

室內三維製圖導入低成本點雲輔助策略與成本評估

賴哲儂¹ 孫翊晴² 許皓香^{3*}

摘要

研究使用低成本的 RGB-D 感測器，獲取室內點雲資料輔助人工三維製圖，並比較純人工測量與建模的做法，探討「測量作業時間」和「建模作業時間」的差異。在「測量作業時間」中，純人工測量花費的時間較 RGB-D 做法少了 1 小時 25 分鐘，原因在於後者因儀器限制必須執行多站掃描和點雲套合任務，使得測量時間倍增。在「建模作業時間」中，點雲輔助策略所花費的時間相較純人工建模少了 4 小時。綜合上述，本研究策略比純人工測量與建模所花時間少；若提升儀器規格或針對複雜且不規則的目標，「測量作業時間」的改善預期更為顯著。

關鍵詞：三維製圖、室內環境、低成本方案、點雲、RGB-D 感測器

1. 前言

土木及建築工程行業中，不論工程規模的大小或各項細部作業，都十分仰賴二維(2D)圖說。1980 年代開始，電腦輔助製圖(Computer Aided Drawing, CAD)系統與 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)曲面技術逐漸成熟，土木及建築工程行業之圖說也從 2D 圖說逐步邁向 3D 化。2000 年後即時渲染技術的崛起，以及 3D 掃描與攝影測量技術的整合應用更是將 3D 建模的精緻度大幅提升。爾後參數化設計的發展則是提供了 3D 建模另一種新的思路。資料管理的雲端協作、沈浸體驗的 VR/AR，也成為 3D 模型發展的主流。直至 2020 年後則是大量發展應用 AI 輔助 3D 建模。此外，更多著重在 IoT 數據結合與數位雙生概念的發展。

承如上述，雖然現今數位模型已非常普及，然實際建築物或者構造物會隨著氣候環境、地形變化(如填土、坍方)、植栽生長、室內裝修、結構體調整或拆除等等因素，不斷發生外部或內部改變，需要依靠實際現地量測技術來輔助更新 3D 模型，其中感測技術實際具有關鍵意義。在建築全生命週期管

理層面，透過感測技術進行掃描可補足 BIM (Building Information Modelling)模型中缺乏的現況細部資訊(Liu *et al.*, 2021)，甚至可作為動態監測之重要工具(Tarsha Kurdi *et al.*, 2023)。在既有都市不斷發展擴充下，攝影測量技術也成為複雜都市場景大規模 3D 建模的可靠且有效的解決方案(Li *et al.*, 2023)。3D 掃描在文化資產領域尤其重要，其可快速擷取實際物件幾何資訊，補足既有數位檔案的局限(Kantaros *et al.*, 2023)；此外也能協助重現建築微細構件或者更新材質變異(Luhmann *et al.*, 2019、Fascia *et al.*, 2024)，促進了數位保存與遠端研究(Spennemann & Hurford, 2024)。

感測器技術發展日新月異，短期內精密儀器恐尚未普及而需高昂成本購置。在室內三維模型相關研究中，資料蒐集方式可概分為被動式、主動式兩種，再使用 3D 電腦圖形軟體建模和敷貼紋理，常見平台如 3ds Max、SketchUp、Blender 等等(Chiabrando *et al.*, 2019、Herban *et al.*, 2022、Lee & Tsai, 2015、Pathak *et al.*, 2021、Redweik *et al.*, 2020、張智安及張正岳, 2018、陳俊宇, 2022)。被動式資料蒐集主要基於相機拍攝，利用一個或多個相機從

¹ 逢甲大學土木工程學系 副教授

² 逢甲大學土木工程學系 碩士生

³ 逢甲大學都市計畫與空間資訊學系 副教授

* 通訊作者, 電話: 04-24517250 轉 3369, E-mail: haohhsu@fcu.edu.tw

收到日期: 民國 114 年 06 月 06 日

修改日期: 民國 114 年 06 月 19 日

接受日期: 民國 114 年 06 月 24 日

不同角度拍攝照片重建三維模型(曾信翰, 2008、錢泓嶧, 2011、楊政儒, 2021); 目標物的特徵萃取(feature extraction)和連結點匹配(tie point matching)能力, 以及幾何交會強度將影響物體建模成效。

主動式方法如雷射測距儀, 計算雷射從物體發射並返回的時間來獲取距離資訊。進階儀器又如地面三維雷射掃描儀(laser scanner), 其又稱為地面光達(Light Detection And Ranging, LiDAR), 使用紅外光或可見光照射物體後, 大量捕獲反射回來之光束所量測的距離及姿態, 回推三維坐標形成點雲(point cloud)型態, 能夠非常快速的獲得空間資訊, 非常適合重建複雜且不規則或特徵稀少的物件, 惟造價昂貴為其門檻。

RGB-D 感測器屬於主動式資料獲取方式, 透過 RGB 及深度(depth)等兩種感測器同時獲取彩色影像及每個像元的深度資訊, 即使在目標特徵不足區域也有相對應之點雲資料(Cho *et al.*, 2012、吳姿璇, 2015、陳俊宇, 2022、朱禹綸, 2023)。RGB-D 感測器因能量功率較低, 僅能小範圍拍攝, 有效範圍在數公尺以內, 且 RGB 影像解析度不如攝影測量用之照片, 但價格低廉和方便攜帶。

RGB-D 感測器有如低規格的地面光達且較多限制, 因拍攝範圍小需架設多站拍攝和點雲套合(registration), 便利性不如價格昂貴的地面光達; 但

透過增加時間成本換取資料蒐集上的金錢成本, 達到權衡利弊。目前已有採取 RGB-D 感測器建置古蹟文物三維模型的案例(Pathak *et al.*, 2021、艾希雅, 2022)。在低成本的需求下, 加上室內環境通常屬於固定形狀且缺乏特徵的情況, 本研究使用 RGB-D 感測器獲取點雲資料輔助人工三維製圖, 並比較「傳統策略」及「RGB-D 策略」的「測量作業時間」, 以及評估兩種測量成果的「建模作業時間」、模型尺寸驗證與外觀分析。

