

以浮測模型理論萃取三維空間資訊

- 以建物重建為例

王聖鐸¹ 曾義星²

摘要

數十年來攝影測量一直被認為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，是萃取三維空間資訊的瓶頸。本研究採用模型式建物萃取法 (Model-based Building Extraction, MBBE)，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。零維的浮測標拓展到三維的浮測模型，除了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，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，此時之模型參數即為最佳解，此即以浮測模型萃取三維空間資訊之基本理論。本研究建置了點、線、面、立體四大類基本元件模型庫，量測員可以依需要選擇適當元件模型，在多張重疊像片上進行模型式的量度。並可依模型精細程度需求，以數個基本元件模型分部萃取，再透過布林運算規則組合為複合模型，因此能適用於萃取大多數的三維建物。本研究並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影像，交由電腦透過最小二乘模型-影像套合演算法自動計算最佳套合。以便在已知相片方位的條件下萃取地物的三維空間資訊，或在已知地物模型的條件下利用模型求解相片的外方位元素。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

1. 前言

三維城市模型或三維空間資訊系統整合各方面所需的空間資訊，可廣泛應用在都市計畫、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方式卻造成生產的瓶頸。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領域共同的研究目標

(Ameri, 2000; Braun et al., 1995; Chio, 2001; Grün, 2000; Lang and Förstner, 1996; Lowe, 1991; Mohan and Nevatia, 1989; Noronha and Nevatia, 1997; Rau, 2002; Shufelt, 1999; van den Heuvel, 2000; Vosselman and Veldhuis, 1999)。許多建物重建的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

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系博士後研究員

² 國立成功大學測量及空間資訊學系教授

資訊被不相關的資訊所干擾時，如：植被、車輛、建物的細部等，此時建物模型的使用便顯得十分重要(Grün, 2000)。

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 (Line Photogrammetry) 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。因此直線式攝影測量常被用於重建工業管線模型(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)。就航空攝影測量而言，都市區由於建物密集且屋頂邊緣線經常被遮蔽，因此也相當適合以直線式攝影測量避開尋找共軛點的瓶頸(Chio and Wang, 1999; Haala, 1995; van den Heuvel, 1999; Zhou and Li, 2001)。

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)。其定義為：「整合了以 CAD 模型來描述物體的攝影測量」，亦即其數學模式必須包含影像量測資料與待定 CAD 模型參數之間的關係，CAD 式攝影測量系統不一定要擁有完整的 CAD 系統功能，但其測量成果必須為包含幾何與位相屬性的完整 CAD 模型。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，並引入直線式攝影測量的概念將其與影像上的直線段套合，以求解模型參數。

本研究亦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。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。

2. 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」模型命名由來。

2.1 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。

2.2 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，可將浮測模型在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 1 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 1 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。

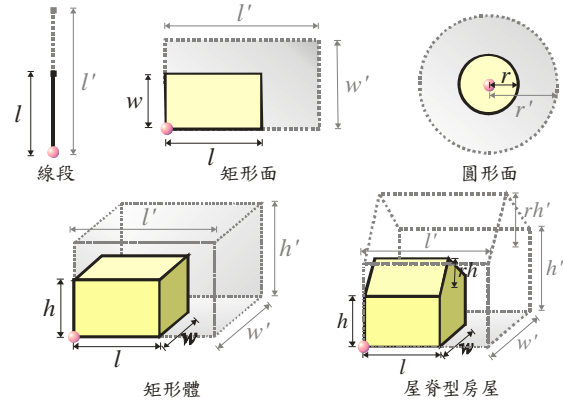


圖 1、五種浮測模型之形狀參數

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 軸方向的平移量 dX 、沿 Y 軸方向的平移量 dY 、以及沿 Z 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 軸方向的旋轉量 s 、逆時針繞 Y 軸方向的旋轉量 t 、以及逆時針繞 Z 軸方向的旋轉量 α 來描述元件在空間中的姿態。圖 2 顯示了四種模型：點、直線段、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，姿態參數的改變並不會影響模型的外型或尺寸，僅改變模型在空間中的位置與姿態。

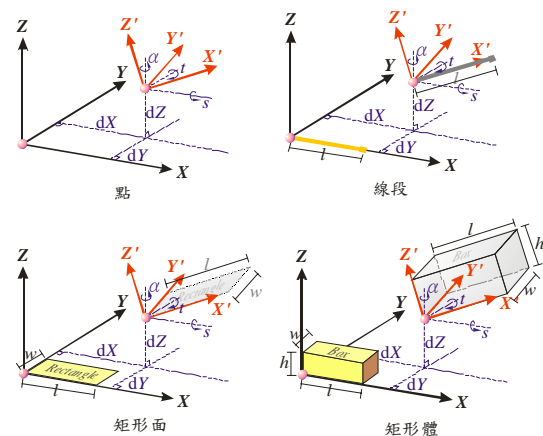


圖 2、四種浮測模型的姿態參數

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 $X - Y - Z$ ，但各對應軸尺度均已相等。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。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，如圖 3 所示。

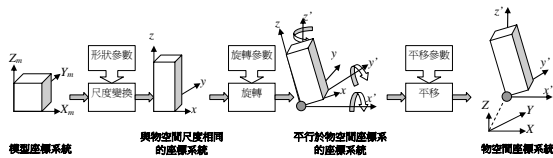


圖 3、浮測模型的三維座標系統轉換

2.3 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 4 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 5 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。

