

# 基于激光测距的航空扫描影像中建筑物的自动提取\*

徐逢亮 李树楷

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

**摘 要** 介绍了利用“机载激光影像制图系统”获得的激光测距,飞机姿态和位置数据解算出的地面三维信息同光谱辐射信息高度融合,用于快速自动地提取城市建筑物边界及高度的方法,探讨了地物的分裂/合并算法、建筑物与树木的分离、边界提取中初始种子点的选择和灰度参考值及阈值的自适应调整,针对影像中建筑物的扭曲采用了二维/三维变换和曲线模板,针对边缘模糊、不连续和强噪声等采用了统计判决和取样模板等等。并利用呼和浩特市数据进行了验证。

**关键词** 建筑物提取,自动提取,扫描影像,激光测距,惯性导航系统,全球定位系统,数字高程模型,阴影分析

## 1 引 言

遥感影像中建筑物的提取方法通常有3种:(1)利用单幅影像,具代表性的有 Yuh-Tay Liow 及 R. Bruce Irvin 等的阴影分析<sup>[1,2]</sup>, R. Nevatia, C. Lin 等的边缘检测和综合分析<sup>[3,4]</sup>, J. Chris McGlone 等的结构重构<sup>[5]</sup>等等;(2)利用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),具代表性的有 Jee-cheng Wu, W. Eckstein 及 Uwe Weidner 等工作<sup>[6-8]</sup>; (3)结合影像与 DEM,如 Caroline Baillard, Michel Roux, Frederic P. Perlant 等人利用立体像对获得 DEM,分离出地物并提取边界<sup>[9-11]</sup>。

本方法属第3类,但与 Caroline Baillard 等人不同。本文中 DEM 来源于激光扫描测距形成的覆盖地面的格网,具有较高的精度、可靠性和均匀性,由此导致完全不同的处理方法。本方法相对于第1类方法大大减少了不确定性和计算量,相对于第2类方法和第3类中 Caroline Baillard 等人的方法提高了边界提取的准确程度。本方法特点之一是自动化程度高,基本不需要人工干预;之二为串行区域性运算,不需要反复迭代,运算速度快;之三是能确定建筑物边界各点的三维坐标及建筑物的高度和绝对高程,能满足制图、地理信息系统等应用的需要。

“机载激光影像制图系统”是集成了扫描成像、激光雷达、惯性导航系统(INS)和全球定位系统(GPS)的机载三维测距/成像制图系统。它不需要地面控制点,能直接获取相互配准的多光谱遥感影

像和高精度、高密度激光测距格网,并以准实时的速率解算出正射影像、DEM、等高线图 and 三维透视图等。在城市遥感中该系统能进行建筑物和树木的高速自动识别与分类,以及道路的半自动提取等。

## 2 主要原理及方法

航空扫描影像中建筑物边界一般存在扭曲,因此无法应用常规的“线性因子提取一对应边匹配一边界重构”的方法,而必须应用曲线检测和曲线描述方法;本文由激光测距点与影像相互配合进行测距点的初始聚类;然后以目标测距点为初始点,进行自适应的区域扩展、阴影和边界跟踪;最后利用高可信度边重构完整边界,并校验。

下文分3个步骤进行建筑物的提取:激光测距点分析、阴影分析、建筑物边界重构。

### 2.1 激光测距点分析

由激光测距数据(斜距  $l$ )、激光束偏角  $\theta$ 、姿态数据(飞机的横滚角  $r$ ,俯仰角  $p$  和偏航角  $y$ )和位置数据(扫描中心点 WGS-84 坐标  $X_0, Y_0, Z_0$ )解算出测距点的三维坐标  $(X, Y, Z)$ :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 p + \operatorname{tg}^2(r + \theta)}} \cdot \begin{bmatrix} \operatorname{tg} p \cos y - \operatorname{tg}(r + \theta) \sin y \\ \operatorname{tg} p \sin y + \operatorname{tg}(r + \theta) \cos y \\ -1 \end{bmatrix} [1] + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此得到初步的 DEM。它包含绝对高程,但不包含相对于地面的高差(即高度)。提取地物必须先计算激光点的高度。首先计算地面高程,取适当矩形区域(大小既要适应地面的起伏,又能包络建筑物和地面)计算其高程直方图,取谷底均值为地面高程。进而计算出各激光点的高度。

