

基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法

刘 涵^{1,2}, 刘东海¹, 李 欣¹, 王 东³, 易传斌³

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 中国三峡建工(集团)有限公司; 3. 四川川交建设集团有限公司)

摘要:针对传统人工巡检在深基坑施工质量管理中存在的时效性差、可视化程度低且过度依赖人员经验等问题,提出了一种融合增强现实(AR)、建筑信息模型(BIM)和知识库技术的深基坑施工质量巡检方法。该方法借助图像辅助和点云配准技术,实现了 AR 环境中 BIM 模型与施工现场的高精度注册,解决了虚拟模型与真实场景间的高精度配准问题;以建立的语义丰富的深基坑 BIM 模型为载体构建了耦合 BIM 的巡检信息知识库,并开发了施工质量虚实增强智能巡检系统,实现了虚实场景融合、多源知识调用和可视化反馈等辅助巡检功能。工程实例验证结果表明,该方法具有良好的有效性和实用性,可为深基坑施工质量的智能化与精细化管理提供可靠的技术手段。

关键词:深基坑施工;质量巡检;增强现实;BIM;知识库

中图分类号:TU74 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0102-08

Virtual-real augmented inspection method for deep foundation pit construction quality based on BIM and knowledge base//Liu Han^{1,2}, Liu Donghai¹, Li Xin¹, Wang Dong³, Yi Chuanbin³(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation; 3. Sichuan Chuanjiao Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: To address the limitations of traditional manual inspection in construction quality control of deep foundation pits, including poor timeliness, limited visualization, and excessive reliance on inspectors' experience, a construction quality inspection method integrating augmented reality (AR), building information modeling (BIM), and knowledge base technologies is proposed. Image-assisted localization and point cloud registration techniques are employed to achieve high-precision registration between the BIM model and the construction site in an AR environment, thereby enabling accurate alignment of the virtual model with the real-world scene. A semantically enriched BIM model for deep excavations is established and used as the information carrier to construct a BIM-integrated knowledge base for quality inspection. An intelligent virtual-real augmented construction quality inspection system is developed, providing inspection assistance through virtual-real scene integration, multi-source knowledge retrieval, and visual feedback. Validation through an engineering case study demonstrates that the proposed method is effective and practical, providing a reliable technical approach for intelligent and refined quality management of deep excavation construction.

Key words: deep foundation pit construction; quality inspection; augmented reality; BIM; knowledge base

深基坑施工^[1]广泛应用于水利水电、地下交通和高层建筑等工程中,其施工工艺的复杂性和施工条件的多变性对质量管理构成严峻挑战,质量巡检是确保施工质量的关键环节。传统巡检模式主要依赖人员经验,通过查阅大量工程资料对施工质量作出判断。此外,由于施工现场环境的碎片化和杂乱性,许多待检部位常被遮挡而难以检测^[2],加之缺乏先进的可视化增强手段,影响了巡检结果的可靠

性。近年来,建筑信息模型(BIM)、人工智能(AI)等技术手段在工程巡检领域得到了广泛应用^[3],为克服常规基坑施工质量巡检的局限性创造了有利条件。

国内外学者在施工质量巡检方法改进方面进行了大量的探索。例如:赵先琼等^[4]集成激光扫描仪、编码器及计算机等设备,提出了基于计算机视觉的盾构施工质量巡检方法;姜骞等^[5]针对变电站场

基金项目:国家自然科学基金项目(52279136)

作者简介:刘涵(1994—),男,工程师,博士,主要从事大型工程数字化施工与智能建造研究。E-mail:liuhanhydraulicboy@tju.edu.cn

通信作者:刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程仿真与优化、数字化施工与质量实时评估研究。E-mail:liudh@tju.edu.cn

景,利用巡检机器人开展自主巡检,并依据机器人云台相机获取巡检图像,为运维人员的决策提供辅助支持;Ma 等^[6]基于计算机视觉构建了缺陷识别模型,辅助管理人员分析混凝土施工质量问题。此外,以传感器技术^[7]、物联网技术^[8]、BIM 技术^[9]为代表的先进技术手段也促进了施工质量巡检的数字化与自动化。

AI 技术在巡检领域中的应用已成为近年来的研究热点^[10]。一方面,知识图谱^[11]、知识库^[12]等工具被用于优化知识的利用方式,有效提升了施工现场巡检效率,如张天鸿等^[13]利用知识库实现了特定灌浆知识的管理,有效提高了生产效率并降低了人力成本。另一方面,虚拟现实(VR)^[14]、增强现实(AR)^[15]、混合现实(MR)^[16]等虚拟技术凭借其可视化增强能力,有助于拓展巡检人员的感知能力,提升工程对象的可视化程度,如 Zhou 等^[17]提出在隧道施工过程中使用 AR,辅助质量检查员检测管片位移并进行工程检验,大幅提高了质量巡检效率。

上述研究为巡检知识的应用及 AR 可视化巡检提供了有效途径。然而现有 AR 巡检方法多侧重于利用虚拟模型辅助建筑物外观检查,在多源信息融合方面存在不足,也未将 BIM 模型与巡检知识进行耦合应用。此外,基于 AR 的巡检方法在化工、机械、电气等领域展现了较高的可靠性与适用性,并取得了良好的检查效果^[2],但在工程施工领域,基于 AR 的质量巡检仍处于起步阶段,尚缺乏有效的智能巡检方法。

