

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0058-06

条件随机抽样一致性稳健平面拟合方法

张绍安, 陈 龙

(中铁上海工程局集团第五工程有限公司, 广西 南宁 530104)

摘要:传统稳健特征值平面拟合方法以固定倍率的距离标准差作为距离阈值,在处理复杂点云时自适应性不足;且由于随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法初始采样点的随机性,无法避免初始平面位置不合理的情况。针对上述问题,从“阈值动态调整”和“随机采样条件”两个方面进行改进,提出条件随机抽样一致性稳健平面拟合方法。对比实验结果表明,“阈值动态调整”改进方法相较于特征值法和传统稳健特征值法精度上分别提升了约59.8%和17.9%。同时“随机采样条件”在一定程度上减轻了距离标准差倍率调节的计算负担。且该方法对于异常值密集且不均匀的坑槽数据依然保持良好的识别效果,其IoU值比特征值法和传统稳健特征值法分别提高了约20.4%和55.4%,验证了方法的鲁棒性和实用性。

关键词:三维激光点云;平面拟合;随机抽样一致性;稳健特征值法;改进阈值动态调整

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0058-06

Robust plane fitting method based on conditional random sample consensus

ZHANG Shaoan, CHEN Long

(China Railway Shanghai Engineering Group No. 5 Engineering Co., Ltd., Nanning 530104, Guangxi, China)

Abstract: The traditional robust eigenvalue plane fitting method uses a fixed multiplicity of distance standard deviation as the distance threshold, which is not adaptive enough when dealing with complex point clouds. And due to the randomness of the initial sampling points of the random sample consensus (RANSAC) algorithm, it is impossible to avoid the situation that the initial plane position is unreasonable. In order to address the above problems, this paper proposes a robust plane fitting method with conditional random sample consensus by improving the “threshold dynamic adjustment” and “random sampling conditions”. Comparative experimental results show that the improved method of “threshold dynamic adjustment” improves the accuracy by about 59.8% and 17.9% compared with the eigenvalue method and the traditional robust eigenvalue method, respectively. Meanwhile, the “random sampling condition” reduces the computational burden of distance standard deviation multiplier adjustment to a certain extent. Moreover, the method in this paper still maintains good recognition effect for the pothole data with dense and uneven outliers, and its IoU value is improved by about 20.4% and 55.4% compared with that of the eigenvalue method and the traditional robust eigenvalue method, which further verifies the robustness and practicability of the method.

Keywords: three-dimensional laser point cloud; plane fitting; RANSAC; robust eigenvalue method; improvement of threshold dynamic adjustment

随着三维激光扫描技术的不断进步,点云数据在精细表达物体几何形态方面展现出极大优势^[1]。实际应用中,点云中通常包含大量具有规则性的平面结构,如地面、墙体及屋顶等。为了更有效地利用这些结构特征,亟需通过平面拟合^[2-3]方法对点云中的平面区域进行准确建模。平面拟合能够以最优平面替代离散点集,提升数据表达的简洁性与精度,其在点云配准^[4-6]、三维重建^[7-8]、构筑物质量检测^[9]等任务中发挥着基础性作用。因此,高效且鲁棒的平面拟合方法研究对于推动三维点云处理技术的发展具有重要意义。

由于仪器精度和复杂环境影响,点云数据难免会存在远离点云主体的异常值。传统的平面拟合方法,如最小二乘

法^[10]和特征值法^[11],忽略了这些异常值,而对拟合平面直接进行计算,这可能会导致精度的下降,不具有稳健型^[12]。随机抽样一致性(RANSAC)^[13-14]是一种用于从包含异常值的观测数据中估计最优数学模型参数的方法。与传统方法不同,RANSAC不使用全部数据来获取初始解,而是随机抽取最少样本子集来拟合初始模型,并在多次迭代中逐步完善模型,能够有效抵抗异常值,适用于点云数据处理^[15]。孔利等^[16]提出了一种稳健平面拟合方法,首先对带有异常值的点云利用RANSAC算法提取内点,然后结合特征值法进行平面拟合,有效地去除了异常值。童子良等^[17]借助RANSAC算法剔除异常值,并通过主成分分析法(principal component analysis, PCA)对拟合平面进行求解,得到了具有鲁棒性和适应性的平

