

# 品質資訊導向的光學點雲測繪框架

莊芷瑄<sup>1</sup> 趙鍵哲<sup>2\*</sup>

## 摘要

近年來，點雲已成為多維度空間資訊獲取與應用中不可或缺的資料形式。然而，「品質」在點雲測繪流程中長期遭到忽略——現有研究多將品質視為事後驗證或成果評分的附屬要素，鮮少探討其對操作判斷、策略選擇與成果採用的影響。本文旨在揭開品質之於點雲測繪技術進步的重要性，品質不僅關乎成果可信度，更牽動整個測繪流程的運作。透過從資料特性、測繪流程與測繪工具等多面向的討論，說明品質如何在不同層次中形成風險、限制或決策依據。透過建立系統性的品質認知框架，為後續品質導向測繪流程與決策支援方法的發展奠定問題意識與研究基礎。

**關鍵詞：**光學點雲、品質資訊、測繪困難區、誤差分析

## 1. 前言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 傳統測繪方法的基石：立體測圖技術與光學影像

傳統光學影像式空間向量資訊的獲取任務主要依賴立體測圖技術。立體測圖技術係指從兩張不同角度拍攝之影像重現場景空間幾何樣貌，利用立體觀測於立體模型中進行測繪。

然而立體測圖需要配備專業的測圖儀器及相關軟體，如圖 1 所示，作業人員必須具備一定的立體觀測能力、判讀專業和純熟的立體測繪操作技術。過往的測繪任務，針對各式地類地物的空間位置偏重於俯視輪廓的萃取，三維訊息(例如地形圖)的收集在此種作業模式下雖具品質及高可靠度，但二維影像相較於經過整合的三維模型，存在深度資訊不完整的限制，因影像受限於單一觀測角度，導致其在處理複雜場景的三維結構時表現不夠直觀，進而影響資料的應用效率。同時，影像的品質、拍攝角度以及影像的重疊率也對後續的資料處理結果產生直接影響。

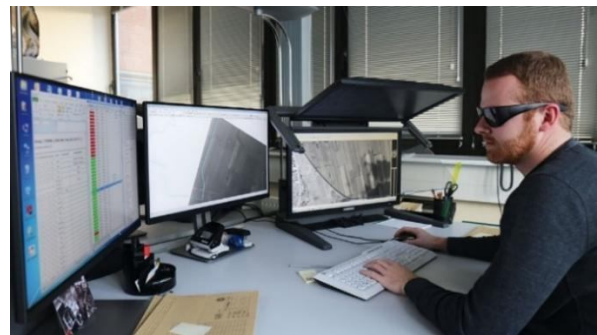


圖 1 立體測圖環境專業設備(資料來源：3D PluraView)

#### 1.1.2 從傳統到現代：密匹配技術產製點雲的進步

隨著電腦視覺(Computer Vision)技術的迅速發展，密匹配(Dense Matching)技術在傳統攝影測量基礎上取得了重大突破，特別是逐像元匹配(Pixelwise Matching)的引入，由二維影像可生成高密度點雲。例如，Hirschmüller(2008)提出的半全域匹配法(Semi-Global Matching, SGM)，通過多組像對的成功匹配之共軛點進行空間前方交會，生成高密度的三維點雲。本文將此類經由光學影像產製之點雲稱為光學點雲，在以下內容也多處簡稱為點雲。

相較於僅仰賴有限視角影像對(Image Pair)的傳

<sup>1</sup> 國立臺灣大學土木工程學系 計畫研究專員

<sup>2</sup> 國立臺灣大學土木工程學系 副教授

\* 通訊作者, E-mail: jejaw@ntu.edu.tw

收到日期：民國 115 年 01 月 08 日

修改日期：民國 115 年 04 月 10 日

接受日期：民國 115 年 04 月 13 日

統立體測圖方式，高密度點雲能更完整且真實地描述目標場景之三維幾何結構，提供具連續性與高解析度的空間資訊，特別適用於地形測量與建物模型建置等需精細幾何表現的測繪任務。隨著空間資訊需求由二維圖資逐步轉向三維圖資，以建物為例，測繪任務已不再僅關注建物屋頂，而需完整描述立面與周邊空間關係，建模複雜度顯著提升，點雲因具備較完整及全面場景資料，能較有效支援現代測繪任務，已成為現代空間資訊萃取與三維測繪中不可或缺的關鍵資料。

### 1.1.3 點雲的優勢與應用價值

圖 2 展示了點雲相對於二維影像在描述真實三維場景時的優勢。傳統立體測圖在兩張影像組成的立體模型中僅能觀測有限的範圍，對完整場景的測繪需選用多組立體模型並組合測繪成果，作業效能不彰。

相較之下，經由多視角密匹配產製的點雲為目標物體的觀測提供了更簡便且高效的方式，不僅減少了影像挑選與拍攝限制對特徵表達的影響，其靈活性與直觀性更在三維場景和物體分析中展現出強大的應用價值，測繪人員可以在視覺化介面中直接縮放目標位置，並通過旋轉進行幾何形態與細節的全面觀察。如圖 2(b) 所示，點雲能清晰呈現建物屋頂的結構，而立體測圖則須結合不同視角(圖 2(a))之多幅影像對才能完整描述目標物，這突顯了點雲在立體幾何觀測中的效率與直觀性。

以內政部近年所推展之多維度資料建置為例，當遇到建物彼此緊鄰或共用牆面的情形，影像較難

以準確區分個別建物的獨立幾何特徵與高程資訊，因此多僅有繪製建物最外圍輪廓，如圖 3(a)及(b)所示(內政部國土測繪中心，2020)。相較之下，點雲資料能夠直接反映建物的真實三維結構，更容易辨識並萃取各棟建物的結構線，提高三維建物模型的精細度與建置效率。

點雲能夠直接、快速地獲取大範圍剖面上連續分布的三維坐標據以分析剖面高程資訊。如圖 4 所示，透過平台的分析功能，可即時產生沿剖面線方向的高程變化曲線，清楚呈現地物表面的起伏特徵與幾何形態，迅速提供完整且連續的高程相關資訊。

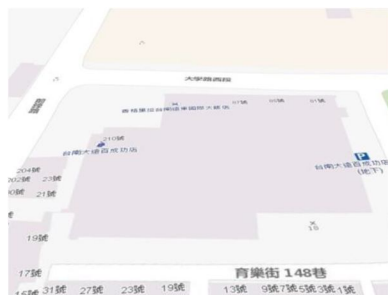


(a) 不同視角之二維影像



(b) 三維點雲

圖 2 不同視角影像對比於點雲描述真實場景差異



(a) 台灣通用電子地圖建物框



(b) 三維建物模型



(c) Google 街景

圖 3 三維近似化建物模型樓高與現況差異比較圖(內政部國土測繪中心，2020)

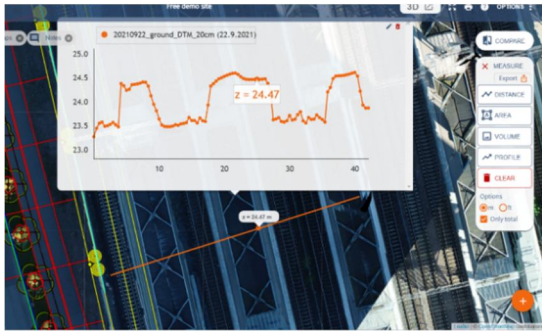
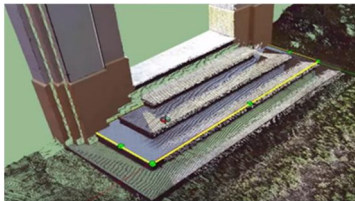


圖 4 快速取得地形剖面(高程)資料(截圖自 Point scene)

點雲亦能通過自動化或半自動化方法快速生成如建物輪廓(圖 5 (a))以及道路邊界及標線(圖 5 (b))等空間資訊，為各類三維場景自動產製任務奠定基礎。顯然地，這種基於三維空間的觀測模式顯著提升了測繪任務的效率與便利性。



(a) 建物結構線萃取(內政部國土測繪中心，2019)



(b) 道路標線萃取(Pix4D Survey)

圖 5 點雲於三維圖資產製之實際應用

### 1.1.4 點雲的測繪的挑戰

然而，在實際測繪應用中，點雲所展現的優勢往往伴隨著多層次的限制與不確定性，使其測繪成果的可靠性與一致性面臨挑戰。這些挑戰並非僅源自資料本身精度，而是同時受到資料特性、人工判斷、測繪工具設計以及自動化方法適用性的共同影

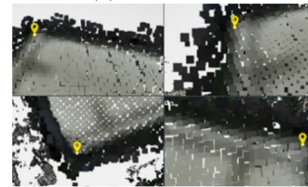
響。以下將從上述四個面向，說明點雲測繪現今所面臨的挑戰：

#### (1) 資料特性：點雲資料的雜訊型態

在點雲生成過程中，因多重點匹配或錯誤觀測值的累積，可能導致模型的幾何變形或結構失真(Yang *et al.*, 2023b)。同時，受點雲雜訊之干擾，即便在不同視角下，仍會影響測繪人員對特徵點的精確判斷(如圖 6 所示屋角頂點處)，不僅影響特徵萃取的準確性，還增加了後續資料處理的負擔。



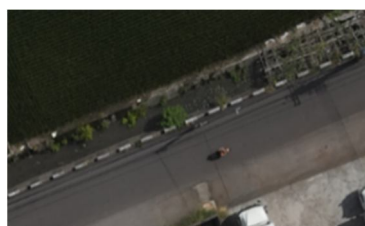
(a) 原始影像



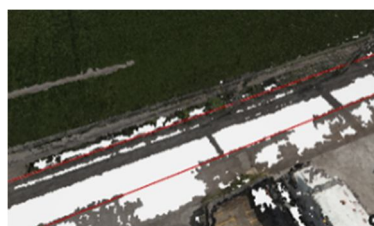
(b) 不同視角的點雲屋角頂點

圖 6 點雲雜訊影響

一般而言，雜訊對所測繪標的具干擾作用，其型態可視資料生產方式及特性再予細分。光學點雲的雜訊來源主要可分為(1)影像匹配以及(2)前方交會兩大面向。在影像匹配方面，光影變化、紋理重複性高表面、均質區域(如圖 7)、陰影遮蔽(如圖 8 紅框範圍)以及高反射材質等，都會造成輻射資訊不穩定，進而導致匹配產生誤差(包括隨機誤差及錯誤)，以及均質區域的失敗匹配；在前方交會方面，內外方位參數品質決定前交點位誤差(包括隨機誤差、局部扭曲以及系統性誤差)。總體而言，光學點雲的雜訊可分為隨機雜訊、錯誤、局部性幾何扭曲以及系統性偏移，是影響重建品質的一大因素。



(a) 原始影像



(b) 點雲

圖 7 均質區域(Yang *et al.*, 2023b)



圖 8 陰影區域(Yang *et al.*, 2023b)

點雲點位屬離散型，密度常呈不均勻樣態，點密度低的區域有可能是匹配失敗造成的點雲破洞(如圖 9)；錯誤匹配會扭曲場景幾何，這些樣態都會增加測繪困難及挑戰。

### (2) 主觀判斷：點位選擇對量測不確定性的影響

由於點雲描述的是三維空間結構，僅從單一觀測角度檢視模型時，往往無法完整呈現點位的實際空間位置，不同觀測角度可能導致對建物角點位置的判斷產生差異(圖 10)。此一角點判讀差異進一步反映於量測結果中，即使針對同一目標點位，在多視角條件下進行重複量測，所得結果仍可能存在偏差(圖 11)，使得點雲點位量測具有一定程度的不確定性，且易受觀測視角與局部幾何條件影響。

