

整合航測與行動裝置影像的三維建物模塑策略

3D Realistic Building Modelling by Integration of Aerial and Mobile Images

王聖鐸^a

Sendo Wang

Abstract

In the last decade, smart city, instead of e-government or i-government, has become a modern trend of urban development for the major cities in the world. However, a city would never be considered smart without knowing where the events are. A precise 3D city model is required as the infrastructure to mark and present the 3D location of the various sensors. The data transferred from the sensors can then be spatially analyzed in the 3D space. Photogrammetry has been considered as the most efficient technique for extracting 3D information or reconstructing 3D models. But its point-by-point measurement of using floating mark has become the bottleneck while reconstructing the 3D city model. In this paper, we expanded the floating mark to the floating model based on the concept of model-based building extraction. The measuring tool is no longer only an abstract point but also many kinds of 3D model, which can be scaled, rotated, or moved in the space. The floating model is defined with a datum point whose 3D coordinates indicate the spatial position of the model as the floating mark does. Furthermore, each kind of models is associated with a set of pose parameters to describe its rotation about the three orthogonal axes and shape parameters to describe its scales along predefined directions. In other words, the floating model is a flexible entity floating in the space, and can be adjusted to fit the object by these parameters. If the model parameters are good enough to represent the 3D spatial information of the object, the projection of the floating model on every overlapped image will all be coincident to the object's image. Therefore, the basic idea of the floating model theory is to fit model to the overlapped images by adjusting the model parameters. Based on the floating model theory, we proposed a semi-automated 3D building reconstruction strategy. A friendly human-machine interface is

^a 國立臺灣師範大學地理學系助理教授

designed for the operator to choose and adjust the floating model to fit the aerial photos manually. Then, the computer calculate the optimal fit by an ad hoc Least-Squares Model-Image Fitting (LSMIF) algorithm. Thus the 3D spatial information can be extracted object-by-object rather than point-by-point by means of floating model, which increases the efficiency and accuracy. The building model are then projected onto photos taken by mobile devices to evaluate which is the most suitable photo for each façade. The façade then could be clipped from the photo and geometrically corrected as for the texture image. According to our tests and experiments, the proposed semi-automated strategy does increase the efficiency of 3D building model reconstruction.

Keywords : Floating Model, 3D Building Model, Model-based Building Extraction, Digital Photogrammetry.

摘 要

繼電子化政府、政府網路服務之後，標榜能察覺城市脈動、即時做出決策反應的智慧城市（Smart City），已成為世界各主要都市努力的目標。打造智慧城市必須先建置精確完善的三維建物模型，才能將各類感測器在三度空間中精確定位，而後才能對感測器傳回的資料進行空間分析，因此三維建物模型實為智慧城市之基礎建設。三維建物模型主要可分為兩個階段：幾何模型及牆面紋理貼圖。過去航空攝影測量一直是最有效且精確的測繪技術，然而傳統以浮測標逐點量測的方式重建三維建物模型時，操作員需要專注於屋角點的量測及點位之連結，是建物幾何模型的瓶頸。為了使三維建物牆面具備真實的場景，必須花費大量人力、時間至現場拍照，回到內業還必須依據建物牆面逐一比對照片，挑出最完整的照片裁切出牆面影像，再依像片角度校正變形，才能作為牆面材質影像，需要大量人力、物力及時間。本研究以浮測模型（Floating Model）為核心，將傳統的浮測標擴充為浮測模型（Floating Model），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。浮測模型除了具備一個基準點可調整其三維位置外，還依模型種類增加了各方向的伸縮尺度、空間旋轉等參數，可想像成一個漂浮在空間中，可移動、旋轉、縮放大小以量測地物的模型。將浮測模型投影至所有影像，並套合至影像上的目標地物，便有如回復攝影瞬間之幾何空間條件，此時之模型參數與影像外方位元素即為最佳解。以此概念，本研究提出一套半自動化萃取策略，操作員透過人機互動介面將模型套合至所有航測影像，交由電腦透過最小二乘模型-影像套合演算法（Least-squares Model-image Fitting, LSMIF）自動計算最佳套合，得到最佳模型參數。其後將行動裝置拍攝建物的影像輸入電腦，由電腦自動計算每一面牆投影在所有像片上，以評估擷取牆面影像範圍，進而自動製作建物材質影像，完成三維建物模型。透過實驗案例證明，浮測模型理論確可有效地萃取建物三維空間資訊，提高三維塑模之效率，並能達到傳統攝影測量之精度要求。

關鍵詞：浮測模型、三維建物模型、模型式建物萃取、數值攝影測量。

前言

三維城市模型 (3D City Model) 作為基礎建設，可以整合各方面所需的空間資訊，廣泛應用在都市計畫、市政管理、不動產管理、交通規劃、機場航道規劃、無線基地台規劃、觀光導覽、國安維護等各種民生及專業用途。航空攝影測量目前仍是製作三維城市模型最經濟實惠的資料來源 (Förstner, 1999)，然而其逐點立體量測的方式是生產上的瓶頸。因此如何從航照影像或近景影像中快速萃取建物的三維空間資訊，成為攝影測量與計算機視覺 (Computer Vision, CV) 領域共同的研究目標 (Ameri, 2000; Braun et al., 1995; Chio, 2001; Lang and Förstner, 1996; Lowe, 1991; Mohan and Nevatia, 1989; Noronha and Nevatia, 1997; Rau, 2002; van den Heuvel, 2000; Vosselman and Veldhuis, 1999)。許多建物重建的相關研究均引入模型的概念 (El-Hakim, 2000; Ermes, 2000; Fischer et al., 1999; Fritsch, 1999; Grün and Dan, 1997; Läbe and Gülch, 1998; Rottensteiner, 2000; Schindler and Bauer, 2003; Tseng and Wang, 2001; Vosselman and Tangelder, 2000)，因為三維空間的物件投影到二維空間時會失去一些萃取所需的資訊，尤其是當影像中有用的資訊被不相關的資訊所干擾時，如：植被、車輛、建物的細部等，建物模型的使用便顯得十分重要 (Grün, 2000)。

有鑑於傳統攝影測量中人工逐點量測造成效率上的瓶頸，而影像中的線形特徵 (Linear Feature) 則可以用演算法自動偵測，學者轉而研究以線形特徵取代傳統點特徵的方法，稱為：直線式攝影測量 (Line Photogrammetry) (Heuel and Förstner, 2001; Hrabacek and van den Heuvel, 2000; Li and Zhou, 1994; McIntosh and Mutch, 1988; Medioni and Nevatia, 1984; Veldhuis and Vosselman, 1998; Vosselman and Haralick, 1996)。不同於傳統攝影測量以共軛點為量測依據，直線式攝影測量是以空間中的一條直線，及其在影像上的共軛線為基礎。因此在共軛點被遮蔽或無法量測的情形下，只要確定量測點位於共軛線上，仍可建立一條觀測方程式。除了線形特徵之外，攝影測量亦可引進更高階的物件實體。有鑑於重建三維模型的龐大需求，及 CAD 描述三維物件的一貫簡潔方式，許多研究嘗試以三維 CAD 模型作為從影像中萃取物件的工具 (Böhm et al., 2000; Ermes et al., 1999; Tseng and Wang, 2003; van den Heuvel, 2000)。近來的發展則是將 CAD 塑模方式引入攝影測量中，亦即從演算法層面整合 CAD 模型，此趨勢創造了一個新名詞：「CAD 式攝影測量」 (CAD-based Photogrammetry)。在攝影測量領域中，CAD 式攝影測量最早是由 Li and Zhou (1994) 提出，採用 CAD 模型描述工業元件，並引入 Line Photogrammetry 的概念將其與影像上的直線段套合，以求解模型參數。目前已商業化的軟體除了德國 inpho 公司的 inJECT 之外，另有加拿大 EOS 公司的 PhotoModeler、美國 ShapeQuest 公司的 ShapeCapture 等。這些系統都提供了數種 CAD 模型供操作員視影像需要選擇，如：立方體、圓柱體、圓錐體等，當操作員將模型近似套合至影像上後，再利用邊緣線萃取、影像匹配等技術，自動計算模型-影像的最佳套合，以決定最佳的模型參數重建 CAD 模型。

浮測模型法即採用直線式攝影測量與 CAD 式攝影測量作為建物重建之基本概念，將原本攝影測量中的浮測標擴充為浮測模型，將原本的立體像對放寬為多張影像，調整三維模型使其同時套合至多張影像上之標的物，以萃取三維空間資訊 (Tseng and Wang, 2003; 王聖鐸, 2007)。浮測模型可以視為浮測標的延伸，包括了點、線 (如：直線段、曲線段)、面 (如：矩形面、圓形面等)、

