

基于GIS的露天矿无人驾驶路径规划与动态避障算法浅析

魏万富

宁夏煤炭基本建设有限公司 宁夏银川 750000

摘要: 随着智慧矿山建设的深入推进,露天矿无人驾驶运输技术成为提升生产安全与效率的关键。本文旨在浅析基于地理信息系统(GIS)的无人驾驶矿卡路径规划与动态避障算法的应用原理与技术特点。文章阐述了GIS技术如何为路径规划提供高精度的露天矿三维空间数字底座,分析了在此基础上的全局静态路径规划算法与局部动态避障策略的核心思想及其协同工作机制。研究表明,融合GIS的智能算法能有效应对露天矿复杂多变的环境,是实现安全、高效、可靠无人运输的重要技术支撑,并对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 露天矿;无人驾驶;路径规划;动态避障;地理信息系统(GIS)

前言

露天矿开采作为全球矿产资源供给的主要方式,其生产规模不断扩大,但同时也面临着安全生产压力增大、人力成本攀升及生产效率瓶颈等多重挑战。在此背景下,以无人驾驶矿用卡车(矿卡)为核心的智能运输系统成为矿山自动化、智能化升级的焦点。无人驾驶矿卡的核心技术难题在于如何在环境复杂、道路非结构化、工况动态变化的露天矿区内,实现安全、高效、经济的自主行驶。其中,路径规划与动态避障是两项至关重要的技术。传统的算法往往依赖于车载传感器实时感知,计算量大且难以预知全局最优。地理信息系统(GIS)凭借其强大的空间数据管理、分析与可视化能力,能够为无人驾驶系统提供精确、全面的静态环境信息,构成了智能决策的“大脑”和“数字地图”。因此,研究基于GIS的路径规划与动态避障算法,对于提升露天矿无人驾驶系统的整体性能、可靠性与安全性具有重要的理论价值和现实意义。本文将围绕这一主题,对其技术内涵与应用进行初步探讨。

一、GIS技术在露天矿无人驾驶中的基础性作用

地理信息系统(GIS)是一种用于采集、存储、处理、分析、管理和呈现地理空间数据的计算机系统。在露天矿无人驾驶的应用场景中,GIS扮演着不可或缺的基础平台角色。

首先,GIS构建了高精度的露天矿三维数字地图。这份地图远非普通的二维导航地图,它集成了矿区的地形高程模型、道路网络、电铲与卸料点位置、排土场边

界、建筑物、固定设施、禁行区域、坡度、曲率以及地质水文等多源异构空间数据。这份静态的、先验的环境模型为无人驾驶矿卡的路径规划提供了全局的、可靠的环境认知基础。车辆无需仅依靠即时传感器从头开始理解世界,而是拥有了一个已知的“战场沙盘”^[1]。

其次,GIS提供了强大的空间分析能力。基于数字地图,系统可以进行坡度分析、可视域分析、最短/最优路径分析、缓冲区分析等。例如,路径规划算法可以调用GIS的坡度分析功能,优先选择坡度平缓的路线,以降低能耗和车辆损耗;或者通过可视域分析,评估在某些路段通信基站的信号覆盖情况,为通信链路冗余设计提供依据。

最后,GIS实现了运输全过程的可视化监控与管理。调度中心可以在地图上实时显示所有无人矿卡的位置、状态、速度、载重等信息,并能够对其行驶轨迹进行回溯与分析,为生产调度、优化运营和应急指挥提供直观的决策支持^[2]。因此,GIS是连接物理矿山与数字世界的桥梁,是无人驾驶系统赖以运行的空间信息基础设施。

二、基于GIS的全局路径规划算法分析

全局路径规划是在已知的全局环境地图(由GIS提供)上,为矿卡从起点(如电铲装料点)到终点(如破碎站或排土场)计算出一条全局最优或次优的参考路径。这条路径通常是静态的,在任务开始前就已确定,不考虑临时出现的动态障碍物。

在露天矿场景中,全局路径的最优性评价标准是多目标的,不仅包括路径长度最短,更需综合考虑行驶时间、能耗、安全性、道路等级和坡度等因素。基于GIS

的路径规划算法能够充分利用其蕴含的丰富属性数据来进行多约束条件下的决策。

常见的全局路径规划算法，如Dijkstra算法、A算法及其衍生算法（如D Lite），在GIS构建的道路网络图中表现优异。它们将道路抽象为图结构中的“边”，将道路交叉点或特征点抽象为“节点”，每条边都被赋予了权重（代价），这个权重可以是距离，也可以是融合了距离、坡度、道路质量、转弯难度等信息的综合代价值。算法通过搜索图中从起点到终点的最小累积代价路径，得到全局参考路线。

