

基于2D激光雷达的SLAM算法研究综述

沈斯杰¹, 田昕², 魏国亮², 袁千贺¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 移动机器人导航功能的实现需要同时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)和路径规划这两方面的技术, 其中由SLAM技术生成的栅格地图是移动机器人运用路径规划算法的前提。2D激光SLAM由于其建图精度高、性能稳定且价格便宜, 在室内移动机器人中应用十分广泛。2D激光SLAM是指移动机器人在自身所处环境及位置先验信息未知的情况下, 以2D激光雷达为主要传感器, 感知周围环境信息, 从而实现自身位姿的估计和地图的构建。将2D激光SLAM分为两部分, 第一部分从激光测距原理入手, 对三角法和飞行时间法进行了详细介绍和优缺点比较。第二部分从前端扫描匹配、后端优化、回环检测和地图构建这四个方面分别详细阐述了2D激光SLAM系统框架。同时对主流2D激光SLAM算法进行了深入分析和优缺点比较, 并对激光SLAM未来的发展进行了展望。

关键词: 2D激光SLAM; 前端扫描匹配; 后端优化; 回环检测; 地图构建

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2022)01-0013-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2022.01.003

Review of SLAM Algorithm Based on 2D Lidar

SHEN Si-jie¹, TIAN Xin², WEI Guo-liang², YUAN Qian-he¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The realization of mobile robot navigation needs simultaneous localization and mapping (SLAM) and path planning. The grid map generated by SLAM technology is the premise of mobile robot using path planning algorithm. 2D laser SLAM is widely used in indoor mobile robots because of its high mapping accuracy, stable performance and low price. 2D laser SLAM means that mobile robot uses 2D laser radar as the main sensor to sense the surrounding environment information when its own environment and location prior information are unknown, so as to realize its own pose estimation and map construction. The 2D laser SLAM is divided into two parts. In the first part, starting from the principle of laser ranging, the triangle method and time-of-flight method are introduced in detail and their advantages and disadvantages are compared. In the second part, the framework of 2D laser SLAM system is described in detail from four aspects: front-end scanning matching, back-end optimization, loop detection and map construction. At the same time, the main 2D laser SLAM algorithms are analyzed and compared, and the future development of laser SLAM is prospected.

Key words: 2D laser SLAM; front-end scanning matching; back-end optimization; loop detection; map construction

0 引言

随着人口老龄化日益严重和用人成本的上升, 移动机器人在生活中出现的频率越来越高, 如高端酒店中的迎宾机器人、疫情期间医院中的消毒机器人和抢险救灾的救援机器人等。在移动机器人众多应用场景中, 周围环境不是一成不变的, 有时候甚至是未知的。作为移动机器人在未知环境下实现自主导航的关键技

术, SLAM因此显得尤为重要。

SLAM可以分为两大类: 基于相机的视觉SLAM^[1-4]和基于激光雷达的SLAM^[5-8]。视觉SLAM对光的依赖度高, 在暗处或无纹理区域运行效果较差, 而激光SLAM可以在较差的光照条件下运行, 并且配合其他传感器可以直接生成用于机器人导航的环境地图。

收稿日期: 2021-02-28

修回日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873169)

作者简介: 沈斯杰(1997-), 男, 硕士, 研究方向为激光SLAM及多传感器融合; 魏国亮, 博士, 教授, 研究方向为移动目标定位、机器人控制、视觉优化。

激光 SLAM 按适用空间可以分为 2D 激光 SLAM 和 3D 激光 SLAM^[9-12]。2D 激光 SLAM 是在二维平面内使用的 SLAM 方法,通过激光传感器获取机器人三个自由度的位姿信息及机器人所处的二维地图^[13]。同理,3D 激光 SLAM 是在三维空间中使用的 SLAM 方法,它可以得到六个自由度的位姿信息及三维地图。由于 2D 激光雷达在成本方面要低于 3D 激光雷达,并且在室内环境下,2D 激光 SLAM 的建图精度满足使用需求,所以在移动机器人领域得到了广泛的应用。因此,该文重点阐述了激光雷达的测距原理和 2D 激光 SLAM 的系统框架,并对主流的 2D 激光 SLAM 算法进行分析和比较。最后展望未来激光 SLAM 的发展方向。

