

最小二乘 CSG 模型與影像最佳套合

周宏達¹ 曾義星² 王聖鐸³

摘 要

半自動化模型式建物萃取法是目前航空攝影測量主要的研究方向，其中模型與影像的最佳套合演算法則是整個流程的關鍵。本文設計了兩種常見的房屋模型基本元件(primitive)，依據建構實體幾何(Constructive Solid Geometry, CSG)的理論可將基本元件加以組合，以描述複雜的房屋模型。每個元件都具有一組形狀參數與姿態參數，藉由調整元件的模型參數可以改變元件的外觀、大小以及在物空間中的位置與姿態。本文所提出之最佳套合法是先將房屋元件依已知的內、外方位投影至航照像片，以消除模型邊線投影與房屋影像邊緣線像元之間的不符值為目標函式，採用最小二乘法逐步疊代求出最佳套合時的模型參數。為探討套合過程中各項因素對成果之影響，本文首先針對環域寬度、像片多寡及模型參數的收斂範圍(pull-in-range)進行實驗分析。接著在航照像片上選取十棟成功大學校區周圍的各式建物，以人機互動方式逐一以矩形和屋脊形元件進行近似套合，再由電腦以最小二乘模型-影像套合法自動計算最佳套合時的模型參數，最後換算出屋頂角點之物空間座標與傳統航測立體製圖成果進行比較，以說明最小二乘 CSG 模型-影像最佳套合法之實驗精度及其可行性。

關鍵詞：建物萃取、模型與影像套合、最小二乘、建構實體幾何、建物重建。

1. 前 言

在模型式建物重建法中，模型與影像之最佳套合的成敗可說是整個流程的關鍵。Sester and Fostner (1989)是航測領域中最早提出利用模型與影像套合法萃取房屋資訊的學者，其提出的群集演算法(clustering algorithm)是以強鈍估值法來估計模型參數，然而此方法只適用於單張影像且只能解算模型的平移參數值，並不適用於將模型與多張重疊影像同時套合，也無法彈性運用模型參數。Fua(1996)則採用snake-like的方法來解算模型參數值，該方法是利用房屋邊線大部份是直線且交角為直角的特性，簡化 snake 理論中的能量函式以估求模型參數之最佳值。而 Veldhuis(1998)則以實驗證明，snake-like 法無

¹ 國立成功大學測量工程學系碩士

² 國立成功大學測量工程學系副教授

³ 國立成功大學測量工程學系博士班研究生

論在收斂速度、收斂範圍及參數評估的精確度上，都不如 Lowe(1991)所提的最小二乘模型 - 影像套合法(Least-squares Model-image Fitting)。Lowe 是從電腦視覺(Computer Vision)的觀點，以最小二乘法進行模型 - 影像套合，以求得影像的方位元素及模型參數。該方法可依應用的需求選擇那些參數為未知量，再以最小二乘套合計算來求解參數值，以航測之建物萃取而言，影像的方位參數為已知，模型的形狀及姿態參數則為未知。Veldhuis and Vosselman(1999)的最小二乘模型 - 影像套合法萃取影像中的建物三維資訊，然而其文中並未詳述所使用模型的定義，以及模型 - 影像套合的目標函式。

曾義星(2000)以 top down 的概念提出了半自動化模型式建物重建法 (Model-based Building Reconstruction)。其方法是以 CAD 圖形描述法先建立構成房屋基本形狀的模型基本元件，並集合數種常見的基本元件建置為模型元件庫，以提供使用者選擇最適合影像中房屋外型的元件進行套合。林文棋(2001)由台南市的航照照片將房屋外型整理分類，據以設計一組足以描述大部分房屋外型的基本元件(primitive)，至於較複雜的房屋模型則建議依建構實體幾何理論，將基本元件按布林邏輯運算以 CSG 樹(CSG Tree)的方式組合出複合式的完整房屋模型。此種模形式建物重建法跳脫傳統立體觀測繪圖的概念，房屋資訊的獲取不再是一點一點數化而得，而是一棟一棟的房屋模型與影像套合而得，不但可大量減少人力，且所得資訊更適合建立三維城市資訊系統。

本研究以曾義星(2000)所提的半自動化 CSG 模型式建物萃取法為架構，以林文棋(2001)所設計的基本元件為基礎，修改 Lowe(1991)的最小二乘模型 - 影像套合法，重新定義影像上萃取出房屋的邊緣像元到模型邊緣投影線的距離為套合不符值，採用最小二乘法使所有不符值的平方和為最小，以迭代計算的方式求出最佳套合時的模型參數(周宏達, 2001)。

2. 元件模型的定義與參數

基本元件模型是組成建物的基本單位，附帶有一組可變動的參數，因此又稱參數式模型(parameterized models)。模型的參數可分成兩類，第一類用以描述模型的尺度或外形，稱為形狀參數；第二類則用以改變模型的位置與方位，稱為姿態參數。由於都市地區中的房子多由矩形和屋脊形房屋所組成，因此本文將以這兩種元件來發展模型與影像最佳套合之理論。

2.1 矩形元件模型與屋脊形元件模型

矩形元件模型是一個單位邊長的正方體，角點編號如圖 1 所示，編號為 1 的角點坐落於模型座標系統之原點，稱為基準點。矩形元件的形狀參數有三個：長(l)、寬(w)及高(h)，分別決定矩形元件在 X' 、 Y' 、 Z' 方向上的尺寸，但無論其形狀參數如何變化，矩形元件必須維持矩形形狀。

