



智慧工地的應用現況、 未來發展與挑戰

王琨淇* / 國立台灣科技大學營建工程系 助理教授

隨著營造產業加速數位轉型，智慧工地的概念逐漸從研究討論走向實務應用，並成為提升施工效率、安全管理與品質控管的重要策略。現階段，許多工地已引入無人機巡檢、雲端協作平台與數位雙生技術，以加強現場資訊蒐集與決策支持，智慧工地已逐步在實務中展現價值。然而，智慧工地的推動仍面臨挑戰，例如跨系統與跨技術的整合度不足、高昂的初期投資與維運成本，對中小型營造公司而言是一大負擔。這些因素使智慧工具雖具應用潛力，但實際推廣於工地現場仍需更多的實務考量。本文透過對智慧工地現況、挑戰與可能發展的探討，期望為營造產業提供參考方向，並促進技術在工地管理中的有效落實與產業競爭力的持續提升。

前言

在數位轉型的浪潮下，營造產業迎來了亟需突破與調整的關鍵時期，亦從營建 4.0 邁向營建 5.0。長期以來，工地現場多仰賴人工作業與經驗傳承，然而，面對工期壓力加劇、專業人力短缺的現況，加上現代工程對施工效率、品質、職安及永續發展的高標準要求，傳統營建模式已難以完全因應。

為解決此問題，許多施工單位開始積極導入各項智慧化工具，期望透過數位技術輔助，強化現場管理能力並提升決策效率。常見的科技工具如物聯網 (IoT)、人工智慧 (AI)、虛擬實境 (VR)、擴增實境 (AR)、混合實境 (MR) 等，近年已逐步出現於營建專案中，透過各式數位工具的導入，現場資訊得以即時蒐集與回饋，施工規劃與調度更具彈性，安全與品質管控也能向前推進。

本文將針對智慧工地現階段的應用重點進行整理與說明，並進一步探討目前智慧工地推行時所遭遇的挑戰，以及未來在政策推動與實務執行面上可努力之方向，期盼作為我國營造產業邁向智慧化與永續發展的可行參考。

智慧工地之應用現況

本文將智慧工地的應用分為營造安全、環境監測、工序協調到專案管理等四個主要面向，分別說明目前智慧工地的常見做法與實際應用。

以數位工具輔助營造安全

AI 影像辨識

工地內常透過 AI 影像辨識系統，在出入口、吊裝區或高風險區域自動偵測人員是否確實配戴安全帽、穿戴反光背心，或是否進入限制出入的危險區域^[1-4]。透過與 CCTV 整合，系統會持續比對影像，一旦發現異常就能立刻發送通知給職安管理人員，儘早排除違規情形，以降低意外發生之機率^[5]。舉例而言，AI 監視系統若捕捉工人進入工地沒有攜帶安全帽，則會即時在管理人員及工人手機發送警報，提醒其必須立即改善或處理。

穿戴式姿勢評估裝置

目前已有內含 GPS 與姿勢感測模組的安全帽或穿戴式智慧裝置^[6]在工地現場投入使用，主要用於即時掌握作業人員的位置與活動狀態。這些裝置通常包含加速度計、陀螺儀與高度計等感測元件，可在不同工作環境下記錄人員的移動路徑、姿勢變化與作業時間

* 通訊作者，wkc@mail.ntust.edu.tw

分布。一旦系統偵測到長時間靜止、急速跌落、突然俯仰或翻轉等異常狀況，便會自動觸發警報，將資訊同步傳送至工地監控中心及主管手機，以便第一時間派員前往確認與救援。

由於工地多為噪音大、視線受阻且作業區分散的開放空間，人工巡檢不僅耗時，還可能錯過關鍵時刻，因此這類穿戴式裝置能有效協助即時監控。此外，部分系統具備歷史數據回溯功能，可分析個別工人的日常活動型態，找出高頻率進行高風險動作的族群，例如反覆彎腰以不良姿勢進行搬運、長時間攀爬或在高處無支撐作業等。這些資料可作為職業傷害風險評估與教育訓練的依據，也能協助調整工作分配，降低因疲勞與姿勢不良導致的職安事件。