1 激光雷达的测距方法

激光雷达作为移动机器人感知周围环境信息的主要工具之一,在机器人避障中起着十分重要的作用。目前,激光雷达主流的测距方法可以分为三角法与飞行时间法(time of flight)。

1.1 三角法

激光以一定的角度射向被测物体,反射光以一定的角度反射回光源旁的接收器,因为激光器和接收器间隔一段距离,所以不同距离的被测物体在接收器上的成像会在不同的位置。通过三角公式就可以计算出被测物体的距离,三角测距原理如图 1 所示。

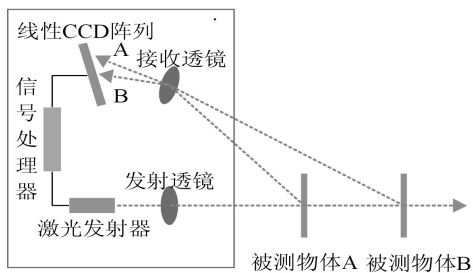


图 1 三角测距原理

1.2 飞行时间法

激光器发射一个激光脉冲,通过激光雷达中的计时器记录下发射的时间,反射光由接收器接收,通过计时器得到接收的时间。飞行时间通过接收时间与发射时间相减得到。由于光速已知,因此就可以计算出被测物体的距离,飞行时间测距原理如图 2 所示。

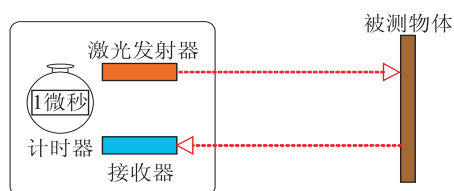


图 2 飞行时间测距原理

从测量距离、测量精度、抗强光能力和成本四个方

面对三角法与飞行时间法进行比较,如表 1 所示。

表 1 三角法与飞行时间法比较

测距方案	测量距离	测量精度	抗强光能力	成本
三角法	近	较高	弱	低
飞行时间法	远	高	强	适中

2 2D 激光 SLAM 的系统框架

2D 激光 SLAM 的系统框架主要可以分为:前端扫描匹配、后端优化、回环检测和地图构建。其中,回环检测不是必须存在的环节。前端扫描匹配是通过读取相邻两帧激光传感器扫描信息之间的关系来估计自身的位姿。后端优化是用来减少扫描匹配后产生的累积误差,并利用地图构建模块生成环境地图信息。回环检测则是通过检测当前位置的估计值和历史位置的估计值是否相同,来消除累积误差,从而减少地图漂移的现象。

2.1 前端扫描匹配

前端扫描匹配是实现同时定位与建图的基础。它可以分为:基于点的扫描匹配、基于特征的扫描匹配、基于数学特性的扫描匹配、基于相关性的扫描匹配和基于优化方法的扫描匹配。

2.1.1 基于点的扫描匹配

基于点的扫描匹配可以认为是对前后两帧激光点集进行匹配。其中,迭代最近点(ICP)的变种算法——PLICP(point-to-line ICP)^[14],由于其原理简单、易于实现被广泛使用。PLICP 与经典 ICP 相比,通过将点与点之间的距离改变成点到线之间的距离,从而加快求取闭合解的速度以及提高匹配精度。

2.1.2 基于特征的扫描匹配

基于特征的扫描匹配方法,其思想就是从激光扫描信息中提取点、线、面等元素进行匹配。Zhao 等人^[15]从扫描数据中提取隐函数作为特征,在具有闭合图形的场合下,具有优异的效果。针对传统的平面扫描匹配方法缺乏足够的边缘和角点特征,Zhao 等人^[16]提出基于二次曲线特征的匹配方法。

2.1.3 基于数学特性的扫描匹配

此类算法的核心是通过各种数学特性来描述帧与帧之间的位姿变化。正态分布变换(NDT)^[17]是基于数学特性的匹配算法中最为典型的。该算法将当前帧扫描到的 2D 平面离散为栅格,根据每个栅格上点的分布,计算出该栅格的概率密度函数。通过牛顿的优化方法求解出概率密度之和最大的变换参数,从而达到最优匹配结果。

