

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.007

基于基本形状及其拓扑关系的点云建筑物重建方法

郝雯, 王映辉, 宁小娟

(西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文提出一种基于基本形状以及形状间拓扑关系的点云建筑物重建方法。首先, 基于每点的法向量以及点间的距离, 利用粗分割-细分割的策略对点云场景进行分割, 并利用高斯球的性质完成场景中平面点云的识别; 然后, 利用平面点云的法向量方向、面积等几何特征完成墙面点云的识别与提取; 接着, 通过“投影-极值点”的方法对单个平面进行重建, 并根据平面间的空间临近关系分析建筑物平面之间的拓扑关系, 根据拓扑关系对初始重建结果进行修正, 自动获得建筑物墙面的重建结果。结果表明, 该方法能够自动完成场景中建筑物墙面的重建。

关键词: 点云场景; 建筑物重建; 基本形状; 拓扑关系

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)03-0290-07

Reconstruction of building point clouds based on the primitive shape and topology relationship

HAO Wen, WANG Yinghui, NING Xiaojuan

(School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A comprehensive strategy is proposed to reconstruct a building based on the primitive shape and topological relationship. First, the scene point clouds are segmented using the rough-detail segmentation algorithm based on the normals and the distance between points. The planar clusters are extracted from the segments based on the properties of Gaussian sphere. Second, the walls belonging to the building are recognized and extracted based on the properties such as normal directions and areas. Then, each plane is reconstructed by finding the extreme points after projection. The topological relationships between the planes in the scene are analyzed based on the spatial proximity. The initial reconstructed results are refined based on the topological relationships between planes. The experimental results demonstrate that the building walls can be reconstructed by using our method.

Key words: scene point clouds; building reconstruction; primitive shape; topology relationship

城市场景与人类的生活息息相关, 随着近年来点云采集设备的普及, 利用地面激光扫描仪能够快速便捷地获取城市场景的点云数据。建筑物是城市的重要构成元素, 由于城市场景点云数据的海量性、不完整性以及易受噪声影响等, 针对城市场景点云中建筑物的重建仍然是一个具有挑战性的问题。为此, 本文以点云场景中的建筑物为研究对象, 探索大场景中建筑物的重建方法。

目前, 已经有很多学者提出了三维建筑物的重建方法, 这些方法可以大致分为: 自动重建方法^[1-3]

和基于先验知识的重建方法^[4-6]两类。通过外轮廓点连接完成平面的重建^[2]是自动重建方法中经常使用的策略, 该方法对于数据缺失或窗户紧邻墙面外轮廓的墙面, 会造成轮廓点提取不准确、分离内/外轮廓点困难, 从而导致重建效果不好; 基于先验知识的重建方法往往适用于特定结构的建筑物, 通用性不强。另外, 该类方法在重建过程中往往未考虑组成建筑物的形状信息以及形状间的拓扑关系。

经过观察可以发现, 现代建筑物可以看作是多个基本形状的组合体, 因此本文提出了一种基于基

收稿日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61602373, 61472319); 西安市碑林区科技基金资助项目(GX1615); 陕西省自然科学基金资助项目(2015JZ015)

作者简介: 郝雯, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为三维点云场景分割与重建。E-mail: haowensxf@163.com

本形状以及形状间拓扑关系的建筑物自动重建方法。该方法首先利用粗分割-细分割的策略完成点云场景的分割,利用高斯球提取场景中的平面点云;然后基于法向量的方向、平面面积、高度等微分几何特征完成建筑物平面点云的提取;接着,基于“投影-极值点”的计算方法对单个平面进行重建,并根据平面间的拓扑关系优化重建结果。

1 点云场景中建筑物墙面的提取

真实的城市场景中往往包含有丰富的对象,而建筑物是城市场景中的常见物体。本文首先基于粗分割-细分割策略完成点云场景的分割^[7],并根据建筑物的几何特征提取出场景中的墙面点云,为建筑物的重建奠定基础。

1.1 点云场景分割

首先,利用主成分分析法计算每点的法向量^[8]。对于点云数据中任一点 p_i ,找到其 k 个邻近数据点 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\} \subset \mathbf{R}^3$, p_i 的三阶协方差矩阵为:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T \quad (1)$$

