

## 基于 UWB 精准定位的数字孪生矿山管控平台的研究与实现

梁琴琴 何东林 贺纪国

山东正元冶达环境科技有限公司, 山东 济南 250101

**[摘要]**为提高矿山作业的安全性和效率,本研究旨在开发一种基于超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术的三维可视化矿山安全生产管控平台。研究的目的在于通过先进的定位技术改善矿山安全管理,减少事故风险。研究方法包括利用 UWB 技术进行精准定位、优化定位算法、构建三维环境模型以及设计用户友好的交互界面。通过这些方法,实现了矿工位置的实时监控和环境的三维可视化表示。研究结果表明,所开发的平台能够在复杂的矿山环境中实现高精度的定位。平台不仅提供了直观的三维位置展示,还整合了电子围栏和紧急响应机制,大幅提升了安全监控的效能。此外,用户界面的直观设计使得管理人员能够轻松掌控矿山安全状况。本研究成功实现了一个综合性的矿山安全生产管控平台,有效结合了 UWB 定位技术与三维可视化,为矿山安全管理提供了一个创新解决方案。该平台的实施能显著提高矿山工作人员的安全水平,为未来矿山安全生产管理提供参考。

**[关键词]** UWB; 精准定位; 数字孪生; 矿山管控平台

DOI: 10.33142/sca.v7i1.10916

中图分类号: TD823.97

文献标识码: A

### Research and Implementation of a Digital Twin Mining Management and Control Platform Based on UWB Precise Positioning

LIANG Qinqin, HE Donglin, HE Jiguo

Shandong Zhengyuan Yeda Environmental Technology Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250101, China

**Abstract:** In order to improve the safety and efficiency of mining operations, this study aims to develop a three-dimensional visualization mining safety production control platform based on Ultra Wideband (UWB) technology. The purpose of the research is to improve mine safety management and reduce accident risks through advanced positioning technology. The research methods include using UWB technology for precise positioning, optimizing positioning algorithms, constructing three-dimensional environmental models, and designing user-friendly interactive interfaces. Through these methods, real-time monitoring of the miner's location and three-dimensional visualization of the environment have been achieved. The research results indicate that the developed platform can achieve high-precision positioning in complex mining environments. The platform not only provides intuitive three-dimensional position display, but also integrates electronic fences and emergency response mechanisms, greatly improving the efficiency of security monitoring. In addition, the intuitive design of the user interface allows managers to easily control the safety status of the mine. This study successfully implemented a comprehensive mine safety production control platform, effectively combining UWB positioning technology and 3D visualization, providing an innovative solution for mine safety management. The implementation of this platform can significantly improve the safety level of mining personnel and provide reference for future mine safety production management.

**Keywords:** UWB; precise positioning; digital twin; mining control platform

### 引言

矿山安全生产历来是矿业发展中的关键问题。随着矿业技术的发展和矿山作业条件的复杂性增加,安全生产的挑战也随之增大。矿山事故往往造成重大的人员伤亡和经济损失,因此提高矿山安全管理水平,保障矿工的生命安全和健康,是矿山企业及相关政府机构的重要职责。当前,随着技术的进步,传统的矿山安全管理方法已逐渐显示出局限性,迫切需要更高效、更智能的安全管理技术来应对日益复杂的矿山作业环境。

超宽带(Ultra-Wideband, UWB)定位技术,以其高精度和强穿透能力,为矿山安全生产提供了新的解决方案。

UWB 技术利用短脉冲宽带信号,可以实现毫米级的定位精度,且不易受到多径效应和遮挡的影响。这使得 UWB 技术在复杂的矿山环境中具有显著的优势,特别是在定位精度和系统稳定性方面。此外,UWB 系统的低功耗特性也使其适合在矿山长时间持续运作。

鉴于此,本研究的目的在于开发一个基于 UWB 定位技术的三维可视化矿山安全生产管控平台。通过集成高精度定位系统和三维可视化技术,旨在提升矿山安全监控的效率和效果,降低安全事故发生的风险。该平台的开发不仅有助于实时监控矿工位置,确保其安全,还能优化矿山应急响应机制,提高矿山整体安全管理水平。

