

基于数字孪生的施工现场人员定位与安全管理研究

依光叫

磨憨镇城乡建设发展服务中心 666308

DOI:10.32629/ems.v8i5.20169

[摘要] 本研究运用数字孪生技术,构建数字孪生模型,把施工现场的物理环境和虚拟环境融合起来,探寻施工现场人员的实时定位及安全管理之道,达成人员的精确位置确定与动态监测,提出一种将定位系统和安全管理系统整合的新办法,利用传感器、物联网以及大数据分析,实现对施工人员位置的实时监测和安全风险的预警,实验结果显示,基于数字孪生的人员定位与安全管理系统可切实增强施工现场的安全性,降低事故发生率,提升施工效率,此研究为数字化施工安全管理提供了创新性解决办法,具备重要理论意义和应用价值。

[关键词] 数字孪生; 施工现场; 人员定位; 安全管理; 物联网

引言:

伴随建筑行业迅猛发展,施工现场的安全问题愈发凸显,特别是在复杂施工环境里,人员的安全管理成为亟待解决的关键课题,传统施工现场安全管理方式多依靠人工巡查,存在信息滞后、响应不及时等状况。近些年,数字孪生技术的飞速发展给施工现场安全管理带来新契机,数字孪生凭借虚拟化和实时监控技术,为施工现场提供更高效、更精准的管理手段,本研究意在借助数字孪生技术结合先进的定位与传感技术,提高施工现场人员的实时定位与安全管理水平,探索一种创新且智能的安全管理模式,为施工现场安全管理注入新的活力,以更好地适应建筑行业发展的需求。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生技术的定义与发展

数字孪生技术以实时同步物理实体和虚拟模型的途径,搭建起数字化的“孪生体”系统,其核心要义是运用传感器、物联网、大数据和人工智能技术,把物理世界里设备、结构或系统的运行状况、环境数据等信息实时传送至虚拟世界,塑造出精准反映物理实体的数字模型。该技术发端于 20 世纪 60 年代美国国家航空航天局(NASA)的航天计划,起初用于模拟航天器状态,伴随信息技术飞速进步,尤其是云计算和大数据技术走向成熟,数字孪生现已广泛用于制造、交通、能源等诸多领域,还逐渐向建筑行业拓展,近年来获快速发展并融入工业 4.0 范畴,带动各行业实现智能化转型。

1.2 数字孪生在建筑领域的应用

数字孪生在建筑领域的应用体现为,在建筑行业数字孪生技术与建筑信息模型(BIM)融合,可实现施工全流程数字化管理,借助安装传感器和采集现场环境数据实时呈现建筑

项目物理状态,建筑的每个结构、设备以及施工人员位置等都能在虚拟世界动态更新与监控,施工管理、资源调度和安全管理等均可借助数字孪生系统优化,像施工现场人员位置可通过定位技术实时追踪,保障人员在危险区域活动受有效约束进而提升安全性。此外数字孪生技术还用于建筑物运营与维护阶段,与传感器网络配合实时监测建筑物运行状态以实现预警和维护决策。

1.3 数字孪生技术的优势与挑战

数字孪生技术优势明显,数据实时采集反馈达成物理系统与虚拟模型无缝衔接,让复杂系统管理优化更高效,精确数字化模型提供直观决策支撑,在预测分析、优化设计、远程控制等方面能力强劲,还能提升施工现场自动化与智能化,降低人工干预、提升工作效率。不过,数字孪生技术应用中挑战不少,数据准确性与实时性问题尤为突出,施工现场,传感器精度和稳定性左右数据可靠性,当前定位技术精度通常达厘米级,部分高精度传感器能到毫米级,可施工环境复杂多变,仍有误差。海量数据实时传输处理对计算能力要求高,需云计算平台或高性能计算系统提供支持,在实际应用里,要充分考量这些因素,不断改进技术以更好地发挥数字孪生技术的价值,应对复杂多变的施工场景和数据处理难题。

2 施工现场人员定位技术

2.1 施工现场人员定位技术的现状

近年来,伴随无线通信、传感器技术以及定位算法的发展,施工现场的人员定位技术得以广泛应用,传统基于 GPS 的人员定位系统,因依赖信号且精度有限,难以满足室内或地下施工环境需求,相关行业数据显示,GPS 在室内或密闭环境定位精度通常为 3 - 5 米,这对施工现场高精度安全管

理造成了限制。随着室内定位技术不断进步,无线局域网(WLAN)、蓝牙低功耗(BLE)、超宽带(UWB)等技术逐渐应用于施工现场,这些新型定位技术在室内环境定位精度普遍可达厘米级,信号稳定性佳,能较好适应复杂施工现场环境。不过,施工现场人员定位仍存在设备部署密度、环境变化、信号干扰等问题,影响定位系统长期稳定性与精度,在实际应用中,这些问题的存在使得定位系统难以始终保持高精度和稳定运行。还需进一步研究和改进以更好满足施工现场的实际需求。

