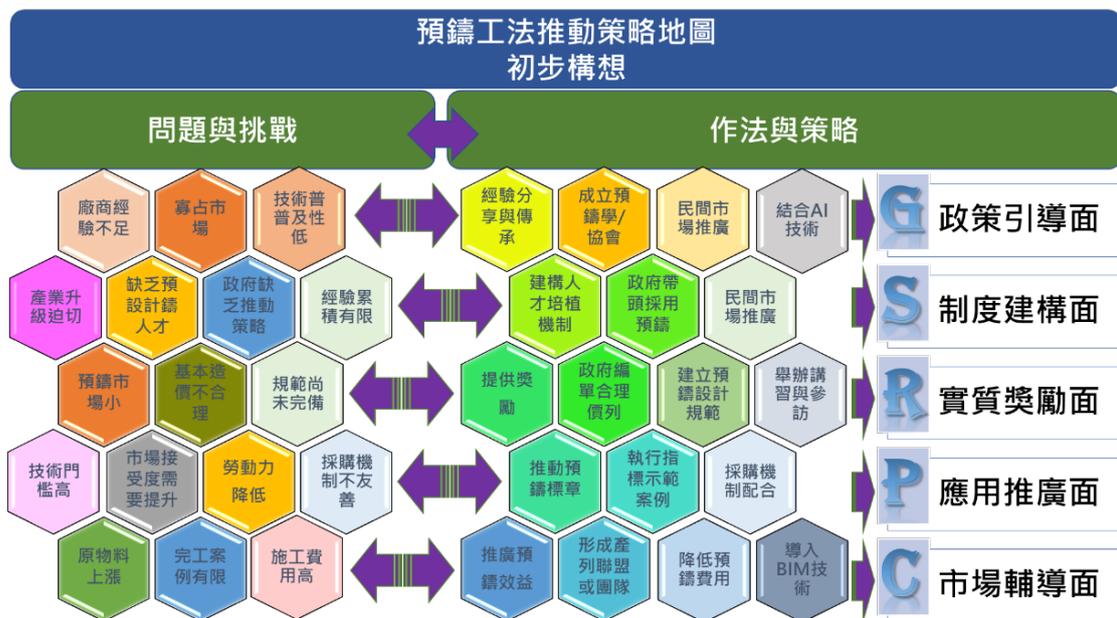


圖 1 預鑄工法推動的策略地圖構想

(資料來源：本研究繪製)

針對國內日後推動應用預鑄工法，本研究提出認為可以採取以下之策略，共分為五大面向，詳表 5 所示，詳細內容分述如各節。

表 5 建築工程預鑄工法推動策略

面向	推動策略
一、政策引導面	<ul style="list-style-type: none"> ■ 增加誘因：將導入預鑄技術做為金質獎、金安獎及各縣市政府公共工程獎項加分的選項之一 ■ 實質優惠：減收應用預鑄工法廠商押標金、履約保證金或保固保證金 ■ 建議採用：公有建築工程一定工程規模以上(例如 2 億元以上)，建議將預鑄工法納為採用的設計工法之一
二、制度建構面	<ul style="list-style-type: none"> ■ 合理預算：研擬合理的結構體應用預鑄工法的共同性費用編列基準 ■ 建立標章：研擬「建築物預鑄建築標章推動使用作業要點」推動預鑄建築標章 ■ 結合標章：在綠建築、智慧建築、耐震設計等標章中納入預鑄工法進行推廣
三、實質獎勵面	<ul style="list-style-type: none"> ■ 獎勵容積：在「都市更新建築容積獎勵辦法」及「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」中，另訂預鑄技術獎勵辦法，給予獎勵容積 ■ 提供補助：對於預計採用預鑄工法之專案，補助進行預鑄工法設計或申請「預鑄建築標章」有關費用
四、應用推廣面	<ul style="list-style-type: none"> ■ 擘畫願景：建立預鑄技術推動路徑圖，讓預鑄工法之推動具有可期待性 ■ 分享資訊：建立預鑄資訊平台，分享各式預鑄工法有關的訊息，加速知識與訊息的傳播
五、市場輔導面	<ul style="list-style-type: none"> ■ 建構組織：輔導成立預鑄建築學/協會，透過民間團體發揮更大的彈性與推動助力 ■ 培育人才：協助培育預鑄人才，讓專業知識能夠普及

肆、結 論

經由計畫執行整年度之工作，本研究已完成之工作項目分述如後：

一、國外應用 BIM 技術強化預鑄工法之應用案例分析

本研究透過國內外有關預鑄技術及相關獎勵機制資訊分析與歸納。目前主要以美國及日本做為學習之對象，分析其預鑄推動經驗，透過文獻發現，國外推動預鑄技術背景之一為人力短缺，與國內目前遭遇人力短缺有相似之處。此外，本研究亦參考日本類似的作法，以促進新技術

利用的角度，提出推動的策略地圖，以利於預鑄技術的推動。

二、國內應用預鑄工法於建築工程之基礎資料調查及文獻分析

本研究透過國內相關文獻及網路資料，蒐集國內目前有執行建築工程應用預鑄工法或生產預鑄產品之公司，發現國內營建產業界應用預鑄技術案例並不多，應用預鑄技術的廠商亦屈指可數，因此，國內建築工程專案應用預鑄技術相當有限，進而影響在預鑄工法的研發與實際的應用。

此外，本研究亦透過訪談及座談方式進行相關國內預鑄產業基礎資料調查，瞭解國內目前應用預鑄技術目前遭遇的困難，除了可能會增加整體的建造成本外，目前廠商施作經驗有限，且在預鑄技術及人才上相當缺乏，導致目前國內推動上的困難。此發現對於本研究提出未來的推動策略具有相當大的幫助。

三、建築結構體應用預鑄工法之項目、比例之獎勵分析

本研究已分析目前國內建築工程相關之獎勵機制及補助辦法，並針對「都市更新建築容積獎勵辦法」及「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」中，提出另訂預鑄技術獎勵辦法，給予獎勵容積。本研究建議可以給予獎勵容積之案件，應於完成預鑄工法設計後，於申請建造執照時一併提出申請。而是否給予獎勵容積之計算則以建築物預鑄構件體積達一定比率者，給予一定基準容積之百分比。(詳第五章內容)。

四、研提預鑄工法給予獎勵之建議草案及日後執行之單位

本研究已分析目前國內建築工程相關之獎勵機制及補助辦法，並針對「都市更新建築容積獎勵辦法」及「都市危險及老舊建築物建築容積獎勵辦法」中，提出另訂預鑄技術獎勵辦法，給予獎勵容積。本研究建議針對應用預鑄工法者，採用預鑄工法達一定比率者，給予一定基準容積之百分比(詳第五章內容)。

五、研提國內推廣預鑄工法之策略、推動策略地圖、獎勵草案及模擬計算範例

本研究已完成國內推廣預鑄工法之策略、獎勵草案等內容，包括國內未來推廣預鑄技術時，可參考不同面向之策略執行。此外，本研究亦參考日本文獻所提路徑圖的作法，提出國內推動預鑄技術的推動策略地

圖，有助於公、私部門有一長期政策之方向導引。

六、研提於共同性費用編列標準中增列預鑄工法的預算編列模式建議草案

本研究透國內既有建築工程預算編列機制及預鑄個案的分析，提出「預鑄技術預算編列模式建議草案」，主要參考公共工程預算編列既有機制，並在建築工程共同性費用編列標準中增列不同比例預鑄之造價建議草案等，本研究針對建議草案提出三項之作法：(一)以少數案例進行單價計算，但價格不低於同類型之傳統 RC 單價、(二)以年度傳統 RC 單價為基礎，利用加成方式推估各類型參考單價、(三)以廠商訪談方式進行各類別單價之推估及其進行優缺點分析(詳第四章第三節)，以利後續供政府部門納入修改共同性費用編列表參考。