GIS平台为这些算法的应用提供了便利。算法可以直接调用道路网络拓扑数据，并便捷地获取每条道路段的各类属性值以计算权重。此外，由于矿区道路会随着开采推进而动态变化（如新的工作平台形成、旧道路废弃），GIS地图可以方便地进行更新和维护，从而确保全局路径规划始终基于最新的环境信息。

三、局部动态避障与实时路径重规划策略

全局路径规划为矿卡提供了一条从起点到目标点的宏观、静态最优路径，可被视为一条理想的“安全走廊”。然而，露天矿场是一个典型的非结构化、动态变化的环境，矿卡在实际行驶过程中，必然会遭遇全局地图中未事先记录或无法预知的动态与静态障碍物。这些障碍物包括但不限于：临时停靠或故障的其他车辆、边坡滑落的碎石、因降雨形成的积水坑洼、正在进行作业的其他无人驾驶矿卡以及意外进入作业区域的人员。面对这些复杂且突发的状况，仅仅依赖预先规划的全局路径是远远不够的。因此，必须在遵循全局路径宏观指引的大前提下，赋予矿卡进行局部动态避障与实时路径重规划的能力，这是确保其安全、高效、自主运行的核心技术。

局部动态避障算法的效能严重依赖于车载传感器系统所提供的实时、高精度环境感知数据。这套系统通常由多源传感器融合构成，包括激光雷达（LiDAR），用于精确获取周围环境的三维点云信息，识别障碍物的形状和距离；毫米波雷达，具备良好的抗干扰能力，可在大雾、雨雪等恶劣天气下稳定测距和测速，尤其擅长探测金属物体；以及摄像头，可提供丰富的纹理和颜色信息，用于障碍物分类（如区分车辆与行人）和交通标识识别。这些传感器协同工作，共同构建一个以自行车为中心、不断更新的局部代价地图（Local Costmap），实时追踪和标注出可通行区域与危险障碍物区域，为后续的局部规划

决策提供数据基础。

目前，主流的局部路径规划算法主要分为以下几类，各有其适用场景与优缺点。首先是人工势场法。该方法将运动规划问题转化为一个虚拟力场的受力问题：目标点对车辆产生“引力”，引导其向前移动；而障碍物则对车辆产生“斥力”，阻止其靠近。车辆在合力作用下朝着目标点运动并自动避开障碍。其最大优势在于计算简洁、反应迅速，符合实时性要求。但其固有缺陷是容易陷入局部极小值点，即车辆可能被困在U型障碍物或两个对称障碍物之间，因合力为零而无法脱身，这对于矿卡作业的可靠性构成了挑战。

其次是动态窗口法。DWA算法的核心思想是在机器人的速度空间（线速度和角速度）中进行离散采样，生成大量可行的速度组合。对于每一组速度，模拟计算出车辆在下一个短时间周期内的运动轨迹。随后，通过一个精心设计的评价函数对这些轨迹进行评分，评估标准通常包括：轨迹与最近障碍物的距离（安全性）、轨迹末端朝向与目标点方向的接近程度（导向性）、以及当前速度的大小（效率性）。最终，选择得分最高的速度对作为控制指令输出。DWA充分考虑了车辆自身的动力学约束，适用于低速、动态环境下的实时避障，在露天矿卡的应用中表现出良好的性能。

第三类是基于采样的算法，以快速随机探索树（RRT）及其多种变体为代表。这类算法通过在车辆的配置空间中进行随机采样，并逐步构建一棵通往目标点的搜索树，从而快速找到一条可行的无碰撞路径。它们在高维空间和复杂障碍环境中具有较高的搜索效率，且概率完备性。改进后的算法如RRT*，还能通过后续优化逐渐趋近于一条最优路径。

然而，必须清醒地认识到，如果孤立地使用上述任何一种局部避障算法，都可能产生“短视”或“贪婪”的行为。例如，为了避开当前一个较小的临时障碍，车辆可能会做出一个大幅度的绕行动作，却不慎驶入一个死胡同或与全局路径产生严重偏离，最终导致任务失败或效率大幅降低。因此，一个鲁棒的无人驾驶系统必须采用一种分层式的规划架构，将全局规划的宏观最优性与局部规划的实时灵活性有机地结合起来。

