

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.09

轮式移动机器人自主导航计量评价现状

姜延欢, 杨永军, 李新良, 吴娅辉, 刘渊, 田森

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 自主导航是评价轮式移动机器人智能化程度的核心指标, 但是目前轮式移动机器人自主导航性能的计量评价仍处于起步阶段, 计量评价指标体系和评价方法严重缺失。本文介绍了现有轮式移动机器人自主导航的架构及路径规划算法, 分析了轮式移动机器人自主导航的性能指标, 归纳国内外轮式移动机器人自主导航计量评价领域的研究现状。在此基础上, 总结轮式移动机器人计量评价技术的关键技术难点, 推进轮式移动机器人计量评价技术的发展。

关键词: 移动机器人; 自主导航; SLAM; 路径规划; 计量评价

中图分类号: TB9; TJ06

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0081-06

Status of Metrological Evaluation for Autonomous Navigation of Wheeled Mobile Robot

JIANG Yanhuan, YANG Yongjun, LI Xinliang, WU Yahui, LIU Yuan, TIAN Sen

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Autonomous navigation is the core index to evaluate the intelligent degree of wheeled mobile robot, but the metrological evaluation of autonomous navigation performance is still in its infancy, and the metrological evaluation index system and evaluation method are seriously missing. This paper investigates the existing wheeled mobile robot autonomous navigation architecture and path planning algorithm, analyzes the performance index of wheeled mobile robot autonomous navigation, and summarizes the research status of autonomous navigation metrological evaluation for wheeled mobile robots. On this basis, the key technical difficulties of metrological evaluation technology for wheeled mobile robot are summarized to further promote the development of metrological evaluation technology for wheeled mobile robots.

Key words: mobile robot; autonomous navigation; SLAM; path planning; metrology and evaluation

0 引言

智能移动机器人是当代高端智能装备和高新技术的突出代表, 对制造业的快速发展至关重要, 已成为衡量国家核心竞争力的重要标志。目前很多发达国家已将推动智能移动机器人技术发展作为国家战略, 以增强国家的整体实力。对于我国而言, 随着中国制造2025、互联网+、国家大数据、机器人产业发展规划等国家战略的提出, 智能移动机器人技术将得到快速的发展和推广。

轮式移动机器人因具有能源利用率高、结构简单、控制方便、可在平面上快速稳定移动等优点, 已在工厂、办公室、仓库、战场等场景得到广泛使用。自主导航是轮式移动机器人的关键性能, 即通过环境感知确定其在地图中的位置、规划到达目标位置的路径并通过向执行器发送必要的命令确保移动机器人避开静态及动态障碍物。

在民用领域, 自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)被大量应用于智能物流、工厂等场景, 据国际机器人联合会统计, 2014年全球用于物流的自动导向车辆系统安装数量约为2564个, 2015~2018年已达到13300个^[2]。世界主要汽车厂商在自动驾驶方面开展了大量研究, L4等级的自动驾驶技术已呼之欲出^[3]。在军用领域, 美军研制的班组任务支援系统、以色列的“守护者”等轮式移动机器人均已实现精确的自主导航能力, 并实现战场废墟、隧道等不同场景下的精确定位和导航, 可出色完成各种作战任务。俄罗斯研发的“暗语”轮式机器人实现了多台设备与无人机协同作战。

相较于轮式移动机器人的快速发展, 与之相对应的计量评价标准却非常滞后。目前, 移动机器人相关计量评价指标的侧重点仍比较传统, 例如ASTME 2801-11, ASTM E2802-11等, 仅关注移动机器人地面间隙、障碍物等情况的计量评价, 但是涉及移动机器人

核心的“智能”项目(如自主导航等)的计量评价技术仍处于空白。轮式移动机器人计量评价标准的缺失,导致轮式移动机器人的发展良莠不齐。同时,由于相关标准的缺失,使我国轮式移动机器人产品在出口时无法完全满足国外的检测要求,限制了智能移动机器人的对外贸易。因此,亟需开展轮式移动机器人相关计量评价标准研究,推动轮式移动机器人产业的高质量发展。