2. 測試區域與儀器

本研究場域為逢甲大學土木水利館會議室, 為三面牆、一面窗之矩形空間, 並含有柱子、白板、窗戶、馬蹄形桌及數張椅子等物件, 如圖 1 所示。本研究使用的 RGB-D 感測器為 Intel® RealSense™ LiDAR Camera L515, 拍攝的解析度為每秒 2300 萬像素, 在深度影像解析度為 1024 x 768 下可以達到 30 fps。可量測之最大距離區間為 0.25 至 9 m, 並搭配其軟體 Intel RealSense Viewer, 來獲取空間點雲資料。L515 RGB-D 感測器包含了一組加速計、陀螺儀、RGB 感測器及波長為 860 nm 的主動式感測器。L515 RGB-D 感測器的直徑約為 61 mm, 高為 26 mm, 重量約為 100 g, 是一台方便攜帶的小型感測器, 如圖 2 所示。



圖 1 測試場域(逢甲大學土木水利館會議室, 場域之長寬高各為 9.755 m、7.052 m、3.371 m)



圖 2 本研究使用之 RGB-D 感測器(Intel RealSense LiDAR Camera L515)

3. 研究流程與方法

本研究以「傳統策略」及「RGB-D 策略」等兩種方式測量及建模，並比較作業上的時間成本與分析成效。整體研究流程如圖 3 表示，傳統策略使用紅外線測距儀或捲尺進行量測，並透過二維平面軟體繪圖及三維建模軟體繪製模型；RGB-D 策略使用低成本 RGB-D 感測器 Intel® RealSense™ LiDAR Camera L515 與其相融軟體 Intel RealSense Viewer 進行拍攝及獲取點雲，並進行點雲套合，套合完之點雲匯入三維建模軟體進行點雲輔助模型建置。

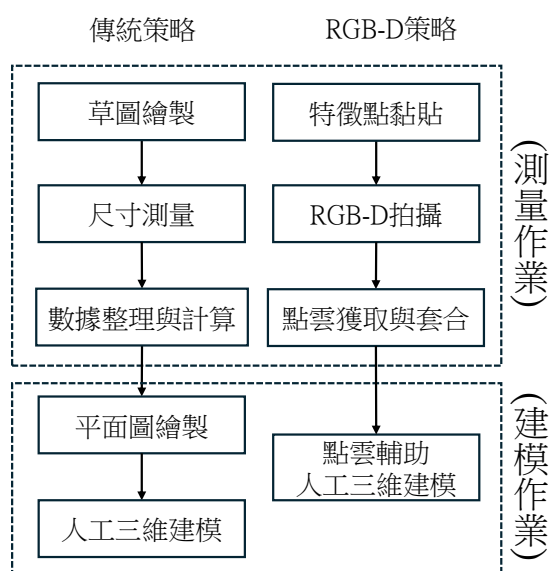


圖 3 研究流程

本研究探討時間成本差異，將「傳統策略」與「RGB-D 策略」的流程拆分為「測量作業」及「建模作業」等兩項進行評估。「傳統策略」的「測量作業」包含草圖繪製、尺寸測量、數據整理與計算等

三項，「建模作業」包含平面圖繪製、人工三維建模等。「RGB-D 策略」的「測量作業」包括人工黏貼特徵點、RGB-D 拍攝、點雲獲取和套合等三項，「建模作業」則為點雲輔助人工三維建模等。在三維建模上又分成建築結構與非建築結構兩類，前者包含如牆面與梁柱等，後者涵蓋如桌椅部分。以上流程細述如下。

3.1 傳統策略

傳統策略之作業流程如圖 3 左側所示。在「測量作業」中，首先繪製草圖，使用紅外線測距儀或捲尺測量空間內梁柱及桌椅等物件尺寸，經過反覆觀測後，將多次觀測數據平均之結果填寫至草圖中。接續進行「建模作業」，將草圖內數據運用二維平面軟體繪製出平面圖，繪製完成之平面圖匯入三維建模軟體進行人工建模。本研究使用的二維平面軟體為 AutoCAD，三維建模軟體為 SketchUp。

3.2 RGB-D 策略

RGB-D 策略之作業流程如圖 3 右側表示。在「測量作業」中，由於室內空間中特徵點不足，不利多站點雲資料套合，先以人工黏貼特徵物的方式獲取特徵點。黏貼特徵點的目標包含建築結構的牆、柱等，非建築結構則有會議室之桌椅，並使用不透光紙蓋住窗戶，避免陽光干涉 RGB-D 感測；前述實況如圖 4 所示。每扇窗戶貼了約 10 個特徵點，所有窗戶約貼了 80 個標記；牆面部分(包含柱)貼了約 800 個特徵；每張椅子各貼 15 個標記，所有椅子貼了約 300 個特徵；桌子約貼了 400 個特徵點。總計室內空間中，涵蓋約 1,580 個特徵點，材料費為新台幣數百元。本研究使用的 RGB-D 感測器因能量功率較低，測試後所得之最佳感測器至目標的距離為 0.75 至 1 m(艾希雅，2022)，故採用多站拍攝的方式涵蓋整個測試場域。在架站策略上，總共設計 24 個測站，且每個測站利用相機腳架各架設 4 種高度，如圖 5 所示；搭配 L515 RGB-D 感測器所使用的軟體 Intel RealSense Viewer 捕捉點雲資料，共計 96 組點雲資料。接續將捕捉後之多站點雲匯入三維立體網格軟體 MeshLab 進行點雲套合，並將套合後

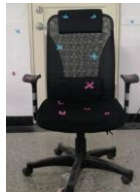
的點雲資料透過外掛模組 Trimble Scan Essentials 匯入三維建模軟體 SketchUp，據此輔助而建置出準確的三維模型。



