

移动机器人自主导航技术研究进展

田建林, 陈晓波, 张文昌, 王海龙, 吴德瑜

(国网甘肃省电力公司酒泉供电公司, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 自主导航技术是移动机器人的核心技术之一, 有力地推动了移动机器人产业发展。为帮助了解移动机器人导航技术发展与挑战, 推动移动机器人自主导航技术的技术交流与发展, 分析全球移动机器人市场现状, 阐述卫星导航技术、激光定位导航、视觉定位导航以及多源信息融合导航技术等常见自主导航方法与技术原理, 指出复杂环境所带来的空间复杂性与时间不确定性难题已成为移动机器人导航技术亟待突破的关键技术瓶颈, 预测未来移动机器人将在多导航融合应用, 与新兴技术结合以及多机协同技术方向发展, 以应对复杂多变的业务场景。

关键词: 移动机器人; 自主导航; 多源信息融合

中图分类号: TP242; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)07-0001-05

Research Progress on Autonomous Navigation Technology for Mobile Robot

TIAN Jianlin, CHEN Xiaobo, ZHANG Wenchang, WANG Hailong, WU Deyu

(Jiuquan Power Supply Company of State Grid Gansu Electric Power Company, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Autonomous navigation technology is one of the core technologies of mobile robots, which strongly promotes the development of mobile robot industry. In order to help understand the development and challenges of mobile robot navigation technology, and promote the technical exchange and development of autonomous navigation technology for mobile robots. This paper analyzes the current situation of the global mobile robot market, describes the common autonomous navigation methods and technical principles, such as satellite navigation technology, laser positioning navigation, visual positioning navigation and multi-source information fusion navigation technology. It points out that the spatial complexity and temporal uncertainty brought by complex environments have become the key technical bottlenecks that need to be broken through in the navigation technology of mobile robots, predicts that the future of mobile robot will be in the multi-navigation fusion application, the combination with emerging technologies and the multi-source information fusion technology, which will help to promote the development of the mobile robot industry. It is predicted that the future mobile robots will be developed in the direction of multi-navigation fusion, combination with emerging technologies and multi-machine synergy technology to cope with the complex and changing business scenarios.

Keywords: mobile robot; autonomous navigation; multisource fusion

0 引言

机器人作为人类生产生活的重要工具和应对人口老龄化的得力助手, 持续推动生产水平提高、生活品质提升, 有力促进经济社会可持续发展。中国作为全球最大的制造业生产国, 在“机器人+”应用行动实施方案、“十四五”机器人产业发展规划及中国制造2025等多项国家政策的助推下, 各行各业纷纷加速机器人升级换代的步伐。由此, 掀起了自动导向车(automated guided vehicle, AGV)与自主移动机器人(autonomous mobile robot, AMR)研究热潮, 而随着AGV/AMR技术的成熟, 其灵活、可靠、高效以及适应性强的特点受到越来越多企业的青睐。

机器人领域涉及到计算机、传感器、人机交互、仿生

学等多个学科, 其中环境感知、自主定位和运动控制是机器人三大核心技术。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)、视觉导航以及结合惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的组合导航技术是移动机器人走向市场的关键, 有力地推动了AGV/AMR产业的发展。然而, 遗憾的是还鲜有人将移动机器人的研究成果概括起来, 无疑是妨碍了移动机器人自主导航技术的技术交流与发展。基于此, 文中采用文献研究法对近年来移动机器人主要研究成果与应用情况进行了系统的梳理, 探讨了目前仍需进一步研究解决的问题, 指出了自主导航技术未来重点研究方向, 对我国AGV/AMR产业的健康发展有积极意义。

1 移动机器人研究与市场现状

移动机器人的研究可以追溯到1966年至1972年之间斯坦福研究院研制的Shakey,首次全面应用了人工智能技术,能够自主进行感知、环境建模、行为规划并执行任务^[1]。Shakey的成功证实了许多属于人工智能领域的严肃科学结论,为后续关于移动机器人的研究带来了较为深远的影响。相较于AGV通常只能沿着预设路线,依照预设的指令完成任务,且在任务执行过程中无法根据现场环境的变化而改变行为;移动机器人具备智能感知、自主路径规划、灵活避障、安全的人机协作等能力,能够应对复杂的现场环境变化,因此更智能、柔性、安全和高效。