1 轮式移动机器人自主导航技术发展现状

近年来,随着智能传感和人工智能算法的快速发展,国内外轮式移动机器人的自主化、智能化性能得到很大提升,但是距离完全实现自主化仍有很大差距。这主要是由于两个原因引起的:一方面是由于传感器及算法导致所构建的环境地图的准确度低,无法实现移动机器人的准确定位;另一方面则是由于目前路径规划算法的智能化程度不高,复杂环境下往往会出现路径局部最优甚至无法规划出路径的问题。

1.1 SLAM 技术发展现状

同步定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技术是轮式移动机器人实现导航及定位的核心框架,了解不同 SLAM 的关键技术问题,实现轮式移动机器人计量评价技术的分解,在此基础上,实现不同技术架构下轮式移动机器人自主导航计量评价指标体系的构建,对轮式移动机器人计量评价的开展具有重要的意义。

自上世纪 70 年代起,学者们针对移动机器人的自主导航开展了大量研究,超声波导航定位、光反射导航定位(包括激光及红外传感器)、GPS 全球定位系统、视觉导航定位等技术在移动机器人导航领域得到了广泛的应用。目前,SLAM 是最主要的轮式移动机器人导航技术,主要用于解决移动机器人在未知环境中运行时的定位导航与地图构建问题。随着人工智能技术和硬件计算能力的快速发展,移动机器人 SLAM 技术的发展呈现出多元化趋势,除了传统的激光 SLAM,近年来基于视觉和视觉惯性融合的 SLAM 技术也得到了飞速发展。

1.1.1 激光 SLAM

激光 SLAM 是一种相对复杂的 SLAM 解决方案,目前已在农业、医疗、消防等领域得到广泛应用,并取得了很好的效果。

为了克服单一传感器的技术缺陷,移动机器人往往通过多传感器融合算法获取更加全面的信息,虽然多传感器融合算法能够有效提升移动机器人的导航及定位精度,但是计算过程复杂,引入的不确定性也更

多。激光 SLAM 主要通过激光雷达获取周围环境的点云数据以实现环境信息的感知,同时结合里程计等传感器信息构建准确的环境地图,进而结合路径规划等算法及相应的执行器实现移动机器人路径的导航(如图 1 所示)。目前市场上的移动机器人主要采用基于滤波器的 SLAM(包括 EKF-SLAM, Fast-SLAM, Gmapping 和 Optimal RBRF 等)和基于图优化的 SLAM(包括 Karto SLAM, Cartographer 等)^[8]。其中,基于图优化的 SLAM 精度更高,且适用于大尺寸环境地图的构建,但是该方法对硬件算力的依赖程度高,实现难度也更大。