收稿日期:2025-04-20;录用日期:2025-05-16

基金项目:中铁上海工程局集团第五工程有限公司科技研发项目(CRECYXGS-技术-2024-001、SHW-2024-引导-04)

作者简介:张绍安(1992—),男,工程师,研究方向:道路与桥梁工程。

通信作者:陈 龙(1999—),男,助理工程师,研究方向:道路与桥梁工程。

引用本文:张绍安,陈龙. 条件随机抽样一致性稳健平面拟合方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(4):58-63. (ZHANG Shaoan, CHEN Long. Robust plane fitting method based on conditional random sample consensus[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(4):58-63.)

面拟合方法。由于内点的判定取决于距离阈值的选取,阈值过高会导致异常值被误判为内点,阈值过低则会去噪过度^[18]。因此,上述文献采用所有点到初始平面的距离标准差的两倍来确定阈值,但在处理复杂的大体量点云数据时,仍可能导致上述问题,自适应性不足。在随机选取初始平面时,可能会出现与点云平面夹角较大的情况。这种显然不合理的情况仍然进行了完整的迭代,这可能会降低算法的整体效率。同时,RANSAC算法是一种非确定性算法,通过随机选取样本点来估计模型参数,并在一定概率下得出合理的模型结果。该算法的迭代次数对最终拟合结果的准确性有重要影响。若迭代次数设置得太少,算法可能无法找到足够的内点,从而无法保证结果的最优性^[19]。张中岳等^[20]结合随机采样一致性和距离加权最小二乘法(weighted total least squares based distances, WTLS),提出了RANSAC-WTSLD算法。通过初步拟合和平面参数的迭代优化,该算法有效提升了点云数据的平面拟合精度,尤其在小规模点云数据上表现显著。Ye等^[21]围绕RANSAC算法在含噪点云数据平面拟合中存在的效果不佳与误识别问题,提出通过基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)改变其初始点选择策略,并用主成分分析法(principal component analysis, PCA)计算点云各点法向量,以点到平面距离和法向量夹角作为内点判定准则,提高了平面拟合准确性和可靠性。但该方法需要人为设置法向量夹角阈值以及点到平面距离阈值,比较依赖人工经验,缺乏自适应性,限制了算法在不同场景下的通用性。

综上所述,传统的RANSAC算法在处理点云中的异常值时表现出色,但在阈值选择方面缺乏对复杂点云的自适应性。此外,由于其采样结果的随机性,传统RANSAC算法难以避免不合理的迭代次数,需要大量的迭代来确保平面拟合的精度,降低了算法的效率。因此,本文将结合RANSAC算法和特征值法^[22],提出一种基于动态阈值和随机采样条件改进的稳健平面拟合方法。

1 条件随机抽样一致性方法

1.1 稳健特征值法

稳健特征值法^[23]需要在原始点云中随机选取3个点拟合初始平面,并用点到初始平面的距离标准差的两倍自动选取距离阈值,以此判定内、外点。经过多次迭代,实现最优点云模型的选定。最后通过特征值法进行最优平面参数求解,具体步骤如下。

1) 初始化: 初始化最大迭代次数 M 和点数阈值 t 。

2) 求解初始平面: 在原始点云集 $\Omega = \{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 中随机选取3个不共线的样本点, 计算其对应初始平面为

$$P = ax + by + cz + d \quad (1)$$

3) 设定距离阈值 ε : 计算点云集 Ω 中所有点到初始平面 P 的欧氏距离 D_i , 如式(2)所示。然后计算其距离标准差 σ , 如式(3)所示。令距离阈值 $\varepsilon = 2\sigma$ 。

$$D_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

4) 判定内、外点: 将每个点的 D_i 与距离阈值 ε 进行对比, 当 $D_i < \varepsilon$ 时, 判定该点为内点, 反之则为外点。并记录内点数 N , 若 $N > t$, 则记下该内点集; 若 $N < t$, 则舍弃该次迭代。

5) 选取最优内点集: 经过 M 次迭代后, 在记录下的内点集中选择点数最多的作为最优内点集 $\phi = \{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, \dots, N\}$ 。