在电子商务快速发展、劳动力稀缺、劳动力成本上升以及生产模式持续向柔性制造转型等因素的驱动下,新技术的加速迭代,新产品的不断涌现,全球及中国移动机器人市场总体保持强劲增长态势,且市场参与者众多。此外,移动机器人领域的投融资及并购也持续保持活跃。从市场规模来看,2022年,全球AGV/AMR行业仍旧保持了相对高速的增长,整体销售规模约为47.5亿美元,同比增长35.71%;销售数量为153 000台,同比增长27.5%^[2]。从全球市场分布来看,2022年,亚太地区市场份额超过一半,为AGV/AMR最大应用市场;第二大市场是美洲市场;欧洲为第三大市场。欧美市场得益于电商的蓬勃发展,仓储机器人迎来了高速发展期。预计未来5年内,北美仓储自动化市场将以9.6%的复合增长率增长,以应对劳动力不足问题。中国工业应用移动机器人(AGV/AMR)产业链相对较完善,近年来一直处于快速发展阶段。并且,受到了制造业自动化、服务业升级以及技术创新的推动。中国移动机器人行业市场规模呈现逐年上涨态势,2022年,中国移动机器人行业市场规模约为89.02亿元、产量约为44 900台^[3]。显然,市场对于AGV/AMR需求远未饱和,随着经济的逐步复苏以及更多新兴市场的开拓,到2030年,全球移动机器人市场规模有望达到200亿美元。

2 移动机器人自主导航方法

移动机器人导航是指移动机器人确定自身在地图参考系中的位置后,自动规划出通往地图参考系中某个目标位置路径并沿着该路径到达目标位置点的能力^[4]。那么,导航系统就要赋予移动机器人解决“我在哪儿?”、“要到哪儿去?”和“怎么去?”的问题。显然,这涉及到导航系统的定位跟踪、路径规划与运动控制。目前主要依托卫星导航技术、激光定位导航技术、视觉定位导航技术以及多源信息融合导航技术来实现移动机器人的自主移动。

2.1 卫星定位导航技术

GNSS是通过观测卫星获得坐标系内绝对定位坐标的测量技术,凭借其高精度、全天候的特点,广泛应用于室外大场景的移动机器人领域^[5-6]。中国北斗导航卫星系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)就是世界四大GNSS典型代表之一。当前,GNSS多依托以载波相位观测为依据的实时动态差分技术(real-time kinematic, RTK)来满足机器人厘米级定位需求,也正是因其高精度、高速度、高稳定性使得RTK-GNSS导航技术广泛应用测绘、无人机、车载、安防等领域。但是,在城市、偏远山区、果园等卫星信号容易受到干扰或遮挡的环境中,无法稳定接收卫星信号,往往不能精确地完成导航任务^[5]。由此,GNSS机器人往往需要结合IMU构建惯性导航系统(inertial navigation system, INS)来提高GNSS的鲁棒性。

姜宽舒等^[7]通过安装RTK-BDS天线和电动方向盘,利用角度传感器和位置传感器,配合PID模糊控制导航算法,在水田作业试验中,转弯和直行时偏离航道的最大误差分别为10.2 cm、5.1 cm;Huang等^[8]设计了RTK-BDS与INS集成导航系统,并采用卡尔曼滤波算法融合机器人角速度、加速度以及北斗位置和速度等信息,实时计算出机器人的精确位置、速度和姿态,在开阔路面上实现发现:位置误差小于3 cm、方位角误差小于0.6°、倾角误差小于1°。说明RTK-BDS/INS集成导航系统定位精度高、抗干扰性强、技术成本低,是机器人导航系统的可靠途径。同时,也暴露出单一的RTK-GNSS在高精度定位需求领域还是存在一定的缺陷。

