

中文引用格式:宫培松,沈欣云,韩博雯,等.深基坑工程人员区域入侵行为预警数字孪生系统[J].中国安全科学学报,2025,35(8):33-39.

英文引用格式:GONG Peisong, SHEN Xinyun, HAN Bowen, et al. Digital twin system for early warning of regional intrusion behavior of personnel in deep foundation pit projects [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 33-39.

深基坑工程人员区域入侵行为预警 数字孪生系统*

宫培松 副教授, 沈欣云, 韩博雯, 郭圣煜** 副教授, 彭冠卿, 钟骏豪
(中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北 武汉 430074)

中图分类号: X924.3 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1471

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(CUG2642022006); 国家自然科学基金面上基金资助(72074198)。

【摘要】 为解决当前深基坑工程危险区域动态风险高、人员入侵行为预警不及时等问题, 开发集成建筑信息模型(BIM)和超宽带(UWB)的数字孪生系统。首先, 通过 OurBIM 三维图形引擎构建深基坑工程虚拟场景; 其次, 提出危险区域标定方法, 利用 UWB 实时定位施工人员与危险源; 然后, 建立人员入侵行为实时预警机制, 设计深基坑工程人员区域入侵行为预警数字孪生系统, 包括场景可视化、危险区域设置、预警数据记录等功能; 最后, 将系统应用于武汉市某深基坑工程项目。结果表明: 该系统能够监控深基坑工程 2 类危险区域的人员入侵行为, 综合预警成功率达 97.4%。该系统验证了数字孪生技术在施工安全领域的可行性和有效性。

【关键词】 深基坑工程; 入侵行为; 数字孪生; 危险区域; 建筑信息模型(BIM); 超宽带(UWB)

Digital twin system for early warning of regional intrusion behavior of
personnel in deep foundation pit projects

GONG Peisong, SHEN Xinyun, HAN Bowen, GUO Shengyu,
PENG Guanqing, ZHONG Junhao

(School of Economics and Management, China University of Geosciences,
Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: To address the dynamic risks in hazardous areas and the lack of timely warning of personnel intrusion within deep foundation pit, a digital twin system integrating BIM and UWB technology was developed. Initially, a virtual scene representing the deep foundation pit was constructed using the OurBIM 3D graphics engine. Second, a method for calibrating hazardous areas was proposed, and UWB technology was utilized to locate construction personnel and hazardous sources in real-time. Third, a real-time warning mechanism for personnel intrusion behavior was established, and a digital twin system was designed for regional intrusion warning of personnel in deep foundation pit, incorporating functionalities

* 文章编号: 1003-3033(2025)07-0033-07; 收稿日期: 2025-03-14; 修稿日期: 2025-05-18

** 通信作者: 郭圣煜(1988—), 男, 湖北咸宁人, 博士, 副教授, 主要从事工程安全和质量管理、风险管理等方面的研究。E-mail: gsy_yu@foxmail.com。

such as scene visualization, hazardous area definition, and warning data logging. Finally, the system was applied to a specific deep foundation pit in Wuhan. The results demonstrate that the system is capable of monitoring personnel intrusion behavior in two distinct types of hazardous areas within the deep foundation pit, achieving a comprehensive warning success rate of 97.4%. This system validates the feasibility and effectiveness of digital twin technology in the construction safety domain.

Keywords: deep foundation pit; intrusion behavior; digital twins; hazardous areas; building information modeling (BIM); ultra wide band (UWB)

0 引言

随着我国城镇化建设的发展,地下空间开发的需求不断增长,深基坑工程的数量和规模持续上升^[1],衍生出一系列的隐患与事故^[2]。其中,深基坑工程危险区域(如临边洞口处、机械设备旁)内高处坠落、物体打击等类型事故时有发生,易产生人员伤亡和财产损失。因此,危险区域的监控是深基坑工程安全管理的重要环节。当前,深基坑危险区域主要依靠的人工监控方式尚存在问题。一方面,深基坑工程危险区域的动态风险高^[3]。另一方面,针对危险区域的人员入侵行为预警不及时^[4]。施工人员临边作业多,人员与大型机械设备(如挖掘机、起重机等)作业的时空交集频繁,人工巡检等难以捕捉瞬发的人员入侵行为。因此,探究危险区域监控的自动化方法和实时预警机制,提升安全管理水平,在深基坑工程事故预防上具有重要意义。