式中, $\bar{p} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i$ 。

通过奇异值分解对矩阵 $\mathbf{M}$ 进行分解,得到三个特征值 $\lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1 > 0$,最小特征值 λ_1 所对应的特征向量 (n_x, n_y, n_z) 即为点 p_i 的法向量。

然后,将每点的法向量映射到高斯球上^[9],图 1(a)为点云场景 1,图 1(b)为将点云场景 1 每点法向量映射到高斯球上的效果图。

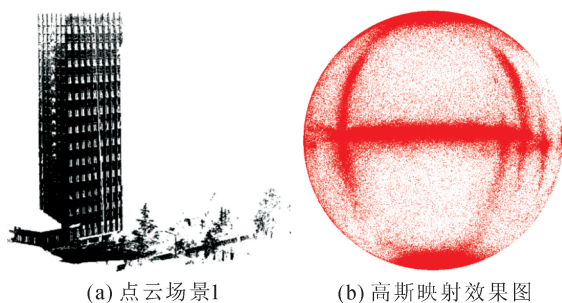


图 1 点云场景 1 法向量的高斯映射图

Fig. 1 Gaussian mapping of normals in scene point clouds 1

接着,利用 Mean shift 算法对高斯球上的点进行聚类,将具有相似法向量的点归为一类。与 k 均值算法相比,Mean shift 算法不需要事先设定分类的数目 k 。最后,根据点间的距离信息进行细分割,将重叠的平面点云簇单独分割出来,获得分割点云簇 $P_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

根据高斯球的性质可知:平面点云数据在高斯

映射后的点会聚集在一个小的区域内,计算点云簇 P_i 的高斯映射数据集 $G(P_i)$ 的方差:

$$\text{var}(G(P_i)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G(p_i) - \bar{c}_i)^2 \quad (2)$$

式中, $\bar{c}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(p_i)$ 。

如果方差 $\text{var}(G(P_i)) < \sigma$,表明该点云簇的法向量分布在一个较小的区域。在本文实验中, $\sigma = 0.2$ 。利用上述方法可以完成点云场景中平面点云簇的识别。

1.2 建筑物墙面提取

在真实场景中,地面往往是最低的。假设地面的法向量为 $\mathbf{n}_g (n_{gx}, n_{gy}, n_{gz})$,其中两个变量应接近于 0,另一个变量的绝对值应接近于 1。由于建筑物均竖立在地面上,墙面的法向量 $\mathbf{n}_w$ 应与地面法向量 $\mathbf{n}_g$ 垂直,即 $\mathbf{n}_w \cdot \mathbf{n}_g \approx 0$ 。另外,建筑物的墙面都有一定的高度,且面积较大,所以从分割后的平面点云簇中提取高度大于一定阈值且面积大于一定阈值的平面,完成点云场景中建筑物各个墙面的提取。

图 2 为利用上述算法从点云场景 1 中(图 1(a))提取的建筑物墙面。每一个墙面用不同的颜色进行标记。

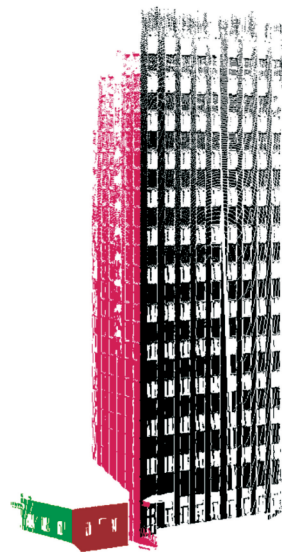


图 2 点云场景 1 中建筑物墙面的提取

Fig. 2 Extraction of building walls from scene point clouds 1

2 拓扑关系分析

本节将对面与面之间的拓扑关系进行分析。Egenhofer 将面与面之间的拓扑关系总结为 8 种:相离、相接、相叠、相等、包含、被包含、覆盖和被覆盖^[10]。由于激光扫描仪是利用激光测距的原理获得被测对象表面的三维坐标数据,对于相叠、相等的两个平面,得到的点云数据经过分割后会被当作一