VR 職安教育訓練

相較於傳統以講義、簡報為主的安全教育，VR 職安訓練（如圖 1）可讓受訓人員以沉浸式之方式，身歷其境體驗高處墜落或物體飛落等職災危險情境，加深對危害的感受與記憶，提升作業人員的安全意識與臨場應變能力^[7,8]。此方式讓工程人員可以用第一人稱視角提前模擬高風險作業，並事先演練作業檢查與緊急應變流程。在實務上，一些國際大型建商已將 VR 安全培訓納入公司內部的強制性開工前程序，部分公共工程的標案中，也開始嘗試將 VR 職安教育訓練列為合約要求。



圖 1 以 VR 輔助工程人員進行職安教育訓練
(圖片來源：余文德等人^[9])

以數位工具輔助施工監測與環境管理

IoT 感測器

在施工現場各處裝設 IoT 感測器，可長時間自動蒐集溫度、濕度、二氧化碳濃度、噪音及振動等數據，形成一個即時環境監控網絡（如圖 2）^[10-12]。這些感測器通常具有低功耗、無線傳輸與多點分佈的特性，可即時將數據彙整後進行分析。當系統偵測到異常值超標，例如噪音分貝超過法規限制或結構振動異常，便能自動發送預警至工地主任、職安管理員或專案經理的行動裝置。

實務上，IoT 感測器也常與自動化控制系統結合，例如當粉塵感測器偵測濃度達警戒值時，可自動啟動灑水系統或排風設備，降低污染源；或在檢測到過高的結構振動時，立即暫停大型機具運作，減少對周邊建築的影響。此外，透過長期累積的感測數據，管理團隊可進行趨勢分析與預測，提早發現潛在問題，例如判斷某工序是否在特定氣候條件下更容易產生安全風險，進而調整施工計畫。

無人機巡檢與影像紀錄

無人機（UAV）搭載高解析度鏡頭，可依照預先設定的定點飛行路線，定期拍攝施工進度、材料堆放狀況、工地出入口人員流量，以及檢查高處構件的安裝品質^[13,14]。此技術能取代部分傳統人工巡檢，減少人員攀爬鷹架或吊籠進行高空檢查的風險，亦能在惡劣氣候條件或危險區域進行遠距檢測，提升安全性與效率。

在進階應用上，無人機可結合影像辨識與 AI 分析，進行自動化施工檢測。例如，透過影像比對 BIM 模型與現況照片，可自動判斷構件安裝位置是否正確，甚至辨識鋼筋外露、模板變形等缺陷。部分系統更能利用熱成像鏡頭進行紅外線檢測，快速發現隔熱層缺失、漏水或能源流失等問題。此外，定期拍攝的影像也可用於建立三維點雲模型，協助管理團隊進行施工量測與進度驗證，減少人工丈量誤差。

以數位工具輔助施工規劃與工序協調

MR 輔助大型機具進場路徑與空間模擬

對於需要大型機具進場作業的工地，MR 技術可先在現場將虛擬機具疊加到真實環境中（如圖 3），協

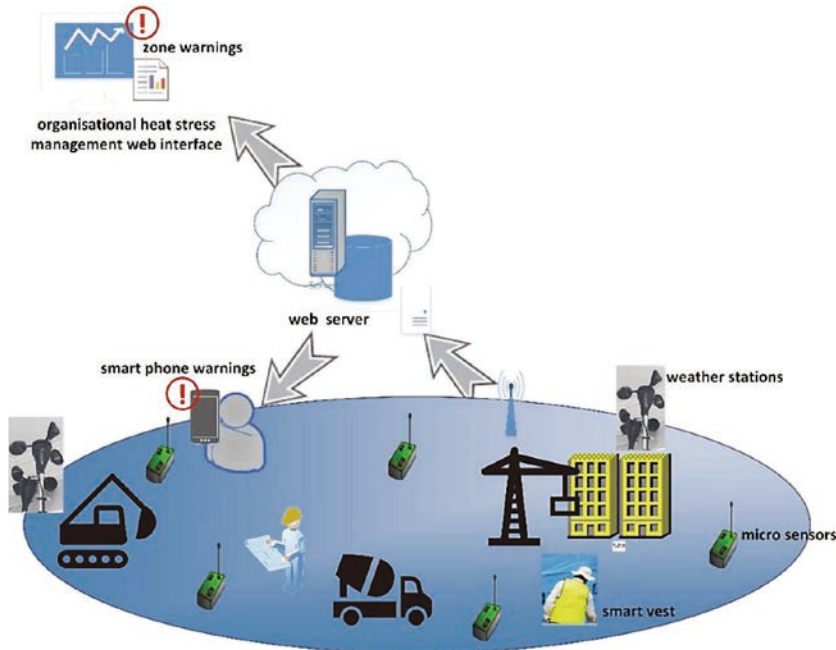


圖 2 IoT-based 智慧工地傳輸
(圖片來源: Edirisinghe, *et al.* [10])