本文提出了一种基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法。该方法通过融合图像辅助识别与点云配准,实现了 BIM 模型与真实场景的精确注册;结合 BIM 与质量巡检知识,建立了语义丰富的施工 BIM 模型和巡检信息知识库,并开发了施工质量虚实增强辅助巡检系统,可为工程施工质量管理提供新的技术手段。

1 总体技术框架

本文提出的基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法由 3 个步骤构成:

- a. 巡检人员佩戴 AR 可视化设备,在施工现场布置辅助定位图片,通过融合图像辅助空间定位与点云配准的三维注册方法,将 BIM 模型精确注册到工程现场。
- b. 构建待巡检建筑物的设计 BIM 模型,并耦合多源巡检信息知识,建立 BIM 关联巡检信息知识库。
- c. 开发远程管理系统与移动巡检系统。远程

管理系统具有巡检任务发布、知识库管理、巡检结果管理等功能,为现场施工质量智能检查提供数据支持;移动巡检系统具有任务接收、模型定位、AR 可视化、质量问题实时反馈等功能,实现虚实融合场景的增强巡检,对知识库的调取与质量知识进行可视化展示,引导巡检人员按照知识库要求对现场施工质量进行检查对比,并将检查结果进行实时反馈,帮助现场质量管理人员弥补经验和技术缺陷。

2 融合图像辅助定位与点云配准的三维注册方法

在深基坑施工场景中,由于存在大量交叉空间结构(如连续支护与临时支撑的交错)、非均匀光照条件(地下工程导致的照度变化)以及动态施工要素(施工机械运作时的扰动),直接基于视觉的特征识别易因局部纹理重复与几何特征退化导致注册失败。因此,采用融合图像辅助定位与点云配准的三维注册方法可以兼顾复杂施工环境下模型注册的精度与计算效率。该方法包括图像识别辅助空间定位和点云配准模型注册两个阶段:①利用现场布置的图片标识物快速确定巡检人员位置、待注册 BIM 模型及其大致空间范围,为后续点云配准提供初始位置约束,避免大范围无初值搜索;②在初始定位基础上进行点云粗配准与精确配准,并通过点云特征筛选和迭代收敛控制降低计算量,最终实现 BIM 模型与实际施工场景的精确注册。

2.1 基于图像识别的空间定位

深基坑工程现场由于施工条件与作业环境易变,现场选择标识物困难;人为设置标识物因其易识别性、可控制性而被广泛应用于 AR 场景中^[18]。为提高识别效率,通过在工程现场人为布置图片标识物,辅助进行空间定位。巡检人员通过 AR 设备扫描现场图片标识物,确定匹配的模型与空间位置。主要步骤为:①预定义虚拟模型与标识物间相对位置,在施工现场相应位置布置标识物图片;②在施工现场利用移动 AR 设备对标识物进行扫描,定位巡检人员位置;③识别图片标识物,获取虚拟模型信息,实现图片标识物与模型的匹配;④将虚拟模型叠加到标识物相对位置处,实现真实场景与 BIM 模型的匹配定位。

图片标识物识别通过基于计算机视觉(CV)的方法实现,包括图像预处理、特征提取和特征匹配^[19]。本文利用集成了 OpenCV 的图像识别算法,以尺度不变(SIFT)和加速稳健(SURF)特征检测器识别源数据库中的对象,完成图像识别配准工作,从而实现辅助空间定位。

此外,图像识别辅助定位除用于确定巡检人员位置及匹配 BIM 模型外,还为后续点云配准提供了有效的初始空间约束。通过预定义图片标识物与 BIM 模型之间的相对位置关系,可先将待配准模型限定在现场目标区域附近,从而避免直接采用点云算法在大范围施工场景中进行搜索。采用“先定位、后配准”的处理方式能够有效缩小点云配准的搜索空间,减少后续初始配准和精确配准的计算量,有助于提高现场巡检过程中三维注册的处理效率。

2.2 基于点云配准的模型注册

通过标识物识别确定匹配的模型及空间位置后,需获取准确的位姿转换矩阵,将 BIM 模型按照精确的位姿参数注册到真实场景中。点云配准算法常被用于将虚拟模型精确配准到真实场景^[20],其步骤为:①获取现场点云与 BIM 模型点云;②通过点云配准算法进行配准;③迭代得到精确的转换矩阵;④将模型按照转换矩阵精确注册到真实场景,完成模型注册。

2.2.1 点云初始配准

将 BIM 模型点云作为源点云 $P_i(i=1,2,\cdots,n)$,现场扫描获取的点云作为目标点云 $Q_j(j=1,2,\cdots,m)$, m 和 n 分别表示两个点集的数量规模,通过点云初始配准后使两个点云大致对齐。选择两个点云上的端点 A 及点云上 A 点的最近点 B 和最远点 C ,并基于这 3 个特征点构造相应的 3 个特征向量,以此特征向量来描述点云,完成初始点云配准。如图 1 所示,所取的特征向量分别为端点 A 到最近点 B 和最远点 C 的特征向量 n_1 、 n_2 ,以及两个特征向量的向量和 n_3 :

$$n_3 = n_1 + n_2 \tag{1}$$

因此,由特征向量组成的目标点云特征向量集 n_q 及源点云特征向量集 n_p 表示如下:

$$\begin{cases} n_q = (n_1, n_2, n_3)^T \\ n_p = (n'_1, n'_2, n'_3)^T \end{cases} \tag{2}$$