个平面,所以本文不考虑面与面之间相叠、相等的情况。本节只对面与面之间相离、相接、包含/被包含、覆盖/被覆盖几种情况进行讨论。

1) 面与面相离。对于两个平面 I 和 II,尽管平面 I 和 II 不平行,在数学意义总会相交在一起,但是两面之间存在一定的距离,没有共同的点,在这里,认为平面 I 和 II 相离。

2) 面与面相接。本文通过点间的邻近关系判断平面间是否相连接。如图 3 所示, S_1 、 S_2 是分割后得到的平面点云。其中,棕色的为平面点云 S_1 ,黑色的为平面点云 S_2 , $p_i \in S_1$,即 p_i 是 S_1 中的一点。利用 $k-d$ 树寻找 p_i 点的 k 个邻近值,并设定阈值 r ,找出与 p_i 点距离小于 r 的点集,如果点集中包含有不同标记的点 $p_j, p_j \in S_2$,则认为 S_1 和 S_2 相连。设置一个 $n \times n$ 维的矩阵 W 来记录平面间的拓扑关系,矩阵元素定义为:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } S_i, S_j \text{ 连接} \\ 0 & \text{如果 } S_i, S_j \text{ 相离} \end{cases} \quad (3)$$

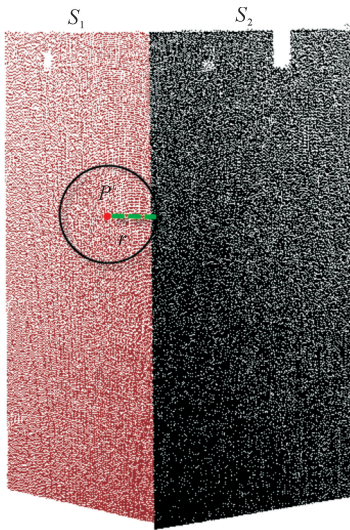


图 3 平面间连通性示意图

Fig. 3 Diagram of the connectivity between planes

图 3 中,平面点云 S_1 和 S_2 相连,则 $w_{12} = w_{21} = 1$ 。

图 4 展示了建筑物 1 中墙面之间的拓扑关系,可以看出,墙面 1 与墙面 4 相连,墙面 2 和墙面 3 相连。构成的拓扑关系矩阵为:

$$W = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}。其中, w_{14} = w_{41} = 1,$$

$w_{23} = w_{32} = 1$ 。用红色结点表示单个墙面,用绿色的线条表示两个墙面间的拓扑关系为相连。

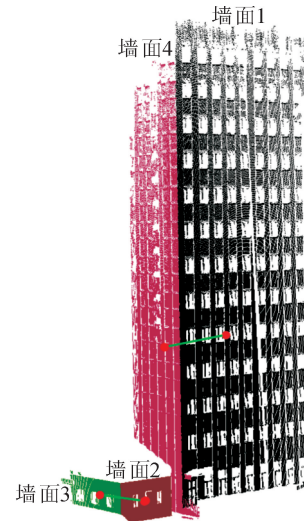


图 4 建筑物 1 墙面间拓扑关系表示

Fig. 4 Topology relationship between walls in building 1

3) 面与面包含/被包含。对于拓扑关系为包含/被包含的两个平面,计算每个平面的包围盒,通过判断一个平面中的点是否完全位于另一平面的包围盒内,决定两平面间的拓扑关系是否为包含/被包含或者覆盖/被覆盖。

在图 5 中,若根据连通性,墙面 B 和墙面 C 应该是相离的,但是通过计算墙面 B 的最小包围盒可以发现,墙面 C 的所有点位于墙面 B 的最小包围盒内。此时,墙面 B 和墙面 C 之间的拓扑关系应当是包含/被包含的关系。造成这一问题的主要原因是由于建筑物前物体的遮挡导致建筑物的墙面缺失严重,使得同一墙面被分裂成多个墙面。

