

以資料蒐評法和影像分塊技術自動萃取空載 光達資料中的建物共面屋頂點*

邱式鴻**

論文收件日期：96年4月24日

論文接受日期：96年6月6日

摘 要

比起傳統的二維地理資訊，人們能由三維地理資訊中更有效率獲取更多的空間資訊。而建物模型是三維地理資訊中最基本且重要的一項資料。利用建物三維模型，除了可以在電腦中建立虛擬城市之外，亦可結合不同的資訊系統，進行各種不同的應用。如結合消防單位的防災資訊系統，可將救災工作做到最迅速確實，將災變損失減到最低。而空載光達測量技術是目前能自動獲取大區域範圍高精度且高密度地表資料的新興測量技術，獲取的資料是大量分布於地表的三維點位資料，隱含著空間中有意義的點、線、面特徵，尤其是面特徵，對於自動建構建物模型相當有用，因此空載光達資料變成目前自動建構建物模型的一項重要資料來源，所以由空載光達資料中萃取並建構都市區或含建物區的建物模型供後續應用是目前相當重要的研究主題。而由包含大量精確平面特徵的空載光達資料中，進一步處理萃取有意義的面特徵，甚至是萃取更有意義的地物資訊供後續應用則需要發展不同的演算法。本文即在假設地表建物屋頂面是由三維平面所構成的前提之下，利用建物高程一定高於地面的物空間知識，由包含建物區範圍內的光達資料中，利用影像分塊的處理技術先行萃取可能涵蓋屋頂面的區域資訊，接著將所獲取的建物區域資訊與空載光達資料進行資料融合之後，利用最小二乘平面擬合的資料蒐評法（data snooping）排除不屬於共屋頂面上的光達點資料，並進行自動萃取屬於建物共屋頂面上的光達點供後續精確決定三維建物模型之用。而由實驗結果中證實了本研究所提方法的可行性。

關鍵詞：光達、建物重建、資料蒐評、影像分塊

* 感謝兩位匿名審查委員寶貴之意見，使得本文更臻完善，然文中若有任何疏漏錯誤之處仍由作者自行負責。此外，本研究承蒙國科會計畫編號：NSC 94-2211-E-004-002贊助研究經費、工研院能資所提供新竹地區空載光達資料供本研究實驗之用，使得本研究得以順利完成，特此致謝。

** 政治大學地政學系助理教授

TEL：(02) 29393091 #51657，E-mail：chio0119@nccu.edu.tw

Automatic Extraction of Roof Points from Airborne LIDAR Data by Data Snooping and Image Segmentation Technique*

Shih-Hong Chio**

Abstract

People can acquire spatial information more efficiently and benefit much more from 3-D geographical information than from traditional 2-D geographic information. In 3-D geographical information, building models are essential elements. Not only can building models be used to construct the virtual cities on the web for visualization, but it can also be used as the bases for different information systems. For example, the information system for the precaution or preparedness against natural calamities can be built based on the building models for relieving the victims of a disaster quickly and reducing the damage. Airborne LIDAR surveying systems can acquire automatically high accurate and reliable terrain surface data covered large area. Therefore it is an important source for automatic reconstruction of building models. Basically, airborne LIDAR data are consisted of a large number of 3-D points on the terrain surface; co-planar points should be extracted for subsequent application. Therefore, lots of algorithms are developed to extract the meaningful 3-D co-planar features. Based on data snooping theory, this study proposes an algorithm to extract building roof points from airborne LIDAR data for building reconstruction. Based on the assumption that building roofs are composed of either horizontal or oblique planes and that the heights of roofs should be higher than ground surface, image segmentation algorithms are employed first to segment the possible regions covered roofs from airborne LIDAR data. Based on the theory of data snooping, least square plane fitting algorithm are developed to remove non-roof points and extract the co-planar roof points by fusing those detected roof region outlines for subsequent accurate building reconstruction. From experiments, it also proves the feasibility of the proposed algorithm.

Keywords: LIDAR, Building Reconstruction, Data Snooping, Image Segmentation

* The author would like to acknowledge two anonymous referees for thoughtful comments and suggestions. However, the author will be responsible for any omissions or errors about this paper. Additionally, the author is also grateful to the offering of the airborne LIDAR test data by Industrial Technology Research Institute of Taiwan, R.O.C and the financial support by the National Science Council, Taiwan, R.O.C., under Grant No. NSC 94-2211-E-004-002.

** Assistant Professor, Department of Land Economics, National Cheng-Chi University
TEL : (02) 29393091 #51657 · E-mail : chio0119@nccu.edu.tw

一、前 言

傳統的二維地理資訊在這個電腦資訊日新月異的時代中，已經漸漸不能滿足現代人的需求；三維地理資訊的建構能幫助人們更有效率得到空間資訊。而建物模型是三維地理資訊最基本且重要的一項資料。利用建物三維模型為基礎，可結合不同的資訊系統，進行各種不同的應用。如結合消防單位的防災資訊系統，可將救災工作做到最迅速確實，將災變損失減到最低（陳聖銘與陳泰弘，2002）；或者進而在網路上建立虛擬數位城市，如芬蘭赫爾辛基政府在西元2000年推行的虛擬芬蘭赫爾辛基計畫（Helsinki Arena, 2000）。

建構建物模型的方式不勝枚舉（饒見有與陳良健，2002；Gruen and Nevatia, 1998；Haala and Brenner, 1997a），但是其資料不外乎來自航測或高解析度衛星影像、數值覆面模型（digital surface model，簡稱DSM）資料，以及現有的建物平面圖。所謂DSM資料是指用數值坐標資料表示地表最上層覆蓋物（含如植被的自然地物及建物的人工地物）的高低起伏。有別於用數值坐標資料表示不含地表自然及人工地物時，地球表面自然地貌高低起伏的數值高程模型（digital elevation model，簡稱DEM）或稱數值地形模型（digital terrain model，簡稱DTM）。

目前獲取高精度高解析度的DSM資料的技術有地面測量技術、航空攝影測量技術及近幾年來發展之空載雷射掃描（airborne laser scanning，簡稱ALS）或稱空載光達（airborne light detection and ranging，簡稱airborne LIDAR）測量技術。地面測量技術僅僅能獲取小區域範圍內的資料且耗費人力成本甚鉅，因此目前透過航空攝影測量技術及空載光達測量技術才可能自動獲取大區域高精度高解析度的DSM資料，而兩種技術中又以新興的空載光達測量技術更能以自動、正確且高精度的方式獲取大區域高精度高密度的地表資料（史天元、曾義星與劉榮寬，2003），因此空載光達資料變成目前自動建構建物模型的一項重要資料來源。其原理就是利用GPS（global position system）全球定位系統和INS（inertial navigation system）慣性導航系統即時定出飛機飛行瞬間的位置和姿態參數，同時利用雷射測距和光學掃描原理，以每秒約數千次的觀測頻率對地面進行掃描，得到大量分布於地表的三維點位資料，又稱為點雲（point cloud）資料（Wehr and Lohr, 1999）。

既然空載光達資料具有高精度高密度表現地表資訊的能力，且是大量分布於地表的三維點位資料，其資料中隱含著空間中有意義的點、線、面特徵，尤其是都市區或含建物的資料區包含大量的精確平面特徵，適合對於面的分析（Schenk and Csatho, 2002），因此由空載光達資料進一步萃取有意義的面特徵供後續應用是

一項重要的工作。此外，空載光達資料應用很廣，它可以應用於高精度的DEM生產、萃取如建物、道路或者樹木等地物作為景觀規劃或是其他方面之應用，甚至可以用來進行災害評估（Axelsson, 1999；Haala and Brenner, 1997b；Vosselman and Dijkman, 2001；Cobby, Mason, and Davenport, 2001；Steinel *et al.*, 2001）。而「空載雷射地形測繪系統（LIDAR）」之技術業於內政部「高精度及高解析度數值地形模型建置計畫」中予以引進，並於九十三及九十四年針對國內中、低海拔及海岸地區各種地形進行測試及分析，以供各防救災單位快速取得地形資訊之參考。內政部同時委託工研院辦理「LIDAR測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作」案，已於2004年及2005年於桃園、新竹、南投、草嶺潭、外傘頂洲、台南縣市、高雄、屏東等地區，針對不同地形及地貌進行測量、分析及應用推廣等工作，以評估其精度及適用之區域，作為應用之依據（王定平、王成機與陳思仁，2004）。

綜合上述原因，國內已引進此技術且因空載光達測量技術不像利用航空影像匹配易產生錯誤和耗時的特性，而且空載光達系統具備主動以及快速獲取高精度和可靠3-D點坐標的特性，使得空載光達系統所產生的光達資料在將來將是進行建物重建相當重要的資料來源。

