

基于激光雷达的爬楼机器人楼梯检测与定位^{*}

黄军芬 王贵龙 薛 龙 曹莹瑜 刘学城

(北京石油化工学院 北京 102617)

摘要:为提升爬楼机器人在楼宇内环境中对楼梯的快速检测与精确定位能力,提出了一种基于旋转式 2D 激光雷达的楼梯检测与定位方法。搭建了由舵机、2D 激光雷达、上位机树莓派(Raspberry Pi 5)和下位机大疆 A 型开发板构成的硬件平台。在此基础上,针对机器人与楼梯处于不同相对位置关系时的楼梯检测场景,提出了基于点云区域生长聚类与主成分分析的楼梯多层台阶立面特征检测算法,并计算多层台阶上行方向角度,确定多场景下楼梯上行方向与机器人 X 轴向在 X-Y 平面上的夹角;以楼梯首级台阶立面中心点为关键定位参数,基于主成分分析的多层台阶立面拟合算法获取台阶高度 H、长度 L 及首层台阶立面中心点坐标等关键定位参数,实现对楼梯的精确定位。开展了 4 类楼梯场景下机器人相对楼梯处于不同位置关系的 240 组实验,得出楼梯上行方向角度检测偏差绝对值整体处于 $[0.03^{\circ}, 2.35^{\circ}]$ 的区间内,平均偏差控制在 1.5° 以内;通过不同楼梯场景下的楼梯台阶定位实验,得出机器人坐标系下楼梯首层台阶立面中心点的 X 方向最大定位偏差为 0.024 m, Y 方向最大定位偏差为 0.062 m。实验结果表明,该方法在多种楼梯场景下均具备较高的检测准确率及定位精度,可为爬楼机器人在复杂楼宇内环境中的自主跨层作业提供可靠的感知与定位支持。

关键词:爬楼机器人;楼梯检测;旋转式激光雷达;点云处理;空间定位

中图分类号: TP24; TP212; TN958.98

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.80

LiDAR-based stair detection and localization for stair-climbing robots

Huang Junfen Wang Guilong Xue Long Cao Yingyu Liu Xuecheng

(Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: In order to enhance the stair-climbing robot's capability for rapid detection and precise localization of stairs in indoor environments, a stair detection and localization method based on a rotating 2D LiDAR was proposed. A hardware platform consisting of a servo motor, a 2D LiDAR, a Raspberry Pi upper computer, and a DJI Type A developer board was constructed. On this basis, for various relative positional relationships between the robot and the stairs, a stair detection algorithm based on point cloud region-growing clustering and principal component analysis (PCA) was proposed to extract multi-level step facade features and compute the ascent direction angle of the stairs. This enabled the determination of the angle between the stair ascent direction and the robot's X-axis in the X-Y plane across multiple scenarios. Using the center point of the first-step facade as a key localization parameter, a PCA-based plane fitting algorithm was employed to obtain critical parameters such as step height (H), length (L), and the coordinates of the first-step facade center point, thereby achieving precise stair localization. A total of 240 experiments were conducted across four types of stair scenarios with varying robot-stair relative positions. The results showed that the absolute deviation in stair ascent direction detection ranged from 0.03° to 2.35° , with an average deviation within 1.5° . Localization experiments in different stair scenarios revealed that the maximum positioning deviation of the first-step facade center point in the robot coordinate system was 0.024 m in the X-direction and 0.062 m in the Y-direction. The experimental results demonstrate that the proposed method achieves high detection accuracy and positioning precision across various stair scenarios, providing reliable perception and localization support for autonomous cross-floor navigation of stair-climbing robots in complex indoor environments.

Keywords: stair-climbing robot; stair detection; rotating LiDAR; point cloud processing; spatial localization

收稿日期: 2025-09-16 Received Date: 2025-09-16

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4707200)资助

0 引言

随着服务机器人在多楼层楼宇内环境中的广泛应用,楼梯自动检测与定位成为服务机器人完成跨层移动的关键技术之一。楼梯作为典型的垂直通行结构广泛存在于住宅、医院、商场等环境中,服务机器人需具备在未知场景中准确感知楼梯、快速定位首级台阶,为路径规划与姿态调整提供关键数据,从而保障爬楼的连续性和安全性。

楼梯识别技术经历了从楼梯二维图像边缘特征识别向三维深度建模的转变。传统图像方法虽实现简便,但对光照与纹理高度敏感,易出现误判^[1]。近年来,随着激光雷达与深度相机的普及,三维点云在结构感知中的应用逐渐成为主流。国外学者 Theeravithayangkura 等^[2]采用立面旋转的单线激光雷达获取稀疏 3D 点云,通过增量阈值分割与平面聚合识别踏步平面并计算初始攀爬位姿;Vu 等^[3]在 sTetro 机器人上将横置 2D 激光雷达与 RGB-D 相机融合构建 3D 地图,再利用深度图注册提取首层台阶三维坐标;Muhammad 等^[4]则用舵机驱动的水平旋转 2D 雷达,通过与预存参考扫描的欧氏匹配在线校正机器人的楼梯朝向;Prabakaran 等^[5]创新地将“扫掠式”2D 激光雷达生成的稠密点云输入 PointNet++ 特征提取与检测回归网络,实现端到端的踏步与扶手检测与定位。为了进一步提升复杂或极端楼梯环境下的感知鲁棒性,近期国外学者在多模态融合与轻量化平台上进行了大量前沿探索。针对障碍物遮挡问题,有研究提出利用全向激光雷达初步定位并结合深度相机数据实时修正机器人的趋近轨迹^[6];为克服光照干扰,Kong 等^[7]构建了基于偏振视觉与飞行时间(time of flight, TOF)相机的异构融合框架,结合 YOLOv11 实现了高精度的楼梯三维重建;在穿戴式辅助导航领域,RGB-D 相机与惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的融合方案^[8]被应用于外骨骼系统,可精确估算台阶尺寸并将落脚点预测误差控制在厘米级。此外,针对感知与计算资源极其受限的微型跳跃机器人平台,Zhang 等^[9]验证了仅依靠微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)惯性传感器与简单测距传感器的轻量化组合,同样能够完成台阶尺寸估算与自主攀爬。