而量測場景或目標物表面能否被清楚辨識，受到點雲模型的幾何形狀、表面材質、色彩對比與光照條件影響。以下展示即使來自同一組點雲資料，位於相近高程的屋頂區域，仍可能因物體表面的材質特性影響匹配成果，而在視覺可辨識度上產生顯著差異。當目標物表面具有明顯的色彩對比且紋理清晰時，屋頂邊界與角點結構較易被辨識(圖 12)；反之，若表面顏色不明顯且受雜訊干擾，則會造成結構模糊與邊界不連續(圖 13)，使特徵角點的判讀難度提高。

最後，點密度對量測的影響也不可忽視。點位密集區域雖提供了更多選擇，但也增加了誤選的風險，特別是由於雜訊的存在(圖 14)，這可能會干擾精確的點位選擇。而在點位稀疏的區域(圖 15)，缺少必要的特徵點可能會導致測繪人員不得不選取周圍的點位，從而增加量測結果和實際標的位置之

間的差異。

### (3) 測繪工具：量測平台對資料潛力發揮的限制

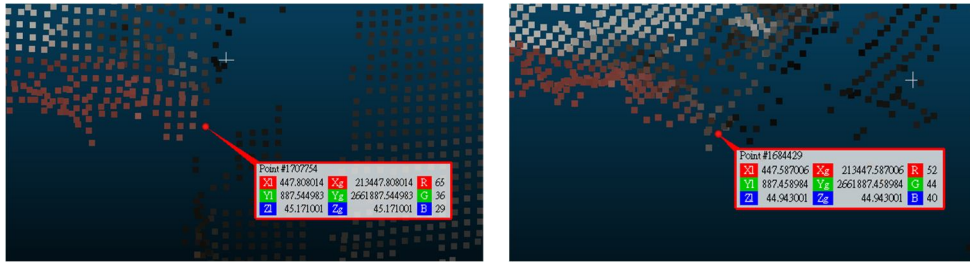
軟體平台的操作友善性與工具設計也對量測效率與成果可靠性產生影響。現行常用之點雲測繪軟體各具其代表性優勢，例如 Pix4D Survey 針對測繪人員設計，具備直觀的量測介面，並支援多角度同步檢視，有助於提升點位判讀與向量編輯的效率；PointScene 以網頁式平台形式提供即時量測功能，能隨操作動作即時顯示斜距、角度及體積等資訊，適合快速分析與成果展示；CloudCompare 作為開源軟體，支援多種點雲與網格模型格式，並提供豐富的點雲處理與分析工具，廣泛應用於學術研究與實務任務；以高效能網頁式點雲顯示著稱的 Potree Viewer，適合大型點雲的快速瀏覽；而 Global Mapper 提供物件偵測與分類等自動化功能。

整體而言，這些軟體多各自聚焦於特定功能取向，形成「功能分散」的發展現況，尚難在單一平台中同時兼顧資料格式彈性、即時量測效率、多視角操作、進階處理能力與良好的互動效能。部分軟體雖操作友善，卻在資料編輯或品質分析功能上有所限制；部分工具功能完整，卻因介面複雜或效能負擔，使實際操作流程不夠流暢。因此，在實務測繪作業中，測繪人員往往需搭配多套軟體以完成不同階段的工作，並主要依賴個人經驗判斷量測結果的可靠性。此一現象顯示，現階段點雲測繪軟體平台仍處於持續發展階段，尚未能在單一平台上全面滿足測繪作業需求。更重要的是，現行平台的互動設計多以成果產製與編輯為核心，普遍缺乏將點雲品質資訊納入量測與判斷流程的輔助機制。



(a) 原始影像 (b) 點雲

圖 9 點雲破洞



(a) 第 1 次選點 (b) 第 2 次選點

圖 10 不同觀測角度影響角點判斷

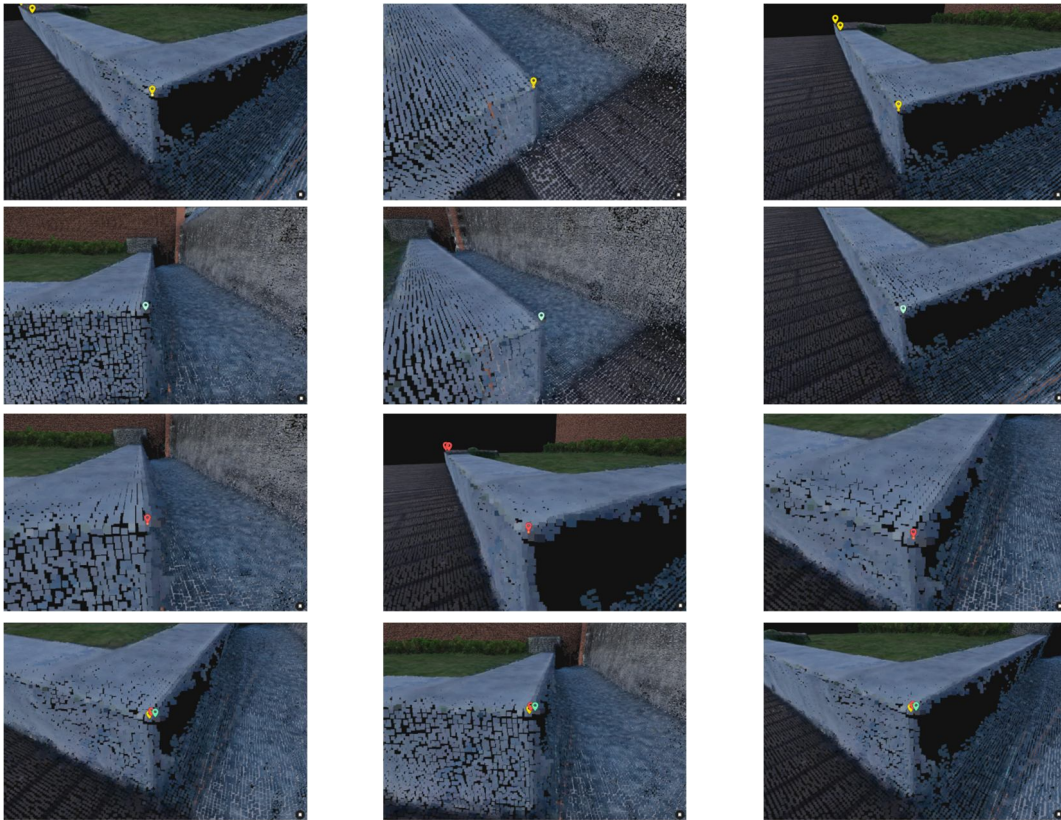
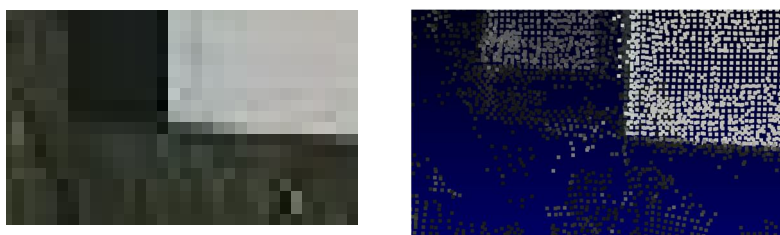
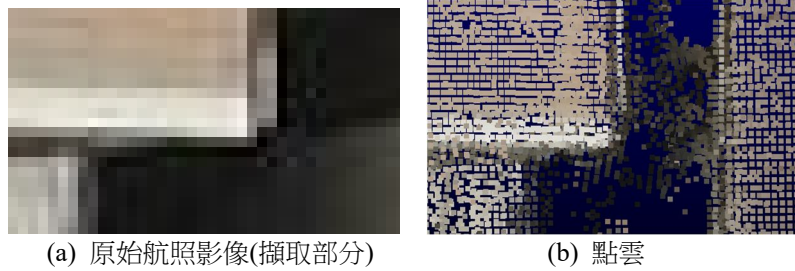


圖 11 點雲點位量測不確定性



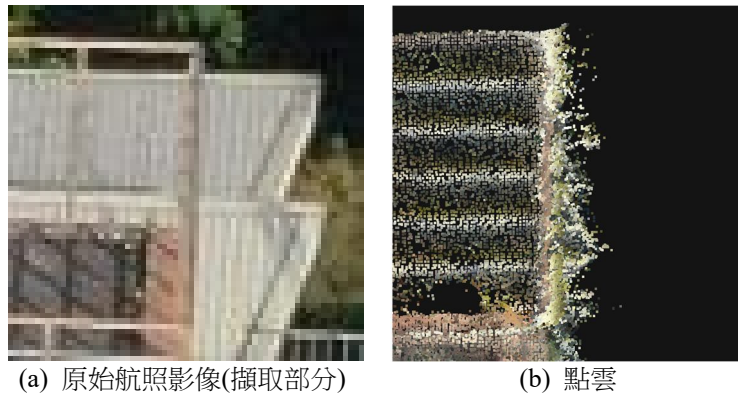
(a) 原始航照影像(擷取部分) (b) 點雲

圖 12 色彩對比明顯的屋頂角點



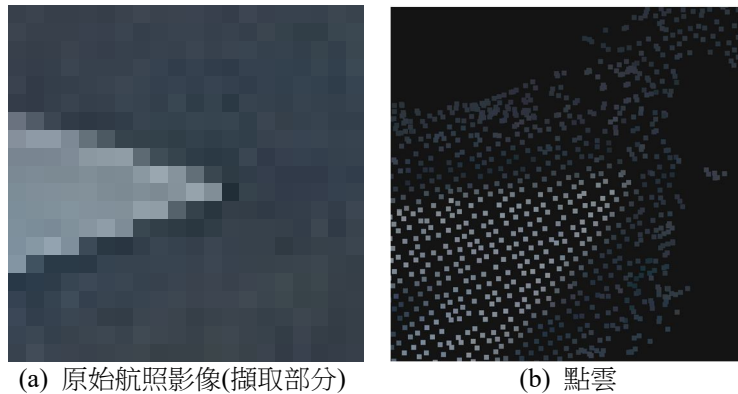
(a) 原始航照影像(擷取部分) (b) 點雲

圖 13 受雜訊影響的屋頂角點



(a) 原始航照影像(擷取部分) (b) 點雲

圖 14 點密度高但過於雜亂



(a) 原始航照影像(擷取部分) (b) 點雲

圖 15 點密度低以致資訊不夠完整

#### (4) 自動化方法：效率提升與可靠性之間的取捨

現有點雲測繪軟體雖已導入部分自動化功能，如表面平面萃取與顏色分類等，在一定程度上提升了資料處理效率，然而在面對幾何結構複雜或資料品質不佳的場景時，自動化工具仍難以同時兼顧結果的正確性與處理穩定性。由於現階段自動化技術尚未成熟，仍無法全面取代人工進行高精度的品質判讀與控管，人工量測、檢查與編修在實務測繪中依然是不可或缺的關鍵環節，其結果亦直接影響最終測繪成果的準確性與可靠性。

在 Li & Wu(2021)的研究中指出，點雲資料缺陷與建物結構複雜性影響建物模型之自動化萃取結果。如圖 16(a) 上半部兩張圖片所示，紅色區域為

錯誤匹配點所造成的過度估計，這些點可能位於航空影像的視線死角；而圖 16(a)下半部兩張圖片中的藍色區域則顯示垂直牆面完全缺失時，因資料不足造成建物表面無法被正確萃取，導致模型表面無法完整重建，顯示自動化方法在實際應用中對點雲缺陷具有敏感性且仍需人工介入。

在點雲測繪的領域中，自動化已成為不可或缺的趨勢。然而，要實現從點雲蒐集到空間資訊產製的整個過程全面自動化，仍需要一段時間的努力和技術突破。因此，在這一願景實現之前，如何在測繪平台中適當引入自動化作業，使其能實質輔助人工判讀、降低作業負擔，並同時維持成果品質與可靠性是值得關注的重要議題。