二、文獻回顧

利用空載光達資料重建建物模型的方法很多。在國外，如Haala and Brenner（1997b）從稠密的雷射測高資料（4點/m²）利用平面分塊（planar segmentation）演算法萃取平面屋頂元件（planar roof primitives），並利用建物平面圖資訊獲取建物平面的位相關係，進而建立完整的建物模型。Lemmens, Deijkers, and Looman（1997）融合雷射測高資料與地形資料庫導出立方體無屋頂（roof-less cube type）的建物元件。Haala, Brenner, and Anders（1998）由最小二乘法平差導出基本的建物元件的3-D CAD模型參數。Maas and Vosselman（1999）依據點雲的不變動量特性導出標準山型屋頂形式的建物模型；此外，也由最小二乘擬合的平面和平面相交建構複雜非參數化的屋頂。而在國內，由大量分布於地表的三維點位資料空載光達資料萃取建物也有相當的研究成果，如陳良健、賴彥中與饒見有（2003）從資料融合角度出發，結合光達資料及彩色空照影像進行三維房屋區塊之建立。邵怡誠與陳良健（2003）利用數學形態學過濾法在高程空間中自動重建高程以區隔出

地上物的高程點，切取高度超過3公尺且面積較大的地物區塊，經計算斜率差後以10種統計量來偵測房屋區塊。

空載光達資料是由大量三維的點雲資料所組成，雖具有高精度高密度表現地表資訊的能力，但是利用光達資料，進行萃建物屋頂面資訊的過程中，可以預期除了構成建物主要屋頂面上的點雲資料之外，還包括不是構成主要建物屋頂面上的點資料，比如位於女兒牆、水塔、樓梯間或其他附屬建築物上的點資料，甚至是雜訊所構成的點位資料。對於由空載光達資料重建建物模型時，建物屋頂面上的光達點或是屋頂面資訊必須先萃取出來。大部分的方法是將分散的空載光達點資料透過內插方式轉到類似影像的網格資料之後再應用影像處理的方法偵測並萃取之（Geibel and Stilla, 2000；Maas and Vosselman, 1999）。如此一來會喪失某些重要的空間資訊（Axelsson, 2000），特別是高程精度。於是，某些演算法則使用原始的空載光達資料進行萃取的工作（Haala and Brenner, 1999；Lee, 2002；Wang and Tseng, 2004；Woo *et al.*, 2002；Vosselman and Dijkman, 2001）。如Lee（2002）應用視覺組織法（perceptual organization）分析原始空載光達資料在空間的幾何結構關係，並將其群聚成面資訊。Wang and Tseng（2004）提出八分樹的分塊合併演算法將原始空載光達資料群聚成3-D的平面。

雖然使用原始的空載光達資料可以保有原始的精度，然對於使用空載光達資料萃取屋頂點資料仍有其難度。首先是如何從空載光達資料中將屋頂點和其他地物點區分出來，然後是如何將不相關的點排除萃取真正屬於共屋頂面上的點資料。此外，至今並無利用粗差偵錯理論發展出任何關於萃取屋頂面上點資料的演算法。事實上，非同一屋頂面上點的排除可以使用粗差偵錯的理論。也就是，在萃取同一屋頂面上的點時將非同一屋頂面上的點視為粗差，利用粗差偵錯的理論將其排除。而資料蒐評（data snooping）法正是粗差偵錯的一種方法。因此，本研究將發展以粗差偵錯為出發點的演算法，亦即利用Baarda（1967）教授所提的資料蒐評法，發展由空載光達資料中萃取屋頂點的演算法，希望於包含建物資訊的空載光達資料中發展可以確實排除不在屋頂面上光達資料的演算法，萃取屬於屋頂面的點位資訊供後續建物模型重建處理之用。因此，本研究在假設地表建物屋頂面是由三維平面所建構而成的前提之下，且利用建物高程一定高於地面的物空間知識，嘗試由包含建物區範圍內的空載光達資料中，首先利用影像分塊的處理技術由光達資料中先行萃取可能涵蓋建物屋頂區的範圍資訊，接著將此範圍資訊與光達資料進行資料融合之後，利用最小二乘平面擬合的資料蒐評法，進行自動萃取空載光達資料中屬於建物屋頂面的光達點資訊供後續建立建物模型之用；亦即利用資料融合和資料蒐評法發

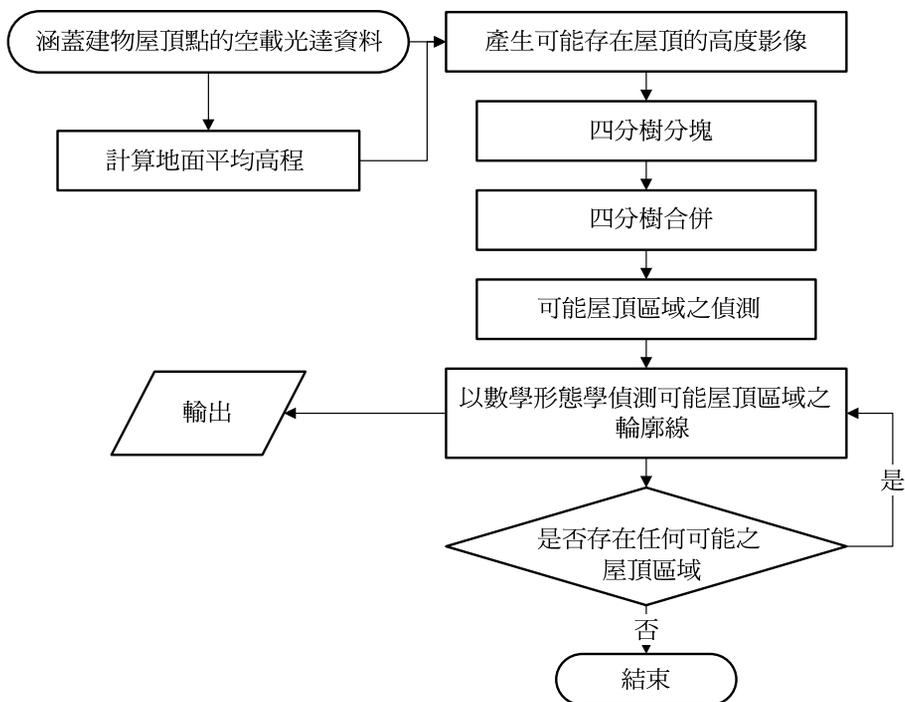
展可以確實排除不屬於屋頂面上光達點資料的最小二乘平面擬合演算法，並精確決定建物屋頂面資訊。

三、研究方法

本研究可分成兩個部份，第一部份是萃取可能涵蓋建物區屋頂面範圍的近似輪廓線；第二部份則是精確萃取輪廓線中的各屋頂面上的光達點。接著依據這兩項工作分別介紹本研究所使用的研究方法。

(一) 萃取可能涵蓋建物區的近似輪廓線範圍

本研究首先萃取可能涵蓋建物區的近似輪廓線範圍，如圖一流程圖所示，由空載光達資料萃取建物輪廓線的工作分成三部份。第一部分產生可能涵蓋建物屋頂的高度影像，第二部份偵測可能涵蓋屋頂的區域，最後萃取此涵蓋建物區域的近似輪廓線範圍。



圖一 由空載光達資料萃取可能屋頂區域輪廓線之流程圖

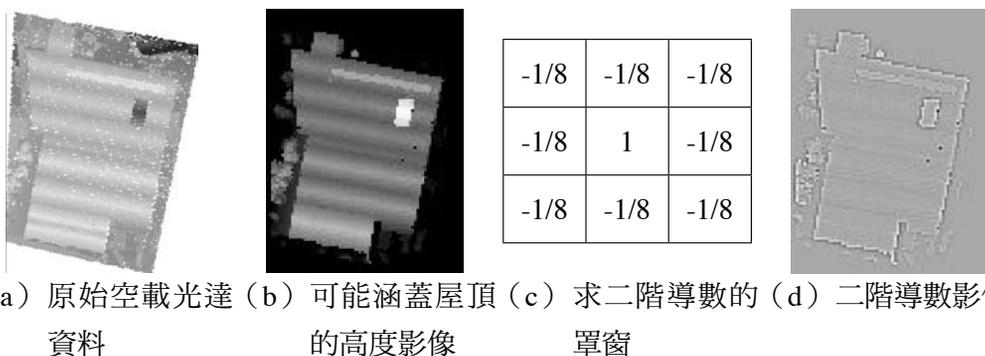
1. 產生可能涵蓋建物屋頂的高度影像

可能涵蓋建物屋頂的高度影像是由資料組中根據高於地面平均高程的光達點、以及網格間距所產生。地面平均高程是由點高程經過升冪排序之後將位於前12%和2%區間的高程點高程取平均得到。之所有去除前2%的高程點乃避免地面平均高程之計算受到雜訊干擾，而取12%和2%區間的高程點高程取平均計算則是假定區域範圍內至少約有10%左右的地面點。接著將所有高於地面平均高程3m以上的光達點高程資料將其轉為影像的灰階值，並依據點坐標和所計算出的網格間距將影像灰階儲存在對應的網格位置中，此影像即稱可能涵蓋建物屋頂區的高度影像。光達點在高度影像中的位置則是由點本身和影像左上角的TWD97坐標與適當的網格間距化算之。光達點在高度影像中的灰階則由點本身的高程和高於地面平均高程的最高點對應灰階255，以及地面平均高程加3m視為最低點並對應灰階1比例換算之。此外，在同一位置上會可能同時存在多個光達點，此時由最後存入該位置的值作為該位置的灰階值；同樣地，也可能位置上並無任何點資料存在，此時灰階用0表示。圖二(中圖二 (a) 表原始空載光達點資料，圖二 (b) 為產生可能涵蓋建物屋頂區的高度影像，此例中的平均地面高程為132.6m，所使用的網格間距為1.5 m，黑色即表示該位置無點資料存在。