国内学者在此基础上也取得了丰富成果。于乃功等^[10]提出区域生长与平面构造相结合的方法,增强楼梯结构识别的鲁棒性;李艳杰等^[11]融合 Velodyne VLP-16 点云与工业相机图像,将点云投影到俯视(XY)和侧视(XZ)平面后以霍夫变换提取台阶边缘,并结合点云直线间距快速估计阶梯宽度、深度和高度;叶一飞等^[12]则融合二维投影图与多尺度聚类策略,提升了楼梯区域在

非结构场景中的鲁棒识别能力;孙浩然等^[13]提出一种改进型基于密度的带噪声空间聚类应用(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)点云聚类算法,结合统计滤波与归一化欧氏距离,有效提升了低密度点云的聚类速度与准确性,适用于楼梯点云的初步分割与边界还原;祝怡锋^[14]通过多方向一维深度特征提取解决楼梯斜向检测问题;田明昊等^[15]构建二维激光与多视角相机融合系统,在保持成本可控的前提下提升点云密度;吴雪静等^[16]通过改进点云配准算法,提高配准精度与稳定性。张冰战等^[17]则提出基于点云特征全局搜索的闭环检测算法,有效改善了移动机器人在纯激光环境下的定位漂移问题。

尽管现有方法在特定场景下表现良好,但仍存在 3 方面挑战:1) 楼梯斜向或遮挡情况下,点云重叠导致结构提取不完整;2) 机器人视角低于楼梯多数踏板造成点云稀疏和不完整引起结构识别不准确;3) 许多方法依赖高性能硬件,成本较高,不适用于服务机器人。

基于 2D 激光雷达的楼梯检测方法在部署成本与平台适应性方面具备优势,特别适用于资源受限场景。为此,本文提出一种基于旋转式单线 2D 激光雷达的楼梯检测与定位方法,通过俯仰旋转构建稀疏三维点云,结合几何建模与空间分析提取楼梯边界与台阶尺寸,实现鲁棒、高效的楼梯检测与定位。该方法结构简洁、部署灵活,适用于服务机器人在多楼层楼宇内环境中的自主完成爬楼任务。

1 基于 2D 激光雷达的楼梯检测与定位系统设计方案

基于 2D 激光雷达的楼梯检测及定位系统应用在楼梯清洁机器人平台上,具体由 24 V 电源、上位机树莓派、下位机大疆 A 型开发板(STM32F427)、舵机 LX-16A 以及 2D 激光雷达 LD19 组成。基于采集的环境的 3D 点云信息开发楼梯上行方向检测与首层台阶立面中心点精确定位算法,实现多场景下的楼梯检测与定位。

1.1 系统硬件平台与整体架构

爬楼机器人的系统体系结构如图 1 所示。激光雷达安装在机器人中心的正前方上面,高于机器人 10 cm,机器人坐标系如图 1 所示,其中 X 轴向为机器人正前方,Y 轴向为机器人正左方,2D 激光雷达扫描平面绕着机器人的 Y 轴做俯仰扫描,形成 3D 点云。应用大疆 A 型开发板控制爬楼机器人电机与舵机 LX-16A 的运动,舵机带动 2D 激光雷达 LD19 绕着机器人的 Y 轴俯仰扫描,扫描范围为 $\pm 35^\circ$ (水平视角为 0°),生成 3D 扫描数据。上位机通过串口与下位机通信,接收激光雷达数据和舵机角度信息,经过树莓派系统软件机器人操作系统(robot operating system, ROS) 2 节点完成数据同步与拼接,形成

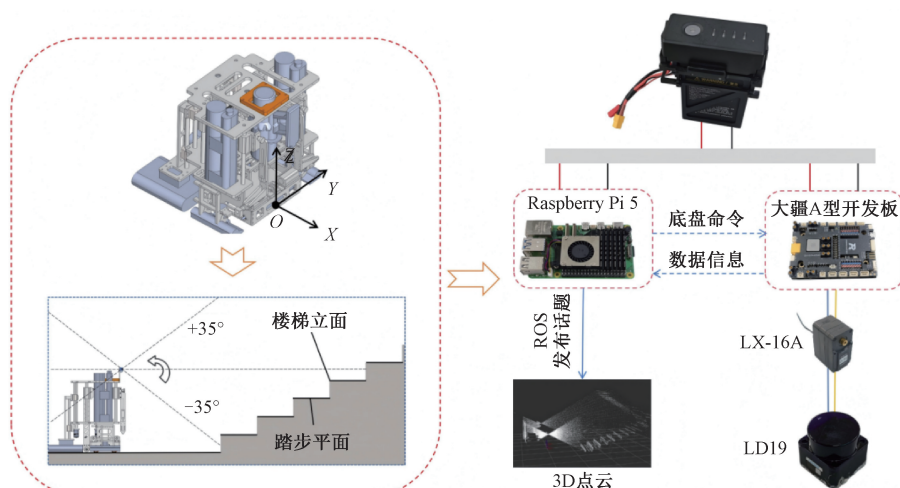


图1 整体系统架构

Fig. 1 Architecture of the overall system

三维点云。

1.2 楼梯检测与定位方法

检测与定位设计算法总体流程如图2所示,2D激光雷达旋转扫描获取的原始点云存在较多干扰,通过截取高度在50~150 cm区间内的点云,规避较低位置的楼梯点云受到密集栏杆及扫描楼梯平面点云的影响;且由于原始点云较为稀疏,无法直接提取楼梯特征,采用将点云投影至 X - Y 平面的方法,提取多个楼梯立面在平面上投影形成的多条平行线特征,然后通过计算立面梯度,得出机器人与楼梯上行方向的夹角关系 θ ,为引导机器人移动到楼梯前方提供基础数据。

