

使用 CSR 演算法重建屋頂面模型

趙鍵哲¹ 鄭傑中²

摘要

本文設計一套利用三維結構線重建屋頂面模型之幾何推論演算法，目標除了探討從不同資料來源所提供的三維結構線中建立初始屋頂面模型的可行性外，也融合三維結構線與航攝影像直線特徵以提升屋頂面模型的品質。演算法分為建構-成型-改良(Construct-Shape-Refine, CSR)三個幾何推論(Geometric Inference)之程序。首先建構為建立屬於同一個屋頂面之三維結構線間的位相關係。而成型則將每個屋頂面上之可視三維結構線進行平差計算以獲得三維屋角點坐標與理論精度，並考量相鄰較低樓層的邊緣線易受遮蔽影響，利用最短路徑(Shortest Path)的概念以相鄰之高度較高的建物邊緣線補償受遮蔽的邊緣線，並建立屋頂面間之空間位相關係以及組成此一階段之屋頂面模型物件。在改良階段則考慮若能在相同的實驗區內獲得其它圖資(如：航空影像、地形圖與光達資料)，此時可進行資料融合以提升屋頂面模型的品質。實驗結果顯示，建構-成型兩步驟能從不同資料來源所得到的三維結構線中重建初始屋頂面模型。而在改良的階段中，除了可處理同為三維結構線圖資之融合作業以提升屋頂面模型幾何品質外，特別是當融合三維結構線與航攝影像圖資時，使用三維結構線確實有助於影像中建物邊緣線之辨識，而利用平差程序處理三維結構線與航測經由前方交會所得到的三維屋頂面邊緣線，能獲致平面與高程精度增益的融合成果。

關鍵詞：位相關係、幾何推論、融合、屋頂面重建

1. 前言

三維城市模型(3D City Model)是近年來相當熱門的研究課題，城市模型主要包含建物、道路、樹木等。由於建物與都市計畫，市政管理，房地產管理等民生用途息息相關，因此發展城市模型的首要任務為建立三維房屋模型，而航測為大範圍房屋測繪所採行之方法，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，此種方式在完全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，點特徵相對於其它特徵(例如線特徵及面特徵)而言是相對難以確認及定義的。反觀直線特徵，其出現往往代表物空間的物件邊緣線，由於直線特徵相較於點特徵

具有更高階資訊，在自動化萃取、匹配的作業與處理屋角點遮蔽的問題上皆有其優勢(Zhou and Li,2001; Rau and Chen, 2003; Habib et al., 2005)。除此之外，從資料的來源來看，直線特徵可由多種圖資來生產(例如影像、地形圖、光達點雲等)，為適合實施資料融合的特徵，其中尤以空載光達點雲資料為進行建物重建深具潛力者。一般而言，空載光達系統所產製之點雲資料其高程坐標精度優於平面坐標精度，並具有描述面狀特徵的優勢，透過特徵萃取程序能進一步推演三維直線特徵及角點特徵(Lin and Jaw,2004)。然而由於取樣問題及離散特性，從空載光達點雲資料所獲致之房屋邊緣線常具有外擴與內縮(王匯智, 2007)的問題，在未引入其它圖資修補之前常只能作為近似值看待(Schenk

¹ 國立臺灣大學土木工程學系副教授

² 國立臺灣大學土木工程學系博士班研究生

and Csatho,2002)。反之，航攝影像資料相對於空載光達點雲資料具有較高空間及輻射解析力，呈現於影像中的邊緣線特徵藉由偵測運算元，能有效及精確的提供邊緣線特徵，但通常也會伴隨著許多無意義的線條，故必須進一步篩選才能獲得正確的建物邊緣線，雖然如此，受限於航攝基線航高比幾何，藉由航測方法所產製房屋邊緣線以及角點在高程坐標的精度是低於平面坐標精度的。有鑑於前述使用單一資料進行建物重建的缺陷，若能整合同類型(例如同為三維結構線)但不同生產單位或不同生產時間之圖資或具互補性的資料(如光達與影像)，其融合效果可優於任一資料來源所獲致的成果(Schenk and Csatho,2002；Seo,2003)。

就三維屋頂面模型重建而言，考量直線特徵與資料融合的優點，本研究設計一套以三維結構線為基礎之屋頂面重建策略，分為建構-成型-改良(Construct-Shape-Refine, CSR)三階段。首先在建構-成型兩階段藉由三維結構線(可由光達點雲、三維地形圖或其它圖資而來)重建初始屋頂面模型，在改良階段當考量圖資之間的互補性(例如光達點雲與航攝影像)，則融合三維結構線與航攝影像直線，能提升僅使用單一資料所得到的重建成果且展現來自於各別資料的最佳高程精度及平面精度；而若融合的圖資同屬三維結構線者(例如來自光達點雲萃取與三維向量地形圖資)，則融合效果猶如進行重覆觀測(不必要為等權)，能提升房屋模型精度及可靠度。歸結以上論述，本文主要探討的任務有二：

(1) 分析建構-成型兩步驟是否能有效的從不同來源(如：光達或三維地形圖資)所獲得的三維結構線中重建不同型態的初始屋頂面模型；

(2) 在改良的階段中，則考量以下兩種圖資處理以提升屋頂面模型品質：

(a) 若引入不同三維結構線圖資，則進行三維結構線融合。

(b) 若引入三維結構線及影像圖資，則利用三維結構線協助影像直線之篩選及前交，並仿上進行三維結構線融合。

2. 相關研究

藉由航攝影像或光達點雲資料實施建物重建，在策略上可分為兩種方式，分別為資料導向(Data-driven)與模型導向(Model-driven)。資料導向法為由下而上(Bottom-up)的方式，首先於萃取出三維點特徵、線特徵或是面特徵後，再以邏輯驗證將特徵組合為建物模型(Brenner,2005; Rottensteiner,2003; Schenk and Csatho,2002; Ameri,2000)。就所量測之特徵而言，建物模型組合可採三維點特徵為基礎(3D point-based)、三維直線特徵為基礎(3D line-based)或三維面特徵為基礎(3D plane-based)的重建方式。以三維點特徵為基礎者，目前則以瑞士 ETH 機構所發展出來的 Cyber-City-Modeler(CCM)最具代表性(Gruen and Wang,2001)，其方法已經發展為商用軟體。該演算法的核心技術為建立三維點特徵間的位相關係，首先將點特徵根據位置分為內部點與外部點，之後建立點位間的位相關係，雖然內部點位的資料順序可以任意，但在外部點仍需按照順時針或逆時針的方式採集，且需要人工預測被遮蔽的屋角點，因此在重建的過程中仍免不了相當程度的人工介入。相較於 Cyber-City-Modeler 以點特徵為基礎的重建方式，Rau and Chen(2003)所提分割-合併-成型(Split-Merge-Shape)演算法為以滴水線為出發點使用三維結構線重建房屋模型。該方法的優點為不受遮蔽的影響，可快速建立三維結構線間的位相關係，並重建稠密區的屋頂面模型。然而該方法為使用多面體模型(Polyhedral)表示建物，缺乏建物外型的語意資訊(Semantic information)，對於建物屋頂面上有高樓的部分，仍需由人工決定是否需要保留或刪除。Scholize(2002)將自影像所得到的三維結構線視為重建的外部輸入資料，將三維結構線組合為平面單元(patch)後，再將平面單元組合為屋頂面模型，在給予屋頂面上結構線的屬性(如屋脊線等)與判斷屋頂面的形狀後，補償影像邊緣偵測不理想導致邊緣線遺失的部分，最後再倒投影到影像上進行對應以修正屋頂面模型。由於建物種類的多樣性，有時會出現邊緣為圓弧型的建物，故除了以直線特

徵進行重建外，也有研究利用多組的短線段來表示圓弧邊緣，以重建此類型的建物屋頂(Chen et al.,2006)。除了應用點與直線特徵外，也有相關研究使用從光達點雲萃取三維面特徵，並以圖形資料結構(Graph)的概念建立彼此間的位相關係，進而組成建物模型(Seo,2003; Ameri,2000; Peternell and Steiner,2004)。相較於前述之資料導向法，模型導向法則需先建立一套模型資料庫，並將所預測或假設之建物模型倒投影到影像上與邊緣線像元進行比對，以決定建物模型的參數(王聖鐸，2005；Suveg and Vosselman,2004; Lang and Foerstner,1996)。此種方法的優點在於模型定義很明確，對於資料的容錯度高，且也容易賦予屋頂面模型屬性資訊；缺點則是需要建立各式各樣的建物模型資料，且不易設計高度自動化的作業程序。有鑑於上述兩種重建策略各有優缺點，本文所設計方法及工作流程希望能發揮資料導向(能具彈性地重建各種形狀建物)與模型導向(易賦予屋頂面屬性)之便。因此，本工作具體目標描述如下：

(a) 不限定屋頂面模型的形狀，即不需要事先定義屋頂面模型資料庫。(b) 以屋角點坐標與三維結構線間的位相關係來表示建物模型。(c) 根據資料的品質以誤差傳播推導工作流程所涉及之各項門檻值。(d) 在建構-成型兩步驟後獲得屋頂面物件間之資訊，例如物件間的位相關係，以提供作為未來人工賦予屋頂面模型屬性的額外資訊。(e) 經由平差程序的處理，可獲得每個屋頂面模型的屋角點坐標與理論精度，並藉由資料融合提升屋頂面角點精度。

3. 建構-成型-改良 (Construct-Shape-Refine)

3.1 三維結構線與影像直線 特徵萃取

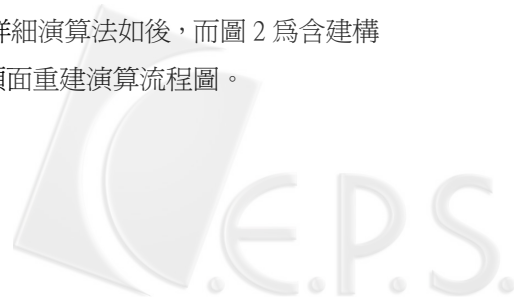
屋頂面三維結構線的來源可由空載光達點雲資料、影像資料、三維地形圖或其它圖資而得，若

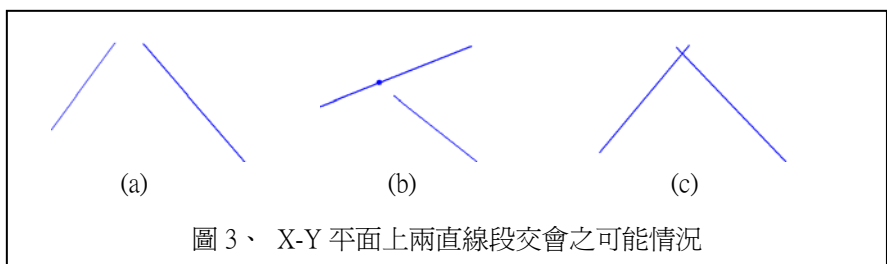
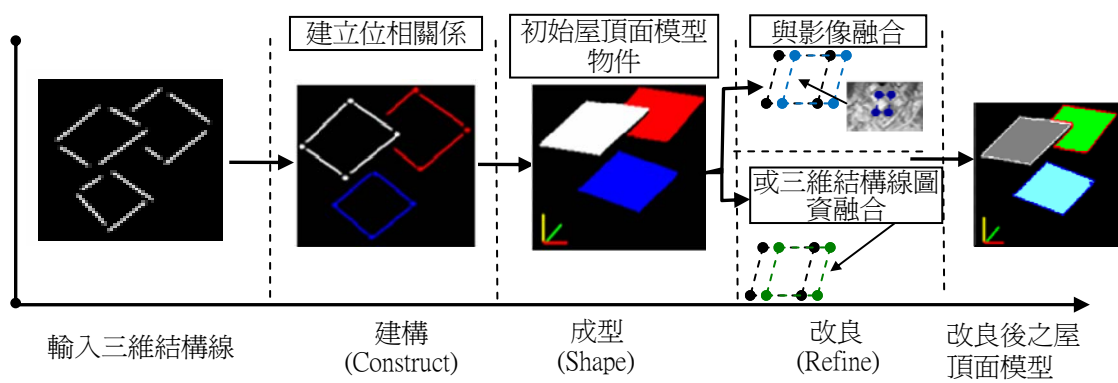
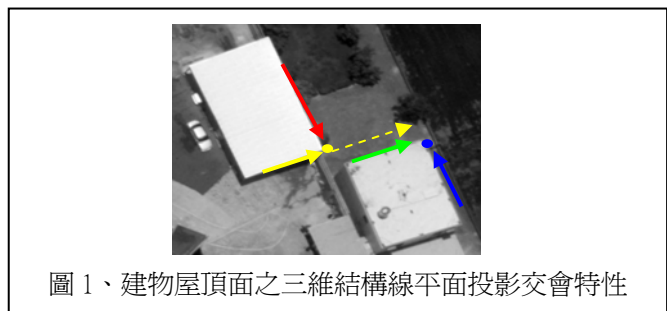
採用空載光達點雲資料生產三維結構線，可利用影像處理方式在光達點雲資料經內插網格化後所產生之距離影像(Range Image)中偵測邊緣線或利用結構化(Structuralization)處理原始離散資料以偵測面狀特徵，再由相鄰面狀特徵產生交線(Lin and Jaw,2004)。此外，藉由在兩張(或多張)重疊影像中萃取共軛直線特徵後，進行前方交會則可獲得三維結構線(鄭傑中，2006)。三維地形向量圖資則含有大量線型特徵，可直接自向量圖檔中擷取房屋所屬線型特徵供作三維結構線。

