

整合空載光達資料及數值地形圖之模型式建物萃取法

Model-based Building Extraction from Airborne LIDAR Data and Digital Topographic Maps

王聖鐸¹ 曾義星² 陳良健³ 陳杰宗⁴ 陳思仁⁵

Sendo Wang Yi-Hsing Tseng Liang-Chien Chen Chieh-Tsung Chen Szu-Jen Chen

摘要

三維城市模型所提供的三維空間資訊，可以廣泛應用在都市計畫、不動產管理、交通規劃、無線基地台規劃、觀光導覽等民生或專業用途。數十年來攝影測量一直是精確量測地物最有效的技術，然而以浮測標逐點量測的方式建置三維城市模型需要龐大的人力，是航測技術的效率瓶頸。本文採用模型式建物萃取法，將傳統的浮測標擴充為浮測模型，使量測的單元不再是抽象的一個點位，而是許多種可伸縮、旋轉、移動的三維模型。即將零維的浮測標拓展到三維實體，除了與浮測標同樣具備可調整的三維位置參數外，還依模型種類增加了各方向的伸縮尺度、空間旋轉等參數，如同一個漂浮在空間中，可移動、旋轉、縮放大小以量測建物的工具，因此稱為浮測模型。相較於過去僅以航照像片作為量度的依據，本文更整合了現有數值地形圖與光達點雲資料：以航照像片作為選取模型的依據，以數值地形圖套合建物的平面輪廓，最後以光達點雲資料套合出建物的頂面資訊。本研究以浮測模型理論為基礎，建置了點、線、面、立體四大類基本元件模型庫，並設計一套程式使操作員可透過人機互動介面依據航照影像選擇模型，將模型底部近似套合至數值地形圖，透過最小二乘模型-影像套合演算法自動計算模型與光達點雲資料的最佳套合。為證明浮測模型同時應用於航照像片、數值地形圖、光達點雲資料後之實用性，本研究選定臺北市部分市區建物為實驗區，利用浮測模型萃建物三維資訊作為測試。測試成果除了以程式展示重建後的三維城市模型外，並與傳統航測地形圖所得資訊相比較；一方面評估浮測模型之逐模型量測方式與傳統航測逐點量測方式之利弊得失，另一方面藉由比較以瞭解浮測模型所能達到之精度。由實驗過程得知，若區域內建物具有類似的基本結構，且可以基本元件模型描述，則使用浮測模型確實可以加快量測的效率，且內含的幾何約制條件能減少人工逐點量測的失誤，所得精度與傳統航測所得相當接近。對於外型較複雜的建物，因需以多個浮測模型套合方能組合為一完整模型，其效率不如傳統逐點量測。惟若考慮後續建置三維城市模型所需，則浮測模型仍具有其潛力。

關鍵詞：建物萃取、光達、數值攝影測量

Abstract

3D city model implies 3D spatial information which can be applied to versatile

¹國立成功大學 測量及空間資訊學系 博士後研究

²國立成功大學 測量及空間資訊學系 教授

³國立中央大學 太空及遙感探測研究中心 教授

⁴內政部 地政司 科長

⁵內政部 地政司 技士

applications such as urban planning, real estate managing, traffic evaluating, radio station locating, tourist guiding etc. Photogrammetry has been considered as the most efficient approach to extracting 3D spatial information in the last few decades. However, the point-by-point measurements of using floating mark has become the bottleneck while reconstructing the 3D city model. Based on the concept of model-based building extraction, we proposed the “Floating Models” for extracting 3D spatial information. The floating mark is expanded to a 3D plastic model which can be moved, rotated, or scaled in the space. By fitting the projection of floating model to the building boundary on images, the shape, size, and pose of the object are also extracted rather than the 3D coordinates of a point. In this paper, the floating model is further modified and applied to topographic maps and lidar data. The model parameters are re-arranged into two groups: plane and height parameters. The plane parameters are determined by fitting the top or bottom boundary of the model to the topographic maps. The height parameters are decided by fitting the top surface of the model to the lidar data. This model-based approach is tested by experiments on extracting buildings in urban area of Taipei. Its efficiency and accuracy are also described.

Keyword: Building Extraction, Lidar, Digital Photogrammetry.

