

基于自顶向下方法的建筑物三维重建

王陈园^{1,2,3}

(1. 中国科学院 空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190;
2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100190)

摘要: 三维重建是计算机视觉领域、遥感领域、摄影测量领域等研究的热点之一。自顶向下的重建方法从建筑物的整体结构出发,不容易受到噪声的干扰。为了对单幅高分辨率遥感图像中的建筑物进行准确重建,提出一种自顶向下的建筑物重建方法,在优化过程中,设计了新的转移核函数,使得优化过程既可以跳出局部最优,又可以达到较快的收敛速度。利用 IKONOS 上 1 m 分辨率的遥感图像及近 1 m 分辨率的仿真图像进行验证,实验结果表明,同时使用特殊转移核和基本转移核的自顶向下的方法能够更加准确地重建建筑物,重建结果要优于仅仅使用基本转移核的结果,并且由于使用了特殊的转移核,能跳出局部最优,具有很强的鲁棒性。

关键词: 建筑物三维重建;参数化建筑模型;形状先验;自顶向下

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Building reconstruction based on top-down method

Wang Chenyuan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: 3D reconstruction is one of the hot researches in the field of computer vision, remote sensing, photogrammetry and so on. Since the top-down reconstruction approach starts from the overall structure of the building, it is not susceptible to noise disturbance. In order to reconstruct buildings from a single high resolution remote sensing image, a top-down building reconstruction method is proposed. In the process of optimization, special transition kernels are designed in order to achieve convergent extraction results and get rid of local minimum. Experimental results show that the proposed method can reconstruct building more accurately than method's only using basic transition kernels by using IKONOS 1 m resolution on remote sensing images and almost 1 m resolution on simulated images. Moreover, it can get rid of local minimum and has strong robustness with respect to the disturbance of background noise.

Keywords: building reconstruction; parametric building model; shape prior; top-down method

1 引言

三维重建是指从单幅图像或多幅图像中恢复三维信息的过程,是计算机视觉领域、遥感领域、摄影测量领域等研究的热点之一。随着分辨率的提高,遥感图像中目标的几何结构信息越来越清晰,为遥感图像实现更精细的目标三维重建提供了可能。

然而,遥感图像中建筑物的三维重建仍然是一个复杂的问题。建筑物三维重建的准确性通常会受图像背景、图

像噪声以及灰度分布相似性的影响,因此需要深入研究对于背景干扰具有鲁棒性的建筑物三维重建方法。

近年来,国内外众多学者做了很多建筑物三维重建的研究,提出了许多行之有效的办法。建筑物重建的方法主要有两种——自底向上的方法和自顶向下的方法。自底向上方法一般是首先提取建筑物的底层特征,然后整合和编组识别点、线等几何特征,然后利用阴影估算建筑物的高度,完成建筑物的重建^[1-3]。该类方法依赖于底层特征的准确提取,但遥感图像特征准确提取的困难,给通过该

类方法进行目标重建带来很大的困扰。

自顶向下方法一般通过给定的先验知识,如形状或表现知识等,在图像中搜索或者整合符合先验知识的区域对象^[4-7]。该类方法可以克服自底向上方法对底层特征依赖性强的缺点。

由于单幅遥感图像包含的立体信息不完整,仅依靠单幅图像往往无法唯一得到物体的三维结构,尤其是在复杂场景下周围地物的遮挡导致图像中感兴趣目标的很多信息损失,使得目标的三维重建更为困难,这往往需要一个先验模型以组织不完整的目标信息并容忍噪声以实现目标的三维重建。

参数化建筑模型法是一种常用的建筑物表示方法,该类方法在建筑物重建领域具有良好的使用前景,在该类方法中,建筑物可以使用一些预定义的类型表示,其基本类型为平顶建筑物,每种建筑物类型由诸如长度、宽度、高度、位置以及角度等参数表示。对于已经定义了模型的建筑物,该类方法能够实现快速高效的建模。参数化建筑模型由两种类型的参数表示:描述建筑物模型几何形状的形状参数和描述在给定世界坐标系下建筑物位置和方向的姿态参数。

基于单幅高分辨率遥感图像的建筑物三维重建是通过估计参数化建筑模型中的形状和姿态参数实现的,当参数较多时,在庞大的参数空间内穷举寻找最优值的方法是不现实的,对于该类问题随机计算是较高效的求解方法,其中马尔科夫链蒙特卡罗(markov chain Monte Carlo, MCMC)方法^[8-9]是随机计算的典型方法。虽然现有很多工作使用 MCMC^[4,10-12]或其改进方法^[6-7,13-14]进行建筑物重建,但这些方法对于特定的问题依然需要设计适合的转移核函数以使优化过程既可以跳出局部最优,又可以达到较快的收敛速度。