本研究著重在屋頂面重建與品質提升的演算法設計上，因此將三維結構線產製視為另一課題。在實驗測試以空載光達資料獲致三維結構線時，則採取最簡易之影像處理邊緣線偵測方式產製房屋三維結構線。同樣地，影像直線特徵也利用邊緣線偵測獲得邊緣線像元後，再擷取直線段兩端點而得。

3.2 概念與演算流程

由於建物屋頂面形狀的多樣性，因此當欲以自動化方式利用三維結構線重建屋頂面模型時，首先必須建立三維結構線間的位相關係。由於在三維空間中的位相判斷複雜，再加上三維結構線量測或偵測結果的不完整性以及所附帶的隨機誤差，倘欲直接藉由三維結構線建構位相關係實屬不易之任務。從觀察屋頂面上的三維結構線可發現：若將三維結構線投影到水平面上(即 X-Y 平面)時，相鄰結構線具有一次交會的特性，亦即當任意一條三維結構線向前延伸時，若與其他結構線交會，則此線條將會停止延伸。因此不論任何複雜的建物屋頂面，其三維結構線並不會無窮的延伸與交會，而將滿足上述建物特性。如圖 1 所示，當黃色線條與紅色線條交會時，則停止延伸，而並不會繼續延伸(黃色虛線)至與藍色線條交會。本研究工作建構三維結構線間之位相關係即根據上述建物屋頂面直線交會特性而設計，詳細演算法如後，而圖 2 為含建構-成型-改良的屋頂面重建演算流程圖。





3.3 建構 (Construct)

目的為建立每個屋頂面上三維結構線間的位相關係，以下分三個階段說明。

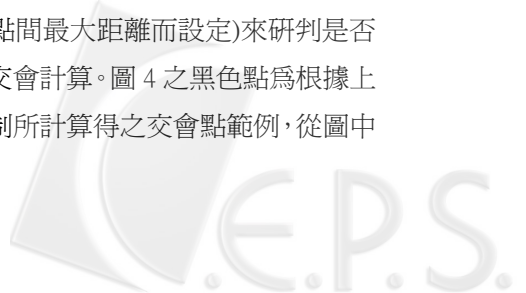
3.3.1 推論合理之交會點坐標

將所有三維結構線投影到 X-Y 平面上可進行交會計算而獲得多組的交會點(Junction points)坐標，但在這當中僅有部份的交會點為由相鄰結構線所交會得到的合理交會點，即為實際屋角點。因此，若能在 X-Y 平面上獲得合理的交會點坐標，表示即能在該平面上獲得正確的房屋邊緣線交會。考量平面上任意兩直線的交會不外乎如圖 3 所示之三種情況：(a)交會點位於兩直線段延伸線上；

(b)交會點位於其中一直線段內部；(c)交會點位於兩直線段內部。以下分三部份闡述有關之幾何推論的演算流程、各階段的判斷條件、可能造成誤判的情況及其處理方式。

3.3.1.1 演算法流程

理論上，平面上兩互相不平行之直線必有交點，然而屋角點應來自相鄰結構線之交會，為減少產生非屋角點之交會點數量，可先利用線段間之角度門檻(根據資料品質以誤差傳播推得，若計算所得之角度小於門檻值表示交會角度不顯著，則兩直線視為互相平行)及距離門檻(為粗略門檻值，根據相鄰邊緣線段端點間最大距離而設定)來研判是否進行該對線段之交會計算。圖 4 之黑色點為根據上述角度及距離限制所計算得之交會點範例，從圖中



可看出此階段之交會點除了實際屋角點以外仍參雜其它非屋角點，為進一步確認實際屋角點，首先在演算法中稱正在處理的三維結構線為 “Target line”，而其他與其交會的線條稱為 “Searching line”，且每條 Target line 在線段兩端延伸方向上都應獲得一個合理的交會點。圖 5 為演算流程與虛擬程式碼(pseudo code)，推論程序分三個階段進行，首先，第一階段包含三個條件，目的在未考量隨機誤差的影響下，以 3.2 節所提出的概念確實能可靠的獲得合理的交會點坐標，如圖 6(d)(e)黑色點所示。但實際情況中，由於三維結構線的不完整性，僅以第一階段判斷並無法完全獲得所有屋頂面上相鄰結構線之交會點，因此在第二階段考量空間圖資既有的誤差，以 Target line 與 Searching line 第一個交會點(距離該線段端點最近的交會點)的精度設定距離門檻值，保留落在此門檻值內(模糊地帶)的屋角點，以便過濾不合理的交會點。由於實際情況中，對於過於靠近的不同房屋(例如防火巷

兩旁房屋)僅以上述兩階段判斷並無法有效獲得合理的交會點，故所屬三維結構線各端點延伸方向上仍可能殘留兩個以上的交會點。因此，第三階段判斷的目的即為處理第二階段所殘留的問題，而通過此階段的交會點均被認定為合理的交會點。簡言之，若能滿足第一階段所設定的任一條件，或經過第二階段條件篩選後該直線在一端延伸方向上剩下唯一交點時，則已獲得合理的交會點。其餘未獲確認的交會點則進行第三階段的檢驗。

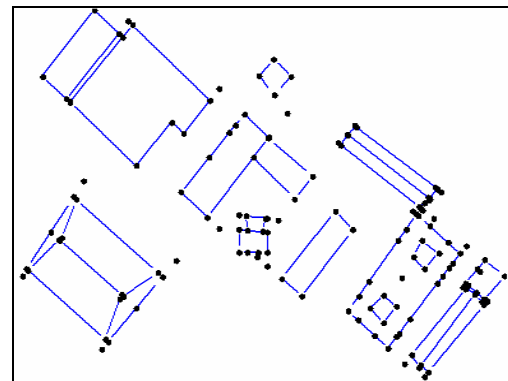


圖 4、由投影至平面之結構線所計算之多組交會點(經粗略角度及距離門檻)

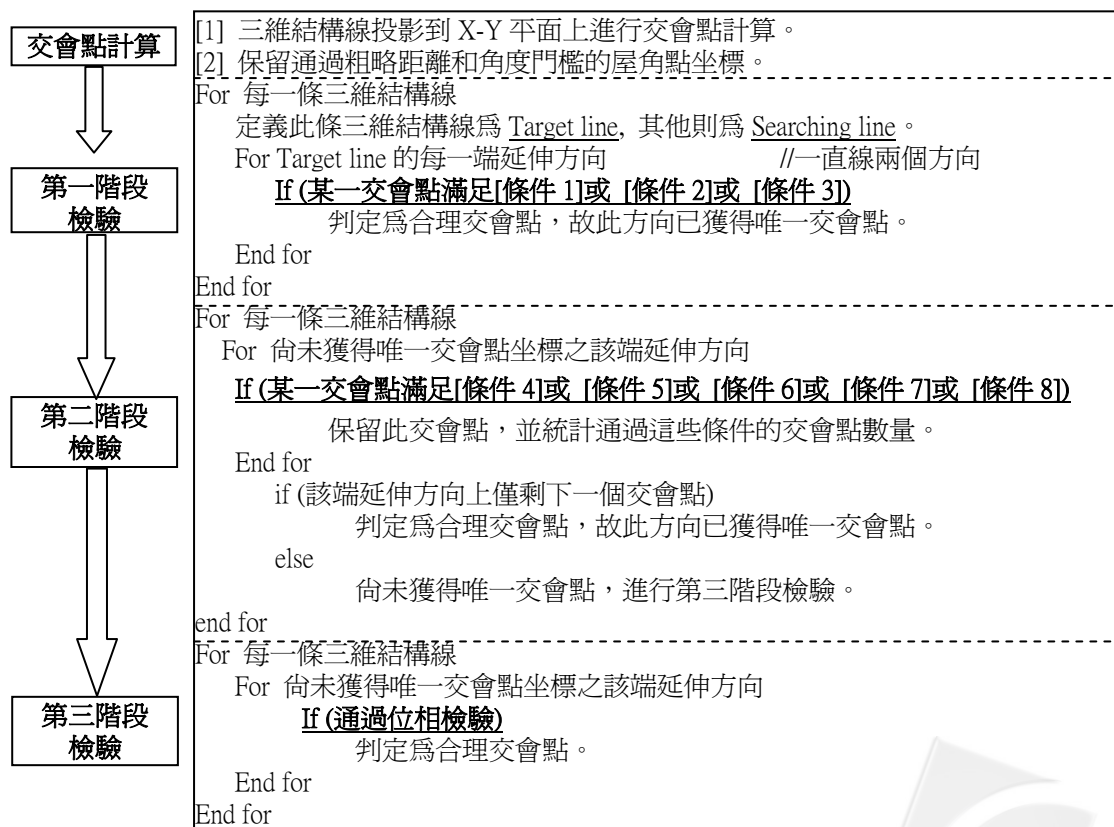


圖 5、推論合理交會點坐標之演算流程與虛擬程式碼

3.3.1.2 各階段之判斷條件說明

■ 第一階段

[條件 1]: 若某一交會點距離 Target line 的端點為最近點, 且也為 Searching line 的最近點時, 則確認為合理屋角點, 如圖 6(a)紅色交會點所示(藍色線條 L_1 為 Target line, 黑色線條 L_2 為 Searching line)。[條件 2]: 當某一交會點距離 Target line 的端點為最近點, 且又位於 Searching line 的內部, 此時確認為合理屋角點, 如圖 6(b)。[條件 3]: 當此交會點為 Target line 的最近點, 且又分別位於兩

相鄰交會線的內部時, 如圖 6(c)所示, 此時確認為合理屋角點。圖 6(d) 黑色點為以三維地形圖資作為三維結構線的資料來源所得到的測試成果, 由於三維地形圖資所提供的線型特徵為以節點來表示線段的端點, 因此每一三維結構線段能可靠的描述該側房屋邊緣線, 故顯示此演算邏輯能可靠獲得合理的交會點坐標(黑色點)。圖 6(e)說明由於三維結構線段的不完整, 僅以本階段的演算邏輯並無法獲得此測試區內所有的合理交會點坐標。