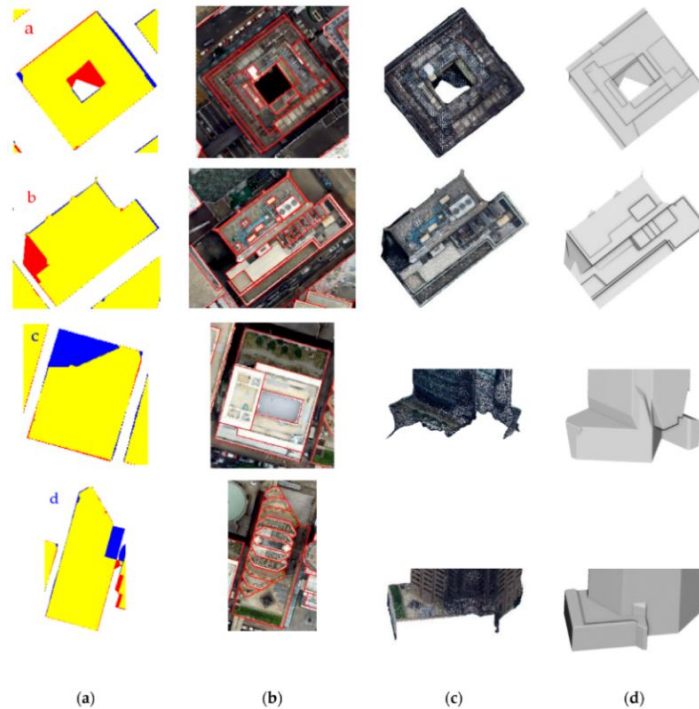


圖 16 建物模型重建錯誤區域，(a)2 維(XY)展示重建模型與人工數化之地真資料差異、(b)人工數化之地真資料套疊正射影像、(c)建物模型重建錯誤或缺失之點雲、(d)所構建之建物模型(Li & Wu, 2021)

## 1.2 研究動機與目的

從上述說明，事實上反映現有點雲測繪流程普遍存在一個共同缺陷，即缺乏對測繪結果品質資訊的反饋，在多種因素相互作用下，影響測繪效率與成果可靠性，並導致點雲資料之潛在效益未能充分發揮。在現有平台中，空間資訊生成後往往直接進入後續應用，而缺乏品質控制機制來及時發現並修正錯誤，若未引入有系統的品質評估，點雲測繪可能難以突破發展初期的局限和應對未來測繪技術的進一步要求。

在本研究中，品質指的是點雲資料及測繪成果在空間位置準確性、幾何結構穩定性與應用可靠性等面向上所具備的可信程度，並應是一種可被檢視與參考的資訊，用以輔助後續判讀與決策。具體而言：空間位置準確性係指測繪資料及結果在三維空間中的正確性；幾何結構穩定性是指正常匹配的點雲應能穩定表達目標建物的幾何結構，包含點位排列均勻等特徵，當出現雜訊或點位缺失時，即代表該區域點雲的幾何結構呈現不穩定狀態；應用可靠性則強調透過品質評估策略與相應的品質資訊，為測繪資料及成果提供客觀的評判標準與「品質標

籤」，讓測繪人員能夠明確了解點雲資料及測繪成果精度範圍，進而判斷其適用的精細程度與整體可靠性。

以下從資料層、流程層與決策層三個層面(統整說明如表 1)，說明為何品質資訊必須成為點雲測繪過程的核心部分：

### (1) 資料層面：從品質未知到品質可知

點雲品質在空間上高度不均勻，遮蔽、曲面、邊界及低密度區皆為量測風險來源。然而，現行測繪流程缺乏對這些空間品質變異的系統性評估機制，測繪人員無法預先識別哪些區域存在高風險。具體而言，現況無法事先判斷點雲資料在不同空間位置的可靠度差異，遮蔽區、低密度區等測繪困難區未被明確標示，且缺乏客觀指標來描述資料的穩定度、不確定性與一致性。可能導致測繪人員在不可靠的資料上進行測製。

### (2) 流程層面：從事後驗證到即時回饋

現行測繪流程中，品質通常在量測完成後才受檢驗，缺乏即時品質回饋機制。這種先做再查的流程模式，使得測繪人員在作業過程中如同盲目前行，缺乏品質控制機制來及時發現並修正錯誤，無法即時感知資料品質變化或立即調整處理順序、參數設

定或操作策略。多數測繪作業假設點雲品質無虞，當發現問題時往往已完成大量作業，修正成本高昂且耗時，更可能導致大量無效作業的累積。

### (3) 決策層面：從憑經驗判斷到有依據決策

在成果決策的階段，測繪人員面臨難以客觀判斷量測結果是否可信的困境，主要依賴個人經驗與主觀判斷，無法識別哪些區域需要策略性補測或重新量測，且缺乏明確的品質標準來決定測繪成果是否可用、是否需補測或修正，同時也無法保證建置成果的可靠度。

總結來說，品質資訊應該成為測繪過程的一部分，而非事後附加物。唯有從資料層建立品質感知能力、在流程層實現即時回饋機制以及於決策層提供客觀依據，才能從根本上突破現行點雲測繪的限制，應對日益複雜的多維度空間資料建置需求並確保測繪成果在多樣化場景中的穩定性和可靠性。本研究不著重於開發全新平台，也非與傳統方法比較精度差異，而是從現有作業流程切入，補足長期受到忽略的品質資訊層面，建立品質意識與輔助判斷機制，示意圖見圖 17。

## 2. 文獻回顧與課題形塑

### 2.1 點雲於多元空間資訊萃取任務之測繪進展

近年來，隨著光學測繪、行動量測與感測技術的發展，點雲已成為三維空間資訊萃取中最重要的資料形式之一，並已廣泛應用於智慧城市、災害監測、基礎設施健康監測、自動駕駛、高精地圖與文化資產保存等領域(圖 18)(Yang *et al.*, 2023a)。顯露度即為對空通視度，無法通視的區域即為遮蔽。針對多種既有的顯露度或遮蔽角測量方法，以下介紹

及分析三類較具實用性的作業方式。

然而，Mirzaei *et al.* (2022)指出，點雲本身屬於高度非結構化資料，普遍存在點分布不均、雜訊干擾、遮蔽效應嚴重以及缺乏語意資訊等問題，使其難以直接支援測繪與工程應用。在實際的大尺度測繪環境中，點雲資料處理流程仍仰賴大量人工介入(鄭錦桐等, 2021)，無論在效率或成果穩定性上皆存在限制，顯示點雲測繪技術尚未成熟為可全面取代人工立體測圖的方法。點雲測繪技術的瓶頸並不在於資料取得本身，而在於缺乏具備品質可控性與可解釋性的處理與判斷策略，使得測繪成果的可靠性與適用性難以一致評估。

在實務應用層面，為改善點雲於視覺化、檢索與幾何理解上的困難，不少業界嘗試引入三維網格模型(Mesh Model)等結構化表示方式，網格模型相較於原始點雲更易於觀測整體形態與表面變化(Xu *et al.*, 2021)。網格模型的品質與其生成流程與參數設定高度相關，不同軟體或平台所採用的建模策略差異，往往導致成果呈現顯著不一致，如 Sorgente *et al.*(2023)針對網格模型的特徵保留能力分析，其中一項關鍵評估指標是在不同演算法計算下的網格邊緣是否能夠準確地再現目標物體的特徵線(Feature Line)，如圖 19 所示。許展祥等(2022)的研究顯示，三維網格模型之製圖精度除了承襲傳統攝影測量的誤差來源外，亦受到密點雲匹配誤差與網格建模流程誤差之影響，在高精度測繪應用情境下，例如一千分之一地形圖繪製，現階段網格模型尚難以滿足既有精度規範要求，亦不宜作為正式測繪成果的唯一依據(Jhuang & Jaw, 2024)。

點雲於多元空間資訊萃取任務中的應用已展現高度潛力，但其測繪流程仍面臨品質不確定性高、處理策略不一致以及成果可靠性難以量化等問題。

表 1 品質資訊缺乏對點雲測繪流程各層級之影響

層級	層級定義	對測繪流程造成的影響
資料層	描述點雲、影像或衍生幾何本身之品質特性，如誤差、不確定性與一致性	測繪人員無法預先識別高風險區域，如同在品質未知狀態下進行作業，難以避開測繪困難區
流程層	在測繪流程進行中即時產生、更新或回饋之品質資訊，用以影響操作與處理策略	問題往往於事後才被發現，修正成本高，易累積大量無效或重複作業
決策層	提供測繪人員或系統進行成果採用、取捨與控管之品質依據	資源配置效率不佳，成果可靠性與一致性難以保證，不同操作者間判斷差異大

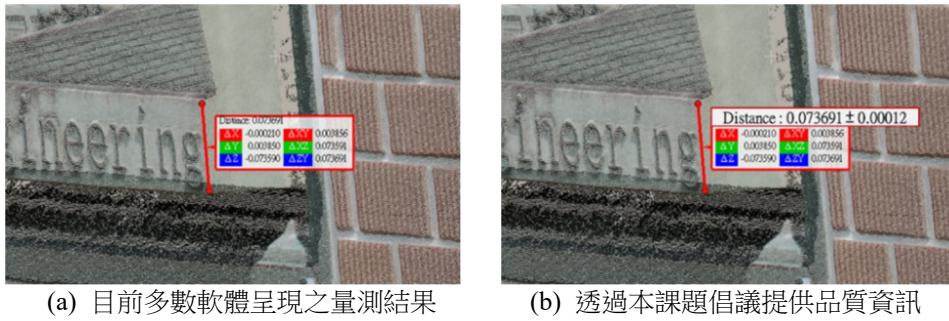


圖 17 幾何資訊量測示意圖

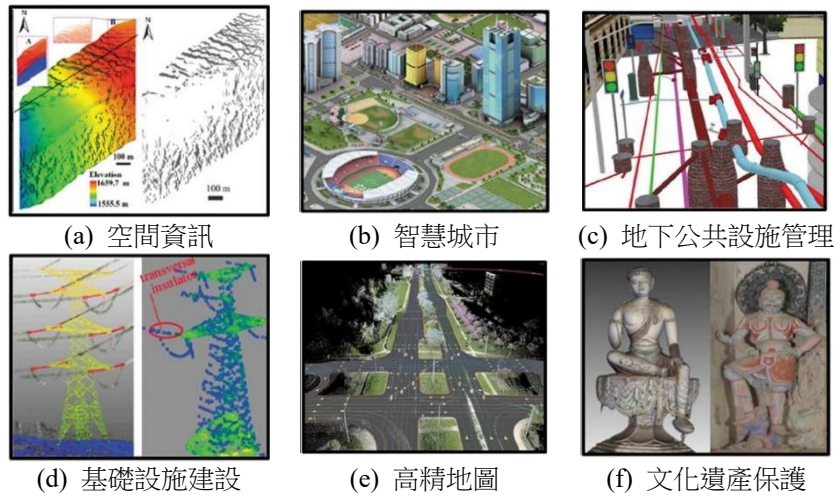


圖 18 點雲於科學研究和工程的應用(修潤自 Yang et al.(2023a))

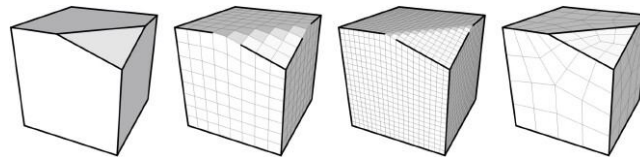


圖 19 不同演算法影響模型邊緣線表示 (Sorgente et al., 2023)