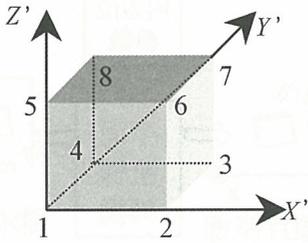


圖 1：矩形元件模型

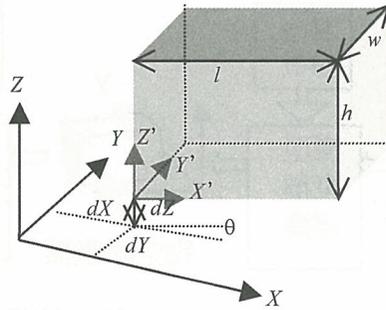


圖 2：矩形元件七個參數的示意圖

矩形元件之姿態參數為 (dX, dY, dZ, θ) ，其中 (dX, dY, dZ) 為平移參數， θ 則為水平旋轉參數，平移參數描述模型基準點相對於物空間座標系統原點之座標平移量，水平旋轉參數則是表達矩形元件在 XY 平面上繞 Z 軸的逆時鐘方向旋轉角。由於大部份建物在一般情況下並不會出現翻轉或傾斜的現象，因此繞 X 軸與繞 Y 軸的兩個旋轉角可視為常數而不加入模型參數，然而在特定情形下仍可將其加入以充分反應建物的現況。因此本研究共使用 $(l, w, h, dX, dY, dZ, \theta)$ 七個參數來描述矩形元件的形狀與姿態，如圖 2 所示。

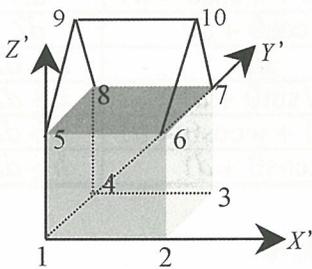


圖 3：屋脊形房屋元件圖

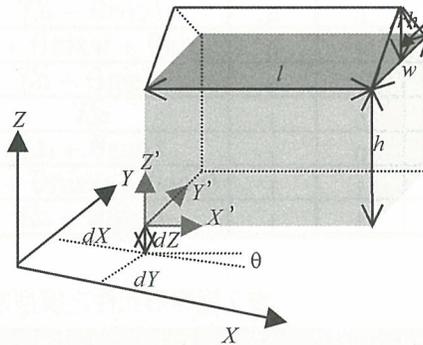


圖 4：屋脊形房屋元件的八個參數示意圖

屋脊形元件(如圖3)則較矩形元件多一個形狀參數 (rh) 來描述屋脊高，其模型參數共八個 $(l, w, h, rh, dX, dY, dZ, \theta)$ ，如圖 4 所示。

2.2 元件模型的座標轉換

模型與影像的套合必須透過一系列的座標轉換步驟，才能在像片座標空間中進行套合，其間涉及的座標轉換如圖 5 所示：

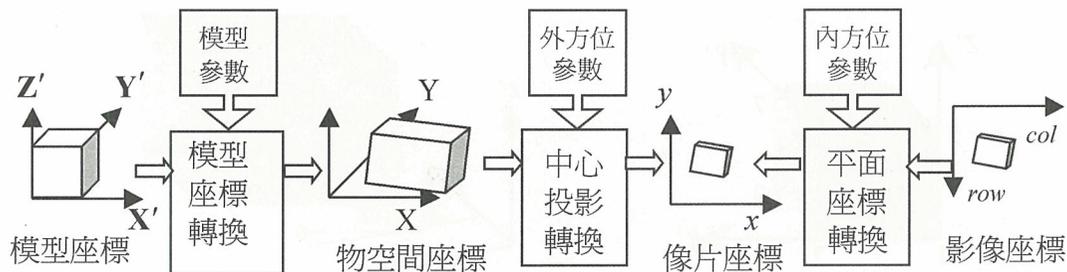


圖 5：座標轉換關係圖

本文所使用的元件模型如圖 1 及圖 3，在原始模型座標系統中矩形元件之長、寬、高皆為 1，屋脊元件之屋脊高亦為 1，則模型各角點之模型座標如表 1 及表 2 所列。所有角點經由座標轉換後，可以用模型參數來表達其物空間座標，如表 1 及表 2 之物空間角點座標一欄所示。

表 1 矩形元件之模型座標與物空間座標

	模型座標			物空間座標		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0	0	0	dX	dY	dZ
2	1	0	0	$l \cos\theta + dX$	$-l \sin\theta + dY$	dZ
3	1	1	0	$l \cos\theta + w \sin\theta + dX$	$-l \sin\theta + w \cos\theta + dY$	dZ
4	0	1	0	$w \sin\theta + dX$	$w \cos\theta + dY$	dZ
5	0	0	1	dX	dY	$h + dZ$
6	1	0	1	$l \cos\theta + dX$	$-l \sin\theta + dY$	$h + dZ$
7	1	1	1	$l \cos\theta + w \sin\theta + dX$	$-l \sin\theta + w \cos\theta + dY$	$h + dZ$
8	0	1	1	$w \sin\theta + dX$	$w \cos\theta + dY$	$h + dZ$

表 2 屋脊形元件之模型座標與物空間座標

	模型座標			物空間座標		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0	0	0	dX	dY	dZ
2	1	0	0	$l \cos\theta + dX$	$-l \sin\theta + dY$	dZ
3	1	1	0	$l \cos\theta + w \sin\theta + dX$	$-l \sin\theta + w \cos\theta + dY$	dZ
4	0	1	0	$w \sin\theta + dX$	$w \cos\theta + dY$	dZ
5	0	0	1	dX	dY	$h + dZ$
6	1	0	1	$l \cos\theta + dX$	$-l \sin\theta + dY$	$h + dZ$
7	1	1	1	$l \cos\theta + w \sin\theta + dX$	$-l \sin\theta + w \cos\theta + dY$	$h + dZ$
8	0	1	1	$w \sin\theta + dX$	$w \cos\theta + dY$	$h + dZ$
9	1/2	0	2	$\frac{1}{2}l \cos\theta + dX$	$-\frac{1}{2}l \sin\theta + dY$	$rh + h + dZ$
10	1/2	1	2	$\frac{1}{2}l \cos\theta + w \sin\theta + dX$	$-\frac{1}{2}l \sin\theta + w \cos\theta + dY$	$rh + h + dZ$

由於像片外方位元素為已知，我們可以根據共線式將物空間座標系統中的角點座標，逐一投影到像片座標系統，按照角點的編號可以重組模型的邊線，即為模型在該張像片上的線框(wire frame)投影。

