

融合自适应滤波与鲁棒配准的位姿估计方法

马伟杰* 陈香箬

新疆轻工职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830021

新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830021

[摘要]针对智能物流分拣过程中三维点云受噪声、遮挡及包裹堆叠影响,导致位姿估计精度下降的问题,文中提出一种融合自适应滤波与鲁棒配准的位姿估计方法。首先,利用曲率、法向量和深度信息构建多特征融合的自适应滤波算法,根据点云局部几何变化调整滤波策略,提高噪声环境下的点云质量。其次,结合 Majorization-Minimization (MM) 优化框架与 Welsch 鲁棒函数,提出改进 ICP 配准算法 (MM-ICP),降低离群点和错误匹配对配准结果的影响。实验结果表明,所提方法能够有效提升点云滤波效果,并在复杂堆叠场景下保持稳定配准性能。基于 Intel RealSense D415 深度相机搭建分拣实验平台,系统综合分拣成功率达到 91.7%,配准精度较传统方案提升约 66.7%,平均处理时间为 3.1s。结果验证了该方法在物流自动化分拣任务中的有效性。

[关键词]智慧物流; 机器视觉; 点云配准; 点云滤波; 自动化分拣

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20196

中图分类号: TP391

文献标识码: A

A Pose Estimation Method that Combines Adaptive Filtering and Robust Registration

MA Weijie *, CHEN Xiangtuo

Xinjiang Industry Technical College, Urumqi, Xinjiang, 830021, China

Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang, 830021, China

Abstract: In response to the problem of decreased pose estimation accuracy caused by noise, occlusion, and package stacking on 3D point clouds during intelligent logistics sorting, this paper proposes a pose estimation method that combines adaptive filtering and robust registration. Firstly, an adaptive filtering algorithm based on multi feature fusion is constructed using curvature, normal vector, and depth information. The filtering strategy is adjusted according to the local geometric changes of the point cloud to improve the quality of the point cloud in noisy environments. Secondly, by combining the Majority-Minimization (MM) optimization framework with the Welsch robust function, an improved ICP registration algorithm (MM-ICP) is proposed to reduce the impact of outliers and incorrect matches on the registration results. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the point cloud filtering effect and maintain stable registration performance in complex stacked scenes. Based on the Intel RealSense D415 depth camera, a sorting experimental platform was built, and the comprehensive sorting success rate of the system reached 91.7%. The registration accuracy was improved by about 66.7% compared to traditional solutions, and the average processing time was 3.1 seconds. The results verified the effectiveness of this method in logistics automation sorting tasks.

Keywords: smart logistics; machine vision; point cloud registration; point cloud filtering; automated sorting

引言

随着电子商务和智能制造的发展,物流自动化分拣需求不断提高,基于三维视觉的包裹定位技术逐渐成为智能分拣系统的重要组成部分。然而,在实际分拣场景中,深度相机获取的点云数据容易受到噪声、离群点以及包裹堆叠遮挡的影响,导致点云质量下降,进而影响后续位姿估计精度。现有滤波方法在去除噪声和保持边缘结构之间难

以取得平衡,同时传统点云配准算法对初始位姿和异常匹配点较为敏感,在复杂场景下容易出现配准误差增大的问题。针对上述问题,本文提出一种融合曲率、法向量与深度特征的自适应滤波算法,并引入基于 Majorization-Minimization (MM) 优化框架和 Welsch 鲁棒函数的改进 ICP 算法 (MM-ICP)。通过标准数据集和实际物流分拣实验对所提方法进行验证,为复杂场景下的