在这一分层架构中，地理信息系统（GIS）扮演了至关重要的“信息枢纽”和“决策顾问”角色，是实现全局与局部无缝协同的关键。当局部传感器感知到障碍物导致原路径不可通行时，整个系统并非进行漫无目的的

局部搜索。其工作流程如下：首先，感知系统将识别出的障碍物信息（包括其地理坐标、轮廓、类型及可能的速度矢量）实时回传并标注更新至中央GIS平台，形成一个动态的、临时性的障碍物图层。这一操作实现了环境信息的“众包”更新与共享，为车队中其他车辆提供了重要的环境情报。随后，本地规划器会向GIS系统发起一次重规划请求，请求的范围并非全局，而是以当前车辆位置为起点，以重新汇入前方全局路径的某个最佳导航点（Look-Ahead Point）为终点，在GIS更新的、包含此临时障碍的局部地图范围内，进行一次快速的、小范围的路径再计算。

GIS为此重规划过程提供了不可或缺的全局上下文信息。它确保了新规划出的局部路径不仅在当前瞬间是无碰撞的，而且其最终导向必然是高效、平滑地回归到原有的全局最优路径上来，从而彻底避免了局部规划的盲目性，保证了整个运输任务执行过程的连贯性和整体最优性。通过这种方式，GIS将静态的全局环境知识与动态的实时感知信息深度融合，驱动矿卡在复杂动态环境中做出既安全又智能的决策。

四、系统集成与面临的挑战

一个成熟、可投入实际应用的基于GIS的露天矿无人驾驶系统，绝非几个独立算法的简单堆砌，而是一个由多子系统深度耦合构成的复杂信息物理系统（CPS）。其核心是全局规划层、局部规划层与控制执行层的闭环协作。全局规划层依托高精度GIS地图提供宏观战略路径；局部规划层依赖感知数据，处理战术层面的实时避障与重规划；控制执行层则将规划出的路径转化为具体的油门、刹车和转向指令，精准控制车辆运动。

然而，这三层的有效运作又高度依赖于一个强大的底层技术支持体系。GIS平台作为系统的“数字底盘”，是所有空间数据的存储、管理和服务中心。感知系统（激光雷达、毫米波雷达、摄像头）如同车辆的“眼睛”，持续不断地扫描和理解周围环境。高精度定位系统（通常采用全球导航卫星系统GNSS与惯性测量单元IMU

融合的方案）则为车辆提供厘米级的自我定位，是一切规划得以在真实世界中落地的前提。此外，车联网通信系统（V2X）如同“神经网络”，实现了车与车（V2V）、车与基础设施（V2I）、车与云端调度中心（V2C）之间的高速、低延时通信，使得信息共享和协同调度成为可能^[1]。这五大技术模块的深度融合与稳定运行，共同构成了无人驾驶矿卡得以实现的技术基石。

尽管该技术蓝图展现出巨大的应用潜力和经济效益，但在露天矿这一极端苛刻的实际应用场景中，其全面落地仍面临着诸多严峻的技术与工程挑战。

结束语

综上所述，GIS技术为露天矿无人驾驶矿卡的路径规划与动态避障提供了坚实的地理空间数据基础和强大的分析能力。通过将基于GIS的全局静态路径规划与基于实时感知的局部动态避障算法相结合，能够有效地引导无人矿卡在复杂危险的矿区环境中安全、高效地完成运输任务。这种“全局参考、局部调整”的分层规划策略是当前技术条件下的主流解决方案。未来，随着5G/V2X通信、云计算、边缘计算、人工智能（特别是深度学习与强化学习）以及传感器技术的进一步发展，GIS与无人驾驶技术的融合将更加深入。我们有望看到更智能的“云-边-端”协同计算架构、更精准的预测性规划算法以及更高效的多车协同作业模式，最终推动露天矿朝着全面智能化、无人化的方向稳步前进，彻底重塑传统矿业的运营模式。

参考文献

- [1] 卢国明, 邓昭. 复杂交通环境无人驾驶车辆防碰撞方法仿真[J]. 计算机仿真, 2024(02): 441-445.
- [2] 李博, 栾博钰, 何玉东. 露天矿山无人驾驶运输效率评估方法[J]. 露天采矿技术, 2024(01): 21-25.
- [3] 邵津津. 矿用卡车无人驾驶车载系统关键技术在西湾露天矿的应用[J]. 智能矿山, 2024, 5(10): 73-80.