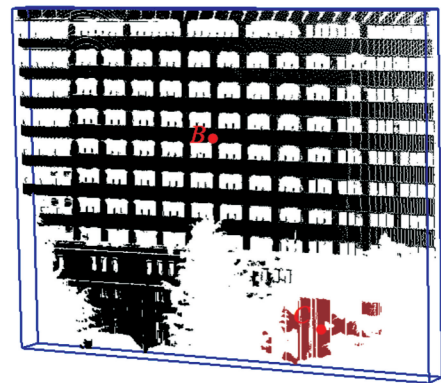


图 5 墙面 1 拓扑关系分析

Fig. 5 Topology analysis of wall 1

4) 面与面覆盖/被覆盖。如果墙面 C 中的点完全位于墙面 B 的最小包围盒内,且墙面 C 一侧(右侧/左侧)端点的 x 、 y 坐标值与墙面 B 一侧(右侧/左侧)端点的 x 、 y 的坐标值相同,则说明墙面 B 覆盖墙面 C,墙面 C 被墙面 B 覆盖。

3 建筑物重建

3.1 单个墙面重建

由于室外环境的复杂性,想要扫描得到每个建筑物完整的点云数据是非常困难的。根据建筑物的对称性以及规则性,本节提出“投影-极值点”的方法完成建筑物墙面的重建。通过计算平面点云簇中的极值点,得到构成平面的四个顶点坐标,然后依次连接四个顶点,完成平面的重建。

由于利用地面激光扫描仪得到的建筑物墙面大多与地面垂直,因此,将墙面点云投影到与地面平行的平面。但是由于扫描仪扫描时放置的角度不同,地面的法向量会有差异。对于地面法向量 $\mathbf{n}_g(n_{gx}, n_{gy}, n_{gz})$,如果 $n_{gx} \approx 0, n_{gy} \approx 0, |n_{gz}| \approx 1$,则将墙面点云投影到 xoy 平面;如果 $n_{gx} \approx 0, |n_{gy}| \approx 1, n_{gz} \approx 0$,则将墙面点云投影到 xoz 平面。否则将墙面点云投影到 yoz 平面。投影后找到二维投影点中的两个端点,然后分别寻找平面点中与两个端点二维坐标值相近的点,并记录其沿地面法向量方向最大的坐标值,同时找出平面中沿地面法向量方向最小的坐标值,从而确定构成平面的四个顶点的坐标。

在三维点云场景中,若地面的法向量中 $n_{gx} \approx 0, n_{gy} \approx 0, |n_{gz}| \approx 1$,此时,将墙面点云投影到 xoy 平面,然后分别寻找平面点中与两个端点 x, y 坐标值相近的点,记录其中最大的 z 值,再结合平面中最小的 z 值,确定四个顶点的坐标。

本节以地面的法向量中 $n_{gx} \approx 0, n_{gy} \approx 0, |n_{gz}| \approx 1$ 为例,介绍单个墙面的重建方法的具体步骤。

首先,找出每一个平面的坐标极值点,即具有最大和最小 x, y, z 坐标值的点,分别用 $P_{\max x}, P_{\min x}, P_{\max y}, P_{\min y}, P_{\max z}, P_{\min z}$ 表示,如图 6(a)所示。

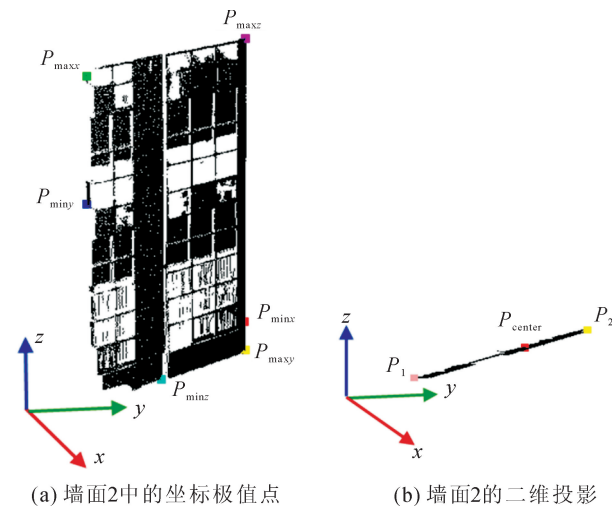


图 6 墙面 2 投影后的极值点

Fig. 6 Extreme points of wall 2 after projection

然后,计算构成平面四个顶点的坐标值。利用公式(4)计算平面点二维投影的中心点 P_{center} 。

$$\bar{x}_{\text{center}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j, \quad \bar{y}_{\text{center}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad (4)$$

