

以光達點雲重建屋頂面模型之半自動化作業平台

A Semi-automatic Platform for Building Roof Reconstruction by Using LIDAR Point Clouds

趙鍵哲¹
Jen-Jer Jaw

鄭傑中²
Chieh-Chung Cheng

摘要

近年來，以光達(Light Detection And Ranging, LIDAR)資料重建屋頂面模型的相關研究為數眾多，其各自的演算法及自動化程度因考量不同目的或品質成果而有所不同。為了兼顧模型重建的可靠度、效率以及品質，本研究從實務的角度出發進行三維屋頂面重建，工作分成四個階段：首先，從網格化的光達點雲資料中藉由影像處理技術自動量測並輔以人工挑選與修補獲致可靠但資料品質較差之三維結構線(以下稱近似三維結構線)；第二階段則針對近似三維結構線，以先前所發展的建構-成型演算法重建初始屋頂面模型，並建構組成屋頂面之各個多邊形；在第三階段改良程序則藉由光達離散點雲資料進行平面擬合計算，再將相鄰兩平面進行交會以獲得改良後的三維結構線；第四階段則將改良後的三維結構線(屋頂面內部)與近似三維結構線(屋頂面外緣)進行整體平差計算，以獲取屋角點三維坐標及標準差。實驗結果顯示，本工作所擬定的重建演算策略能獲致幾何精度較高且結構完整的屋頂面模型。

關鍵詞：光達、屋頂面重建、三維結構線。

Abstract

Building roof reconstruction by using LIDAR ((Light Detection And Ranging) data has been a research focus seen in many studies, varying in strategies, algorithmic designs, levels of automation and quality of the product, however. To optimize among reliability, efficiency and quality of the building roof reconstruction, the authors present an effective strategy and develop a workable platform of LIDAR data processing for this task. There are four main procedures involved in this study. First, rough but reliable initial 3D structure lines are extracted from LIDAR point clouds by combining automatic and manual measurements. Then, the initial building roofs are reconstructed on a 3D structure line basis through Construct-Shape algorithmic procedures and followed by constructing polygons of each building roof. The third procedure is aimed to refine the 3D structure lines that situate inside roofs by going through the following two geometric inferences: (1) Performing the plane

¹ 國立台灣大學土木工程學系 副教授

² 國立台灣大學土木工程學系 博士生

fittings; (2) Calculating the intersections of adjacent planes. The final procedure is to adjust the roof geometry by combing the outer initial 3D structure lines and the refined inner 3D structure lines. Experiments show that the proposed strategy as well as the developed platform not only supports a reliable and complete building roof reconstruction task but also exploits the best geometric quality of LIDAR point clouds.

Keyword: LIDAR, Building Roof Reconstruction, 3D Structure Lines

一、前言

考量三維房屋模型在都市計畫與管理以及其它與空間資訊相關的使用潛能與需求，如何能在重建的過程中兼顧效率、可靠度與幾何精度，為一實用的研究課題。傳統上，航空攝影測量為大範圍房屋測繪所採行的方法，其原理為藉由立體像對中找尋兩張影像的共軛屋角點特徵並進行前方交會以獲得三維屋角點坐標，此種方法在人工量測作業模式下有其作業上的便利性。然而，在航測作業自動化的目標下，針對影像中資訊不足之處，例如特徵不明顯以及遮蔽區域等，點特徵相對於其他特徵(如線特徵)是相對難以確認與判識的，其特徵偵測乃至共軛(Conjugate)屋角點之配對仍需有賴大量的人為判斷與推論予以補足。

近幾年來，光達系統技術日趨成熟，相較於航照立體影像對(Stereo-pair)，其特點為可直接提供大量、高密度且具三維坐標的點雲資料，對以自動化程序進行三維物表重建的任務有顯著的助益(Brenner, 2005)。從相關文獻的報導發現，截至目前為止，利用光達點雲資料重建屋頂面模型多從全自動化的角度出發，其作業流程可分成建物偵測、特徵(點特徵、線特徵或面特徵)萃取與建物重

建三個階段。建物偵測的目的在提取建物所在區域的光達點雲供進一步處理，其做法可將光達資料內插網格化獲得距離影像後，以影像處理方式進行特徵分類(Rottensteiner, 2003; Tovari and Vogtle, 2004)，或以統計平差的方式結合平面擬合與偵錯機制獲得屋頂平面區塊(邱式鴻, 2004)，抑或採用物件的概念藉由點特徵方式進行建物偵測(Lafarge et al., 2008)。此外，在特徵萃取的策略上也可分成兩方面進行，一為將光達離散點雲利用結構化方式偵測面或線特徵(Lin and Jaw, 2004; 羅英哲, 2008)，或從網格化光達資料中偵測面特徵(Rottensteiner, 2003)。當取得建物重建所需的特徵資訊後，則須建立一套屋頂面假說(Hypothesis)或位相推論(Topological inference)邏輯，以聚合特徵資訊進而重建屋頂面模型(Rau and Chen, 2002; Rottensteiner, 2003; Schwalbe, 2004; Ahlberg et al., 2004; Verma et al., 2006; Forlani et al., 2006; Wang and Zhao, 2008; Arefi et al., 2008; Chen et al., 2008; Sohn et al., 2008; 張智安、陳良健, 2005; 趙鍵哲、鄭傑中, 2007)。

然而，在實際的重建作業中常受到雜訊、遮蔽、點雲密度與建物複雜程度等變因的交互影響，目前尚無任何演算法能夠全自動化且正確無誤地

達成模型重建的任務，重建成果最後仍需藉助人力進行檢核與編修。因此，為了兼顧資料品質、重建成果的可靠度與效率，本研究從實務的角度出發設計如下程序的演算：(1).將光達離散點雲利用內插產製網格化之數值表面模型 (Digital Surface Model, DSM)，再以半自動化的方式結合影像處理與人工判識與量測程序萃取出可靠、完整但資料品質較差(相對於最終成果)的三維結構線(以下稱近似三維結構線)；(2).利用先前所研擬的建構-成型演算程序以獲得初始屋頂面模型框架(趙鍵哲、鄭傑中，2007)；(3).擴展成型演算程序，由初始屋頂面模型

框架中的屋角點坐標，利用幾何推論演算法組成不同形狀的多邊形 (Polygon)；(4).擷取位於多邊形內的原始光達離散點雲，進行平面擬合計算並將相鄰平面進行交會計算獲致三維結構線，此為改良後的三維結構線；(5).進行第二次的模型重建 (Re-shape)，即將改良後的三維結構線(位於屋頂面內部)與近似三維結構線(位於屋頂面外緣)進行整體平差計算以獲致幾何精度較高的三維屋角點坐標。以下各章節包含數學工具以及針對本文的研究方法加以詳細介紹，圖 1 為研究流程圖。