## 2.2 點雲的品質獲取

從品質評估理論架構來看，點雲品質指標可進一步區分為全參考(Full-Reference, FR)、部分參考(Reduced-Reference, RR)與無參考(No-Reference, NR)三種類型。FR 方法透過比較原始點雲與經處理後點雲之差異進行品質評估，而 RR 方法則是在無法取得完整參考資料的情況下，利用局部幾何特徵或期望值進行比較。FR 與 RR 方法皆需仰賴參考點雲作為基準，而在實際測繪環境中，地面真值往往難以取得，在缺乏參考模型的情境下，仍亟需更具普適性的品質指標(Alexiou & Ebrahimi, 2017、da Silva Cruz et al., 2019)。

不少研究著重於以人類視覺為基礎的主觀品質評估，常透過 MOS(Mean Opinion Score)彙整多位

受試者對三維模型視覺品質的主觀評分，以作為品質判斷依據(Javaheri et al., 2022)。然而，此類方法需投入大量人力與時間成本，難以應用於實際自動化或即時測繪任務中。

隨著無參考品質評估的需求增加，相關研究開始嘗試以點雲本身的幾何與顏色特徵建構客觀品質指標。例如，Zhang et al. (2022)提出一套無參考彩色點雲品質評估方法，結合多種幾何特徵與顏色特徵，並透過自然場景統計與機器學習模型推估整體視覺品質分數，或建構大規模點雲資料集，並發展學習式的無參考品質評估模型(Liu et al., 2023)。

多數研究以整體點雲模型作為品質評估單元，然而實際上，同一組點雲資料於不同區塊中，往往因幾何複雜度、遮蔽程度與點密度差異，而呈現截

然不同的品質狀態。部分研究已嘗試透過局部幾何特徵進行更細緻的分析，例如以法向量計算相應點與點之間的角度，作為品質差異的量化依據 (Alexiou & Ebrahimi, 2018)，或利用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 為基礎的幾何描述性指標，評估點雲在結構表現上的穩定性 (Alexiou *et al.*, 2024)。然而，既有文獻多著眼於資料表現形式或演算法改進，對於如何在測繪流程中系統性地引入品質資訊，並作為策略調整與決策判斷之依據，仍有進一步探討之必要。

## 2.3 小結

從相關研究可知，點雲於多元空間資訊萃取任務中具備高度潛力，惟其測繪流程與成果仍受限於資料品質不均、處理策略不一致及品質難以量化等問題。既有文獻多著重於成果層級的品質評估或演算法改進，較少將品質資訊視為可影響測繪流程運作與決策判斷的核心要素。因此，如何以品質導向的觀點，將點雲品質資訊系統性導入測繪流程中，作為操作判斷與策略調整的依據，成為本研究之主要關注重點。

## 3. 品質資訊設計及演算

為填補上述不足，本研究設計一系列整合性導入品質資訊的測繪策略架構，包含：(1)系統性誤差檢查；(2)測繪困難區偵測；(3)影像倒投影；(4)重複量測及品質計算。同時，為展示此策略理念，本研究設計一簡易平台進行資料處理及效果演示。以下逐一說明四項品質內容。

### 3.1 系統性誤差檢查

在點雲測繪中，系統性誤差常因具累積性偏移 (圖 20)，對整體模型準確性造成潛在影響，並且難以從重複量測或倒投影誤差中辨識。這是因為資料內部的幾何與投影參數通常能彼此配合，滿足整體物像對應關係，使測繪結果看似合理，卻可能在絕對空間中產生一致性的偏移。因此，唯有藉由與外部獨立資料的比對，才能揭露其是否存在一致性偏移的系統性誤差。

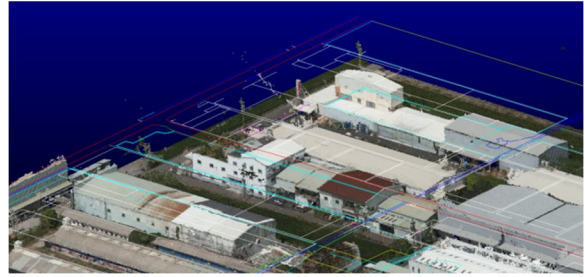


圖 20 點雲與既有向量圖資偏移示意圖

本研究設計一套檢查流程，以欲測繪的點雲資料與既有圖資(如地形圖，本文以 DXF 代表向量圖資)進行對照為例，分析兩者在空間上的一致性。此檢查流程的策略透過共軛點的量測，從坐標差異中識別可能的系統性誤差型態，包括平移、尺度與旋轉等。

檢查流程首先從點雲資料與既有圖資中選取對應的共軛點，透過坐標相減的方式，計算共軛點對間的觀測偏移量，如式(1)，當多數共軛點對的偏移量( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )在方向與量值上趨於一致時，可推論可能存在整體平移誤差，此類誤差通常由坐標系未統一或基準轉換錯誤所引起。

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_{pointcloud} - x_{DXF} \\ \Delta y &= y_{pointcloud} - y_{DXF} \dots\dots\dots (1) \\ \Delta z &= z_{pointcloud} - z_{DXF} \end{aligned}$$

當共軛點對間的偏移量呈現明顯變異時，表示兩資料間可能存在其他系統性變形，此時需進一步透過共軛點對形成的共軛線段進行尺度與旋轉誤差分析。在尺度檢查方面，透過計算共軛線段的長度差異及比例來判別是否存在尺度縮放問題。若線段長度差異顯著，則可能存在資料間的尺度差異，此類問題可能與比例參數設置錯誤有關。在旋轉檢查方面，透過計算兩組資料中共軛線段的夾角  $\theta$  來判別是否存在旋轉變形。夾角計算公式如式(2)。

$$\theta = \arccos \left( \frac{\overline{V_{pointcloud}} \cdot \overline{V_{DXF}}}{|\overline{V_{pointcloud}}| \times |\overline{V_{DXF}}|} \right) \dots\dots\dots (2)$$

其中  $\overline{V_{pointcloud}}$  和  $\overline{V_{DXF}}$  分別為點雲與 DXF 圖資的共軛線段向量。若存在明顯夾角，則可能存在旋轉誤差，此類問題通常與坐標系軸向或影像姿態參數偏移有關。

從數學層面來看，當旋轉參數及尺度參數都具

顯著性時，應利用轉換公式(例如空間相似七參數轉換)解算系統性參數，不過此階段品質檢查旨在查驗有或無系統性誤差供作品質查驗要項，嚴密系統性參數解算並非任務需求。當點雲資料與既有圖資幾何近似時(亦即沒有顯著旋轉及尺度差異)，為了判別觀測到的偏移量是否屬於系統性誤差，本研究採用誤差傳播定律計算理論容許誤差值。根據兩類資料及其固有精度特徵，包括點雲精度和 DXF 精度(向量圖資的數化精度與坐標精度)，理論容許誤差值 $\sigma_{total}$ 的計算公式為：

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{pointcloud}^2 + \sigma_{DXF}^2} \dots\dots\dots (3)$$

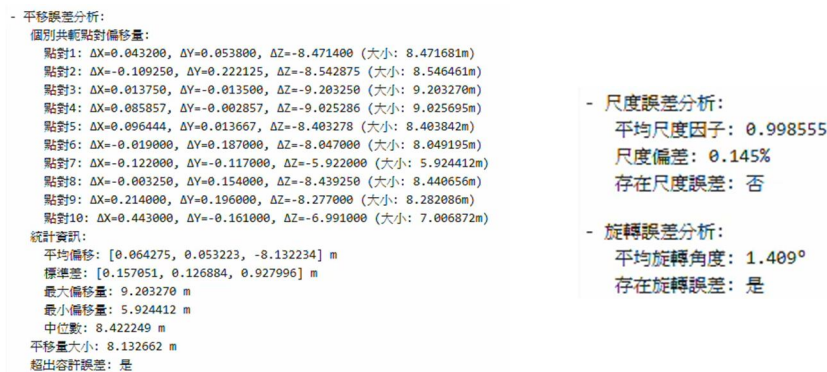
其中 $\sigma_{pointcloud}$ 為點雲精度， $\sigma_{DXF}$ 為 DXF 圖資精度。

基於此理論容許誤差值，可建立誤差性質的判別準則。若所觀測偏移量大於理論容許誤差值(或大於理論容許誤差值的 n 倍，n 由檢驗方設定)，則判定為系統性誤差；若所觀測偏移量小於或等於容許

誤差，則判定為隨機誤差。然而若僅在局部區域發現顯著誤差，則可能由場景變遷(如建物拆除或新建)引起，而非真正的系統性誤差。

圖 21 及圖 22 展示在本研究中系統性誤差檢查相關資訊。圖 21 顯示綜合分析結果，平台分析各點對在 X、Y、Z 三軸向的偏移量，並計算相關統計參數，包含平移向量、標準差、最大偏差、最小偏差及平均偏差等指標(圖 21 (a))，此設計支援在隨機選取的五個區域中進行共軛點量測，比較點雲與 DXF 向量的空間差異，判斷誤差是否具有系統性特徵，例如因坐標系統轉換(TWD67 vs. TWD97)導致的高程偏差或者是坐標系旋轉及尺度問題(圖 21 (b))。

圖 22 進一步提供系統性誤差分析圖表，包含平移誤差向量圖、偏移量大小分布直方圖、尺度因子分析散佈圖及旋轉誤差分析圖等視覺化呈現方式。



(a) 平移誤差統計報表 (b) 尺度與旋轉誤差統計報表  
圖 21 系統性誤差綜合分析結果

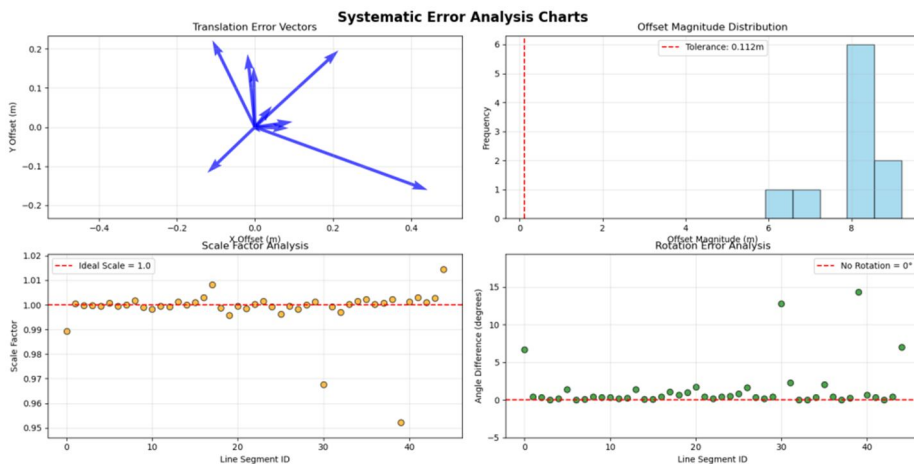


圖 22 系統性誤差分析圖表

如前已述，此比對機制的設計重點並非執行系統性誤差的自動校正或資料重構，而是著重於測繪任務開始前即提供系統性誤差的視覺報導與數值，協助測繪人員在任務初期即掌握資料的空間位置品質風險，作為後續作業或資料使用前的判讀參考基礎。至於偏差成因的追溯與資料重建修正，屬於資料產製端的作業範疇，需回溯調整參數與流程。

### 3.2 測繪困難區偵測

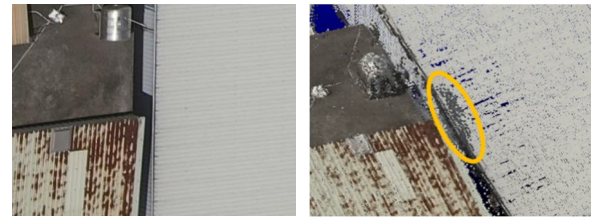
當點雲點位呈現幾何複雜或資料空缺，前者無法或難以經由基本點線面幾何特徵描繪或擬合；後者則無資料內容可資辨識，要不無法辨認及測繪，便是只能以推測(Inference)方式進行，是測繪挑戰的另一極致。此兩種類型點雲樣態均可歸類為測繪困難區。除此之外，點雲資料樣態中也不乏幾何複雜區中混雜著部分資料空缺，同樣帶來難以辨識及完整測繪的挑戰。