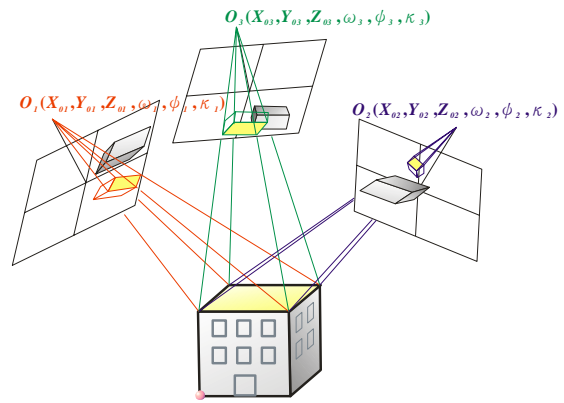


圖 4、模型在影像外方位不正確時的投影

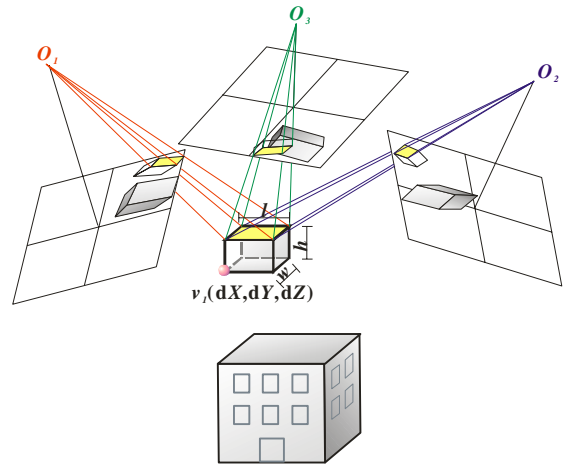


圖 5、參數錯誤的模型在影像上的投影

浮測模型是以形狀參數與姿態參數來控制其變形與浮動，而參數的調整可以分為兩種方式：(1)直接修改參數；(2)拖拉、伸縮、旋轉模型。直接修改參數可以很精確地調整模型的浮動與變形，但是對於操作員而言不夠直覺。直接拖拉、伸縮、旋轉模型比較符合操作員直接控制模型的期望，但是拖拉模型會同時影響多個參數。建議依照：「先對齊基準點（調整姿態參數中的平移參數）、接著三軸順序旋轉（調整姿態參數中的旋轉參數）、最後才延伸模型（調整形狀參數）」的原則來調整參數，才能盡量將參數的影響量獨立開來。

若影像外方位元素 $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$ 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 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 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。

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 6 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 L1、L2、L10，在影像 B 上無法顯示 L2、L3、L11，在影像 C 上無法顯示 L1、L4、L9，在影像 D 上無法顯示 L1、L3、L4、L9、L12。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 v5、v6、v7、v8 同時出現，其他的角點都無法觀測。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，可提高套合的可靠性。

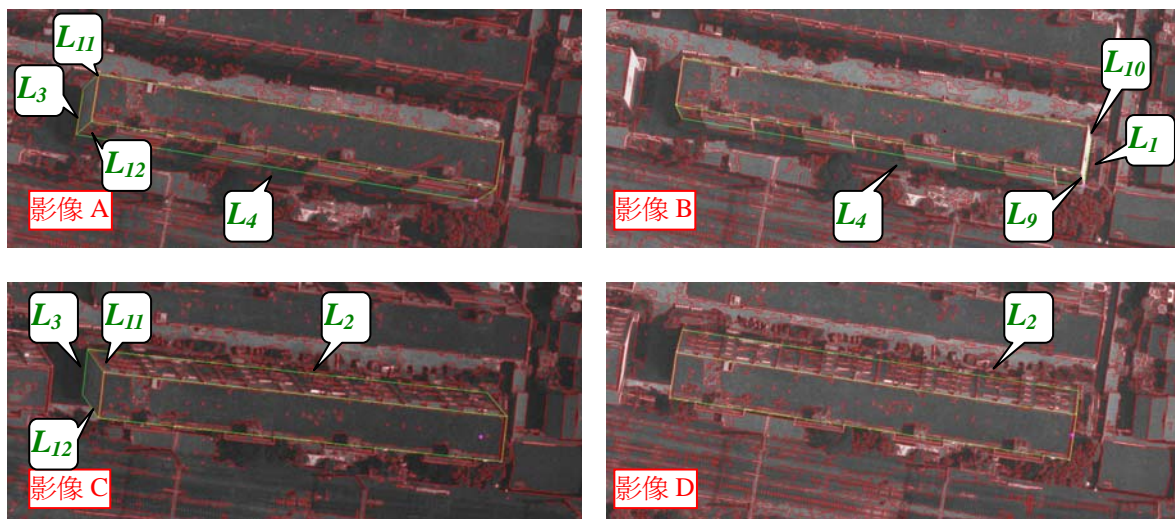


圖 6、矩形體模型在四張影像上的觀測情形

2.4 模型-影像最佳套合概念

浮測模型法的基本概念就是將模型投影到影像，控制半模型的浮動與變形使其與影像套合，以求解模型的形狀與姿態參數。因此模型與影像特徵是在像片（或影像）座標系統套合，而不是在物空間座標系統套合。像片上最適合套合的依據即為線特徵，亦即將半模型的框線套合至影像上萃取出來的邊緣線特徵像元。圖 7 是套合線特徵的示意圖，灰色小圓點代表影像上萃取出來的特徵像元，虛線箭頭的方向代表藉由調整模型參數使半模型更貼近特徵萃取像元。以萃取像元到半模型邊緣線的垂直距離為觀測量，令所有觀測量的期望值為零做為目標函式，可將邊緣線調整至最符合萃取像元分佈的狀態。圖 7 中半模型的一條邊緣線可以同時套合到多個邊緣線像元，而計算最佳套合時是將所有影像上半模型的所有邊緣線一起加入，因此多餘觀測相當充足。

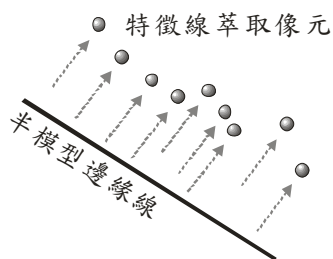


圖 7、模型-影像套合的依據-線特徵

3. 模型-影像最佳套合

3.1 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 萃取出來的像元，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，可確保萃取出來的邊緣線寬度僅一個像元，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，改善模型-影像最佳套合的成果。