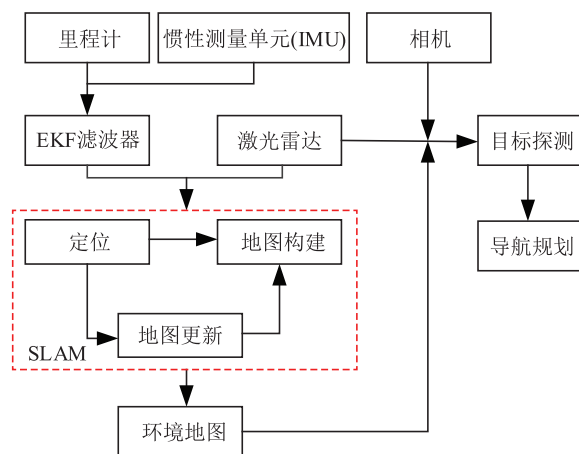


图 1 基于激光 SLAM 技术的导航流程

基于激光 SLAM 构建的地图较为简单(如图 2 所示),导致机器人无法获取更为详细的环境信息,限制了移动机器人智能化的提升。

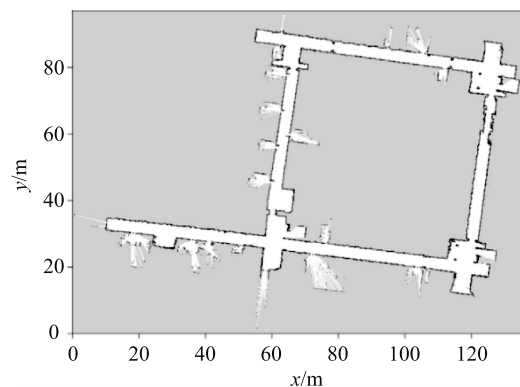


图 2 激光 SLAM 构建的地图

1.1.2 视觉 SLAM

视觉 SLAM 主要分为单目、双目和 RGB-D SLAM 方法。单目 SLAM 仅采用一个摄像头,具有方法简单、成本低廉的优点,但是由于不能准确获取深度信息,存在尺度不确定的问题。双目相机在一定程度上能够克服单目相机的缺点,可以通过双目测距原理得到图

像的深度信息，获得精度更高的测距结果，但是对两个镜头的安装位置和距离有更高的要求，并直接影响相机的标定结果。RGB-D 相机主要通过红外结构光或 Time-of-Flight 原理，直接测得图像中各像素与相机之间的距离，相较传统相机能够提供更丰富的信息，也不必像单目或双目 SLAM 那样费时费力地计算深度。许多视觉传感器本身具有视觉里程计，具有鲁棒性高、精确性好和易于实现的特点。视觉 SLAM 的技术架构如图 3 所示。

相较于激光 SLAM，视觉 SLAM 能够为轮式移动机器人提供更加全面的信息。视觉 SLAM 主要通过安装在移动机器人上不同位置、不同类型的相机获得场景的空间信息，并通过一系列的图像处理及空间建模得到场景的空间地图(如图 4 所示)。但是由于相机自身参数感知存在局限性，为实现轮式移动机器人的高精度自主导航，需要研究如何构建准确可靠的环境地图，并研究视觉 SLAM 系统的科学评价方法。例如在多摄

像机系统中，大多数虚拟空间光调制器系统需要摄像机标定参数，包括摄像机固有参数和不同摄像机之间的对准参数，这就对精确估计这些标定参数的方法提出了要求。然而，从各种环境中检索图像和地面，估计几个传感器之间的校准参数和标注有用的标签都需要繁琐的人工劳动，并且会不可避免地引入误差。

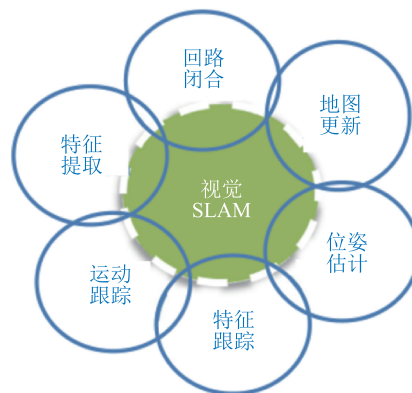


图 3 视觉 SLAM 技术架构

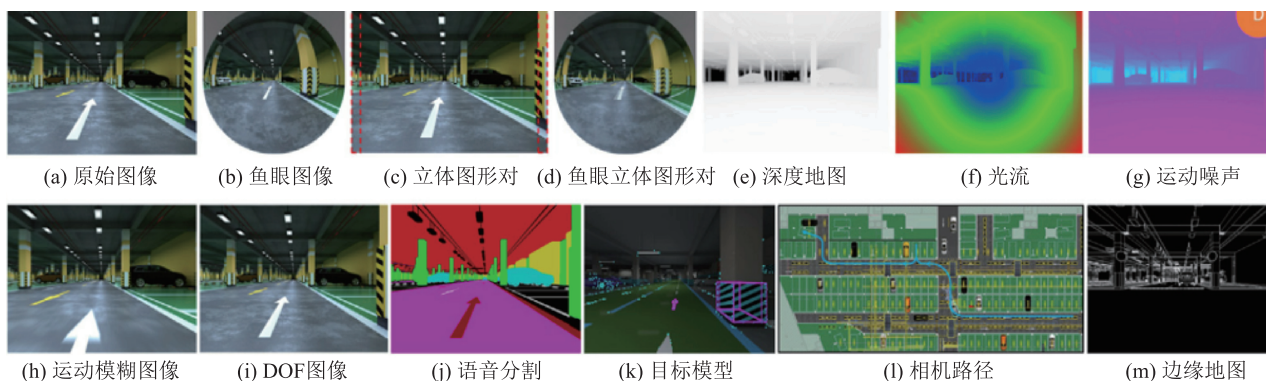


图 4 视觉 SLAM 的建图流程^[11]