透過研究進行中對光學點雲不同場景樣態的分析與歸納，測繪困難區雖然成因各異，但可系統性地分為兩大類型：

#### (1) 幾何複雜區

此類區域的測繪困難原因主要來自環境干擾所造成額外的複雜性，如大量雜訊的存在會干擾特徵邊界的準確判定(圖 23)，或是目標本身具有高度幾何複雜性，例如植被覆蓋區的樹冠與灌木叢，其

不規則表面和多層次結構使得點雲呈現高度幾何變異；建物的雕刻以及浮雕等裝飾元素，包含大量細緻的幾何細節；或是交錯之管線以及支架結構等基礎設施(圖 24(a))，其空間關係錯綜複雜。這些因素相互疊加，不僅大幅增加了人工判讀的難度與不確定性，更使得自動化演算法在特徵提取以及分類等任務上容易產生誤判或參數估算偏差。



(a) 原始影像 (b) 點雲  
圖 23 雜訊影響

#### (2) 破洞與缺漏區

此類區域為點缺失或出現明顯破洞特徵(沒有點)或點缺漏狀況(點極度稀疏)(圖 24 (b))。造成這類問題的原因可分為影像獲取(Image Acquisition)階段的限制與資料處理過程的缺陷。在影像獲取方面，視角的遮蔽是最常見的原因，包括建物的自遮蔽效應或物體間的相互遮擋；此外，某些表面材質的特殊光學性質，如高反射的玻璃或同調區(圖 25(a))，都容易造成匹配失敗而形成點雲的破洞與缺漏區(圖 25(b))。



(a) 結構複雜 (b) 破洞與缺漏區

圖 24 點雲測繪困難區示意圖



(a) 原始影像 (b) 點雲

圖 25 高反射材質導致匹配失敗

本研究不以定義各類型測繪困難區樣態為目標，而是著重於分析點雲之幾何排列與分布特性，以判斷目標區域的測繪難易程度。由於不同類型的測繪困難區在成因與表現上具有顯著差異，單一處理方法難以有效應對各種情境。因此，本研究提出具針對性的偵測策略：對於幾何複雜區域，採用 PCA 量化點雲局部幾何變異程度，並依據各項 PCA 幾何特徵之特性加以整合，設計「幾何複雜困難度分數」(以下簡稱困難度分數, Difficulty Score)，以量化其幾何複雜程度，相關演算式詳於 3.2.1 節；對於破洞與資料缺漏區，則透過基於奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 的切平面估計，結合最大角度差準則，進行資料缺失邊界的偵測。透過此種分類式的處理架構，不僅能更準確地辨識不同類型的測繪困難區，亦能為後續測繪與處理策略提供明確且具體的指引。幾何複雜區以及破洞與缺漏區偵測方法設計說明如下。

### 3.2.1 幾何複雜區偵測

透過點雲點位局部鄰域方差-協方差矩陣，本研究參考 Alexiou *et al.* (2024) 提出之 PCA 衍生特徵，取得三個主成分特徵值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ ，並由此衍生出多項具有明確幾何解釋意義的特徵指標，特徵指標名稱、定義與其說明整理如表 2。

以下為 PCA 特徵指標的初步計算成果分析，圖

26 展示了 (b) Omnivariance 特徵指標在偵測幾何複雜性的同時，也對建物邊緣的線型結構產生高值反應。圖 26 (c) Linearity 特徵指標計算結果清楚標示出這些線型邊界區域，主要集中在建物輪廓線、屋頂邊緣和立面分界線等明顯的線型幾何特徵。透過 Linearity 特徵指標的線性度門檻值設定，可以有效排除 Omnivariance 特徵指標所偵測出的過於規則的線型邊緣區域，確保最終的 Difficulty Score 計算能有效指引真正具有三維幾何複雜性挑戰的區域，而非單純的二維邊界線型特徵。

相較於 Curvature Gradient (圖 27(b))，Omnivariance 特徵指標除了強化幾何差異的表徵，似乎也更具破洞與缺漏區表達能力 (圖 27(c))。

圖 27 (c) 展示於屋頂面 Omnivariance 特徵指標呈現大量的橙紅色高值區域，這些高值分布並非來自真實的幾何複雜性，而是受到點雲的雜訊影響。此現象說明在使用 Omnivariance 進行幾何複雜度分析時，必須謹慎處理雜訊干擾問題。過度敏感的特性雖然能夠偵測細微的幾何變化，但同時也容易將測量雜訊誤判為幾何複雜區，影響分析結果的可靠性。因此，在實際應用中宜在測繪任務前消除雜訊，或透過適當的門檻值設定和其他特徵指標的組合使用，來平衡偵測靈敏度與抗雜訊能力，確保 Difficulty Score 計算的準確性即可靠性。

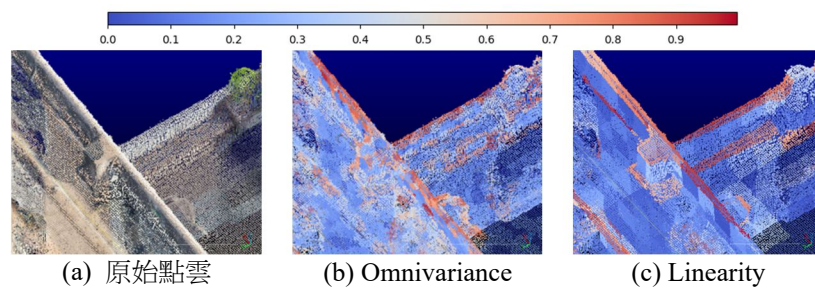


圖 26 Omnivariance 與 Linearity 特徵表現差異

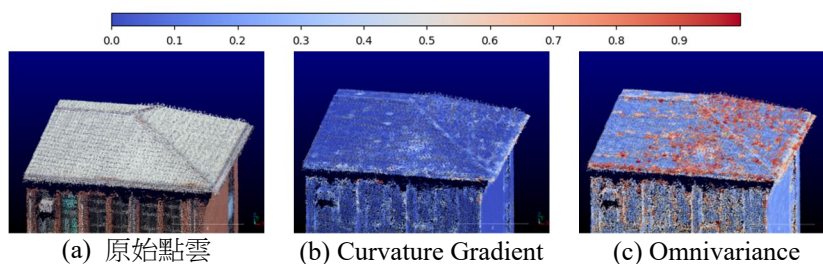


圖 27 Curvature Gradient 與 Omnivariance 特徵指標表現差異

表 2 PCA 特徵指標名稱、定義及說明(修潤自 Alexiou *et al.*, 2024)

名稱	定義	說明
Scattering (散射性)	$\frac{\lambda_3}{\lambda_1}$	測量點雲在鄰域內沿三個主方向的分散程度，用於辨識角點特徵
Planarity (平面性)	$\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1}$	衡量最大與中等特徵值之間的差距，用於辨識平面特徵
Linearity (線性度)	$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1}$	衡量最大特徵值相對於其他特徵值的延展程度，用於辨識線型特徵
Entropy (熵)	$-\sum_{v=1}^3 \lambda_v \cdot \ln \lambda_v$	描述鄰域內特徵值分布的混亂程度，並評估表面的不確定性
Curvature (曲率)	$\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$	估計點雲表面彎曲的程度，用於反映曲面變化情況
Omnivariance (全向變異性)	$\sqrt[3]{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3}$	以三個特徵值的幾何平均數評估點雲特徵的多維延展維度
Anisotropy (異向性)	$\frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_1}$	強調最大與最小特徵值之間的相對變化，用於反映方向性差異
Roughness (粗糙度)	$ (p_i - \bar{p}) \cdot e_3 $	衡量標的點與鄰域質心連線向量沿局部平面法向量的投影長度，越大代表越粗糙
Parallellity X / Y / Z (平行性)	$1 -  u_x \cdot e_3 $ $1 -  u_y \cdot e_3 $ $1 -  u_z \cdot e_3 $	法向量與空間軸平行程度，用於特徵方向分析(如牆面、水平方向)
Textural Entropy (紋理熵)	$-\sum_{v=1}^3 \lambda_v^t \cdot \ln \lambda_v^t$	結合不同光譜的熵值以描述場景紋理多樣性與混亂程度

綜合前述特徵指標分析及事例探討(莊芷瑄, 2025), 本研究透過結合互補性特徵及排除衝突性特徵, 設計一測繪困難區量化演算法, 其量化數值稱為 Difficulty Score, 公式如下:

$$Difficulty\ Score = Omnivariance \times W_{Om} + Curvature\ Gradient \times W_{CG} + Entropy \times W_E \dots\dots\dots (4)$$

其中:  $W_{Om}$ 、 $W_{CG}$  及  $W_E$  分別為 *Omnivariance*、*Curvature Gradient* 及 *Entropy* 特徵指標的權, 而所有特徵指標都經過正規化處理(數值介於 0~1)。當滿足以下任一條件時, 則 Difficulty Score 強制為 0:

$$Linearity > \theta_{threshold\ linearity} \dots\dots\dots (5)$$

$$Omnivariance, Curvature\ Gradient < \theta_{threshold}$$

其中:  $\theta_{threshold\ linearity}$  為 *Linearity* 門檻值;  $\theta_{threshold}$  為 *Omnivariance* 及 *Curvature Gradient* 之共同門檻值。

現階段因尚未實現依點雲規模與空間分布自適應調整之機制, 各特徵指標之門檻值依據經驗法則手動設定, 僅篩除特徵指標數值明顯偏低、確定不具幾何複雜性之點位: *Linearity* 門檻值設為 0.9,

*Omnivariance* 與 *Curvature Gradient* 門檻值同設為 0.1。

*Difficulty Score* 的演算實質整合多特徵、加權及篩選機制, 能較有彈性反應變化多端場景之複雜度。圖 28 展示 *Difficulty Score* 計算結果, 可以觀察到高數值區域成功將點雲多紊亂的區域篩選出來。

### 3.2.2 破洞與缺漏區偵測

雖破洞與缺漏樣態不同, 但在成因和資料呈現上, 均可視為破洞。本研究以 Cui *et al.* (2021) 提出的平面擬合角度差法為理論基礎, 該方法透過 SVD 計算局部切平面, 並以最大角度差作為邊界點判別準則。其理論原理在於破洞邊界點具有明顯的幾何不連續性特徵, 表現為局部鄰域內點雲分布的非均勻性。透過建立局部切平面並投影至二維空間, 計算相鄰點間的角度分布, 當最大角度差超過所設定門檻時, 即可判定該點為潛在的破洞候選點。

如圖 29 所示, 原始流程包含破洞偵測和修補兩個階段。然而, 考量到本研究僅聚焦於破洞的偵測而非修補, 因此僅採用上半部的破洞偵測部分。

同時，由於 Cui *et al.* (2021)處理對象為對稱物件，與本研究目標點雲性質不同，本研究在此基礎上增補多項(如偏轉角度連接、建物邊緣與破洞分類)約制條件，建立了更完整的破洞偵測流程。

具體而言，本研究建立的破洞偵測流程包含五個主要階段：首先進行統計去雜訊前處理，移除點雲中的離群點與雜訊(此處因應破洞偵測效果，所濾除之雜訊為較屬於錯誤之雜訊及離群點)；接著基於 SVD 切平面計算與最大角度差別進行破洞候選

