

基于多传感器的扫地机器人导航系统避障研究

龙启华

宁波浩嘉电器有限公司 浙江 余姚 315400

摘要：本文聚焦基于多传感器的扫地机器人导航系统避障研究，介绍了多传感器融合技术，指出单一传感器在复杂室内环境下导航避障的局限，多传感器融合可整合优势、弥补缺陷。详细阐述了扫地机器人导航系统常用的激光雷达、视觉、超声波、红外传感器的工作原理、特点及应用场景，分析了各传感器的性能指标及优缺点。进而设计了多传感器的扫地机器人导航系统，包括系统架构、传感器选择与配置、数据预处理与融合策略。提出基于多传感器融合的避障策略，涵盖环境建模、障碍物检测与识别、避障决策，通过多传感器融合提高扫地机器人导航和避障的准确性与可靠性。

关键词：扫地机器人；多传感器融合；导航系统；避障策略

1 多传感器融合技术概述

多传感器融合技术是指将来自多个不同类型传感器的数据进行综合处理、分析与融合，以获得对环境或目标更准确、全面的理解和描述的技术。在扫地机器人领域，单一传感器往往存在局限性，难以满足复杂室内环境下导航避障的高精度要求。例如，激光雷达虽能精确测量距离，但对颜色和纹理信息获取不足；视觉传感器可识别物体特征，但受光照条件影响较大。多传感器融合技术通过整合各传感器优势，弥补单一传感器的缺陷，提高系统的可靠性、准确性和适应性。其融合方式主要有数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合直接对原始传感器数据进行融合处理，能保留较多信息，但计算量大；特征层融合先提取各传感器数据特征，再进行融合，计算量相对较小，且对传感器依赖度低；决策层融合则是各传感器独立处理数据并做出决策，最后将决策结果进行融合，具有较好的容错性^[1]。

2 扫地机器人导航系统常用传感器类型

2.1 激光雷达传感器

激光雷达传感器堪称扫地机器人的“空间测绘大师”，它基于光的飞行时间（TimeofFlight, ToF）测量技术工作。它以每秒数万次的频率向周围环境发射激光束，激光束遇到物体后反射回来，传感器通过精确测量发射与接收激光的时间差，依据光速恒定的原理，便能精准计算出自身与障碍物之间的距离。在测量精度方面，主流的机械式激光雷达能够轻松达到毫米级精度，一些高端型号在理想环境下，对1-3米距离范围内障碍物的测量误差可控制在1毫米以内。扫描范围通常极为宽广，常见的为270°-360°，这使得扫地机器人宛如拥有了360度无死角的“透视眼”，能够全方位感知周围环境。

例如，某知名品牌的扫地机器人搭载的RPLIDARA3激光雷达，在正常室内环境下，能以0.5°的角度分辨率进行扫描，快速生成周围环境的点云图。在一个20平方米的客厅中，短短30秒内，它就能构建出包含沙发、茶几、电视柜等家具精确位置和形状的三维空间模型，为扫地机器人后续的路径规划和避障提供极为精准的数据支持。

激光雷达并非十全十美。一方面，其成本相对较高，这在一定程度上增加了扫地机器人的整体制造成本，限制了其在中低端产品中的普及。另一方面，当遭遇强光直射，如阳光透过窗户直射在激光雷达上时，反射光信号会受到干扰，导致测量精度下降，误差可能扩大至厘米级。在有大量灰尘或水汽的环境中，如刚打扫完灰尘弥漫的房间，或者湿度较大的卫生间附近，激光束在传播过程中会发生散射和衰减，同样会影响测量精度，对2米外障碍物的测量误差可能达到3-5厘米。

激光雷达性能指标	具体数据
测量精度（理想环境）	1-3米内误差 < 1毫米
扫描范围	270°-360°
角度分辨率（示例产品）	0.5°
构建20平客厅模型时间（示例场景）	30秒
强光直射下测量误差	厘米级
多尘/水汽环境下2米外测量误差	3-5厘米

2.2 视觉传感器

视觉传感器赋予扫地机器人“智慧之眼”，它借助摄像头采集周围环境图像，并运用先进的图像处理和分析技术来识别物体、检测障碍物。其中，采用深度学习算法的视觉传感器在识别能力方面表现尤为卓越。研究表明，经过大量室内场景数据训练的视觉传感器，对常见室内障碍物，如拖鞋、玩具、椅子等的识别准确率可

