



# 智慧工地 資訊技術 的 整合 與 挑戰

莊梅菱／國立中央大學土木所 IT 組 博士候選人、桃園大眾捷運股份有限公司 專員

王如觀／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 博士後研究員

王蘇傑／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

柯榮云／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

簡奕帆／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

洪榕芊／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

許華容／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生

周建成\*／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 教授

在建築或營建產業邁向數位轉型過程中，智慧工地逐漸成為提升工程專案管理效率，與推動工安及品質的關鍵技術。不同於傳統工地管理仰賴人工作業與經驗判斷，智慧工地強調以資訊技術為支撐，促進資源整合與專案控制。本研究採取系統性文獻回顧方式，探討智慧工地相關研究發展脈絡，特別是資訊技術如何應用於營建管理不同層面，以達成工程專案如期如質與如價的管理目標。文章首先分析現有研究如何透過智慧工地進行資源管理與效率最佳化，相關技術如工人定位與出勤管理、機具使用率監測與排程最佳化、材料供應鏈追蹤與物料管理系統，皆直接影響工程專案進度控制、成本管理與品質保證。在資訊技術層面，本研究依應用層次與技術特性，進行分層探討。首先介紹通用型資訊技術，如雲端平台、大數據分析、人工智慧等，最後探討機器人與 3D 列印。綜上所述，智慧工地的資訊技術應用展現出從決策層到現場管理的多層次特性，為建築或營建產業數位轉型的關鍵利器，本研究透過文獻回顧，提出智慧工地資訊技術在營建管理領域中的整體位階與未來發展方向，期望為後續學術研究與實務應用提供有系統的參考架構。

## 導論

智慧工地運用物聯網（Internet of Things, IoTs）等新式資訊技術，來提升複雜建築或營建工程專案成效、工程品質和安全性。一般而言，智慧工地採用即時資料收集技術，監視或感測工地現場的工作人員、施工機具或設備，及施工材料或物料等的狀態，並將資料傳回中央伺服器，使得遠端監控和管理成為可能<sup>[1,2]</sup>。智慧工

地的關鍵要素包括雲端平台及智慧化管理作法，透過物聯網的運用，能夠有效進行資料收集、分析和應用，支援各種管理服務需求<sup>[3]</sup>。這種整合性的資訊技術不僅提升了工地營運效率，更為建築或營建產業帶來了前所未有的數位化管理體驗<sup>[4,5]</sup>。

智慧工地的概念最早可追溯約莫二十年前，當時多以「IT-supported construction site management」或「Automated construction monitoring」為名出現於相關文獻中。初期研究重點多集中工地現場的物料監控、

\* 通訊作者，ccchou@ncu.edu.tw

資訊流整合，以及施工資料的數位化<sup>[5,6]</sup>，試圖解決傳統因資訊分散、資訊孤島（Information island）或資訊煙囪（Information silo）、資料格式不相容，缺乏即時反饋等因素，而導致工地現場管理效率低落與透明度不佳等問題。隨著感測科技與無線通訊技術的發展，智慧工地研究於近十年間快速升溫，技術焦點逐漸轉向物聯網、虛擬實境（Virtual Reality, VR）、建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）、與人工智慧（Artificial Intelligence, AI）及深度學習（Deep Learning, DL）等領域，研究範疇也從單一技術應用，擴展至多技術融合與管理的系統性探討。特別在營建資源管理、進度追蹤與工地現場數位化，及施工安全預警等面向，智慧工地已漸次形成標準技術架構與實務應用模式。

從文獻發表的地理分布看，美國、中國與英國學者於智慧工地研究具領先地位<sup>[7,8]</sup>。其中，美國學者多著重於 BIM 與感測整合技術的創新，中國則在 AI 與物聯網技術的落地實踐方面快速推進，而英國則關注於智慧工地的政策框架與永續導向。這顯示智慧工地的發展已從技術實驗階段逐漸走向策略導入與產業應用，並呈現出跨國多元的發展路徑。整體而言，智慧工地的歷史發展可視為營建產業數位化與智慧化演進的縮影，從早期以工地大數據為核心的靜態管理，逐步邁向結合即時監控、預測分析與智慧決策的動態營運系統。本研究將在此歷史脈絡下，整理資訊技術於智慧工地中的發展脈絡與管理應用，特別聚焦於其如何強化工程如期如質與如價的專案目標達成。

以下首先說明智慧工地的背景概念，接著探討新式資訊技術如何協助管理工人、機具與物料等工地現場資源，以讓工程專案達到如期如質與如價目標。此外，也將依序介紹智慧工地所涵蓋的各式資訊技術，並闡述智慧工地在工地安全的應用。文章最後，則作一總結與展望。

## 背景概念：營建 4.0 與智慧營建物件

營建 4.0（Construction 4.0）是建築或營建產業的全面數位化革命，此概念是工業 4.0 在建築或營建領域的具體實踐與發展，旨在透過實體與數位技術的深度整合，為傳統作法帶來全面性與革命性的變革<sup>[9]</sup>。營建 4.0 的核心在於建立網宇實體系統（Cyber-Physical

System, CPS）與數位生態系統，並由機器人、人工智慧、3D 列印等新興科技提供技術後援。建築資訊模型構成了實施營建 4.0 的基礎架構，為整個產業的數位轉型奠定了堅實的技術基礎，這種整合性的技術架構不僅改變了傳統的施工作業模式，更重新定義了建築或營建專案從規劃、設計、施工，到營運維護的完整生命週期管理流程<sup>[9]</sup>。

當前研究趨勢顯示，營建 4.0 主要聚焦施工階段的最佳化、品質管控，和工安風險等的管理流程改善<sup>[10]</sup>。3D 列印技術、大數據分析、虛擬實境和物聯網等關鍵技術成為推動營建 4.0 發展的主要驅動力，這些技術整合後，理論上能創造前所未有的施工效率和管理精確度。透過這些先進技術的整合運用，建築或營建產業預期將轉型為一個高效率、以品質為中心、安全性極佳的現代化產業，能夠充分滿足人類社會對於建築環境品質和永續發展的多元化需求<sup>[11]</sup>。然而，營建 4.0 作為一個新興概念，其技術仍在持續演進中，相關研究領域正快速增長，有發展潛力和創新空間。隨著技術的不斷成熟和應用案例的累積，營建 4.0 將逐步實現從理論框架到實務應用的全面落地，為全球建築或營建產業開創嶄新的發展局面<sup>[11]</sup>。

綜合來看，營建 4.0 概念可謂擴展智慧工地至工程全生命週期之願景，相關資訊技術除運用時間尺度或規模不同，其他並無重大相異處。

智慧營建物件（Smart Construction Objects, SCOs）被定義為建築或營建產業的基礎智慧單元，透過將其實體物件，例如工人的頭盔，與資訊技術做深度融合，創造出具備自主性、感知能力和互動特性的智慧化個體<sup>[12]</sup>。事實上，智慧營建物件的概念，亦可用於智慧工地的場域。這些創新物件不僅具備傳統個體的基本功能，例如頭盔保護工人頭部，更整合了感測、運算和通訊能力，能夠主動感知環境變化、自主進行決策，並與其他物件或系統進行即時互動<sup>[13]</sup>。智慧營建物件構成建築或營建業之物聯網核心基礎，為創新運算應用程式和增強型決策提供了系統整合技術平台，改變了傳統工程專案資訊流和決策流程，不僅提升了施工過程的智慧化程度，更為建築或營建產業帶來了前所未有的自動化管理和精準控制能力<sup>[13]</sup>。

由於智慧營建物件具備高度聯網特性，這些特徵使其與傳統物件產生根本性的差異，具有徹底改變施



工流程和改善資訊流的巨大潛力<sup>[14]</sup>。在整合時，智慧營建物件能夠支援跨領域的協同作業，並封裝智慧化功能以促進不同專業領域之間的資訊交換與整合，這種跨領域的資訊整合能力，使得建築、結構、機電、消防等各次專業領域能夠在同一個智慧化平台上，進行協同設計和施工管理，大幅提升工程專案執行的效率和品質<sup>[15]</sup>。隨著建築或營建產業對智慧營建物件概念理解的不斷深化，新一代資訊技術，諸如即時定位技術、嵌入式感測器和人工智慧等，可創造更高效率且反應更迅速的施工環境<sup>[16]</sup>。未來智慧營建物件將能自主監控結構健康狀態、最佳化能源使用效率、預測維護需求，並與建築資訊模型等系統進行無縫整合，為建築或營建產業帶來全面數位轉型、智慧化升級與運用的理想世界<sup>[17]</sup>。