为了解决优化过程陷入局部最优的问题,本文提出一种自顶向下的建筑物重建方法,该方法同时使用灰度信息和形状先验信息,实现单幅高分辨率遥感图像的建筑物三维重建。为了避免陷入局部最优,本文设计新的转移核函数。实验结果表明该方法能够更加准确地重建建筑物,重建结果要优于仅仅使用基本转移核的结果,并且由于使用了特殊的转移核,该方法能跳出局部最优,具有很强的鲁棒性。

2 研究方法

参数化建筑模型的求解的一般框架如图 1 所示。给定输入图像,以及一些相机参数,首先根据建筑物的先验形状信息,构建建筑物的参数化建筑模型,然后根据映射关系将该模型投影为 2D 图像即产生仿真图像,然后构建仿真图像与待重建图像的匹配函数,使用参数估计的方法估计模型的形状和姿态参数,然后参数调整重复上面的步骤,直到得到最优的形状和姿态参数。

立方体模型作为参数化建筑模型的基本类型,可以使

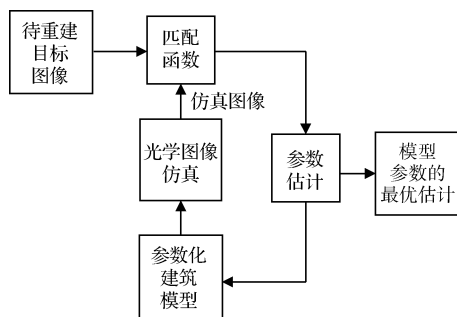


图 1 基于自顶向下方法的单幅遥感图像建筑物三维重建方法流程

用建筑物的长度、宽度、高度、角度以及位置等参数变量($W_x, W_y, H, \alpha, C_x, C_y, C_z$)来描述,如图 2 所示。任意平顶建筑物的三维模型可以由图 2 所示的模型通过变换以上 7 个参数得到。

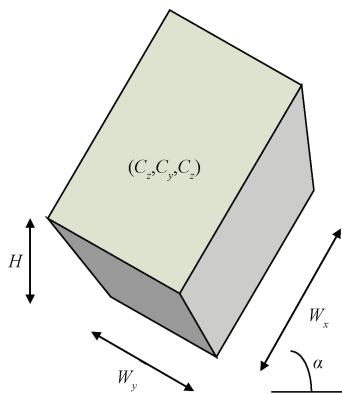


图 2 平顶建筑物的参数模型

其中 H 表示建筑物的高度, α 表示建筑物与参考方向的夹角, W_y 表示建筑物的宽度, W_x 表示建筑物的长度, C_x, C_y, C_z 代表建筑物的中心点坐标, C_z 的取值为 H 。

2.1 匹配函数

根据映射关系将该模型投影为 2D 图像即仿真图像,因此建筑物参数模型与实际图像的匹配转化为仿真图像与实际图像之间的匹配。仿真图像与实际图像的匹配函数设计如下:

$$E_{\text{total}} = w_1 E_{\text{region}} + w_2 E_{\text{shape}} \quad (1)$$

由与形状和姿态参数的真值差别较小的参数得到的仿真图像与实际图像的匹配函数取值较高;反之,由与形状和姿态参数的真值差别较大的参数得到的仿真图像与实际图像的匹配函数取值较低;特别的是,由形状和姿态参数的真值得到的仿真图像与实际图像的匹配函数取值最大。

2.1.1 区域项

建筑物屋顶区域和阴影区域的灰度存在差异,如果仿真图像和实际图像实现了最佳匹配,则区域之间的灰度分布差异最大;相反如果两者匹配错位,则区域之间灰度分

布差异也减小。因此,利用建筑物屋顶和阴影区域之间的灰度差异来衡量两者的匹配程度具有可行性。

当仿真图像和实际图像实现最佳匹配时,屋顶区域的灰度密度分布函数与阴影区域的灰度密度分布函数之间的差异最大,两者之间的 KL 距离最大。当仿真图像和实际图像匹配错位时,屋顶区域的灰度密度分布函数与阴影区域的灰度密度分布函数之间的相似性较大,两者之间的 KL 距离较小。

$$E_{\text{region}} = K\left(\frac{P_r}{P_s}\right) + K\left(\frac{P_s}{P_r}\right) = \sum_{x \in X} p_r(x) \ln \frac{p_r(x)}{q_s(x)} + \sum_{x \in X} q_s(x) \ln \frac{q_s(x)}{p_r(x)}$$

