

文章编号: 1001-1595(2008)03-0391-03

中图分类号: P237

文献标识码: A

LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像提取建筑物轮廓方法

程 亮¹, 龚健雅²

1. 南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

Building Boundary Extraction Using Very High Resolution Images and LiDAR

CHENG Liang¹, GONG Jian-ya²

1. Department of Geographical Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Key Lab of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In order to extract geometric precise and detailed building boundary, a new approach is presented integrating very high resolution images and LiDAR data. The process consists of a sequence of four steps.

Pre-processing—identify segmented building points from raw LiDAR data. Create building images—after creating a buffer and a bounding rectangle of a building according to the segmented building points, filter the original image using the buffer and then cut the result image by the bounding rectangle. Line segments extraction—most buildings have perpendicular structure with two rectilinear axes. So an automatic and robust method on building principal orientations estimation is presented based on rough principal orientations constraint, thus improving the accuracy and robustness of line segments extraction. Boundary selection—a selection strategy is proposed based on LiDAR data density analysis and Kmeans clustering. The results demonstrated that the proposed approach determined building boundaries well.

Key words: LiDAR; very high resolution image; line segment extraction; boundary selection

摘 要: 以精确自动提取建筑物轮廓为目标, 提出一种 LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像进行轮廓提取的新方法。其要点分为 4 步: 预处理, 检测 LiDAR 中建筑物点并分割成每栋建筑物的点集; 建立轮廓提取区, 针对每栋建筑物做缓冲区和外接矩形, 通过缓冲区过滤和外接矩形切割, 建立轮廓提取感兴趣区域; 线段提取, 借助 LiDAR 估算出建筑物概略主方向, 并在该方向的约束下, 自动、鲁棒地检测出建筑物的主方向和建筑物的线段; 轮廓筛选, 基于 LiDAR 密度分析与 Kmeans 聚类动态筛选出精确轮廓。本方法所提取的建筑物轮廓定位精确、细节完好, 轮廓提取准确率 91%。

关键词: LiDAR; 超高分辨率影像; 线段提取; 轮廓筛选

轮廓提取是建筑物提取与模型重建的重要基础工作。从高分辨率影像中自动提取建筑物的研究已经开展多年, 文献[1]通过提取矩形的角点来提取建筑物轮廓; 文献[2]通过计算各直线相互关系的代价函数及其最小准则提取建筑物矩形轮廓; 文献[3]引入知识定义了几种近似的矩形结构, 提出了一套直线后处理的方法。这些方法的要点在于: 基于几何约束、或者基于某种规则、或者基于知识等优化轮廓线的提取。然而高分辨率影像包含着大量丰富信息, 仅仅基于影像难以自动分离建筑物区域与非建筑物区域, 道路边线、建筑物阴影等类似目标往往会轮廓提取形成干扰, 单纯基于影

像要自动准确提取轮廓, 技术难度很大。

利用 LiDAR 数据或 DSM 提取建筑物轮廓的研究成果也有许多。文献[4]利用 DSM 与 DEM 之间的差异提取建筑物轮廓; 文献[5]利用规划数据辅助 LiDAR 进行建筑物重建; 文献[6]将 LiDAR 数据与 IKONOS 影像结合检测建筑物轮廓; 文献[7]使用规则化的方法提取建筑物轮廓。现阶段, 空载 LiDAR 数据的点间距一般为米级, 相对于摄影测量常用的厘米级分辨率航空影像, LiDAR 数据空间分辨率低, 单纯基于 LiDAR 获取的建筑物轮廓相对不够精细且精度不高。利用规则化技术可以提高轮廓线的精度, 但规则化方法也受制于 LiDAR 数据的空间分辨

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-05-22

基金项目: 国家 973 项目(2006CB701300)

作者简介: 程亮(1978-), 男, 南京人, 博士, 主要从事数字摄影测量、LiDAR 数据处理等方面的研究。E-mail: geocl@163.com

率、滤波与分类等处理的精度,还存在不确定性且容易产生轮廓整体偏移问题。

从影像中提取出的轮廓几何精度高、细节丰富,但处理的自动化程度不高,从 LiDAR 数据中提取的轮廓精确性与细节性不高,但 LiDAR 直接提供了 3 维坐标,有利于提高处理的自动化程度,两类数据具有很强的互补性,两者的集成将有利于自动、准确地获取精确、细节的建筑物轮廓。因此,为了精确、自动地提取矢量形式的建筑物轮廓,本文提出一种 LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像(厘米级分辨率)提取建筑物轮廓方法。