七、專家諮詢會議

為了使本研究內容更臻於完善，本研究規劃召開兩場次專家諮詢會議(期中及期末)，第一場於 110 年 6 月 28 日(週一)上午辦理完成，主要邀請國內預鑄領域專家學者及預鑄廠商進行討論；第二場於 110 年 10 月 1 日(週五)上午辦理完成，主要邀請公部門對預鑄技術有一定瞭解之專家進行討論。由於新冠肺炎之因素，兩場皆以 Google Meet 線上會議方式召開，兩場次會議皆檢視計畫所提出階段性成果，包括建築工程應用預鑄技術預算編列草案、預鑄工法推動策略等，以使研究成果確實符合產業實際應用之需求。

八、北、中、南部推廣說明會

本次成果說明會分別於 110 年 10 月 8 日、110 年 10 月 12 日、110 年 10 月 15 日以 Google Meet 線上會議方式辦理完成，會議內容除了由執行團隊進行成果簡報之外，另邀請目前執行預鑄技術較具經驗之潤弘精密工程事業股份有限公司詹耀裕總經理，分享建築工程應用預鑄工法之經驗。本次會議北部出席率為 72%、中部出席率為 68%、南部出席率為 83%。本次會議亦透過綜合討論時間，收集與會者對於預鑄議題之相關問題，將可回饋於本研究之內容，相關意見及團隊答覆請參閱附錄八所示。

伍、參考文獻

- (1)McGraw-Hill Construction,"Smart Market Report Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction.", 2011.
- (2)Wen Jiang, "Factors affecting prefabricated construction promotion in China: A structural equation modeling approach.", 2020.
- (3.Israel Kaner, "Case studies of BIM adoption for precast concrete design by mid-sized structural engineering firms.", 2008.
- (4)Dodge Data and Analytics, "Smart Market Report, Prefabrication and Modular Construction." 2020.
- (5)Johnson, W."Lessons from Japan: A comparative study of the market drivers for prefabrication in Japanese and UK private housing development." 2007.
- (6)日本國土交通省，「建設技術研究開發概要」，2009.
- (7)日 本 一 般 法 人 預 鑄 協 會 ：
<https://www.purekyo.or.jp/bukai/jyutaku/prefab.html>。
- (8)溫秀玲，「建築產業跨域創新發展策略擬定」，內政部建築研究所委託研究計畫，2020。
- (9)劉賓亮，「預鑄混凝土廠生產自動化節能減碳之研究—以潤弘楊梅預鑄廠為例」，2017。
- (10)吳子良、尹衍梁，「預鑄混凝土工法應用於建築之優勢」， 2017。
- (11)尹衍樑、賴士勳，「台灣地區預鑄技術發展與應用」， 2007。
- (12)新北市政府都市更新處：<https://www.uro.ntpc.gov.tw/>。
- (13)曹昌盛，「預鑄工法—營建 4.0 的未來趨勢」，2017。
- (14)經濟部統計處：<https://www.moea.gov.tw/Mns/dos/home/Home.aspx>。

- (15)潤弘精密工程事業股份有限公司：Available from:
<https://www.rtc.com.tw/>。
- (16)林泰煌，「國內NEWRC預鑄工法實際應用與發展簡介」，2019。
- (17)亞利預鑄工業股份有限公司：<https://www.facebook.com/>。
- (18)行政院公共工程委員會，「公共建設工程經費估算編列手冊總則篇」，2018。
- (19)行政院公共工程委員會，「公共建設工程經費估算編列手冊建築工程篇」，2020年。
- (20)行政院主計總處，「110年度共同性費用編列基準表」，2020。
- (21)行政院主計總處，「111年度共同性費用編列基準表」，2021。
- (22)詹耀裕，「建築工程應用預鑄工法之經驗分享」，2021。

數位雙生(Digital Twin)-建築資訊建模 (BIM) 與
人工智慧(AI)整合應用可行性研究

主講人簡歷

姓 名：莊榮彥

服務單位：思納捷科技股份有限公司

職 稱：總經理

聯絡電話：7713-4828

傳 真：2713-0867

電子信箱：polon@insynerger.com

學 歷：台灣大學 工程科學系 博士

經 歷：思納捷科技股份有限公司 總經理

資訊工業策進會 副主任

中文摘要

莊榮榮¹ 嚴嘉鑫²

**關鍵字：數位雙生、建築資訊模型、人工智慧、物聯網、空調
節能**

數位雙生(Digital Twin, 簡稱DT)以虛擬的場域來呈現實質環境的資訊應用,提供使用者或決策者進行判讀或決策運用。DT是建立在人工智慧、機器學習、資料分析三個基礎,創造動態的數位模型。這個模型可以不斷的學習、更新場域的實質狀態,達到資訊整合應用。

近年來,建築資訊模型(BIM)導入設計與工程應用日漸成熟,隨著本所104、105年研擬「我國BIM協同作業指南執行要項」,108、109年完成建築物維護資料交付項目與維護管理作業指南之研擬,從設計、施工、竣工到維運階段應可建立完整建築物生命週期維護管理資料。智慧建築是未來國家推動建築發展的政策主軸,人工智慧(Artificial Intelligence, 簡稱AI)的導入可以協助相關資訊整合應用,建立主動化與最佳化的管理指標或服務模式,藉此節省日常維護管理所需的人力與成本,延伸建築物使用之生命週期。

本案採用實作方式於實際案場建值BIM與AIoT整合的示範平台,透過改善建築物內設備的方式驗證此整合應用的可行性與效益。

¹思納捷科技股份有限公司 總經理

²思納捷科技股份有限公司 經理

ABSTRACT

Keywords : Digital Twins, BIM, Artificial intelligence, IoT, Chiller, Power saving

Digital Twin (DT) uses data to present information applications in the real environment, providing users or decision makers with interpretation or decision-making applications. DT is built on the three foundations of artificial intelligence, machine learning, and data analysis to create dynamic digital models. This model can continuously learn and update the actual state of the field to achieve information integration applications.

In recent years, Building Information Modeling (BIM) has introduced data on design, process application, stage maturity, design, construction, completion, construction completion, construction completion, maintenance management, etc. of the whole life cycle of a building. From design, construction, completion to maintenance, it should be possible to establish complete building life cycle maintenance management data. Smart buildings are the main policy axis for the country to promote the development of buildings in the future. The application of artificial intelligence can assist in the integration and application of relevant information, establish automated and optimized management indicators or service models, thereby saving manpower and costs required for daily maintenance and management. Extend the life cycle of building use.

In this case, a demonstration platform for the integration of BIM and AIoT was built on the actual site, and the feasibility and benefits of this integrated application were verified by improving the equipment performance in the building.

壹、緒 論

一、研究動機與目的

建築物數位雙生的精神在於將建物的有形資產以數據資料的方式複製儲存、分析、利用。近十餘年來因數位科技的進步與資通訊設備普及化並成本降低，將建物數位化的技術門檻也隨之降低。像是 BIM 的導入對於建物在營建週期的審查自動化、施工期間工程碰撞避免、工序最佳化等應用都有成熟的實績。

但諸如 BIM、IoT 與 AI 的整合應用卻鮮少在一個建物生命週期最長的運維(O&M)週期中充分的被利用並賦予價值。多數的 BIM 資料在營建週期結束後便束之高閣。本研究即聚焦在建物數位資料在營運週期依然能發揮其價值。本計畫將在 BIM 資訊在的營運週期的再利用之外納入建物 IoT 的即時資訊以及透過 AI 方法論將建物的靜態、動態資料賦予建築運維上的價值。

貳、研究內容

本研究的三大技術領域分別為 BIM(Building Information Model)、IoT(Internet of Things)與 AI(Artificial Intelligence)。BIM 領域最早由美國發跡，於 2007 年起建築送審須提交 3D BIM 模型作為審查依據。美國建築師協會 AIA 於 2008 年提出全面以 BIM 為主，整合各項審查作業流程。之後先進國家紛紛跟進，將 BIM 納入公共工程的流程要件。陸續跟進的國家為英國、新加坡、丹麥、日本、中國、韓國與芬蘭。過內近年亦將 BIM 納入較大規模公共工程標案的要件。也有產業界積極投入 BIM 的開發與應用，包括物管業者、建築自動化(BA, building automation)業者與資通訊整合業者。