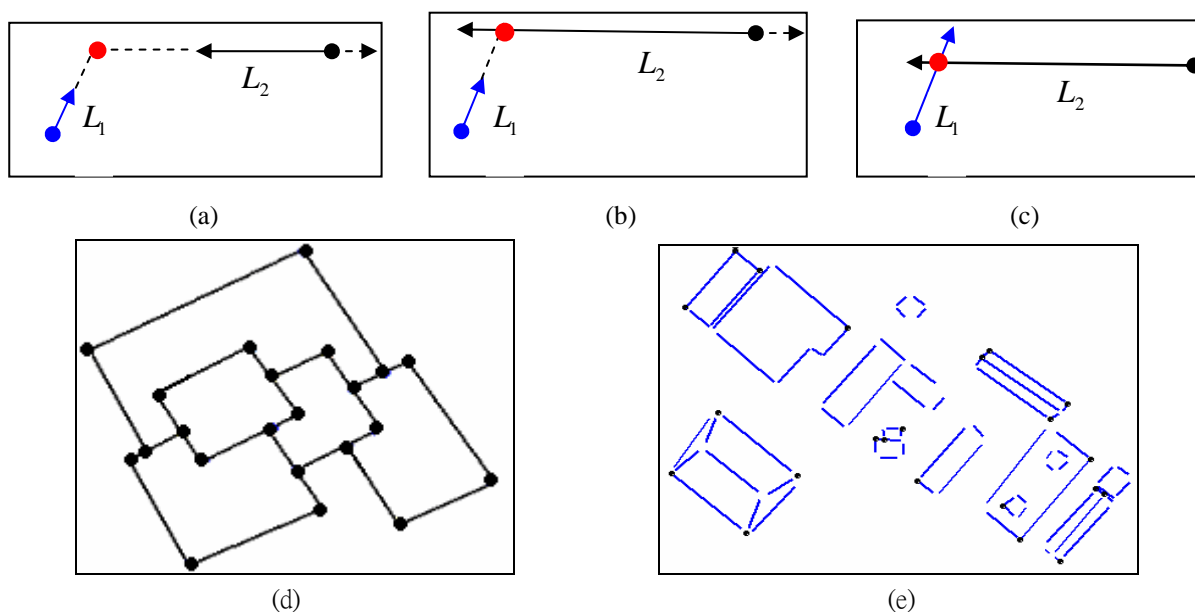


圖 6、第一階段合理交會點確認之示例

■ 第二階段

此階段主要針對距離做檢驗, 考量合理的交會點可能位於線段的內部或外部, 故又分為內部距離檢驗與外部距離檢驗。首先, 內部距離檢驗包含如下兩個條件:

[條件 4]: 由 Target line 的端點根據端點位置誤差(例如兩倍端點坐標中誤差)開設一位置區間(如圖 7(a)中藍色虛線, 視之為距離門檻), 以考量合理交會點位於 Target line 內部之情況。若一交會點位於端點區間內且又和 Searching line 之第一個交會點(即圖 7(a)的綠色點)的距離也小於距離門檻值(圖 7(a)中綠色虛線), 則保留之; [條件 5]: 亦或位於 Searching line 線條的內部, 如圖 7(b)。當交會點不在此端點區間內, 則認定其不可能為 Target line 在

該端延伸方向上的交會點, 故忽略之, 以待當 L_2 作為 Target line 時再進行檢驗, 如圖 7(c)紅色點。

相較於上述條件, 外部距離檢驗為確認可能位於 Target line 端點向外延伸方向上的交會點, 故若某交會點與 Target line 第一個交會點的距離小於距離門檻值, 且又滿足任意以下三個條件, 則判斷為合理的交會點, 條件說明如下:

[條件 6]: 和 Searching line 之第一個交會點的距離也小於距離門檻值; [條件 7]: 或也為 Searching line 之第一個交會點; [條件 8]: 或又位於 Searching line 的內部時。

例如: 圖 7(d)紅色點位於 Target line 第一個交會點(紫色點)的距離區間(橘色虛線)且位於

Searching line 第一個交會點(綠色點)所設定的距離區間內(藍色虛線)；而如圖 7(e)紅色點位於 Target line 第一個交會點(紫色點)的距離區間內且也位於 Searching line 的內部，故此紅色點將被視為合理的交會點。因此，當某一交會點雖和 Target line 第一個交會點的距離小於距離門檻值，但與 Searching line 之第一個交會點的距離超過距離門檻值，則此

交會點將被剔除，如圖 7(f)所示，紅色交會點與 Searching line 第一個交會點(綠色點)的距離超過距離門檻值(藍色虛線)，故將被刪除。此時，Target line 在此延伸方向上將繼續檢查位於其第一個交會點所設之距離區間(橘色虛線)內的紫色點，而位於距離區間外之線段延伸方向上的點(如：黃色點)將不列入檢驗。

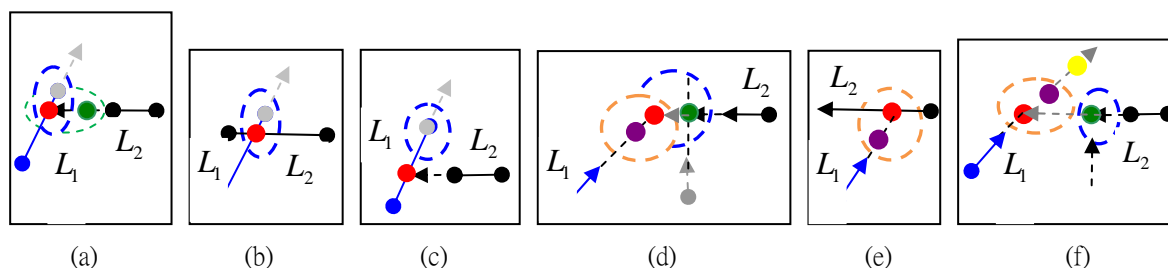


圖 7、Target line 內外部交會點檢驗邏輯示意圖

第三階段

又稱為位相檢驗，其目的為處理建物間距離窄小的情況，如圖 8 所示，所屬三維結構線各端點延伸方向上仍殘留兩個以上的交會點(經第一及第二階段判斷後)。演算概念為檢驗 Searching line 與 Target line 所組成的區域是否含有其他三維結構線。以下以兩棟相鄰建物為例(如圖 9(a))，說明位相檢驗的演算邏輯。圖 9(a)中 Target line 在一方向上經過前面階段的篩選後，尚殘留紅色與藍色之交會點，為了確認唯一的交會點，必須選出一組最佳的交會組。首先，藉由 Target line 與 Searching line 線條的中點分別代入對方的直線方程之函式 ($ax+by+1$)中可得到彼此間的位相關係以建立位相比對樣板(pattern)，如表 1 所示，表中第一欄的符號為將 Target line 中點坐標代入 Searching line 的直線方程函式中(假設所得數值大於零，故設定為+)，同樣第二欄也設定為+。之後，為比對 Target line 與 1 號 Searching line 之交會點的合理性，挑出在

Target line 一端延伸方向上所有與其可能交會的 Searching line，如圖 9 中的 2 號線，將其中點坐標按照順序代入 1 號 Searching line 與 Target line 的直線方程之函式中，以獲得一組位相資料。同理，為判斷 Target line 與 2 號 Searching line 之交會組合的合理性，將 1 號 Searching line 的中點坐標按照同樣順序代入前兩者之直線方程之函式中，經判斷若有任一組位相資料與樣板(表 1)相同時，表示三維結構線位於此區域內，此時違背了三維結構線在平面上交會的特性，故構成此區域對應之交會點不合理，也就是其對應之 Searching line 應被排除。如圖 9(b)中的 1 號 Searching line 位於 Target line 與 2 號 Searching line 所組成的灰色區域內，可知 Target line 與 2 號 Searching line 為不合理的交會。

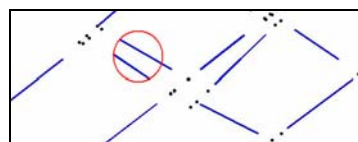
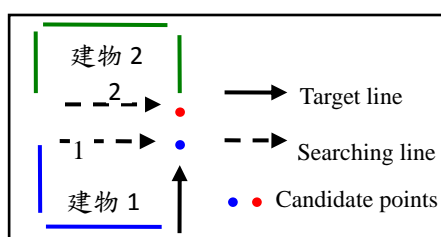
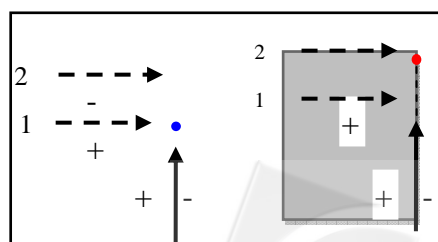


圖 8、可能存在防火巷的相鄰建物



(a)



(b)

圖 9、兩棟相鄰建物之處理示意圖

表 1、建立位相比對樣板說明

結構線間位相關係	Target line 的中點對於 Searching line 的位相關係 設為+	Searching line 的中點對 Target line 的位相關係 設為+
----------	---	--

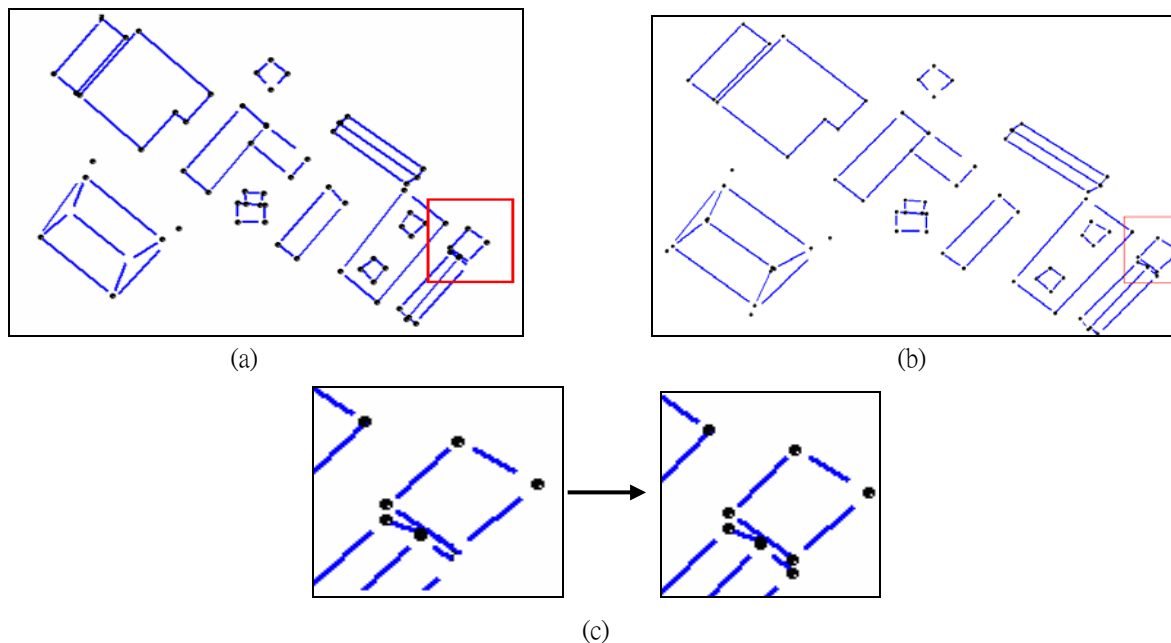


圖 10、獲得合理的交會點坐標

圖 10(a)為圖 4 經由第一及第二階段篩選程序的結果，空間分離度足夠的房屋，其相對應的三維結構線均能確認線段兩端唯一的交會點，而未產生的交會點(如左邊山型屋脊之兩三岔點)表示該邊線在此延伸方向上存在著兩個以上的交會點；圖 10(b)為圖 10(a)再經過位相檢查後的成果，而圖 10(c)則為展示圖 10(a)(b)紅色框中原交會點仍具問題的成果(圖 10(c)左圖)再經位相檢驗修正後的成果(圖 10(c)右圖)。由圖 10 中黑色交會點可看出篩選結果的合理性，且此方法亦展現具有有效確認鄰近建物交會點的能力。惟圖 10(a)及(b)左下端山型屋頂面之多重屋角點乃來自不同三維結構線對之交會，均為經前述篩選程序所判定之合理交會點，藉助 3.4 節之平差程序可獲致唯一之角點。

3.3.1.3 可能誤判的情況

另外，舉圖 7(f)之例說明當三維結構線太短時(即表示無法很可靠地以此線段來代表此側屋頂邊緣線)，則可能無法獲得合理的交會點，如藍色線條之第一個交會點為紅色點，但紅色點是錯誤的交

會點，此時根據前述的邏輯判斷，只會保留位於有限大小之距離區間內的交會點(如紫色點)以便再與 Searching line 進行檢驗，但實際正確的交會點(如：黃色點)卻落在此距離區間外時，此時無法獲得正確的線條交會，故導致位相建立失敗。而此現象顯示，線段越短表示其資料越不可靠，因此承擔錯誤交會的風險也越大；故位相建立的成功與否完全取決於三維結構線的可靠性(包含長度以及精度之綜合考量)，若能取得與圖 6(d)相近的圖資品質，則以此演算邏輯能可靠地獲得合理的交會點坐標。

