最小二乘模型-影像套合之各項影響因素探討

Effects of Various Factors on Model-image Fitting Algorithm

王聖鐸[1] 曾義星[2] 劉彥秀[3]
Sendo Wang Yi-Hsing Tseng Yen-Hsiu Liu

摘　要

模型式建物萃取（Model-based Building Extraction, MBBE）之關鍵，在於將建物模型與影像精確套合，以萃取出原本隱含於二維影像內的建物三維空間資訊。最小二乘模型-影像套合法（Least-squares Model-image Fitting, LSMIF）是先將建物的線框模型（Wire-frame Model）投影至已知方位的像片上，並以邊緣線偵測元（Edge Detector）萃取出像片上建物的邊緣線像元，藉由最小二乘法漸進地調整模型參數，使所有邊緣線像元到線框模型投影的距離平方和為最小，進而決定出建物在三維空間中最佳的模型參數（周宏達，2001）。本文以一系列的實驗深入探討 LSMIF 之各項影響因素，包括：（1）邊緣線偵測元、（2）環域內像元的加權方式、（3）模型參數初始值、（4）重疊影像的張數。所得成果不僅釐清各因素對於套合之影響，同時提供一套提升 LSMIF 套合成功率與強鈍性的運作原則。

關鍵詞：最小二乘平差、模型-影像套合、邊緣線偵測、建物萃取

Abstract

Fitting the projected wire-frame model to the detected edge pixels on images by using least-squares approach, called Least-squares Model-image Fitting (LSMIF), is the key of the Model-based Building Extraction (MBBE). It is implemented by iteratively adjusting the model parameters to minimize the squares sum of distances from the extracted edge pixels to the projected wire-frame. This paper describes a series of experiments and studies on various factors affect the fitting results, including the edge detectors, the weighting rules, the initial parameters, and the number of overlapped images. The experimental result is not only helpful to clarify the influences of each factor, but is also able to enhance the robustness of the LSMIF algorithm.

Keywords: Least-squares Adjustment, Model-Image Fitting, Edge Detection, Building Extraction

---

[1] 國立成功大學測量與空間資訊學系博士候選人
[2] 國立成功大學測量與空間資訊學系副教授
[3] 國立成功大學測量與空間資訊學系碩士

一、 前言

以預先建立的建物模型萃取三維空間資訊，稱為模型式建物萃取（Model-based Building Extraction, MBBE），其關鍵在於如何將建物模型與影像套合，以萃取出原本隱含於二維影像內的建物三維空間資訊（Sester and Förstner, 1989; Lowe, 1991; Vosselman, 1998; Tseng and Wang, 2003）。最小二乘模型-影像套合法（Least-squares Model-image Fitting, LSMIF）是先將建物的框線模型（Wire-frame Model）投影至已知方位的像片上，並以邊緣線偵測元（Edge Detector）萃取出建物在像片上的邊緣線像元，藉由最小二乘法漸進地調整模型參數，使所有邊緣線像元到框線模型的投影的距離平方和為最小，此時決定出的模型參數即為建物在三維空間中最佳的精簡描述（周宏達，2001）。在研究最小二乘模型-影像套合法的過程中，吾人發現套合成果仍受到許多因素的影響，例如：萃取邊緣線像元的邊緣線偵測元、沿著線框設定取捨邊緣線像元的環域（Buffer）大小、環域內每一個邊緣線像元在平差計算中所佔的權值大小、模型參數的初始值、參與平差的影像張數等因素之影響都仍待釐清。因此本文之目的即針對各項因素進行分析，藉由一系列的實驗探討各因素對最小二乘模型-影像套合法之影響，進而提昇最小二乘模型-影像套合法之強鈍性（Robustness）。實驗的部分，首先分別以(1)Sobel、(2)Canny、(3)Laplacian of Gaussian（LoG）三種不同的邊緣線偵測元萃取同一影像的邊緣線像元，分別代入最小二乘模型-影像套合法，以測試各邊緣線偵測元的適用程度。第二項實驗則是針對線框環域內的邊緣線像元在平差計算時的權值進行分析，除了等權外，分別以三種不同的方式加權：(1)以影像灰值的梯度方向（Gradient Vector）與投影框線的角度差為權、(2)以影像灰值的梯度強度（Gradient Magnitude）為權、(3)先依角度差取捨，再以梯度強度為權。在分析第一、二項實驗的成果後得到一組最理想的邊緣線偵測元搭配邊緣線像元加權方式的組合，利用此搭配方式再進行第三項實驗：收斂範圍（Pull-in Range）測試，藉以評估模型參數的初始值範圍。第四項實驗則是分別以兩張、三張、四張含有同一建物的不同像片進行模型-影像套合，希望評估多張影像對於最小二乘模型-影像套合在正確率及精度上的影響。本文之分析將有助於釐清最小二乘模型-影像套合法之各項影響因素，提供一套最適切的操作原則，提昇模型-影像套合的成功率，增進建物萃取的效率。