式中: n'_1 、 n'_2 、 n'_3 为源点云对应的 3 个特征向量。

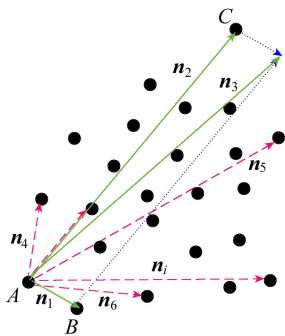


图 1 点云特征向量构建

经过点云初始配准后,源点云和目标点云实现大致重合,即通过旋转矩阵 R_1 和平移矩阵 T_1 进行变换后,两特征向量集实现重合,即:

$$n_q R_1 + T_1 = n_p \tag{3}$$

求解旋转矩阵 R_1 和平移矩阵 T_1 ,将源点云按照上述的旋转、平移矩阵变换至目标点云坐标系下,实现两组点云空间对齐,以此将变换后的源点云作为初始配准后点云 P'_i 。

2.2.2 点云精确配准

为实现模型的精确配准,获取模型对齐现场的精确变换参数,将初始配准后点云与源点云进行精确配准,从而获取精确的转换矩阵。为在保证模型注册精度的同时降低大规模现场点云参与迭代最近点(ICP)迭代所带来的计算开销,本文针对现场扫描点云数据量较大的特点,采用 PCA+ICP 的精确配准方法。传统 ICP 需要在迭代过程中不断建立两组点云之间的对应关系,当点云规模较大时,最近邻搜索及距离计算会占用较多计算资源。为此,先利用主成分分析法(PCA)提取并筛选两组点云的主要几何特征,剔除冗余数据。后续 ICP 仅基于筛选后的有效点云进行对应点搜索和误差计算,从而有效降低单次迭代计算量,提高精确配准效率。算法具体步骤如下:

- 输入初始配准后点云和源点云。
- 利用 PCA 对两点云中的特征点进行筛选,获得降维后的点云。
- 构造精确配准转换旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 ,求解得出误差函数最小的最优变换矩阵。
- 计算配准后目标点云和源点云之间的平均距离 d 。
- 迭代过程设置双重终止准则:当源点云与目标点云间对应点的平均欧氏距离小于预设收敛阈值时,判定配准收敛并终止迭代;若迭代次数达到预先设定的最大迭代次数,则强制终止迭代,否则返回步骤 a,直至满足收敛条件。
- 对源点云按照转换矩阵进行变换,得到新的对应点云。

综上,巡检人员利用 AR 移动设备扫描现场目标点云,BIM 模型转换点云则作为源点云存储在数据库中,通过点云配准后,输出配准后的点云。点云配准完成后,同时输出旋转矩阵 R_2 、平移矩阵 T_2 ,按照式(4)将 BIM 模型精确注册到施工现场:

$$(x_0, y_0, z_0) R_2 + T_2 = (x, y, z) \tag{4}$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 表示初始位置; (x, y, z) 表示配准完成后所处的位置。

点云精确配准算法中两点云对应点平均距离收

收敛阈值 d 设为 0.001 m, 最大迭代次数 $N_{\max}$ 设为 1000 次。但是, 1000 次仅为算法在未收敛情况下的最大迭代上限; 在实际计算过程中, 当对应点平均欧氏距离达到 0.001 m 的预设收敛阈值时, 迭代提前终止, 因此, 实际迭代次数通常小于最大迭代次数^[2]。算法迭代完成后, 输出点云配准的旋转、平移矩阵参数, 并作为 BIM 模型到工程现场精确位姿变换的参数, 实现模型与建筑物的虚实融合。从计算过程来看, 本文的三维注册方法通过图像标识物识别先获得模型的大致空间位置, 以减小点云配准搜索范围; 在此基础上利用特征向量完成初始对齐, 进一步为 ICP 提供较优初值; 随后采用 PCA 降低参与精确配准的数据规模, 并通过收敛阈值和最大迭代次数双重终止准则控制迭代过程。上述处理避免了对完整现场点云进行无约束、全局和长时间迭代配准, 有助于提高三维注册过程的计算效率。

3 耦合 BIM 的多源巡检信息知识库构建

深基坑工程具有施工环境复杂、风险因素多、时空效应显著等特点, 其质量与安全巡检对象不仅包括围护结构、支撑体系等实体构件, 还涉及地下水控制、基坑变形及周边环境影响等专业内容。不同施工阶段的巡检对象、巡检指标及判定依据存在差异。为了在巡检过程中实时调用巡检知识信息, 需将巡检知识与 BIM 模型关联, 构建 BIM 关联的多源巡检信息知识库, 从而在 AR 场景中实现知识引导质量巡检。BIM 关联的巡检信息知识库构建分为两步, 即语义丰富的 BIM 模型构建和巡检信息知识库构建。