### 與工程專案管理目標的關係

以下分別說明智慧工地對於工程專案如期如質與如價的目標實現程度，其在文獻上的研究進展。

在如期完工部分，智慧工地運用先進資訊技術可大幅縮短工程專案時程，並能顯著提升營建生產力（Construction productivity）<sup>[18]</sup>。例如，基於電腦視覺的活動識別技術，透過 YOLOv3 深度學習模型，能自動化即時更新工程專案的進度，有效改善施工效率和專案管控精確度<sup>[18]</sup>。這種創新的自動化監控系統不僅減少了人工排程更新的時間成本，更透過精準的影像辨識，即時掌握工地現況和施工進展，協助管理者全面掌控時程<sup>[18]</sup>。此外，智慧工地常結合價值工程（Value engineering），應用精實管理（Lean management）策略，改善工地各式資源配置，以提升工程專案時程控制能力<sup>[19]</sup>。當施工區域較大，或工地進出路線複雜，若運用多代理人系統（Multi-Agent System, MAS）與機器學習等技術，可協助施工機具進行最佳路徑規劃，或施工材料運送路線最佳化，以提升整體工程專案執行成效<sup>[20]</sup>。研究顯示，智慧工地結合多代理人系統等技術，可節省 3.1% 工期<sup>[21]</sup>；若智慧工地結合資源限制演算法等技術，可避免重工（Rework reduction）與達到排程效率最佳化，最多能節省 4.6% 工期<sup>[22]</sup>。

在工程專案品質部分，智慧工地運用先進資訊技術來品質保證施工的過程與成果。影響智慧工地品質管理的關鍵因素，包括自動化技術、智慧化系統、法

規框架和全面性品質標準體系的建立與執行<sup>[23]</sup>。這些要素的整合應用，不僅提升了施工品質的一致性和可靠性，更建立了系統化的品質保證機制，確保每個施工環節都能達到預期的品質標準。智慧工地透過建築資訊模型、物聯網、區塊鏈（Block chain）、人工智慧和即時模擬等技術的深度整合，實現了對工作人員、機具設備，和施工材料的持續性追蹤監控，例如區塊鏈技術可讓品質管理紀錄的儲存與管理更完備，即使無中央伺服器亦可追蹤，讓紀錄維持高可靠度，最終促使品質管理過程公開透明，避免工程專案有多參與者而衍生的資料不一致或爭議等問題<sup>[24]</sup>。這種全方位的即時監控系統，不僅提供了完整的施工過程紀錄，更能夠即時識別潛在的品質問題，為工程專案管理者提供預警和決策支援，有效降低品質缺陷發生機率<sup>[20]</sup>。

在工程專案成本部分，智慧工地在降低建築或營建專案成本和提升施工效率方面，展現出良好的發展潛力。從專案成本數據來看，日本小松製作所透過機器人、無人機系統和雲端平台的整合，成功將工程專案成本降低 20% ~ 30%<sup>[25]</sup>。智慧工地所運用的創新技術，不僅改變了傳統的施工作業流程，更透過自動化設備和數據驅動的決策制定，大幅提升了施工精確度和資源使用效率。另一方面，文獻亦顯示運用智慧營建物件概念與技術，能夠將建築成本削減幅度高達 70% 以上<sup>[17]</sup>。這些數據充分證明了妥善運用智慧工地技術，所增加的資訊技術相關成本不多，反而能減少整體工程專案成本，為建築或營建產業的數位轉型提供有力的實證支持。

### 通用型技術：數位雙生、雲端平台

簡言之，智慧工地場域為工地現場，需整合各新式資訊技術，方能應付施工過程碰到多樣化問題。在眾多資訊技術中，通用型數位雙生（Digital Twin, DT）與雲端平台，可謂扮演整體框架與整合者角色，制定各項特定需求所需資訊技術（後文稱具體技術），使得在智慧工地的大藍圖上，不同具體技術間介面整合或訊息互動得以完成。

首先說明數位雙生技術，事實上，數位雙生正成為智慧工地領域的必備軟體架構。如圖 1 所示，數位雙生技術包含實體世界（圖 1 左方）與虛擬世界（圖 1 右方），實體世界指定物件，例如準備搭計程車的

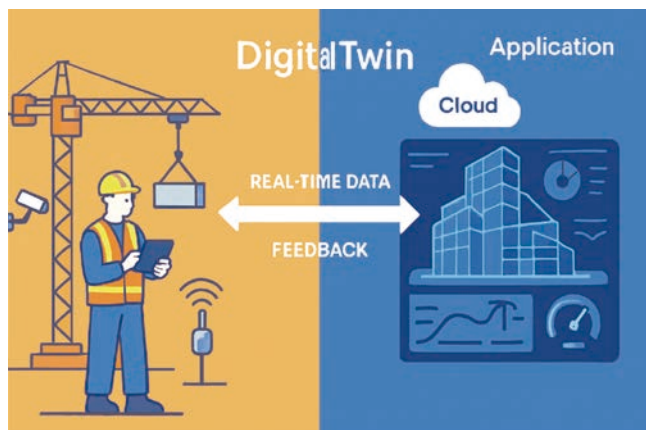


圖 1 數位雙生軟體架構圖

旅客與手機，具備感測器或物聯網裝置，以便收集物件即時資料或位置，並將資料送至實體世界的中央伺服器，或稱虛擬世界的雲端平台。以手機叫車程式如 Uber 為例，在雲端平台有許多應用程式，皆具有大數據分析、預測與決策能力，可針對使用者需求、分析收進來的資料，做出決斷，例如計算出最匹配的計程車司機。當應用程式將運算結果將送回實體世界，可能透過人類、動作器（Actuator），或可程式控制的實體世界裝置，來實現指定產出，例如旅客看到應用程式傳回來的計程車之車牌號碼，決定搭車前往。將 DT 應用在智慧工地上，能為即時監控和決策支援提供了前所未有的能力，這些虛擬世界應用程式透過整合來自多樣化來源的資料串流（Data stream），包括自主式機械設備、感測器網路和物聯網系統等，創建動態的工地地圖，並能顯著改善施工安全管控能力<sup>[26,27]</sup>。

數位雙生技術的核心價值在於其能夠將實體工地的各種資訊即時同步至虛擬環境中，使管理者能夠透過數位化方式全面掌握工地現況，包括人員動態、設備狀態、材料分布和施工進度等關鍵資訊<sup>[26]</sup>。這種即時的資訊整合和視覺化能力，不僅提升了工地管理的透明度和精確度，更為複雜的建築或營建專案提供了強有力的監控和分析工具<sup>[27]</sup>。此外，透過採用標準化框架和系統架構，數位雙生技術能夠有效克服數位轉型的障礙，並自動化多項關鍵流程，包括進度監控、品質控制和設備管理等環節<sup>[28]</sup>。網頁應用程式和儀表板系統的導入，使得 3D 模型和資料視覺化（Data visualization）成為可能，為決策制定者提供直覺且全面的資訊支援平台<sup>[29]</sup>。這種整合性的資訊呈現方式，不僅簡化了複雜數據的理解和分析過程，更使得跨領

域團隊能夠在同一個平台上進行協同作業和決策討論。儘管數位雙生技術在提升建築環境的生產力、資源效率 and 安全性方面展現出巨大的發展潛力，但在實際導入過程中仍面臨諸多挑戰。為了實現數位雙生技術在既有建築工地的廣泛應用，仍需要進一步的研究來完善資料傳輸方法並解決現有的技術瓶頸，包括數據標準化、系統整合和成本效益等關鍵議題，以確保這項創新技術能夠順利轉化為實際的產業應用價值。

在雲端平台部分，雲端運算在提升智慧工地管理與促進永續發展方面展現出顯著潛力。此技術透過提供高效率且即時的資料收集、存取與分析能力，能有效支援工地的數位轉型，進而滿足各類行政管理及商業運營需求<sup>[4]</sup>。在綠色施工管理的推動上，雲端運算可藉由降低能源消耗、減少二氧化碳排放量，同時提升協作效率與系統整合程度，促進建築或營建產業向低碳化與資源最佳化方向發展<sup>[30]</sup>。此外，雲端運算亦扮演新興建築科技發展的創新驅動角色，為建築資訊模型、物聯網、虛擬實境等技術的應用提供基礎支援與運行環境<sup>[31]</sup>。在實務層面，其應用涵蓋施工流程最佳化、跨部門與跨地點的即時溝通、資料共享以及生產力提升等多面向<sup>[30]</sup>。然而，儘管雲端運算在建築或營建領域的應用已展現出多重優勢，其推廣與普及仍受到多項挑戰與限制的影響，包括資訊安全疑慮、技術基礎設施不足、組織採納意願與人力資源能力差異等問題。因而，必須制定有效的策略與管理模式，以克服這些阻礙並促進其廣泛應用<sup>[31]</sup>。綜合而言，雲端運算不僅為建築或營建產業提供了一條邁向高效率、協作互動性與永續性皆高的技術路徑，更有助於推動整體產業結構轉型，促進智慧建築與綠色建築的長遠發展。

## 裝置端技術：物聯網與 RFID

在工地現場端，首先說明智慧工地應用上最為關鍵的物聯網技術。物聯網是一種透過感測器、無線通訊、網際網路協議及嵌入式系統，將各類實體物件連接至網路的技術與架構，使其能夠進行資料的自動感知、收集、傳輸、交換與處理，從而實現對實體世界的智慧化監測、控制與決策支援。在智慧工地上，物聯網透過分散式網路架構，實現多重建築或營建工地的遠端監控暨適應性管理機制，促使管理者得以基於感測器陣列與智慧裝置所提供之即時資料流，進行動



態決策制定與資源配置最佳化<sup>[32]</sup>。此創新管理作法，根本性地重構了傳統建築或營建工程專案之監控模式，藉由異質性感測器網路的佈署，管理者得以同時掌握多重智慧工地之施工樣態，涵蓋人力資源動態、設備運行狀態、環境參數變化及施工進度指標等關鍵性資訊維度<sup>[32]</sup>。