1.2 路径规划算法发展现状

轮式移动机器人自主导航算法是其实现自主导航及准确定位的核心，要实现轮式移动机器人自主导航性能的计量评价，就需要对其算法进行深入的分析和研究，提炼出合理的计量评价指标。

基于对移动机器人全面的调研，B. K. 等人^[12]将现有的轮式移动机器人的路径规划算法分为经典方法 (Classical Approachs) 和反应式方法 (Reactive Approachs) 两类(如图 5 所示)。整体而言，路径规划算法的发展与移动机器人硬件的发展是相辅相成的，随着计算算力的不断提升，算法的复杂程度和智能化程度也不断提升。

轮式移动机器人早期的路径规划算法主要基于路线图法 (Roadmap Approach)、人工势场法 (Artificial Po-

tential Field) 等经典方法，但是这些算法存在计算强度大、陷入局部极小、无法处理最大不确定性、需要关于环境的精确信息、实时导航需要精确的传感机制等问题。相较于经典方法，遗传算法 (Genetic Algorithm)、布谷鸟搜索算法 (Cuckoo Search Algorithm)、神经网络 (Neural Network) 等反应式方法往往会有更好的处理结果，这主要是因为反应式方法能够更好地处理环境中存在的不确定性问题，因此也更适用于实时导航。

随着统计分析方法及机器学习研究的不断深入，基于深度学习的建模方法不断完善，基于神经网络技术的路径规划成为学者们的研究热点。结合移动机器人研制过程中产生的大量的试验数据，神经网络技术能够确保模型形式和阶次均不确定条件下的路径规划建模的准确性，其技术实现方法如图 6 所示。

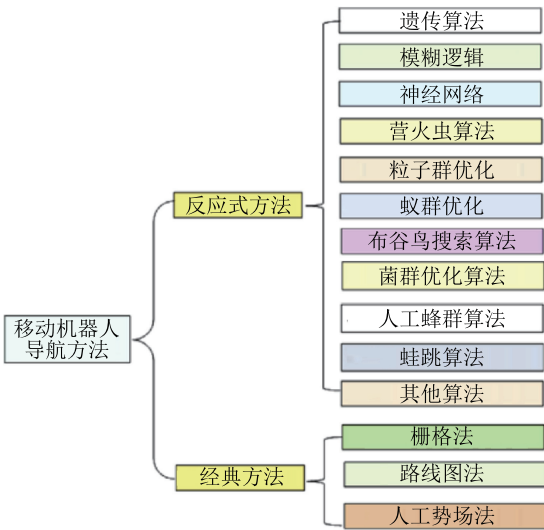


图 5 移动机器人导航算法分类^[12]

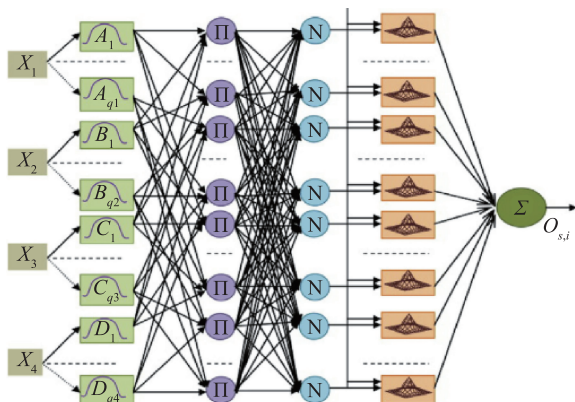


图 6 基于神经网络的路径规划方法^[13]