1 方法

1.1 预处理

首先从 LiDAR 数据中分离出非地面点,再从非地面点中分离出建筑物点,最后分割成每栋建筑物点集。本文采用该方法分离 LiDAR 数据中的地面点与非地面点。针对获取的非地面点,采用基于面片拟合的区域生长方法提取建筑物点^[8],最终结果即为已分割的建筑物点集。预处理环节的全自动化尚有难度,一定的人工编辑是需要的。

1.2 轮廓提取区的建立

通过预处理获得了已分割的建筑物点集,将这些点集与影像作用,生成轮廓提取区,以使轮廓提取工作专注于目标区域,减少无关信息的干扰。轮廓提取区建立的方法为:

1. 套合 LiDAR 数据与超高分辨率影像。根据不同的需求(3 维重建、2 维矢量图生成等),需要应用不同类型影像(立体像对、正射影像等)于本方法,对于不同的影像具体套合方法不同。例如,若是正射影像,两者直接套合即可;若是立体像对,则可根据外方位元素,通过共线方程将 LiDAR 点反投影到影像上;如果是方位未知的影像,则人工配准。

2. 缓冲区过滤。LiDAR 数据与影像的套合会受一系列误差的影响而导致位置偏差,将建筑物点集内插成面域后,向外做缓冲区(阈值取 LiDAR 数据平均点距的 2 倍),以确保影像上建筑物落在缓冲区内。利用该缓冲区过滤掉影像上非建筑物区域信息。

3. 外接矩形切割。针对每个建筑物,根据其点集拟合外接矩形,以缓冲区阈值进行外扩,切割过滤所得影像,形成轮廓提取区。

1.3 主方向约束下的线段提取

线段提取需要在边缘影像上进行,本文采用

Edison 算子对轮廓提取区进行边缘检测。在边缘影像上,利用 Hough 变换进行线段提取,不同之处在于本文 Hough 变换只在主方向上进行。在主方向的约束下,线段提取工作由 Hough 变换 2 维积累空间的峰值检测变为两个主方向上的 1 维峰值检测,线段提取更为准确、可靠。其中,建筑物主方向的检测是关键。

现实中绝大多数的建筑物具有规整的几何形状且呈直角转折,直角转折建筑物的所有轮廓线只有两个方向且相互垂直,这两个方向即建筑物主方向。文献[8]介绍了基于主方向的直线提取方法,但其单纯依靠影像检测主方向的方法存在一些不足,如:复杂纹理时结果不稳定,建立角度直方图的积累矩阵阈值需人工设定等。针对这些问题,本文提出一种自动、鲁棒的建筑物主方向检测算法。影像上平行的轮廓线对应着 Hough 空间的同一个,根据阈值过滤积累矩阵可以建立角度累加直方图,直方图上的峰值即为建筑物主方向。本算法利用 LiDAR 数据预先获取概略主方向,在其约束下以自适应方式自动获取阈值;同时在概略主方向约束下,当主方向检测存在严重干扰时,直方图的峰值检测只需要在给定区间内做单峰值检测,降低了干扰严重时出错的可能。

1.3.1 概略主方向估计

针对每个建筑物,根据其 LiDAR 点集拟合旋转的最小外接矩形(MBR),以该外接矩形的主方向为建筑物的概略主方向。考虑到建筑物形状比较复杂时,建筑物主方向可能与 MBR 方向有一定的偏差,本文以一定阈值(本文取 5°)形成概略主方向区间。

1.3.2 主方向检测

在概略主方向的约束下,建筑物主方向检测算法的步骤如下: 对轮廓提取区影像做 Hough 变换,找出积累空间中的最大值; 设定阈值为积累空间最大值乘以系数 t , t 初始取值为 0.9,将积累空间每个单元的值与此阈值进行比较,大于阈值的保留,小于阈值的单元值设为 0; 在概略主方向区间内,对于每个累加积累空间的列,如果累加值都为 0,那么减小系数 t (减小幅度为 0.1),跳转到,如果积累值有不为零的,那么对这些积累值做单峰值检测,此峰值就是精确主方向; 判断概略主方向区间是否都处理完毕,如果是,则程序终止,如果没有,则跳转到,完成处理。

1.4 基于 LiDAR 密度分析与 Kmeans 聚类的轮廓筛选

线段提取的结果中,除了轮廓线段还存在较多

的屋顶线段以及一些干扰线段,因此需要进一步从中筛选出轮廓线段。文献[6]介绍了一种利用LiDAR数据从IKONOS影像中提取建筑物轮廓的方法。然而,与IKONOS影像上的线段提取不同,厘米级超高分辨率影像条件下,线段提取会使得很小的局部区域内存在多条可能的轮廓线,为了从中自动筛选出精确轮廓线,本文提出一种基于LiDAR密度分析与Kmeans聚类的轮廓筛选策略。