近些年已有研究采用传感器、计算机视觉以及混合技术开展了工程危险区域的智能化监控。如MEI Xinyu等^[4]利用计算机视觉自动识别施工人员静态危险区域(基坑、临边、洞口等)入侵行为;KANAN等^[5]使用可穿戴的射频传感器实现圆形施工危险区域的自动监控和实时预警;LEE等^[6]设计了一种基于超声波和红外传感器的检测方法,用于实时监控施工人员是否靠近堆放物品的危险场地。这些研究虽然实现了工程危险区域的自动监控,但监控的对象仅为单一类型的危险区域,面向深基坑工程动态复杂的危险区域监控难以应用。数字孪生的概念最初是在密歇根大学的产品生命周期管理课程中提出^[7],并在美国航空航天局的航天器维护中得到应用。随着智能建造相关研究的深入,数字孪生被认为是数字工地应用最具潜力的技术之一^[8-9]。工程数字孪生借助传感设备实现工地实时数据的同步,创建高精度的虚拟场景来模拟工程建设实体的状态和行为,实现工程建设与管理任务的动态监控、分析和优化^[10]。将数字孪生应用于深基

坑工程,通过虚拟场景动态划分危险区域,再利用传感器实时捕捉人员入侵行为,有望实现危险区域的智能化监控。

鉴于此,笔者拟采用建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)相关技术构建深基坑工程虚拟场景,通过超宽带(Ultra Wide Band, UWB)获取人员和危险源的实时定位数据,建立危险区域标定方法和入侵行为实时预警机制,开发数字孪生系统,实现虚拟场景和现实环境的互操作性、深基坑工程2类危险区域的自动监控、人员入侵行为的实时报警和记录,以期提高施工现场风险管控水平。

1 深基坑工程虚拟场景构建

采用OurBIM图形引擎构建深基坑工程数字孪生的虚实同步的虚拟场景。OurBIM图形引擎是BIM的一种可视化工具,提供强大的2D和3D渲染功能,并与其他主流BIM软件(如Revit、SketchUp等)无缝集成,在各种硬件配置、终端形态下加载BIM模型,并与之进行实时交互。

相较于其余图形引擎,OurBIM图形引擎在应用程序编程接口(Application Programming Interface, API)设计与使用方面具有显著的集成优势。首先,OurBIM图形引擎的API文档开源,方便接口信息(如定位数据、预警信息)的自由获取。其次,OurBIM图形引擎的API设计简洁,使用过程代码量较低,操作相对简单,传输定位数据、标定危险区域等工作开发门槛被降低。

已有数字孪生的相关研究大多采用2D图形呈现虚拟场景^[11]。在深基坑工程上,2D图形难以全面、直观地传达其复杂的空间结构、分层分段施工状态以及各层段之间的空间关系。OurBIM图形引擎通过轻量化处理深基坑工程BIM模型,既保证模型的关键信息与精度,又提升模型加载与运行速度。构建的深基坑工程3D虚拟场景能够呈现深基坑工程的动态空间布局,同时,方便后续传感数据的解读。

构建虚拟场景采用如下步骤:①根据深基坑工程的设计图纸,使用 Revit 创建三维 BIM 模型;②将 BIM 模型上传至 OurBIM 图形引擎进行渲染处理,生成高保真的模型;③根据施工现场参与作业的人员和机械设备,在 OurBIM 图形引擎上添加相应的构件,形成与现场施工场景对应的虚拟场景,虚拟场景中施工进度根据实际情况实时更新和优化。

2 深基坑工程危险区域的自动监控

2.1 基于 UWB 的危险源与人员定位

深基坑工程数字孪生的虚实同步需要传感器产生的实时数据。作为一种常见的定位技术,UWB 在工程领域已经被广泛应用^[12]。各定位技术对比见表 1。相较于蓝牙、射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)、无线保真(Wireless Fidelity, WIFI)、超声波等通信定位技术,UWB 具有定位精度高、穿透性好、抗干扰能力强等优势^[13]。另外,UWB 功耗和成本低、信息安全性高、布设简单。在相同覆盖范围内,UWB 仅需少量的基站即可满足定位数据的采集与传输要求。因此,选择 UWB 实施危险源与人员定位。通过深基坑工程的危险源(起重机械、运输车辆、材料加工设备等)和施工人员的 UWB 标签,获取危险源与人员的实时定位数据。

