

DSM 数据中多层次、多直角房屋的三维重建

阎 平¹ 江万寿²

(1 北京电顾航测遥感技术中心, 北京市西城区安德路 65 号, 100011)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 根据房屋的层次结构特点, 采用附加约束条件的最小二乘平差精化房屋几何模型, 使得重建房屋满足现实世界中多数房屋邻接墙面直角相交的要求。对于非平顶房屋, 采用法向量统计分析的方法与模型库中的房屋类型匹配, 然后按匹配类型重建房顶。实验表明, 本方法对于从 DSM 数据中重建多层次、多直角房屋和人字型屋顶等类型的房屋是行之有效的。

关键词: DSM; 局部化处理; 等高线跟踪; 房屋三维重建

中图法分类号: TP751; P237.3

随着测绘科学技术的不断进步, 采用新的空间数据获取方式所得到的 DSM 数据的精度越来越高。例如, 使用 LIDAR (light detection and ranging) 获取三维空间数据和使用数字航拍仪 ADS40 生成的 DSM 分辨率可达到 0.5 m, 这使得从 DSM 中检测并重建三维建筑物成为可能。对于较大数据量的 DSM 数据, 全局处理显然不太现实, 房屋区域检测即大数据量的局部化处理就成为重建质量与效率的关键问题之一^[3]。因此, 如何获得较为稳健的兴趣区域是本文首先要考虑的问题。另外, 房屋的重建应尽量考虑房屋的层次结构特点, 使房屋的平面和屋顶形式符合实际情况, 而现实世界中多层次、多直角的房屋极为普遍, 本文主要探讨了该类房屋的重建方法。

近 10 多年来, 国内外很多学者对由 LIDAR 数据重建房屋进行了大量的研究。Madhavan 等使用航空激光扫描系统 (ALS) 所获得的高精度 DSM 数据来重建房屋^[9]。他们通过边缘检测和细化来获取房屋的轮廓, 通过区域分割、平面拟合等手段来估计屋顶。边缘检测时常常会出现破碎的边缘, 使得房屋轮廓线不完整, 要自动构成一个完整的房屋显得比较困难。另外, 其全局的处理方式也增加了数据处理的难度。郭韬将 IKONOS 影像和 LIDAR 数据结合起来进行城市三维建模^[9], 通过边缘检测、直线提取、直线编组以获

得房屋轮廓。由于直线编组需要很多线索, 推理信息不足往往使直线编组困难重重, 使编组获得的房屋轮廓线不完整。尤红建等从 LIDAR 数据所生成 DSM 中, 通过阈值分割获得建筑物的大致形状和位置, 利用基于像素邻域的边界跟踪获得建筑物边界, 并对边界进行规格化处理, 完成简单房屋主轮廓的重建^[1]。

1 房屋区域及轮廓线的获取

房屋在 DSM 上表现为高出地面并呈一定规则形状的区域, 它与周围有较明显的高差。同一层次的房屋平面往往在高程上具有一致性, 区域作为一个特征可以反映这种一致性。因此, 首先将 DSM 按照高程值进行区域分割以得到潜在的房屋区域。本文采用基于均值平移 (MeanShift) 的分割算法^[8]。均值平移算法是一种有效的统计迭代算法, 已经广泛应用于聚类分析、跟踪、影像分割、影像平滑、滤波、影像边缘提取和信息融合等方面。

图 1 为日本筑波地区按高程值量化后的 DSM 影像。图 2 为采用均值平移算法对 DSM 影像进行分割的结果。从图中可以看出, 独立的房屋区域基本被分割开来, 而且多层房屋的每一层也被分割开来, 这为房屋轮廓提取提供了便利。

房屋轮廓线的获取是从 DSM 中重建房屋最重要的一步。通常,重建的基本处理单元就是构成房屋的轮廓线。获得了房屋各层次的轮廓,就可以重建房屋的各个结构,通过不同结构的组合就可以得到对房屋的完整描述。等高线提供了一个将 DSM 数据和多层次房屋模型联系起来的桥梁。首先,等高线反映了房屋每一层次的高程信息,使对多层次房屋的重建成为可能;其次,等高线构成了每一层次的轮廓线,提供了重建的基本单元;更为重要的是,对于一个完整的房屋层次而