2. 可能涵蓋屋頂區域之偵測

既然屋頂不是水平面就是斜平面，因此每一屋頂位置求其高程的二階導數應該為零。將可能涵蓋屋頂區的高度影像和如圖二 (c) 求二階導數的罩窗進行摺積運算則可得到如圖二 (d) 所示的二階導數影像。

如圖一流程圖所示得到二階導數影像，立即運用影像處理技術中的影像分塊和



圖二 原始空載光達資料、高度影像、以及二階導數罩窗與二階導數影像圖示說明

合併技術獲取可能涵蓋屋頂的區域。影像分塊合併法是在四分樹 (quadtree) 資料結構下進行, 步驟如下: (張祖勛與張劍清, 1997)

- (1) 將影像資料分成四分樹的資料結構, 並將其編碼。
- (2) 針對每個子分支進行均調測試, 若其無法達到某種均調程度, 則再將其一分為四, 並再予以編碼。重覆以上均調測試及分塊演算, 直至所有子分支均達到某種均調性為止。此時稱達到某種均調性的所有子分支為 GRID 區塊。
- (3) 使用區域相鄰資料結構, 對相鄰區塊進行均調測試, 把達到某種均調測試的區塊合併。反覆以上合併運算, 直到不再存在可合併之區塊為止, 即完成四分樹分塊合併工作。此時將合併之後所得的區塊稱為 SEED 區域。

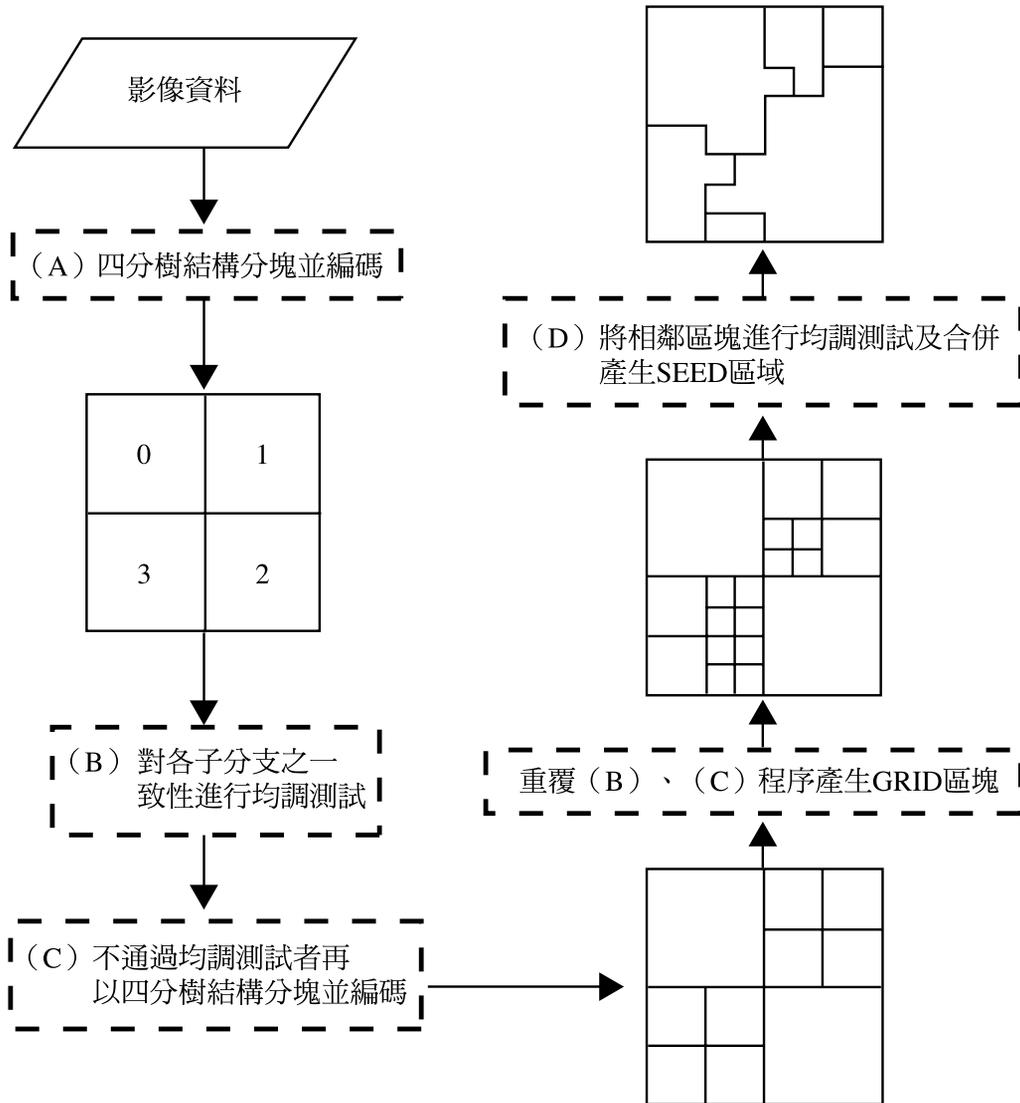
上述步驟圖示說明如圖三所示。依上述方法, 由二階導數影像中萃取可能涵蓋屋頂的區域時, 影像資料即為二階導數影像, 而因為假設位於同一平面的二階導數值應該為零, 也就是如果二階導數影像中各位置的值均接近零, 即可將此區域視為一個平面。因此, 圖三中所謂的均調性就是指影像分塊合併時必須滿足區塊內或是區域內的二階導數值應該為零。

如圖三所示, 首先進行四分樹分塊 (quad-tree splitting) 處理, 將二階導數影像分成GRID區塊, 在這些區塊中其二階導數平均值的中誤差必須小於某一臨界值或該區塊中只包含一個像元。中誤差的臨界值是根據空載光達點的高程精度和誤差傳播原理計算得到。比如, 對應圖二 (c) 單窗中每一位置的高程為 $Z_1 \sim Z_9$, 則二階導數由式 (1) 計算得到。

$$ddH = Z_5 - (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9) / 8 \dots \dots \dots (1)$$

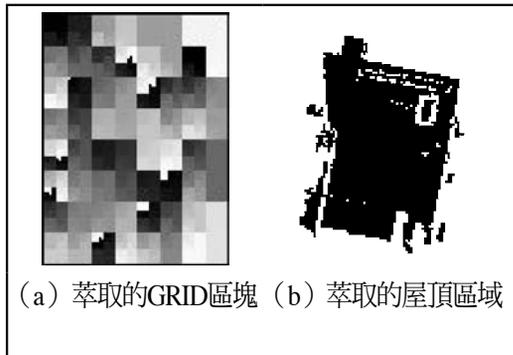
若點高程的中誤差是 σ_h , 則依據誤差傳播原理 ddH 的中誤差為 $0.75 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_h$; 若GRID區塊中有 n 個點, 則其二階導數平均值的中誤差則為 $0.75 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_h / \sqrt{n}$ 。此階段是為將可能涵蓋屋頂區域儘可能偵測出來, 因此將二階導數影像分成GRID區塊時其二階導數平均值中誤差臨界值取3.5倍的 $0.75 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_h / \sqrt{n}$ 。且 σ_h 也取0.2m比空載光達測量高程可達精度0.12m來的大。其構想是將條件放鬆儘可能將涵蓋屋頂的區域偵測出來供後續使用。圖四 (a) 即為利用 $\sigma_h = 0.2m$ 進行四分樹分塊所得的GRID區塊。

接著, 進行四分樹合併 (quad-tree merging)。依據合併之後的平均二階導數值和某一臨界值比較判斷是否合併相鄰的GRID區塊。在將條件放鬆儘可能將涵蓋屋頂的區域偵測出來的構想下, 將此臨界值取為3.5乘上 $0.75 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_h$ 。過程中, 選取GRID區塊中像元數最多的作為主區塊, 一旦發現主區塊的相鄰區塊和主區塊