点云处理与位姿估计提供参考。

1 文献综述与技术基础

1.1 国外研究现状

国外在机器人视觉抓取与三维点云处理领域起步较早,相关技术研究较为成熟。点云配准作为机器人位姿估计的重要环节,迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法及其改进方法得到了广泛应用。然而,传统ICP算法对初始位姿较为敏感,同时容易受到噪声和离群点影响。近年来,基于Majorization-Minimization(MM)框架的鲁棒配准方法通过构造辅助优化函数,并结合Welsch等鲁棒核函数降低异常点干扰,提高了复杂场景下的配准稳定性。在点云处理方面,Ding等系统总结了深度学习在点云配准、分割和分类等任务中的研究进展^[1];Zhou等提出DRGNet双关系图网络用于点云特征分析^[2];Sarabia等研究了基于RGB-D相机的自适应定位与三维建图方法^[3]。在机器人抓取方面,Zhang等提出OVGrasp方法,通过开放词汇学习实现复杂环境下的目标抓取^[4];Hao等设计视触觉融合传感器,结合视觉和触觉信息提升抓取性能^[5]。此外,Amazon Robotics、KUKA和FANUC等企业也将三维视觉、点云处理及多传感器融合技术应用于自动分拣和智能抓取场景。总体来看,国外研究已逐渐由传统几何方法向智能化、多传感器融合方向发展,为机器人视觉抓取和三维感知技术提供了重要支撑。

1.2 国内研究现状

我国在三维视觉与物流分拣领域的研究近年来发展较快。在三维重建理论研究方面,李明阳等从深度学习角度梳理了三维重建技术的发展过程,指出卷积神经网络在深度估计和点云补全任务中具有较好的应用效果^[6]。在点云处理方面,卢健等对基于深度学习的三维点云分割方法进行了系统总结^[7];李佳男等针对三维目标检测任务,对点云、体素以及多视图融合等技术路线进行了对比分析^[8];梁循等从图神经网络角度研究点云特征表达,强调了局部几何信息对点云分析的重要作用^[9]。在工程应用方面,李佳等研究了高斯滤波在测量数据处理中的应用^[10];叶锦华等提出基于DBSCAN改进的RANSAC点云平面拟合算法^[11];王硕等设计了基于PLC的智能分拣控制系统,实现了分拣过程的自动化控制^[12]。目前,国内相关研究已逐步向实际应用拓展,但针对高速分拣场景下点云算法的实时性和工程适应性,仍需进一步研究。

1.3 技术发展趋势

面向物流分拣的三维视觉技术主要向多源感知、自适应处理和鲁棒配准方向发展。感知方面,结构光、双目视

觉和ToF等多种技术逐渐融合,以提高点云获取的完整性和精度;数据处理方面,滤波方法由固定参数向结合局部几何特征的自适应方法转变,在去噪的同时保持点云细节;配准方面,基于鲁棒优化的算法逐渐应用于低重叠、高噪声场景,提高配准稳定性。同时,边缘计算技术的引入也推动了物流分拣系统的实时化发展。

针对上述问题,本文围绕三维点云滤波与配准展开研究,提出融合曲率、法向量和深度信息的自适应滤波方法,以及基于MM优化和Welsch鲁棒函数改进的ICP算法,并在物流分拣原型系统中进行验证。

2 融合自适应滤波与鲁棒配准的位姿估计方法

针对物流分拣过程中包裹点云存在噪声、边缘缺失以及多视角配准不稳定等问题,本文提出一种融合自适应滤波与鲁棒配准的位姿估计方法。该方法通过点云特征增强提高数据质量,并结合改进ICP算法实现包裹位姿的精确估计。

2.1 多特征融合的自适应点云滤波

对于输入点云 $P=\{p_i\}_{i=1}^N$,为每个点构建 k 近邻局部邻域 $N(p_i)$ 。采用主成分分析法(PCA)估计法向量与曲率:对邻域点协方差矩阵进行特征值分解,得到特征值 $\lambda_{i,1} \leq \lambda_{i,2} \leq \lambda_{i,3}$,最小特征值对应的特征向量即为法向量 n_i ,曲率估计值定义为:

$$\kappa_i = \frac{\lambda_{i,1}}{\lambda_{i,1} + \lambda_{i,2} + \lambda_{i,3} + \epsilon} \quad (1)$$

式中: ϵ 为防止除零的小常数。深度特征则通过计算点 p_i 到其局部拟合平面(由 n_i 和邻域质心 μ_i 确定)的垂直距离绝对值,经全局最大值归一化得到 D_i 。