式中: P_r 为屋顶区域的灰度密度分布函数, P_s 为阴影区域的灰度密度分布函数。

2.1.2 形状项

只使用图像灰度的匹配容易受到灰度分布相似性和图像噪声的影响,不具备鲁棒性。同时仿真图像中建筑物的形状被完整地保留下来,在仿真图像与实际图像的匹配中形状^[15-17]的加入能够解决只使用图像灰度匹配时出现问题。

chamfer 匹配^[18]方法在复杂场景中能够得较好的结果,所以本文选择使用 chamfer 匹配方法来计算形状项的相似性度量。

仿真图像与目标图像之间的 chamfer 距离即表示为距离变换图像上的对应仿真图像中点集相同位置处距离值的均方根平均值。理想情况下当两个形状完全匹配时, chamfer 距离应当为 0。计算目标图像 U 和仿真图像 V 的边缘点的 Chamfer 距离为:

$$D(V,U) = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} U_{DT}(v_i) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (3)$$

式中: $\{u_j\}_{j=1}^m$ 记录 U 中边缘点的坐标位置, $U(u_j)$ 表示目标图像 U 在位置 u_j 处的灰度值。 $\{v_i\}_{i=1}^n$ 记录 V 中边缘点的坐标位置, $V(v_i)$ 表示仿真图像 V 在位置 v_i 处的灰度值。 d_i 表示在 v_i 处距离图像的取值, n 表示仿真图像中非零点的个数。DT 变换的基本含义是计算一个图像中非零像素点到最近的零像素点的距离,也就是到零像素点的最短距离。 $U_{DT}(v_i)$ 取值越小,不匹配程度越小。

2.2 参数估计

本文采用 MCMC 方法估计参数,为保证最后的结果是全局最优的,引入模拟退火算法,将搜索方向引导至最优解区域。MCMC 方法的核心是转移核的设计,本文采用的 7 种转移核包括 4 种基本转移核(平移核、长缩放核、宽缩放核以及旋转核)和 3 种新转移核。新转移核允许在长度,宽度或者高度参数变化时,仿真图像中至少有一条边保持不变。此处主要展现 3 种新转移核,分别如下所示:

$$\begin{cases} W_y^{\text{new}} = m \times W_y \\ Cx^{\text{new}} = Cx + (m-1) \times \sin(\alpha) \times W_y \\ Cy^{\text{new}} = Cy - (m-1) \times \cos(\alpha) \times W_y \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} W_x^{\text{new}} = m \times W_x \\ Cx^{\text{new}} = Cx - (m-1) \times \cos(\alpha) \times W_x \\ Cy^{\text{new}} = Cy - (m-1) \times \sin(\alpha) \times W_x \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} H^{\text{new}} = m \times H \\ Cx^{\text{new}} = Cx + \frac{\sin(\theta_a - \frac{\pi}{2}) \times \sin(\theta_e - \frac{\pi}{2})}{\cos(\theta_e - \frac{\pi}{2})} \times (m-1) \times H \\ Cy^{\text{new}} = Cy + \frac{\cos(\theta_a - \frac{\pi}{2}) \times \sin(\theta_e - \frac{\pi}{2})}{\cos(\theta_e - \frac{\pi}{2})} \times (m-1) \times H \end{cases} \quad (6)$$

其中 m 为长度,宽度和高度的缩放的倍数, α 为建筑物参数模型的主方向, θ_e 为 IKONOS 卫星的高度角和 θ_a 为方位角, k 为沿着扫描方向的像素间隔和 l 为垂直于扫描方向的像素间隔。

3 实验

为验证本文方法的有效性及其鲁棒性,本节对仿真图像及遥感图像中的建筑物进行重建实验,其中使用仿真图像测试建筑物的重建精度,使用遥感图像检测本文方法的抗干扰效果。实验中测试了角度不同的 2 幅仿真图像,分别为 $0^\circ, 37.1^\circ$; 2 幅具有 1 m 分辨率的遥感图像,已知 IKONOS 卫星的高度角 θ_e 和方位角 θ_a , 沿着扫描方向的像素间隔 k 和垂直于扫描方向的像素间隔 l , 太阳的高度角 θ_e 和方位角 θ_a 分别为: $\theta_e = 64.67^\circ, \theta_a = 132.65^\circ, k = 0.94 \text{ m}, l = 0.95 \text{ m}, \theta_e' = 34.25^\circ, \theta_a' = 144.59^\circ$ 。