建築 IoT 的產業算是建築自動化(BA, Building Automation)的延

伸。有別於建築有數十年甚至百年的生命週期，資通訊技術的生命週期可在一至三年內就更替一個世代。所以在許多建物在營建時期建置的資通訊系統在建物運營時期會遇到因資通訊技術汰換而無法維修或料件停產的窘境，而後裝(Aftermarket installation)的建築 IoT 市場也因而興起。IoT 的特性是採用高度彈性的通訊元件與協定，如 4G、5G 及其下的窄頻服務(ex. NB-IoT)以及 WiFi、ZigBee、Bluetooth 等低功耗、易於佈建的通訊技術，搭配感測網路、控制器、影音通路等，並由行動裝置 App 將應用整合到隨時隨地可存取操作的情境。

IoT 技術與產品的後裝特性部分適應了建築生命週期內資通訊技術演化的問題，讓舊建築智慧化的門檻降低。所以近年 IoT 產品在建築領域有逐漸取代部分以 SCADA 實現 BA 的趨勢。

關於建築的 AI 技術現況，人工智慧的應用多是以影像辨識的型態利用在商用建築中，例如門禁的生物辨識、人流(crowd monitoring)/容留(accommodate)感測計數分析、電子圍籬(Electronic fence)等應用。常見的有利用集中式運算(centralized computing)或邊際運算(edge computing)的方式解決建築子系統的問題，鮮少有跨子系統數據整合的運用。而除了前述安防系統的利用外，能資源管理例如電力設備安全診斷、設備預知保養與耗能設備的效能優化都是近年建築領域 AI 較常見的產品方向。

本研究之目的為利用建物營建週期的重要數據資產 BIM，加上 IoT 技術整合建物運營週期設備數據、環境感測數據與控制資源，建立建物數位雙生的模型，再結合 AI 的手法將建築內的硬體設備的運維智慧化以達到降低人力投入、降低能資源成本與設備效能優化的綜效。

參、研究發現

根據改善前與改善後的操作與耗能製成以下比較表。表中外氣溫度為中央氣象局板橋測站之讀數。冰水主機當日累積耗能为冰水主機電表瓦時計之讀數累積值(kWh 讀數日尾減日首)。根據數據計算，不改變每日開機 12.5 小時之下每日可節省 82 度電，相當於改善 6.3%。而實驗組當日外氣溫度還略高於對照組外氣溫度。

若以該建築每月上班日 20 日計算，每度電費新台幣 3 元。每月將可省下 5000 元的電費，每年可節省六萬元電費。

若暫不納入研發成本系統單一冰水主機建置費用(含工料)約為十萬元(閘道器含安裝設定兩萬、BTU 計含安裝設定四萬、電表含安裝兩萬、通訊布線及設定約兩萬)，投資的回收年限將不會超過兩年。對於年度使用時數更長，冷凍噸數更大的主機而言，回收年限與投資報酬率將更具市場誘因。

肆、結 論

本研究透過實作方式已將數位雙生的概念實體化，上端資料流部分透過 BIM 的圖台工具以及 IoT 平台的資料擷取，將真實空間中的幾何資料、設備運轉資料帶到虛擬空間來建立數位雙生。進而在虛擬空間利用 AI 建立建築設備的效能模型，在模型中運算並優化效能，再將優化的建一回饋給實體世界(下端的回饋資訊)。完成數位雙生的運作。AI 冰機優化的驗證方法則為先建立冰機改善前的效能基線(Baseline)，與改善後的實際量測績效做出驗證。本可行性研究除了驗證數位雙生的可行性，也驗證在不投入昂貴資源的條件下亦可完成數位雙生的架構，包含低廉的 IoT 架構與設備、開源的 BIM 圖台與可在雲端運作的 AI 優化演算法。

探討數位雙生利用感測、建模與決策的手法結合領域知識來改善建築在全生命週期中的各種應用。包含了營建管理、設施設備管理、居住空間的安全防災、健康舒適、節能減碳、貼心便利以及各種輔助決策來降低營運成本、提高效率與居住品質等。除了如本計畫針對節能減碳的應用，透過即時監測與 AI 演算法自動調控設備，優化設備效能之外，運用 AI 機械學習演算法預測或辨識空間使用行為、主動訊息發布及能源管理最佳化訊息或決策建議。以下列舉其他可透過數位雙生來優化建築管理的各種方向與可行性。

- (1)設備維管：監測設備參數，預測設備劣化時主動推播通報。效益為節省人力，提高設備妥善度。
- (2)能資源管理：監測並記錄建築用電參數，利用演算法精算最佳契約容量及電價方案。效益為節能、節費。
- (3)健康舒適：監測建物空間舒適度參數及有害氣體參數模型，透過演算法分析空氣環境。效益為提升住戶健康條件、了解空間使用行為。
- (4)輔助決策：由大數據評比各供應商、產品維修率、維修成本作為未來採購依據。效益為建立優質供應鏈、提升設備品質及妥善度。

伍、參考文獻

- [1] BIM Blog, “Model viewers,” [online]. Available: <https://bimblog.bondbryan.co.uk/model-viewers/>
- [2] 台灣積體電路, “業界首創人工智慧冰水系統節能手法年省 3,000 萬度電,” [online]. Available: <http://esg.tsmc.com/csr/ch/update/greenManufacturing/caseStudy/18/index.html>
- [3] 蔡尤溪, “空調系統節能應用,” [online]. Available: <http://https://www.slideserve.com/makya/3433386> .
- [4] 陸紀文, “莫里耳圖與空氣濕線圖應用,” [online]. Available: <http://blog.ncut.edu.tw/userfile/2773/8第八節-莫里圖耳圖應用.pdf>.
- [5] 蔡尤溪, “空調負荷計算理論,” [online]. Available: <http://esg.tsmc.com/csr/ch/update/greenManufacturing/caseStudy/18/index.html>
- [6] 台灣日立江森自控, “冰水主機負荷曲線,” [online]. Available: http://http://www.jci-hitachi.tw/products/products_level3.aspx?83ADA55777525D74.
- [7] 台灣積體電路, “台積公司成功開發業界第一個冰水系統最佳化節能控制程式,” [online]. Available: <https://esg.tsmc.com/csr/ch/update/greenManufacturing/caseStudy/6/index.html>

- [8] 台灣積體電路, “TWI640387B 最佳化控制的冷卻系統及其之自動控制方法,” (專利) [online]. Available: <https://patents.google.com/>.
- [9] XeoLabs, “xeokit-bim-viewer,” [online]. Available: <https://github.com/xeokit/xeokit-bim-viewer>.
- [10] XeoLabs, “Xeokit SDK” [online]. Available: <https://github.com/xeokit/xeokit-sdk>.
- [11] IFCOpenShell, “IFCOpenShell” [online]. Available: <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell>.
- [12] Autodesk, “Autodesk Forge” [online]. Available: <https://forge.autodesk.com/>.
- [13] Unity, “Unity Reflect” [online]. Available: <https://unity.com/products/unity-reflect>.
- [14] YouTube, “Interview of Dr. Michael Grieves” , [online] <https://www.youtube.com/watch?v=vAgDfcR-Ww8>
- [15] David Gelernter (1991), “Mirror World” , (pp. 16-19). ISBN 978-0195079067
- [16] 經濟部能源局非生產性質行業能源查核, [online]<https://energynet.tgpf.org.tw/>
- [17] 台灣產業服務基金會, ” 空調系統能源管理應用指標” , <https://www.ftis.org.tw/active/hsct-002/002-1b.pdf>