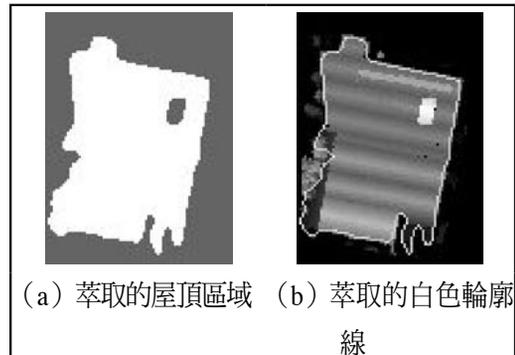
圖三 四分樹分裂合併法

內的二階導數值的平均值小於臨界值則將此相鄰區塊合併，依據已合併區塊再尋找其相鄰區塊，若有相鄰區塊則用相同方式進行合併判斷，同樣的程序一直進行到無相鄰區塊可以合併為止。然後再由未合併的區塊中，由最多像元數作為主區塊進行上述程序以取得可能涵蓋屋頂面的區域，如此反覆直到無主區塊可進行合併為止，如圖三流程圖中所述最後得如圖四（b）顯示合併之後可能涵蓋屋頂面的區域。



(a) 萃取的GRID區塊 (b) 萃取的屋頂區域

圖四 可能涵蓋屋頂區域偵測之圖示說明



(a) 萃取的屋頂區域 (b) 萃取的白色輪廓線

圖五 可能屋頂輪廓線偵測圖示說明

3. 萃取涵蓋屋頂區域的近似輪廓線

因為在偵測的屋頂區域中某些像元內可能並無資料（稱空像元），因此在萃取屋頂區域的近似輪廓線之前，必須運用類似數學形態學中的閉合處理（closing operation）將空像元填滿。此操作具有平滑輪廓和連結狹小中斷並消除區域中空洞的作用。其理論說明如下，意即集合A由結構元素B閉合運作以 $A \bullet B$ 表示並定義為

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \dots\dots\dots (2)$$

換言之，閉合處理就是先由結構元素B擴張集合A；然後緊接著用B侵蝕擴張的結果。本研究中，擴張處理是由非屋頂像元位置的八相鄰只要有一個屋頂元素則進行擴張；而侵蝕處理時則判斷屋頂像元八相鄰中至少有四個非屋頂像元才進行侵蝕。圖五（a）顯示一個屋頂區域經過上述處理的結果，其中黑色表背景、白色表屋頂面區域。很明顯的，空像元和間隙均被填滿。之後因上述的結果很容易轉成二元影像，則輪廓線的萃取很容易的由此二元影像萃取得到。當然，萃取得到的輪廓線可由Douglas-Peucker algorithm（Douglas and Peucker, 1973）進行簡化。萃取得到的輪廓線僅僅是近似輪廓線，將提供給下一步驟進行精確的屋頂點萃取。圖五（b）即為一屋頂區域經過輪廓線萃取的成果。

（二）共屋頂面點萃取和資料蒐評理論

本節將說明如何由依據資料蒐評（data snooping）的最小二乘法原理進行共屋頂面點的萃取。第一小節描述如何由足夠的光達點進行共面點的萃取；然後第二和第三小節將更詳細描述資料蒐評法的原理和如何應用於共面點的萃取。

1. 共面點萃取

首先假定欲萃取的點資料群中僅僅存在一個屋頂面，且此屋頂面在空間中不是水平面就是斜平面，則構成此空間平面的數學函數為

$$Z = aX + bY + c \dots\dots\dots (3)$$

其中 (X,Y,Z) 為點坐標，a,b,c 為表示該平面的參數。

如此一來，區域範圍內屬於同一平面內的點資料都應該滿足方程式

$$Z_i = aX_i + bY_i + c \dots\dots\dots (4)$$

其中 (X_i,Y_i,Z_i) 為點坐標。

但是點位量測難免有誤差，在本研究中假設誤差是僅出現在位置 (X_i,Y_i) 的高程值 Z_i 上, 因此觀測方程式寫成如下所示

$$Z_i + v_i = aX_i + bY_i + c \dots\dots\dots (5)$$

其中 v_i 為高程改正數。

若有 n (>3) 個觀測方程式，則可以用矩陣形式表示如下

$$L + V = AX \dots\dots\dots (6)$$

各矩陣之元素如下所示

$$L = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

其中 L 為觀測值所組成的向量、V 為觀測值的改正數向量、A 為係數矩陣、X 則為待求參數之未知數向量。如果假設觀測值為不等權，且其觀測值的權矩陣 P 由下列矩陣形態表示。

$$P_{ii} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_n \end{bmatrix}$$

如此一來，只要觀測量個數 n 大於 3，即可利用最小二乘原理解算平面參數，

$$X = (A^T P_{ii} A)^{-1} (A^T P_{ii} L) \dots\dots\dots (7)$$

而且後驗的權單位中誤差 $\hat{\sigma}_0$ 等於 $\sqrt{\frac{V^T P_{11} V}{n-u}}$ 可用來評估面擬合精度的好壞，其中 u 是未知數參數等於 3。

2. 資料蒐評理論

資料蒐評是 Baarda (1967) 所提出的一個觀測量偵錯的方法。本研究中利用此理論排除非共面的屋頂點資料。詳細推導可見 (Wolf and Ghilani, 1997)。依據 (6) 和 (7) 式，改正數向量

$$V = AX - L = (AN^{-1}A^T P_{11} - I) L = (AN^{-1}A^T - Q_{11}) \dots\dots\dots (8)$$

依據誤差傳播理論，由上式得改正數的協因數矩陣（權係數矩陣）

$$Q_{VV} = Q_{11} - AN^{-1}A^T \dots\dots\dots (9)$$

若觀測量的平差值為

$$\hat{L} = L + V \dots\dots\dots (10)$$

則

$$Q_{\hat{L}\hat{L}} = AQ_{xx}A^T = AN^{-1}A^T \dots\dots\dots (11)$$

所以改正數的協因數矩陣可以改寫為

$$Q_{vv} = Q_{11} - Q_{\hat{L}\hat{L}} \dots\dots\dots (12)$$

因此改正數向量

$$V = - (Q_{vv} P_{11}) L \dots\dots\dots (13)$$

上式描述平差系統中，改正數由平差中觀測值向量 L 和矩陣 $Q_{vv} P_{11}$ 所決定。而改正數與觀測值真誤差 ϵ_i 的關係可以用

$$V = - (Q_{vv} P_{11}) \epsilon_i \dots\dots\dots (14)$$

表示。由此式可知觀測量的改正數與觀測值真誤差之間的關係，詳細分析見 (李德仁、袁修孝，2002)。其綜合分析得知：

- (1) 任一改正數受到所有觀測值真誤差的影響；
- (2) 某一觀測值真誤差對所有改正數均有影響；
- (3) 單一觀測值真誤差反應到對應觀測量改正數之影響量由 $Q_{vv} P_{11}$ 矩陣中相對應的對角線元素值所決定，意即

$$v_i = - (Q_{vv} P_{11})_{ii} \epsilon_i \dots\dots\dots (15)$$

由上述可知，進行觀測量偵測時，單獨由平差後的改正數判斷是無法真正得到正確的結果，因此進行觀測量偵錯時必須先找到反應在觀測量的真誤差量，而此誤差量可由平差後的改正數和 $Q_{vv}P_{ll}$ 矩陣中相對應的對角線元素值計算而得。

$Q_{vv}P_{ll}$ 矩陣中第*i*個對角線元素稱為觀測量 l_i 的多餘觀測分量 r_i ，且平差的多餘觀測量 r 等於 $Q_{vv}P_{ll}$ 所有相對應的對角線元素值的和，意即 $Q_{vv}P_{ll}$ 矩陣的跡。所以

$$r_i = (Q_{vv}P_{ll})_{ii} \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{且 } r = \sum_{i=1}^n r_i = \text{tr}(Q_{vv}P_{ll}) \dots\dots\dots (17)$$

因此 $v_i = -r_i \varepsilon_i$ ，由此可以看出觀測真誤差反應在改正數的百分比。而改正數中誤差

$$\sigma_{v_i}^2 = (Q_{vv})_{ii} \sigma_0^2 = (Q_{vv}P_{ll}Q_{ll})_{ii} \sigma_0^2 = [Q_{vv}P_{ll}(Q_{ll}\sigma_0^2)]_{ii} \dots\dots\dots (18)$$

，對於觀測量不相關的情形下，此時 Q_{vv} 和 P_{ll} 均為對角線元素，可得

$$\sigma_{v_i}^2 = (Q_{vv}P_{ll})_{ii} (Q_{ll})_{ii} \sigma_0^2 = (Q_{vv}P_{ll})_{ii} \sigma_{l_i}^2 \dots\dots\dots (19)$$

