

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及 自動辨識技術輔助建築構件精準安裝

受 委 託 者：國立臺灣大學

主 持 人：林之謙

共同主持人：曾惠斌、曾仁杰

研 究 助 理：曾酩順、王文廷、程懷恩、呂鎮宇

研 究 期 程：中華民國 111 年 1 月至 111 年 12 月

研 究 經 費：新台幣 102 萬 7 仟元整

內政部建築研究所委託研究計畫報告

中華民國 111 年 12 月

（本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

目次

目次	i
圖次	iii
表次	v
摘要	vii
ABSTRACT	xi
第一章 研究方法及進度說明	1
第一節、研究背景	1
第二節、研究目的	1
第三節、研究重要性	2
第四節、研究方法	2
第五節、研究方法之採用原因	10
第六節、重要儀器之配合使用情形	12
第七節、研究步驟	14
第二章 蒐集之資料、文獻分析	17
第三章 研究成果	21
第一節、預鑄構件安裝精準度流程分析	21
第二節、蒐集影像資料	23

第三節、 3D 點雲模型重建.....	25
第四節、 點雲與 BIM 模型疊合	31
第五節、 深度學習點雲語意分割	34
第六節、 安裝準確度比較	38
第四章 專家座談會	41
壹、 座談會內容	41
貳、 政策向建議	42
第五章 結論與建議	43
壹、 結論	43
貳、 建議	44
參、 本研究已完成之工作項目	47
附錄一、採購評選會記錄與回應	49
附錄二、審查會議回覆	53
附錄三、專家座談會會議紀錄	61
附錄四、成果說明會記錄	69
附錄五、工作會議記錄	71
附錄六、參考文獻	91

圖次

圖 1-1、語意分割流程（本研究整理）	9
圖 1-2、利用自動偵測辨識構件平面方式進行誤差判斷（本研究整理）	10
圖 1-3、（左）環景相機、（右）單眼相機（本研究整理）	12
圖 1-4、深度相機（本研究整理）	13
圖 1-5、安裝精準度分析流程圖（本研究整理）	15
圖 2-1、使用光達設備拍攝之點雲模型並利用深度學習方式進行精準的語意分割， 以自動分割構件種類（Perez-Perez 等，2021）。	19
圖 3-1、傳統預鑄 PC 版片吊裝及誤差檢驗流程（本研究整理）	21
圖 3-2、本研究流程介入點（本研究整理）	22
圖 3-3、點雲建立成果。使用儀器分別為（左）單眼相機、（中）環景相機、（右） 空拍機	25
圖 3-4、深度相機拍攝之點雲重建成果	26
圖 3-5、利用光達 SLAM 技術建立之點雲模型(圖上)將重建之點雲模型以點雲密度 呈現，圖下將點雲以密度轉為灰階呈現	27
圖 3-6、(圖左)彩色影像，(圖右)光達拍攝無色彩點雲（本研究整理）	28
圖 3-7、(圖左)利用 Canny 演算法將彩色相機邊界運算，(圖右)利用體素法將無顏 色點雲邊界處理（本研究整理）	28
圖 3-8、(圖左)初始未對齊之點雲，(圖右)經過本研究所運算之自動對齊結果（本研 究整理）	29
圖 3-9、彩色相機結合光達 SLAM 之結果（本研究整理）	29

圖 3-10、BIM 模型與環景相機建立之點雲模型疊合。(左上) BIM 模型、(右上) 點雲模型、(下) 疊合結果 (本研究整理)	32
圖 3-11、(左) 原始 BIM 模型、(右) 鋼構點雲與 BIM 模型之疊合，綠色區域顯示公分級誤差 (本研究整理)	33
圖 3-12、點雲透過 PointNet++ 語意分割之成果(圖左)環景相機拍攝點雲分割效果，(圖右)環景相機拍攝點雲加上 BIM 模型一同辨識 (本研究整理)	35
圖 3-13、光達利用 PointNet++ 分割效果 (本研究整理)	35
圖 3-14、以環景相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)	37
圖 3-15、以深度相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)	37
圖 3-16、以單眼相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)	37
圖 3-17、以光達建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)	37
圖 3-18、(左) 深度相機點雲模型之語意分割成果、(右) 利用 RANSAC 進行平面偵測之結果。(本研究整理)	38
圖 3-19、以深度相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(上) 分割成果、(左下) 分割牆面構件 1、(右) 分割牆面構件 2。(本研究整理)	39
圖 3-20、單眼相機進行平面誤差判斷 (本研究整理)	40

表次

表 1-1、各儀器之優缺比較（本研究整理）	14
表 3-1、影像資料清單（本研究整理）	23
表 3-2、模型建立成果之比較（本研究整理）	30

摘要

關鍵詞：預鑄工法、電腦視覺、點雲、BIM、深度學習

一、研究緣起

BIM (Building Information Modeling, BIM) 在國內應用的普及率已越來越高，加上近年來營建、建築市場所面臨到的成本上升問題，建築預鑄工法在各方面的優勢慢慢浮現，其與目前大數據以及人工智慧、深度學習之結合，有機會將建築、營建相關傳統產業進行提升自動化，並實現建築 4.0。本研究希望能夠針對建築預鑄工法中準確度部分，進行較深入的應用討論，並透過與深度學習、BIM 等自動辨識技術的結合，有效達到智慧建築之應用。

以點雲技術建立真實世界物體的數位立體模型已是重要的資訊科技應用方向。本研究將應用目前工地所蒐集的大量影像資料，建立三維現實點雲模型，並與 BIM 結合，應用人工智慧、電腦視覺以及深度學習相關技術達到準確度分析。第一步為蒐集工地現場影像資料，由工地現場影像資料將可產生點雲模型以呈現工地安裝建築構件安裝完成後之情況。第二步為與 BIM 模型結合作為比較之基準，其中將應用簡單之計算攝影技術進行疊合。第三步為應用 BIM 模型對點雲模型進行分割並蒐集影像之特徵資料。第四步為透過點雲模型中單元構件與 BIM 模型之匹配、比較分析構件之安裝類別正確性、整體準確度，並與相關規定進行比較。第五步為透過 BIM 模型與點雲模型將結果視覺化呈現。

二、研究方法及過程

本計畫研究方法主要可以分為五個模組：(一) 蒐集工地現場影像資料、(二) 模型建立、(三) BIM 模型與點雲模型結合、(四) 深度學習模型分析、(五) 構件安裝類別正確性、整體準確度分析。

三、 重要發現

(一)國內外有關自動辨識技術應用建築產業之研究情況

利用三維點雲重建技術等電腦視覺相關技術應用輔以施工現場之研究及其設備，於國外已有許多重大突破。然而其有效之真實應用，國內土木工程依舊無實質上之進展。目前重建點雲之方式主要有三種方式，基於影像之點雲重建、基於深度影像之重建、基於光達設備之重建。基於影像重建三維點雲模型，主要透過大量蒐集工程現場之影像資料，如無人機搭載鏡頭、一般相機、魚眼相機、環景相機等各式能夠蒐集影像之設備，其主要利用運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 為主要重建方法，其方法利用多張不同角度位置之部分重疊影像為基礎利用電腦視覺方式計算影像之姿態與內方位參數參數與移動軌跡，藉以重新建立點雲模型；基於深度影像之重建，主要能夠透過深度相機進行深度影像與彩色影像之擷取以即時重建或保存影像以後續利用演算法進行影像匹對重建點雲模型，可以利用深度相機搭配無人飛行載具及彩色相機進行即時動態建模，並透過不同時間之飛行建模監控土方工程，以及結合施工現場 4D BIM 進行施工進度追蹤；最後，基於光達方式之點雲重建，主要利用量測每秒數萬數量的光脈衝之發射與反射其來回飛行時間以推算其距離。光達能夠利用連續移動搭配即時動態建模快速建立點雲模型，若同步以進行矯正之彩色相機進行拍攝，即能在光達產生之無色點雲進行上色，得到帶有彩色資訊之點雲模型。

如能妥善利用以上目前現有之技術與大量之影像資訊與利用更多先進之三維點雲重建設備使用於工程現場，其對於土木工程之品質與作業方法必能帶來眾多改變革與改善。自動化施工需要基於點雲模型技術，得以增加品質、進度、工安、養護管理等眾多用途乃至於推動更先進之點雲深度學習應用，然而目前國內並未有重大發展與真實應用，因此如何能夠有效且廣泛利用點雲對於國內之工程品質或者既有建築之養護能力提升有其急迫與重要。

(二)深度學習之建築案場資料庫架構

資料集是利用深度學習技術進行自動辨識研究的基礎，優秀的演算法需要透過完整的資料來評估它的效果。演算法的最終目的是要擬合趨勢或者分佈，不同的資料集的特徵分佈是不同的，同一資料集劃分方式由於改變不同的輸入參數也會使得特徵的分佈存在差異。因此找到合適的資料並做好適當的預處理，可以更加體現演算法的能力。惟既有之點雲資料庫主要以室內點雲居多，本計畫嘗試不同深度學習模型合併平面偵測演算法進行研究，將來增加以建築案場為基礎之點雲資料庫，可提升辨識精度。

(三)案場施工誤差資訊可視化

本研究藉由將中山區某建築工地預鑄外牆構件十八個樣本點雲場景，使用前述之成果進行偵測辨識，其成果之平面利用平面方程式以及平面點雲相差平均距離進行運算，可得到交角與平面距離，藉此得出誤差值。另外，本研究將環景相機所建立之點雲模型套疊 BIM 模型後藉由熱顯圖可視化真實構件與設計模型之誤差。

(四)關於本研究之效益

近年來營建產業面臨成本上升問題，本研究結合大數據以及人工智慧、深度學習與建築預鑄工法的優勢，發展流程與使用照相攝影設備建立即時案場點雲模型，使得即時性的檢驗更為精簡、省時。

四、 主要建議事項

建議一

結合 BIM 及感測技術進行即時建築構件安裝檢測：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系

建築構件安裝精準度檢驗流程往往需要經過多次查核，並與測量人員協調時

間以完成最後核實。整體流程除牽涉人員多、間隔時間不定外，也容易因為時間之耽誤，造成最後檢驗結果的誤差。近年來在預鑄構件及鋼構件的應用愈趨廣泛下，檢驗流程的最佳化，以及誤差反應的即時性也更顯重要。同時間，有此檢驗需求之相關建築構件多數具有對應之 Building Information Modeling (BIM) 模型。整合 BIM 至檢驗流程，並輔以最新之感測技術，「即時」提供安裝檢測結果，並加速檢驗流程，提供正確結果，為相當重要之研究課題。建議統整並應用先前之研究成果，加強其中技術之即時性，更加貼合目前業界需求。

建議二

預鑄元件資料庫建立，作為後續研究對模型與真實物件進行分析參考：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系、財團法人台灣建築中心

目前影像及點雲資料庫仍以一般建築相關元件作為資料蒐集對象。主要考慮針對不同元件，先進行構件資料採集後，建立三維模型。舉例而言，鋼構在施作上很常遇到安裝誤差的狀況，若是增加蒐集鋼構元件的影像資料，可以利於拓展研究的面向，將鋼構安裝精準度的部分也同時納入考量。另外，BIM 模型元件也可以轉換成點雲模型做為參考對象，若繼續增加各種 BIM 模型元件，對於點雲資料庫的完備也有效益。

建議三

深度學習模型資料庫建立，提升後續研究對模型與真實物件自動辨識精準度：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系、財團法人台灣建築中心

舉例而言，目前 PointNet++ 室內點雲資料庫為室內點雲居多，過往辨識模型仍以室內資料集為主要搜集對象。建議可研擬推動針對施工案場現地資料豐富資料集，強化深度學習模型之物件辨識能力，間接提升案場誤差辨識精準度。

ABSTRACT

Keyword: modular construction, computer vision, point cloud

The broad implementation of BIM with the pressure of labor and material cost for the construction industry provides a unique opportunity for modular construction to play a significant role in the construction 4.0 era. Modular construction shows excellent potential to automate construction processes, integrate with new technologies such as artificial intelligence and deep learning and introduce a cleaner, faster and systematic approach. However, the prefabricated component installation accuracy has been an issue that could affect the progress and quality of modular construction. This research aims to integrate BIM, deep learning, and object detection to validate the installation accuracy and improve the installation process.

This research will first utilize the big visual data collected on the construction site to generate the current 3D reality point cloud model after the installation process. Second, we will use a simple transformation algorithm to align the BIM and the point cloud model for further analysis. Then, the BIM can be used to segment the point cloud into components and extract feature information from the image and 3D geometry for the next step. Next, the trained deep learning model can detect the component type to verify the installation. And the accuracy verification model will compare and calculate the error between the point cloud model and the BIM model for installation quality assessment. Finally, the BIM and the point cloud can be used to visualize the accuracy results by color-coding the models.

In this research, an integrated solution that incorporates BIM and deep learning is developed to analyze the prefabricated components' installation accuracy. The study will establish analysis strategies, a system framework, and a prototype to implement the integrated solution. We expect the result to promote BIM usage and provide insights into using artificial intelligence and deep learning in construction.

第一章 研究方法及進度說明

第一節、研究背景

近十年來，營建業生產力相較其他產業近趨零成長，再加上近期缺工影響加劇，整體產業轉型升級自動化需求極大。預鑄工法整體而言有許多優勢，如在工廠模組化生產，過程可系統化、產品品質較穩定、施工現場速度快、人力需求相對低。在近年缺工、營建材料上漲的趨勢下，造價偏高之缺點已不明顯。在近年技術進步下，應用越來越廣，成本也相對開始下降。但其中推展的一個挑戰在於，安裝之準確度仍有疑慮、施作時亦有可能產生誤差，反而造成工期的延誤。另一方面，預鑄構件及鋼構件等建築構件準確度對於後續建築之維護、營運、管理影響甚大，其中在結構上包括安全、抗震問題，在使用上包括漏水、接合處之影響等等。在目前預鑄已應用於高科技工廠及社會住宅的趨勢下，這些問題皆將成為未來廣泛應用推廣後，極需注意的課題。近年 BIM (Building Information Modeling, BIM) 應用成熟及深度學習 (Deep Learning) 技術躍進，本研究預計結合相關技術，透過工地大量蒐集之影像，攝影機之佈設，由影像等感知設備，自動辨識建築構件安裝之準確度。

第二節、研究目的

本研究主要將應用在工地現場所蒐集之大量影像資料，針對建築構件之安裝準確率進行研究探討。研究中將利用電腦視覺演算法所建立之點雲模型真實呈現工程現場安裝結果及元件空間位置，並結合 BIM 模型進行準確度判斷。此模型可作為在深度學習模型判斷中，提取相關特徵資訊之基礎，另外加上計算攝影、電腦圖學技術，可系統性蒐集安裝準確度資訊。其中將應用卷積神經網路判斷預鑄元件安裝空間正確度。本研究預計建立以下模組：

1. 結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析策略。

2. 結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析系統架構及內容。
3. 結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析離型系統並進行實際案例操作。

第三節、研究重要性

在近期人力、物料成本急遽上升，預鑄工法成本問題已漸不明顯，更加顯示主要普遍應用的挑戰在於安裝過程之技術課題，其中更以安裝之精準度為其中必須克服的問題。同時工地目前應用影像資料漸趨普遍，現地除一般攝影監視器外，也已開始應用各式相機記錄工地建造過程或者應用影像紀錄缺失進行議題追蹤。這些相機包括，無人機載具相機、環景相機、一般傻瓜相機等。另外 BIM 在近年來應用同樣也越來越廣泛，並有超過 LOD (Level of Development) 300-400 等級之施工模型。BIM 亦是在實施預鑄工法中不可獲缺的一環。結合這些相關技術的整合，可以作為預鑄工法準確性驗證之基礎，並開始更有效在的施工現場加以校正。

此研究涉及多項不同技術之整合，包括人工智慧、深度學習、BIM 模型、點雲等，技術門檻較高，若能應用於預鑄工法檢驗，並實現於國內公共工程，其示範效果有利於預鑄、BIM、人工智慧乃至於整體建築 4.0 之推動。

第四節、研究方法

本研究預計採用之方法主要可以分為五個模組：(一) 蒐集工地現場影像資料、(二) 模型建立、(三) BIM 模型與點雲模型結合、(四) 深度學習模型分析 (五) 構件安裝類別正確性、整體準確度分析。首先，模型建立將目標建築元件之點雲模型透過影像建立作為後續比對之基礎；再來，特徵資訊蒐集將針對前階段之點雲模型及影像資料體取相關可用於深度學習分析之資料；同時，也將運用語意分割深度學習模型將疊合後之點雲模型與 BIM 模型進行分割。在資料蒐集完成後，將針對建築元件蒐集訓練資料集。最後將建立深度學習模型分析建築元件之安裝準確率。

本案於今年度開發一結合 BIM 及深度學習之建築元件安裝準確度分析方法。其中奠基於 110 年計畫「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」延伸核心技術包括：資料蒐集方式、資料轉換成模型方法、特徵資料判斷標準、點雲語意分割架構、建築元件深度學習資料庫、準確度判斷標準及自動化導入流程。唯準確度分析將由結合多種感知設備，並應用多元深度學習、主動學習方法分析。執行過程將與預鑄廠商合作，實際執行離型系統，同時透過專家座談瞭解離型系統應用實用度。執行將分為不同階段執行自動化過程，階段性導入離型系統。預期離型系統成果藉由先進人工智慧技術提升預鑄元件安裝準確度，並實際應用於預鑄構造及鋼構造等建築工地監測，進一步拓展相關工法未來應用廣度。以下將詳細討論各模組之技術細節以及應用方法。

壹、 蒐集工地現場資料

一、 影像資料(環景相機、廣角鏡頭、單眼相機、空拍機、SLAM¹過程之彩色影像)

環景相機可全方位拍攝影像資訊，主要用錄影的方式進行資料蒐集，並以三軸穩定器輔助拍攝以確保影像品質，後續以每 10 幀為單位擷取照片，再進行點雲模型之建立；空拍機能突破空間限制，拍攝人員較難達到之位置的影像資料，使後續重建的 3D 模型能更臻完整。廣角鏡頭與單眼相機拍攝手法較為相近，因其無法像環景相機一樣能全方位蒐集資料，拍攝時需上下、左右來回針對目標物重複拍攝，蒐集重疊率夠高的影像集合，以利後續三維立體模型重建，其中廣角鏡頭的自動防震功能能使得蒐集資料不需額外準備穩定裝置，僅攜帶相機本身即能完成資料蒐集，而單眼相機則仰賴其高畫質的影像，能精準重建出構件之細節，有利於重建局部點雲模型；本研究後續利用深度相機以及光達進行 SLAM，於進行即時定位建模同時搭配彩色相機蒐集色彩資訊，因此也一併紀錄彩色相片。

¹ Simultaneous Localization And Mapping，同時定位與地圖構建。

二、 深度地圖

深度相機能蒐集深度地圖，將深度資訊以圖像的方式作呈現。深度資訊為一常用的特徵資料。相較於攝影機將真實世界的三維空間資訊轉換儲存成二維平面畫面，深度攝影機可以測量出每一個影像點和攝影機之間的 Z 軸距離，儲存的格式為三維空間資訊。本研究使用之工作原理為藉由紅外發射器發射出紅外散斑，以提高低質感場景中的深度精度，左右兩個紅外相機採集兩張紅外圖像，處理器根據兩張紅外圖像中的散斑特徵點匹配計算視差圖，最終得到深度影像。

三、 光達點雲

本研究為保證點雲品質以測量精準度於本案應用光達，其能夠在非常短的時間內以不可見光束得到三維點雲地圖，其成果快速穩定且精度高，其原理為發射光束，及接收光束接觸物體反回之光束，來回計算週期時間差以得到對應光束點雲，光達能夠在極短時間快速來回利用此原理進行掃描，以建立對應三為點雲地圖。

四、 資料集

本案於資料蒐集同時，將順帶建立預鑄元件以及鋼構元件的資料集。因深度學習模型往往需要大量影像資料進行模型訓練，但目前國內外仍缺乏大型的預鑄元件影像或點雲資料庫，因此本案希望於進行資料蒐集同時，保存足量的影像資料與幾何資訊來建置資料集，讓未來有意願使用之研究都能夠參考與使用。

- 預鑄構件：樓、柱、板、牆、帷幕系統。
- 鋼構：柱
- 類型：點雲、影像、深度。

貳、 模型建立

一、 SfM²搭配 MVS³

藉由運動恢復結構，偵測影像資料中的特徵點，並與其他影相資料中相似的特徵點進行匹配，計算出三維座標，並利用光束平差法將影像中的誤差最小化，即可得到稀疏點雲，做為下一步多視立體的輸入；多視立體會經由迭代運算，使得點雲密度提高，將輸入的稀疏點雲轉變成高密度點雲模型。詳細原理與方法可以參閱 110 年計畫「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」。

二、 深度相機之即時定位建模技術(RGB-D SLAM)

本研究利用雙目深度相機進行即時定位建模 (Simultaneous Localization and mapping, SLAM) 技術進行點雲重建，本研究利用 RtabMap 所發展之技術框架，並利 ROS(Robot Operating System) 系統進行系統與硬體串聯，本研究採用之深度相機為 Intel Realsense D455 其搭配深度相機與彩色相機，並於出廠同時已經經過精準校正，代表其深度相機與彩色相機原廠已經提供其校正參數於開發程式當中，因此於輸入 RGB-D SLAM 演算法前，已能夠擁有彩色影像、深度地圖外方位角。本研究首先利用彩色相片進行特徵點提取 GFTT(Good Features To Track) 特徵點，並利用 RANSAC⁴進行 PnP(Perspective-n-Point) 相對相機姿態運算，並利用局部光束平差進行姿態更新，反覆進行上述運算，並於拍攝新相片同時，進行全局篩選與閉環檢測，於演算法結束同時，即能蒐集彩色相片、相機外方位角、視覺里程、深度地圖，最後再將以上資訊縫合，即能得到完整三圍點雲。

² Structure from Motion，運動恢復結構。

³ Multiple View Stereo，多視角立體視覺。

⁴ RANdom SAMple Consensus，隨機抽樣一致。在一包含許多離群值(Outlier)之數據中，找出一組離群值不會影響結果之內點(Inlier)。

