

基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法研究

郭培¹, 贺镜儒¹, 杨子雨²

1. 国能准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300

2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083

DOI:10.61369/ME.2025060030

摘 要 : 随着露天矿开采的规模化和智能化发展, 无人驾驶卡车的应用成为提高生产效率和安全性关键。本文聚焦于基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法研究。首先分析了多传感器融合在露天矿复杂环境下的必要性, 阐述了常用传感器如激光雷达、视觉相机、GPS 等特点及局限性。通过研究多种定位与避障算法, 提出了一种融合多传感器信息的优化算法。实验结果表明, 该算法能够有效提高无人驾驶卡车的定位精度和避障能力, 在复杂露天矿环境下具有良好的适应性和可靠性, 为露天矿无人驾驶技术的进一步发展提供了理论支持和实践参考。

关 键 词 : 多传感器融合; 露天矿; 无人驾驶卡车; 定位算法; 避障算法

Research on Positioning and Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Trucks in Open-pit Mines Based on Multi-Sensor Fusion

Guo Pei¹, He Jingru¹, Yang Ziyu²

1. China Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083

Abstract : With the large-scale and intelligent development of open-pit mining, the application of driverless trucks has become a key to improving production efficiency and safety. This paper focuses on the research of positioning and obstacle avoidance algorithms for unmanned trucks in open-pit mines based on multi-sensor fusion. Firstly, the necessity of multi-sensor fusion in the complex environment of open-pit mines was analyzed, and the characteristics and limitations of commonly used sensors such as lidar, visual cameras, and GPS were expounded. By studying various positioning and obstacle avoidance algorithms, an optimization algorithm integrating multi-sensor information is proposed. The experimental results show that this algorithm can effectively improve the positioning accuracy and obstacle avoidance ability of unmanned trucks, and has good adaptability and reliability in complex open-pit mine environments, providing theoretical support and practical reference for the further development of unmanned driving technology in open-pit mines.

Keywords : multi-sensor fusion; open-pit mine; driverless truck; positioning algorithm; obstacle avoidance algorithm

露天矿开采是资源开发的重要方式, 传统的露天矿卡车运输依赖人工驾驶, 存在劳动强度大、安全风险高、生产效率低等问题。随着科技的发展, 无人驾驶技术在露天矿领域的应用成为研究热点。无人驾驶卡车能够实现 24 小时不间断作业, 提高运输效率, 降低人力成本, 同时减少人为因素导致的安全事故。然而, 露天矿环境复杂多变, 存在粉尘、光照变化、地形起伏等多种干扰因素, 对无人驾驶卡车的定位和避障提出了极高的要求。单一传感器在复杂环境下难以满足高精度定位和可靠避障的需求, 因此多传感器融合技术应运而生。多传感器融合可以综合利用不同传感器的优势, 提高系统的可靠性和准确性。本文旨在研究基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法, 以解决露天矿复杂环境下无人驾驶卡车的关键技术问题。

一、多传感器融合概述

（一）多传感器融合的概念

多传感器融合是指将来自多个不同类型传感器的数据进行综合处理，以获得更全面、准确的信息。在露天矿无人驾驶卡车系统中，常用的传感器包括激光雷达、视觉相机、GPS、惯性测量单元（IMU）等。激光雷达能够提供高精度的三维点云数据，用于障碍物检测和环境建模；视觉相机可以获取丰富的图像信息，用于目标识别和场景理解；GPS 能够提供全局定位信息，但在露天矿环境下可能存在信号遮挡问题；IMU 可以测量车辆的加速度和角速度，用于辅助定位和姿态估计^[1]。

（二）多传感器融合的优势

多传感器融合具有以下优势：一是提高信息的准确性和可靠性。不同传感器在不同环境下具有不同的性能表现，通过融合多个传感器的数据，可以弥补单一传感器的不足，提高系统的整体性能。二是增强系统的鲁棒性。在复杂环境下，单一传感器可能会受到干扰或失效，而多传感器融合可以通过其他传感器的数据进行补充和验证，保证系统的正常运行。三是扩大信息的覆盖范围。不同传感器的测量范围和精度不同，融合多个传感器的数据可以获得更全面的环境信息。

（三）多传感器融合的方法

多传感器融合的方法主要包括数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是指直接将多个传感器的原始数据进行融合处理，这种方法能够保留最多的原始信息，但计算量较大。特征层融合是指先从各个传感器数据中提取特征，然后将这些特征进行融合，这种方法可以减少计算量，但可能会丢失一些原始信息。决策层融合是指各个传感器独立进行决策，然后将这些决策结果进行融合，这种方法计算量小，但决策的准确性可能会受到影响^[2]。