三类特征提取后,分别计算其在邻域内的变化量以量化几何突变程度:曲率变化量 Δ_c 取当前点曲率与邻域平均曲率之差的全局归一化值;法向量变化量 Δ_n 取当前点法向量与邻域各点法向量夹角的平均值并归一化至 $[0,1]$;深度变化量 Δ_d 由当前点深度与邻域平均深度之差归一化得到。三者加权求和形成边缘分数:

$$S(p_i) = w_c \Delta_c(p_i) + w_n \Delta_n(p_i) + w_d \Delta_d(p_i) \quad (2)$$

式中:权重(w_c, w_n, w_d)满足和为1(本文取0.3、0.4、0.3)。

边缘点判别采用自适应百分位阈值。设边缘分数集合为 S ,取第 $100-\alpha$ 百分位数作为阈值 T (默认 $\alpha=5\%$),分数高于 T 的点标记为初始边缘点。为弥补离散采样导致的边缘断裂,进行形态学膨胀:以每个边缘点为中心、半径 rr (取平均点间距的3倍)的球体内所有点均纳入边

缘点集。非边缘区域通过 DBSCAN 聚类算法分割，识别不同包裹表面或同一包裹的不同平面，为后续配准提供结构先验。

2.2 基于MM优化框架与Welsch函数的改进ICP精配准

经典 ICP 及其变体以最小二乘损失为基础，对离群点和错误对应关系极为敏感。本文引入 Welsch 鲁棒核函数 $\psi_v(x)=1-\exp(-x^2/(2v^2))$ ，其导出的权重 $\omega(x)=\frac{1}{v^2}\exp(-x^2/(2v^2))$ 随残差增大呈指数衰减，能够自动压制离群点的影响。配准目标函数定义为源点云经变换后与目标点云对应点残差的 Welsch 损失之和。

由于目标函数非凸，直接优化困难，故借助 MM 框架构造替代函数。在第 k 次迭代，给定当前变换 $\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{t}^{(k)}$ ，对于每一对应点对 $(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_i)$ （由最近邻搜索确定），计算残差 $r_i^{(k)} = \|\mathbf{R}^{(k)}\mathbf{p}_i + \mathbf{t}^{(k)} - \mathbf{q}_i\|$ ，并计算权重：

$$\omega_i^{(k)} = \exp\left(-\frac{(r_i^{(k)})^2}{2v^2}\right) \quad (3)$$

则原目标函数的二次替代函数为：

$$g(\mathbf{R}, \mathbf{t} | \mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{t}^{(k)}) = \sum_{i=1}^N \omega_i^{(k)} \|\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{q}_i\|^2 + C^{(k)} \quad (4)$$

式中： $C^{(k)}$ 为与变换无关的常数项。该替代函数在 $(\mathbf{R}^{(k)}, \mathbf{t}^{(k)})$ 处与原函数相等，且处处不小于原函数，故最小化替代函数可保证原目标函数单调下降。该加权最小二乘问题通过奇异值分解（SVD）高效求解：计算加权质心、去中心化、构造加权协方差矩阵并分解，得到旋转矩阵与平移向量。

尺度参数 v 控制鲁棒性的强弱—— v 较大时算法近似最小二乘，收敛范围宽； v 较小时聚焦于高置信度点对，局部精度高。为实现由粗到精的渐进配准，采用 v 递减策略：初始值 $v_{\max}$ 设为初始残差中位数的 3 倍，终值 $v_{\min}$ 设为目标点平均间距的 $1/(3\sqrt{3})$ ，每次外层迭代将 v 减半，直至达到终值。在每个固定 v 下执行内层加权 ICP 迭代直至收敛。

为进一步加快收敛，引入 Anderson 加速技术。将刚体变换参数映射至李代数 $\mathfrak{se}(3)$ 空间，利用历史迭代信息进行线性外推，再通过指数映射恢复至变换矩阵。该策略在不增加对应点搜索次数的前提下显著减少迭代轮数，提升了计算效率。

上述滤波与配准算法构成完整的位姿估计链路：自适应滤波输出的边缘保持点云和区域分割结果为配准提供了高质量输入；改进 MM-ICP 利用鲁棒损失函数和渐进收缩策略，在离群点和低重叠率条件下仍能精确恢复包裹

