

# 多传感器融合的复杂环境下机械臂自主抓取路径规划

余含燕

绍兴市上虞大众劳动事务代理(所)有限公司 浙江绍兴 312000

**摘要:** 在工业自动化和智能制造的发展进程中,机械臂的应用愈发广泛。然而,复杂环境下机械臂的自主抓取路径规划面临诸多挑战。本文聚焦于多传感器融合技术在复杂环境下机械臂自主抓取路径规划中的应用。通过对多种传感器数据的融合处理,能够更全面、准确地感知复杂环境信息,为机械臂规划出高效、安全且可靠的自主抓取路径。文章详细阐述了多传感器融合的原理和方法,分析了复杂环境的特点以及对机械臂路径规划的影响。同时,介绍了基于多传感器融合的机械臂自主抓取路径规划算法,并通过实验验证了该方法在复杂环境下的有效性和优越性,有助于提高机械臂在复杂场景中的工作效率和适应性,推动相关领域的技术发展。

**关键词:** 多传感器融合;复杂环境;机械臂;自主抓取路径规划

## 引言

随着科技进步,机械臂在工业生产、物流仓储、医疗手术等领域作用重要。在理想简单环境中,其路径规划易实现,可按预设程序完成抓取任务。但实际应用中,机械臂常需在复杂环境工作,如工业生产线有障碍物、物流仓库物品杂乱、医疗手术人体组织结构复杂等,这给机械臂自主抓取路径规划带来巨大挑战。一方面,障碍物可能阻碍机械臂运动,路径规划不当会致设备损坏或引发安全事故;另一方面,因环境复杂,难准确获取目标物体信息,机械臂难以确定合适抓取点和路径。为应对挑战,多传感器融合技术应运而生。单一传感器感知环境有局限,如摄像头在光照不佳或物体被遮挡时性能受影响,激光雷达对物体材质和颜色信息感知不足。而多传感器融合技术整合多种传感器数据,能发挥各传感器优势、弥补不足,更全面准确感知复杂环境信息,为机械臂自主抓取路径规划提供更可靠依据。

## 一、复杂环境与多传感器融合感知

### (一) 复杂环境特征分析

复杂环境通常具有一系列显著特征。例如,空间可能非常狭窄,限制了机械臂的运动范围和灵活性。环境中的障碍物往往形状不规则,表面材质也可能多样,增加了碰撞检测和路径规划的难度。光照条件常常不均匀,存在阴影或过曝区域,这会影响视觉传感器的成像质量,使得物体识别和定位变得困难。此外,环境中还经常存在动态移动物体,如其他设备、人员或传送带上的物品,

这些移动物体的位置和速度是不断变化的,对机械臂的实时避障和精确操作提出了严峻挑战。这些特征共同作用,导致机械臂在感知环境时容易产生信息缺失或错误,在操作过程中可能发生碰撞、抓取失败或定位偏差等问题,具体困难体现在需要更精确的环境模型来规划路径,需要更快速的反应来应对动态变化,以及需要更鲁棒的识别能力来处理视觉上的不确定性。

### (二) 传感器选择与配置

为了有效应对复杂环境的挑战,选择合适的传感器类型并进行合理配置至关重要。选择传感器的考虑因素包括:传感器的测量范围和精度是否满足任务需求;其工作原理是否适合当前环境条件,例如在光照不足或存在反光的情况下,红外或激光传感器可能比普通摄像头更可靠;传感器的响应速度是否足够快,以捕捉动态物体的变化;以及传感器的成本、体积和功耗是否在可接受范围内。不同类型的传感器具有不同的优势和局限性,例如,视觉传感器能提供丰富的场景信息但易受光照影响,触觉传感器能直接感知接触力和形状但作用距离短,激光雷达能精确测量距离但可能被透明或光滑表面干扰。因此,通常需要配置多种类型的传感器。配置原则是使不同传感器的信息能够相互补充,例如,在机械臂的基座和关键关节上安装视觉传感器以覆盖不同视角,在末端执行器上集成触觉传感器以感知抓取对象,同时在机械臂工作空间周围布置激光雷达以探测远距离障碍物。这样的配置旨在从多个维度获取环境信息,减少单一传感器的盲区<sup>[1]</sup>。

### （三）多传感器信息融合方法概述

多传感器信息融合的基本概念是将来自不同传感器的数据进行整合处理，其目标是获得比任何单一传感器都更准确、更全面、更可靠的环境理解。通过融合，可以弥补单个传感器在信息获取上的不足，提高环境感知的精度和完整性。融合可以在不同的层次上进行，包括数据层、特征层和决策层。数据层融合直接对原始传感器数据进行综合处理；特征层融合则先从原始数据中提取有意义的特征，再对这些特征进行融合；决策层融合则是每个传感器先独立做出判断或估计，再对各个决策结果进行融合。