2.1.4 基于相关性的扫描匹配

相关性扫描匹配由 Olson^[18]提出,首先构造似然

场模型,然后在指定的搜索空间内进行搜索,计算每个位姿的得分,最后根据位姿得分,计算本轮位姿匹配的方差。由于该方法使用暴力搜索,因此需要较长的匹配时间。不过,该方法可以结合分枝定界策略加速匹配。

2.1.5 基于优化方法的扫描匹配

将扫描匹配问题转换为非线性最小二乘问题,通过梯度下降的方式来求解,因此需要选择合适的初始位置,否则容易陷入局部极值。

目前,在 2D 激光 SLAM 中,相关性扫描匹配结合梯度优化是最主流的前端扫描匹配方法。

2.2 后端优化

SLAM 中的后端优化环节主要是减少扫描匹配所产生的累积误差。目前,可以分为两大类:基于贝叶斯滤波的后端优化方法和基于图优化的后端优化方法。

2.2.1 基于贝叶斯滤波器的后端优化

基于贝叶斯滤波的 SLAM 方法都是在马尔可夫假设的前提下进行的,即当前时刻机器人的状态只与当前时刻的测量值和上一时刻的状态相关,与其他时刻的无关。根据后验概率表示方法的不同,可以分为卡尔曼滤波和粒子滤波。滤波类方法最大的缺点就是无法建立大尺度地图,因为一旦当前时刻的估计出现偏差,偏差就无法消除,从而导致所建立的地图有错位的情况。

2.2.2 基于图优化的后端优化

基于图优化的 SLAM 方法则没有马尔可夫假设,当前时刻机器人的状态与之前所有的测量值都相关,图优化的系统框架如图 3 所示。所谓图优化,就是将图论的思想引入到 SLAM 的问题中。它将机器人的位姿表示成一个节点,相邻节点之间的弧表示空间约束关系,以此构成的图就是位姿图。通过调整位姿图中的节点以最大程度满足空间约束关系,从而获得机器人的位姿信息和地图。

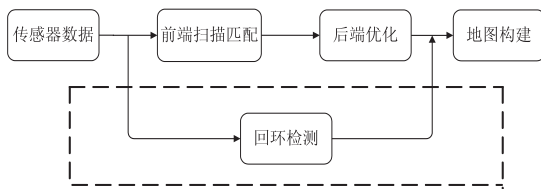


图 3 图优化的系统框架

2.3 回环检测

回环检测是指机器人通过传感器测量的数据检测到自己又回到之前来过的位置。这里可以借助控制科学中经典的反馈控制理论,来理解闭环检测在 SLAM 中的作用^[13],消除累积误差,从而改善建图效果。

2.3.1 帧与帧(scan-to-scan)的回环检测

Scan-to-scan 是利用 Olson^[18]所提出的相关性扫

描匹配,将两帧激光雷达数据通过相对平移和旋转角度进行匹配,从而达到回环检测的目的。然而,因为单帧激光数据包含的信息量太少,容易出现匹配失败的情况。

2.3.2 帧与子图(scan-to-map)的回环检测

将当前帧的激光雷达数据与子图进行匹配,该子图由一段时间内连续的激光数据帧构成。其中最具有代表性的是于 2016 年 google 提出的 cartographer^[19]算法,通过 scan-to-map 的回环检测方法,减少连续多帧激光雷达数据之间的冗余性,提高回环的效率。

2.3.3 子图与子图(map-to-map)的回环检测

Map-to-map 就是将当前连续时间内的激光数据帧构建成子图,与之前生成的子图进行匹配,从而改善单帧激光数据所含信息量少的问题。文国成^[20]所提出的 map-to-map 的回环检测方法,使用定位筛选和压缩表对回环候选集进行优化,在构建大尺度地图时,可以加快回环速度,降低回环出错的可能性。

2.3.4 特殊的回环检测

Olson^[21]提出一种基于多分辨率扫描匹配的方法,将当前激光数据帧和多分辨率地图进行匹配。该方法即使在位置不确定的场合下,也能通过枚举法找到最佳匹配。Yin 等人^[22]提出一种基于孪生神经网络的激光雷达点云半手工表示学习方法,在此基础上,进一步建立 KD 树,加速回环检测。