位姿。为验证该方法有效性，分别在标准点云数据集和实际物流包裹数据上进行实验，从配准精度、收敛速度、抗噪能力和系统分拣成功率等方面进行定量评估与对比分析。

3 实验与分析

为验证算法工程可行性，搭建了基于 Intel RealSense D415 深度相机的双目立体视觉实验平台，如图 1 所示。平台由成像模块、运动控制模块及计算控制单元构成。

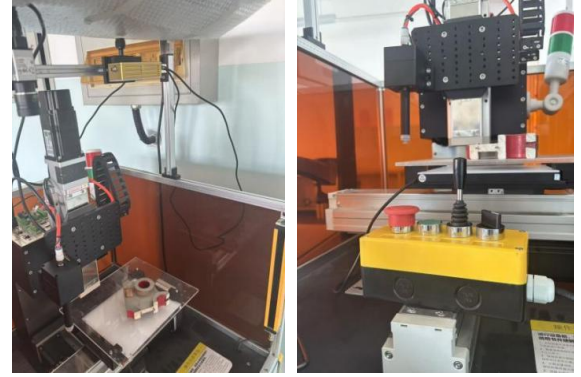


图 1 平台整体结构图

3.1 位姿估计实验

为全面验证 MM-ICP 算法有效性，使用公开数据集同源点云配准与实际多视角点云进行对比。对比算法包括点对点 ICP、点对面和 GICP，采用 RMSE 作为评价指标，配准结果如图 2 所示。

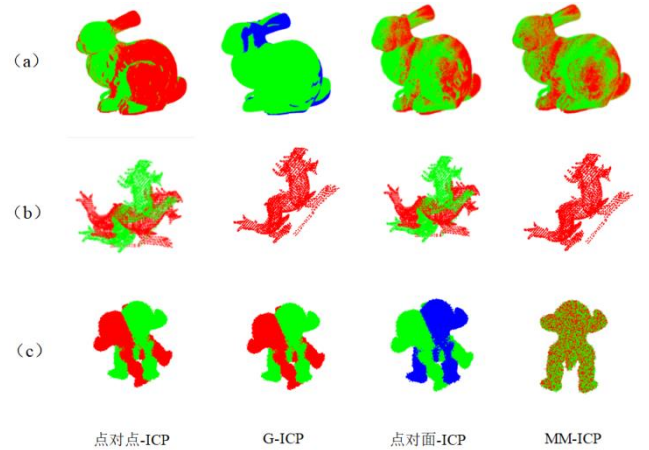


图 2 公共数据集各算法多场景配准结果对比图

Bunny 模型（35,947 点，旋转 45° ）的配准实验中，四种方法均能正常收敛。MM-ICP 首次迭代 RMSE 为 0.007141，仅为 P-P ICP 的 47.8%、P-Plane ICP 的 39.8%，前期收敛优势显著；最终精度与 P-P ICP 持平（0.002022），优于 P-Plane ICP（0.002252）和 GICP（0.003450），对应的 RMSE 迭代曲线如图 3 所示。