确定机器人与楼梯上行方向间的初步位置关系后,即可引导机器人朝向楼梯,进行精确定位。楼梯定位的目标在于确定机器人应对接的首级台阶立面中心点坐标 (x, y) ,楼梯精确定位截取高度区间0~50 cm范围的点云,提取楼梯前几层台阶立面的3D点云,对点云进行半径滤波处理,滤除掉楼梯踏板平面的稀疏点云;对3D点云做平面聚类,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)^[18]对楼梯区域内的点云进行平面拟合与分割,区分楼梯立面与墙壁立面,提取多个拟合的平行楼梯立面;通过几何参数计算方法,获取与楼梯结构直接相关的关键尺寸参数:每级台阶的高度 H 、台阶的长度 L 、楼梯整体上行方向角度 θ 、第1层立面中心点坐标 (x, y) ,实现机器人坐标系下的首层台阶立面中心点的精确定位。

2 基于激光雷达的楼梯检测与定位方法

2.1 楼梯检测方法

通过直通滤波截取高度区间在50~150 cm范围内的

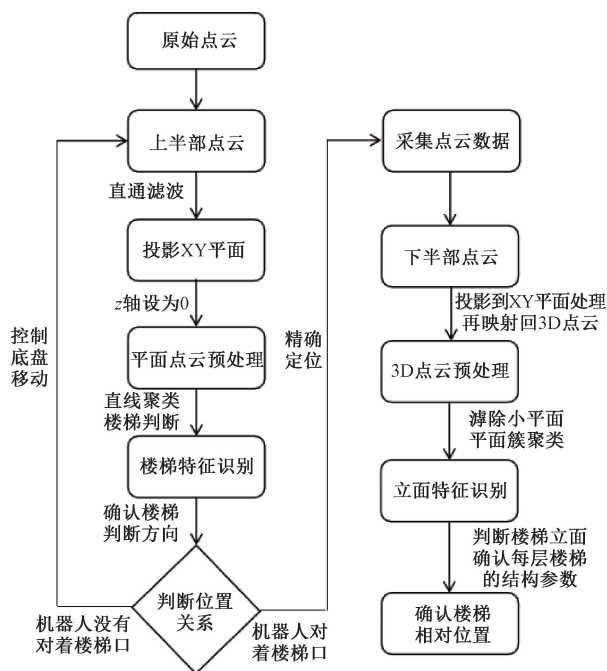


图2 总体算法流程

Fig. 2 Flowchart of the overall algorithm

点云,将其在 X - Y 平面上投影,得到二维点云。对二维点云进行预处理,采用体素网格下采样处理方法,降低平面点云数据量,再通过最小二乘法(moving least squares, MLS)平滑直线处理,得到清晰的特征点云。引入区域生长算法(region growing algorithm, RGS)^[19]。与PCA直线拟合相结合算法,检测出平面点云中楼梯立面投影到 X - Y 平面形成的多条平行线特征。基于每条平行线在原始三维点云中的高度信息,估计出楼梯的上行方向,确认机器人与楼梯的相对位置关系,为引导机器人到达楼梯正

前方提供关键数据。

1) 点云数据预处理

鉴于机器人上 2D 激光雷达的扫描视角相对楼梯较低,楼梯踏板平面点云稀疏,难以用来检测楼梯特征;楼梯踏板立面点云投影到 X - Y 平面形成对应台阶边缘的一条直线,多个立面点云投影构成多条平行线,便于楼梯特征提取,故将 3D 点云投影到 2D 平面之后进行楼梯检测。

将楼梯原始三维点云投影至 X - Y 平面以得到平面点云,通过对平面点云进行滤波与平滑处理,除掉楼梯环境点云噪声并减少点云数据量,提升计算效率。如图 3 和表 1 所示,针对截取的点云使用体素网络下采样以及 MLS 平滑滤波处理。结果表明,该方法显著减少了点云数据量,其中经过 MLS 平滑处理的点云在连续性与表面质量方面表现更优。

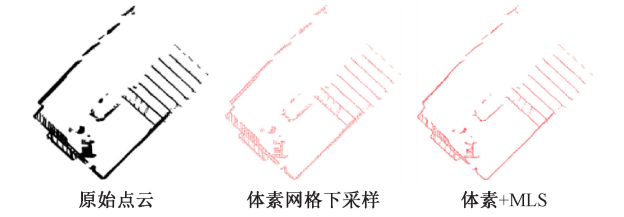


图 3 滤波效果
Fig. 3 Filtering results

表 1 数据预处理结果

Table 1 Results of data preprocessing		
滤波方法	处理时间/s	点数
原始数据	0.005 9	129 388
体素网格下采样	0.009 5	1 926
体素下采样+MLS 平滑滤波	0.094 6	1 926

2) 2D 点云楼梯特征检测算法

针对楼梯台阶边缘在投影图中表现为多条平行直线段的特点,传统直线提取方法在稀疏且不连续的点云环境中均存在显著局限^[20]。基于随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)模型的直线检测更适合处理单条直线^[21],楼梯环境容易漏检短小直线或被长直线残留点干扰。