3.2 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 8 顯示模型其中一條框線的環域。

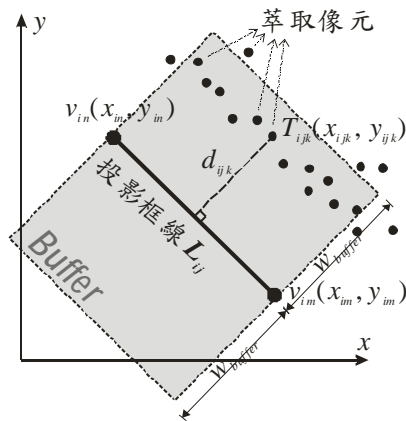


圖 8、搜尋環域

假設圖 8 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。本文採取漸縮式策略，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。

3.3 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 8 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 個被萃取出來的邊緣線像元像片座標，則距離公式如下：

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

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_{Ei} 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：

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

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，其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(dijk) 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 dijk 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
j 代表模型的邊緣線編號
k 代表某邊緣線搜尋環域內的萃取像元編號

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：

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

在影像外方位元素已知且確定的情況下，(3)式中的 PE 可視為常數，則未知數僅剩下模型的形狀參數 PS 與姿態參數 PP。以矩形面為例，(4)式可改寫為：

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

(7)式為非線性函式，直接代入(6)式不易求解未知參數。故採用牛頓漸進法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：

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

其中 vijk 是觀測量 dijk 與期望值 0 之間的改正數，Fijk0 是函數 Fijk 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 Fijk 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，可以改寫為矩陣形式的： $\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{X} - \mathbf{L}$ ，其中 A 是

函數 Fijk 對未知參數偏微分後的 $m \times n$ 係數矩陣，X 是各項未知參數增量的 $n \times 1$ 向量，L 是函數 Fijk 近似值的 $m \times 1$ 向量，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為：

$q = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$ 為最小，其中 P 是觀測量的權矩

陣，其對角線元素 pmm 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為零。平差計算的過程，是先將未知參數的初始值代入計算 A 矩陣與 L 向量，而後由 $X = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ 計算出未知參數的增量向量 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 A 矩陣與 L 向量，再同樣由 $X = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ 計算出新的未知參數增量向量 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。本研究將平面上模型參數（如：l, w, dX, dY...）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, ...）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 V 與權矩陣 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。另一方面，或可利用各種偵錯方法，在迭代的過程中同時剔除疑為非邊緣線的像元後再重新計算套合。

3.4 觀測點位的權值

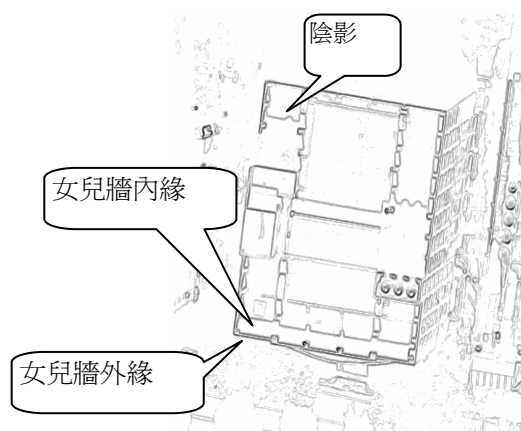
儘管搜尋環域內的邊緣線萃取像元都是邊緣線的備選位置，但是邊緣線偵測元可能受到雜訊或

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並不合理，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越可能為邊緣線。因此梯度的大小與方向，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，則梯度大小可視為像元屬於邊緣線之機率。因此在模型-影像最佳套合計算中，除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，以加權的方式設定其對模型框線的影響力。



(a)



(b)

圖 9、原始影像與梯度影像

圖 9(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，再乘以 255 以正規化到 0~255 之間。圖 9(b)顯示梯度影像的反相，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 9(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近，另外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。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。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} 可採用正規化到 0~1 之間的梯度大小。

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。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。角度差越小者，越可能是邊緣線像元，故賦予較大權值。如圖 10 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 10(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 10(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。

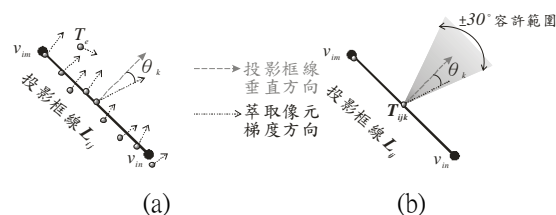


圖 10、萃取像元梯度方向與投影框線方向

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大的像元。

3.5 強制附合與人工修正

當邊緣線在影像上受到陰影、遮蔽或其他雜訊影響，而無法以邊緣線偵測元順利萃取出來時，可能導致 LSMIF 將模型套合至錯誤位置，如圖 11 所示，其中藍色的點位代表邊緣線偵測元萃取出來的像元，綠色的框線代表 LSMIF 套合後的模型框線。圖 11(a)的建物屋頂有許多條紋狀的紋理，建物底部的線段又被樹木所遮蔽。圖 11(b)則是因為樓梯間高於建物主體，恰巧陽光照射的角度使其於建物主體的屋頂面上產生陰影，由於樓梯間與建物主體之間沒有明顯的邊緣線可約制模型的長度 l ，導致模型套合至陰影。圖 11(c)的建物實際上是一「人」字形建物，因此以矩形體模型套合時，無法確定模型的長度 l ，加上建物旁有許多陽台，且陽台一直到建物的底部，因此邊緣線偵測元萃取出來的像元大多是陽台的邊緣線，以致模型在寬度 w 上套合至陽台的邊緣。以上三種套合錯誤的情形並不是 LSMIF 本身套合計算的問題，而是在邊緣線偵測時就無法萃取出正確的邊緣線像元。因此本研究提出兩種解決的方法：(1)若能由其他資訊來源獲得某參數，則將該參數視為已知，重新平差計算其他參數；(2)在影像上加入一虛擬觀測點位，賦予較大之