言,等高线是封闭的,这避免了对零散的边缘进行编组的难题。对此,封闭区域进行统计分析,可以辨识出房屋轮廓内部的房顶类型。选择适当的模型,可以完成对屋顶的重建。

基于以上考虑,本文采用等高线跟踪算法^[2],按照分割出的每个区域的平均高程跟踪得到的等高线可以作为房屋每一层次的轮廓线。

图 3 中的封闭线段是采用等高线跟踪算法获取的房屋轮廓线。房屋各层次的轮廓线都已经得到,并且轮廓完整。图 4 是其中某一层次的轮廓线。



图 1 东京筑波地区 DSM 深度影像
Fig. 1 Partial DSM Image of Tokyo



图 2 基于 MeanShift 的分割结果
Fig. 2 Segmentation of DSM with MeanShift Algorithm

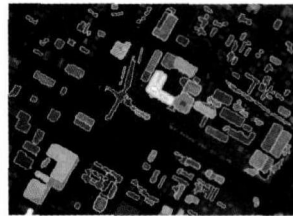


图 3 等高线跟踪获取房屋轮廓线
Fig. 3 Building Contours Traced

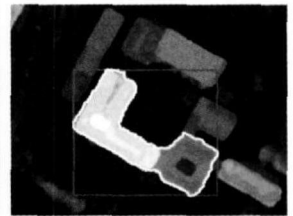


图 4 某一层次的完整轮廓线
Fig. 4 Contour of a Building Level

2 房屋外围轮廓的精细化与假房屋的滤除

获取了房屋轮廓以后,可以进一步地获得房屋轮廓的矢量描述。首先将轮廓线分裂,获取每条直线段的点集,再通过垂直、平行等约束条件进行轮廓线平差,获得满足多直角条件的房屋角点近似位置,由此获得直角房屋的描述。

房屋外围轮廓估计的主要步骤如下。

1) 首先将房屋每一层次跟踪出来的轮廓线采用基于分裂的最小均方根误差线段逼近法^[1]进行分段,获得粗略的端点。

2) 将每一对端点之间的轮廓线采用最小二乘原理拟合出一条直线段。在处理的过程中,将拟合出的几段方向相近的直线合并为同一条直线。拟合直线段后,相邻直线段之间求交点以获得房屋各层次的角点。

3) 附加几何条件约束的房屋轮廓平差。对拟合出来的各条直线段,用一个关系图记录各条直线段之间的相互关系。如果两条直线段之间的夹角小于一定限值,认为两条直线段平行;如果两条直线段之间的夹角接近于 90°,认为两条直线段垂直。

如果将垂直关系用 P 表示,平行关系用 L 表示,其他关系用 N 表示,则图 7(a) 中多边形 4 条直边之间的平行、垂直等关系可以用图 7(b) 来描述。

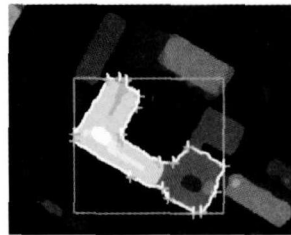


图 5 轮廓线分割后得到的端点
Fig. 5 Line Segments Splitted From a Contour

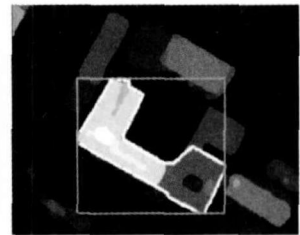
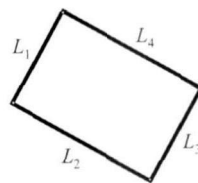


图 6 分段拟合、合并后的直线段
Fig. 6 Line Segments After Fitting and Merging



(a) 一个多边形

	L_1	L_2	L_3	L_4
L_1	N	P	L	P
L_2	P	N	P	L
L_3	L	P	N	P
L_4	P	L	P	N

(b) 边之间的关系

图 7 一个多边形及其关系图

Fig. 7 A Polygon and Relations Between Its Edges

平差时采用间接法平差模型,将各种限制条件作为虚拟观测值加入误差方程。对于每条直线段,观测值为拟合该条直线段的原始轮廓线上的点集。点 $P(X_P, Y_P)$ 到由端点 (X_i, Y_i) 、 (X_{i+1}, Y_{i+1}) 所连接成的直线段的距离为:

$$d_p = \frac{|(Y_{i+1} - Y_i)(X_p - X_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_p - Y_i)|}{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}} \quad (1)$$