3.3.2 萃取出屬於每棟建物屋頂面之三維結構線

藉由三維結構線的高程值與交會點(由前述程序獲致)，將可分類出屬於每個屋頂面的三維結構線，方法如下：

(a) 首先將三維結構線根據線段端點高差分類為水平面結構線(以下簡稱平結構線)與斜平面結構線(以下簡稱斜結構線)，之後，由於斜結構線的

中點高度並無法合理的代表該線段的高程，故在高程值的群聚分析(Cluster analysis)上僅以平結構線根據線段中點的高度為考量依據，在分群後同一群(表高程值相近)的三維結構線不一定屬於同一屋頂面，而不同群的則也有可能屬於同一個屋頂面(如山型屋頂面)，因此僅採用高程資料並不足以根據分群結果完成確認每個屋頂面上的三維結構線。如圖 11(a)所示，紅色線條在高度上屬於同一群組，但實際上卻是不屬於同一個屋頂面上的三維

結構線；(b)承上，由於三維結構線已分為兩類(平結構線與斜結構線)，因此逐一將此兩類結構線藉由交會點進行連結(Connection)。首先，將平結構線進行連結，故高度屬於同一群者將被進一步的分群，如圖 11(b)所示，紅色實線藉由交會點判斷已經再次施以屋頂面歸屬分群。(c)之後，引入斜結構線再次進行連結。圖 11(c) 成果顯示顏色與線條型態相同者表示同群組，由此圖顯示正確的三維結構線之屋頂面歸屬。

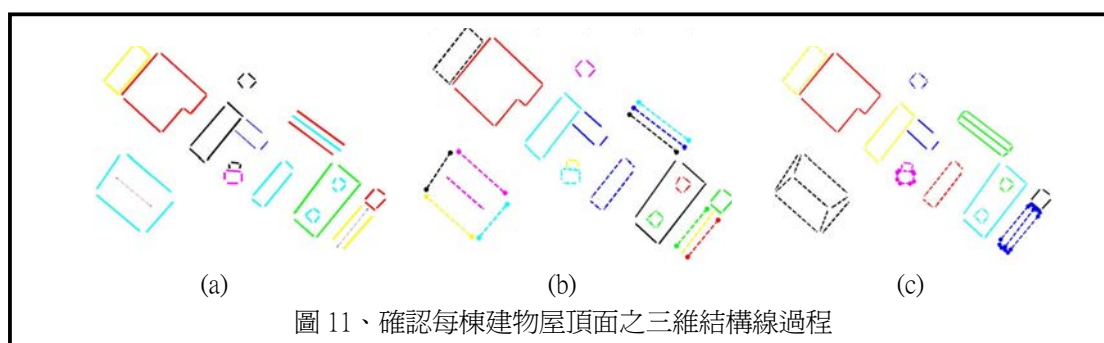


圖 11、確認每棟建物屋頂面之三維結構線過程

3.3.3 建立每棟屋頂面之三維結構線間的位相關係

為完成每棟屋頂面之三維結構線間的位相關係，再次引入群聚分析將每個屋頂面上確認的交會點施以分群。如圖 12 所示，位於同一群的交會點(為前述交會點篩選程序所最後確認之點位，如紅色框中的黑色點位)，實際上應為同一屋角點，只是受到三維結構線隨機誤差的影響，導致不會剛好位於同一位置。最後，藉由同群組的交會點反推得到該屋角點是由哪些結構線所組成，如此即建立每個屋頂面的三維結構線間之位相關係。

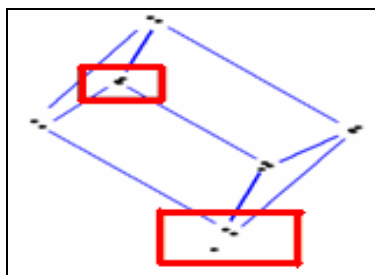


圖 12、由隨機誤差產生之屋角交會點群聚現象

3.4 成型 (Shape)

成型旨在獲得三維屋角點坐標，並利用相鄰較高樓層之建物屋頂面補償因遮蔽效應而失去的屋頂面邊緣線，最後判斷任一屋頂面是否位於其他的屋頂面內部，即判斷建物屋頂面上是否還有附加高樓，以便能獲致更佳的重建成果。

3.4.1 平差計算獲得屋角點坐標

演算方法為同時調整屋頂面各側的三維結構線段，使其能一次獲得該棟房屋所有屋角點的坐標最或是值與理論精度，在此模式下之演算法並未限定所處理之三維結構線必須位為同一平面上。三維直線特徵可以四個獨立參數表示，其方程式型態可有多種表示式(李志宏，2002)，本研究採用兩面式(如式(1)例)，將兩面式中之四參數視為觀測值，而將三維結構線交會之屋角點三維坐標視為待求參數，利用附有參數的條件平差法(如式(2)所示)迭代計算以求得屋角點坐標最或是值。經由三維結構線計算交會點之平差示意圖參見圖 13。

$$\begin{aligned} a_1X + b_1Y + 1 &= 0 \\ c_1Y + d_1Z + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, a_1, b_1, c_1, d_1 為以兩面式表達三維直線之四參數, X, Y, Z 為位於三維直線上的點位坐標值。

$$B_{c \times n} e_{n \times 1} + A_{c \times u} \xi_{u \times 1} - W_{c \times 1} = 0_{c \times 1},$$

$$e \sim (0, \Sigma = \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (2)$$

其中, A 、 B 分別為式(1)對三維結構線交會之屋角點坐標未知參數及三維結構線參數觀測量偏微分之係數矩陣; ξ 為未知參數增量向量; 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; n 為觀測量個數; u 為未知參數個數。

最小二乘法之屋角點三維坐標參數收斂解:

$$\begin{aligned} \hat{\xi} &= N_{aa}^{-1} A^T N_{bb} W \quad (\text{其中 } N_{aa} = A^T N_{bb} A, \\ N_{bb} &= B P^{-1} B^T) \end{aligned} \quad (3)$$

後驗參數協方差矩陣:

$$\hat{\Sigma}_{\xi} = \hat{\sigma}_0^2 N_{aa}^{-1} \quad (\text{其中, } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{e}^T P \tilde{e}}{n-u}, \tilde{e} \text{ 為改正數向量}) \quad (4)$$

自後驗參數協方差矩陣取對角線元素經開方可獲致屋角點三維坐標理論精度($\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$, 亦即中誤差)。

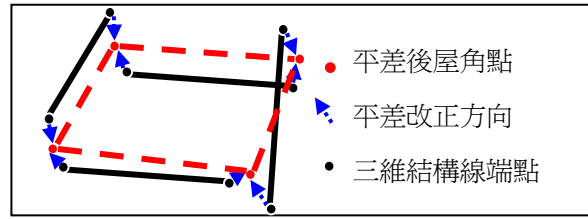


圖 13、屋角點計算示意圖

3.4.2 遮蔽邊緣線補償演算策略

由於屋頂面可能受到相鄰建物遮蔽的影響導致遺失某一側的邊緣線, 本工作為此所研擬的策略為利用相鄰樓層較高者進行補償, 而高度則由補償起點與終點(任意設定)的高度差根據交點及補償起終點線條的距離與總長度的比例而分配。舉圖 14 中的 House1 為例, 該棟屋頂面的房屋邊緣線為 No.1、2、3、4, 此屋頂受到左側較高建物的遮蔽影響導致遺失邊緣線。在進行邊緣線補償時, 設定線條 1 與 5 號的交點為補償的起點, 線條 13 與 4 號的交點為補償終點。當建立圖 14 的圖形相鄰矩陣(Adjacency matrix)後, 應用 Floyd-Warshall 最短路徑搜尋演算法(Cormen et al., 1990), 找出距離補償終點最短的路徑, 而此路徑不能經過該補償建物屋頂面上的節點(如線條 2 與 3 號的交點), 之後紀錄最短路徑上所通過的每一個節點, 而高度值的補償則利用式(5)計算得到。經前述補償方法能獲致圖 14 受遮蔽之邊緣線(黑色端點連線段)。

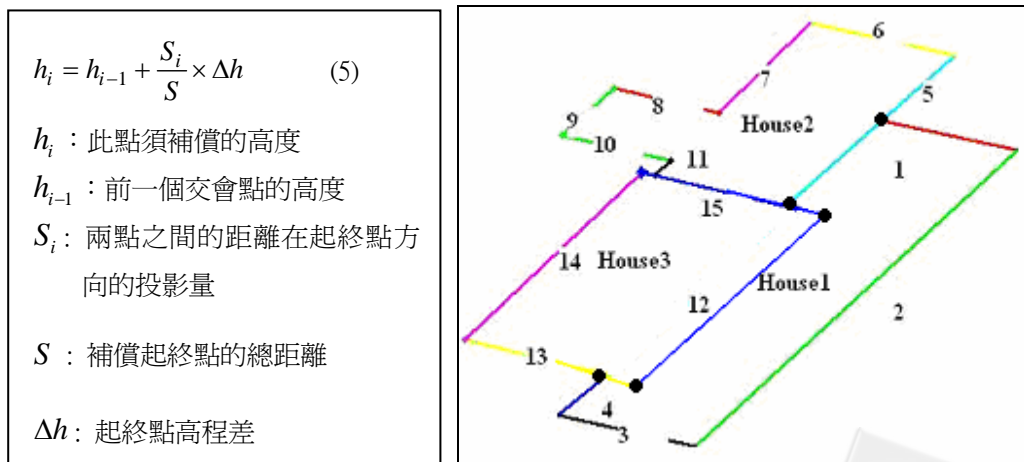


圖 14、屋頂面邊緣線遮蔽補償演算法示例



3.4.3 判斷某一屋頂面上是否有其 他的屋頂面模型

當重建屋頂面模型後，每個屋頂面模型都可視為不同的物件，此時同樣藉由三維結構線平面交會的特性可建立屋頂面物件間之空間位相關係，即可知某一屋頂面模型是否位於另一屋頂面模型之內部，如此，可決定屋頂面上其他屋頂面物件的去留。邏輯的判斷方式為於投影平面上判斷，若某屋頂面模型的每一邊由兩端點向外延伸所交會得到的線條都屬於另一個屋頂面物件時，則判斷此屋頂面位於另一屋頂面的內部。以圖 15 為例，灰色屋頂面物件由紅色端點向外延伸，其每一邊向外延伸都會與黑色屋頂面物件的藍色邊緣線交會，因此判定灰色屋頂面位於黑色屋頂面的內部。

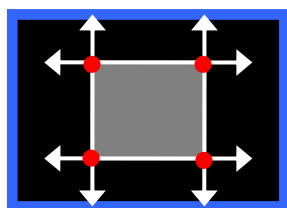


圖 15、屋頂面物件間位相關係判斷示意圖

3.5 改良 (Refine)

考慮若能在相同作業區中取得不同圖資以作為三維結構線的資料來源，如光達資料與三維地形向量圖資等，此時即可進行資料融合(以 3.4.1 節所述平差方法，惟此時處理重覆觀測之三維結構線)以改良利用單一資料建立初始屋頂面模型的品質。而若欲融合三維結構線與影像資料，則必須發展從影像圖資中萃取建構房屋邊緣線並進行三維結構線及二維影像直線間的對應與物空間重建，其工作包含幾何推論(篩選合適的影像直線)、前方交會及融合計算，相關演算法介紹如後。

3.5.1 影像直線之篩選

幾何推論法之整體作業程序為先利用已知的像片外方位參數、參數精度以及像片座標系與影像

座標系的轉換關係將三維結構線投影至影像上，以出現在三維結構線附近的影像直線段特徵為篩選對象，篩選程序包括在像、物空間的二維以及三維幾何推論，推論條件包括角度、距離以及位相對應，最後再將通過幾何推論而保留的多組共軛影像直線段進行直線的擬合以獲得更為可靠的建物屋頂面邊緣線。