立體（如：矩形體、屋脊型房屋、內縮式屋脊型房屋、圓柱體等）四大類元件模型。所有的浮測模型都具有一組形狀參數與姿態參數，調整形狀參數可以伸縮模型但仍維持其外型，而調整姿態參數則可以在三維空間中自由旋轉或移動模型。藉由將浮測模型的線框模型反投影回影像，並套合至影像上偵測到的邊緣線，可決定模型之參數，重建出三維建物模型。

本研究以浮測模型為核心，提出一套半自動化三維建物模型策略，如圖 1。建物的幾何模型（Geometric Model）依據航測影像來製作，而建物的材質影像（Façade Texture）則是由行動裝置拍攝的影像來製作，以浮測模型為核心，透過最小二乘模型-影像套合法（Least-squares Model-image Fitting, LSMIF）（Wang and Tseng, 2009），來提升像真（Photo-realistic）三維建物的模型效率。

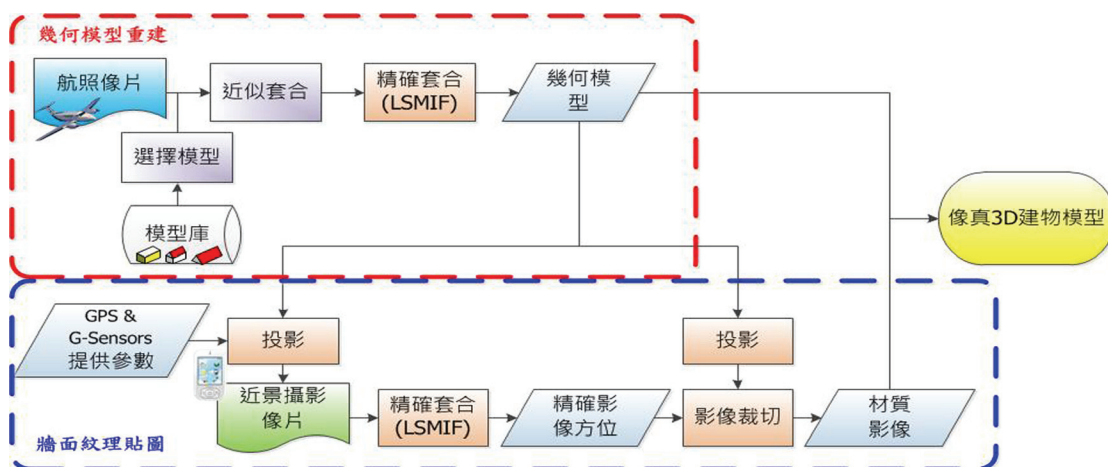


圖 1 整合航測影像與行動裝置影像之半自動三維建物模型策略

浮測模型理論

浮測模型理論是使用浮測標立體測繪觀念之延伸，若浮測標可被視為是零維的模型，則依模型的空間延展維度，可擴充為一維的線模型、二維的面模型、乃至於三維的立體模型。浮測模型除了保有浮測標漂浮在三維空間中的特性，更增加了模型的尺寸、姿態調整機制，並隱含了外型的約制條件。藉由移動、旋轉或縮放浮動模型，使其套合至影像上物體的成像，可萃取出物體的三維空間資訊，此即「浮」「測」模型。

（一）模型類別與描述

浮測標逐點量測的方式可說是最基本的量測型態，對於高維度的物體就必須逐點量測，再逐一連線。若能將浮測標擴展為一條「浮測線」，在立體模型上直接貼附線段一次萃取，不需要再量測頭尾兩點，可減少操作員重複的量測工作。對於更高維延伸的實體，節省的量測人力更為顯著。浮測模型是一個漂浮在空間中，可以調整位置、姿態、大小尺寸的三維模型，在設計之初即賦予固定的結構與位相關係，能明白指出物體的外型，但又保有尺寸、位置、姿態等彈性，故同時具備了量測物體三維空間資訊之功能。為符合各種萃取需求，浮測模型可依延伸維度分成四類：零

維的點、一維的線、二維的面、以及三維的立體實體。點、線、面、立體四大類別下所有的模型，都是定義在模型座標系統 X_m - Y_m - Z_m 中的單位實體，由模型各頂點中擇一定義為基準點，置於模型座標系統的原點，將模型長度方向定義與 X_m 軸平行，寬度方向定義與 Y_m 軸平行，高度方向定義與 Z_m 軸平行，且模型底面貼附於 X_m - Y_m 平面，並將長度、寬度、高度均設定為 1 單位，由此可推算模型各頂點 v_i 之模型座標。

(二) 模型的浮動與變形

為了使定義在模型座標系統中的浮測模型漂浮於物空間座標系統，達到萃取物體三維空間資訊之目的，可將浮測模型的各個角點座標藉由一系列座標系統轉換到物空間。從操作員的觀點，就是調整一個漂浮在三維空間中，可移動、可伸縮、可旋轉、具有彈性但又同時保有外型約制的三維模型，使其完全符合物體在物空間的外觀，進而萃取出物體的三維空間資訊。而此一調整機制可透過兩類參數來達成：(1) 形狀參數 (Shape Parameters) 以描述模型在物空間中的大小尺寸，但是不論尺寸如何調整，模型都應該維持原本定義的外型；(2) 姿態參數 (Pose Parameters) 以描述模型在物空間中的位置與姿態。調整這兩類參數，使模型貼合至物體，即能達成浮測模型萃取三維空間資訊之目的。若將形狀參數視為模型在座標系統各軸向上延伸的尺度，將姿態參數視為座標系統三軸的旋轉與平移量，則透過模型座標系統至物空間座標系統之間一系列的三維座標轉換，便能控制浮測模型在物空間的浮動與變形。

每一種模型都應具有一組形狀參數來描述其外型尺寸，藉由更改某一項形狀參數，可以讓模型往該參數所定義的方向伸展或收縮，同時維持模型的外型不變。但不同類型的模型，其外觀不同，約制形狀的方式也不同，因此會有不同的形狀參數。如圖 2 展示了五種浮測模型：線段、矩形面、圓形面、矩形體、屋脊型房屋，分別具有不同的形狀參數。線段的形狀參數只有沿線段方向的長度 l 。矩形面的形狀參數分別是長度 l 與寬度 w 。圓形面的形狀參數也只有半徑 r 。矩形體的形狀參數分別是長度 l 、寬度 w 、高度 h 。而屋脊型房屋的形狀參數則比矩形體更多一個屋脊高 rh 。由圖 2 中的灰色虛線外框可以看出，當形狀參數改變時，元件只是尺寸上的縮放，但外型不變。

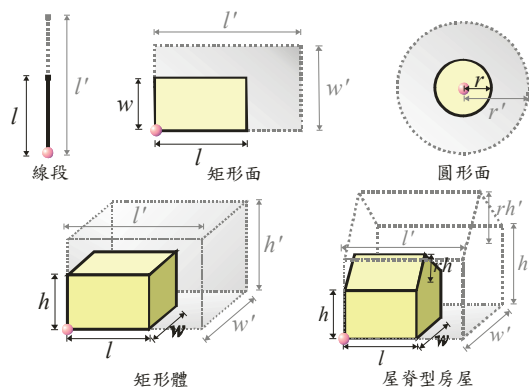


圖 2 浮測模型之形狀參數

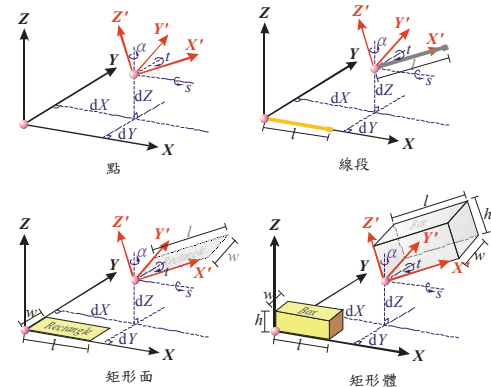


圖 3 浮測模型之姿態參數

除了形狀參數外，浮測模型還具有一組姿態參數，以描述其物空間的位置與姿態。物體在空間中的位置或姿態與外型無關，因此所有浮測模型可以共用相同的六個姿態參數：沿 X_m 軸方向的平移量 dX 、沿 Y_m 軸方向的平移量 dY 、以及沿 Z_m 軸方向的平移量 dZ 來描述模型基準點的空間位置；以及逆時針繞 X_m 軸方向的旋轉量 s 、逆時針繞 Y_m 軸方向的旋轉量 t 、以及逆時針繞 Z_m 軸方向的旋轉量 α 來描述元件在空間中的姿態。圖 3 顯示了四種類型：點、線段、矩形面、矩形體的姿態參數，以及參數改變後的模型。其中粉紅色的圓點標示模型基準點的位置，黃色的模型表示原本的位置與姿態，灰色的模型表示姿態參數改變後對模型的影響。由圖中可發現，姿態參數的改變對於模型的外型或尺寸並不會有影響，僅能改變模型在空間中的位置與姿態。