理论上, 直线上的每一点到直线的距离 d_p 应为 0。但是由于各种误差原因, d_p 一般不可能为 0。把距离 d_p 视为虚拟观测值, 以角点坐标为未知数, 可得:

$$v_{d_p} = (Y_{i+1} - Y_i)dX_i + (X_{i+1} - X_i)dY_i + (Y_p - Y_i)dX_{i+1} + (X_p - X_i)dY_{i+1} - d_p \quad (2)$$

对于直线段 (X_i, Y_i) 、 (X_{i+1}, Y_{i+1}) 和直线段 (X_j, Y_j) 、 (X_{j+1}, Y_{j+1}) , 若这两条直线段之间满足垂直关系, 则两直线的斜率乘积为 -1, 可表示为:

$$(Y_{i+1} - Y_i)(Y_{j+1} - Y_j) + (X_{i+1} - X_i) \cdot (X_{j+1} - X_j) = 0 \quad (3)$$

将式(3)的不符值作为虚拟观测值, 以角点坐标的改正值为未知数, 可得误差方程式:

$$v_{\text{perpendicular}} = (Y_{i+1} - Y_i)(dY_{j+1} - dY_j) + (Y_{j+1} - Y_j)(dY_{i+1} - dY_i) + (X_{i+1} - X_i)(dX_{j+1} - dX_j) + (X_{j+1} - X_j)(dX_{i+1} - dX_i) \quad (4)$$

若这两条直线段之间满足平行关系, 则两直线的斜率相同, 有:

$$(Y_{i+1} - Y_i)(X_{j+1} - X_j) - (X_{i+1} - X_i) \cdot (Y_{j+1} - Y_j) = 0 \quad (5)$$

将式(3)的不符值作为虚拟观测值, 以角点坐标为未知数, 得误差方程式:

$$v_{\text{parallel}} = (Y_{i+1} - Y_i)(dX_{j+1} - dX_j) + (Y_{j+1} - Y_j)(dX_{i+1} - dX_i) + (X_{i+1} - X_i)(dY_{j+1} - dY_j) + (X_{j+1} - X_j)(dY_{i+1} - dY_i) \quad (6)$$

对检测轮廓点和角点之间存在的垂直、平行条件按式(2)、式(4)、式(6)列 3 类误差方程, 联合这 3 类方程, 按最小二乘原理进行迭代求解, 可以得到各角点坐标的改正值, 最终得到满足垂直、平行条件的直线段的角点坐标。平差时, 应注意各误差方程权的选择。式(2)的权应考虑直线段的长度, 式(4)、式(6)的权可以取得大一些, 以强调垂直和平行条件。

图 8 是图 1 中 DSM 按等高线跟踪得到的局部原始轮廓线。可以看出, 除了房屋以外, 还存在其他不属于房屋的轮廓线。它们可能属于汽车、树木等其他高出地面的物体。对这些轮廓线按上述方法平差后, 可以计算出距离中误差。距离中误差度量了该轮廓线满足多直角条件的程度。再根据轮廓线的尺寸、面积、周长等条件, 可以区分出非建筑物的轮廓线。距离中误差的阈值要由最小的房屋边长来确定。

图 9 是图 8 中轮廓线平差并滤除非房屋轮廓线的结果, 其中距离中误差阈值为 1.5 m。

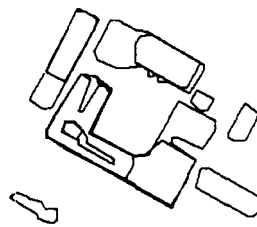


图 8 原始轮廓线
Fig. 8 Extracted Building Contours

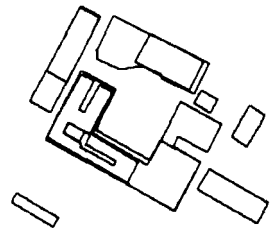


图 9 轮廓线平差结果
Fig. 9 Refined Building Contours

3 模型的选择及人字型房屋的重建

得到了房屋轮廓线之后, 可以进一步考察房屋的屋顶类型, 并对其进行重建。对于一个轮廓线围成的房屋区域, 对其中各点的表面法向量进行统计, 可以得到法向量分布的情况, 如峰值个数、朝向等。