6) 求解拟合平面参数: 通过特征值法^[24]求解最优内点集 ϕ 对应平面参数 a, b, c, d 。

稳健特征值法在保留了RANSAC算法对异常值的鲁棒性的同时, 利用特征值法进一步提高了平面参数估计的准确度。

1.2 改进的稳健平面拟合方法

虽然传统稳健特征值法通过两倍距离标准差自动选取距离阈值, 但当初始平面与点云平面夹角较大时, 距离标准差会随之增加, 这可能导致距离较近的异常值无法被剔除。在这种情况下得到的内点集可能因其内点数较多而被选定为最优内点集, 从而影响最终平面拟合的效果。此外, 当整个流程中存在过多不合理的迭代时, 算法的整体效率可能会降低。本文将在“随机采样条件”和“距离阈值动态调整”两个方面对算法进行改进, 并用更直观的内点期望占比 η 代替点数阈值 t , 其中 $\eta = \text{内点数} / \text{总点数}$, 若当前迭代内点占比 $T \geq \eta$, 则保留该内点集, 反之舍弃。

1.2.1 随机采样条件

当点云的离散程度较高且3个初始样本点的位置较为集中时, 初始平面与点云平面之间的夹角很可能较大, 这显然无法得到理想的内点集, 如图1所示。为了减少这种情况, 初始样本点的间距应尽可能大, 以使初始平面与点云平面之间的夹角尽可能小。因此, 本文将初始样本点所围成三角形的面积(s)作为判断因子, 以评估此次随机采样的合理性。

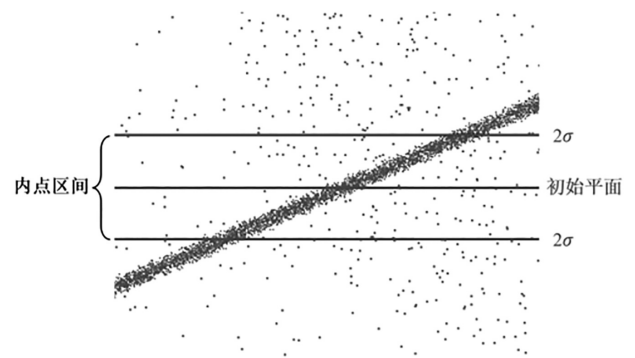


图1 不合理的初始平面位置

Fig. 1 Unreasonable initial plane positions

在开始迭代之前,求得原始点云 x, y, z 坐标的最大值和最小值,生成最小外接六面体将其包围。取该六面体面积最大的一个面,其面积记为 S 。

在选取初始样本点时,计算三点围成三角形的面积,记为 s 。若 $s \geq mS$,则继续本次迭代;若 $s < mS$,则重新选取样本点,其中 m 为最大面积的倍率,其值可根据点云实际情况自行调整。

1.2.2 距离阈值动态调整

用距离标准差的 $k(0 < k \leq 2)$ 倍代替原来的两倍,如式(4)所示。初始化 $k = 0.1$,当内点占比小于期望占比时,自动增加 k 值大小,步长为0.1,直至内点占比大于期望占比。若 $k = 2$ 时,仍不能达到期望占比,则舍弃该次迭代。改进后的稳健平面拟合方法完整流程如图2所示。