下面用分裂/合并算法进行测距点的初始聚类。先根据高度将激光点分为 3 类:

$$\begin{cases} \text{地物点} & h \geq T_{\text{above}} \\ \text{地面点} & h \leq T_{\text{ground}} \\ \text{未知点} & T_{\text{ground}} < h < T_{\text{above}} \end{cases}$$

$h$  为高度,  $T_{\text{above}}$ ,  $T_{\text{ground}}$  为地物阈值和地面阈值。

将地物点作为初始种子点,将具有相似高程和光谱辐射特性的邻近激光点合并为同一类。由于人工地物的热辐射明显高于树木,由激光点对应的热红外影像可将建筑物与树木分开。建筑物特点是:一般为凸多边形,光谱辐射较为均匀,有阴影存在。因此,对建筑物内部的激光点组成的拓扑结构将满

$$\begin{cases} X = \frac{-(l_y \cos p \sin y + l_z \sin p + X_0 \cos p \cos y + Y_0 \cos p \sin y + Z_0 \sin p)}{\cos p \cos y + k_y \cos p \sin y + k_z \sin p} \\ Z = k_z X + l_z \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta = -r + \text{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{\sin y} \left( \text{tg} p \cos y + \frac{X - X_0}{Z - Z_0} \right) \right] \quad (5)$$

将  $X$ ,  $Z$  代入式(5)求出激光束偏角  $\theta$ ,进而求出交点的列号  $N_{\text{col}}$ 。由交点串  $l_{\text{row}}$ ,  $N_{\text{col}}$  形成的曲线  $l$  能适应影像的扭曲,在  $l$  上检验光谱辐射的一致性将与真实的情况相吻合。

将分离出的强连通子集作为建筑物内点  $I_{\text{in}}$ , 紧邻  $I_{\text{in}}$  的激光点联为一多边形  $I_{\text{out}}$ , 结果如图 1。由此得到建筑物边界的内外极限,为后面的边界提取打下基础。

## 2.2 阴影分析

边界提取使用两种策略:(1)由  $I_{\text{in}}$  出发进行区域扩展,在  $I_{\text{in}}$  与  $I_{\text{out}}$  组成的内外极限中寻找一最佳边界,在阴影不存在时适用;(2)进行阴影探测—阴影区域扩展—阴影边界提取—建筑物侧阴影边分离—建筑物边界重构,由于阴影的光谱特性相当均匀,用该方法能获得准确的边界。因为建筑物一般存在阴影,方法(2)成为首选方法。下文将着重论述方法(2)。

文中进行区域扩展需要使用自适应灰度参考值  $R$  及阈值  $T$  如式(6):

足强连通约束。据此约束将每一类激光点分裂为最大的强连通子集,每一个强连通子集对应于一栋建筑物。

由于影像存在扭曲,建筑物不再表现为凸多边形,因而不能直接在激光点之间的连线上检验连通性。但激光点三维坐标及每条扫描线的参数已知,使得三维空间中的直线  $l_0$  能映射为影像空间中的曲线  $l$ ,使得连通性检验能在  $l$  上进行。映射方法如下:

设两激光点间的直线方程组为公式(2),影像中每条扫描线(行号  $N_{\text{row}}$ )的扫描平面方程为公式(3):

$$\begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_y \\ k_z \end{bmatrix} [X] + \begin{bmatrix} l_y \\ l_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$X \cos p \cos y + Y \cos p \sin y + Z \sin p + L_0 = 0 \quad (3)$$