(a) 使用之軟、硬體及牆、柱與窗戶實況



(b) 桌子



(c) 椅子

圖 4 使用之軟、硬體與特徵點黏貼之建築結構及非建築結構實況



(a)



(b)

圖 5 RGB-D 感測器架站位置圖，(a)測站擺設之平面圖(共 24 站)、(b)各測站不同高度之側視圖

4. 研究成果與討論

本研究比較「傳統策略」及「RGB-D 策略」的「測量作業」及「建模作業」時間成本，並探討模型三維視覺化之成果。「傳統策略」的「測量作業」時間包含草圖繪製、建築與非建築結構的量測及計算等；「建模作業」時間，因需將 2D 平面圖拉成 3D 立體圖，故包含平面圖繪製及三維建模等過程。

「RGB-D 策略」的「測量作業」時間則包含場地的特徵點黏貼、RGB-D 拍攝、點雲套合等；「建模作業」時間，因僅使用點雲輔助建置模型，因此只包含三維建模之工項。前述所有工作項目皆由 4 位組員各別執行，並統計各自所花時間，以期客觀地比較時間成本。4 位組員皆為大四學生，其大一修過 2 學期的工程圖學，擁有基本 AutoCAD、SketchUp 等製圖技能。RGB-D 感測器針對建築結構產製和套合完成的點雲資料如圖 6 所示，非建築結構則如圖 7。圖 8 顯示點雲資料和其中一位組員建置的三維模型成果。

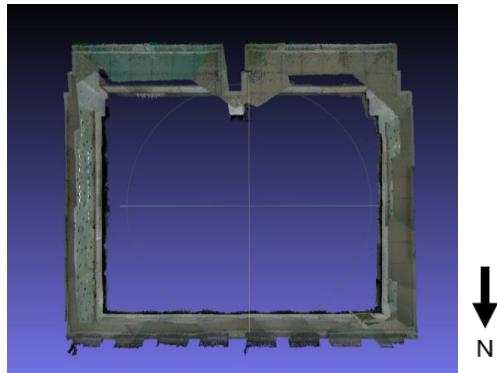
4.1 時間成本

圖 9 呈現 4 位組員根據「傳統策略」及「RGB-D 策略」所花的時間成本，其拆解成「測量作業」及「建模作業」時間。由圖可知，4 位組員的時間趨勢相近，具有一定程度的參考意義。此外，「傳統策略」的「建模作業」及「RGB-D 策略」的「測量作業」時間成本較高；平均 4 位組員的時間成本，「傳統策略」之「測量作業」、「建模作業」時間各為 3.479 小時、4.958 小時，「RGB-D 策略」則為 5.209 小時、1.188 小時。

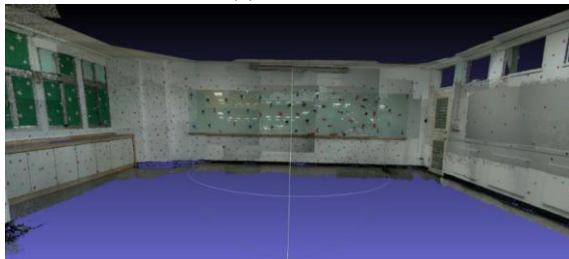
以組員 1 為例(所花時間最高者)，其「傳統策略」的「測量作業」時間較「RGB-D 策略」少 1 小時 45 分鐘(1.75 小時)，其原因在於本研究使用的 RGB-D 感測器有效範圍短而進行多站拍攝，以及本研究場域特徵不足需黏貼大量人工特徵點以利後續的點雲資料套合，導致「RGB-D 策略」在「測量作業」環節佔用大部分時間。在「建模作業」時間中，「RGB-D 策略」則省下 4 小時，原因為透過點雲輔助可得準確的尺寸和紋理特徵，使得建模作業能相對客觀且容易地繪製出建築結構和非建築結構物件。

表 1 進一步顯示組員 1 在細部工作項目的時間成本。「傳統策略」在「測量作業」時間中，草圖繪製需 10 分鐘，測量建築結構與非建築結構共花費 190 分鐘，而數據整理和計算有 20 分鐘，總計 3 小時 40 分鐘(3.667 小時)；在「建模作業」中，平面圖繪製需 30 分鐘，建築結構和非建築結構的三維建模共

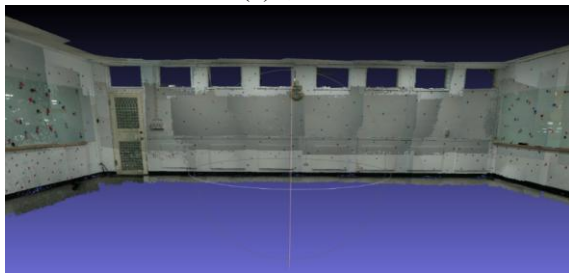
花費 4 小時 50 分鐘，合計 5 小時 20 分鐘(5.417 小時)。「RGB-D 策略」的「測量作業」裡，場地特徵點黏貼花費 1 小時，RGB-D 拍攝需 1 小時 5 分鐘，點雲套合有 3 小時 20 分鐘，共計 5 小時 25 分鐘(5.333 小時)；「建模作業」則花費 1 小時 20 分鐘。