權值，使模型強制附合到該點。

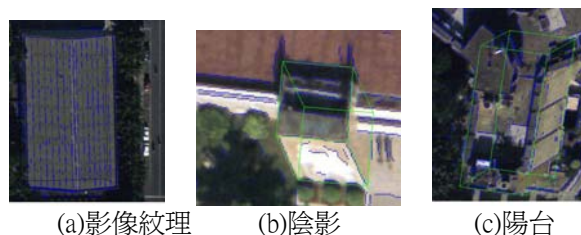


圖 11、三種導致套合錯誤的情形

航照影像中建物底部的框線經常被其他建物或樹蔭遮蔽而不可見，邊緣線偵測元無法萃取底部框線的邊緣線像元，導致 LSMIF 無法套合至正確位置。以矩形體而言，若無法觀測底部的 L1, L2, L3, L4 線段，就無法決定矩形體的高 h 與基準點的 dZ 。在 LSMIF 中加入已知參數的方法有二：(1)若資料來源相當正確，則將該參數視為已知數，與其他參數的初始值一併代入計算偏微分係數矩陣 A 與觀測量向量 L ，並自未知數向量 X 中剔除其增量。(2)加入該參數，但讓該參數一起平差，也就是仿照(8)式對該參數單獨列出觀測方程式。例如：由樓層數與樓層高換算出建物高 h_{known} ，在列出所有萃取點的觀測方程式後，再針對建物高 h 增列一條觀測方程式：

$$0 + v_h = \Delta h + h_0 - h_{known} \quad (9)$$

其中 h_0 是建物高的初始參數， Δh 是建物高的增量也是平差計算中的未知數， v_h 是平差後的改正數，並給予該觀測值較大的權值 p_{mm} 。如此不僅平差計算能順利收斂，而且權值 p_{mm} 給得越大，平差後的建物高 ($h_0 + \Delta h$) 就會越接近預先設定的 h_{known} 。

若無法由其他來源得知正確之參數，可以在影像上點選確定為邊緣線的萃取像元，作為虛擬的觀測點，增列一條如(8)式的觀測方程式，並給予較大的權值 p_{mm} ，使相對應的邊緣線強制附合到虛擬的觀測點。

4. 實驗測試

為驗證浮測模型理論之可行性，並測試以浮測模型萃取三維空間資訊之精度，本研究以 C++ 程式

語言設計了一套在一般 PC 上執行的視窗程式，並在航空攝影像片上選取數棟常見建物，測試以浮測模型萃取建物三維空間資訊。實驗影像以成大校園為中心，挑選分別於 90、91 年採用同一像機所拍攝的 12 張航空像片，像幅為 230mm*230mm，率定像主距為 305.11mm。第一次航拍平均高度約 1600m，平均比例尺約 1/5000，第二次航拍平均高度約 1200m，平均比例尺約 1/4000，相鄰像片重疊均超過 60%，航帶重疊亦超過 30%。像片經專業掃描儀以 $25 \mu m$ 像元大小數化，故第一次航拍影像每像元約對應地面 0.125m，第二次航拍影像每像元約對應地面 0.1m。透過量測影像框標點的影像座標，以及率定書所記載的框標點像片座標，可求出內方位元素與影像-像片座標之 Affine 轉換參數。而像片的外方位元素，則是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計算而得。

為測試 LSMIF 最佳套合能力，首先以測量系館樓梯間為範例，測試以矩形體模型套合影像，並分析套合的過程。接著改變環域的設定，由寬環域到窄環域，並與漸縮式環域互相比較。為了比較 LSMIF 最佳套合的精度，本研究從實驗區中選取了十棟建物，先以手動調整浮測模型使其近似套合後，再以 LSMIF 計算其最佳套合。將套合成果化算為建物各頂點座標後，與傳統以浮測標立體觀測的成果互相比較，可獲得 LSMIF 的參考實驗精度。

4.1 矩形體模型套合測試

為證明 LSMIF 確實能完成模型-影像之最佳套合，我們從 2-28 與 2-27 兩張像片中挑選了測量系樓梯間作為矩形體模型的套合測試對象，透過人機互動介面將矩形體移動到粗略的位置，並以手動粗略調整模型參數，再交由 LSMIF 自動計算最佳套合。圖 12 顯示兩張原始影像，以黃色的模型框線顯示矩形體模型的初始投影位置，以水藍色的像元標示 Sobel 運作元以門檻值 110 所萃取出的邊緣線像元。