## 1 相关工作和理论背景

### 1.1 矿山安全技术的发展

矿山安全技术是保障矿工安全和矿山可持续发展的关键。近年来,随着技术的进步,矿山安全管理方法不断革新。早期的矿山安全管理主要依赖于人工巡检和基础的监控系统。然而,这些方法在处理复杂、多变的矿山环境时显得力不从心。为此,学术界和工业界投入大量研究,探索更先进的安全技术。例如,传感器网络的应用大幅提升了矿山环境监测的准确性和实时性。此外,机器人技术和自动化装备也开始在矿山巡检和事故应急中发挥作用。这些技术的发展为矿山安全管理带来了新的可能性。

### 1.2 UWB 定位技术及其在矿山中的应用

超宽带(UWB)技术是近年来迅速发展的无线通信技术之一。UWB系统通过发射和接收低能量、高带宽的脉冲信号,实现精准的距离测量和定位。在矿山环境中,UWB定位技术因其高精度和强抗干扰能力而受到重视。相较于传统的RFID或Wi-Fi定位技术,UWB能在复杂的地下环境中提供更为准确的位置信息。这对于实时监控矿工位置、预防事故和快速响应紧急情况具有重要意义。当前,UWB技术在矿山安全领域的应用研究正逐渐增多,展现出广阔的应用前景。

### 1.3 三维可视化技术在安全管理中的应用

三维可视化技术在多个领域得到了广泛应用,尤其是在安全管理领域。三维可视化技术能够直观地展现复杂信息,提高数据的可理解性。在矿山安全管理中,三维可视化技术可用于模拟矿山结构,实时显示矿工和设备的位置,甚至可以模拟事故发生时的应急响应路径。这些应用不仅增强了安全监控的直观性,还提高了决策的效率和准确性。尤其是结合UWB定位技术,三维可视化可以更精确地展示矿工在复杂环境中的具体位置,从而提高安全管理的有效性。

## 2 系统架构与设计

### 2.1 平台总体架构

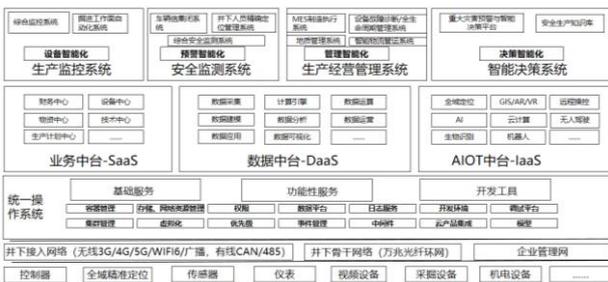


图1 数字孪生矿山管控平台

本研究开发的矿山安全生产管控平台基于模块化设计原则,整体架构分为四级:数据采集模块、UWB定位模块、三维可视化模块和用户交互模块。数据采集模块负责收集矿山内部的各种信息,包括矿工位置、环境参数等。UWB定位模块通过部署在矿山内的UWB节点实现对矿工精

准位置的追踪。三维可视化模块利用收集到的数据,在计算机界面上构建矿山的三维模型,并实时显示矿工的位置。用户交互模块为管理人员提供一个直观的操作界面,用于监控矿山状况和执行安全管理任务。

### 2.2 UWB 定位系统的集成与优化

UWB定位模块作为本平台的核心组成部分,发挥着非常重要的作用。该模块采用了尖端的UWB技术,通过在矿山关键位置部署多个UWB基站,实现了对矿工精确位置的高效追踪。这一高精度追踪功能对于确保矿工的安全和优化矿山的作业流程非常重要。

为了进一步提高定位的准确性和稳定性,本研究对UWB信号处理算法进行了深入的优化。这些优化措施包括但不限于高级的信号去噪技术,有效消除多径效应的策略,以及精细调整的定位算法。特别地,我们还考虑到了矿山环境中的特殊因素,例如温度和湿度对UWB信号传播的潜在影响。通过对这些环境因素的综合考量和应对措施的实施,我们显著提升了系统的鲁棒性和可靠性。

为了适应矿山环境的动态变化和潜在的挑战,我们的系统设计了一套自适应机制。这一机制允许UWB系统根据实时环境数据自动调整其参数,以保持最佳的定位性能。这种自适应能力使得系统不仅能在稳定环境下工作良好,而且能在变化多端的矿山条件下继续保持其高精度和高稳定性的特点。