評估模型與影像是否套合的依據為模型邊線投影與影像中房屋邊緣線像元之吻合度，藉由模型座標系統到像片座標系統的轉換，可以獲得模型邊線在像片空間的投影。而邊緣線像元則可藉由特徵萃取技術求得，邊緣線萃取的方法有很多種，本文應用 F 類 stner(1994)提出的方法來萃取線特徵像元，在實際的程式運作上則是以邱式鴻(1996)撰寫的程式來萃取影像中的房屋邊緣線像元，再利用已知的像片內方位元素將萃取出的邊緣線像元影像座標轉換到像片座標系統，進而與模型邊線投影進行模型-影像最佳套合計算。

3. 最小二乘套合演算法

3.1 觀測函式

當模型與影像上的房屋完全套合時，模型頂點經由座標轉換投影至像片空間後所組成的模型邊緣線投影，與影像上萃取出的房屋邊緣線像元經內方位轉換至像片空間後的特徵像元點理應重合，其間的差異量可視為不符值而以點到直線之距離 d 來描述，如圖 6 及式(1)所示。

$$d = \frac{|(y_1 - y_2)x_i + (x_2 - x_1)y_i + (y_2x_1 - y_1x_2)|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \quad (1)$$

式中 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 是房屋模型邊緣線兩端點投影的像片座標，圖 6 中之 T 是影像中萃取出的房屋邊緣線像元， (x_i, y_i) 亦為轉換後的像片座標。

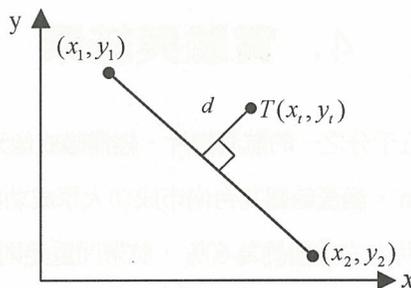


圖 6：點到直線之垂直距離示意圖

在實際應用上，我們假設模型參數的近似值已具有相當準確度，因此可先排除模型自我遮蔽的邊線，然後對每個未被遮蔽的邊線設定搜尋範圍，或稱為環域(buffer)，只有在環域內之特徵像元才會形

成觀測方程式(周宏達, 2001)。在不同的近似值或影像複雜度的情形, 吾人採取漸進的環域期能獲得良好的收斂結果, 後續的實驗中, 我們採用了兩種不同的環域設定。

以矩形為例, 特徵像元與模型邊線的垂直距離可視為是七個模型未知參數的非線性函數如式(2):

$$d_i = F_i(dX, dY, dZ, l, w, h, \theta) \quad (2)$$

我們的目的就是要調整模型參數使這不符值之平方和為最小, 所以目標函式如式(3):

$$\sum d_i^2 = \sum [F_i(dX, dY, dZ, l, w, h, \theta)]^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

3.2 最小二乘套合

在理想的套合狀況下, 式(2)中的距離 d_i 應為 0, 亦即模型的邊線投影與影像上萃取出房屋邊緣線完全重合。因此 d_i 可以視為最小二乘平差中的不符值, 而形成如式(4)之觀測方程式。將式(4)線性化之後, 即可逐步疊代求出模型未知參數值。

$$0 + v_i = F_i(dX, dY, dZ, l, w, h, \theta) \quad (4)$$

在航測像片中, 建物常因陰影、被它棟建物遮蔽或自我遮蔽的情況, 造成觀測量不足而導致某些模型參數無法順利解算。此時可利用其它方式(如地面測量)觀測得模型參數值, 將它以式(5)的形式, 當成一種物空間約制條件加入最小二乘演算法中, 使整個系統能順利解算。

$$O_h + v_h = F(dX, dY, dZ, l, w, h, \theta) \quad (5)$$

4. 實驗與結果

實驗影像採用比例尺約為五千分之一的航測像片, 經掃描成像元尺寸為 $25\mu\text{m}$ 的數位影像, 每一像元對應於地面尺寸約為 12.5cm 。涵蓋範圍為台南市成功大學成功校區周圍約五百公尺區域(共兩條航帶, 各航帶為三張像片), 像片左右重疊約為 60%, 航帶間重疊則約為 30%。每張像片皆經空中三角測量計算得其外方位參數, 像片內方位參數則是利用量測像片框標位置並參考像機率定書計算而得。