首先,过滤。分为两步:根据建筑物主方向调整最小外接矩形(MBR),形成与主方向完全一致的MBR,利用其切割线段提取结果,排除其外的线段;针对剩余的每条线段,沿其垂直方向外扩,形成其左右矩形。分析左右矩形内的LiDAR点:如果左右矩形内均没有LiDAR点,则说明此线段位于建筑物外,过滤之;如果左右矩形内LiDAR点密度相当,则说明此线段位于屋顶,过滤之。过滤所得轮廓线段,即为候选轮廓。

其次,分组和聚类。针对候选轮廓,根据平行轮廓间的水平距离和垂直距离对轮廓线段分组。针对每组线段,按照上述方法对其中每条线段外扩形成左右矩形,计算每条线段的左右矩形LiDAR点密度差,采用公式(1)定义一组线段的密度差

$$L = \{ |d_k| \mid k = 0, \dots, m \} \quad (1)$$

式中, d_k 表示第 k 条候选轮廓线的密度差。利用Kmeans聚类算法,根据 $|d_k|$ 将所有密度差聚集成两类,一类密度差大,另一类密度差小。密度差小的被排除,保留密度差大的,密度差大的线段即为该组的精确轮廓线。

2 实验与分析

本方法适用于不同类型影像(立体像对、正射

影像等),为了选择较大范围的测试区域,实验采用了真正射影像(超高分辨率航空影像涵盖范围相对有限)。实验影像如图1(a),大小约为 $7\,310 \times 8\,290$ 像素,空间分辨率为 5 cm 。对应LiDAR数据平均点距为 1 m 。实验选取的区域包含了不同走向、不同结构、不同屋顶纹理特征的多个建筑物,以测试方法适用性。

图1(b)、图1(c)分别为基于最大值峰值检测线段提取算法(最大值法)、本文主方向约束下的线段提取算法结果。两图中分别有线段 $5\,709$ 、 $4\,141$ 条,图1(b)中的轮廓线在图1(c)中几乎都有,但图1(c)中一些重要轮廓在图1(b)中却没有(如标注A、B),说明本文线段提取算法不仅减少了无关线段的提取,而且提取出了最大值法漏检的一些重要轮廓线。图1(d)为本文轮廓筛选算法的结果。从图1(c)到图1(d),线段数量由 $4\,141$ 条减少为 779 条,过滤率 81% ,筛选算法在保留轮廓线的基础上,过滤掉了绝大多数的非轮廓线。为了定量评价轮廓提取的准确性,套合最终轮廓与原有影像,检查对应轮廓之间的角度与距离,如果角度不超过 2° 且平均距离不超过 4 像素,则认为提取成功,否则视为失败。图1(d)中共有线段 779 条,其中 709 条正确, 70 条错误,准确率 91% 。为了评估方法的精确性,利用LiDAR方案(仅使用LiDAR数据,不使用影像)在同套数据上进行了轮廓提取实验。以真正射影像上轮廓为真值,分别从两套方案结果中选择 32 条同名轮廓评价精度,本文方案与LiDAR方案所提取轮廓的平面均方差(RMSE)分别约为: 2 像素、 10 像素。顾及LiDAR数据与真正射影像的套合误差(约 2 像素),LiDAR方案的精度依然相对低,本文集成方案精确性优势明显。

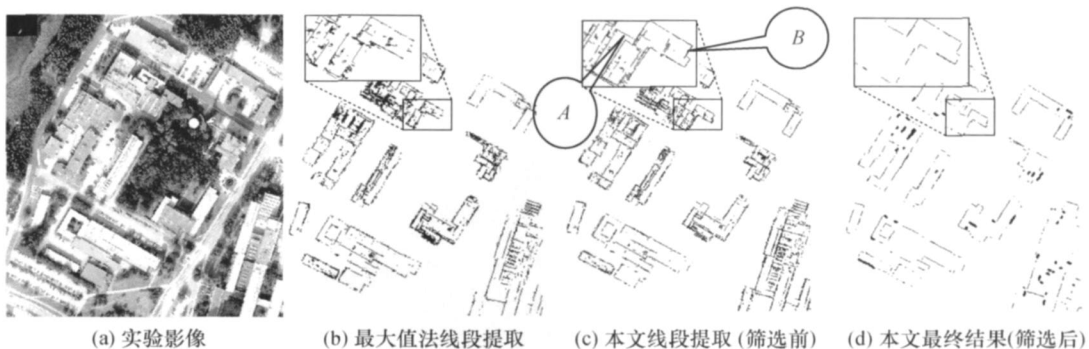


图1 轮廓提取实验数据与结果

Fig. 1 The experimental datasets and results of building boundary segments extraction