三、 光達 SLAM 與光達 SLAM 結合彩色相機

本研究因深度相機於大規模工地場景重建能力較為不足，受限於本研究無利用額外 IMU(Inertial measurement unit)、標記物、機器人等設備，容易造成大場景重建點雲誤差產生，因而本研究導入平面光達作為改善措施，本研究參考 FAST-LIO2 (Fast Direct LiDAR-inertial Odometry)光達 SLAM 作為重建點雲手段，相較於本研究 RGB-D SLAM 採用之方法採用彩色影像特徵點為匹對手段，平面光達能夠利用更為精準平滑之點雲，光達所建立之部分時間累積點雲，利用卡爾曼濾波器將點雲資訊投射到另一維度空間，並利用其建立選集樹以便進行索引配對，於其中並加入光達所搭配之 IMU 資訊以強化配對過程，重複上述步驟反覆匹對累積點雲地圖，即能形成點雲模型。此方式由於有別於傳統 SLAM 利用特徵點提取，利用全部之點雲進行姿態匹對，能夠得到更精準且穩固的姿態判斷，且因利用卡爾曼濾波器搭配選集樹之建立，使得運算索引之速度得到大幅提升，此 SLAM 架構穩固且運算快速，於本案之大場景工地適用度極高。而後續深度學習模型針對點雲直接進行語意或者實例分割，其輸入特徵若能夠不只如光達 SLAM 所產生之無色彩點雲，能夠加入色彩資訊即能提升分割效果，本研究首先將平面光達以及彩色相機進行校正，首先將光達影像利用體素進行重建，再將其平面及邊界進行分離，再將彩色影像利用 Canny (邊緣檢測)演算法將邊緣取出，透過光達點雲之邊界以及彩色影像之邊界進行最小誤差矯正，即能得到其外方位角，為結合彩色資訊於光達無顏色之 SLAM 結果，本研究參考 R3LIVE 之架構，其由 FAST-LIO2 所發展而來，於原架構中加入彩色資訊，其原理為運用光流追蹤方法進行彩色影像之地圖位置匹對，於同時再將影像投影至光達點雲，即能得到彩色點雲資訊。

參、 BIM 模型與點雲模型結合

將三維點雲重建後，因其演算法緣故只會帶有空間相對資訊，並無真實空間資訊，因此須將其與具有真實空間資訊的 BIM 模型進行疊合。可利用 CloudCompare 中點對點以及 ICP 對齊方式，挑選多個參考點後，即能夠將點雲模型自動疊合到 BIM 模型上，獲得正確的真實空間資訊。

肆、 深度學習模型分析

利用深度學習模型分析，進行點雲成果之分割，分割流程概念如圖 1-1。本研究嘗試兩種不同的深度學習模型：

一、 POINTNET++

傳統之點雲深度學習模型多利用捲積神經網絡進行點雲之深度學習，其最大缺點即是會喪失過多點雲之特徵資訊，造成辨識精準度尤為不佳，近年眾多優秀的點雲深度模型因深度學習技術的進步，眾多新架構之出現也給點雲深度學習帶來契機，其中針對點雲深度學習近年之最大突破應屬 PointNet 模型，此模型是捲積神經網絡之變形，此研究發現先前卷積神經網絡於輸入層後很快即進入池化層，造成幾何特徵損失過快，因此 PointNet 利用多層感知器先將特徵投射至高維度避免其先通過池化層喪失過多特徵，於取得高維度之特徵後，再將此時再進行池化層處理，即能保有更多特徵資訊，後再經由多層感知器連接即能進行點雲分割、分類，為確保其數入點雲以及通過多層感知器後之特徵底不受角度不同影響，於輸入點雲時以及通過多層感知器後也會通過 t-net 自動將特徵點轉至相同的尺度，意及點雲進行正則化處理，但 PointNet 其針對局部特徵卻無法進行準確學習，即針對語意分割多個物體並不能夠擁有較好的分割性，因此此研究選用其升級網絡 PointNet++模型，PointNet++ 針對局部特徵之處理有了突破性的利用，其利用階層學習(hierarchical learning)為手段，對點進行區域特徵蒐集，將其進行局部群集處理，再通過 PointNet 中得到多個 PointNet 特徵點，再將此所有特徵點放入反捲積

網絡中即能得到各點之判斷結果，此方法增強了對地區特徵之提取也意味增強了語意分割之精準度，因此本研究將利用 PointNet++作為語意分割之網絡。

二、 辨識模型-SoftGroup

本研究於初始階段利用 PointNet++進行語意分割，再利用 DBSCAN 演算法針對以辨識點雲進行集群處理，已將點雲達到實例分割之效果，但本案發現，PointNet++並無法勝任本研究之分割任務，且分割結束同時，並無法得知個體物體之效果，需再透過集群方法處理，本研究因此引進實例分割模型 SoftGroup 作為替代實例分割模型，有別於 PointNet++模型，此模型先利用通過一對稱捲積神經網路進行點雲特徵提取，其利用編碼器以及解碼器，將點雲特徵提出，並於編碼器以及解碼器對應固定層數進行連結，將編碼器之資訊也直接傳向解碼器，即不會於最終因過度利用捲積網路喪失過多訊息。並利用兩個小型多層感知器(Multilayer perceptron, MLP)模型，針對點雲進行語意分數提取以及個體質心分數評分，且確保兩模型能夠取出點雲類別分數以及其對應物體中心，在得到兩項分數後，利用相對同質心物體不同種類之點雲計算 IOU(Intersection over Union)，並設定閾值將背景以及真實群集過濾，後續再將多個群集放入一個如前述小型對稱捲積網路模型提取特徵，並銜接三個 MLP 模型，分別計算種類、分割形狀、集群分數，即能透過分數閾值設定，將點雲真正分割為精準的實例分割結果。

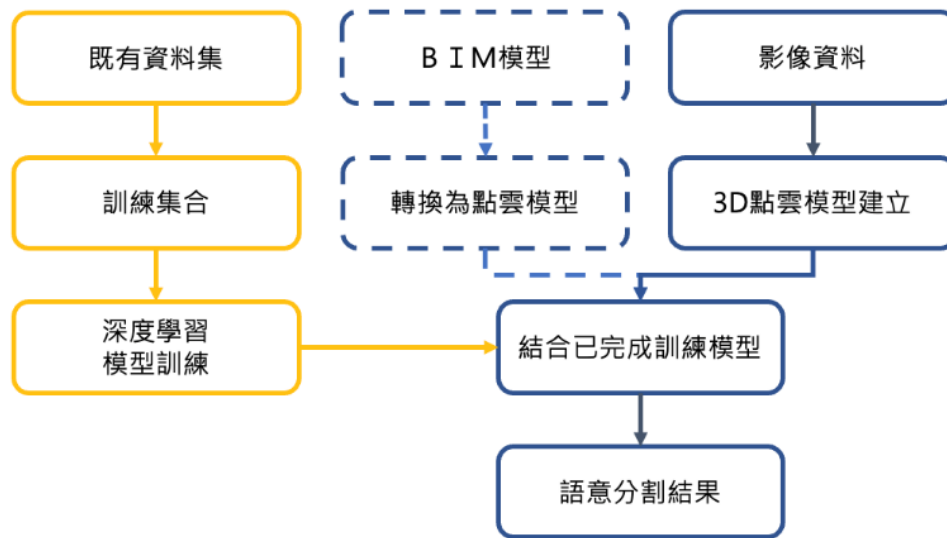


圖 1-1、語意分割流程（本研究整理）

伍、 構件安裝類別正確性、整體準確度分析

一、 點雲和 BIM 比對誤差

蒐集大量點雲資訊，但因本研究無搭載全球定位系統，因此於前述步驟將點雲與 BIM 模型進行套疊，而經由套疊之點雲與 BIM 即能先行運算其最鄰近點誤差，得到一初步之誤差判斷熱顯圖。

二、 判斷平面以計算交角誤差以及平面誤差距離

將實例分割完成的點雲構件進行平面偵測處理(圖 1-2)，可利用 RANSAC 演算法自動抓取構件平面，將此方法運用到各個構件後，即可藉由比較不同構件的構件平面，了解不同構件間的交角情形，即可得知物件間的交角誤差，而從所獲得之平面點雲，即能計算平面點雲以即平面點雲之平均最小距離，即能獲得平面距離。藉上述之方法即能判斷構件是否安裝精準。

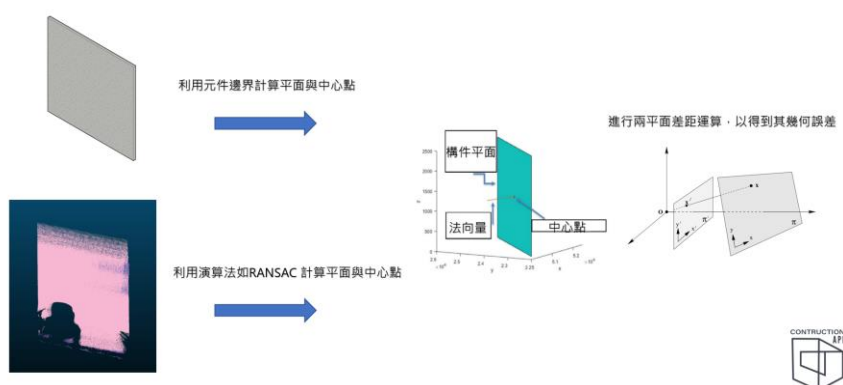


圖 1-2、利用自動偵測辨識構件平面方式進行誤差判斷（本研究整理）

第五節、研究方法之採用原因

壹、 影像式點雲

工地影像資料的蒐集方式，舉凡是手機、無人機、環景相機等，但目前這些影像資料多作為紀錄使用，少有實際的有效應用。影像式點雲即是透過蒐集影像資料的方式，重建出三維空間模型，並進行後做安裝精準度分析。

貳、 深度相機 SLAM

即時定位建模能快速將剛蒐集到的影像資料以點雲的方式呈現，並且，以目前的演算法已經能達到很高的精度，加上視覺 SLAM 所需要的輸入影像門檻不高，因此在使用上不僅方便，也是成本相對不高的優良選。

參、 光達 SLAM

由光達儀器發射出的光波，打到物件或建物後引起散射和反射。一部分光波會經由反向散射返回到儀器的接收器中，將光信號轉變為電信號記錄下來，並測量發射與接收反射回波的時間差，再將資料回傳至電腦進行處理，

建立點雲模型，而於過往光達造價昂貴，但近年隨著科技進步與相關產業過模經濟擴大，如自駕車、自動化倉儲等應用之形成，平價之光達設備儼然成為可能。

肆、 光達結合彩色相機

利用光學雷達掃描環境偵測，再將光達的接收資料傳送至電腦讀取，如：距離資訊、物體的角度資訊等等。同時使用彩色相機，對相同場域環景度環境進行拍攝，並將彩色相機座標與光學雷達的點雲圖座標進行匹配建模，最後再將彩色相機投影至光達點雲之上即能得到彩色點雲模型。

伍、 深度學習模型 - SoftGroup

本研究使用實例分割模型- SoftGroup 作為點雲分割之模型，先利用 U-Net 進行點雲特徵提取，再利用兩個小型 MLP 模型，針對點雲進行語意分數提取以及個體質心個別分數評分，且確保兩模型能夠取出點雲類別分數以及其對應物體中心，在得到兩項分數後，利用相對同質心物體不同種類之點雲計算 IOU，並設定閾值將背景以及真實群集過濾，後續再將多個群集放入一個微型 U-Net 模型提取特徵，並放入三個 MLP 模型，分別計算種類、分割形狀、集群分數，即能透過分數閾值設定，將點雲真正分割為精準的實例分割結果。

陸、 誤差判斷

分割後的點雲有其空間資訊與分割後的類別資訊，再利用 RANSAC 的演算法可以有效地將分割後的點雲再進行分群，並計算出每個元件的相關幾何資訊，此方法還能有效的避免點雲處理中最常見的噪點問題，使其在獲取空間資訊是能更加準確。

第六節、重要儀器之配合使用情形

壹、環景相機、空拍機、廣角相機、單眼相機

環景相機(圖 1-3)可以蒐集到全方位的影像資料，蒐集方式主要透過影片紀錄，需由研究人員將相機安裝在三軸穩定器上，並在工地目標樓層、目標區域，以儀器高舉過頭方式繞行，欲建立之目標物任何面向皆需涵蓋在影像紀錄內，以樓層為例，人員必須完整繞行整層樓，更建議人員穿越所有柱與柱之間之組合，則影像紀錄會更為完整，以便後續模型建立。

空拍機對於欲蒐集人員無法到達之處的資料更為便利，以尚未進行模板施工之鋼構樓層為例，空拍機應飛行經過任何柱與柱、不同樓層之橫梁間，使資料完整度足夠進行建模。

廣角相機及單眼相機(圖 1-3)，與環景相機不同，無法取得全方位之資料，因此操作人員較需注意對於目標物的影像蒐集，蒐集方式為針對目標物或目標區域前後、上下、左右來回進行拍攝，確保影像間重疊率足夠高，於利用影像式點雲重建方法建立三維點雲模型時，不同圖片中相同特徵點才能更容易被抓出。其中廣角鏡頭的自動防震功能能使得蒐集資料不需額外準備穩定裝置，僅攜帶相機本身即能完成資料蒐集；而單眼相機因其影像畫質極高，更適用於局部構件（例如：一次鐵件、預鑄板片間距及高程差）模型之建立。



圖 1-3、(左) 環景相機、(右) 單眼相機 (本研究整理)

貳、 深度相機

深度相機(圖 1-4)之應用，其能夠蒐集彩色相片以及深度地圖，並選擇能夠與 ROS 平台進行溝通和使用，以利後續資料處理以及時應用，在拍攝時必須穩定姿態，因本研究採用 SLAM 即時定位建模之技術，不得有過大之動作避免姿態游移，深度相機也因其深度距離限制，必須先行測試其能夠拍攝之距離限制，例如雙目相機因採用兩鏡頭視差其能運用於較大場景之應用，但於較遠之距離時誤差即會放大，且因採視差方式有別於光學光達深度相機其準度較為不好，但光學光達因採用光束距離測量，於較為平價之光學光達深度相機其長受到陽光之干擾，因此本研究根據拍攝場景需要適時轉換運用之深度相機種類。



圖 1-4、深度相機（本研究整理）

參、 光達

光達或稱激光雷達，主要為利用雷射光束進行測距或量測物體物理特性的光學遙測技術。光達結合 SLAM 技術，利用光達取得的單元構件影像資料，運動過程中通過重複觀測到的地圖特徵同時計算本身在未知環境中最接近的位置與移動姿態，並且持續建構並更新該環境三維的空間資訊。

肆、各儀器優缺比較

表 1-1、各儀器之優缺比較（本研究整理）

	環景相機	單眼相機	空拍機	深度相機	光達
特性	環景影像	低曲變影像	空拍影像	彩色影像 深度地圖	高精度點雲
資料蒐集	快速	耗時	快速	耗時	快速
使用難易度	簡單	中等	中等	難	難
價格	低	中等	中等	低	昂貴

第七節、研究步驟

圖 1-5 為本研究之研究步驟流程。本研究先探討預鑄安裝流程，並分析安裝流程中何時有精度要求，成為本案研究內容之介入時機，同時，使用者將先在工地進行相關影像資料蒐集，包括環景影像、一般相機（廣角相機、單眼相機、空拍機鏡頭）影像、深度影像、光達彩色相片。影像將輸入 3D 點雲模型重建模組中（3D 幾何模型與影像空間定位），建立工地現實之點雲模型。重建之點雲模型將透過簡單座標轉換計算與 BIM 模型疊合，疊合後之模型可利用深度學習進行辨識，其中，深度學習模型將事先透過大量蒐集之建築構件資料庫進行訓練。進行語意分割後，可獲得各構件之點雲模型，再利用 RANSAC 演算法對分割結果進行平面偵測，可對其結果做誤差之判斷。

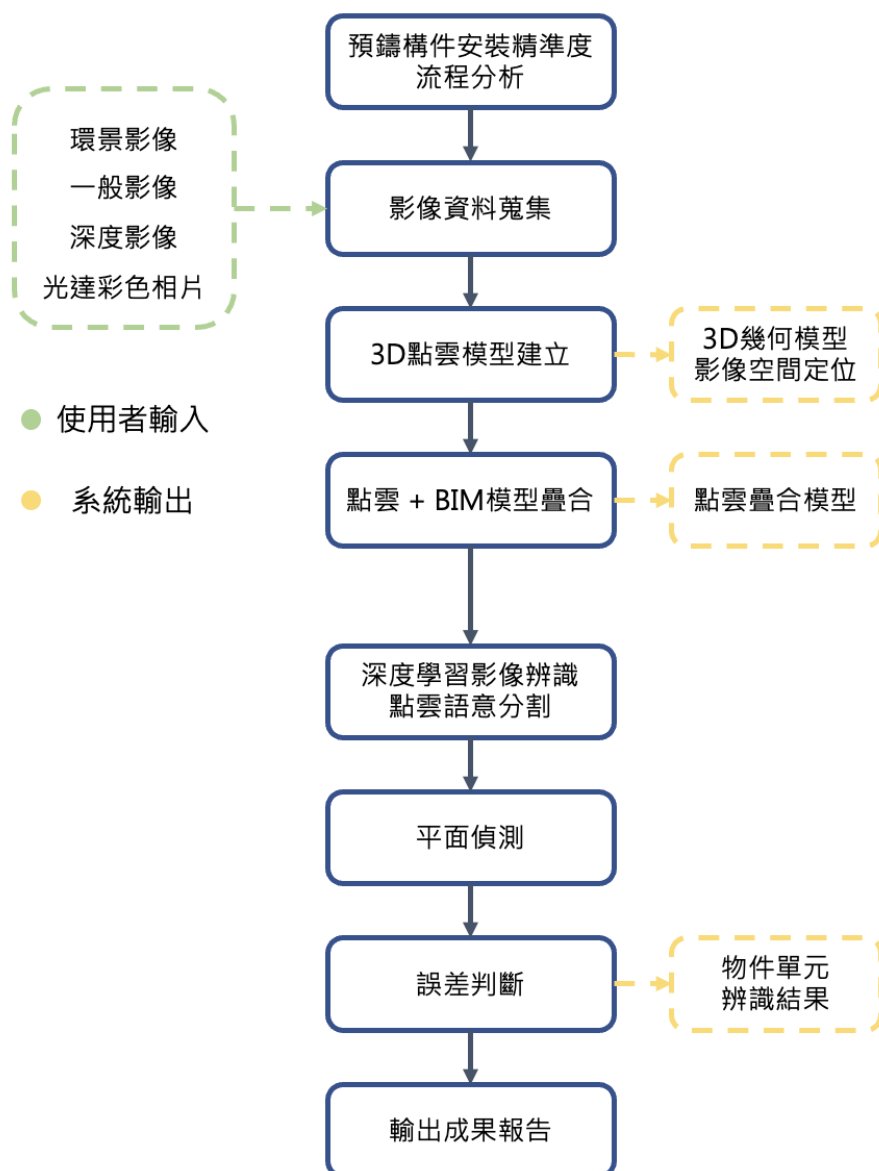


圖 1-5、安裝精準度分析流程圖（本研究整理）

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝

第二章 蒐集之資料、文獻分析

隨著硬體運算設備與電腦視覺演算法之演進與快速進步，輔以施工現場之大量影像蒐集，有效之應用施工現場影像已成為一大機會，雖說三維點雲重建技術相關研究以即其設備已有許多重大突破，但如何有效之真實應用，國內土木工程依舊無實質上之突破，如能妥善利用現有之技術與大量之影像資訊與利用更多先進之三維點雲重建設備使用於工程現場，其對於土木工程之品質與作業方法必能帶來眾多改變革與改善。

目前重建點雲之方式主要有三種方式，基於影像之點雲重建、基於深度影像之重建、基於光達設備之重建。

壹、 基於影像重建三維點雲模型：

主要透過大量蒐集工程現場之影像資料，如無人機搭載鏡頭、一般相機、魚眼相機、環景相機等各式能夠蒐集影像之設備，其主要利用運動恢復結構（Structure from Motion, SfM）為主要重建方法，其方法利用多張不同角度位置之部分重疊影像為基礎利用電腦視覺方式計算影像之姿態與內方位參數與移動軌跡，藉以重新建立點雲模型，藉由影像重建之三維點雲模型能夠藉由和原先所建立之 BIM 模型進行進度比較與安裝元件比較，藉以進度排程與構件施工安裝精準度之探討與確認，Han 等（2015）即利用運動恢復結構建立三維點雲模型結合 BIM 模型、建立點雲之影像和運動恢復過程中產生之相機內外方外參數，抓取特徵像素區塊以自動分類構件，藉以和 4D BIM 進行進度比對，三維點雲模型也能針對工地危險開口、鷹架、禁制區等進行自動辨識進行工安分析，Jie Shen 等（2021）利用深度學習方式進行平面相片之語意分割，再藉由相機焦距長度與電腦視覺方式計算影像之偽雷射點，藉以得到深度地圖，透過語意分割與製造之深度地圖，即能於彩色相片提取機具與工人搭配其遮罩於深度地圖提出相對之真實深度，以此能運算工人與機具之距離關係以預警是否進入機具周圍危險區。

貳、 基於深度影像之重建：

主要能夠透過深度相機進行深度影像與彩色影像之擷取以即時重建或保存影像以後續利用演算法進行影像匹對重建點雲模型，其建立之點雲不同於利用運動恢復結構方式重建，其不必返回推算深度地圖，而是利用其感知器即能準確地得知，再利用反覆運算最近點 (Iterative Closest Point, ICP) 等方式進行三維融合重建，其在反覆計算不同點雲之最近匹配點後試圖極小化匹對點間之匹對誤差以矯正姿態，再將其利用於點雲之對其融合，已得到完整三維模型。因其建立之點雲完整平滑，能夠於工程上用以和 BIM 之構件如牆柱樑版和機械電力管線等進行更精準之比對分析以比較進度或者精準度，或者利用傳統演算方法或深度學習模型自動進行表面或立體進行自動語意分割以自動分割構件與判別其種類，Shang 等 (2018) 則利用深度相機搭配無人飛行載具及彩色相機進行即時動態建模，並透過不同時間之飛行建模監控土方工程，以及結合施工現場 4D BIM 進行施工進度追蹤。

參、 基於光達方式之點雲重建：

主要利用量測每秒數萬數量的光脈衝之發射與反射其來回飛行時間以推算其距離。光達能夠利用連續移動搭配即時動態建模快速建立點雲模型，也能透過定點雷射掃描儀進行高精準度三百六十度精確掃描，透過定點移動儀器進行點雲掃描拍攝再以程式拼接出完整點雲模型，上述拍攝方式於進行光達點雲攝影同時也能利用事先已和光達設備進行矯正之彩色相機進行同步拍攝，即能在光達產生之無色點雲進行上色，已得到帶有彩色資訊之點雲模型，利用光達拍攝之點雲模型擁有高精準度，相較於只利用影像的點雲重建方式更精準完整且和相比深度相機擁有更精準之空間資訊，能夠比前述利用深度相機拍攝之點雲進行更精準與 BIM 之建築構件與機電水氣管線進行精度比對，也能將光達設備架設於施工現場，進行即時之點雲建立，再進行例如機具與人員之安全距離監測等，Perez-Perez 等 (2021) 即利用光達建立室內點雲模型並精準地利用深度學習方式進行語意分割，將點雲分割出各式構件與管線等以利用至更新既有建築之 BIM 模型，Bosché 等 (2014) 也使用光達掃

描點雲模型與 BIM 進行比較，以監控機械電氣管道系統的進度，Han 等(2018)使用運動恢復結構重建三維點雲模型，另也同時使用定點光達進行整個工地掃描建模，上述兩三維點雲模型再利用其三維點雲模型幾何、顏色、材質進行構件分類，藉由和 BIM 模型自動化比對得到真實施工進度。