3.5.1.1 影像平面幾何推論

[門檻 1] 影像與三維結構線之距離檢驗

由於二維影像平面上兩不平行的直線必相交會，故線段間之距離則訂為影像線條的中心點與倒投影的三維結構線之垂距，並考慮影像量測誤差與倒投影的誤差，利用誤差傳播推得距離中誤差，並設定距離中誤差之倍數(例如二或三倍)當作篩選門檻，故距離中誤差越大時系統也將自動分配較大的距離門檻值，當檢查之直線距離超過此門檻則被視為粗差，即非建物屋頂面邊緣線。距離計算公式如下：

$$d = \frac{|ax_0 + by_0 + 1|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (6)$$

其中 (x_0, y_0) 為影像線條的中點坐標， a, b 為三維結構線倒投影至影像的直線方程式參數。

由式(6)可知距離中誤差與三維結構線在影像上的直線方程式參數以及影像線條之中點坐標的中誤差有關，且直線方程式參數又與倒投影端點坐標的中誤差有關。若設定影像直線方程式表示為式(7)

$$ax + by + 1 = 0 \quad (7)$$

將倒投影之直線兩端點 (x_1, y_1) 與 (x_2, y_2) 代入直線方程式

$$a = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_1 y_2 - x_2 y_1)} ; \quad b = \frac{(x_1 - x_2)}{(x_2 y_1 - x_1 y_2)} \quad (8)$$

式(8)分別對 (x_1, y_1) 與 (x_2, y_2) 進行偏微分，依誤差傳播可得三維結構線倒投影於影像平面之直線參數的方差-協方差矩陣，最後將式(6)分別對 (a, b, x_0, y_0) 偏微分得到係數矩陣，依誤差傳播即推算得距離 (d) 的中誤差。

[門檻 2] 影像與三維結構線之交角檢驗
交角計算公式如式(9)。

$$\theta = \arccos\left(\frac{(x_1 - x_2)(x_3 - x_4) + (y_1 - y_2)(y_3 - y_4)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \cdot \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}}\right) \quad (9)$$

其中 (x_1, y_1) 及 (x_2, y_2) 為三維結構線在影像上的兩點坐標； (x_3, y_3) 及 (x_4, y_4) 為所萃取影像直線上兩端點坐標。

交角中誤差為利用式(9)分別對 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 及 (x_4, y_4) 偏微分後進行誤差傳播計算獲得。同理，可據此設定角度中誤差的倍數做為篩選門檻。

[門檻 3] 整體性位相檢驗

目的為利用三維結構線間的位相關係(將影像線條中點坐標帶入對應三維結構線其相鄰邊緣線之直線方程函式: $ax + by + 1$, 取其所得數值之正或負符號), 濾除雖然通過距離門檻但卻與建物屋頂面邊緣線相距很遠的線條。考慮若該線條的中點落在欲進行位相判斷之房屋邊的距離區間內時, 就表示該邊的誤差可能會影響位相判斷的結果, 必須將之判定為不確定的因素。因此即使結構線的中點與相鄰之結構線的位相與影像所對應之兩邊位相不同時, 該影像線條也會被保留。以圖 16 為例, 紅線為屋頂面上之三維結構線, 假設 A 邊的中點對於相鄰兩邊 BD 的位相關係為(+,+), 如果藍色線條相對於 BD 的位相關係為(-,+), 且不在 D 距離門

檻內, 則此藍線將被篩除。反之, 綠色線條的位相關係為(-,+), 但由於其中心點落在 D 邊的距離區間(黑色虛線)內, 故此線條將被保留。

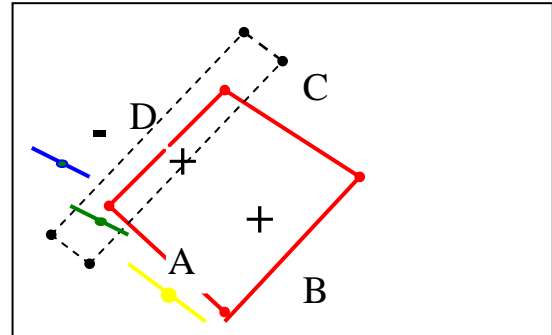
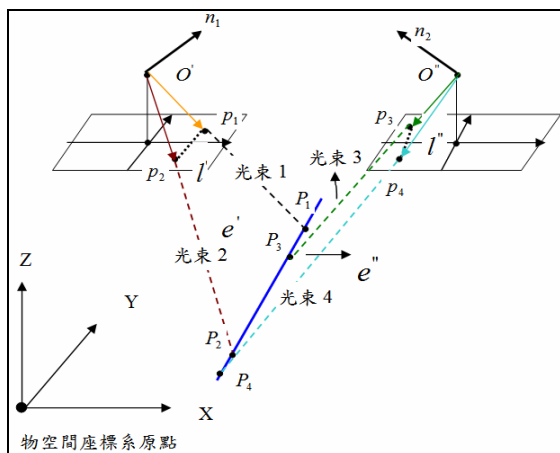


圖 16、影像平面之位相檢驗示意

3.5.1.2 以直線特徵為主的前方交會之物、像幾何模式

攝影測量以直線特徵為主的重建方式和傳統點特徵不同, 主要在於投影中心、影像直線特徵與對應之物空間直線特徵具有共面的特性, 此平面稱為判斷面(Interpretation Plane)。在立體模型上利用直線特徵進行三維重建時, 左像直線之兩端點所形成的兩光束與右像之判斷面將交會得到兩個物空間點位坐標, 同理, 右像的兩光束與左像之判斷面也會交會得到兩個物點坐標, 而這四個點位應位於同一空間直線上, 如圖 17。



符號說明:

- O', O'' : 左右像投影中心;
- l', l'' : 左右像的直線觀測量;
- n_1 : 左影像直線 l' 和投影中心 O' 所形成判斷面 e' 的法向量;
- n_2 : 右影像直線 l'' 和投影中心 O'' 所形成判斷面 e'' 的法向量;
- p_i : 直線觀測量兩端點, $i = 1 \sim 4$;
- P_i : 物空間三維點位, $i = 1 \sim 4$ 。

圖 17、直線物、像幾何關係



3.5.1.3 物空間幾何推論

[門檻 4] 空間距離檢驗

如圖 18 所示，候選之三維房屋邊緣線的中點至三維結構線的距離可依 $\vec{PM} \cdot \vec{V} = 0$ 之條件先解得垂足 M 點之坐標後再計算點 P 和點 M 間的長度，即為點 P 到三維結構線 L 的距離。滿足此空間距離門檻之候選三維房屋邊緣線方得保留。

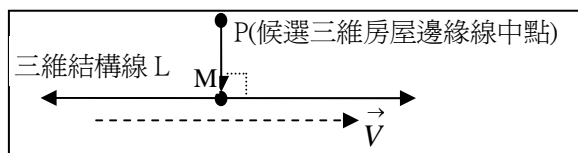


圖 18、空間距離計算示意圖

[門檻 5] 空間角度檢驗

空間向量角度計算方法仿式(8)，但由二維擴展至三維，在此不再贅述。同理，滿足此空間角度門檻之候選三維房屋邊緣線方得保留。

至於空間距離、角度門檻值仍以誤差傳播所推算之距離及角度中誤差乘以經

驗倍數(例如二倍或三倍)的方式來給定。

現階段由於影像直線特徵量測的不完整，在上述各項幾何推論程序後，由左右影像前交獲致的屋頂面三維結構線多呈破碎，尚必須針對同一條邊緣線之破碎線段進行擬合(可仿式(1)採重覆觀測方式計算擬合後的新四參數估值及精度)以提供更為可靠的屋頂面邊緣線。

3.5.2 屋頂面模型品質改良

由共軛影像直線交會所組成的三維線條可仿三維結構線利用兩面式來示，此時兩對應之判斷面恰好提供該兩平面，故融合影像交會產生之屋頂面三維線條與外來三維結構線的平差處理方式概念與 3.4.1 節相同，僅需將兩種圖資所組成的係數矩陣 B、A、W 與權矩陣合併，以式(2)模式進行屋角點三維坐標未知參數平差計算。

4.1 資料說明

本研究分別從光達點雲資料與三維地形向量圖資中獲得三維結構線，光達測試資料位於新竹地區，來源為由農委會所提供，而三維地形向量圖資(比例尺 1/1000)製作方式為在影像工作站上經由立體量測航空影像所得的線畫圖資料(包括高程資訊)，測區位於苗栗頭份地區。光達資料為 2002 年 4 月間由 Leica 公司之 ALS 40 之系統所收集，並在 2004 年經過系統誤差的校正，目前實驗使用該經過系統誤差校正後的資料。光達資料中原始離散點解析力大約為 $0.5 \text{ point}/m^2$ ，高程先驗中誤差為 $\pm 0.15m$ ，平面先驗中誤差為 $\pm 0.3m$ 。除此之外，在光達資料測試區中也獲得對應的航攝影像，其來源為交大璞玉計畫所提供。由於航攝影像拍攝時間與光達掃描時間相近，故可嘗試在不考慮現況變遷的條件下進行資料融合，以提升利用光達所提供的三維結構線所建立之屋頂面模型的品質。光達與航測系統相關的誤差設定如表 2。此外，苗栗頭份的測試區中，並未能同時獲得其他來源的資料(如光達)，故僅可利用三維地形向量圖資進行重建，以測試建構-成型兩演算程序於重建初始屋頂面模型的可行性。

表 2、實測資料之相關參數設定

像片比例尺	$\approx 1/5800$
像元地面解析度	$\approx 25cm \times 25cm$
像片觀測量先驗中誤差	$\pm 0.05mm$
光達內插網格間距	$1m \times 1m$
光達內插網格先驗中誤差	$(\pm 0.5m, \pm 0.5m, \pm 0.2m)$
$*(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$	
外方位位置參數中誤差	$\sigma_x = \sigma_y = \pm 0.3m ;$ $\sigma_z = \pm 0.5m$
外方位姿態參數中誤差	$\sigma_\omega = \sigma_\phi = \sigma_\kappa = \pm 30''$

*考量內插效應，網格點精度設為低於原始點雲資料精度

4. 實驗測試成果與分析

4.2 以建構-成型兩程序建立初始屋頂面模型之測試實例

本研究爲了測試演算法是否能從多種不同來源資料所提供的三維結構線段中重建初始屋頂面模型，因此採用前述光達資料及三維地形向量圖資料所提供的線型特徵重建初始屋頂面模型以驗證演算法的適用性。而在 4.3 節中則展示光達資料與影像資料進行融合以改良屋頂面模型的重建成果。

4.2.1 由光達資料重建初始屋頂面模型

實驗測試區內有 21 棟建物(包含平屋頂及山型屋頂)，爲了測試處理多元類型屋頂的能力，因此再額外增加了兩棟虛擬屋頂面(如圖 19(c)中文字 Virtual building 所示位置)，其物件型態爲內縮屋脊

型與 L 型的山型屋頂面，故總共包含了 26 個屋頂面物件。圖 19(a)爲測試區之航照影像，圖 19(b)黑色線條爲由光達資料中所萃取得到的三維結構線，圖 19(d)爲多組屋頂面模型的三維重建成果，藍色的屋頂面爲經過屋頂面物件的位相檢查判定爲位於其他屋頂面的內部。除此之外，彼此相連之高低建物屋頂面可有效的被分離爲不同的屋頂面物件。表 3 爲第 3 號與第 9 號建物屋頂面之角點理論精度(由平差計算獲致之後驗參數中誤差)。由表中可知，角點高程精度優於原光達網格資料先驗之高程精度，但角點平面位置則明顯受到部份三維結構線延伸外推交會點的影響，其平面坐標精度比原光達網格先驗平面精度來得差。