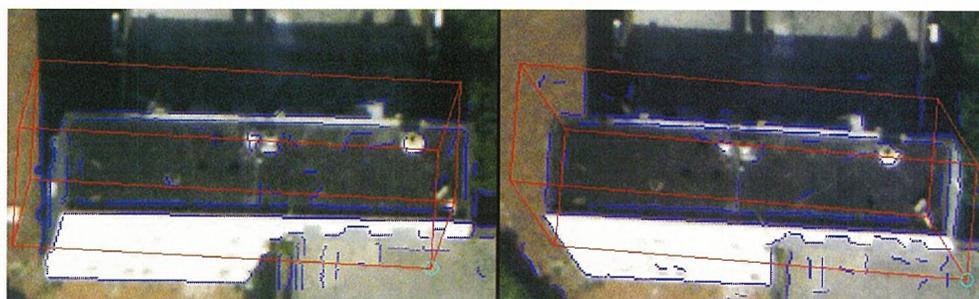
4.1 環域寬度對套合之影響

環域(Buffer)指的是自房屋邊線投影向外延伸固定距離所涵蓋的矩形區域, 只有落在此範圍內的房

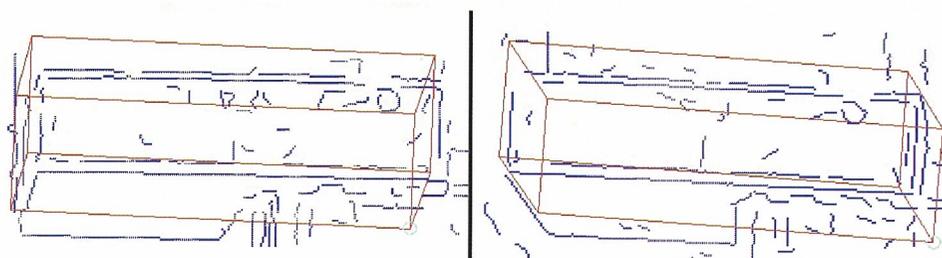
屋影像邊緣線萃取像元，才會被加入最小二乘計算。在模型初始投影時，由於近似參數比較差，因此需要較寬的環域以提高搜尋到正確對應的邊緣線的機率。在疊代後期，模型參數理論上將越來越接近最佳套合狀態，模型邊緣投影應較接近正確的房屋邊緣線，因此環域應該縮減以避免雜訊或誤認像元的干擾。本文根據經驗，設計了一個漸進的環域，初始的環域設定為 0.5mm，前 8 次疊代中環域寬度每次縮減 0.05mm，但在第 9 次疊代後環域就固定在 0.08mm。其套合成果如表 3 和圖 7 所示，將最後得到的模型參數換算成屋頂點之座標，再與傳統立體航測製圖所得之屋頂點座標比較，所得結果如表 4。

表 3 漸進式環域之參數收斂表

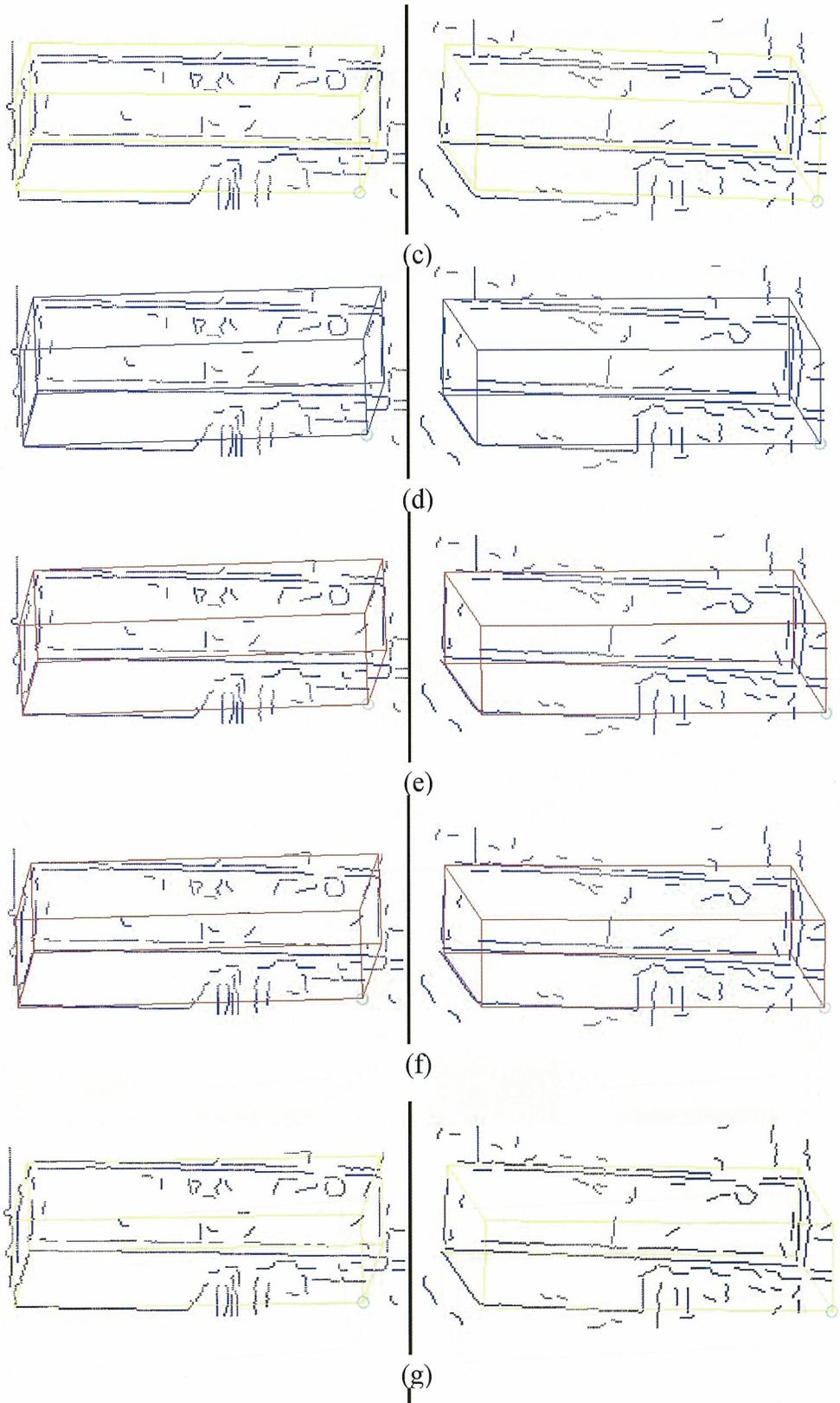
參數值 疊代 次數	$dX(m)$	$dY(m)$	$dZ(m)$	$l(m)$	$w(m)$	$h(m)$	$\theta(度)$
一	169208.8379	2544552.7921	23.4946	7.2346	24.7383	15.2207	6.0965
三	169209.0412	2544552.3858	22.5826	6.9211	24.6351	15.1814	4.0850
五	169209.2990	2544552.0008	22.9087	6.7500	24.8337	15.4530	1.8771
七	169209.3838	2544551.9307	21.8284	6.5597	24.8890	16.3856	1.7552
九	169209.3017	2544551.9341	21.4066	6.4472	24.9050	16.8590	2.0609
十一	169209.2413	2544551.9559	21.1853	6.3441	24.9019	17.1012	2.3622
十三	169209.1685	2544551.9812	21.1014	6.2641	24.8964	17.2003	2.6384
十五	169209.0704	2544552.0054	21.1349	6.2376	24.8879	17.2120	2.8968
十七	169208.9053	2544552.0372	21.2422	6.2066	24.8941	17.0733	3.3794
十九	169208.5753	2544552.1031	21.3970	6.2784	24.8948	16.8574	4.3088



(a)



(b)



