

基于物方几何约束提取建筑物垂直边缘

唐亮¹⁾ 谢维信²⁾ 黄建军²⁾ 谢兴灿¹⁾

¹⁾(西安电子科技大学工程学院, 西安 710071) ²⁾(深圳大学信息工程学院, 深圳 518060)

摘要 航空影像中,垂直边缘对建筑物提取具有重要意义。为快速准确地提取垂直边缘,依据航空摄影测量学的有关知识,利用摄影测量成像模型推导出垂直边缘灭点位置,并结合物方空间几何约束和图像空间边缘信息,采用一种自适应模糊 Hough 变换算法,实现了建筑物垂直边缘的自动提取。实验证明,该算法是行之有效的。

关键词 垂直边缘 摄影测量 灭点 自适应模糊 Hough 变换

中图分类号: TP79;Tu989 TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)09-1049-06

A Method for Extracting Vertical Lines of Buildings Based on Geometric Information of Object Space

TANG Liang¹⁾, XIE Wei-xin²⁾, HUANG Jian-jun²⁾, XIE Xing-can¹⁾

¹⁾(School of Electronical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

²⁾(School of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract In aerial images, vertical line is of significant use for building extraction, which provides not only the key and reliable evidence for building existence, but also the height of buildings. In this paper, in order to extract vertical lines, a simple method for determining the vanishing point of vertical lines is first analyzed based on the knowledge about the aerial photogrammetry. It is demonstrated that, suppose the imaging plane in aerophotograph is approximately parallel with the horizontal plane, the central point of an aerial image is approximate to the vanishing point of vertical lines. This information provides a geometrical constraint for vertical line extraction in object space and makes the automatic extraction of vertical lines very straightforward and simple. Second, in order to improve the efficiency and precision of line detection and to acquire the complete description of vertical lines (e. g. line parameters, pixel positions, and length etc.), the adaptive fuzzy Hough transform, which combines the geometrical constraint in object space and gradient orientation information in image space adequately to achieve an excellent performance, is adopted to extract vertical lines automatically. Lastly, the Experimental results are given to indicate that the presented algorithm is effective and efficient for real-time applications, and provides a key evidence and clue for automatic building extraction from aerial images.

Keywords vertical lines, photogrammetry, vanishing point, adaptive fuzzy Hough transform

1 引言

基于地理信息系统(GIS)信息快速获取和数据更新的需要,二十多年以来,由航空影像中自动提取物体成为一个活跃的研究领域。1996年,欧洲实验摄影测量研究组织(OEEPE)面向三维城市模型的使用者和生产者所做的问卷调查显示,95%的人员

对建筑物信息感兴趣^[1],从而使得建筑物的自动、半自动提取成为该领域的重要研究方向^[2,3]。初期的研究主要采用区域增长技术和简单的图像几何模型(如正射模型)来进行建筑物提取,后来基于线段-角点分析和阴影分析的推断建筑物结构的方法则成为主流,但这些方法大都把图像作为唯一的信息来源,而忽视了航空影像摄影测量成像过程蕴含的物方空间几何结构信息。这种局限性使得用于成功提取建

建筑物的图像或场景必须满足一些约束条件,当建筑物不能被有效分割、形状较复杂或视角倾斜较大时,这些方法就会表现出较差的性能。最近的研究表明^[4~7],准确的摄影测量成像模型不仅可以在测图应用中用来产生建筑物假设,还可以为建筑物提取提供重要的几何结构信息,比如依据视角方向检测垂直边缘^[4,5],结合视角和光照方向计算阴影区域^[5,6],以及利用多幅图像的成像模型来检测和重构建筑物^[6,7]等。

航空影像中,建筑物表现出来的外形和细节的千变万化是建筑物自动提取的难点所在,但是,由于建筑物垂直边缘是所有建筑物必备的特征,同时也是建筑物与自然场景中其他物体的关键区别,它既能提供建筑物假设形成的依据,又能给出建筑物的高度信息,因此对建筑物提取有重要意义。在建筑物提取的研究背景下,本文着重讨论了建筑物垂直边缘(以下简称垂直边缘)的提取算法,即首先依据项目中所用航空影像的成像模型分析来确定垂直边缘的灭点位置;其次,结合物方空间几何约束和图像空间边缘信息,采用一种自适应模糊 Hough 变换^[8]来实现垂直边缘的自动提取。实验表明,本文算法能快速有效地提取垂直边缘。