为克服上述不足,本研究提出 RGS 与 PCA 直线拟合相结合的两步法。如图 4 所示,首先,基于点的邻域距离与法向量一致性,通过 RGS 算法,将同一台阶边缘上的点云划分为连通簇;随后,对每个簇的二维投影点集应用 PCA,提取其第一主成分方向作为直线特征,生成多条连续边缘线段,将每条直线以隐式方程表示为:

$$a_i x + b_i y + c_i = 0 \tag{1}$$

式中: x, y 为直线上的点在二维平面中的坐标; a_i, b_i 为第 i 条直线方程的系数,且决定了该直线的法向量; c_i 为

第 i 条直线方程的常数项。则其法向量 $\boldsymbol{n}_i = (a_i, b_i)$, 并可计算法向角 α_i 为:

$$\alpha_i = \arctan2(b_i, a_i) \ (a_i \in (-\pi, \pi]) \tag{2}$$

对于任意两条直线,若其方向夹角满足平行阈值($< 5^\circ$),且法线间距位于国家标准台阶宽度范围($25 \sim 35$ cm)内,则判定为相邻台阶的边缘线。通过筛选出一组满足方向一致性和间距约束的平行直线,可以计算得到这组直线的平均方向向量,作为楼梯的主方向 α_k , 两者的最小角度差为 $\Delta\alpha_i$:

$$\Delta\alpha_i = \min(|\alpha_i - \alpha_k|, \pi - |\alpha_i - \alpha_k|) \tag{3}$$

式中: $\Delta\alpha_i$ 表示第 i 条直线的法向角与楼梯主方向角之间的最小绝对角度差; α_i 为第 i 条直线的法向角; α_k 为经过初步筛选出的一组平行直线的平均方向角(即楼梯主方向)。

当 $\Delta\alpha_i < 5^\circ$ 时,视该直线方向与楼梯台阶边缘基本平行,否则予以剔除,在满足方向平行性的基础上,进一步验证相邻直线对的法线距离是否符合国家标准台阶宽度。对于两条具有相同法向量方向(设共同的法向量分量为 a, b) 的直线 i 和 j , 其间的法线距离 d_{ij} 可表示为:

$$d_{ij} = \frac{|c_i - c_j|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \tag{4}$$

式中: d_{ij} 为直线 i 与 j 之间的法向垂直距离; c_i, c_j 分别为直线 i 和 j 的隐式方程常数项; a, b 为这两条平行直线共同的法向量分量。

当 $d_{ij} \in [0.28, 0.32]$ 时,可判定该直线与相邻两级台阶的边缘对应;仅保留同时满足角度阈值与距离阈值的直线,最终得到一组既平行又符合间距的楼梯台阶边缘线段,计算该组平行线的法线,方向由低阶边缘线指向高阶边缘线即为楼梯上行方向 α_k , 计算楼梯上行方向与机器人坐标系 X 轴的夹角 θ_{stair} , 以此作为检测结果的核心参数。

3) 楼梯检测实验及结果

针对 4 种楼梯环境开展了检测实验,在每一种楼梯环境中,设置两个机器人停靠区域,分别为楼梯正前方区域和楼梯侧方区域;在每个区域机器人相对于楼梯的初始位置关系为 3 种典型位置关系:正对楼梯(机器人 X 轴与楼梯上行方向在 X - Y 平面夹角 0°);斜对楼梯(机器人 X 轴与楼梯上行方向在 X - Y 平面夹角 $\pm 45^\circ$);侧对楼梯(机器人 X 轴与楼梯上行方向在 X - Y 平面夹角 $\pm 90^\circ$)。两个区域 3 个角度点位采集 10 次 3D 点云数据,共计采集了 4 个楼梯环境,24 个位置关系下共计 240 组 3D 点云数据。

