

以浮測模型套合多重來源資料重建三維建物模型

3D Building Modeling by Fitting Floating Models to Versatile Data Sources

王聖鐸 ¹	曾義星 ²	陳良健 ³	陳杰宗 ⁴	許淑珍 ⁵	陳思仁 ⁶
Sendo Wang	Yi-Hsing Tseng	Liang-Chien Chen	Chieh-Tsung Chen	Hsu-Chen Hsu	Szu-Jen Chen

摘要

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。光達雖可快速建立數值地表模型，但點雲數量龐大，且不易對應明確地面點，用於重建建物模型亦有困難。本文採用模型式建物重建法，將傳統的浮測標擴充為三維浮測模型，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，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，故稱為浮測模型。本文所提之浮測模型法整合了數值地形圖、光達點雲、數值高程模型等可能取得之量測資料，依其特性發展套合模式，並建置矩形體、屋脊型房屋及多邊形稜柱體等三種基本元件模型。本研究已利用 C++ 程式語言開發一套建物模型重建操作系統，提供人機互動介面及最小二乘模型套合演算法，半自動計算模型與各項來源資料之最佳套合。為證明本文所提浮測模型法之實用性，本研究選定台北市市區約 500 公頃區域，以 1:1000 比例尺數值地形圖、40m 網格數值高程模型、10 點/m² 光達點雲、17cm/pixel 地面解析度航照像片作為測試資料。重建成果除了以自行開發之 OpenGL 程式展示外，並與傳統航測地形圖所得資訊相比較。

關鍵詞：光達、建物重建、數值攝影測量、浮測模型。

Abstract

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

¹ 台灣世曦工程顧問股份有限公司 地理資訊部 正工程師

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 約聘研究員

⁶ 內政部 總務司 專員

moved, rotated, or scaled in the space. By fitting the projection of floating model to the building, 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. This model-based approach is tested by reconstructing buildings across 500 *hectare* of urban area in Taipei. There are 38 buildings are selected to examined the correctness and accuracy of the results.

Keywords: LiDAR, Building Reconstruction, Digital Photogrammetry, Floating Models

一、前言

模型式建物重建(Model-based Building Reconstruction, MBBR) (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重建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-資料的最佳套合。當模型-資料套合完成後，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。模型式建物重建的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(王聖鐸, 2005)，拓展到光達資料與數值地形圖，為模型式建物重建法建立一套完整可行的實作藍圖。

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。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。量測員可以依需要選擇適當元件模型，系統會依照模型參數投影在光達點雲資料、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、光達點雲資料及

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」等；而「立體」更多樣化，可以是「矩形體」、「圓柱體」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。 $X'-Y'-Z'$ 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。可以清楚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說明更動形狀參數後的變化，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