收存運用建築資訊建模 (BIM) 與物聯網 (IOT) 之建
築數據中心開發策略研擬

主講人簡歷

姓 名：王仁佐

服務單位：國家地震工程研究中心

職 稱：研究員

聯絡電話：02-6630-0894

傳 真：02-66300858

電子信箱：rzwang@ncree.narl.org.tw

學 歷：國立中央大學 土木系結構組

經 歷：國立中央大學土木系 助理教授、國立中央大學土木系 講師

主要著作：

1. 陳志賢, 蔡明華, 王仁佐, 謝志毅, 許家展 (2020), 物聯網與城市實景三維模型之整合應用—以沙崙智慧綠能科學城 C 區為例, 第十五屆結構工程研討會暨第五屆地震工程研討會, 中華民國結構工程學會, 2020/09/02~2020/09/04.
2. 陳志賢, 蔡明華, 王仁佐, 謝志毅, 許家展 (2020), BIM 在大樓能源管理的應用—以沙崙智慧綠能科學城 C 區為例, 第十五屆結構工程研討會暨第五屆地震工程研討會, 中華民國結構工程學會, 2020/09/02~2020/09/04.
3. Y.F. Duan¹, S.M. Wang, R.Z. Wang, C.Y. Wang, J.Y. Shih, and C.B. Yun, “Vector Form Intrinsic Finite-Element Analysis for Train and Bridge Dynamic Interaction,” Journal of bridge Engineering, 23 (1), 2018. (通訊作者) (SCI)
4. 發表於中華民國力學期刊之「VECTOR FORM INTRINSIC FINITE ELEMENT BASED APPROACH TO SIMULATE CRACK PROPAGATION (Vol. 33, No. 6, pp. 797 - 812)」一文, 榮獲中華民國力學學會本 (107) 年度力學期刊最佳論文獎 (固力組)

中文摘要

陳志賢¹ 王仁佐² 溫琇玲³ 鄭維中⁴

關鍵字：建築數據庫、數據安全、管理措施

建築數據的收集分析將有效提升建築全生命周期的安全性能、能源的節約以及環境的健康與最佳化的管理，並提供使用者貼心便利的服務。若從城市治理的觀點，建築的數據蒐集將是城市智慧治理的重要依據。因此，以數據驅動的世界，所有建築都需要有建築數據庫或數據雲來收集建築的各種數據，擴大到區域或城市則需要建築數據中心的建置來保存建築空間各種靜態與動態數據，進行分析提供服務。

本研究內容包括，(一)收集國內外文獻，參考彙整建築數據庫及數據中心基礎設施規劃，包括基礎架構說明、主要功能、擴充性規劃以及基礎設施管理機制。(二)提出數據管理措施，包括組織、制度及工具。(三)依照國內條件，研提建築數據採集能力、採集範圍與採集方式說明。(四)數據安全以及隱私權保護措施，從網路安全、數據安全、應用安全等全方位安全技術保障數據安全，並應符合隱私權保護等相關法令規定。

¹國家地震工程研究中心 助理研究員

²國家地震工程研究中心 研究員

³中國文化大學 副教授

⁴國家地震工程研究中心 資訊技術組組長

ABSTRACT

Keywords : Building Database, Data Security, Management Measures

This project mainly formulates development strategies of building data center, used in building information modeling (BIM) and Internet of Things (IoT), infrastructure planning of building database and data center, including infrastructure description, main functions, expansion planning and infrastructure management mechanism. Data management measures include organization, systems, tools, collection capacity of building data, collection range, description of data collection method, data security and privacy protection measures. Primary functions of database are collection, storage, analysis, visualization, and standardization of value-added applications. The method of acquiring building database is mainly through building database cloud platform. The type of data is based on safety, management, energy saving, and health. This project has completed the basic structure of social residential building data database. It provides central or local government with building maintenance and operation management units. It can be used as reference of helping to formulate management strategies of database for professional construction impersonal entities.

壹、緒論

一、研究動機與目的

我國科技會報辦公室於 109 年 2 月研提「國家發展計畫(110 至 113 年)」具體計畫發展策略，有關「智慧國家」未來方向的規劃部分，因應 2030 年臺灣在社會結構與科技進展及環境永續等挑戰，在下階段 DIGI+ 方案規劃，將「資料治理」及「資通安全」兩大關鍵基礎議題，融入政府各項計畫，其中「資料治理」將建構以「資料」為核心之公私領域決策環境，透過軟硬體整合強化，促進資料治理及多元資料應用推展。

配合前述國內資訊發展政策，建築產業需積極推動數位轉型，透過 BIM、資通訊、自動化及智慧控制技術，並以人為本的使用者體驗作為技術發展重點，著重於建築空間品質提升與環境友善及永續發展。為達此目標，建築需具有靜態 BIM 資訊、各種感知連結、數據融合及自進化和深度學習等功能。建築中究竟有多少數據該被收集，如何收集，以及如何運算分析，提供使用者應用服務，將成為物聯網、大數據、人工智慧及 5G 時代的重要研究課題。

建築數據的收集分析將有效提升建築全生命周期的安全性能、能源節約及環境健康與最佳化管理，並提供使用者貼心的服務。若從城市治理觀點，建築數據蒐集將是城市智慧治理的重要依據。因此，以數據驅動的世界，所有建築都需要有建築數據庫或數據雲來收集建築的各種數據，擴大到區域或城市則需要建築數據中心的建置來保存建築空間各種靜態與動態數據，進行分析提供服務。

貳、研究內容

一、文獻回顧

由於國內資訊發展政策，建築產業需要積極推動數位轉型，透過 BIM、資通訊、自動化、智慧控制技術，達到建築空間品質提升與環境友善及永續發展。建築數據資料庫可以保存建築空間各種靜態及動態數據，透過這些數據，可以管理建築全生命週期之安全性能、能源節約、環境健康與最佳化管理，並提供使用者貼心便利的服務，建築產業數位轉型(建築 4.0)架構，包含建築數據中心、智慧管理雲平台、智慧建材、智慧營造、BIM 建築資訊建模，共五大部分[1]，其中建築數據中心則是所有建築數據收集與儲存及加值應用的藏寶室。

建築數據中心之目的在於整合建築生命週期各個階段的靜態與動態數據資訊，以追求效率、智慧、永續為目標，提升營建產業效能與人居環境品質。引領建築產業運用高端資通訊技術，整合電機、材料、自動控制、系統整合、BIM、雲端運算、設施管理等多項產業技術，全面提升建築營造品質，創造優質智慧生活空間。

內政部建築研究所，在 BIM 已經累計大量研究成果報告[2-5]，研究內容包括，臺灣 COBie-TW 標準與使用指南規劃與雛型建置、建築資訊模型(BIM)於建築物、國內 BIM 元件通用格式與建置規範研究，這些研究成果均可作為本研究重要參考依據。

在 IoT 部分，目前國內台灣資通產業標準協會與社團法人台灣智慧建築協會，成立 TAICS 智慧建築資通訊技術工作委員會，致力於制定智慧建築相關資要標準，從 2018 年至 2020 年共發佈四個版本，主要對於智慧建築能源管理與安全監控系統，分別擬定資料格式標準及資料格式測試規範。