一、前言

模型式建物萃取 (Model-based Building Extraction, MBBE) [Ameri, 2000; Brenner and Haala, 1999; Lowe, 1991; van den Heuvel, 1997; Wang and Tseng, 2004] 的假設是以建物模型來描述三維空間中的目標建物，設法在模型與現有資料(如：航照影像、光達點雲資料、數值地形圖等)之間建立關係，以萃取建物的三維空間資訊。大部分的模型式建物萃取多採取半自動化的程序，其中高階的工作像是：建物偵測、模型選擇、模型編修、及賦予屬性等都由操作員以人機互動方式完成，而電腦系統則是用來執行低階的計算工作如：模型-影像的最佳套合。當模型-影像套合完成後，建物的空間資訊也就隨之確定，這種逐物件 (Object-by-object) 的萃取方式將比逐點 (Point-by-point) 式的量測更有效地提供精確而可靠的成果，大幅減低操作員的負擔。模型式建物萃取的概念與優點雖為專家學者所認同，然而詳細運作模式仍有待確立，因此本文基於「浮測模型」 (Floating Model) 的概念與方法 [王聖鐸, 2005]，拓展到光達資料與數值地形圖，為模型式建物萃取法建立一套完整可行的理論與實作藍圖。

目前三維建物模型的萃取仍以航測之立體製圖技術為主，在類比、解析或數值攝影測圖儀中提供立體影像的觀測系統，配合浮測標的操作，逐點量測待定點三維坐標。浮測標實際上是由左右像上的半標 (Half Mark) 構成，半標的移動需受影像相對方位的約制，必須保持位在同一核面 (Epipolar Plane) 上。如此在物空間形成一個漂浮的點位，調整手輪可移動其平面位置，調整腳盤則移動其垂直位置。當浮測標貼地面時，即代表左右半標位在影像的共軛位置上。延伸浮測標量度的概念為浮測模型，即將零維的浮測標拓展到三維實體，除了與浮測標同樣具備可調整的三維位置參數外，還依模型種類增加了各方向的伸縮尺度、空間旋轉等參數，如同一個漂浮在空間中，可移動、旋轉、縮放大小以量測建物的工具。量測員可以依需要自點、線、面、或立體等四大類模型中選擇適當元件模型，系統會依照模型參數顯示在光達點雲資料、數值地形圖以及重疊像片上，操作員即可進行模型式的量度。萃取成果為一個獨立的模型，並可以視需求按照建構實體

幾何(Constructive Solid Geometry, CSG)的概念與布林運算法則(Boolean Set Operator)組合，以構成建物完整的複合模型。由於模型在設計之初即隱含幾何約制條件，且由地形圖、光達資料以及多張影像同時套合而得，因此可以提高遮蔽區的萃取機率，同時提高量測的可靠度。

以浮測模型萃取建物包括兩大議題：模型設計與模型套合。模型設計的議題在於如何完整建立足以代表各式建物的模型，基於建物外型的多樣性與複雜性，要為所有建物建立其專屬模型是不可能的，較可行的方法是採用 CSG 的概念來設計建物模型。CSG 並非針對整棟建物設計模型，而是依照建物所需詳細程度，組合數個稱為基本元件(Primitives)的簡單形狀實體構成一棟建物的複合模型[Braun, Kolbe, 1995;Laebe and Guelch, 1998;Lang and Foerstner, 1996;Tseng and Wang, 2003;van den Heuvel, 2000]。模型套合的重點則在分析「模型與影像」、「模型與地形圖」、「模型與光達點雲資料」之關係，藉由調整模型的形狀與姿態參數，控制模型在空間中的浮動與變形，連帶改變模型在地形圖及影像上的投影，使其重合於各來源資料中物體的邊緣線，以決定出最佳套合時的模型參數。

二、浮測模型理論

傳統航測製圖系統以量測「點」的三維坐標為基礎，浮測標可以很簡易地表達出三維空間的點位，因此儘管航測製圖儀由類比發展至解析再發展至現今之數位航測工作站，浮測標仍然是航測的基本工具。浮測標在傳統 2 維或 2.5 維的量測相當實用，因為它明確地指出點位唯一的三維坐標。然而當影像含有陰影或遮蔽等不良因素時，將無法同時量測立體像對上的共軛點，同時越來越多的應用需要三維的物件模型，此一逐點量測的方式也會造成作業上的瓶頸。

為了解決快速建模的問題，本研究將浮測標的概念加以擴展，提出了以浮測模型重建三維建物模型的方法。浮測模型本質上就是一個參數式多面體模型，模型設計之初便決定了建物或物件的內部幾何條件。基本的浮測模型可以概分為四大類：點、線、面、立體，每一種類型的浮測模型還可以各自衍生出不同的模型以符合實際作業需要。例如：「線」就包括了「直線段」或「弧線段」；而「面」包括了「矩形面」、「圓形面」、「橢圓面」、「三角面」等等；而「立體」更多樣化，可以是「矩形體」、「圓柱體」、「角椎體」、或「屋脊型建物」等等。儘管這些浮測模型的外型各異，卻都擁有一些共同的特徵，就是一定具有一個基準點，一組姿態參數(Pose Parameters)以及一組形狀參數(Shape Parameters)。基準點與姿態參數

決定了模型在物空間中的位置與姿態，其中基準點的位置由三個平移參數(dX , dY , dZ)來描述，而三個旋轉參數分別代表繞 Y 軸的傾角(t)、繞 X 軸的旋角(s)、以及

