

# 三维实景模型融合BIM模型的施工进度管理系统的研究

黄 镨

中国铁工投资建设集团有限公司科技创新部, 北京

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月17日; 发布日期: 2025年8月29日

## 摘 要

随着工程领域的信息化、数字化、智能化不断推进, 三维实景模型与施工图BIM模型的融合应用愈发普遍, 分布式多终端共享的进度管理应用以及对实景环境下进度形象的定量分析成为发展趋势。本文基于开源Cesium平台进行软件开发, 通过包围盒算法与射线投射法进行实景模型与BIM模型的相似度分析, 实现自定义工程区域的工程结构的自动化计算工程数量和统计施工产值, 做到工程进度形象的实时定量分析, 为项目管理提供数据支持。经实践, 在工程应用上取得了良好的效果。

## 关键词

Cesium, 实景模型, BIM模型, 工程进度, 定量分析

# Research on a Construction Schedule Management System Integrating 3D Real Scene Models with BIM Models

Lei Huang

Department of Science and Technology Innovation, China TieGong Investment & Construction Group Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 27<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 17<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

With the continuous advancement of informatization, digitalization, and intelligentization in the engineering field, the integrated application of 3D real scene models and as-designed BIM models

has become increasingly prevalent. Distributed multi-terminal sharing for schedule management applications and the quantitative analysis of progress visualization within the real scene environment represent emerging trends. This paper develops software based on the open-source Cesium platform. Through the bounding box algorithm and ray casting method, similarity analysis between the real scene model and the BIM model is performed. This enables the automated calculation of engineering quantities and statistical analysis of construction output for custom-defined project areas and structures. Consequently, real-time quantitative analysis of project progress visualization is achieved, providing robust data support for project management. The practical application has demonstrated its effectiveness in engineering projects.

## Keywords

Cesium, Real Scene Model, BIM Model, Construction Progress, Quantitative Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

基础设施工程建设过程中往往因工作面重叠、工序衔接乱等问题, 进而导致工程进度延迟、成本费用超支及其他项目风险增加; 同时项目设计和施工条件的变更, 会进一步增加项目进度管理风险, 因此进行施工进度管理的研究越来越多。在数字技术方面, Ying 等人研究了利用倾斜摄影技术获取数据生成点云与进度信息(4DBIM)集成对道路施工进度进行监测[1]; Hu 等人提出了一种机器人辅助移动激光扫描方法, 用于自动三维重建和生成点云模型[2]; Kopsida 等人提出了一种通过 HoloLens 加强内部施工活动检查和进度监测的方法, 将 3D 模型投影到真实场景中, 从而比较施工进度的差异[3]; Kavaliauskas Paulius 等人提出了将 3D 点云数据与 BIM 信息模型集成实现施工进度监控方[4]; Abdul 等人研发了一种基于 SEM 的建设项目进度自动监测技术模型[5]; 胡静探索了三维激光扫描测绘技术在施工进度监测中的现有应用[6]; Giorgio 等人提出了一种基于 BIM4D 与 SLAM 的施工进度监测方法[7]; Wei 等人提出了一种基于计算机视觉算法的土基施工进度监测方法, 利用改进的 SOLOv2 对施工进度进行定性和定量识别, 并探究了网格尺寸对施工进度测绘精度的影响[8]。在工程进度管理方面, 主要是基于激光扫描的点云 3D 重建、计算机视觉、三维实景模型等技术与 BIM 模型进行比对分析并实施进度管理, 激光扫描点云获取模型精度高, 但操作复杂、成本高、效率低; 计算机视觉的获取网格的精度较低、操作简单、成本低、效率高; 三维实景模型精度较高、操作简单、成本低、效率较高; 因此, 通过三维实景模型融合 BIM 模型的进度管理实施性更强, 能解决目前工程建设中纸质或电子清单、每日报告、现场照片和分包管理情况等进度数据管理有限, 定性偏主观, 定量分析缺乏的问题, 尤其是解决工程结构的自动化计算工程量的不足, 存在分段统计与流水施工统计易错且耗时的难题。相比三维激光扫描设备和计算机视觉相关设备, 无人机成本低廉且易于操作, 推广性更高, 适用的工程类型和结构施工场景更多, 获取影像图片及实景模型简单, 结合开源软件技术的工程进度管理应用的前景广阔。CesiumJS 是由社区开发者维护的开源 JavaScript 库, 通过 3D 数据和图像渲染交互式场景, 具备跨平台和跨浏览器特性。本文提出一种自动化的工程进度管理软件系统框架, 通过 Revit 软件和广联达 GTJ 软件建立 BIM 模型, 应用 Autodesk Forge 转换 BIM 模型数据格式, 融合工程的三维实景模型, 基于 Cesium 进行软件开发, 对实景模型和 BIM 模型做相似性分析, 通过包围盒算法或实景模型坐标的射线投射法可提取 BIM 模型的工程数量信息, 结合