浮測模型是定義在模型座標系統 $X_m - Y_m - Z_m$ 的單位長度實體，在轉換時首先考慮將模型依形狀參數所定義的方向調整比例尺，轉至 $x - y - z$ 座標系統，使模型符合物空間尺度。此時的 $x - y - z$ 座標系統雖然尚未對齊物空間座標系統 $X - Y - Z$ ，但 x 軸與 X 軸、 y 軸與 Y 軸、 z 軸與 Z 軸的尺度均已相等。然後再將模型依姿態參數中的三軸旋轉量 (s, t, α) 旋轉至與物空間座標系統 $X - Y - Z$ 平行之 $x' - y' - z'$ 座標系統，旋轉方向是依右手定則：旋轉軸正向朝上，逆時針旋轉角度為正。最後再將 $x' - y' - z'$ 座標系統的原點平移到物空間座標系 $X - Y - Z$ 的基準點 (dX, dY, dZ) 上，即完成模型座標至物空間座標系統 $X - Y - Z$ 之轉換，整套座標系統轉換過程如圖 4 所示。

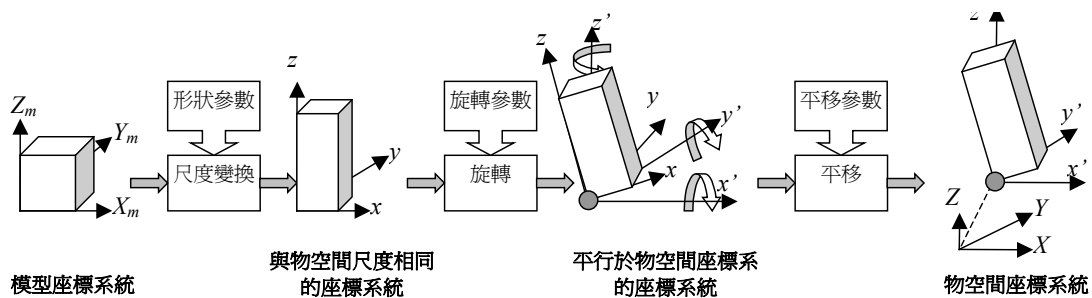


圖 4 浮測模型的三維座標系統轉換

(三) 模型與影像關係

以中心透視投影的航照影像而言，三維物體表面之光線穿過鏡頭，投影在像機內的成像平面。忽略鏡頭畸變之影響，光線行進路徑可視為一直線，因此物點、透視中心、像點三點為共線，此為攝影測量共線式的理論基礎。亦即物體在二維像片上的成像，是由三維空間中物體的位置、透視中心的位置、以及像片在三維空間中的姿態等三項要素共同決定，任何一項改變都會構成不同光線，形成不同的像片。攝影測量即基於像片成像原理，逆向藉由浮測標來模擬地物點，透過觀測像片上的內容，以光線決定物體三維座標或影像方位，重建物體與像片成像時的幾何關係。傳統作法是以半標模擬光線在像片上的交點，希望在重建拍攝瞬間的幾何關係後，在物空間交會出物體的位置。而浮測模型則是在攝影光線的理論基礎下，將原本覆蓋在左、右像片上的半標，由同時投影在多張影像上的半模型所取代，每張影像原本僅有一道光線穿越發展到一群光束同時穿越，因此半模型自身即隱含幾何約制。若將浮測模型同時投影到多張影像，則會有無數道遵守核

幾何條件的光束，分別交會到地面的模型表面上。一旦影像方位不正確，或模型參數不正確，則模型在影像上的投影就會與物體實際的成像有所差距。以矩形體浮測模型為例，假設地面上有一建物，分別由 O_1 、 O_2 、 O_3 三個位置拍攝影像。若影像外方位 $(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i)$ 錯誤，即使給予正確的矩形體模型參數 $(l, w, h, dX, dY, dZ, s, t, \alpha)$ ，各影像上的半模型也無法重合於建物之成像，如圖 5 所示。若已知影像外方位而矩形體模型參數錯誤，各影像上的半模型同樣無法重合於建物原本之成像，如圖 6 所示。唯有影像方位與模型參數均正確，半模型才能與建物原本成像完全重合。

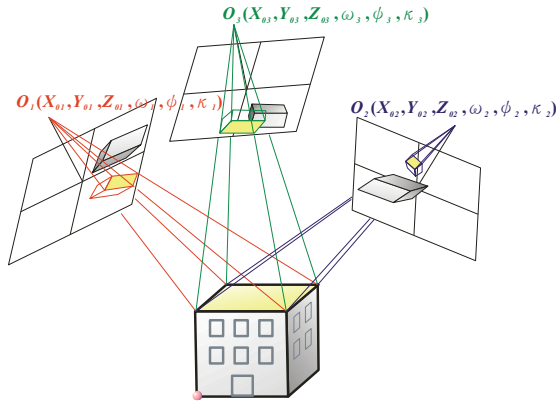


圖 5 模型在影像外方位不正確時的投影

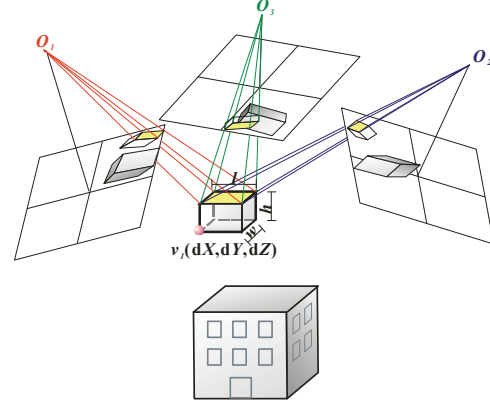


圖 6 參數錯誤的模型在影像上的投影

若影像外方位元素 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ 已知，則空間中任何一點 $P(X_P, Y_P, Z_P)$ 可透過共線式計算其像片座標 $p(x_p, y_p)$ ：

$$\begin{aligned} x_p &= -f \frac{m_{11}(X_P - X_0) + m_{12}(Y_P - Y_0) + m_{13}(Z_P - Z_0)}{m_{31}(X_P - X_0) + m_{32}(Y_P - Y_0) + m_{33}(Z_P - Z_0)} \\ y_p &= -f \frac{m_{21}(X_P - X_0) + m_{22}(Y_P - Y_0) + m_{23}(Z_P - Z_0)}{m_{31}(X_P - X_0) + m_{32}(Y_P - Y_0) + m_{33}(Z_P - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 (x_p, y_p) 是 p 點的像片座標

(X_P, Y_P, Z_P) 是 P 點的地面座標

f 是像片的像主距

(X_0, Y_0, Z_0) 是透視中心的地面座標

$m_{11}, m_{12}, m_{13}, \dots, m_{33}$ 是由像片旋轉角 (ω, ϕ, κ) 函數組成的係數

浮測模型頂點的物空間座標，其實是形狀參數與姿態參數的函式，只要將模型參數代入 (1) 式，就可以將頂點物空間座標化算為像片座標。而浮測模型在設計之初，即賦予特定的點、線、面位相關係，因此只要按照構成面的頂點編號依序繪出邊緣線，即能在每張影像上繪出半模型。然而在物體成像的過程中，某些點位與邊緣線會被物體本身所遮蔽而不可見，如圖 7 (a) 中的角

點 v_3 與邊緣線 L_2 、 L_3 、 L_{11} 在影像上應該會被矩形體本身遮蔽而不可見，影像上既然無法成像就不宜投影這些線段。因此在投影半模型的時候，必須依影像方位檢測每條邊緣線是否遭遮蔽，剔除被遮蔽邊緣線後，才將線框模型投影到影像上供套合之用，如圖 7 (b) 所示。對於矩形面、矩形體等不具任何彎曲表面的模型，邊緣線自我遮蔽可以平面法向量檢測。