$$\varepsilon = k \cdot \sigma \quad (4)$$

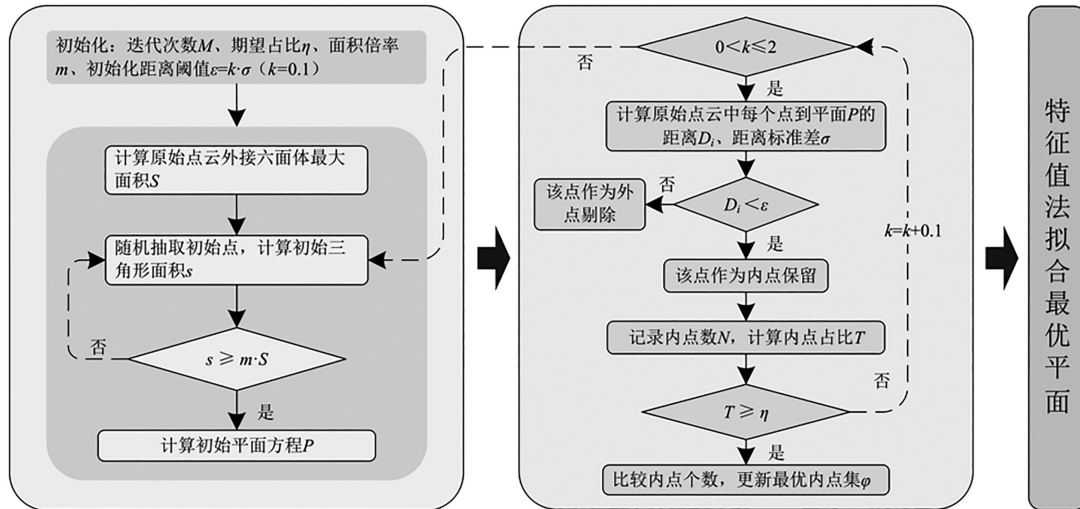


图2 改进方法流程图

Fig. 2 Flowchart of the improved method

2 实验与结果分析

2.1 仿真对比实验

为了验证改进方法的稳健性,本文采用模拟数据进行仿真对比实验。模拟数据的制作过程包括以下步骤:假定一个拟合平面方程;在该平面上随机生成点云数据,并对这些点添加随机误差;增加一定数量的异常值。实验通过特征值法、稳健特征值法以及本文方法分别对模拟数据进行拟合平面参数的求解。最后,从平面拟合精度和算法效率两个方面对实验结果进行分析与评价。

2.1.1 模拟数据制备

假设要拟合的平面为

$$P_0 = x + 2y + 3z + 4 \quad (5)$$

在该平面上随机抽取10 000个点,其 x, y 的值在 $[-5 000, 5 000]$ 内浮动。随后将这些点按照式(6)添加随机误差。

$$\begin{cases} x = x_i + \delta_x \\ y = y_i + \delta_y \\ z = z_i + \delta_z \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 分别为 x, y, z 上的随机误差,其取值为 $[-\delta, \delta]$,本文取 $\delta = 2$ 。随机误差添加结果如图3所示。

2.1.2 仿真对比实验及结果分析

在随机误差点云的基础上添加1 000个异常值,如图4所示。将含有异常值的随机误差点云分别通过特征值法、稳健特征值法以及本文方法进行平面拟合。各方法相

关参数设置如下(特征值法无需参数设置)。



图3 随机误差点云

Fig. 3 Random error point cloud

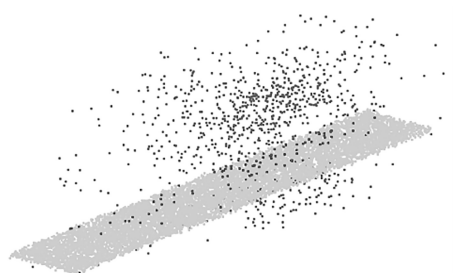


图4 含有异常值的随机误差点云

Fig. 4 Random error point cloud with outliers

稳健特征值法:初始化最大迭代次数 $M = 500$;距离阈值 $\varepsilon = 2\sigma$;内点期望占比 $\eta = 80\%$ 。

本文方法:初始化最大迭代次数 $M = 500$;距离阈值 $\varepsilon = k\sigma(0 < k \leq 2)$; k 值增加步长为0.1;最大面积倍率 $m = 1/6$;内点期望占比 $\eta = 80\%$ 。

最终以 $ax + by + cz + d = 0$ 的形式输出平面参数。为了体现平面拟合效果,还需以随机误差点云为基础,求得距离标准差 σ 作为评定标准。输出结果如表1所示。3种方法的平面拟合结果如图5所示。

表 1 拟合平面参数及精度

Tab. 1 Fitted plane parameters and accuracy

方法	a	b	c	d	σ
特征值法	0.268 773	0.542 796	0.795 697	-2.970 069	1.628
稳健特征值法	0.270 259	0.535 592	0.800 064	1.688 558	0.797
本文方法	0.267 484	0.534 556	0.801 687	1.064 814	0.654