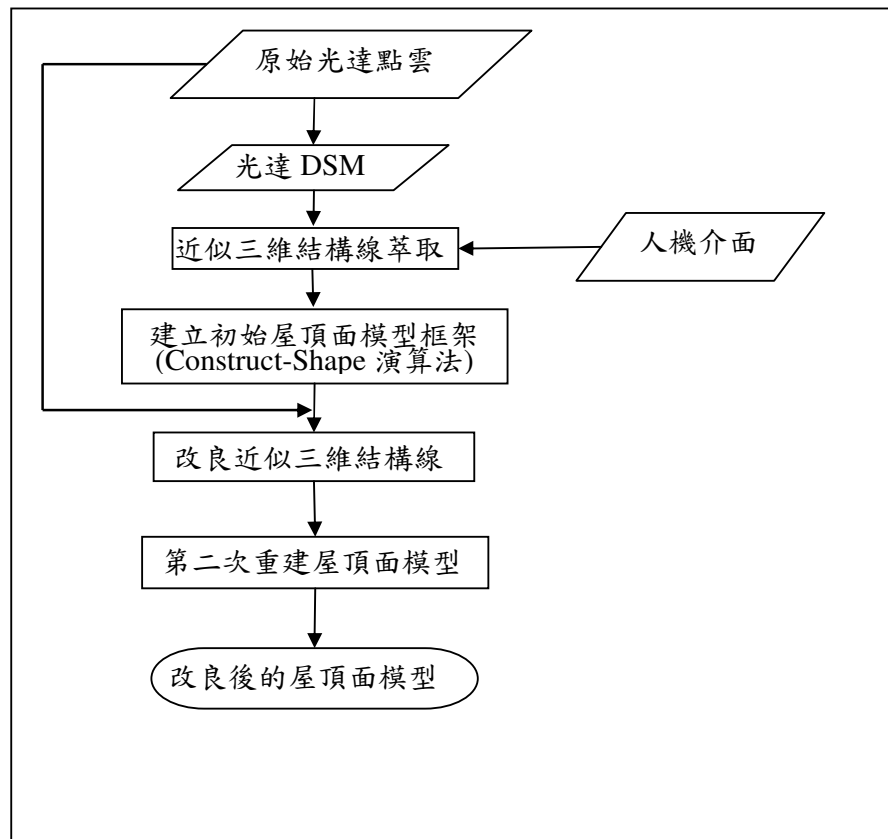


圖 1、研究流程圖

二、數學幾何

本小節歸納以下各個階段所需要的數學工具：

二維直線方程式：

$$ax+by+1=0 \quad (1)$$

其中： (a,b) 為直線方程式參數， (x,y) 為直線上之點位坐標值。

三維結構線參數表示式：

三維結構線可以利用通過此直線之兩點坐標值並以式(2)表示：

$$\begin{aligned} X &= X_1 + (X_2 - X_1)t = X_1 + ft \\ Y &= Y_1 + (Y_2 - Y_1)t = Y_1 + gt \\ Z &= Z_1 + (Z_2 - Z_1)t = Z_1 + ht \end{aligned} \quad (2)$$

其中： (X_1, Y_1, Z_1) (X_2, Y_2, Z_2) 為三維結構線上兩點坐標值， (X_1, Y_1, Z_1) 視為參考點， $(f, g, h)^T =$

$$t = \frac{X - X_1}{f} = \frac{Y - Y_1}{g} = \frac{Z - Z_1}{h} \quad (3)$$

將式(3)內兩兩相乘(如實線與虛線所示)得式(4)。

$$\begin{aligned} g(X - X_1) &= f(Y - Y_1) \Rightarrow gX - fY + (fY_1 - gX_1) = 0 \Rightarrow gX - fY + D_1 = 0 \\ h(Y - Y_1) &= g(Z - Z_1) \Rightarrow hY - gZ + (gZ_1 - hY_1) = 0 \Rightarrow hY - gZ + D_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

將式(4)分別除以 D_1 與 D_2 得到式(5)，此即為以(XY+YZ)兩面式表達之三維結構線。

$$\begin{aligned} \left(\frac{g}{D_1}\right)X + \left(-\frac{f}{D_1}\right)Y + 1 &= 0 \Rightarrow A_1X + B_1Y + 1 = 0 \\ \left(\frac{h}{D_2}\right)Y + \left(-\frac{g}{D_2}\right)Z + 1 &= 0 \Rightarrow A_2Y + B_2Z + 1 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中： A_1, B_1, A_2, B_2 為以兩面式表達三維結構線之四參數， X, Y, Z 為三維結構線上的點位坐標值。惟須注意式(5)僅為導由式(3)的一種兩面式表示式，此種表示法無法表達平行於 XZ 平面之三維結構線；同理，其它由(XY+XZ)以及(XZ+YZ)之兩面式各無法表達平行於 YZ 以及 XY 平面之三維結構線。

$(X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)^T$ 為直線方向向量。

式(2)又稱為六參數式，然而此六參數並非獨立參數。由式(2)中若將參考點沿著直線移至與 XY 平面穿刺位置 $(p, q, 0)$ ，並將方向向量各分量同除 Z 分量使成 $(a, b, 1)^T$ ，則 (a, b, p, q) 稱為表達三維結構線之四參數。依據三維結構線方向，前述穿刺點亦可能落於 YZ 或 XZ 平面，在該情況下，方向向量亦分別隨著調整為 $(1, a, b)^T$ 或 $(a, 1, b)^T$ 另外，將式(2)改寫為參數式的型態如(3)。

因此須依據三維結構線空間特性搭配適當的兩面式。

平面方程式：

$$aX + bY + cZ + 1 = 0 \quad (6)$$

其中： (a, b, c) 為平面方程式參數， (X, Y, Z) 為平面上之三維點位坐標值。

兩相鄰平面交會三維結構線之參數計

算式(7)為以兩相鄰平面來表示的三維結構線(六參數型態)。而式(8)為進行相鄰平面交會之三維結構線四參數 (a, b, p, q) 的表示式，其中三維結構線方向向量 $(a, b, 1)^T$ 為將兩平面參數外積並將Z分量化為1(如前所述)，而穿刺點 $(P, q, 0)$ 為坐落在XY平面上，將

$$\begin{cases} \text{Plane}_1 : a_1 X + b_1 Y + c_1 Z + 1 = 0 \\ \text{Plane}_2 : a_2 X + b_2 Y + c_2 Z + 1 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$a = \frac{(b_1 c_2 - c_1 b_2)}{(a_1 b_2 - b_1 a_2)}, \quad b = \frac{(c_1 a_2 - a_1 c_2)}{(a_1 b_2 - b_1 a_2)}, \quad p = \frac{b_2 - b_1}{a_2 b_1 - a_1 b_2}, \quad q = \frac{a_2 - a_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (8)$$

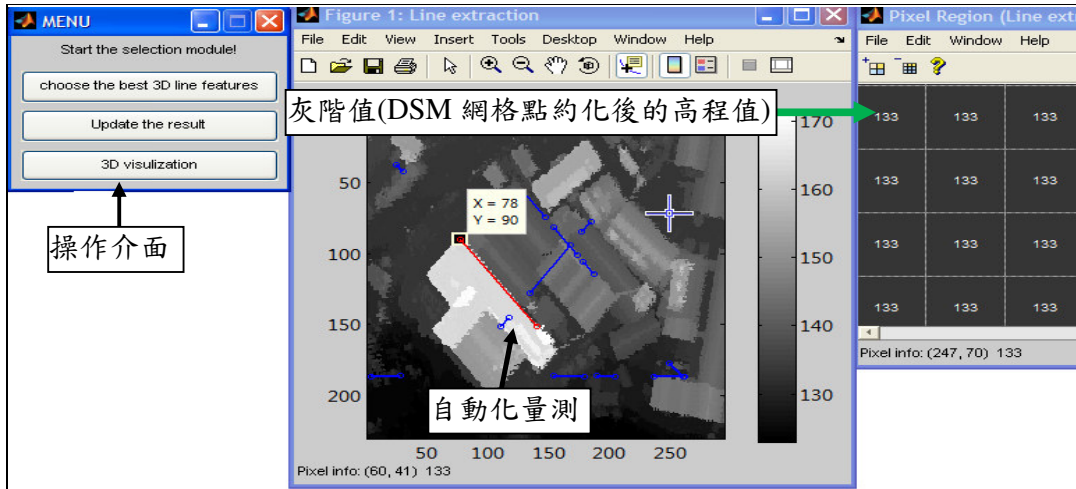
$$A_1 = \frac{b}{aq - bp}, \quad B_1 = \frac{-a}{aq - bp}, \quad A_2 = \frac{-1}{q}, \quad B_2 = \frac{b}{q} \quad (9)$$