表 1 各定位技术对比

Table 1 Comparison of positioning techniques			
定位技术	定位精度	穿透性	抗干扰
UWB	亚厘米-亚毫米	好	强
蓝牙	数米;<8 m	好	较弱
RFID	亚米-亚厘米	差	弱
WIFI	数米;<10 m	较差	较强
超声波	亚米-亚毫米	差	强

UWB 通过共享测距信息实现定位,目前常用的定位方法^[14]有基于信号到达角度、到达时间(Time of Arrival, TOA)、到达时间差以及信号飞行时间定位。从定位方式来看,这些方法均属于多点定位,即确定标签与多个基站的相对位置关系定位。其中,TOA 通过计算信号到达接收器时的时间与信号传输速度的乘积来测量信号源与接收器之间的实际距离,再利用该乘积估算信号源的位置^[15]。

基于 TOA 定位方法的 UWB 设备工作原理,以 3 个基站二维定位为例,提前设置好的 3 个基站 a 、 b 、 c ,它们的坐标分别为 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 、 (x_c, y_c) ,信号源坐标是 (x, y) ,3 个基站到信号源的距离分别是 R_a 、 R_b 、 R_c ,如图 1 所示。

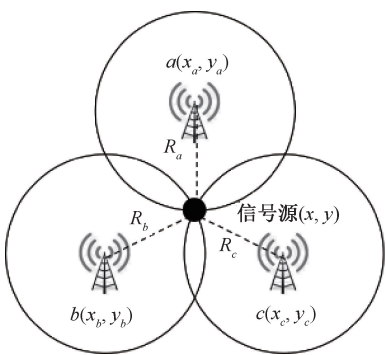


图 1 基于 TOA 定位算法

Fig. 1 Diagram of TOA-based localization algorithm

由此可得到以下方程组:

$$\begin{cases} R_a = \sqrt{(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2} \\ R_b = \sqrt{(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2} \\ R_c = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)两两作差后,可以得到:

$$\begin{cases} (x_b - x_a)x + (y_b - y_a)y = \beta_1 \\ (x_b - x_c)x + (y_b - y_c)y = \beta_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{1}{2}(R_a^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_a^2 + y_b^2 - y_a^2) \\ \beta_2 = \frac{1}{2}(R_c^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2) \end{cases} \quad (3)$$

为方便求解,式(2)转化为矩阵形式如下:

$$\begin{pmatrix} x_b - x_c & y_b - y_c \\ x_b - x_a & y_b - y_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} R_a^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_a^2 + y_b^2 - y_a^2 \\ R_c^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

可设:

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} x_b - x_c & y_b - y_c \\ x_b - x_a & y_b - y_a \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}; \\ B &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} R_a^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_a^2 + y_b^2 - y_a^2 \\ R_c^2 - R_b^2 + x_b^2 - x_c^2 + y_b^2 - y_c^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

即可求得信号源地位置坐标 X 为:

$$X = A^{-1}B \quad (6)$$

配备 UWB 标签的施工人员和设备危险源即为信号源地,通过在施工现场布置相应的基站,即可获取施工人员和设备危险源的定位坐标。再采用 Python 语言调用 OurBIM 提供的修改人员和设备位置 API,将定位数据封装成符合 API 要求的 JSON 格式,通过 API 接口持续传输至虚拟场景中对应的人

员和设备,更新它们的坐标,以此实现定位数据驱动下的虚拟场景实时映射。

2.2 2类危险区域的标定方法

深基坑工程的危险区域主要有2类,第1类是由施工设备(起重机、运输车辆、材料加工设备等)作业产生的动态危险区域;第2类是由“四口五临边”设置不完善或地质条件复杂产生的静态危险区域,如未及时加装护栏的建筑物边缘、楼梯口以及易引发基坑坍塌的软土层上方等。针对这2类危险区域分别设置标定方法。

1) 第1类危险区域采用点-圆法进行标定。设备类危险源作业状态下可能对周围入侵施工人员造成危险,因此,危险区域设置为圆形,以设备类危险源上UWB定位中心为圆心,根据作业安全管理要求设定危险区域的半径,从而实现第1类危险区域的标定,如图2a所示。

2) 第2类危险区域通过虚拟场景进行标定。因为虚拟场景是基于UWB基站的原点建立的,所以虚拟场景和施工现场中的位置一一对应。利用三维图形引擎的多边形定义功能,在虚拟场景中设置及时加装安全防护装置的“四口五临边”位置标定危险区域,如图2b所示。