或是

$$\sigma_{v_i} = \sqrt{r_i} \sigma_{l_i} \dots\dots\dots (20)$$

假設觀測量最多只存在一個粗差，若已知觀測量的單位權變方 σ_0^2 和權矩陣為對角矩陣，則可計算出標準化殘差

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{v_i}{\sqrt{r_i} \sigma_{l_i}} = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{v_{ii}}}} \dots\dots\dots (21)$$

式中 $q_{v_{ii}}$ 為 Q_{vv} 矩陣的第*i*個對角線元素。

若觀測量 l_i 不存在粗差， w_i 服從標準化常態分布，即 $w_i | H_0 \sim N(0, 1)$ 。

則可通過標準化殘差的統計檢定來判斷觀測量是否存在粗差。也就是選定一顯著性水平 α_0 （通常為0.1%），由常態分布表得到檢定的臨界值 K_α 。若 $w_i \leq K_\alpha$ 則觀測值不含粗差；若 $w_i > K_\alpha$ 則觀測值可能含有粗差。這就是Baarda所提出的資料蒐評法。

假定單位權變方未知時，則檢定量 t_i 如下式所列，且為符合t分布的檢定量

$$t_i = \frac{|v_i|}{\sigma_t \sqrt{q_{v_{ii}}}} \sim t_{n-u-1} \dots\dots\dots (22)$$

式中，

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{n-u-1} \left(V^T P V - \frac{p_i V_i^2}{r_i} \right) \dots\dots\dots (23)$$

同樣地選定一顯著性水平 α_0 ，由t分布表得到檢定的臨界值 t_α 。若 $t_i \leq t_\alpha$ 則觀測值不含粗差；若 $t_i > t_\alpha$ 則觀測值可能含有粗差。

本研究中假定 σ_0 未知，因此利用 t_i 檢定量進行t測試分離非共面的屋頂點。

3. 萃取完整共屋頂面光達點之策略

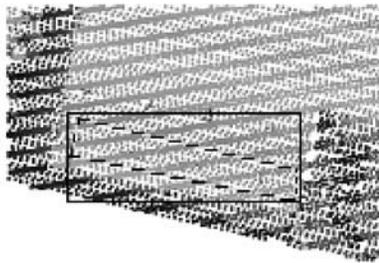
前兩小節已經描述依據資料蒐評法分離非共面屋頂光達點和萃取共面屋頂點的理論，本小節將進一步描述如何萃取完整的共面屋頂光達點。更完整的自動萃取共面屋頂光達點的演算法將在下節中詳細說明。

兩種方式可以用來獲取更完整的共屋頂面光達點。第一種方式是將所有共面和非共面的屋頂光達點含括在一資料組中，然後運用資料蒐評法將非共面屋頂點一一去除，這種方式的困難點在於如何保證資料組中只有一個屋頂面，若是有多個屋頂面存在，就幾乎不可能利用資料蒐評法萃取個別的屋頂面。反之，如果一屋頂面上的一部份的共屋頂面光達點若能事先取得，則將很容易運用資料蒐評法萃取屋頂面完整的光達點。也就是在合併個別點到部份共面屋頂光達點資料組形成完整共面屋頂點的過程中，資料蒐評法可以對於光達點一一進行t測試，將非共面點去除。本研究中將此方式稱為前向選擇策略。以下完整描述整個構思。

利用前向選擇策略合併鄰近共屋頂面光達點時，須先萃取屋頂面上部份的共面光達點，這項工作亦是由四分樹分塊合併演算法所完成，其與第三（一）2節中偵測可能涵蓋建物屋頂區域以及Wang and Tseng（2004）所使用的八分樹分塊合併演算法的原理相似。參考圖三所示，此時均調性的測試是針對區塊內光達點的擬合中誤差是否小於某一臨界值，而不是如第三（一）2節中測試區塊內高度影像之二階導數值是不是趨近於零。

利用四分樹分塊合併演算法萃取屋頂面上部份的共面光達點時，首先將某一輪廓線內（如圖六（a）中黑線虛線所示）的光達資料依據最小二乘法擬合原理進行四分樹分塊處理，亦即先確定包含輪廓線內的空載光達資料最大矩形範圍（如圖六（a）中矩形實線黑色框），然後依據四分樹結構進行分塊處理，如圖六（b）所示，先將矩形黑色框分成0、1、2、3四個子分支。然後對某個子分支進行擬合中誤差的測試，若子分支區塊內的光達點擬合中誤差大於某一臨界值則繼續分塊，一直分塊到GRID區塊內的光達點擬合中誤差不是小於某一臨界值（0.12m）或是點數小

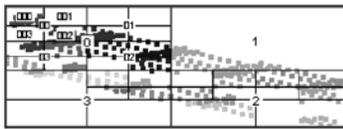
於某臨界值（如6點）。在此臨界值取0.12m比起偵測建物輪廓線時進行四分樹（參考第三（一）2節）分塊的臨界值0.2m來的嚴格的原因是建物輪廓線偵測時希望偵測所得的輪廓線可以盡量涵蓋且不遺漏任何可能之建物，因此所設的臨界值較為寬鬆；而此階段乃真正欲精確萃取屋頂面上的點，因此所設的臨界值則趨於嚴格。圖六（b）即顯示依據最小二乘法擬合原理進行四分樹分塊萃取得到的GRID平面區塊。



(a) 原始空載光達點資料
(不同灰階表不同高程)



(c) 萃取得到的SEED區域
(不同灰階表不同SEED區域)



(b) 萃取得到的GRID區塊
(不同灰階表不同GRID區塊)



(d) 萃取得到的屋頂點

圖六 前向選擇資料蒐評法之圖示說明

接著，依據高程約制和相鄰關係將鄰近的GRID平面區塊合併成SEED平面區域，此即四分樹合併。合併GRID平面區塊過程中，同樣由具有最多光達點的GRID平面區塊視為主區塊，對應主區塊的中心高程可以由主區塊的擬合平面參數計算出，而相鄰區塊的中心高程可以由擬合平面參數計算出，若兩中心高程差小於主區塊一倍的擬合中誤差，則相鄰區塊合併至主區塊，然後再尋找合併後區塊的相鄰區塊進行同樣高程約制判斷，進行合併處理，相同的程序和判斷一直進行到無區塊可以合併為止形成SEED區域。然後再由未處理的區塊中找尋點數最多的GRID平面區塊，再度進行合併處理直到無主區塊可進行合併為止。圖六（c）圖示說明合併相

關的GRID區塊之後所得的SEED區域。

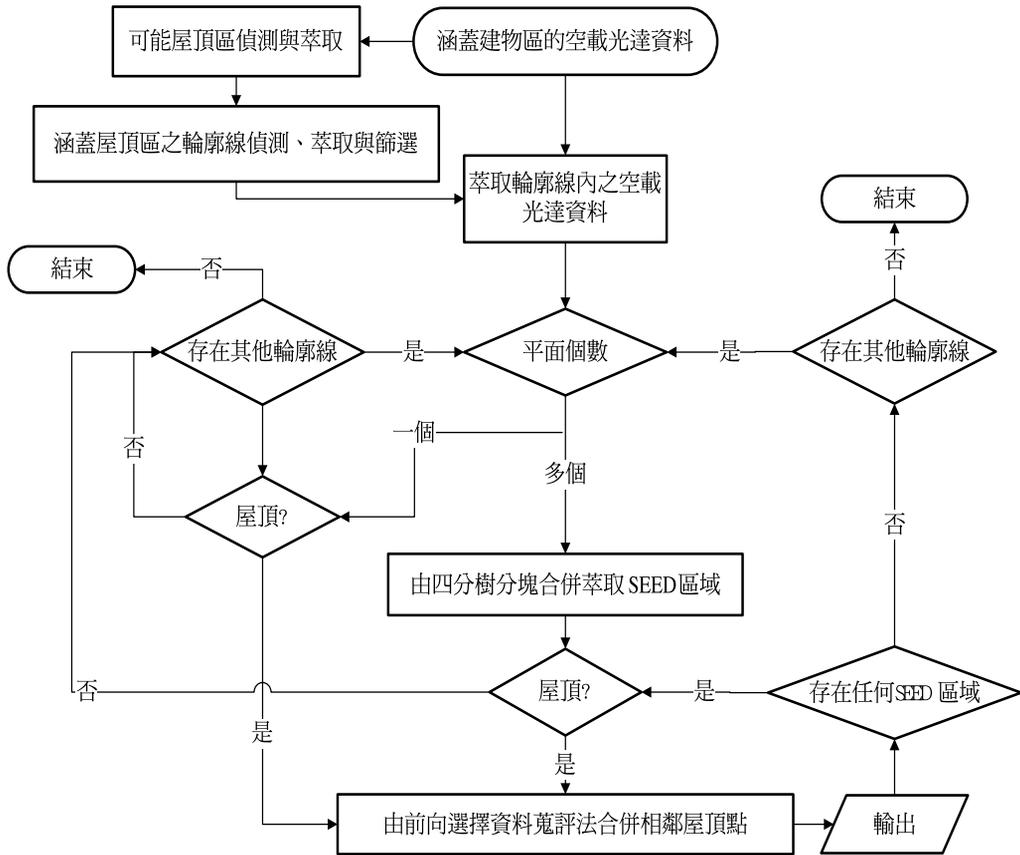
SEED區域獲取之後，隨即利用前向選擇的資料蒐評法進行合併SEED區域鄰近光達點。由具有最多光達點的SEED區域（如圖六（c）中編號3之SEED區域）視為主區域開始合併周圍的光達點，若合併的點位於其餘SEED區域中，這些點將從這些SEED區域中移除，而且這些點也將不再用於其餘屋頂面之萃取。相鄰點是由距離和包含高度和法向量的幾何約制條件所決定。距離約制中要求相鄰點至少和SEED區域中的兩點需小於兩倍的平均點距離，而高程約制則要求相鄰點和其依據SEED區域中擬合參數所計算的高程差需在3倍空載光達測量點可達到的高程精度。此外，從此點和最鄰近SEED區域中兩點所計算的法向量需相似於SEED區域的法向量，也就是兩法向量差須在某臨界值內，如15度。一旦相鄰點符合上述條件則運用資料蒐評法排除非共面屋頂點並將共面點合併成新SEED區域中。每當一群相鄰點合併進新資料組，則依據相同的約制條件判斷新資料組的相鄰點群，然後再利用前向選擇資料蒐評法判斷是否合併相鄰點，直到無相鄰點可合併為止。圖六（d）圖示說明以編號3之SEED區域為主區域進行合併相鄰點之後所得的屋頂點。