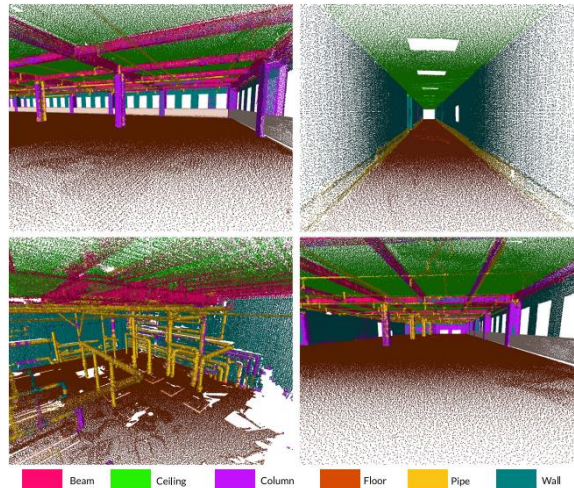


圖 2-1、使用光達設備拍攝之點雲模型並利用深度學習方式進行精準的語意分割，以自動分割構件種類（Perez-Perez 等，2021）。

點雲模型於工程上之應用可以說是尚能擁有相當程度之發展空間，於施工階段，能在各階段與不同階段之 BIM 模型進行比對以得知其進度或者精準度，也能利用深度相機以及光達設備於現場即時產生之點雲進行即時自動監控，以加強工安管理或利用即時之點雲資訊進行機器人或者無人載具之自動移動或作業，藉以增加施工自動化程度與施工精準度等，對於工程中發現之遺址也能透過點雲之快速掃描建模以保留其原始樣貌於三維點雲資料以利後續利用，對於已完成之既有建築也能透過點雲之方式進行掃描養護，透過光達或者深度相機精準之拍攝之點雲能夠用於比對設計圖以對既有管線之維護，建物之牆面、橋梁、隧道、壩體、鋼構建物等結構物之表面，也能透過重建點雲搭配語意分割之演算法或深度學習模型方式進行斷面以及瑕疵面之自動判斷或標註，以更精準之確保結構物之安全，利用上述方式點雲模型也能與 VR/MR 進行結合，透過特徵點等方式進行空間定位，即能在真實之工程中進行預置構件或設備之模擬或真實物件與 BIM 物件之

比對，以確認施工精準度，也能將其應用於以建立好之點雲模型中，進行基於現實之施工現場模擬，以確保真實抵達施工現場能夠降低工安意外發生，Fang 等 (2016) 即利用施工現場現場建立之點雲模型搭配虛擬實境 (Virtual Reality, VR) 方式藉以輔助工程現地起重機之作業。

目前國內工程與土木工程之研究對於三維點雲模型之應用普遍停留於與 BIM 模型進行人工比對進度或過度簡易之計算應用，對於點雲能夠增加品質、進度、工安、養護管理等眾多用途乃至於更先進之點雲深度學習應用、自動化施工並未有重大發展與真實應用，因此如何能夠有效且廣泛利用點雲對於國內之工程品質或者既有建築之養護能力提升有其急迫與重要。

第三章 研究成果

第一節、預鑄構件安裝精準度流程分析

預鑄工法在不同構件組合的施作上，往往會因為不同案例各自的考量，而有不盡相同的施作方式，本研究探討安裝精準度之前，亦針對安裝精準度的流程進行相關研究與探討。

相關安裝精準度流程可參考下圖（圖 3-1）。誤差檢驗的流程在相異工法構件上大致相同（圖 3-1），惟數量有異，待一定數量的構件完成施作後，檢測人員及進場進行誤差測量，將結果記錄下來後進行評估並檢討，若施作符合精度要求，該部分構件即完成施作，可進行後續工項；若施作沒有達到精度要求，則需通知施作人員進行改善，並於改善後，檢測人員再行複驗直到符合要求。不同種類的構件在檢驗流程上的差異通常在於每次檢驗的數量、檢驗花費的時間與精度要求，根據此流程（圖 3-1），每一構件吊裝完成後，檢驗人員即會進場檢驗，一單位構件檢驗過程約五到十分鐘，一層樓約需半天至一天時間，精度要求則須小於六毫米。

傳統吊裝檢驗流程

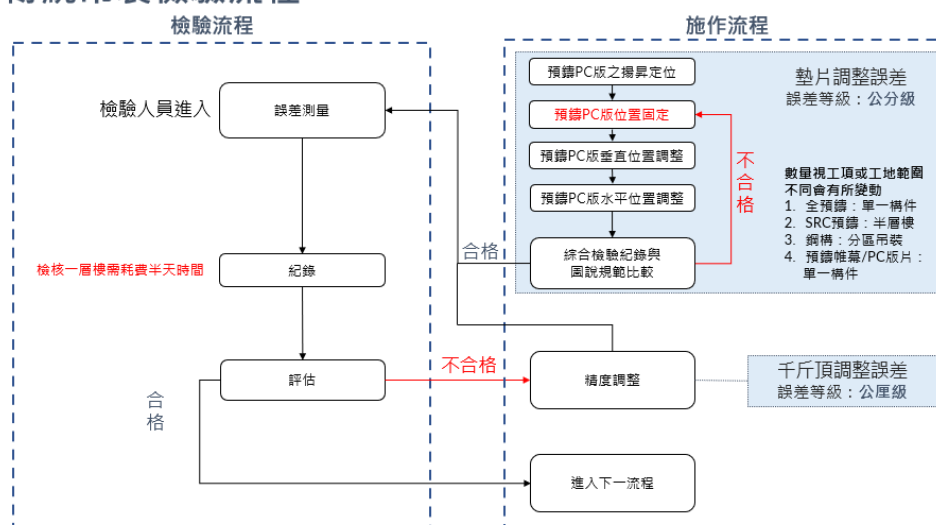


圖 3-1、傳統預鑄 PC 版片吊裝及誤差檢驗流程（本研究整理）

在與相關施工現場人員進行流程確認與討論的過程中，現場人員最常關心的即是本研究成果能達到的精度標準以及檢驗流程能如何精簡並節省多少時間。由於此研究方法在(圖 3-1)所介紹之相異工法成效相同，下圖（圖 3-2）就不重複贅述，並展示本研究成果所分析之本研究可介入的時間流程。

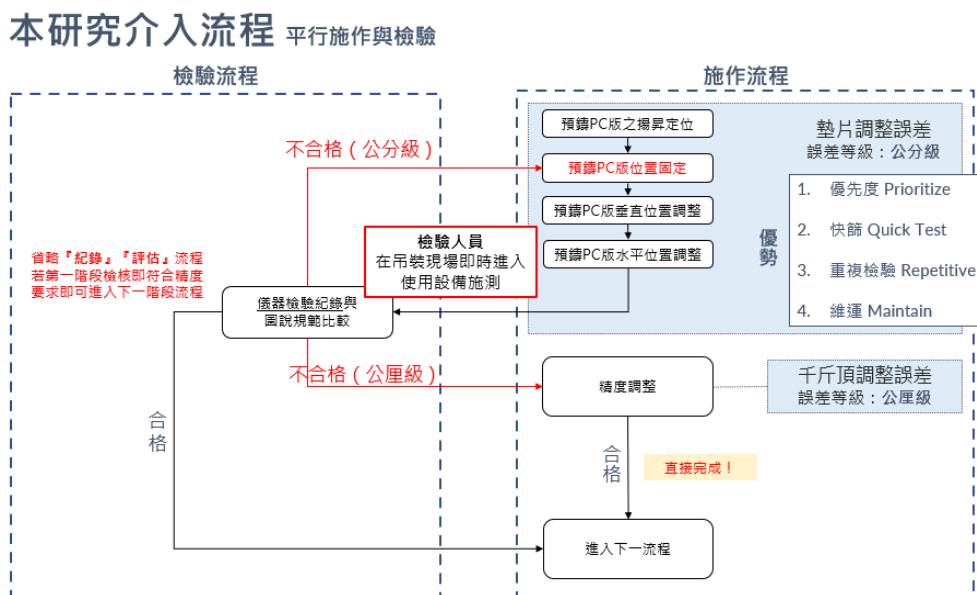


圖 3-2、本研究流程介入點（本研究整理）

透過設備輔助，即時性的檢驗使得流程更為精簡、省時。在此流程圖(圖 3-2)中，現地的吊裝施作與檢驗得以平行進行。以 PC 版片(即為預鑄帷幕外牆)為例，在 PC 版片吊裝完成的當下檢驗人員可以立馬使用設備介入檢驗，並將誤差分為公分級與公釐級兩個等級，憑此決定使用墊片亦或是千斤頂來調整不同精度的誤差。

而就目前影像資料重建的模型精度來說，能達到公分級的精度標準，因此誤差容許範圍在此精度標準以上的工項都將能直接利用本研究之研究成果，而目前影像蒐集工具以及影像重建技術之相關方法亦持續進步當中，可期待未來這方面相關研究的進度能推動此方法的精準度，使得後續應用能更加廣泛。

第二節、蒐集影像資料

本研究因利用深度學習需仰賴大量資料蒐集，本研究蒐集大量影像資料進行三維點雲重建。其中預鑄元件相關影像資料在國內、外之影像資料庫還是相對其他標的物處於相對缺乏。此研究基於 110 年計畫「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」基礎上，持續擴增相關影像資料庫。

研究團隊透過自身研究成果與 110 年度計畫，已成功於多個室內外環境完成拍攝作業且大多皆能成功建立點雲模型，已掌握多種攝影器材包含環景相機、單眼相機、空拍機、深度相機等儀器及蒐集技術，並可根據不同蒐集環境進行儀器調整，以達到最佳的蒐集資料方式。

研究團隊於本期研究期程利用不同攝影設備蒐集多個工地的影像資料，相關資訊可參考下表 (表 3-1)。

- 停車塔樓為預鑄結構，主塔結構是鋼構，中央雙螺旋車道為 SS 造，並包含預鑄梁、柱、版等工項，採高度模組化的方式進行，基地面積為 6010.00m²，地上九層地下兩層。
- 辦公大樓則是專注於蒐集預鑄混凝土帷幕牆及鋼構的資料，採用特殊無支撐開挖工法，地上十二層地下三層。
- 醫療大樓則包含主體的鋼構以及預鑄外牆系統，外牆部分於安裝時常有接合處不平整之狀況需後續調整，主體開發面積約 16,540 m²，預計興建地上十四層及地下四層。

表 3-1、影像資料清單 (本研究整理)

拍攝目標	點雲重建方法	工具	日期	建物種類	所需精細度	適用本案
停車場整層	SfM + MVS	運動相機 廣角鏡頭	2022.3.12	預鑄	毫米	否
停車場整層	SfM + MVS	環景相機	2022.3.12	預鑄	毫米	否
停車場整層	RGB-D SLAM	雙目深度相機	2022.3.12	預鑄	毫米	否
停車場特定構	RGB-D SLAM	雙目深度	2022.3.12	預鑄	毫米	是

件		相機				
停車場特定構件	SfM + MVS	運動相機 廣角鏡頭	2022.3.12	預鑄	毫米	否
辦公大樓整層	SfM + MVS	運動相機 廣角鏡頭	2022.4.30	鋼構	公分	是
辦公大樓整層	SfM + MVS	環景相機	2022.4.30	鋼構	公分	是
辦公大樓預鑄帷幕構件	SfM + MVS	運動相機 廣角鏡頭	2022.4.30	鋼構	公分	是
辦公大樓預鑄帷幕構件	RGB-D SLAM	雙目深度相機	2022.4.30	鋼構	公分	是
停車場鋼構樓梯	SfM + MVS	UAV	2022.6.2	預鑄	公分	是
醫療大樓整層	SfM + MVS	運動相機 廣角鏡頭	2022.6.4	鋼構	公分	是
醫療大樓整層	SfM + MVS	環景相機	2022.6.4	鋼構	公分	是
醫療大樓外層預鑄帷幕構件	SfM + MVS	單眼相機	2022.6.4	鋼構	公分	是
醫療大樓外觀	SfM + MVS	單眼相機	2022.6.4	鋼構	公分	否
醫療大樓外層預鑄帷幕	RGB-D SLAM	雙目深度相機	2022.6.4	鋼構	公分	是
醫療大樓整層	SfM + MVS	環景相機	2022.8.11	鋼構	公分	是
醫療大樓外層預鑄帷幕構件	SfM + MVS	單眼相機	2022.8.11	預鑄	公分	是
醫療大樓整層	SfM + MVS	環景相機	2022.9.21	鋼構	公分	是
醫療大樓外層預鑄帷幕構件	SfM + MVS	單眼相機	2022.9.21	預鑄	公分	是
醫療大樓整層	光達 SLAM	光達 + 彩色相機	2022.9.21	鋼構+預鑄	公分	是
醫療大樓整層	SfM + MVS	環景相機	2022.9.28	鋼構	公分	是
醫療大樓外層預鑄帷幕構件	SfM + MVS	單眼相機	2022.9.28	預鑄	公分	是
醫療大樓整層	光達 SLAM	光達 + 彩色相機	2022.9.28	鋼構+預鑄	公分	是
醫療大樓整層	光達 SLAM	光達	2022.10.12	鋼構+預鑄	公分	是
醫療大樓外層預鑄帷幕構件	SfM + MVS	單眼相機	2022.10.12	預鑄	公分	是

第三節、3D 點雲模型重建

壹、 影像式點雲重建方法

研究團隊在三維點雲重建之演算法使用運動恢復結構建立疏鬆點雲再搭配多視立體來進行密集點雲模型之重建。本研究團隊使用兩個點雲重建開源軟體，都為主要利用運動恢復結構的 COLMAP 和 OpenSfM。

首先研究團隊先利用 OpenSfM 進行運動恢復結構疏鬆點雲重建，於計算運動恢復結構階段，先對每張相片進行 SIFT 特徵點計算，再利用運動恢復結構進行特徵比對，並進行三角測量恢復疏鬆點雲位置，並透過光束平差法（Bundle Adjustment, BA）進行全局優化，之後在以建立之模型中再逐漸新增影像提出特徵點透過和不同影像特徵點匹配得到正確姿態，對新加入的影像和其他影像三角化得到疏鬆點雲，再針對建立之點雲和姿態進行光束平差法矯正位置和姿態，重複上述流程直到運算完所有輸入之相片，輸出全部相機姿態和疏鬆點雲空間資訊，於 OpenSfM 運行完疏鬆點雲後，COLMAP 即能將由運動恢復結構階段建立之疏鬆點雲和正確得像機姿態放置進行多視立體運算，透過此步驟即建立起密集稠密的點雲。利用以上軟體，研究團隊能夠得到的點雲建立結果，相比單純只利用 COLMAP 時更快速，卻又保有其稠密點雲之特性（圖 3-3）。

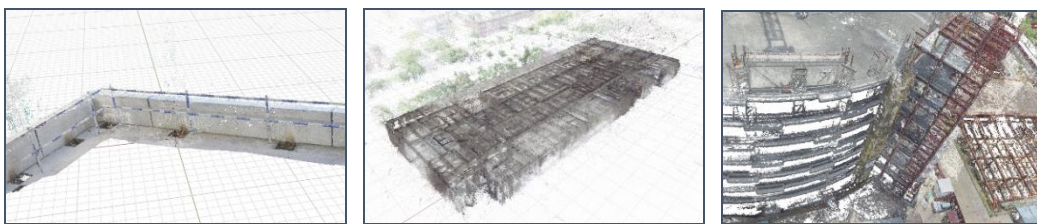


圖 3-3、點雲建立成果。使用儀器分別為（左）單眼相機、（中）環景相機、（右）空拍機
（本研究整理）

貳、 影像式點雲重建方法

研究團隊因本案需要將重建之點雲經由深度學習模型進行三維語意分割，但於後續步驟利用時發現影像式點雲雜訊過多，雖說本研究嘗試利用不同方式解決，但仍易造成辨識困難。綜合上述本研究團隊也嘗試利用深度相機採用 RGB-D SLAM 演算法並參考 RTAB-Map 所發表的 SLAM 架構來建立三維點雲模型，本研究並結合機器人 ROS 平台與 Realsense L515 以及 Realsense D455 深度相機來進行演算法展現。前者帶有雷達和後者帶有紅外線雙目景深視覺，並利用光束直接打在物體反射以計算深度資訊後者則利用兩顆景深遠紅外光鏡頭拍攝之兩張紅外線影像產生之視差來推算深度資訊，前者平面完整度較高後者平面完整度隨距離增加大幅變差但拍攝範圍較遠，本研究於本次研究發現前者主要可以在室內進行拍攝，於工地使用時，常因工地為半開放建築，常受太陽光干擾，造成其發射光線無效，後者其紅外線光束並不受強光影像，因此於室內、內外皆能夠使用。但 RGB-D SLAM 容易受限於儀器等級以及無慣性陀螺之採用，如要應用於大規模建築工地必須要取得更高等級之深度相機、搭載高等級慣行陀螺儀、利用高穩定度無人載具之採用。本研究本期 RGB-SLAM 主要透過手持無慣性陀螺儀進行拍攝，其方式較為不穩，且也須透過熟悉人員之操作以穩定模型之建立，且本研究發現平價之深度相機因其設計元件因素，非常容易因戶外環境或高強度使用，造成儀器過熱，因此本研究勢必須嘗試採取其他點雲重建手法。成果可參照下圖（圖 3-4）。

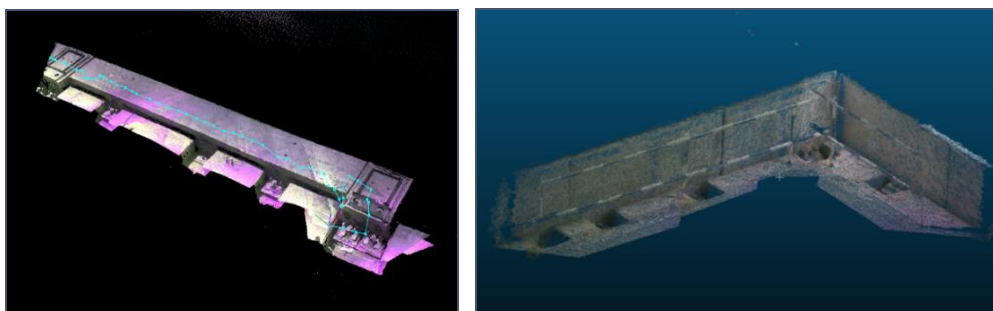


圖 3-4、深度相機拍攝之點雲重建成果
（本研究整理）

參、 採用光達之即時定位建模

本研究因採用之深度相機於大規模工地場景重建能力較為不足，受限於本研究無利用額外慣性陀螺儀、標記物、無人機器人等設備，容易造成大場景重建點雲錯誤產生，但為求後續三維點雲語意分割之方便性，完整工地場景之點雲乃為必須。綜合前述本研究導入平面光達作為另一三維點雲重建方法，本研究參考 FAST-LIO2 光達 SLAM 作為重建點雲手段，相較於 Realsense D455 雙目深度相機，平面光達能夠建立更為精準平滑之點雲。本研究利用 ROS 系統整合所有演算法，將光達所建立之部分時間累積點雲，利用卡爾曼濾波器將點雲資訊投射到另一維度之空間，並利用其建立 KD-tree 以便進行索引配對，於其中並加入光達所搭配之慣性陀螺儀資訊以強化配對過程，重複上述步驟反覆匹配累積點雲地圖，即能形成點雲模型，此方式由於有別於傳統 SLAM 利用特徵點提取，直接利用全部之點雲進行姿態匹配，能夠得到更精準且穩固的姿態判斷，且因利用卡爾曼濾波器搭配 KD-tree 之建立，使得運算索引之速度得到大幅提升，此 SLAM 架構穩固且運算快速，於本案之大場景工地適用度極高。結果顯示於圖 3-5。

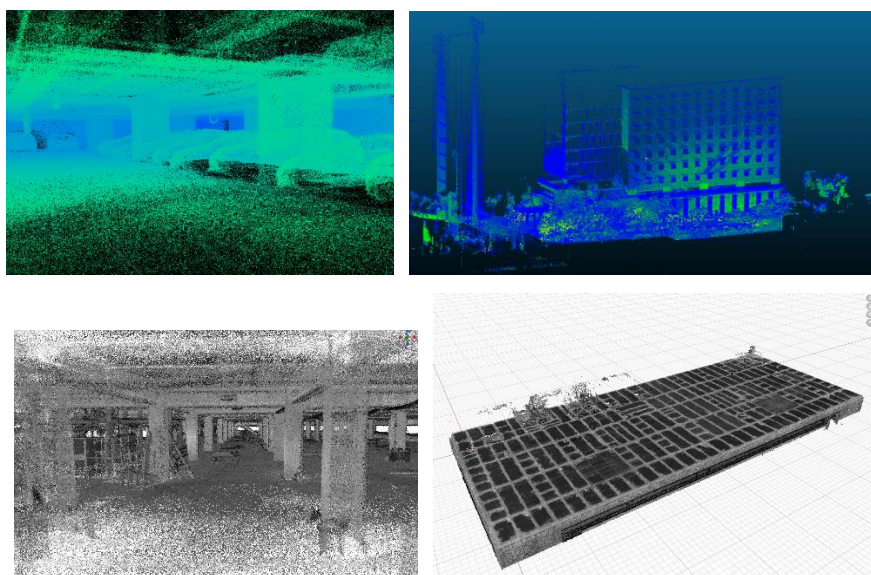


圖 3-5、利用光達 SLAM 技術建立之點雲模型(圖上)將重建之點雲模型以點雲密度呈現，圖下將點雲以密度轉為灰階呈現
(本研究整理)

而後續深度學習模型針對點雲直接進行語意或者實例分割，其輸入特徵若能夠不只如光達 SLAM 所產生之無色彩點雲（圖 3-6），若能夠加入 R、G、B 色彩資訊即能有效提升分割效果。本研究因此嘗試將平面光達以及彩色相機進行結合，但首先即會遭遇所選之設備，並無將平面光達以及彩色影像結合之困難，因此本研究參考 [Chongjian Yuan](#) 等人之方法，首先將光達三維點雲利用 voxel 進行體素網格重建，再將其平面及邊界進行分離，再將彩色影像利用 Canny 演算法將邊緣取出（圖 3-7），透過光達點雲之邊界以及彩色影像之邊界進行最小誤差矯正，即能得到其外方位角（圖 3-8）。