圖 3 以 MR 技術評估機具動線
(圖片來源: 洪偉翔 [15])

助施工團隊檢視動線、吊裝半徑與障礙物位置，預防空間不足或路徑干涉問題，提升規劃準確度 [15]。在規劃內容方面，除路徑與轉彎半徑外，會同步檢核臨時動線、臨時設施位置、回轉掃掠區、吊裝盲區與人員隔離線。若基地周邊有路權限制或既有建物淨空間不足，可先以 MR 模擬不同入場時間與分段進場策略，評估對交通維持與鄰里影響。完成審查後，系統可輸出進場路線配置圖、關鍵區域之模擬樣式截圖，提供現場監造會勘使用。然而，此一應用常見限制包含定位不準確、戶外強光造成設備之可讀性下降、網路穩定性差時導致多人操作之同步時間差。

AR/MR 工序說明與現場輔助

在複雜的施工作業中，紙本圖說往往無法即時反映現場情況，導致施作位置偏差或後續衝突。在現場實作階段，AR 或 MR 技術可直接把下一步施作的結構或管線位置，以虛擬影像顯示在實際場域，讓現場人員比對參考，避免埋設或安裝錯位，同時減少依賴紙本圖說的困擾，有助於複雜工項的協調與解釋。以多工種協作的廠房工程為例，空調風管、消防管與電纜橋架之間需保持嚴格間距，透過 AR 顯示的即時位置資訊，安裝團隊能在施工前確認所有系統的預定位置，並在現場及時調整安裝策略。

以數位工具輔助專案管理與決策支援

雲端協作平台

部分工地會使用雲端平台將最新的設計變更、現場回報與檢核紀錄集中管理，讓設計單位、監造與施工團隊能即時在線上共同檢視與討論，縮短訊息傳遞時間並降低錯誤。以 bimU 平台（如圖 4）為例，其平台可整合圖資、模型、施工紀錄與施工議題等，亦可即時瀏覽與標註 3D 模型，讓不同利害關係人於同一平台上討論問題點，並提出修改建議。此外，亦可於雲端平台上統計過去所發生之議題類型、追蹤人員處理情形等，提供工地管理之效率。

進度自動比對與預測分析

透過無人機影像或感測器回傳的現場數據，系統能自動比對實際進度與原定工期是否一致，若有延誤或異常，則提供預測結果與可行調整建議，讓現場人員或管理階層可即時因應^[16]。

雖然目前工地上已經可以看到各式各樣的智慧化應用，但就整體執行情況而言，許多技術仍處在逐步成熟與驗證的階段。像是 AI 的辨識準確度、感測器的穩定性、無人機與機器人自動化巡檢的可用性，以及 VR、AR、MR 的現場操作便利性，都還有許多細節需要持續優化與調整。

對多數施工單位來說，如何讓這些智慧化工具真正符合現場需求、整合成穩定可用的系統，仍有相當

大的努力空間。因此，在推動智慧工地的同時，也需要更多實際案例的累積與跨領域技術的協作，才能讓各項應用真正發揮效益。

智慧工地之未來發展趨勢

隨著人工智慧、感測技術、實境科技與自動化設備持續進步，未來的工地不再只是導入單一之數位工具，更會強調多技術整合。其應用層面亦隨之拓展，不再侷限於目前已經普遍嘗試的安全監控、進度管理與環境監測。以下為可能的發展方向：