图 5 为机器人处于楼梯前侧方区域,机器人正对楼梯、斜对楼梯以及侧对楼梯 3 个位置关系时楼梯检测结果,通过直线拟合补全缺失的点云直线,实现楼梯角度的准确判断。

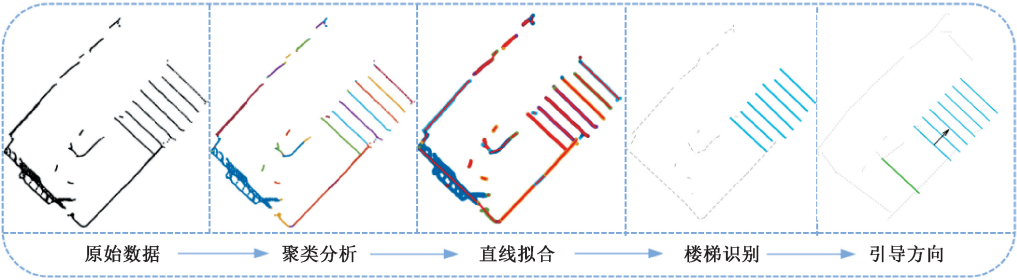


图 4 点云数据处理流程
Fig. 4 Flowchart of point cloud data processing

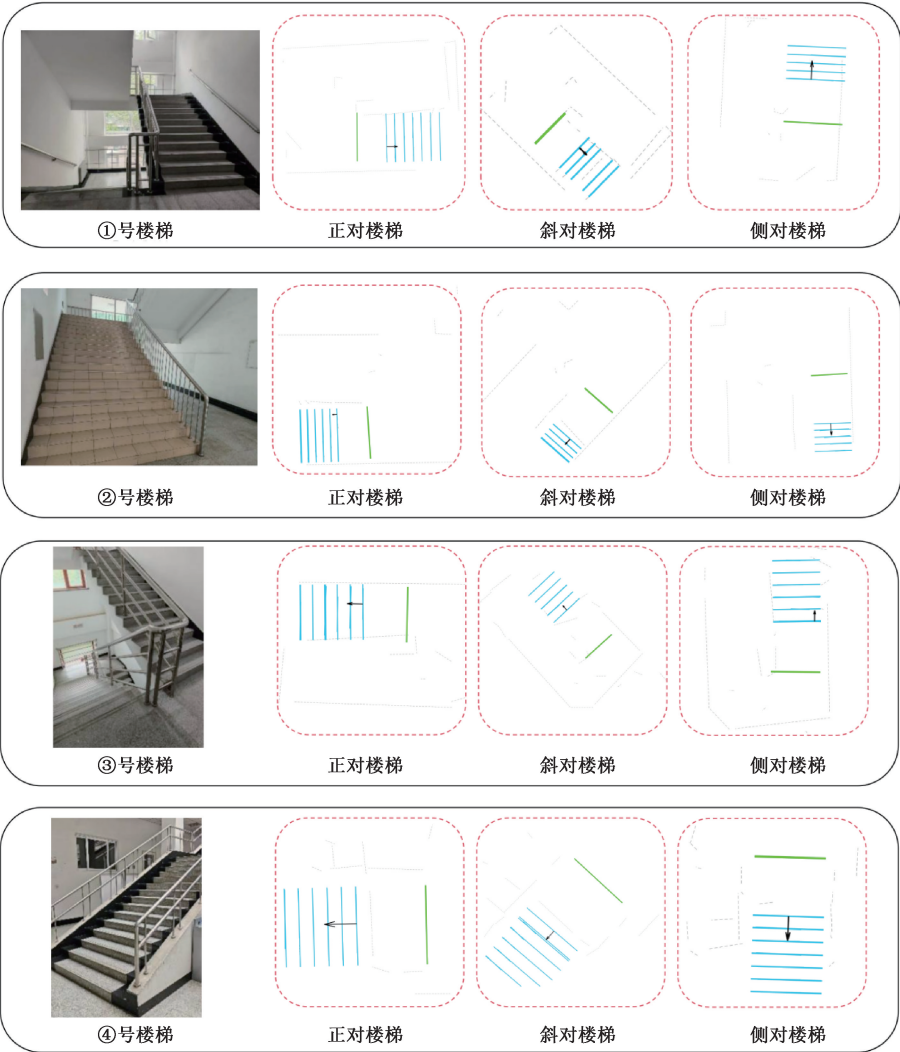


图 5 实验场景与结果
Fig. 5 Experimental setup and results

如表 2 所示,通过统计所有实验场景下,姿态偏差绝对值的最小值 (Min)、最大值 (Max) 及平均值 (Mean),楼梯上行方向角度检测偏差绝对值整体处于 $[0.03^\circ, 2.35^\circ]$ 的窄区间内,且各姿态下偏差均值均控制在 1.5°

以内。能够满足楼梯机器人对于楼梯上行方向角度检测精度需求。

基于楼梯边缘线在 Z 轴方向的梯度变换,可计算出首层台阶边界的安全距离 (该距离需大于机器人自身半

表 2 楼梯上行方向角度偏差绝对值统计

Table 2 Statistical results of absolute deviation in stair ascending direction angle

区域角度	正对楼梯 0°			斜对楼梯 ±45°			侧对楼梯 ±90°		
	Min ₁	Max ₁	Mean ₁	Min ₂	Max ₂	Mean ₂	Min ₃	Max ₃	Mean ₃
正前区域偏差绝对值	0.03°	1.85°	0.83°	0.12°	1.98°	1.07°	0.14°	2.07°	1.31°
侧方区域偏差绝对值	0.08°	2.12°	0.89°	0.16°	2.35°	1.33°	0.07°	1.84°	0.93°

径)。随后,将算法初步生成的楼梯正前方安全距离设为机器人的初始导航目标点,并将机器人的移动目标朝向调整为正对楼梯上行方向(即与楼梯立面法向量相反的方向),以确保机器人到达该目标点时,能恰好面对楼梯的上行方向。

2.2 楼梯精确定位方法

完成对楼梯初步检测并使机器人正对楼梯之后,转入三维点云的深度分析,获取楼梯的几何参数并完成楼梯首层台阶边缘中心点的空间精确定位。对 3D 点云数据采用直通滤波与半径滤波,去除地面和周边干扰;基于点云空间连通性,采用递归 RGS 算法提取出楼梯台阶面上的点云簇,针对每个簇应用 PCA,拟合出每级楼梯立面的平面模型,计算出楼梯的长度 L、高度 H 以及首层台阶立面中心点坐标,确定首层台阶立面中心点在机器人坐标系下的空间位置。

1) 3D 点云数据预处理

点云数据预处理的主要目标在于去除地面、墙壁与远距离噪声点,同时保证楼梯边缘结构点云特征的完整性与连贯性。楼梯已经在机器人的正前方,对原始三维点云实施直通滤波(pass-through filter),仅保留满足以下条件的点:

$$\begin{cases} x_i > 0 \\ Z_{\min} \leq Z_i \leq Z_{\max} \\ \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq R_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_i 、 y_i 、 Z_i 分别表示三维点云中第 i 个点在机器人坐标系下的 X 、 Y 、 Z 轴空间坐标; $Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$ 分别对应空

间中楼梯前 4 层有效点云高度区间的下限和上限; $R_{\max}$ 为设定的机器人前方感兴趣区域的最大扫描半径。滤除机器人身后、地面反射及超出扫描范围的点云,从而将点数大幅缩减。

再将点云投影至 X - Y 平面的二维坐标集合 $\{(x_i, y_i)\}$ 构建 KD-Tree 结构,通过半径滤波滤除掉楼梯踏板平面稀疏的点云。如图 6 所示,该方法的处理效果更能清晰地展示出楼梯的立面特征。