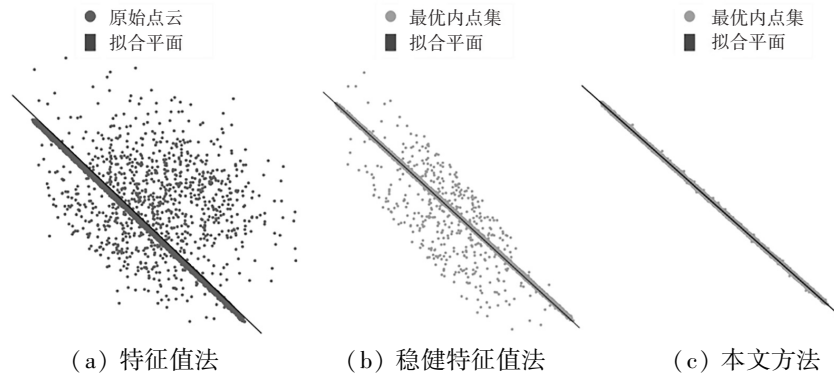


图 5 平面拟合结果侧视图

Fig. 5 Side view of the plane fitting results

根据表 1, 本文提出的条件随机抽样一致性稳健平面拟合方法在精度上相较于特征值法和稳健特征值法分别提高了 59.8% 和 17.9%。结合图 5, 特征值法由于没有去噪功能, 直接对原始点云进行拟合, 其拟合平面受到异常值较多一侧的“牵引”, 最终导致距离标准差过大, 拟合效果差。稳健特征值法虽然平面拟合效果较好, 但由于其固定的标准差倍率, 使得距离点云主体较近的异常值无法去除, 从而影响了拟合精度。相比之下, 本文方法在拟合精度和去噪能力方面均明显优于其他方法, 具有更强的稳健性。

基于“距离阈值动态调整”的改进虽然能够增强算法

的去噪能力, 但其每次迭代都需要对 k 值进行调整, 且每调整一次都要进行一次内、外点的区分, 增加了算法的计算量。因此, 本文在此基础上使用初始三角形面积 (s) 作为随机采样条件, 判断此次随机采样的合理性, 从而减少不必要的迭代次数, 提升算法效率。本次实验将对比稳健特征值法 (A)、动态阈值改进方法 (B)、动态阈值和随机采样条件改进方法 (C) 在相同的迭代次数下的运算效率。

采用相同的模拟数据, 在不同的迭代次数 M 下分别运行上述 3 种方法 20 次, 最后输出最大内点占比、满足阈值条件的迭代次数、距离标准差和运行时长这 3 个参数的平均值, 输出结果如表 2 所示。

表 2 不同迭代次数下的平面拟合结果均值

Tab. 2 Mean of fitted plane results with different iteration counts

M	最大内点占比			满足条件的迭代次数			距离标准差 $\bar{\sigma}$			运行时长/s		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
10	0.948	0.910	0.910	8	8	9	0.674	0.655	0.655	0.21	1.26	0.86
30	0.948	0.912	0.913	24	23	26	0.683	0.655	0.655	0.54	4.04	2.66
50	0.948	0.913	0.913	38	39	42	0.704	0.655	0.655	0.86	6.46	4.52
100	0.948	0.913	0.913	79	78	84	0.717	0.655	0.655	1.74	12.73	9.02
150	0.949	0.913	0.913	117	116	129	0.716	0.655	0.655	2.47	19.16	12.70
200	0.949	0.913	0.913	158	155	170	0.726	0.655	0.655	3.36	25.23	17.41
300	0.949	0.913	0.913	233	229	254	0.727	0.655	0.655	4.87	38.93	26.52
400	0.949	0.913	0.913	312	307	341	0.730	0.655	0.655	6.43	51.82	34.69
500	0.949	0.913	0.913	393	385	426	0.741	0.655	0.655	8.31	63.58	43.09

根据模拟点云数据, 理论内点数 (10 000) 占总点云数 (11 000) 的比例约为 90.9%。从表 2 可以看出, 稳健特征值法在不同 M 值的情况下, 最大内点占比约为 94.9%, 表明至少有 4% 的异常值被错误地判定为内点。这直接导致其距离标准差均值 ($\bar{\sigma}$) 偏大且不稳定。表 2 中的数据显示, 随

着迭代次数的增加, 稳健特征值法的 $\bar{\sigma}$ 值反而增大。原因在于图 1 中角度较大的情况, 会随着迭代次数的增加而变得更加频繁, 这些情况的距离标准差往往较大, 拉高了平均值 $\bar{\sigma}$ 。动态阈值改进方法与本文方法由于其优秀的去噪能力, $\bar{\sigma}$ 值一直稳定在 0.655 左右。值得一提的是, 仅含随机