物聯網系統透過嵌入式感測器陣列自建築機械設備中進行資料收集，並運用雲端平台進行資料處理與使用者介面存取，此等先進技術實現設備狀況之即時監測與診斷，涵蓋振動頻譜分析及排放物質監控等關鍵性能指標，不僅提升設備預測性維護之精確性，更能預防潛在設備故障與安全風險事件之發生<sup>[33]</sup>。物聯網解決方案同步促進自主化施工技術之發展，透過電腦視覺技術之整合應用，實現更高層次之施工自動化與智慧化<sup>[33]</sup>。物聯網技術於施工材料管理領域之整合性應用，正獲得學術界與產業界之廣泛關注，透過系統性效率提升與營運成本最佳化策略，展現顯著之應用價值<sup>[34]</sup>。

基於物聯網之創新性框架運用多元感測器網路進行施工材料之即時追蹤與狀態監控，有效解決材料錯置、庫存管理不當及偽造材料等關鍵性管理議題<sup>[35]</sup>。長距離無線感測網路（Wireless Sensor Network, WSN）與平台之應用研究，展現其於追蹤靜態建築設備方面之技術可行性，能夠於廣域範圍內實現穩定之通訊連接與數據傳輸<sup>[35]</sup>。物聯網技術於供應鏈管理最佳化發揮關鍵性作用，特別於即時資訊更新機制與施工材料處理流程自動化方面，展現卓越之應用效益<sup>[36]</sup>。物聯網應用範疇更擴展至建築物全生命週期維護、施工管理體系及安全管理機制等多重領域，透過與 AI/DL 之深度整合，實現運輸板車之車隊互動式三維監控系統，顯著改善現場作業績效與操作人員行為模式<sup>[37]</sup>。此等技術進展於減少作業無效率現象與提升生產力指標方面，展現顯著之發展潛力，同時於流程最佳化、廢料減量化及資源使用效率提升等面向，具備變革性影響力。然而，於系統可靠性、智慧感測器技術成熟度及巨量資料管理架構等技術領域仍存在進一步發展之空間，需透過持續性技術創新與系統最佳化研究，以實現物聯網技術於建築或營建產業之全面性應用價值與產業轉型效益。

物聯網技術近年來在建築或營建產業中應用日益廣

泛，並逐漸成為提升施工安全與作業效率的重要手段。基於物聯網的系統可實現對勞工健康與安全狀況的即時監測，從而降低事故與傷害的發生率<sup>[38,39]</sup>。此類系統結合多元感測器、穿戴式裝置以及各類資料收集方法，以獲取有關作業人員及其作業環境的動態資訊<sup>[40]</sup>。在建築或營建工程專案中引入物聯網技術，可有效提升安全性、隱私保護、作業生產力以及整體績效<sup>[41]</sup>。然而，勞工對該技術的接受程度對成功落實應用至關重要，其中，隱私與資安議題是首要考量<sup>[39]</sup>。為促進技術採用，建議在設計過程中納入勞工的參與，並開發能建立信任感的技術解決方案<sup>[39]</sup>。此外，政府支持與專業技能培訓亦被認為是推動物聯網於建築或營建領域有效落實的關鍵措施<sup>[41]</sup>。

物聯網正持續推動建築或營建產業的數位轉型，並透過提升工程專案管理、監測能力及作業效率，重塑產業運作模式<sup>[42]</sup>。其核心在於，藉由佈署於實體物件上的感測器與軟體，實現資料的收集、儲存與交換<sup>[43]</sup>。該技術不僅有助於提升施工安全、決策品質與生產力<sup>[42]</sup>，亦可與建築資訊模型整合，提供即時的環境數據與定位資訊，從而服務於施工階段與後續的設施管理<sup>[44]</sup>。在智慧建築領域中，基於物聯網的架構可結合雲端運算與基於位置的自動化控制，顯著提升能源效率<sup>[45]</sup>。物聯網在智慧工地領域的落實應用，具備降低成本、減少浪費及最佳化資源配置等多重優勢<sup>[43]</sup>。隨著建築或營建產業持續擁抱數位化浪潮，物聯網有望成為改善施工流程與最終成果的關鍵技術支柱。

值得一提的是，物聯網的前身為無線射頻識別（Radio Frequency Identification, RFID）技術，作為一種非接觸式自動識別與資料擷取方法，約莫二十年前，在工地管理領域早已展現出應用潛力。該技術透過射頻訊號實現標籤（Tag）與讀取器（Reader）之間的無線通訊，可對施工材料、施工設備以及現場人員進行即時追蹤與精確識別<sup>[46]</sup>。RFID 標籤分主動式（需要電源供應），與被動式（不需要電源供應），現今台灣高速公路電子收費系統即使用被動式 RFID 標籤，稱作 eTag。應用在建築或營建產業，RFID 使得材料採購、物流配送以及工地資源定位等流程更為高效，有助於縮短供應鏈週期並減少因資源錯置或遺失所造成的延誤<sup>[46]</sup>。RFID 技術的另一關鍵優勢在於其可實現施工資源的即時監控，減少人工資料輸入的需求，並有效避

免重複登錄或資料錯誤等問題<sup>[47]</sup>。當 RFID 系統與手持裝置結合時，可即時顯示標籤標記物件之登錄或識別資訊，進一步提升工具、設備與高價值資源的管理便利性<sup>[48]</sup>。此外，相較於傳統條碼系統，RFID 具有更高的資料儲存容量、可在無視線環境下進行識別，以及能同時讀取多個標籤的特性，因而在複雜的建築工地環境中具備更強的適應性<sup>[48]</sup>。

然而，RFID 在建築或營建領域的推廣應用仍面臨多項挑戰，包括設備與安裝成本、訊號干擾問題、金屬與水對讀取效能的影響、以及與現有資訊管理系統的整合難度等。此外，資料安全與隱私保護亦是必須考量的議題，特別是在涉及人員行蹤監控的情境下。儘管如此，研究與實務案例顯示，RFID 在大型建築或營建專案中能夠顯著提升資源調度效率與現場作業的透明度<sup>[47]</sup>。總體而言，RFID 技術透過精確且即時的資源追蹤與識別能力，不僅有助於優化工地現場管理流程，亦能為建築或營建工程專案的進度控制、成本管理及品質保證提供強有力的技術支援<sup>[48]</sup>。隨著感測技術的進一步成熟及與其他數位化工具的整合，RFID 有望在未來建築產業的智慧化與數位轉型中扮演更加關鍵的角色。

## 穿戴式與定位技術

在智慧工地的現場，除了上一節提到物件裝置端，在工人身上端也常見穿戴式裝置，用以收集資料、展示成果，甚至執行分析。在這技術脈絡下，計有：延展實境（Extended Reality, XR）技術，包括虛擬實境、擴增實境（Augmented Reality, AR）與混合實境（Mixed Reality, MR），日益廣泛應用於智慧工地領域，以提升工地現場的安全性、效率與訓練成效。透過將虛擬模型疊加於實體環境之中，XR 技術能有效增進品質檢查的準確性，此外，其在降低工地事故發生率與強化職業安全衛生（Occupational Safety and Health, OSH）方面亦展現高度潛力<sup>[49]</sup>。目前 XR 在工程專案管理上的應用範疇涵蓋進度控管、品質控管與安全管理，並促進工程專案參與者間即時資訊交換<sup>[50]</sup>。在工程教育與訓練層面，XR 亦被應用於安全管理、技能培訓、設備操作、人機協作及人體工學等訓練內容<sup>[51]</sup>。然而，儘管 XR 技術具備顯著潛能，其在實際環境中之導入仍面臨技術瓶頸與使用者採納等挑戰<sup>[50]</sup>。

近年來，關於穿戴式感測器於提升工地現場安全與監測工人健康之潛能的研究逐漸增多。手環式感測器可量測如皮膚電活動（Electrodermal activity）、皮膚溫度與心率變異性等生理訊號，進而評估工人的身心狀態<sup>[52]</sup>。市售穿戴裝置亦展現出在連續監控體溫與偵測健康風險方面的可行性，相關研究已針對其準確度與配戴舒適性進行評估<sup>[53]</sup>。進階穿戴科技如具備擴增實境功能的智慧安全帽、生理感測器與外骨骼裝置，透過即時數據傳輸、生命徵象監控與降低身體負荷等方式，提供更具個人化之安全防護方案<sup>[54]</sup>。此外，創新系統如配備多重感測器之智慧手環與安全帽，能即時追蹤工人位置、生理參數，並偵測跌落事件，從而採取主動式工人健康管理策略。這些科技之應用，標誌著工地安全管理體系的重大進展。值得注意的是，新一代 XR 裝置通常具備良好的室內定位能力，搭配下一節提到的定位技術，在智慧工地現場，亦可混搭不同裝置來截長補短，以求現場所收集之資料串的正確性、完整性與即時性，方能真正輔助後續各式決策工作。