将扫描中心点坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$  代入(3)式确定  $L_0$ , 然后与式(2)并联求解,确定是否相交及求出交点坐标  $(X, Y, Z)$ 。

$$\begin{cases} R_{n+1} = b_n \cdot R_n + \eta_n \cdot x_n \\ T_{n+1} = d_n \cdot T_n + \xi_n \cdot x_n \end{cases} \quad (x \text{ 为灰度输入}) \quad (6)$$

式中  $b_n$ ,  $d_n$ ,  $\xi_n$  和  $\eta_n$  为权值,由  $I_{\text{out}}$  区域的直方图决定。

阴影分析的步骤如下。

(1)沿阳光入射方向在  $I_{\text{in}}$  与  $I_{\text{out}}$  连线上寻找阴影点。整幅影像中阴影的灰度变化范围较大,本文用可调阈值寻找阴影。

(2)根据阴影宽度和建筑物高度校验阴影的有效性,并根据阴影的宽度将阴影分为线状阴影和面状阴影。线状阴影一般存在不连续,要加以延伸以重构完整的阴影。

(3)由阴影点出发进行区域扩展、二值填充及边缘跟踪,最后得到闭合的阴影边界。

(4)阴影边界矢量化。算法为:寻找边界上相距最远的两点,构造通过它们的直线;计算余下各点到该直线的距离,若最大距离小于阈值  $T_d$  则将这些点用矢量表示,否则在距离最大处将余下点分为两段,分段矢量化,最后形成边界矢量。

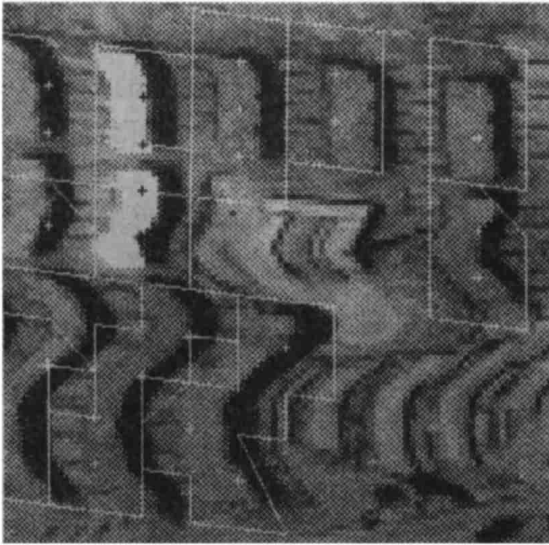


图 1 激光测距点分布图

“+”表示建筑物内点  $I_{in}$ , 折线表示外点  $I_{out}$

Fig. 1 Laser ranging points

(5) 依据阳光入射方向将边界矢量分为向阳边集(紧靠建筑物)和背阳边集(远离建筑物)。向阳边集包含建筑物最清晰的 1-2 条边。图 2 为阴影边界及向阳边集。

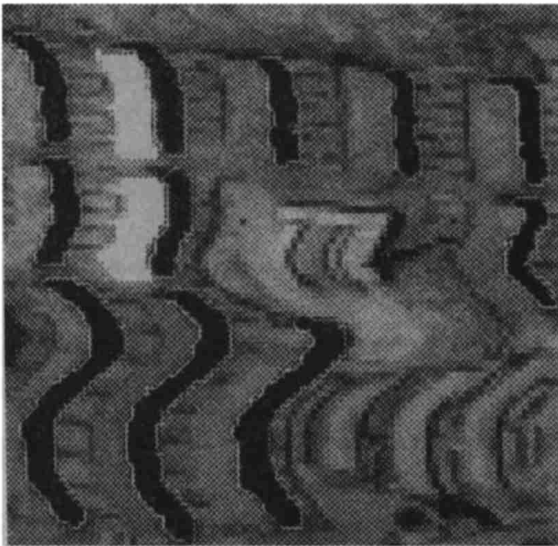


图 2 阴影边界及向阳边集

向阳边为建筑物侧较亮的曲线

Fig. 2 Shadow contour and sunside edges

### 2.3 建筑物边界重构

受飞机横滚影响, 航空影像存在“S”状扭曲, 沿飞行方向(行方向)分布的边扭曲程度最大, 而沿扫描方向(列方向)分布的边扭曲程度最小。为克服扭

曲的影响, 我们以曲线模板来保持扭曲边的形状, 将其沿扭曲程度小的边推移以重构完整的边界, 算法如下:

将阴影向阳边集按其矢量方向分离为曲线模板  $E_{curve}$  与推移路径  $E_{route}$  ( $E_{curve}$  或  $E_{route}$  可能不存在, 则分别用行方向或列方向的直线代替)。为取得建筑物的统计特性, 我们取  $E_{curve}$  的中间部分为取样模板  $E_{sample}$ , 并按如下步骤重构边界:

**确定推移距离  $D_{shift}$**  为描述模糊边界, 定义差分算子:

$$\Delta_i^2 = (C - C_i), \Delta_i^3 = (C_i - C_{((i+4)\%8)})$$

$$\Delta_{max} = \max\{|\Delta_i^2|, |\Delta_i^3|, i = 0, \dots, 7\}$$

( $C$  和  $C_i$  为当前点及邻点的灰度)

将  $E_{sample}$  沿  $E_{route}$  推移同时计算模板的灰度分布及各点的  $\Delta_{max}$ , 以确定灰度变化的剧烈程度。由于边界的模糊和破碎会导致  $E_{sample}$  越出实际边界, 即误判; 同时噪声的存在会导致  $E_{sample}$  的推移过早停止, 而达不到实际边界, 即漏判; 两种情况往往同时存在。为提高可靠性, 本文使用了统计判决, 即推移停止条件为:

$$\sum \text{灰度剧变点}(\Delta_{max} > T_{max}) / \text{模板总点数} \geq T_{ratio}$$

(其中  $T_{max}$ ,  $T_{ratio}$  为灰度剧变阈值和统计判决阈值, 自样本学习得到)

最后得到  $D_{shift}$  (即建筑物的长/宽度)。由  $E_{curve}$  的尺寸可近似定出建筑物的宽/长度。

**提取建筑物边界** 由于建筑物侧阴影边比建筑物实际边界稍短(约为该方向的阴影宽度), 将  $E_{curve}$  两端延长, 并沿  $E_{route}$  推移, 计算其首位  $\Delta_{max}$  的变化从而确定首位两条边; 将  $E_{curve}$  移动  $D_{shift}$  确定另一条边; 加上阴影向阳边界, 即可得到建筑物的初略边界。最后依据边界各点  $\nabla_{max}$  的分布微调边界, 确定最终的边界点。结果如图 3, 对应高度如表 1。

**建筑物后校验** 建筑物边界应具有良好的线性, 而非人工地物(如树木)的边界则不规则。由于影像的扭曲, 提取出的边界为闭合曲线。我们利用建筑物的高程  $Z$  及各条扫描线的姿态位置参数, 依据公式(7)反推出边界各点的大地坐标, 并进行线性校验, 以确定建筑物的有效性。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{tg}\rho \cos\gamma - \text{tg}(r + \theta) \sin\gamma \\ \text{tg}\rho \sin\gamma + \text{tg}(r + \theta) \cos\gamma \\ Z_0 - Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