實境科技與人工智慧的整合

AR、VR、MR 等實境科技已能在工地提供視覺化輔助，但未來若與人工智慧結合，將可形成即時分析與視覺提示的現場輔助模式。系統可透過攝影機或智慧眼鏡即時擷取現場影像，AI 模型自動辨識構件安裝錯誤、施工順序偏差或安全防護不足，再於使用者設備上直接以圖示或文字標註問題位置與修正方法。例如，在安裝鋼構時，AI 系統可即時比對現場構件的整體位置、垂直度與連接狀況，若發現與設計模型有超過允許範圍的差異，便會在使用者視野中直接標記問題區域，並提示可能的修正方式；在進行鋼筋綁紮時，亦可掃描檢核實際綁紮之數量是否與設計圖有差異，並即時指出錯誤。

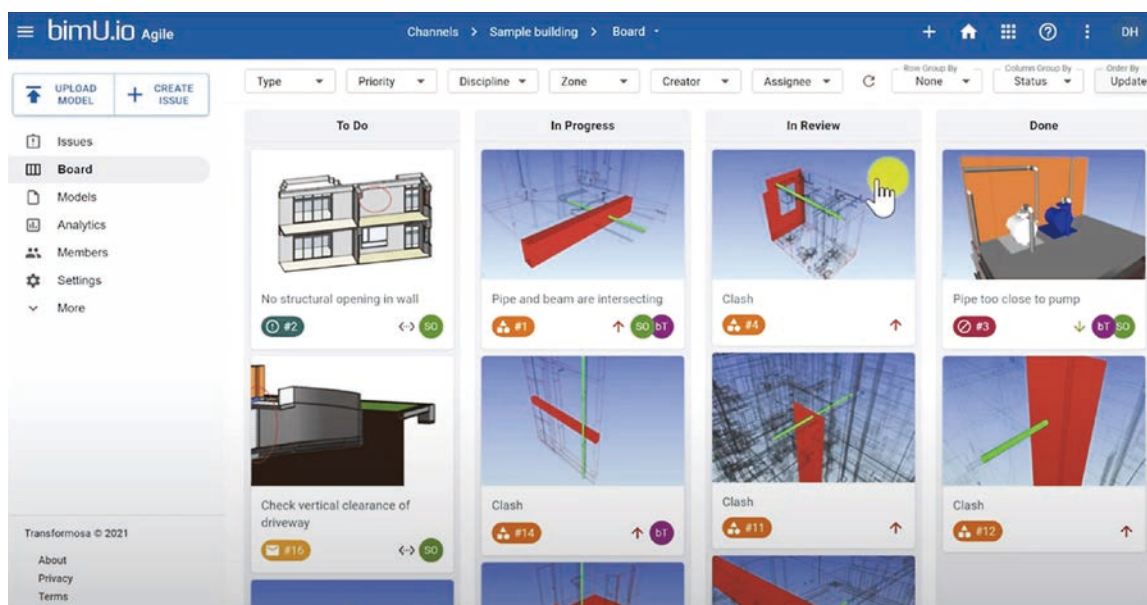


圖 4 bimU 雲端管理平台

（圖片來源：鈞逸科技有限公司^[17]）

機械手臂於現場施工之協助

機械手臂的應用未來將從工廠製造延伸至現場施工。未來的工地可部署具備移動能力與視覺感測的機械手臂，協助完成重複性高或高風險的作業，例如鋼筋綁紮、模板組裝、構件搬運與固定等。機械手臂可透過雷射掃描或攝影機即時感知施工區域，並依據 BIM 或數位雙生模型自動調整作業路徑，確保施工位置與排程一致。在高處或狹窄空間作業時，機械手臂還能減少人員暴露於高風險環境的時間，降低職安事件發生的風險。

數位雙生於施工流程檢核之應用

數位雙生技術將從進度模擬工具，發展為施工現場的即時檢核平台。透過感測器與影像辨識系統，現場狀況可即時映射到數位雙生模型中。監造人員使用各式智慧裝置檢視時，能將設計模型與現場實景精準對位，比對構件的安裝位置、尺寸與方向。例如，在機電管線安裝階段，系統可即時判斷管線是否與模型位置一致，並標記可能與其他系統干涉的部分；又或是比對機具之站位、材料之堆置情形，是否符合施工初期之規劃。

