

以獨立模型法進行多測站地面光達資料 的平差結合

Adjustment of Ground-Based LiDAR Data Merging Using Independent Model Method

湯凱佩¹
Kai-Pei Tang

劉燈烈²
Teng-Lieh Liou

曾義星³
Yi-Hsing Tseng

摘 要

利用地面光達（Ground-Based LiDAR）掃瞄資料建構三維場景時，由於場景結構複雜或場景過大以及地面光達掃瞄範圍的限制，必須於多個不同測站（位置）進行掃瞄取得完整場景掃瞄資料，再將各掃瞄站間之點雲資料加以結合來達成。由於每一個掃瞄站點雲資料分屬個別的座標系統，必須將所有測站點雲資料轉換至統一座標系，稱之為點雲資料的套合(Merging or Alignment)。

本研究提出以平差方法來完成多測站點雲資料的結合，引用航空攝影測量中獨立模型法之概念，視每一掃瞄站點雲資料為一獨立單元模型，量測模型連結點、控制點座標並將已知的控制點地面座標值視為觀測值加入平差系統，進行多測站之整體平差求解，最後將所有資料轉換至同一座標系統，達成多測站點雲資料結合的目的。

完成點雲結合後，本研究以個別掃瞄點為材質數貼單元，計算掃瞄資料與影像之轉換關係，逐點計算數貼之色彩值，完成場景簡易材質數貼。

關鍵詞：雷射掃瞄、光達、點雲結合、平差、材質數貼

Abstract

Due to large or complicated object and the limit scanning range of scanner, multiple scans are always required while reconstructing 3D model with point cloud data. However, because the data set of each scan is defined in a local coordinate system, the data set of multi-station must be merged into a unified coordinate system.

Based on independent model adjustment developed in the field of photogrammetry, a point cloud data merging adjustment is proposed. Each point cloud data set is treated as a single model. The model coordinates of tie points and control points are treated as observations in adjustment calculation. After adjustment, the data

¹ 國立成功大學測量暨空間資訊學系博士班研究生，內政部土地測量局測量員

² 國立成功大學測量暨空間資訊學系碩士班研究生

³ 國立成功大學測量暨空間資訊學系教授

sets can be merging using the transformation parameters, and the standard derivation of observation residuals indicates the quality of data merging.

A method is also proposed to integrate ground-based LiDAR data sets and digital images. An image scene can be projected on the LiDAR point cloud data as long as image orientation is solved.

Keywords: Laser scan, LiDAR, point cloud data merging, adjustment

一、前言

隨著雷射掃瞄科技的成熟並且應用在測量技術與技術上，為測量人員帶來大量且豐富的三維量測資訊，常應用於災害監測、邊坡滑動偵測、隧道變形偵測、坑道測量以及建物模型重建方面。

然而在工程測量應用方面，受限於掃瞄目標場景的複雜結構或是場景過大問題以及掃瞄儀掃瞄範圍的限制，常常無法由單一掃瞄站取得完整的場景掃瞄資料，因此必須以多掃瞄站方式來解決。然而由於各掃瞄站點雲資料乃定義於個別的掃瞄座標系統，因此必須結合多掃瞄站點雲資料，將所有點雲資料轉換至統一的座標系統下。目前所發展的點雲結合法多以點雲資料間的共軛關係或是距離關係來進行匹配，最著名且廣泛應用的點雲結合法為 ICP(Iterative Closest Point)演算法 (Besl&Mackay, 1992)。然而絕大多數的點雲結合方式都兩兩相連依序連結之，無法對所有點雲資料進行整體套合及點位平差，因此缺乏客觀的點雲結合精度指標。

本研究提出以平差概念進行點雲資料的結合，根據攝影測量之獨立模型法區域平差法，視個別掃瞄站點雲資料為一個單元模型，觀測模型連結點與控制點座標，並將控制點地面座標值視為平差觀測值加入平差系統。透過最小二乘平差條件要求所有觀測值改正數平方和為最小，求得待定點座標和模型座標系統與地面座標系統之間的轉換參數。根據計算所得轉換參數將所有模型座標轉換到統一的座標系統下，即地面座標系統，完成點雲資料套合。並且藉由檢核點座標與已知地面座標間的座標差，計算點位座標精度，視其為點雲資料結合精度指標，提供做為點雲結合成果優劣的判斷。