三、近似三維結構線萃取

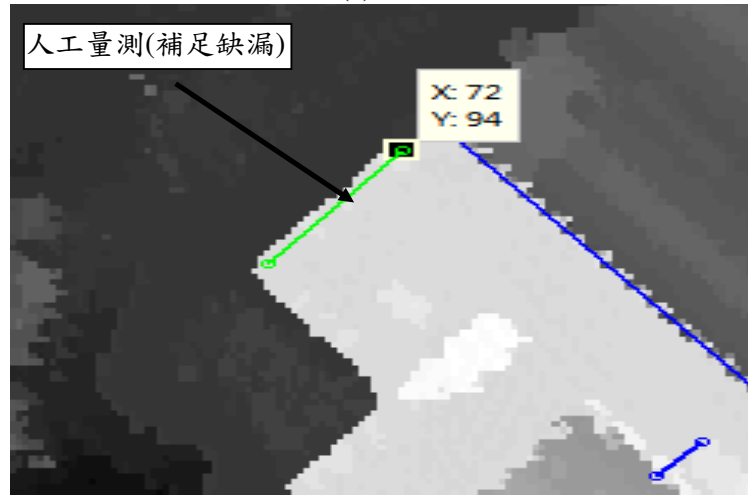
由於建物型態複雜而多變，且在都市區受到遮蔽和屋頂雜物的影響導致常無法可靠地以全自動化方式萃取三維結構線。在建模的課題上，不符合幾何條件的觀測量將造成錯誤的建物重建，例如一棟矩形建物，倘若萃取到五條不共邊的邊緣線，此時以這五條邊緣線進行重建將造成模型的錯誤。如若設定幾何約制條件，如相鄰線交角為直角與對邊互相平行等，或許可偵測錯誤的觀測量而加以排除。然而建物形狀種類何其多，無法保證相鄰邊緣線交角一定是直角或接近直角，因此即便採用約制條件能過濾錯誤的線條，但相對地也限制演算法能重建各種複雜型態屋頂面的彈性。且依目前資料型態及技術層面來考量，在建模的議題上過度強調自動化是不切實際的。因此，為了獲得可靠的屋頂面模型，需依賴可靠的特徵(點、線或面)資訊作為外部輸入。由於三維結

其代入式(7)後進行聯立解算得到對應之 P, q 值。式(9)為將穿刺點 $(P, q, 0)$ 與三維結構線方向向量 $(a, b, 1)$ 代入式(2)中經過式(3)~(5)的計算程序後，所得到之兩面式的表示方式(型態同式(5))。

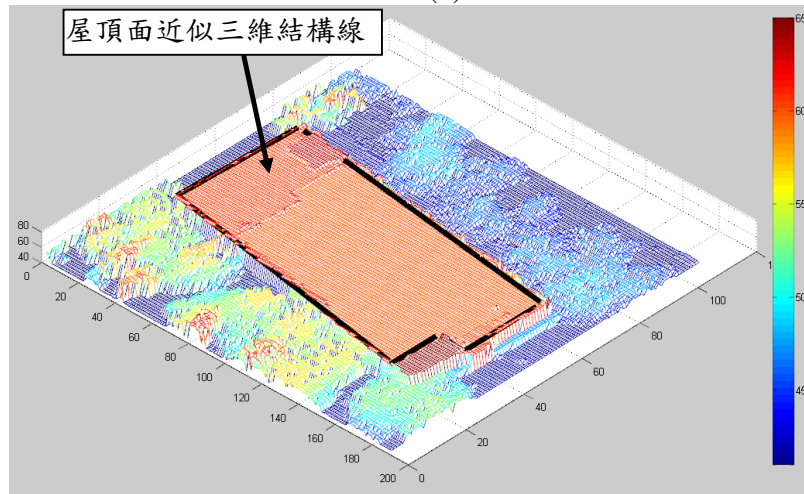
構線呈現具體的屋頂面幾何型態，且其資料來源相較於其他特徵資訊來的廣泛(例如也可從三維地形圖資獲得)，因此在演算法設計上選用三維結構線特徵進行模型的重建有其優勢與便利性。圖2為本研究工作所設計的近似三維結構線萃取之使用者介面，藉此可由光達離散點資料內插得到的DSM中萃取得到近似三維結構線。其處理程序首先以影像處理方式利用Canny邊緣線偵測元(Canny, 1986)與Hough Transform演算法(Hough, 1962)自動化偵測得到近似三維結構線，如圖2(a)中的藍色線條。之後，人工挑選(無量測動作)位於房屋區塊中可靠的線條做為重建所需的近似三維結構線，如圖2(a)中的紅色線條。接著，由人工量測補足自動化偵測所遺漏的建物邊緣線，如圖2(b)中的綠色線條。圖2(c)中的黑色線條則為藉由此人機介面所獲致之屋頂面近似三維結構線示例。



(a)



(b)



(c)

圖 2、所萃取之近似三維結構線套疊至 DSM

四、建立初始屋頂面模型

當獲得近似三維結構線做為建立初始屋頂面模型框架的外部輸入後，則採用先前所發展的演算法(建構-成型程序)自動化建立初始屋頂面模型框架(趙鍵哲、鄭傑中，2007)，該演算法屬於資料導向的重建策略，只要屋頂面邊線為直線之類型均適用(現階段不包括弧型、球型等非以直線型描述的屋頂面)。演算法分為兩階段，首先在建構階段為建立屬於每棟屋頂面上之近似三維結構線間的位相關係；而成型階段的任務為獲得屋頂面的三維資訊(即屋角點坐標)，接著利用相鄰較高的建物進行遮蔽補償以獲得完整的初始屋頂面模型框架，同時本文擴展先前發展之成型程序(趙鍵哲、鄭傑中，2007)，利用幾何推論演算法以建立屋頂面封閉多邊形。演算法說明如下：

4.1 建構 (Construct)

建立屋頂面三維結構線間位相關係的主要構想在於觀察若將其投影到

XY 平面上獲得二維直線方程式(如式(1)所示)後進行交會計算，具有一次交會的特性，如圖 3 所示，紅色線向前延伸到與藍色線或綠色線交會獲得交會點後即停止，然而不論多麼複雜的建物都將滿足此現象。因此，利用此概念設計一包含距離與位相檢驗門檻之幾何推論演算法(趙鍵哲、鄭傑中，2007)，以獲得在平面上合理的交會點坐標，圖 4 為建構程序的演算流程圖。圖 5(a)紅色點為將近似三維結構線(藍色線)投影到平面上進行交會計算所得到的多組交會點；圖 5(b)黑色點表示所推論得到的合理交會點坐標；圖 5(c)說明近似三維結構線進行分類歸屬(趙鍵哲、鄭傑中，2007)的範例，其群次表示依序被分類歸屬於不同屋頂面的三維結構線；圖 5(d)紅色框中顯示理應為同一角點之同群交會點(由於隨機誤差影響)，藉此可推論得到此角點是由哪些近似三維結構線所交會延伸而成的，進而建立每個屋頂面上近似三維結構線間的位相關係。