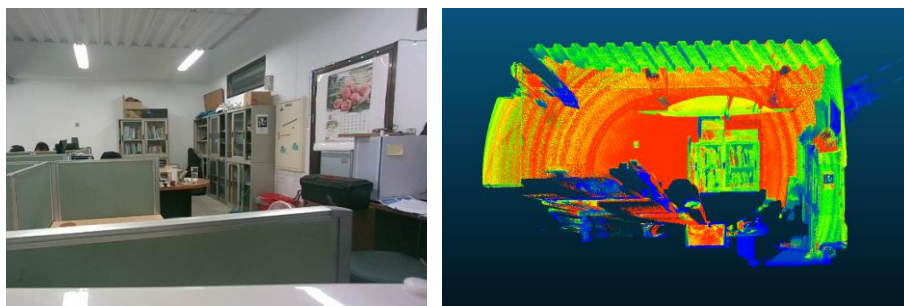


圖 3-6、(圖左)彩色影像，(圖右)光達拍攝無色彩點雲（本研究整理）

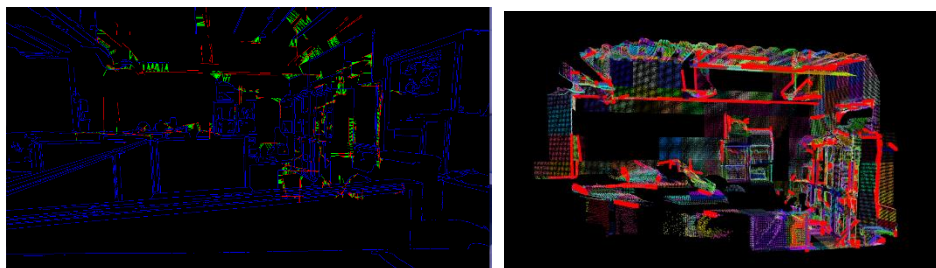


圖 3-7、(圖左)利用 Canny 演算法將彩色相機邊界運算，(圖右)利用體素法將無顏色點雲邊界處理（本研究整理）

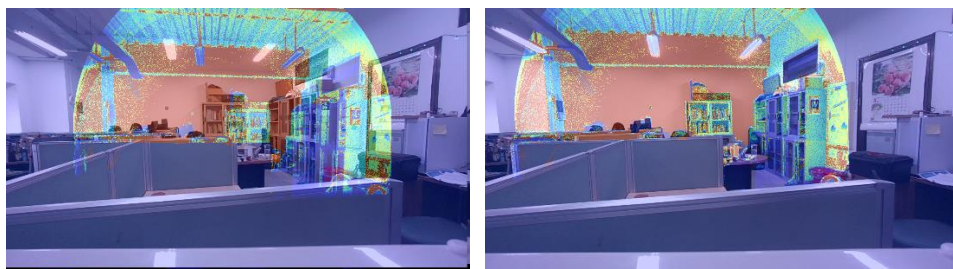


圖 3-8、(圖左)初始未對齊之點雲，(圖右)經過本研究所運算之自動對齊結果(本研究整理)

為結合彩色資訊於光達無顏色之 SLAM 結果，本研究參考 r3live 之架構，其由 FAST-LIO2 所發展而來，於 FAST-LIO2 所提出之光達 SLAM 架構中加入彩色資訊整合，其將彩色影像利用 Lucas Kanade 光流追蹤方法進行彩色影像之地圖位置匹對，於同時再將影像投影至光達點雲，即能得到彩色點雲資訊(圖 3-9)。

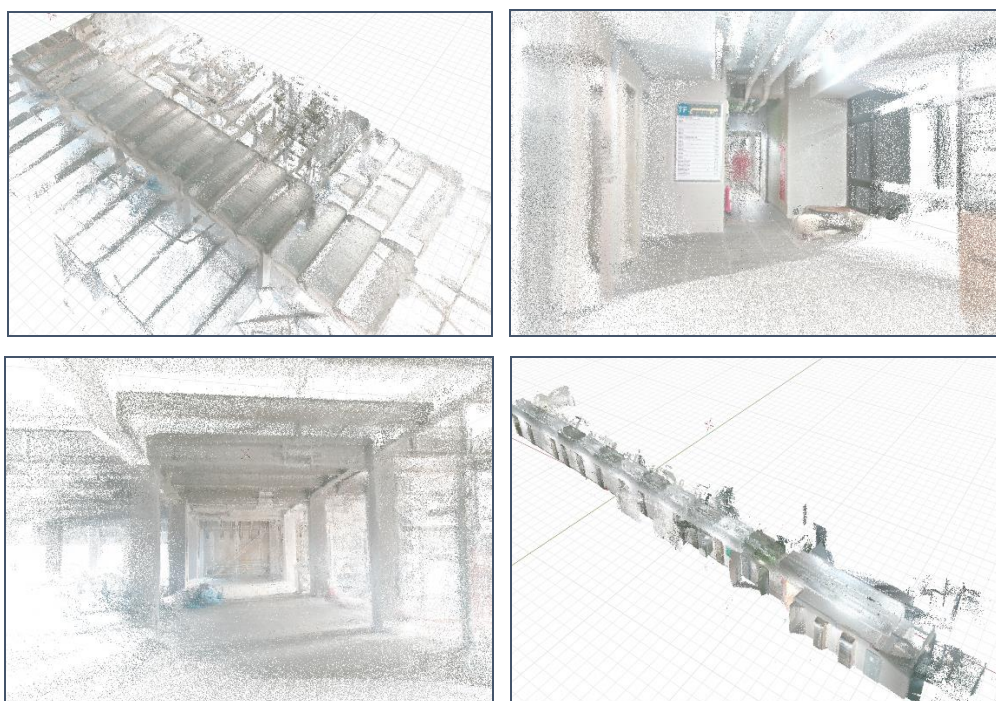


圖 3-9、彩色相機結合光達 SLAM 之結果(本研究整理)

肆、模型建立成果之比較(表 3-2)

本研究於資料以及點雲重建之階段，採用眾多的演算法方式進行，其理由為希望建立高品質、高精度的點雲，且希望此點雲能夠於後續深度學習模型使用，並且能夠精準的進行分割後再進行精準度運算。環景相機其使用性簡單，適合工地人員簡易利用，但其建立之點雲雜訊較多，不利於後續深度學習模型分割使用。單眼相機則因其鏡頭變形較小，能夠利用其建立較為平整之點雲模型，但需要專業攝影人員進行相片拍攝，且其拍攝時間需要較長。空拍機搭載高像素鏡頭所其建立之點雲則相當完整，因空拍機能夠以較大視野拍攝建築構物，本研究搭配之鏡頭為平面鏡頭，其變形並不如環景相機嚴重，能夠確保其建立點雲相對平整，但因本案案場其飛行限制，空拍機於本案則較無發揮空間。深度相機以及光達所採用之 RGB-D SLAM 或光達 SLAM 其建立之點雲相對前述影像式點雲建立方法，其建立之點雲擁有真實空間資訊，能夠測量真實幾何關係，兩者皆須透過專業人員操作。RGB-D SLAM 所拍攝之點雲其平面平整，但因本案儀器限制無法拍攝大範圍之點雲。本案所採用光達 SLAM 所拍攝之點雲平整，且受利於其建模演算法，能夠成功建立完整工地點雲模型，但因本案利用之光達設備限制，其點雲密度並不如深度相機所拍攝之點雲。

表 3-2、模型建立成果之比較（本研究整理）

	環景相機	單眼相機	空拍機	深度相機	光達
特殊限制	無， 方便度高	需專業拍攝 手法	操作人員執照 飛行區限制	需穩定姿態 操作複雜	需穩定姿態 操作複雜
目標	大面積之 場所	部分構件局 部細節	鋼構施工階段 完成	部分構件	任何
建模耗時	長	長	長	短	短
點雲成果	雜訊較多 精度較低 破洞明顯	平整且完整	平整且完整	平整且完整 精度高	平整且完整 精度高
精度	公分級	公分級	公分級	公分級	公分級

第四節、點雲與 BIM 模型疊合

利用前述多種方式所建立之三維點雲重建，影像式點雲重建方法如環景相機、單眼相機、空拍機鏡頭等因其應用之演算法只能獲得空間之相對資訊，並無真實空間以及幾何資訊。而 RGB-D SLAM 以及光達 SLAM 所重建之點雲，能夠擁有真實幾何長度資訊。

然而本案拍攝無搭配全球定位系統等定位系統，其建立之點雲並非處於真實世界坐標中。綜合上述，本案所採用之點雲拍攝方式，受限於演算法或者儀器限制，必須利用與擁有真實空間資訊之 BIM 模型作為地面真象(ground-truth)進行對齊(圖 3-10、圖 3-11)。除此之外，BIM 模型亦可作為點雲模型誤差判斷之其中一種指標，藉由熱顯圖顯示誤差結果。

本研究將由影像所建立之點雲利用既有之 BIM 模型將其轉換為 FBX 網格模型和前述所重建之點雲三維模型匯入 CloudCompare 中利用點對點之對齊方式進行點雲對齊及大小自動調整至 BIM 模型之初步動作，再利用 ICP 演算法將點雲更精準地對齊至 BIM 模型所轉變之點雲模型之上，使點雲模型帶有正確之空間資訊。

透過 RGB-D SLAM 以及光達 SLAM 所產生之點雲，因其擁有真實幾何長度資訊，所以本案將其簡單旋轉至 BIM 模型之上即能初步對齊，再透過 ICP 進行精準對齊，即能得到對齊結果，此點雲相對影像式點雲，相對快速且簡易，即能對齊至 BIM 模型。已對齊之現地案場點雲模型比對原始設計 BIM 模型，即可以此誤差結果先進行初步誤差判斷。而後再利用誤差最小點對於 BIM 模型平面投射點之兩者距離判斷，將所有本案所建立已對齊之現地真實點雲模型利用此方法與 BIM 模型進行點距 BIM 模型平面最小距離運算比對，即能成功建立誤差比對熱顯圖（圖 3-10、圖 3-11），即能以視覺化方式初步判斷構件誤差。

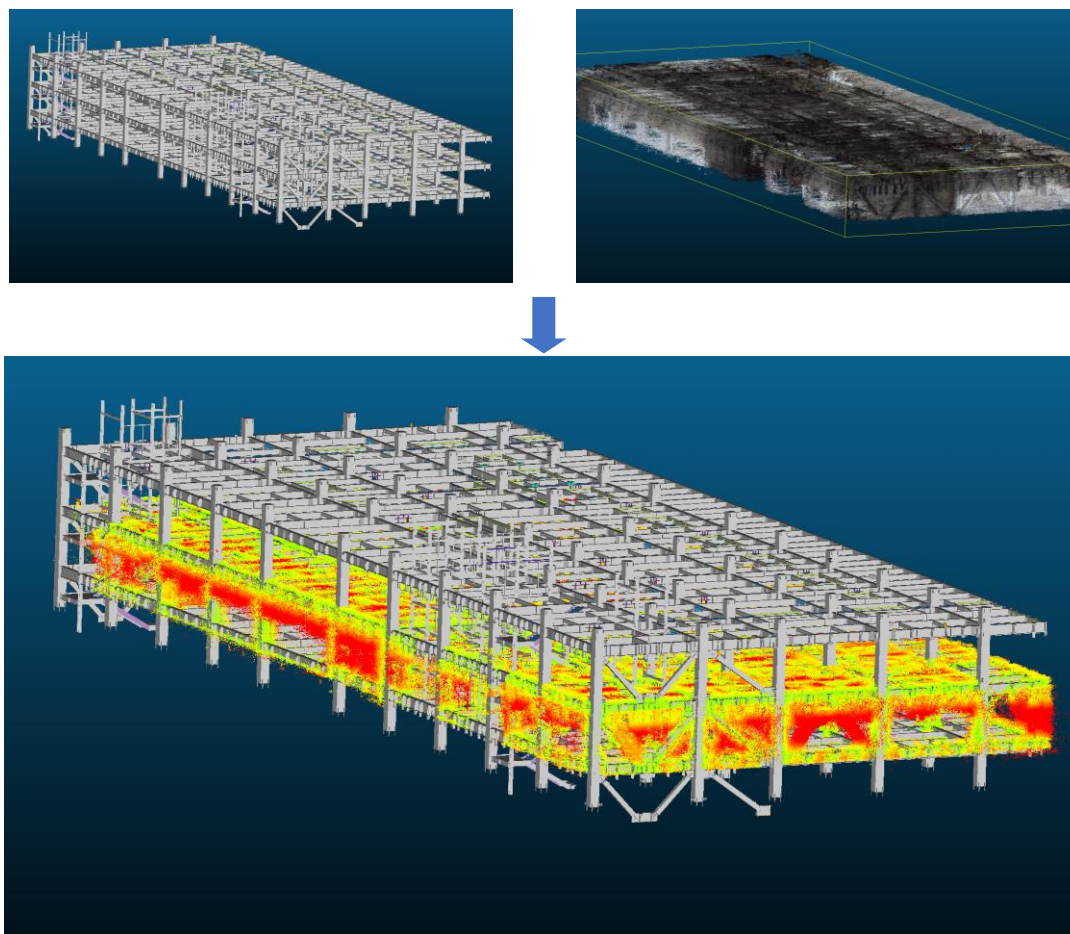


圖 3-10、BIM 模型與環景相機建立之點雲模型疊合。(左上) BIM 模型、(右上) 點雲模型、(下) 疊合結果 (本研究整理)

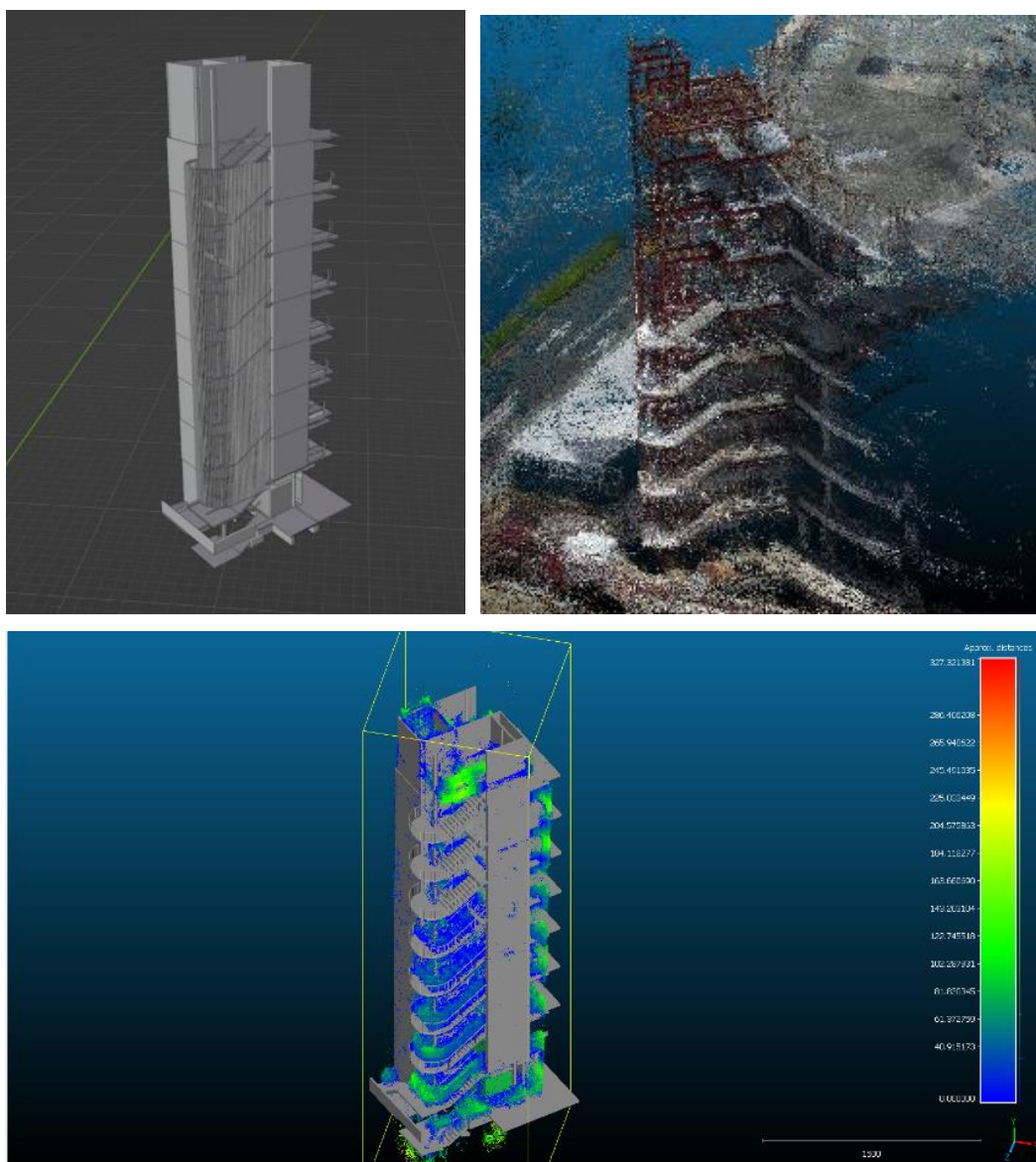


圖 3-11、(左)原始 BIM 模型、(右)鋼構點雲與 BIM 模型之疊合，綠色區域顯示公分級誤差（本研究整理）

第五節、深度學習點雲語意分割

於前述章節中，本研究可以得到三維點雲模型，其帶有顏色資訊、空間資訊、幾何資訊等，但對於點雲之種類，如牆、柱、樑、樓板等資訊，其並不能擁有，傳統研究於處理此種問題，必須透過多種演算法進行處理，目前也有研究嘗試利用二維影像語意分割再利用投影技術將資訊投射回三維點雲，但近年隨著運算硬體的快速發展，直接利用三維點雲進行深度學習儼然成為可能，但目前國內較無研究直接將三維點雲語意分割運用於土木營造行業，因此本研究於此階段將再透過三維點雲深度學習模型進行判別。本研究嘗試利用兩種分割方式其一為三維語意分割，另一為三維實例分割。

壹、 PointNet++：

此模型作為當今三維點雲語意分割模型之重要發展模型，有別於傳統 CNN 模型於資料輸入階段即將所有點雲特徵經過池化層進行處理，點雲因特徵較為複雜，運用此方法會簡化太多幾何特性，導致過度犧牲其所含資訊，因此此模型嘗試利用多層感知器將點雲投射到較高維度，再經過池化層後連接多層感知器分類點雲，即能保留更多點雲特徵資訊。因目前開源之工地點雲資料集，目前仍較為缺乏，因此本研究利用 Stanford Indoor 3D 為訓練資料集，其包含地板、牆壁、柱、梁、天花板等建築構件，並選用 Pytorch 為使用函式庫。

點雲之訓練需耗費較大之顯示卡記憶體空間以及運算力，其訓練需較長之時間與高性能之運算設備，本研究選用中央處理器 AMD 16 核 32 續、記憶體 128GB、顯示卡 NVIDIA 3090 24GB DDR6X，設定超參數批尺寸 32、訓練速率 0.001 並等隨訓練次數比銳減速率、優化器選用 Adam⁵、訓練次數設為 32 次、辨識目標有 13 個，選擇交叉熵為損失函數，約略訓練一天，最終得到其點雲平均辨識精準度為 83%，而其 IOU 為 52%，在完成訓練後，將前述章節之重建點雲放入此模型中，即能賦予點雲語意資訊，使其點雲擁有種類之

⁵ Adam Algorithm: <https://keras.io/api/optimizers/adam/>

資訊。

然而由本研究所訓練之 PointNet++ 之三維語意分割模型並不完全適用於本研究之辨識場域或者拍攝手法，影像式點雲如用環景相機其建立之點雲噪點過多，本研究曾嘗試套疊 BIM 之點雲以輔助點雲辨識，然而由於 PointNet++ 資料集本身是以室內點雲為主，辨識結果仍有錯誤。套疊 BIM 是一種提升辨識度的方法選項，然而整體而言，應先從資料集進行改善再輔助 BIM 進行辨識才會最有效益。而單眼相機以及深度相機建立之點雲則因過度局部，模型並無法成功辨識。光達則因點雲密度並不均勻，辨識效果於此模型較差（圖 3-13）。

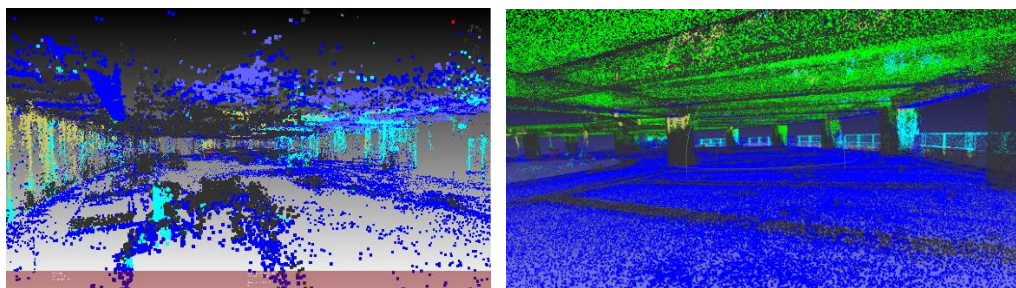


圖 3-12、點雲透過 PointNet++ 語意分割之成果(圖左)環景相機拍攝點雲分割效果，(圖右)環景相機拍攝點雲加上 BIM 模型一同辨識（本研究整理）

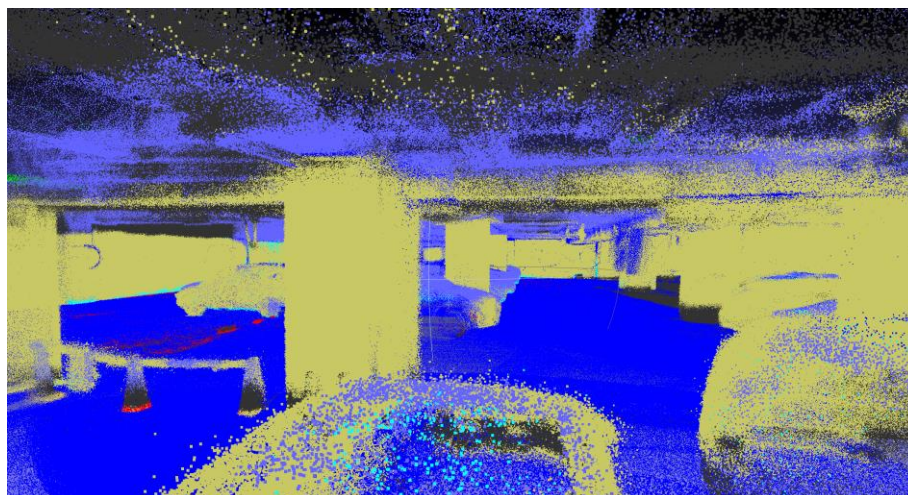


圖 3-13、光達利用 PointNet++ 分割效果（本研究整理）

貳、 SoftGroup：

根據前述得知，PointNet++ 語意分割如運用目前現有之資料集於本案之施

工現場，針對構件方面並無法得到良好辨識，因此研究團隊引進 SoftGroup 架構進行實例分割。語義分割會為圖像中的每個像素分配一個類別，但是同一類別之間的對像不會區分；然而不同於語義分割，實例分割只對特定的物體進行分類。兩者的不同之處是語義分割輸出的是目標的邊界框和類別，實例分割輸出的則直接是目標的 Mask 和類別。

承上所述，本案原先計畫利用 PointNet++ 進行語意分割後再透過 DBSCAN 集群演算法以達到實例分割效果，但新採用之 SoftGroup 即一次性解決語意分割以及集群問題。

此模型首先利用 U-Net 網路架構將輸入點雲之 x、y、z 位置以及 r、g、b 顏色資訊進行特徵提取，並訓練以及利用兩個小型 MLP 模型，針對點雲進行語意分割提取以及個體質心分數評分，且確保兩模型能夠取出點雲類別分數以及其對應物體中心，在得到兩項分數後，利用相對同質心物體不同種類之點雲計算 IOU，並設定閾值將背景以及真實群集過濾，後續再將多個群集放入一個小型 U-Net 模型提取特徵，並放入三個 MLP 模型，分別計算種類、分割形狀、集群分數，即能透過分數閾值設定，將點雲真正分割為精準的實例分割結果。本研究選用中央處理器 AMD 16 核 32 緒、記憶體 128GB、顯示卡 NVIDIA 3090 24GB DDR6X，設定超參數批尺寸 4、優化器 Adam、學習速率 0.004、訓練目標物 13 種包含牆、柱、地板、天花板等 S3DIS(The Stanford 3D Indoor Scene Dataset)中之標註物、訓練次數為 20 次、並利用由 HAIS 所訓練之預先訓練模型參數，選用 S3DIS 為訓練資料集，最終 AP(Average Precision) 為 52.7%、AP_50 為 65.5%、AP_25 為 72.3%、IOU 為 67.9%、Acc 為 89.4%。