## 定位與資料收集傳送技術

首先介紹同步定位與地圖繪製技術（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）：近年研究 SLAM 於建築或營建產業的應用逐漸增加，SLAM 可使自主機器人或車輛於複雜且持續變動之施工場域中，進行自主導航與地圖構建<sup>[55]</sup>。透過 SLAM，自主機器人或車輛能夠蒐集三維空間數據、辨識障礙物，並在未知環境中自主移動<sup>[56]</sup>，此技術有效解決了傳統靜態雷射掃描方法所面臨之遮蔽問題，與需進行多點掃描的限制<sup>[57]</sup>。基於 SLAM 的機器人或車輛可產出具備高解析度與 RGB 紋理資訊之點雲資料，廣泛應用於智慧工地領域，如進度監控與安全風險辨識等<sup>[56,57]</sup>。近期更進一步拓展 SLAM 於大型室內場域中的應用潛能，透過融合多種感測器，例如立體攝影機與三維雷射掃描儀，以提升定位與建圖之精度與穩定性<sup>[58]</sup>。上述發展有望顯著促進施工作業自動化、提升生產效率，並強化現場作業之安全管理。

進一步看其他空間或定位技術，光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）與三維雷射掃描（3D laser scanning）皆屬於以雷射為基礎之空間數據擷取方法，但兩者針對之應用需求與場域有所不同。三維雷射掃描以其高精度著稱，特別適用於需細部建模之專



案，例如歷史建築修復與精緻建築資訊模型建構。而 LiDAR 則強調其大範圍與高效率特性，更適用於動態與大尺度環境中，如都市規劃、自主駕駛與地形建模等場景。儘管兩者應用面向不同，皆對提升多元空間資料準確性與作業效率具有顯著貢獻。

首先說明雷射掃描技術，該技術發展甚早，近年來已成為工地現場管理與監測中極具價值的工具。該技術可快速且精確地取得三維空間數據，應用於施工進度控管、品質保證以及決策支援等多項工程管理任務<sup>[59,60]</sup>。透過與四維模型整合，雷射掃描能實現施工進度之自動化追蹤與排程更新<sup>[59]</sup>，此外，其亦可用於建立工地現場之視覺化表徵，以增進溝通效率與目標物追蹤<sup>[61]</sup>。為提升資料蒐集效率並兼顧品質，已有研究提出快速掃描規劃法，以在滿足資料精度需求的同時，最小化掃描時間<sup>[60]</sup>。實務應用顯示，雷射掃描技術可有效應用於土方量測、鋪面特性評估與考古遺址記錄等領域，當與傳統測量方法結合時，更能展現其經濟效益與高應用價值，顯示其於工程專案管理與施工控管層面具有高度潛能<sup>[59,60]</sup>。

另一方面，LiDAR 技術迭代較快，目前常結合深度學習演算法，革新工地現場之監測與管理方式，進一步促進施工安全、生產效率與法規遵循。此一整合方案能實現工人、設備與環境狀況之即時監測，有助於風險辨識與工作流程最佳化。透過 LiDAR 數據可建立具語意資訊之工地地圖，支援物件分類與自動化路徑規劃<sup>[62]</sup>，實證研究顯示，LiDAR 技術於工地現場具顯著應用潛力，可用於地面平整度分析、模板檢測等作業，進而提升營建生產力、品質紀錄完整性，與業主參與度<sup>[62]</sup>。綜合而言，LiDAR 技術正展現出促進施工實務現代化與智慧化之發展潛能。

接著，探討一項新興資料收集裝置或技術：無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）。UAV 於建築或營建領域應用日益廣泛，涵蓋工地監測、安全評估與施工进度追蹤等多元面向<sup>[63-65]</sup>，相較於傳統方法，UAV 具備更佳之空拍能力，特別是在高處或整體場域視角之影像擷取上，展現其資訊可視化與資料覆蓋範圍的優勢<sup>[65]</sup>。此外，UAV 可結合擴增實境技術，進一步強化施工管理與問題偵測功能，提升決策效率與現場反應能力。在工地安全管理方面，UAV 亦扮演關鍵角色，透過機器學習演算法，UAV 可自動識別工人是否配戴

個人防護裝備（Personal Protective Equipment, PPE），從而促進安全規範之落實與風險控管<sup>[64]</sup>。然而，UAV 技術之導入亦可能引入新的工安風險，如操作失誤、設備墜落或隱私疑慮等問題，亟需進行系統性之風險評估與管理<sup>[63]</sup>。儘管存在挑戰，UAV 技術已實證其於施工現場監控、安全管理與整體專案執行效率提升等方面之應用潛力，對於推動工程管理數位化與智慧化具有積極意義<sup>[63-65]</sup>。

當工地現場資料收集完畢，欲傳送到中央伺服器或雲端平台時，此時，傳輸方式的選擇，往往亦是智慧工地導入成功與否的指標。以下，從文獻上分別探討 5G、藍芽，與長距離低功耗通訊技術（Long Range Radio, LoRa）技術。5G 技術於智慧工地場域之整合應用展現出顯著潛力，特別是在提升工地安全、生產力與自動化層面，5G 可支援遠端操作與自主施工機械，其在低延遲（Low latency）與高可靠性通訊需求的應用場景中，優於先前之 4G 技術<sup>[66]</sup>。低延遲性指的是資料在裝置與伺服器之間傳輸，一來一往的延遲時間，以 Wi-Fi 為例，Wi-Fi 5（802.11ac），約 10 至 30 毫秒；Wi-Fi 6（802.11ax），約 1 至 10 毫秒，為理想值，實際延遲受路由器品質、干擾與裝置數量等；4G 平均延遲，約 30 至 50 毫秒在；而 5G 理論值低於 1 毫秒，實際約 1 至 10 毫秒。因此，這種即時性對於需要快速反應的應用非常關鍵，例如遠端控制機械、自動化設備操作或即時監控系統，是故，5G 可提供高速且穩定之無線數據傳輸，並可依據工地特性進行網路佈署之優化與調整<sup>[67]</sup>。5G 於智慧工地現場之應用範疇涵蓋各式大型車輛管理、即時協調與資源追蹤等功能<sup>[68]</sup>。然而，針對室內或局部定位需求，其他低功耗通訊技術如藍牙低功耗（Bluetooth Low Energy, BLE）亦具備成本效益高之優勢，適用於資源實時定位與人員移動軌跡監控<sup>[69]</sup>。此類技術之導入可有效應對智慧工地場域動態性高、作業分散等挑戰，為建築或營建產業之數位轉型與自動化發展奠定基礎<sup>[67,68]</sup>。

除了常見的 Wi-Fi、4G 或 5G，近期研究關注於長距離低功耗通訊技術的應用，探討其於施工現場即時監控與資訊傳輸之潛力。LoRa 具備遠距傳輸與低能耗特性，特別適用於工地等通訊條件受限之環境<sup>[70]</sup>。相關研究已將 LoRa 應用於工人健康監控、設備辨識與定位等功能<sup>[70,71]</sup>，進而提升工地之安全性、作業效率與流

程管理能力。部分研究更進一步將 LoRa 與其他通訊協定，如 ZigBee 與 Wi-Fi 整合，建構混合式通訊架構，以實現更全面之場域監控系統<sup>[71]</sup>。此外，基於 LoRa 之網路協定 LoRaWAN 已被應用於施工現場之網路建置與物流自動化作業，顯示其於建築資訊整合、現場通訊與物聯網實作方面之廣泛應用潛力<sup>[72]</sup>。整體而言，這些研究反映出 LoRa 技術於提升建築或營建產業資訊傳遞效率、安全管理與智慧化作業之高度發展潛能，然而，LoRa 的高延遲性、低資料傳輸速率（0.3 kbps 到 50 kbps），在應用仍需妥善考量。

最後，如同任何資訊系統，智慧工地於現場所收集的數據雖然眾多，但均為真實資料，非必要不應修改，更不能竄改，後續無論用在工程保險或工安稽核，這些現場數據必須妥善保存，方能取得資料上下游參與者的信任，與發揮最大功效。而區塊鏈技術便在建築或營建產業中，為此需求，展現出高度潛能，能有效回應當前業界所面臨之信任不足、資訊不透明與資料可追溯性薄弱等核心挑戰<sup>[73]</sup>。在數位化工地與智慧建造日益普及的背景，施工現場產生大量異質性資料，例如來自感測器、無人機、電腦視覺或穿戴裝置的資訊，這些資料需即時傳輸至雲端平台以供分析與決策。然而，在資料傳輸與儲存過程中，資訊有可能遭竄改、遺失或被未授權存取之風險，進而影響管理決策之正確性與系統整體信任度。區塊鏈技術透過其去中心化架構、加密演算法、時間戳記與共識機制，可有效確保資料在從現場端至雲端平台傳輸過程中之不可竄改性（Immutability）與完整性（Data integrity）。例如，可透過合約機制，建立資料上鏈，當感測器或影像擷取設備產生新資料時，自動驗證其真實性並上鏈儲存，確保任何資料變動皆可追溯其來源與修改紀錄<sup>[74]</sup>。此一資料治理機制不僅提升資訊透明度，亦強化各參與方間之信任基礎，特別是在多方協作與外包頻繁的建築或營建專案中。