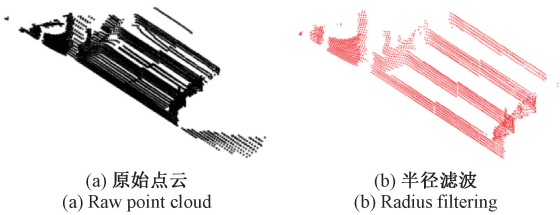


图 6 预处理效果
Fig. 6 Preprocessing results

2) 楼梯台阶立面特征提取与定位方法

采用基于 RGS 的楼梯立面特征提取方法,滤除墙面点云及扶手干扰,提取流程如图 7 所示。该方法对预处理后的三维点云估算法向量并构建空间邻域结构,在距离与法向双重约束下,递归地将同一立面上的点云聚为连通簇;剔除小规模噪声簇,并根据簇的平均法向与楼梯主方向的一致性筛选出真实立面;对保留的立面簇应用 PCA,拟合每级台阶立面的平面模型并提取其几何参数以及平面中点空间坐标,实现精确定位。

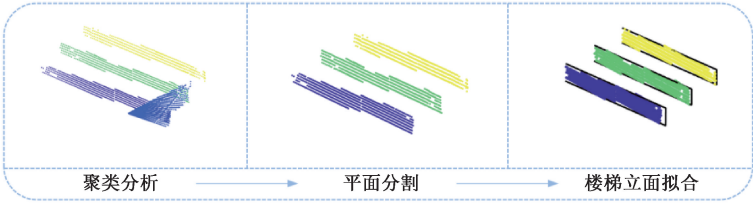


图 7 楼梯立面提取流程
Fig. 7 Process of stair facade extraction

对预处理后的三维点云在局部邻域(如每点取其若干最近邻)上应用 PCA 拟合平面,提取每个点的法向量;以空间距离(0.1 m)和法向夹角(10°)为双重判据,从任一点出发递归地将相互连通且法向一致的点归并为

同一平面簇,剔除少于 300 点的小簇,确保仅保留主要的平面结构。

对每个平面簇,计算其所有点法向的平均向量 n_L 并归一化,接着与全局 X 轴方向(1,0,0)计算夹角 θ_L :

$$\theta_L = \arccos(|\mathbf{n}_L \times (1,0,0)|) \quad (6)$$
式中： θ_L 表示平面簇的平均法向量与机器人全局 X 轴正方向之间的夹角； $\mathbf{n}_L$ 为该平面簇内所有点法向量经过归一化处理后的平均法向量； $(1,0,0)$ 为全局 X 轴的单位方向向量；取绝对值，以保证求得的夹角处于锐角或直角范围内。

保留平面法向与机器人 X 轴夹角小于 $\pm 30^\circ$ 的平面簇，对每个保留簇，计算质心 P_0 、法向 n 及平面方程常数 $d = -n \times P_0$ 。在切平面上以 PCA 提取两个正交基向量 $u、v$ ，将簇内所有点投影到 $\{u,v\}$ 平面，分别计算坐标范围以得到矩形长宽 $[L,W]$ 。最终将每个平面簇拟合为一个矩形，并得出长宽数据。

对每对平面模型，如果其法向余弦相似度 $|\hat{n}_i \times \hat{n}_j| > 0.95$ ，则沿法向方向计算质心间距 $d_{ij} = \hat{n}_i \times (P_{0,j} - P_{0,i})$ 以度量相邻台阶的空间间隔，即为楼梯踏板平面宽度，其中 $P_{0,i}$ 和 $P_{0,j}$ 分别为相邻台阶立面簇的质心坐标。

对于所有保留的楼梯立面簇，按照其质心高度 Z 从低到高排序，将最低的立面矩形作为第 1 层台阶立面。记该立面的质心为 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ，则其在机器人坐标系下的坐标即为楼梯第 1 层立面中心点。该点作为导航目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 。

以相邻两级台阶立面连线方向为楼梯上行方向方向，取其与机器人坐标系 X 轴的夹角作为楼梯主方向角 θ_{goal} 。定位结果由 $(x_{goal}, y_{goal}, \theta_{goal})$ 三元组表示，为机器人正对并接近楼梯提供位姿目标。

表 4 楼梯尺寸拟合结果								
Table 4 Stair dimension fitting results								
地点	长度 1/m	长度 2/m	长度 3/m	平均相对误差/%	高度 1/m	高度 2/m	高度 3/m	平均相对误差/%
①号楼梯	2.000	2.000	1.910	1.50	0.167	0.15	0.151	4.00
②号楼梯	2.578	2.505	2.402	1.15	0.182	0.188	0.158	7.32
③号楼梯	1.214	1.219	1.160	3.80	0.165	0.164	0.151	6.67
④号楼梯	1.995	1.965	1.845	4.91	0.174	0.171	0.164	9.46

楼梯定位实验结果如表 5 所示，实验记录了楼梯首层台阶立面中心点在机器人坐标系下的实测坐标及机器人坐标系 X 轴与楼梯上行方向的夹角，并将通过前述算法计算得到的估计值与实测值进行对比。结果表明，楼梯首层台阶立面中心点在机器人坐标系下的 X 轴向最大偏差为 0.024 m， Y 轴向最大偏差为 0.062 m，参考楼梯台阶宽度为 25~35 cm，上述坐标偏差处于允许误差范围；机器人坐标系 X 轴与楼梯上行方向在 X - Y 平面的角度偏差最大不超过 1.5° ，同样处于爬楼机器人姿态调整的允许误差范围内，能够满足爬楼机器人实际应用中的楼梯定位需求。

4) 与现有方法的对比分析
为了进一步验证本文所提方法的有效性与工程部署

3) 实验结果分析
本实验在 4 种不同楼梯场景下，分别采集楼梯台阶的点云数据，记录每级台阶的台面长度、宽度和高度以及第 1 层台阶的立面中心在机器人坐标系下的坐标作为真实值，如表 3 所示。

表 3 楼梯尺寸			
Table 3 Stair dimensions			(m)
采集地点	长度	宽度	高度
①号楼梯	2.000	0.300	0.150
②号楼梯	2.524	0.304	0.164
③号楼梯	1.245	0.270	0.150
④号楼梯	2.035	0.301	0.155