工程造价清单，能够实现“进度形象 - 工程数量 - 施工产值”的管理内容。

## 2. 模型创建与转化

### 2.1. 模型创建

**BIM 模型：**工程建设中，较多采用 Revit 软件和广联达的 GTJ 软件对土建结构建模，依据施工图所建立的模型包含了工程结构的几何、属性、坐标系等信息，能输出工程数量，结合时间序列设置，能可视化展现工程施工模拟形象，较好表达工程进度管理内容。

**实景模型：**基于测绘学的倾斜摄影测量技术和贴近摄影测量技术，结合 Context Capture 软件或大疆智图等软件，生成工程现场全要素、高精度的三维实景建模，能完整呈现现场真实的三维场景，具有可量测性和环境分析能力。

### 2.2. 模型转化

三种不同来源的模型(Revit 模型、GTJ 模型、三维实景模型)并不能直接在 Web 上进行展示，模型需要进行格式转换，转化成为 Cesium 平台支持的格式，并需要在模型转换中尽量多的保留模型的属性信息。模型转化的技术路线如图 1 所示。

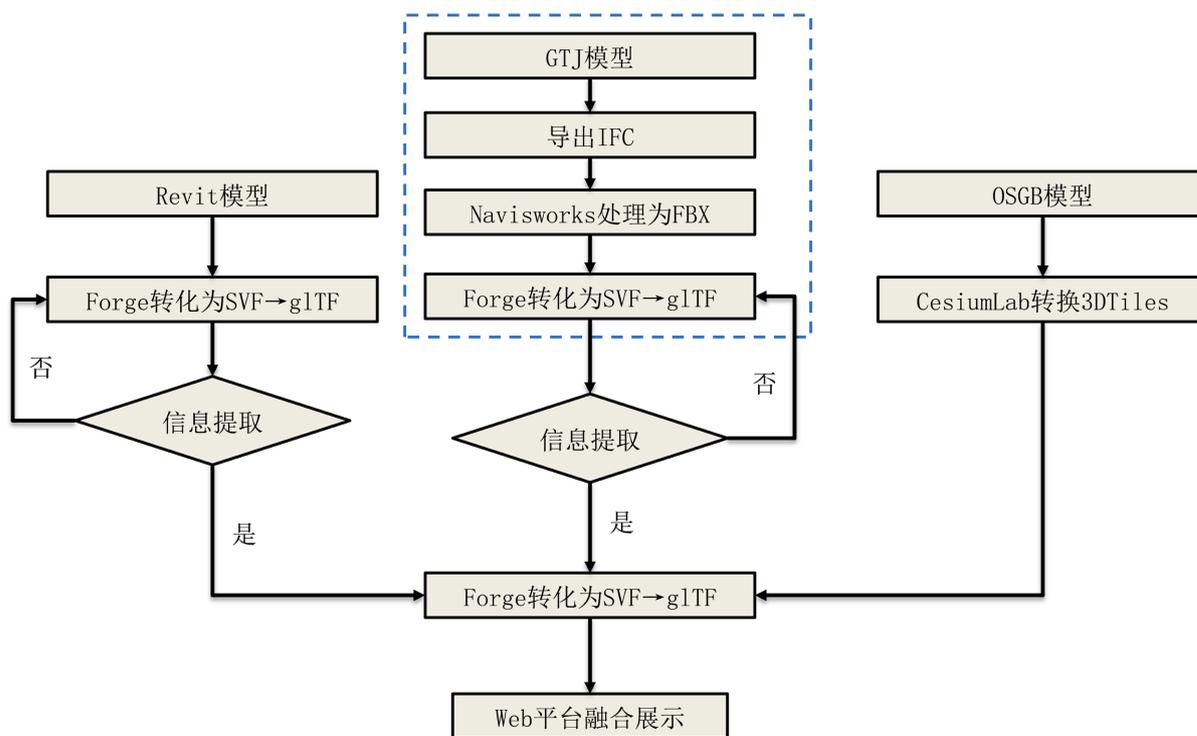


Figure 1. Technology roadmap for model transformation

图 1. 模型转化的技术路线图

通过 Revit/GTJ 构建结构化工程数据(几何 + 属性)，经 Forge 转为轻量化 SVF 格式，提取工程结构信息，确保设计施工图的内容完整传递，结合厘米级精度的三维实景模型，通过 Cesium 的 pickPosition 实现像素级坐标映射，并基于 Cesium 进行坐标系统的统一，基于实景模型高度比对 BIM 设计高度进行工程量获取，完成自动化工程量的统计分析。

### 3. 研究方法 with 系统开发

传统进度管理是依据现场提供的图表和局部影像图片,存在着“定量不可信,定性偏差大”的问题。实景模型与 BIM 模型的融合,通过可量测的实景模型与 BIM 模型的比对分析生成工程数量和施工产值,依据真实现场环境得到的定量分析成果,为工程进度管理提供了真正意义上的“所见即所得”。实现该解决方案的主要技术原理是基于包围盒算法与布尔运算、射线投射法。