2 轮式移动机器人自主导航计量评价技术研究现状

轮式移动机器人的自主导航涉及感知、决策、响应等多个环节，研究如何实现轮式移动机器人自主导航的计量和评价具有重要意义。目前，学者们更多地聚焦于轮式移动机器人自主性的实现及评估，对于轮式移动机器人自主导航测试的研究相对较少，造成这种现象的主要原因是目前尚未对轮式移动机器人自主导航性能指标进行分解，也尚未形成专业、统一的计量评价方法。

2.1 轮式移动机器人自主导航性能指标

“美国 DARPA 无人车挑战赛”以任务完成度和完成时间为标准对无人车的自主导航进行评价；“中国智能车未来挑战赛”以 4S 即安全性 (Safety)、智能 (Smartness)、平稳性 (Smoothness) 和速度 (Speed) 标准评价无人驾驶车辆完成测试任务情况，以完成时间、考点

得分和人工干预对无人车进行综合打分评测，并且对无车人在直道无障碍情况下的最小速度提出了要求。

哥伦比亚的 Munoz 等人^[14]利用路径跟踪法从机器人的安全性、路径距离和路径平滑性等方面评估了机器人的导航性能。

中国运载火箭技术研究院研发中心的阎岩等人^[15]通过提取机器人自主行驶和避障行为中的运动轨迹特征，在非障碍区段以方位偏差、方向偏离和状态稳定性作为导航性能评价指标，在障碍区段以机器人的避障启动距离、避障安全距离和避障状态稳定性作为导航性能评价指标，如图 7 所示。

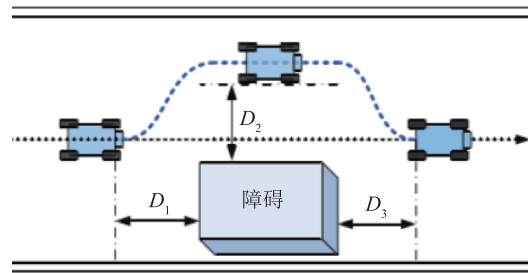


图 7 障碍区段特征分析

中国科学院沈阳自动化研究所的周维等人^[16]基于轨迹分析方法对自主移动机器人的自主导航能力进行测试，以最大速度、最小速度和平均速度作为速度指标，以移动机器人完成任务所耗总体时间、轨迹的总体长度及代表机器人移动轨迹弯曲程度的曲率能量作为导航效率的评价指标，以静态单点定位误差和动态轨迹误差作为定位精度的评价指标。

综上所述，不同学者对于移动机器人自主导航性能评价指标的选择存在较大差异，很多评价指标的定义及测量方式也不统一，导致轮式移动机器人自主导航性能评价无法达成共识，阻碍了不同轮式移动机器人自主导航能力的比较。

2.2 轮式移动机器人自主导航计量评价方法

国际标准委员会依据国际标准 ISO 18646 - 2: 2019 完成了对服务机器人性能标准和相关测试方法的起草，基于标准化的测试方法，从直线、矩形及混合路径等角度对导航性能进行了评价，此外还考虑了障碍物对机器人导航的影响，并明确了相应的计量评价指标及相应的测量方法^[17]。国内则依据标准 GB/T 38124 - 2019《服务机器人性能测试方法》对服务机器人的导航性能进行计量评价，该标准主要侧重于评价直线和多区域场景下服务机器人在导航模式下到达某地的能力，评价指标主要包括到达目标点的姿态准确度和重复性^[18]。现有标准并未充分考虑人工智能技术发

展背景下移动机器人自主导航性能技术的飞跃,事实上简单的场景、路线已无法科学评判移动机器人自主导航性能的优劣。

在 AGV 的测试标准研究方面, NIST 配置了相应的计量测试场景,包括机架、各种边界(行人、机架和砖石结构)、各种照明及其他几种环境条件,以代表制造和仓库场景下的测试环境(如图 8 所示),实现 AGV 导航等性能的计量评价。