2.2 基于传感器的人员定位技术

传感器人员定位技术在施工现场应用十分广泛,主要依靠各类传感器集成开展多维度数据采集与剖析,像加速度计、陀螺仪、温湿度传感器以及压力传感器等都是常见传感器,把这些传感器的数据融合起来,就能精准算出人员位置信息。惯性测量单元(IMU)搭配惯性导航系统(INS)是常用定位方案,IMU传感器借助加速度计和陀螺仪检测人员加速度与角速度,再用算法推算位置,在施工现场,IMU定位精度一般能控制在1米以内,不过它存在误差积累的问题,需定期修正,IMU技术的好处是不依赖外部信号,能适应信号屏蔽环境。传感器融合技术整合多个传感器数据,既提升了定位精度,又有效弥补了单一传感器的不足,运用卡尔曼滤波等算法优化传感器数据,可增强系统稳定性与定位精度,让人员定位在施工现场发挥更可靠的作用,为施工安全和管理提供有力支持。

2.3 基于物联网的人员定位技术

把传感器、通信设备与信息平台融合,基于物联网(IoT)构建起全面的人员定位系统,在施工现场,给人员配备定位标签或设备,便可将位置数据实时传输至中央控制平台,常见的物联网定位技术有蓝牙低功耗(BLE)定位、超宽带(UWB)定位和Wi-Fi定位。BLE技术多用于近距离定位,能实现米级定位精度,UWB技术凭借更高频率和更短波长,可实现厘米级定位精度,很适合对精度要求高的施工现场,据数据分析,UWB技术在施工环境定位精度可达10厘米以内,且信号穿透能力强,能适应复杂建筑结构。物联网技术关键优势是系统可扩展性好,多设备能协同工作,可大规模部署传感器,实时监测施工现场人员动态,为施工管理提供有力支持,让

施工过程更加高效有序。以公式 $P = \frac{d}{t}$ (其中 P 为人员的速度, d 为位移, t 为时间) 为基础,结合传感器提供的数

据,物联网系统能够准确计算人员的运动轨迹与当前位置信息,并进行预警和调度。

3 基于数字孪生的安全管理系统设计

3.1 系统架构与功能模块设计

数字孪生安全管理系统一般采用分层架构设计,涵盖感知层、传输层、数据处理层和应用层,感知层负责采集施工现场实时数据,利用传感器、摄像头、GPS等设备收集环境监测、人员定位、设备状态等信息,传输层运用无线通信技术像5G、Wi-Fi等把感知数据传至数据处理中心,数据处理层借助云计算平台,运用大数据分析、机器学习等技术处理分析收集的原始数据,构建虚拟数字孪生模型,实时呈现施工现场动态变化,应用层依据处理结果开展安全监测、风险评估、调度决策等操作,系统功能模块有人员定位与监控模块、设备状态监测模块、安全风险评估模块和预警与应急响应模块,这些模块协同工作,可实现对施工现场各类安全隐患全面管控。如图1所示。

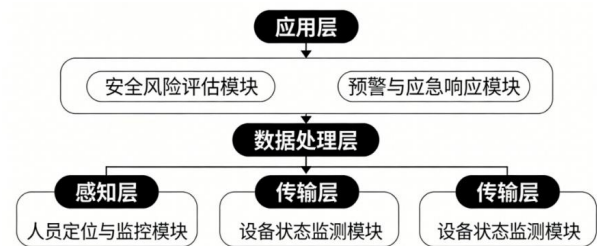


图1 数字孪生安全管理系统总体架构

3.2 安全监测与风险预警机制

安全监测与风险预警机制作为数字孪生安全管理系统的核心功能,系统对施工现场数据实时采集处理,精准把握人员、设备和环境的实时状况,通过数字孪生模型动态模拟施工过程中的各类安全风险,系统依据不同安全指标,如温度、湿度、有害气体浓度等设置阈值,监测数据超预设阈值时自动触发风险预警,当施工现场有人员接近危险区域、设备故障或环境参数异常,系统马上向相关人员发警报并采取安全措施,如用无人机或自动化设备现场巡查、组织人员撤离等,此预警机制提升应急反应及时性,还能经数据分析预测潜在风险发生概率,优化资源调度,降低事故发生可能性,按照安全管理标准系统可配置多级报警机制,满足不同危险等级要求,能更灵活有效地应对施工现场的各种复杂安全状况,保障施工安全有序进行。