二、露天矿无人驾驶卡车定位算法

（一）常用定位传感器及原理

在露天矿无人驾驶卡车定位中，常用的传感器包括 GPS、IMU 和激光雷达。GPS 是一种基于卫星定位的系统，通过接收卫星信号来确定车辆的位置。其原理是利用卫星发射的信号与接收机之间的时间差来计算距离，然后通过多个卫星的距离信息来确定车辆的三维位置。IMU 是一种惯性测量单元，通过测量车辆的加速度和角速度来计算车辆的姿态和位置变化^[3]。激光雷达则是通过发射激光束并测量反射光的时间来获取周围环境的三维点云数据，通过对这些点云数据进行处理可以实现车辆的定位。

（二）基于多传感器融合的定位算法

为了提高露天矿无人驾驶卡车的定位精度，本文提出了一种基于 GPS、IMU 和激光雷达融合的定位算法。利用 GPS 提供的全局定位信息作为初始定位，然后通过 IMU 进行短时间内的姿态和位置更新，以弥补 GPS 信号丢失时的定位需求^[4]。利用激光雷达的点云数据进行局部地图匹配，进一步提高定位的准确性。具

体算法流程如下：

设 P_{GPS} 为 GPS 测量的位置， P_{IMU} 为 IMU 计算的位置， P_{Lidar} 为激光雷达匹配得到的位置，则融合后的位置 P_{fused} 可以通过以下公式计算：

$$P_{fused} = \alpha P_{GPS} + \beta P_{IMU} + \gamma P_{Lidar}$$

其中， α 、 β 、 γ 为权重系数，满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。这些权重系数可以根据不同传感器的测量精度和可靠性进行动态调整。

（三）定位算法实验与分析

为了验证基于多传感器融合的定位算法的有效性，进行了实验测试。实验在露天矿模拟环境中进行，使用了一辆无人驾驶卡车，安装了 GPS、IMU 和激光雷达传感器。实验结果如表 1 所示：

实验次数	GPS 定位误差 (m)	融合定位误差 (m)
1	1.2	0.3
2	1.5	0.4
3	1.3	0.35
4	1.4	0.32
5	1.6	0.45

从实验结果可以看出，基于多传感器融合的定位算法能够有效降低定位误差，提高定位精度。

三、露天矿无人驾驶卡车避障算法

（一）障碍物检测传感器及原理

在露天矿无人驾驶卡车避障中，常用的传感器包括激光雷达和视觉相机。激光雷达通过发射激光束并测量反射光的时间来获取周围环境的三维点云数据，通过对这些点云数据进行处理可以检测出障碍物的位置和形状。视觉相机则是通过拍摄周围环境的图像，利用图像处理和目标识别技术来检测障碍物^[5]。

（二）基于多传感器融合的避障算法

为了提高露天矿无人驾驶卡车的避障能力，本文提出了一种基于激光雷达和视觉相机融合的避障算法。利用激光雷达的点云数据进行障碍物的初步检测，得到障碍物的位置和大致形状。利用视觉相机的图像数据对障碍物进行进一步的识别和分类，确定障碍物的类型和危险程度。根据障碍物的信息制定避障策略。具体算法流程如下：

设 O_{Lidar} 为激光雷达检测到的障碍物集合， O_{Camera} 为视觉相机识别到的障碍物集合，则融合后的障碍物集合 O_{fused} 可以通过以下公式计算：

$$O_{fused} = O_{Lidar} \cup O_{Camera}$$

根据障碍物的类型和危险程度，为每个障碍物分配一个危险等级 R ，根据危险等级制定相应的避障策略^[6]。

（三）避障算法实验与分析

为了验证基于多传感器融合的避障算法的有效性，进行了实验测试。实验在露天矿模拟环境中进行，设置了不同类型的障碍物，如石块、树木等。实验结果表明，该避障算法能够准确检测

到障碍物，并及时采取避障措施，避障成功率达到了 95% 以上。

四、多传感器融合算法的优化

（一）数据预处理与滤波

在多传感器融合过程中，传感器数据可能会受到噪声和干扰的影响，因此需要进行数据预处理和滤波。对于激光雷达的点云数据，可以采用统计滤波和半径滤波的方法去除噪声点。对于视觉相机的图像数据，可以采用高斯滤波和中值滤波的方法去除图像噪声。对于 GPS 和 IMU 数据，可以采用卡尔曼滤波的方法进行数据融合和滤波，以提高数据的准确性和稳定性^[7]。