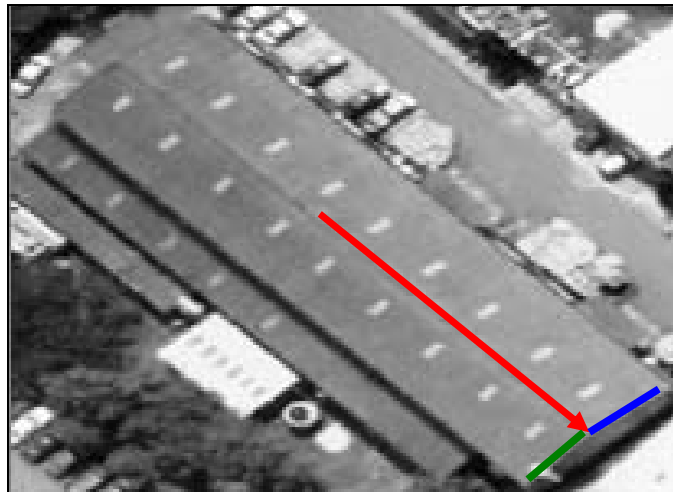


圖 3、建物屋頂面之近似三維結構線於 XY 平面上投影交會特性

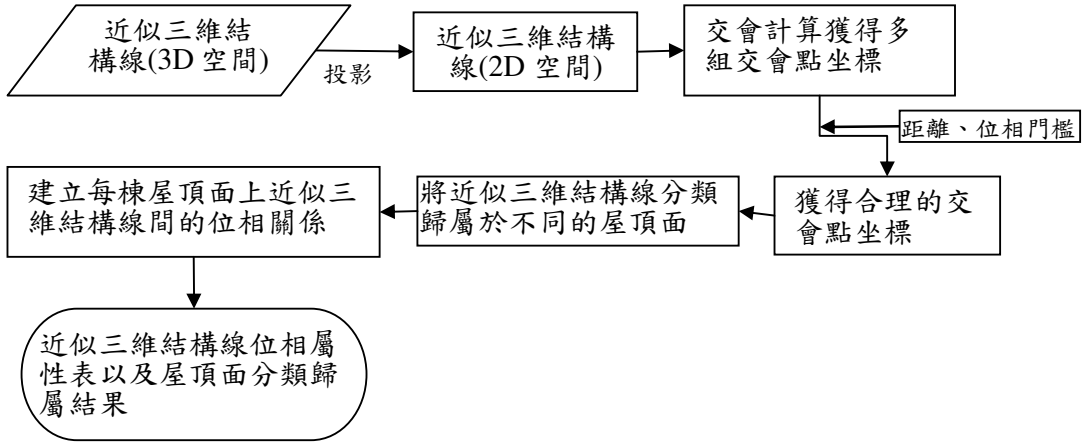


圖 4、建構程序之演算流程圖

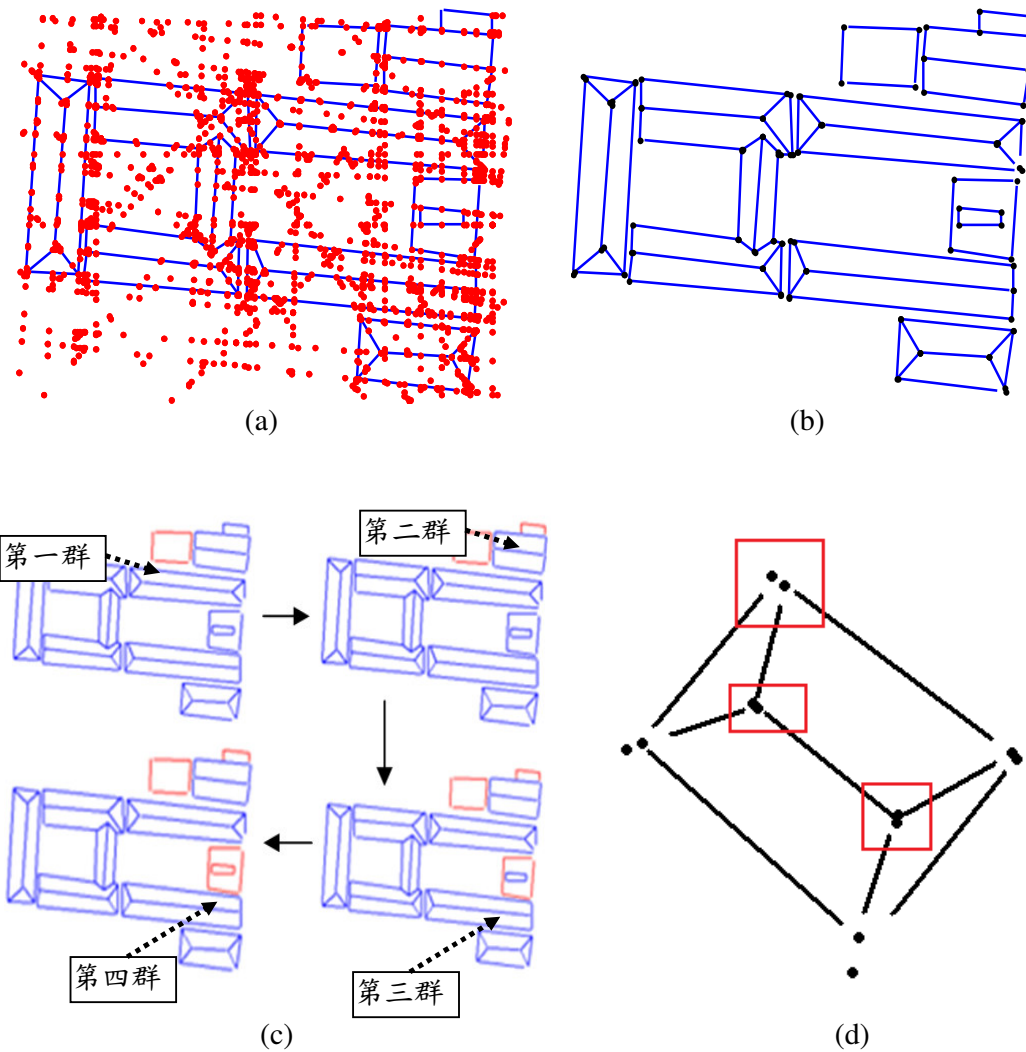


圖 5、建構階段成果示意圖

4.2 成型 (Shape)

此階段的目的是在於獲得屋頂面的三維資訊，即屋角點坐標、屋頂面框架以及屋頂面多邊形；而策略分成三個部分：(1)平差計算獲得屋角點坐標及其標準差；(2)遮蔽補償；(3)建立屋頂面多邊形。

三維屋角點坐標乃藉由相鄰之三維結構線進行交會計算，以式(5)兩面式來描述三維直線軌跡，兩三維結構線其交會點之計算實際上是以四個方程式來解算三個未知參數，因此具有一個多餘觀測數。基本上，同一棟建物之屋頂面所有屋角點交會計算可以

$$B_{c \times n} e_{n \times 1} + A_{c \times u} \xi_{u \times 1} - W_{c \times 1} = 0_{c \times 1} \quad e \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (10)$$

式(10)中， A 與 B 分別為式(5)對屋角點坐標未知參數及近似三維結構線四參數觀測量偏微分之係數矩陣； ξ 為屋角點坐標未知參數增量向量； W 為不符值向量； e 為誤差向量； Σ 為觀測量方差-協方差矩陣； σ_0^2 為方差分量； P 為權矩陣； c 為方程式個數(等於所納入計算之三維結構線個數乘以2)； n 為觀測量個數(等於所納入計算之三維結構線個數乘以4)； u 為未知參數個數(等於所計算之屋角點個數乘以3)。

利用同時平差 (Simultaneous Adjustment)程序來進行，其意義為同一棟屋頂面交會計算所牽涉的所有三維結構線是同時調整並獲得該棟建物之所有屋角點坐標，而並非一個一個屋角點各別計算。利用式(5)引入三維結構線進行屋角點的平差數學模式為式(10)，其型態為附有未知參數的條件平差觀測方程式。除具有前述同時解算之特色以外，此屋角點平差計算式的另一特點在於其並未具有屋角點共平面的假設(即使針對四邊形屋頂面)，故更能描述實際情況。

遮蔽補償的方式為將近似三維結構線投影到平面上後，以搜尋最短路徑的方式藉助相鄰較高的建物補償遮蔽部分(Cormen et al., 1990)，如圖6所示，黑色虛線部分表示補償成果，灰色點為補償得到的虛擬屋角點，而黑色點為由三維直線觀測量所平差得到的實際屋角點。虛擬屋角點由於坐標資訊都是未知的，故其屋角點的標準差則刻意給定為一較大值($\pm 1000m$)用以跟實際屋角點有所區別。