通过 PCA 平面拟合获得的三级台阶尺寸与实测数据进行对比，分别计算每级台阶的台面长度和高度误差，并据此评估拟合精度。计算各级台阶尺寸估算的相对误差，并统计 4 个地点楼梯的平均相对误差。单次测量的相对误差定义为：

相对误差 = $\frac{| \text{真实值} - \text{估计值} |}{\text{真实值}} \times 100\%$

随后计算 3 次估算结果相对误差的算术平均值。平均相对误差越低，证明楼梯尺寸估计越准确。根据表 4 所示实验结果，楼梯尺寸长度方向误差低于 5%，高度方向误差相对较高在 10% 以下，基本能够满足机器人对楼梯尺寸的判断。

优势，将本文方法与近年来典型的楼梯参数检测与定位方法进行了横向对比。分别选取基于 16 线 3D 激光雷达与视觉融合算法^[11]以及最新的基于深度学习卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 视觉检测算法^[22]。对比维度涵盖了传感器配置、核心特征提取算法以及最终的定位精度，对比结果如表 6 所示，文献[11]依靠昂贵的高线束三维雷达与视觉融合，获取了极其稠密的环境数据；而基于 CNN 的视觉定位方法虽然实现了约 2 cm 和 1° 的高精度定位，但其严重依赖神经网络训练模型，不仅需要搭载具备强大 GPU 算力的硬件平台，且在实际楼宇环境中极易受到光照突变、阴影或楼梯材质反光的干扰。相比之下，本文方法仅依赖低成本的单线二维激光雷达，在算力受限的树莓派平台上，通过引入

RGS 与 PCA 相结合的特征提取法,有效克服了稀疏点云的局限性。结果表明,本文方法不仅完全免疫光照干扰,且实现了 X 向 0.024 m 的最大定位偏差与 1.5° 以内的角度误差。在大幅降低硬件成本与系统算力依赖的前提

下,本文提出的轻量化算法在定位精度上能够媲美依赖高算力的深度学习与多传感器融合方案。该方法在大幅削减系统硬件成本的同时,有效保障了机器人的定位可靠性。

表 5 定位结果
Table 5 Localization results

实验 场地	第 1 层台阶中心坐标计算值及角度			实际坐标值与角度		
	x_{cal}/m	y_{cal}/m	$\theta_{cal}/(^{\circ})$	x_{true}/m	y_{true}/m	$\theta_{true}/(^{\circ})$
①号楼梯	0.724	0.017	1.41	0.700	0.000	0
②号楼梯	0.711	-0.116	1.40	0.700	-0.100	0
③号楼梯	0.705	0.162	0.79	0.700	0.100	0
④号楼梯	1.021	0.095	0.05	1.000	0.100	0

表 6 方案对比
Table 6 Comparison of schemes

	方案 1	方案 2	方案 3
传感器配置	16 线 3D 雷达+ 工业相机	RGB 视觉相机	单线 2D 激光雷达+ 俯仰舵机
系统算力与成本	极高(需高性能上位机处理稠密点云)	高(需 GPU 算力支持神经网络推理)	极低(树莓派 5 即可满足实时计算)
环境光照鲁棒性	不受光照条件影响,鲁棒性强	极易受光照、阴影及反光干扰	不受光照条件影响,鲁棒性强
首层台阶定位精度	(未给出绝对定位,尺寸误差约 2 cm)	定位误差约±2 cm	X 向最大偏差 2.4 cm
上行方向角度误差	(未明确)	约±1°	最大偏差不超过 1.5°

3 结 论

本文针对多场景下室内爬楼机器人的楼梯检测问题,提出了基于 RGS 及 PCA 直线拟合的楼梯上行方向检测算法,通过 RGS 提取投影到 X - Y 平面的多个楼梯台阶立面直线点云,采用 PCA 方法拟合出各台阶立面特征直线,从而确定楼梯上行方向角度。4 个楼梯场景共 240 组实验数据表明,楼梯上行方向角度检测偏差均值控制在 1.5° 以内,完全满足室内爬楼机器人对楼梯上行方向角度检测的精度需求;针对楼梯首层台阶立面中心点定位问题,提出基于 PCA 的多台阶立面拟合算法,结合几何参数计算方法,获取首层台阶立面中心点坐标。实验结果表明,在机器人坐标系下,首层台阶立面中心点的定位误差在 X 方向最大为 0.024 m、 Y 方向最大为 0.062 m,满足爬楼机器人在实际应用中的定位需求。

参考文献

[1] 汪方斌,钱丹莉. 3D 激光雷达在洗地机器人中的应用进展[J]. 长春大学学报, 2025, 35(4): 1-8.
WANG F B, QIAN D L. Advances in the application of 3D laser radar in floor cleaning robots [J]. Journal of Changchun University, 2025, 35(4): 1-8.
[2] THEERAVITHAYANGKURA C, TAKUBO T, MAE Y, et al. Stair recognition with laser range scanning by limb

mechanism robot “ ASTERISK ” [C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 2009: 915-920.
[3] VU A L, THIHA P K, ELARA R M, et al. Autonomous floor and staircase cleaning framework by reconfigurable sTetro robot with perception sensors [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101: 17-35.
[4] MUHAMMAD I, SHI Y, ELARA RM, et al. Design of sTetro: A modular, reconfigurable, and autonomous staircase cleaning robot [J]. Journal of Sensors, 2018, 2018: 1-16.
[5] PRABAKARAN V, PRATHAP KS, KARTHIKEYAN E, et al. A novel autonomous staircase cleaning system with robust 3D-deep learning-based perception technique for area-coverage [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 194: 116544.
[6] DING P, ZHU F, ZHU H, et al. Identifying and approaching for obscured stairs [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 171: 104535.
[7] KONG W, TAN Z, CHENG L, et al. Staircase recognition and location based on polarization vision [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 195: 109309.
[8] GUZMAN ER, GIONFRIDA L, HOWE R D. RGB-D and IMU-based staircase quantification for assistive navigation