2.2 激光定位导航技术

激光定位主要是指通过激光雷达来实现机器人在环境中的定位技术。LiDAR通常是利用三角测距法、时间飞行法(time of flight, ToF)和调频连续波法(frequency modulated continuous wave, FMCW)来实现周围物体与激光传感器之间的距离测量,从而获取环境中的几何信息^[6]。根据激光发射器数量的不同,可以分为单线激光雷达(2D激光雷达)和多线激光雷达(3D激光雷达)。而且,通常情况下,激光定位技术首先需要通过对环境的同时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术来建立地图,并在地图中规划作业路径,然后在作业时通过实时扫描与地图的匹配程度来获取自己在地图中的位置,从而实现机器人实时定位。

(1) 2D激光定位技术

2D SLAM发展较早,已经发展出了如Gmapping, Hector, karto, Cartographer等诸多有名的开源算法框架^[9],尤其是由Google开源的Cartographer实现了算法性能、稳定性、功能完整性、可抑制性等多个方面的统一。近年来,在2D SLAM领域出现了相对成熟的Life-Long SLAM技术,实现了建图与定位的统一^[10],并且在定位的过程中可以

实时地修正地图,克服了环境动态变换引起的地图偏差问题^[11]。

何佳泽等^[12]设计了阈值重采样函数对传统RBPF-SLAM算法进行优化,解决了构建地图存在重影的问题; Zhang等^[13]设计了基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)平台的双激光雷达导航系统,采用图优化的2D-SLAM方法构建环境地图,再通过粒子滤波算法进行系统定位,实现了2 cm的导航精度和4 mm的平均可重复导航精度。

(2) 3D激光定位技术

3D激光雷达通过发射多束激光测量其与未知环境中物体的几何信息,获取包含精准的距离和角度信息的点云数据,体现三维空间结构信息^[14]。而且线数越多获得的激光点个数越多,对环境结构的描述也更清晰^[15]。3D激光定位技术的发展相对滞后于2D,2014年Ji Zhang^[16]提出激光雷达测距和测绘(liDAR odometry and mapping, LOAM)点云配准算法,兼顾了SLAM建图的速度和精度。其提出的特征点配准方法启发了大量后续研究者,代表性的有LeGO-LOAM、LIO-SAM等^[17]。同时,随着多线激光雷达的量产和普及以及嵌入式处理器功耗降低和算力增强,基于迭代最近点(iterative closest point, ICP)的一些衍生型点云配准算法(如G-ICP、VGICP等)也得到了发展,使得3D激光雷达开始走向低成本、低功耗和高可靠性的应用^[15]。

Zhou等^[18]提出一种基于随机森林算法的三维激光点云户外移动机器人位置识别导航方法,通过使用KITTI数据集的广泛评估以及户外环境的真实场景验证了该方法; Vaclav Pritzl等^[19]一种利用3D激光雷达测距相对定位的伴随无人机对微型飞行器协同导航的新方法,激光雷达数据用于无人机之间的无标记相对定位,以便在激光雷达SLAM的参考系中精确引导辅助无人机。

2.3 视觉定位导航技术

视觉传感器具有价格低、体积小和纹理信息丰富的特点,在SLAM技术的研究中占有很重要的地位^[20]。同样地,视觉定位技术也需要依托SLAM技术来建立地图。根据传感器类型将视觉SLAM算法分为纯视觉SLAM、RGB-D SLAM和视觉惯导SLAM三类^[21]。纯视觉定位指仅依靠单(双)目相机形成二维图像来估计自身位姿,存在较高的位姿估计累计误差并在复杂光照、纹理缺失的场景下可能失效^[22]。相较于基于激光雷达的SLAM算法,纯视觉算法由于视野、尺度估计等硬件极限问题,其精度和鲁棒性上尚无法和雷达达到同一水准。由此,诞生了增加IMU形成视觉惯导SLAM(visual-inertial SLAM, VI-SLAM)技术来有效解决纯视觉定位存在的不足^[23-25]。另外,RGB-D相机以较低的成本、较高的测量精度和较快