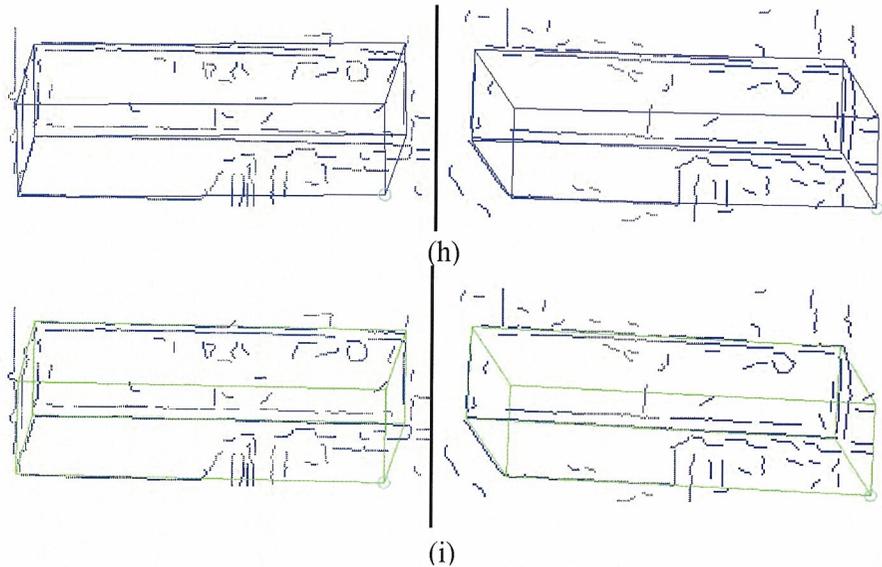


圖 7：漸進式環域最佳套合圖(a)模型投影初始圖(b)第一次疊代後之模型投影圖(c)第三次疊代後之模型投影圖(d)第五次疊代後之模型投影圖(e)第七次疊代後之模型投影圖(f)第十次疊代後之模型投影圖(g)第十三次疊代後之模型投影圖(h)第十六次疊代後之模型投影圖(i)第十九次疊代後之模型投影圖

表 4 漸進式環域套合與傳統航測製圖座標差值之平均值與 RMS 值

座標	差值平均	差值 RMS
X(m)	-0.072	0.139
Y(m)	-0.076	0.121
Z(m)	-0.491	0.493

4.2 像片多寡對套合之影響

以矩形元件為例共有七個未知參數，理論上七個獨立不相關的觀測量恰可以解出矩形元件的模型參數，而影像上的任一條房屋邊緣線在作完影像萃取後都可得到數量相當多的影像邊緣線像元，即使只有單張影像也可以提供大量的多餘觀測。然而在實際應用上，由於房屋邊緣線常因自我遮蔽、陰影、其他建物遮蔽以及拍攝角度等因素而無法被成功萃取出來，此時若能加入多張包含該棟房屋的像片，不僅邊緣線可視的機會增加，模型參數解的可靠度也會提高。為了試驗像片張數對套合結果的結果，我們將對4.1節的矩形房屋分別計算單張、兩張及三張像片的套合結果。結果顯示單張像片由於求解條件不足所以無法完成參數解算。而在兩張和三張套合的比較方面，三張像片套合時的收斂速度較兩張快，由表 5 可以看出使用三張像片套合在第 15 次疊代之後模型參數就已經沒什麼變化，且參數的收斂行為也比較平滑，兩張像片則在前幾次疊代時，呈現在最佳收斂值附近震盪的情況(如表 5)。

表 5 兩張和三張像片套合之參數疊代表

疊代 次數	像片 張數	$dX(m)$	$dY(m)$	$dZ(m)$	$l(m)$	$w(m)$	$h(m)$	$\theta(\text{度})$
一	2	169208.8379	2544552.7921	23.4946	7.2346	24.7383	15.2207	6.0965
	3	169209.1846	2544552.7352	22.0501	7.0908	25.1822	15.1458	6.3231
三	2	169209.0412	2544552.3858	22.5826	6.9211	24.6351	15.1814	4.0850
	3	169208.9634	2544552.4982	20.9531	6.1205	24.7704	15.1735	5.8632
五	2	169209.2990	2544552.0008	22.9087	6.7500	24.8337	15.4530	1.8771
	3	169208.4941	2544552.3681	21.1646	5.9769	24.9409	15.8144	6.3004
七	2	169209.3838	2544551.9307	21.8284	6.5597	24.8890	16.3856	1.7552
	3	169208.5443	2544552.2258	21.1474	6.0767	25.0329	16.1134	5.1752
九	2	169209.3017	2544551.9341	21.4066	6.4472	24.9050	16.8590	2.0609
	3	169208.5558	2544552.1818	20.9708	6.0800	24.9470	16.6816	4.7015
十一	2	169209.2413	2544551.9559	21.1853	6.3441	24.9019	17.1012	2.3622
	3	169208.5052	2544552.2126	21.0507	6.0692	24.8346	16.9125	4.6752
十三	2	169209.1685	2544551.9812	21.1014	6.2641	24.8964	17.2003	2.6384
	3	169208.4527	2544552.2319	21.2567	6.0770	24.7485	16.8719	4.7129
十五	2	169209.0704	2544552.0054	21.1349	6.2376	24.8879	17.2120	2.8968
	3	169208.4332	2544552.2390	21.3416	6.0816	24.7375	16.8392	4.7270
十七	2	169208.9053	2544552.0372	21.2422	6.2066	24.8941	17.0733	3.3794
	3	169208.4333	2544552.2390	21.3415	6.0816	24.7375	16.8391	4.7270
十九	2	169208.5753	2544552.1031	21.3970	6.2784	24.8948	16.8574	4.3088
	3	169208.4333	2544552.2390	21.3415	6.0816	24.7375	16.8391	4.7270