3.1 语义丰富的 BIM 模型构建

为实现 BIM 模型与质量巡检知识信息的关联, 需对当前 BIM 模型的语义信息进行扩展, 添加相应的工程信息, 结合深基坑工程巡检对象及知识组织特点, 选取工程类型和实体部位作为 BIM 模型的关键扩展语义参数。其中, 工程类型与实体部位信息从施工图纸、施工组织设计及深基坑专项施工方案等施工文件中提取, 并写入对应 BIM 模型中的具体构件, 形成语义丰富的深基坑 BIM 模型。

在深基坑工程中, 实体部位按照主要巡检对象进行划分, 包括围护结构、支撑体系、立柱体系、降排水系统等, 并可进一步细分至具体构件。例如: 围护结构可细分为地下连续墙、排桩、冠梁等; 支撑体系可细分为混凝土支撑、钢支撑、围檩等; 降排水系统可细分为降水井、排水沟和集水井等。通过建立具有深基坑专业特征的实体部位分类, 使 BIM 构件能够与相应的巡检知识建立明确的语义映射关系。

本文的 BIM 模型以 IFC (industry foundation classes) 文件格式进行存储。IFC 格式作为一种开放标准, 可实现建设项目在设计、施工和运营阶段的数据交换和共享。在 IFC 架构中, BIM 构件的属性可作为直接属性与 BIM 实体进行关联。为此在模型中新增表示工程信息的属性集“Pset ProjInfo”, 属性集中包括“ProjType”(工程类型)、“ProjPart”(实体部位)两个参数, 参数的表示形式均为字符串; 新增的属性集通过关系实体与构件实体关联。对于每一个构件都将包含补充的工程信息、实体部位两类参数。补充的工程类型、实体部位信息和构件编号、构件名称、族信息等 BIM 模型的构件信息组成 BIM 信息表单。

以深基坑支撑体系为例, 当某 BIM 构件为钢支撑时, 其“ProjType”定义为“深基坑工程”, “ProjPart”定义为“支撑体系-钢支撑”; 当构件为地下连续墙时, 其“ProjPart”定义为“围护结构-地下连续墙”。由此, 每一个巡检相关构件均包含相应的工程类型及实体部位信息。扩展后的工程类型、实体部位信息与 GUID(构件唯一编号)、构件名称、族信息等共同组成 BIM 信息表单, 为后续深基坑专业巡检知识与 BIM 构件的自动关联提供数据基础。

3.2 巡检信息知识库构建

3.2.1 巡检信息知识存储

深基坑工程巡检知识具有多源性和专业性, 其知识来源主要包括相关标准规范、设计文件、专项施工方案以及施工技术要求等。根据深基坑现场巡检需求, 知识内容主要涉及围护结构、支撑体系、降排水系统及基坑周边环境等对象, 其巡检内容包括构件外观及施工质量、围护结构变形、支撑体系状态、地下水及渗漏情况、坑底异常和周边环境变形等。为协助巡检人员快速、合理地利用巡检知识, 需设计相应的人机交互机制, 构建巡检信息知识库, 使巡检人员能够高效利用巡检知识。本文基于 SQL Server 进行知识库构建, 耦合 BIM 的质量巡检信息知识库包括 BIM 信息和质量巡检知识两部分内容。

质量巡检信息知识库中共有 6 个字段, 见表 1, 以知识条例的编号(ID)作为主键, 其他提取的内容包括构件唯一编号(GUID)、工程类型、实体部位、依据、质量知识, 其中工程类型、质量知识不可为空值。而为了适用知识库中较长的字段情况, 选定数据类型为 varchar 以保证完整显示。

例如, 对于“支撑体系-钢支撑”对象, 可在 Quality knowledge 字段中存储支撑连接状态、构件变形及异常情况巡检知识, 并在 Basis 字段中记录对应的标准规范或专项施工方案; 对于“围护结

表 1 质量巡检信息知识库表结构

字段名称	字段含义	类型
ID	编号	int
Project_type	工程类型	varchar(255)
Component_position	实体部位	varchar(255)
Quality knowledge	质量知识	varchar(255)
Basis	依据	varchar(255)
GUID	构件唯一编号	char

构-地下连续墙”,则存储墙面质量、接缝、渗漏及异常变形等巡检知识。通过上述组织方式,将通用规范条文进一步转化为面向深基坑具体实体对象的巡检知识。

为实现 BIM 构件信息与质量信息知识之间的关联,利用字符特征匹配来计算两个表单中相同变量工程类型、实体部位的相似度,实现 BIM 构件与质量知识的匹配。其中相似度匹配计算公式为:

$$S_{kj} = \frac{\mathbf{w}_k^T \cdot \mathbf{w}_j}{\|\mathbf{w}_k\| \|\mathbf{w}_j\|} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{w}_k$ 为质量知识中检索到的第 k 个关键词的词向量; $\mathbf{w}_j$ 为 BIM 信息中提取到的第 j 个同类关键词的词向量; S_{kj} 为词 k 和 j 之间的相似度。通过关键词语义之间的匹配,对质量知识表单和 BIM 信息表单进行自动组合,合并为耦合 BIM 的巡检质量知识信息,实现知识库的存储。知识库间的链接关系如图 2 所示,其中主键(PK)用来唯一标识表中的每一条记录,保证数据的唯一性,外键(FK)用来建立表与表之间的关联,保证数据的引用完整性。