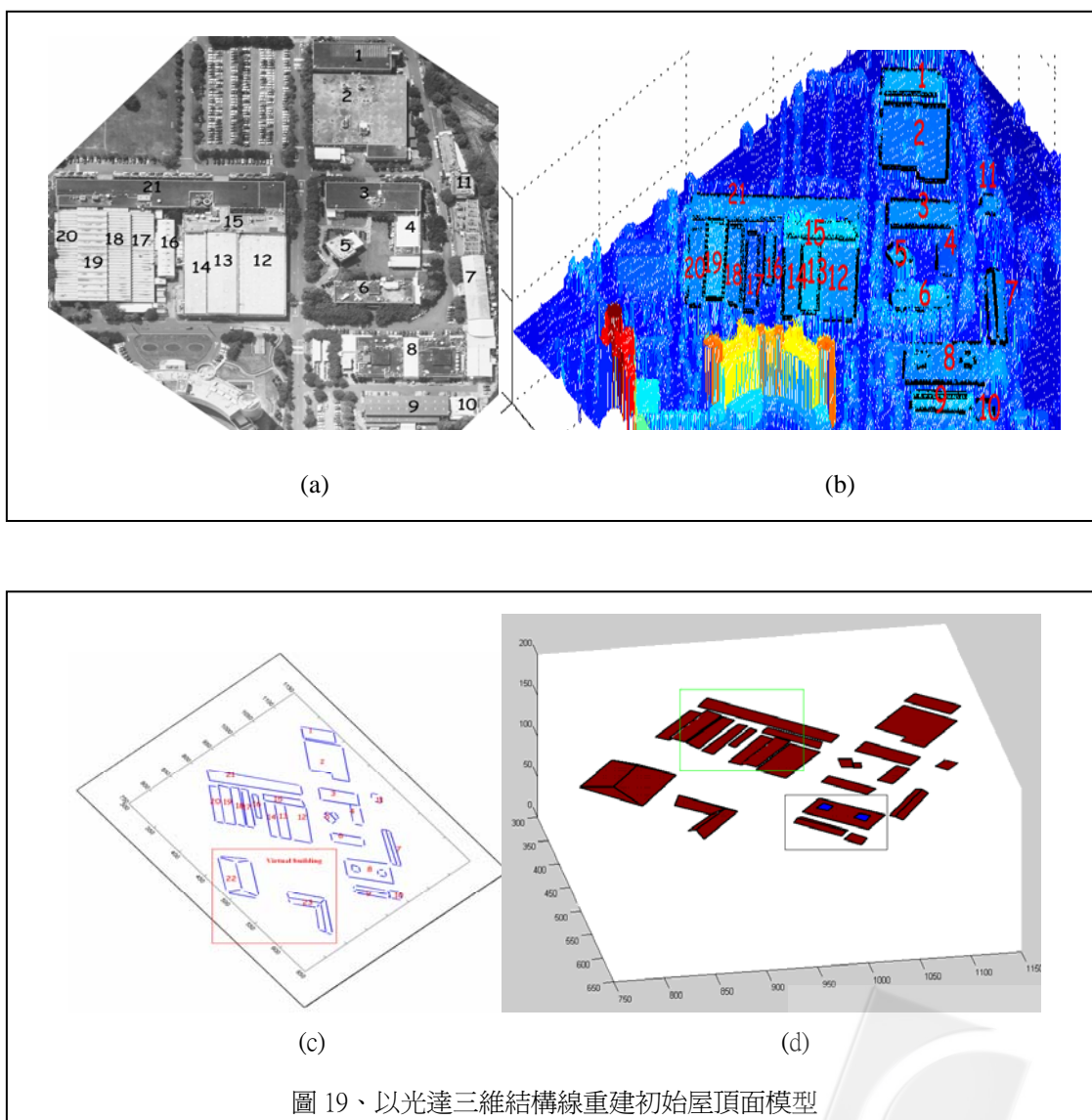
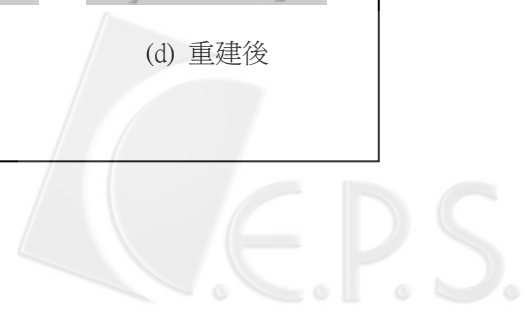
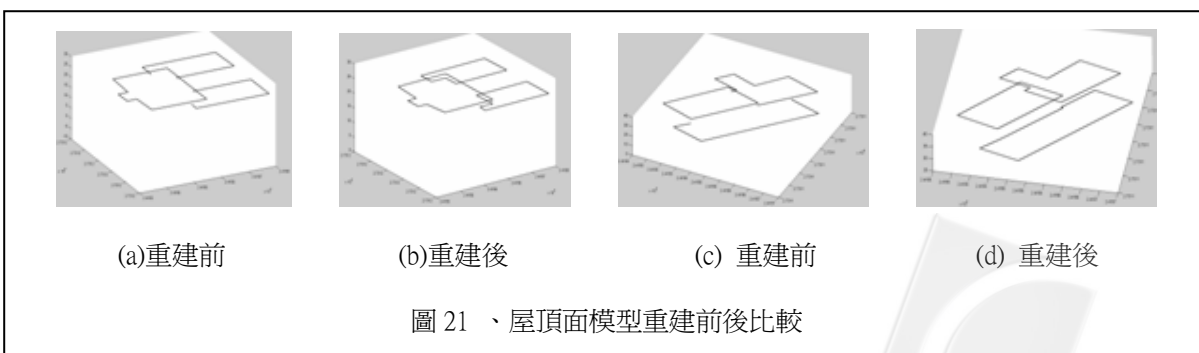
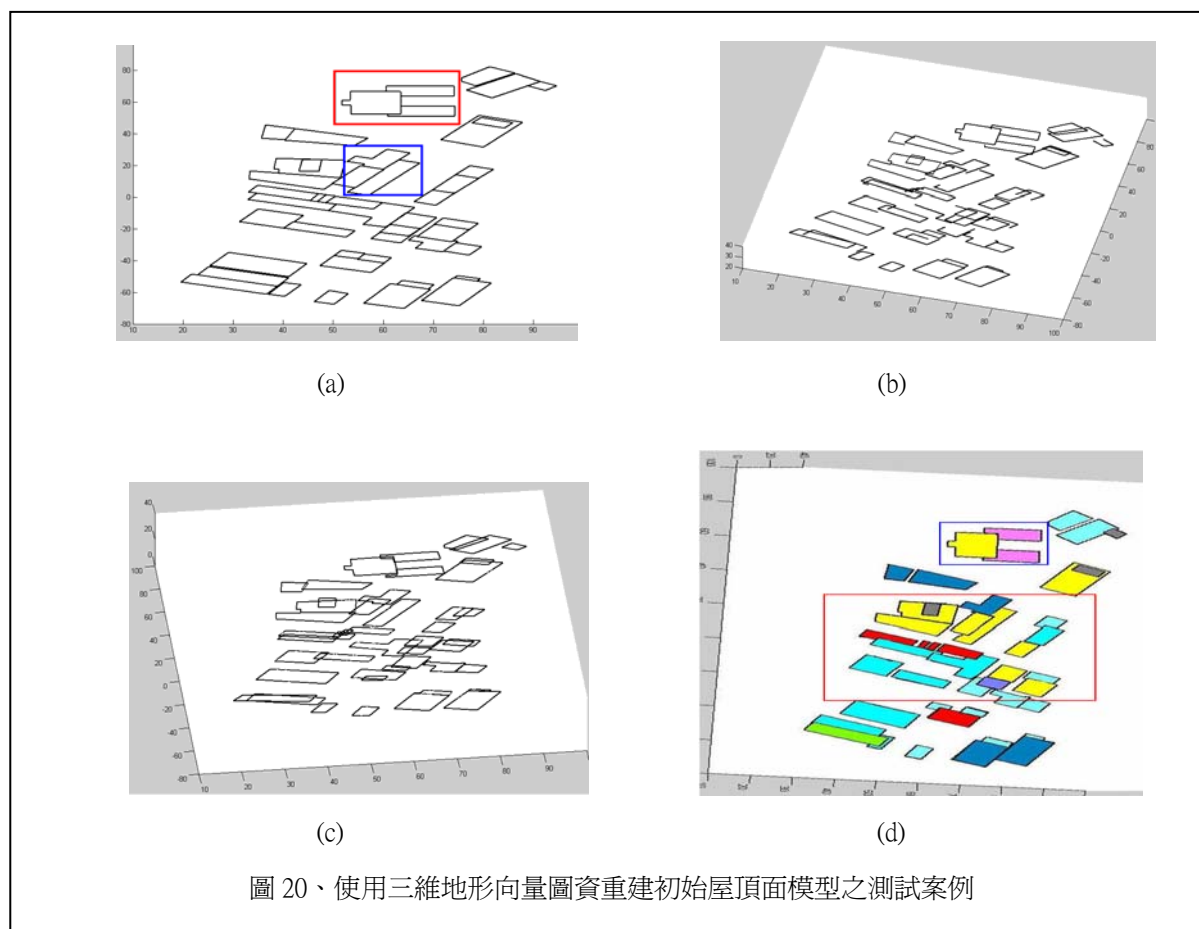


圖 19、以光達三維結構線重建初始屋頂面模型



表 3、第 3 與 9 號初始屋頂面模型之屋角點理論精度(單位：公尺)

第 3 號屋頂面				第 9 號屋頂面			
角點編號	σ_x	σ_y	σ_z	角點編號	σ_x	σ_y	σ_z
1	± 0.49	± 0.51	± 0.12	1	± 0.44	± 0.47	± 0.18
2	± 0.89	± 0.88	± 0.14	2	± 0.66	± 0.58	± 0.16
3	± 0.68	± 0.71	± 0.13	3	± 0.51	± 0.76	± 0.21
4	± 0.75	± 0.69	± 0.14	4	± 0.78	± 0.73	± 0.18
				5	± 0.46	± 0.33	± 0.14
				6	± 0.85	± 0.38	± 0.18



4.2.2 由三維地形向量圖資重建 初始屋頂面模型

在三維地形向量圖資測試區中含有 42 個屋頂面，圖 20(a)為三維地形向量圖資的平面圖，圖 20 (b) 為自三維地形向量圖資向量檔中所提取的三維結構線段，而圖 20 (c)為利用建構-成型重建後所得到的屋頂面，圖 20 (d)為所重建得到的初始屋頂面模型，其成果亦展示彼此相鄰之高低建物屋頂面模型能被有效分離。而圖 21 (a)為圖 20 (a)中紅色框的放大圖，圖 21 (b)則為該區重建後模型；圖 21 (c)為圖 20 (a)中藍色框的放大圖，圖 21 (d)則為該區重建後模型。比較圖 21 (a)、(b)、(c)及(d)可清楚看出，重

建後的屋頂面模型確實能有效補償因相鄰較高建物造成之遮蔽效應。

4.3 融合三維結構線與影像 圖資改良屋頂面模型之 重建成果

本研究以圖 19 中之 3 號(屬平屋頂)與 9 號(屬山型屋頂)之兩個屋頂面模型為例，測試光達所提供的三維結構線能否有效篩選影像直線，以獲得位於房屋邊緣的影像線條，且分析融合光達與影像資料前後屋頂面重建成果的變化。