二、 邊緣線偵測元

邊緣線偵測元不論在計算機視覺（Computer Vision）或數位攝影測量（Digital Photogrammetry）領域均已是發展成熟的技術，許多學者提出各種不同的邊緣線偵測元以符合各種萃取需求。本文採用較為廣泛使用於萃取建物邊緣線的三種邊緣線偵測元對同一幅影像進行邊緣線偵測以進行比較，分別是以一階導數為依據的(1)Sobel Operator、(2)Canny Edge Detector，以及二階導數為依據的(3) Laplacian of Gaussian（LoG）Edge Detector。每一種偵測元都具備一些可調整的參數與臨界值，在本實驗中，以萃取出實驗影像（如圖一(a)）中建物左側底部的邊緣線、且盡量

避免萃取出非邊緣的像元為原則，以試誤法（Try & Error）反覆測試出各偵測元最佳的參數與臨界值，最後得到邊緣線偵測結果。Sobel 偵測元是利用兩個罩窗分別萃取像元在 x 方向與 y 方向的梯度分量，據以求出像元的梯度強度，由梯度強度是否超過臨界值來判斷是否為邊緣線。根據反覆實驗的結果，梯度強度以臨界值 0.02 的效果較佳，萃取成果如圖一(b)所示。Canny 偵測元使用高斯函數的一階導數分別沿 x 方向與 y 方向對影像作折積（Convolution），以計算出的像元梯度強度作為判斷的依據（Canny, 1986）。實驗中當高斯函數的標準差 σ 選擇為 1 時，影像可以適當地被平滑化且不會喪失該條邊緣線資訊，若將像元梯度的高臨界值設為 0.09，低臨界值設為 0.036，則可以在萃取出該條指定邊緣線且不會產生太多雜訊點的原則下，萃取出如圖一(c)所示的成果。LoG 偵測元其實是先以標準差為 σ 的二維高斯函數將影像平滑化，再以拉普拉斯運算子（Laplacian Operator）偵測其二階導數的跨零值像元，判斷其是否為邊緣線（Marr & Hildreth, 1980）。實驗中仍將高斯函數的標準差 σ 設為 1，並以±0.0036 作為判斷該像元是否為過零值像元的臨界值，可萃取出指定的邊緣線且不會產生太多雜訊點，成果如圖一(d)所示。

(a) 原始影像　(b) Sobel 偵測元　(c) Canny 偵測元　(d) LoG 偵測元

圖一、三種邊緣線偵測元的偵測成果

由圖一可以發現 Sobel 偵測元萃取出的邊緣線像元最多，其中也包括許多不屬於建物邊緣線的雜訊點。Canny 偵測元與 LoG 偵測元的結果相近，不過 LoG 偵測元仍得到一些孤立的像元，而且在建物左側底部邊緣的萃取成果不是很理想。

三、 權值的給定

明顯的邊緣線像元其梯度強度較強，不論採用何種邊緣線偵測元皆可偵測出來，而較不明顯的邊緣線像元梯度強度較弱，會因邊緣線偵測元的不同造成萃取結果的差異。根據以實例測試各種邊緣線偵測元的經驗，在萃取較不明顯的邊緣線像元時常連帶萃取出非建物邊緣線的像元，如陰影、水塔邊緣、屋頂上的雜物等等。顯然在利用萃取出的邊緣線像元作為模型與影像套合的依據時，不同強度的邊緣線像元應該具有不同的影響力，此觀念可用觀測量加權的方式來實現。本研究根據梯度強度與梯度方向兩種資訊來賦予萃取點不同的權，實驗 4 種給權的方法：(1)等權、(2)以梯度強度為權、(3)以梯度方向與投影框線間的角度差為權、(4)先依角度差取捨再以梯度強度為權，藉此增進套合效率並減少雜訊點的影響。