误差的点云到拟定平面 P_0 的距离标准差约为 0.654 654, 进一步说明了本文方法平面拟合精度之高。

然而, 较高的精度和稳定性需要以运算效率为代价。由表 2 可以得到, 动态阈值改进方法的平均运行时长约为稳健特征值法的 7.5 倍。在添加随机采样条件后, 本文方法的平均运行时长比动态阈值改进方法减少了约 32%, 一定程度上削弱了动态阈值改进为算法带来的负面影响。此外, 在相同迭代次数下, 满足内点占比要求的迭代次数越多, 所需的最大迭代次数 M 就越少。表中的数据显示, 本文方法在这方面优于其他方法。

结合上述仿真对比实验可以得出, 条件随机抽样一致性稳健特征值法具有较强的点云去噪能力, 这使得其平面拟合精度高且稳定。虽然在速率上不如传统稳健特征值法, 但随机采样条件的改进在一定程度上弥补了这一点。

2.2 坑槽点云提取实验

为进一步验证本文方法的鲁棒性, 以 KSCAN-magic 手持三维扫描仪采集到的沥青路面坑槽点云数据为基础, 进行坑槽点云提取实验, 其点云总数为 214 579。实验主要对比了特征值法、传统稳健特征值法和本文方法对坑槽点云的提取效果。

特征值法提取坑槽点的原理是以拟合平面为界限, 将原始点云分为坑槽点和非坑槽点两部分。稳健特征值法和本文方法提取坑槽点的原理均是将最优内点集作为非坑槽点, 最优外点集作为坑槽点。3 种方法的坑槽提取结果如图 6 所示。为了对比 3 种方法的提取效果, 实验以手动提取方法为标准, 并通过坑槽点数占比和交并比 (IoU) 这两个指标对结果进行评价。交并比计算方式见式 (7), 相关参数及结果评价如表 3 所示。

$$IoU = \frac{|\alpha \cap \beta|}{|\alpha \cup \beta|} \quad (7)$$

式中, α 为手动提取出的坑槽点集, β 为其他方法提取出的坑槽点集。

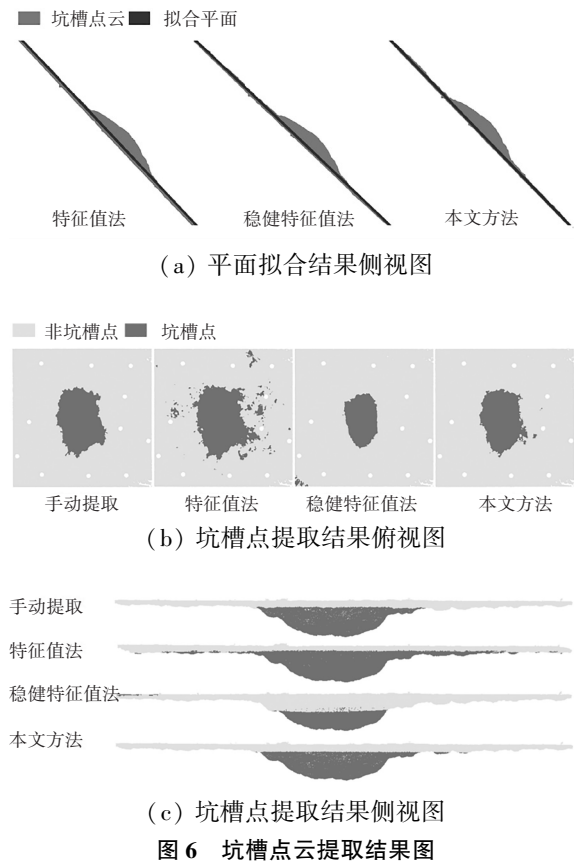


图 6 坑槽点云提取结果图

表 3 平面拟合参数及结果评价

Tab. 3 Parameters of plane fitting and result evaluation

方法	a	b	c	d	σ	坑槽点占比/%	IoU
特征值法	0.190 468	0.017 578	0.981 536	-410.231 493	3.616 687	20.2	0.727
稳健特征值法	0.191 411	0.018 275	0.981 340	-408.850 525	1.259 009	8.5	0.563
本文方法	0.191 183	0.018 356	0.981 383	-408.589 688	0.674 750	13.0	0.875
手动提取	—	—	—	—	—	14.7	—