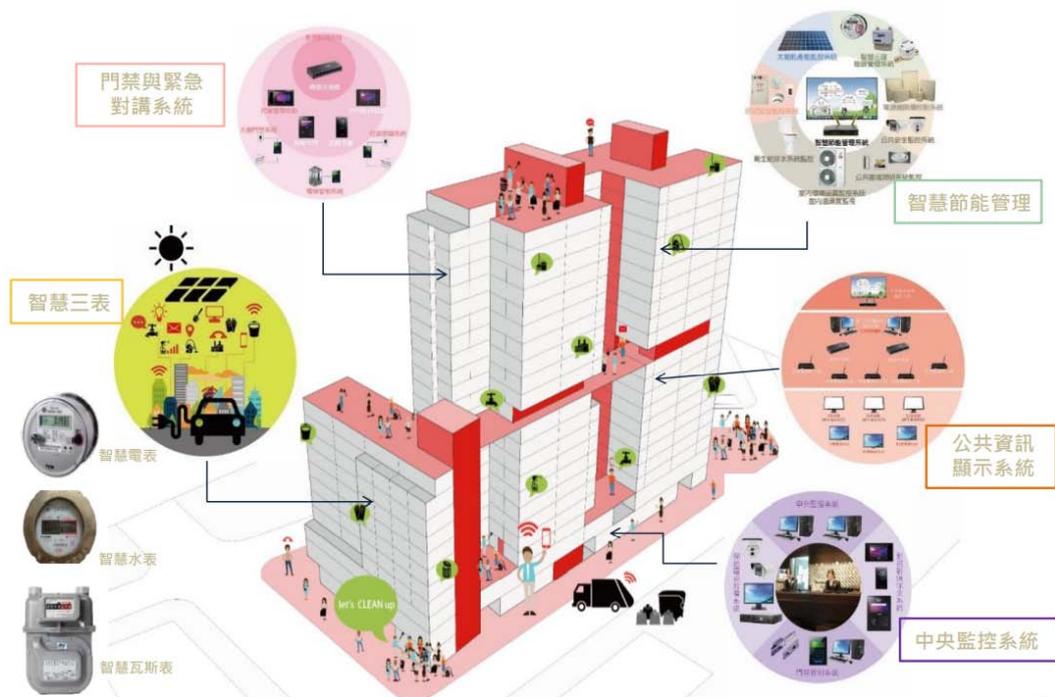


圖 1 智慧建築與家庭能源管理系統架構示意圖

(資料來源：臺北市政府都市發展局)

臺北市政府推動社會住宅智慧化應用案例，例如興隆公宅與廣慈園區社會住宅。興隆公宅建置智慧建築與家庭能源管理系統，架構如圖 1 所示，包括智慧三錶、公共資訊顯示系統、中央監控系統、智慧節能管理、門禁與緊急對講系統。興隆公宅 BIM 採用 E-plane check 無紙化作業，並且設計過程將工程數量提供設計單位進行方案設計擬定，同時使用 WeBIM SYNC 平台服務。臺中市政府也建置臺中市政府社會宅 BIM 雲端平台，整合社會住宅 BIM、設施管理(FM)、與物聯網(IoT)技術，用於協助各社會宅之施工、竣工及完工後設施維運管理等及各階段之工程技術服務。

智慧城市體現於大數據的整合加值應用，並廣泛應用於各大領域，隨著物聯網技術的發展，延伸出各種資訊整合的重要性，諸如建築物內的消防、能源管理、環境監控、攝影機，以及室外的 LED 節能路燈等。然而，現階段多系統各自獨立的管理平台，造成管理的分散。因此，國

家實驗研究院國家地震工程研究中心，打造虛實空間整合的 5D 可視化管理平台，並置於沙崙智慧綠能科學城 C 區進行實證應用，建立「沙崙 C 區 5D 智慧維運管理系統」，如圖 2 所示。



圖 2 沙崙 C 區 5D 智慧維運管理系統
(資料來源：國家地震工程研究中心智慧城市小組)

二、建築數據資料庫基本架構

本研究提出建築數據資料庫基本架構，如圖 3 所示，包含 BIM/GIS 等靜態數據及 IoT 動態數據；靜態數據主要收集建築規劃、設計、施工、維護管理等全生命週期建築數據，而動態數據主要收集建築環境數據與設備資訊及行為數據，數據可應用在建築維護管理。本研究主要為擬定收存運用建築資訊模型(BIM)與物聯網(IoT)之建築數據資料庫開發策略，因此，主要研究內容擬定建築數據資料庫基礎架構，提供政府單位或國內營建產業需建置建築數據資料庫之參考，並不會深入規劃細部建築數據庫的工作項目，但仍可作為建築數據資料庫發展策略之參考依據。

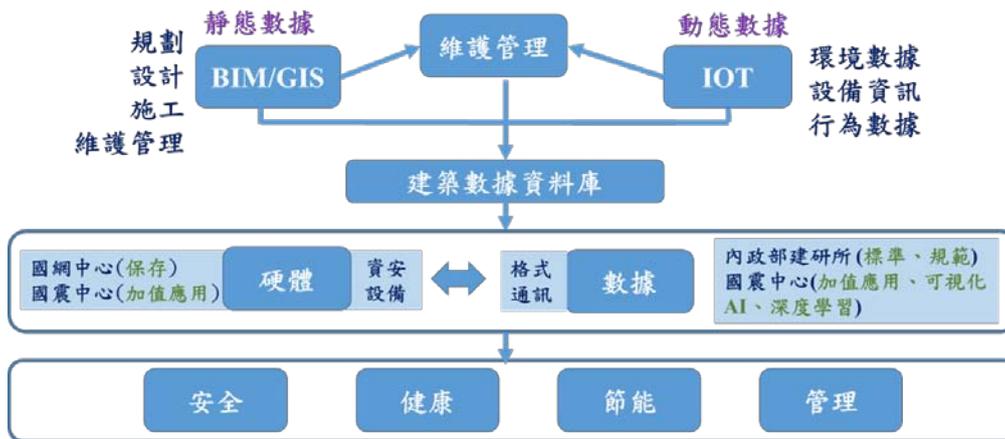


圖 3 建築數據資料庫基本架構[6]

所有數據資訊均會收集儲存於建築數據資料庫，資料量與使用流量大，提供對外各項服務工作，電腦硬體與網路通訊需考量資通訊安全。目前國家所成立高效能電腦與大容量資料儲存空間，以國家實驗研究院國家高速網路與計算中心數據雲端保存容量最大，在建築數據專業加值應用維運管理方面，國家成立之專責學術研究單位如國家地震工程研究中心，可協助政府建築主管單位研發建築數據加值應用相關技術，例如3D可視化、AI深度學習等。內政部建研所可制定建築數據中心各項數據格式標準與規範及相關應用技術規範，建築數據中心效益，就是將建築數據加值應用，讓民眾能居住在安全與節能及健康生活環境，以及精簡及高效能管理。

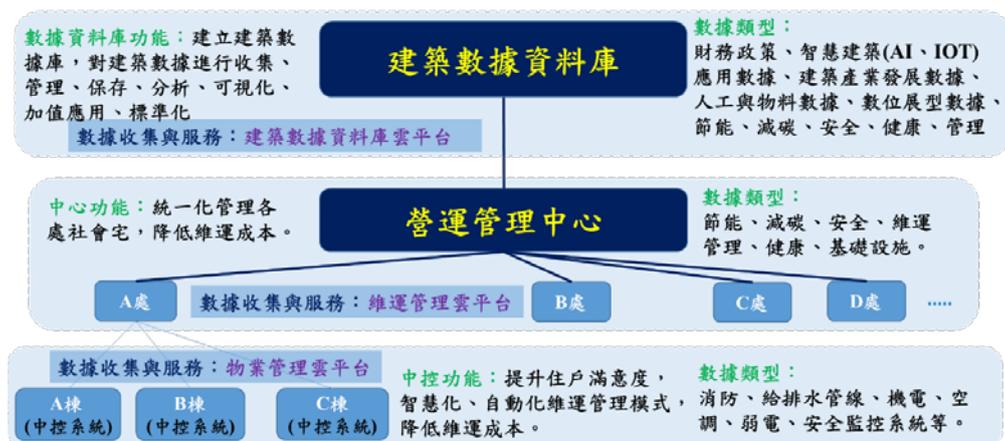


圖 4 社會住宅建築數據資料庫基本架構圖[6]

建築數據在不同管理層級有著不同數據類型需求，收集方式與維運管理方式也都不盡相同，本研究以社會住宅為例，建立社會住宅建築數據庫的基本架構，如圖 4 所示，建築數據資料庫主要建置於中央單位或地方政府的建築物維運管理單位，或是委託專業建築法人單位協助資料庫管理，用來全面掌握所有社會住宅全生命週期狀態，數據庫主要功能為收集、保存、分析、可視化、加值應用標準化，收集數據類型包括財務政策、智慧建築(AI、IoT)應用數據、建築產業發展數據、人工與物料數據、展示數據、節能、減碳、安全、健康、管理。建築數據資料庫數據取得方式，主要透過建築數據庫雲平台取得營運管理中心數據資料。