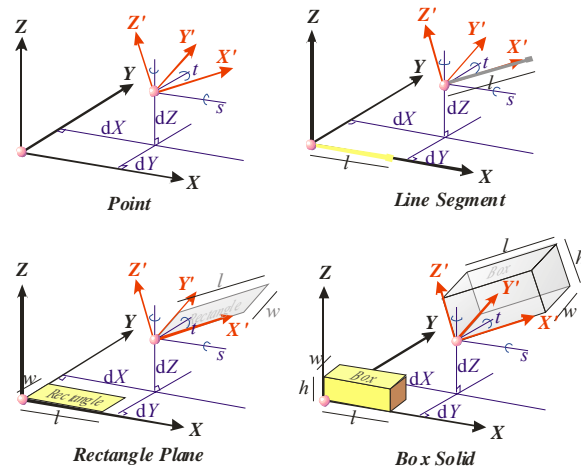


圖 1、浮測模型的姿態參數

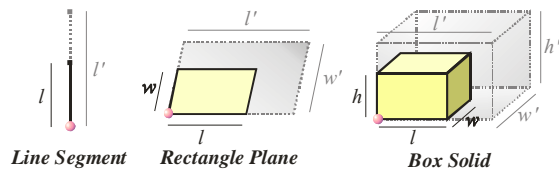


圖 2、浮測模型的形狀參數

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。 $X'-Y'-Z'$ 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。可以清楚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說明更動形狀參數後的變化，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。為符合重建本地建物模型所需，本研究採用三種浮測模型：矩形體、屋脊型房屋及多邊形稜柱體，如圖 3 所示。其中多邊形稜柱體無法以參數完整描述，只是以多邊形節點座標描述其頂面及底面外邊線，故其形狀參數僅有屋頂高度 (h)，而姿態參數僅有基準點三維座標 (dX, dY, dZ)。主要應用於無法以矩形體或屋脊型房屋重建之建物，如：圓弧狀邊線、不規則多邊形、邊線曲折太多之建物。

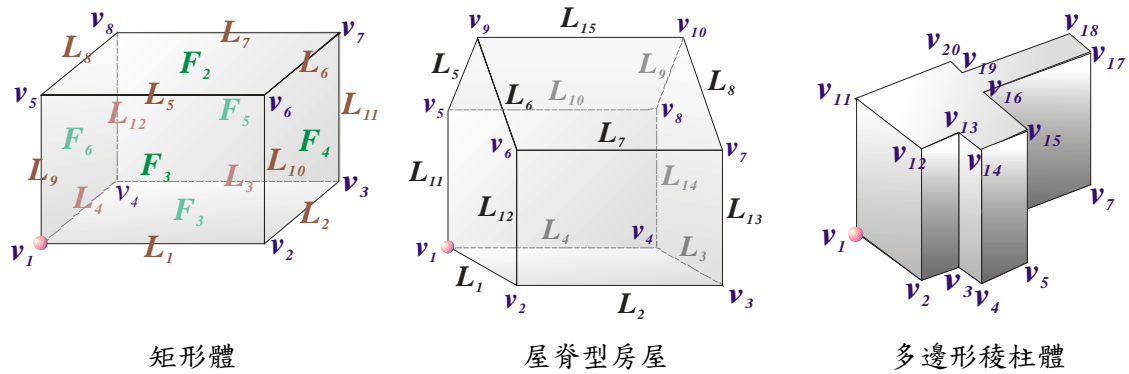


圖 3、本研究採用之三種浮測模型

三、模型套合

為將浮測模型拓展應用於多重來源資料，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)、基準點之平面坐標 (dX, dY)、以及繞 Z 軸的方位角 (α)；高程參數則包括：模型高度 (h) 及基準點坐標之地面高 (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及數值高程模型 (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。模型與多重來源資料套合之概念如圖 4 所示。