4.3 未知參數的收斂範圍測試

收斂範圍(Pull-in-range)指的是模型參數由初始值到收斂值的範圍，經此項測試後可更了解各模型參數的收斂行為，以作為輸入模型參數近似值的參考。在本節的實驗中，我們以 4.1 節的房屋為例，測試其各參數的收斂範圍。此模型之參數皆為已知，將已知參數值當成起始值，但每次變動一個參數來進行套合，如此循序測試每個模型參數的收斂範圍。測試結果顯示(如圖 8) dZ 和 h 兩個參數的收斂範圍比其它參數要寬，這表示 dZ 和 h 兩參數相較於其它參數在近似參數給定時可較不精確，而 θ 角的收斂範圍約在正負 6 度之內，所以在旋轉角近似值的給定時不能偏差太多。收斂範圍會受到附近其它影像灰階像元的影響，測試環境不同就有可能產生不同的結果，所以本實驗之結果也僅供參考。若測試物體越單純，其萃取出來的影像越清晰，則各參數的收斂範圍應會更有參考價值。

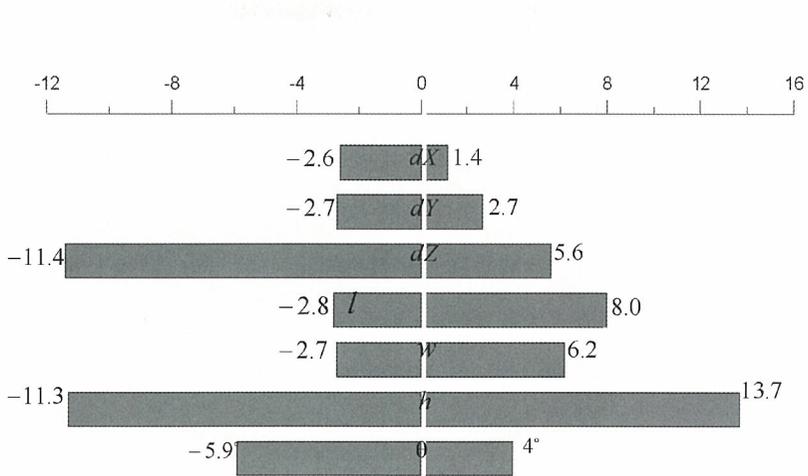


圖 8：矩形元件各模型參數之收斂範圍圖 (其中 θ 單位為度，其餘皆為公尺)

4.4 未知參數附帶條件約制

在航測影像中，由於自我遮蔽或被其它物體或陰影遮蔽等因素，使某些建物的邊緣線不明顯或是無法被萃取出來，其中尤以看不見建物底部的情況最常見(如圖9)。從幾何角度來看(如圖10)，若要解得建物高(h)的參數，至少需有一條屋頂的邊緣線如：編號 5-6 和一條底部的邊緣線如：編號 1-2 才能決定高度(h)。若要決定模型長(l)，則至少需要一條右側的邊緣線如：編號6-7和一條左側的邊緣線如：編號 5-8 的觀測量才行。其它的模型參數也是和上述情況類似。

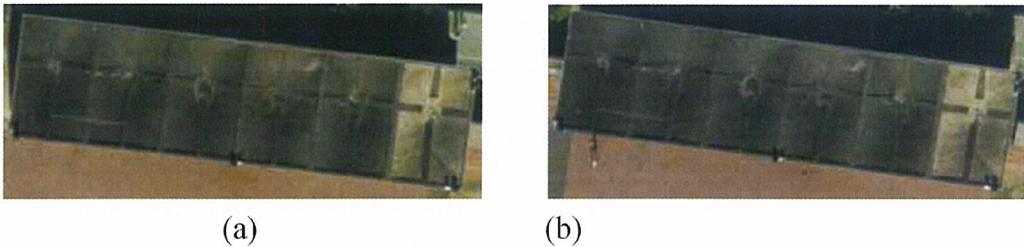


圖 9：底部遮蔽之實驗影像(a)左片(b)右片

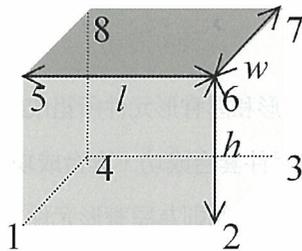


圖 10：矩形元件編號示意圖

若因為陰影或遮蔽之情形造成上述之幾何條件不足，則就算有充足的多餘觀測量，也將因為方程式為 ill-condition，導致某些未知參數之解算值不正確。此時若能經由其他管道求得某些未知參數之值，則可以利用 3.2 節所述之間接觀測附帶條件約制平差法，將已知的參數值視為觀測值，再以加權約制的方法加入最小二乘套合的計算中幫助其他參數的解算。本節則以實驗來驗證其可行性：未加入約制條件時由於房屋底部無法觀測，因此 dZ 和 h 兩參數無法解算(如表 6)，在以其它方式求得 dZ 和 h 的值，並將其視為觀測量並提高其權值加入平差後則可順利求解(如表 7)。

表 6 未知數未帶條件約制之參數疊代表

疊代次數	$dX(m)$	$dY(m)$	$dZ(m)$	$l(m)$	$w(m)$	$h(m)$	$\theta(度)$
一	168695.5115	2544420.6707	發散	12.5562	47.3931	發散	10.3695
二	168694.5774	2544420.3313	發散	12.3660	46.8128	發散	10.4848
三	168694.4342	2544419.9335	發散	12.4072	47.2994	發散	10.5257
四	168694.7308	2544419.9957	發散	12.4967	47.5047	發散	10.3816
五	168694.1632	2544419.5475	發散	12.6329	47.6973	發散	10.4466

表 7 未知數帶有條件約制之參數疊代表

疊代次數	$dX(m)$	$dY(m)$	$dZ(m)$	$l(m)$	$w(m)$	$h(m)$	$\theta(度)$
一	168694.6944	2544420.1107	17.7368	12.6643	47.3217	11.1368	10.4805
三	168694.3914	2544419.7862	17.5248	12.4383	47.3487	10.9248	10.4740
五	168694.2165	2544419.5203	17.5177	12.6380	47.7868	10.9177	10.4072
七	168694.1029	2544419.4053	17.5917	12.7508	47.9967	10.9917	10.5629
九	168694.0723	2544419.3862	17.6610	12.7802	47.9413	11.0610	10.6501
十一	168693.9944	2544419.3665	17.6089	12.8715	47.9675	11.0089	10.6627
十三	168693.9513	2544419.3359	17.5778	12.9070	48.0015	10.9778	10.6656
十五	168693.9411	2544419.3202	17.5675	12.9135	48.0190	10.9675	10.6668
十七	168693.9398	2544419.3138	17.5683	12.9135	48.0258	10.9683	10.6674
十九	168693.9398	2544419.3138	17.5683	12.9135	48.0258	10.9683	10.6674