點偵測；第三階段透過點位分群與群組合併，將離散邊界點聚類(Clustering)並合併相近群組；第四階段使用方向準則連接同群組內的邊界點形成封閉邊界；最後透過三平面(XY、YZ 及 XZ)投影的線性度、跨度比(Span Ratio)與點密度指標區分真實破洞與建物邊緣(莊芷瑄, 2025)。透過此多階段的處理流程，有效提升了邊界點偵測的準確性與穩定性，並能準確區分真正的破洞缺陷與正常的建物邊緣特徵，偵測成果如圖 30 所示。

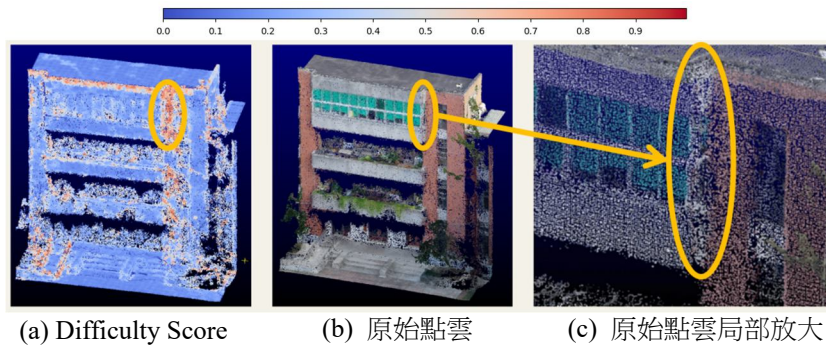


圖 28 Difficulty Score 計算成果

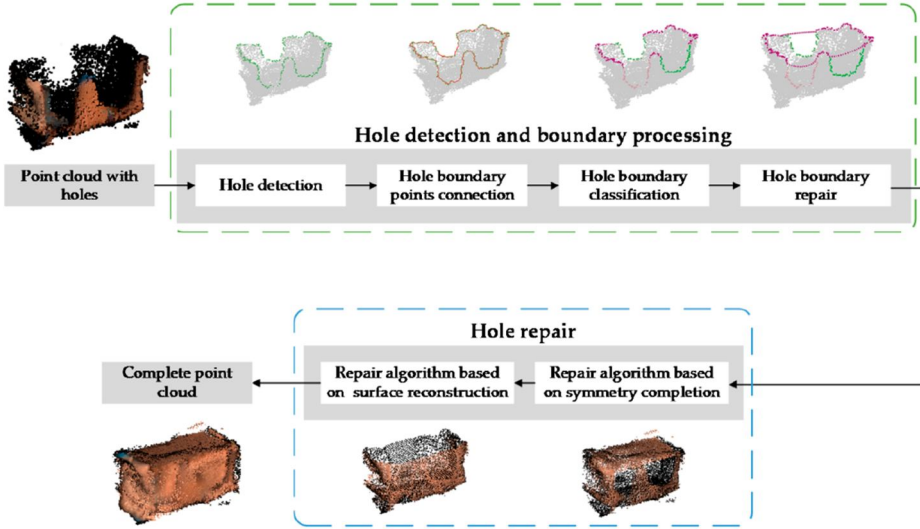


圖 29 Cui *et al.* (2021)的破洞偵測與修補完整流程圖



圖 30 破洞與缺漏區偵測結果(顏色線條標示處)

### 3.3 影像倒投影

本研究影像倒投影(Image Reprojection)是指利用共線方程式，依其物點三維坐標仿透視投影成像對應到影像的像點。共線方程式建立了物空間與像平面之間的幾何關係，引用完整相機參數(內方位、外方位、相機透鏡畸變參數)以確保倒投影的準確性。為了簡化求解共線方程式的計算複雜度，整個過程分為兩個主要步驟：

- (1) **無畸變影像產製**：對原始影像進行透鏡畸變差修正(包括輻射透鏡畸變差和離心透鏡畸變差)，產生無畸變影像，使像元坐標符合理想針孔相機模型的假設。
- (2) **無畸變影像上的倒投影**：使用共線方程式，將三維物點投影至無畸變影像上。除此之外，可結合參數誤差進行誤差傳播分析以量化位置的不確定性。

為加速資料演算效能，產製無畸變影像是較佳的策略，因為包含畸變修正的共線方程式會使影像坐標同時出現在方程式的兩側，需要迭代求解像點坐標。透過先產製無畸變影像，可以免除非線性解算繁複的過程，簡化倒投影演算程序並提升資料處理效能。

此外，更進一步基於品質資訊策略的考量，本研究將影像倒投影應用區分為診斷性(Diagnostic)與驗證性(Verificative)兩個層面：

(1) **診斷性影像倒投影 (Diagnostic Image Reprojection)**：主要針對點雲處理過程中偵測出的測繪困難區，透過將此區域位置倒投影回原始影像，使測繪人員能夠檢視究竟是匹配失敗抑或資料缺失導致測繪困難區的生成，以利後續採取適當的處理策略。

(2) **驗證性影像倒投影 (Verificative Image Reprojection)**：則著重於測繪結果的精度驗證，結合誤差傳播分析計算像點位置的標準差，建立以一倍或兩倍標準差為基準的容許誤差區間，形成明確的容差範圍判定機制，確保最終測繪成果的可信度與精度要求。

驗證性影像倒投影效益範例可見圖 31，將點雲測繪成果之建物屋頂面角點或邊緣線經過倒投影至影像可查視線條與影像之套合狀況，並可量化偏差量，如圖 31 (b)與(c)中矩形範圍表示由兩坐標分量標準差框出矩形範圍，提供直觀的誤差界限表示和差異品質資訊(圖 32)。

診斷性影像倒投影平台架構建立於前述困難區偵測成果之上，形成完整的問題診斷工作流程。在點雲中選擇需要進一步確認的問題點位，平台隨即自動擷取該選點的三維坐標資訊投影回原始影像中，讓測繪人員能夠在多張影像(包含垂直和傾斜影像)中確認目標點在原始影像資料上的真實樣態(圖 33)(其中紅色十字標示位置為倒投影點)，釐清造成點雲測繪困難的問題根源。

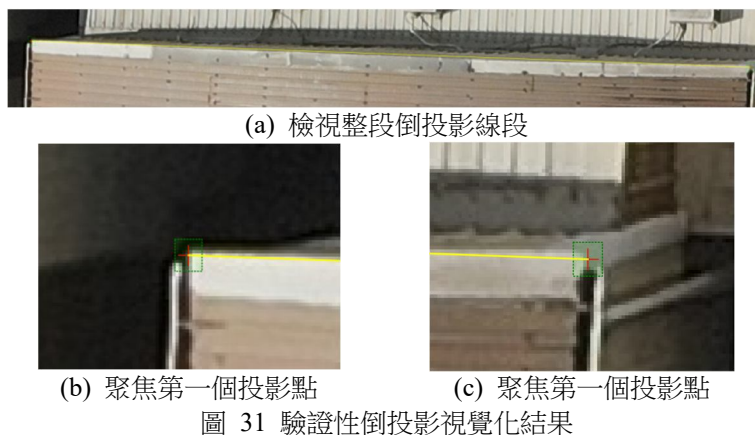


圖 31 驗證性倒投影視覺化結果

選取點: (2436.2, 280.6) | 到點1距離: 42.3px | 到點2距離: 45.0px | 到線段距離: 20.0px

圖 32 畫面即時選點與投影點距離統計

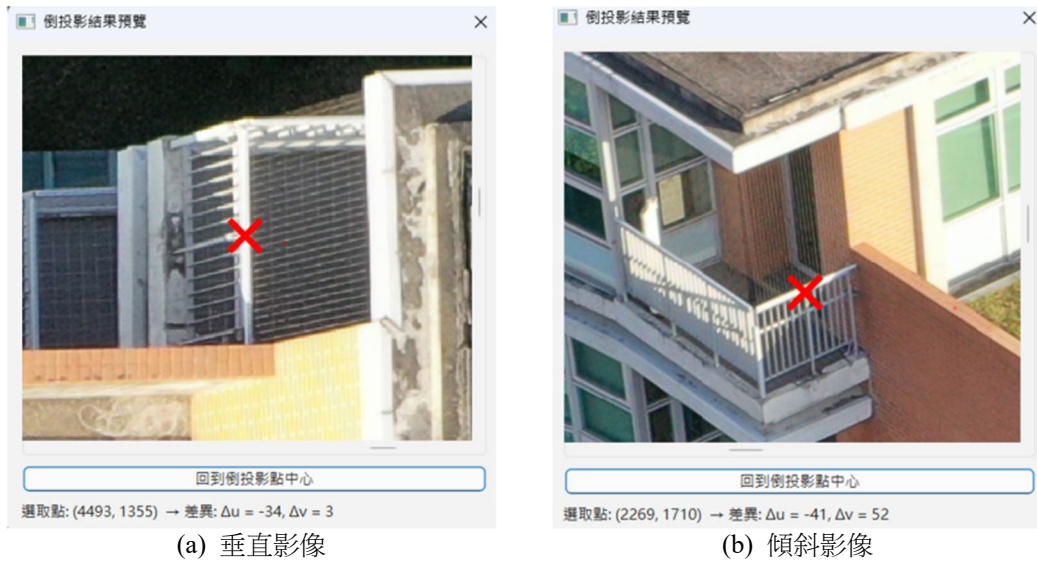


圖 33 診斷性影像倒投影詳細檢視成果

### 3.4 重複量測及品質計算

本研究針對測繪作業易受環境變化與操作影響所產生的不確定性，提出一套重複量測與即時品質評估的解決方案。測繪人員在三維場景中對同一目標點進行多次獨立觀測，平台可利用這些三維坐標值計算目標點位的坐標最或是值。接著，根據每個量測點與最或是值在 X, Y, Z 三個方向上的改正數(Residual)，計算出這些分量的標準差( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ )和總體標準差( $\sigma_{total}$ )。平台將自動比對該點之歷次量測紀錄並即時顯示各改正數向量與總體標準差。透過視覺化表現，測繪人員可一面觀察品質變化趨勢，一面進行量測值的判讀與修正，作為確認點位品質是否符合需求之依據。

圖 34 展示此品質面向的資料量測及資訊呈現的實作及效果，在重複量測模組能夠在三維點雲視窗中，以紅色標記呈現同一控制點在多次觀測中的實際量測位置，並以綠色標示其根據所有量測結果所計算出的幾何中心，直觀地反映各次測量的空間離散情形。測繪人員在量測過程中，只要點擊同一位置，系統便會自動擷取當前坐標並以紅、藍色分別標示負值與正值改正數，同時在點雲畫面中更新紅點，以便於即時觀察改正數方向與大小。

對應地，圖 35 中的統計介面則將每次量測的 X、Y、Z 坐標以及相對中心點的偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ ，以直觀的色彩標示呈現；紅色代表改正數為負

值、藍色代表改正數為正值，表格下方則自動計算出各軸向的標準差  $\sigma_x = 0.027m$ 、 $\sigma_y = 0.030m$ 、 $\sigma_z = 0.018m$ ，以及總體標準差 $\sigma_{total} = 0.044m$ ，這些數值反映出在本研究場景中，此量測案例能達到不超過 5 cm 的重複量測精度。透過此即時可視化與自動化統計功能，測繪人員不僅可以在點雲中清楚看到量測點的離散分布，還能隨時掌握量測品質，進而對可能的誤差來源(如環境干擾或操作誤差)進行快速排查與校正，顯著提升測繪流程的可靠性與效率。