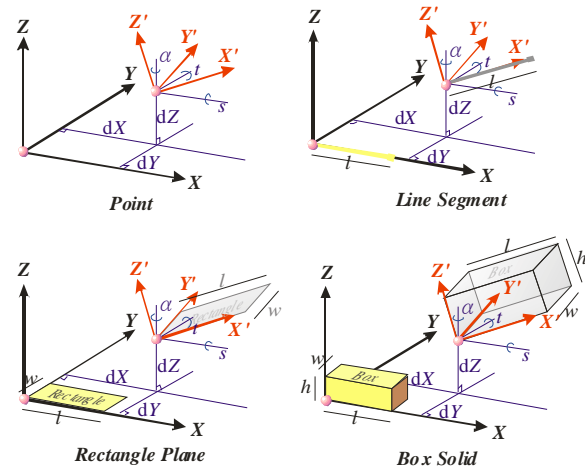


圖 1、更改姿態參數前後浮測模型的改變

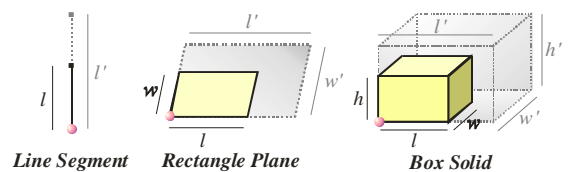


圖 2、更改形狀參數前後浮測模型的改變

繞 Z 軸的方位角(α)。圖 1 以四個浮測模型為例，顯示更動姿態參數後的變化。圖中 X'-Y'-Z' 坐標系統定義在模型空間，而 X-Y-Z 定義在物空間。粉紅色的小圓球代表基準點的位置，黃色的元件模型表示更動參數(dX, dY, dZ, t, s, α)前的位置與姿態，而灰色的元件模型則是代表更動參數後的模型位置與姿態。由圖一可以看出模型就有如漂浮在物空間中，藉由控制這些姿態參數，可以任意地移動或旋轉模型，惟模型的外型與大小並不會因為姿態參數的改變而有所不同。模型的外型與大小是由形狀參數所控制，例如：矩形體模型具有三個形狀參數，分別描述其寬度(w)、長度(l)、以及高度(h)。改變這些參數的值可以修改模型在三個軸向上的大小，但是模型整體的外觀並不會改變。不同外觀的模型會具備不同的形狀參數，例如：屋脊型房屋除了上述三個形狀參數外，還多了一個屋脊高參數(rh)。圖 2 以三個浮測模型為例子，說明更動形狀參數後的變化。「點」浮測模型是一個特例，因為它不具備任何形狀參數。圖中粉紅色的小圓球代表基準點的位置，黃色的元件模型表示更動形狀參數前的模型，而灰色的元件模型則是代表更動形狀參數後的模型。由圖二可知更動形狀參數並不會影響模型的位置或姿態，卻讓模型在外觀上具有某些約制而又保有調整大小的彈性。

三、模型套合

本計畫以浮測模型為基礎，為拓展應用於光達點雲資料及數值地形圖，故將模型參數重新分組為平面參數(Plan Parameters)與高程參數(Height Parameters)。以矩形體模型為例，平面參數包括：模型寬度(w)、模型長度(l)、基準點坐標之(dX, dY)、以及繞 Z 軸的方位角(α)；高程參數則包括：模型高度(h)及基準點坐標之(dZ)，若是屋脊型房屋模型，則高程參數尚包括屋脊高(rh)。如此分組方式有助於簡化原先最小二乘套合計算的複雜程度，而改採兩階段套合：首先利用數值地形圖上建物的輪廓套合出模型之平面參數，再利用光達點雲資料或數值高程模型(DEM)決定高程參數。最後系統會將模型框線投影在所有涵蓋該建物的航照影像上供操作者檢查，必要時可直接調整模型參數加以編修。本文所採用的模型套合概念與流程如圖 3 所示。