圖 7 線框模型的投影：(a) 所有邊緣線均投影、(b) 隱藏自我遮蔽邊緣線後的投影

由於物體成像時受到本身體積與攝影角度的影響，並不是所有的邊緣線和角點都能成像，儘管不被自我遮蔽，也可能因為攝影角度的關係，受到其他物體遮蔽。傳統以浮測標立體觀測，如果物體角點無法同時成像於立體像對，就無法精確觀測點位。而浮測模型可以同時投影到多張影像，因此可以選用不同角度拍攝的影像以降低遮蔽的影響。只要像片涵蓋待測物體且方位已知，就可以將浮測模型投影於像片進行量測。圖 8 是四張取自兩條不同航帶的航空攝影像片，像片中的建物因自我遮蔽，在影像 A 上無法顯示 L_1 、 L_2 、 L_{10} ，在影像 B 上無法顯示 L_2 、 L_3 、 L_{11} ，在影像 C 上無法顯示 L_1 、 L_4 、 L_9 ，在影像 D 上無法顯示 L_1 、 L_3 、 L_4 、 L_9 、 L_{12} 。如果以傳統選擇像片對組立體模型的方法，則總有邊緣線被遮蔽，只有頂面的四個角點 v_5 、 v_6 、 v_7 、 v_8 同時出現在立體模型上，其他的角點都無法直接觀測。而使用浮測模型，可同時將矩形體模型投影到四張影像上，矩形體的八個頂點及十二條邊緣線都可以作為套合的依據，不僅能決定模型參數，而且重複的邊緣線增加了多餘觀測，可提高套合的可靠度。

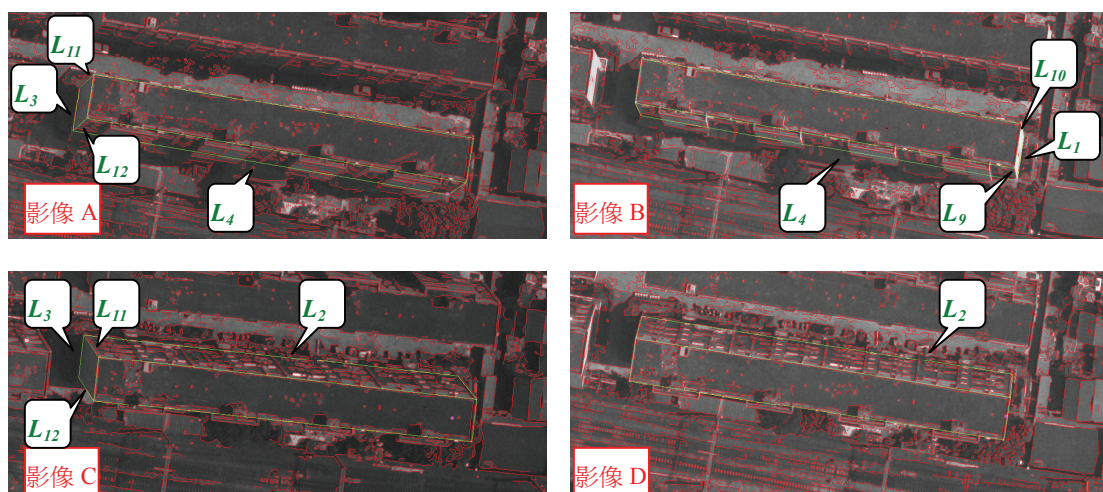


圖 8 矩形體模型在四張影像上的觀測情形

模型－影像最佳套合

本研究所提出的模型-影像最佳套合演算法，是將邊緣線萃取像元到投影框線的距離作為觀測量，以所有模型框線上觀測量的平方和為最小作為目標函式，透過最小二乘平差法求解模型框線在影像上的最佳位置，以自動化求解模型-影像之最佳套合。

（一）邊緣線偵測

影像上的邊緣線可定義為：兩均調區域間具有明顯不同灰度值之界線，亦即灰度值不連續之像元連線。此一不連續性表現在影像函數，會導致一階導數出現極值以及二階導數出現跨零值，因此大多數的邊緣線偵測元便以計算影像函數的一階導數或二階導數做為偵測邊緣線的依據。例如 Sobel 運作元、LoG 運作元、Canny 邊緣線偵測元（Canny, 1986）與 Förstner 多元特徵萃取法（Förstner, 1994）等。各種邊緣線偵測元均有其獨特之參數與門檻值可調整，對於同一幅影像、同一種偵測元，使用不同的參數將得到不同的邊緣線偵測結果，而對於不同影像，也必須調整偵測元的參數並多方測試門檻值，才能萃取出最適合的邊緣線。因此即便是同一幅影像，也無法以完全客觀的標準互相比較偵測元間的優劣。對於本研究而言，採用何種邊緣線偵測元並不是重點，而是盡可能偵測出確為模型邊緣線之像元。因此本研究僅採用一階微分之 Sobel 運作元偵測影像上之邊緣線，同時為求計算效率，僅在模型初始投影後的外圍往外加大 20 個像元的矩形範圍內進行偵測。而梯度大小篩選的門檻值則必須由操作員給定，以本研究所使用實驗影像的經驗值大約在 75~120 之間，但仍必須參考影像及其萃取成果而定：若萃取出太多非邊緣線像元，則必須提高門檻值；相反地，若無法萃取出真實邊緣線，就必須酌予降低門檻值。若某條邊緣線無法成功萃取出來，即可能無法決定其對應的參數，因此實作上寧可降低門檻值，以免無邊緣線像元可供套合。對於 Sobel 萃取出的像元，本研究則是再以一個 3x3 的罩窗進行細化過濾，在罩窗內若有其他梯度方向相近的像元，且落於中心像元的梯度方向，而其梯度大小大於中心像元，則將中心像元淘汰。如此當門檻值較低時，可確保萃取出的邊緣線寬度只有一個像元，但仍無法避免萃取出獨立的邊緣線像元。然而梯度大小並不能作為像元是否屬於物體邊緣線的唯一判斷依據，例如：不同材質相接處、陰影、或是物體表面紋理都可能具有較高的梯度大小，而這些並不是套合時所需要的邊緣線像元。因此在 Gülch（1997）或 Chio（2001）的方法中，則是對偵測出的邊緣線像元再作統計上的假說測試，以減少實非邊緣線卻被偵測為邊緣線像元的影響。本文則是利用梯度方向來檢驗邊緣線像元的正確性，並將梯度大小融入最小二乘法的加權計算，期能改善模型-影像最佳套合的成果。

（二）搜尋環域

LSMIF 是將三維模型的線框模型依影像外方位元素以及自我遮蔽分析後，將可見邊緣線段投影到影像上，與影像上透過邊緣線偵測元所偵測到的像元套合。其套合原理與直線擬合的問題很類似，已知一群直線上的點位，以最小二乘法求解出最能代表這些點位的直線方程式，該直線應位於所有點位的重心。不同的是，模型-影像套合時是將所有的邊緣線一併套合，因此求取出的模型參數應使得所有邊緣線同時與該對應點群相符，而非逐條擬合邊緣線。由於模型已經透過手動

調整至近似位置、大小、姿態，正確的邊緣線像元應該位於投影線的一定範圍內，不需要也不應該將整張影像上的邊緣線萃取點都作為邊緣線套合的目標。合理的作法應該是沿垂直於邊緣線的方向伸展一搜尋環域（Buffer），只有在搜尋環域內的萃取點才納入套合計算，搜尋環域外的萃取點則捨去不計，如圖 9 顯示模型其中一條框線的環域。當環域內含實屬兩條邊緣線的點群時，若其他邊緣線的套合足以提供內部幾何約制，則模型仍能套合至正確的邊緣線，否則將套到兩條邊緣線的中間。

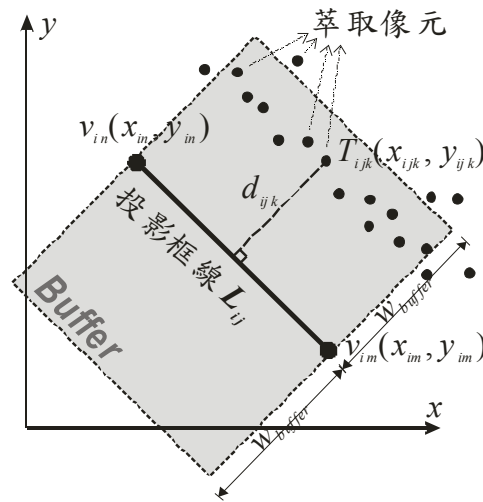


圖 9 搜尋環域

假設圖 9 中的投影框線 L_{ij} 是由某模型的兩角點 v_{im} 與 v_{in} 投影在第 i 張影像上所形成的線段，則由垂直於投影框線 L_{ij} 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_{ij} 的搜尋環域。若有一萃取點 $T_{ijk}(x_{ijk}, y_{ijk})$ 落於環域之內，即視為可能之邊緣線萃取像元，標記為 T_{ijk} ，表示是第 i 張影像上屬於第 j 條框線環域內的第 k 個萃取點。若萃取點落於環域之外，則視為不相關點位，不納入套合計算。 w_{buffer} 決定了環域的大小，由於環域內所有的萃取點像元都會被視為套合的依據，因此環域的大小也決定了模型-影像套合的搜尋範圍。若設定較大的 w_{buffer} 值，則模型在影像上的搜尋範圍較大，涵蓋較多的邊緣線萃取像元，一方面增加了涵蓋到確為邊緣線像元的機率，但另一方面也增加了納入非邊緣線像元的可能。而較小的 w_{buffer} 值使模型在影像上的搜尋範圍較小，涵蓋較少的邊緣線萃取像元，雖然減少了涵蓋到正確像元的機率，但同時也可能減少了一些非邊緣線像元的影響。因此 w_{buffer} 值的決定，除了考慮到手動套合的精確度，還必須參考影像的品質。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像元，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。