3.1 以梯度強度為權

為了以梯度強度加權有一定的標準，吾人將權值正規化（Normalize）至 0~1 之間，其方法是在對一張影像進行邊緣線偵測後，取得這張影像的梯度強度影像 G，找出梯度強度最大值 $G_{\max}$，再將強度影像 G 的所有像元除以 $G_{\max}$，得到新的強度影像 P，而 $P(x,y)$ 即可作為萃取點 $E(x,y)$的權值 $Weight(x,y)$，如式(1)。

$$Weight(x,y) = P(x,y) = \frac{G(x,y)}{G_{\max}} \tag{1}$$

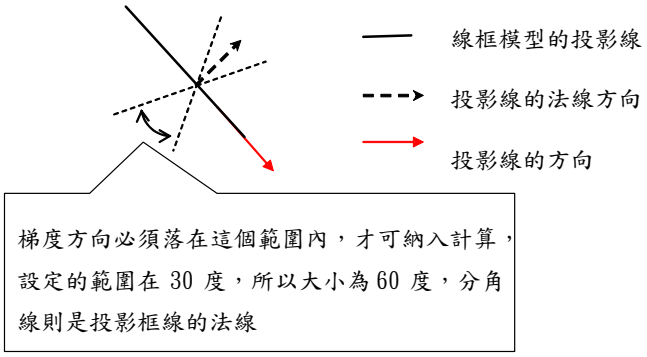
3.2 以梯度方向與模型投影框線間的角度差為權

在以一階導數為依據的邊緣線萃取過程中，梯度方向是另一項可資利用的資訊，因為其象徵了萃取出的邊緣線的方向。在正確套合的情形下，模型投影的框線應該重合於萃取出的建物邊緣線，所以投影框線方向與建物邊線梯度方向之間的角度差應為 90˚或 270˚。透過影像方位元素與模型參數初始值，可以計算出線框模型在影像上投影線的方向，而萃取點的梯度方向可在邊緣線萃取時由梯度強度計算而得，兩者相減得到一角度差值 λ。為了讓角度差值為 90˚或 270˚的萃取點之權為 1，可依(2)式將其正規化，以得到萃取點 $E(x,y)$的權值 $Weight(x,y)$。

$$Weight(x,y) = \frac{1}{2}[\sin(2\lambda - 90°) + 1] \tag{2}$$

3.3 合併考量梯度強度與梯度方向來給權

一般而言，若邊緣線偵測元將非建物邊緣線像元（雜訊點）誤判為邊緣線像元，其梯度方向與線框模型投影線的方向間角度差不會是 90˚或 270˚。雖然依角度差加權可以減少此類干擾，但是套合結果仍會受到雜訊點的影響，因此在加權平差之前可以先依角度差對萃取點進行篩檢，然後再依梯度強度加權計算。考量到投影線的方向畢竟是從模型參數近似值算得，並非完全準確，故需給予一合理的範圍值。本研究以±30˚進行實驗，也就是當角度差落在設定的範圍內（如圖二），則將此邊緣線像元納入模型-影像最小二乘套合解算中，並以其梯度強度為權，否則將此邊緣線像元排除。