本研究亦提出以座標系統轉換關係整合地面光達點雲資料與數位影像資料，應用於場景的材質敷貼。研究中以個別點位作為材質敷貼單元，利用座標系統轉換關係，計算取得場景模型的敷貼色彩值，使場景模型的外觀更接近於實際場景景象。

二、利用座標系統轉換進行資料整合

本研究重點之一在於整合地面光達點雲資料與數位影像資料。兩種不同形式的資料進行整合，必須透過兩者之間的座標系統轉換關係來進行。地面光達對於被測物體的定位，是以光達為中心的座標系統來定義。即地面光達所定義出來的

座標系是以光達雷射發射中心為座標原點，根據右手定則定義光達右方為X軸，掃瞄方向(景深)為Y軸，光達上方為Z軸，再根據地面光達對於被測物體所取得之量度資訊來計算出被測物體的三維座標，如圖 1 所示，地面光達座標系統可視為物空間座標系統。數位影像資料定義於二維影像座標系統，如圖 2 所示，其座標的原點定義在影像的左上角，行(直)方向稱為R軸，向下為正，列(橫)方向稱為C軸，向右為正，符合左手定則。因此可對影像上任一點以C軸與R軸兩座標量加以表示，定義某影像點P之座標為 (C_p, R_p) 。兩者的座標轉換必須經過中介的座標系統加以關聯，即像片座標系統。像片是經由中心透視投影，以二維平面來紀錄場景，而像點的座標則採用像片平面的二維座標來定義，即由框標所定義的x軸與y軸兩座標軸來表示，稱此座標軸為像平面座標系，如圖 3 所示。透過外方位計算掃瞄點位相對應在像片上的位置，再透過內方位轉換計算對應在影像上的位置並且取得此位置的影像色彩值，並經由雙線性內插進行灰度再取樣取得較正確的色彩值。座標系統的轉換關係以及兩種資料的整合流程如圖 4 所示。