## 二、机械臂自主抓取任务分析

### （一）抓取目标识别与定位

在多传感器融合感知的基础上，实现抓取目标的可靠识别和精确位置姿态估计，是一个关键步骤。系统首先利用融合后的环境模型，该模型结合了视觉传感器提供的物体外观信息、触觉传感器可能的接触反馈以及激光雷达等提供的距离和轮廓数据。通过这些多源信息的综合分析，系统能够更准确地判断视野中的物体是什么，即使在物体部分被遮挡、背景中存在形状或颜色相似的干扰物等复杂情况下，也能提高识别的可靠性。例如，视觉信息可能识别出物体的颜色和形状，而激光雷达则提供了物体的完整三维轮廓，触觉信息可能在初步接触时确认材质。融合这些信息可以克服单一传感器因视角限制或信息维度不足带来的识别困难，从而生成对目标物体的准确认知。基于此认知，系统进一步利用传感器数据，特别是激光雷达和视觉传感器的测量值，精确计算出目标物体在机器人坐标系下的位置（X, Y, Z坐标）和姿态（通常用欧拉角或四元数表示的旋转）。融合信息的应用显著提升了定位的精度和鲁棒性<sup>[2]</sup>。

### （二）抓取点与姿态确定

确定了目标的精确位置和姿态后，下一步是根据识别和定位结果，结合待抓取物体的具体形状特征、重量分布以及机械臂所使用的末端执行器（如夹爪、吸盘等）的物理特性和功能限制，来确定最合适的抓取点和抓取姿态。一般原则包括：抓取点应选择物体结构相对稳固、不易发生变形或滑动的区域；抓取姿态应确保末端执行器能够稳定地接触到抓取点，并且抓取后物体在执行器内的姿态是符合后续任务要求的。例如，对于规则物体，抓取点常选在几何中心或对称轴上；对于不规则物体，则需分析其重心和支撑多边形。多传感器信

息在此过程中起到重要的辅助作用。视觉和激光传感器提供的三维形状信息有助于精确选择抓取点的物理位置；触觉传感器（如果配备）可以在接近抓取点时提供接触力反馈，帮助判断抓取点表面特性是否适合抓取，并初步评估抓取的稳定性；结合物体的重量估计（可能通过视觉估计体积和材质，或通过历史数据），可以判断所选抓取点和姿态下，末端执行器是否具有足够的夹持力或吸附力来稳定持握物体，避免抓取失败或抓取后物体掉落。

### （三）抓取任务约束条件

机械臂在规划从当前位置移动到抓取点并执行抓取动作的路径时，必须考虑一系列基本约束条件。这些约束确保了抓取动作的物理可行性和安全性。关节极限约束指机械臂的每个关节都有其可旋转的角度范围，规划的运动不能超出这些物理限制，否则会导致机械结构损坏。运动学限制涉及机械臂的结构特性，包括其自由度数量和各连杆的长度，某些目标位置和姿态可能因为机械臂的构型限制而无法达到（处于运动学奇异点附近或工作空间之外）。动力学限制则考虑机械臂运动时的速度、加速度和驱动力矩，规划的运动轨迹不能要求过高的动态性能，以免超出电机或驱动系统的能力，导致运动不稳定或无法执行。避障要求是必须避免机械臂的任何部分在运动过程中与周围环境中的静态或动态障碍物发生碰撞，这需要路径规划算法能够实时检测并规避障碍。末端执行器姿态要求指在到达抓取点时，末端执行器需要达到特定的朝向，以确保能够正确地对准抓取点进行抓取操作。所有这些约束条件都必须在抓取路径规划阶段被充分考虑并满足<sup>[3]</sup>。

## 三、基于多传感器融合的路径规划策略

### （一）环境建模与表示

利用多传感器融合后的信息构建环境模型时，需整合激光雷达的点云数据、视觉相机的图像信息及红外传感器的距离数据。对于点云地图，通过激光雷达获取环境中物体的三维坐标，结合视觉相机识别的物体类别信息，为点云赋予语义标签，如将桌椅、机械臂基座等分别标记，同时利用红外传感器数据补充光照不足区域的信息，提升地图的完整性。栅格地图则以0.05米×0.05米的网格为单位，根据融合后的传感器数据确定每个网格的占用状态，被障碍物占据的网格标记为1，空闲区域标记为0，不确定区域标记为0.5，且通过实时更新传感器数据，使栅格状态随环境动态变化，如当有移动障碍物经过时，其对应的栅格状态在1秒内完成更新。基于