如图 10 所示, 法向量 V 可以使用两个角度(α 、 β)来表示, 其中 α 表示该向量在平面 XOY 上的投影与 X 轴之间的夹角, β 表示该向量与平面 XOY 的夹角($\alpha \in [0, 360]$, $\beta \in [0, 90]$)。按 1° 的分辨率进行离散化, 可以得到 90×360 的累积矩阵。对于区域内的每一个点, 计算(α 、 β), 并累计到邻近的累积矩阵单元内, 可以得到法向量方向分布图。

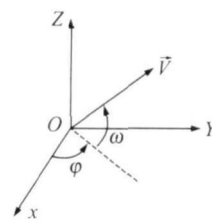


图 10 法向量方向示意图
Fig. 10 Parameters of Normal Vector

如图 11, 人字型房屋的法向量方向主要集中在两个关于屋脊线对称的方向上, 且与 Z 轴的夹角较大。而平顶房屋的屋顶区域中的法向量方向主要集中在 Z 轴上。对各种不同的屋顶法向量进行统计, 可以得到法向量统计库。

对于具体的房屋, 将其法向量统计结果与法向量分布图和法向量统计库中的分布图进行匹配, 可以得到该房屋的屋顶类型。

由于数据类型的限制, 只考虑了平顶屋顶、人字形屋顶和有 4 个斜面的人字形屋顶。对于人字

型房屋,法向量分布图中有两个峰值,用峰值方向附近所有高程点可以拟合出两个平面。两个平面的交可以得到屋顶山脊,而两个平面与轮廓垂直面的交可以得到精确的三维轮廓线,由此即可重建人字型屋顶及外轮廓面。对于 4 个斜面人字形屋顶以及更复杂的屋顶,可以按类似的方法处理。

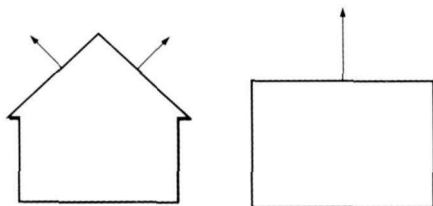
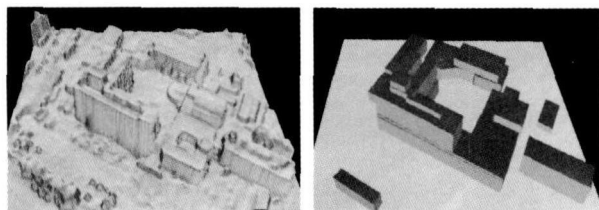


图 11 人字型与平顶房屋法向量方向分布示意图

Fig. 11 Normal Vector Distribution of 'A' Building and Plane Building

4 实验

图 12(a) 为图 8 对应的 DSM 三维显示,从中可以看出其中的房屋都是多直角的多层房屋,有些房屋的组成比较复杂。图 12(b) 为利用本文算法从 DSM 重建的多层次多直角房屋,可以看出,房屋的各层次都被重建出来,并且相邻墙面之间的直角关系都得到了满足,说明本文的方法对于此类房屋是有效的。



(a) DSM 局部

(b) 重建的建筑物

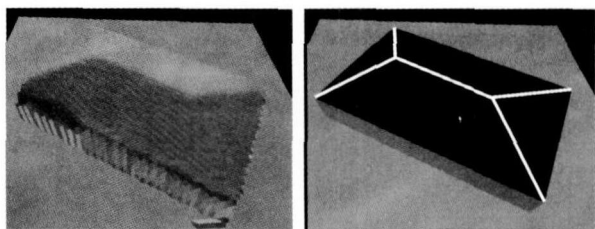
图 12 多层次多直角房屋的三维重建结果

Fig. 12 Reconstruction Result of Multiple Level Rectangle Buildings

图 13(a) 是一栋顶部有 4 个面的人字型房屋,在使用等高线方法获取外轮廓线后,使用法向量统计方法可以检测出屋顶的 4 个法向量分布峰值,利用具有 4 个面的人字型房屋模型进行拟合平差后可以得到图 13(b) 的重建效果。