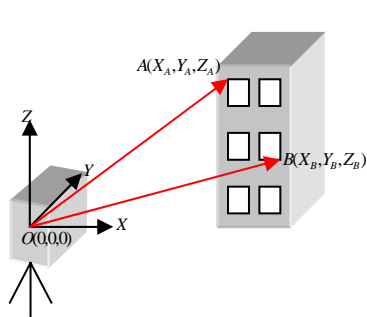


圖 1. 地面光達座標系統

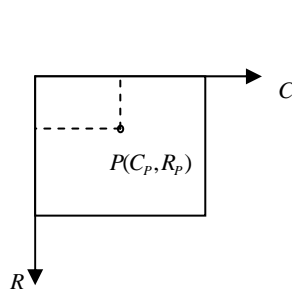


圖 2. 影像座標系統

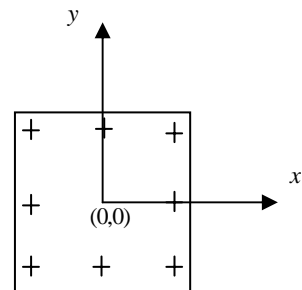


圖 3. 像片座標系統

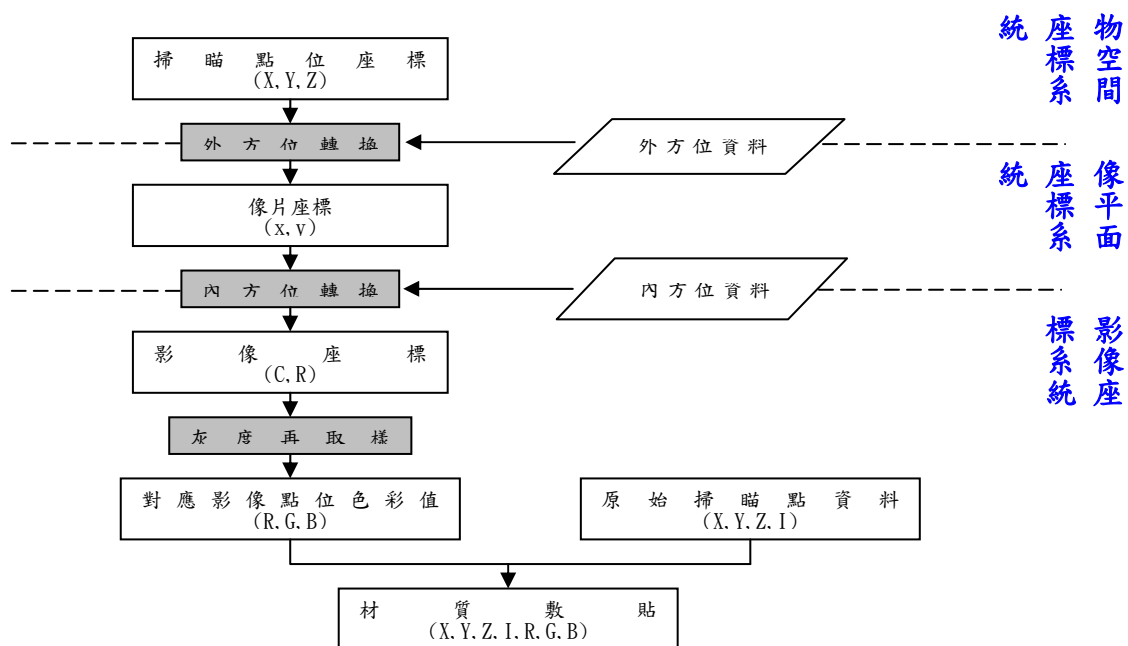


圖 4. 地面光達點雲資料與數位像機影像資料整合流程

三、點雲資料的平差結合

3.1 點雲結合的概念

由於受限於地面光達的掃瞄範圍以及掃瞄場景的場景大小與結構複雜等因素，因此在工程測量的應用上，往往無法由單一測站取得完整的場景掃瞄資料，必須藉由結合多掃瞄站點雲資料來達成。地面光達的各個掃瞄站會建立一個獨立的區域性座標系統，意即不同掃瞄站的點雲資料分屬不同的座標系統，必須將掃瞄點座標轉換到統一的座標系，稱之為點雲資料的結合或套合(Merging or Alignment)。若欲考慮與其他相關的空間資訊結合運用，則應將掃瞄點座標轉換到統一的地面座標系統。對場景進行掃瞄之掃瞄站分別屬於個自獨立的掃瞄座標系統，各掃瞄座標系統之間並無關聯性。然而各掃瞄站資料包含了場景中的控制點以及連結點，分別對其進行特徵點萃取，測得個別座標系下的點位座標值。藉由三維空間正形轉換，可將所萃取出來的連結點與控制點座標值計算出個別掃瞄座標系統與地面座標之間的轉換關係。此正形轉換關係可以三維空間七參數轉換描述之，如式(1)。若假設各掃瞄站點雲資料並無系統性的尺度差異，還可以將尺度轉換參數固定，形成六參數轉換。

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix} = S \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X - \Delta X \\ Y - \Delta Y \\ Z - \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 獨立模型法應用於點雲資料平差結合

本研究將各個掃瞄站點雲資料視為一個單元模型，觀測各個模型的控制點與連結點座標將所有觀測值帶入平差模型中，藉以將所有模型連結，求解出所有模型的轉換參數，轉換個別點雲資料座標，使全部掃瞄站點雲座標位於同一座標系下，完成點雲資料的連結。在一般航空攝影測量獨立模型法中，可以使用兩種數學模型來進行區域平差，一是平面高程聯立求解，二是平面高程分求。本研究中採用第一種數學模型，將點雲資料三個點位座標觀測值一起帶入平差觀測方程式中，共同求解。式(2)表示平差中每一個單元模型各自進行三維線性轉換，即為掃瞄點座標與點位地面座標間的轉換關係，將此式移項成為式(3)，成為平差數學模型。

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X - E_0 \\ Y - N_0 \\ Z - H_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \cdot R^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ N_0 \\ H_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 X, Y, Z 為模型座標，亦即雷射掃瞄連結點或控制點座標

E, N, H 為地面座標，在本研究中平面座標採用二度TM座標系 E, N ， H 則為

高程系統

E_0, N_0, H_0 為模型座標系統相對於地面座標系統之平移量

λ 為單元模型之比例尺參數

R 為模型絕對定向之旋轉參數所構成的旋轉矩陣，為 ω, φ, κ 組成

本研究中所包含的觀測值種類有：1. 模型點觀測值，包括控制點與連結點，須藉由式(3)列出數學關係式，此關係式為由多項未知數所組成的非線性函數如式(5)；2. 已知控制點地面座標值，此類觀測值可以藉由式(4)列出數學關係式，而其待求未知數所組成的函數如(6)所示。