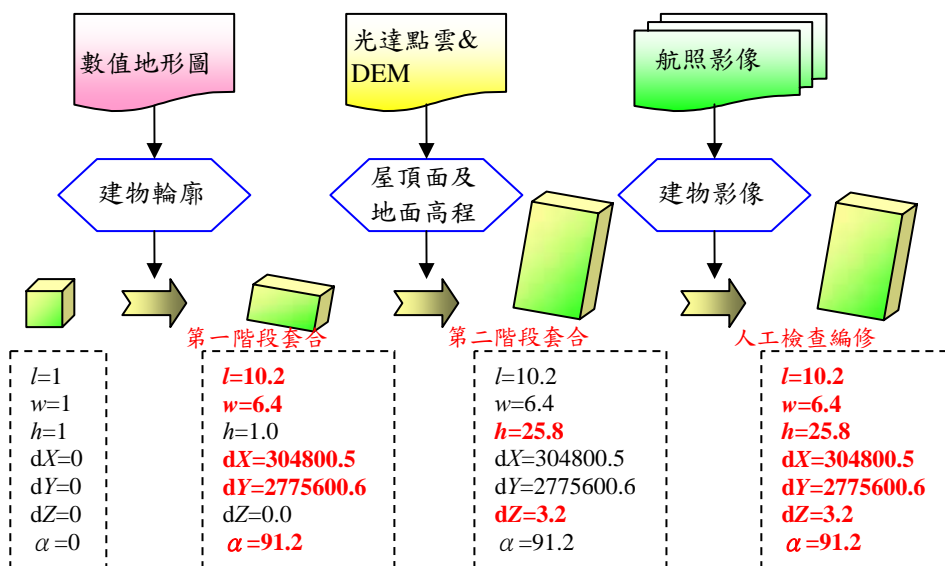


圖 4、模型套合多重來源資料之概念

3.1 平面套合

本文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 5 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)。由於本研究所開發系統僅能疊加模型而無法挖除模型，故需檢查是否有多邊形包含其他多邊形之情形：若內部多邊形高於外部多邊形，例如：屋頂之樓梯間，可透過疊加模型表達，則多邊形無需修正；若內部多邊形低於外部多邊形，例如：具有天井的房屋，模型疊加後會將天井填滿，故必須將外部多邊形切開，合併內部多邊形成一個新的內部挖空的多邊形。圖 6(a)由左至右顯示天井處理前多邊形在數值地形圖、航照影像及三維模型展示的情形，由三維展示圖可看出天井部分完全被外多邊形所填滿。由圖 6(b)可看出模型在天井處理後，雖然在地形圖上會出現切割線，但是在三維展示時不僅可以正確顯示天井，也不會顯示切割線。

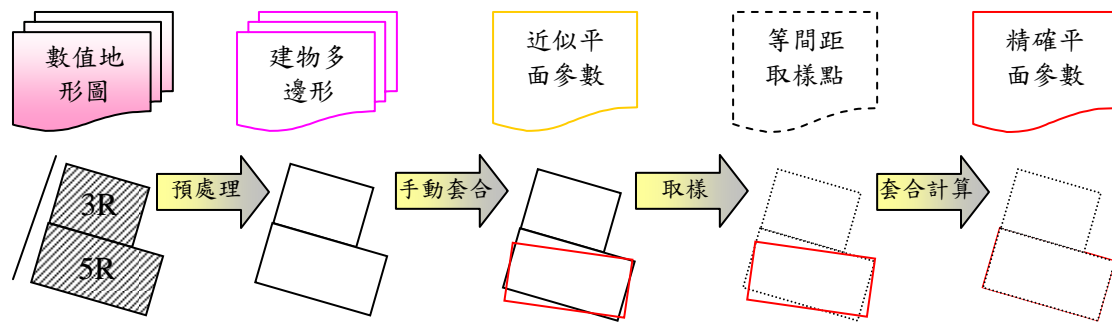
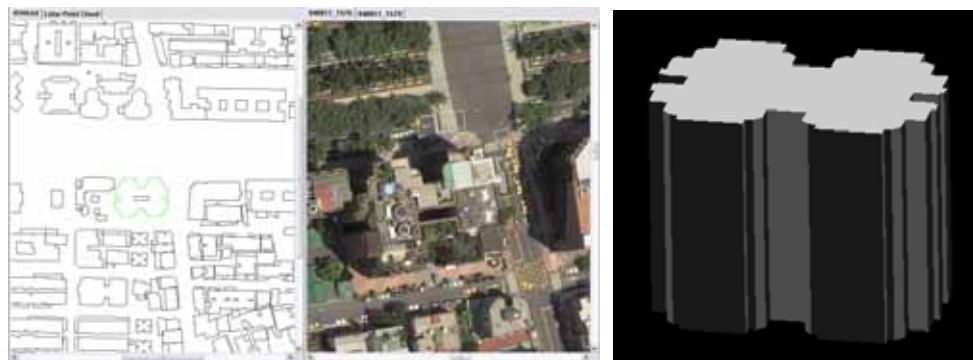
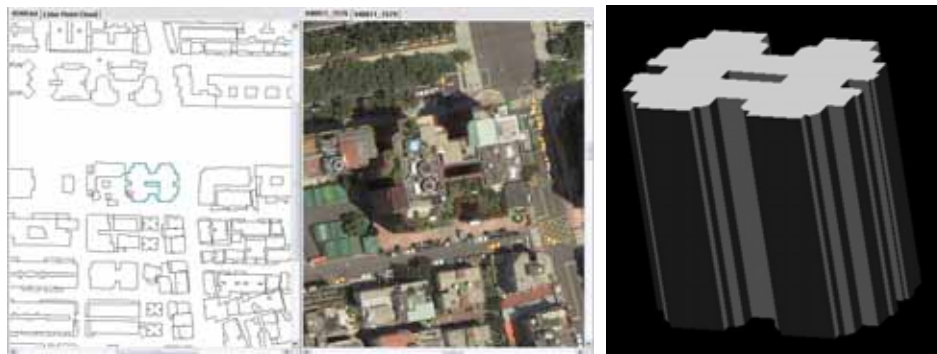