上述三小節已經描述合併相鄰共面屋頂點的相關理論和策略，下節中提出本研究的完整演算法。

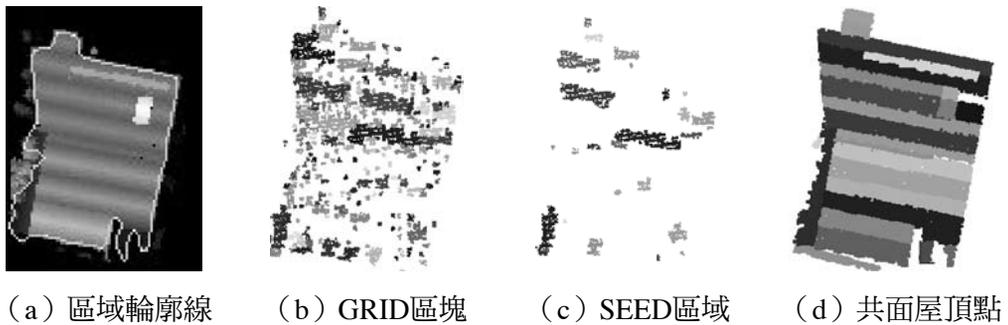
（三）共面屋頂點的自動萃取

前面已說明萃取屋頂區的輪廓線和萃取輪廓線內共面屋頂點的方法，本節將詳細說明如何將前兩節所描述的方法結合起來發展從空載光達點中自動萃取共面屋頂點的演算法。

如圖七流程圖所示，涵蓋建物屋頂區域近似範圍的輪廓線先粗略地利用影像處理的技術從可能涵蓋屋頂面的高度影像偵測得到，此範圍內可能有多個建物屋頂面存在。因近似的輪廓線是由影像處理技術所獲取，有可能許多小輪廓線會存在大輪廓線中，若是如此這些小輪廓線將先被去除。之後，逐一對每一輪廓線取其包含此輪廓線的左上右下矩形範圍。因輪廓線並不精確，需要將其範圍再往外擴張3公尺，使其儘可能將此區域內所有屋頂面上的光達點含括進來進行前向選擇的資料蒐評法。依據第三（二）1節，每一輪廓線所取出的光達點若將其視為等權則其平面擬合的 σ_0 可用來判斷可能存在屋頂面個數的。若 σ_0 大於某一值（如0.12m），則該資料組可能存在多個屋頂面；反之只有一個屋頂面存在。若多個屋頂面存在，則運用如圖六所示的四分樹分塊合併法尋找SEED區域進行前向選擇資料蒐評合併相鄰點的工作。圖八（c）的SEED區域即是由圖八（a）中白色輪廓線所取出的空載光



圖七 自動萃取共屋頂面上光達點之流程圖



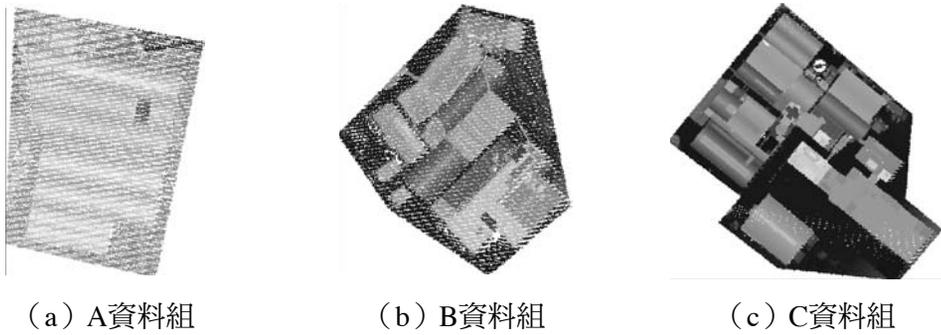
圖八 自動萃取共面屋頂點的圖示流程圖

達點資料進行四分樹分塊合併法後，用來進行前向選擇資料蒐評合併相鄰點所用的SEED區域。圖八（b）則顯示四分樹分塊合併過程中所萃取的GRID區塊。如前所示，由具點數最多的SEED區域依據前向選擇的資料蒐評法用來合併相鄰點時，相鄰關係是由距離和幾何約制判斷之。只要有新的一群相鄰點加入，將會依據新合併的資料組判斷新的一群相鄰點，則再度使用前向選擇的資料蒐評法用來合併相鄰點。相同程序一直進行到無光達點可合併為止。萃取完一屋頂面上的光達點之後，再依據SEED區域中的光達點數選取下一個進行合併相鄰點的SEED區域。相同的程序一直進行到無SEED區域可用來合併相鄰的光達點為止。圖八（d）顯示依據上述演算法由資料組A中所萃取的屋頂面。

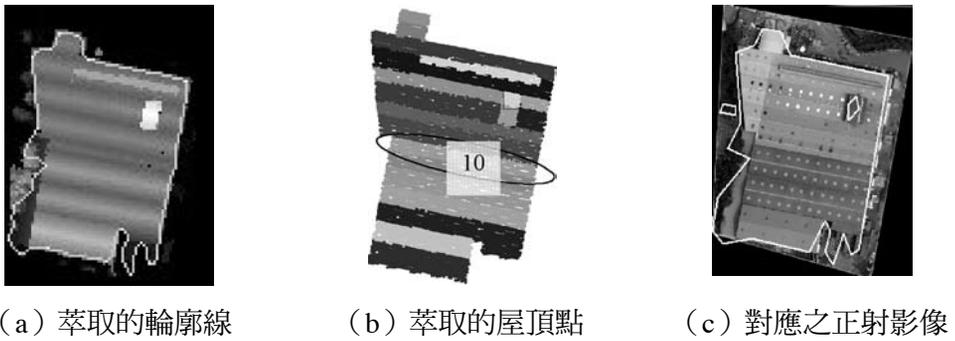
四、結果與討論

為了測試所設計演算法的功效，並瞭解影響演算法的因素，選用行政院內政部”辦理LiDAR測區之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案”中所提供於2004年掃描的的空載光達資料，測試資料範圍在新竹地區工研院內，使用的光達掃描儀器為Leica ALS50、掃瞄時飛機距地面平均高程（above ground level）約1450公尺、視角42度、掃描點密度約1.2點／平方公尺。從中選取三組測試資料。第一組資料A主要是由相鄰的山形屋頂所組成。其餘兩組資料B和C既有相鄰的山形屋頂亦有平頂屋，而且上面還有些附屬屋頂結構物。圖九所示即為此三組測試組資料，為顯示資料，不同灰階顏色表不同高度，且光達點均適度放大，空白處則顯示該處並無光達資料。