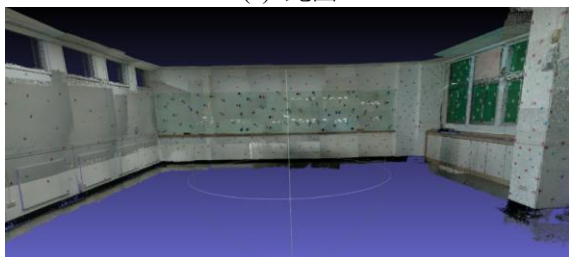
(a) 俯視圖



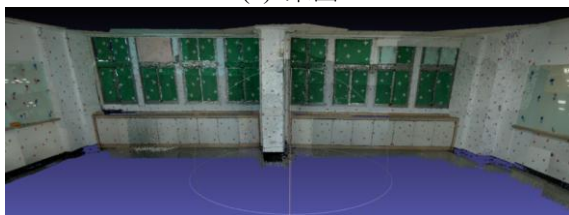
(b) 西面



(c) 北面

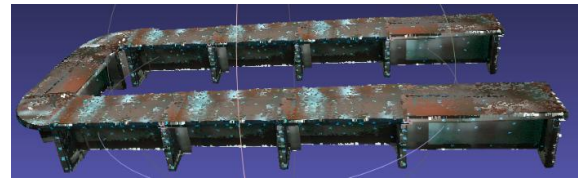


(d) 東面

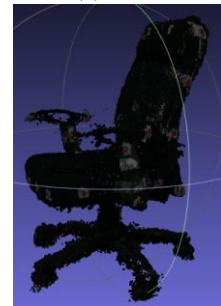


(e) 南面

圖 6 建築結構點雲資料套合成果



(a) 桌子

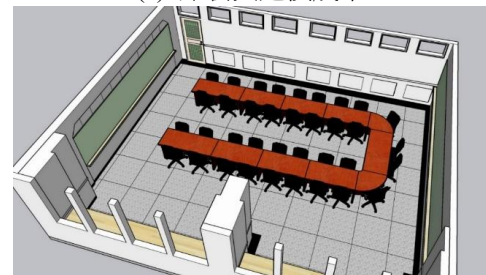


(b) 椅子

圖 7 非建築結構點雲資料套合成果



(a) 點雲與建模成果



(b) 建模成果(組員 1 為例)

圖 8 套合後點雲資料與三維模型成果

值得一提，「傳統策略」窒礙難行之處在於非建築結構物件的測量(組員 1 案例為 2 小時 20 分鐘)和模型建置(3 小時 30 分鐘)；「RGB-D 策略」時間成本大多花在建築結構的點雲套合(2 小時 30 分鐘)，卻大大節省非建築結構物件的建置(僅 35 分鐘)，如表 1 粗體底線標記所示。此現象說明，「傳統策略」的測量與建模作業不利複雜或不規則目標，若測試場域更為複雜，其時間成本恐大大上升；另一方面，「RGB-D 策略」的儀器規格若能提升(未達地面光達等級)，預期減少測站數量和點雲套合作業，可進一步降低時間成本。整體而言，本研究的「RGB-D 策略」時間成本較「傳統策略」節省 2 小時 15 分

鐘。

4.2三維模型視覺化比較

4 位組員根據兩種策略建置三維模型之比較如圖 10 呈現，左側為「傳統策略」，右側為「RGB-D 策略」。外觀上，兩種策略與不同人員產出的幾何差異不大，惟紋理敷貼因主觀判斷而有所不同(如物件的顏色及深淺、地板是否考慮方框圖樣等等)，以及部分目標稍有不一致情形(如會議桌與白板的距離、組員 2 繪製柱有實心與空心情形等等)。圖 10 的紋理差異，突顯通用紋理敷貼極度依賴繪圖者的主觀判斷，或許需要事前的定義與事後的檢核，才能有效保持外觀一致性。

圖 10 的複雜物件為椅子，細節放大及其繪製依據如圖 11 所示；圖 11 中(a)至(d)上方和下方個別為「傳統策略」和「RGB-D 策略」建置成果，其繪製依據如圖 11(e)與(f)所示。比較圖 11(a)至(d)，顯示點雲輔助建模作業產生較一致的成果(如圖 11 第二列)，尤其在椅背頂端、扶手及基座等部分甚為明顯。從圖 10 和圖 11 可知，簡單物件(本研究即為建築結構)不論採用「傳統策略」或「RGB-D 策略」，建構的幾何形狀差異不大，但複雜且不規則物件(如椅子)採用「RGB-D 策略」的幾何品質較為穩定；而紋理敷貼依靠產製者主觀判斷後，從圖片資料庫選取，導致外觀與顏色差距甚遠，值得後續探討紋理的產製策略。

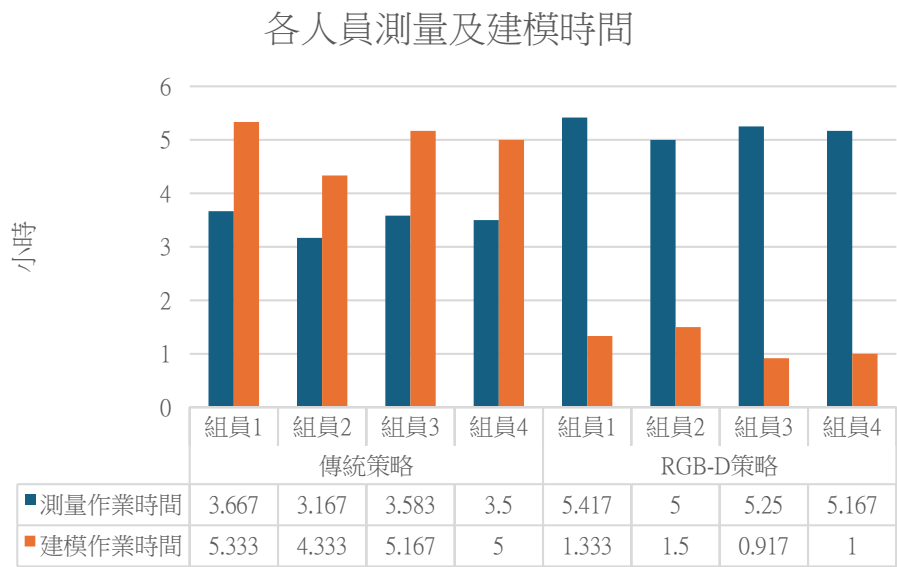


圖 9 時間成本比較(傳統策略之平均測量作業時間：3.479 小時、平均建模作業時間：4.958 小時，RGB-D 策略之平均測量作業時間：5.209 小時，平均建模作業時間：1.188 小時)