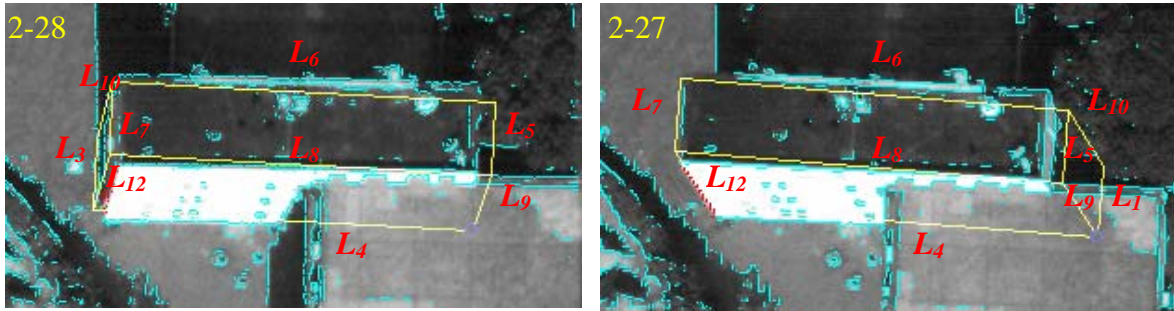


圖 12、測試矩形體模型的原始影像與線框模型初始投影

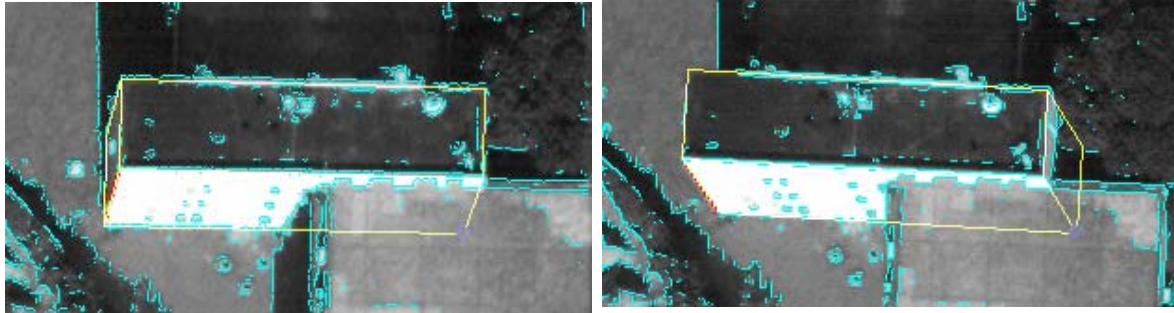


圖 13、矩形體模型套合測量系樓梯間的第 11 次迭代後成果

套合的過程採用漸縮式的環域設定，一開始的環域寬度為：0.5mm（約影像上 20 像元），每次迭代減少 0.05mm，一直縮減到 0.05mm 即不再縮減。迭代到第 11 次後，模型參數的增值均小於預先設定的門檻值，視為收斂至最佳套合位置，圖 13 顯示迭代收斂後的套合成果。

由於 LSMIF 的目的是讓所有萃取點到框線的距離平方和為最小，就如同以最小二乘法求解直線擬合的問題，惟此處可以視為對多條直線同時擬合，因此套合出來的模型參數將使得框線位於所有萃取點的中間。這一點可以由第 1 次迭代後的情形看出，由於屋頂上方及右方的女兒牆分別萃取出內、外邊緣線，因此 L5 及 L6 被套到內、外邊緣線的中間。但是隨著 LSMIF 迭代過程中逐次改進模型參數，使得其他邊緣線也能有更好的套合，以達成所有距離平方和為最小的目標，L5 最後便套到正確的位置。而 L6 儘管有 L10 在 2-28 上少數幾個萃取像元協助決定參數 w ，但畢竟 L6 在兩張影像上具有相對較多數的萃取像元，所有觀測量等權平差的結果，仍維持 L6 套在內、外緣中間位置。

本實驗能成功收斂到最佳套合位置之因素如

下：(1)幾乎所有未受自我遮蔽的邊緣線都有被萃取出來；(2)一開始較寬的環域囊括了所有正確的萃取像元；(3)L6 及 L8 在兩張影像上都萃取出足夠的像元，足以決定模型的長度 l ；(4)L3, L5, L7 也萃取出足夠的像元，足以決定模型的寬度 w ；(5)L3 及 L4 萃取出像元足以決定基準點的高程 dZ ；(6)雖然基準點在兩張影像上都被遮蔽，但因為 L5 及 L8 萃取出足夠的像元，甚至還包括 L9 也萃取出少數幾個像元，再加上其他邊緣線像元的間接影響力，足以決定基準點的水平位置 dX 及 dY ；(7)由於屋頂面 L5, L6, L7, L8 萃取出足夠的像元，搭配底部 L3, L4 萃取出像元所決定的基準點高程，便足以決定模型的高度 h ；(8)逐漸縮窄的環域逐漸減少長距離像元的影響，使得 LSMIF 能收斂到正確位置。

4.2 環域測試

環域的大小將會影響 LSMIF 的搜尋範圍，同時也會影響平差計算是否能收斂。本節即針對固定式的環域大小進行測試，並與漸減的環域設定比對與分析，故此處仍以圖 12 的兩張影像以及初始的模型參數作為測試對象，將環域在像片空間上的大小分別固定為 0.5mm、0.4mm、0.3mm、0.2mm、

0.1mm、0.05mm 進行測試，則套合結果分別如圖 14 所示。

由圖 14 可以清楚看出(a)0.5mm 及(b)0.4mm 由於環域太大，底部的四條邊線逐步提高，多次迭代後，將底部的四條邊線也套到與頂面相同的四條邊線，以獲得最多的觀測量與最小的距離平方和，結果使得模型的高度 h 為 0。(c)0.3mm 及(d)0.2mm 的結果很接近，迭代 4 次後即收斂，套合成果相較於(a)或(b)已經有所改善，但因為環域仍然太大，底部的 L3 套到錯誤的陰影，L11 及 L12 也未套到正確的邊緣線像元上。(e)0.1mm 的環域設定在 8 次迭代後，得到最接近最佳套合值的套合成果，是固定環域測試中唯一套合成功者。而(f)0.05mm 則可能是因為環域太窄，迭代 4 次後即固定在錯誤的套合位置。由迭代收斂後的單位權中誤差來看，可以發現環域越小、包含的邊緣線萃取像元越少，單位權中誤差也會隨之降低。儘管(f)的單位權中誤差較(e)小，但(e)的套合結果卻遠比(f)正確，因此單位權中誤差只能視為模型框線與邊緣線像元吻合度的指標，而不宜作為套合結果是否正確的判斷依據。