本研究再將前述步驟所拍攝之點雲放入此模型中進行自動化實例分割，發現由環景將所拍攝之點雲其分割效果較不理想(圖 3-14)。深度相機則是能夠讓模型最完整分割，應為其拍攝手法與所訓練之資料集採用之拍攝手法相近有關(圖 3-15)。而單眼相機所拍攝之點雲能夠交由模型分割，但偶有雜訊(圖 3-16)。光達則是相對深度相機較為方便，能夠一次性分割多個元件，於本案乃因得利於其設備以及使用演算法，但於局部特徵，並無法如深度相機所拍攝之點雲擁有良好分割性(圖 3-17)。

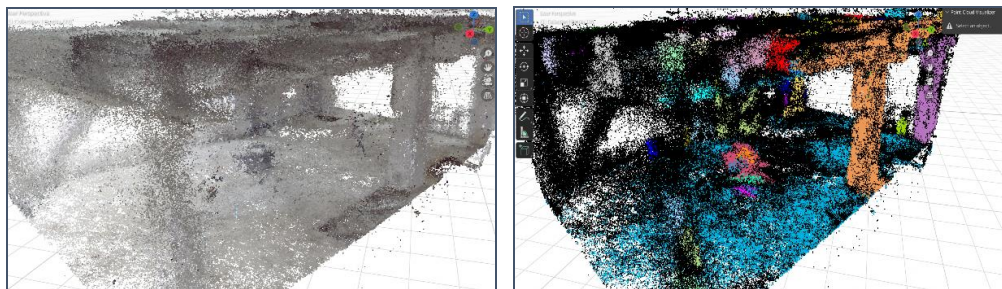


圖 3-14、以環景相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)

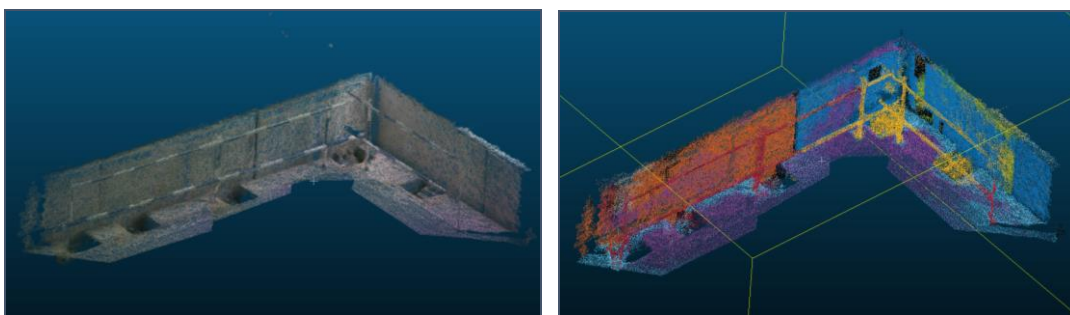


圖 3-15、以深度相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)

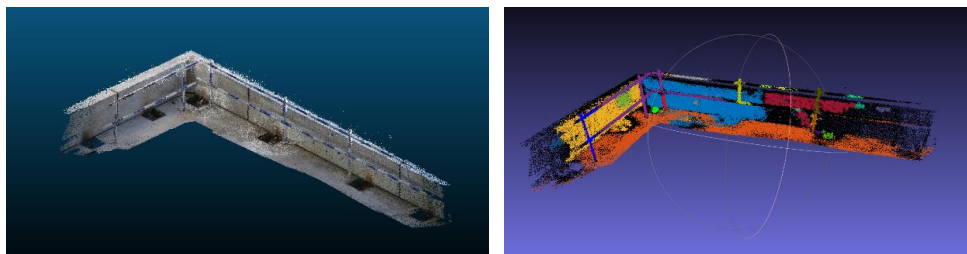


圖 3-16、以單眼相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)

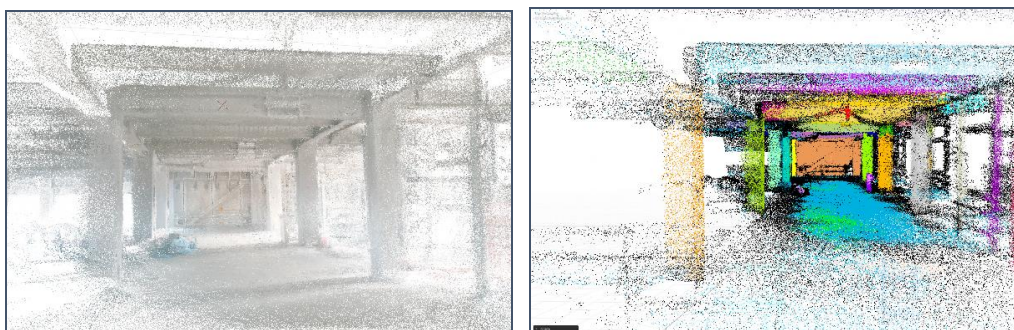


圖 3-17、以光達建立之點雲模型進行語意分割成果。(左) 分割前、(右) 分割後 (本研究整理)

第六節、安裝準確度比較

壹、平面分割 – RANSAC：

將由前述章節所得之實例分割結果，將多個構件個別提出，並再利用 RANSAC 演算法進行平面偵測，此演算法會根據所設之閾值數量自動選擇隨機點雲平面，並根據所設定之誤差範圍計算平面內之內群點，其他未被選取之點即為外群點，經過反覆迭代，並記錄包含最多內群點之即能得到多個最佳平面，而此平面即為構件平面。將偵測之平面利用平面方程式進行運算即能得到其交角，再利用平面點雲相差平均距離，即能得到平面距離，利用此方法即能自動得到構件交角以及距離，本研究所設定之最佳耦合平面參數根據本案所設定為距離限制 1、選用 10% 已辨識構件點雲數量作為隨機平面構成點雲個數，迭代次數設定為 1000 次，本研究以此參數即能成功建立辨識構件平面(圖 3-18、圖 3-19)。

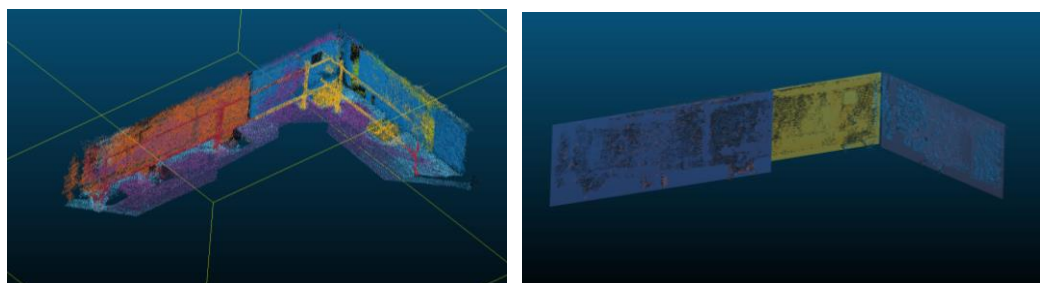


圖 3-18、(左) 深度相機點雲模型之語意分割成果、(右) 利用 RANSAC 進行平面偵測之結果。
(本研究整理)

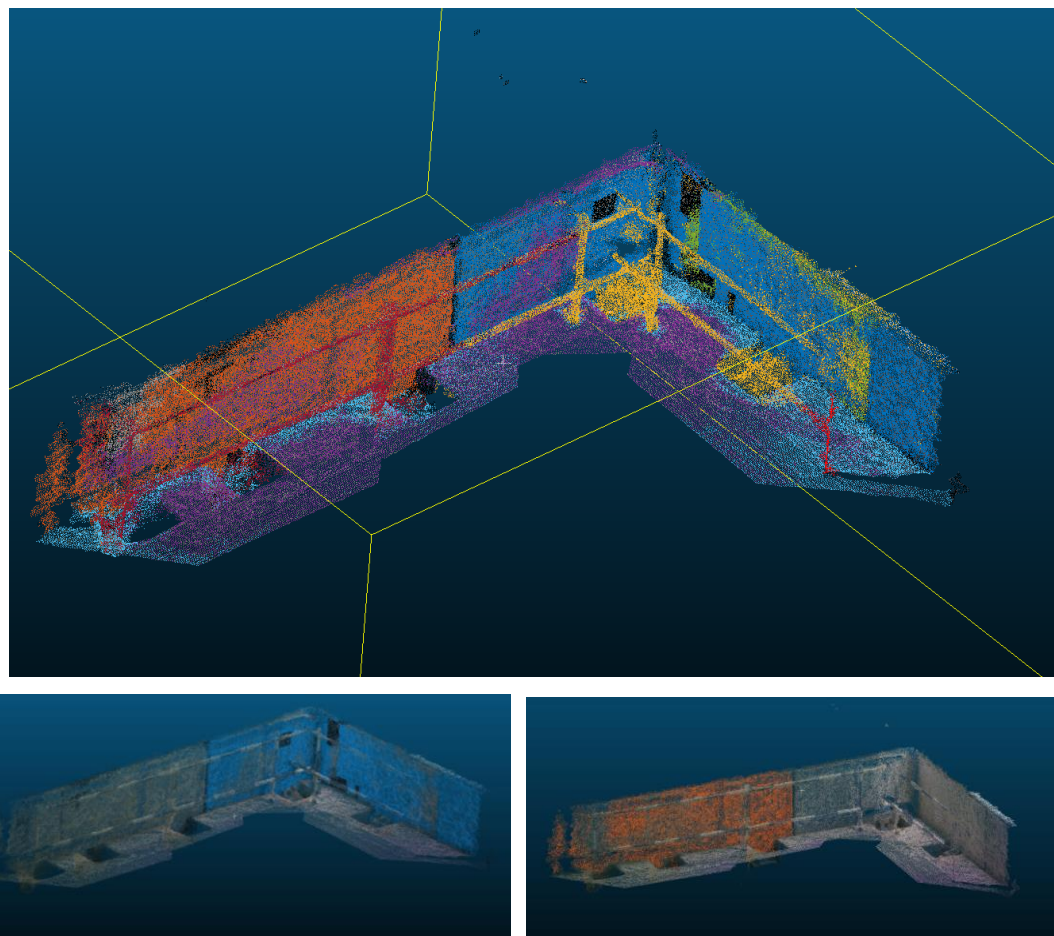


圖 3-19、以深度相機建立之點雲模型進行語意分割成果。(上) 分割成果、(左下) 分割牆面構件 1、(右) 分割牆面構件 2。(本研究整理)

貳、平面誤差判斷

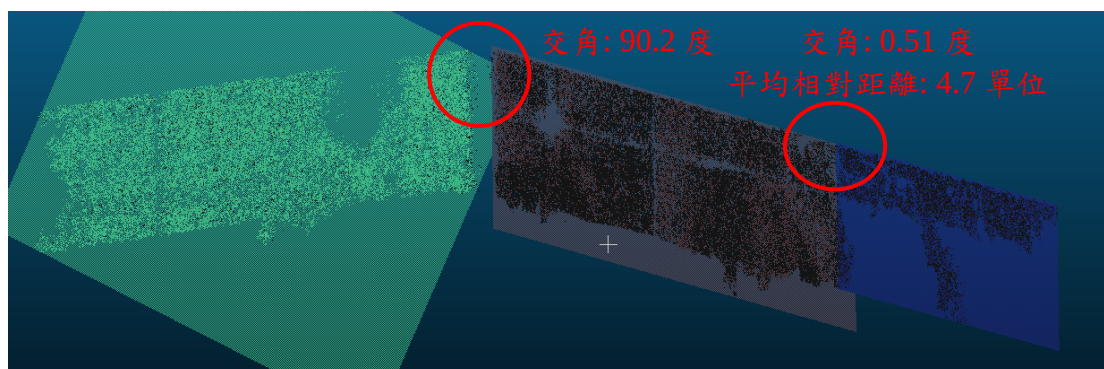


圖 3-20、單眼相機進行平面誤差判斷 (本研究整理)

將偵測之平面利用平面方程式進行運算，即能得到其交角，再利用平面點雲相差平均距離，即能得到平面距離，利用此方法即能自動得到構件交角以及距離。最終本研究將所偵測之平面，利用前述 RANSAC 演算法取得不同構件各自同平面，並利用平面方程式以及平面點雲進行運算，即能得到其交角，平面點雲相差平均距離即為平面距離，利用此方法即能自動得到構件交角以及距離，本研究在篩選能夠有效運用於本案之目標點雲後，利用一共中山區某建築工地預鑄外牆構件十八個樣本點雲場景，得到此場地之預鑄外牆構件交角誤差平均為 0.51 度而平均構件平面距離為 2.00 公分(圖 3-20)。

第四章 專家座談會

本團隊期望能理解業界對於此案研究內容之看法，以及針對業界需求將研究方向進行調整，因此舉辦兩場專家座談會，邀請經驗豐富、來自各大廠商的業界人士。本團隊已對於座談會內容進行整理，並在兩次座談會後分別對專家建議於本案進行探討。

壹、座談會內容

一、精度：

安裝錯誤的判讀，若能與本案所發展的技術結合並以點雲分解設計圖的各式構件，能有效滿足真實設計需求。目前檢驗柱子垂直度的方法過於費工，需要工程師與承包商一同逐一檢查。若無人機能透過事前分析大範圍地即時反應墊片高低誤差，對於精度幫助很大。然而預鑄工法的精度要求需要至少 6 公釐以上，研究團隊需要想方設法再提高精度等級，才能有效應用於案場實作。

二、預鑄產業：

在工資與工料不斷上漲的時代，預鑄產業成本緊隨著產業趨勢，即將與傳統場鑄工法成本發生黃金交叉。隨著國內多項預鑄工法專利即將到期，是全面推廣預鑄產業的大好時機。預鑄產業雖然看似蒸蒸日上，但是人才之培訓不易且耗費時間，新公司於初期營運需投入的成本龐大，目前產業市場多由大公司把持產能，對於小公司而言難以為繼，需要更多公司參與合作，提升產業競爭力。

三、營建自動化：

營建自動化如：混凝土 3D 列印、鋼筋自動化、繪圖自動化等可以有效降低建築人力成本。另外透過建立數位資訊整合平台，引進 KPI 績效管理，將營建資訊除了 BIM、再結合類似 synchro 4D 等流程整合系統一併統至一個模

組化的數位平台後自動判讀施工進度。平台可以提供全套的模組化流程、標準化設計圖，並且透過模組化整合生產提升效率、有效降低成本。

貳、 政策向建議

政府推廣預鑄，惟目前社會住宅受限於基地大小，產量難以有效提升，可以透過修法提供都更危老住宅的稅制減免。亦或是修改規範建物中的預鑄工法比例及提升容積獎勵等方式，新增預鑄工法的獎勵選項，激勵各家廠商投入預鑄產業，提升產業競爭力。另外，營建自動化與預鑄產業的人才培養不易，建議政府機關協助相關獎勵措施與推動產學合作，進一步培養相關人才。

第五章 結論與建議

壹、 結論

本研究利用純視覺方式建立之點雲於深度學習模型(PointNet++)中分割效果不彰，但仍可將成果與 BIM 做比較。使用較低難度的方式取得點雲成果，能與 BIM 疊合後做出簡單的初步分析。

本研究成功發展出一套關於如何迅速檢驗預鑄工程精準度的流程與架構。以往傳統方法若要完成一層樓板的檢驗至少需費時半天，且耗費人力資源。本研究所研究之流程架構除了將檢驗流程與吊裝施作平行執行，只需少數人員操作儀器即可，不僅省時也省工，在這個工人薪資大幅上漲的背景下，也大幅減少施工成本。根據傳統檢驗流程，檢驗完成時僅留下一張精度檢核表供施作人員參考，不僅檢核範圍小，也難以作為後續維運依據。倘若使用點雲模型作為檢驗依據，不僅可由誤差大小排出整層樓之誤差調整優先順序；維運階段仍可憑著先前點雲模型做出調整。

本研究的創新方法引用人工智慧深度學習，如：PointNet++、SoftGroup 等等，嘗試不同的深度學習演算法，找出有效結合 BIM 模型之方法，進行誤差分析之判斷。本研究從最初步且經濟的角度出發，尋找深度學習與影像辨識技術於工程領域之有效應用與可能性，不足之處惟受儀器之精度限制，難以結合 BIM 在公釐級別的誤差上呈現有效效果。

本研究提出能夠利用本案所自動化介入之階段或預鑄構件施工種類，嘗試了多種儀器以及其影像蒐集方式，從中整理出各方法之優缺點並相互做出比較。並且本案完成如何運用點雲模型和深度學習、BIM 技術進行預鑄構件誤差判斷之架構，後續將會加強此架構完整性以此利用。

於眾多點雲建立方法中，我們得出以下結論：

- 環景相機：因其點雲有破損及噪點過多，分割效果不彰。
- 單眼相機：因點雲完整良好，分割效果良好，但因其無真實空間資訊，

只能計算相對角度及距離。

- 空拍機：因空拍機為特殊需求使用（人員無法到達之場所、未進行模板施工之鋼構樓層），而在此不多做討論。
- 深度相機：點雲良好且完整，分割效果良好，因有真實空間資訊，能夠計算真實角度及距離。
- 光達：點雲良好且完整，分割效果良好，因有真實空間資訊，能夠計算真實角度及距離。

本研究發現於本案應用光達無論於精度、速度、穩定度等，都優於其他本案建立點雲之方法，後續將會利用光達蒐集更多案場資料提出分析。

貳、建議

研究進行之預計進度符合預期，而初步結果也證實運用深度學習、BIM、點雲模型進行預鑄元件安裝精準度分析之可行性。然而在進行中也遇到相關困難。其中一些困難預計可以在未來進行更深入的探討。初步建議如下：

建議一

結合 BIM 及感測技術進行即時建築構件安裝檢測：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系

建築構件安裝精準度檢驗流程往往需要經過多次查核，並與測量人員協調時間以完成最後核實。整體流程除牽涉人員多、間隔時間不定外，也容易因為時間之耽誤，造成最後檢驗結果的誤差。近年來在預鑄構件及鋼構件的應用愈趨廣泛下，檢驗流程的最佳化，以及誤差反應的即時性也更顯重要。同時間，有此檢驗需求之相關建築構件多數具有對應之 Building Information Modeling (BIM) 模型。整合 BIM 至檢驗流程，並輔以最新之感測技術，「即時」提供安裝檢測結果，並加速檢驗流程，提供正確結果，為相當重要之研究課題。建議統整並應用先前之研

究成果，加強其中技術之即時性，更加貼合目前業界需求。

建議二

預鑄元件資料庫建立，作為後續研究對模型與真實物件進行分析參考：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系、財團法人台灣建築中心

目前影像及點雲資料庫仍以一般建築相關元件作為資料蒐集對象。主要考慮針對不同元件，先進行構件資料採集後，建立三維模型。舉例而言，鋼構在施作上很常遇到安裝誤差的狀況，若是增加蒐集鋼構元件的影像資料，可以利於拓展研究的面向，將鋼構安裝精準度的部分也同時納入考量。另外，BIM 模型元件也可以轉換成點雲模型做為參考對象，若繼續增加各種 BIM 模型元件，對於點雲資料庫的完備也有效益。

建議三

深度學習模型資料庫建立，提升後續研究對模型與真實物件自動辨識精準度：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立臺灣大學土木系、財團法人台灣建築中心

舉例而言，目前 PointNet++ 室內點雲資料庫為室內點雲居多，過往辨識模型仍以室內資料集為主要搜集對象。建議可研擬推動針對施工案場現地資料豐富資料集，強化深度學習模型之物件辨識能力，間接提升案場誤差辨識精準度。

另外，本研究也針對研究內容中未來可行之方向進行以下建議：

一、 整體系統整合

目前各個資料蒐集方式尚為各自獨立運行，缺乏整體系統的整合，若能同時結合各資料來源，建立一整合之點雲模型，則可利用到不同設備之優點。然而，整合系統具相當難度，主要因為各系統包含許多不同

技術，且各自皆有缺點，必須利用更艱深的方式在整合系統中去除缺失。

目前的初步概念為，將深度相機、光達、環景相機、單眼相機整合為同一系統（即將上述儀器安裝整合成可一起進行資料蒐集之自製儀器），並利用自動化資料蒐集方式，同時蒐集不同來源之資料並於點雲模型建立後整合。

二、 資料自動化方式

目前資料蒐集的過程仍為手動，造成許多不確定性。即使在人員受過完整訓練後，根據實際現地不同狀況，蒐集成果產生之點雲完成性及準確性會有影響。若能透過較為自動化，或者半自動導引提示方式將可保證最後點雲生成結果。可以進行方式為透過開發手機軟體等。但目前研究仍針對個模組之實際應用程度進行討論。

三、 三維語意分割輔助增強

因三維點雲語意分割模型其資料集對於場域特性辨識度要求度高，在不同場域以及不同條件之地點較難以完全符合。因此，利用更純熟之二維彩色相片語意分割輔助三維語意分割模型，在擁有符合本案條件之資料集建立前能以先行使用搭配，其能利用在建立點雲同時建立與蒐集之彩色相片、相機內外方位角進行，首先利用二維語意分割模型針對彩色相片進行分割提取遮罩，再利用針孔成像原理透過相機參數反投影遮罩，即能得到三維語意分割模型。

四、 點雲模型與 BIM 模型之即時性比對

若能建立一整合系統，在整合設備之中加入微型電腦，將所蒐集之資料進行即時建模，並同時與 BIM 模型比對，另可安裝一螢幕將比對成果以及誤差數據立即呈現出來。然而同樣地，技術的整合一樣是未來研究的瓶頸與重點，且以現行技術，建立模型與整合比對需要一定的硬體效能，若考慮研究成本，目前微型電腦普遍效能尚無法處理此流程，未

來應考慮成本較高之高效能硬體設備進行研究，或待硬體端有更進一步發展。

五、點雲模型噪點處理

由於點雲密匹配影像有座標量測誤差、反投影誤差(內外方位誤差)、分類誤差等等因素，影響相同建物之體元群於前後期的位置與類別有誤差，將形成建物外圍薄殼狀之雜訊。未來可針對模型資訊的噪點進行過濾並且針對點雲前後排列形成之遮蔽物差補正方式進行研究，強化物件辨識能力、提升誤差分析精度。

六、加入地面控制點

三維空間中的點雲模型，存在排列產生之遮蔽誤差。探討加入地面控制點後，利用 GPS 座標、通過在收集任何數據之前標出已知坐標，藉由此明確定義的中心，與設置的坐標對齊。討論是否可以強化點雲模型之精準度並同時解決大面積使用時之累積誤差，提升模型辨識誤差精度。

