



電腦視覺技術於 自動化工程進度管控

林之謙／國立臺灣大學土木工程學系 助理教授

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

前言

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

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

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



耗時



簡略



不直覺

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

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

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

各國營建業生產力狀況

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

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

工地影像資料的成長及機會

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

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

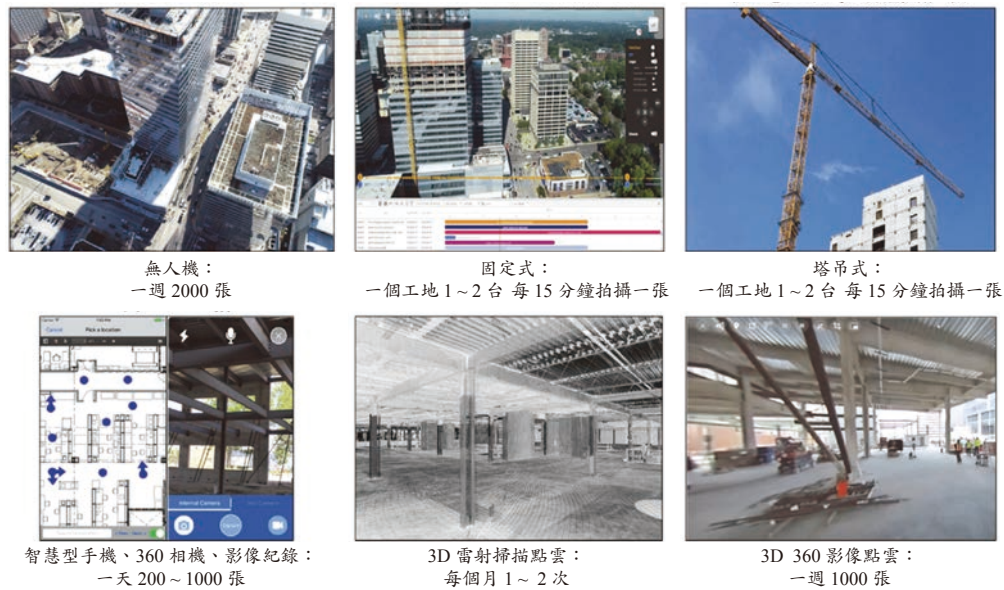


圖 2 目前工地平均影像蒐集量

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

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

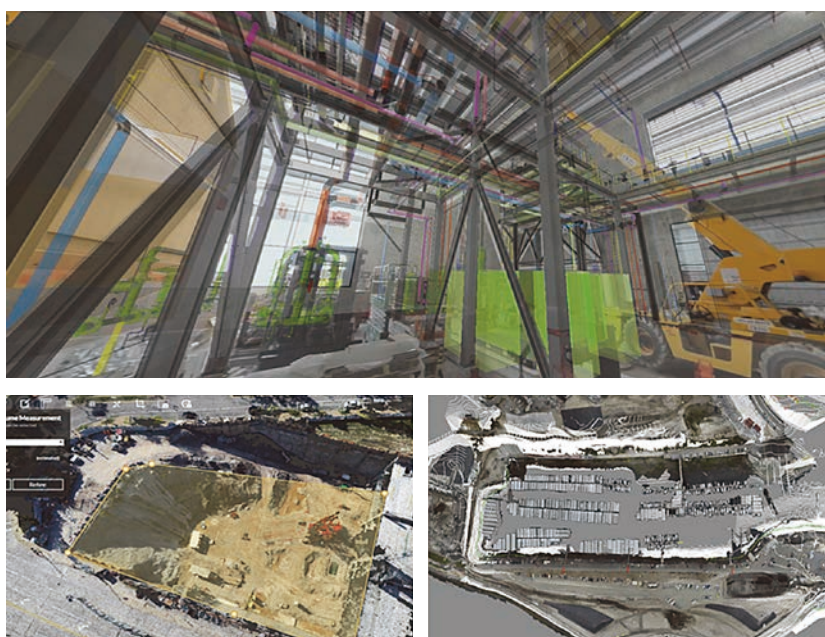


圖 3 應用影像進行進度、品質管控，也可利用影像重建點雲製作高解析度正射投影圖進行土方量測、動線規劃、等高線比對。

電腦視覺技術應用影像於工程進度管控

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

電腦視覺技術應用於工程進度工項監測

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

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

目前常見的兩種方法為：

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

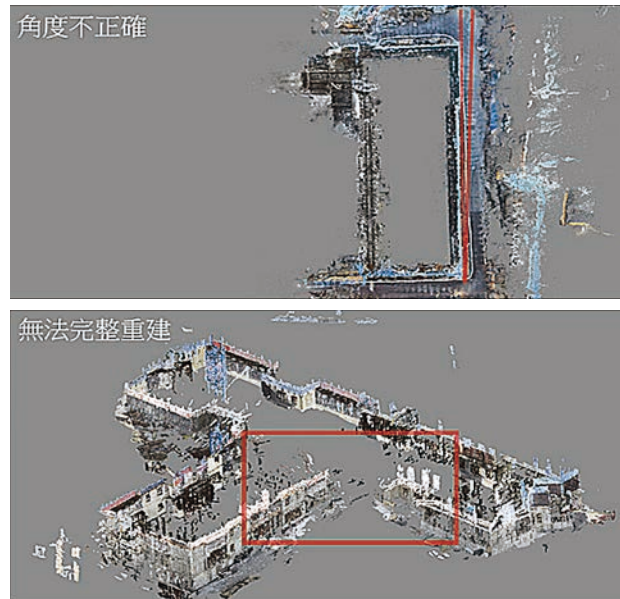


圖 4 目前三維重建點雲仍會有再大範圍影像蒐集時，仍會有角度、準確率、完整度的問題。

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

影像式三維重建點雲模型

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

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

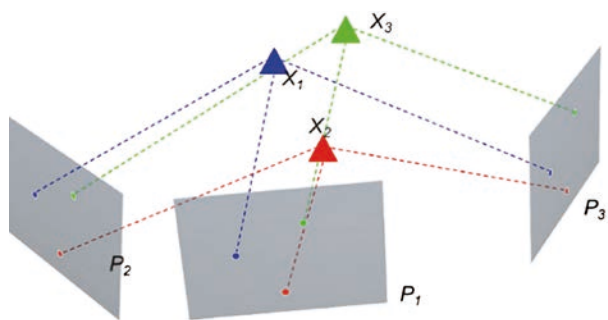


圖 5 影像三維模型重建過程，其中 X1、X2、X3 為從影像 P1、P2、P3 反投影出之三維點位。

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

$$\operatorname{argmin}_{\mathbb{P}, X_u, t} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{u \in \text{tracks}_i} \| \text{project}(\mathbb{P}_i, X_u(t_u)) - u \|^2 \right] \quad (1)$$