圖 5、模型平面套合流程



(a)處理前的建物多邊形



(b)處理後的建物多邊形

圖 6、建物多邊形的天井處理

天井處理後的多邊形，以順時針方向紀錄各頂點坐標，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。

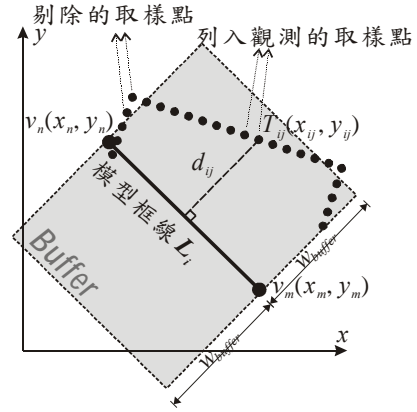


圖 7、搜尋環域

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 7 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 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} ，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緣，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：

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

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：

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

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

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{X} - \mathbf{L}$$

立起來，可以改寫為矩陣形式的： $m \times 1 \quad m \times n \quad n \times 1 \quad m \times 1$ ，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 $m \times n$ 個元素， \mathbf{X} 是各項未知參數增量的 $n \times 1$ 向量， \mathbf{L} 是函數 F_{ij} 近似值的 $m \times 1$ 向量， \mathbf{V} 則是觀測量改正數的 $m \times 1$ 向量。因此(3)的目標函式可以表達為：

$$\mathbf{q} = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$$

$1 \times m \quad m \times m \quad m \times 1$ 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（距離參數增量門檻值設為 $0.01m$ ，旋轉參數增量門檻值設為 0.0001 度），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 高程套合

本研究以數值高程模型及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，使其模型基準點服貼於地面高程模型面，並使光達點雲恰落於模型的頂面上。套合計算可比照平面參數套合的方式，將觀測方程式由原本二度空間中點到模型框線的距離，推展到三度空間中點到模型面的距離，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，由於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，也會提高迭代發散的機率。考慮到實用性與時效性，本研究採用坐標轉換的方式，將光達點雲正射投影到模型側面，使三度空間中的屋頂面降維成二度空間中的直線，如此一來，原本點到面的套合就轉換成點到線的套合，可透過前節所述之 LSMDF 計算模型頂面高程，高程套合流程如圖 8 所示。