2 确定垂直边缘灭点

由投影几何可知,现实场景中的平行线组在影像中交于一点,称为灭点(vanishing point),亦称合点。由于所有的垂直边缘显然是平行的,因此在影像中它们必然有共同的交点。Shufelt 利用一种以投影中心为圆心的“高斯球(Gaussian sphere)”来累积检测灭点位置^[4,5],该方法虽是目前灭点检测的标准方法,但计算较为复杂。本节通过实际航空影像中心投影模型分析,给出一种简单易行的方法用于确定垂直边缘灭点,该方法简介如下:

众所周知,航摄像片是以摄影物镜 S 为投影中心的中心投影所成的像,由 S 做铅垂线交像片平面于点 V ,称为像底点,此铅垂线交地面于点 N ,称为地底点。由中心投影变换可知^[9],如图 1 所示,所有铅垂线(AA_0, BB_0)在像面上的构像(aa_0, bb_0)均位于以点 V 为辐射中心的相应辐射线上。换句话说,所有垂直边缘在影像中的构像必通过像底点 V , V 即是垂直边缘的灭点。由于在航空摄影中,通常要求摄影像平面与水平面平行,即误差小于 3° ,因此,可

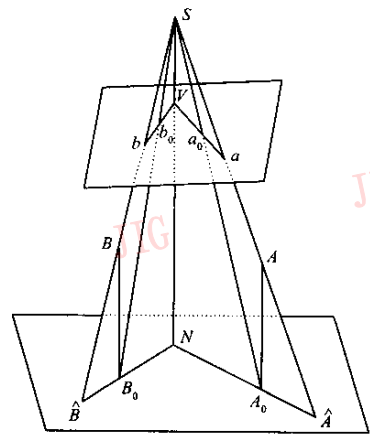
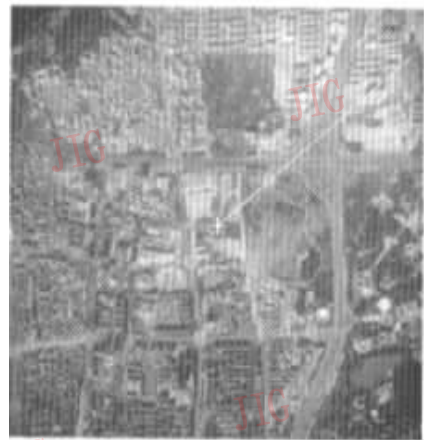


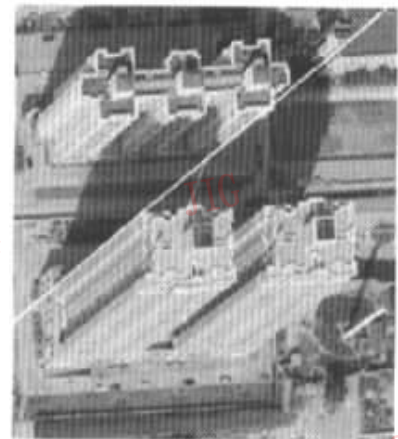
图 1 中心投影模型示意图

以概略地认为影像的中心点即是像底点。综上所述,航空影像中所有的垂直边缘都通过它们的灭点——影像的中心点。

图 2 给出了一个实际例子。



(a) 整幅航空影像示意图



(b) 局部区域示意图

图 2 航空影像灭点位置、垂直边缘构像与辐射线示意图。

图2(a)是一幅完整的航空影像,图像尺寸 9152×9152 像素,分辨率较高(20cm/像素),图中白色“+”号表示垂直边缘灭点 V 的位置,白色的线条代表由影像中心点(灭点)出发的辐射线,图2(b)给出其中的一个局部区域,以便观察。由图2可以看到,由影像中心出发的辐射线与建筑物垂直边缘吻合严密,说明由上述简单方法确定的灭点位置具有足够的精度,第4节的实验结果将进一步证明这一点。