（三）最小二乘套合

模型-影像最佳套合是藉由調整模型參數或影像外方位元素，使得模型投影能完全符合影像上萃取出來的特徵，以本研究而言，就是將模型的投影套合至影像上萃取出的邊緣線像元。因此觀

測的對象是環域內萃取像元 T_{ijk} 到投影框線 L_{ij} 的垂直距離 d_{ijk} ，如圖 9 所示。若以 $v_{im}(x_{im}, y_{im})$ 與 $v_{in}(x_{in}, y_{in})$ 表達第 i 張影像上模型第 j 條框線投影兩端點的像片座標，而以 $T_{ijk}(x_{ijk}, y_{ijk})$ 表示第 i 張影像上模型第 j 條框線投影的搜尋環域內第 k 個被萃取出的邊緣線像元像片座標，則距離公式如下：

$$d_{ijk} = \frac{|(y_{im} - y_{in})x_{ijk} + (x_{in} - x_{im})y_{ijk} + (y_{in}x_{im} - y_{im}x_{in})|}{\sqrt{(x_{im} - x_{in})^2 + (y_{im} - y_{in})^2}} \quad (2)$$

其中 $v_{im}(x_{im}, y_{im})$ 與 $v_{in}(x_{in}, y_{in})$ 是單位模型的頂點座標，透過形狀參數、姿態參數轉換到物空間座標系統，再經由影像外方位元素以共線式轉換到像片座標系統，因此 $x_{im}, y_{im}, x_{in}, y_{in}$ 實為模型形狀參數、姿態參數與影像外方位元素的函數。亦即：

$$d_{ijk} = F_{ijk}(P_S, P_P, P_{Ei}) \quad (3)$$

其中 P_S 代表模型的形狀參數
 P_P 代表模型的姿態參數
 P_{Ei} 代表第 i 張影像的外方位元素

每一種模型具有不同的模型參數，以矩形面為例，形狀參數 P_S 包括 (l, w) 兩個參數，姿態參數 P_P 包括 $(dX, dY, dZ, s, t, \alpha)$ 六個參數，而第 i 張的影像外方位元素 P_E 則為 $(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i)$ 。因此對於矩形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 (3) 式列出一條觀測方程式：

$$d_{ijk} = F_{ijk}(l, w, dX, dY, dZ, s, t, \alpha, X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i) \quad (4)$$

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，當外方位元素也完全正確時，浮測模型的外框線投影理應完全重合於影像上的物體，因此邊緣線像元到投影線段距離的期望值 $E(d_{ijk})$ 為零。但受到外方位元素、模型參數、邊緣線偵測等誤差影響，造成萃取出的邊緣線像元至投影線段間的垂直距離 d_{ijk} 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：

$$q = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (d_{ijk})^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (5)$$

其中 i 代表含有該模型的影像編號， $i=1 \sim I$
 j 代表模型的邊緣線編號， $j=1 \sim J$
 k 代表某邊緣線搜尋環域內的萃取像元編號， $k=1 \sim K$

為求得距離平方和 q 為最小時的參數，可將 (5) 式對所有未知參數偏微分，並令其為零後求

解：

$$\frac{\partial q}{\partial p_n} = 0 \quad ; \text{其中 } p_n \text{ 爲未知參數} \quad (6)$$

在影像外方位元素已知且確定的情況下，(3) 式中的 P_E 可視爲常數，則未知數僅剩下模型的形狀參數 P_S 與姿態參數 P_P 。以矩形面爲例，(4) 式可改寫爲：

$$d_{ijk} = F_{ijk}(l, w, dX, dY, dZ, s, t, \alpha) \quad (7)$$

(7) 式爲非線性函式，直接代入 (6) 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爲參數初始值與參數增量的線性函式：

$$\begin{aligned} 0 + v_{ijk} = & \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial l}\right)_0 \Delta l + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial w}\right)_0 \Delta w + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial dX}\right)_0 \Delta dX + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial dY}\right)_0 \Delta dY + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial dZ}\right)_0 \Delta dZ \\ & + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial s}\right)_0 \Delta s + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial t}\right)_0 \Delta t + \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial \alpha}\right)_0 \Delta \alpha + F_{ijk0} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 v_{ijk} 是觀測量 d_{ijk} 與期望值 0 之間的改正數

F_{ijk0} 是函數 F_{ijk} 的近似值

$\left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial l}\right)_0, \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial w}\right)_0, \left(\frac{\partial F_{ijk}}{\partial dX}\right)_0, \dots$ 是函數 F_{ijk} 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

每一張影像上每一條邊緣線的搜尋環域內的每一個萃取像元，都可以列出一條如 (8) 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，可以改寫爲矩陣形式的： $\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{X} - \mathbf{L}$ ，其中 $\mathbf{A}$ 是函數 F_{ijk} 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_{ijk} 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 (5) 的目標函式可以表達爲： $\mathbf{q} = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 爲最小，其中 $\mathbf{P}$ 是觀測量的權矩陣，其對角線元素 p_{mm} 代表每一個萃取像元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爲零。平差計算的過程，是先將未知參數的初始值代入計算 $\mathbf{A}$ 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爲最佳套合解。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。在本研究所進行的實驗中，是將平面上模型參數（如： $l, w, dX, dY \dots$ ）

的門檻值設為 10cm，約當影像上的 1 個像元，高程上模型參數（如： $h, rh, dZ, \dots$ ）的門檻值設為 20cm，角度上模型參數（ α, s, t ）的門檻值設為 0.001 度。

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 $\mathbf{P}$ 計算出一個單位權中誤差值 $\hat{\sigma}_0$ ，該值可視為 LSMIF 套合的一種精度指標。當 $\hat{\sigma}_0$ 越大，表示環域內所有的萃取像元到對應投影框線的距離平方和較大，意味影像與模型之間的吻合度較低。相反地當 $\hat{\sigma}_0$ 越小，即環域內所有的萃取像元到對應投影框線的距離平方和較小，意味影像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，對於相同影像、相同模型投影位置而言，較大的環域會納入較多距離投影框線較遠的邊緣線萃取像元，因此會導致 $\hat{\sigma}_0$ 較大。以本研究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萃取像元，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量數目。

（四）觀測點位的權值

儘管搜尋環域內的邊緣線萃取像元都是邊緣線的備選位置，但是邊緣線偵測元可能受到雜訊或其他影像內容的干擾，而萃取出並非真正物體邊緣線的像元。因此將環域內所有萃取像元視為等權加入套合計算，可能導致錯誤的套合位置。理想的套合計算，應該先剔除環域內確定不屬於物體邊緣的萃取像元，其餘的萃取像元依據其為物體邊緣的機率賦予適當的權值，使其在平差過程中對投影框線產生適當的吸引力。由於影像梯度的大小 ∇g 代表像元與相鄰像元間的差異性，差異越大越可能是明顯的邊緣線；而梯度方向 α_g 代表像元與相鄰像元間差異最大的方向，該方向越垂直於真正邊緣線投影的走向，該像元越可能屬於邊緣線。因此梯度的大小與方向，應可作為環域內萃取像元的篩選與加權依據。

影像上灰度值不連續的因素有二：（1）幾何上不連續的物體邊緣線，其相鄰面受到角度、光線等影響，成像時形成兩塊不同的均調區，因此邊緣線在影像上的灰度值表現出不連續的特性；（2）物體表面不同材質或不同色彩的界線，也會造成影像灰度值的不連續。假設物體表面材質相當均勻，影像上的不連續主要由邊緣線所構成，則梯度大小可視為邊緣線機率，梯度越大，像元越可能屬於邊緣線。因此在模型-影像套合的平差計算中，除了以搜尋環域剔除距離太遠的邊緣線萃取像元外，環域內的萃取像元亦應考慮其梯度大小，以加權的方式設定像元對模型框線的影響力。