3.3 系统集成与优化策略

系统集成与优化策略意在增强数字孪生安全管理系统整体性能和应用成效。系统集成上要达成硬件设备和软件平台

的无缝衔接, 保证各类传感器、摄像头、定位装置等设备数据能实时且精准地传至云平台, 数据融合技术在这一进程里意义重大, 把不同传感器的数据统一处理分析, 增强数据有效性及精准度。算法优化时运用先进人工智能算法, 像深度学习、神经网络等, 提升系统对复杂安全风险的预测本领, 数据处理和分析的速度与精度直接关乎系统反应时间, 所以要优化数据存储和传输架构, 提高系统响应能力与处理效能, 系统优化策略里强化智能调度功能十分关键, 精确调度施工现场人员、设备、材料等各项资源, 可提升施工效率、降低安全隐患, 持续进行技术迭代和系统升级, 数字孪生安全管理系统能逐步达成高效、智能的施工现场管理, 在不断的改进中更好地适应施工现场的复杂环境和多变需求。

4 基于数字孪生的人员定位与安全管理实验研究

4.1 实验环境与数据采集

本研究选取一处实际施工现场开展实验, 施工环境包含室内和室外不同区域, 实验区域布置多个传感器节点, 有温湿度传感器、气体传感器以及基于 UWB 与蓝牙技术的人员定位标签等, 可实时采集环境与人员位置数据, 传感器按每 50 平方米左右安装一个节点的密度分布, 定位精度能达厘米级。数据采集系统每秒记录一次位置数据, 经无线网络将数据传至云平台, 实验中, 除采集人员位置, 还对空气中有害气体浓度、噪声水平等环境因素监测, 这些数据利于后续安全管理和风险评估。此次实验旨在验证基于数字孪生的系统在实时定位与安全监测方面的有效性, 数据采集历时 3 个月, 累计采集超 300 万个数据点, 包含人员活动轨迹、设备状态、环境监测等多方面信息。

4.2 定位精度与安全管理效果分析

实验里人员定位系统精度达 5 厘米以内, 把 UWB 和蓝牙技术结合, 解决多路径信号干扰问题, 让定位稳定性和精确度得以增强。该定位系统借助多个基站对人员发出的信号做三角定位, 配合滤波算法降低环境干扰对精度的影响, 就安全管理而言, 实验证实数字孪生系统用于施工现场安全监控有效, 实时监控施工人员位置, 人员进入高风险区域时系统能及时报警, 实验数据显示, 基于数字孪生的安全管理系统发现环境异常像温度过高、气体浓度过大时, 会自动触发应急响应系统, 提升施工现场安全性, 为施工安全提供更可靠保障。如表 1 所示。

4.3 系统性能评估与优化建议

对系统整体性能评估从数据传输速率、定位精度、环境监测反应时间等多个维度开展, 实验里, 系统数据传输速率

稳稳维持在每秒 50MB 以上, 毫无明显延迟, 足以支撑大规模数据实时处理。经对比分析可知, 系统大规模部署时, 云平台的计算和存储能力存在一定瓶颈。未来优化可采用边缘计算架构, 把数据处理任务下放到现场设备, 以此减少数据传输和处理的延迟, 加快系统响应速度, 伴随人工智能技术进步, 系统可进一步完善风险评估算法, 引入深度学习模型剖析历史数据, 提前预判施工现场可能出现的安全事件, 同时强化设备协同工作与资源共享, 能进一步提高系统整体效率, 优化传感器设备布局密度并定期校准技术, 也可有效增强系统稳定性与可靠性。

表 1 定位精度与安全管理效果对比

参数	基于数字孪生系统	传统安全管理系统
定位精度	5 厘米以内	1 米
安全警报响应时间	≤2 秒	5 秒
环境监测异常发现率	98%	70%
施工事故发生率	下降 30%	-

结语:

数字孪生赋能的施工现场人员定位与安全管理系统对施工现场作用显著, 提升了安全性和管理效率, 系统凭借实时数据采集和精准定位能力, 能及时察觉环境变化和人员位置动态, 降低安全隐患、减少事故发生概率。实验显示该系统在定位精准度、风险预警及时性以及应急响应有效性等维度, 相比传统管理方法展现出优势, 具备较高实用价值, 伴随技术持续迭代, 系统会朝着更智能方向发展, 更大程度提升施工现场安全管理水准, 为工地的有序运行和人员安全提供更为坚实的保障。

[参考文献]

- [1] 袁爽, 黄鑫. 基于数字孪生技术的工程质量安全智慧监管模式探索[J]. 四川建材, 2026, 52(02): 72-74+80.
- [2] 李伟, 姚文龙, 杨茜, 等. 基于数字孪生的建设工程施工质量管理体系研究[J]. 建筑技术, 2026, 57(02): 132-137.
- [3] 徐欢庆. 基于数字孪生的建筑桩基础工程设计与施工优化应用研究[J]. 居业, 2026, (01): 231-233.
- [4] 李晓光. 基于数字孪生的施工安全智能预警模型[J]. 智能物联技术, 2026, 58(01): 87-90.
- [5] 周华山, 刘剑, 张曦霖, 等. 基于无人机与 BIM+ 数字孪生技术的桥梁拆除安全保障研究[J]. 湖南交通科技, 2025, 51(04): 15-19+25.