的测量速度在制图、三维重建、室内机器人、手势识别、物体的检测和识别等领域广泛应用^[26-27]。

贺军义等^[28]提出一种双目视觉辅助计算行人死亡人数(pedestrian dead reckoning, PDR)的组合导航定位方法,有效解决室内复杂环境下单一PDR累积误差问题;刘义亭等^[29]提出了一种利用农作物行特征辅助进行的视觉导航方案,解决了环境光照对导航路径的影响,实现了农业机器人田间自主导航;Liu Chenxin等^[30]基于ORB-SLAM2提出了一种实时精确的DFR-SLAM,显著提升了动态场景的适应能力;韩彦峰等^[31]改进RGB-D ORB-SLAM2算法,构建出精确的稠密点云地图并转换为八叉树地图,满足了高精度、快速性的导航需求。

2.4 多源信息融合定位导航技术

GNSS是一种绝对位置的定位技术,无累计误差,但卫星信号易受到高层建筑物、大树等遮挡物的干扰,进而影响到定位系统的稳定性;激光定位技术测量距离远,易产生累计误差、成本高;视觉定位技术成本低廉、信息量丰富,但是容易受到环境光照的影响,系统鲁棒性稍差;IMU可感知机器人自身运动,并凭借其低成本和轻量化获得了市场的青睐,但IMU测量同样存在较大的累计误差和零偏不确定性^[32]。由此,现有的主流技术方法试图从多传感器、多特征和多维度信息融合3个层次来解决或改善单一定位技术存在的不足,并将此类方法称为多源信息融合方法。“视觉+IMU”、“激光雷达+IMU”和“视觉+激光雷达+IMU”等融合方式已经成为当下AGV/AMR主流的定位导航方法。

林雪原等^[33]提出一种基于无迹卡尔曼滤波(unscented kalman filter, UKF)的多传感器最优融合算法,不仅有效提高GNSS/CNS/SINS组合导航系统的导航精度,还可提高系统解算的实时性;周维超等^[34]针对不同场景需要调整相应传感器的置信度问题,提出了一种自适应紧耦合的激光雷达与相机融合SLAM算法——AVLS,并证明了其鲁棒性和精确度可以达到目前领先水平。而且,越来越多的研究者将注意力集中在了多源信息融合定位导航技术上,并取得了一定的突破,并有效推动了AGV/AMR产业的发展。

3 当前面临的主要问题

自主定位导航是移动机器人自主行走核心的技术之一,在落地实践中面临着多项挑战。涉及环境感知、决策规划以及控制执行等多层架构。而且,移动机器人的工作环境不是一成不变的。例如,人群、动态障碍物、非结构化等特定的环境会随着时间的变化而改变环境状态,由此带来了时间不确定性的难题。另外,在狭窄、杂乱、

大尺度等空间复杂性场景中也会增加技术难度。也就是说,复杂环境所带来的空间复杂性与时间不确定性难题已成为移动机器人导航技术亟待突破的关键技术瓶颈。

(1) 动态环境适应性有待提高

环境的时间不确定性源自时间推移所带来的环境状态变化,如天气、光照等因素带来的物体特征变化,以及物体移动带来的空间位置变化。例如商场人员活动,会大幅度改变现有的移动机器人工作环境,从而使得移动机器人无法正常稳定执行工作^[35]。这就对局部规划算法提出了更高的要求,需要在动态物体建模、避障策略生成方面做出进一步的改进,以应对时间不确定性带来的诸多干扰。

(2) 空间复杂环境应用有待进一步优化

狭窄、杂乱等复杂环境会限制部分全局规划算法对可行解的获取,不可避免地使得相关建模精度下降,进而影响到性能。栅格地图分辨率过低、采样数量不足均会导致对狭窄通道区域的建模失败,从而造成空间连通性缺失,也就无法寻得可行解。那么,在实时性与硬件性能的限制下,如何尽可能少地采样数量来保留更多的空间信息成为解决空间复杂性难题的有效途径。虽然在多年的研究努力下,已有多种改进方法在理论与实践过程中被证明具备较好的建模精度,但在实际产品应用过程中还需进一步优化,以提升系统稳定性与鲁棒性。