3.2.2 巡检信息知识查询

在深基坑施工现场应用中,需在虚实融合场景中选择 BIM 模型构件,通过构件包含的属性信息调取关联的质量巡检知识来进行巡检,即通过 BIM 构件中包含的信息进行质量知识查询。因模型构件名称可能存在重复情况,而构件的 GUID 具有唯一性,故可作为查询的起点。首先查询 BIM 模型构件的

GUID,从而获取工程类型、实体部位等信息;然后在质量知识库中基于工程类型、实体部位进行知识检索。

当巡检人员在 AR 场景中选择某一钢支撑构件时,系统根据 GUID 识别该构件,并获取“深基坑工程-钢支撑”的语义信息,随后在知识库中检索与钢支撑相对应的连接状态、构件变形及异常状态等巡检内容和相应依据,从而实现“现场构件—BIM 属性—专业巡检知识”的定向关联。对于地下连续墙、降水井等其他深基坑巡检对象,则采用相同机制调取相应的围护结构质量、渗漏水或降排水等专业知识。

此外,BIM 模型构件中的工程类型和构件部位信息由人工编辑,其定义层级可能存在差异。例如,工程类型中的“地基与基础工程”可能被定义为“地基基础工程”;实体部位中的“脚手架”可能进一步细分为“立杆”和“斜支撑”等。为确保知识查询的准确性,在巡检信息知识库中应统一这些层级差异。具体而言,设立“Project_type”字段用于存储工程类型相关的信息,设立“Component_position”字段用于存储实体部位的信息。在进行知识查询时,检索逻辑被设定为从工程到部位的顺序进行匹配:首先匹配工程类型,然后匹配实体部位。若未匹配到相关内容,则将其归类为通用知识。例如,当“钢支撑”未检索到特定知识时,可进一步检索“支撑”的通用巡检要求;若仍未检索到,则调用基坑工程层级的通用巡检知识。这种分层级的检索逻辑不仅能提高查询的准确性,还能确保知识库的结构清晰,便于维护和扩展。

4 施工质量虚实增强辅助巡检系统开发

深基坑施工质量虚实增强辅助巡检系统包括远程管理系统和移动巡检系统两部分。远程管理系统

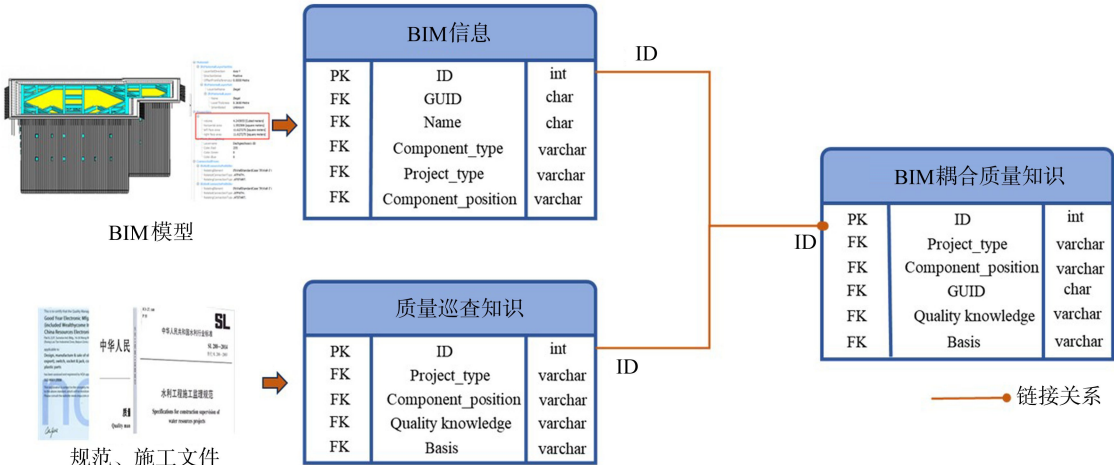


图 2 知识库间链接关系

用于巡检任务发布、质量知识库管理、巡检结果反馈等功能模块,为现场质量智能巡检提供数据支持,并对检查过程中反馈的各类信息进行存储管理;移动巡检系统通过 BIM 模型的调用以及真实场景三维注册,为巡检人员提供了虚实融合的施工现场,同时实现对知识库的调取与质量知识的可视化展示,引导巡检人员按照知识库中的质量要求对现场质量进行检查对比,并实时反馈。

4.1 远程管理系统功能实现

远程管理系统包括项目管理、任务管理、知识库管理、BIM 信息管理以及巡检结果管理 5 个子模块,各模块功能包括:①项目管理模块用于查看、修改、新增项目列表,实现项目相关信息的管理;②知识库管理模块用于查看、搜索、修改和扩充知识库,为移动巡检系统提供数据来源;③BIM 信息管理模块用于管理 BIM 模型及其相关信息,同时自动关联巡检知识库,实现从模型构件到巡检知识的转换;④任务管理模块用于查看、新建、删除、修改巡检任务。任务发布后将同步至移动巡检系统,供现场巡检人员接收;⑤巡检结果管理模块用于管理巡检结果,巡检完成后,移动巡检系统反馈信息将上传至数据库,管理人员可查看问题描述、现场图片、整改期限等。