表 1 細項工作項目之時間成本比較(組員 1 為例)								
測量作業時間					建模作業時間			
傳統策略	總計 3 小時 40 分鐘	測量	草圖繪製	10 分鐘	總計 5 小時 20 分鐘	平面圖繪製	建築結構	20 分鐘
			建築結構	50 分鐘			尺寸標註	10 分鐘
			非建築結構	<u>2 小時</u> <u>20 分鐘</u>			建築結構	1 小時 20 分鐘
		數據整理與計算	20 分鐘	建模	非建築結構	<u>3 小時</u> <u>30 分鐘</u>		
RGB-D 策略	總計 5 小時 25 分鐘	特徵點黏貼	建築結構	40 分鐘	總計 1 小時 20 分鐘	建築結構	45 分鐘	
			非建築結構	20 分鐘				
		拍攝	建築結構	45 分鐘		非建築結構		
			非建築結構	20 分鐘				
		點雲套合	建築結構	<u>2 小時</u> <u>30 分鐘</u>				
			非建築結構	50 分鐘			<u>35 分鐘</u>	

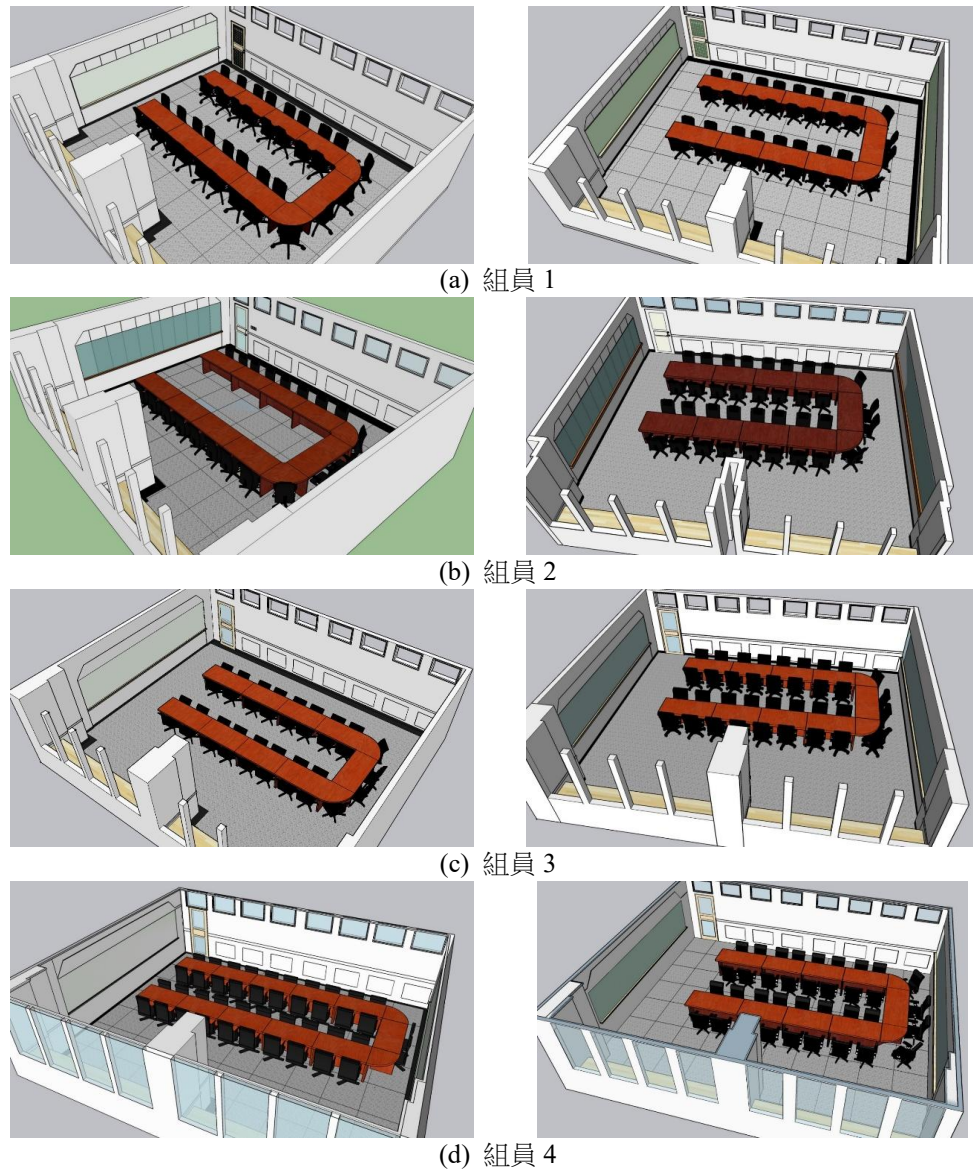


圖 10 三維模型成果比較(左側為傳統策略、右側為 RGB-D 策略)

4.3 討論

4.1 節呈現不同建置策略的時間成本，揭露兩種策略個別在測量和建模作業的時間差異，以及建構規則/簡單、不規則/複雜物件的成效。圖 9 顯示，「傳統策略」在「測量作業」階段較「RGB-D 策略」平均節省約 1 小時 44 分鐘(5.209 – 3.479 小時)；在「建模作業」階段，「RGB-D 策略」的總花費時間較「傳統策略」平均減少約 3 小時 46 分鐘(4.958 – 1.188 小時)。此外，在非建築結構中(表 1)，「RGB-D 策略」在測量與建模作業個別減少 1 小時 10 分鐘(2 小時 20 分鐘–20 分鐘–50 分鐘)和 2 小時 55 分鐘(3 小時 30 分鐘–35 分鐘)。