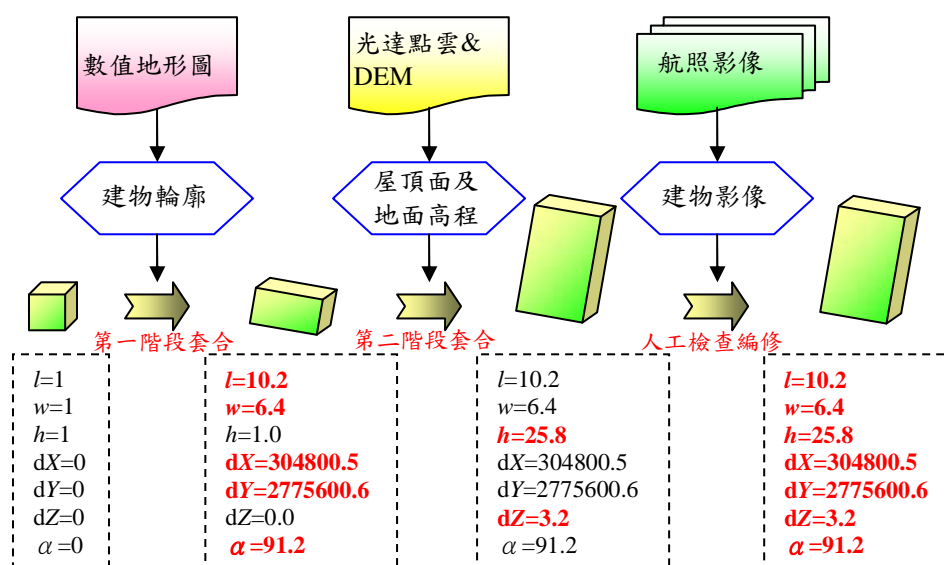


圖 3、模型套合的概念與流程

3.1 平面套合

本研究以數值地形圖作為萃取模型平面參數之依據，套合目標為建物的平面外輪廓線，平面套合之流程如圖 4 所示。由於地形圖中除了建物外，也包含了道路邊緣線、地界、等高線各種地物線及高程、樓層數、圖例、圖樣等各項註記資訊，因此必須先對數值地形圖預作處理。首先將數值地形圖中的建物圖層獨立萃取出來，接著濾除獨立點、線並建立完整封閉的多邊形(Clean & Build)，最後以順時針方向紀錄多邊形各頂點坐標並賦予建物編號。完成預處理的多邊形即可作為模型套合的基礎，操作員依據多邊形的外型挑選適合的模型基本元件，手動調整模型近似套合，即得到精確套合所需的初始參數。本研究修改自 Wang and Tseng[2004]之最小二乘模型-影像套合法，原觀測方程式由影像邊緣線萃取點至模型框線之距離所組成，本研究則是將多邊形邊緣依等間距取樣，由每一個取樣點至對應模型框線之距離組成觀測方程式。

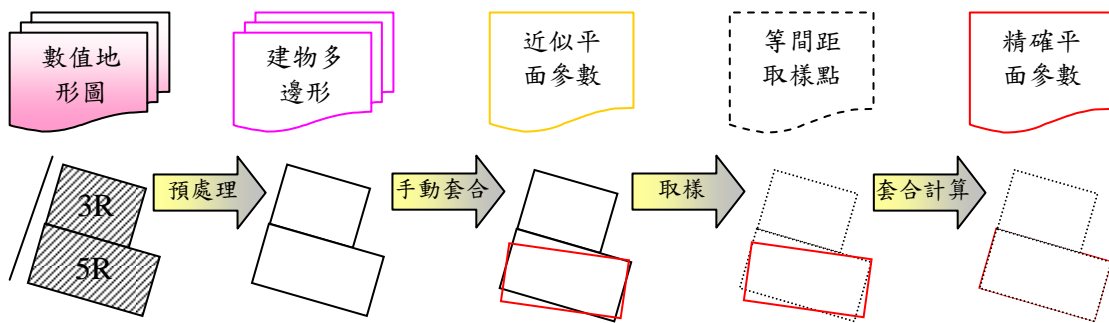


圖 4、平面套合流程

由於模型已手動近似套合，模型框線應接近地形圖上的建物邊緣線。對於每一條模型框線，只有在附近的取樣點才可能是原應落於該框線上的點，因此必須對每一條模型框線設定搜尋環域(Buffer)，只有落於環域內的點才列觀測方程式，環域外的點則剔除不計。假設某模型共具有 i 條框線，圖 5 中的框線 L_i 是由兩角點 v_m 與 v_n 所形成的線段，則由垂直於 L_i 的方向向外延伸 w_{buffer} 寬度，所涵蓋的矩形區域即為該框線 L_i 的搜尋環域。若有一取樣點 $T_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ 落於環域之內，即視為觀測點，標記為 T_{ij} ，表示是第 i 條框線環域內的第 j 個觀測點。 w_{buffer} 決定了環域的大小，由於環域內所有的取樣點都會被視為套合的依據，因此環域的大小也決定了模型套合的搜尋範圍。若設定較大的 w_{buffer} 值，則模型在地形圖上的搜尋範圍較大，一方面增加了涵蓋到確為該邊緣線取樣點的機率，但另一方面也增加了納入非該邊緣線取樣點的可能性。而較小的 w_{buffer} 值使模型的搜尋範圍較小，雖然減少了涵蓋到正確取樣點的機率，但同時也可能減少了一些非該邊緣線取樣點的影響。因此 w_{buffer} 值的決定，必須考慮到手動套合的精確度。比較可靠的作法是採取漸縮式策略，先給予較寬鬆的搜尋環域，以求盡量涵蓋到所有正確的邊緣線取樣點，隨著套合的迭代計算，逐步縮減搜尋環域 w_{buffer} 值，以逐步減少非邊緣線像元的影響。