4.2 移动巡检系统功能实现

在深基坑复杂施工环境下,巡检人员需佩戴 AR 设备完成辅助巡检任务。微软 HoloLens 2 因采用多层衍射波导显示技术,可实现地下空间光照变化情况下的稳定渲染,而其配备的环境摄像头与惯性检测单元(IMU)结合的实时定位功能大大优于传统的手机、平板等移动设备。因此,移动巡检系统以 HoloLens 2 中的通用 Windows 平台(UWP)作为系统应用开发框架,具体功能如下:

- a. 巡检任务接收与 AR 场景显示。在执行任务前,登录巡检系统进入任务管理模块,查看远程管理系统发布的任务并接收。接收任务后,基于提出的三维注册方法,扫描现场布置的标识物,系统将匹配任务对应的 BIM 模型,将模型注册到工程现场,如图 3(a)所示。模型精确配准完成后将进入虚实融合场景,巡检人员可选择对模型位置进行锚定,以减少模型在巡检移动过程中的抖动。
- b. 质量知识查询。巡检人员可在虚实融合场景中选中 BIM 模型构件,展示构件名称,点击功能栏中的知识按键,查看知识库中构件关联的质量巡检知识,以知识辅助巡检人员完成检查,如图 3(b)所示。
- c. 质量问题记录与反馈。当巡检人员在现场

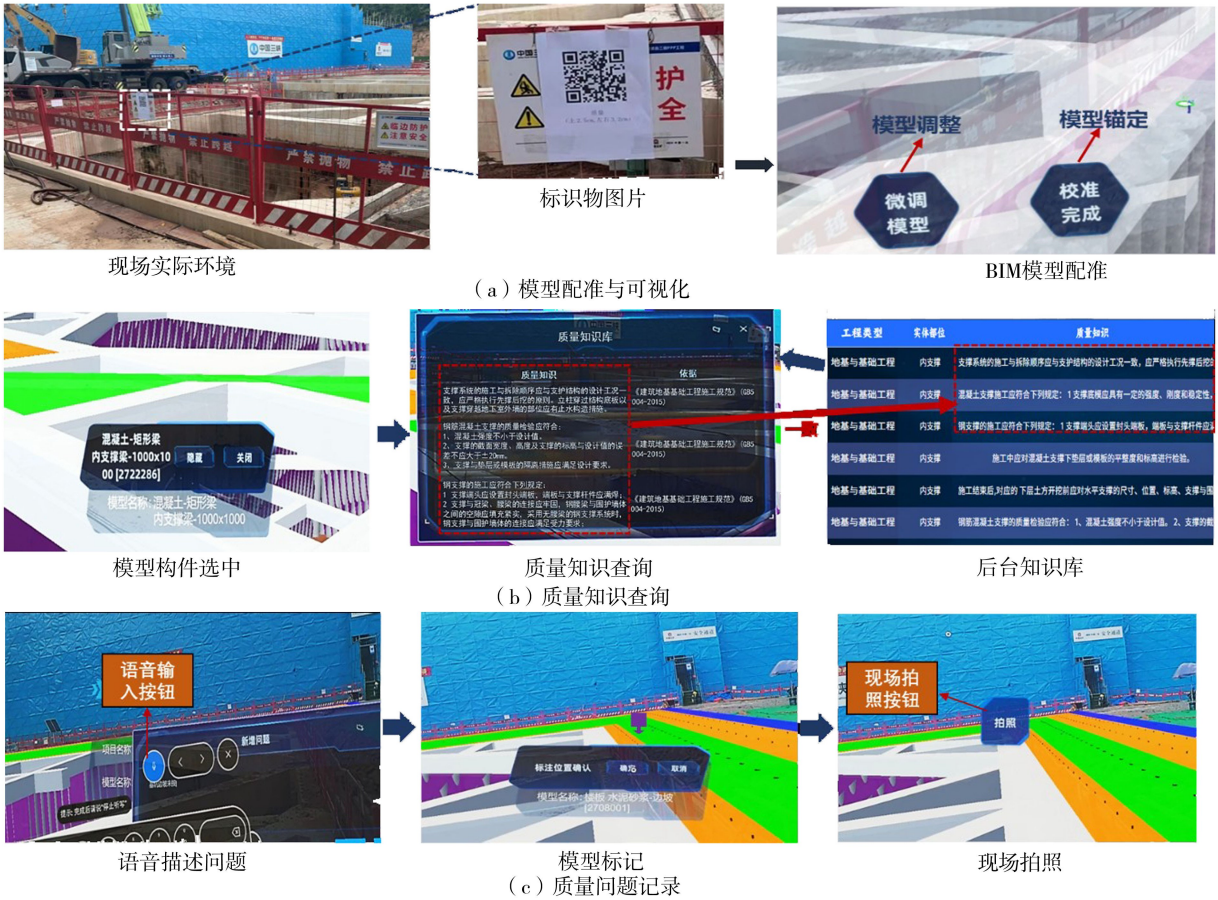


图 3 施工质量巡检系统界面

发现建筑实体与模型或质量标准不符等问题时,通过点击“质量问题”按钮,通过语音描述问题(自动转换成文本),同时对质量问题进行现场拍照、对问题部位进行标注,如图 3(c)所示。问题记录完成后,点击保存按钮进入问题列表,核实无误后,可点击上传。问题详细描述、现场图片等记录信息将上传至远程数据库,并同步至远程系统中的巡检结果管理模块。