圖二、角度差範圍的示意圖

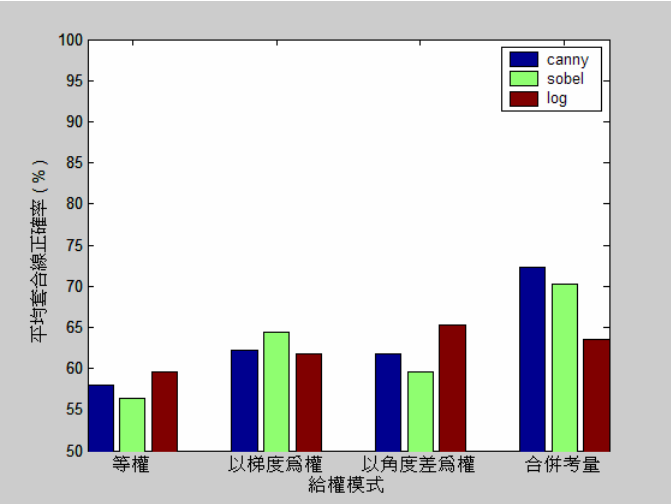
四、 實驗成果

4.1 平均套合線正確率分析

第一項實驗是分別以(1)Sobel、(2)Canny、(3) LoG 三種不同的邊緣線偵測元萃取同一影像的邊緣線像元，分別代入最小二乘模型-影像套合法，以測試各邊緣線偵測元的適用程度。第二項實驗則是針對線框環域內的邊緣線像元在平差計算時的權值進行分析，除了等權外，分別以三種不同的方式加權：(1)以影像灰值的梯度方向與投影框線的角度差為權、(2)以影像灰值的梯度強度為權、(3)先依角度差取捨，再以梯度強度為權。不論第一項或第二項實驗，都是以影像內建物所有可見邊線中不必人工修正的套合框線的百分比為套合線正確率，作為套合成果的評估，其計算如(3)式。

$$rate = \frac{\sum l'_i}{\sum l_i} * 100\% \tag{3}$$

其中 l_i 為第 i 張重疊像片中建物的可見邊線總數；l_i' 為第 i 張重疊像片中不需人工修正的套合框線；$\sum l_i$ 為所有像片中建物的可見邊線總和；$\sum l_i'$ 為所有像片中不必人工修正的套合框線總和。圖三為針對 5 棟建物，分別使用不同的邊緣線偵測元與給權方式的平均套合線正確率分析圖。



圖三、 平均套合線正確率分析圖

從圖三很難決定出何種偵測元是較有效的，但是對於不同的給權方式，卻是合併考量為佳，因此後續第三及第四項實驗將選擇 Canny 偵測元及合併考量加權方式來進行。至於不同給權方式的套合失敗情形分析如下：

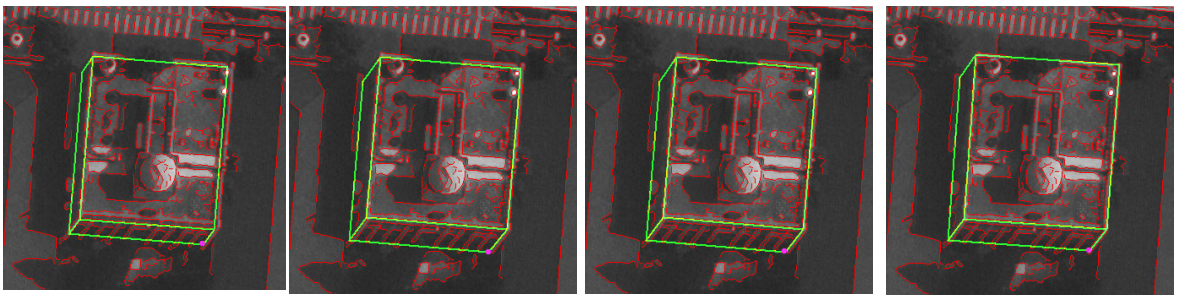
(一) 採取等權的方式，容易受到 buffer 內非建物邊線的萃取像元（雜訊點）影響，導致套合線正確率不佳。如圖四(a)，可明顯看到由於建物邊線附近有其他的邊線像元，導致模型無法套合至正確的建物邊線上。