「RGB-D 策略」於「測量作業」較「傳統策略」多花 1 小時 44 分鐘，其原因為感測器有效拍攝範圍較短，需要多站拍攝及大量點雲資料套合，加上測試場域大多為規則物件，使得資料蒐集優勢不明顯。「建模作業」部分則突顯點雲輔助三維製圖的優勢，尤其是非建築結構物件透過點雲描繪輪廓，能相對快速且客觀的繪製，減少時間成本。因此，儀器規格和場域特性是影響本研究策略執行成效的主要原因。本研究使用的 RGB-D 感測器售價不到新台幣 2 萬元，對於實務界仍有一定程度的吸引力；若感測器的有效距離提升，相信在資料蒐集和點雲套合的時間成本能進一步降低，其硬體成本亦不若光達設備高昂，有產業鏈實施的可行性。



圖 11 複雜物件成果比較(第一、二列為傳統策略、RGB-D 策略)及數化依據

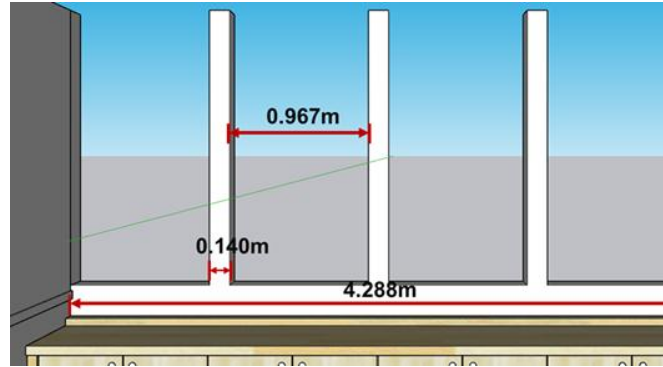
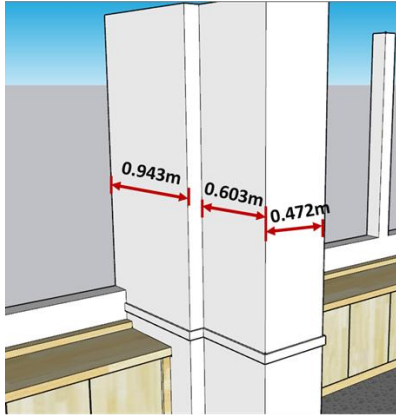
4.2 節從外觀上質化建模成果，可從幾何與紋理等兩個角度探討。「RGB-D 策略」的幾何成果較為穩定，不易受簡單或複雜的物件影響，建置的時間成本也較低。惟本研究透過人工進行三維製圖，其紋理依靠繪製者的主觀判斷，從資料庫中挑選近似圖片敷貼，導致外觀與顏色因人而異，故事前的定義與事後的檢核值得後續精進。在模型尺寸的比較，圖 12 顯示兩種策略建置的成果相近，差異絕對值介於 3 mm 至 2.8 cm；距離較長的目標(窗台)恐因點雲誤差或人為判斷而有公分級差別，而柱僅公厘級差異，此成果應能滿足視覺化與建築結構力學分析的需求。

根據前述的成果比較及討論，以下列出未來可能的精進方向。

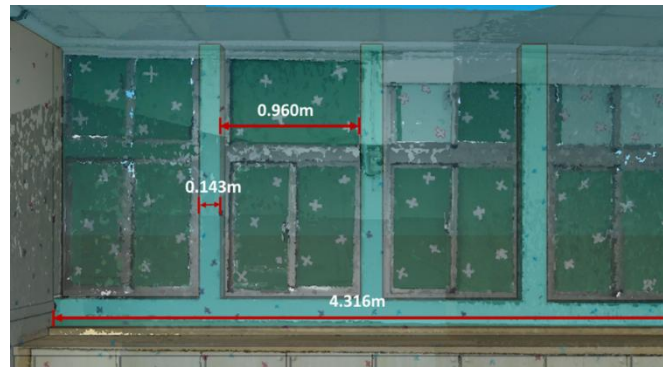
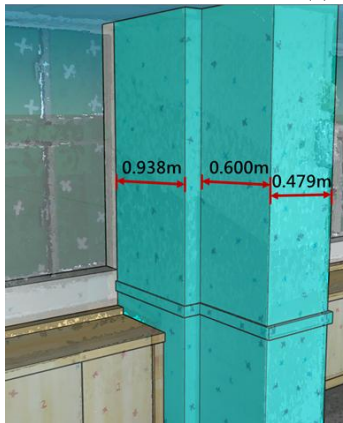
(1) 4 位作業人員在「傳統策略」和「RGB-D 策略」的「測量作業」皆統一執行，實務上不同作業人

員可能產生不一致性的幾何量測問題，釐清此情況有利建立更清晰的比較基準。

- (2) 提升點雲與室內三維製圖的品質與自動化程度：例如建置載台(吳姿璇，2015)、方位重建精化點雲品質(郭宣瑋，2018)、點雲套合自動化(陳威穎，2019、王名玉，2010)、點雲擬合成參數化模型(林育薇，2019、鄧歲元，2017、陳侶臣，2016、陳俊元，2015、曹恒銓，2015)、結合其他低成本感測器(張正岳，2017)等等。
- (3) RGB-D 感測器的影像於本研究中扮演點雲套合的輔助角色，其品質和清晰度作為真實(photo-realistic)紋理影像的可行性需進一步測試。
- (4) 利用真實紋理敷貼策略(林后駿，2005、陳正軒，2006)搭配影像遮蔽補償機制(陳品學，2010)，或採通用(generic)與真實紋理混合策略(張凱硯，2018)提升紋理敷貼的一致性和自動化程度。



(a) 傳統策略建置成果(即現地測量結果)



(b) RGB-D 策略建置成果

圖 12 三維模型尺寸量測比較(差異絕對值介於 3 mm 至 2.8 cm)