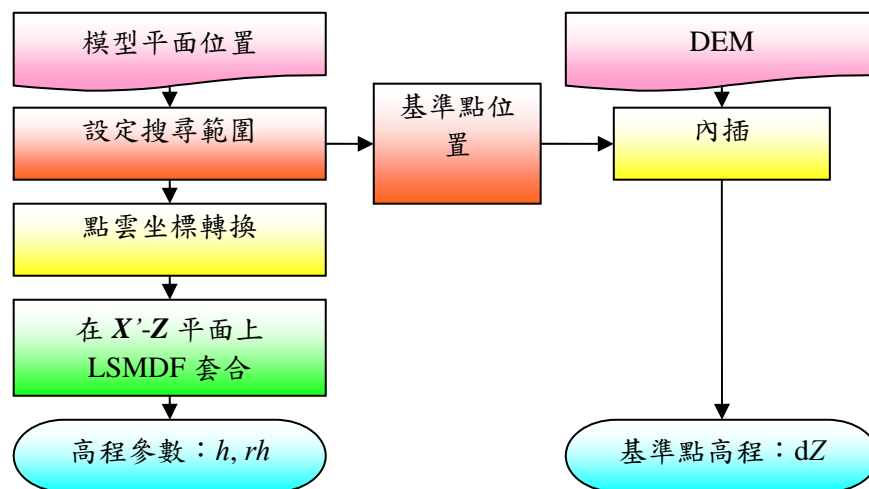
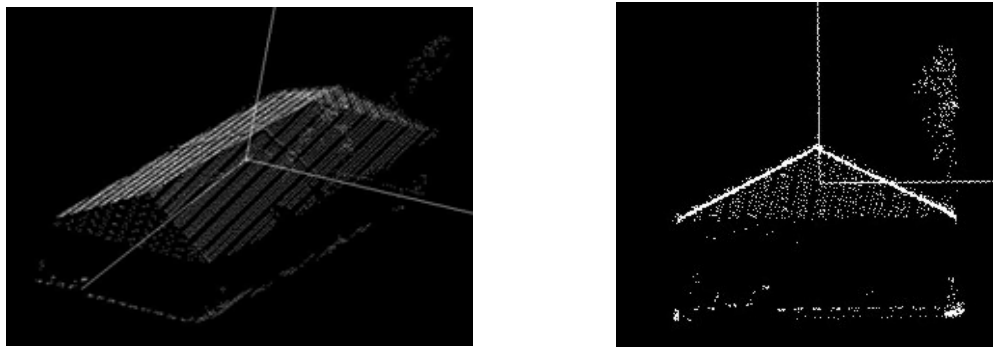


圖 8、模型高程套合計算流程

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之光達點方納入建物高 h 計算。模型地面高 dZ 可依基準點平面坐標 (dX, dY) ，由數值高程模型經雙線性內插 (Bi-linear Interpolation) 求得。若無法取得 DEM 資料，亦可參考搜尋範圍外近距離內之光達點雲加以計算。

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模型水平旋轉角 α ，將搜尋範圍內的點雲由物空間之 X - Y - Z 坐標系統轉換至模型側面上區域性的 X' - Y' - Z 坐標系統，其中 X' 軸平行於屋簷， Y' 軸平行於屋脊， Z 軸不變，如圖 9 所示。等

於是將點雲投影到 $X'-Z$ 平面上，此時屋脊型房屋的兩屋頂面降維成兩條直線，在不考慮遮蔽及其他誤差的前提下，絕大部分的光達點都會群聚在這兩條直線上，故可透過前節所提之 LSMDF 解算屋脊高 rh 與建物高 h 。



(a) 原始點雲 (b) 轉換至 $X'-Z$ 坐標系統後的點雲
圖 9、對範圍內點雲資料進行坐標轉換

為求操作流程平順，本系統會在讀取專案檔時將整幅光達掃描點雲資料讀入記憶體，當操作員初始投影模型後，再依模型頂面範圍擷取範圍內之點雲，依據模型之 Z 軸旋轉角 α ，將點雲投影至 $X'-Z$ 平面與 $Y'-Z$ 平面，如圖 10(b)之 $X'-Z$ 側視圖及圖 10(c) 之 $Y'-Z$ 側視圖展示。圖中以黑點繪出點雲、紅線為模型框線、深紫色線標示範圍內點雲高程之眾數 (Mode)、綠色線標示範圍內點雲高程平均值。