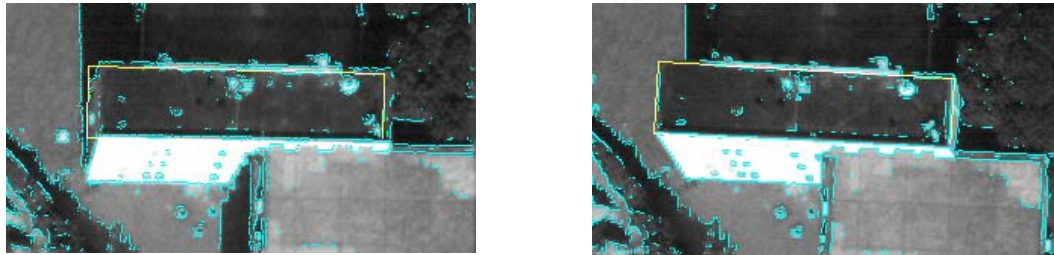
回顧先前的漸減式環域設定：一開始的環域大小與(a)相同，在迭代 2 次後環域大小與(b)相同，迭代 4 次後環域大小與(c)相同，迭代 6 次後環域大小與(d)相同，迭代 8 次後環域大小與(e)相同，迭代 10 次後環域大小與(f)相同，而在第 11 次迭代達到最佳套合。相較於唯一成功的固定式環域(e)的 8 次迭代即收斂，漸減式的環域設定似乎需要較多次迭代；但是相較於其他固定式環域失敗的套合結果，漸減式的環域設定顯然使得 LSMIF 比較容易收斂到正確位置。而在實際操作上，操作員透過人機互動介面將模型近似套合影像後，可大約評估模型投影框線與影像之間的最大不符程度，乘上掃描解析度，即可做為設定環域的依據。若搭配漸減式的環域設定，將有助於減少長距離錯誤萃取像元的影響，也可避免太窄的環域使得模型固定在錯誤萃取像元上。

4.3 十棟建物範例

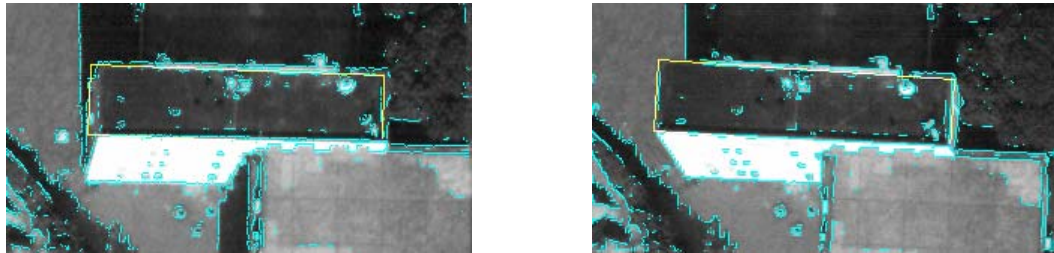
本研究從第一次航拍影像上選取了 10 棟不同類型的建物作為套合的實驗對象，除了建物一與建物七可由單一個屋脊型房屋模型元件萃取外，其餘建物は採用至少 2 個、至多 5 個浮測模型元件萃取，共計使用 23 個元件套合。除了建物八必須約制模型長度 1，否則 LSMIF 套合計算無法收斂之外，其餘模型不加入任何約制條件即可收斂。將最佳套合計算所得的模型投影到影像上後，以目視檢驗建物角點套合的正確與否，其成功率大約可達 88.5%。對於套合錯誤或 LSMIF 發散的模型，在手動加入參數約制後，都可以修正到最佳套合。若參數無法得知，亦可以採取加入虛擬萃取像元的方式，強制對應的模型邊緣線套合到該點。

LSMIF 的理論精度可以由 LSMIF 過程中的改正數向量 V 、權矩陣 P 、法方程式逆矩陣 N^{-1} 等推算；而實驗精度則必須對照其他資料來源加以檢核。本實驗在完成 23 個元件的最佳套合後，由模型參數換算出建物頂點的座標作為實驗組，並在數位立體測圖儀上以浮測標量測頂點的座標作為對照組。表 1 列出 X 座標差值 ΔX 、 Y 座標差值 ΔY 、 Z 座標差值 ΔZ 、 $\Delta X - \Delta Y$ 幾何平均數、 $\Delta X - \Delta Y - \Delta Z$ 幾何平均數等五項的最大值、最小值、平均值及標準差。

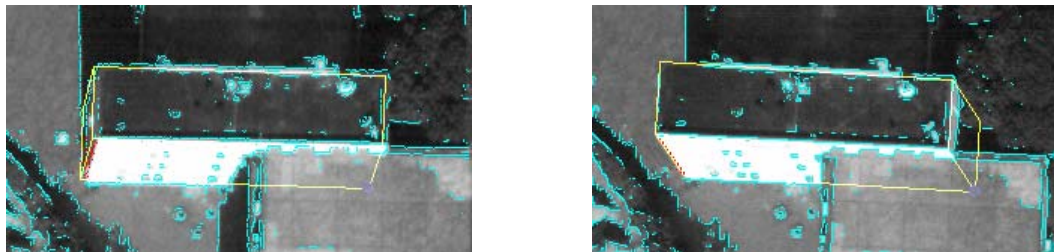
ΔX 與 ΔY 都介於 -1m~1m 之間，平均值分別是 16cm 與 7cm，似乎顯示 LSMIF 套合成果與航測成果之間存在某種系統性的偏移，而標準差分別為 ± 33 cm 與 ± 28 cm，顯示差值的分佈並不是十分集中。由於航測的幾何性質，使得高程方向的量測精度會低於 X - Y 平面上的量測精度，不論是 LSMIF 或浮測標量測所得的 Z 座標精度都較差，因此 ΔZ 的分佈範圍比 ΔX 或 ΔY 更廣，可由標準差擴大為 ± 103 cm 得證。藉由計算 $\Delta X - \Delta Y$ 幾何平均數，可以推估 LSMIF 與浮測標量測座標在 X - Y 平面上的差異量，也就是說，LSMIF 套合所得的平面座標大約會落於傳統航測所得平面座標的 40cm（標準差 24cm）範圍內。若一併考慮 ΔZ 計算幾何平均數，則 LSMIF 套合所得三維座標大約落在傳統航測所得三維座標的 94cm（標準差 62cm）範圍內。