營運管理中心設置於實際管理社會住宅主管單位，主要任務為統一維運管理所有社會住宅時使用，因此維運管理中心功能包含統一化管理各處社會住宅、降低維運成本。數據類型主要包含節能、減碳、安全、健康、基礎設施、維運管理等相關數據。營運管理中心建築數據取得方式，主要透過維運管理雲平台取得每棟建築物中央監控系統數據資料。每棟建築物的中控系統數據，可依據物業管理上需求，透過物業管理雲平台進行數據收集及服務，收集的數據類型包含消防、給排水管線、機電、空調、弱電、安全監控系統等。中央監控與物業管理功能，主要提升住戶滿意度、智慧化與自動化維運管理模式、降低維運成本。

參、研究發現

(一) 國內外建築數據庫現況調查

為推動建築產業數位轉型，內政部建築研究所提出建築 4.0，其內容包括建築數據中心、智慧管理雲平台、智慧建材、智慧營造、BIM 建築資訊建模等共五大主題項目。內政部建築研究所在 BIM 相關研究，已經累計多年大量研究成果報告，例如；國內 BIM 元件通用格式與建置規範研究、政府建置 BIM 維護管理平台的需求與應用研究、BIM 雲

端作業之先導應用與 AEC 產業 4.0 升級策略規劃研究、我國 BIM 全生命週期編碼發展與國際編碼標準銜接之研究、BIM 建築物設備元件建置與產業輔導機制之擬訂、國內公有集合住宅應用 BIM 改進維護管理作業之研究、新建社會住宅 BIM 業主資訊需求指引研訂、地方政府建築資訊建模(BIM)圖資交付平台規劃研究、「我國 BIM 協同作業指南」應用情形調查與內容調整研究，這些研究成果均可作為建築數據資料庫 BIM 建置之重要參考依據。

國內對於 IoT 標準格式制定，在台灣資通產業標準協會與社團法人台灣智慧建築協會推動下，成立 TAICS 智慧建築資通訊技術工作委員會，致力於制定智慧建築 IoT 標準格式，自 2018 年至 2020 共發佈四個版本，主要對於智慧建築能源管理與安全監控系統，分別擬定標準資料格式及測試規範。財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，於科技部沙崙綠能科學城 C 區，亦成功導入 3D GIS 與 BIM 及 IoT 技術，建立沙崙 C 區 5D 智慧建築維運管理系統，成功整合多棟智慧建築維運系統。

(二) 建築數據庫基礎架構

建築數據資料庫之基礎架構數據，在靜態數據主要收集建築規劃、設計、施工、維護管理等全生命週期建築靜態 BIM 與電子化工程文件或營運數據資料，而動態數據主要收集建築環境數據或設施設備營運數據。建築數據在不同管理層級，有不同數據類型需求，數據收集方式亦不盡相同。本研究擬定建築數據資料庫之基礎架構模式，以社會住宅為例，可依據管理基層需求來收集不同數據類型。建築數據資料庫收集數據，可掌握社會住宅全生命週期狀態。數據資料庫主要功能包含收集、保存、分析、可視化、加值應用標準化。收集數據類型則以安全、管理、節能、健康為主要項目。

(三) 建築數據庫標準資料格式

國外有關 BIM 標準格式已有 NBIMS-US、NBIMS-CANADA、NBIMS-ROK 等，維運管理階段常使用 Omni Class 與 COBie 標準格式可遵循。國內內政部建築研究所也提出許多 BIM 標準格式，例如臺灣 COBie-TW 標準與使用指南規劃與雛型建置等標準格式。IoT 標準格式台灣資通產業標準協會與社團法人台灣智慧建築協會，成立 TAICS 智慧建築資通訊技術工作委員會，發佈智慧建築能源管理系統資料格式標準(TAICS TS-0022 v1.0)、智慧建築安全監控系統資料格式標準 v2(TAICS TS-0009 v2.0)、智慧建築安全監控系統資料格式測試規範(TAICS TS-0023 v1.0)、智慧建築能源管理系統資料格式測試規範(TAICS TS-0033 v1.0)標準格式可遵循，在通訊交換標準格式亦可採用 OpenID 2.0。GIS 方面規範可參考 OGC 規範。

(四) 建築數據庫數據管理措施

本研究建議建築數據管理措施，可由建築數據資料庫之營運管理單位執行，或委託現有常設法人經營或成立公設財團法人管理，擬定建立數據管理制度與建築數據資料庫，營運初期之費用可爭取政府預算相關經費支持，當建築數據庫加值應用成果越來越豐碩，建築數據資料庫維運管理單位，可開始向營運商與使用者收取相關費用，讓建築數據資料庫能永續營運管理。

(五) 建築數據採集能力與採集範圍及採集方式說明

建築物數據採集時機影響數據採集能力，需從建築規劃、設計、施工、維運管理等各階段，導入不同繪圖或作業軟體，再依據數據標準格式來採集各項建築數據，透過雲平台可即時快速採集各種類型數據。建築數據採集範圍主要分為四個類型，管理、安全、節能、健康。管理包括預測維護、降低設備故障率、延長建築壽命、降低維運成本、節省電費、精簡維管程序。安全包括提升建物安全、改善避難逃生動線、提升

公共安全、降低人為災害損失、降低天然災害損失。節能包括精簡大數據比較分析、節能減碳、降低排放二氧化碳與近零碳排。健康包括打造健康生活環境與提升生活便利性。建築數據資料庫數據採集方式，主要透過建築數據庫雲平台，取得建築營運管理中心靜動態數據，並且將建築數據儲存於建築數據資料庫。

(六) 數據安全以及隱私權保護措施

建築全生命週期數據集合大量敏感性資訊，其中可能包含政府施政管理的圖文及商業機密、建築使用人的個資及生活隱私。建築數據庫承擔收存、管理、運用建築全生命週期數據之角色，透過資通系統介面連結雲管理平台，提供資料服務及加值分析運用，在機密性與完整性及可用性三個面向必須具備水準以上要求，因此妥善規劃及執行建築數據資料庫之資訊安全及隱私保護措施，是建築數據資料庫發展上獲得使用者、管理者乃至於主管機關信賴的關鍵因素。

肆、結 論

本研究結論說明如下：

- 一、建築數據資料庫之基礎架構，在靜態數據主要收集建築規劃、設計、施工、維護管理等，全生命週期之 BIM、數位化工程文件或營運數據資料；而動態數據主要收集建築環境數據或設施設備營運數據。建築數據在不同管理層級，有不同數據類型需求，數據收集方式亦隨之改變，本研究以社會住宅為例，提出建築數據資料庫之基礎架構。
- 二、建築數據資料庫主要功能包含收集、保存、分析及數據可視化，採集數據類型以安全、管理、節能、健康為首要，再經由建築數據資料庫 AI 演算法加值應用，創造建築數據數位經濟價值，以降低建築人力與物力成本，以及節能減碳優質生活機能。

- 三、國外有關 BIM 標準格式，已有 NBIMS-US 與 NBIMS-CANADA 及 NBIMS-ROK 等標準格式，在維運管理階段有 Omni Class 與 COBie 標準格式可遵循。內政部建築研究所也提出許多 BIM 標準格式，例如「臺灣 COBie-TW 標準與使用指南規劃與雛型建置」等標準格式可使用。
- 四、國內在臺灣資通產業標準協會與社團法人台灣智慧建築協會推動下，成立 TAICS 智慧建築資通訊技術工作委員會，致力於制定智慧建築 IoT 標準格式，已發佈智慧建築能源管理系統資料格式標準 (TAICS TS-0022 v1.0)、智慧建築安全監控系統資料格式標準 v2(TAICS TS-0009 v2.0)、智慧建築安全監控系統資料格式測試規範 (TAICS TS-0023 v1.0)、智慧建築能源管理系統資料格式測試規範 (TAICS TS-0033 v1.0)標準格式可遵循。在通訊交換標準格式可採用 OpenID 2.0，在 GIS 數據標準格式可參考 OGC 規範。
- 五、建築數據資料庫收集資料量巨大且使用流量大，隸屬國家實驗研究院的國家地震工程研究中心與國家高速網路與計算中心，可協助提供建築工程專業數據增值應用與維運管理數據分析技術，以及提供建築數據資料庫所需之高效能電腦與高容量資料儲存空間。
- 六、建築全生命週期數據集合大量敏感性資訊，其中可能包含政府施政管理的圖文及商業機密、建築使用人的個資及生活隱私。建築數據庫承擔收存、管理、運用建築全生命週期數據之角色，透過資通系統介面連結雲管理平台，提供資料服務及增值分析運用，在機密性與完整性及可用性三個面向必須具備水準以上要求，本研究已提供妥善規劃及執行建築數據資料庫之資訊安全及隱私保護措施策略，是讓建築數據資料庫發展上獲得使用者、管理者乃至於主管機關信賴的關鍵因素。
- 七、本研究擬定建築數據庫基本架構發展策略，以及建議各類型具增值