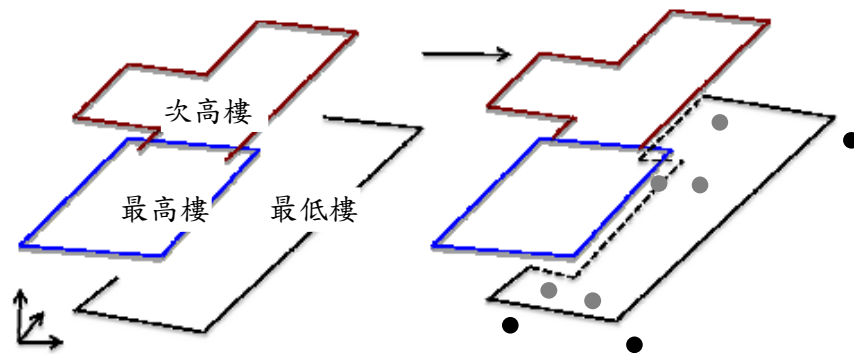


圖6、遮蔽補償示意圖

當完成屋角點交會計算以及遮蔽補償的程序後可獲得初始屋頂面模型框架(Wireframe)，而其資料結構(Data Structure)為以屋角點配合屋角點間相鄰關係的邊界描述法(Boundary representation, B-rep)來表示此棟建物，然而該表示法並不足以提供相鄰屋頂平面特徵的資訊。如圖 7 為一棟建物的初始屋頂面模型框架，表 1 為相鄰矩陣(Adjacent Matrix)，其記錄屋角點間的相鄰位相關係。以 15 號屋角

點為例(位於圖 7 中的紅色框)，由表 1 相鄰矩陣(非灰色區域數值)可知，15 號與 1 號及 2 號屋角點相鄰(即相鄰矩陣中的非零值)。換句話說，初始屋頂面模型只提供 15 號與 1 號或 2 號屋角點間可各組成一條屋頂面邊緣線的訊息，但卻無從得知此棟建物有多少個屋頂平面資訊，也就是仍未具體給出那些邊緣線構成封閉多邊形以及該棟屋頂面上封閉多邊形的個數。

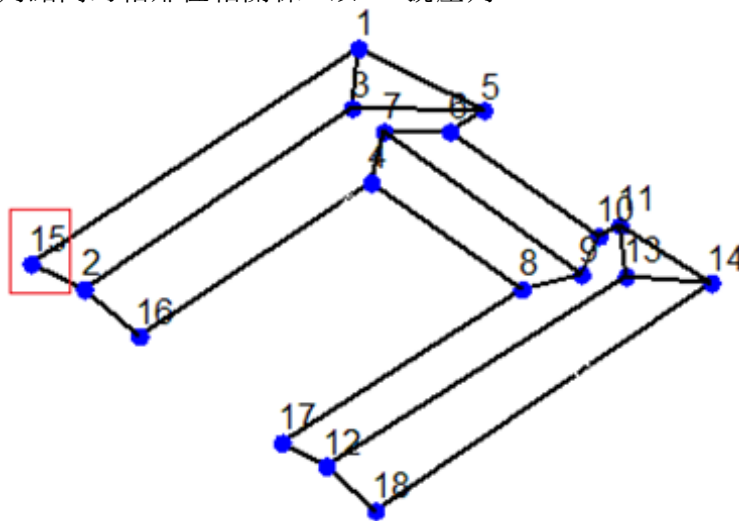


圖 7、初始屋頂面模型框架表示圖

表 1、相鄰矩陣

角點編號	1	2	3	4	5	6
3	1	1		0	1	0
15	1	1	0	0	0	0
16	0	1	0	1	0	0

故為建立屋頂面上多組封閉多邊形，本研究設計一套幾何推論演算法，為藉由屋角點坐標及其相鄰關係，逐步推演屋頂面上的封閉多邊

形。演算法分成四個幾何推論程序，圖 8 為此演算程序的流程圖，詳細說明如後：

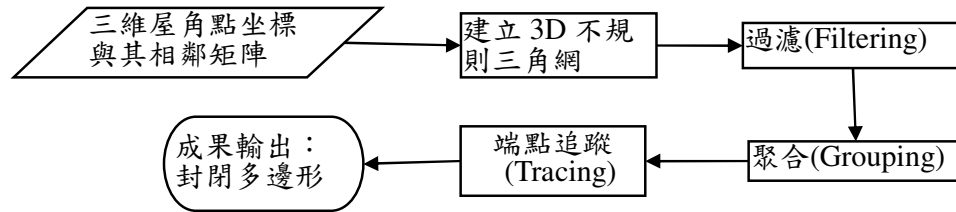


圖 8、建立封閉多邊形演算流程圖

建立 3D 不規則三角網 (3D Triangulated Irregular Network, 3D TIN)：首先利用三維屋角點坐標建立 3D 不規則三角網，如圖 9(a)所示。再將所建立之 3D 不規則三角網投影到平面上獲得多組不規則三角形，如圖 9(b)所示。此外，藉由屋角點與其相鄰矩陣，可將任一三角網所存放的三條邊線(由三個屋角點構成)定義為兩類，分別為真實邊緣線(real edge)與虛擬邊緣線(virtual edge)，其區分方式為若三角形的邊線為三維結構線，則該邊線為真實邊緣線，否則即為虛擬邊緣線。

過濾(Filtering)：此階段包含兩個判斷條件，由於真實邊緣線表示屋頂平面的結構線，因此倘若任一組不規則三角形與真實邊緣線交會(條件一)，或任一組不規則三角形內包含其他的屋角點坐標(條件二)，則這些不規則三角形判定為不合理，將予以剔除。圖 9(c)為此階段的兩個判斷條件示意圖。圖 9(d)中所顯示的不規則三角網則為經過此兩項幾何推論程序過濾後的結

果。

聚合(Grouping)：此程序引入區域成長(Region Growing)的概念，當任兩不規則三角形的共用邊為虛擬邊緣線時，此兩三角形則聚合為同一群組(例如圖 9(e))，依此邏輯逐一進行共同邊判斷，直至所有共同邊均處理完成為止。

端點追蹤(Tracing)：當不規則三角網完成前述聚合後，接著剔除虛擬邊緣線。任一群組在剔除虛擬邊緣線後，即可連接真實邊緣線的端點坐標(屋角點)，倘若能構成一個封閉的路徑(即起終點相同)，即完成一組封閉多邊形的建立。反之，該群組無法建立封閉多邊形。以圖 7(a)左上角為例，經過三角形的聚合與剔除虛擬邊緣線後，殘留四條真實邊緣線(分別由 15,1,3 與 2 號屋角點連線組成)，而這四條真實邊緣段確實可以連接成為一組封閉多邊形。