$$\begin{bmatrix} E' \\ N' \\ H' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{E'} \\ v_{N'} \\ v_{H'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{E'}(E, N, H) \\ F_{N'}(E, N, H) \\ F_{H'}(E, N, H) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_X(\lambda, \omega, \varphi, E_0, N_0, N_0, E, N, H) \\ F_Y(\lambda, \omega, \varphi, E_0, N_0, N_0, E, N, H) \\ F_Z(\lambda, \omega, \varphi, E_0, N_0, N_0, E, N, H) \end{bmatrix} \quad (5) \quad \begin{bmatrix} E' \\ N' \\ H' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{E'} \\ v_{N'} \\ v_{H'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{E'}(E, N, H) \\ F_{N'}(E, N, H) \\ F_{H'}(E, N, H) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由於上述觀測值之數學函式為非線性，須進行線性化以取得觀測方程式。因此每觀測一個模型點或是已知控制點地面座標皆可列出三個觀測方程式，將其寫成 $L+V=AX$ 的形式。其中 L 為觀測值，將原始觀測值減去由未知數初始值帶入數學函式而得之， V 為各觀測數之改正數將所有觀測方程式加以聯立， A 為平差係數矩陣，由對未知數偏微分所得。根據最小二乘法原理，平差計算所得之未知參數值必使觀測值改正數滿足加權平方和為最小，根據此一原則進行參數計算。 X 為未知參數增量，首先必須以近似的未知參數初始值代入，根據最小二乘理論中 $X = N^{-1}U = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T L$ 求得未知參數增量 X 。將未知參數初使值加上未知參數增量，作為下次迭代計算的初始值，逐次疊代計算直到未知參數增量的平方和小於所設定的迭代結束門檻值為止，即可結束計算，輸出未知參數，包括各模型的轉換參數以及各點位之點位座標。在這裡根據實務航測中獨立模型法作業，將疊代結束的門檻值設為十的負十次方。

根據所計算出來的各模型轉換參數將其最終參數代入式(2)中，計算待定點或連結點座標，並且也將原始點雲資料代入此式，逐一算出各掃瞄站點雲資料的地面座標，完成點雲資料的套合。

四、實驗成果

4.1 場景建置

本實驗以成大圖書館作為實驗場景，進行實驗前必須利用三角三邊觀測先於目標場景四週佈設地面導線控制點位。於兩個或兩個以上地面導線控制點位進行前方交會觀測，定位出建物場景即圖書館上的特徵點位座標，包括場景控制點

與檢核點。本實驗於圖書館周圍選擇九個位置進行掃瞄，並在掃瞄的同時於光達相近位置與姿態以數位像機取得影像資訊，提供後續影像數貼之用。利用本研究所提出之平差結合方式將各掃瞄站點雲資料進行結合後，可以取得所有待定位點座標，與前置作業中所定位出之檢核點點位座標相比較並計算出點位精度，視之為點雲結合成果優劣判斷之指標。根據平差所解算出的各掃瞄站與地面座標間的空間相似轉換參數進行點雲資料座標轉換，將所有點雲資料由各自獨立的掃瞄座標系統轉換到地面座標系統下，各掃瞄站點雲資料完成套合。根據所取得的各像片外方位參數，逐點計算所對應平差後且經過座標轉換的掃瞄站點雲資料在像片上的影像位置，由於計算所得位置並非整數格點，必須再進一步進行雙線性內插，取得改正後的色彩值(RGB)，賦予原掃瞄點色彩屬性值，並且加以輸出。

4.2 實驗成果與分析

利用獨立模型法概念進行點雲資料的平差結合，其主要解算成果包括了各掃瞄站座標系與地面座標系之間的轉換參數以及所有點位的座標值。觀測所有點雲資料結合後，相鄰兩站的點雲結合後的殘留誤差，來加以判斷某掃瞄站點雲資料是否具有錯誤的匹配點，或具有系統性的誤差，進而檢視此掃瞄站的轉換參數。因此，本實驗先分析觀測值的殘差 v 是否有異常，進而分析是否含有某種規律的趨勢，以檢定系統中是否含有某方向系統性誤差。並藉由計算後驗觀測中誤差 σ_0 來對於本實驗區域整體的觀測精度作評估。本研究在不考量模型間比例尺的影響的情況下，以六參數進行解算。利用自由網平差概念，保持網型解算的最小約制，此處以控制點數目為最小約制，以最少的建物場景控制點進行平差解算。在上述條件下進行平差並分析觀測值殘差。圖5為各方向觀測值殘差的個數統計，以直方圖形式表現。表1則為各方向觀測值殘差的統計表。