式中, N 为墙面的总点数。 (x_j, y_j) 为墙面上每点二维投影的坐标。图 6(b) 是将平面上的点进行二维投影得到的结果。其中, P_{center} (红色) 是二维投影点的中心点。

设坐标极值点 $P_{\max x}, P_{\min x}, P_{\max y}$ 和 $P_{\min y}$ 的二维投影点依次为: $P'_{\max x}, P'_{\min x}, P'_{\max y}$ 和 $P'_{\min y}$ 。投影点的 x, y 坐标值与极值点相同,即 $P'_{\max x}.x = P_{\max x}.x$, $P'_{\max x}.y = P_{\max x}.y$, 其它投影点也是如此。

如果该平面与 x 轴平行,即 $P'_{\max y}.y = P'_{\min y}.y$ 。分别将 $P'_{\max x}, P'_{\min x}$ 的 x 坐标值与中心点 P_{center} 的 x 坐标值进行比较, x 坐标值大于 $P_{\text{center}}.x$ 的点位于墙面的一侧,即 $P_1.x = P'_{\max x}.x, P_1.y = P'_{\max x}.y$; x 坐标值小于 $P_{\text{center}}.x$ 的点位于墙面的另一侧,即 $P_2.x = P'_{\min x}.x, P_2.y = P'_{\min x}.y$ 。

如果该平面与 y 轴平行,即 $P'_{\max x}.x = P'_{\min x}.x$, 则投影后两端点的坐标值 $P_1.x = P'_{\max y}.x, P_1.y = P'_{\max y}.y$; $P_2.x = P'_{\min y}.x, P_2.y = P'_{\min y}.y$ 。

如果该平面既不与 x 轴平行也不与 y 轴平行,分别将 $P'_{\max x}, P'_{\min x}, P'_{\max y}$ 和 $P'_{\min y}$ 四个投影点的 x 坐标值与中心点 P_{center} 的 x 坐标值进行比较, x 坐标值小于 $P_{\text{center}}.x$ 的点位于墙面的一侧; x 坐标值大于 $P_{\text{center}}.x$ 的点位于墙面的另一侧。在图 6(a) 所示的墙面 1 中,可以看到, $P'_{\max x}$ 和 $P'_{\min y}$ 位于墙面的一侧, $P'_{\min x}$ 和 $P'_{\max y}$ 位于墙面的另一侧。

对于位于同一侧的坐标极值点,判断它们与中心点 P_{center} 的距离,距离最远的即为端点,如图 6(b) 中的粉色点和黄色点。将两个端点的 x, y 坐标分别赋给 P_1, P_2 。

一旦确定二维投影点的端点 P_1, P_2 , 寻找平面中与 P_1 的 x, y 坐标值相近的点,记录其中最大的 z 坐标值 $Z_{\max 1}$ 。同时,寻找平面中与 P_2 的 x, y 坐标值相近的点,记录最大的 z 坐标值 $Z_{\max 2}$ 。则该平面的四个顶点依次为 $(P_1.x, P_1.y, Z_{\max 1}), (P_1.x, P_1.y, P_{\min z}.z), (P_2.x, P_2.y, P_{\min z}.z), (P_2.x, P_2.y, Z_{\max 2})$ 。

若地面的法向量中 $|n_{gy}| \approx 1$, 则将墙面点云投影到 xoz 平面,然后分别寻找平面点中与两个端点 x, z 坐标值相近的点,记录其中最大的 y 值,再结合平面中最小的 y 值,确定四个顶点的坐标。当地面的法向量中 $|n_{gx}| \approx 1$, 其思想与上面的相同,在此不再赘述。

图 7 为利用投影-极值点方法对点云场景 1 中建筑物的重建结果。可以看出,墙面 1 和墙面 4 出现了交叉。



图 7 场景 1 建筑物初始重建模型

Fig. 7 Initial reconstruction result of building in scene point clouds 1

3.2 基于拓扑关系的结果优化

单个墙面进行重建后,本文根据墙面间的拓扑关系对重建结果进行修正。

1) 面与面相连。根据 3.1 节提出的投影-极值点方法可以对单个平面进行重建,对于拓扑关系为相交的两个平面,对两个平面分别进行拟合后,两者的相交部分可能会出现缝隙或者交叉,需要计算出两平面的相交点,对重建结果进行优化。