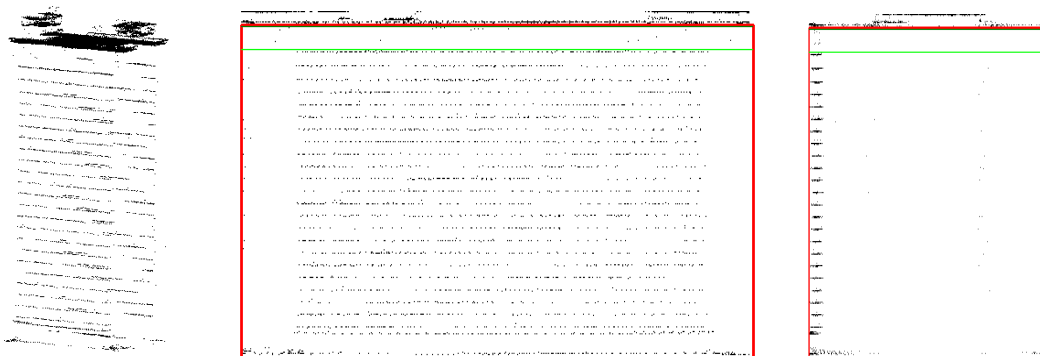


圖 10、擷取光達點雲：(a)俯視圖、(b) $X'-Z$ 側視圖、(c) $Y'-Z$ 側視圖

矩形體模型與多邊形稜柱體之高程套合實際上並不需要動用點到線的觀測方程式，由於落於屋頂面的點雲經坐標轉換至模型側視圖後會呈一直線，故可先設定一起始高程 (h) 及高程搜尋環域，計算環域內光達點雲高程之幾何平均數及中誤差，若中誤差超過門檻值 ($0.1m$) 則需以幾何平均數作為高程起始值，縮減環域後重新計算新環域內之幾何平均數及中誤差，如此迭代計算直到收斂。

由於採用迭代計算，房屋高程 (h) 之起始值是否接近真實屋頂面高程影響套合結果甚鉅。在本系統中此起始值除了可引用人工手動調整值外，亦可指定引用範圍內光達點雲之最集中高程 (Mode)、平均高程 (Mean) 或原地形圖上建物頂點高程，並可設定高程搜尋環域寬度之起始值與最小值。眾數之計算方法是將範圍內點雲由 $0m$ 至 $600m$ ，每 $0.5m$ 分一級，計算每一級之光達點數，如圖 11 為圖 10 所示房屋之光達點雲高程分級長條圖，點數最多者，取該級距中間值作為眾數。

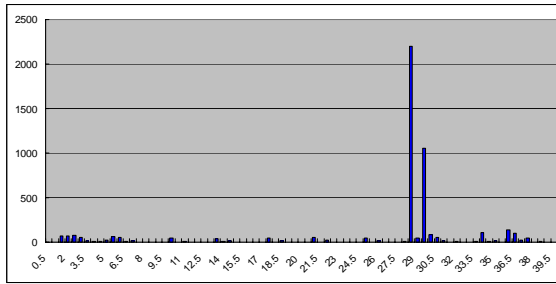


圖 11、光達點雲高程分級以求取眾數



圖 12、模型式建物重建程式介面

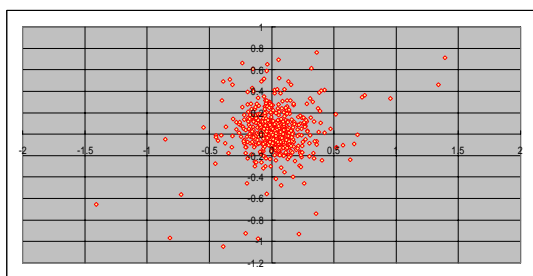
四、實驗測試

本研究擬整合 1/1000 數值地形圖、空載光達資料及數位航照，以模型式建物重建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，涵蓋商業區、住宅區及工業區。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、天井處理並賦予建物編號。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 $9\mu m * 9\mu m$ ，平均飛行高度約為 1930m，地面解析度約為 0.17m/pixel。空載光達掃瞄點雲密度約達 10 點/ m^2 。

