引文格式：杨红刚,段旭哲,吴玄,等. 点云加权迭代线拟合室内平面图自动生成方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 20-23. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.005

点云加权迭代线拟合室内平面图自动生成方法

杨红刚[1]，段旭哲[2]，吴　玄[1]，胡庆武[2]
（1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063；2. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：提出了一种基于三维激光点云加权迭代线拟合的室内平面图自动生成方法，根据线特征对三维点云沿高程方向的投影点云进行分割，采用加权迭代直线拟合方法进行分段直线拟合，并进一步对拟合直线进行融合和轮廓补全，实现室内平面图的自动生成。基于手持SLAM系统获取的典型室内场景激光点云自动生成室内平面图，结果表明，该方法能有效抑制室内点云噪声，结构提取完整性可达94.4%，制图精度优于3 cm，可快速生成室内平面结构图。

关键词：室内激光点云；平面图；点云分割；加权迭代线拟合
中图分类号：P283　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0020-04

Indoor Layout Automatic Generation Method Based on Weighted Iterative Line Fitting with Point Cloud

YANG Honggang[1], DUAN Xuzhe[2], WU Xuan[1], HU Qingwu[2]
(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, we proposed an automatic generation method of indoor layout based on weighted iterative line fitting from 3D laser point cloud. We segmented the projection point cloud along the elevation direction according to the line features, and used the weighted iterative line fitting method to proceed segmented line fitting. Then, we further fused and completed the segmented fitting lines, realizing the automatic generation of indoor layout. The experimental results show that the proposed method can effectively suppress the indoor point cloud noise, the structural extraction integrity can reach 94.4% and the mapping accuracy is better than 3 cm, which can rapid generate indoor layout structure map.

Key words: indoor laser point cloud, layout, point cloud segmentation, weighted iterative line fitting

室内地图是房产测绘、装修设计和房屋维护的基础，也是室内定位、位置服务、机器人局部路径规划和安全应急等系列室内智能化服务的关键支撑。传统的房产测量、平面图数字化室内地图制作方法已不能满足当下需求[1-4]。随着移动激光扫描、激光SLAM技术的快速发展，基于LiDAR技术的背包式、手推车、手持式[5-7]室内三维激光扫描为室内地图制作提供了高密度三维激光点云，也带来了新的挑战。一方面，室内三维激光点云密度高、数据量大，数据处理软件对点云加载和处理的效率低；另一方面，室内场景结构复杂，遮挡噪声多，数据智能化处理困难。影响室内二维平面图绘制精度和效果的主要因素是墙面点云。墙面点云分割算法包括点距离法[8-9]、边连续法[10-11]和线追踪[12-13]等，但建立在全部点云上的分割算法均面临数据处理量大、效率低的问题。Hough变换作为经典的直线检测方法，在分割直线时若不能确定直线端点则会检测出虚假直线和额外画出对称直线[14]，且时间复杂度较大，难以识别较短直线[15]。本文考虑建筑物室内墙壁之间的空间结构特征，针对墙面点云分割和直线拟合问题，提出了一种基于分层切片点云加权迭代线拟合的室内平面图自动生成方法。

1　研究方法

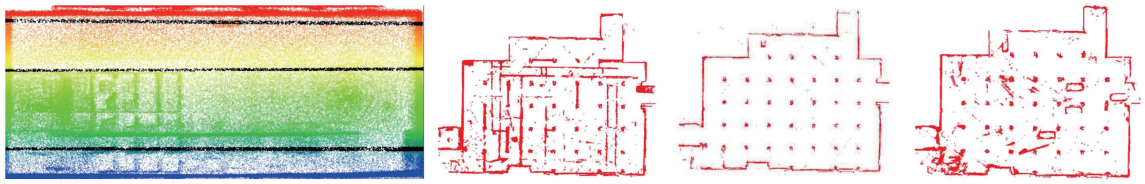
本文设计的建筑物室内激光点云平面图自动生成方法包括点云切片投影降维、墙面分割、直线拟合和分段融合补全等步骤。首先利用分层切片投影，沿高程方向将室内三维激光点云按照一定厚度切片并投影到平面上，得到表征室内平面结构的二维点云，大幅降低点云数量；然后根据建筑物结构特征聚类，从二维点云中分割出线特征墙面点云；再采用加权直线迭代拟合得到墙面分段线；最后进行分段融合和轮廓补

收稿日期：2022-07-25。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2021YFB2600401）。
第一作者简介：杨红刚（1978—），高级工程师，主要从事铁路勘测、工程测量技术研究与实践工作，E-mail：740794704@qq.com。