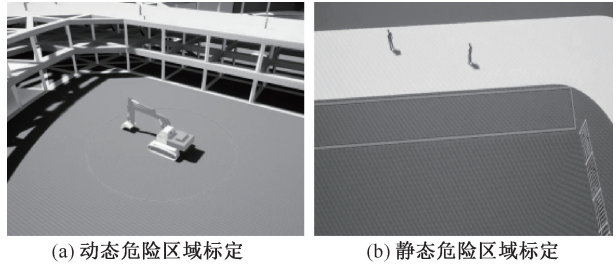


图2 危险区域标定示例

Fig. 2 Example illustration of hazardous area determination

2.3 人员入侵行为实时预警机制

判断施工人员是否进入危险区域,通过实时计算施工人员和危险源之间的相对位置关系确定。

对于第1类危险区域,通过计算施工人员UWB定位标签与危险源UWB定位标签之间的距离,当该距离小于设定的危险区域半径,判定为人员入侵行为并预警。

对于第2类危险区域,尤其是深基坑临边未设置护栏的区域通常呈现为多边形,预警需要判定施工人员的UWB定位标签在多边形范围内。射线法是解决这类判定问题常用算法,射线法的基本思想

是在已知施工人员UWB定位标签和多边形区域,从施工人员坐标向右水平引出一条射线,根据射线同多边形的各边交点的数量来判断。若它们之间交点数为奇数,则标签点在多边形内,判定施工人员入侵危险区域并预警;若交点数为偶数,则标签点在多边形外,判定施工人员在危险区域外。标签点与多边形危险区域的位置关系如图3所示。

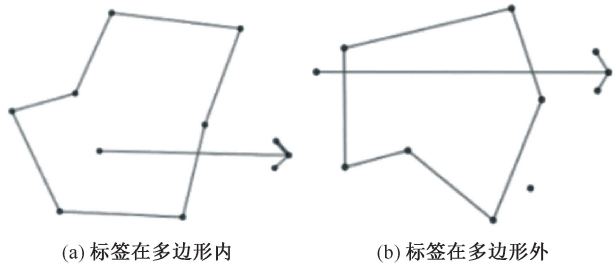


图3 点与多边形危险区域的位置关系

Fig. 3 Location relationships between points and polygonal hazardous areas

人员入侵危险区域实时预警机制的基本流程如下:当携带UWB标签的施工人员进入施工现场时,其轨迹就会被实时监控。一旦检测到施工人员进入未授权的危险区域,则会立即发送警报。1s后如果施工人员仍在危险区域,警报将持续;如果施工人员离开危险区域,则停止警报并将相关信息记录到后台数据库。1s后若施工人员还在施工现场内,则重复整个流程;若已离开施工现场,则结束整个流程。

3 数字孪生系统

3.1 系统构建模型

传统的数字孪生模型分为物理空间、数字空间和它们之间的交互^[16]。随着人工智能技术的发展产生了数字孪生的五维模型:物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据和组成部分间的连接^[17]。深基坑工程人员区域入侵行为预警数字孪生系统采用五维模型构建。该模型解决了深基坑工程物理实体与虚拟实体之间的互操作性,物理实体与虚拟实体不再是孤立存在,通过数据传输,不仅虚拟实体可动态呈现物理实体,物理实体中施工人员区域入侵行为预警转移至虚拟实体中实现,实现实时且双向的交互。