最後，圖 9(f)不同顏色表示不同的封閉多邊形建立成果。

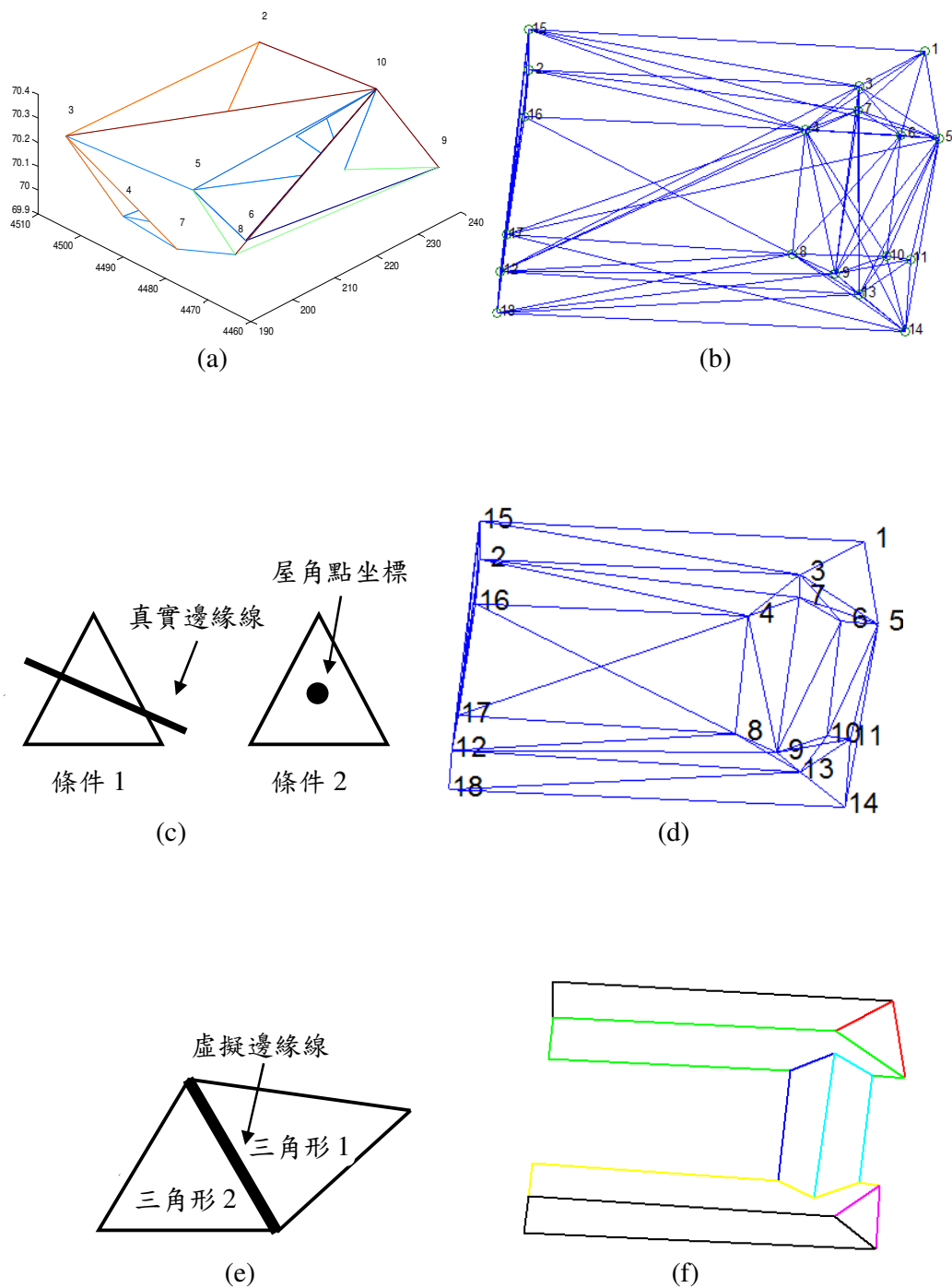


圖 9、多邊形建立演算程序

4.3 方法的限制與失敗的情況

目前演算法為針對邊緣線為直線的建物進行重建，尚不考慮邊緣線為曲線或屋頂面形狀為曲面的建物。除此之外，若房屋各側的三維結構線過短時，代表該線段用來描述該側的房屋邊緣的訊號不夠強烈，因此容易導致重建相鄰線段間位相關係的錯誤。換句話說，線段越短越不可靠，承擔錯誤交會的風險也越大，而位相交會的成功與否取決於三維結構線的可靠性(綜合長度與精度的考量)。

五、改良初始屋頂面模型

改良階段主要乃藉由交會相鄰平面以精化原有經人工或自動量測的近似三維結構線，其程序與任務如下：

(1) 找出位於每個封閉多邊形內的光達離散點(如圖 10(a))，同時考量接近邊緣位置光達點雲產生的錯位效應(Jaw and Chuang, 2008)，剔除部份靠近邊緣線上的光達點位後(如圖 10(b))，接著進行平面擬合計算，並計算離散點到擬合平面垂距殘差的平均值(設定一門檻值)以排除擬合成果不佳的多邊形(表示其非為平面)；(2)將相鄰兩平面進行交會獲得改良後的三維結構線(如式 7 至式 9 所示)，並取代經由人機介面程序獲致之相對應近似三維結構線；(3) 最後，將改良後的三維結構線(位於屋頂面內部)與近似三維結構線(位於屋頂面外緣)再次進行如式(10)之平差計算，以提升模型品質。圖 11 為此階段的演算流程圖。

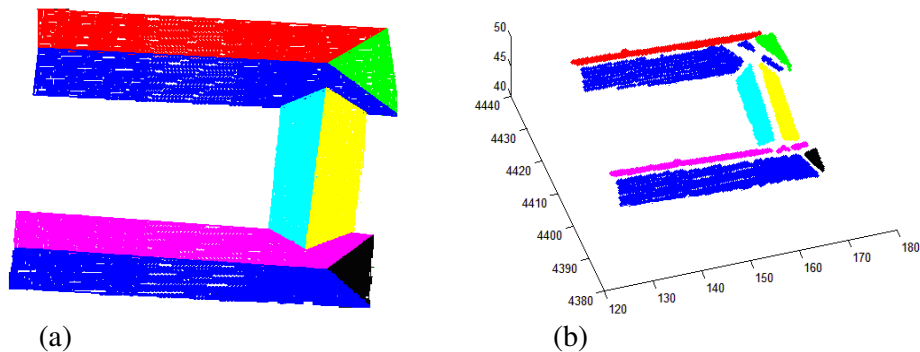


圖 10、光達離散點雲資料擷取

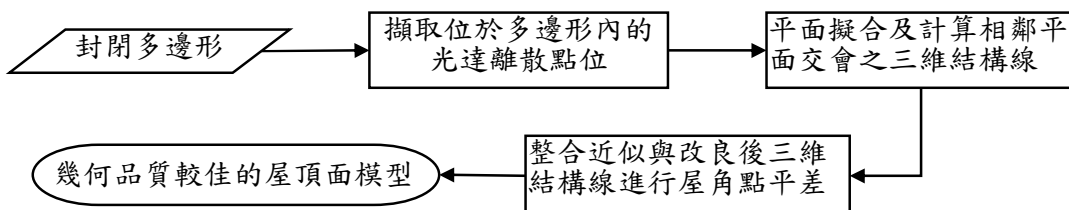


圖 11、改良程序之演算流程圖

六、實驗測試與分析

6.1 實驗區資料

實驗測試區位於成功大學校區內，所使用的空載光達掃描的儀器型號為 ALTM 30/70，測區範圍約為

150m×300m，其中包含了 30 棟不同型態的建物屋頂面，光達點雲平均密度約為 6.42 points/ m^2 。表 2 內容為測試區資料的相關資訊。

表 2、測試區資料的相關資訊

項目	
測區大小	150m×300m
建物數量	30 棟
光達系統	Optech ALTM 30/70
光達點雲密度	6.42 points/m ²
網格化光達點位先驗標準差 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)	(±0.5, ±0.5, ±0.30)m
光達離散點位先驗標準差 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)	(±0.3, ±0.3, ±0.15)m