对于拓扑关系为相接的两个平面 I 和 II,通过计算两平面的交线以及相交的关键点,优化平面重建结果。

对于平面 I: $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$, 平面 II: $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$, 平面方程的系数 A_1, B_1, C_1, D_1 和 A_2, B_2, C_2, D_2 可以利用最小特征值对应的特征向量来求解得到。若两个平面相交,交线上某点的坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{(B_2C_1 - B_1C_2)z + (B_2D_1 - B_1D_2)}{A_2B_1 - A_1B_2} \\ y = \frac{(A_2C_1 - A_1C_2)z + (A_2D_1 - A_1D_2)}{A_1B_2 - A_2B_1} \\ z = z_0 \end{cases} \quad (5)$$

两个相交平面中的最大和最小的 z 值 $Z_{\max 1}$ 、 $P_{\min z_1} \cdot z$ 、 $Z_{\max 2}$ 、 $P_{\min z_2} \cdot z$ 可以计算得到,分别将公式(5)中的 z 赋值为平面 I 和 II 的最大和最小 z 值,即 $z = Z_{\max 1}$, $z = P_{\min z_1} \cdot z$, $z = Z_{\max 2}$, $z = P_{\min z_2} \cdot z$, 求出两

平面相交的关键点坐标。然后分别更新两个平面的一侧端点坐标,优化相交平面的重建结果。

另外,由于室外扫描环境的限制,墙面点云往往会有缺失,因此,在本文算法中,若一个墙面 S_i 仅与另外一个墙面 S_j 相邻,如果 S_i 与 S_j 高度相差较小(在本实验中,不高于墙面 S_i 高度的 $1/10$),则将两墙面的最上面两个端点的 z 值设置为 S_i 与 S_j 的最大 z 值,否则不做处理。同时,当两个相交墙面的最低点相差不大时,也将两个相交平面的底部对齐。在场景 1 中,墙面 4 仅与墙面 1 相连,且两者最高处相差不大,因此将墙面 4 的上面两个端点的 z 值调整的和墙面 1 相同。墙面 2 与墙面 3 底部相差不大,因此,将墙面 2 和墙面 3 的底部 z 值调整为一样。图 8 为基于墙面间的拓扑关系,对建筑物初始重建模型最终优化结果。