（二）权重分配优化

在多传感器融合中，权重系数的分配对融合结果的准确性和可靠性有重要影响。为了优化权重分配，本文提出了一种基于自适应调整的权重分配方法。该方法根据不同传感器的测量精度和可靠性动态调整权重系数。例如，当 GPS 信号良好时，增加 GPS 的权重；当 GPS 信号受到遮挡时，减少 GPS 的权重，增加 IMU 和激光雷达的权重^[8]。

（三）算法复杂度优化

为了提高多传感器融合算法的实时性，需要对算法复杂度进行优化。可以采用并行计算和分布式计算的方法来加快算法的执行速度。对算法中的一些复杂计算进行简化和优化，减少不必要的计算量。

五、系统实现与验证

（一）硬件系统搭建

为了实现基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障系统，搭建了相应的硬件系统。该硬件系统包括传感器模块、计算模块和执行模块。传感器模块包括 GPS、IMU、激光雷达和视觉相机等传感器，用于获取周围环境的信息。计算模块采用高性能的计算机，用于对传感器数据进行处理和分析。执行模块包

括电机控制器和转向控制器，用于控制卡车的行驶和转向^[9]。

（二）软件系统开发

软件系统采用模块化设计，包括传感器驱动模块、数据处理模块、定位算法模块、避障算法模块和决策控制模块。传感器驱动模块负责与各个传感器进行通信，获取传感器数据。数据处理模块负责对传感器数据进行预处理和滤波。定位算法模块和避障算法模块分别实现基于多传感器融合的定位和避障算法。决策控制模块根据定位和避障结果制定卡车的行驶策略，并将控制指令发送给执行模块^[10]。

（三）系统验证与测试

在露天矿实际环境中对系统进行了验证和测试。测试结果表明，基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障系统能够准确地实现卡车的定位和避障功能，在复杂环境下具有良好的适应性和可靠性。系统的实时性也满足实际应用的需求。

六、结束语

本文对基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车定位与避障算法进行了深入研究。通过分析多传感器融合的概念、优势和方法，提出了基于多传感器融合的定位和避障算法，并对算法进行了优化。通过实验和测试验证了算法的有效性和系统的可靠性。

研究表明，多传感器融合技术能够有效提高露天矿无人驾驶卡车的定位精度和避障能力，在复杂露天矿环境下具有良好的适应性和可靠性。然而，本文的研究还存在一些不足之处，例如在极端环境下算法的性能还需要进一步提高，系统的鲁棒性还需要进一步增强等。未来的研究方向包括进一步优化多传感器融合算法，提高算法在复杂环境下的性能；加强系统的故障诊断和容错能力，提高系统的可靠性；开展与其他智能设备的协同作业研究，提高露天矿的整体生产效率。通过不断的研究和改进，基于多传感器融合的露天矿无人驾驶卡车技术将在露天矿领域得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 陈轶豪. 动态环境下基于多传感器融合的无人驾驶汽车定位与建图算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.002063.
- [2] 何朝洪. 未知环境下基于多传感器融合的同步定位构图与路径规划算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.001534.
- [3] 时勇. 基于多传感器融合的移动机器人定位与建图算法研究 [D]. 长安大学, 2024.DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2024.000173.
- [4] 阮顺领, 赵微, 辛智, 等. 改进时间弹性带的露天矿无人卡车避障路径规划研究 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(06): 1449–1457.DOI: 10.11992/tis.202306033.
- [5] 樊宏丽, 李郁峰, 郭荣, 等. 基于 IMU 与激光雷达融合的无人弹药补给车 SLAM 系统研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(05): 196–201.DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.05.028.
- [6] 马宝良, 崔丽珍, 李敏超, 等. 露天煤矿环境下基于 LiDAR/IMU 的紧耦合 SLAM 算法研究 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(03): 236–244.DOI: 10.12438/cst.2023–0538.
- [7] 王伯君. 智慧矿山中无人驾驶技术发展趋势研究与总体设计 [J]. 煤炭科技, 2024, 45(05): 24–31.DOI: 10.19896/j.cnki.mtkj.2024.05.005.
- [8] 任高丽. 基于多传感器融合的无人驾驶汽车 SLAM 技术研究 [D]. 东北大学, 2024.DOI: 10.27007/d.cnki.gdbeu.2021.003042.
- [9] 常睿智. 基于多传感器融合的同步定位与建图方法研究 [D]. 吉林大学, 2024.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2024.002187.
- [10] 沈汐. 面向自动驾驶的多传感器实时定位与地图构建技术研究 [D]. 北方工业大学, 2024.DOI: 10.26926/d.cnki.gbfgu.2024.000372.