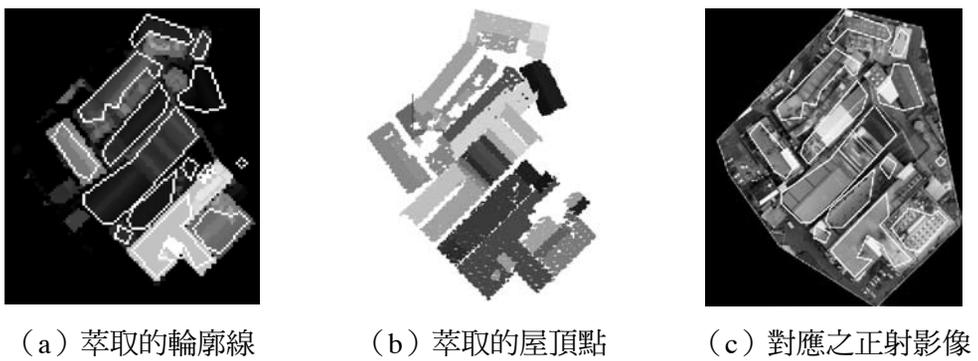
圖十（a）到十二（a）圖示說明原始空載光達資料所產生的高度影像和取出的輪廓線，其中不一樣的灰階表不同的高程，輪廓線則以白色表示。圖十（c）到十二（c）則說明由利用原始光達資料和其對應的航空影像以現有軟體Leica Photogrammetry Suite所製作地面解析力約0.5m的正射影像。圖十（a）到十二（a）中白色輪廓線是利用第三（一）節的方法獲取，圖十（c）到十二（c）中輪廓線對應的正射影像正說明不只屋頂面而且還有其他地物含括在這些萃取到的輪廓線中。圖十（b）到十二（b）則顯示本研究提演算法最後萃取得到的屋頂點。為了視覺化顯示，不一樣的共面屋頂點用不一樣的顏色表示且點的大小均適當放大。三組資料中分別萃取得到21、48與109個屋頂面。從對應的正射影像中可看出在資料組B和C中有很多小的附屬結構物在屋頂上，因此下列討論將集中在每一資料組的主



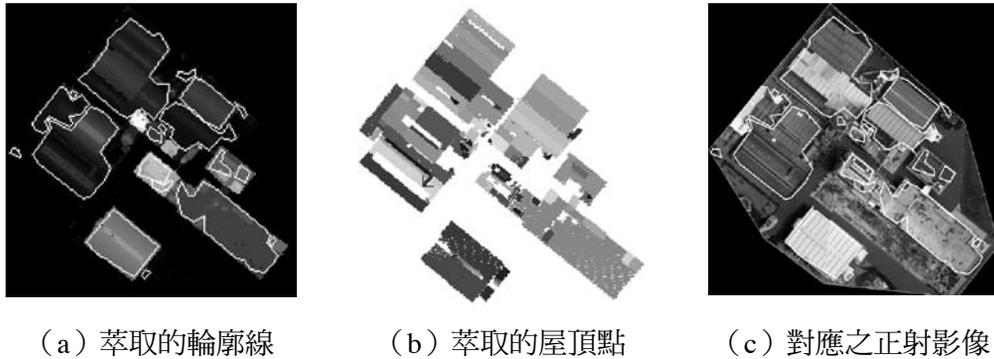
圖九 測試資料組



圖十 A資料組萃取成果



圖十一 B資料組萃取成果



圖十二 C資料組萃取成果

屋頂結構。

三組資料中的主屋頂結構大部份均被正確萃取出來。同時發現若是SEED區域正好橫越屋脊或靠近屋脊，則相鄰點合併進來很容易產生錯誤的結果，通常這樣最後擬合中誤差都會比較大；而若是由兩屋頂面所形成之山形屋，其兩屋頂面近似水平相交亦會得到錯誤的萃取成果，如圖十三即為圖十(b)中黑色框線中一近似水平山形屋之錯誤萃取結果，而此類之擬合中誤差通常亦偏大，此例的擬合中誤差為0.202m。而大部分不完整的萃取都是因為屋頂上具有複雜的附屬結構在屋頂上。此外，由於用物空間的屋頂知識，亦即屋頂面高程需高於地面，這樣的物空間約制也的確除去非屋頂面的光達點。而關於萃取過程中各因素的影響和詳細探討可參考(邱式鴻，2006)。

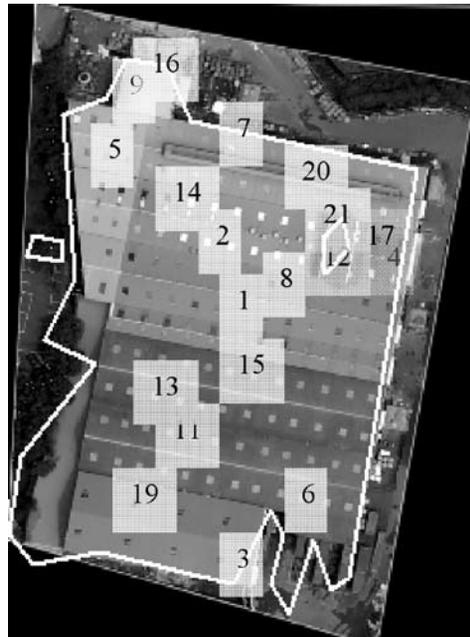
由三組資料組的萃取成果觀察，主屋頂結構的萃取率可達80%以上。而絕大部份無法萃取的主屋頂結構源自於其上有複雜的附屬結構物。而其他少部份則是因為一開始這些建物屋頂面較小以至於進行輪廓線偵測時，無法找到涵蓋這些屋頂點的輪廓線。也就是用來產生可能屋頂的高度影像的網格間距分別是1.5、1.7和1.8 m，此導致許多小屋頂區域的輪廓線無法被偵測出來。因此，如何產生高地面解析力之可能屋頂的高度影像來偵測輪廓線將是未來的一個改進方向。但是從試驗中，大部分的屋頂上的光達點均已被自動萃取出來，雖然演算法還有些改進的空間，不過基本已經證實本法的可行性。

上述是假定使用資料蒐評法萃取共面屋頂點時，單位權變方未知，且選定顯著水平為0.1%，對於光達點一一進行t測試去除非共面點所得之結果。為瞭解本研究所發展之演算法在不同顯著水平下和不使用資料蒐評法進行萃取所得成果之差異，以下以A資料組和所萃取的輪廓線為測試資料，此組資料中有兩近似水平屋頂

面組成之山形屋（圖十（b）中編號10），和一屋脊上隆起之結構（如圖十四編號20之面），若亦視為一屋頂面，則A資料組中共有21個完整之屋頂面。將測試資料分別在（A）0.1%、（B）1%、及（C）5%不同顯著水平下以資料蒐評法進行萃取，和萃取過程中（D）不使用資料蒐評而僅以三倍擬合中誤差為依據判斷去除非共面點的結果進行差異比較。（A）、（B）、（C）、（D）四種方式所萃取得到的面個數分別是21、22、25和21個。四種方式均正確萃取18個屋頂面（見表一和圖十四），四種方式均無法萃取出編號10之山形屋頂（見圖十（b））中的兩個近似水平相交之屋頂面，而（A）、（B）、（D）三種方式均可完整萃取得編號20之屋頂面，但（C）方式則將其萃取為兩不完整屋頂面。

此外，由於（C）方式將顯著水平提升至5%，則正確選擇的機率雖僅有95%，但相對地同樣是小粗差視為無誤的觀測量的機率則隨著顯著性水平的提升而降低，亦即假說測試中犯第二類錯誤的機率降低，因此由表一中正確萃取的屋頂面中可看出各屋頂面在（C）顯著水平5%的擬合精度比起（B）顯著水平1%和（A）0.1%的擬合精度都是不是相同就是較佳；而相同的道理，各屋頂面在（B）顯著水平1%之擬合精度比（C）顯著水平0.1%的擬合精度也是不是相同就是較佳。

而（D）方式是不使用資料蒐評而僅以三倍擬合中誤差為依據判斷去除非共面



圖十四 A資料組正確萃取成果屋頂面編號圖示

表一 測試資料以 (A) 0.1%、(B) 1%、(C) 5% 不同顯著水平下以資料蒐評法進行屋頂面萃取，和 (D) 不使用資料蒐評而僅以三倍擬合中誤差為依據判斷去除非共面點的萃取結果

萃取 方式	A (顯著水平0.1%)		B (顯著水平1%)		C (顯著水平5%)		D (三倍擬合中誤差)	
	點數	擬合中誤差 (單位：m)	點數	擬合中誤差 (單位：m)	點數	擬合中誤差 (單位：m)	點數	擬合中誤差 (單位：m)
1	1452	0.15	1325	0.11	1146	0.08	1435	0.14
2	1214	0.14	1101	0.10	963	0.08	1213	0.13
3	925	0.11	906	0.10	816	0.09	928	0.11
4	261	0.13	247	0.11	218	0.09	256	0.12
5	1157	0.11	1112	0.09	997	0.07	1155	0.10
6	1269	0.13	1253	0.13	1207	0.12	1268	0.13
7	1039	0.14	1052	0.13	983	0.12	1039	0.14
8	975	0.13	1102	0.13	1146	0.13	986	0.13
9	146	0.09	143	0.08	141	0.07	158	0.13
11	1069	0.16	1076	0.15	1035	0.14	1066	0.16
12	135	0.11	131	0.10	110	0.08	135	0.11
13	1009	0.14	1005	0.14	980	0.13	1012	0.14
14	764	0.14	844	0.14	835	0.13	769	0.14
15	846	0.15	889	0.15	972	0.15	851	0.15
16	140	0.14	144	0.13	138	0.13	128	0.14
17	163	0.15	174	0.15	189	0.15	166	0.15
19	838	0.17	849	0.17	847	0.17	835	0.17
21	106	0.15	108	0.15	54	0.11	106	0.15