應用數據，但對於各類型數據儲存空間管理機制及維護管理的費用尚未提出，而實務面上若建置建築數據資料庫仍需合理估算經費，建議後續可持續研究提出解決方案。

伍、參考文獻

- (1) 溫琇玲，「建築產業創新發展策略擬訂」，中華民國內政部建築研究所，2020。
- (2) 陳建忠，「臺灣 COBie-TW 標準與使用指南規劃與雛型建置」，中華民國內政部建築研究所，2015。
- (3) 鄭元良，「建築資訊模型(BIM)於建築物」，中華民國內政部建築研究所，2011。
- (4) 鄭泰昇，「國內 BIM 元件通用格式與建置規範研究」，中華民國內政部建築研究所，2015。
- (5) 余文德，「我國 BIM 協同作業指南執行要項研擬」，中華民國內政部建築研究所，2016。
- (6) 陳志賢、溫琇玲、王仁佐、鄭維中，「收存運用建築資訊建模 (BIM) 與物聯網 (IoT) 之建築數據中心開發策略研擬」，中華民國內政部建築研究所，2021。

結合建築資訊建模(BIM)、辨識技術與人工智慧(AI)
技術於建築物預鑄工法應用

主講人簡歷

姓名：曾仁杰

服務單位：國立陽明交通大學土木工程學系

職稱：教授

聯絡電話：03-5647416

傳真：03-5731982

電子信箱：rjdzeng1@mail.nctu.edu.com

學歷：美國密西根大學土木與環境工程學系博士

經歷：國立交通大學土木工程學系教授、中國土木水利工程學會 工程管理委員會主任委員、國立交通大學 Eco-City 智慧生活科技整合中心執行長、新竹市政府顧問...等

主要著作：

1. Dzung, R.J., Lin, C.T., and Fang, Y.C. (2016, Feb). Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification. *Safety Science*, 82, pp.56-67.. MOST 102-2627-E-009-002.
2. Wang, W.C., Bilozero, T., Dzung, R.J., Hsiao, F.Y., & Wang, K.C. (2017). “Conceptual Cost Estimations Using Neuro-fuzzy and Multi-factor Evaluation Methods for Building Projects, *J. of Civil Engineering and Management (SCI)*, Volume 23(1)
3. Fang, Y.C. and Dzung, R.J. (2017). “Accelerometer-based fall-potential detection algorithm for construction tiling operation”, *Automation in Construction*, Vol. 84, December, pp. 214-230 <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.015> (Corresponding Author)
4. Chang, K.M. , Dzung, R.J., and Wu, Y.J. (2018) “An Automated IoT

Visualization BIM Platform for Decision Support in Facilities Management”, Applied Science (SCI), Vol.8 pp.1086-1104.

5. Dzung, R.J., Hsueh, H.H., Watanabe, K. (2018) “Applications of ICTs and Action Recognition for Construction Workers”, Trends in Civil Engineering and Material Science, 1(3), p.48-54. TCEMS.MS.ID.000112.
6. Huang, C.Y. and Dzung, R.J. (2019) “Evaluating Ancillary Business Scale for PPP-BOT Projects: A Social Housing BOT Case in Taiwan”, Sustainability, 11(1415-1432)
7. Ren-Jye Dzung¹, Hsien-Hui Hsueh², Pa Ousman Njie³, Yi-Min Lai⁴, (2021) “Automated Evaluation of Visible Appearance Quality of Installed Tiles”, Automation in Construction (Submitted on 2021/05)

中文摘要

王榮進¹ 曾仁杰² 林之謙³ 陳士明⁴ 厲妮妮⁵ 黃昱翔⁶

關鍵字：進度管控、預鑄、深度學習

近年來為照顧弱勢及青年族群的居住需求，社會住宅等建築物之興建數量大幅成長，然面對營造業缺工、技術工老年化及工安環保要求逐漸提高的問題，部份社會住宅等建築工程開始思考導入預鑄工法之可行性。預鑄工法先行於預鑄廠完成構件，再於工地現場進行構件吊掛與組裝，不僅可大量減少工人需求、減少假設工程及施工廢料、工安事故發生機率、工期，亦可提高工程品質穩定度。

國內 BIM 的使用於近年已逐步提高，再加上人工智慧與辨視技術（如 RFID、影像辨視、QRCode）應用已然成熟，因此本計畫以社會住宅等建築預鑄工程為標的，研究應用 BIM、辨識技術與人工智慧等技術於建築物預鑄工程之管理。

本研究為求有效應用工地現場蒐集之巨量影像資料，針對預鑄工法，利用、延伸電腦視覺演算法建立現地點雲模型呈現工程現場進度，並結合 4D BIM 模型建立虛擬視覺模型。本研究採用之方法主要可以分為三個模組：（一）虛擬視覺模型建立、（二）特徵資訊蒐集、（三）深度學習模型分析。研究流程主要依據方法分為以下步驟：蒐集影像資料、建立點雲模型、建立 4D BIM 模型、結合點雲模型及 4D BIM 模型建立虛擬視覺模型、進行所有 BIM 元件及點雲網格模型反投影至所有影像資料、所有影像資料超像素處理、將超像素中兩模型之深度、法向量及顏色資訊結合、輸入深度學習模型、分析工程進度。

本期研究結果發展出一系統包括影像資料的蒐集規則，模型轉換與

貼合，整合虛擬視覺模型進而後續由深度學習分析工程進度。研究結果初步證實運用深度學習、BIM、點雲模型進行預鑄工程進度分析之可行性。

¹內政部建築研究所所長

²國立陽明交通大學教授

³國立台灣大學助理教授

⁴內政部建築研究所助理研究員

⁵內政部建築研究所助理研究員

⁶內政部建築研究所助理研究員

ABSTRACT

Keywords : Schedule automation, image recognition, AI, precast concrete

The number of social welfare housing buildings have increased in recent years for the need of young and social-disadvantage community. While faceting the problem of labor shortage and environmental concerns on site, these buildings also start using precast concrete approach, which fabricate most structural elements in factories and assemble the elements on site, to reduce the labor need and pollution on site.

The use of BIM also prevails in Taiwan's construction industry in recent years. With the rapid development of artificial intelligence and object/behavior recognition techniques (e.g., RFID, image recognition, QRcode), the adoption of automated recognition techniques for the construction site management becomes feasible.

This project aims at developing image recognition techniques for the foundation of automated construction schedule monitoring process. The research methodologies mainly are composed of three parts: construction of virtual model, collection of features information, and deep learning models. We used video cameras to collect the images of the construction progress of a precast concrete parking lot, developed image recognition algorithm to construction the 3D point cloud, and mapped the points with the BIM based on the derived normal vectors so later the differences between the 4D BIM model and the reconstructed 3D model can be identified and the construction progress can be derived. Deep machine learning technique is

used to enable the system to recognize the structural elements from images.

The project successfully developed a series of rules for efficiently collecting image data of construction progress, model transformation and mapping, and the integration of digital model and the derived virtual model using deep learning algorithm. The project also demonstrates that the automated progress monitoring for precast concrete construction project is feasible.