平面套合的目標是調整模型使其底面框線符合地形圖上建物的邊緣線，因此觀測的對象是環域內觀測點 $T_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ 到框線 L_i 的垂直距離 d_{ij} ，

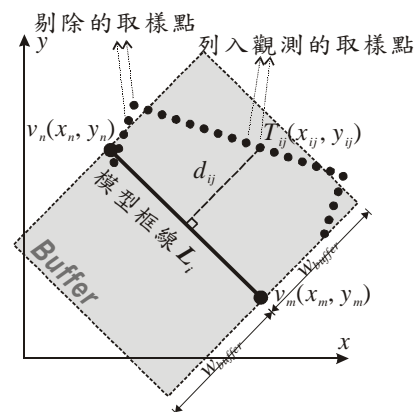


圖 5、搜尋環域

公式如下：

$$d_{ij} = \frac{|(y_m - y_n)x_{ij} + (x_n - x_m)y_{ij} + (y_n x_m - y_m x_n)|}{\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}} \quad (1)$$

其中 $v_m(x_m, y_m)$ 與 $v_n(x_n, y_n)$ 是單位模型的頂點坐標，透過形狀參數、姿態參數轉換到物空間坐標系統，因此 x_m, y_m, x_n, y_n 實為模型形狀參數與姿態參數的函數，亦即： $d_{ij} = F_{ij}(P_S, P_P)$ ，其中 P_S 代表模型的形狀參數、 P_P 代表模型的姿態參數。每一種模型具有不同的模型參數，以矩形體為例，形狀參數 P_S 包括 (l, w, h) ，姿態參數 P_P 包括 (dX, dY, dZ, α) 。由於此處僅套合模型的底部面以求取平面參數，因此對於矩形體底面的四條邊緣線而言，每一個位於搜尋環域內的邊緣線萃取像元都可以列出一條觀測方程式：

$$d_{ij} = F_{ij}(l, w, h, dX, dY, dZ, \alpha) \quad (2)$$

當模型參數完全正確時，浮測模型等於是三維空間中物體的外框線，其底面框線理應完全重合於地形圖上的建物邊線，因此取樣點到框線距離的期望值 $E(d_{ij})$ 為零。但受到模型參數、航測製圖等誤差影響，造成取樣點至模型框線間的垂直距離 d_{ij} 不為零，因此最小二乘平差的目標就是讓所有距離的平方和 q 為最小：

$$q = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (d_{ij})^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (3)$$

其中 i 代表模型的框線編號， $i=1 \sim I$

j 代表搜尋環域內的取樣點編號， $j=1 \sim J$

為求得距離平方和 q 為最小時的參數，可將(3)式對所有未知參數偏微分，並令其為零後求解：

$$\frac{\partial q}{\partial p_u} = 0 \quad ; \text{其中 } p_u \text{ 為未知參數} \quad (4)$$

由於(2)式為非線性函式，直接代入(3)及(4)式後，並不容易求解出未知參數。故採用牛頓漸進法以最小二乘計算求解非線性函式的解，而以一階泰勒展開式展開為參數初始值與參數增量的線性函式：

$$0 + v_{ij} = \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial l}\right)_0 \Delta l + \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial w}\right)_0 \Delta w + \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial dX}\right)_0 \Delta dX + \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial dY}\right)_0 \Delta dY + \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial dZ}\right)_0 \Delta dZ + \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial \alpha}\right)_0 \Delta \alpha + F_{ij0} \quad (5)$$

其中 v_{ij} 是觀測量 d_{ij} 與期望值 0 之間的改正數

F_{ij0} 是函數 F_{ij} 的近似值

$\left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial l}\right)_0, \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial w}\right)_0, \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial dX}\right)_0, \dots$ 是函數 F_{ij} 對模型參數偏微分後的各項係數

$\Delta l, \Delta w, \Delta dX, \dots$ 是各項未知參數的增量

每一條模型底面框線的搜尋環域內的每一個取樣點，都可以列出一條如(5)式般線性化後的觀測方程式。假設共有 m 條觀測方程式， n 個未知參數，則將所

有的觀測方程式聯立起來，可以改寫為矩陣形式的： $\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{X} - \mathbf{L}$ ，其中 \mathbf{A} 是函數 F_{ij} 對未知參數偏微分後的係數矩陣，共有 $m*n$ 個元素， \mathbf{X} 是各項未知參數增量的 $n*1$ 向量， \mathbf{L} 是函數 F_{ij} 近似值的 $m*1$ 向量， \mathbf{V} 則是觀測量改正數的 $m*1$ 向量。