進一步而言，區塊鏈亦可與電腦視覺技術整合，針對施工影像進行自動化資訊擷取與上鏈存證，例如辨識施工進度、作業安全或品質問題等，並確保所擷取之影像資料具備法律效力與資料真實性<sup>[75]</sup>。此外，其應用潛力可涵蓋建築生命週期各階段，包括但不限於供應鏈管理（例如追蹤建材來源）、契約履約驗證、品質保證、檢驗流程記錄與支付機制自動化等<sup>[76]</sup>。然

而，儘管區塊鏈技術於建築或營建產業具高度潛力，目前仍處於初步研究與實驗性階段，尚未全面落地於大規模工程實務中。其導入仍面臨多項挑戰，例如資料上鏈成本、交易延遲、區塊鏈與既有系統整合之困難度，以及法規與標準體系尚未完善等<sup>[76]</sup>。因此，未來研究應持續探討區塊鏈技術於建築資訊模型等資料管理中之可行性、架構設計、與異質資料整合機制，以促進其在建築或營建產業中之實質應用與價值實現。

## 決策與行動：人工智慧與機器人

若將智慧工地比喻成數位雙生系統，則數位雙生在虛擬世界所做的決策，相當於智慧工地運用人工智慧的過程，包含資料前處理、數據分析，與資料後處理；而數位雙生從虛擬世界將決策傳回實體世界，則相當於智慧工地使用機器人或智慧裝置，執行人工智慧計算的結果。

事實上，人工智慧的深度學習技術於智慧工地應用，正深刻改變傳統的安全監控與生產效率管理模式。此類技術能夠實現即時辨識現場工人、機具或施工材料，及潛在危害因子，大幅提升施工安全與作業反應速度<sup>[77,78]</sup>。透過電腦視覺演算法，系統可高精度地識別物件類型，並結合人臉辨識技術，進行工人身分識別，提升現場人員管理效率<sup>[77]</sup>。針對職業安全管理，已訓練之深度學習模型可自動檢測個人防護裝備（如安全帽與反光背心）之配戴狀況，而應用 Kalman filter 等演算法則能進行工人動線與行為軌跡之追蹤<sup>[78]</sup>，有助於即時預警與風險預測。進一步結合 LiDAR 技術與深度學習，可實現更高解析度之三維空間建模與環境監控能力，有效提升危害辨識與作業流程最佳化<sup>[79]</sup>。與傳統監視系統相比，基於深度學習的監控系統具備更高的偵測準確率與更佳的环境適應性，特別是在多工種共作、環境複雜且動態變化快速的建築或營建場域中。然而，該技術仍面臨大量數據處理、模型訓練成本與邊緣運算需求等挑戰，亟需發展更具彈性與效率的資料管理架構<sup>[79]</sup>。整體而言，深度學習於智慧工地的應用，對於提升施工安全、作業效率及法規遵循之能力，具有高度發展潛力與產業轉型意義<sup>[80]</sup>。

電腦視覺技術於建築或營建產業中展現出顯著潛力，能有效促進施工安全管理、生產效率提升與進度監控自動化。此類技術可透過影像與影片資料，實現



施工現場中之自動化物件偵測、目標追蹤與行為辨識，大幅降低人力監控負擔並提升資訊即時性<sup>[81]</sup>。其應用範疇廣泛，涵蓋施工進度評估、施工材料檢查，以及施工機具安全監控等。進階的深度學習模型能準確偵測與追蹤工人及施工設備，進一步分析其互動關係，並識別潛在危險區域，以實現主動式事故預防與風險控制<sup>[82]</sup>。然而，儘管技術發展迅速，仍面臨若干挑戰，尤其是在實現全面性場景理解（Comprehensive scene understanding）、確保跨攝影機視角下的追蹤一致性，以及對多目標實體同時行為辨識等技術層面尚待突破<sup>[81]</sup>。此外，實務應用中亦涉及多項限制因素，如施工現場環境高度動態化、工人隱私權保障問題，以及需依工作情境設計具針對性的安全評估指標等，皆為影響電腦視覺技術在建築或營建產業廣泛落地之關鍵議題<sup>[81]</sup>。綜上所述，電腦視覺技術作為智慧建造核心支撐之一，具備促進工程數位化與自動化之潛能，惟需進一步解決技術與倫理層面的實務挑戰，方能實現其在建築或營建領域中的全面應用。

近年來，學術界日益強化智慧工地中之物件偵測與辨識能力。為提升深度學習模型於建築或營建場域之辨識準確性，研究者發展了如 Scalable Open Dataset for Architecture (SODA) 等大型標註資料集，專為訓練施工場域中專屬物件之偵測模型而設計<sup>[83]</sup>。其中，基於 YOLOv5 的系統，在多尺度條件下對於小型物件之即時偵測表現出良好成效，顯著提升工地即時監控與安全管理之自動化程度<sup>[84]</sup>。此外，YOLO 類神經網絡亦被成功應用於無人機影像與固定監視器畫面中，實現多類別物件，如工人、機具、材料等，之高準確度辨識，有助於擴展工地監測應用之範疇與深度。早期研究亦提出整合三維電腦輔助設計模型作為圖像過濾機制，以輔助進行物件辨識與施工進度監測，進一步提升資料解析與自動比對效率。該方法提供一種從靜態影像中識別施工階段變化的可行路徑。綜合而言，這些人工智慧與電腦視覺技術的進展，正逐步促進施工現場之智能化監測與資訊自動化處理，除可有效降低人力成本外，亦有助於提升施工安全性與決策效率，展現其於智慧建造領域中的關鍵支撐角色。

此外，GSO-YOLO 模型結合了全域優化與穩定擷取模組，強化了模型在複雜環境中對情境資訊的捕捉能力與目標偵測穩定性<sup>[85]</sup>。CaSnLi-YOLO 為一種基

於 YOLOv5s 的輕量化架構模型，融合了座標注意力機制（Coordinate attention）與軟非極大值抑制（Soft-NMS）技術，在有效降低模型參數數量的同時，顯著提升了偵測準確率<sup>[86]</sup>。另有研究針對個人防護裝備，進行 YOLOv5 各版本之性能比較，發現 YOLOv5s 在處理速度上最為高效，達每秒 110 幅影像的處理效能，具備良好的即時性與實用價值<sup>[87]</sup>。另外，GeoIoU-SEA-YOLO 模型結合了幾何交併比損失函數（Geometric intersection over union loss）與結構增強注意力機制（Structural-Enhanced Attention, SEA），針對小型目標偵測與特徵優化方面表現優異，並在辨識不安全行為等應用上，超越既有 YOLO 模型的準確度與穩定性<sup>[88]</sup>。整體而言，這些 YOLO 模型之創新發展大幅推進了施工場域中之自動化、即時化安全監控技術，有效回應了遮蔽（Occlusion）、小目標辨識與複雜環境下偵測精度不足等長期挑戰，為建築或營建產業邁向智慧安全管理奠定技術基礎。

至於探討機器人部分，施工機器人在建築或營建產業中正逐漸成為提升生產力、安全性與作業效率的重要工具。具備移動操作功能的機械手臂與全向移動平台（Holonomic platforms）等機器人系統已被開發，用於執行高空鑽孔等高風險與高精度作業，展現出其在施工現場中的實務應用潛力。此類建築機器人具備多項優勢，包括操作精度提升、與工程管理系统之整合性高，以及現場客製化構件之即時製造能力<sup>[89]</sup>。實證研究顯示，施工機器人可減少 25% 至 90% 的重複性作業負擔，並可降低高危險作業時間約 72%；此外，其可提升施作精度約 55%，同時重工比例降低超過 50%<sup>[90]</sup>，顯著優化建築品質與資源運用。儘管具備多重潛力，施工機器人的實際佈署仍面臨諸多挑戰，包括：需整合機械工程、建築學、電機與資訊工程等跨領域知識體系；施工場域之非結構化環境與高度動態性，也對感知、導航與作業規劃提出高度要求。此外，如何在機器人與人類工人共作情境下確保作業安全，亦為當前技術落地應用的重要瓶頸<sup>[89]</sup>。儘管存在上述挑戰，半自主式移動機器人（Semi-autonomous mobile robots）於實際工地中的試驗性佈署已展現出廣泛的應用潛能，不僅為施工流程帶來高度自動化，亦預示未來建築產業邁向智慧建造與人機協作新典範的發展方向<sup>[91]</sup>。

近期智慧工地相關研究，逐漸關注大型語言模型（Large Language Models, LLMs）於建築與機器人領域之應用潛力。LLMs 正在改變傳統建築實務，特別是在文件分析、自動化資料處理與內容管理方面，展現出顯著的資訊理解與處理能力<sup>[92]</sup>。在多機器人任務規劃（Multi-robot task planning）領域中，SMART-LLM 展現了將高階語意指令轉換為具體任務規劃之能力，透過任務分解、合作編組與資源分配等步驟，實現複雜作業流程的語意驅動式規劃<sup>[93]</sup>。針對工地現場中的機器人應用，LLMs 可用於提升任務指派效率，透過與人類操作者互動與調適現場環境變化，協助動態資源調度與行動決策。此外，AutoRepo 框架運用多模態大型語言模型（Multimodal LLMs）自動生成施工檢查報告，不僅可加速文件產製流程，亦有助於強化安全管理與紀錄的標準化<sup>[94]</sup>。上述應用實例顯示，LLMs 在工程管理領域具有高度革新潛力，有助於提升作業效率、資料處理準確性與決策品質，並可望在施工自動化與智慧建造的實踐中發揮關鍵作用。