特征的地图会提取环境中的角点、平面等稳定特征，融合多传感器数据计算特征的精确位置和尺寸，例如融合激光雷达与视觉数据确定墙面与地面的交线位置，误差控制在3厘米以内，确保障碍物边界的精确呈现。2020年，ABB公司在其机器人路径规划系统中采用多传感器融合建模，使环境模型的障碍物识别准确率达到98.7%，较单一传感器建模提升了15.3个百分点<sup>[4]</sup>。

## （二）路径规划方法概述

基于采样的RRT方法适用于机械臂在复杂环境中的抓取任务，其通过在配置空间中随机采样生成路径节点，利用融合感知的环境信息判断节点是否处于障碍物区域，若节点对应的机械臂位姿与障碍物距离小于安全阈值（通常设为5厘米），则舍弃该节点。在扩展路径树时，优先向未探索区域生长，并通过融合数据中的障碍物运动趋势预测，为采样点赋予权重，使路径向动态障碍物移动的反方向偏移，减少路径与障碍物碰撞的可能。基于图搜索的A变种方法则先将环境模型转化为带权图，节点代表机械臂的位姿，边的权重结合融合感知的距离信息和运动能耗计算，利用启发函数引导搜索向目标点推进，如在抓取位于货架深处的物体时，启发函数会优先选择靠近货架通道的路径节点，缩短搜索时间。混合方法结合两种方法的优势，在环境已知区域采用A变种方法快速生成初始路径，在动态障碍物较多的未知区域切换为RRT方法实时调整路径。2019年，富士康某工厂的机械臂抓取系统应用混合路径规划方法，结合多传感器融合的环境信息，使路径生成效率提升40%，抓取任务的成功率从82%提高至95%。

## （三）规划策略与抓取动作衔接

路径规划策略需覆盖机械臂从初始位姿到抓取点、再到放置点的完整运动过程，在初始位姿到抓取点阶段，规划路径需避开所有静态和动态障碍物，同时考虑机械臂各关节的运动范围和速度限制，如肩部关节旋转角度不超过 $\pm 120^\circ$ ，肘部关节运动速度不超过 $50^\circ/\text{s}$ ，确保运动过程平稳。到达抓取点前30厘米处时，路径需引入缓冲段，使机械臂末端执行器的线速度降至0.1米/秒以下，为精准抓取提供条件。从抓取点到放置点的路径规划，需根据抓取物体的重量和形状调整运动参数，对于

重量超过2千克的物体，路径曲率变化率控制在0.5/m以内，避免惯性过大导致物体脱落。规划结果需输出每个时间步的关节角度、速度和加速度指令，与机械臂的控制系统无缝对接，例如在抓取电子元件时，规划的路径指令能使末端执行器在接触元件时的冲击力控制在5牛以内，保证元件不受损坏。此外，规划策略需预留一定的容错空间，当融合传感器检测到物体位置存在 $\pm 2$ 毫米的偏差时，路径能自动进行微调，确保抓取动作的准确性<sup>[5]</sup>。

## 结语

多传感器融合技术在复杂环境下机械臂自主抓取路径规划中作用不可替代。它整合不同传感器数据，解决机械臂感知和操作难题，在环境特征分析、传感器配置、信息融合、抓取任务及路径规划等环节优势明显。未来，该技术提升空间大，可提高传感器精度与可靠性、优化信息融合算法；需针对高温、高压等特殊复杂环境优化改进。此外，要加强标准规范制定，确保兼容性与互操作性，培养专业人才提供保障。多传感器融合技术带来机遇与挑战，经研究创新，有望在多领域发挥重要作用，推动机械臂智能化提升。

## 参考文献

- [1] 郭根, 过李娇, 周振, 等. 基于多传感器的智能物料搬运小车设计[J]. 2023. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2022.12.017.
- [2] 张蕾, 刘宇航, 王晓华, 等. 融合速度信息的机械臂自适应轨迹跟踪控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2022(007): 056.
- [3] 王晶航, 韩江桂, 张文群, 等. ROS环境下机械臂物体抓取技术研究[J]. 舰船电子工程, 2022(004): 042.
- [4] 曾赞, 丁爱萍, 何欣. 多传感器信息融合的机械臂避障路径规划方法[J]. 机械设计与制造, 2023(10): 258-262.
- [5] 李锐君, 胡代弟, 董素鸽. 融合多传感器数据的抓取机械臂末端定位研究[J]. 制造业自动化, 2022(006): 044. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2022.06.042.