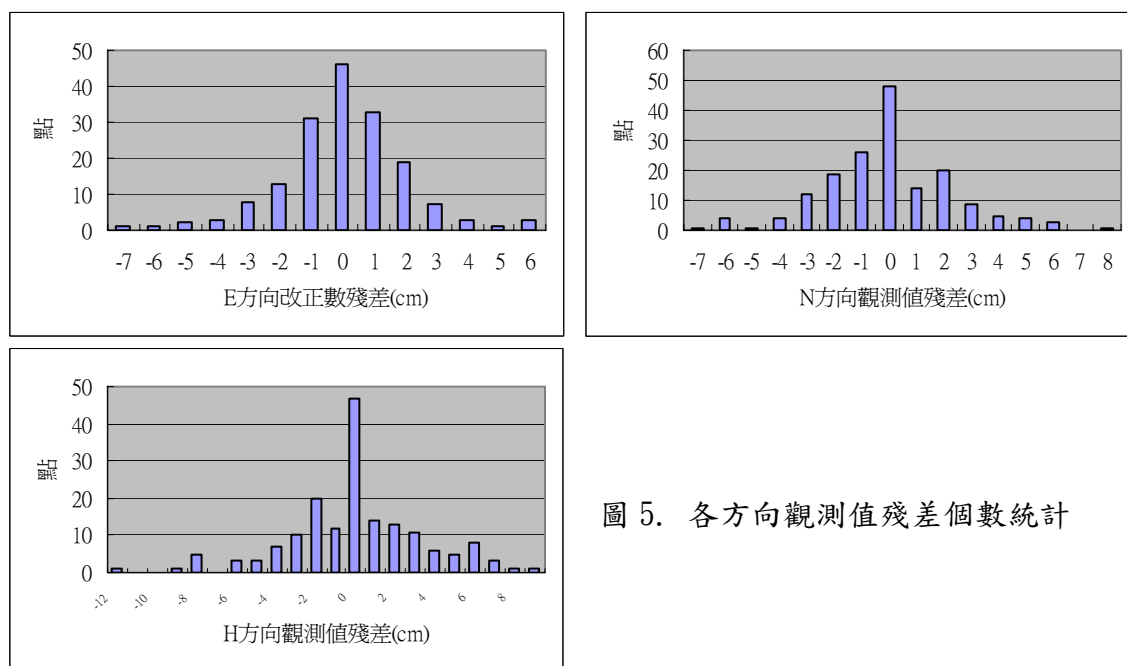


圖 5. 各方向觀測值殘差個數統計

由圖 6 可以看出，觀測值殘差分佈並無明顯偏向正值或負值區域，分佈均勻，且三個方向的觀測值殘差大致呈鐘型曲線，符合常態分佈，推斷平差系統中應無明顯系統性誤差。最後計算驗後單位權中誤差 $\hat{\sigma}_0 = 3.39(\text{cm})$ 。於此所得後驗單位權中誤差明顯大於本研究所採用的雷射掃瞄點位定位精密度，約 8mm~12mm[賴志凱，2004]，其因推測是由於本研究中代入平差系統之模型點觀測值大多是經過“萃取”後計算所得，而並非完全都是原始的掃瞄點位，因此點位觀測精度不受定位精密度直接影響，再者由於點雲資料的離散性，使得點位的觀測與萃取受到主觀意識一定程度的影響，無法保證萃取所得的點位為實際特徵點位。諸多觀測上的誤差造成後驗單位權中誤差明顯不如雷射掃瞄點的點位定位精度。若考量本研究所採用的地面光達在各掃瞄方向上的尺度上並不一致，造成模型間比例尺因子不固定，因此另以七參數轉換進行平差解算，得驗後單位權中誤差 $\hat{\sigma}_0 = 3.14(\text{cm})$ ，推論雖然尺度參數可吸收部份誤差，但效果並不明顯。

表 1. 觀測值殘差統計分析表

	Max	Min	Mean	標準偏差
E	6.13	-7.06	-0.25	$\hat{\sigma}_E = 1.48\text{cm}$
N	7.90	-7.30	0.33	$\hat{\sigma}_N = 1.73\text{cm}$
H	9.11	-11.78	0.59	$\hat{\sigma}_H = 2.51\text{cm}$