最後探討 3D 列印在智慧工地的應用：3D 列印（3D Printing）技術在建築或營建領域中日益受到關注，被視為促進施工自動化與減少材料浪費之具潛力創新技術。該技術已發展出多種應用形式，包括輪廓建造法（Contour crafting）、混凝土列印（Concrete printing）與 D-shape 列印技術等<sup>[95]</sup>，旨在透過數位化施工實現更高效率與設計自由度。以 BatiPrint3D 技術為例，其運用發泡材料作為混凝土的臨時模板，不僅構築結構體，亦同時提供隔熱功能，展現功能一體化建構（Integrated function and structure）的潛力<sup>[96]</sup>。此外，大尺度三維列印已成功應用於多項具複雜幾何形體之工程專案中，進一步回應傳統建造技術在可施工性（Constructability）與建築設計自由度方面之限制<sup>[97]</sup>。現地混凝土列印（On-site 3D concrete printing）具備多項優勢，包括減少能源消耗、擴展設計表現形式，以及促進環保建材之使用<sup>[98]</sup>。研究亦指出，三維列印之牆體結構在力學性能方面，表現優於傳統磚造結構，顯示其在建築結構應用上具備技術可行性與潛在優勢<sup>[98]</sup>。儘管三維列印技術於建築領域展現高度潛能，然其全面落地仍面臨若干挑戰，如成本過高、材料選擇受限、施工標準尚未成熟，以及缺乏大規模實證研究以驗證其在真實工地環境中之應用成效與穩定性<sup>[95,99]</sup>。因

此，未來仍需跨學科合作與實地試驗，推動該技術在建築工程實務中的深度應用與制度化發展。

## 結論與建議

本研究透過系統性文獻回顧，全面整理智智慧工地在建築與營建產業中之資訊技術應用現況，並針對其整合特性與實施挑戰進行分析。隨著全球建築產業面臨數位轉型浪潮<sup>[100]</sup>，智慧工地已逐漸從概念性架構走向實質應用，其核心價值在於透過資訊技術導入，實現工地作業流程的數據化、透明化與即時化管理。研究發現，智慧工地涵蓋之資訊技術從基礎的雲端運算與大數據平台，到進階的人工智慧、機器人與 3D 列印等，構成多層次且系統性的技術網絡，對工程專案的進度控制、成本管理、安全監測與品質保證皆產生深遠影響。

在資源管理與效率最佳化層面，智慧工地透過人員定位與出勤追蹤、機具使用率監控、施工材料供應鏈資訊化管理等，已展現出良好的管理成效。這些技術的落實不僅提升了施工現場作業透明度，更促使管理者能依據即時數據進行決策，有效降低工程延誤與成本超支風險。

然而，智慧工地資訊技術的導入亦面臨多重挑戰。首先，在技術整合層面，不同技術間缺乏標準化介面與資料互通性，導致系統間整合困難。再者，施工現場高度動態與不確定性的環境特性，使得設備感測與資料收集的穩定性與準確性仍有待強化。此外，人員的技術接受度與操作能力亦成為導入智慧工地的重要瓶頸，特別是傳統營建產業中仍存在對新科技的抗拒情緒與應用落差。

有鑑於此，本研究提出以下建議以促進智慧工地資訊技術於營建管理中的深化應用：

1. 推動資訊標準化與系統整合機制：應建立統一之資料交換格式與技術介面，促進異質資訊系統間的互操作性，以實現跨平台整合與全面性數據管理。
2. 加強人機協作機制與使用者訓練：為減少技術落差與使用阻力，建議從現場實務角度出發，設計友善介面與操作流程，同時強化工地人員對智慧技術之認知與操作能力。
3. 建構動態且可適應的智慧系統架構：因應施工現場高度變動的特性，資訊技術應具備彈性調整與模組化設計能力，以適應不同專案規模與工地情境。



4. 強化資料安全與隱私保護機制：在大量感測與即時監控情境下，需建立有效的資料加密與區塊鏈驗證機制，確保關鍵工地資料之完整性與不可竄改性。
5. 鼓勵跨領域合作與政策支持：智慧工地的發展需結合建築、資訊、管理與法規等多領域專業，建議政府單位提供政策誘因與示範計畫，加速技術落地與產業升級。

總結而言，智慧工地所代表的不僅是技術革新，更是營建管理思維與模式的根本轉變。未來研究可進一步從實證研究出發，針對特定技術應用成效與管理制度設計進行深入探討，進一步建構符合我國營建產業實情之智慧工地發展策略。

## 誌謝

本研究部分感謝國科會計畫編號 MOST 111-2221-E-008-024-MY3 與 NSTC 113-2221-E-008-028-MY3 的支持。

## 參考文獻

1. Hammad, A., Vahdatikhaki, F., Zhang, C., Mawlana, M., and Doriani, A. (2012). Towards the smart construction site: Improving productivity and safety of construction projects using multi-agent systems, real-time simulation and automated machine control. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. <https://doi.org/10.1109/wsc.2012.6465160>
2. Bucchiarone, A., De Sanctis, M., Hevesi, P., Hirsch, M., Abancens, F.J.R., Vivanco, P.F., Amirslanov, O., and Lukowicz, P. (2019). Smart Construction: Remote and Adaptable Management of Construction Sites through IoT. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2(3), 38-45. <https://doi.org/10.1109/iotm.0001.1900044>
3. Zhou, H., Wang, H., and Zeng, W. (2018). Smart construction site in mega construction projects: A case study on island tunneling project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.15302/j-fem-2018075>
4. Liu, T., Hou, J., Xiong, G., Nyberg, T.R., and Li, X. (2016). Smart cloud-based platform for construction sites. 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Beijing, China, 2016, pp. 168-173, doi: 10.1109/SOLI.2016.7551681.
5. Liu, H., Song, J., and Wang, G. (2021). A Scientometric Review of smart Construction site in Construction Engineering and Management: Analysis and visualization. *Sustainability*, 13(16), 8860. <https://doi.org/10.3390/su13168860>
6. Song, J., Haas, C.T., Caldas, C., Ergen, E., and Akinci, B. (2005). Automating the task of tracking the delivery and receipt of fabricated pipe spools in industrial projects. *Automation in Construction*, 15(2), 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.03.001>
7. Zhu, H., Hwang, B., Ngo, J., and Tan, J. (2022). Applications of Smart Technologies in Construction Project Management. *Journal of Construction Engineering and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0002260](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002260)
8. Zheng, Z., Wang, F., Gong, G., Yang, H., and Han, D. (2022). Intelligent technologies for construction machinery using data-driven methods. *Automation in Construction*, 147, 104711. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104711>
9. Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J., and Pérez, C.T. (2020). A proposed framework for Construction 4.0 based on a review of literature. *EPiC Series in Built Environment*. <https://doi.org/10.29007/4nk3>
10. Perrier, N., Bled, A., Bourgault, M., Cousin, N., Danjou, C., Pellerin, R., and Roland, T. (2020). Construction 4.0: a survey of research trends. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, 416-437. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.024>
11. Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., and Pulido-Arcas, J. A. (2020). Construction 4.0: A Literature Review. *Sustainability*, 12(22), 9755. <https://doi.org/10.3390/su12229755>
12. Niu, Y., Lu, W., Chen, K., Huang, G.G., and Anumba, C. (2015). Smart construction objects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000550](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000550)
13. Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., and Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1109/mic.2009.143>
14. Štefani, M. and Stankovski, V. (2018). A review of technologies and applications for smart construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 172(2), 83-87. <https://doi.org/10.1680/jcein.17.00050>
15. Halfawy, M. and Froese, T. (2005). Building Integrated Architecture/Engineering/Construction Systems Using Smart Objects: Methodology and Implementation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(2), 172-181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2005\)19:2\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2005)19:2(172))
16. Kortuem, G., Kawsar, F., Sundramoorthy, V., and Fitton, D. (2009). Smart objects as building blocks for the Internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14(1), 44-51. <https://doi.org/10.1109/mic.2009.143>
17. Lee, J., Shin, D.P., Park, S.H., and Byon, C. (2023). Development and application of Smart Construction Objects and Management System for an Efficient and Cost-Effective Safety Management. *Buildings*, 13(6), 1383. <https://doi.org/10.3390/buildings13061383>
18. Bhokare, S., Goyal, L., Ren, R., and Zhang, J. (2022). Smart construction scheduling monitoring using YOLOv3-based activity detection and classification. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 240-252. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.012>
19. Elizar, N., Suripin, N., and Wibowo, M.A. (2017). The concept of value stream mapping to reduce of work-time waste as applied the smart construction management. *AIP Conference Proceedings*, 1903, 070010. <https://doi.org/10.1063/1.5011579>
20. Kuenzel, R., Mueller, M., Teizer, J., and Blickle, A. (2015). SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Proceedings of the 32nd ISARC*, Oulu, Finland. <https://doi.org/10.22260/isarc2015/0068>
21. Jiang, S., Yang, B., and Liu, B. (2025). Precast Components On-site Construction Planning and Scheduling Method Based on a Novel Deep Learning Integrated Multi-agent System. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.111907>
22. Khalesi, H., Balali, A., Valipour, A., Antuchevien, J., Migilinskas, D., and Zigmund, V. (2020). Application of Hybrid SWARA-BIM in Reducing Reworks of Building Construction Projects from the Perspective of Time. *Sustainability*, 12, 8927. <https://doi.org/10.3390/su12218927>
23. Zhang, S., Liu, J., Li, Z., Xiahou, X., and Li, Q. (2024). Analyzing critical factors influencing the quality management in smart Construction Site: a DEMATEL-ISM-MICMAC based approach. *Buildings*, 14(8), 2400. <https://doi.org/10.3390/buildings14082400>
24. Sheng, D., Ding, L., Zhong, B., Love, P., Luo, H., and Chen, J. (2020). Construction quality information management with blockchains. *Automation in Construction*, 120, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103373>
25. DeWit, A. (2015). Komatsu, Smart Construction, Creative Destruction, and Japan's robot Revolution. *Japan Focus*, 13(50). <https://doi.org/10.1017/s1557466015017143>
26. Wickberg, P., Fattouh, A., Afshar, S., and Bohlin, M. (2023). Adopting a digital twin framework for autonomous machine operation at construction sites. 2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI), 1, 1-6. <https://doi.org/10.1109/cvci59596.2023.10397254>
27. De Andrade Marques Ferreira, E., De Jesus, B.S.V.B., Araújo, C.S., Rodrigues, Y.C.M., and Costa, D.B. (2021). Digital twins to monitor physical resources at construction sites with web application. *AIP Conference Proceedings*, 2429, 050006. <https://doi.org/10.1063/5.0070688>
28. Torres, J., San-Mateos, R., Lasarte, N., Mediavilla, A., Sagarna, M., and León, I. (2024). Building digital twins to overcome digitalization barriers for automating construction site management. *Buildings*, 14(7), 2238. <https://doi.org/10.3390/buildings14072238>
29. Chacón, R., Posada, H., Ramonell, C., Jungmann, M., Hartmann, T.,