达92%-95%。它能够敏锐捕捉到物体丰富的纹理、颜色等细节信息，通过与已建立的物体特征库进行比对，快速准确地判断出物体类型。例如，在一个摆放有多种玩具的儿童房内，视觉传感器能够在1秒内识别出积木、玩偶、小汽车等不同玩具，并将其标注在环境图像中。然而，光照条件成为制约视觉传感器性能发挥的关键因素。在强光环境下，如夏日正午阳光充足的房间，图像易出现过曝现象，导致物体细节丢失，识别准确率可能

骤降至60%-70%。而在弱光环境，比如夜晚仅靠小夜灯照明的卧室，图像会变得模糊不清，噪声增加，识别错误率大幅上升，漏检情况也更为频繁。此外，视觉传感器对硬件性能要求颇高，为了快速处理大量的图像数据，需要配备高性能的图像处理器（GPU）。以某款搭载视觉传感器的扫地机器人为例，其采用的英伟达JetsonXavierNX模块，成本高达500-800元，这无疑增加了产品的硬件成本^[2]。

视觉传感器性能指标	强光环境	弱光环境	正常光照
常见障碍物识别准确率	60%-70%	65%-75%	92%-95%
识别常见障碍物时间（示例场景）	1秒	-	1秒
配备GPU成本（示例产品）	500-800元	-	-

2.3 超声波传感器

超声波传感器是扫地机器人近距离避障的“忠诚卫士”，它利用超声波在空气中的传播特性工作。传感器向周围发射超声波，当超声波遇到障碍物后会反射回来，传感器接收反射波，并根据发射与接收的时间差，结合超声波在空气中的传播速度（约340米/秒），计算出与障碍物之间的距离。在扫地机器人应用场景中，一般超声波传感器的有效检测距离为0.1-3米。能够精准测量距离自身0.2-2.5米范围内障碍物的距离，测量精度可达1-2厘米。在近距离避障场景中，表现尤为出色。例如，当扫地机器人靠近桌腿时，距离桌腿0.3米左右，超声波传感器便能迅速检测到障碍物，及时向控制系统反馈信息，使扫地机器人调整行进方向，避免碰撞。但超声波传感器存在波束角较大的固有缺陷，通常波束角在15°-30°之间，这意味着它的检测范围较为宽泛，容易将周围非目标物体的反射波误判为障碍物信号。比如，在靠近墙角时，由于墙角的特殊结构，超声波在墙面之间多次反射，可能导致传感器误判，认为前方存在多个障碍物。此外，对于一些细小障碍物，如直径小于2厘米的电线、绳索等，超声波传感器的检测能力有限，容易出现漏检情况。

超声波传感器性能指标	具体数据
有效检测距离	0.1-3米
精准测量距离范围	0.2-2.5米
测量精度	1-2厘米
波束角	15°-30°
易误判场景	墙角等复杂结构处
易漏检物体	直径<2厘米的细小物体

2.4 红外传感器

红外传感器是扫地机器人的“近场感知精灵”，它

通过发射和接收红外线感知周围环境变化。当有物体进入其检测范围时，物体自身的热辐射或者对红外线的反射强度会发生改变，红外传感器捕捉到这种变化后，便能迅速判断出障碍物的存在。其响应速度堪称一绝，在检测距离小于0.5米的障碍物时，响应时间可短至30-50毫秒。为扫地机器人的紧急避障提供了有力支持。成本方面，红外传感器结构简单，成本低廉，单个红外传感器的成本通常在5-15元之间，这使得它在扫地机器人中得以广泛应用，常被布置在扫地机器人的边缘位置，用于检测边缘和近距离避障。但它的检测距离较短，一般有效范围仅在0.1-1米。并且，红外传感器容易受到环境温度和其他红外源的干扰。在环境温度较高的场景下，如靠近暖气片的区域，环境热辐射较强，可能导致传感器误判，将正常环境误认成障碍物。当周围存在其他红外发射源，如电视遥控器发射红外线时，也可能干扰红外传感器的正常工作，导致其检测结果出现偏差。

3 多传感器的扫地机器人导航系统设计

3.1 系统架构与功能模块

多传感器的扫地机器人导航系统主要由传感器模块、数据处理模块、控制模块和执行模块组成。传感器模块负责采集环境信息，包括激光雷达、视觉传感器、超声波传感器和红外传感器等；数据处理模块对各传感器数据进行预处理、融合及分析，提取有用信息；控制模块根据数据处理结果生成控制指令，规划扫地机器人的运动路径；执行模块由电机、轮子等组成，负责执行控制指令，实现扫地机器人的移动和清洁动作。在实际运行中，传感器模块实时采集数据，数据处理模块快速融合分析，控制模块依据结果规划路径，执行模块精准执行，确保扫地机器人高效避障和完成清洁任务^[3]。