图 8 基于拓扑关系对重建结果进行优化

Fig. 8 Optimization of reconstruction results based on topological relation

2) 面与面包含/被包含。对于拓扑关系为包含/被包含的两个平面,只需要对较大的平面进行重建即可。图 9 为墙面 1 的重建结果。



图 9 墙面 1 的重建结果

Fig. 9 Reconstruction result of wall 1

3) 面与面覆盖/被覆盖。对于建筑物的重建结

果,无论平面 B 与平面 C 之间的关系是包含/被包含或者覆盖/被覆盖,最后的重建结果均是相同的。所以本文将包含/被包含、覆盖/被覆盖两种情况归纳为一类。

4 实验结果及分析

4.1 实验结果

图 10 为点云场景 2 中建筑物的重建结果,可以看出,本文的方法可以有效地将点云场景中的建筑物分解成多个平面,通过分析平面间的拓扑关系,完成建筑物墙面的重建。

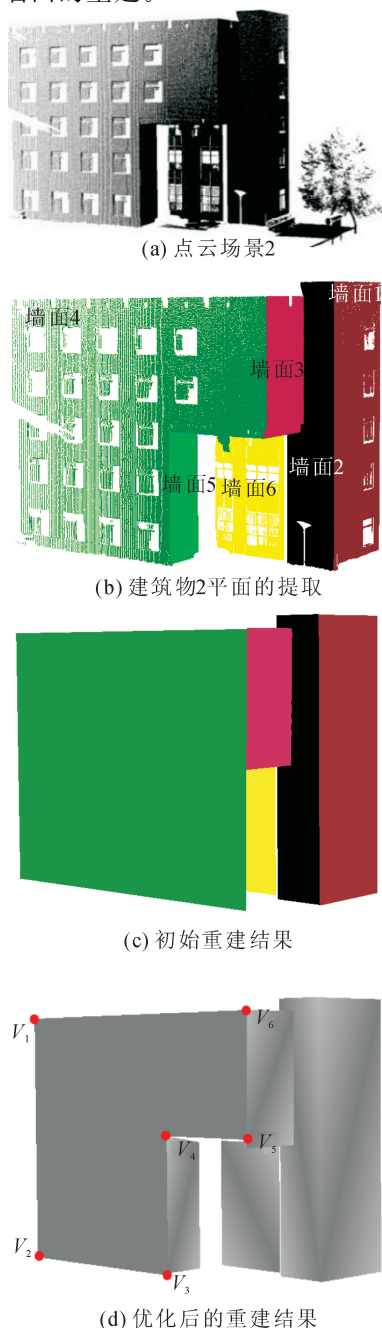


图 10 建筑物 2 墙面的重建与修正

Fig. 10 Reconstruction and refinement result of building 2

图 10(a)为点云场景 2,图 10(b)为利用本文方法提取得到的点云场景 2 中的建筑物平面,其中, $w_{12}=w_{21}=1, w_{23}=w_{32}=1, w_{34}=w_{43}=1, w_{45}=w_{54}=1$ 。图 10(c)为利用本文“投影-极值点”方法重建得到的建筑物平面,可以看出,墙面 4 的重建结果大于墙面本身,根据墙面 4 与墙面 3、墙面 5 间的拓扑关系,对重建结果进行修正。图 10(d)为修正后得到的重建模型,构成墙面 4 的端点为 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6$ 。

图 11(a)为点云场景 3,图 11(b)为利用本文方法提取得到的点云场景 3 中的建筑物平面,每个墙面用不同的颜色表示。

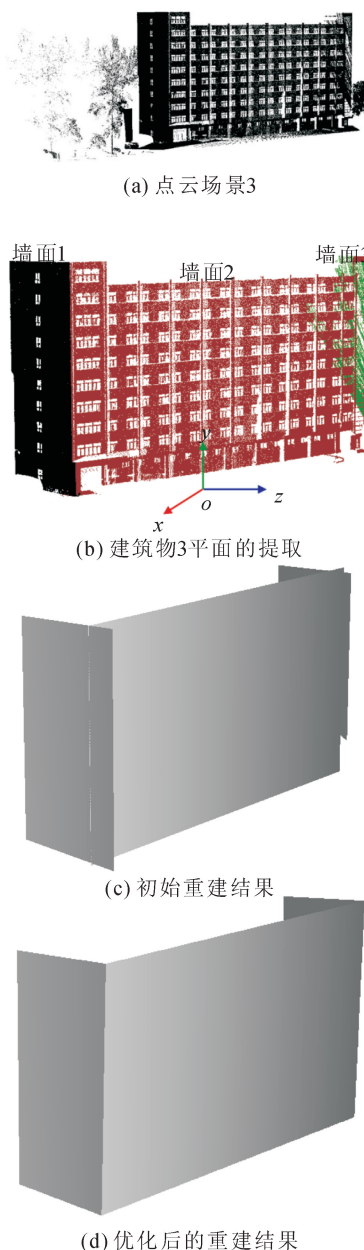


图 11 建筑物 3 墙面的重建与修正

Fig. 11 Reconstruction and refinement result of building 3

其中, $w_{12}=w_{21}=1, w_{23}=w_{32}=1$ 。在点云场景 3 中,其地面法向量 $n_{gx} \approx 0, |n_{gy}| \approx 1, n_{gz} \approx 0$,将墙

面点云投影到 xoz 平面。找出投影点中的两个端点,分别遍历平面点中与两个端点 x, z 坐标值相近的点,记录其中最大的 y 值,再结合平面中最小的 y 值,确定四个顶点的坐标。图 11(c) 为利用本文“投影-极值点”方法得到的初始建筑物重建模型。可以看出,相邻的两个墙面之间出现交叉。由于将点云场景 3 中的建筑物墙面投影到 xoz 平面,其交线上某点的坐标可以利用公式(6)求得。

$$\begin{cases} x = \frac{(C_1 D_2 - C_2 D_1) - (B_1 C_2 - B_2 C_1)y}{A_1 C_2 - A_2 C_1} \\ y = y_0 \\ z = \frac{(A_1 D_2 - A_2 D_1) - (A_2 B_1 - A_1 B_2)y}{A_2 C_1 - A_1 C_2} \end{cases} \quad (6)$$