6.2 模型框架重建成果

圖 12 為測試區的光達離散點雲，圖 13 為初始屋頂面模型框架，測

試區中屋頂面類型包括平屋頂、一般山型屋、複雜山形屋以及連貫型的屋頂面。

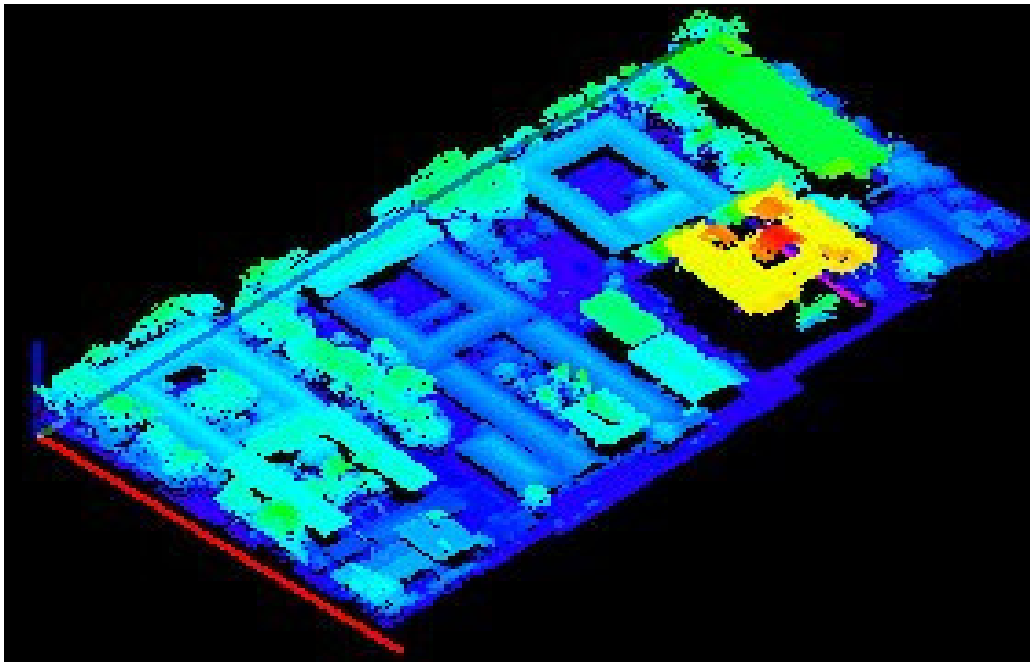


圖 12、測試區的光達離散點雲

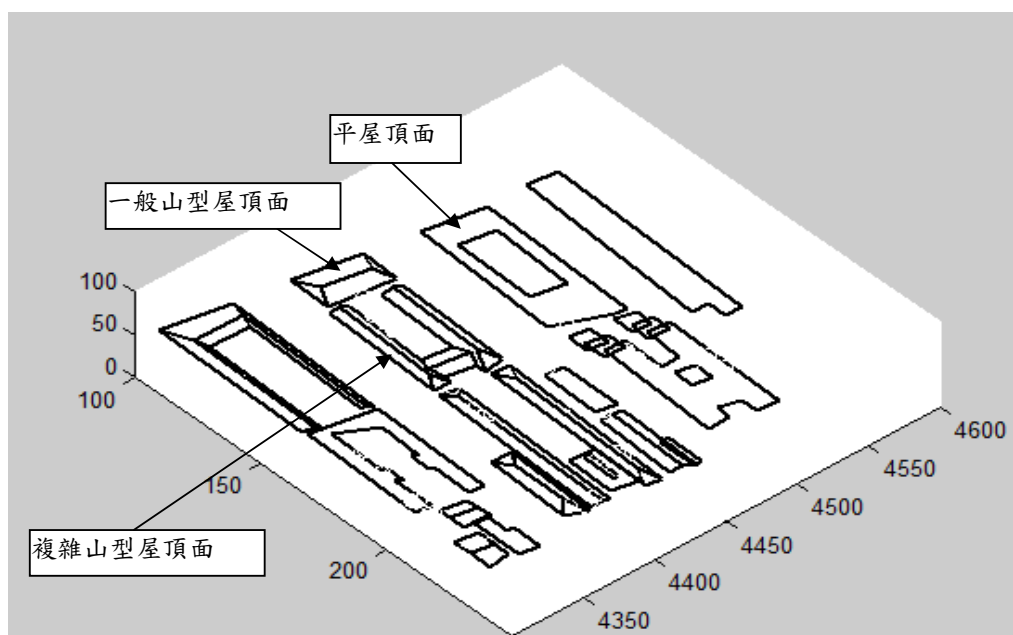


圖 13、初始屋頂面模型框架重建成果

6.3 改良程序測試與分析

以複雜山型屋頂面為例，如圖

14(a)(b)分別表示框架模型以及已建立封閉多邊形後的屋頂面模型。

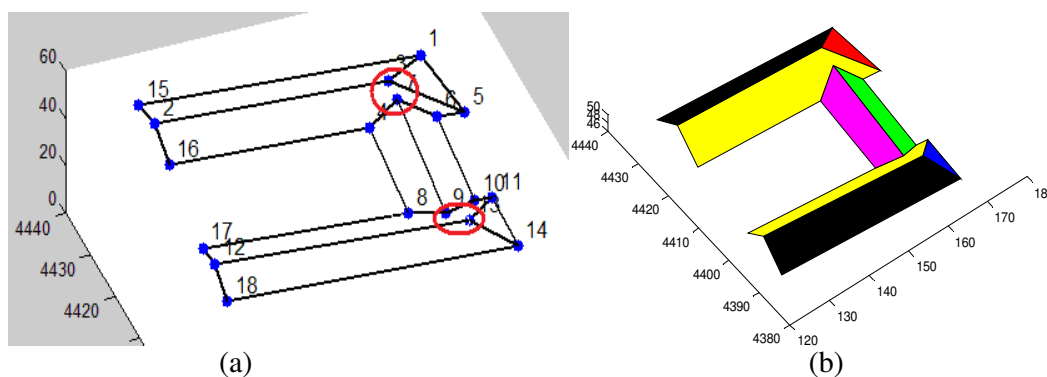


圖 14、改良程序測試案例

經由改良程序的屋角點精度增益 (Gain of efficiency) 可分成以下三種類型(經 3.2 節的方法所計算得到): 內部屋角點、第一類的外部屋角點(與內部屋角點直接相連)與第二類的外部屋角點(與內部屋角點間接相連)。如圖

14(a)紅色框表示位於屋頂面內部屋角點，表 3 數據(標準差取自屋角點坐標平差計算的後驗方差-協方差矩陣相應對角線元素開方)顯示藉由大量的光達離散點所提供的觀測量，可顯著提升內部屋角點的幾何精度。此外，

表 3 也顯示即便是外部屋角點，只要與改良後三維結構線有直接或間接關連，其幾何精度也會提升，但精度提升效益則不如內部屋角點。然而，第二類外部屋角點由於只受到內部屋角點精度提升的間接影響，其本身精度增益並不顯著，例如 17 號屋角點改良前後的僅僅些微差異。圖 14(b)為已建立封閉多邊形(不同色彩表示)的複雜山型屋頂面模型。

表 3、屋角點改良前後標準差(單位：公尺)

屋角點編號	屋角點屬性	$(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$	
		改良前	改良後
3 號屋角點	內部屋角點	$(\pm 0.43, \pm 0.22, \pm 0.18)$	$(\pm 0.14, \pm 0.04, \pm 0.03)$
7 號屋角點	內部屋角點	$(\pm 0.32, \pm 0.21, \pm 0.23)$	$(\pm 0.06, \pm 0.08, \pm 0.04)$
9 號屋角點	內部屋角點	$(\pm 0.37, \pm 0.26, \pm 0.41)$	$(\pm 0.05, \pm 0.10, \pm 0.05)$
13 號屋角點	內部屋角點	$(\pm 0.40, \pm 0.23, \pm 0.19)$	$(\pm 0.15, \pm 0.07, \pm 0.06)$
11 號屋角點	第一類外部屋角點	$(\pm 0.40, \pm 0.38, \pm 0.12)$	$(\pm 0.28, \pm 0.22, \pm 0.10)$
8 號屋角點	第一類外部屋角點	$(\pm 0.41, \pm 0.25, \pm 0.21)$	$(\pm 0.28, \pm 0.20, \pm 0.16)$
17 號屋角點	第二類外部屋角點	$(\pm 0.49, \pm 0.47, \pm 0.29)$	$(\pm 0.49, \pm 0.47, \pm 0.28)$
16 號屋角點	第二類外部屋角點	$(\pm 0.48, \pm 0.49, \pm 0.41)$	$(\pm 0.48, \pm 0.49, \pm 0.39)$