目前,在 2D 激光 SLAM 领域中,使用最多的回环检测方法是帧与子图之间的匹配,利用分枝定界法加速回环并且通过延时决策(lazy decision)降低回环出错的可能性。

2.4 地图构建

SLAM 所构建的地图是移动机器人实现自主导航与定位的前提与基础。地图可以分为:尺度地图、拓扑地图和语义地图。在 2D 激光 SLAM 中,主要针对尺度地图中的栅格地图和特征地图进行研究。

2.4.1 栅格地图

栅格地图是尺度地图中最为常用的一种。栅格地图是指将环境空间划分成一个个大小相等的栅格单元,每个栅格单元中含有被障碍物占据的概率值。如果栅格被占用,则概率值越接近于 1。当栅格中不含物体时,则概率值越接近于 0。若不确定栅格中是否有物体,则概率值等于 0.5。栅格地图具有高准确性并且能够充分反映出环境的结构特征,因此栅格地图可以直接用于移动机器人的自主导航与定位。

2.4.2 特征地图

特征地图又称为几何地图,一般由环境信息中提取到的点、线或圆弧等几何特征构成。当构建小场景地图时,特征地图占用的资源较少且建图精度尚可;当

构建环境较大的地图时,由于特征地图无法有效表现出真实环境中的详细信息,其建图精度会大打折扣,因此不适用于大场景建图。

3 主流的 2D 激光 SLAM 算法

主流的 2D 激光 SLAM 可以分为:基于贝叶斯滤波、基于图优化和基于高斯牛顿优化的激光 SLAM。

3.1 基于贝叶斯滤波的激光 SLAM

扩展卡尔曼滤波(EKF)被用来解决 SLAM 问题最早可追溯到 1987 年,通过联合状态向量来同时表示机器人的位姿和路标所处的位置。虽然 EKF SLAM 开创了将概率统计运用于 SLAM 上的先河,但是此方法存在着一些问题,如所占用的计算资源较大、算法稳定性较差和所建立的特征地图无法直接用于机器人的自主导航等。

基于粒子滤波器的激光 SLAM 方法对上述问题进行改善。2003 年, Montemerlo 等人^[23]提出 Fast SLAM1.0 算法,将 SLAM 问题分解成机器人位姿的估计和位置路标的估计,分别使用粒子滤波器和卡尔曼滤波器求解。但是粒子滤波器存在粒子退化的问题,为此 Fast SLAM2.0^[24]算法提出一种求取重要性函数的方法。为了继续优化 Fast SLAM, Gmapping^[25]于 2007 年被提出,它通过改进提议分布和选择性重采样,进一步改善粒子退化的情况,建图效果如图 4 所示。

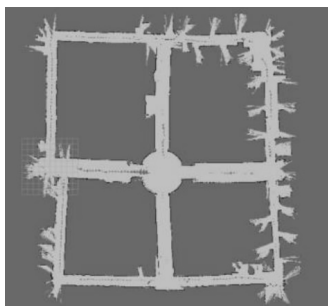


图 4 Gmapping 算法

由于每个粒子都携带机器人的轨迹和对应的环境地图,所以占用的计算资源较大。2010 年提出的 Core SLAM^[26],是一种只有 200 行代码的轻量化 SLAM 方法,因此性能损耗较小。

不管是基于卡尔曼滤波器还是粒子滤波器的 SLAM 算法,由于缺少回环检测,因此在构建大尺度地图时无法取得理想的效果。

3.2 基于图优化的激光 SLAM

图优化的思想在 SLAM 中的使用最早可追溯到 1997 年,其通过最小二乘法来解决前端匹配所产生的累积误差。由于没有考虑到矩阵稀疏性,当时采用矩阵求逆的方法来求解,只能离线使用,无法满足实时构