因此(3)的目標函式可以表達為： $\mathbf{q} = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 為最小，其中 \mathbf{P} 是觀測量的權

矩陣，其對角線元素 p_{mm} 代表每一個取樣點在平差中所佔的權值，基於觀測間獨立不相關的假設，對角線外的其餘元素均設為零。平差計算的過程，是先將未知參數的初始值，也就是手動近似套合後的模型參數，代入計算 \mathbf{A} 矩陣與 \mathbf{L} 向量，而後由 $\mathbf{X}=(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{L}$ 計算出未知參數的增量向量 \mathbf{X} ，將未知參數的增量分別加到各初始值後，重新代入計算新的 \mathbf{A} 矩陣與 \mathbf{L} 向量，再同樣由 $\mathbf{X}=(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{L}$ 計算出新的未知參數增量向量 \mathbf{X} 。如此反覆迭代運算，直到所有未知參數的增量均小於預先設定的門檻值，表示平差計算收斂，因此加上最後一組增量的參數即為最佳套合解。反之若迭代計算始終無法得到唯一的一組低於門檻值的參數解，並超過預先設定的迭代次數，則表示平差計算發散，無法求解未知參數。

在每一次迭代之後，都可以由觀測量的改正數向量 \mathbf{V} 與權矩陣 \mathbf{P} 計算出單位權中誤差值 $\hat{\sigma}_0$ ，該值可視為 LSMIF 套合的一種精度指標。當 $\hat{\sigma}_0$ 越大，表示環域內所有的取樣點到對應框線的距離平方和較大，意味地形圖與模型之間的吻合度較低。相反地當 $\hat{\sigma}_0$ 越小，即環域內所有的取樣點到對應框線的距離平方和較小，意味地形圖與模型之間的吻合度較高，套合成果可能較值得信賴。但需要特別注意的是： $\hat{\sigma}_0$ 同時會受到環域大小的影響，對於相同地形圖、相同模型投影位置而言，較大的環域會納入較多離框線較遠的取樣點，因此會導致 $\hat{\sigma}_0$ 較大。以本研究所採用的漸縮式環域設定為例，由於每次迭代時均縮減環域寬度，等於是逐步淘汰距離較遠的取樣點，單位權中誤差亦隨之降低。因此以 $\hat{\sigma}_0$ 值評估套合成果時，應同時考慮環域的寬度與觀測點數目。

3.2 計算高程

本研究以光達點雲資料作為高程套合的依據，套合目標是調整模型的高程參數，使其光達點雲恰落於模型的頂面及側面上。吾人故可以比照平面參數套合的方式，對模型的每一個面設定一箱型的搜尋環域，如此一來，觀測的對象就是環域內第 j 個光達掃瞄點 $T_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ 到模型第 i 面 F_i 的垂直距離 D_{ij} ，再以最小二乘平差計算套合後的參數。此作法等於是在三維空間中進行點雲的最小二乘平面擬合計算，且該平面方程式是由模型參數組成，線性化的過程必須對未知數偏微分，因此計算的複雜度會大幅提昇。考慮到實用性與時效性，本研究改採自點雲直接計算模型頂面高程之方法，計算流程如圖 6 所示。

在經過第一階段平面參數套合後，模型的平面位置已經相當明確，可以直接將模型底面設定為光達點雲資料的搜尋範圍，唯有 X - Y 坐標在模型底面範圍內者方納入建物高計算。而搜尋範圍外近距離內之點雲，則可作為計算地面高(基準點高程)dZ 之參考。若能取得 DEM 資料，亦可自 DEM 直接內插計算地面高。

接下來依屋頂類型不同而有不同計算方式。矩形體建物為平頂，其高程參數僅一個建物高 h ，可直接計算範圍內點雲高程平均值作為建物高 h 之解。惟需注意若平均值之中誤差過大，表示點雲高低分佈差異大，應剔除最高

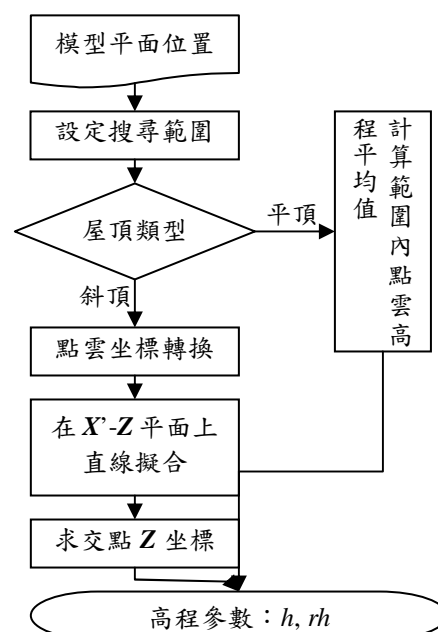


圖 6、計算模型高程流程

與最低點後重新計算平均值。屋脊型建物與斜頂建物因屋頂面為斜面，具有兩個高程參數：一為建物高 h 、另一為屋脊高 rh ，故無法以平均值求解。為降低三維空間套合計算的複雜程度，本文採取的策略是利用已套合出的旋轉角 α ，將搜尋範圍內的點雲由 X - Y - Z 坐標系統轉換至 X' - Y' - Z' 坐標系統，其中 X' 軸垂直於屋脊方向而 Y' 軸平行於屋脊方向。再將點雲投影到 X' - Z' 平面上，即可以二維平面上的直線擬合套出屋頂的兩條斜邊，進而解算屋脊高 rh 與建物高 h 。