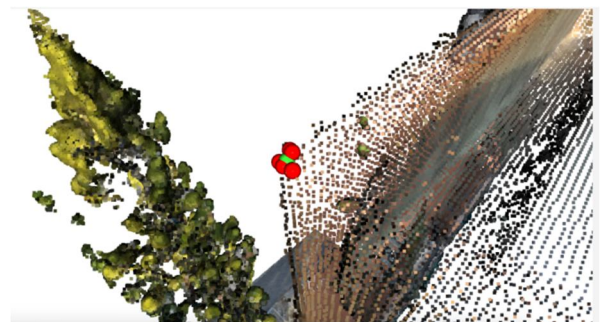


圖 34 三維空間中重複量測點分布

Point	X	Y	Z	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
1	304421.931	2767916.477	57.365	0.0317	-0.0017	0.0290
2	304421.877	2767916.476	57.325	-0.0223	-0.0027	-0.0110
3	304421.879	2767916.421	57.337	-0.0203	-0.0577	0.0010
4	304421.889	2767916.517	57.312	-0.0103	0.0383	-0.0240
5	304421.943	2767916.505	57.352	0.0437	0.0263	0.0160
6	304421.877	2767916.476	57.325	-0.0223	-0.0027	-0.0110
Center	304421.899	2767916.479	57.336			
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$			
	0.0272	0.0303	0.0179			
Total $\sigma$			0.0444			

圖 35 重複量測即時統計介面

## 4. 品質資訊導入點雲測繪流程之體現

本章從整體系統設計角度，統整本研究中所有與「品質」相關策略的設計概念與機制。透過品質於測繪流程中的角色定位、品質資訊在操作平台中的實際呈現樣態，以及品質策略於不同階段(資料層、流程層與決策層)之分工，本研究意圖將原本抽象的品質概念，轉化為可即時獲取、操作與引用的測繪資訊。藉由此整體視角，更具體闡明品質參與測繪流程的運作方式與決策邏輯。

### 4.1 品質資訊在平台中的可視化樣態

本研究所擬定方法，就圖資生產面而言，包含品質指標的提供及對資料的查驗及問題追蹤；而就資料屬性擴充而言，增列點雲特徵屬性，豐富點雲資訊量。此兩部分功效參見圖 36 及表 3。

圖 36 將本研究其中三大品質策略(除了系統性誤差)同時呈現在一張畫面上，並用不同顏色的框線標示出它們各自的對應區域：

#### (1) 重複量測及品質計算

在圖 36 左上方，可以看到「Point 1 = (304681.142, 2768123.894, 35.688) ( $\sigma_{Total} = \pm 0.044$  m)」以及「Distance =  $9.43 \pm 0.05$  m」這兩組

標註。這正是對單點與線段進行多次獨立量測後，計算其位置與距離的統計標準差，用以量化測繪結果的精度與不確定度。

#### (2) 測繪困難區偵測

A.幾何複雜區：在建物立面上，PCA 特徵值被映射成由藍到紅的色彩梯度，顏色越偏紅代表該區域的點雲結構越複雜、幾何變化越大。這讓我們能辨識出哪些區域因幾何複雜而造成量測困難。

B.破洞與缺漏區：右側以及左下角局部都有以紅色框線圈出來的邊界線，這些就是透過破洞偵測所標定的「破洞點」邊緣，圈選出資料缺漏的位置，方便後續針對性補洞或重拍。

#### (3) 影像倒投影

A.診斷性倒投影：在左下角的淺藍色框中，將標出的破洞區域倒投影回原始影像，畫面下方以放大視窗展示了倒投影後的位置。透過這種方式，可以直接比對影像與點雲中缺失點的對應，診斷破洞形成的原因(如遮蔽或影像模糊)。

B.驗證性倒投影：在畫面中央偏下的位置，量測所得的線段(粉紫線)倒投影回影像，上面疊加紅色的實際對應點。這一步驟可用來檢驗點雲量測與影像觀測之間的吻合程度，確保量測誤差在可接受範圍內。

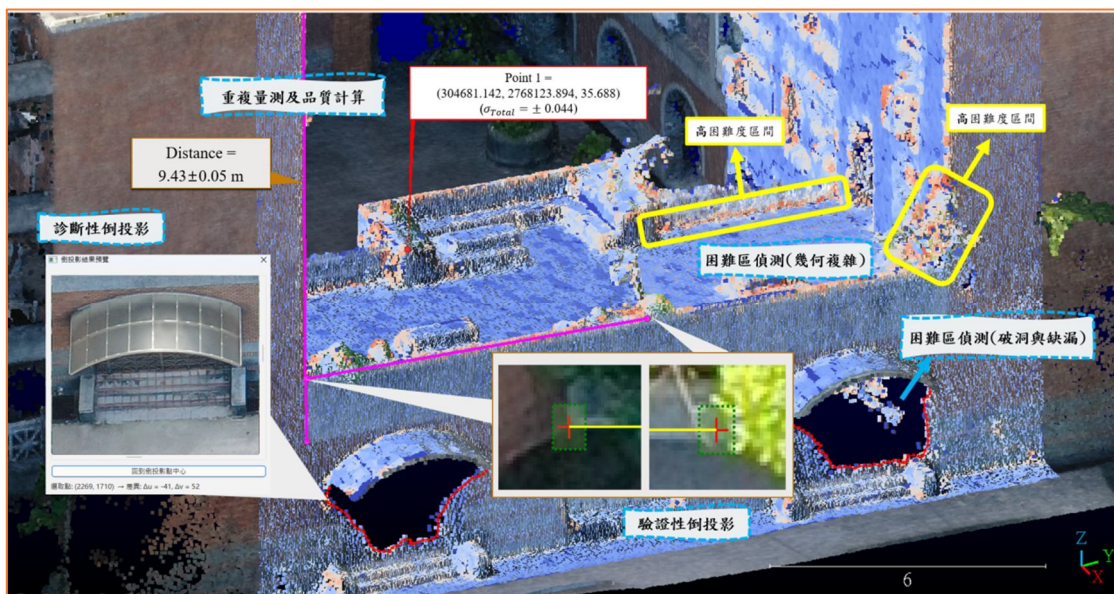


圖 36 多策略點雲品質資訊與可視化示意圖

表 3 點雲與圖資屬性擴充總覽表

	原始資料	新增屬性
點雲	1. X, Y, Z 2. RGB	1. Difficulty Score：困難度數值評分 2. Hole Flag (T/F)：是否落於破洞範圍
圖資	1. Point 2. Line 3. Polygon	1. Point Std：點位坐標標準差 2. Line Length Std：線段長度標準差 3. Repeat Count：重複測量次數 4. Reprojection Error：倒投影誤差(pixels)

從表 3 看到經過本研究品質資訊策略設計，在點雲和向量圖資的資訊上能新增一些屬性資料。在點雲資料部分，原本僅包含每個點在三維空間中的坐標(X、Y、Z)與對應的色彩資訊(RGB)。經過本研究的處理流程，我們為每一個點額外計算並附加了「困難度數值評分」(Difficulty Score)與「破洞範圍標記」(Hole Flag)。

在圖資部分，原測繪成果屬性資料包括三種類型：單一位置的點(Point)、連接兩點之間空間關係的線段(Line)，以及描述封閉區域範圍的多邊形(Polygon)。本研究對這些圖資要素新增了四項屬性：首先，對單獨測量點計算「點位坐標標準差」(Point Std)，以及對線段計算「線段長度標準差」(Line Length Std)，用以量化重複測量的一致性；同時記錄「重複測量次數」(Repeat Count)，以反映統計結果的可靠度；最後，在將點或線段倒投影回原始影像時，計算其在像元層級上的「倒投影誤差」(Reprojection Error)，從而客觀評估影像與點雲之間的吻合程度。

## 4.2 品質策略的協同作用與資訊傳遞

本研究旨在解決光學點雲測繪中品質資訊不足的問題，通過整合品質導向的策略，建立一套具系統性以及可操作的決策流程架構。圖 37 統整說明每個階段能夠得到的品質資訊，建立整體的決策流程架構，正是本研究的核心貢獻。首先，光學點雲輸入後便與外部資料(如地形圖)進行比對，執行系統性誤差檢查。如果發現顯著偏移，平台會量化偏移量，告訴測繪人員「資料可信度」以及「是否

需校正」。此步驟確保點雲在絕對空間中的準確性。

若判斷無系統性誤差，流程進入測繪困難區偵測階段。平台能夠分類資料中的「幾何複雜區」和「破洞與缺漏區」。並為每個區域計算 Difficulty Score 和幾何穩定性指標(亦即破洞位置資訊)。這為測繪人員提供「潛在風險區域」及「可靠度等級」的預警資訊，協助在測繪前選擇適當的處理策略。

影像倒投影策略分為診斷性和驗證性兩種應用，首先利用診斷性倒投影將測繪困難區投影回原始影像，分析誤差成因，回答「為什麼此區域有問題」，並根據結果調整測繪模式，調整測繪模式的具體策略包括：當問題源於密匹配失敗或目標幾何結構過於複雜時，可採協作方式透過影像前方交會獲取目標點位坐標或回到立體測繪模式填補所需測繪標的物；當遇到因遮蔽導致的資料缺失區域時，則可將該區域標註為「不可靠」區域。經過測繪步驟獲取之成果還可以再利用驗證性倒投影計算像點標準差和容差區間，提供幾何一致性的量化品質指標，讓測繪人員清楚掌握「測繪結果與原始影像的吻合程度」。

而重複量測及品質計算功能則可針對目標點位進行多視角量測，計算觀測量標準差及總體精度指標，提供「內部一致性」資訊，幫助測繪人員評估「點位量測穩定度」。同時，粗差偵測機制可有效排除顯著偏差的觀測值。

整套設計流程中實現『圖資測繪 + 品質資訊』的同步輸出。不僅解決了傳統點雲測繪缺乏品質評估的問題，更提供了系統性的決策支援機制。這套框架的價值在於：它不只告訴你「測繪結果是什麼」，更重要的是告訴你「測繪結果的可信度」，以及「需

謹慎處理的情境」，從而提升測繪成果的可靠度與應用價值。

最終以圖 38 說明四項品質策略在不同階段中所扮演的角色與其品質資訊的傳遞方式。圖中左側流程代表點雲測繪與成果產出程序，由資料取得(資料層)、處理分析(流程層)至最終決策(決策層)逐步推進(詳見表 1)；其中，深綠色且尺寸較大的圓點表示該品質策略在該流程階段中發揮主要功能，而淺綠色且尺寸較小的圓點則表示其於該階段中具有輔助或間接影響的角色。透過此視覺化方式，可清楚呈現各品質策略並非僅作用於單一階段，而是以不同程度貫穿整體測繪流程。

雖然各項品質策略在流程中的主要作用階段不同，但其所產生之品質資訊皆會持續傳遞並最終匯入決策層，作為成果採用與否的重要依據。此設計強調品質資訊並非僅用於事後驗證，而是可在測繪任務進展中不斷累積與回饋，形成一種具連續性的品質導向作業模式。

其中，「影像倒投影」在本研究中扮演一個較為特殊且關鍵的角色。影像倒投影本身並不屬於標準點雲測繪流程中的既定步驟，然而當點雲資料存在不確定性、局部品質不佳或出現疑似測繪困難區時，影像倒投影可動態地引入流程中，作為一項輔助性

參考機制。透過將點雲位置回溯至原始影像資料檢視，不僅可協助釐清誤差來源，亦能支援測繪人員判斷資料品質是否可接受，進而決定是否需調整策略或重新處理。圖 38 中所示之橘色箭頭則代表當流程中偵測到品質問題時，可進行策略轉換或流程回溯的可能方向。這些箭頭象徵測繪流程可依據品質資訊的回饋結果，在不同策略之間進行切換或補強，體現一種以品質資訊為引導的彈性測繪流程規劃。

### 5. 結論

綜合本文內容，當前點雲測繪技術所面臨的關鍵限制，並非單純來自演算法能力或資料取得效率，而是源於「品質資訊在測繪流程中長期缺位」所造成的系統性問題。

首先從資料層、流程層與決策層三個層面切入，凸顯品質資訊不僅代表最終輸出的精度，實際上深刻參與了整體測繪流程的運作。

為回應上述問題，本研究設計一系列導入品質資訊的光學點雲測繪策略，包含系統性誤差檢查、測繪困難區偵測、影像倒投影以及重複量測與品質計算等四項，系統性地產製測繪過程中的品質資訊。