全，自动生成室内平面图。

1.1　点云切片投影

室内平面图可视为墙面在地板上的投影，通常在高程方向具有相同的截面。由于遮挡难以获取近地板部分的完整点云，因此本文根据建筑物结构截取房屋两个不同高度一定厚度的点云数据，将其投影至水平面，得到能够表征房屋结构的二维投影点云。选择一定厚度的切片是为了避免噪声或局部物体影响，本文按照3倍点云间隔设定切片厚度，确保3层以上截面点云投影。由图1可知，由于室内空间物体的摆放，不同高度的切片房屋轮廓清晰度不同，实际选择需根据房屋类型确定。



a 按不同高度截取点云　　b 上部切片点云　　c 中部切片点云　　d 下部切片点云

图1　点云分层切片投影

1.2　墙面线特征分割

室内平面图由墙面线段连接而成，根据墙面的线特征，可对二维投影点云进行分割，分离大量非墙面点云，得到仅包含墙面的点集，具体步骤为：①根据激光点原始扫描信息，按照统一的时间同步标签，从移动扫描轨迹中获取该点对应的扫描站点坐标；②离扫描站点过近或过远的点为墙面离群点，根据室内场景设置阈值，剔除墙面离群点；③将点集划分为若干个子集，根据线特征进行聚类，直至点到线段的最远距离小于对应阈值且相邻两点之间的最大距离小于对应阈值为止；④计算聚类分割的所有线特征点集的首末端点距离，若距离小于相应阈值或点集包含的点数小于相应阈值，则舍弃该点集；⑤得到按照墙面线特征分割的点集。

1.3　加权直线迭代拟合

墙面线特征点集的几何关系见图2。每个扫描点到待拟合直线的距离可表示为：

$$\delta_k = d_k^{\,i}\cos(\alpha-\phi_k^{\,i})-R \tag{1}$$

$$d_k^{\,i} = D_k^{\,i}+\varepsilon_d \tag{2}$$

$$\phi_k^{\,i} = \Phi_k^{\,i}+\varepsilon_\phi \tag{3}$$

式中，α、R为直线的极坐标参数；$d_k^{\,i}$、$\phi_k^{\,i}$分别为扫描点到坐标原点的距离和扫描点到坐标原点连线与水平方向的夹角；$D_k^{\,i}$、$\Phi_k^{\,i}$为其理论真值；ε_d、ε_ϕ为测量误差项，其方差分别为$\sigma_d^{\,2}$和$\sigma_\phi^{\,2}$。

根据式（1）迭代求解R和α，直至当前R和α与上一次估计的R和α之差小于阈值为止。该方法可对每个点集进行直线拟合，将每个点集的始末端点投影到拟合出的直线上，再对直线进行截取，即可获得相应拟合线段。

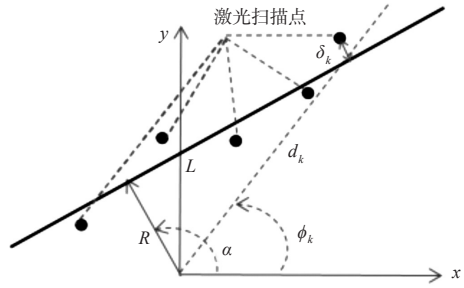


图2　待拟合直线几何表示及其误差形式

1.4　线段融合与轮廓补全

加权拟合方法获得的线段存在由同一组扫描信息提取或线段间距离过近的问题，需对这些线段进行融合。本文采用卡方分布[16-17]进行线段融合，再根据墙面空间特征进行轮廓补全。

1.4.1　卡方分布线段融合

对检测出的线段进行两两组合，计算其协方差矩阵，利用卡方检验方法确定两条线之间的差异是否在3倍方差阈值内，进而判断这两条线是否需要被融合。其计算公式为：

$$\chi^2 = (\boldsymbol{\delta L})^{\mathrm{T}}(P_{L_1}^{i}+P_{L_2}^{i})^{-1}\boldsymbol{\delta L} < 3 \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\delta L} = \begin{bmatrix} R_1^i - R_2^i \\ \alpha_1^i - \alpha_2^i \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{\delta L}$为两条线之间的差异。

重新计算需融合线段的始末端点，生成新的线段来替代原始线段。对所有线段进行卡方检测，即可得到最终的墙面直线检测结果。

1.4.2　边界轮廓补全

激光雷达扫描受扫描角度和场景限制，无法覆盖全部场景，提取的场景边界线段往往不完整，需进行

边界延伸和补全。本文对提取的直线段进行延长求交，以实现边界轮廓补全。对于近似垂直线段，延长求交可得到完整轮廓；对于近似平行线段，延长求交将存在交点超出场景范围的情况，无法得到正确轮廓，因此可根据相邻两条线段夹角来采取不同轮廓补全策略（图3）。其具体步骤为：