4 结束语

移动机器人的发展经历了依赖外部标记物、按照固定路径行驶的AGV阶段,到无须外部标记物、可实现自主导航与路径规划的AMR阶段。当前,移动机器人产业正处于快速发展阶段,在制造业、物流、新零售、商业服务、医疗大健康、公共安全等领域已有大量的应用落地。未来,移动机器人将在多导航融合应用,与新兴技术结合以及多机协同技术方向发展,以应对复杂多变的业务场景。

(1) 多导航融合应用,应对复杂多样环境

移动机器人主要依赖于SLAM技术实现自主导航,而SLAM主要有激光SLAM和视觉SLAM两种解决方案。随着业务场景的复杂程度的进一步加大,单一的导航技术将暴露出自身的局限性,难以适应复杂场景的需要。由此,多导航融合应用是应对复杂环境定位导航的重要举措。

(2) 与新兴技术紧密结合,实现性能优化和增强

将大数据、5G、边缘计算和云计算等新兴技术应用于移动机器人的研发,可有效实现性能的优化与增强。大数据技术可以对移动机器人收集的数据进行处理和分析,发现规律与趋势,从而提升移动机器人的性能与效率。而且,将移动机器人与边缘计算、云计算技术相结

合,不仅能充分利用边缘端和云端算力,也能使移动机器人能够在不牺牲精度的前提下,降低构建和更新大规模地图的时间和成本。

(3) 群体智能与多机协同调度将成技术发展方向

伴随着机器人的大规模部署,自动化程度的不断提高。未来的机器人应用场景中,在同一环境下,成百上千台机器人规模化集群作业以及与人类协同作业将成为必然。如何融合人工智能技术,以群体智能为抓手,以智能算法驱动实现多机高效协同与更安全的人机协作,从而满足复杂环境与工况下的作业要求,将成为移动机器人技术发展的重点。

参考文献:

- [1] VERGINIS C K, DIMAROGONAS D V. Adaptive robot navigation with collision avoidance subject to 2nd-order uncertain dynamics[J]. *Automatica*, 2021(123): 109303.
- [2] 中商产业研究院.2024-2029全球及中国自主移动机器人行业发展现状调研及投资前景分析报告[R/OL].(2024-04-14)[2024-05-23]. <https://max.book118.com/html/2024/0412/5314133113011141.shtm>
- [3] 北京智研钧略咨询有限公司.2023-2029年中国移动机器人(AGV)行业发展战略规划及投资方向研究报告[R/OL].(2023-09-14)[2024-05-23].https://it.sohu.com/a/720347167_121395046
- [4] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 1-22, 55.
- [5] 杨涛, 李晓晓. 农机自动驾驶系统研究进展与行业竞争环境分析[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(11): 222-231.
- [6] 马振兴, 李真娣, 杜帅, 等. 基于北斗定位技术的输电线路智能巡检系统[J]. *自动化技术与应用*, 2024, 43(6): 120-123, 165.
- [7] 姜宽舒, 高菊玲, 于泓, 等. 基于北斗-RTK的无人插秧机自动导航关键技术应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(10): 187-190.
- [8] HUANG Y, FU J, XU S, et al. Research on integrated navigation system of agricultural machinery based on RTK-BDS/INS[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1169-1183.
- [9] 周旭龙, 赵言正, 杨玥旻. 室内移动机器人自主定位导航系统设计[J]. *中国民航大学学报*, 2020, 38(5): 55-59.
- [10] ALI W, LIU P, YING R, et al. A life-long SLAM approach using adaptable local maps based on rasterized LIDAR images[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21740-21749.
- [11] 翁嘉鑫, 何坚强, 陆群. 基于ROS平台的移动机器人自主导航技术研究[J]. *自动化技术与应用*, 2023, 42(4): 5-8.
- [12] 何佳泽, 张寿明. 2D激光雷达移动机器人SLAM系统研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(4): 35-39.
- [13] H. Z, L. Y, S. F. Design of dual-Lidar high precision natural navigation system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 7231-7239.
- [14] 周治国, 曹江微, 邸顺帆. 3D激光雷达SLAM算法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(9): 13-27.
- [15] 缪文南, 周政, 陈雪娇, 等. 全向轮移动机器人的视觉目标跟踪研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(7): 52-56.

(下转第55页)