四、實驗測試

本研究擬整合 1/1000 數值地形圖、空載光達資料及數位航照，以模型式建物萃取法進行三維城市模型重建。為驗證所提方法之可行性，選定臺北市南北帶狀約 500 公頃作為測試區，如圖 7 中的 C 區塊，其涵蓋商業區、住宅區及工業區，並包含主要地標：臺北市政府及臺北 101 大樓，相信測試區內的建物形態已具有足夠代表性。測試所使用的 1/1000 數值地形圖已經過 3.1 節所述之預處理，萃取出建物多邊形並賦予建物編號。數位航照則是以 Vexcel UltraCam D 像機拍攝，像主距為 101.4mm，像幅為 7500 像元*11500 像元，像元尺寸為 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ ，平均飛行高度約為 1930m，地面解析度約為 0.17 m/pixel。由於空載光達掃瞄資料未能於本文截稿前及時取得，故本研究暫以模擬點位代替，僅驗證流程可行。

本研究所使用之模型式建物萃取程式是採用 Borland C++ Builder 自行開發，其操作介面可同時顯示數值地形圖、空載光達點雲、數位航照及三維框架模型，並具備基本元件模型庫、可調整模型參數、模型套合計算等功能，如圖 8 所示。以左上視窗的數值地形圖為出發點，右上視窗會根據地形圖所顯示位置自動載入航照影像，左下視窗同樣依據地形圖顯示位置自動載入並顯示 DEM 或光達點雲資料。操作者可透過工具列選取適當的模型，給予初始模型參數後，系統即將模型顯示在地形圖及航照影像視窗，操作者可透過更改模型參數來調整模型近似套合，最後按下「套合模型」的按鈕，系統即自動進入兩階段最佳套合計算，求解最佳套合時之模型參數。操作員可透過模型在航照影像上之投影檢核套合計算之成果，必要時可再次修改模型參數使模型框架投影能完全與影像上的建物邊緣線重合。測試區內建物之外觀相當多樣，通常無法僅靠一個模型就完成建物重建，以

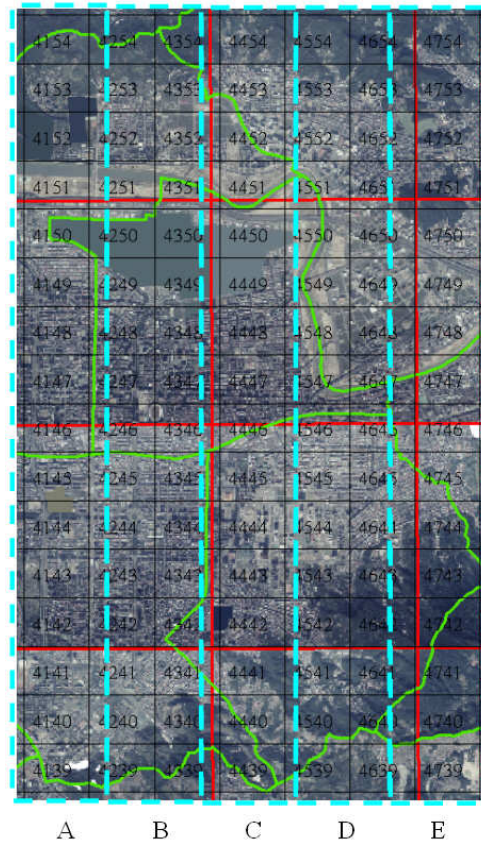


圖 7、測試區範圍

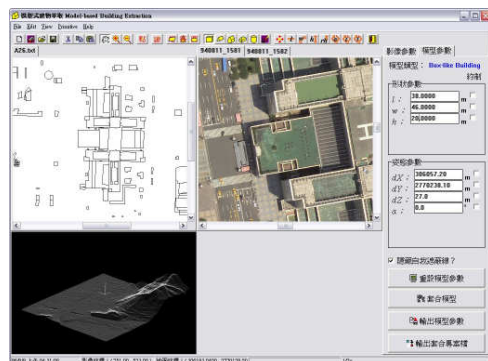


圖 8、模型式建物萃取程式介面

圖 8 中的臺北市政府大樓為例，需要 18 個矩形體模型才能完整重建。儘管每個模型之套合計算通常不需一秒即可完成，但操作員必須選取適當模型並賦予初值，按照由大模型至小模型、由基底模型至頂上模型的順序一一進行萃取，並檢查相鄰模型之位相關係，因此越複雜的建物需要越多操作時間，以本例而言，需時約 45 分鐘。