1）计算两条线段的夹角。不考虑起始点顺序，夹角范围为[0°,90°]，以45°为分割阈值来判断它们之间的几何关系。

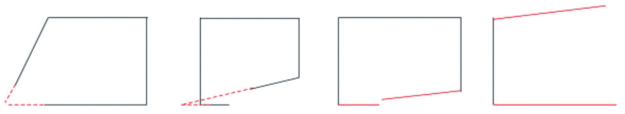
2）若两条线段夹角在[45°,90°]范围内，则认为两条线段近似垂直，其交点为：

$$x=\frac{b_2-b_1}{k_1-k_2},\quad y=\frac{k_2(b_2-b_1)}{k_1-k_2}+b_2 \tag{6}$$

式中，k_1、k_2为两条线段所在直线的斜率；b_1、b_2为所在直线的截距。

求得两线段延长交点后，即可将交点坐标赋给两条线段始末端点，实现轮廓补全。

3）若两条线段夹角在[0°,45°]范围内，则认为两条线段近似平行。近似平行的相邻线段又可分为位于异侧和位于同侧两种情况，前者可不做处理，后者可根据最邻近两点距离判断是否闭合。本文以0.5 m为距离阈值，若最邻近两点水平距离和竖直距离均小于阈值，求取坐标均值填补缺口，使轮廓闭合；反之，则判断该部分为门、窗灯，无需闭合补全。



a 垂直相交 b 平行相交 c 同侧近似平行 d 异侧近似平行

图3 分段直线关系

2 实验结果与分析

本文采用GeoSLAM ZEB-REVO手持移动扫描系统[18-19]采集室内三维数据。该系统集成了HOKUYO单线激光雷达传感器和MEMS，采用SLAM技术实现室内三维建图。

2.1 数据采集和实验结果

实验采用GeoSLAM获取酒店大堂、厂房工作间等多个典型场景的室内三维激光点云数据（图4）；在Intel Core i7 3Ghz处理器、32 G内存的计算机上对本文提出的方法进行验证。对原始点云进行点云切片投影，效果见图5，切片效果较好，能清晰反映房屋结构轮廓。利用加权直线迭代拟合方法和边界轮廓融合补全方法，对上述切片点云进行线追踪拟合，并根据相交、平行、简化等规则完善线段，获得该场景的平面边界图（图6），所提线段基本能完全覆盖房屋轮廓。

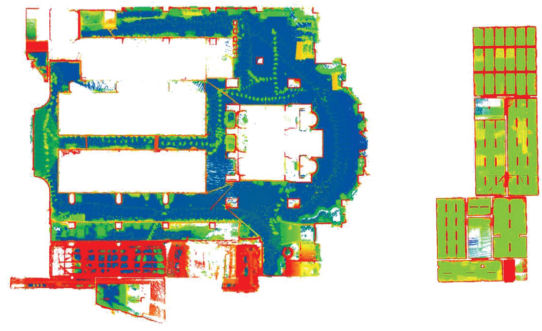


图4 手持移动扫描仪获得的场景点云

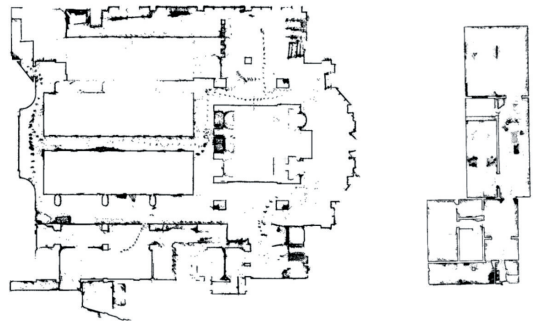


图5 场景点云切片投影结果



图6 切片点云边界线提取效果

2.2 墙面边界线段提取率

不同长度的直线分割难度不同，按照长度将室内墙壁点云分为(5,15]cm、(15,25]cm、(25,35]cm和>35 cm 4类，分析本文方法处理后的直线识别准确率，结果见表1，准确率是自动分割算法中正确分割直线数量与手动分割点云直线数量之比，可以看出，该方法提取和分割直线的效果较好。

表1 不同长度的直线识别准确率

墙壁长度/cm	墙壁数量	正确识别数量	准确率/%
(5,15]	18	17	94.4
(15,25]	19	19	100
(25,35]	25	25	100
>35	28	28	100

2.3　室内平面图制图精度

室内墙壁拐角点的点位精度能反映室内平面图的准确性。以厂房场景为例，真实墙壁的拐角点有8个，由本文方法获取的点云投影中拐角点有8个。将本文方法获取的墙壁拐角点 (X_f, Y_f) 与基于点云数据人工选取角点后经编辑直角化制图得到的点位坐标 (X_p, Y_p) 进行对比，结果见表2，可以看出，采用本文方法的平面图点位中误差为0.024 m，满足室内平面图制图要求。