图 14 为图 1 中 DSM 利用本文方法重建的结果,从图中可以看出,本文的重建算法可以生成层次清晰、细节丰富的真实城市三维景观模型框架,重建效果比较满意。

图 15 是日本东京银座地区 DSM 数据重建的部分结果,其中的高层建筑均得到了重建。不过,这些建筑的顶部都是比较简单的。



(a) 人字形房屋 DSM

(b) 重建结果

图 13 人字型屋顶重建结果

Fig. 13 Reconstruction Result of Gable Roof Building

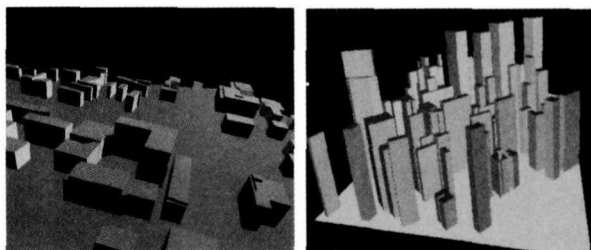


图 14 筑波地区更多结果

图 15 东京银座地区部分结果

Fig. 14 Reconstructed Buildings in Tsukuba, Japan

Fig. 15 Reconstructed Buildings in Ginza, Tokyo

参 考 文 献

- [1] 尤红建, 苏林, 李树楷. 利用机载三维成像仪的 DSM 数据自动提取建筑物[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 408~ 413
- [2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- [3] Baillard C. 3D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery: A Focusing Strategy [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 76(3): 244-258
- [4] Guo Tao. 3D City Modeling Using High-resolution Satellite Image and Airborne Laser Scanning Data [D]. 东京: 东京大学, 2000
- [5] Brenner Cl. Building Reconstruction from Laser Scanning and Image[C]. Proc. ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques, Enschede, The Netherlands, 2003
- [6] Vosselman G, Dijkman S. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 34(3/W4): 37-43
- [7] Vosselman G. Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Integrating Our View of the Planet IGARSS, Toronto, 2002

(下转第 499 页)

[J]. 测绘通报, 2001(8) : 19-21

- [4] 华锡生, 赵钢. 自动全站仪监测系统的大气折光改正研究[J]. 工程勘测, 2001(5) : 45-49
- [5] 刘志德, 葛永慧, 肖海波. 应用 LEGE 法探测三角高程网中的大气折光差[J]. 测绘通报, 2000(12) : 1-3

第一作者简介: 张正禄, 教授, 博士生导师。主要从事精密工程测量、变形监测分析与预报、测量数据处理和工程信息系统方面的科研和教学工作。

E-mail: zz1623@whu.edu.cn

Influence of Atmosphere Refraction on Horizontal Angle Surveying and Countermeasures

ZHANG Zhenglu¹ DENG Yong¹ LUO Changlin¹ MEI Wensheng¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Choosing oriented direction is crucial to line-angle surveying in line-angle nets is put forward in the paper, and how to select the oriented direction as surveying the angles and the means to check the quality of auto-surveying with Georobot are brought forward as well. At last, it expounds some countermeasures to reduce the influence of side-refraction when dispose and survey ultrahigh-precision line angle nets.

Key words: atmosphere refraction; horizontal angle surveying; Georobot; interchanging method; optimal oriented direction

About the first author: ZHANG Zhenglu, professor, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education of precise engineering geodesy, deformation monitoring analysis and forecast, measurement data processing and engineering geo-information system.

E-mail: zz1623@whu.edu.cn

(上接第 495 页)

- [8] Comanicu D, Meer P. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 2002, 24(5) : 603-619

第一作者简介: 阎平, 硕士, 工程师。现主要从事数字化电网、电厂设计、电力勘测相关软件开发等工作。

E-mail: ypx10@163.com

Reconstruction of Buildings with Multi Right Angles and Multilayers from LIDAR

YAN Ping¹ JIANG Wanshou²

(1 Beijing Diangu Aero-Photogrammetry and Remote Sensing Technical Center, 65 Ande Road, Beijing 100011, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Automatic reconstruction of building from DSM is presented. Focusing the ROI (regions of interest) is a pivotal step in reconstruction. The contour tracing is adopted here to get the ROI and every level of building's closed boundary is acquired simultaneously. The normal analysis of ROI is discussed to select the geometric model and reconstruct the roof. The closed boundaries are adjusted by least square refining to constitute the multi-orthogonal and multi-level buildings. The geometric models used are prismatic (flat roof) and parametric (gabled roof).

Key words: DSM; localized processing; contour tracing; 3D reconstruction

About the first author: YAN Ping, postgraduate, engineer. His is now engaged in digitalized electric network, design of electric power station and surveying software development for electric power.

E-mail: ypx10@163.com