智慧化施工品質即時監測

除人工檢測外，未來可在澆置混凝土、焊接或塗裝等工序中安裝即時監測模組。例如混凝土澆置時，可透過內嵌式感測器持續監測溫度與濕度，並即時分析是否有早期離析或未密實的風險；焊接作業則可透過影像與熱感應數據分析焊縫均勻度與溫度分布，判斷是否需要立即補強。系統一旦偵測異常，可立刻提醒施工人員修正。

個人化安全防護系統

未來的工地安全管理可依照每位工人的健康狀態與作業風險等級，提供個人化的安全防護策略。穿戴式裝置可持續監測心率、體溫與姿勢變化，例如在高溫作業環境下，若偵測到工人體溫異常上升或心率過高，系統會立即透過智慧手環或耳機發出提醒，並同步通知主管安排替換或休息。同時，系統還可整合作業紀錄與風險評估，針對長時間從事高負荷工作的員工，提前安排輪休或調整工作內容，以預防疲勞累積造成的事故。

智慧工地之挑戰

雖然近年來各類智慧化工具在工地現場的導入已逐步增加，許多技術也開始進入實際應用階段，但在推動智慧工地的過程中，仍存在一些無法忽視的挑戰與限制，需要各方持續投入資源與心力共同克服。

目前缺乏統一之系統整合標準

目前工地上所使用之智慧工具，如感測器、AI 影像辨識系統、無人機及各式雲端管理平台，大多來自不同廠商或由不同團隊開發，軟體與硬體之間的資料格式、串接介面皆不一致。如此導致各系統之間難以直接互通，常出現資料重複輸入、資訊不相容以致無法銜接或需要額外轉換格式的情況。如何有效整合各種分散的數位工具，仍是推動智慧工地時必須面對的挑戰之一。

環境與現場條件限制

智慧工地的重點在於即時掌握現場各項施工或管理所需之資訊，提高施工效率或降低施工錯誤。然而，實際施工現場之環境複雜，且現場變動快速，各項感測器或預先製作之智慧模組等都可能無法與現場完全吻合。此外，由於現場條件不同，可能導致場地障礙或訊號不佳，以致無法發揮智慧工具之最大效益。

加強人才培育

智慧工地涉及感測器配置、數據分析判讀、AI 監控管理與實境技術操作，對現場管理與施工人員的數位素養要求相對較高。然而目前許多工地主任與工程人員雖具備豐富的施工經驗，但對新興數位工具仍不熟悉，缺乏操作與維護經驗。近年來，許多學校已陸續開設智慧工具之相關課程，培育新一代工程師對智慧工具之熟悉能力，但由於課堂時間有限以及傳統教學方式的約束，課程內容往往難以深入涵蓋所有智慧工地之實際應用。

經費投入與業主支持

目前智慧工地已廣為熱議，但由於科技設備仍未真正普及，目前智慧工地所導入之硬體（如感測設備、穿戴裝置等）與軟體（如雲端平台或自行開發串接之軟體）所需之經費不低。對部分中小型營造廠而言，若缺乏業主在經費或制度上的支持，很難獨自承

擔這些長期投入。換言之，雖智慧化應用已被認定為具潛力與效益，但仍受限於初期投入成本與回收期的不確定性，導致推動速度較為緩慢。

結語

智慧工地是營造業面對數位轉型的重要實踐方向之一。近年來，AI 影像辨識、穿戴式裝置、IoT 感測器、無人機、AR/VR 教育訓練等工具已逐步導入工程現場；但實務上，這些技術大多仍處於試行階段，能長期穩定運作的案例並不多。其原因並非技術本身不可行，而是整體導入的環境尚未成熟，包含管理機制、配套措施與人才支援等面向都尚有落差。

從目前台灣營建業實務現場觀察可發現，智慧化推動最常遇到的問題不在於沒有工具可用，而在於不知道要從哪裡開始用。許多業者在導入智慧工地時，抱持著「要全面升級」的觀念，反而忽略了不同工地之規模、工種與階段需求並不相同。當智慧技術無法對應實際問題，或是投入成本無法轉換為顯著成效時，就容易在一兩次試行後選擇放棄。這也反映出，智慧工地的推動應該回到工地之基本需求，而非盲目追求完整性或全面性。

另一個不容忽視的挑戰是人力與組織的調適速度落後於技術變化。即使部分學校與培訓單位已經開始提供數位營建課程，但許多施工現場的管理幹部與基層工程人員，仍習慣於傳統的溝通與作業流程，對於新系統的接受度偏低。當系統導入後缺乏足夠的支持與使用動機，就容易淪為形式，無法實現技術原本預期可帶來之管理價值。