- Khan, R., and Tomar, R. (2024). Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure. *Journal of Building Engineering*, 84, 108522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>
30. Rawai, N.M., Fathi, M.S., Abedi, M., and Rambat, S. (2013). Cloud Computing for Green Construction Management. 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Hong Kong, China, pp. 432-435, doi: 10.1109/ISDEA.2012.107.
  31. Bello, S.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Bilal, M., Delgado, J.M.D., Akanbi, L.A., Ajayi, A.O., and Owolabi, H.A. (2020). Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, 122, 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
  32. Jiang, Y. and He, X. (2020). Overview of applications of the sensor technologies for construction machinery. *IEEE Access*, 8, 110324-110335. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3001968>
  33. Khoury, H., Salhab, D., and Antar, S. (2018). A review on internet of things solutions for enhancing construction equipment fleet productivity. *Creative Construction Conference 2018 - Proceedings*, 971-978. <https://doi.org/10.3311/cc2018-126>
  34. Jain, E.A.S. (2023). An IoT-Based framework for enhanced construction material management and tracking. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(9), 1579-1586. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i9.9143>
  35. Brennan, T.M., Jesson, J.E., Deese, A.S., Rodriguez, E., and Bechtel, A.J. (2021). Internet of things application for smart construction assets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 174(3), 79-87. <https://doi.org/10.1680/jsmic.21.00022>
  36. Kumar, A. and Shoghli, O. (2018). A review of IoT applications in supply chain Optimization of construction materials. 2018 Proceedings of the 35th ISARC, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0067>
  37. Katiyar, A. and Kumar, P. (2021). A review of Internet of Things (IoT) in Construction industry: Building a Better Future. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 3(2), 65-72. <https://doi.org/10.30630/ijasce.3.2.53>
  38. Prabha, D., B. D., A. D.M., and K. S. (2021). IoT application for Safety and Health Monitoring System for Construction Workers. 2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). <https://doi.org/10.1109/icoei51242.2021.9452911>
  39. Häikiö, J., Kallio, J., Mäkelä, S., and Keränen, J. (2020). IoT-based safety monitoring from the perspective of construction site workers. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 4(1), 1-14. [https://doi.org/10.24840/2184-0954\\_004.001\\_0001](https://doi.org/10.24840/2184-0954_004.001_0001)
  40. Singh, R., Gehlot, A., Gupta, D., Rana, G., Sharma, R., and Agarwal, S. (2019). XBee and internet of robotic things based worker safety in construction sites. In *CRC Press eBooks* (pp. 81-107). <https://doi.org/10.1201/9780429053290-4>
  41. Oke, A.E., Arowoiya, V.A., and Akomolafe, O.T. (2020). Influence of the Internet of Things' application on construction project performance. *International Journal of Construction Management*, 22(13), 2517-2527. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1807731>
  42. Alzubi, K.M., Alaloul, W.S., Salaheen, M.A., Qureshi, A.H., Musarat, M.A., and Alawag, A.M. (2022). Reviewing the applications of internet of things in construction projects. 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA), 169-173. <https://doi.org/10.1109/dasa54658.2022.9765143>
  43. Katiyar, A. and Kumar, P. (2021). A review of Internet of Things (IoT) in Construction industry: Building a Better Future. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 3(2), 65-72. <https://doi.org/10.30630/ijasce.3.2.53>
  44. Teizer, J., Wolf, M., Golovina, O., Perschewski, M., Propach, M., Neges, M., and König, M. (2017). Internet of Things (IoT) for integrating environmental and localization data in building Information Modeling (BIM). 2017 Proceedings of the 34rd ISARC, Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.22260/isarc2017/0084>
  45. Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A., and Sha, M. (2015). An Internet of Things framework for smart energy in buildings: designs, prototype, and experiments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 527-537. <https://doi.org/10.1109/ijot.2015.2413397>
  46. Jaselskis, E.J. and El-Misalami, T. (2003). Implementing Radio Frequency Identification in the Construction Process. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 129(6), 680-688. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:6\(680\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:6(680))
  47. Soleimanifar, M., Beard, D., Sissons, P., Lu, M., and Carnduff, M. (2013). The autonomous Real-Time system for ubiquitous construction resource tracking. 2013 Proceedings of the 30th ISARC, Montréal, Canada. <https://doi.org/10.22260/isarc2013/0162>
  48. Gaba, A., Panwar, A., Singh, R., Gehlot, A., and Garg, V. (2018). An approach to monitor construction site based on radio frequency identification and internet of things. In *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 1629-1639). [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2\\_169](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_169)
  49. L. M., Ganesh, B., Bai, H.S., R. P., and S. U.M. (2023). Blend of IoT and Extended Reality for Safety in Construction Trend of Technology. *Proceedings of the International Conference Emerging Trends in Engineering (YUKTHI 2023)*, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4557020>
  50. Zhao, X., Zhang, M., Fan, X., Sun, Z., Li, M., Li, W., and Huang, L. (2023). Extended Reality for Safe and Effective Construction Management: State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions. *Buildings*, 13(1), 155. <https://doi.org/10.3390/buildings13010155>
  51. Li, S., Wang, Q., Wei, H., and Chen, J. (2024). Extended Reality (XR) training in the construction industry: A content review. *Buildings*, 14(2), 414. <https://doi.org/10.3390/buildings14020414>
  52. Jebelli, H., Choi, B., Kim, H., and Lee, S. (2018). Feasibility study of a Wristband-Type wearable sensor to understand construction workers' physical and mental status. *Construction Research Congress 2022*, 367-377. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.036>
  53. Nasirzadeh, F., Karmakar, C., Habib, A., Neelungal, K.B., Mir, M., Lee, S., and Amel, T. (2024). Continuous monitoring of body temperature for objective detection of health and safety risks in construction sites: An analysis of the accuracy and comfort of off-the-shelf wearable sensors. *Heliyon*, 10(6), e26947. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26947>
  54. Rane, N., Choudhary, S., and Rane, J. (2023). Leading-edge wearable technologies in enhancing personalized safety on construction sites: a review. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4641480>
  55. Yarovoi, A. and Cho, Y.K. (2024). Review of simultaneous localization and mapping (SLAM) for construction robotics applications. *Automation in Construction*, 162, 105344. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105344>
  56. Kim, P., Chen, J., and Cho, Y.K. (2018). Autonomous mobile robot localization and mapping for unknown construction environments. *Construction Research Congress 2022*, 147-156. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.015>
  57. Kim, P., Chen, J., Kim, J., and Cho, Y.K. (2018). SLAM-Driven intelligent autonomous mobile robot navigation for construction applications. In *Lecture notes in computer science* (pp. 254-269). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91635-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91635-4_14)
  58. Ress, V., Zhang, W., Skuddis, D., Haala, N., and Soergel, U. (2024). SLAM for indoor mapping of wide area construction environments. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2404.17215>
  59. Bosché, F., Turkan, Y., Haas, C.T., and Haas, R. (2010). Fusing 4D modelling and laser scanning for construction schedule control. In *Proc 26th Annual ARCOM Conference* (pp. 1229-1238).
  60. Zhang, C., Kalasapudi, V.S., and Tang, P. (2016). Rapid data quality oriented laser scan planning for dynamic construction environments. *Advanced Engineering Informatics*, 30(2), 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.004>
  61. Shih, N. (2002). The application of 3-D scanner in the representation of building construction site. *Proceedings of the 19th ISARC, Washington, USA*. <https://doi.org/10.22260/isarc2002/0053>
  62. Westfechtel, T., Ohno, K., Akegawa, T., Yamada, K., Neto, R.P.B., Kojima, S., Suzuki, T., Komatsu, T., Shibata, Y., Asano, K., Nagatani, K., Miyamoto, N., Suzuki, T., Harada, T., and Tadokoro, S. (2021). Semantic mapping of construction site from multiple daily airborne LiDAR data. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 3073-3080. <https://doi.org/10.1109/ira.2021.3062606>
  63. Howard, J., Murashov, V., and Branche, C.M. (2017). Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety. *American Journal of Industrial Medicine*, 61(1), 3-10. <https://doi.org/10.1002/ajim.22782>
  64. Gupta, S. and Nair, S. (2023). A review of the emerging role of UAVs in construction site safety monitoring. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.135>