建地图的需求。1999 年, Gutmann 等人^[27]提出与当前相似的图优化框架,但仍忽视矩阵稀疏性。千禧年以后,随着研究者的深入探索,SLAM 中的矩阵稀疏性得以发现,使得高效求解成为可能。正是站在巨人的肩膀上,在 2010 年, Konolige 等人^[28]提出 Karto SLAM 算法。这是首个基于图优化的开源算法,利用高度优化和非迭代平方根法分解从而进行稀疏化解耦求解,建图效果如图 5 所示。但是该算法依然有不足之处,在回环检测部分,需要预先构建局部子图。

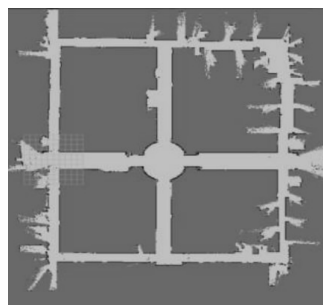


图 5 Karto 算法

一般的图优化方法都需要初始假设,即起始点经过多次迭代后得到局部代价函数的最小值。然而在 2011 年, Carlone 等人^[29]提出一种近似线性化的图优化 SLAM 方法。2016 年, Google 团队开源了 Cartographer^[19]算法,通过相关性扫描匹配结合梯度优化完成前端匹配,利用分枝定界法加速回环检测以及结合延时决策(lazy decision)降低回环出错的可能性,建图效果如图 6 所示。2020 年, Li 等人^[30]利用高斯过程(Gaussian process, GP)回归,提出了一种基于区域化 GP 地图重建算法的新型地图表示方法。该方法可以采用简洁的数学方法完成位姿估计和地图更新。

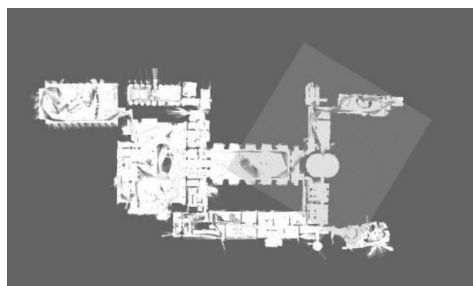


图 6 Cartographer 算法

3.3 基于高斯牛顿优化的激光 SLAM

2011 年, Kohlbrecher 等人^[31]提出 Hector SLAM 算法,该算法无后端优化部分且不需要借助额外的传感器,所以需要高更新频率且测量噪声小的激光雷达。Hector SLAM 将当前帧的激光雷达数据与子图进行匹配,通过高斯牛顿法进行位姿优化。为了避免陷入局部最优解,求得全局最优解, Hector SLAM 采取多分辨率地图的策略。此算法在旋转过快时,建图易发生漂移,建图效果如图 7 所示。

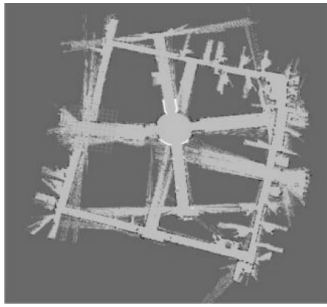


图 7 Hector 算法

目前,主流的激光 SLAM 算法的优缺点分析如表 2 所示。

表 2 激光 SLAM 算法的优缺点分析

算法名称	算法框架	优缺点
EKF SLAM	卡尔曼滤波	首个开源地图算法;计算量大,鲁棒性差,特征地图无法用于导航
Fast SLAM	粒子滤波	最早的实时输出栅格地图的算法;粒子退化
Gmapping	粒子滤波	改善粒子退化现象;严重依赖里程计,无法构建大尺度地图
Core SLAM	粒子滤波	占用内存资源少,建图偏差较大
Hector SLAM	高斯牛顿	不需要里程计;适用于空中或路面不平坦的环境;旋转过快易发生漂移;无回环
Karto SLAM	图优化	第一个基于图优化的开源 SLAM;无法实时构建子图,耗费时间
Lago SLAM	图优化	无需初始假设;占用计算资源较多
Cartographer	图优化	适用于低成本激光雷达;加速回环检测;实时性强;在几何对称环境中,易回环出错
GP SLAM	图优化	在中小型场景下,实时性强,建图精度较高;所构建的地图无法直接用于机器人导航

4 激光 SLAM 的发展趋势

激光 SLAM 的系统框架已经成熟,但是仍有很多工程应用问题有待解决,目前的发展趋势有以下三种:

(1) 多传感器融合。

在复杂环境下,多传感器融合是一种必然的趋势。李陆君等人^[32]提出将二维激光雷达与深度相机融合,从而提高传感器的抗干扰能力、探测范围和建图精度。陈志键等人^[33]针对室内定位中 UWB 存在非视距的影响以及激光雷达有误差累积问题,将 UWB 绝对定位技术和激光雷达相对定位技术相融合,提高定位准确度。

(2) 与深度学习的结合。

近些年,深度学习得到蓬勃的发展和广泛的关注

度。深度学习在特征提取和特征学习方面性能突出,不少研究者在 SLAM 中引入深度学习改善前端匹配与回环检测的性能。Wang 等人^[34]将深度学习用于激光里程计系统,提高预测位姿的鲁棒性与准确度。邹勤提出^[35]一种基于深度学习的激光 SLAM 回环检测方法,将 SLAM 回环检测的问题转化为 SLAM 数据样本的检索问题。

(3) 优化激光 SLAM 算法。

为了推动移动机器人在日常生活中的普及,需要进一步提升 SLAM 算法的稳定性和实时性,降低硬件成本。刘哲铭^[36]通过速度估计补偿法和里程计插值模型去除激光雷达中的运动畸变,提升前端扫描匹配的精确度。Zhang 等人^[37]提出一种新颖的序列数据处理流程,该方法有效减少了建图漂移现象,提升了系统的鲁棒性。Pang 等人^[38]通过对激光扫描数据进行分割,提取出特殊的边缘或角点特征,使其在低成本的设备下可以保持较高的建图精度。

5 结束语

文中主要对 2D 激光 SLAM 的系统框架和发展现状进行了概述,总结分析了主流 2D 激光 SLAM 算法,不难发现,基于图优化的激光 SLAM 将是未来的主流。若要进一步提高 SLAM 算法的实时性、鲁棒性和准确性,结合多传感器融合与深度学习技术符合当下的发展趋势。

移动机器人是人工智能的重要载体,而激光 SLAM 是机器人学中的关键技术,是实现机器人自主探索的基石。现如今激光 SLAM 技术的建图精度和硬件成本仍呈正比关系,相信在未来,随着激光 SLAM 技术的深入发展和硬件成本的降低,会出现低成本高精度的激光 SLAM 技术。到那时,越来越多的移动机器人会出现在人们的视野中,便利你我的生活。

参考文献:

- [1] 陈宇翔,王仁,张建.基于 RGB-D 相机的 SLAM 算法优化[J].计算机工程与设计,2020,41(5):1445-1451.
- [2] 陈兴华,蔡云飞,唐印.一种基于点线不变量的视觉 SLAM 算法[J].机器人,2020,42(4):485-493.
- [3] 朱鸣镝,陈婵.基于多特征融合的高鲁棒性视觉 SLAM 改进算法[J].智能计算机与应用,2020,10(2):23-28.
- [4] 胡年宗,伍世虔,张亦明.基于卷积神经网络的 SLAM 回环检测算法研究[J].计算机仿真,2020,37(5):282-286.
- [5] 丁元浩,吴怀宇,陈洋.基于 2D 激光扫描到子图匹配的 SLAM 方法[J].计算机工程与设计,2020,41(12):3458-3463.
- [6] 何松,孙静,郭乐江,等.基于激光 SLAM 和深度学习的语义地图构建[J].计算机技术与发展,2020,30(9):88