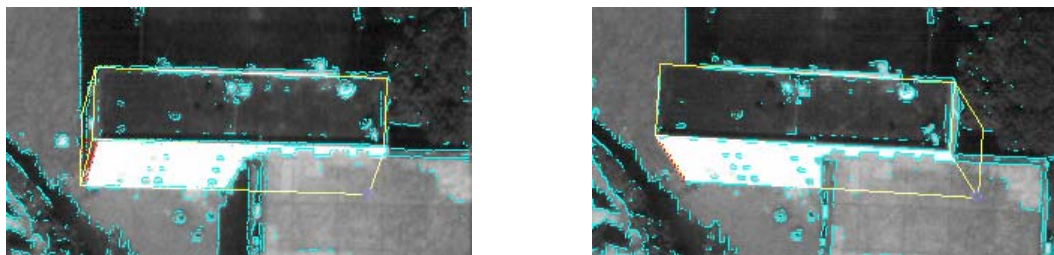
(a)固定環域為 0.5mm，迭代 10 次後收斂，最後環域內共有 1287 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0160$



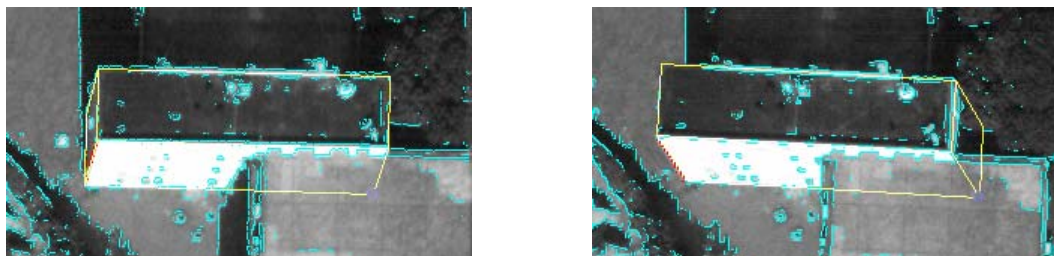
(b)固定環域為 0.4mm，迭代 19 次後收斂，最後環域內共有 1296 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0114$



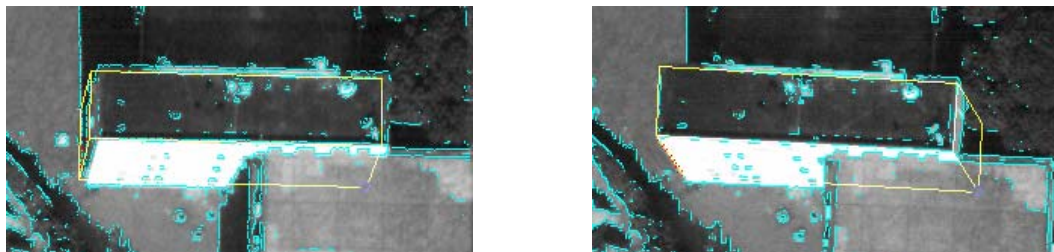
(c)固定環域為 0.3mm，迭代 4 次後收斂，最後環域內共有 1046 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0094$



(d)固定環域為 0.2mm，迭代 4 次後收斂，最後環域內共有 970 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0049$



(e)固定環域為 0.1mm，迭代 8 次後收斂，最後環域內共有 829 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0015$



(f)固定環域為 0.05mm，迭代 4 次後收斂，最後環域內共有 505 個像元， $\hat{\sigma}_0=0.0004$

圖 14、固定六種環域大小的套合成果

表 1、LSMIF 與傳統航測所量測頂點座標差值統計表

	ΔX	ΔY	ΔZ	$\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$	$\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$
最大值(m)	0.983	0.723	3.034	1.072	3.047
最小值(m)	-0.733	-0.985	-1.932	0.045	0.138
絕對值的平均值(m)	0.291	0.223	0.799	0.397	0.942
平均值(m)	0.161	0.070	0.047	0.397	0.942
標準差(m)	0.3296	0.2770	1.0335	0.2400	0.6233

5. 結論與建議

本研究延伸浮測標量度的概念為浮測模型，將零維的浮測標拓展到三維實體，使其除了具有標定三維座標功能之外，更增加了各方向的伸縮量、空間旋轉等參數，成爲一個漂浮在空間中，可移動、伸縮、旋轉以量測各式地物的三維模型。藉由控制浮測模型的浮動與變形，使投影在每一張影像上之半模型均套合至地物之成像，即能萃取出三維空間資訊，重建地物的三維模型。本研究並提出一套最小二乘模型-影像套合演算法，使操作員僅需調整模型近似套合至影像，即可交由電腦自動計算最佳套合時的模型參數。經由航測影像的實驗測試，證明浮測模型理論之可行性，釐清 LSMIF 之最適情形與不足之處。

原則上所有能以參數描述的模型都可以設計為浮測模型，因此操作員只要自各種預先定義的浮測模型中挑選最適合的一種進行量測，就能萃取出屬於該類型的地物，而不再侷限於逐點量測。且浮測模型在定義時即隱含內部幾何約制條件，因此即使物體某部分被遮蔽，仍能萃取出完整的物體模型。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。最佳套合後的浮測模型即代表該物體的外觀，不需要逐點連線。

而在研究的過程中也發現一些浮測模型與 LSMIF 的缺點：(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爲一個浮測模型，而必須切割後再分部進行量度。(3)航測像片中許多建物的底

部是被遮蔽的，而無法提供計算最佳套合的依據。除了由其他來源獲得地面高並在平差中約制 dZ 之外，另一個方法是改用面模型，或是屋頂類的模型（如：橫等腰三角柱體）來套合建物的頂面，再往下延伸到地面構成稜柱體模型。(4)儘管模型本身內部具有幾何約制條件可彌補部分被遮蔽的邊緣線，惟若所有與該參數有關的邊緣線均被遮蔽而不可見，就無法藉由套合以求解參數。(5)由於環域內所有梯度方向相符的像元均納入計算，因此除了遮蔽之外，環域內若有陰影與其他雜訊，只要被判斷爲邊緣線像元就會干擾套合的成果。