3 垂直边缘的提取

在已知垂直边缘灭点的条件下,Shufelt的方法^[4,5]是首先在影像中检测直线边缘,然后检测直线边缘的延长线是否通过灭点,若误差在2个像素内,则判为垂直边缘;或者计算该边缘与边缘中心和灭点间连线的夹角,若小于 0.2 rad ,则判为垂直边缘。然而,由于上述方法没有充分利用已知的几何约束和图像信息(如已知的灭点方位和图像边缘梯度方向间的关系),这就使得影像中所有边缘点都要参与直线检测,并使得所有检测到的直线都要参与延长线或夹角的阈值判断,从而带来了较大的计算冗余,致使计算速度较慢,不利于大数据量航空影像的实时处理。为提高计算效率,本节先将大尺寸的航空影像分块,并分析各图像块由灭点位置确定的垂直边缘几何约束,然后结合此物方几何约束条件和图像空间边缘信息,利用改进的Hough变换来检测可能的垂直线段,最后由连通性检测和灭点通过性验证来提取建筑物垂直边缘。

3.1 物方几何约束

由于整幅航空影像尺寸 (x_0+n) 太大,因此可考虑先将图像分为如图2(b)一样的块,再进行垂直边缘检测。此时,要检测的垂直边缘应满足以下两个几何约束条件:

- (1) 其延长线必通过灭点 V ;
- (2) 边缘点梯度方向必处于由该图像块位置确定的一个角度范围之内。

如图3所示,设图像块 P 大小为 $m \times n$ 像素,其左上角点 p_0 相对于灭点 V 的坐标为 (x_0, y_0) ,容易计算 P 中垂直边缘的直线方向应满足的范围 $[\alpha_1, \alpha_2]$,例如在图3中的 $[\alpha_1, \alpha_2]$ (图像块位置不同时,略有区别)为

$$[\alpha_1, \alpha_2] = [\tan^{-1}(y_0/x_0+n), \tan^{-1}(y_0+m/x_0)] \quad (1)$$

相应地,垂直边缘梯度方向应处于如下范围内:

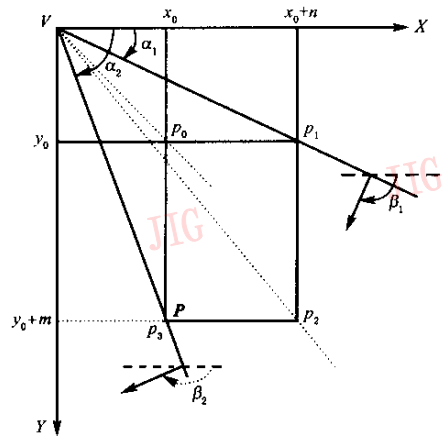


图3 灭点几何约束示意图

(V 为灭点, P 为一个图像块, β_1, β_2 指出了垂直边缘应满足的梯度方向范围)

$$[\beta_1, \beta_2] = [\alpha_1 + \pi/2, \alpha_2 + \pi/2] \cup [\alpha_1 - \pi/2, \alpha_2 - \pi/2] \quad (2)$$

由此可见,在边缘检测算法得出边缘位置和梯度方向的基础上,完全可以仅由梯度方向满足式(2)的边缘点参与处理,而将其他边缘点舍弃,且仅需检测满足式(1)方向条件的直线段,这样则必将大幅度提高计算效率。

3.2 检测垂直线段

通过上述分析可见,垂直边缘的检测是一个带几何约束的直线检测问题。Hough变换(HT)^[10]是直线检测的一种主要方法,由于它采用全局累积矩阵检测直线,因而使得该方法对噪声和线段不连续具有较好的鲁棒性。检测过程中,物方几何约束应该较好地与Hough变换结合,以减少计算量,但需要考虑边缘点位置和梯度方向因计算误差而带来的不准确性;同时,垂直边缘的端点坐标或像素位置需要确定,才能推断建筑物的高度,因此,本文采用一种改进的Hough变换算法——自适应模糊Hough变换(adaptive fuzzy Hough transform, AFHT)^[8]来检测直线。该方法是通过极小极大模糊推理机制来综合图像局部梯度方向信息以及全局累积信息而得到的一种快速有效的、能给出直线像素位置的直线提取方法。