结合图 6(a) 和表 3, 对于坑槽点云的平面拟合距离标准差 σ , 本文方法相较于特征值法和稳健特征值法分别提升了约 81.3% 和 46.4%。以此得出, 本文方法对于异常值 (坑槽点) 分布密集且不均匀的情况, 平面拟合效果更好。

结合图 6(b)、6(c) 和表 3, 特征值法由于是直接拟合平面分割坑槽点和非坑槽点, 导致较多的地面点被误认为坑槽点, 其坑槽点占比相较于手动提取方法高了 5.5%。稳健特征值法由于固定的标准差倍率, 导致其距离阈值偏大, 坑槽点提取不充分, 其坑槽点占比相较于手动提取方法低了 6.2%。本文所提出的方法具有较强的适应能力, 能够自动确定较为合适的距离阈值。因此, 该

方法可以更有效地分割坑槽点与非坑槽点, 提取效果也更趋近于手动提取方式。在坑槽点占比方面, 本文方法的结果与手动提取结果也仅相差 1.7%。交并比 (IoU) 是目标检测中用于衡量预测区域与真实区域之间重叠程度的指标。在本次实验中, 交并比的大小直接反映了坑槽提取效果的好坏。从表 3 可以得到, 本文方法 IoU 值最大, 相较于特征值法和稳健特征值法分别提高了约 20.4% 和 55.4%, 其坑槽点提取效果明显优于另外两种方法。

3 结论

本文提出了一种条件随机抽样一致性稳健平面拟合方法。该方法通过自动调整距离标准差倍率 k , 以解决传

统稳健平面拟合方法自适应性不足的问题,增强算法去噪能力。同时,本文使用初始样本点所围成三角形的面积作为判断因子,来评估当前随机采样的合理性,从而减少不必要的迭代次数,提升计算效率和稳定性。仿真对比实验结果表明,本文方法距离标准差值相较于特征值法和稳健特征值法分别提升了约 59.8% 和 17.9%,异常值剔除能力显著提升,平面拟合精度更高。同时,“随机采样条件”的加入使得算法整体运算时间减少了约 32%,减轻了 k 值动态调整带来的计算压力。虽然该方法对于传统稳健特征值法来说速率较慢,但由于其较高的算法稳定性和准确性,可以适当减少最大迭代次数 M ,以提升计算速度。在坑槽点云提取实验中,本文方法依然表现出较好的平面拟合效果。并且具有较强的适应能力,可自动确定合适距离阈值,更有效地提取坑槽点,其效果也更接近手动提取方法。且在交并比 (IoU) 指标上,相较于特征值法和稳健特征值法分别提高约 20.4% 和 55.4%,进一步验证了该方法的鲁棒性和实用性。