在此謹以個人研究經驗，提出以下三點建議供後續研究參考：(1)增加浮測模型種類：本研究所設計浮測模型的表面均以平面爲主，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。但是以多邊形作爲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，可作爲後續研究方向之一。(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爲套合的依據。事實上可以再對邊緣線像元進行各項處理，測試其是否確爲邊緣線像元，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。

參考文獻

- ACRS: Asian Conference on Remote Sensing
- IAPRS: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing
- ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
- PE&RS: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
- Ameri, B., 2000. Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings through Computer Vision and Digital Photogrammetry. Doctoral Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, 110 pages.
- Böhm, J., Brenner, C., Gühring, J. and Fritsch, D., 2000. Automated Extraction of Features from CAD Models for 3D Object Recognition. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 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*, PAMI-8(6): 679-698.
- Chio, S.-H., 2001. A Practical Strategy for Roof Patch Extraction from Urban Stereo Aerial Images. Doctoral Thesis, National Cheng Kung University, Tainan, 97 pages.
- Chio, S.-H. and Wang, S.-C., 1999. Semi-automatic System for Roof Reconstruction Based on 3-D Linear Segments, The 20th ACRS, Hong Kong, pp. 165-170.
- El-Hakim, S., 2000. A Practical Approach to Creating Precise and Detailed 3D Models from Single and Multiple Views. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 202-209.
- Ermes, P., 2000. Constraints in CAD Models for Reverse Engineering Using Photogrammetry. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 215-221.
- Ermes, P., van den Heuvel, F.A. and Vosselman, G., 1999. A Photogrammetric Measurement Method Using CSG Models, ISPRS Workshop "Measurements Project Modeling and Documentation in architecture and Industry", pp. 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, Bonn, pp. 101-119.
- Förstner, W., 1994. A Framework for Low Level Feature Extraction. *Computer Vision*. Springer, Berlin, pp. 383-394.
- Förstner, W., 1999. 3D-City Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods. *Photogrammetric Week '99*. Wichmann, Stuttgart, pp. 291-304.
- Fritsch, D., 1999. Virtual Cities and Landscape Models - What Has Photogrammetry to Offer? *Photogrammetric Week '99*. Wichmann, Stuttgart, pp. 3-14.
- Grün, A., 2000. Semi-automated Approaches to Site Recording and Modeling. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 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, Monte Verita, pp. 149-160.
- Gülch, E., 1997. Application of Semi-Automatic Building Acquisition. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Monte Verita, pp. 129-138.
- Haala, N., 1995. 3D Building Reconstruction Using Linear Edge Segments. Photogrammetric Week '95. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 19-28.
- 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, Hawaii, pp. 1-8.
- Hrabacek, J. and van den Heuvel, F.A., 2000. Weighted Geometric Objects Constraints Integrated in a Line-Photogrammetric Bundle Adjustment. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 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, IAPRS, Vienna, pp. 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. RICS Books, Melbourne, pp. 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.
- Noronha, S. and Nevatia, R., 1997. Detection and Description of Buildings from Multiple Aerial Images., IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, pp. 588-594.
- Rau, J.-Y., 2002. Geometrical Building Modeling and Its Application to the Ortho-rectification for Aerial Images. Doctoral Thesis, National Central University, Chungli, 104 pages.
- Rottensteiner, F., 2000. Semi-Automatic Building Reconstruction Integrated in Strict Bundle Block Adjustment, IAPRS, pp. 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, Nice, France, pp. Softcopy(CD-ROM).
- Schwermann, R., 1994. Automatic image orientation and object reconstruction using straight lines in close-range photogrammetry. IAPRS, 30(5): 349-356.
- Shufelt, J.A., 1999. Performance Evaluation and Analysis of Monocular Building Extraction From Aerial Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 21(4): 311-326.
- Tseng, Y.-H. and Wang, S., 2001. Semi-automatic

- Building Extraction by Matching CSG Primitives with Aerial Images, The Asia GIS 2001, Tokyo, Japan, pp. 1-8.
- Tseng, Y.-H. and Wang, S., 2003. Semi-automated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting. *PE&RS*, 69(2): 171-180.
- van den Heuvel, F.A., 1999. A Line-Photogrammetric Mathematical Model for the Reconstruction of Polyhedral Objects. In: S.F. El-Hakim (Editor), *SPIE*, pp. 60-71.
- van den Heuvel, F.A., 2000. Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. The XIXth Congress of the ISPRS, Amsterdam, pp. 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, Cambridge, pp. 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. Informatik Aktuell*. Springer Verlag, pp. 285-292.
- Vosselman, G. and Veldhuis, H., 1999. Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models. *PE&RS*, 65(7): 769-776.
- Zhou, G. and Li, D., 2001. CAD-Based Object Reconstruction Using Line Photogrammetry for Direct Interaction between GEMS and a Vision System. *PE&RS*, 67(1): 107-116.

Theory of Floating Model in 3D Spatial Information Extraction – A Case Study on Building Reconstruction

Sendo Wang¹ Yi-Hsing Tseng²

ABSTRACT

Photogrammetry has been considered as the most efficient technique for extracting 3D spatial information in the last few decades. However, the 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 an abstract point but many kinds of 3D model, which can be scaled, rotated, or moved in the space. The floating model is defined with a datum point indicates the model's position. 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 outlines. In order to meet the needs of building reconstruction, we designed several primitive models that can be categorized into four kinds: point, line segment, surface, and solid. By means of human-computer interface, the operator is able to choose the most suitable model and measure the object on multiple images. The complicated building can be split into several parts, modeled part-by-part, and finally joined into one complex model. Based on the floating model theory and model-based building extraction, we proposed a semi-automated strategy. A friendly human-machine interface is designed for the operator to choose and adjust the floating model to fit the images manually. Then, the computer calculate the optimal fit by an ad hoc Least-Squares Model-Image Fitting algorithm. Thus the 3D spatial information can be extracted object-by-object, which increases the efficiency and accuracy.

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

¹ Post-doctoral Researcher, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

² Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University