根据3.1节所述物方几何约束,首先仅选择梯度方向满足式(2)的边缘点参与运算,并仅检测满足式(1)方向条件的直线段,这样就减少了AFHT的计算量和累积矩阵的内存占用量;其次,若以灭点 V 为坐标原点,理想情况下,AFHT只需检测 $\rho=0$ 的直线段(ρ 表示原点到直线的垂直距离),它可进一

步减小累积矩阵尺寸,然而实验表明,由于边缘像素梯度方向存在的误差,致使图像块 P 中几乎平行的垂直线段集合在以灭点 V 为原点的坐标系中,相互之间难以区分(几条直线检测为一条直线),不利于后续的处理,因而,本文采取的方法是,一方面利用图像块和灭点 V 之间的相对位置来确定像素的梯度方向范围;另一方面在 AFHT 中,需以本图像块的左上角为坐标原点,以便利用 ρ 值将平行线组区分开来。

按 AFHT 算法步骤,首先选择梯度方向满足式(2)的边缘像素(可容忍一定误差) Q_i ,并依据边缘点位置 (x_i, y_i) 和梯度方向 γ_i ,然后考虑到边缘检测的计算误差,将 Q_i 模糊映射为 (ρ, θ) 平面的如下模糊数:

$$\tilde{A}_i = \int \mu_{i,j,l} / (\rho_{i,j,l}, \theta_{i,j}), \theta_{i,j} \in [\beta_1 - \theta_{tol}, \beta_2 + \theta_{tol}] \quad (3)$$

式中, \int 表示元素的罗列, θ_{tol} 为梯度方向误差容忍范围,文中其取为 0.2 rad, $\mu_{i,j,l}$ 表示局部意义上点 Q_i 属于直线 $(\rho_{i,j,l}, \theta_{i,j})$ 的隶属度,本文采用高斯函数来计算该隶属度,即

$$\mu_{i,j,l} = \exp[-(\theta_{i,j} - \gamma_i)^2 / 2\sigma_\theta^2] \cdot \exp[-(\rho_{i,j,l} - \rho_{i,j})^2 / 2\sigma_\rho^2] \quad (4)$$

式中, $\sigma_\theta, \sigma_\rho$ 分别为 ρ, θ 方向的高斯方差, $\rho_{i,j} = x_i \times \cos\theta_{i,j} + y_i \sin\theta_{i,j}$, $\rho_{i,j,l} \in [\rho_{i,j} - \rho_{tol}, \rho_{i,j} + \rho_{tol}]$, ρ_{tol} 为 ρ 方向的误差容忍范围。

将所有映射模糊数累积并归一化,得以下模糊集

$$\tilde{C} = \int \mu_C(\rho, \theta) / (\rho, \theta), \theta \in [\beta_1 - \theta_{tol}, \beta_2 + \theta_{tol}] \quad (5)$$

$\mu_C(\rho, \theta)$ 表示全局意义上直线 (ρ, θ) 存在的可能性程度。

综合局部和全局信息,经极小极大模糊推理,得到的像素 Q_i 属于一条直线的可能性程度为

$$T(Q_i) = \max_{j,l} \{ \min[\mu_{i,j,l}, \mu_C(\rho_{i,j,l}, \theta_{i,j})] \} \quad (6)$$

式中取得最大值的 $(\rho_{i,j,l}, \theta_{i,j})$ 即为 Q_i 最可能归属的直线 (ρ_i, θ_i) (ρ_i 表示直线 i 到原点的距离, θ_i 为直线 i 的法线方向)。依据式(6),AFHT 将边缘像素以一对一映射的形式进行二次累积,由于此时像素为且仅为所属直线 (ρ_i, θ_i) 投票,因此峰值检测较为简单,并可得到直线段的像素位置(属于该条直线的像素集合)。