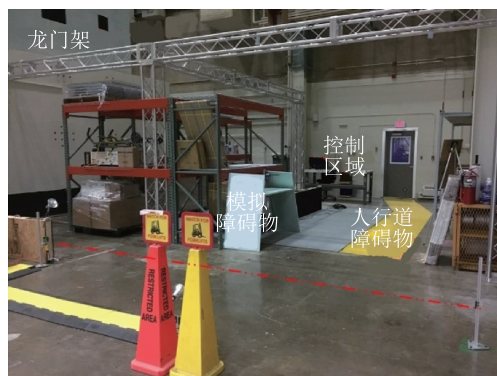


图 8 NIST 设计的 AGV 测试场景

军用条件下对轮式移动机器人的定位及导航精度有更高的要求,现有的针对服务机器人导航的计量测试标准并不适用。国外以 NIST 为首的计量测试机构,目前已针对 50 余种特殊用途移动机器人开展了相关计量评价研究,但是主要集中在移动机器人的机动性、操作能力、传感器及安全性等方面。针对特殊用途轮式移动机器人计量评价(如图 9 所示)对导航性能的计量评价同样不够全面和完善。



图 9 NIST 特殊用途机器人的计量评价场景

整体而言,轮式移动机器人导航性能的定量测量尚未形成完善的计量评价标准,对于导航性能需要遵循哪些客观的评估程序,也没有达成共识。这导致一线战备人员无法明确特定的导航性能容易出现哪些错误并加以预防,也无法确定目标机器人能否满足特定任务所需的性能标准。此外,由于可重复的计量评价

方法的缺失,导致研发人员无法对机器人的性能进行横向和纵向比较,阻碍了研究成果的交流及技术转让。

3 轮式移动机器人自主导航计量评价技术难点

目前,激光 SLAM 及视觉 SLAM 的研究热点均集中在不确定性、环境地图表达、数据关联、SLAM 算法优化等方面^[19]。其中,数据关联和环境地图表达主要影响环境地图的构建。此外,在移动机器人导航的计量评价中,传感器的测量精度和噪声、路径规划算法及相应的执行机构同样需要重点关注。不同系统、体系之间,以及系统内部往往并非简单的线性关系,而是非常复杂的非线性关系,且不同系统往往高度耦合,加大了轮式移动机器人计量评价的难度。

1) 传感器的误差

传感器是轮式移动机器人实现周围环境感知的“眼睛”。对于轮式移动机器人而言,其工作环境往往不是一成不变的,环境温度、光照强度等因素均会对传感器的测量精度产生影响。在长期工作条件下,部分传感器的误差会逐渐增大,导致系统性能下降甚至故障。目前,车载传感器自身的校准往往是在实验室条件下开展的,无法完全满足现场动态环境下的工作需求。

2) 不确定性

SLAM 中主要有两种不同类型的不确定性,即硬件的不确定性和位置不确定性。硬件不确定性由机器人部件中的硬件错误和噪声引起,可导致姿态、地标等信息不准确,并通过执行部件以宏观参数的形式体现出来。位置不确定性由移动机器人的位置和环境中的多条路径的存在而产生。这些不确定性的存在将会对结果的不确定度的评定产生极大影响。

3) 环境地图

对于轮式移动机器人而言,环境地图是实现自主导航的基础。目前主要利用激光雷达或视觉传感器实现环境地图的构建,两种方法的算法不同,所构建的地图形式也存在较大差异,研究如何实现环境地图的计量评价,确保所构建地图中相对、绝对尺寸等量值传递的准确性具有重要意义。

4) 算法

轮式移动机器人研制及生产单位往往会根据预算、需求、使用场景等要素,综合决定移动平台所采用的 SLAM 算法及路径规划算法。目前 SLAM 算法主要有基于过滤的方法(例如卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、自适应卡尔曼滤波、粒子滤波器^[20]等)和基于优化的方法。不同算法的基本原理、复杂程度、响应速度等往

往存在显著差异,研究如何提炼共性的计量评价参数具有重要意义。此外,由于轮式移动机器人大量使用多传感器融合方法,研究如何实现数据融合后的校准同样具有重要意义。

4 总 结

自主导航是推动轮式移动机器人智能化程度进一步提升的重要技术,涉及环境感知、决策、执行等多个环节。随着智能制造水平的不断深化及高端装备的不断服役,研究如何实现轮式移动机器人自主导航的计量评价日益紧迫。不同轮式移动机器人的用途、应用场景、结构特性等存在显著差异,梳理轮式移动机器人计量评价参数,明确与之相对应的计量评价方法,在此基础上构建轮式移动机器人系统级、整体级的计量评价体系,具有重要意义。