实验中,对两组数据采用相同的参数。式(1)中 $\omega_1 = 25, \omega_2 = 1$ 。优化算法中初始温度 $T = 10^\circ\text{C}$, 温度的降低系数为 0.9。

图 3 列举了仿真图像中建筑物的重建结果。表 1 列举了仿真图像中建筑物的真值以及本文给出的结果。可以看出,本文提出的方法对于建筑物的重建取得了较好的结果。

表 1 本文方法得到的重建结果以及参数真值对比

| 对比 | 参数值 | | | | | |
|-----------|-------|-------|-----|-----------------------|--------|--------|
| | W_x | W_y | H | α ($^\circ$) | C_x | C_y |
| 真值 | 45 | 41 | 33 | 37.1 | -13 | -38 |
| 本文方法得到的结果 | 44 | 39 | 35 | 36.9 | -14.24 | -36.94 |

在仿真图像的分辨率约为 1 m 的情况下,几何参数模型中各参数的误差为:角度的偏差是 0.54%,建筑物长度的误差是 2.2%,建筑物宽度的误差是 4.88%,建筑物高度的误差是 6.1%,建筑物 X 方向平移的误差是 9.5%,建筑物 Y 方向平移的误差是 2.79%。

图 4 展示了本文方法在遥感图像中的结果,图(a)表

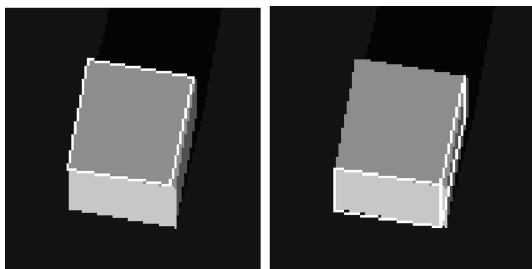
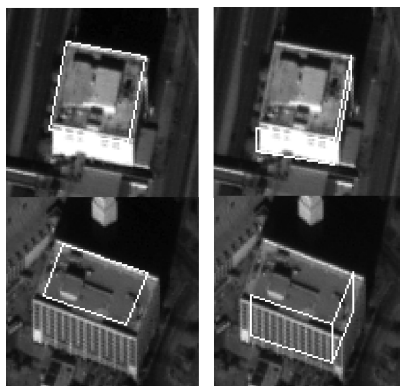
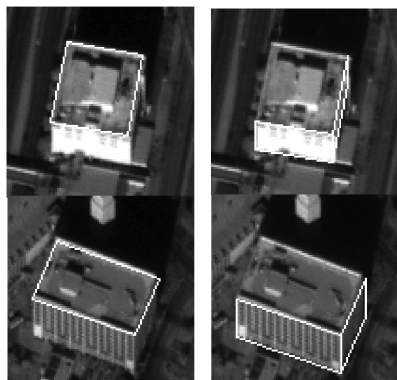


图3 仿真图像中建筑物的重建结果



(a) 不使用新转移核的重建结果



(b) 本文方法的重建结果

图4 遥感图像中建筑物重建结果

示不加新转移核的建筑物重建结果,图(b)表示本文方法的重建结果。可以看出,本文方法能够跳出局部最优。

4 结论

本文提出一种自顶向下的建筑物重建方法,用于单幅高分辨率遥感图像的建筑物三维重建。为了避免陷入局部最优,本文设计了适合实际情况的转移核函数。实验结果表明该方法能够更加准确地重建建筑物,重建结果要优于仅仅使用基本转移核的结果,并且由于使用了特殊的转移核,该方法能跳出局部最优,具有很好的鲁棒性。下一步的工作主要是使用一些底层特征确定某些参数的大致范围,加快收敛速度。