點的萃取結果，乍看之下跟 (A) 方式結果非常相近，但若是跟 (B) 方式比較，此時顯著性水平為1%，則即可看出資料蒐評法會得到比 (D) 方式較佳的萃取成果，也就是在 (B) 方式中各擬合中誤差有半數以上比 (D) 方式來的小。雖然顯著性水平值愈高，會得到更佳的屋頂面擬合精度，但相對將有更大的機率將正確的

邱式鴻：以資料蒐評法和影像分塊技術自動萃取空載光達資料中的建物共面屋頂點

光達點排除在外，造成萃取的點數減少甚至造成屋頂面萃取不完整（表一中編號21即是此例），因此基於上述考量，可以將顯著性水平設為1%。

而不論用哪一個顯著水平進行萃取，所得到的斜屋頂面間會存在過度萃取而導致越界之現象產生。所謂越界即在斜屋頂面相交處（如圖十五黑色橢圓框線處），屬於另一斜屋頂面上的點因為擬合時殘差異甚小所以亦會被歸入為萃取之斜屋頂面上，圖十五為分別使用0.1%和1%顯著水平下所得屋頂面之透視圖。



圖十五 以資料蒐評法進行屋頂面萃取時分別使用不同顯著水平下所得之結果透視圖

五、結論與展望

本研究在假設屋頂面是三維平面的前提之下，利用建物高程一定高於地面的物空間知識，由包含建物區的光達資料中，利用影像分塊的處理技術先行萃取可能涵蓋屋頂面的區域資訊，接著將所獲取的建物區域資訊與空載光達資料，利用最小二乘平面擬合的資料蒐評法（data snooping）排除不屬於共屋頂面上的光達點資料，並進行自動萃取建物共屋頂面上的光達點供後續之用。經過試驗結果分析與比較，結論與展望如下：

1. 本試驗中，以空載光達資料萃取涵蓋建物屋頂區域範圍所需之四分樹分塊合併臨界值可以透過光達可達到的高程精度和誤差傳播推導得到。因此本研究所提的萃取建物屋頂點演算法中第一階段萃取涵蓋建物屋頂區範圍輪廓線可以直接由空載光達資料中進行自動萃取。
2. 進行萃取建物共面屋頂點之工作時其相關之臨界值之設定均與建物物空間資訊相關，因此也可以進行自動化處理。
3. 由測試資料組的萃取成果觀察，主屋頂結構的萃取率可達80%以上，這對後續建構完整的三維建物模型將有正面之意義。
4. 本試驗中以空載光達點高程高於地面平均高程3m之點雲製作高度影像以偵測建物屋頂區範圍輪廓線。若建物位於斜坡區域或高程起伏大之區域將不適用。由於

目前全台灣地區5m解析度之DEM已經製作完成，因此未來可加入此項資料協助判斷製作高度影像。

5. 空載空達資料是點群資料，較不易精確決定面的邊界，因此未來將結合兩種資料進行融合以萃取更完整的屋頂面資訊進而建置完整的建物模型。

參考文獻

- 王定平、王成機、陳思仁（2004），〈發展國家基本測量〉，《第六屆 GPS 衛星科技研討會論文集》，國立成功大學，頁 1-13。
- 史天元、曾義星、劉榮寬（2003），〈空載雷射掃描與航空測量數據高程精度比較之研究〉，《第二十一屆測量學術及應用研討會論文集》，國立交通大學，頁 195-204。
- 李德仁、袁修孝（2002），《誤差處理與可靠性理論》，武漢：武漢大學出版社，頁 237-240。
- 邱式鴻（2006），〈資料蒐評法應用於空載光達資料中屋頂面資訊萃取之研究〉，《第二十五屆測量學術及應用研討會論文集》，清雲科技大學，頁 1107-1114 頁。
- 邵怡誠、陳良健（2003），〈利用光達資料於 DTM 生產及房屋偵測〉，《第二十二屆測量學術及應用研討會論文集》，國防大學中正理工學院，頁 87-94。
- 陳良健、賴彥中、饒見有（2003），〈結合光達資料與數位空照影像建立三維建物區塊〉，《第二十二屆測量學術及應用研討會論文集》，國防大學中正理工學院，頁 273-280。
- 張祖勛、張劍清（1997），《數字攝影測量學》，武漢：武漢大學出版社。
- 饒見有、陳良健（2002），《利用都市區大比例尺數值航測地形圖重建三維房屋模型》，第二十一屆測量學術及應用研討會論文集，國立交通大學，頁 63-72。
- 陳聖銘、陳泰弘（2002），〈網際網路智慧型大樓災害管理空間資訊系統〉，《國土資訊系統通訊》，第 43 期，<http://ngis.moi.gov.tw/TheFiles/journal/43/009.htm>。
- Axelsson, P. (1999), "Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 138-147.

- Axelsson, P. (2000) , “DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive Models,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (Part B4/1) : 110-117.
- Baarda, W. (1967) , *A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks*, Delft, the Netherlands: Computing Centre of the Delft Geodetic Institute.
- Cobby, D.M., D.C. Mason, and I.J. Davenport (2001) , “Image Processing of Airborne Scanning Laser Altimetry Data for Improved River Flood Modeling,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 56: 121-138.
- Douglous, D. H. and T. K. Peucker (1973) , “Algorithms for Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature,” *Canadian Cartographer* , 10: 110-122.
- Geibel, R. and U. Stilla (2000) , “Segmentation of Laser Altimeter Data for Building Reconstruction: Different Procedures and Comparison,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (Part B3) : 326-334.
- Gruen, A. and R. Nevatia (1998) , “Special Issue on Automatic Building Extraction from Aerial Images,” *Computer Vision and Image Understanding*, 72 (2) : 98-99.
- Haala N. and C. Brenner (1997a) , “Generation of 3D City Models from Airborne Laser Scanning Data,” Paper presented at the Proc. 3rd EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea, Estonia: Tallinn, July 17-19.
- Haala, N. and C. Brenner (1997b) , “Interpretation of Urban Surface Models Using 2D Building Information,” in A. Gruen, E.P. Baltsavias, and O. Henricsson, eds., *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)* , Berlin: Birkhauser Verlag, pp.213-222.
- Haala, N., C. Brenner, and K.-H. Anders (1998) , “3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data,” in T. Schenk and A. Habib, eds, *ISPRS Commission III Symposium on Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels*, Columbus: Ohio, pp. 339-346.
- Haala, N. and C. Brenner (1999) , “Extraction of Building and Trees in Urban

- Environments,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 130-137.
- Helsinki Arena 2000 website : http://www.helsinkiarena2000.fi/3dhelsinki/helsinki/index_vrml.html
- Lee, I. (2002) , *Perceptual Organization of Surfaces*, Doctoral Dissertation, Columbus, OH: The Ohio State University.
- Lemmens, M., H. Deijkers, and P. Looman (1997) , “Building Detection by Fusing Airborne Laser-Altimeter DEMs and 2D Digital Maps,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (3-4W2) : 42– 49.
- Maas, H. G. and G. Vosselman (1999) , “Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 153-163.
- Schenk, T. and B. Csatho (2002) , “Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a More Complete Surface Description,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33: 310-317.
- Steinel , E., J. Kiema, J. Leebmann, and L.H. Bähr (2001) , “Laserscanning for Analysis of Damages Caused by Earthquake Hazard,” Paper presented at the OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Sweden: Stockholm, March 1-3.
- Vosselman, G. and S. Dijkman (2001) , “3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34 (part 3/W4) :37- 44.
- Wang, M. and Y. H. Tseng (2004) , “LIDAR Data Segmentation and Classification Based on Octree Structure,” *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35 (B3) : 308-315.
- Wehr, A. and U. Lohr (1999) , “Airborne Laser Scanning-An Introduction and Overview,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54:68-92.
- Wolf, Paul R. and Charles D. Ghilani (1997) , *Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS*, New York: John Wiley & Sons, Inc.

邱式鴻：以資料蒐評法和影像分塊技術自動萃取空載光達資料中的建物共面屋頂點

Woo, H., F. Kang, S. Wang, and K.H. Lee (2002) , “A New Segmentation Method For Point Cloud Data,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42:167-178.