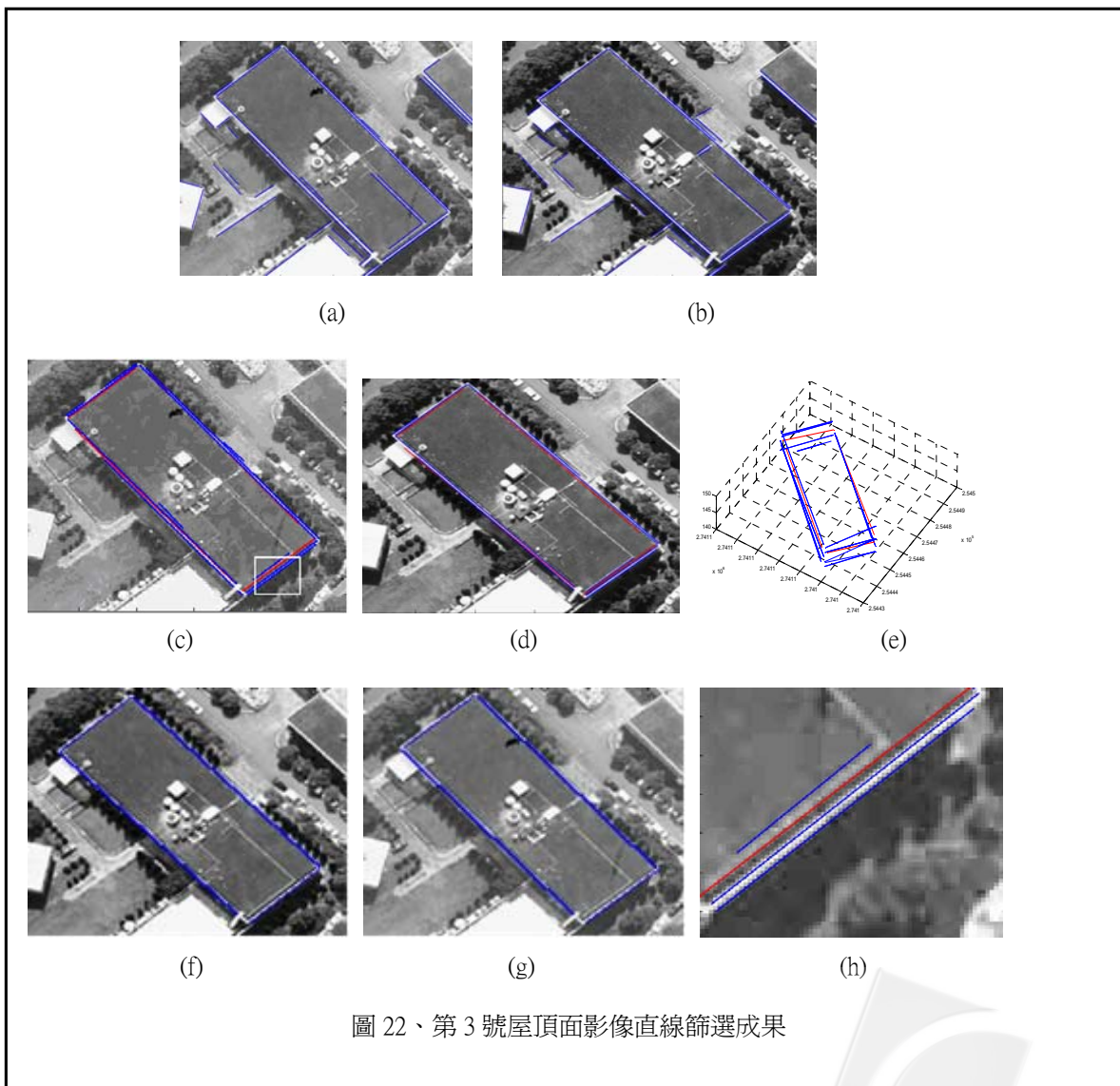


圖 22、第 3 號屋頂面影像直線篩選成果

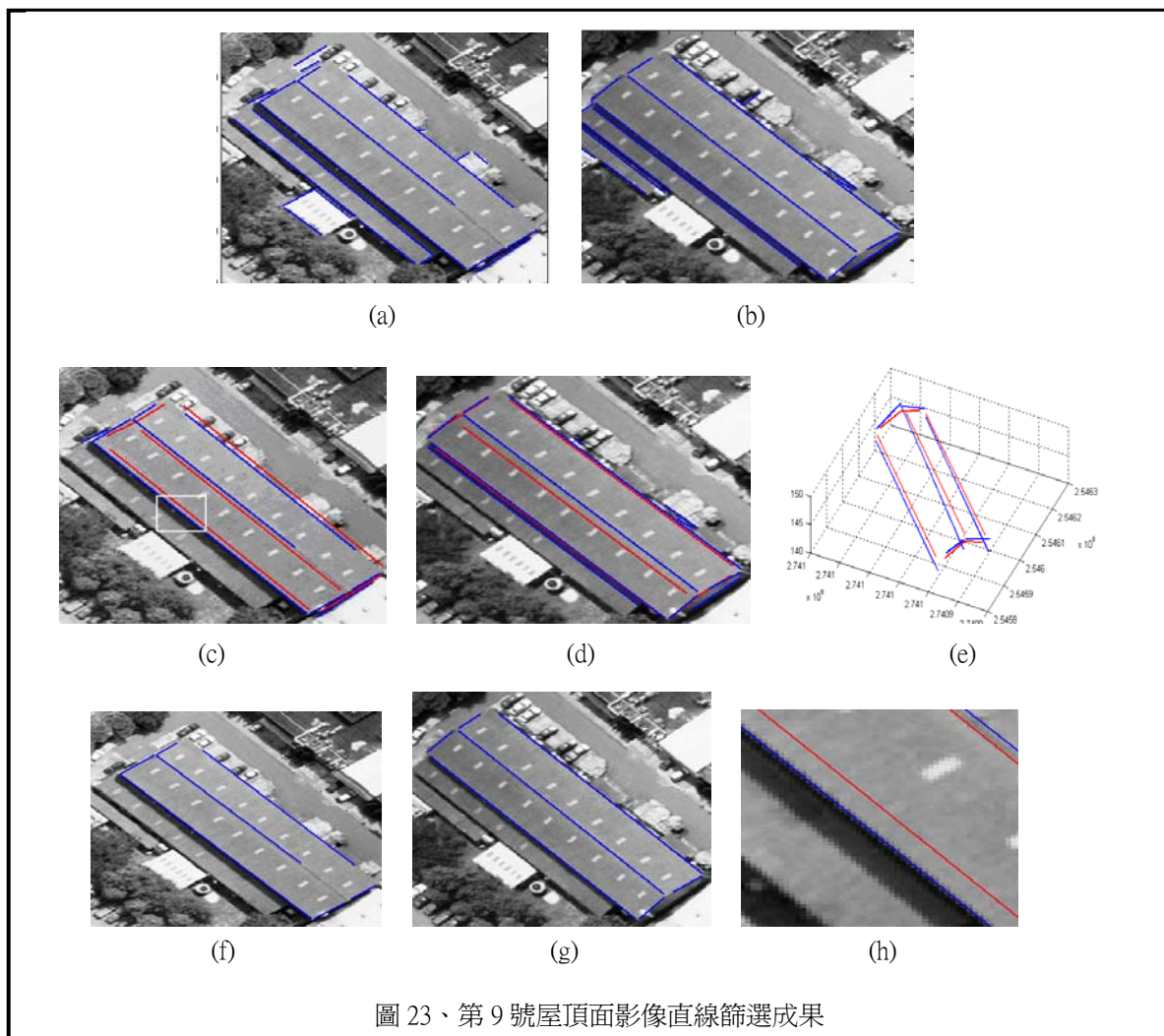
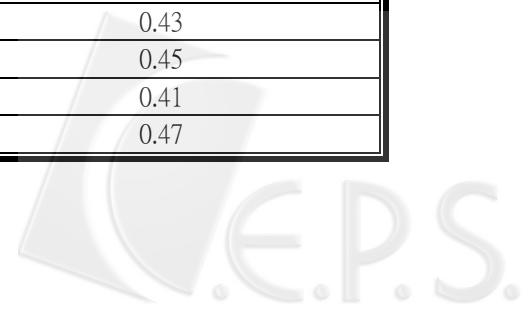


圖 23、第 9 號屋頂面影像直線篩選成果

表 4、第 3 號與 9 號屋頂面之融合後屋角點理論精度與位移總誤差量 (單位:公尺)

第 3 號屋頂面融合後屋角點理論精度				
角點編號	σ_x	σ_y	σ_z	$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}$
1	± 0.27	± 0.26	± 0.13	0.39
2	± 0.28	± 0.28	± 0.13	0.42
3	± 0.29	± 0.28	± 0.15	0.42
4	± 0.29	± 0.28	± 0.13	0.43
第 9 號屋頂面融合後屋角點理論精度				
角點編號	σ_x	σ_y	σ_z	$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}$
1	± 0.29	± 0.24	± 0.15	0.41
2	± 0.25	± 0.28	± 0.16	0.41
3	± 0.30	± 0.27	± 0.14	0.43
4	± 0.31	± 0.30	± 0.14	0.45
5	± 0.26	± 0.28	± 0.15	0.41
6	± 0.32	± 0.31	± 0.17	0.47



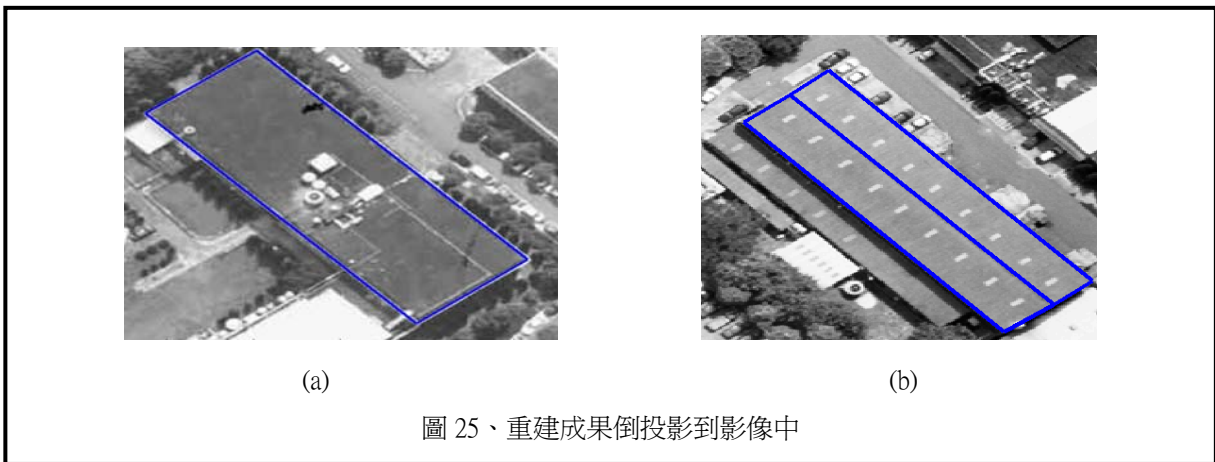
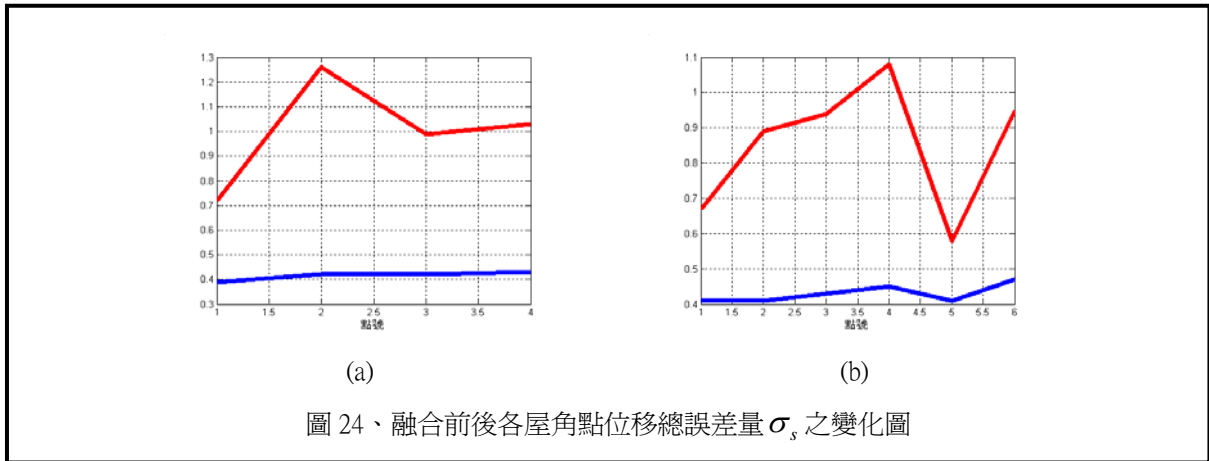


表5、 相關研究比較表

	CSR	Rau and Chen (2003)	Gruen and Wang (2001)
輸入特徵	三維直線特徵	三維直線特徵	三維角點特徵
資料輸入彈性	任意	任意	任意或依序
自動化程序	屋頂面重建	屋頂面重建	屋頂面重建
部份遮蔽處理	可	可	需由人工預測
屋角點共平面否	無限制	具共平面假設	具共平面假設
建物模型呈現方式	多面體模型(由屋角點組成)	多面體模型	多面體模型
精度成果	(1)三維結構線交會角點之平差後精度(只經由建構-成型) (2)資料融合後的精度(經由建構-成型-改良)	航測精度	航測精度