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

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

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

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

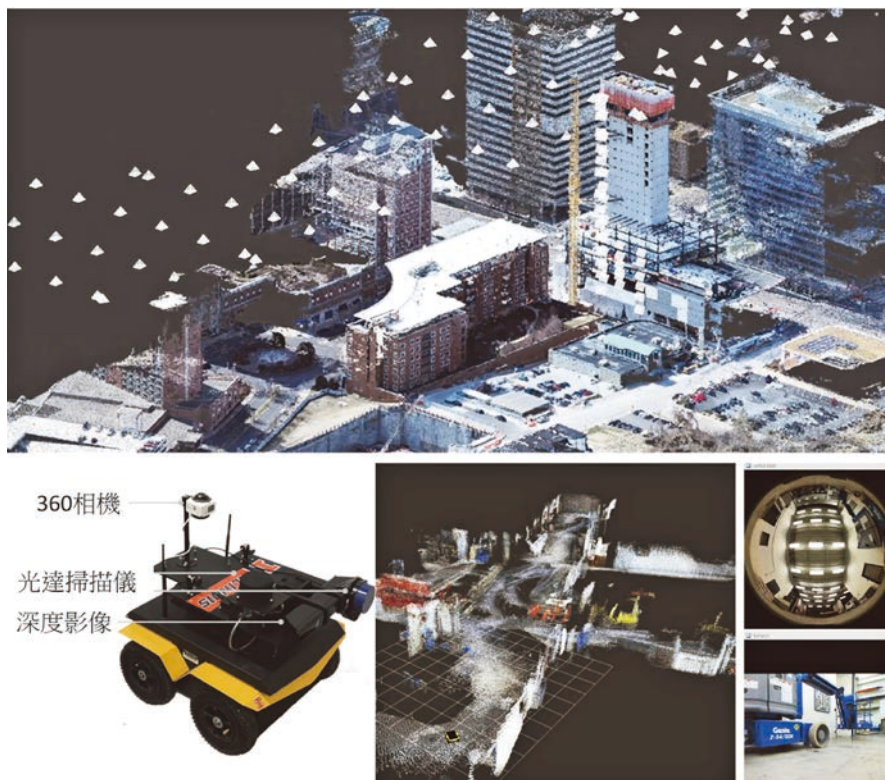


圖 6 工地影像點雲可應用無人機 [9] 或工地自動巡檢機器人 [10]