(下转第399页)

精度约为 0.4 m,运动学轨道精度的提高,将进一步提高约化动力学轨道的精度。

致谢:感谢 Geo Forschungs Zentrum Potsdam 葛茂荣教授在本文修改过程中的建议以及讨论。

参考文献:

- [1] HUGEN TOBLER U, DACH R, FRIDEZ P, MEINDL M. Bernese GPS Software Version 5.0 DRAFT[R]. Bern: Printing Office of the University of Bern, 2006.
- [2] SVEHLA D, ROTHACHER M. Kinematic and Reduced-dynamic Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters[J]. Advances in Geosciences, 2003, 1: 47-56.
- [3] BEUTLER G. Methods of Celestial Mechanics Volume I: Physical, Mathematical, and Numerical Principles[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [4] BEUTLER G. Methods of Celestial Mechanics Volume II: Application to Planetary System, Geodynamics and Satellite Geodesy[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [5] BOCK H. Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System[D]. Berne: Astronomical Institute University of Berne, 2003.
- [6] WANG Jie-xian. Precise Orbit Determination and Positioning of GPS[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (王解先. GPS精密定轨定位.上海:同济大学出版社,1997.)
- [7] CHEN Jun-ping. On Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (陈俊平.低轨卫星精密定轨研究[D].上海:同济大学,2007.)
- [8] BOUCHER C, ALTAMIMI Z, SILLARD P, FEISSEL-VERNIER M. The ITRF2000 (IERS Technical Note No. 31)[M]. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004.
- [9] McCARTHY D D, PETIT G. IERS Conventions (2003) (IERS Technical Note No. 32)[M]. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004.
- [10] CHEN Jun-ping, WANG Jie-xian. Kinematic Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiter Based on Epoch-Difference Strategy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(4): 57-61. (陈俊平,王解先.基于历元间差分的低轨卫星运动学精密定轨[J].大地测量与地球动力学,2007,27(4):57-61.)
- [11] LIU Jing-nan, ZHAO Qi-le, ZHANG Xiao-hong. Geometric Orbit Determination of CHAMP Satellite and Dynamic Models Compensation during Orbit Smoothing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(1): 1-6. (刘经南,赵齐乐,张小红.CHAMP卫星的纯几何定轨及动力平滑中的动力模型补偿研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(1):1-6.)

(责任编辑:丛树平)

(上接第 393 页)

3 结 论

本文提出的方法可以精确、自动地提取建筑物的轮廓。方法特点如下:轮廓提取区的建立,不仅有利于适应超高分辨率影像大数据量处理的要求、提高后续处理的鲁棒性,而且为排列杂乱的建筑物主方向检测提供了必要前提;建筑物主方向检测算法自动、鲁棒,主方向约束下的线段提取更为准确、可靠,尤其有利于检测一些成像效果不佳的细微轮廓;基于 LiDAR 密度分析与 Kmeans 聚类的轮廓筛选策略,无需阈值,可动态、准确地分离轮廓线与非轮廓线。

参考文献:

- [1] HUERTAS A, NEVATIA R. Detection Building in Aerial Images[J]. Computer Vision Graphics Image Process, 1988, 41(2):131-152.
- [2] KIM T, MULLER J P. Development of a Graph-based Approach for Building Detection[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(1):3-14.
- [3] TAO Wei-bing, LIU Jian, TIAN Jir-wen. A New Approach to Extract Rectangle Building Automatically from Aerial Images[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(7): 866-873. (陶文兵,柳健,田金文.一种新型的航空图像城区建筑物自动提取方法[J].计算机学报,2003,26(7):866-873.)
- [4] WEISS R, FORSTNER W. Towards Automatic Building Extraction from High-resolution Digital Elevation Models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1995, 50(4): 38-49.
- [5] VOSSelman G, DIJKMAN S. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plan[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 34(3W4): 37-43.
- [6] SOHN G, SAMPATH A. Building Extraction Using LiDAR DEMs and IKONOS Images[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 34(3/W13).
- [7] SAMPATH A, SHAN J. Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne Lidar Point Clouds[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(7):805-812.
- [8] ZHANG K, YAN J, CHEN S C. Automatic Construction of Building Footprints from Airborne LiDAR Data[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2523-2533.
- [9] RAU J Y, CHEN L C. Fast Straight Lines Detection Using Hough Transform with Principal Axis Analysis[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 8(1):15-34.

(责任编辑:丛树平)