5 工程实例验证

以某在建的深基坑工程为例,其建筑平面面积为 585.20 m²,深度为 32.90 m。首先,按照设计文件构建施工 BIM 模型,并获取 BIM 模型构件信息;收集工程质量巡检的相关文件,以此作为巡检质量信息知识的基础文件,提取质量巡检过程中需要的巡检知识信息。基于上述提炼的知识,按照 3.2 节中的构建流程完成耦合 BIM 的巡检知识库构建;保存模型各种属性信息(包括 GUID、构件名称、ID 等信息),设计增强现实虚拟巡检环境与功能界面。此外,为了使模型能准确注册到工程现场,巡检人员根据远程管理系统中提示的图片位置,在工程现场张贴标识物图片,工程现场环境与二维码布置如图 4 所示。

质量巡检过程中,巡检人员佩戴 Trimble XR10 混合现实头盔(以 HoloLens 2 为内核的现场使用设备),根据眼镜扫描现场环境以及二维码,调取巡检数据库中的信息,匹配 BIM 模型,准确注册虚拟模型到真实场景。显示终端最终以 AR 形式展示施工

质量巡检虚实融合场景,同时以智能虚拟按键的形式展示巡检过程中的各项功能,三维注册平均时间约为 46 ms。此外,具体展示还包括所有功能模块,如图 5 所示。系统将设计尺寸参数以模型形式展示,可直观对比实际建筑与设计参数之间的差距,辅助巡检人员发现质量问题。现场人员通过查询 BIM 模型关联的巡检知识信息(图 3(b)),通过知识信息辅助完成关键部位的检查,系统反应时间均小于 3 ms。

巡检人员发现质量问题后,根据图 3(c)的步骤对质量问题进行记录,同步上传至管理端系统,如图 6 所示。管理人员也可以通过关联的项目信息联系现场人员进行督促整改。

此外,将结果与同一项目中相同施工位置的传统人工巡检方法进行对比分析。13 名经验丰富的现场巡检人员利用 BIM+AR 方法与传统巡检方法进行了巡检,并从可视化、使用便捷性和对巡检的帮助性 3 个方面对两种巡检方法进行了对比评价,在每个评价维度中选择其认为表现更优的巡检方法。

结果表明,与传统巡检方法相比,BIM+知识库的虚实融合辅助巡检方法有效提升了可视化水平,提供了更便捷的知识查询与问题反馈方式,有助于巡检人员高效、准确地完成巡检。但是,仍然存在一名经验丰富的巡检人员认为巡检系统在增强现实场景中操作不灵敏,该问题可通过简单的混合现实手势培训解决。此外,5 名巡检人员认为该系统在使用过程中避免了传统巡检方法易忽略的质量缺陷,提高了巡检的准确性。



图 4 深基坑施工现场



图 5 系统现场应用场景



图 6 上传巡检中发现的质量问题

6 结 语

本文提出了一种融合 BIM、AR 与知识库的深基坑施工质量智能辅助巡检方法,通过标识物图像获取初始空间位置,并结合点云配准实现 BIM 模型与施工现场的精确注册,增强了施工质量检测单元的可视化能力,有效改善了隐蔽部位的巡检效果;在此基础上,依据质量知识与 BIM 构件之间的关联关系,采用语义特征相似度计算实现构件信息与质量知识的匹配,构建耦合 BIM 的质量巡检知识库,为巡检过程提供了知识支撑,从而降低了因人员经验和认知不足导致的巡检偏差;进一步开发了施工质量虚实增强辅助巡检系统,并在实际深基坑工程中开展了应用验证。结果表明,该系统能够实现 BIM 模型与真实施工场景的虚实融合,辅助巡检人员快速获取相关质量知识,并依据质量要求开展现场检查、问题记录与实时反馈,验证了所提出三维注册方法及知识驱动巡检机制的可靠性与适用性。

参考文献:

[1] 晏莉,杨海涛,崔云龙,等. 富水粉砂地层深基坑底部注浆加固数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):80-86. (Yan Li, Yang Haitao, Cui Yunlong, et al. Numerical simulation analysis of grouting reinforcement at bottom of a deep foundation pit in water-rich silt stratum [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4):80-86. (in Chinese))

[2] Liu Han, Liu Donghai, Chen Junjie. Depth-informed point cloud-to-BIM registration for construction inspection using augmented reality[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62:102867.