(二) 以梯度強度為權時，最怕在建物邊線附近在有強梯度的東西，但是在屋

頂邊線旁常有水塔或陰影等梯度較強的萃取像元，導致套合失敗，如圖四(b)。

(三) 以梯度方向與投影線方向的角度差為權時，因為建物邊線旁常有女兒牆、陽台或陰影等與建物邊線近似平行的萃取像元，造成套合失敗，如圖四(c)。

(四) 合併考量時，由於萃取像元經過角度差範圍的篩選，儘管仍以梯度為權，但是並不會受到建物邊線旁強梯度邊緣線像元的影響，表現最佳，如圖四(d)。

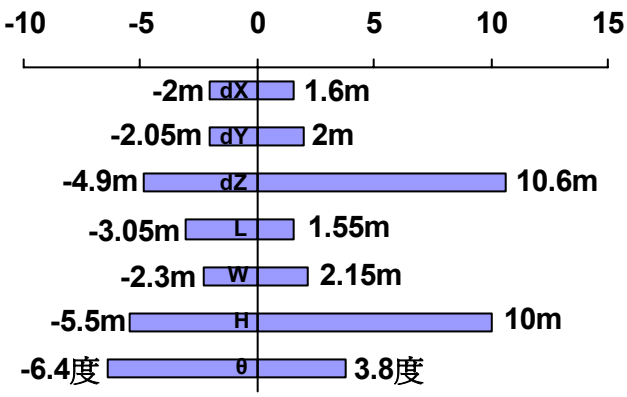


(a)等權　(b)以梯度為權　(c)以角度差為權　(d)合併考量

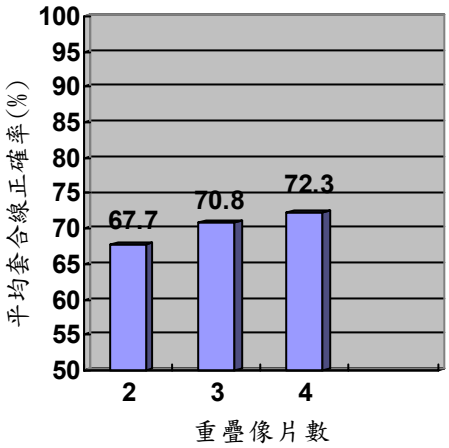
圖四、不同給權方式的套合失敗情形

4.2 收斂範圍測試

圖五為四棟不同矩形建物的模型參數之平均收斂範圍，dZ 和 h 兩個參數的收斂範圍比其他參數要來得大，表示給定近似參數時，dZ、h 可較不精確。θ 的收斂範圍約在±5 度內，表示初始旋轉角不能偏差太多，與周宏達（2001）的 θ 參數收斂範圍±6 度相差並不大，可見雖然經過角度差範圍的篩選，θ 的收斂範圍並不因此而縮減。至於在 dX、dY、L、W 參數上，其收斂範圍大致都在±2 公尺左右，若將其換算至影像坐標系上約為 0.5mm，與設定的漸進環域（初始 0.4mm，每次減少 0.05mm，最後固定為 0.05mm）初始值相當，可見即使模型參數起始值不佳，只要建物邊線仍落在環域內依然可正確套合。



圖五、模型參數收斂範圍



圖六、不同重疊像片數的平均套合線正確率

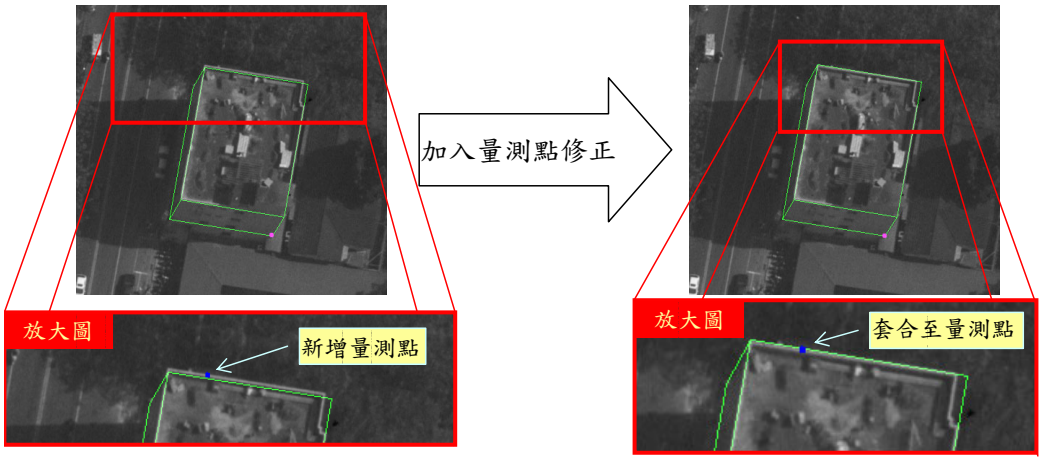
4.3 重疊影像張數

增加重疊影像張數的最大優點就是提供多視角的觀點，以矩形體建物為例，若不考慮其他遮蔽僅考慮建物自我遮蔽的情況下，一張影像上最多能出現 9 條邊

緣線，另外有 3 條邊緣線將因自我遮蔽而不可見。若能提供不同視角的重疊影像，將提高這三條邊緣線出現的機率，同時提升套合的可靠度。圖六為分別使用 2 張、3 張、4 張重疊影像的套合線正確率情形，可看出增加重疊影像的張數確實有助於套合線正確率的增加，減少人工修正的次數。