圖 15 為測試區經本作業平台重建後之屋頂面模型。

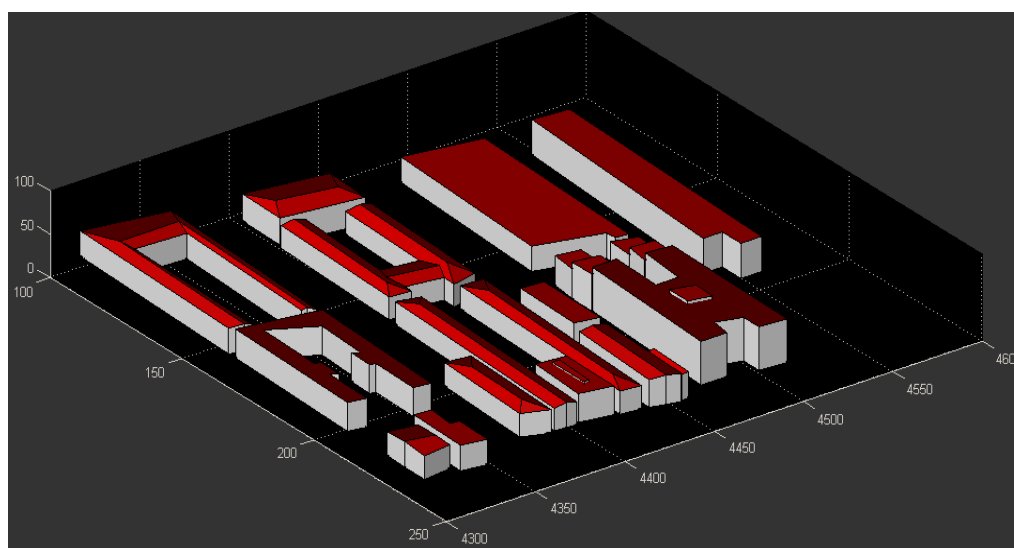


圖 15、經過本作業平台所重建的屋頂面模型

七、結論與後續研究工作

本文提出一套純由光遠點雲資料進行屋頂面模型重建的半自動化演算策略及組成操作平台，根據不同的階段所歸納的具體研究工作如下：所發展的半自動化三維結構線萃取介

面能獲得可靠但幾何品質不佳的近似三維結構線。

建構-成型演算程序具備重建平頂屋、斜頂屋或山型屋(含複雜型)等不同種類之初始屋頂面模型框架以及建立封閉多邊形的能力。

改良演算程序藉由獲得位於多邊形內的離散光達點雲、進行平面擬合、交會直線和第二次屋頂面重建等程序，可確實改良屋頂面角點的幾何精度。然而，若欲顯著提升第二類外部屋角點精度，則須引入來自空載光達(一般而言此種點位非常稀疏)或地面光達點雲資料，或融合其他互補性的資料(如航空影像或三維地形圖資等)，以提升屋頂面重建的品質與可靠度。後續研究工作可分以下三方面繼續發展：(1)目前在三維結構線的萃取上採用半自動化的方式進行，為了能提升自動化的層次，應擴展能兼顧可靠性與精度的三維結構線萃取方式；(2)將此作業平台引入目前正在發展具融合功能的 CSR 演算法中(趙鍵哲、鄭傑中，2007)，以多圖資融合方式增加屋頂面重建作業的便利性及可靠度；(3)擴展屋頂面重建演算法以重建無法以平面特徵表示的屋頂面模型(如曲面或球面等)，或是無法以直線特徵表示的屋頂面模型(如圓形的建物)。

參考文獻

邱式鴻，2004，利用資料蒐評法自動萃取空載光達資料中的屋頂面資訊，地籍測量學刊，第二十三卷第 4 期，第 1-24 頁，中華民國九十三年十二月。

張智安、陳良健，2005，利用光達資料模塑建物之研究，航測及遙測學刊，第十一卷，第二期，175-189 頁。

趙鍵哲、鄭傑中，2007，使用 CSR 演算法重建屋頂面模型，航測及遙測學刊，第十二卷，第四期，457-478 頁。

羅英哲，2008。從光達點雲資料重建面特

徵，國立成功大學測量與空間資訊學系碩士論文，台南，85 頁。

Arefi, H., Engels, J., Hahn, M., and Mayer, H., 2008. Levels of Detail in 3D Building Reconstruction From LiDAR Data. Proceedings of ISPRS Conference, Beijing, 3-11 July. (on CD-ROM).

Ahlberg, S., Soderman, U., Elmqvist, M., and Persson, A., 2004. On modeling and visualization of high resolution virtual environments using lidar data. In Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics, pp. 299-306.

Brenner, C., 2005. Building Reconstruction From Images and Laser Scanning. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6(3-4):187-198.

Chen, L.C., Teo, T.A., Kuo, C.Y., and Rau, J.Y., 2008, Shaping Polyhedral Buildings by the Fusion of Vector Maps and LIDAR Point Clouds, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74(5):1147-1157.

Cormen, T. H., C. H. Leiserson, and R. L. Rivest, 1990. Introduction to Algorithms, first edition, MIT Press and McGraw-Hill, pp.558-565.

Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:679-714.

Forlani G. C, Nardinocchi., M, Scaioni., P. Zingaretti., 2006. Building Reconstruction and Visualization From LiDAR Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and

- Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12.
- Hough, P. V. C., 1962. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Patent No. 3,069,654.
- Jaw, J.J., and Chuang, T.Y., 2008, Registration of Ground-based LIDAR Point Clouds by Means of 3D Line Features, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 31(6):1031-1045.
- Lafarge, F., Descombes, X., Zerubia, J. and Pierrot-Deseilligny, M., 2008. Automatic Building Extraction from DEMs using an Object Approach and Application to the 3D-city Modeling, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 63:365-381.
- Lin, S. H., and J. J. Jaw, 2004. Structuralization of LIDAR Point Cloud, 25th ACRS, Chiang Mai, Thailand, Vol I, pp. 102-107.
- Rottensteiner, F., 2003, Automatic Generation of High-Quality Building Models From LiDAR data, IEEE Computer Graphics and Applications, 23(6):42-50.
- Rau, J. Y., and Chen, L. C., 2003. Robust Reconstruction of Building Models from Three-Dimensional Line Segments. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(2):181-188.
- Schwalbe, E., 2004. 3D Building Model Generation From Airborne Laser Scanner Data by Straight Line Detection in Specific Orthogonal Projections, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 35, Part B3, pp. 249-254.
- Sohn, G., X. Huang and V., Tao, 2008. Using a Binary Space Partitioning Tree for Reconstructing Polyhedral Building Models from Airborne Lidar Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74(11):1425-1438.
- Tovari, D., and Vogtle, T., 2004. Classification methods for 3D objects in laser scanning data, IAPRS, Vol. XXXV (B3), pp.408-413.
- Verma, V., Rakesh, K., Stephen, H., 2006. 3D Building Detection and Modeling From Aerial LiDAR Data. Proceeding of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06).
- Wang, C.Y. and Zhao, Z.M., 2008. Building Reconstruction From LiDAR Data. Proceedings of ISPRS Conference, Beijing, 3-11 July. (on CD-ROM).