4.3 多測站誤差累積

目前所發展的點雲資料的結合方式，如 ICP 法，結合時會將掃瞄站的拼接誤差逐站逐站地傳播，如開放導線一般，導致點雲結合成果精度逐漸下降。因此以獨立模型法概念進行點雲資料的平差結合，其目的在於利用平差的原理，將點雲結合的誤差平均分配，散布至各掃瞄站中，避免結合誤差的累積，以期得到最佳的點雲資料結合成果。實驗中將掃瞄站分批加入平差系統中解算，起初以第一站與第二站點雲資料一起平差，逐次加入第三站、第四站直到全部九個掃瞄站一起平差，觀測其解算後點位精度之變化。圖 6 所示分別觀測三個方向上的點位精度變化，雖然在各方向上點位精度皆隨著掃瞄站資料的累積而逐漸下降，但是其下降程度並不明顯。因此推論，若加入掃瞄站觀測資料中並無大錯，點雲資料以平差方式結合可使誤差分佈均勻，且不致產生多掃瞄站誤差逐漸累積的情形。

4.4 場景建置成果

根據平差後所得各掃瞄站與地面座標系統間的轉換參數，將所有掃瞄站點雲資料進行座標轉換，使所有點雲資料都位於既有的地面座標系統下，完成多掃瞄站點雲資料的結合。完成點雲資料結合後，進行材質敷貼。本研究中採用 Pixel-Based 的材質敷貼方式，即以個掃瞄點作為材質敷貼單元，利用前述座標轉換系統方式計算出每個掃瞄點對應的敷貼色彩值，於展示平台上展示場景建置之成果。圖 7 為加上敷貼色彩值後完整場景建置成果。

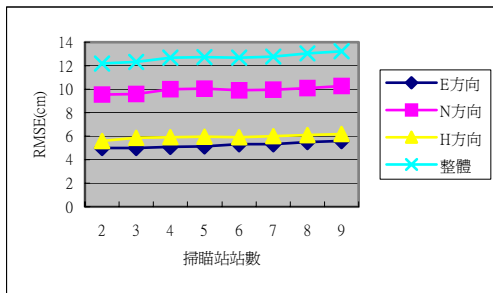


圖 6. 掃瞄站站數與點位精度之關係

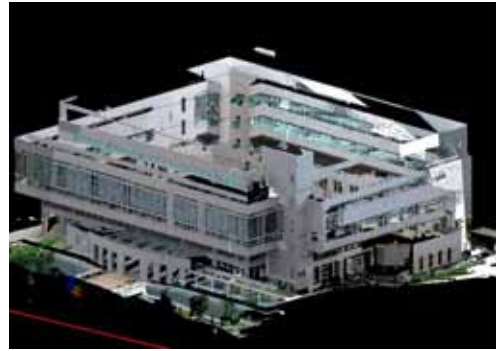


圖 7. 圖書館三維場景建置完整成果

五、結論與建議

在本研究所設計的實驗中，利用了平差的概念與方法完成了點雲資料的結合。並且藉由座標系統轉換的概念整合了影像資料與點雲資料，完成三維場景的建置。更重要的是提出了客觀的點雲資料結合精度指標，提供使用者參考。對測量界而言，以獨立模型法為概念對點雲資料進行整體計算來達到點雲結合的目的，並且提出點位精度作為結合成果精度指標，在理論基礎及程序上較嚴謹且成果較容易被接受。對長形場景或測區，如橋樑或隧道而言，利用平差點雲結合法可於場景的頭尾兩端佈設控制點，加強點雲資料與地面座標間轉換的穩固，避免點雲結合法誤差累積傳播的現象。

六、參考文獻

- 王之卓，『攝影測量原理』，測繪出版社，pp. 80-82，1984。
- 李德仁與鄭肇蓀，『解析攝影測量學』，測繪出版社，pp. 137-140，1992。
- 王正忠，『以近景攝影測量進行模型式建物重建』，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文，2002。
- 傅秉綱，『三維建物模型表面影像數貼自動化之研究』，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文，2002。
- 賴志凱，『地面雷射掃瞄儀的精度分析與檢定』，國立成功大學測量及空間資訊學系研究所碩士論文，2004。
- Ackermann, F., 1999. "Airborne laser scanning-present status and future expectations", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54(1999)64-67.
- Besl, P. j. and McKay, N. D., 1992. "A method for registration of 3-D shape", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239-256.
- Iavarone, A., Vagners, D., 2003. "Sensor fusion : generation 3D by combing airborne and tripod-mounted LiDAR data", *International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W10.