将两个相交平面中的最大和最小的 y 值代入到公式(6)中,求出两平面相交的关键点坐标。更新两个平面的一侧端点坐标,优化相交平面的重建结果。图 11(d) 为修正后得到的重建模型。可以看出,利用本文方法可以较好地完成点云场景中墙面的重建。

4.2 算法对比

基于轮廓点的平面自动重建方法^[2],往往需要将轮廓点分为外轮廓点和内轮廓点,该方法对于扫描数据完整、窗户离墙面外轮廓较远的建筑物效果较好,却不适用于数据缺失严重或窗户紧邻墙面外轮廓的建筑物。图 12 为墙面 1 的轮廓点,可以看出,由于墙面数据缺失以及部分窗户离墙面外轮廓很近,很难将轮廓点区分为外/内轮廓点,因此难以利用基于轮廓点的平面重建方法对墙面 1 进行重建。对于这种缺失严重的数据,利用本文提出的“极值-投影点”方法可以快速对两个平面进行重建,并可以根据两平面间的拓扑关系,对初始重建结果进行优化,完成墙面 1 的重建,如图 9 所示。

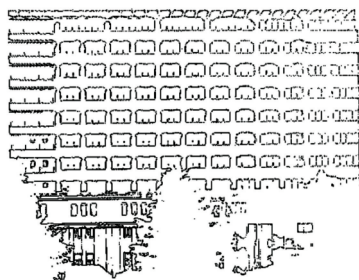


图 12 墙面 1 的轮廓点

Fig. 12 The boundary points of wall 1

5 结 语

本文提出了一种基于基本形状以及形状间拓扑关系的建筑物重建方法,该方法从原始的点云场景出发,通过点云场景建筑物提取、单个平面重建、基

于拓扑关系修正三步,完成了对大场景中建筑物的重建。实验结果表明,该方法可以有效避免由于点云数据缺失造成的重建效果不准确现象。同时,本文采用的基于“基本形状及形状间拓扑关系”的重建思路,可以为场景中通过形状组合,实现三维物体的识别提供借鉴。

目前,本论文只是讨论了由平面组成的建筑物,在今后的工作中,重建出由更多形状(圆柱、锥形等)组成的建筑物以及重建墙面上更多的细节特征是未来工作的主要关注点。

参考文献:

- [1] ARIKAN M, SCHWARZLER M, FLORY S, et al. O-snap: optimization-based snapping for modeling architecture [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, 32(1): 6.
- [2] NING X J, WANG Y H, ZHANG X P. Hierarchical model generation for architecture reconstruction using laser-scanned point clouds [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 061612.
- [3] WANG J, XU K. Shape detection from raw lidar data with subspace modeling [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 23(9): 2137-2150.
- [4] PU S, VOSELMAN G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(6): 575-584.
- [5] LI M, WONKA P, NAN L. Manhattan-world urban reconstruction from point clouds [C]// *Proceedings of European Conference on Computer Vision, Amsterdam, The Netherlands*, 2016: 54-69.
- [6] LI M, NAN L, LIU S. Fitting boxes to Manhattan scenes using linear integer programming [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(8): 806-817.
- [7] WANG Y H, HAO Wen, NING Xiaojuan, et al. Automatic segmentation of urban point clouds based on the Gaussian map [J]. *The Photogrammetric Record*, 2013, 28(144): 342-361.
- [8] PAULY M, GROSS M, Kobbelt L P. Efficient simplification of point-sampled surface [C]// *Proceedings of IEEE Visualization, Boston, Massachusetts*, 2002: 163-170.
- [9] 朱飞雪. 三维点云模型轮廓线的绘制 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
ZHU Feixue. To draw the silhouettes based on 3D points cloud model [D]. Ji'nan: Shandong University, 2008.
- [10] 霍林林. 复杂空间关系模型及空间描述逻辑中若干问题的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
HUO Linlin. Research on some problems of complex spatial relations models and spatial description logic [D]. Changchun: Jiling University, 2013.

(责任编辑 王卫勋)