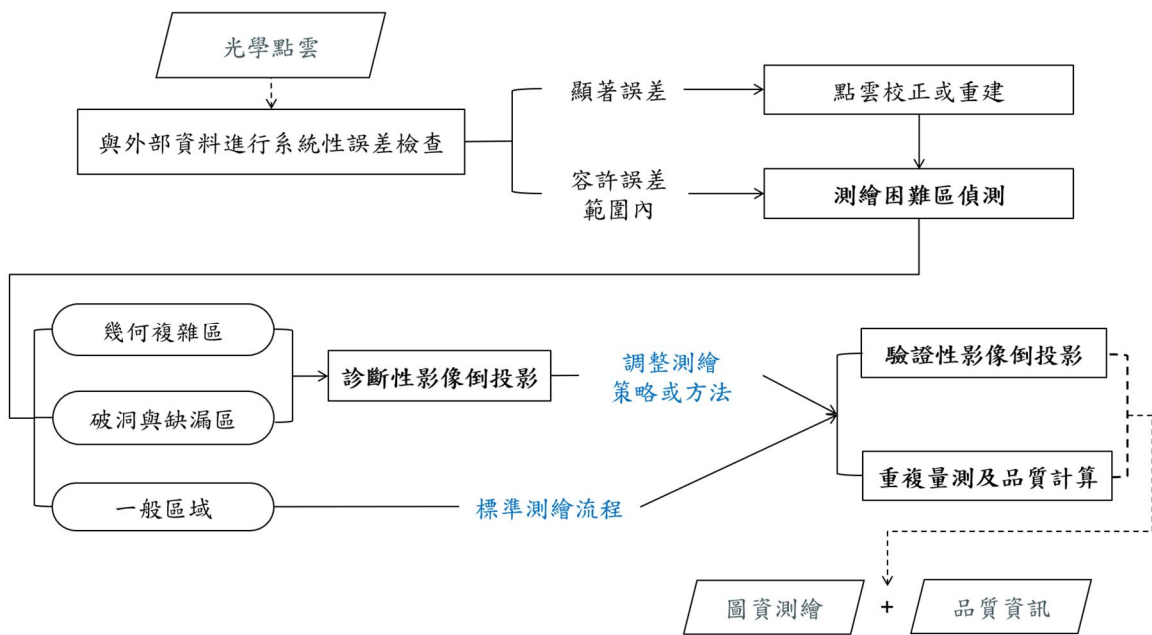


圖 37 測繪任務中的決策流程圖

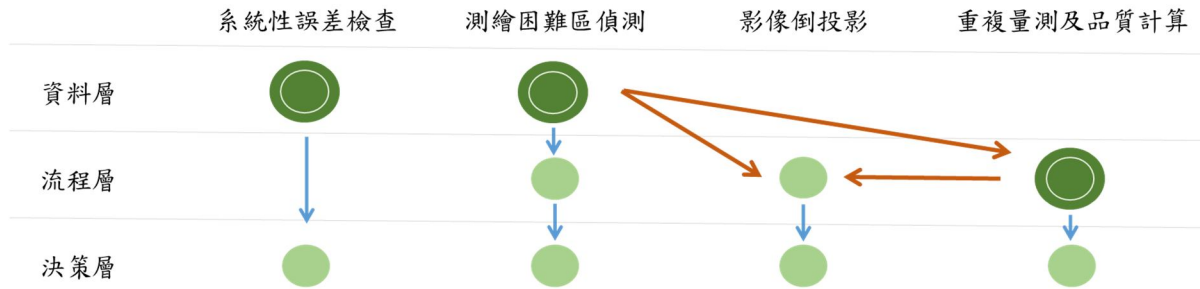


圖 38 品質策略在點雲測繪工作流程中的應用

為使這些品質資訊能真正應用於測繪流程，本研究進一步提出「品質資訊導入點雲測繪流程之整體設計概念」，透過視覺化呈現、屬性化儲存與流程回饋機制的設計，將品質資訊轉化為可被感知、操作與引用的測繪資訊，使其在不同測繪階段中提醒潛在問題、支持策略轉換，最終提升成果的可靠度與應用價值。

本研究重新定義「品質」在點雲測繪中的角色：品質不僅是數值或評分結果，而是能夠跨越資料、流程與決策層次的關鍵資訊。透過提供一套可操作的品質導向框架，未來研究者與實務工作者可參考本研究所提出的品質資訊產製策略與流程設計概念，發展適用於不同測繪情境的品質管理機制。期望本研究能引發對點雲測繪品質議題的進一步關注，並作為未來發展品質導向測繪技術的重要參考。

## 誌謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會專題研究(計畫編號 MOST 114-2121-M-002-005) 以及中華民國航空測量及遙感探測學會業務二部經費補助，得以順利推展；2 位審查委員給予文章內容諸多建設性修潤意見，謹此致謝。

## 參考文獻

內政部國土測繪中心，2019。108 年度三維近似化建物模型建置工作總報告。[National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior, 2019. The annual report on the construction of 3D building model with simulation texture. (in Chinese)]

內政部國土測繪中心，2020。運用區塊建物框細緻化技術精進三維建物模型之研究報告書。[National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior, 2020. The annual report on the research of dividing aggregate 3D building model into individual ones. (in Chinese)]

莊芷瑄，2025。光學點雲測繪導入品質資訊與互動式策略-以建物為例，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文，DOI: 10.6342/NTU202504227。[Jhuang, J.S., 2025. Integrating quality information and interactive strategy for building measurement in photogrammetric point cloud, Master Thesis, National Taiwan University, ROC, DOI: 10.6342/NTU202504227. (in Chinese)]

許展祥、林鷺均、王敏雄，2022。利用三維網格模型繪製一千分之一地形圖之精度評估，國土測繪與空間資訊，10(2)：219-240。[Hsu, C.H., Lin, L.C., and Wang, M.S., 2022. Evaluation of the accuracy of 1/1,000 topographic mapping using a 3D mesh model, Taiwan Journal of Geoinformatics, 10(2): 219-240. (in Chinese)]

鄭錦桐、黃梓育、王選仲、林玉梅、鄧澤揚、黃意筌、賴穎萱、王禹翔，2021。人工智慧與高精地圖於道路資產管理之實務應用，土木水利 48(2)：4-14，DOI：10.6653/MoCICHE.202104\_48(2).0002。[Zheng, J.T., Huang, Z.Y., Wang, X.Z., Lin, Y.M., Deng, Z.Y., Huang, Y.Q., Lai, Y.X., and Wang, Y.X., 2021. Practical applications of AI and HD map in road asset management, Journal of the

- Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 48(2): 4-14, DOI: 10.6653/MoCICHE.202104\_48(2).0002. (in Chinese)]
- Alexiou, E., and Ebrahimi, T., 2017. On subjective and objective quality evaluation of point cloud geometry, in Proceedings of the Ninth International Conference on Quality Of Multimedia Experience (QoMEX), Erfurt, Germany, DOI: 10.1109/QoMEX.2017.7965681.
- Alexiou, E., and Ebrahimi, T., 2018. Point cloud quality assessment metric based on angular similarity, in Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), San Diego, CA, USA, DOI: 10.1109/ICME.2018.8486512.
- Alexiou, E., Zhou, X., Viola, I., and Cesar, P., 2024. PointPCA: Point cloud objective quality assessment using PCA-based descriptors, EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2024(1): 20, DOI: 10.1186/s13640-024-00626-3.
- Cui, L., Zhang, G., and Wang, J., 2021. Hole repairing algorithm for 3D point cloud model of symmetrical objects grasped by the manipulator, Sensors, 21(22): 7558, DOI: 10.3390/s21227558.
- da Silva Cruz, L.A., Dumić, E., Alexiou, E., Prazeres, J., Duarte, R., Pereira, M., Pinheiro, A., and Ebrahimi, T., 2019. Point cloud quality evaluation: Towards a definition for test conditions, in Proceedings of the Eleventh International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Berlin, Germany, DOI: 10.1109/QoMEX.2019.8743258.
- Hirschmüller, H., 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2): 328-341, DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166.
- Javaheri, A., Brites, C., Pereira, F., and Ascenso, J., 2022. Joint geometry and color projection-based point cloud quality metric, IEEE Access, 10: 90481-90497, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3198995.
- Jhuang, J.S., and Jaw, J.J., 2024. Mesh models as enhancements to point cloud-based surveying and mapping, in Proceedings of the 45th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Colombo, Sri Lanka.
- Li, Y., and Wu, B., 2021. Relation-constrained 3D reconstruction of buildings in metropolitan areas from photogrammetric point clouds, Remote Sensing, 13(1): 129, DOI: 10.3390/rs13010129.
- Liu, Y., Yang, Q., Xu, Y., and Yang, L., 2023. Point cloud quality assessment: Dataset construction and learning-based no-reference metric, ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications, 19(2s): 80, DOI: 10.1145/3550274.
- Mirzaei, K., Arashpour, M., Asadi, E., Masoumi, H., Bai, Y., and Behnood, A., 2022. 3D point cloud data processing with machine learning for construction and infrastructure applications: A comprehensive review, Advanced Engineering Informatics, 51: 101501, DOI: 10.1016/j.aei.2021.101501.
- Sorgente, T., Biasotti, S., Manzini, G., and Spagnuolo, M., 2023. A survey of indicators for mesh quality assessment, Computer Graphics Forum, 42(2): 461-483, DOI: 10.1111/cgf.14779.
- Xu, Y., Tong, X., and Stilla, U., 2021. Voxel-based representation of 3D point clouds: Methods, applications, and its potential use in the construction industry, Automation in Construction, 126: 103675, DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103675.
- Yang, B., Haala, N., and Dong, Z., 2023a. Progress and perspectives of point cloud intelligence, Geo-

- spatial Information Science, 26(2): 189-205, DOI: 10.1080/10095020.2023.2175478.
- Yang, Y.C., Chiou, Y.P., and Jaw, J.J., 2023b. Topographic features in photogrammetric point clouds, in Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing (ISRS), Jeju, Korea.
- Zhang, Z., Sun, W., Min, X., Wang, T., Lu, W., and Zhai, G., 2022. No-reference quality assessment for 3d colored point cloud and mesh models, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 32(11): 7618-7631, DOI: 10.1109/TCSVT.2022.3186894.

# A Quality-Information-Oriented Framework for Measurement in Photogrammetric Point Cloud

Jhih-Syuan Jhuang <sup>1</sup>      Jen-Jer Jaw <sup>2\*</sup>

## Abstract

In recent years, point clouds have become indispensable data for producing multi-dimensional spatial information. However, "Quality" has long been overlooked in point cloud surveying and mapping workflows because, in practical applications, it is often treated as an end-stage validation or an auxiliary indicator for evaluating results, with little attention to its influence on operational decisions, strategic planning, and the adoption of survey products.

This paper aims to demonstrate the critical importance of quality for advancing point cloud surveying technology, arguing that quality not only governs the credibility of survey outputs but also fundamentally shapes the entire surveying workflow; through multifaceted examinations, how quality forms risks, constraints, or decision-making references at different levels is thoroughly elaborated; and most importantly, a systematic conceptual framework for quality awareness with a clear problem consciousness and research foundation for the subsequent development of quality-oriented point cloud surveying workflows and decision-support methodologies has been established.

**Keywords: Photogrammetric Point Cloud, Quality Information, Surveying and Mapping Difficulty Areas, Error Analysis**

---

<sup>1</sup> Research Associate, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

\* Corresponding Author, E-mail: jejaw@ntu.edu.tw

Received Date: Jan. 08, 2026

Revised Date: Apr. 10, 2026

Accepted Date: Apr. 13, 2026