### 2.3 三维可视化界面与用户交互设计

三维可视化模块的设计旨在提供一个直观、易于理解的界面,帮助管理人员快速准确地把握矿山状况。该模块利用计算机图形学技术,根据矿山的实际地形和结构数据,构建矿山的三维模型。矿工的位置信息通过UWB定位模块实时更新,并在三维模型中准确展示。此外,界面还集成了各类监控信息,如气体浓度、温度等环境参数,以及安全警报和应急指令。用户交互模块则提供了一个友好的操作界面,包括数据展示、报警信息处理和历史数据查询等功能,确保了管理人员能够高效地进行矿山安全管理。

## 3 关键技术实现

### 3.1 UWB 定位算法与精度优化

UWB定位技术的核心优势在于其出众的高精度和短时延定位能力,这对于矿山这样的复杂环境尤为关键。本研究采用的UWB定位算法基于时间差测量(Time Difference of Arrival, TDOA)原理。该原理通过精确测量信号从不同UWB基站到达标签的时间差来计算标签的精确位置坐标。这种方法在复杂的矿山环境中表现出了极高的定位准确性。

为了进一步提升定位的精度,我们对UWB定位算法进行了深度优化。这些优化措施包括了对信号同步误差的精确校正,以及多径效应的有效抑制。多径效应是矿山环境中常见的问题,它可能导致定位精度的显著下降。通过高

级的信号处理技术,我们能够显著减少这些效应对定位准确性的影响。本研究还采用了机器学习方法对历史定位数据进行深入分析。通过这种方法,我们不仅能够理解定位性能在不同条件下的表现,还能够识别和自动调整系统以应对复杂的环境变化。这种基于数据驱动的优化方法使我们的 UWB 定位算法在实际应用中达到了更高的精度和稳定性。

### 3.2 电子围栏与轨迹跟踪技术

电子围栏和轨迹跟踪技术在矿山安全管理中扮演了非常重要的角色。电子围栏技术,尤其是在本研究开发的平台上,通过在三维可视化界面上设置虚拟边界,能够实时监控矿工是否进入或离开特定区域。这一技术不仅提高了安全管理的效率,而且显著提升了预防事故的能力。一旦矿工进入禁止区域或偏离既定的安全路线,系统会立即发出警报,从而使管理人员能够及时采取必要的安全措施。

轨迹跟踪技术则进一步扩展了矿山安全管理的能力。通过记录和分析矿工在矿山内的移动轨迹,这一技术不仅帮助管理人员实时了解矿内人员的分布情况,还能够监控矿工的行为模式。此外,轨迹跟踪数据的积累对于理解矿山内的作业流程和潜在安全风险具有重要价值。长期而言,这些数据可以用于改进矿山的工作流程和安全规程,从而在根本上提升矿山的整体安全水平。

结合电子围栏和轨迹跟踪技术,本研究开发的平台能够为矿山安全管理提供一个全面且高效的解决方案。这些技术的应用不仅使得矿山安全管理更加主动和智能化,也为防止事故的发生提供了强有力的技术支持。

### 3.3 视频联动与警告系统

视频联动系统是本研究的另一项关键技术。该系统将视频监控与 UWB 定位系统结合,实现了视觉与定位数据的融合。当系统检测到异常情况,如矿工进入危险区域,视频联动系统会自动调整相应摄像头的焦点,对相关区域进行实时监控。同时,警告系统能够根据不同的安全威胁级别发出相应的警报,并通过平台向管理人员和矿工发送紧急通知,确保矿山安全生产的及时响应。

## 4 案例研究与应用实例

### 4.1 应用案例介绍

为了验证平台的实用性和有效性,本研究选择了某大型地下矿山作为应用案例。该矿山具有典型的复杂地形和多变的作业环境,是检验系统性能的理想场所。在此矿山中,部署了完整的 UWB 定位系统,并在控制中心建立了三维可视化管控平台。矿工和设备均配备了 UWB 标签,以实现实时定位和监控。