為驗證套合後模型之精度，本文以測試區內 10 棟建物之屋頂角點作為檢測依據，依套合後的模型參數換算出各角點坐標，與原先航測製圖所量測得的角點坐標比較，其差異量統計如表 1。檢視其中差異量較大者，其成因如下：(1)錯用模型，例如：建物為梯形而錯以矩形萃取；(2)人工量測女兒牆外緣而模型套合至內緣與外緣之間；(3)航測製圖之人工量測誤差；(4)套合時搜尋環域納入其他多邊形之邊緣線。

表 1、屋頂角點坐標差異統計表

航測坐標-套合坐標	ΔX	ΔY	$\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$
最大值 (m)	0.983	0.723	1.220
最小值 (m)	-0.733	-0.985	1.228
絕對值之平均值 (m)	0.291	0.223	0.367
平均值(m)	0.161	0.070	0.176
標準差 (m)	0.3296	0.2770	0.4305

五、結論

本文提出一套以浮測模型為基礎之模型式建物萃取法，整合數值地形圖之建物平面資訊與空載光達掃瞄資料之建物高程資訊，並以數位航測影像作為檢核成果與人工編修之依據。本方法具有以下特點：

1. 操作員只要自各種預先定義的基本元件模型庫中挑選最適合的一種進行量測，就能萃取屬於該類型的建物，而不再侷限於逐點量測。
2. 操作員僅需調整模型近似套合至地形圖，即可交由電腦自動計算最佳套合時的模型參數。
3. 浮測模型內部的幾何約制也確保了萃取成果的幾何特性，如：平行、正交、等長等。

而在實驗測試的過程中也發現模型式建物萃取法的一些缺點：

1. 由於浮測模型隱含內部幾何約制條件，若操作員選錯模型，不論如何調整都無法完全套合。
2. 由於必須以參數描述模型，因此不規則的多面體便無法設計為一個浮測模型，而必須切割後再分部進行量度，反而降低模型重建效率。
3. 無法萃取具有曲面之建物。
4. 元件模型之間需再加入外部約制條件，才能確保合併後的建物模型無誤。

綜上所述，若區域內建物具有類似的基本結構，且可以基本元件模型描述，則使用浮測模型確實可以加快量測的效率，且內含的幾何約制條件能減少人工逐點量測的失誤，所得精度與傳統航測所得相當接近。對於外型較複雜的建物，因需以多個浮測模型套合方能組合為一完整模型，其效率不如傳統逐點量測。惟若考慮後續建置三維城市模型所需，則浮測模型仍具有其潛力。

六、致謝

本研究承蒙內政部「三維數位城市模型先期建置工作」計畫案資助，謹申謝忱。

七、參考文獻

1. 王聖鐸, 以浮測模型理論萃取三維空間資訊-以建物重建為例, 測量及空間資訊學系. 2005, 國立成功大學: 台南市. p. 168.
2. Ameri, B. *Feature Based Model Verification (FBMV): A New Concept for Hypothesis Validation in Building Reconstruction. Proceedings of The XIXth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.* 2000. Amsterdam.
3. Braun, C., Kolbe, T.H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A.B., Foerstner, W., and Plumer, L., *Models for Photogrammetric Building Reconstruction.* Computers & Graphics, 1995. **19**(1): p. 109-118.
4. Brenner, C. and Haala, N., *Towards Virtual Maps: On the Production of 3D City Models.* GeoInformatics, 1999. **2**(5): p. 10-13.
5. Laebe, T. and Guelch, E. *Robust Techniques for Estimating Parameters of 3D Building Primitives. ISPRS Commission II Symposium.* 1998. Cambridge.
6. Lang, F. and Foerstner, W. *3D-City Modeling with a Digital One-eye Stereo System. Proceedings of The XVIIIth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.* 1996. Vienna.
7. Lowe, D.G., *Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images.* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991. **13**(5): p. 441-450.
8. Tseng, Y.-H. and Wang, S., *Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003. **69**(2): p. 171-180.
9. van den Heuvel, F.A. *Efficient 3D-Modeling of Buildings Using a Priori Geometric Object Information.* in SPIE. 1997.
10. van den Heuvel, F.A. *Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. Proceedings of The XIXth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.* 2000. Amsterdam.
11. Wang, S. and Tseng, Y.-H., *Least-squares Model-image Fitting for Building Extraction from Aerial Images.* Asian Journal of Geoinformatics, 2004. **4**(4): p. 3-12.