BIM 於工程進度工項監測

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

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

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

結合電腦視覺與 BIM 進行工程進度工項監測

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



圖 7 應用 QR Code 方式自動對應 BIM 模型及點雲模型

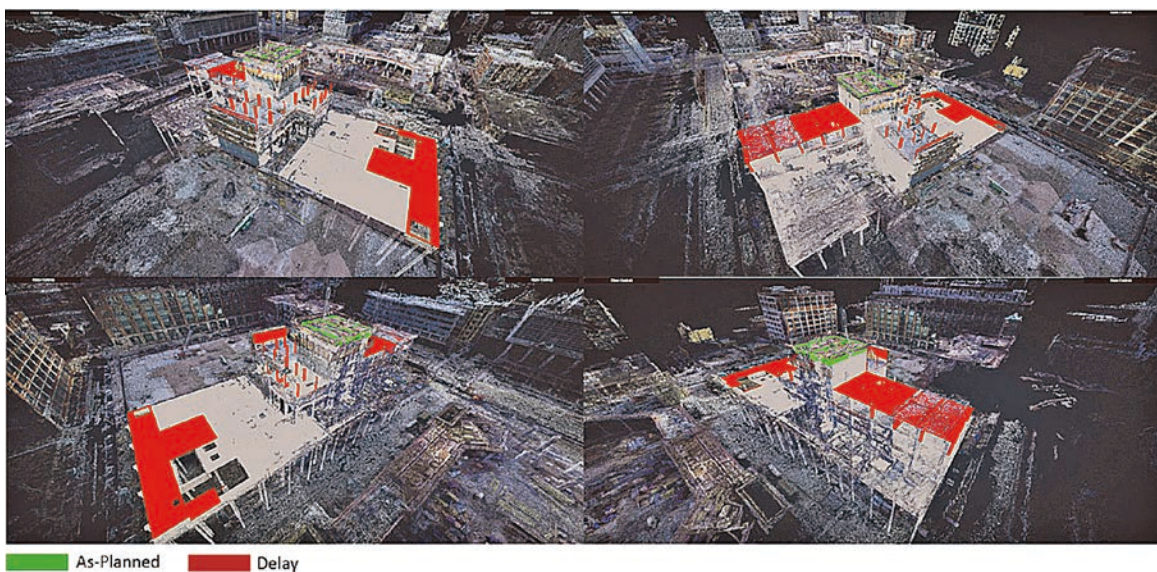


圖 8 透過結合點雲、4D BIM 模型可以分析工地之進度。

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

空間幾何分析

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

物件材質分析

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

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

深度學習綜合分析

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

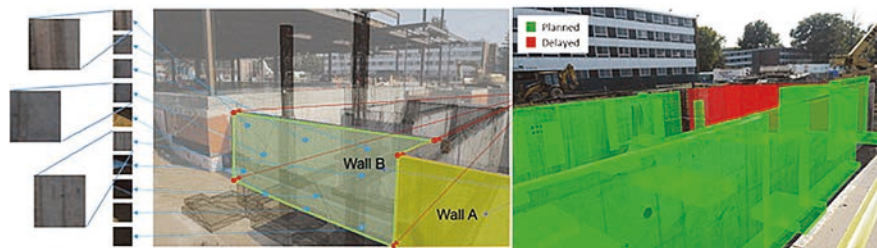


圖 9 透過反投影的方式分析障礙物、材質並分析工程進度。

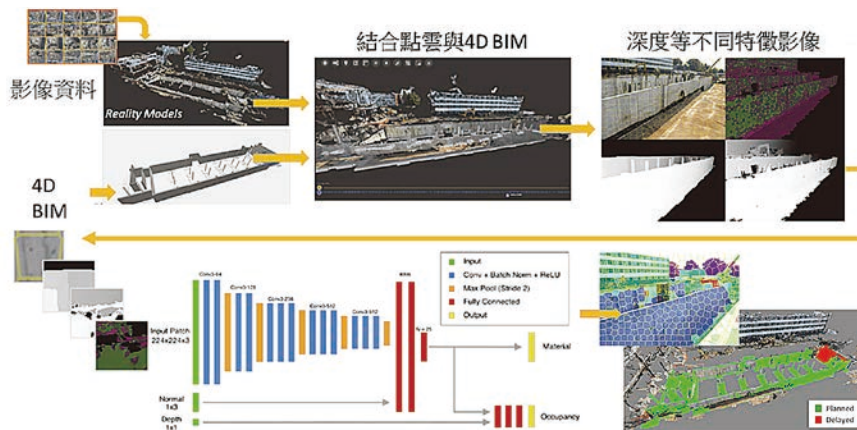


圖 10 應用深度學習分析工程進度架構 [21]