65. Kaamin, M., Razali, S.N.M., Ahmad, N.F.A., Bukari, S.M., Ngadiman, N., Kadir, A.A., and Hamid, N.B. (2017). The application of micro UAV in construction project. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.5005403>
66. Xiang, Y., Xu, B., Su, T., Brach, C., Mao, S.S., and Geimer, M. (2021). 5G Meets Construction Machines: Towards a Smart Working Site. 2021 International Conference on Computing and Communications Applications and Technologies (ICCAT), Ipswich, United Kingdom, 2021, pp. 28-35, doi: 10.1109/ICCAT53310.2021.9629426.
67. Jung, V. and Brell-Cokcan, S. (2024). Enabling construction automation: Implementing radio frequency communication infrastructure on construction sites. 2024 Proceedings of the 41st ISARC, Lille, France. <https://doi.org/10.22260/isarc2024/0047>
68. Mendoza, J., De-La-Bandera, I., Álvarez-Merino, C.S., Khatib, E.J., Alonso, J., Casaderrey-Díaz, S., and Barco, R. (2021). 5G for Construction: Use Cases and Solutions. Electronics, 10(14), 1713. <https://doi.org/10.3390/electronics10141713>
69. Badihi, B., Zhao, J., Zhuang, S., Seppänen, O., Jäntti, R. (2019). Intelligent Construction Site: On Low Cost Automated Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons. 2019 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe), Pulau Pinang, Malaysia, 2019, pp. 29-35, doi: 10.1109/ICWiSe47561.2019.8971829
70. Teizer, J., Weber, J., König, J., Ochner, B., and König, M. (2018). Real-time positioning via LORA for construction site logistics. 2018 Proceedings of the 35th ISARC, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0001>
71. Kumar, G.S.A., Singh, R., Gehlot, A., and Akram, S.V. (2022). LoRa enabled Real-time Monitoring of Workers in Building Construction Site. International Journal of Electrical and Electronics Research, 10(1), 41-50. <https://doi.org/10.37391/ijeer.100106>
72. Dai, R., Diraneyya, O., and Brell-Cokcan, S. (2021). Improving data communication on construction sites via LoRaWAN. Construction Robotics, 5(2), 87-100. <https://doi.org/10.1007/s41693-021-00059-8>
73. Darabseh, M. and Martins, J.P. (2023). Blockchain orchestration and transformation for construction. Smart Cities, 6(1), 652-675. <https://doi.org/10.3390/smartcities6010031>
74. Zhang, Y., Wang, T., and Yuen, K. (2021). Construction site information decentralized management using blockchain and smart contracts. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 37(11), 1450-1467. <https://doi.org/10.1111/mice.12804>
75. Wu, H., Li, H., Luo, X., and Jiang, S. (2023). Blockchain-Based onsite activity management for smart construction process quality traceability. IEEE Internet of Things Journal, 10(24), 21554-21565. <https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3300076>
76. San, K.M., Choy, C.F., and Fung, W.P. (2019). The Potentials and Impacts of Blockchain Technology in Construction Industry: A literature review. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 495, 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/495/1/012005>
77. Nain, M., Sharma, S., and Chaurasia, S. (2024). Deep learning oriented smart constructional material and face recognition system for the site safety. 2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), 1-8. <https://doi.org/10.1109/upcon62832.2024.10983026>
78. Zhao, Y., Chen, Q., Cao, W., Yang, J., Xiong, J., and Gui, G. (2019). Deep learning for risk detection and trajectory tracking at construction sites. IEEE Access, 7, 30905-30912. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902658>
79. Igboekulie, C.V. (2025). Integrating deep learning and LIDAR for autonomous construction site monitoring: enhancing safety, productivity, and regulatory compliance frameworks. International Journal of Research Publication and Reviews, 6(4), 14835-14751. <https://doi.org/10.55248/gengpi.6.0425.1671>
80. Zhang, Y. and Yuen, K. (2021). Applications of deep learning in intelligent construction. In Structural integrity (pp. 227-245). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81716-9_11)
81. Seo, J., Han, S., Lee, S., and Kim, H. (2015). Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. Advanced Engineering Informatics, 29(2), 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.02.001>
82. Wang, M., Wong, P.K., Luo, H., Kumar, S., Delhi, V.K., and Cheng, J.C. (2019). Predicting safety hazards among construction workers and equipment using computer vision and deep learning techniques. 2019 Proceedings of the 36th ISARC, Banff, Canada. <https://doi.org/10.22260/isarc2019/0054>
83. Duan, R., Deng, H., Tian, M., Deng, Y., and Lin, J. (2022). SODA: A large-scale open site object detection dataset for deep learning in construction. Automation in Construction, 142, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104499>
84. Kim, S., Hong, S.H., Kim, H., Lee, M., and Hwang, S. (2023). Small object detection (SOD) system for comprehensive construction site safety monitoring. Automation in Construction, 156, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105103>
85. Zhang, Y., Guan, D., Zhang, S., Su, J., Han, Y., and Liu, J. (2024). GSO-YOLO: Global Stability Optimization YOLO for Construction Site Detection. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.00906>
86. Hao, F., Zhang, T., He, G., Dou, R., and Meng, C. (2024). CaSnLi-YOLO: construction site multi-target detection method based on improved YOLOv5s. Measurement Science and Technology, 35(8), 085202. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad42c5>
87. Ngoc-Thoan, N., Bui, D.T., Tran, C.N.N., and Tran, D. (2023). Improved detection network model based on YOLOv5 for warning safety in construction sites. International Journal of Construction Management, 24(9), 1007-1017. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2171836>
88. Jia, X., Zhou, X., Shi, Z., Xu, Q., and Zhang, G. (2025). GEOIOU-SEA-YOLO: An advanced model for detecting unsafe behaviors on construction sites. Sensors, 25(4), 1238. <https://doi.org/10.3390/s25041238>
89. Luo, D. and Yu, L. (2021). From Factory to Site—Designing for industrial robots used in On-Site construction. In Advances in 21st century human settlements (pp. 87-109). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5_4)
90. Brosque, C. and Fischer, M. (2022). Safety, quality, schedule, and cost impacts of ten construction robots. Construction Robotics, 6(2), 163-186. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00072-5>
91. Braga, R.G., Tahir, M.O., Iordanova, I., and St-Onge, D. (2024). Robotic deployment on construction sites: considerations for safety and productivity impact. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2404.13143>
92. Ahmadi, E. and Wang, C. (2024). Transforming Construction Practices with Large Language Models. EPiC Series in Built Environment, 5, 414-404. <https://doi.org/10.29007/hb2g>
93. Kannan, S.S., Venkatesh, V.L.N., and Min, B. (2024). SMART-LLM: Smart Multi-Agent Robot Task Planning using Large Language Models. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 12140-12147. <https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10802322>
94. Pu, H., Yang, X., Li, J., Guo, R., and Li, H. (2023). AutoRepo: A general framework for multi-modal LLM-based automated construction reporting. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2310.07944>
95. Perkins, I. and Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. International Journal of Construction Management, 15(1), 1-9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>
96. Poullain, P., Paquet, E., Garnier, S., and Furet, B. (2018). On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of YhnovaTM. MATEC Web of Conferences, 163, 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301001>
97. Teizer, J., Blickle, A., King, T., Leitzbach, O., and Guenther, D. (2016). Large scale 3D printing of complex geometric shapes in construction. 2016 Proceedings of the 33rd ISARC, Auburn, USA. <https://doi.org/10.22260/isarc2016/0114>
98. Van Der Putten, J., Van Olmen, A., Aerts, M., Ascione, E., Beneens, J., Blaakmeer, J., De Schutter, G. and Van Tittelboom, K. (2020). 3D concrete printing on site: a novel way of building houses? In Rilem bookseries (pp. 712-719). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_71)
99. Prasittisopin, L. (2024). How 3D printing Technology Makes Cities Smarter: A review, thematic analysis, and perspectives. Smart Cities, 7(6), 3458-3488. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060135>
100. Wang, R.G. (2023). Transformation of Building Information Models into Knowledge Graph-based Digital Twin Systems for Facility Management. Ph.D. Dissertation, National Central University, Jhongli, Taoyuan, Taiwan. <https://hdl.handle.net/11296/c7u83f>