4.5 套合實例

本文自實驗像片中選出十棟由矩形和屋脊形元件所組成的房屋來作套合的範例。十棟建物共含 27 個元件進行套合，實驗結果中 24 個元件套合成功，套合成功率達 89%。在此列舉兩個套合成功的實例，一為矩形元件之套合(如圖 11)，另一個則為屋脊形元件之套合(如圖 12)，其套合結果計算得之元件角點坐標與傳統航測地形圖比較結果如表 8 和表 9。

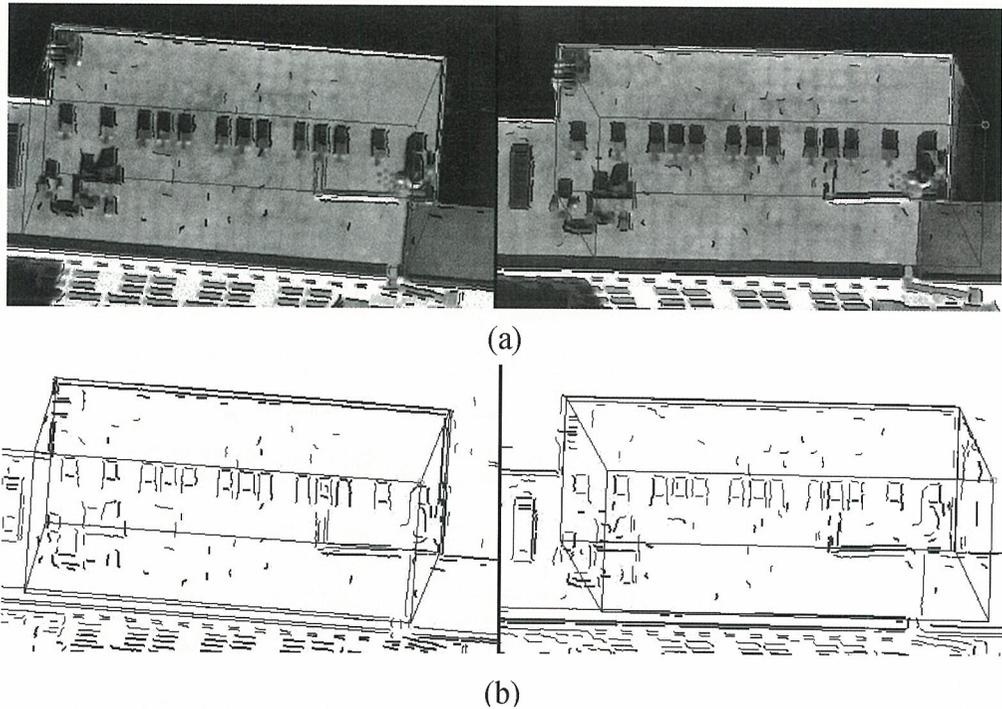
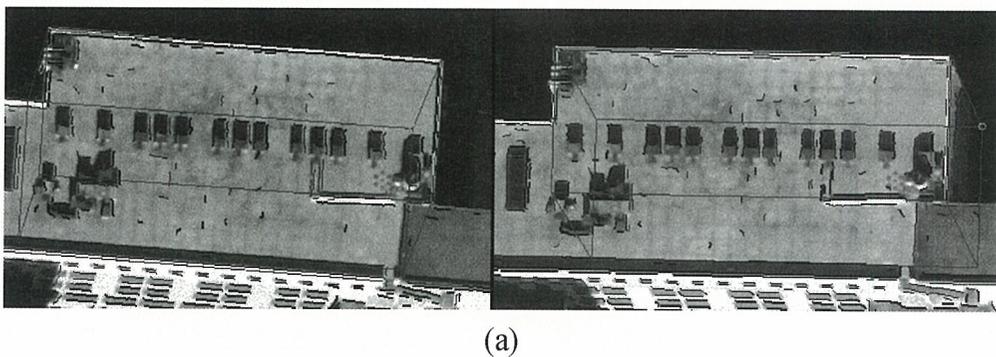


圖 11：矩形元件套合情形(a)初始投影圖(b)19 次疊代後之最佳套合圖

表 8 矩形元件屋頂點與傳統航測製圖角點的座標差值之平均值與 RMS 值

座標	差值平均	差值 RMS
X(m)	-0.180	0.212
Y(m)	0.293	0.327
Z(m)	-0.220	0.221

圖 11 中實例之模型近似參數已接近正確值，故最佳套合與近似套合的差距不大，但由圖中仍可看出最佳套合時，各投影邊線與其相對應之特徵邊緣線都幾乎緊密套合。而其與傳統航測值的比較上，X，Y 和 Z 值都僅約差在 20-30cm。