3.2 传感器选择与配置

在选择传感器时,需综合考虑扫地机器人的应用场景、性能要求和成本限制。对于大面积空旷区域的导航,优先配置激光雷达传感器,以获取精确的全局地图;在复杂家具环境中,视觉传感器有助于识别不同类型障碍物;超声波传感器和红外传感器则用于近距离避障和边缘检测。例如,在一款中高端扫地机器人中,采用激光雷达进行全局定位和远距离障碍物检测,配合两个视觉摄像头识别物体,四个超声波传感器用于近距离避障,两个红外传感器检测边缘,形成全方位的环境感知体系。

3.3 数据预处理与融合策略

数据预处理是去除传感器数据中的噪声、异常值等干扰信息,提高数据质量。对于激光雷达数据,采用滤波算法去除测量噪声;视觉传感器数据通过图像增强、去噪等预处理操作,提高图像清晰度。在数据融合策略上,采用特征层融合和决策层融合相结合的方式。先对各传感器数据提取特征,如激光雷达的距离特征、视觉传感器的图像特征等,进行特征层融合;再根据融合后的特征,各传感器独立做出决策,如是否检测到障碍物、障碍物类型等,最后在决策层进行融合,综合判断环境状况,为避障和导航提供准确依据。

4 基于多传感器融合的避障策略

4.1 环境建模

利用多传感器数据构建精确的环境模型是避障的基础。激光雷达通过扫描获取环境点云数据,构建三维空间模型;视觉传感器采集的图像数据经处理后,识别物体并标注在模型中;超声波传感器和红外传感器补充近距离和边缘信息。通过融合这些数据,构建包含障碍物位置、形状、类型等信息的全局环境地图。在构建过程中,不断更新和优化地图,以适应环境变化,如家具位置移动等。例如,扫地机器人在首次清扫房间时,通过多传感器融合构建初始地图,后续清扫中,根据传感器实时数据更新地图,提高导航和避障准确性^[4]。

4.2 障碍物检测与识别

多传感器融合提高了障碍物检测与识别的准确性。激光雷达检测障碍物的距离和位置,视觉传感器识别障碍物类型和特征,超声波传感器和红外传感器辅助近距离检测。当激光雷达检测到前方有物体时,视觉传感器对其进行识别,判断是家具、垃圾还是其他障碍物。通

过融合多传感器信息,对障碍物的检测准确率可达95%以上。例如,在检测到一个距离2米的物体时,视觉传感器识别其为椅子,结合激光雷达数据确定其位置和形状,为避障决策提供依据。

4.3 避障决策

基于多传感器融合的环境信息和障碍物检测结果,扫地机器人做出避障决策。当检测到障碍物时,首先判断其危险程度,如距离远近、是否移动等。对于近距离障碍物,立即停止前进,采用绕障策略,根据传感器数据规划绕障路径,保持安全距离。对于远距离障碍物,评估其对当前路径的影响,若影响较小,继续按原路径前进;若影响较大,重新规划全局路径^[5]。在避障过程中,实时调整路径,确保高效完成清洁任务。例如,当检测到前方0.5米处有障碍物时,扫地机器人立即停止,通过传感器数据计算出绕障路径,以每秒0.2米的速度绕开障碍物,继续清扫工作。

结束语

综上所述,多传感器融合技术在扫地机器人导航系统中的应用,显著提升了扫地机器人的环境感知能力和避障精度。通过整合激光雷达、视觉传感器、超声波传感器和红外传感器各自的优势,扫地机器人能够在复杂多变的室内环境中高效、安全地完成清洁任务。未来,随着传感器技术和融合算法的不断进步,扫地机器人的导航与避障性能将得到进一步提升,为用户提供更加智能、便捷的清洁体验。

参考文献

- [1]张亮.刘智宇.曹晶瑛.等.扫地机器人增强位姿融合的Cartographer算法及系统实现[J].软件学报,2020(9):31-35
- [2]刘建宏.王其儒.王旭.室外智能扫地机器人优化设计[J].中国设备工程,2020(21):90-92.doi:10.3969/j.issn.1671-0711.2020.21.050
- [3]苏健.扫地机器人硬件与软件设计[J].科技风,2021(2):5-6.
- [4]陈敏生.扫地机器人电机自动测试装置[J].自动化与信息工程,2020,41(3):27-31.
- [5]黄杭.扫地机器人的实现研究[J].中国科技投资,2020(3):66-67.