系统实现包括物理实体、虚拟实体、孪生数据、服务以及它们之间的连接,如图4所示。

1) 物理实体。深基坑工程作为一个系统性的物理实体,包含现场人员、施工机械、危险区域、物联网传感设备等单元级实体。

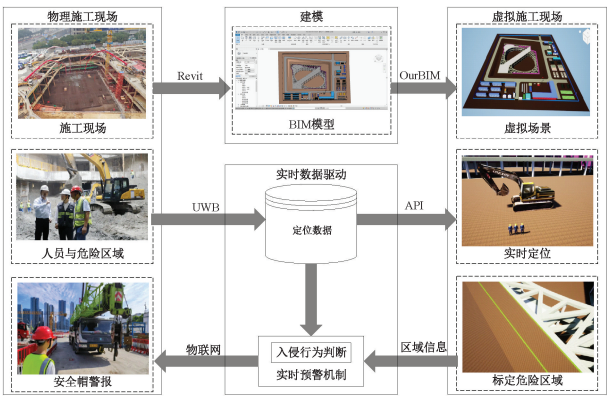


图 4 数字孪生系统实现

Fig. 4 Implementation diagram of digital twin system

2) 虚拟实体。深基坑工程的设计图纸、等比例构建的 BIM 模型、作业人员的行为模型、施工安全标准等。这些虚拟实体多尺度地描述和刻画物理实体。

3) 孪生数据。人员、设备、危险源等作为安全管理对象的数据;UWB 基站、标签等采集的空间和警报数据;作业人员入侵行为的记录数据。

4) 服务。功能性服务有深基坑工程 BIM 模型;针对定位数据的储存、清洗、运算、融合;UWB 定位数据的采集。业务性服务是面向用户的危险区域监控及衍生服务。

5) 连接。实现数字孪生系统的互联互通。如 UWB 设备采集的数据通过标准 MODBUS-远程终端单元(Remote Terminal Unit, RTU)通信协议传输到数据库并显示在上位机中;调用 OurBIM 平台 API 接口,在虚拟场景中生成人员和危险源的实时位置;通过数据库接口,实时读取定位数据和不安全行为的记录等。

3.2 数字孪生系统介绍

数字孪生系统前端采用开发工具(超文本标记语言(Hyper Text Markup Language, HTML)、层叠样式表(Cascading Style Sheets, CSS)、JavaScript)创建 Web 页面,包括监控大数据、项目管理的功能模块。监控大数据模块主要呈现深基坑工程的虚拟场景,实时显示人员入侵行为的预警信息等;项目管理模块是对人员、设备、UWB 标签等进行分类管理,包括危险区域设置等功能。数字孪生系统的后端基于 SpringBoot 框架搭建,数据库采用 MySQL,用来存储和管理数据,如 BIM 模型数据、设备信息、施工工人信息、UWB 定位数据等。同时,具备强大的计算分析和实时交互能力,如定位数据转化、危险区域的入

侵判定等均在后端运行。如果施工人员进入未授权的危险区域,则通过 MODBUS-TCP 协议将警报信息推送到智能安全帽,触发蜂鸣器警报,提醒人员避险。所有数据存储在 MySQL 数据库中,供后续分析和

4 数字孪生系统实施与效果

4.1 工程概况

数字孪生系统选择湖北省武汉市某大厦深基坑工程展开应用,该工程包含 1 栋 57 层塔楼及 4~5 层配套裙楼,地下建筑面积 4.4 万 m²,塔楼开挖深度为 21.50 m,裙楼及纯地下室开挖深度为 16.30~19.00 m,基坑垂直开挖面积约 9 358 m²,东西长约 394 m,属于典型的深基坑工程。

4.2 数字孪生系统实施过程

首先,根据该工程的设计图纸构建 BIM 模型,通过 OurBIM 图形引擎渲染后上传至数字孪生系统,建立该工程的虚拟场景,如图 5a 所示,并在系统内上传该工程的项目基本信息。其次,在施工现场布置基站,现场人员和危险源装备 UWB 定位标签,再在系统 UWB 标签管理下添加对应的人员和设备 UWB 标签信息,如图 5b 所示。然后,根据作业安全管理要求设定动态危险区域的半径以及根据多边形的关键点定义静态危险区域,如图 5c 所示。再次,系统根据人员入侵行为实时预警机制判断施工人员是否入侵危险区域。最后,系统数据库向违规人员发出预警指令,违规人员的智能安全帽警报响起,提醒施工人员尽快离开危险区域,如图 5d 所示。



图 5 实施过程各部分效果

Fig. 5 Visual illustrations of implementation processes

4.3 数字孪生系统实施效果

系统于 2024 年 3 月 1 日—4 月 2 日在施工现场

稳定运行1个月后,记录期间发生的入侵危险区域事件,跟踪现场主要施工人员和挖掘机、起重机等设备,采用UWB定位的平均误差率在1.46%,在系统内标定现场14个“四口五临边”的危险区域,成功预警并记录危险区域入侵39次。其中,第1类危险区域的入侵24件,第2类危险区域的入侵15件;第1类危险区域的触发频率更高,代表施工人员作业过程中易忽视周围的挖掘机、起重机等机械设备,致使出现频繁的入侵行为。

根据警报成功率的指标验证系统实施效果:

$$P = \frac{M}{N} \quad (7)$$

式中: P 为警报成功率; N 为所有警报次数; M 为预警成功次数。

计算得出39次警报记录的准确率为97.4%。系统应用的结果表明:标定危险区域、危险区域入侵报警、报警记录等功能使用正常,系统状态良好,警报成功率高,可适应深基坑项目的复杂环境。施工单位据此对多次违规人员实施惩罚措施和针对性教育,并有针对性的安排落实安全管理制度进,提高了施工现场的安全管理水平。