七、不同施作場域探討

為增加本研究技術之可用性與價值，探討不同施作場域之誤差容許值，例如：基樁放樣偏心誤差為正負 7.5cm 內；建築工程模板組立時，檢驗模板彎曲、膨脹、平直情形，垂直容許誤差 $\pm 20\text{mm}$ 、平面位置容許誤差 $\pm 25\text{mm}$ 。上述不同施工階段，若使用本技術目前所達成的精度能力來檢測，可以滿足業主檢驗需求的精度誤差。

參、本研究已完成之工作項目

- 一、提出一結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析策略，已撰寫於成果報告書第一章第柒節。本研究分析安裝流程中何時有精度要求，成為本案研究內容之介入時機。使用者將先在工地進行相關影像資料蒐集，包括環景影像、一般相機（廣角相機、單眼相機、空拍機鏡頭）影像、

深度影像、光達 彩色相片。影像將輸入 3D 點雲模型重建模組中 (3D 幾何模型與影像空間定位)，建立工地現實之點雲模型。重建之點雲模型將透過簡單座標轉換計算與 BIM 模型疊合，疊合後之模型可利用深度學習進行辨識，以此提出一套分析安裝精準度的策略。

二、 規劃一結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析之系統架構及內容已撰寫於成果報告書第三章。本研究探討安裝精準度之前，針對安裝精準度的流程進行相關研究與探討。傳統吊裝檢驗流程。傳統吊裝檢驗流程費時費工，必須待版片吊裝完成後，測量工班人員才得以進入量測，本研究提出一關於如何應用本研究之安裝精準度分析之系統架構，減少人力成本、檢驗時間。

三、 透過結合 BIM 及深度學習之預鑄構件及鋼構件等安裝準確度分析技術示範系統架構，進行實際案例操作，已撰寫於成果報告書第三章之第四節及第五節中。本研究藉由將中山區某建築工地預鑄外牆構件十八個樣本點雲場景，使用前述之成果進行偵測辨識，其成果之平面利用平面方程式以及平面點雲相差平均距離進行運算，可得到交角與平面距離，藉此得出誤差值。另外，本研究將環景相機所建立之點雲模型套疊 BIM 模型後藉由熱顯圖可視化真實構件與設計模型之誤差。

四、 辦理一場成果說明會，已於 2022/10/25 於大坪林大樓 15 樓國際會議廳辦理完畢，活動內容撰寫於本冊第 67 頁。

附錄一、採購評選會記錄與回應

內政部建築研究所 111年度「應用建築資訊建模(BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝」委託研究計畫案 審查意見及廠商回應一覽表

項次	審查委員意見	廠商回應
1	本研究目的是進行安裝準確度的分析，還是輔助進行精準安裝？如果只是完成準確度的判斷，如何做到服務建議書中所提到「預期雛型系統成果藉由先進人工智慧技術提升預鑄元件安裝準確度」？應進一步說明。	本計畫目前先以在安裝過後進行影像資料蒐集，並透過本計畫研發之自動辨識技術與 BIM 比對判斷安裝準確度，協助安裝品質監控為主要目標。未來此技術可進一步發展，應用於即時示警系統。
2	本研究屬施工過程智慧化程序的應用，如何應用於服務建議書研究緣起中提到的可應用於智慧建築的部分，應再具體說明。	本計畫由研提之所有工程影像資料蒐集、三維點雲之建立等，圖資化建築過程與所獲得的資訊，可進一步與 BIM 結合，將施工與設計整合，以應用於未來智慧建築設施維護管理。
3	請說明「建築構件」在研究團隊日後執行的計畫中如何定義？	主要預計將包含鋼構件與 RC 預鑄樓、柱、板、牆建築構件。
4	目前研究團隊提出的整合作法，與國內外類似的作法的主要差異為何？	本計畫預期將整合影像資料蒐集、三維施工模型重建、點雲語意切割以及準確度分析。除整合系統外，在準確度判斷中應用語意切割亦為創新應用。
5	研究目的似乎要解決安裝準確度，請說明目前實務上的問題及困擾，實務上的解決方式為何？目前提出的技術/工具/方法是否針對上述問題進行研析。	目前預鑄工法實務上在安裝過程後並無自動化方式進行工程檢驗查核，檢驗過程往往需要耗費許多人力並且耗時。而建築構件間之安裝過程容易發生接合處緊密度問題，造成後續品質管理問題。本計畫將研提的技術主要希望藉由自動化系統，整合不同方法並協助過去耗時及人力密集之問題，並且及時發現品質問題，提早解決時間。
6	最後的成果/交付成果為何？建議清楚說明。	本計畫之交付成果之示範系統架構包含整套分析流程、所收集的照片、學習資料、訓練後的辨識運算法，並以實際案例輔助解釋。

7	原提出的可能遭遇問題，以及目前提出的作法，如何解決本土化的問題。	為了解國內外作法之差異，除本研究計畫書提及之國外案例外，也會加入本團隊於近兩年蒐集之國內資料並持續擴增以因應國內外營建工程工法差異。計畫其亦將持續蒐集影像，擴增本土營建工程影像資料集。
8	本研究計畫是針對構件精度或是安裝的精度？	本計畫主要針對安裝準確度。
9	目前 RFID 可解決安裝定位問題，那麼解決安裝精度問題能帶來什麼效益。	本計畫主要將解決建築構件安裝之精準度，可將品質管理系統化，及時發現接合問題。並且建置之方法未來可應用於即時示警的研究，將能於工地進行實時監督。
10	未來用什麼方式交付成果？程式或雲端網頁。	同第6點回應內容。
11	本研究計畫是採預測預防，或是施工中控管，亦或是施工後檢驗？	本計畫會先進行施工後檢驗的部分，並同時建置足量資料庫以供未來能做到即時預警。
12	營建物件很多元，採用 Pointnet++ 的理由為何？	Pointnet++ 方法應用範圍較廣，預計較能有效針對建築元件點雲進行切割。
13	無人機應用、相機鏡頭如何在施工中的工地進行點雲搜集。	工地現場環境複雜，針對遭遮蔽物件，建立點雲時亦會運用深度資訊進行分析減低遮蔽影響。
14	請說明稀疏點雲、密點雲使用的地方？	稀疏點雲用於協助密點雲生成，密集點雲用於後續語意分割、準確度分析等任務。
15	本案包括辦理1場成果說明會，惟未在服務建議書之甘特圖中顯現。請問預定辦理之時程為何？	成果說明會預計11、12月辦理。
16	依甘特圖規劃，「蒐集影像資料」之工作為期6個月，請說明如何執行？影像資料來源為何？	本計畫拍攝工作需要研究人員去工地，用穩定器輔助的360相機進行拍攝。預計蒐集頻率為每個月3-4次。
17	目前國際上是否已有類似技術應用於工程實務？	依據目前所蒐集到的資料，國際上並未有本計畫所提出整合各方法之應用。僅有各別方法之應用，如應用點雲進行品質管控。
18	本案成果可否產出專利？適用對象為何？	本計畫所提出之方法有機會產出專利。適用對象目前以營造廠為主，但並不受限。

19	本案編有「勞務人員」費用，惟其時薪為50元，低於基本工資168元/小時，請修正。	此部分應為誤植，會修正。
20	本案經費配置「(四)設備使用及維護與租金等」列有「電腦工作站」、「影像蒐集設備」，分別編列6萬元及9萬元，且依甘特圖表示「蒐集影像資料」之工作僅為期6個月，以此考量，本案編列之租金價格似有偏高之虞，請合理調整金額。	此部分應為誤植，會修正。
21	本案翻譯費用編列2萬元，請說明預定參考並翻譯哪一國的資料？該國目前發展情形如何？	翻譯費為用於後續論文發表之英文編修。
22	精準安裝需解決的問題何在？如何持續解決。	本計畫欲解決的主要問題在於缺乏人工以外的系統查驗方式。在目前影像資料蒐集應用越來越多的趨勢下，應與自動辨識及 BIM 結合，並在未來持續與機器人整合，達到工地智慧自動化。

附錄二、審查會議回覆

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
期中審查回覆表

委員	審查委員意見	研究單位回應
施教授宣光	研究團隊提出很清楚的說明，對於過程中使用的點雲模型及深度學習針對建築資訊模型進行比對的研究成果取得重大的貢獻。	感謝肯定。
	建議可以針對深度學習的部分做進一步的說明，例如學習案例的取得、學習模型的建構、學習的目標，以及學習成果分析等等。	後續將參考本次會議意見補充深度學習的相關說明。
	關於精確度的提升，是否有運用大量的資料透過適當的演算法提高精確度的可能性	有關精確度的部分，在未來硬體以及加入更多不同處理方式的情況下一定能提高。
林教授祐正	非常肯定研究團隊之期中成果，本研究成果應可以提升建築構件施工安裝效能及精準度	感謝肯定。
	建議研究團隊可以補充未來實際導入可能會遇到的問題及困難	案例實際導入情形將於後續補充。導入案例的部分會包含流程建立，以配合不同案例的流程差異以及使用工具不同所帶來的影響，讓使用者能參考並選擇適合的工具作使用。
	宜補充說明使用不同方式蒐集影像（如環景相機及深度相機等）之結果及建議	同上。
洪建築師迪光	市場上目前缺工缺料嚴重。此研究案對節省高空危險工程之人力等，都可產生很大效益，非常有意義	感謝肯定。
	精準度是未來重點，目前提出精準度 2cm 一定要達成並再提升，此才是最要緊。並請考量工地清潔度、天氣溫度、濕度是否會有影響	工地的狀況與環境都會對拍攝的成果造成影響，因此團隊開發不同工具搭配使用來減少環境對影像品質的影響
	導入案例建議採用工廠案例最能	廠房案例對本研究的利用性確實較

	發揮功效，應為重複跨距，且最容易檢測出錯誤，大跨距、重複性、鋼構、預鑄，是最佳案例	高，惟其管理嚴格，配合上較為困難。
	請說明此研究案需要那些設備，高階費用及低階費用各如何	將於後續補充使用工具不同所帶來的影響，讓使用者能參考並選擇適合的工具作使用。
	可考慮召開國際性視訊會議，參考國外目前 BIM 自動辨識進展情形	將參考並納入未來研究建議。
	深度學習資料宜再加強補充說明	後續將參考本次會議意見補充深度學習的相關說明。
高組長文婷	建議未來可考量與現行三級品管規範作結合，奠定預鑄施工規範的基礎	後續若有機會將與相關單位進行研擬。
內政部營建署 姚分隊長怡君	肯定本研究結果，惟考量國內預鑄工法於不同廠商、不同構件及不同工址條件下，均有不同之接合施工方式，預鑄構件安裝亦受半預鑄或全預鑄工法影響，爰國內暫無統一之預鑄構件安裝標準及資訊(如尺寸、材質、規範及維修頻率等)。建議後續邀集國內專家學者及廠商共同研析標準化構件安裝準確度資訊(如：施工步驟、檢(查)驗資訊、查核點示警、動(靜)態結構模擬、災防模擬等)，將 BIM 構件更細緻化，以供設計、監造、施工、維管、審查單位有可參考之準則	後續若有機會將與相關單位進行研擬。
臺北市建築師公會 林建築師煒郁	期中報告第9頁中(四)...本研究利用既有之 BIM 模型「傳換隔是」後...應為錯別字請修正	將會進行修改。
	本研究優勢是可以檢測不容易到達處，如高空或危險點可利用本技術，建議可以有完整之實際案例操作配合說明	案例實際導入情形將於後續補充。導入案例的部分會包含流程建立，以配合不同案例的流程差異以及使用工具不同所帶來的影響，讓使用者能參考並選擇適合的工具作使用。
	目前研究是針對精準安裝做學習及辨識，建議未來也可考慮是否可以應用至施工階段的勘驗及竣工查驗等	後續將參考本次會議意見進行應用至其他施工階段之相關評估。

新北市建築師公會 林建築師大目 (書面意見)	專業術語定義建議加註關鍵詞，如 BIM、BIM 模型、BIM 建模等，如定義不同，請加註說明；如皆相同，請統一修正	將會進行修改。
	期中報告第 4 頁(二)模型建立之內容，建議補充模型名稱及摘錄詳細原理與方法	後續將參考本次會議意見補充深度學習的相關說明。
	期中報告第 17 頁表 3-1，影像資料中適用於本研究案之案例，建議將參照範圍、構件、內容等簡要敘述	後續將參考本次會議意見補充相關說明。
	期中報告第 23 頁，使用 BIM 軟體 Blender 套件之 IFC 檔，對其他 BIM 軟體所匯出之 IFC 檔，是否適用或有所限制，可考慮納入未來後續研究建議	後續將參考本次會議意見補充相關說明。
羅台灣 副秘書物業 長書管管理 紫學學會 萍理	預鑄工法是新加坡推動營造業轉型的重要科技，同時也是日本 i-Construction 中常見的應用。因此，本研究發展預鑄工法的精準安裝技術，可提升國內預鑄品質與可靠性	將參考並納入未來研究建議。
公司潤弘 王精密工 副總程事 經理業股 瑞份有 禎限	這三個計畫對產業都是相當實用的研究，期待研究可以順利準時完成，研究成果能透過多元管道供業界使用、擴散，使資源投入效益極大化	感謝肯定。
助理內政 研究部 員建 士築 明研 究所 陳	請補充說明操作過程是否是在單一構件施工完成即須進行拍攝。	後續將參考本次會議意見補充相關說明。
	是否可以利用多角度拍攝來提升精度	目前研究方法是利用多角度進行拍攝，固定式攝影機之圖資較難運用於本研究
	點雲建置花費的時間大約為何	就目前的設備與技術來說，單次點雲建置的時間需花費約莫半小時。

蔡組長綽芳 內政部建築研究所	建議可加強從使用者角度進行考量，補充在不同精度的狀況下如何使用，並表達本研究成果關於省時、省工之預期效益。	案例實際導入情形將於後續補充。導入案例的部分會包含流程建立，以配合不同案例的流程差異以及使用工具不同所帶來的影響，讓使用者能參考並選擇適合的工具作使用。
主席	預鑄工法的規範正在研擬中，請補充說明若只有蒐集點雲資料是否也能使用此技術	缺乏 BIM 的情形因缺少真實世界的座標做為參考，僅能得到元件間之相對位置及角度誤差。利用分割後點雲模型，經由計算後得到各元件之中心點以及表面之位置，再藉由比較可得到相對位置及角度誤差。具備 BIM 的情形則有真實世界的座標可供參考，能藉由比較點雲與 BIM 的位置差異與交角狀況獲取誤差資訊。

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
期末審查回覆表

委員	審查委員意見	研究單位回應
陶顧問 宇鼎	點雲中，因前後排列物件形成遮蔽等誤失，後續研究中需再深入探討如何將被遮蔽與微小的幾何面積更精進、填補。另外建議列出： 1. 異型構件之組合條件。 2. 殼狀構件（殼狀環片），請表現清楚並再於研究中說明。	未來會針對受遮蔽物與微小幾何面積的部分，做更深入的探討，提出如何解決。
	遮蔽案例，例如：新加坡環狀系統，點雲要有表殼；港中澳大橋，RFID鎖在螺絲上，馬上知道異動量是多少；航站二期，隱蔽部分的構件，重測測了三天，不斷用人工修改。	同上
蘇經理 瑞育	P.32 有兩點問題： 1. 補充是否資料為 lidar。 2. P.17 指出預鑄構件誤差要小於 6mm，與本頁量測現況 2cm 有點差距，是否加入地面控制點可以改善。	1.是。 2.現正在研究不同儀器設備的模型建立成果，利用不同儀器分別蒐集深度資訊與彩色資訊再做疊合，朝更加精準的精度之目標前進，未來會考量加入地面控制點。
	預鑄工法在設計階段就必須考量，但礙於採購法之限制，很難在設計階段就把預鑄工法納入考量，或者需要從法規放鬆等配套措施。	將參考並納入未來研究建議。
	是否能建議未來自動化，需提出一根據本研究方案量化之可提升的數值，例如：檢驗流程之效率比較。	本案於研究方法章節已提出相較於傳統檢驗流程更加精簡之檢驗方法流程。基於本案目前已有之精度能力，本團隊將持續朝提升精度之方向努力，即可提出本案方法之效率提升數值。
江經理 志雲	在現場施工吊裝，如能透過本案研究，提昇反饋時間以有實務效益。	將參考並納入未來研究建議。
	實務被要求點雲，用點雲自動檢測，可接受比較大誤差。不同案場，可以用目前精度能力。	將討論不同工程項目之精度要求，本案目前之精度能力，應有一些工項已可使用。

	資訊的反饋必須為肯定值，避免工地使用時不被信任，而降低使用價值。	本團隊會持續朝高精度要求之目標研究。
	由於點雲兩側之資料量太大，如何將大量點雲資料快速分類，以降低運算時間。例如：需要分離結構體（處理噪點），ex. 萊卡，快速把結構體分離，管子跟模型誤差距離，在自己的環境做比對。	大面積資料搜集，資料量過於龐大。即時性仰賴記憶體。團隊將進一步嘗試噪點的過濾處理。
	點雲大面積執行，點雲聚合過程中需要校正，否則造成誤差。	將參考並納入未來研究建議。
	每個元件允收誤差不同，可用性可能不同。例如誤差對於 MEP 系統要求較小，或許可以使用本案。	將討論不系統之精度要求，本案目前之精度能力，應有一些系統已可使用。
	點雲的 ICP，在較大的 Scope 時會有飄移，如何解決？	本研究非使用 ICP 進行，請參閱點雲使用 Fast-LIO 建置章節
	對於語意分割步驟，業界在使用上應會遇到困難。	將參考並納入未來研究建議。
	對於語意分割步驟，業界在使用上應會遇到困難。	將參考並納入未來研究建議。
洪建築師迪光	請再多增加現場實驗數據回報，交待試驗值及誤差度。本案為深度學習及自動辨識技術，除了理論應再加強實證分析。	報告書針對委員提出未來實務內容進行改善。
	請再加強分析國際在 BIM 建模，在深度學習領域與國際間之發展情形，並請和國內比較後加強論述。	後續將參考本次會議意見補充相關說明。
姚營 怡建 君署	目前國內大多為 RC，或許從公共工程統包工程開始，才能呼應本案結果。	公共工程、統包工程之案例值得加入討論，進一步了解本案之真實應用價值，謝謝。
林祐正 委員	本研究案對於國內 BIM 自動化之發展相當重要，研究成果相當具體	感謝肯定。

	建議期末報告宜補充研究成果說明。	將補充於結論與建議章節。
	期末報告中專家座談會部分建議整理及說明座談會之相關重要內容。	後續將參考本次會議意見補充相關說明。
	期末報告建議補充說明本研究之限制及未來實務應用之建議。	報告書針對委員提出未來實務內容進行改善。
陳上元委員	本案處理機器所認知的真實世界(點雲)與機器所建構的理想世界 (BIM)的匹配問題。匹配時以 Cloud-Compare 作為兩者疊合的溝通平台，分析其疊合誤差，以證明兩者被控制在允許(或超過)的誤差範圍。	將參考並納入未來研究建議。
	深度學習的前半為非監督式學習，以”擷取特徵”;後半段為監督式 學習以”進行分類”。	同上。
	現代建築的構件相當簡化，其”柱””樑””版”在”影像”上的特徵不易區分，或許還有機會以”位相”點，加以分類。但與”匹配計算施工誤差”的研究命題，其關聯性還不易理解，請加以說明。	三維空間中的點雲模型，存在排列產生之遮蔽誤差。將影像辨識的點雲物件與 BIM 模型疊合匹配可以提升模型精度，進一步提升辨識精度結果。
	Cloud-Compare 可以對真實世界(點雲)進行立體網格處理，以立體網格比對 BIM 模型，在視覺上是否更助於判讀?在匹配誤差的運算上有沒有困難或者實質的幫助?	將參考並納入未來研究建議。
蔡組長 內政部 建築研究所	希望了解工地現場使用概況說明，並在實務上與國際使用情形做比較。	報告書針對組長提出應用內容比較進行改善。
	初期注重與預鑄相關。應可以擴展到不同領域，在其他領域上加強論述，增加價值。	將參考並納入未來研究建議。

	本研究案之成果可朝發表期刊之方向努力。	研究案將朝期刊發表方向努力。
內政部建築研究所 王所長	本研究案之成果可以在未來 BIM 學院的展示中心展出。	感謝肯定，本團隊會盡力爭取。
	本研究案可考量與社宅結合。	針對與社會住宅結合與如何應用，本研究可以有進一步討論
台北市建築師公會黃建築師	本案研究與 A I 相關，有實際作為技術上的研究和成果。 為何是針對預鑄工程？推行跟應用上的限制太大，且預鑄的推行應不會將精準度為優先考量，題目設計有點不明。雖然在第一線品管不夠，但是對監造二級品管也可能可以有高度應用。Tensor Flow 語意分割是最重要的關鍵，對於未來研究非常重要，日本研究：無人開挖（自動化），應用在台灣很多連續壁、基樁...。開挖時，讓機器辨認物件非常重要。針對 Pointnet++，對其限制做出更多說明與研究。	PointNet++ 室內資料（建築完成後），對施工階段的資料量尚且不足，需要擴增資料集。
公司 潤弘精密工程事業股份有限公司 林經理明煌	SLAM 技術很新穎。施工前，鐵件安裝完的時候就把儀器架設起來。如果 P C 版完成後，調整機會比較少，建議移到施工前。傳統工法大多使用 2D 圖面，較少會有 3D 圖。	謝謝委員建議。本研究將擴大範圍檢討不同施工階段之使用效益。

附錄三、專家座談會會議紀錄

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝 專家座談會會議紀錄

日期	2022/7/7 (星期二)	時間	13:30-16:00	地點	線上 Google meet 會議
出席人員	<u>內政部建築研究所：</u> 蔡綽芳 組長 劉青峰 研究員				
	<u>主持人：</u> 曾仁杰 教授（國立陽明交通大學土木工程學系） 林之謙 助理教授（國立臺灣大學土木工程學系）				
	<u>與會專家：</u> 王瑞禎 副總經理（潤弘精密 研發部） 蘇怡先 副總經理（潤弘精密 預鑄事業） 張圻 襄理（遠揚營造） 林泰煌 顧問（遠揚營造） 紀乃文 教授（國立臺灣科技大學） 劉家銘 總工程師（台北市新建工程處） 萬有為 主持建築師（萬有為建築師事務所）				
	<u>國立臺灣大學土木工程學系營建工程與管理組：</u> 曾酩順、王文廷				
主題	專家座談會會議紀錄			紀錄	曾酩順
內容					
王瑞禎 副總經理： 1. 此研究很重要，對於未來實例應用，能以此研究繼續發展。 2. 預鑄精度測量必要性。 3. 吊裝完就澆置，因此確實精度較高，外牆板會是介入機會。 4. 此案鋼構安裝確實誤差大。 5. 接頭誤差較難控制，但外掛構件誤差較小。					
林之謙 助理教授： 1. 針對以上第二點回覆，並不是不需要，而是目前精度不足，後續研究會針對接頭（鐵件）之類。					