5. 結論與建議

本文改良傳統人工量測進行室內三維製圖流程，以低成本的 RGB-D 感測器蒐集環境資料，透過點雲輔助來提升人工建模的作業成效。本研究主要貢獻在於複雜且不規則的物件能以相對客觀與快速方式進行測量和建置模型；惟儀器規格限制和測試場域的特性，使得資料蒐集時間較長。整體而言，「RGB-D 策略」的時間成本較「傳統策略」少，所提之作業流程仍有一定程度的實務性。根據實驗設計和結果，提出以下總結和未來展望。

- (1) 在時間成本中，「RGB-D 策略」較「傳統策略」平均節省約 2 小時；針對非建築結構部分(如桌椅)，更減少 1 小時 10 分鐘的「測量作業」時間與 2 小時 55 分鐘的「建模作業」時間。若提升儀器規格或場域涵蓋更多複雜物件，其整體測量作業將減少多站觀測與點雲套合的時間成本，增加作業流程的經濟性。

- (2) 兩種策略的模型外觀比較上，幾何的主要差異在於非建築結構，來自人工數化的主觀判釋或依據客觀的點雲輪廓；紋理部分則受制於人工建置模型過程的影像資料庫選用，導致圖樣及顏色不一致的情形。
- (3) 模型的尺寸驗證中，兩種策略產製模型的差異絕對值介於公厘級至 2.8 cm，其與物件大小有關，但應滿足視覺化與建築結構力學分析之需求。
- (4) 本研究成果揭露紋理敷貼的重要性，以及點雲套合和模型產製的高成本。建議未來朝室內紋理敷貼策略、點雲資料處理與建模自動化等方向進行改善。

致謝

本研究承蒙中華民國航空測量及遙感探測學會補助筆者赴南韓仁川參加 2025 年國際遙測研討會(International Symposium on Remote Sensing 2025)，

並發表本研究成果，特此致謝。作者群亦感謝林侑璉、陳彥霆、孫秉宏等同學協助本研究進行。

參考文獻

- 王名玉，2010。多尺度張量應用於 3D 點雲套合之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。[Wang, M.Y, 2010. 3D point cloud registration using multi-scale tensors, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 朱禹綸，2023。基於 RGB-D SLAM 之 3D 點雲模型重建演算法框架設計與實作，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文。[Chu, Y.L, 2023. Design and implementation of a 3D point cloud model reconstruction algorithm framework based on RGB-D SLAM, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 艾希雅，2022。發展低成本點雲與三維模型建置策略重建中式傳統圖騰藝術物件，逢甲大學智慧城市碩士學位學程碩士論文。[Escobar Hernandez, C.A., 2022. Developing a low-cost strategy of point cloud generation and 3D modeling for reconstructing an art object with Chinese traditional patterns, Master Thesis, Feng Chia University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 吳姿璇，2015。整合 RGB-D 感測器與單眼數位相機的室內環境點雲模型重建，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Wu, T.S., 2015. Integration of RGB-D sensor and digital single-lens reflex camera for indoor point cloud model generation, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 林后駿，2005。三維房屋模型實景紋理影像製作與敷貼之研究，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Lin, H.J., 2005. Near photo-realistic texture mapping on 3D building models, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 林育薇，2019。整合參數模型與網格模型重建複雜建築結構物，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Lin, Y.W., 2019. Integrating parametric and mesh models for complicated building structures, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張正岳，2017。以視訊式環景影像產製三維點雲，國立交通大學土木工程學系碩士論文。[Chang, C.Y., 2017. The generation of 3D point clouds using video-based panorama images, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張凱硯，2018。三維房屋模型擬真牆面通用紋理產製及敷貼，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Chang, K.Y., 2018. Improving generic façade textures of building models for realistic visualization, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 張智安、張正岳，2018。以球形及圓柱投影雙環景影像產製三維點雲，航測及遙測學刊，23(4)：273-284，DOI：10.6574/JPRS.201812_23(4).0004。[Teo, T.A., and Chang, C.Y., 2018. The generation of 3D point clouds from spherical and cylindrical panorama images, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 23(4): 273-284, DOI: 10.6574/JPRS.201812_23(4).0004. (in Chinese)]
- 曹恒銓，2015。空載光達點雲結合幾何約制之三維建物模型擬合，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。[Tsao, H.C, 2015. Airborne LiDAR point cloud fitting with geometric constrains, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 郭宣瑋，2018。利用角度與距離聯合平差於 RGB-D 影像之方位重建，國立交通大學土木工程學系碩士論文。[Kuo, S.W., 2018. Orientation modelling for RGB-D images using angle and distance combined adjustment, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]