上述整个检测过程由于充分利用了物方几何约束和图像边缘信息,因此不仅计算效率大为提高,并且给出了可能为建筑物垂直边缘的直线参数及其像

素位置,但由于受影像质量和边缘检测误差的影响,此时的垂直边缘有一些不连续,且还有一些杂散点,因此有必要进行连通性检测。

3.3 连通性检测

检测过程如下:

首先给定一条直线 (ρ_i, θ_i) 及属于该直线的像素集合 S_i ,若同时过原点作该直线的垂线并与直线交于点 J_i ,则容易推得 S_i 中所有像素 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 到点 J_i 的距离为

$$d_{i,j} = y_{i,j} \cos\theta_i - x_{i,j} \sin\theta_i \quad (7)$$

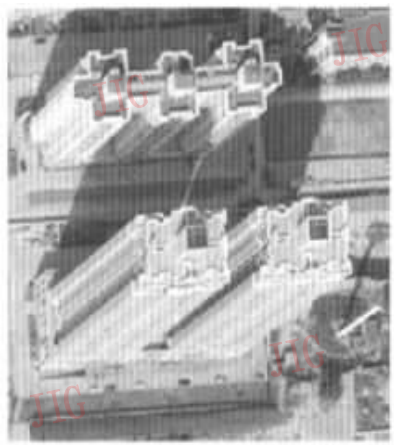
然后将 $d_{i,j}$ 由小到大排序,并以最小值为直线段起点开始跟踪,再设置间断阈值 τ_1 ,若两相邻 $d_{i,j}$ 差值小于 τ_1 ,说明对应的两点是连通的,则继续跟踪;若差值大于 τ_1 ,则认为一个直线段终止,同时记录终点,并将下一点作为新的直线段的起点继续跟踪。将上述过程应用于所有检测到的垂直直线,即可得满足连通性条件的垂直线段及其端点坐标,同时通过设置长度阈值 τ_2 来将不应有的短线段去除。检测时,阈值 τ_1, τ_2 的选取取决于图像质量和边缘检测精度,本文依据实验情况选取 $\tau_1 = 5, \tau_2 = 30$ 。

3.4 灭点通过性验证

由于式(2)给出的是梯度方向的一个范围,且以上检测的结果中可能包含一些与垂直边缘梯度方向接近的直线段,因此应该进行灭点通过性验证,以将非垂直线段去除。灭点通过性验证可以采用直线段延长线到灭点的距离,以及直线和直线段中点到灭点连线的夹角两种方法。研究发现,由于延长线—灭点距离与图像块到灭点距离相关,其阈值难以确定,因此本文采用夹角判断方法。其中直线的方向已由 AFHT 得出,因此只须计算线段中点与灭点连线的方向,二者之差即为夹角。设定阈值 τ_3 ,夹角大于 τ_3 的直线段被舍弃。阈值 τ_3 的取值对于提取结果有较大影响,因为若 τ_3 过大,会导致一些非垂直边缘被误检, τ_3 过小,则会使一部分梯度方向略有误差的垂直边缘漏检。多次实验表明, $\tau_3 = 0.05$ rad 较为适中。

4 实验结果

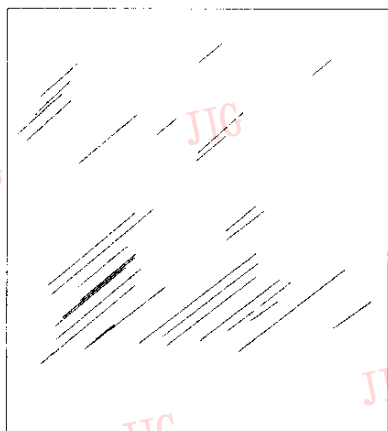
将上述垂直线段提取方法应用于实际航空影像,图4给出1个例子。图4(a)为原图像,图4(b)为 Canny 算子边缘检测的结果。垂直边缘提取结果示于图4(c),为了更清楚地察看效果,图4(d)中将提取的垂直边缘用加粗的黑色线条标示于原图像上。