### 4.2 实际应用效果分析

系统部署后,立即展现出其对矿山安全生产的显著贡献。首先,UWB 定位系统提供了精确的矿工定位信息,极大提高了对矿工位置的监控能力。电子围栏功能有效预防

了矿工进入危险区域的事件,提高了安全管理的主动性。三维可视化界面则使得监控数据更加直观,便于管理人员快速做出决策。视频联动系统也在几次紧急情况中发挥了关键作用,帮助及时发现并处理了潜在的安全隐患。

### 4.3 用户反馈与评价

用户反馈表明,该平台显著提升了矿山的安全管理水平。矿工和管理人员普遍认为,平台不仅提高了他们的安全感,也使得安全管理工作更加高效、便捷。特别是在应急情况下,平台的快速响应和准确信息提供了宝贵的时间窗口,减少了事故发生的可能性。一些用户建议,未来的系统升级可以考虑增加更多用户定制化功能,以满足不同矿山的特殊需求。

## 5 性能评估与分析

### 5.1 定位精度与响应时间的评估

为了评估系统的性能,重点对 UWB 定位系统的定位精度和响应时间进行了测试。实验表明,本研究开发的 UWB 定位系统在典型矿山环境中的平均定位误差小于 30 厘米,满足了高精度定位的需求。系统的平均响应时间低于 2 秒,能够实时反映矿工的位置变动,为及时的安全管理提供了支持。这些测试结果证明了系统在关键性能指标上的优越性,满足了矿山安全监控的实际需求。

### 5.2 系统稳定性与可扩展性分析

系统稳定性是保障长期运行的关键因素。在长达数月的现场测试中,系统显示出了高度的稳定性,无论是在极端环境条件下还是在连续运行的情况下,均未出现明显的性能下降。而且,系统的设计考虑了可扩展性。它能够轻松适应不同规模矿山的需求,无论是扩展更多的定位节点,还是增加更复杂的安全管理功能,系统均能够灵活地进行配置和升级。这一特性使得系统不仅适用于当前的矿山环境,也能够适应未来技术和需求的发展。

## 6 讨论与展望

### 6.1 系统实施的挑战与局限性

虽然本研究开发的矿山安全生产管控平台在实际应用中表现出色,但在实施过程中仍面临一些挑战和局限性。首先,UWB 定位技术在极端矿山环境下的稳定性和精度仍有提升空间,尤其是在复杂地质结构的干扰下。其次,系统的实施需要大量的初始投入和维护成本,对于一些中小型矿山来说可能是一个挑战。此外,系统的用户接受度和操作培训也是实施过程中不可忽视的因素,需要通过用户教育和界面优化来加以解决。

### 6.2 未来改进方向和技术趋势

面对这些挑战和局限性,未来的研究和开发可以从以下几个方面进行改进和创新:首先,可以进一步研究和开发更高效、更稳定的 UWB 定位算法,尤其是针对复杂矿山环境的适应性改进。其次,探索成本效益更高的系统实施方案,例如通过模块化设计降低初始投资,或采用云计算

和大数据技术减少维护成本。此外,加强用户体验设计,通过更直观的界面和简化的操作流程,提升系统的易用性和用户满意度。在技术趋势方面,结合人工智能和物联网技术的发展,未来的矿山安全管理系统将更加智能化和自动化,能够实现更精准的风险预测和更有效的事事故预防。

## 7 结语

总体而言,本研究的成果不仅为矿山安全生产提供了一个高效的管理工具,也为未来矿山安全技术的发展指明了方向。随着技术的不断进步,期望未来能够开发出更加先进和智能化的矿山安全管理系统,为保障矿工安全和促进矿业可持续发展做出更大的贡献。

## [参考文献]

- [1]邢震,韩安,陈晓晶,等.基于工业互联网的智能矿山灾害数字孪生研究[J].工矿自动化,2023,49(2):23-3055.
  - [2]武枝,王振飞,张效文,等.基于 UWB 技术的矿井人员(设备)精准定位与环境监测综合基站研究[J].数字通信世界,2021(5):98-99.
  - [3]吉敏鹏.基于 UWB 的高密度精准定位技术的研究[J].自动化应用,2023,64(13):245-248.
  - [4]晋海瑜.基于 UWB 的煤矿人员精准定位系统设计研究[J].内蒙古石油化工,2022,48(7):32-36.
- 作者简介:梁琴琴(1985.11—),女,学历:硕士,高级工程师,地质资源与地质工程。