参考文献

- [1] 赵鹏,李欣,冯晖元. 三维激光扫描技术在变形监测中的应用研究[J]. 石河子科技, 2024(6):27-29.
- [2] 完平平,黄建莹,谢志勇. 三维激光扫描技术在建筑数字化中的研究[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2024, 24(9):68-73.
- [3] 朱峰,冯兴乐,伍川,等. 沥青路面构造深度分区平面拟合算法[J]. 中外公路, 2024, 44(2):61-67.
- [4] 张龙,朱学军,马心知,等. 融合特征点提取的三维点云配准方法[J]. 应用激光, 2023, 43(12):139-149.
- [5] 武鹏. 平面特征的多站地面激光雷达点云配准[J]. 测绘科学, 2024, 41(9):108-111.
- [6] 李华蓉,毛宏宇,赵一,等. 线面特征约束的跨源点云配准方法[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(5):1180-1192.
- [7] 于兴华,梁志敏,高洪明,等. 用于焊接环境三维建模的稀疏点云拟合[J]. 焊接学报, 2007(6):109-112,118.
- [8] 欧元汉,刘进,劳冬影. 基于 MVS 点云的城市建筑三维重建方法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(11):3064-3068.
- [9] 方文鏢,李长春,郑春,等. 基于三维激光扫描的建筑旧改墙面质量检测方法[J/OL]. 自动化技术与应用, 1-6 (2025-04-19). <https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20241227.1514.064>.
- [10] 马学磊,薛河儒. 基于迭代最小二乘的点云法向量估计方法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(7):363-367.
- [11] ZHENG L, WANG R, WANG S, et al. Point cloud plane fitting based on RANSAC and Robust Eigenvalue method [C]//2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2022: 1368-1372.
- [12] 欧江霞,邓雄文,蔡茂欣,等. 一种基于 LS-WTLS 的稳健平面拟合方法[J]. 激光技术, 2020, 44(6):784-788.
- [13] MAF, RC B. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.
- [14] RAHULR, ONDREJ C, MARC P, et al. USAC: a universal framework for random sample consensus [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2013, 35(8):2022-2038.
- [15] 官云兰,程效军,施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008(7):981-984.
- [16] 孔利,王延存,周茂伦,等. 基于随机抽样与特征值法的点云平面稳健拟合方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(3):43-46.
- [17] 童子良,余学祥,汪涛,等. 一种新的鲁棒三维点云平面拟合方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(12):1684-1688.
- [18] 李孟迪,蒋胜平,王红平. 基于随机抽样一致性算法的稳健点云平面拟合方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(1):102-106.
- [19] 王洋,王俊元,杜文华,等. 基于最小平方中值的点云平面拟合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(4):1-8.
- [20] 张中岳,周惠兴,王舜,等. 基于 RANSAC 的 WTLS 平面拟合算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(6):93-98.
- [21] YE J H, LIN X M, WU H B. Improved RANSAC point cloud plane fitting algorithm based on DBSCAN [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(2):76-87.
- [22] 郭爽,徐江涛,高志远,等. 基于平面拟合的事件传感器光流估计改进算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(14):263-271.
- [23] 杨军建,吴良才. 基于 RANSAC 算法的稳健点云平面拟合方法[J]. 北京测绘, 2016(2):73-75, 79.
- [24] 苏毅辉,陈志聪,吴丽君. 利用 LMedS 算法与特征值法的点云平面拟合方法[J]. 信息技术与网络安全, 2022, 41(3):38-43.
- [14] 艾瑞咨询. 中国智能家居行业发展白皮书(2022年)[R/OL]. (2023-10-27). <https://www.iresearch.com.cn/Detail/report?id=3971&isfree=0>.
- [15] 严苗忠. 集成灶变频控制器的设计与应用[J]. 家电科技, 2022(增刊1):70-73.
- [16] 宁波舜韵电子有限公司. 智能厨电控制系统技术白皮书[R]. 宁波:宁波舜韵电子有限公司, 2023.
- [17] 刘伟,赵阳,李静. 基于深度学习的智能油烟机风量自调节算法研究[J]. 家电科技, 2022(3):56-61.
- [18] 王涛,孙晓丽. 基于麦克风阵列的厨房语音识别降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8):123-130.
- [19] 陈浩,张鑫. 变频技术在冰箱压缩机节能控制中的应用[J]. 制冷与空调, 2020, 34(2):45-49.
- [20] 董伟,沈璐. 面向智能厨房的物联网传感数据融合研究综述[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(增刊1):15-19.
- [21] NESHEEN T, KHAN R A. A survey on security and privacy issues in IoT-based kitchen appliances [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2021, 12(7):734-741.
- [22] 张永,冯登国. 智能家居物联网安全威胁分析及防护技术研究[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(10):2087-2104.
- [23] 李志刚,孙晓. 基于边缘计算的智能家电控制策略研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(5):268-275.
- [24] ALI M W, ELKHATIB K. Challenges and opportunities in smart kitchen design for health monitoring [J]. IEEE Pervasive Computing, 2022, 21(1):36-43.
- [25] 高爽,张忠,容慧娟. 基于电流源型变频器的电机长线驱动方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 10(49):176-180.
- [26] 张永年,李瑞敏,吴紫瑄,等. 新零售背景下炎陵红茶包装的多模态交互设计[J]. 中国包装, 2025, 45(2):40-45.
- [27] 陶建华,巫英才,喻纯,等. 多模态人机交互综述[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(6):1956-1987.

(上接第 16 页)