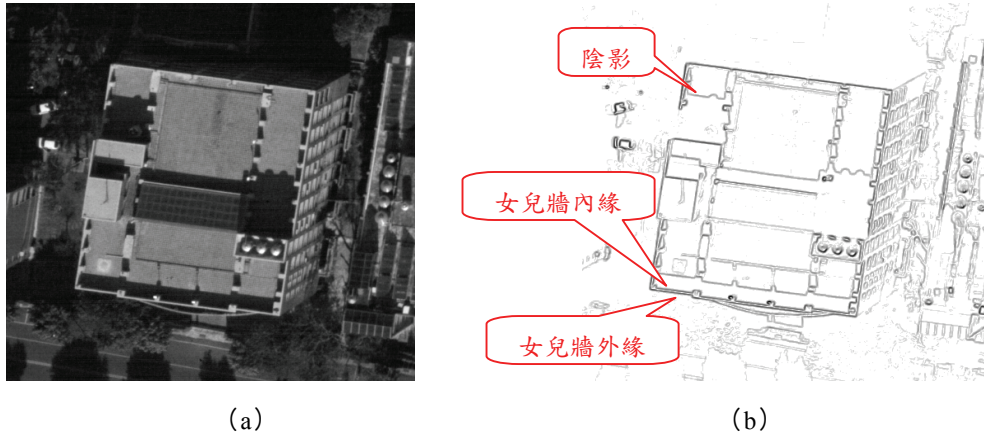


圖 10、原始影像與梯度影像

圖 10 (a) 的原始影像，經過 Sobel 運算元計算每一個像元的梯度大小後，先以門檻值 75 篩選出 35766 個邊緣線像元，再將每個邊緣線像元的梯度大小除以整張影像中最強的梯度大小 751.324，以正規化到 0~255 之間。為清楚呈現邊緣線像元，圖 10 (b) 顯示的是梯度影像的反相，亦即以全黑 (0) 代表梯度最大值，以全白 (255) 代表梯度最小值。由圖中可清楚看出，建物屋頂的邊緣線具有最強的梯度，若以梯度大小為權，這些像元將對套合具有最大的影響力。圖 10 (b) 同時也顯示出邊緣線偵測元在通過建物的女兒牆時，有可能同時偵測出女兒牆的內緣與外緣，而且內緣與外緣的梯度大小相差不多，另一方面，來自建物本身或其他物體的陰影也會造成較高的梯度大小。本文所採用的 LSMIF 是將所有環域內的邊緣線像元都列入觀測方程式，一旦上述的邊緣線像元依據梯度大小加權納入觀測方程式後，就會影響套合結果的正確性，因此以梯度大小加權只能作為理想狀況下的輔助。當模型近似套合至影像後，每一個位於搜尋環域內的邊緣線像元都可以列出一條如 (8) 式的觀測方程式，而該次觀測量的權 p_{mm} ，可正規化到 0~255 之間的梯度大小，或是將原梯度大小正規化到 0~1 之間。

梯度方向 α_g 代表了像元與相鄰像元間差異最大的方向，若該像元確實為邊緣線，則梯度方向應該垂直於邊緣線的方向。若手動套合可以將模型套合至影像上相當接近的位置，則邊緣線的搜尋環域內的萃取像元，其梯度方向越垂直於模型投影框線者越可能是正確的邊緣線像元。比照依梯度大小加權的方式，梯度方向與投影框線垂直方向的角度差也可以作為加權的依據。角度差越大者，越不可能是邊緣線像元，故賦予越小的權值；而角度差越小者，越可能是邊緣線像元，故賦予較大權值。如圖 11 所示，萃取像元梯度方向與投影框線垂直方向的角度差 θ_k ，而 θ_k 介於 $\pm 90^\circ$ 之間。若 θ_k 等於零，表示該像元最可能是邊緣線，故賦予最大的權值 1；若 θ_k 等於 90° 或 -90° ，表示該像元幾乎不可能是邊緣線，故賦予最小的權值 0。若萃取像元的梯度方向近乎平行於投影框線時，如圖 11 (a) 中的 T_e 點，該像元不太可能屬於該條邊緣線，儘管權值較低但仍舊會影響平差計算。為減少此類被偵測元誤判為邊緣線像元的影響，比較理想的作法是設定可容許的角度差範圍，如： $\pm 30^\circ$ 之間，凡是角度差小於容許範圍內的萃取像元，才納入平差計算，如圖 11 (b) 所示。其中 T_{ijk} 像元梯度方向與框線投影垂直方向的角度差 θ_k 落於 $\pm 30^\circ$ 的範圍內，可視為通過邊

緣線角度篩選納入套合計算。

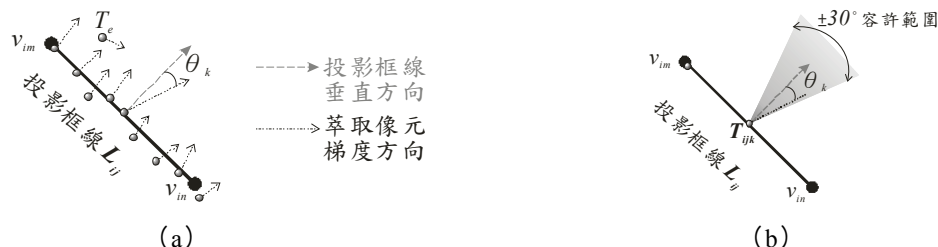


圖 11 萃取像元梯度方向與投影框線方向

梯度方向篩選可與梯度大小加權一併採用：先剔除梯度方向與投影框線垂直方向的角度差在容許範圍之外的萃取像元，再對容許範圍內的萃取像元依其梯度大小加權。如此不僅可以減少偵測元誤判為邊緣線像元的影響，同時也可以將模型套合到梯度大小較強烈的像元。

牆面材質影像製作

得利於浮測模型與建構實體幾何，由航空像片模塑出的幾何模型，可以很快分解成各個外牆面，每個外牆面都是一個多邊形 F_i ，而每個多邊形又是由各個直線段 L_i 構成，每個直線段則是由兩端點 v_i, v_j 定義，如圖 12 所示。因此，只要能確定像片的方位元素，就可以依據式 1 的共線式將每個端點投影到該張像片，再將端點依序連線，就可以繪出外牆面的多邊形，也就是每一個外牆面在該張像片的範圍。現代的行動裝置多半具備全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 接收晶片可以提供攝影站位置，也具備陀螺儀及電子羅盤可以提供攝影時的三軸旋轉角，因此攝影時可以記錄當下的外方位元素。對模型上的每一個外牆面而言，就可以一一投影到所有行動裝置拍攝的像片上，自動檢查該牆面是否出現在該張像片，或是只有部分出現在該張像片。就詳細程度而言，牆面在像片上佔據越大的範圍，理論上能顯示越多細節，該像片越適合作為該牆面的材質影像。但是就完整度而言，最好能找到牆面完整出現在一張影像上，這樣擷取影像的亮度、對比度、色調、飽和度才會一致。若沒有任何一張像片能包含完整牆面，就不能以牆面多邊形為單位來製作材質影像，而必須逐像元自不同像片混合材質影像（王聖鐸等，2008）。

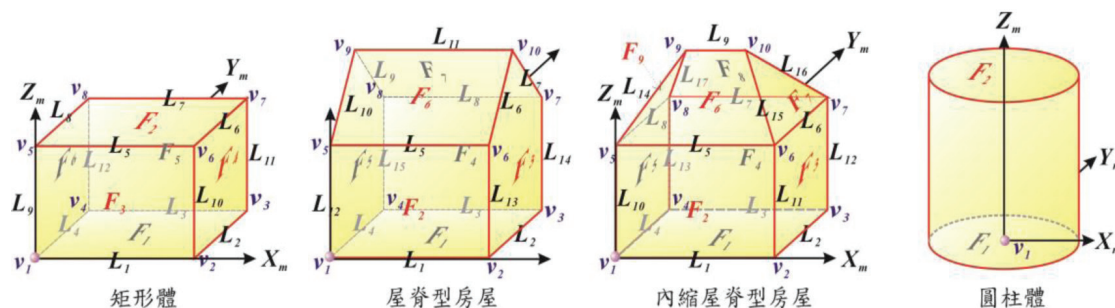


圖 12 浮測模型的解構

本研究以校園建物為實驗對象，在校園內攝影時已盡可能考慮需完整包含牆面，因此採用牆面多邊形為單元製作材質影像，以確保材質影像之一致性。材質影像之製作流程如圖 13 所示。當牆面多邊形投影到真實像片後，即確定牆面的範圍。假設要製作一張 100pixel x 200pixel 之材質影像，則以牆面的左下角為原點，將每一個材質影像的像元投影到真實像片上，如圖 13 中的紅色方塊。由於紅色方塊不會恰巧落在真實影像的整數位置，因此以雙線性內插（Bi-linear Interpolation）重新取樣出材質影像的 RGB 值，如此重新取樣出該牆面的材質影像，敷貼到對應的模型面上。