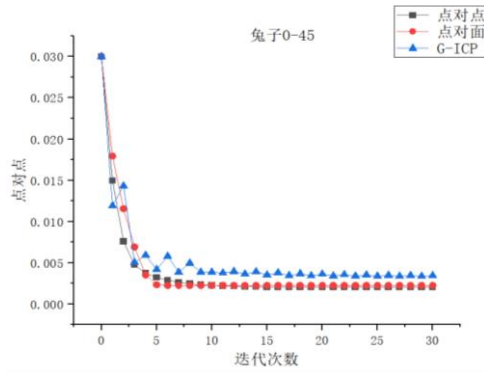


图3 Bunny RMSE 对比图

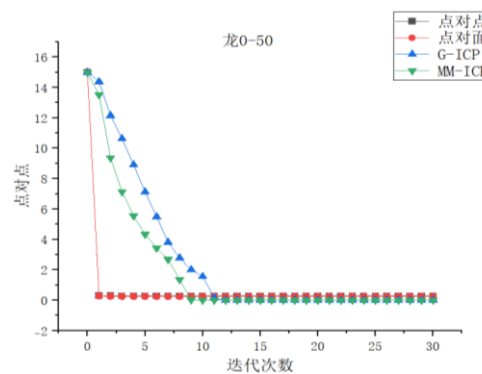


图4 Gragon RMSE 对比图

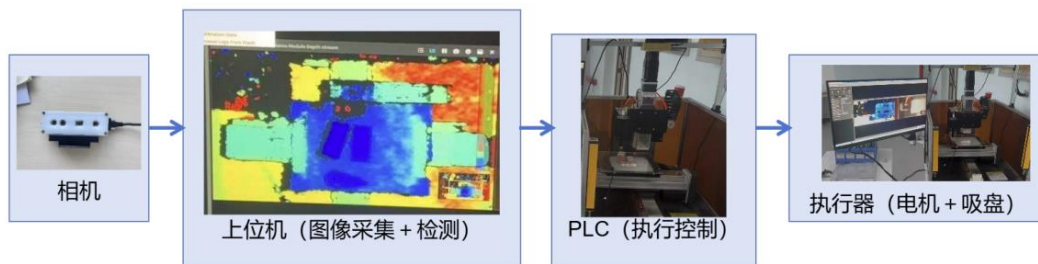


图5 系统整体流程图

Dragon 模型实验进一步验证了上述“MM-ICP 在传统 ICP 集体失效的极端场景中仍能精确收敛”的结论：P-P ICP 和 P-Plane ICP 分别锁定于 0.2815 和 0.2485 而完全失败，MM-ICP 在第 10 次迭代即精确收敛至零（图 4）。在传统 ICP 方法集体失效的复杂几何场景中，MM-ICP 成为唯一成功配准的算法。

综合上述实验可得出以下结论：在精度与收敛速度方面，MM-ICP 在正常收敛场景中的最终 RMSE 始终处于最低或并列最低水平，且早期收敛速度领先，Anderson 加速平均减少约 30% 的迭代次数。在鲁棒性方面，MM-ICP 展现出显著优势——Monster、Dragon 等传统 ICP 完全失效的极端场景中，仅 MM-ICP 能够稳定精确收敛，这得益于 Welsch 鲁棒核对离群点的软抑制以及 v 递减策略的全局搜索能力。综合来看，MM-ICP 在精度、鲁棒性和泛化能力上均优于传统 ICP 变体，为点云配准任务提供了可靠的技术支撑。

3.2 分拣抓取实验

为验证算法在实际物流分拣场景中的工程可用性，将自适应滤波与 MM-ICP 配准算法集成至自动化分拣系统，开展全流程闭环分拣实验。

3.2.1 系统集成方案

分拣控制系统采用“上位机（视觉感知）+下位机（PLC 控制）”的主从模式。上位机负责点云采集、自适应滤波、配准、位姿估计及坐标转换；PLC 控制三轴运动平台与真空吸盘执行分拣动作。上位机与 PLC 之间通过 RS232 串口通信，自定义协议确保数据传输的可靠性与实时性，整体如图 5 所示。

系统启动后，包裹运送至相机视野中心区域时，光电传感器触发 PLC，PLC 通过数字输出端口向深度相机发送采集触发脉冲。相机采集一帧彩色点云并上传至上位机，上位机依次执行自适应滤波、MM-ICP 配准与位姿估计，输出包裹在相机坐标系下的六自由度位姿（旋转矩阵和平移向量）。根据事先标定的手眼变换矩阵将位姿转换至机器人基坐标系，并通过串口将目标位姿发送至 PLC。PLC 控制三轴运动平台移动至抓取点，驱动吸盘下降并开启真空发生器，待真空度达到 -60kPa 阈值时确认抓取成功，随后将包裹搬运至目标放置区域。分拣完成后平台复位，系统进入下一循环。

3.2.2 测试场景与评价指标

设置三类典型场景，每类重复测试 20 次：场景 A（单

包裹)、场景 B (双包裹堆叠, 遮挡 40%~60%)、场景 C (多包裹随机, 3~5 个, 间距<50mm)。评价指标包括配准 RMSE、抓取成功率 (吸附并搬运至目标区域未掉落) 及综合分拣成功率 (抓取成功且放置偏差 $\leq 5\text{mm}$)。