因此，未來在推動智慧工地時，建議應從幾個方向著手。第一，從技術成熟之重點需求開始導入，聚焦在那些已被實證可行、成本可控且回饋機制明確的技術，如 AI 安全帽辨識、無人機巡檢、環境感測與簡易 AR 導引，逐步累積智慧工地之管理經驗。第二，推動輕量化導入之觀念，讓中小型營造廠也能在有限預算下參與智慧化轉型，避免將智慧工地視為大型工地之專利。最後，制度與政策層面應給予更多鼓勵與支持，包含示範案例之推行、補助機制與導入指引等，讓實務現場人員願意嘗試，也能逐漸建立屬於公司本身的智慧管理能力。

參考文獻

1. 林楨中、余文德、廖琬洲、蕭文達、張憲寬 (2021)，人工智慧視覺化技術於工地危害辨識之應用，*勞動及職業安全衛生研究季刊*，第 29 卷第 1 期，第 67-80 頁。
2. 余文德、張憲寬、蔡宛穎 (2022)，基於電腦視覺技術之防墜落設施安全狀態辨識研究，*中國土木水利學刊*，第 34 卷第 2 期，第 109-120 頁。
3. 蕭文達、余文德、張憲寬 (2023)，利用大數據建立營建人員安全管理的風險分類模型，*勞動及職業安全衛生研究季刊*，第 31 卷第 4 期，第 22-33 頁。
4. Wang, R.J., Yu, W.D., Liao, H.C., Chang, H.K., and Lim, Z.Y. (2024). Cost/Benefit Analysis of AIoT Image Sensing for Construction Safety Monitoring. *Journal of Engineering, Project & Production Management*, 14(3).
5. 余文德、蕭文達、張憲寬、謝培程 (2023)，基於影像辨識距離計算之工地即時人員定位方法研究，*中國土木水利工程學刊*，第 35 卷第 7 期，第 705-719 頁。
6. 詹斯晴 (2022)，穿戴式偵測墜落及跌倒裝備於本國建築工地之研發測試，國立中央大學土木工程學系在職專班，碩士論文。
7. Yu, W.D., Wang, K.C., and Wu, H.T. (2022). Empirical comparison of learning effectiveness of immersive virtual reality-based safety training for novice and experienced construction workers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(9), 04022078.
8. Man, S.S., Wen, H., and So, B.C.L. (2024). Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis. *Journal of safety research*, 88, 230-243.
9. 余文德、王琨淇、吳獻堂、劉國青 (2022)，以互動式 VR 體驗學習系統輔助工地高危害職安教育之效益評估，*技術學刊*，第 37 卷第 3 期，第 149-164 頁。
10. Edirisinghe, R., Andamon, M.M., and Ghanem, A. (2022, November). Exploring the thermal conditions in construction sites through IoT based methodologies. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1101, No. 8, p. 082031). IOP Publishing.
11. Jeoung, J., Jung, S., Hong, T., and Choi, J.K. (2022). Blockchain-based IoT system for personalized indoor temperature control. *Automation in construction*, 140, 104339.
12. Ismail, Z.A.B. (2022). Thermal comfort practices for precast concrete building construction projects: towards BIM and IOT integration. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1504-1521.
13. Tan, Y., Li, S., Liu, H., Chen, P., and Zhou, Z. (2021). Automatic inspection data collection of building surface based on BIM and UAV. *Automation in Construction*, 131, 103881.
14. Aela, P., Chi, H.L., Fares, A., Zayed, T., and Kim, M. (2024). UAV-based studies in railway infrastructure monitoring. *Automation in Construction*, 167, 105714.
15. 洪偉翔 (2024)，以 MR 為基礎之施工機具作業空間檢討，朝陽科技大學營建工程系，碩士論文。
16. Zhen, L., Yang, Z., Laporte, G., Yi, W., and Fan, T. (2024). Unmanned aerial vehicle inspection routing and scheduling for engineering management. *Engineering*, 36, 223-239.
17. 鉤逸科技有限公司 (2025)，bimu.io, <https://bimu.io/> 