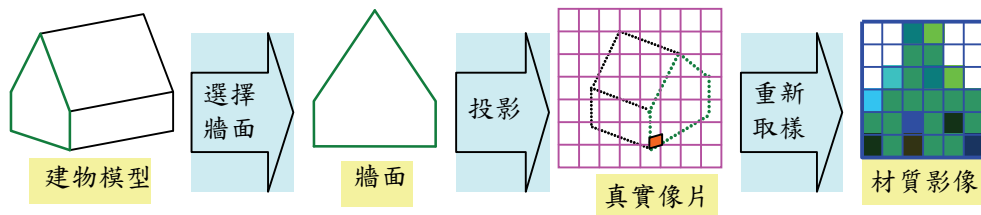


圖 13 材質影像製作流程

實驗測試

為驗證浮測模型理論及本文所提半自動化模塑策略之可行性，本研究以 C++ 程式語言設計了一套在 PC 上可執行的視窗程式，使用者可以一次匯入多張航照影像，並輸入其內方位元素及外方位元素，若有需要，也可以在視窗右端的操作面板即時修改方位元素，如圖 14 所示。

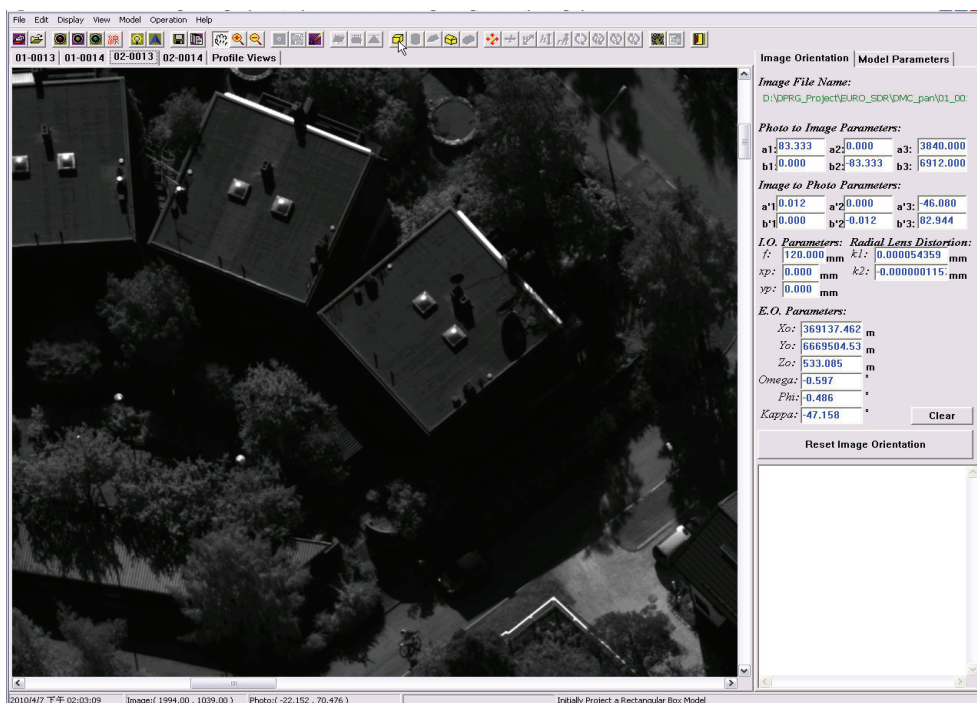


圖 14 本研究所設計之人機互動介面

本研究所使用之航照影像是以 Intergraph Z/I Imaging 出品的 RMK DX 相機拍攝，像幅為：12096pixel x 11200pixel，像元大小為 $7.2\mu\text{m} \times 7.2\mu\text{m}$ ，率定像主距為：91.9817mm，航高約為 1300m，每像元對應地面解析度約為：10cm。航測像片的內方位元素由率定報告書查得，外方位元素則是先以直接地理定位定向（Direct Geo-referencing）作為初始值，透過量測地面控制點，以及自動匹配連接點，以空中三角航帶平差軟體迭代計算而得，如表一所示。

表 1 本研究使用航空攝影像片之外方位元素

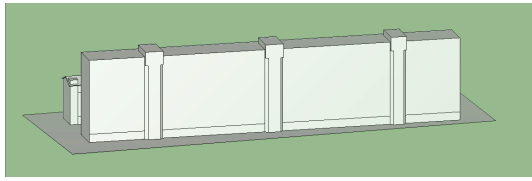
ID	X_o	Y_o	Z_o	ω	φ	κ
101_0474	303241.975	2768702.906	1331.429	0.6042	-0.8832	-177.6828
101_0475	303040.865	2768703.811	1332.241	0.6173	0.0619	-178.8835
101_0476	302838.873	2768706.341	1334.716	-0.2830	0.5567	-178.7466

地面像片則是以 hTC 出品的 EVO 3D 智慧型手機拍攝，像幅為：2560pixel x 1920pixel，像主距約為：12.524mm。手機內建有 GPS 接收儀，可記錄拍攝當時攝影站位置；內建陀螺儀及電子羅盤，可記錄拍攝當時手機的三軸旋轉角，如圖 15 所示。

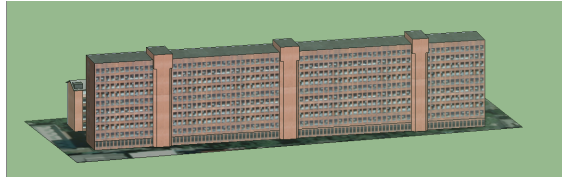


圖 15 使用智慧型手機拍照可同時紀錄拍攝當時的位置與姿態

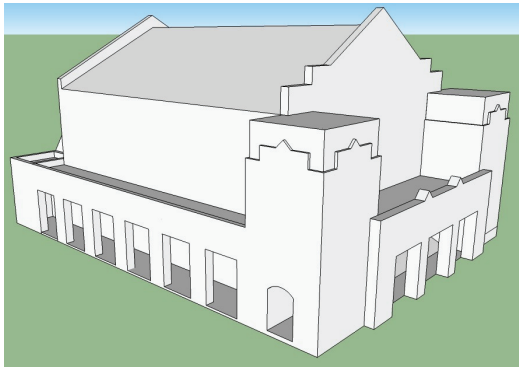
為方便展示成果，我們將模塑後的三維建物模型匯入 Trimble Sketchup 軟體，並對模型作一些細部編修（例如：挖出門廊），再匯出為 Google kmz 檔，並以 Google Earth 作為展示介面，如圖 16 所示。



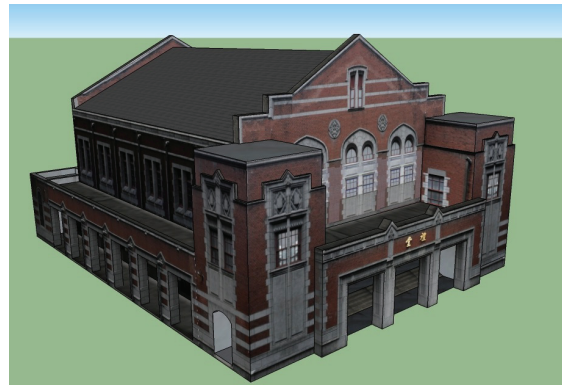
(a) 航測影像重建的文學院大樓幾何模型



(a) 貼上材質後的文學院大樓模型



(a) 航測影像重建的禮堂幾何模型



(a) 貼上材質後的禮堂模型

圖 16 半自動化策略模塑出的三維像真建物模型

結論與建議

本詳述浮測模型與最小二乘模型影像套合之概念，並提出一套半自動化三維建物模型策略，從航測影像中重建建物幾何模型，由行動裝置拍攝影像中萃取牆面紋理材質影像，進而製作出像真三維建物模型。實驗測試過程中發現，以浮測模型模塑三維建物模型與傳統觀念不同，操作員需要一段訓練時間才能上手，且不同操作員可能會用不同的元件來模塑同一棟建物，造成模型會略有不同。另一方面，引入浮測模型概念後，確實能有效提高材質影像製作效率，減少人工裁切、校正影像的工作。