3.2.3 分拣实验结果

各场景系统性能统计如表 1 所示。单包裹场景综合成功率 100%，配准 RMSE 均值 0.38mm；双包裹堆叠场景综合成功率 90%，RMSE 均值 0.56mm，下层包裹因点云缺失 RMSE 增大至 0.65~0.71mm，抓取失败 1 次 (吸盘边缘碰撞)；多包裹随机场景综合成功率 85%，RMSE 均值 0.58mm，抓取失败 1 次 (DBSCAN 欠分割导致放置偏差超标)。总体综合分拣成功率为 91.7% (55/60)，全流程平均处理时间 3.1s。

表 1 不同场景下的系统性能统计

测试场景	样本数	配准 RMSE 均值 (mm)	配准 RMSE 标准差 (mm)	抓取成功率	综合分拣成功率
单包裹	20	0.38	0.11	100%	100%
双包裹堆叠	20	0.56	0.18	95%	90%
多包裹随机	20	0.58	0.19	95%	85%
合计/平均	60	0.51	—	98.3%	91.7%

由表 1 可知，相较于统计滤波+P-P ICP 方案 (综合成功率 63%) 和双边滤波+GICP 方案 (74%)，本系统综合分拣成功率分别提升 28.7 个和 17.7 个百分点，配准精度较传统方案提升约 66.7%。

4 结论

本文面向物流包裹分拣应用，提出一种多特征融合自适应滤波算法和基于 MM 优化框架及 Welsch 鲁棒函数的改进 ICP 配准方法。滤波阶段结合曲率、法向量和深度信息，通过自适应阈值实现噪声抑制与边缘保持；配准阶段利用 MM 框架和 Welsch 函数降低离群点影响，提高复杂场景下 ICP 算法的稳定性。实验结果表明，系统综合分拣成功率达到 91.7%，配准 RMSE 均值为 0.51mm，整体处理时间约 3.1s，具备实际应用需求。

[参考文献]

[1]Ding Z ,Sun Y ,Xu S , et al.Recent Advances and

Perspectives in Deep Learning Techniques for 3D Point Cloud Data Processing[J].Robotics,2023,12(4):100.

[2]Zhou C ,Ling Q .DRGNet: Dual-Relation Graph Network for point cloud analysis[J].Journal of Visual Communication and Image Representation,2025(107):104353.

[3]Sarabia G A ,Fraga G A J ,Kober I V , et al.Adaptive Approach to Simultaneous Localization and 3D Mapping Using an RGB-D Camera[J].Journal of Communications Technology and Electronics,2025,70(3):1-8.

[4]Zhang X ,Ling H ,Huang X , et al.OVGrasp: Target-oriented open-vocabulary robotic grasping in clutter[J].Robotics and Autonomous Systems,2026(195): 105210.

[5]Hao L , Weng L ,Ji X , et al.Design of an improved visual-tactile sensor for robotic grasping[J].Sensors and Actuators: A. Physical,2025(396):117172.

[6]李明阳,陈伟,王珊珊,等.视觉深度学习的三维重建方法综述[J].计算机科学与探索,2023,17(2):279-302.

[7]卢健,贾旭瑞,周健,等.基于深度学习的三维点云分割综述[J].控制与决策,2023,38(3):595-611.

[8]李佳男,王泽,许廷发.基于点云数据的三维目标检测技术研究进展[J].光学学报,2023,43(15):296-312.

[9]梁循,李志莹,蒋洪迅.基于图的点云研究综述[J].计算机研究与发展,2024,61(11):2870-2896.

[10]李佳,邱丽荣,杨佳苗,刘大礼,赵维谦.共焦元件测量系统数据处理中的高斯滤波算法[J].光学技术,2013,39(2):157-162.

[11]叶锦华,林旭敏,吴海彬.基于 DBSCAN 的改进 RANSAC 点云平面拟合算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(2):76-87.

[12]王硕,魏柯.基于 PLC 的智能分拣控制系统设计[J].工业控制计算机,2025,38(11):165-167.

作者简介：马伟杰（1998—），中国地质大学（武汉）机械专业硕士，现就职于新疆轻工职业技术学院智能制造学院，研究方向为机器视觉，三维重建及点云配准。