蘇怡先 副總經理：

1. 外牆、柱樑前期不會去細看，當下誤差就足夠小了，鋼構應比較適合在數量較小幾個單元，如三樓後方去檢驗。

林泰煌 顧問：

1. 停車場誤差較小，3mm 左右。
2. 臺大醫院鋼構誤差來自設計以及施工誤差，誤差遠超過 2cm，後續需補強。

張圻 襄理：

1. 這系統可能還需驗證，全預鑄用不到，鋼構現場誤差 2cm 就應立即調整，至於此系統可以在外牆吊裝部分應用，因為牆完全吊裝完才會核查。

林之謙 助理教授：

1. 目前還是分區，我們會加強討論。

劉家銘 總工程師：

1. 一般在鋼構上會利用假阻力。鋼構與帷幕不同，帷幕需再二工，必須回到現場。BIM 和 3D 點雲能夠套量，對突出物有幫助，補足視角上缺失。
2. 預鑄研究方向，類似我有一案輕鋼構，因其模組化，能以很多拼裝方式完成。鼓勵建築師利用既有模組使用成本取決量能，目前量不高，未來有更多進步空間。

萬有為 主持建築師：

1. 預鑄精度在設計前很難明確得知，因此容許誤差有先設計，以我在雙禧的案子為例，是半預鑄案。
2. 建築師較難考量太多預鑄工法，因其和廠商較無直接接觸、交流。
3. 應保留一點彈性給建築師，如選擇性應用預鑄工法等。

曾仁杰 教授：

1. 設計應要和上下游整合，3D 模型應要建出來。
2. 預鑄精準度較高。
3. 現場施工精準度難調整，全預鑄難，但半預鑄或許有機會。

紀乃文 教授：

1. 預鑄和 BIM 的概念很像，類似樂高。在施工階段，點雲和 BIM 之比對很重要，點雲精度有限，利用 BIM 輔助點雲會是個機會。

林泰煌 顧問：

1. 此案對於不同斷面大小都一樣會有幫助。
2. 如能先將誤差紀錄，後續應用分析、鋼構施工和設計二次鐵件都應有幫助。

王瑞禎 副總經理：

1. 研究點雲精準度應提升。
2. 構件製作前的精度查驗應為一個重點，甚至做完再驗也很重要，但製造端需要的精準度較高。

蔡緯芳 組長：

1. 未來點雲有必要在預鑄上使用嗎？
2. 檢驗速度時間多久？

林之謙 助理教授：

1. 會再檢討。

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝

專家座談會會議紀錄

日期	2022/10/4 (星期二)	時間	09:00-11:30	地點	大坪林聯合開發大樓 15 樓會議室
出席人員	<u>內政部建築研究所</u> ： 蔡綽芳 組長 劉青峰 研究員 <u>主持人</u> ： 曾仁杰 教授（國立陽明交通大學土木工程學系） 林之謙 助理教授（國立臺灣大學土木工程學系） <u>與會專家</u> ： 柯茂榮 副執行長（國家住宅及都市更新中心） 陳俊樹 經理（遠東建經） 詹耀裕 總經理（潤弘精密） 蔡東和 總經理（雙禧營造、東建工程） 蔡孟涵 教授（國立臺灣科技大學） 魏世玉 副總經理（遠揚營造） 蘇志榮 總經理（名峰營造） <u>國立臺灣大學土木工程學系營建工程與管理組</u> ： 程懷恩、呂鎮宇、曾酩順				
主題	專家座談會會議紀錄			紀錄	程懷恩、呂鎮宇、曾酩順
內容					
詹耀裕 總經理： 1. 公分級精度不能滿足預鑄工法的檢核要求（±6mm），需再想辦法提升精度等級。 2. 精度並不是只需要針對一支柱子，在兩根柱子對接的情況，應考慮垂直誤差。例如：剪力柱尺寸普遍太大，吊車無法承受其整支重量，因此剪力柱通常需要分段接裝，在接裝時精度就極為重要。 3. 無人機能夠看到事前分析，立即反應墊片高低誤差，應比光達事後掃描適用，且無人機能夠看到的範圍比較大。 4. 目前需工程師與承包商一同逐根檢查柱子的垂直度，相當費工；無人機可以即時且快速檢閱柱子的垂直度，幫助很大。 5. 安裝錯誤的判讀，為相當重要判讀環節，如與 BIM 的比對或者利用本案所發展的技術：利用工具支解設計圖的各式構件，於現場進行施工，能夠真實滿足真實設計需求。 6. 潤弘的技術專利已過期多項，台灣其他營建同業，應能全面利用推廣。 7. 在國外已有各式營建自動化的項目，如混凝土 3D 列印、鋼筋自動化、繪圖自動化等。					

8. 預鑄好處有二點：第一，對環境影響優良，能夠於各式環境要求、節能減碳；第二，大幅減少現場工期，混凝土構件皆可於工廠施作，不須耗費大量時間進行現場澆置之工作（北市晚間 6 停工對於現場澆置之工項不友善）。
9. 以民國 85 年為例，鋼模要產生 100 組預鑄構件才能打平成本，目前北市預鑄的收益和台積電相比只有一半。應考慮將廢棄的鋼模販賣，或者保存後續使用，並隨著人力成本的上升（預鑄工法節省人力），預鑄工法正逐漸變得比傳統工法划算。
10. 政府的獎勵都更目前沒有預鑄工法的選項，應施予較多獎勵措施給預鑄工法以推廣進行。
11. 預期瓶頸：訓練預鑄工程師並不容易且耗時。

魏世玉 副總經理：

1. 預鑄市場目前相對較小，且市場較為不穩定，因此成本較高，小公司難以為繼。若市場有更多公司參與合作，將提高產業競爭力。
2. 希望政府提供更多獎勵，例如容積獎勵或者規定建物中預鑄工法之比例。
3. 預鑄對品質、環境、工期皆有很多幫助
4. 現場智慧吊裝分為四部分：
5. 施工圖說比對，檢查有無錯誤
6. 目前可利用 BIM，檢核製造精度
7. 預埋構件精度、交角確認
8. 傳統測量都很耗時，未來可利用像是相機、無人機等。
9. 梁柱版的預鑄比外牆預鑄精度要求更高，國內能夠做的公司還是不多，但是投入需花費大量金錢，投入的成本需要考量，和未來的收益工作量。
10. 全結構預鑄遇到的困境：人力資源與市場穩定的需求。
11. 未來預鑄的方向，須結合如 BIM 或更多學界來投入。人力的斷層和成本的上揚，能夠替預鑄帶來更多機會，市場的維持也很重要。

陳俊樹 經理：

1. 預鑄鋼模的轉換率不高，延續使用較為困難，鋼模的使用需要到三十、四十次才會回本。希望政府能給獎勵推廣，亦可按照樓板尺寸，進行鋼模標準化，以降低成本。
2. 模板一直漲價、缺工，預鑄跟場鑄價差大概 5%，甚至較為便宜。
3. 預鑄能夠減少施築人員、增加精度。
4. 希望能夠設計一個共同連結和系統，以便施工圖的轉換，例如 BIM 與施工圖說。
5. 老舊房屋的重建，如能採用預鑄能夠給予獎勵，應是相當重要的部分。
6. 如魏副總所言，影響精度四個要素有：施工圖、製造、預埋件、設備。

柯茂榮 副執行長：

1. 政府在推廣預鑄，但是目前政府社宅的數量受限基地大小，產量還沒有辦法太高。目前中興於宜蘭遇到的問題則是受限於運輸路程，外牆預鑄構件難以在宜蘭生產。
2. 目前建研所在技術方面的研究，已經非常前瞻。

3. 財務的考量，以社宅為例，越快完工能夠越早營運收租，預鑄相當適合。
4. 預鑄的管理，需要考量後續維護管理（例如：國民住宅），發展預鑄管理方法。
5. 政策面推廣，應將政府推廣機構整合，及更加強推廣機構力道，提供獎勵機制。同時修法提供在都更危老提供稅制的減免。建議內政部機關協助提供不同種類廠商相應的減免條件，以及提供技術人員培養的獎勵。
6. 營建自動化的配合，尚須人員技術的培養，政府可以推動相關人才培養。

蔡東和 總經理：

1. 現今市場，RC 工法缺工，轉為尋找鋼構，同時也開始探詢預鑄工法。但預鑄工廠的產能無法保證，使業主不敢貿然提早簽約預訂；而業主不提早預訂簽約，工廠也不敢保證生產數量是否能符合需求。造成兩難的情況。
2. 預鑄標準化難度不高，以樓梯為例，將所有樓梯統一設計，並將難以施工部位改為鋼構。
3. 台灣目前很多樓高、住梁構件，幾何形狀、大小都差不多，若主導市場的預鑄廠，能夠訂出統一規模，更可以與鋼構市場相互競爭，同時也希望政府能針對預鑄工法提出獎勵條款。
4. 使用預鑄工法後難以變更設計（改工法如 R C、鋼構...），需有更多合作機制，目前應思考如何能將預鑄與鋼構競爭，因預鑄比 rc 品質高許多，不須將 rc 與預鑄放在同個平面比較。
5. 以我個人經驗，預鑄工程對於公共工程應相當有幫助。

蘇志榮 總經理：

1. 檢驗的設備需要被施工人員接受，其使用方便性和運算速度需要考量，施工當下馬上就需要調整，還有天候的可接受性需要考量。
2. 光達能否結合聲音傳感器，馬上提供施工人員資訊，了解到構件是否到達正確位置。
3. 潤弘有固定的客群而且產能飽滿，難以將產能分配至目前正常民間商用用途。
4. 假設有政府的獎勵，廠商真的願意使用嗎？例如都更危老，巷弄內的路寬可能難以將預鑄構件運入。
5. 目前預鑄廠商少，而且預鑄需要龐大財力物力（資本、設備），台灣廠商是否能夠承受。
6. 預鑄產業封閉性高，後續難以變更設計，必須早期切入。政府應幫忙訂定模組化標準與平台，以利後續規模使用。

蔡孟涵 教授：

1. 專業人員技術可在大學課程中培訓，亦可與業界合作、交流。

曾仁杰 教授：

1. 向政府推動預鑄以及相關自動化技術研究案。
2. 自動化可降低成本：建立數位平台、引進 KPI 績效管理，有全套的模組化流程、標準

設計圖，自動判讀施工進度。

3. 目前 BIM、點雲、深度學習技術已趨成熟，尚缺自動化以及各技術與現場施工之整合。

附錄四、成果說明會記錄

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝 成果說明會記錄

日期	10/25/2022 (星期二)	時間	9:00~12:00	地點	大坪林大樓 15 樓國際會議廳
主題	成果說明會				
內容					

本案依照合約需求辦理成果說明會：

1. 活動海報 (左) 與議程海報 (右)

時間	議題	主講人
9:00 ~ 9:10	報 到	
9:10 ~ 9:30	長官致詞	內政部建築研究所
9:30 ~ 9:40	開場說明	研究團隊
9:40 ~ 10:40	應用建築資訊建模 (BIM) 深度學習自動辨識技術輔助建築構件精準安裝應用	國立台灣大學 計畫主持人 林之謙 教授
10:40 ~ 10:50	中 場 休 息	
10:50 ~ 11:20	相關技術分享 (一) 鋼結構安裝精準度之 應用案例及未來發展	春源鋼鐵 蘇明朝 董事顧問
11:20 ~ 11:50	相關技術分享 (二) 自動辨識與預鑄工程 整合用之發展	國立陽明交通大學 曾仁杰 教授
11:50 ~ 12:00	綜合討論	計畫主持人 林之謙 教授

Logos at the bottom: 中華民國內政部建築研究所, 國立台灣大學, 國立陽明交通大學.

Logos at the bottom: 中華民國內政部建築研究所, 國立台灣大學, 國立陽明交通大學.

2. 活動花絮



附錄五、工作會議記錄

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝 工作會議紀錄

日期	03/25/2022 (星期五)	時間	15:00~16:00	地點	內政部建築研究所會議室
出席人員	內政部建築研究所：蔡綽芳組長、劉青峰副研究員 國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、王文廷				
主題	工作進度會議			紀錄	王文廷、曾韶順
內容					
一、進度報告 資料蒐集進度 點雲分割試作 二、討論事項 ● 應用相關： 去年聚焦於進度管控，今年著重安裝精準度之分析。國外已發展部分相關研究，但應用部分尚待發展，目前會先從完工後的偵測開始，逐步推展至能即時偵測之系統，並預計於研究後期與廠商洽談，實際將研究方法與案例作結合並進行分析探討，期望待技術發展成熟後能申請相關專利 ● 社宅相關： 目前社宅的案例多只包含外牆的預鑄，希望能將社宅納入相關案例的探討，以便研究的利用與推廣。 精度相關 目前運用環景相機能達到 20~30mm 的精度。預計與相關廠商逕行施工精度需求之討論，了解實際導入時需要符合的標準，同時亦打算採用能達到更高精度的單眼或 GoPro 進行後續拍攝。 <u>決議事項：</u> ● 專家會議邀請預鑄廠商、營造廠、建築師、業主，同時積極邀請社會住宅相關人士。 ● 下次工作會議於四月舉辦，時間之後再行確認。 <u>提問與回應：</u> ● 本期研究與上一期研究之差異？去年聚焦於進度管控，今年著重安裝精準部之分析。 ● 此研究的目標對象是？預鑄廠商。 ● 能否即時回饋資訊？目前不行，完成後可以讓人力要求降低(技術要求上、數量上)。					

- 研究成果可節省的時間？專業人力上、工期上(專業人員沒空時還是能偵測)。
- 國外相關案例，新加坡的研究如何？研究方面有，實際應用部分還在進行。
- 應用面上的障礙？即時偵測目前尚待開發，目前先從完工後偵測開始。
- 元件已經模組化，施作誤差從何而來？現場事件與環境造成之誤差。
- 何時能導入工地做測試？預計研究後期就會進行試作。
- 如何落實此研究，進行技術移轉應用，是否需要申請專利？目標是代技術發展成熟後申請。
- 鋼構的問題能否一同解決？研究目標為樓柱板牆與鋼構，因此也會包含到。
- 是否能應用在社宅？青峰：華江社會住宅外牆為預鑄。可能請教潤弘
- 廠商需要的精度如何？請廠商提供相關要求。
- 建築防火搶救時，缺乏相關圖資？
- 研究完成後的經濟效益？後續將流程列出後再想辦法量化。(時間、人力的節省)
- 預鑄流程為何，以及研究如何輔助施工？
- 誤差會累積，研究如何與實務結合與配合？與實際案例作配合，將完整程序列出。
- 覺得視覺模型是技術重點，是否能直接做其他相關應用(施工勘驗)？Scan-to-BIM已包含。
- 現況是公共工程一千萬以上時要繳交 BIM 模
- 點雲模型能否辨識材質？顏色的特徵也算是材質的一部份。
- 目前辨識出來的精度為何，建議與廠商討論施工精度之需求？環景相機可達到 20~30mm 的精度，未來打算採用能達到更高精度的單眼和 GoPro。

**應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄**

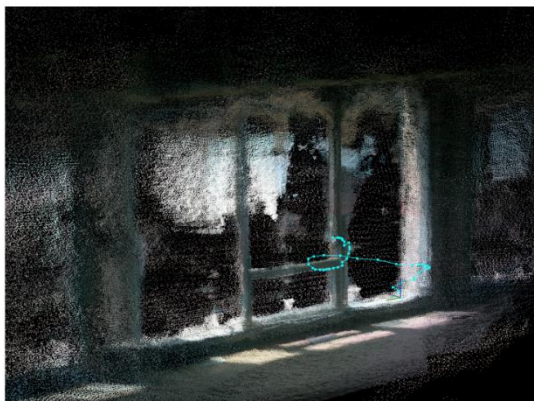
日期	04/22/2022 (星期五)	時間	11:00~12:00	地點	Google meet
出席 人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、王文廷				
主題	工作進度會議			紀錄	王文廷
內容					
一、進度報告 資料蒐集進度 點雲分割試作 準確度檢驗流程圖 點雲分割方式比較 二、討論事項 ● 流程圖相關： 施工中與施工後皆須涵蓋，以 4D BIM 輔助說明。 ● 點雲相關： 比較不同蒐集方式的生成結果，以及不同生成方式的結果比較。 ● 圖資相關： 需蒐集辦公大樓的相關資料，包括工項、順序、BIM 等。 <u>決議事項：</u> ● 內部工作會議隔週舉辦，時間暫定周五 15:30。					

**應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄**

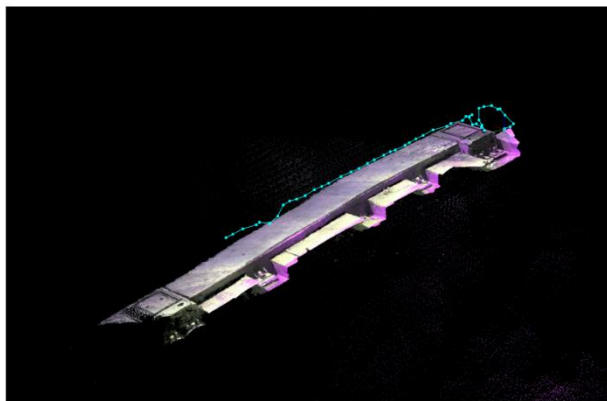
日期	04/28/2022 (星期五)	時間	17:00~18:00	地點	CERB 802
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾酩順、王文廷 遠東建築經紀公司：陳俊樹專案副理				
主題	工作進度會議			紀錄	王文廷
內容					
一、進度報告 資料蒐集進度 點雲分割試作 準確度檢驗流程圖					
二、討論事項 ● 精準度檢測相關： 比較不同工法材料的精準度測量時機，討論如何減少這部分的時間成本。 ● 預鑄相關： 全預鑄半預鑄的分辨方式還有帷幕種類討論。 ● 流程相關： 釐清各工項的施作順序。					
<u>決議事項：</u> ● 週六前往現地進行拍攝。					

**應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄**

日期	05/06/2022 (星期五)	時間	15:00~16:00	地點	CERB 710
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、王文廷				
主題	工作進度會議			紀錄	王文廷
內容					
一、進度報告 資料蒐集進度 點雲分割試作 準確度檢驗流程圖 二、討論事項 ● 精準度檢測相關 比較不同工法材料的精準度測量時機，討論如何減少這部分的時間成本。 全預鑄的部分會在各構件吊裝完成後，即請檢測人員進行測量，測量過程約五到十分鐘，對於誤差的要求須小於五毫米；SRC 預鑄的部分主要是針對樑柱接頭的精準度進行檢測，施工每半層樓會進行一次測量，測量時間約需半天；鋼構的誤差因其材料特性，最多會到六公分，整區吊裝完後會進行測量，需耗費約一天的時間，鋼構件固定好後測量並調整，確認無誤後再銲住構件，調整前會先用夾具固定，夾具主要用於固定柱頭，控制好柱頭，誤差就不會太嚴重。 ● 預鑄帷幕相關 全預鑄半預鑄的分辨方式主要取決於樓板，若樓板是使用模板製造並直接吊裝，則為全預鑄；還有帷幕種類討論，可分為玻璃帷幕、金屬帷幕、PC 版帷幕。以亞東醫院附近的辦公大樓為例，此次工法的選用主因是為了確保防水的效果。 ● 流程相關 釐清各工項的施作順序。 以亞東醫院附近的辦公大樓為例，牆體為內側吊裝，相較於外側吊裝，可有效減少施作時發生工安意外的狀況，外牆部分施工順序為柱(非結構用途)、樑、水性脫模劑、鋼框、PC 版安裝。其中 PC 版安裝有單片安裝或多片安裝					



預鑄玻璃帷幕



預鑄梁柱

決議事項：

- 週六前往現地進行拍攝。

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

日期	05/20/2022 (星期五)	時間	15:00~16:00	地點	Zoom
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、王文廷				
主題	工作進度會議			紀錄	曾韶順

內容

一、進度報告

資料蒐集進度

點雲深度學習模型改善討論

各項工項誤差檢驗以及流程探討

台大健康中心工地工地溝通進度

二、討論事項

● 替代工地地點安排

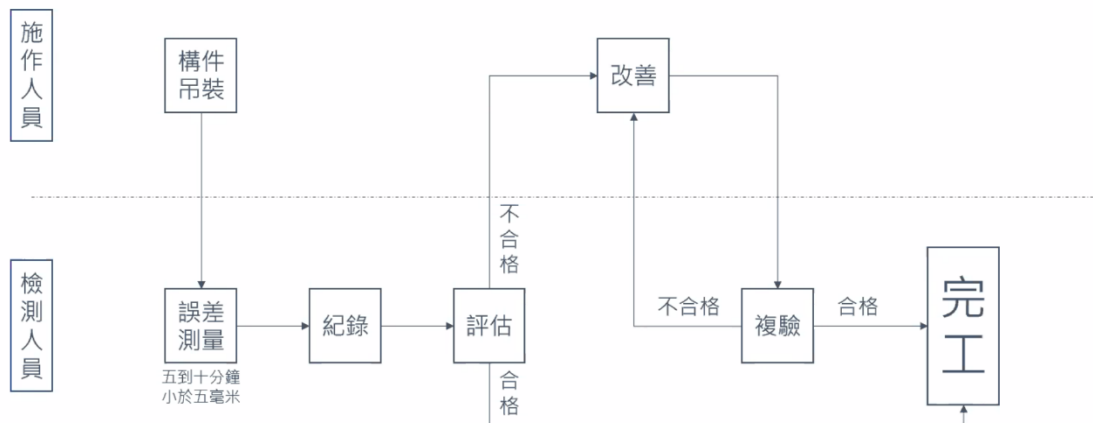
因原始 Google 雲端大樓工地已完工，較無蒐集資料比較之必要，遠雄聯絡人通知台大健康中心有機會能夠蒐集，但目前似乎台大校方尚未有施工之進度與跡象，需再和遠雄聯絡人連絡確認此工地之可利用性。