4.3.1 影像直線篩選成果

首先以第 3 號屋頂面為例，圖 22(a)(b)為從左右影像萃取得到的影像直線(藍色)；(c)(d)為倒投影到影像的光達三維結構線(紅色)並經過二維影像平面幾何篩選之成果(藍色線條)；(e)為交會到物空間並經過物空間幾何篩選之成果；(f)(g)為經過物空間幾何篩選並施以破碎三維直線段擬合後之結構線倒投影至影像上的成果；(h)為(c)中白色框的局部放大圖，由圖中可看出光達三維結構線無法精準的描述屋頂面邊緣線，相對地，影像直線較貼近屋頂面邊緣線。由此測試案例可知，藉由三維結構線所提供的近似屋頂面邊緣線資訊能有效的篩選影像線條，並藉由三維直線的擬合將能獲得更為可靠的屋頂面結構線。

同樣地，就第 9 號屋頂面而言，圖 23(a)(b)為自左右影像萃取得到的影像直線(藍色)；(c)(d)為倒投影到影像的三維結構線(紅色)並經過二維影像平面幾何篩選之成果(藍色線條)；(e)為前方交會到物空間並經過物空間幾何篩選之成果；(f)(g) 為經過物空間幾何篩選並施以破碎三維直線段擬合後之結構線倒投影至影像上的成果；(h)為(c)中白色框的局部放大圖，成果同於前例，倒投影之光達線條不如影像直線那樣地貼近屋頂面邊緣線。

4.3.2 資料融合以提升屋頂面重建成果

經光達三維結構線與影像前交三維結構線進行平差計算後，兩棟建物屋頂面之角點理論精度如表 4 所示。圖 24 為融合前(紅色線條)與融合後(藍色線條)的角點精度位移總誤差量 σ_s (縱軸)變化圖(橫軸數值為角點編號)。由圖 24 與表 4 中顯示資料融合後，屋頂面物件的重建成果有顯著提升，即 σ_s 的數值明顯下降。從兩圖表內容顯示航攝影像可彌補光達資料在平面精度上的不足，而光達資料也能提升航攝影像在高程精度上相對較差的缺點，而融合後的成果優於僅使用光達資料進行重建的成

果。由於在本測試區中目前並無可靠外部檢核資料，故將融合後的屋頂面模型投影到影像上以視覺檢查，而圖 25(a)(b)為上述兩種建物模型倒投影到影像上的成果例，從視覺感官而言，資料融合後之成果似是令人滿意的。

4.4 演算法效率與有效性之分析

在演算法實作上，目前操作平台是架構於 CPU 為 Pentium M 1.4-GHz 的筆記型電腦，而所使用的程式語言為 c++，若以 4.2.1 節的實驗區而言(含有 131 條三維結構線)，在建構階段推論得到合理的交會點並建立三維結構線間之位相關係演算法所計算的時間總共約在 5 秒之內，在成型階段，平差計算與遮蔽補償計算所花的計算時間也約在 5 秒內，而在改良程序影像直線之幾何推論並進行融合計算，其總共計算的時間也近乎 5 秒。因此，由實驗測試可知，藉由電腦的運算效能進行計算與邏輯判斷，可有效率的完成重建任務。以下歸納本研究之特色與有效性：

- 相較於傳統使用 GIS 軟體建立位相關係必須將每一相鄰線段節點進行點選與數化以獲得每一條線段特徵間的位相關係，且當資料的輸入順序有變動其位相關係必須重新建立的建立(施保旭，2001)，本研究所提出的建立直線特徵間位相關係的演算法，不論資料輸入的順序為何，均能正確自動建立特徵物間的位相關係，故能有效提升重建的效率。
- 由於屋頂面模型為以屋角點坐標搭配位相關係所描述而成的多面體模型，故在重建之前無需預先設定一屋頂面模型資料庫。此外由實驗測試中可知，針對於密集相連高低雜亂且不規則輪廓的建物(如圖 20(d)紅色框所示)、鞍型建物(如圖 20(d)藍色框)或平頂、山型組合式房屋(如圖 19(d)綠色框與黑色框)，皆可經由本文所設計之程序完成重建。
- **建構-成型**兩程序的特色不僅可重建多組屋頂面

模型與獲得屋角點的理論精度外，也可有效的將相連高低建物拆解成彼此互相獨立的屋頂面模型物件(如：圖 21(d)中所得之三個屋頂面模型物件)，以利於改良程序中逐一提昇每個屋頂面模型的幾何精度。

- 在改良的程序中，首先，可有效的藉由三維結構線所具有的空間幾何資訊進行影像直線的篩選，以獲得位於屋頂面邊緣的影像直線；之後於融合程序，利用資料之間的互補性能有效提昇融合後的重建品質。
- 由於是以直線特徵作為重建處理的幾何特徵，因此藉由線段的延伸與文中所提的遮蔽補償演算法，可有效處理建物屋角點被部份遮蔽的情況。

而表 5 為本研究與其他相關研究間的比較。

5. 結論

本研究所發展的建構-成型-改良三階段演算法可以有效地重建初始屋頂面模型並藉由資料融合來提升模型的品質。當僅有單一資料來源(如：光達或三維地形圖資)提供三維結構線之線型資訊且其精度已足以滿足所需時，僅需利用建構-成型兩步驟進行屋頂面模型的重建即可。此外，在改良階段考慮若能在相同作業區中取得不同圖資以作為三維結構線的資料來源，如航空影像與光達資料亦或光達資料與三維地形圖資等，此時即可進行資料融合以改良利用單一資料建立初始屋頂面模型的品質。若圖資來源均為三維結構線，則可分別先以建構-成型兩程序分別重建初始屋頂面模型後，再於改良階段中直接進行融合計算以獲致品質提升的屋頂面模型；而當一方資料為三維結構線並欲藉助影像資料施行融合，則於改良階段中先以幾何推論演算法篩選合適的影像直線段後再進行融合計算以獲致品質提升的屋頂面模型。此外，本研究工作著重在屋頂面重建演算法之發展，故以下工作可留作後續探討：

1. 發展完整性及精度較高的三維及二維直線特徵偵測運算元，以提升直線特徵品質以及資料處理自動化層次。

2. 為能因應人口稠密的都會區型態複雜的建物重建任務，應設計半自動化的作業模式，利用使用者介面於適當時刻輔以人工量測來強化重建結果、修正錯誤或處理目前演算法無法顧及的它類屋頂面型態。

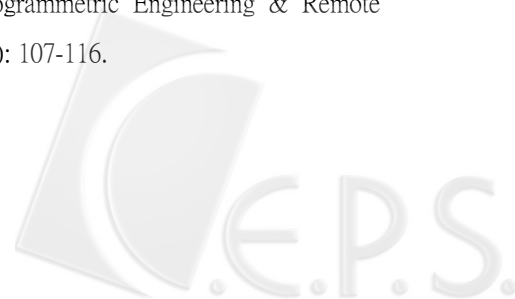
誌謝

本文承蒙兩位審查者提供修正意見，經修潤後提昇完整性及嚴謹度，在此深深致謝。

參考文獻

- 王聖鐸，2005。以浮測模型理論萃取三維空間資訊-以建物重建為例，國立成功大學測量與空間資訊學系博士論文，台南，169 頁。
- 王匯智，2007。完整波形分析對於提升空載光達系統定位精度之研究，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，台北，110 頁。
- 李志宏，2002。應用線特徵物求解攝影測量方位參數與物型重建，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，台北，7-9 頁。
- 施保旭，2001。地理資訊系統，儒林圖書公司，台灣，302-303 頁。
- 鄭傑中，2006。以幾何推論法融合光達資料與航攝影像進行建物屋頂面重建，國立台灣大學土木工程學系碩士論文，台北，150 頁。
- Ameri, B., 2000. Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings through Computer Vision and Digital Photogrammetry, PhD dissertation, Deutsche Geodaetische Kommission, Reihe C, Nr. 526, Muenchen, 109p.
- Ackermann, F.,1999, Airborne Laser Scanning - present status and future expectations, ISPRS

- Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54, pp. 64-67.
- Brenner, C., 2005. Building reconstruction from images and laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4), pp.187-198.
- Cheng, C. C., and J. J. Jaw, 2006, 3D Structure Line-based Building Roof Reconstruction, *Proceedings of Asian Conference on Remote Sensing*, Oct. 9-13, Ulaanbaator, Mongolia, CD-ROM.
- Chen, L.C., T. A. Teo, C. H. Hsieh, and J. Y. Rau, 2006, Reconstruction of Building Models with Curvilinear Boundaries from Laser Scanner and Aerial Imagery, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4319, pp.24-33.
- Cormen, T. H., C. H. Leiserson, and R. L. Rivest, 1990. *Introduction to Algorithms*, first edition, MIT Press and McGraw-Hill, pp. 558 - 565.
- Gruen, A., and X. Wang, 2001. News from CyberCity-Modeler, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)* (E.P. Baltsavias, A. Grün, and L. Van Gool, editors), Centro Stefano Franscini, Monte Verita, Ascona, Switzerland, pp. 93 - 102.
- Habib, A., M. Ghanma, M. Morgan, and R. Al-Ruzouq, 2005, Photogrammetric and LIDAR Data Registration Using Linear Features, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6): 699 - 707.
- Lang, F., and W. Foerstner, 1996. 3D-City Modeling with a Digital One-eye Stereo System, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vienna, Austria, pp. 415-420.
- Lin, S. H., and J. J. Jaw, 2004. Structuralization of LIDAR Point Cloud, 25th ACRS, Chiang Mai, Thailand, Vol I, pp. 102-107.
- Peternell, M., and T. Steiner, 2004. Reconstruction of piecewise planar objects from point clouds, *Computer-Aided Design*, 36, pp.333 - 342
- Rau, J.Y., and L.C. Chen, 2003. Robust Reconstruction of Building Models from Three-Dimensional Line Segments, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(2):181-188.
- Rottensteiner, F., 2003. Automatic generation of high-quality building models from lidar data, *Computer Graphics and Applications*, IEEE 23(6):42 - 50.
- Schenk, T., and B. Csatho, 2002. Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a More Complete Surface Description, *IAPRS*, vol. XXXIII, pp. 310-317.
- Seo, S., 2003. Model-Based Automatic Building Extraction From LiDAR And Aerial Imagery, PhD dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 139p.
- Scholz, S., 2002. A Probabilistic Approach to Building Roof Reconstruction, PHD dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 188p.
- Suveg, I., and G. Vosselman, 2004. Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58, pp. 202 - 224.
- Zhou, G., and D. Li, 2001. CAD-Based Object Reconstruction Using Line Photogrammetry for Direct Interaction between GEMS and a Vision System *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(1): 107-116.



Building Roof Reconstruction by Using CSR Approach

Jen-Jer Jaw¹ Chieh-Chung Cheng²

ABSTRACT

3D structure lines are geometric evidences of building roofs and can be resulted from photogrammetric mapping process, feature extraction of LiDAR data sets or other sources. Hence, 3D structure lines by nature are advantageous for inferring to building roof reconstruction. The objective of this investigation is to present a novel algorithm of building roof reconstruction, termed CSR (Construct-Shape-Refine) in this study. The proposed algorithm aims at reconstructing building roof model purely by employing 3D structure lines or integrating 3D structure lines and imagery line features. Geometric inferences are imposed at the stage of Construct where topological relationship of the 3D structure lines is established while 3D coordinates of roof corners are adjusted and estimated through Shape processes, apart from compensating the hidden boundaries, if any. The efficiencies of two streams, fusion of 3D structure lines that result from different sources or fusing 3D structure lines with photogrammetric line features, are gained as promoting the building roof quality via Refine workflow. The experiments of the Construct-Shape steps demonstrate that the proposed method is independent of building roof type as well as whether 3D structure lines are complete for both successful and efficient performance of building roof reconstruction on 3D line basis. Furthermore, the Refine step offered more robust and satisfactory building reconstruction result as compared to the situation when only single data set was attempted.

Key Words: Topological Relationship; Geometric Inference; Fusion; Building Roof Reconstruction.

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University
² PhD Student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University