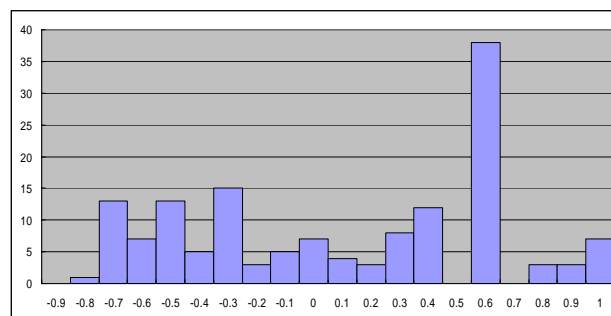
本研究採用 Borland C++ Builder 自行開發程式，其操作介面可同時顯示數值地形圖、空載光達點雲、數位航照及三維框架模型，並具備基本元件模型庫、可調整模型參數、模型套合計算等功能，如圖 12 所示。以左視窗的數值地形圖為出發點，右視窗會根據地形圖所顯示位置自動載入航照影像，左後視窗顯示光達點雲資料之側視圖。操作者可透過工具列選取適當的模型，給予初始模型參數後，系統即將模型顯示在地形圖及航照影像視窗，操作者可透過更改模型參數來調整模型近似套合，最後按下「套合模型」的按鈕，系統即自動求解最佳套合時之模型參數。操作員可透過模型在航照影像及光達點雲側視圖上之投影檢核套合計算之成果，必要時可修改模型參數使模型框架投影能完全與影像上的邊緣線重合。

為驗證套合後模型之正確性及精度，本文以測試區內 38 棟建物之 930 個屋頂角點作框選窗以為檢測依據，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。若模型角點於框選窗內多於一點，視為誤授；若僅有一點，且有其他可資檢核點位，則視為正確；若框選窗內無點，而其他檢核資料在該框選窗內有量測點位，則視為漏授。其中整體的遺漏率為 32%，誤植率為 2%，完整性為 68%，正確性為 98%。完整性偏低有兩大因素，一是模型導向的特性使得不規則形狀的房屋無法重建，以致找不到點位可供比較；二是判斷哪一些房屋元件要進行重建，亦即重建的細緻度要到何種程度，由於操作員認知的不同，造成重建的落差。比較重建三維房屋模型與航測人工數化屋角點，從 930 框選窗中共篩選出 589 組共軛屋角點，其差值的平均值在三軸方向上分別為 2.55cm、2.56cm 及 16.75cm，其差值的均方根誤差在三軸方向上分別為 20.88cm、20.35cm 及 94.65cm。由此可知，使用模型導向重建房屋模型與航測人工數化屋角點，平面誤差約 20cm，高程誤差約平面誤差的 5 倍，約 95cm。圖 13 為屋角點平面誤差分佈圖及高程誤差

之直方圖。



a. 平面誤差分佈圖



b. 高程誤差直方圖

圖 13、重建模型與航測人工數化屋角點誤差分佈圖

五、結論

本文提出一套以浮測模型為基礎之模型式建物重建法，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，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。

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」計畫資助得以完成，謹申謝忱。並感謝臺北市政府、中央大學太遙中心及台灣世曦工程顧問股份有限公司提供相關資料及技術協助。

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., 國立成功大學測量及空間資訊學系博士論文: 台南市. p. 168.
- Ameri, B., 2000. Feature Based Model Verification (FBMV): A New Concept for Hypothesis Validation in Building Reconstruction. The XIXth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.

- Braun, C., Kolbe, T.H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A.B., Foerstner, W., and Plumer, L., 1995. Models for Photogrammetric Building Reconstruction. *Computers & Graphics*, **19**(1): p. 109-118.
- Brenner, C. and Haala, N., 1999. Towards Virtual Maps: On the Production of 3D City Models. *GeoInformatics*, **2**(5): p. 10-13.
- Laebe, T. and Guelch, E. 1998. Robust Techniques for Estimating Parameters of 3D Building Primitives. ISPRS Commission II Symposium, Cambridge.
- Lang, F. and Foerstner, W. 1996. 3D-City Modeling with a Digital One-eye Stereo System. The XVIIIth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna.
- Lowe, D.G., 1991. Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **13**(5): p. 441-450.
- Tseng, Y.-H. and Wang, S., 2003. Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting. *PE & RS*, **69**(2): p. 171-180.
- van den Heuvel, F.A., 1997. Efficient 3D-Modeling of Buildings Using a Priori Geometric Object Information. in *SPIE*.
- van den Heuvel, F.A., 2000. Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. The XIXth Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.
- Wang, S. and Tseng, Y.-H., 2004. Least-squares Model-image Fitting for Building Extraction from Aerial Images. *Asian Journal of Geoinformatics*, **4**(4): p. 3-12.