- 陳正軒，2006。以視訊影像進行三維房屋模型實景紋理敷貼之研究，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Chen, C.H., 2006. Producing realistic building texture using video mosaic, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 陳俊元，2015。基於空載光達點雲之三維建物模型擷取系統，國立成功大學測量及空間資訊學系博士論文。[Chen, J.Y, 2015. 3D building model retrieval system using airborne LiDAR point clouds, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 陳俊宇，2022。應用深度影像技術於實景影像即時三維建模，南華大學永續綠色科技碩士學位學程碩士論文。[Chen, J.Y., 2022. Applications of depth image technologies on real-time 3D modeling for real images, Master Thesis, Nanhua University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 陳侶臣，2016。影像式空載光達點雲編碼應用於三維建築模型擷取，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。[Chen, Y.C, 2016. Image-based airborne LiDAR point cloud encoding for 3D building model retrieval, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 陳品學，2010。影像修補技術於牆面紋理影像遮蔽去除之應用，國立中央大學土木工程學系碩士論文。[Chen, P.S., 2010. Occlusion removal of façade texture with constrained image inpainting, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 陳威穎，2019。相似轉換參數估算比較研究應用於多測站光達點雲之套合，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。[Chen, W.Y, 2019. Comparison study of similarity transformation parameter estimation for multi-station LiDAR point clouds, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 曾信翰，2008。三維雷射掃描儀反射標定位精度提升之研究-以 Trimble Mensi GS200 為例，國立交通大學土木工程學系碩士論文。[Tzeng, S.H., 2008. A study on the improving 3D laser scanner target's positioning precision and accuracy-A case of Trimble Mensi GS200, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 楊政儒，2021。以雙繞射光學元件設計廣角結構光圖案之設計與實現，國立臺北科技大學光電工程系碩士論文。[Yang, Z.R, 2021. Design and implementation of wide-angle structured light patterns of dual diffractive optical elements, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 鄧崑元，2017。空載光達點雲與塊狀式迭代偵測技術應用於三維建物模型重建，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。[Deng, W.Y, 2017. 3D building modeling from airborne LiDAR data using block-based iterative detection, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 錢泓嶧，2011。三維影像建模技術之研究與應用，國立東華大學光電工程學系碩士論文。[Chien, H.Y., 2011. O The study and application of 3D image modeling technology, Master Thesis, National Dong Hwa University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- Chiabrando, F., Sammartano, G., Spanò, A., and Spreafico, A., 2019. Hybrid 3D models: When geomatics innovations meet extensive built heritage complexes, ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(3): 124, DOI: 10.3390/ijgi8030124.
- Cho, J.-H., Lee, K.H., and Aizawa, K., 2012. Enhancement of depth maps with Alpha channel estimation for 3-D video, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 6(5): 483-494, DOI: 10.1109/JSTSP.2012.2195156.
- Fascia, R., Barbieri, F., Gaspari, F., Ioli, F., and Pinto,

- L., 2024. From 3D survey to digital reality of a complex architecture: A digital workflow for cultural heritage promotion, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W4: 205–212, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-205-2024.
- Herban, S., Costantion, D., Alfio, V.S., and Pepe, M., 2022. Use of low-cost spherical cameras for the digitisation of cultural heritage structures into 3D point clouds, *Journal of Imaging*, 8(1): 13, DOI: 10.3390/jimaging8010013.
- Kantaros, A., Ganetsos, T., and Petrescu, F.I.T., 2023. Three-dimensional printing and 3D scanning: emerging technologies exhibiting high potential in the field of cultural heritage, *Applied Sciences*, 13(8): 4777, DOI: 10.3390/app13084777.
- Lee, I.-C., and Tsai, F., 2015. Applications of panoramic images: From 720° panorama to interior 3D models of augmented reality, *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4/W5: 189-192, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-189-2015.
- Li, Q., Huang, H., Yu, W., and Jiang, S., 2023. Optimized views photogrammetry: Precision analysis and a large-scale case study in Qingdao, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 144-1159, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3233359.
- Liu, J., Xu, D., Hyyppä, J., and Liang, Y., 2021. A survey of applications with combined BIM and 3D laser scanning in the life cycle of buildings, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 5627-5637, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3068796.
- Luhmann, T., Chizhova, M., Gorkovchuk, D., Hastedt, H., Chachava, N., and Lekveishvili, 2019. Combination of terrestrial lasercanning, UAV and close-range photogrammetry for 3D reconstruction of complex church es in Georgia, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11: 753–761, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019.
- Pathak, R., Saini, A., Wadhwa, A., Sharma, H., and Sangwan, D., 2021. An object detection approach for detecting damages in heritage sites using 3-D point clouds and 2-D visual data, *Journal of Cultural Heritage*, 48: 74-82, DOI: 10.1016/j.culher.2021.01.002.
- Redweik, P., Blasco, J.J.de S., Sánchez-Fernández, M., Atkinson, A.D., and Corrales, L.F.M., 2020. Tower of Belém (Lisbon)–status quo 3D documentation and material origin determination, *Sensors*, 20(8): 2355, DOI: 10.3390/s20082355.
- Spennemann, D.H.R., and Hurford, S., 2024. Low-cost mobile 3D scanning of heritage objects to facilitate long-distance research collaboration, *arXiv:2412.09749*, DOI: 10.48550/arXiv.2412.09749.
- Tarsha Kurdi, F., Reed, P., Gharineiat, Z., and Awrangjeb, M., 2023. Efficiency of terrestrial laser scanning in survey works: Assessment, modelling, and monitoring, *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 32(2): 556334, DOI: 10.19080/IJESNR.2023.32.556334.

Assessments of Indoor 3D Mapping with Low-cost Point Clouds

Jhe-Syuan Lai ¹ Yi-Cing Sun ² Hao-Hsiang Hsu ^{3*}

Abstract

This study applies the RGB-D sensor, which is one of low-cost devices, to capture point clouds of the indoor environment for aiding 3D reconstruction manually. Based on the goal of reducing the cost, the proposed solution is compared with that of measurements and 3D reconstructions by manually. For measuring the indoor environment, the manual approach is faster than the RGB-D scanning, saving 1 hour and 25 minutes. The RGB-D sensor captures point clouds with multiple stations and data registrations causing time consuming operations. For reconstruction, the RGB-D based method improves than the manual approach to save 4 hours. In summary, this study demonstrates the feasibility of the low-cost strategy. The significant improvements of measurement will be expected by upgrading the specification of the used sensor or modeling the complex and irregular targets.

Keywords: 3D Mapping, Indoor Environment, Low-cost Solution, Point Cloud, RGB-D Sensor

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Feng Chia University

² Master Student, Department of Civil Engineering, Feng Chia University

³ Associate Professor, Department of Urban Planning and Spatial Information, Feng Chia University

* Corresponding Author, Tel: 886-4-24517250 ext. 3369, E-mail: haohhsu@fcu.edu.tw

Received Date: Jun. 06, 2025

Revised Date: Jun. 19, 2025

Accepted Date: Jun. 24, 2025