壹、緒 論

一、研究背景

營建工程進度之有效管控是工程管理中一大重點，唯工程進度之回報仍仰賴大量人力之現地視察及清點。近期工程進行中，工地為了掌握進度、品質及成本，開始大量運用許多照片、影片、縮時攝影等影像記錄。然而目前這些巨量影像資料，在沒有自動化、系統性的整理與分析下，仍然缺乏有效應用。於現行 BIM 技術普及、人工智慧技術及影像拍攝設備日益成熟，成本快速下降下，如何利用智慧影像辨識，進行營建工程進度偵測自動化是本研究之主要目的。

預鑄工法有品質穩定、施工快速、人力需求低之優點，其造價偏高之缺點於近年營建產業工資上漲、大量缺工，以及因疫情管制外勞人力更為不足下，相較於傳統之鋼筋混凝土建築已不明顯。本研究擬以預鑄建築之組裝為主要研究對象及範圍，於既有之 BIM 模型及預定工程進度資料下，結合人工智慧與影像辨識，藉由 360 環景相機所記錄之工地現場影像資料，實作工程進度監測自動化。

二、研究目的

針對預鑄工程，應用 BIM、辨識技術與人工智慧等技術於建築物預鑄工程之管理，包含以下功能：

1. 利用 BIM、人工智慧、辨識技術等前瞻技術開發預鑄工程建築構件施作控管系統，即時偵測預鑄建築構件於施工階段是否依設計圖說正確安裝，並控管施作進度管理架構及流程之研擬。
2. 建置預鑄工程建築構件施作控管系統，控管建築構件施作位置正確性及施作進度。
3. 提出預鑄工程建築構件施作控管系統之系統標準。

貳、研究內容

本研究為求有效應用工地現場蒐集之巨量影像資料，將針對預鑄工法，利用、延伸電腦視覺演算法建立現地點雲模型呈現工程現場進度，並結合 4D BIM 模型建立虛擬視覺模型。此虛擬視覺模型可作為提取進度特徵資訊之基礎，另外加上計算攝影、電腦圖學技術，可系統性蒐集進度特徵資訊，包括點雲及 BIM 的法向量、深度等。最後運用深度學習卷積神經網路判斷預鑄元件安裝進度、正確度。本研究採用之方法主要可以分為三個模組：（1）虛擬視覺模型建立、（2）特徵資訊蒐集、（3）深度學習模型分析。以下將詳細討論各模組之技術細節以及應用方法。

參、研究發現

完成研究的作業流程操作後，將其與目前較常被使用的傳統作業流程進行比較，而為了方便比較，故在傳統作業流程中也同樣要求要能輸出 BIM 模型當作基準。人力上，傳統作業流程需派遣具有相關知識的工人或工程師進行物件的確認與檢察；本研究之作業流程對於拍攝人員則無特別要求。

傳統作業流程大致上為派遣工地指定的項目工程師，以在工地周圍行走視察時，根據觀察各項目完成數量、或是實際測量進度變化來決定該期間各工程項目進展，並於回報進度後，將相關之進度資訊鏈結到 BIM 的資訊模型，提供相對客觀之檢驗機會。

研究成果的作業流程為蒐集資料、重建模型、渲染影像以及模型訓練等。其中，模型訓練只要經由一次的完整訓練，後續的使用階段不需要再花費這步驟的時間即可直接進行使用，因而在時間上能比傳統的作業流程省下相當多的時間。

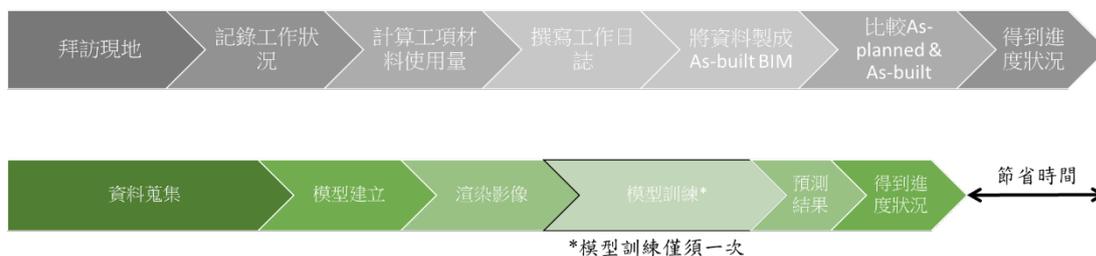


圖 1 傳統作業流程（上）與研究成果作業流程（下）的比較

肆、結 論

本計畫提出一套結合建築資訊模型、人工智慧辨識技術應用於預鑄工法之安裝進度分析系統，並由詳細討論各階段之技術開發細節，主要包括資料蒐集、模型建立至資料分析共包含11項模組完成整理流程：蒐集影像資料、BIM 模型資料蒐集、資料標注、點雲模型演算法建立、4D BIM 模型架構建立、結合模型、建立虛擬視覺模型、影像定位演算法、反投影演算法、場域測試及深度學習模型訓練。其中在蒐集影像資料中，建立360影像資料蒐集準則，並導入開發快速、穩定、有效蒐集資料之方法。在 BIM 模型資料蒐集中，討論若需應用人工智慧辨識方法分析預鑄工法之工程進度，BIM 模型所應具備之條件及排程資訊等。再來針對人工智慧所需之資料標注進行相關說明，並提出一自動化標注方法以加強整體效率。在點雲模型演算中說明如何透過已蒐集之影像資料建立點雲模型。在4D BIM 模型建立架構，提出透過應用 IFC 模型的輸出方式，由 Synchro 導入模型，最後再透過 Blender 呈現。在建立虛擬視覺模型中結合 BIM 及點雲模型，呈現整體進度。結合之虛擬視覺模型則可以開始進行影像定位及應用反投影演算法將各別 BIM 模型構建分離。最後解說深度學習模型如何透過由前述方法所擷取之深度、法向

量等相關資訊作為輸入，分析各構件是否安裝與否並最終比對工程進度。

本研究將預鑄工程進度管控之流程，透過 BIM 及人工智慧辨識之應用解構為不同步驟並加以開發。並在研究中開發出不同演算法、架構加以分析，最後由深度學習模型判斷，並可達99%準確度分析工程進度。整體方法預計將可透過系統化方法，有效提升工程進度追蹤目前耗時及人力密集之問題。並由於預鑄工法為目前工程上推動產業升級之必要途徑，更可加強應用 BIM 及人工智慧方法加以推動。

伍、參考文獻

1. Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & 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, in: Proceedings of the 6th International Conference on Innovations in AEC.
2. Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & Savarese, S., 2012. Automated progress monitoring using unordered daily construction photographs and IFC-based building information models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 147–165. doi: <https://doi.org/10.1061/> (ASCE) CPPPPP.1943-5487.0000205.
3. Bosché, F., Guillemet, A., Turkan, Y., Haas, C., & Haas, R., 2014. Tracking the built status of MEP works: assessing the value of a scan-vs-BIM system. *Journal of Computing in Civil Engineering* 28.
4. Turkan, Y., Bosché, F., Haas, C., & Haas, R., 2012a. Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. *Automation in Construction* 22, 414–421.

5. Turkan, Y., Bosché, F., Haas, C., & Haas, R., 2012b. Toward automated earned value tracking using 3d imaging tools. *Journal of Construction Engineering and Management* 139, 423–433. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000629](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000629).
6. Han, K., Degol, J., & Golparvar-Fard, M., 2018. Geometry- and appearance-based reasoning of construction progress monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management* 144, 4017110. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428).
7. Han, K. K. & Golparvar-Fard, M., 2015. Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs. *Automation in Construction* 53, 44–57.
8. Jacob J Lin, Jae Yong Lee, Mani Golparvar-Fard, 2019. Exploring the Potential of Image-Based 3D Geometry and Appearance Reasoning for Automated Construction Progress Monitoring. *ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019*, 162-170. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784482438.021>
9. Lin J.J., Golparvar-Fard M. (2020) Construction Progress Monitoring Using Cyber-Physical Systems. In: Anumba C., Roofigari-Esfahan N. (eds) *Cyber-Physical Systems in the Built Environment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41560-0_5