轮式移动机器人各系统之间存在强约束、高耦合、强非线性的特性,实现关键参数的解耦,并实现实验室及现场环境下的计量评价是未来的主要技术发展方向之一。在开展硬件层面的计量校准技术研究的同时,也要针对人工智能算法、系统的计量评价进行深入研究。随着数字孪生、深度学习、5G技术的不断深入,研究如何实现相关技术在轮式移动机器人及其他智能平台的计量评价中的应用同样具有重要意义。这些新技术不仅能够促进虚拟化计量技术的实现,同时也能够从海量的计量校准数据中提炼出隐藏的信息。

参 考 文 献

- [1] Taheri H, Zhao C X. Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 103958.
- [2] Bechtsis D, Tsolakis N, Vlachos D, et al. Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 142: 3970 - 3984.
- [3] Badue C, Guidolini R, Carneiro R V, et al. Self-Driving Cars: A Survey[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 165: 113816.
- [4] 姜延欢, 杨永军, 李新良, 等. 智能无人系统环境感知计量评价研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12): 80 - 85.
- [5] ASTM E2801 - 11 Standard test method for evaluating emergency response robot capabilities; mobility; confined area obstacles; gaps[S]. America: NIST, 2020.
- [6] ASTM E2802 - 11 Standard test method for evaluating emergency response robot capabilities; mobility; confined area obstacles; hurdles[S]. America: NIST, 2020.
- [7] Li J, Zhang X, Li J, et al. Building and optimization of 3D semantic map based on Lidar and camera fusion[J]. Neurocomputing, 2020, 409: 394 - 407.
- [8] 陈旭. 基于多传感器信息融合的地图构建和移动机器人导航研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [9] Yilmaz A, Temeltas H. Self-adaptive Monte Carlo method for indoor localization of smart AGVs using LIDAR data-Science Direct [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 122: 103285.
- [10] Taheri H, Xia Z C. SLAM; definition and evolution[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 97(5): 104032.
- [11] Wang S, Yue J, Dong Y, et al. A synthetic dataset for Visual SLAM evaluation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 124(3): 103336.
- [12] B K P, Ganesh B L, Anish P, et al. A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot[J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 582 - 606.
- [13] Abubaker A. A Novel Mobile Robot Navigation System Using Neuro-Fuzzy Rule-Based Optimization Technique [J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2012, 4(15): 2577 - 2583.
- [14] Munoz N D, Valencia J, Londono N. Evaluation of navigation of an autonomous mobile robot[C]// Permis 07 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems. ACM, 2007.
- [15] 阎岩, 唐振民, 刘家银. 基于不确定性分析的自主导航轨迹评测方法[J]. 机器人, 2013, 35(2): 194 - 199.
- [16] 周维, 李斌, 张国伟, 等. 自主移动机器人导航与定位性能测试设备研究[J]. 高技术通讯, 2014(7): 752 - 758.
- [17] BS ISO 18646 - 2 - 2019, Robotics. Performance criteria and related test methods for service robots. Navigation [S]. Switzerland, 2019.
- [18] 国家市场监督管理总局. GB/T 38124 - 2019 服务机器人性能测试方法[S]. 2019.
- [19] 朱友帅. 基于 ROS 的服务机器人同步定位与地图构建研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2019.
- [20] 郭剑辉, 赵春霞. 一种新的粒子滤波 SLAM 算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(5): 853 - 860.

收稿日期: 2021 - 03 - 10

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目; 创新基金项目 (ZC02101582)

作者简介

姜延欢(1990 -), 男, 山西运城人, 工程师, 主要研究方向为动态测试及校准技术。2019年毕业于北京交通大学, 获载运工具运用工程专业博士学位, 同年于航空工业计量所重点实验室工作至今。