(a) 原图像



(b) Canny 算子边缘检测结果



(c) 垂直边缘提取结果



(d) 原图像中标示有提取结果的图像

图 4 一幅实际航空影像的边缘检测和垂直边缘提取结果



(a) 航空影像 A



(b) 航空影像 B

图 5 两幅实际航空影像的垂直边缘提取结果

图 5 给出了另外两幅图像的垂直边缘提取结果。这 3 幅图像的尺寸、提取的垂直边缘数目以及本文方

法和文献[3,5]方法的计算时间见表 1。算法用 VC++6.0 编程,在主频 1.8G 的计算机上实现。

表 1 垂直边缘提取的数目和计算时间

	图像大小 (Pixels)	垂直边缘数目	计算时间(s)	
			本文方法	文献[3,5]算法
图 4	672×592	31	4.703	29.547
图 5(a)	640×512	23	3.937	20.125
图 5(b)	463×492	23	1.375	11.765

从检测结果来看,虽然几幅图像中建筑物形状较为复杂,但本文方法仍可提取出建筑物的大部分垂直边缘,且具有与 Canny 算子边缘检测相同的像素位置,这一方面说明用本文第 2 节方法确定的垂直边缘灭点位置有足够的精度,另一方面也说明第 3 节所述的提取算法是有效的。尽管一些垂直边缘由于梯度方向误差、阴影遮挡等原因而不能完整提取,但所得到的结果仍为建筑物提取提供了重要的依据和线索。同时,从表 1 中可看到,本文方法计算速度比 Shufelt 的方法提高了 5~7 倍,基本可以满足实际应用的需求。

5 结 论

仅利用图像空间信息提取建筑物的传统方法,在处理复杂场景和复杂形状建筑物的情况下,其性能受限。本文利用中心投影模型提出一种用于确定航空遥感影像中建筑物垂直边缘灭点位置的简单方法,并结合物方空间几何约束条件和图像空间边缘信息,采用自适应模糊 Hough 变换,形成了一种快速准确的建筑物垂直边缘提取方法。该方法不仅可为建筑物自动、半自动提取提供关键依据和线索,也体现了摄影测量成像模型蕴含的物方空间几何结构信息对于建筑物提取算法的重要意义。

参 考 文 献

- 1 Fuchs C, Gülch E, Förstner W. OEEPE survey on 3D-city models[A]. In: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie[C], Frankfurt, Germany: OEEPE Official Publication, 1998, (35): 9~123.
- 2 Mayer H. Automatic object extraction from aerial imagery—A survey focusing on buildings[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 74(2):138~149.
- 3 Shufelt J A. Performance evaluation and analysis of monocular building extraction from aerial imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(4): 311~326.

- 4 McGlone J, Shufelt J A. Projective and object space geometry for monocular building extraction[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[C], Seattle, Wash. USA, IEEE Press, 1994: 54~61.
- 5 Shufelt J A. Exploiting photogrammetric methods for building extraction in aerial images [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31 (B6/S): 74~79.
- 6 Noronha S, Nevatia R. Detection and modeling of buildings from multiple aerial images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(5): 501~518.
- 7 张祖勋, 张剑清, 胡翔云. 基于物方空间几何约束最小二乘匹配的建筑物半自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(4): 290~295.
- 8 唐亮, 谢维信, 黄建军等. 自适应模糊 Hough 变换[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 69~72.
- 9 金为铄, 杨先宏, 邵鸿潮等. 摄影测量学[M]. 武汉测绘科技大学出版社, 武汉, 1996.
- 10 Illingworth J, Kittler J. A survey of Hough transform [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44(1): 87~116.



唐亮 1975 年生,西安电子科技大学电子工程学院博士研究生。当前主要研究兴趣为信号处理、模糊信息处理、图像处理和模式识别等。已发表学术论文数篇。
E-mail: tang-liangcn@yahoo.com.cn



谢维信 教授,博士生导师,现任深圳大学校长。主要从事信号和图像处理、智能信息处理、模糊信息处理等方面的研究。已发表学术论文百余篇,出版学术专著数部,并获多项科研奖励。



黄建军 1971 年生,1997 年获西安电子科技大学博士学位,现为深圳大学信息工程学院副教授。主要从事智能信息处理方面的研究,已发表学术论文二十余篇。