5 结 论

1) 基于数字孪生的入侵行为实时监测和预警方法,能够有效对深基坑施工现场内的人员入侵行为进行自动判定和预警。

2) 在施工现场运用数字孪生技术实现人员区域入侵行为的实时预警,能够丰富该技术的理论内涵。该技术应用整合多源数据,构建施工现场行为安全管理数字模型,促进工程数字化和智能化管理。同时,该技术开启了工程安全预警发展的新方向。通过精准映射物理施工现场,实现入侵行为的动态捕捉、实时可视化以及管理端和人员终端的同步预警,改善以往依赖感知装置预警透明度低、风险研判迟滞等问题。此外,该技术将计算机视觉、传感器难解决的入侵区域标定放到虚拟场景处理,简化行为识别流程,避免硬件堆砌下高成本、现场布设困难等问题,加强新技术在工程安全预警上应用的可行性。

3) 研究重点在危险区域监控和人员入侵行为预警,而在预警数据的大数据分析上尚待深入,未来研究考虑通过关联规则等方法挖掘数据价值。另外,考虑将数字孪生系统推广应用于更多的施工场景。

参 考 文 献

- [1] 张琦,王月峰,李建春,等. 深基坑紧邻地铁隧道安全评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 95-104.
ZHANG Qi, WANG Yuefeng, LI Jianchun, et al. Evaluation method for safety of subway tunnels adjacent to deep foundation pits[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 95-104.
- [2] TIAN Shuicheng, ZHANG Xinyue, YANG Pengfei, et al. Study on the accident-causing of foundation pit engineering[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 156(6): DOI: 10.1088/1755-1315/153/6/062012.
- [3] NIE Shumin, REN Feng. Study on risk management of deep foundation pit engineering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638/639/640: 574-579.
- [4] MEI Xinyu, ZHOU Xiaojing, XU Feng, et al. Human intrusion detection in static hazardous areas at construction sites: deep learning-based method[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2023, 149(1): DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002409.
- [5] KANAN R, ELHASSAN O, BENSALEM R. An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies[J]. Automation in Construction, 2018, 88: 73-86.
- [6] LEE U K, KIM J H, CHO H, et al. Development of a mobile safety monitoring system for construction sites[J]. Automation in Construction, 2009, 18(3): 258-264.
- [7] 孙殿阁. 基于数字孪生技术的民用机场安全管理系统构建[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增1): 222-227.
SUN Dian'ge. Research on the construction of civil airport safety management system based on digital twin technology[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 222-227.

[8] JIANG Feng, MA Ling, BROYD T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector[J]. Automation in Construction, 2021, 130: DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103838.

[9] OPOKU D G J, PERERA S, OSEI-KYEI R, et al. Digital twin application in the construction industry: a literature review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: DOI: 10.1016/j.jobeb.2021.102726.

[10] MADUBUIKE O C, ANUMBA C J, KHALLAF R. A review of digital twin applications in construction[J]. Journal of Information Technology in Construction, 2022, 27: 145–172.

[11] TUHAISE V V, TAH J H M, ABANDA F H. Technologies for digital twin applications in construction[J]. Automation in Construction, 2023, 152: DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104931.

[12] VENTURA S M, BELLAGENTE P, RINALDI S, et al. Enhancing safety on construction sites: a UWB-based proximity warning system ensuring GDPR compliance to prevent collision hazards[J]. Sensors, 2023, 23(24): DOI: 10.3390/s23249770.

[13] LI Chunting, CHENG J C P, CHEN Keyu. Top 10 technologies for indoor positioning on construction sites[J]. Automation in Construction, 2020, 118: DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103309.

[14] WU Fengbo, LIU Zhaoqi. Research on UWB / IMU fusion positioning technology in mine[C]. 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS),2020: 934–937.

[15] CHAN Y T, Hang H Y C, CHING P C. Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 10–16.

[16] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85–113.

[17] TAO Fei, CHENG Jiangfeng, QI Qinglin, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/10/11/12): 3 563–3 576.



作者简介： 宫培松 （1975—）,男,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事工程管理信息化、施工安全管理等方面的研究。E-mail: gongps@cug.edu.cn。