- using step estimation for exoskeleton support [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2026, 264: 104621.
- [9] ZHANG Y, ZHANG J, CHEN B, et al. Obstacle detection and autonomous stair climbing of a miniature jumping robot [J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2023, 3(1): 100085.
- [10] 于乃功, 谢秋生, 李洪政. 基于点云处理的仿人机器人楼梯障碍物识别与剔除方法[J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 339-350.
- YU N G, XIE Q SH, LI H ZH. Obstacle identification and removal method for humanoid robot stairs based on point cloud processing [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2025, 47(2): 339-350.
- [11] 李艳杰, 刘宸, 眭晋. 基于视觉和激光传感器信息融合的楼梯结构参数估计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(6): 40-42, 47.
- LI Y J, LIU CH, SUI J. Estimation of stair structure parameters based on fusion of vision and laser sensor information [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(6): 40-42, 47.
- [12] 叶一飞, 王建中. 基于点云的复杂环境下楼梯区域识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 124-133.
- YE Y F, WANG J ZH. Stair region recognition in complex environments based on point cloud data[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 124-133.
- [13] 孙浩然, 杨家富, 王子洋, 等. 基于改进 DBSCAN 聚类的激光雷达点云数据算法研究[J]. 传感技术学报, 2025, 38(2): 301-308.
- SUN H R, YANG J F, WANG Z Y, et al. Research on LiDAR point cloud data algorithm based on improved DBSCAN clustering[J]. Journal of Sensor Technology, 2025, 38(2): 301-308.
- [14] 祝怡锋. 基于多方向一维深度特征的楼梯识别与结构参数估计[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHU Y F. Staircase recognition and structural parameter estimation based on multi-directional one-dimensional depth features [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [15] 田明昊, 李攀, 阎肃, 等. 基于二维激光雷达和多视角相机数据级融合的 3D-RGB 点云成像[J]. 数据采集与处理, 2025, 40(6): 1505-1517.
- TIAN M H, LI P, YAN S, et al. 3D-RGB point cloud imaging based on data-level fusion of two-dimensional laser radar and multi-view camera data [J]. Data Acquisition and Processing, 2025, 40(6): 1505-1517.
- [16] 吴雪静, 苏杰, 宋席发, 等. 基于改进的点云配准算法的室内 2D 建图方法[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(1): 100-102.
- WU X J, SU J, SONG X F, et al. Indoor 2D mapping method based on an improved point cloud registration algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2025, 38(1): 100-102.
- [17] 张冰战, 尹晨晨, 李志远, 等. 基于点云特征全局搜索的回环检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 176-186.
- ZHANG B ZH, YIN CH CH, LI ZH Y, et al. Loop closure detection algorithm based on global search of point cloud features [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 176-186.
- [18] 石峰源, 张春明, 姜丽辉, 等. 采用主成分分析的迭代最近点算法优化与验证[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 189-197.
- SHI F Y, ZHANG CH M, JIANG L H, et al. Optimization and verification of iterative closest point algorithm using principal component analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 189-197.
- [19] 刘德儿, 李琦. 多条件约束的建筑物立面点云语义聚类分割[J]. 应用激光, 2025, 45(3): 127-135.
- LIU D E, LI Q. Semantic clustering segmentation of building facade point clouds under multi-constraint conditions[J]. Applied Laser, 2025, 45(3): 127-135.
- [20] 刘建兴, 胡全一, 乐美燕, 等. 直线段检测算法在机载 LiDAR 建筑物轮廓线提取中的应用[J]. 测绘通报, 2023(10): 145-149.
- LIU J X, HU Q Y, LE M Y, et al. Application of line segment detection algorithm in building contour extraction from airborne LiDAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10): 145-149.
- [21] 李恒源, 季民, 李婷, 等. 一种基于点云数据的单木几何参数提取方法[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(8): 97-102.
- LI H Y, JI M, LI T, et al. A method for extracting geometric parameters of single trees based on point cloud data[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(8): 97-102.
- [22] ILYAS M, LAKSHMANAN AK, LE AV, et al. Staircase recognition and localization using convolutional neural

network (CNN) for cleaning robot application [J].
Mathematics, 2023, 11(18): 3964.

作者简介



黄军芬, 1998 年于吉林工业大学获得学士学位, 2001 年于吉林大学获得硕士学位, 2005 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京石油化工学院副研究员, 主要研究方向为自动化焊接装备与工艺、医学康复机器人技术、机器视觉检测技术。

E-mail: huangjunfen@bipt.edu.cn

Huang Junfen received her B. Sc. degree from Jilin University of Technology in 1998, M. Sc. degree from Jilin University in 2001, and Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2005, respectively. Now she is an associate researcher in Beijing Institute of Petrochemical Technology. Her main research interests include automated welding equipment and technology, medical rehabilitation robotics, and machine vision

inspection technology.



曹莹瑜(通信作者), 2002 年于北京石油化工学院获得学士学位, 2006 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 2017 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京石油化工学院副教授, 主要研究方向为医学康复机器人技术、机器视觉检测技术及特种机器人控制技术。

E-mail: caoyingyu@bipt.edu.cn

Cao Yingyu (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Beijing Institute of Petrochemical Technology in 2002, M. Sc. degree from Beihang University in 2006, and Ph. D. degree from Beihang University in 2017, respectively. Now she is an associate professor in Beijing Institute of Petrochemical Technology. Her main research interests include medical rehabilitation robotics, machine vision inspection technology, and special robot control technology.