参考文献

- [1] IZADI M, SAEEDI P. Three-dimensional polygonal building model estimation from single satellite images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(6):2254-2272.
- [2] WANG J, YANG X, QIN X, et al. An efficient approach for automatic rectangular building extraction from very high resolution optical satellite imagery[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(3):487-491.
- [3] 陈辉, 马世伟, Andres Nuechter. 基于激光扫描和SFM的非同步点云三维重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):1148-1157.
- [4] HUANG J Y, COWAN B. Simple 3D reconstruction of single indoor image with perspective cues[C]. CRV 2009, Sixth Canadian Conference on Computer and Robot Vision, Kelowna; DBLP, 2009:140-147.
- [5] 吴斌, 孙显, 王宏琦, 等. 概率体素模型中建筑物精确三维结构提取[J]. 计算机工程, 2016, 42(10): 1-5.
- [6] HUANG H, BRENNER C, SESTER M. A generative statistical approach to automatic 3D building roof reconstruction from laser scanning data [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 79(5):29-43.
- [7] LAFARGE F, DESCOMBES X, ZERUBIA J, et al. Building reconstruction from a single DEM[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. DBLP, 2008:1-8.
- [8] MARTINO L, ELVIRA V, LUENGO D, et al. MC-MC-driven adaptive multiple importance sampling[M]. Berlin; Springer International Publishing, 2015:97-109.
- [9] JIMÉNEZ S, MARIETHOZ G, BRAUCHLER R, et al. Smart pilot points using reversible-jump Markov-chain Monte Carlo[J]. Water Resources Research, 2016, 52(5):3966-3983.
- [10] ORTNER M, DESCOMBES X, ZERUBIA J. Building outline extraction from digital elevation models using marked point processes[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 72(2):107-132.
- [11] MAYER H, REZNIK S. MCMC linked with implicit shape models and plane sweeping for 3D building façade interpretation in image sequence[J]. The International Archives of The Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2006, 36(3): 130-135.
- [12] LAFARGE F, GIMEL'FARB G, DESCOMBES X. Geometric feature extraction by a multimarked point process[J]. IEEE Transactions on Software Engi-

- neering, 2009, 32(9):1597-1609.
- [13] BRÉDIF M, TOURNAIRE O, VALLET B, et al. Extracting polygonal building footprints from digital surface models: a fully-automatic global optimization framework[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013, 77(3):57-65.
- [14] LAFARGE F, DESCOMBES X, ZERUBIA J, et al. Structural approach for building reconstruction from a single DSM[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2010, 32(1):135-147.
- [15] 周静雷,张智. 基于多尺度 Gabor 滤波器的彩色图像边缘检测[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(4): 49-52.
- [16] 周美丽,白宗文. 基于形状特征的图像检索系统的设
计[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(6): 82-84.
- [17] 李荣雨,程磊. 基于 SVM 最优决策面的决策树构造[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3): 342-351.
- [18] ZHANG X, AGAM G, CHEN X. Alignment of 3D building models with satellite images using extended chamfer matching[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, IEEE Computer Society, 2014:746-753.

作者简介

王陈园, 1987 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理, 计算机视觉等。

E-mail: wangchenyan123@126.com

(上接第 72 页)

- [9] SCHAEERLI Y, WOOTTON R C, ROBINSON T, et al. Continuous-flow polymerase chain reaction of single-copy DNA in microfluidic microdroplets[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(1):302-6.
- [10] WU W, LOAN K T, LEE N Y. Flow-through PCR on a 3D qiandu-shaped polydimethylsiloxane (PDMS) microdevice employing a single heater: toward microscale multiplex PCR[J]. *Analyst*, 2012, 137(9): 2069-76.
- [11] JIANG L, MANCUSO M, LU Z, et al. Solar thermal polymerase chain reaction for smartphone-assisted molecular diagnostics. [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(7):4137-4137.
- [12] HIROAKI T, MASATO S, SHOGO S, et al. On-chip quantitative detection of pathogen genes by autonomous microfluidic PCR platform [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2015, 74:725-730.
- [13] CHEN J J, LIAO M H, LI K T, et al. One-heater flow-through polymerase chain reaction device by heat pipes cooling [J]. *Biomicrofluidics*, 2015, 9(1): 014107.
- [14] SPOTO G E, OCCHIPINTI L G, DALL'OGGIO C, et al. Microfluidic pcr device[P]. US 20140038193-A1,2014.
- [15] ALAM M J, CAMERON D C. Optical and electrical properties of transparent conductive ITO thin films deposited by sol-gel process[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 377-378(1):455-459.
- [16] LEE J, MOON H, FOWLER J, et al. Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2002, 95(2-3):259-268.
- [17] VOGELSTEIN B. Digital PCR[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(16):9236-41.
- [18] 邓友,丁卫撑,陈浩峰. 基于传递函数法的 PT100 的高精度测温设计[J]. *电子测量技术*, 2015, 38(12): 92-95.

作者简介

牛嘉琦,2014 年于河南科技大学获得学士学位,2014 年至今于南京理工大学攻读硕士学位,主要研究方向为数字微流控,电润湿。

王伟强(通讯作者),2012 年于美国罗切斯特大学获得博士学位,现任南京理工大学机械工程学院副教授。研究方向为数字微流控极其生物检测应用。

E-mail:wangweiqiang@njust.edu.cn