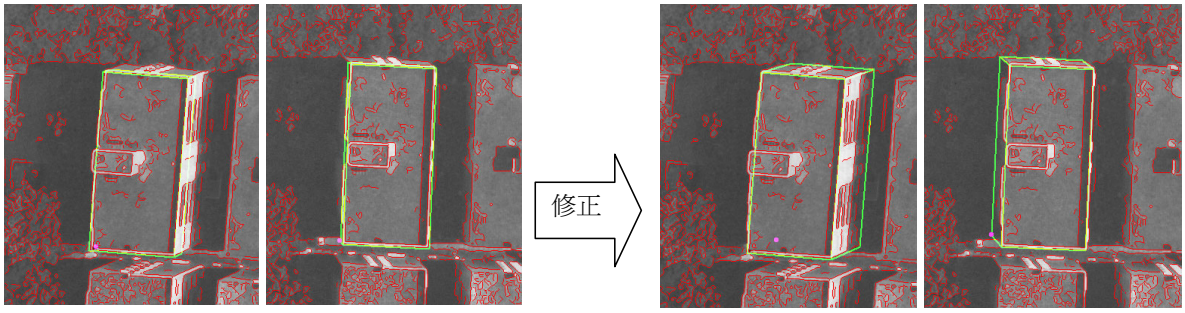
4.4 套合結果的修正

沒有任何一種自動化方法可以保證成果完全正確，儘管選用較佳的邊緣線偵測元與加權方式來加強 LSMIF 的套合能力，其結果也難免會有誤差，此時人工介入的修正就相當重要。本文提出兩種簡便的方法加以修正：第一種方法是給予一個或兩個人工量測點，適用於建物邊線有被萃取出來，模型線卻套合錯誤的情形，如模型框線套合到女兒牆的情況。新增的人工量測點視為該張像片中權值較大之萃取點，主要作用是讓一開始的計算不至於跑掉，而且僅需對重疊像片其中一張增加人工萃取點即可，不必對全部的像片做處理。圖七為模型框線套合至女兒牆以及加入人工量測點（放大圖中的藍點）修正後的情形。



圖七、新增人工量測點的套合情形，其中藍點為新增的人工量測點。

第二種方法是當建物因遮蔽導致建物底部線不可見或無法萃取，此時可透過其他方法（如地面測量）求到模型參數 H 或 dZ 的值，做為約制條件，以加權約制的方法加入最小二乘套合，協助解算其他參數。由圖八的左側兩幅影像可以看出建物底部邊緣線因受樹木遮蔽而無法萃取，導致套合失敗。故由從地形圖上取得此棟建物的 H 為 18.00m，將 H 做為約制條件加入套合計算，即可得到正確的套合結果，如圖八所示。



圖八、加入模型參數約制的套合情形

五、 結論與建議

本文根據最小二乘模型與影像套合的理論，分別對邊緣線偵測元、加權方式、收斂範圍、及影像張數等影響因素進行探討，從一系列的實驗中得知若要提升最小二乘模型與影像套合的套合線正確率，應選擇一階導數的邊緣線偵測元，如：Canny 偵測元，搭配以角度差為篩檢標準、梯度強度為權的合併考量方式給權，如此將可有效過濾雜訊點，且降低人工修正的次數。採用上述的套合策略後，模型參數的收斂範圍較諸之前的研究已有所提升，若同時增加重疊影像的張數，將更有效地提高套合的正確率。而即使 LSMIF 的自動套合結果有部分誤差，本文也提出兩種簡便的人工修正方法加以彌補：(1)對套合錯誤的邊緣線新增一點人工量測點、(2)由其他管道取得模型參數加入約制，根據實驗結果，這兩種方式都能有效改正 LSMIF 的誤差，且無需太多的人工介入。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會之研究計畫（NSC 91-2211-E-006-019）支持方得以順利完成，謹申謝忱。

參考文獻

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，臺南。

Canny, J. F. 1986. A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6): 679-698.

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

Marr, D. and Hildreth, E., 1980. Theory of Edge Detection, Proceedings of the Royal Society of London, B 207: 187-217.

Sester, M. and Förstner, W., 1989. Object Location Based on Uncertain Models, Mustererkennung 1989, Informatik Fachberichte 219, Springer-Verlag, 457-464.

Tseng, Y. H., and Wang, S., 2003. Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-image Fitting, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(2): 171-180.

Vosselman, G., 1998. Interactive Alignment of Parameterised Object Models to Images, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(WG3): 272-278.