依據本研究實驗經驗，謹提出以下幾點建議供後續研究參考：(1) 增加浮測模型種類：本研究設計浮測模型的表面均以平面為主，曲面固然可以數學函數描述，但要計算曲面模型在影像上的半模型投影卻十分繁雜，因此 CAD 軟體多以多邊形投影來近似。但是以多邊形作為浮測模型的半模型投影，不僅會增加套合時的計算量，而且當多邊形不夠近似於曲面時，就會導致套合失敗。因此如何加入曲面類型的浮測模型，以萃取生活周遭無所不在的圓滑物體，可作為後續研究方向之一。(2) 針對偵測出的邊緣線像元加以處理：本研究是以環域先篩檢偵測出的邊緣線像元，再搭配梯度方向進行過濾，凡環域內梯度方向相符的像元均作為套合的依據。事實上可以再對邊緣線像元進行各項處理，測試其是否確為邊緣線像元，或是在平差的過程中以偵錯的方式剔除非邊緣線的像元，相信更能提高模型-影像套合的正確性與成功率。(3) 彈性調整環域的大小：目前漸減式環域的設定是先設定一個較大範圍，逐次縮小固定寬度。但環域的大小與收斂範圍息

息相關，若縮小的幅度不夠或太多都可能造成套合的失敗。建議可由每一次迭代後的單位權中誤差或觀測量的改正數加以分析，機動調整環域的寬度，或許能提高正確套合的機率。(4) 行動裝置目前的定位定向單元精度仍嫌不足，因此需要一套人機互動調整機制，調整影像的方位元素，如此投影框線才能正確投影。(5) 行動裝置的鏡頭內方位似乎並不穩定，本研究採用預先率定的方法，卻發現框線似乎無法準確套合至影像，除了外方位不夠精確外，很有可能是內方位的誤差。建議後續可針對行動裝置相機的內方位判定進行探討。

誌謝

本研究中以行動裝置拍攝影像製作牆面材質之部分研究承蒙國科會研究計畫（NSC 100-2221-E-003-025）補助得以完成，謹申謝忱。並感謝國立臺灣師範大學地理學系劉婕昕同學、黃傳楷同學之協助，使實驗及測試得以順利進行。

參考文獻

- 王聖鐸 (2007): 〈以浮測模型理論萃取三維空間資訊-以建物重建為例〉, 《航測及遙測學刊》, 12 (4): 489-507。
- 王聖鐸, 曾義星, 傅秉綱 (2008): 〈以真實影像自動化敷貼三維建物模型表面之研究〉, 《航測及遙測學刊》, 13 (2): 75-84。
- Ameri, B. (2000): *Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings through Computer Vision and Digital Photogrammetry*. Stuttgart: Doctoral Thesis of the University of Stuttgart: 110 pages.
- Böhm, J., Brenner, C., Gühring, J. and Fritsch, D. (2000): Automated Extraction of Features from CAD Models for 3D Object Recognition. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 76-83.
- Braun, C., Kolbe, T.H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A.B., Förstner, W. and Plümer, L. (1995): Models for Photogrammetric Building Reconstruction. *Computers & Graphics*, 19(1): 109-118.
- Canny, J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6): 679-698.
- Chio, S.-H. (2001): *A Practical Strategy for Roof Patch Extraction from Urban Stereo Aerial Images*. Tainan: Doctoral Thesis of the National Cheng Kung University: 97 pages.
- El-Hakim, S. (2000): A Practical Approach to Creating Precise and Detailed 3D Models from Single and Multiple Views. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 202-209.
- Ermes, P. (2000): Constraints in CAD Models for Reverse Engineering Using Photogrammetry. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 215-221.
- Ermes, P., van den Heuvel, F.A. and Vosselman, G. (1999): A Photogrammetric Measurement Method Using CSG Models, *ISPRS Workshop on "Measurements Project Modeling and Documentation in architecture and Industry"*: 36-42.

- Fischer, A., Kolbe, T.H. and Lang, F. (1999): On The Use of Geometric and Semantic Models for Component-based Building Reconstruction. *SMATI '99 Workshop*: 101-119.
- Förstner, W., 1994. A Framework for Low Level Feature Extraction. *Computer Vision*. Berlin: Springer: 383-394.
- Förstner, W. (1999): 3D-City Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods. *Photogrammetric Week '99*: 291-304.
- Fritsch, D. (1999): Virtual Cities and Landscape Models - What Has Photogrammetry to Offer? *Photogrammetric Week '99*: 3-14.
- Grün, A. (2000): Semi-automated Approaches to Site Recording and Modeling. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 309-318.
- Grün, A. and Dan, H. (1997): TOBAGO - A Topology Building for the Automated Generation of Building Models. *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*: 149-160.
- Gülch, E. (1997): Application of Semi-Automatic Building Acquisition. *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*: 129-138.
- Heuel, S. and Förstner, W. (2001): Matching, Reconstructing and Grouping 3D Lines from Multiple Views Using Uncertain Projective Geometry, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 1-8.
- Hrabacek, J. and van den Heuvel, F.A. (2000): Weighted Geometric Objects Constraints Integrated in a Line-Photogrammetric Bundle Adjustment. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 380-387.
- Läbe, T. and Gülch, E. (1998): Robust Techniques for Estimating Parameters of 3D Building Primitives, *ISPRS Commission II Symposium*, Cambridge.
- Lang, F. and Förstner, W. (1996): 3D-City Modeling with a Digital One-eye Stereo System, *Proceedings of the XVIIIth Congress of the ISPRS*: 415-420.
- Li, D. and Zhou, G. (1994): CAD-based Line Photogrammetry for Automatic Measurement and Reconstruction of Industrial Objects, *ISPRS Commission V Symposium on Close Range Techniques and Machine*: 231-240.
- Lowe, D.G. (1991): Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(5): 441-450.
- McIntosh, J.H. and Mutch, K.M. (1988): Matching Straight Lines. *Computer Graphics and Image Processing*, 43: 386-408.
- Medioni, G. and Nevatia, R. (1984): Matching Images Using Linear Features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(6): 675-685.
- Mohan, R. and Nevatia, R. (1989): Using Perceptual Organization to Extract 3-D Structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(11): 1121-1139.
- Mulawa, D.C. and Mikhail, E.M. (1988.): Photogrammetric Treatment of Linear Features, *Proceedings*

- of the XVIth Congress of the ISPRS: 383-393.
- Noronha, S. and Nevatia, R. (1997): Detection and Description of Buildings from Multiple Aerial Images., *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 588-594.
- Rau, J.-Y. (2002): *Geometrical Building Modeling and Its Application to the Ortho-rectification for Aerial Images*. ChungLi: Doctoral Thesis of the National Central University: 104 pages.
- Rottensteiner, F. (2000): Semi-Automatic Building Reconstruction Integrated in Strict Bundle Block Adjustment, *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 461-468.
- Schindler, K. and Bauer, J. (2003): A Model-Based Method For Building Reconstruction, *ICCV Workshop on Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion*.
- Tseng, Y.-H. and Wang, S. (2001): Semi-automatic Building Extraction by Matching CSG Primitives with Aerial Images, *The Asia GIS 2001*: 1-8.
- Tseng, Y.-H. and Wang, S. (2003): Semi-automated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(2): 171-180.
- van den Heuvel, F.A. (2000): Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. *Proceedings of the XIXth Congress of the ISPRS*: 852-863.
- Veldhuis, H. and Vosselman, G. (1998): The 3D Reconstruction of Straight and Curved Pipes Using Digital Line Photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(1): 6-16.
- Vosselman, G. and Haralick, R.M. (1996): Performance Analysis of Line and Circle Fitting in Digital Images, *The Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms*: 1-24.
- Vosselman, G. and Tangelder, J.W.H. (2000): 3D Reconstruction of Industrial Installations by Constrained Fitting of CAD Models to Images, *Mustererkennung 2000*: 285-292.
- Vosselman, G. and Veldhuis, H. (1999): Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(7): 769-776.
- Wang, S. and Tseng, Y.-H., 2009. Least-Squares Model-Image Fitting of Floating Models for Building Extraction from Images, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 32(5): 667-677.

投稿日期：103 年 2 月 24 日

修正日期：103 年 4 月 28 日

接受日期：103 年 4 月 29 日