- 94.
- [7] 杨爽,曾碧,何炜婷.融合语义激光与地标信息的SLAM技术研究[J].计算机工程与应用,2020,56(18):262-271.
- [8] 吴正越,张超,林岩.基于RBPF的激光SLAM算法优化设计[J].计算机工程,2020,46(7):294-299.
- [9] 周光召,苑晶,高海明,等.结构化环境下基于结构单元软编码的3维激光雷达点云描述子[J].机器人,2020,42(6):641-650.
- [10] CHEN J, LIN G, FAN Y, et al. High-accuracy mapping design based on multi-view images and 3D LiDAR point clouds [C]//Proceedings of IEEE international conference on consumer electronics (ICCE). Las Vegas, USA: IEEE Press, 2020: 1-2.
- [11] 张天喜,周军,廖华丽,等.基于三维激光的图优化即时定位与建图策略[J].激光与光电子学进展,2019,56(20):201502.
- [12] 宋凯,钟若飞,杜黎明,等.3D SLAM的室内背包移动测量系统研究[J].测绘科学,2019,44(5):126-131.
- [13] 李博.GP-SLAM:基于激光雷达的新型同时定位与建图算法[D].杭州:浙江大学,2020.
- [14] ANDREA C. An ICP variant using a point-to-line metric [C]//Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). Pasadena, CA, USA: IEEE Press, 2008: 19-25.
- [15] ZHAO J, ZHAO L, HUANG S D, et al. 2D laser SLAM with general features represented by implicit functions [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4329-4336.
- [16] ZHAO J, HUANG S D, ZHAO L, et al. Conic feature based simultaneous localization and mapping in open environment via 2D lidar [J]. IEEE Access, 2019, 7: 173703-173718.
- [17] BIBER P, STRASSER W. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching [C]//Proceedings of IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453). Las Vegas, NV, USA: IEEE Press, 2003: 2743-2748.
- [18] OLSON E B. Real-time correlative scan matching [C]//Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). Kobe, Japan: IEEE Press, 2009: 4387-4393.
- [19] HESS W, KOHLER D, RAPP H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM [C]//Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). Stockholm, Sweden: IEEE Press, 2016: 1271-1278.
- [20] 文国成,曾碧,陈云华.一种适用于激光SLAM大尺度地图的闭环检测方法[J].计算机应用研究,2018,35(6):1724-1727.
- [21] OLSON E. M3RSM: many-to-many multi-resolution scan matching [C]//Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE Press, 2015: 5815-5821.
- [22] YIN H, DING X Q, TANG L, et al. Efficient 3D LIDAR based loop closing using deep neural network [C]//Proceedings of IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO). Macau, China: IEEE Press, 2017: 481-486.
- [23] MONTEMERLO M, THRUN S, ROLLER D, et al. FastSLAM: a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem [C]//Proceedings of AAAI national conference on artificial intelligence. Palo Alto, CA: AAAI Press, 2002: 593-598.
- [24] MONTEMERLO M, THRUN S, ROLLER D, et al. FastSLAM: an improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges [C]//Proceedings of the 18th international joint conference on artificial intelligence. Acapulco, Mexico: ACM Press, 2003: 1151-1156.
- [25] GRISETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1): 34-46.
- [26] STEUX B, HAMZAOU O. TinySLAM: a SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program [C]//Proceedings of the 11th international conference on control automation robotics & vision. Singapore, Singapore: IEEE Press, 2010: 1975-1979.
- [27] GUTMANN J, KONOLIGE K. Incremental mapping of large cyclic environments [C]//Proceedings of IEEE international symposium on computational intelligence in robotics and automation. CIRA '99 (Cat. No. 99EX375). Monterey, CA, USA: IEEE Press, 1999: 318-325.
- [28] KONOLIGE K, GRISETTI G, BURGARD W, et al. Efficient sparse pose adjustment for 2D mapping [C]//Proceedings of IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Taipei: IEEE Press, 2010: 22-29.
- [29] CARLONE L, ARAGUES R, BONA B, et al. A linear approximation for graph-based simultaneous localization and mapping [C]//Proceedings of robotics, science and systems VII. Los Angeles, USA: MIT Press, 2011: 41-48.
- [30] LI B, WANG Y, ZHANG Y, et al. GP-SLAM: laser-based SLAM approach based on regionalized Gaussian process map reconstruction [J]. Autonomous Robots, 2020, 44: 947-967.
- [31] KOHLBRECHER S, STRYK O, MEYER J, et al. A flexible and scalable SLAM system with full 3D motion estimation [C]//Proceedings of IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics. Kyoto, Japan: IEEE Press, 2011: 155-160.
- [32] 李陆君,张智,韩蕊,等.基于激光雷达和深度相机融合的视觉SLAM研究[J].智能计算机与应用,2020,10(8):87-92.
- [33] 陈志键,徐爱功,隋心,等.室内UWB/LiDAR组合定位