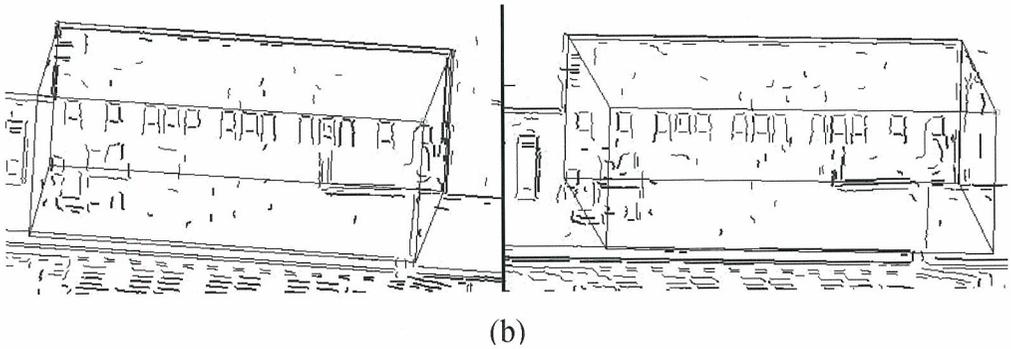


圖 12：屋脊形元件套合情形(a)初始套合圖(b)19 次疊代後之最佳套合圖

表 9 屋脊形元件屋頂點與傳統航測製圖角點的座標差值之平均值與 RMS 值

座標	差值平均	差值 RMS
X(m)	0.244	0.590
Y(m)	0.308	0.655
Z(m)	0.356	0.382

由圖 12 可以看出，模型的近似參數已相當準確，故其初始套合的情況已很接近真實房屋，但仍可看到屋脊高的高度不足，經過 19 次最小二乘疊代計算後，可發現模型邊線與房屋套合的情況略有改善，房屋屋脊的邊線也套合至相對應的位置。

在套合實例中，共使用兩種環域來作套合的計算，其中第一組環域的初始值為 0.5mm，前 8 次疊代時，隨著疊代次數減少而每次縮減 0.05mm，自第 9 次疊代後固定在 0.08mm；而第二組環域的初始值為 0.35mm，每一次疊代後則縮減 0.05mm，自第 6 次疊代後則固定在 0.07mm。由於環域的選用會影響最佳套合的成功率，而其寬度與模型近似參數的好壞則有密切關係，第一組環域初始值較寬，環域寬度在疊代過程中縮減較慢，所以適用於模型近似參數較差時使用；反之第二組環域則適用在模型近似參數較精準時使用。由表 10 可以看出，由於本套合實例之模型近似參數都不錯，所以第二組環域的使用率較高。

表 10 環域選用率

	第一組環域	第二組環域
房屋數目	9	15
百分比	37.5%	62.5%

表 11 為建物使用如式(5)之約制條件加入計算的百分比，由表 11 可以看出，由於航測像片常因建物遮蔽或陰影的問題，使得某些模型參數無法順利解算，其中又以底部線段不可得，導致 dZ 和 h 兩參數無法解算的例子最多，此時須以參數約制條件的方法使整個最佳套合的計算能順利進行。

表 11 建物使用約制條件幫助解算之百分比

	有加入約制條件	無加入約制條件
房屋數目	14	10
百分比	58.3%	41.7%

5. 結論

本研究之套合程式目前只能針對矩形和屋脊形元件，其它元件如等腰三角柱或半屋脊形元件等，其觀測函式原理和矩形和屋脊形類似，所以其與影像的套合也應該適用。由於本文之觀測函式是計算邊緣線像元到模型邊界線的距離，對於曲形元件如圓柱體及圓錐體等，其邊界線並非直線，而且曲面因模型方位不同，投影至影像所形成之邊界線也不同，因此無法直接應用。

影響最佳套合的因素大致可分為邊緣線萃取的好壞、環域是否涵蓋正確的房屋邊緣線像元、模型近似參數的好壞及雜訊點的干擾，若能改善這些因素的影響，最小二乘 CSG 模型與影像的最佳套合的效果應該會更理想。除此之外，後續研究可考慮其他的套合方法，如：基因演算法，評估其是否對以上缺失有所助益。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會研究計畫（NSC90-2211-E-006-103）支持得以順利完成，謹申謝忱。

參考文獻

- 邱式鴻，1996。F 類 stner 特徵物萃取法精確性的探討，第十五屆測量學術及應用研討會論文集，台北市，pp.667-676。
- 周宏達，2001。以最小二乘法進行參數式模型與影像之最佳套合，國立成功大學測量工程學系碩士論文。
- 林文棋，2001。半自動化建物萃取之建物模型建置與操作，國立成功大學測量工程學系碩士論文。
- 曾義星、王聖鐸，2000。結合 CAD 與攝影測量之三維城市模型建置，中華地理資訊學會 GIS 2000 學術研討會論文集，民國 89 年 12 月，台南市，pp.40~48。
- Förstner, W., 1994. A Framework for Low Level Feature Extraction, *Computer Vision*, Springer-Verlag, pp. 383-394.
- Fua, P., 1996. Model-Based Optimization: Accurate and Consistent Site Modeling, *Interna-*

tional Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, pp. 222-233.

Lowe, D. G., 1991. Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(5), pp. 441-450.

Sester, M. and W. Förstner, 1989. Object Location Based on Uncertain Models, *Mustererkennung 1989*, Springer Verlag, pp. 457-464.

Veldhuis, H., 1998. Performance Analysis of Two Fitting Algorithms for The Measurement of Parameterised Objects, *ISPRS Commission 3 ,Working Group 4*, pp. 400-407.

Vosselman, G. and H. Veldhuis, 1999. Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(7), pp. 769-776.

Least-squares CSG Model-image Fitting

Hung-Ta Chou¹ Yi-Hsing Tseng² Sento Wang³

Abstract

Semi-automatic model-based building extraction is the major research topic of digital photogrammetry. The effectiveness of model-image fitting algorithm is the key of semi-automatic model-based building extraction. In this paper, a building is modeled by some combinative primitives, and model-image fitting is proceeded primitive by primitive. After fitting, complex buildings can be modeled by combining simple primitives defined by the theory of Constructive Solid Geometry (CSG). A model primitive can be transformed into the object coordinate system to form its size and position with the shape and pose parameters. With the known photo exterior and interior orientation parameters, the primitive model and image features can be transformed into the photo coordinate system. The fitting is evaluated based on the correspondence between the projected model wire frame and the edge pixels. The least-squares fitting algorithm is applied to solve the optimal fitting and estimate the final model parameters. Ten houses composed of box and gable-roof primitives are tested for demonstration. The experimental results are compared with the data of manual measurements.

Keywords: Building Extraction, Model-image Fitting, Least-squares Fitting, Constructive Solid Geometry, Building reconstruction.

¹ Master, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University

² Associate Professor, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University

³ Ph.D. Student, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University