電腦視覺技術應用於工程進度工項施作監測

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

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

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

案例討論

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

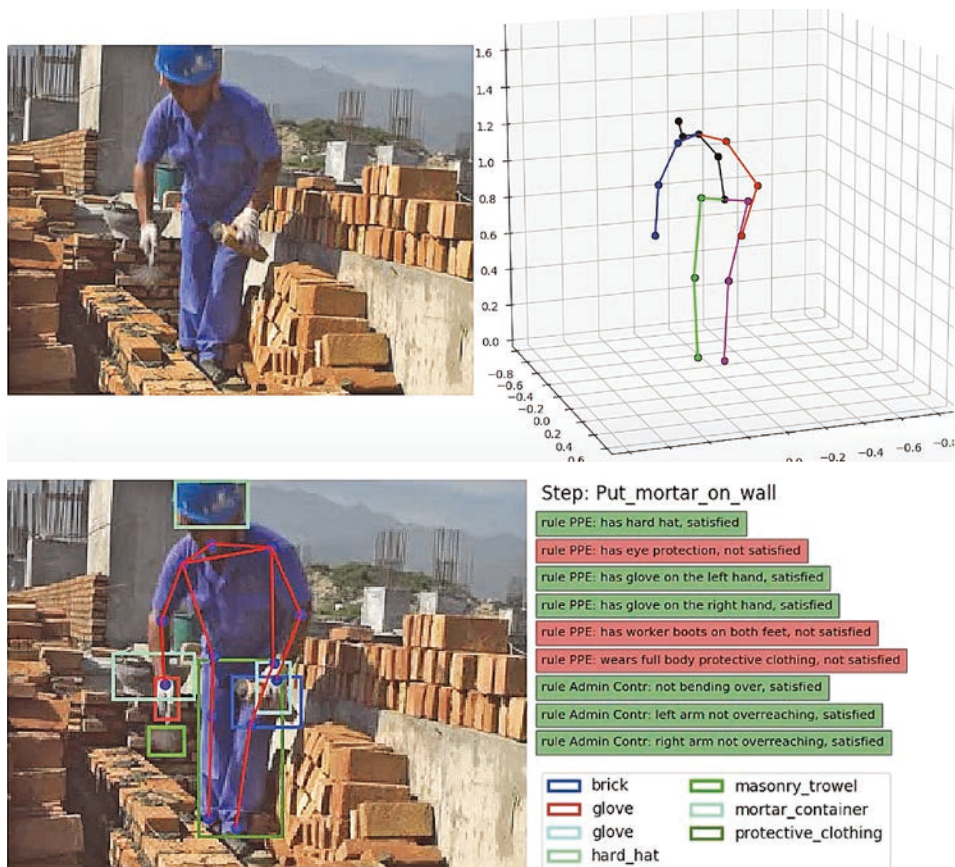


圖 11 運用深度學習偵測砌牆工人生產力及安全^[27]



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

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



圖 13 工程例會中應用點雲、4D BIM 等檢討進度規劃排程。

結論

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

參考文獻

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

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

土木技師 國之棟樑

逢山開路，遇水架橋
高樓擎天，資源再造



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

理事長 洪啓德

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