● 各式工法誤差檢驗流程

➤ 全預鑄

討論其流程圖，討論誤差測測量之方式需再更明確表示方式，其流程圖尚待改善，如 1.誤差測量結束後應再有改善再誤差測量，2.複驗方式，其流程有缺陷不夠明確。

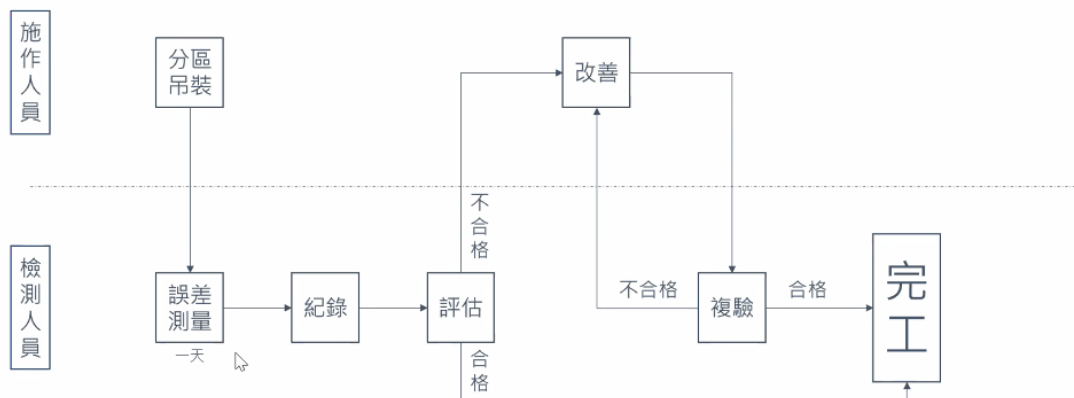
全預鑄誤差檢驗流程



➤ SRC

半層樓定義需再定義，其流程圖也需完整改善，明顯有眾多缺陷。

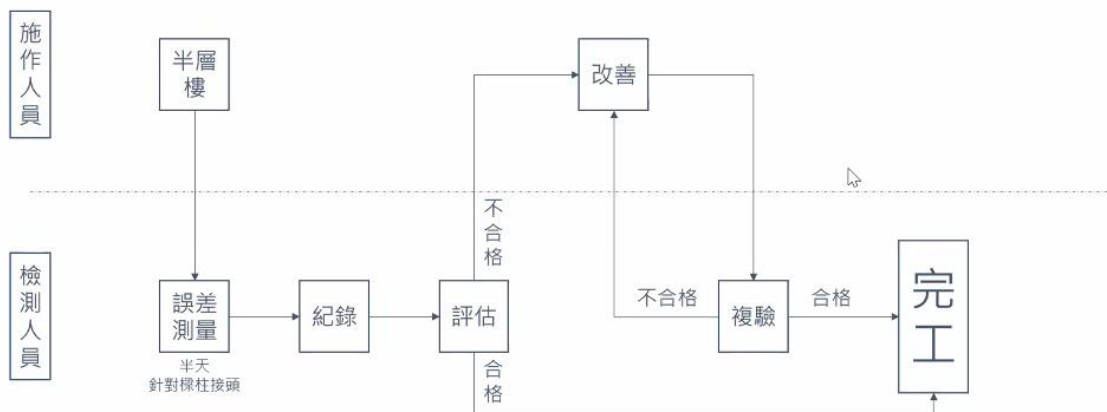
鋼構誤差檢驗流程



➤ 鋼構

施作調整方式需要再詳細述說，如測量誤差結束後其改善流程是如何進行，其流程圖也需完整改善，明顯有眾多缺陷。

SRC預鑄誤差檢驗流程



● 帷幕施作方式

關於先前 Google 雲端大樓有特殊預鑄帷幕工程，需再進行流程圖之製作以及 4D 動畫之製作改善以利後續發表使用。

● 點雲建立與討論

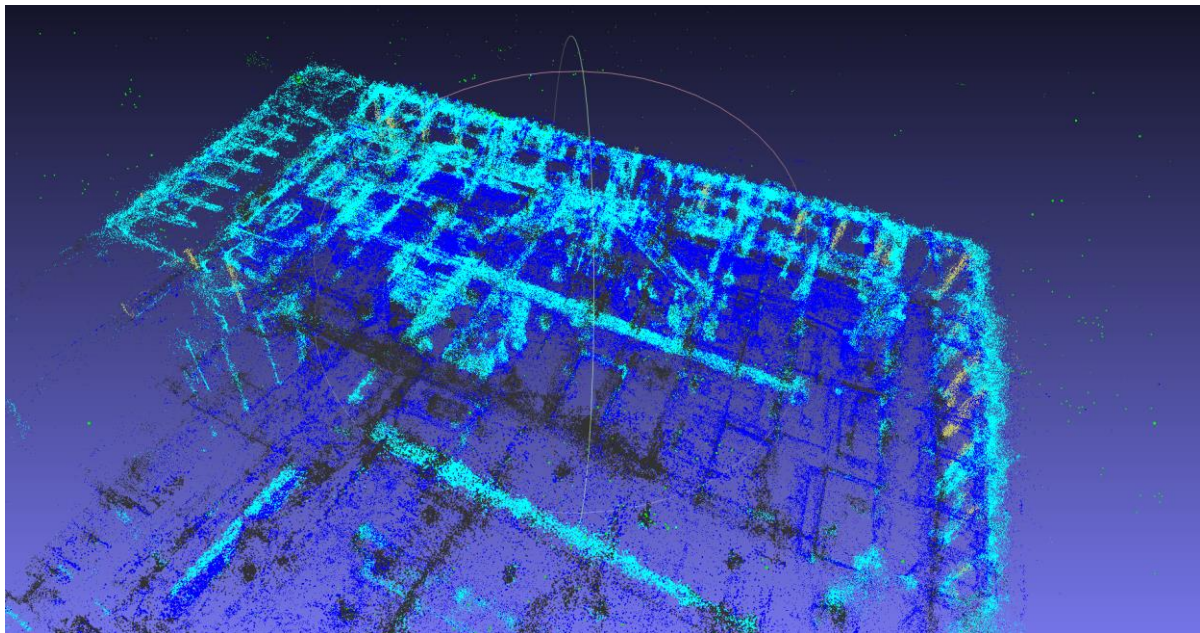
討論 0430 前往 Google 工地點雲之品質以及透過點雲討論工地環境，其點雲建立仍有改善空間，工地環境有別普通辦公大樓環境。

點雲建模成果 - 360



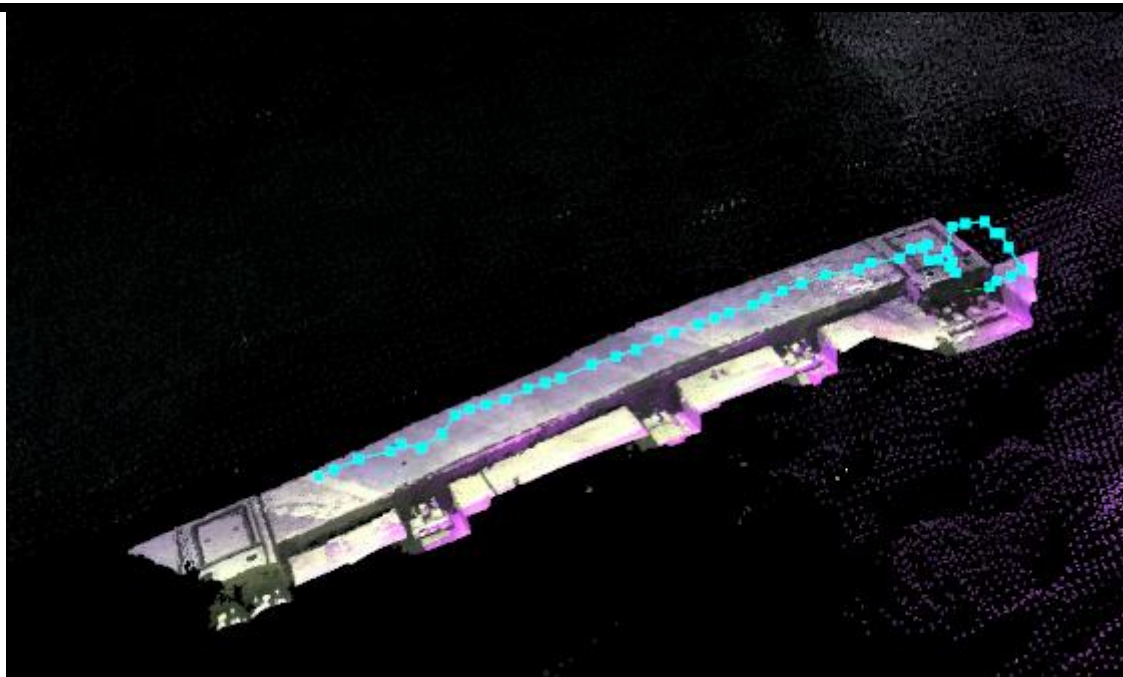
● 深度學習模型語意分割結果

利用點雲進行語意分割成果，發現地板能夠精準分割，但對於牆面以及其他構件仍有相當程度進步空間，須再加強，後續應利用 BIM 模型加入，放入牆壁之特徵給模型辨識，應能得到中大改善。



● 誤差辨識

目前拍攝點雲能用於誤差辨識之數量仍相對不足，需再前往拍攝，但於先前利用深度拍攝帷幕牆之點雲能夠再利用來先發展初步誤差判斷方法，並於未來點雲數量充足後再行利用，但此點雲只有部分構件，如何自動辨識還需研究討論，例如利用 RANSAC 等演算法。



決議事項：

- 和遠雄聯絡人再行溝通，得到更多工地地點，再行前往拍攝。
- 利用先前深度相機拍攝之結果，再行初步誤差檢驗方式開發，以利後續更多場景應用。
- 施工檢驗流程再行改善
- 模型辨識點雲需再加入 BIM 模型

**應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄**

日期	06/03/2022 (星期五)	時間	15:30~16:30	地點	Zoom
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾酩順、王文廷				
主題	工作進度會議			紀錄	王文廷
內容					
一、進度報告 資料蒐集進度 期中報告進度 二、討論事項 ● 資料蒐集相關： 討論亞東醫院停車大樓以無人機拍攝之影像成果，以及鋼構施作過程與拍攝間隔配合之方法；因亞東醫院辦公大樓預鑄部分施作皆已完成，需聯絡其他相關工地進行資料蒐集前已聯絡台大健康中心的工地，並討論拍攝時程。 ● 報告相關： 章節分配以及釐清內容。 <u>決議事項：</u> ● 週六前往台大健康中心進行拍攝。 ● 期中報告草稿於 6/13 完成。					

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

日期	2022/8/26 (星期五)	時間	10:00-11:00	地點	線上 Zoom 會議
出席 人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組： 林之謙助理教授、曾韶順、王文廷、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	程懷恩
內容					
一、進度報告：					
NULL					
1. 討論事項：					
2. 會議記錄負責人：懷恩跟鎮宇輪流。					
3. 最終交付項目：待青峰與陳博士討論後再研議。					
4. 案場資料相關：可能要每週都前去拍攝工程進度。					
5. 流程相關					
6. 懷恩負責聯絡俊樹，詳加確認以下流程問題。					
7. 將亞利版片吊裝流程加入測量人員進入時間點及其工作內容：須詳述版片吊裝後何時進行複測？以及如何複測？					
8. 確認一次鐵件是以螺栓轉緊進行假固定，還是用點銲的方式？最後確認配置無誤後才完整銲接。					
9. 以上皆確認完成後，將流程與亞利的 <u>精度檢查表</u> 進行圖表整合，確認每一個環節檢查無誤。					
<u>決議事項：</u>					
1. 量化 RGB、新光達及深度相機結果、整理出誤差結果並量化點雲資訊。					
2. 由上一點的結果進行比對後製作比較表格。					
3. 韶順整理三次去台大醫院案場的結果。					
4. SFM 模型中，柱子與柱子間的物件時常消失不見：韶順條列整理問題點。					
5. 執行 BIM 與點雲模型的整合。					
6. 台大醫院案場需要用環景相機拍攝 1 樓到 13 樓的資料。					
7. 專家座談會，懷恩協助名單整理。					

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

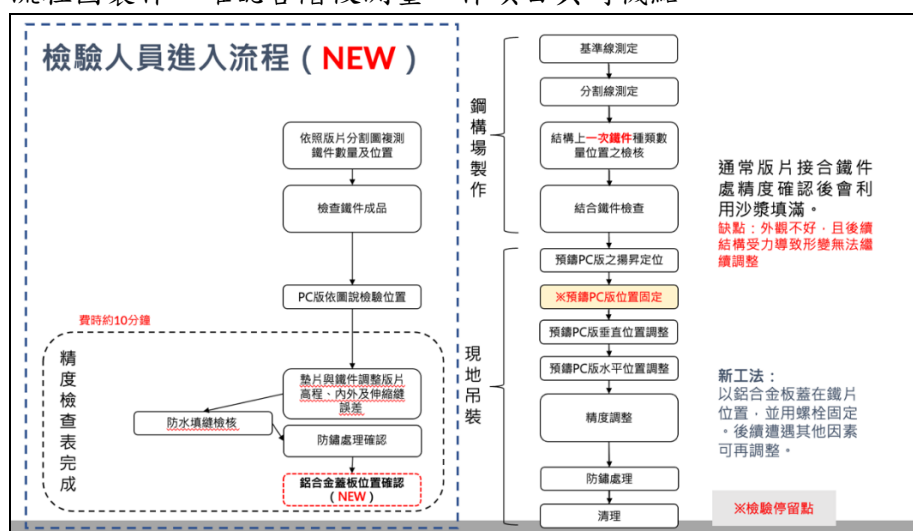
日期	2022/09/07 (星期三)	時間	19:00-20:00	地點	線上 Google meet
出席 人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：陳俊樹、曾酩順、程懷恩、呂鎮宇				
主題	PC 版吊裝流程之檢核內容			紀錄	呂鎮宇
內容	進度報告： NULL 討論事項： PC 版吊裝流程檢核內容： 進行 08/25 會議決議內容之「 1. 將亞利版片吊裝流程加入測量人員進入時間點及其工作內容：須詳述版片吊裝後何時進行複測？以及如何複測？ 2. 確認一次鐵件是以螺栓轉緊進行假固定，還是用點銲的方式？最後確認配置無誤後才完整銲接。 」事項討論，以下為討論結果。 一次鐵件通常於鋼構出廠前即施工完畢（完整銲接）。於現場吊裝流程中，在基準線及分割線測定後，會再進行一次一次鐵件的檢核，內容為鋼結構上一次鐵件之種類、數量、位置，並根據圖面檢驗。通常一個 PC 版面會有四個鐵件，梁上梁下各 2 件，尺寸規格不一。PC 版片吊裝時，若柱間距較大（例如：9m），吊裝完一面（單跨間）就會做檢核；若柱間距小，則會同時檢核 3~5 組跨距之 PC 版片。 精度調整： 從基準面引出，依 PC 版圖說，利用 U 型墊片與長條孔調整版片高程、內外及伸縮縫誤差。 精度檢查流程如下： 先對調整後之精度進行檢核，接著檢核防水填縫，最後檢驗防鏽處理。 精度檢查表應新增以下項目為佳： PC 版片接合處沙漿填補（現行之施工方法）； 將鋁合金板利用螺栓固定於鐵件接合處（蓋板），此為未來期望之施工方式，若遭遇地震或其他因素使精度無法符合要求，可將蓋板移除後進行調整。				

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝 工作會議紀錄

日期	2022/9/8 (星期四)	時間	15:30-16:30	地點	CERB710
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組： 林之謙助理教授、曾韶順、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	程懷恩
內容					

一、進度報告：

1. 流程圖製作：確認各階段測量工作項目與時機點。



2. OpenSfM 實作與數據處理：

3. Resize 單眼相片與分割環景影片成圖 (每 30 幀擷取一張)。

4. 模型實作、檢視點雲模型。

模型成果 - 單眼相機 (OpenSfM)



5. COLMAP 優化實作。

二、討論事項：

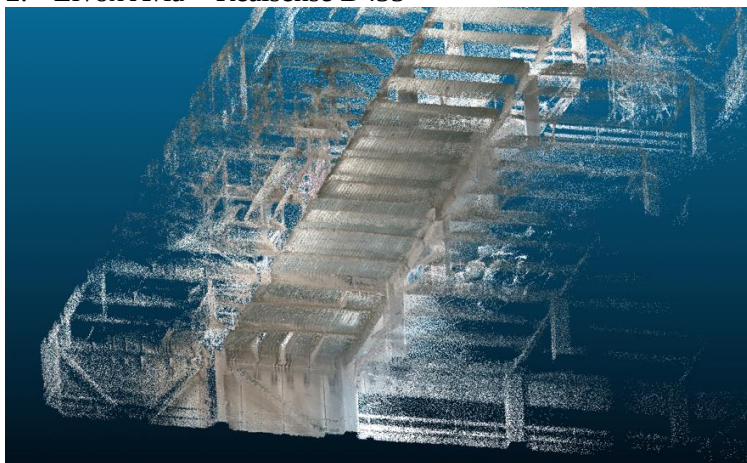
1. 案場資料相關：進一步瞭解流程圖最後一步鋁合金蓋板位置確認方式與固定方式。
2. 流程細節相關
3. 伸縮縫為何規範為 3mm，設計值卻為 25mm？進一步確認規範與設計原因。
4. 『版片高程』所指為兩版片間高低差，還是相較基準面之高程差？
5. 精度調整後會立刻灌漿嗎？還是待該樓層版片皆確認後一齊灌漿施作？

一、決議事項：

1. 以營造廠角度（優先）找出技術的效益點：
2. 如何凸顯資料記錄效益？從即測即調比較測量紀錄後請廠商調整。
3. 需注重時間以外的效益並確認技術介入時機點。
4. 提供 KPI 量化資料。
5. 案場資料：版片吊裝後立馬記錄一次（營造廠優先角度）。
6. 以業主角度（後備）找出技術的效益點：
7. 提供紀錄資料、確保施工精度。
8. 精度調整後再紀錄一次（提供後續精度調整基準）
9. 台北市新工處，劉家銘先生。
10. 資料記錄方式以 Lidar 與單眼相機為主。

紀錄：

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

日期	2022/9/23 (星期五)	時間	15:00-15:30	地點	CERB710
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	程懷恩
內容					
一、進度報告：					
1. 點雲資料確認：					
1. 單眼相機：轉角處要多拍幾張					
					
2. Livox Avia + Realsense D455					
					

決議事項：

1. 將資料彙整交給醅順做版片分割、整合誤差、量化 KPI。
2. 開會時程：改為每週一下午 4:30。
3. 下次拍攝要帶量尺，用作參考。
4. 10/4 專家座談會項目：
5. 統整人數，需要訂會後便當、飲料。
6. 9/30(五)前，以成果說明會為基礎製作 slides 草稿。
7. 鎮宇負責 sensor（光達+深度相機+環景相機）支架，以 3D 列印印出。
8. 10/25 成果說明會項目：
9. 場佈物品、確認尺寸，開始聯絡廠商。

應用建築資訊建模 (BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

日期	2022/10/13 (星期四)	時間	16:00-17:00	地點	內政部建築研究所 13F 會議室
出席人員	內政部建築研究所：劉青峰 國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	程懷恩
內容					
決議事項：					
針對 10/25 成果說明會之討論事項：					
1. 取消等身背板。					
2. Lab logo 調整。					
3. 講者職稱可能需要調整。					
4. 地點改 15 樓，海報可以先做。					
5. 電梯海報留大字、地點，先寄送 pdf 給青峰。					
6. 簽到、簽退表（手簽）。					
7. 報名表。					
8. 海報增加 QRcode（報名資訊）					
9. 主辦單位：建研所＋台灣大學，營建所打電話確認換公文（快遞）。					
10. 建築師證書。					
11. 工程會>技師課程。					
12. 成果報告 QRcode。					
13. 事先跟講者要簡報內容（不強制）。					
14. Email 確認公文進度、副本要給建研所。積分申請進度。					
15. 提案單第三年具體有一個硬體設備一套 profolio 彙整成報告，方向：申請專利（但不要寫）流程文件作為研究成果。					
16. 前一天(24)進來佈置。					
17. 下週三查看報名人數。					

**應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄**

日期	2022/11/7 (星期一)	時間	15:00-15:30	地點	CERB710
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	呂鎮宇
內容					
<u>決議事項：</u> ● 期末審查回覆表 11/9 前完成。 ● 11/18 整理完成果報告書。 ● 成果報告書結論要重寫。 ● 組長建議： 1. 補上除了預鑄以外的應用 2. 流程哪一部分可以節省更多哪些成本。 ● 保持每隔兩週去一次工地					

應用建築資訊建模（BIM）、深度學習及自動辨識技術輔助建築構件精準安裝
工作會議紀錄

日期	2022/11/14 (星期一)	時間	15:00-15:30	地點	CERB710
出席人員	國立臺灣大學土木工程學系營建管理組：林之謙助理教授、曾韶順、程懷恩、呂鎮宇				
主題	工作進度會議			紀錄	呂鎮宇
內容					
<u>決議事項：</u>					
● 完成成果報告。 ● 成果報告： 1. 補上英文摘要。 2. 一般工項可以在本案發展的方向。 3. 未來方向要改。 ● 要看提案單，新一期的大綱可以依照提案單去寫。					

附錄六、參考文獻

1. Alcantarilla, P. F., & Solutions, T. (2011). Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell*, 34(7), 1281-1298.
2. Amer, F., Zhao, Z., Tang, S., & Torres, W. (2018). Constructing Locally Dense Point Clouds Using OpenSfM and ORB-SLAM2. *arXiv preprint arXiv:1804.08243*.
3. Bosché, F., Guillemet, A., Turkan, Y., Haas, C. T., & Haas, R. (2014). Tracking the built status of MEP works: Assessing the value of a Scan-vs-BIM system. *J. Comput. Civ. Eng*, 28(4), 05014004.
4. CloudCompare (version 2.13) [GPL software]. (2022). Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>
5. Fang, Y., Cho, Y. K., & Chen, J. (2016). A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations. *Automation in Construction*, 72, 367-379.
6. 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.
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. Han, K., Degol, J., & Golparvar-Fard, M. (2018). Geometry-and appearance-based reasoning of construction progress monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 04017110.
9. KAZE Features. Pablo F. Alcantarilla, Adrien Bartoli and Andrew J. Davison. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Firenze, Italy, October 2012 Retrieved from <https://docs.opencv.org/3.4/javadoc/org/opencv/features2d/KAZE.html>
10. Kopf, J., Rong, X., & Huang, J. B. (2021). Robust consistent video depth estimation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 1611-1621).
11. Labbé, M., & Michaud, F. (2019). RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation. *Journal of Field Robotics*, 36(2), 416-446.

12. Lin, J., & Zhang, F. (2022, May). R 3 LIVE: A Robust, Real-time, RGB-colored, LiDAR-Inertial-Visual tightly-coupled state Estimation and mapping package. In 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 10672-10678). IEEE.
13. Perez-Perez, Y., Golparvar-Fard, M., & El-Rayes, K. (2021). Scan2BIM-NET: deep learning method for segmentation of point clouds for scan-to-BIM. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(9), 04021107.
14. Qi, C. R., Yi, L., Su, H., & Guibas, L. J. (2017). Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. *Advances in neural information processing systems*, 30.
15. Schonberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-motion revisited. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4104-4113).
16. Shang, Z., & Shen, Z. (2017). Real-time 3D reconstruction on construction site using visual SLAM and UAV. *arXiv preprint arXiv:1712.07122*.
17. Shen, J., Yan, W., Li, P., & Xiong, X. (2021). Deep learning-based object identification with instance segmentation and pseudo-LiDAR point cloud for work zone safety. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(12), 1549-1567.
18. Vu, T., Kim, K., Luu, T. M., Nguyen, T., & Yoo, C. D. (2022). SoftGroup for 3D Instance Segmentation on Point Clouds. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2708-2717).
19. Xu, W., Cai, Y., He, D., Lin, J., & Zhang, F. (2022). Fast-lio2: Fast direct lidar-inertial odometry. *IEEE Transactions on Robotics*.
20. Yuan, C., Liu, X., Hong, X., & Zhang, F. (2021). Pixel-level extrinsic self calibration of high resolution lidar and camera in targetless environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 7517-7524.

應用建築資訊建模(BIM)、深度學習及自動辨識技術輔助建築

構件精準安裝

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：林之謙、曾仁杰、曾惠斌、曾酩順、程懷恩、呂鎮宇、
王文廷

出版年月：111年12月

版次：第1版

ISBN：978-626-7138-49-6