表2　室内平面图制图精度统计/m

角点号	室内制图结果		本文方法		误差		
	x	y	x	y	Δx	Δy	Δp
1	426 429.535	418 859.724	426 429.560	418 859.730	0.025	0.006	0.026
2	4264 29.535	431 160.879	426 429.560	431 160.865	0.025	−0.014	0.029
3	420 698.221	431 160.879	420 698.209	431 160.865	−0.012	−0.014	0.018
4	420 698.221	455 649.809	420 698.209	455 649.791	−0.012	−0.018	0.022
5	411 412.093	455 649.809	411 412.112	455 649.791	0.019	−0.018	0.026
6	411 412.093	431 086.054	411 412.112	431 086.039	0.019	−0.015	0.024
7	413 209.597	431 086.054	413 209.581	431 086.039	−0.016	−0.015	0.022
8	413 209.597	418 866.974	413 209.581	418 866.992	−0.016	0.018	0.024

注：Δx 的中误差为0.019 m，Δy 的中误差为0.013 m，Δp 的中误差为0.024 m。

3　结　语

室内空间开发利用和智慧运营管理对室内地图具有广泛的应用需求，本文提出了一种基于激光点云的室内平面图自动生成方法，通过对三维激光点云进行分层切片投影降低数据量，然后利用一种加权直线迭代拟合方法实现了墙面边界线段的准确提取，再通过线段融合和轮廓补全，实现了室内平面图的自动生成。实验结果表明，本文方法能稳健、快速、准确地从室内扫描点云中提取墙面边界线，在室内地图制作方面具有广泛的应用前景。然而，仍需进一步考虑门、窗、楼梯等室内附属设施的提取，为室内精细化制图提供支撑。

参考文献

[1] 周婷婷. 室内电子地图制作技术方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2017,40(11):185-187

[2] 胡宇楠,陶永亮,胡晓明,等. 单人背包式三维全景技术在室内虚拟三维场景中的应用[J]. 测绘通报,2015(9):68-71

[3] 孙卫新,张锦明,王光霞,等. 室内地图空间数据矢量化采集方法研究[J]. 测绘科学技术学报,2016,33(2):191-195

[4] 湛逸飞,杨必胜. 基于LiDAR点云法向量稳健估计的室内平面图自动生成方法[J]. 地理信息世界,2017,24(1):92-96

[5] 胡博,危双丰,严强,等. 推车SLAM室内实景三维测图及应用[J]. 测绘通报,2019(1):39-43

[6] 闫利,单瑾,谢洪,等. 一种面向室内模型结构化重建的模型匹配方法[J]. 地理空间信息,2020,18(9):15-19

[7] 刘涛. 视觉信息辅助的室内建图与行人导航方法研究[J]. 测绘学报,2019,48(6):804

[8] 胡伟,卢小平,李理,等. 基于改进RANSAC算法的屋顶激光点云面片分割方法[J]. 测绘通报,2012(11):31-34

[9] 魏巍,陈铭泉,罗炜. 一种快速欧式距离点云分割方法:CN110490893A[P]. 2019

[10] 介维,张京军,高瑞贞. 基于区域增长方法的点云分割[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(5):899-903

[11] 方莉娜. 车载激光点云中道路环境几何特征提取[D]. 武汉:武汉大学,2014

[12] 蔡来良,宋德云,胡青峰,等. 自动绘制室内平面图的点云向量追踪算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(9):1 404-1 411

[13] 陈华伟,袁小翠,吴禄慎,等. 基于曲率突变分析的点云特征线自动提取[J]. 光学精密工程,2019,27(5):1 218-1 228

[14] 田朋举,梅文胜,花向红,等. 一种基于点云数据快速生成建筑物断面图的方法[J]. 测绘地理信息,2020,45(4):88-92

[15] Talib M L, Ramli S. A Review of Multiple Edge Detection in Road Lane Detection Using Improved Hough Transform [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1 125: 541-545

[16] Canal L. A Normal Approximation for the Chi-square Distribution-science Direct[J]. Computational Statistics and Data Analysis,2005,48(4):803-808

[17] 丁海勇,史文中. 利用卡方分布改进N-FINDR端元提取算法[J]. 遥感学报,2013,17(1):122-137

[18] 檀继猛,张鹏飞,邵士成,等. 移动式三维激光扫描仪在地下管廊测量中的应用[J]. 测绘通报,2019(12):156-158

[19] 马骏,徐帅,戴星航,等. 基于GeoSLAM的矿山生产环境快速虚拟重构研究[J]. 金属矿山,2021(2):161-166