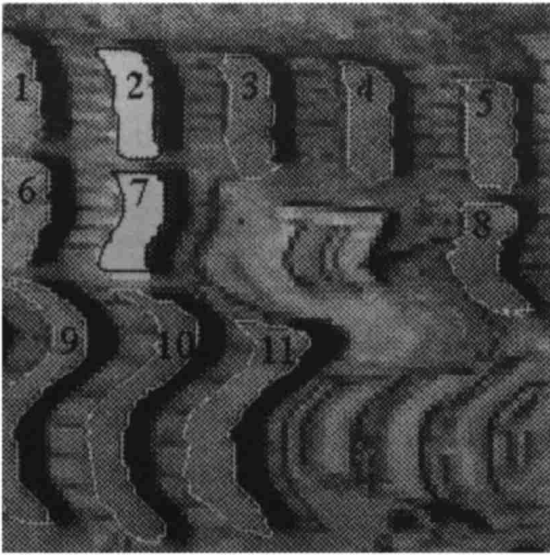


图 3 建筑物边界及高度

Fig. 3 Edges and heights detected

表 1 图 3 中建筑物高度

Table 1 Building heights detected in fig. 3

编号	1	2	3	4	5	6
高度/m	9.84	14.97	15.34	14.84	15.67	14.15
编号	7	8	9	10	11	
高度/m	15.20	15.58	14.00	14.44	17.43	

### 3 实验与结论

本方法利用呼和浩特市的数据进行了验证。数据参数:飞行方向为东西方向,时间为上午 8:00—9:00,影像分辨率为 2 m/像素,激光测距点间距约为 14 m,扫描角约 22.5°,包含热红外影像。由于建筑物一般面南朝北,影像中建筑物走向与飞行方向夹角较小。由于扫描角较小,建筑物之间很少遮挡,基本上保持独立。市区高楼密集,阴影明显,因此识别概率和边界提取的准确率极高。由于建筑物的初始聚类仅在激光测距点进行,同时确定了建筑物的大致范围,这使得后期影像边界的提取是一个局域化串行计算过程,导致不确定性和计算量大大减少,而准确率大大提高;影像空间和三维空间的相互转换克服了影像扭曲的影响,使得建筑物的重构成为可能。

实验表明,建筑物的漏判主要受激光测距点间距和精度的影响;建筑物的误判主要受影像分辨率

和波段数的影响;边界提取及重构的准确程度受影像质量及飞机姿态的影响较大。随着“机载激光影像制图系统”的性能改善,激光点密度和精度的提高,以及图像分辨率的提高和多波段化,自动识别的准确率将迈上一个新台阶。

总之,本方法是一种面向对象的、层次化的、综合多维信息的自动化处理方法。在解决利用遥感手段进行城市建筑物自动提取这一难题中,向实用化迈出了一步。但尚需进一步完善算法和提高精度,以适用大面积低成本快速作业。

### 参 考 文 献 (References)

- 1 Yuh-Tay Liow. Use of Shadows for Extracting Building in Aerial Images. *Computer Vision, Graphics, and Processing*, 1990, **49**: 242—277.
- 2 R. Bruce Irvin, David M. McKown. Methods for Exploiting the Relationship between Buildings and Their Shadows in Aerial Imagery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989, **19**(6): 1564—1575.
- 3 A. Huertas, R. Nevatia. Detecting Building in Aerial Images. *Computer Vision, Graphics, and Processing*, 1988, **41**: 131—152.
- 4 C. Lin, A. Huertas, R. Nevatia. Detection of Buildings Using Perceptual Grouping and Shadows. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, 62—69.
- 5 J. Chris McGlone, Jeffrey A. Shufelt. Projective and Object Space Geometry for Monocular Building Extraction. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, 54—61.
- 6 Jee-cheng Wu. Extracting Buildings in Aerial Image by Using DEM. 1997 ACSM/ASPRS Annual Convention & Exposition, Technical Papers Vol. 2 GIS&GPS. 1997, 365—368.
- 7 W. Eckstein, O. Munkelt. Extraction objects from digital terrain models. *SPIE*, 1995, **2572**: 43—51.
- 8 Uwe Weidner, W. Forstner. Towards automatic building extraction from high-resolution digital models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1995, **50**(4): 38—49.
- 9 C. Baillard, et al. Extraction and textural characterization of above-ground areas from aerial stereo pairs; a quality assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, **53**(2): 130—141.
- 10 Michel Roux, David M. Mckeown. Feature Matching for Building Extraction from Multiple Views. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition* 1994, 46—53.
- 11 Frederic P. Perlant, David M. Mckeown. Scene Registration in Aerial Image Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1990, **56**(4): 481—493.

作者简介

徐逢亮,男,1973年8月出生,1996年获中国科学技术大