[3] 刘婷,张社荣,李志竑,等. 基于字符级 CNN 的调水工程巡检文本智能分类方法[J]. 水力发电学报,2021,40(6):89-98. (Liu Ting, Zhang Sherong, Li Zhihong, et al. Intelligent text classification method for water diversion project inspection based on character level CNN [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(6):89-98. (in Chinese))

[4] 赵先琼,邓凯,张亚洲,等. 大直径盾构隧道成型质量巡

检方法研究[J]. 工程科学学报,2024,46(2):365-375. (Zhao Xianqiong, Deng Kai, Zhang Yazhou, et al. Molding quality inspection method for large-diameter shield tunnels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(2):365-375. (in Chinese))

[5] 姜骞,刘亚东,严英杰,等. 面向高变倍场景的变电站巡检机器人云台相机对准方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8):3337-3346. (Jiang Qian, Liu Yadong, Yan Yingjie, et al. Substation inspection robot PTZ camera alignment method for high zoom scenes[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8):3337-3346. (in Chinese))

[6] Ma Guofeng, Wu Ming, Wu Zhijiang, et al. Single-shot multibox detector- and building information modeling-based quality inspection model for construction projects [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 38:102216.

[7] Bae J H, Han S U. Vision-based inspection approach using a projector-camera system for off-site quality control in modular construction: experimental investigation on operational conditions [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021, 35(5):04021012.

[8] Wu Haitao, Zhong Botao, Li Heng, et al. On-site construction quality inspection using blockchain and smart contracts [J]. Journal of Management in Engineering, 2021, 37(6):04021065.

[9] 龚健,包腾飞,陈知渊,等. 基于 BIM 技术的地下空间曲线钢管分段排布算法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):108-114. (Gong Jian, Bao Tengfei, Chen Zhiyuan, et al. A BIM technology-based algorithm for steel pipe segmentation arrangement of underground space curves [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):108-114. (in Chinese))

[10] Shin H J, Cha H S. Proposing a quality inspection process model using advanced technologies for the transition to smart building construction [J]. Sustainability, 2023, 15(1):815.

[11] Tian Dan, Li Mingchao, Shi J, et al. On-site text classification and knowledge mining for large-scale projects construction by integrated intelligent approach [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 49:101355.

(下转第 122 页)

- 的太原市水资源优化配置[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 79-86. (Liu Xin, Zhao Xuehua, Wu Wenyu, et al. Optimal allocation of water resources based in Taiyuan City on NSGA-II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))
- [38] 吴山, 高瑞忠, 王英杰, 等. 水网联通情境下鄂尔多斯市多水源-多用户-多目标水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 176-185. (Wu Shan, Gao Ruizhong, Wang Yingjie, et al. Multi-source, multi-user and multi-objective optimal allocation of water resources under context of water network connection in Ordos City [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 176-185. (in Chinese))
- [39] 陶洁, 王沛霖, 王辉, 等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (Tao Jie, Wang Peilin, Wang Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))
- [40] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [42] Jenks G F. The data model concept in statistical mapping [J]. International Yearbook of Cartography, 1967, 7: 186-190.
- [43] 杨扬, 赵伟明, 胡颖冰, 等. “衡邵娄干旱走廊”干旱时空演变特征分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 550-559. (Yang Yang, Zhao Weiming, Hu Yingbing, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought in the “Heng-Shao-Lou drought corridor” [J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 550-559. (in Chinese))
- [44] 刘元沛, 盛东, 山红翠, 等. 衡邵干旱走廊典型灌区水资源优化调度研究[J]. 湖南水利水电, 2016(5): 52-56. (Liu Yuanpei, Sheng Dong, Shan Hongcui, et al. Optimal operation of water resources in a representative irrigation district of the Heng-Shao Drought Corridor [J]. Hunan Hydro & Power, 2016(5): 52-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-19 编辑: 俞云利)

(上接第 109 页)

- [12] 樊启祥, 孙洪昕, 雷振, 等. 大型梯级水电项目开发知识管理研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 102-109. (Fan Qixiang, Sun Hongxin, Lei Zhen, et al. Knowledge management in project development of large cascaded hydropower projects [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 102-109. (in Chinese))
- [13] 张天鸿, 王晓玲, 余红玲, 等. 基于大语言模型的灌浆工程知识服务系统[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 130-142. (Zhang Tianhong, Wang Xiaoling, Yu Hongling, et al. Grouting works knowledge service system based on large language model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 130-142. (in Chinese))
- [14] Li Xiao, Yi Wen, Chi H L, et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety [J]. Automation in Construction, 2018, 86: 150-162.
- [15] Jiang Junjie, Yang Zhile, Wu Chengke, et al. A compatible detector based on improved YOLOv5 for hydropower device detection in AR inspection system [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 225: 120065.
- [16] Lee D, Nie Guangyu, Han K. Vision-based inspection of prefabricated components using camera poses: addressing inherent limitations of image-based 3D reconstruction [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105710.
- [17] Zhou Ying, Luo Hanbin, Yang Yiheng. Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction [J]. Automation in Construction, 2017, 82: 112-121.
- [18] Chen Junjie, Fu Yonglin, Lu Weisheng, et al. Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: 119341.
- [19] Andrews C M, Henry A B, Soriano I M, et al. Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices [J]. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 2021, 9: 4900214.
- [20] Ahn H, Lee C, Kim M, et al. Applicability of smart construction technology: prioritization and future research directions [J]. Automation in Construction, 2023, 153: 104953.

(收稿日期: 2025-06-04 编辑: 俞云利)