#### 3.1. 基于包围盒算法与布尔运算

基于包围盒算法的进度管理是采用统一的坐标系将两种模型导入,以布尔算法和包围盒算法对两个模型进行匹配计算,从而获得施工进度。包围盒算法在三维模型处理中有着广泛的应用,如碰撞检测、物理模拟、渲染优化等,主要有轴对齐包围盒(AABB)、有向包围盒(OBB)、包围球、固定方向包围盒(FDH)等方法[9]-[11],在工程进度管理上,采用 OBB (有向包围盒法)进行设计,可任意旋转的长方体,通过协方差矩阵确定主轴方向,紧密包裹物体。

通过分析实景模型的点云数据分布特征(协方差矩阵特征值),确定最优包围盒方向,通过协方差矩阵优化包围盒方向(减少冗余空间),减少体积计算误差。

$$C_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k) \quad (1)$$

式中,  $x_{ij}$ : 点云中第  $i$  个点的  $j$  坐标值 ( $j \in \{x, y, z\}$ );  $\bar{x}_j$ : 所有点  $j$  坐标的均值;  $C_{jk}$ : 坐标轴  $j$  与  $k$  的协方差(反映数据分布相关性)。

通过集合运算精确分割实际施工区域,在实际开发过程中,对工程项目中的每个单体建立坐标范围的数据库,使用包围盒快速过滤工程单体范围内的不相交构件,对可能相交的构件进行精确三角面相交计算,布尔运算集合表达式如下:

$$\text{并集(模型融合): } X \cup Y = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in X \text{ 或 } (x, y, z) \in Y\} \quad (2)$$

$$\text{交集(重叠区域识别): } X \cap Y = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in X \text{ 且 } (x, y, z) \in Y\} \quad (3)$$

$$\text{差集(开挖量计算): } X - Y = \{(x, y, z) | (x, y, z) \in X \text{ 且 } (x, y, z) \notin Y\} \quad (4)$$

融合三维实景模型与 BIM 模型,进行施工进度关键指标,即体积差计算,通过计算实际施工区域与理论设计体积的差值占比,量化施工进度。

$$V_{pro} = \frac{V_{real}}{V_{BIM}} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $V_{BIM}$ : BIM 模型中设计构件的理论体积;  $V_{real}$ : 实景模型中实际施工区域的包围盒体积。

在统一坐标系下的三维实景模型融合 BIM 模型,是实现施工进度比对分析的前提。三维实景模型与 BIM 模型具有共同的特征,以特征匹配点对应的 BIM 模型中构件作为最小单元生成包络体,用三维实景模型切割包络体,从而匹配模型。包络体为封闭的曲面,切割和修剪能力均比实体强大得多。三维实景模型本身和施工进度分析匹配过程中均存在一定误差,需根据实际情况对首次匹配生成的包络体尺寸进行微调,以提高模型匹配精度。通过布尔运算和包围盒算法,基于体积的重叠程度得出特征匹配点的施工部位是否已经完成施工。

### 3.2. 射线投射法

融合实景模型与 BIM 模型，快速建立相交模型的信息后，通过 Cesium 的交互功能实现用户在三维场景中获取精确的空间数据，通过 `scene.pick()` 方法获取模型实体，`scene.pickPosition()` 方法获取精确世界坐标，配合 Screen Space Camera Controller 提升精度，射线投射计算模型交点。

$$\text{Ray} = \text{camera.position} + t \cdot (\text{view direction}) (t \geq 0) \quad (6)$$

式中，`camera.position`：相机在三维空间中的位置坐标；`t`：射线参数(距离参数)；`view direction`：视线方向的单位向量，从相机指向屏幕点击位置的方向；`Ray`：射线上的点坐标，随着 `t` 值变化，表示射线上不同位置的点。

通过获取三维场景中结构的坐标数据，建立了一种高程对比与进度计算方法，对比实景模型表面高程与 BIM 构件设计高程，得到工程数量。利用该方法进行软件设计，提供更为灵活的工程量计算模式，能在融合后的实景模型与 BIM 模型环境下，自定义选择工程范围，进行施工区域的工程数量统计，面对现场流水施工的变动情况下，也可以快速提供工程数量统计，结合工程清单，形成施工产值的形象。

1) 对于线型构件

$$H_p = \frac{H_{real} - H_{base}}{H_{design} - H_{base}} \times 100\% \quad (7)$$

式中， $H_{base}$ ：BIM 构件的基础高度； $H_{real}$ ：实景模型的高程； $H_{design}$ ：BIM 构件的设计高程； $H_p$ ：实景模型与 BIM 模型比对的比例。

$$V_f = V_{BIM} * H_p \quad (8)$$

式中， $V_f$ ：是从构件基础高度到当前实际高度的已施工部分体积； $V_{BIM}$ ：施工图 BIM 模型构件的工程数量。

2) 对于非线性构件

对于非垂直构件(如斜坡、曲面等)，采用分段积分法：

$$V_f = \int_{H_{base}}^{H_{real}} A(h) dh \quad (9)$$

式中， $A(h)dh$ ：高度  $h$  处的截面面积函数； $\int_{H_{base}}^{H_{real}} A(h) dh$ ：对截面面积函数进行累积求和，累积从基础高度到实际高度的截面面积，从而得到体积。

通过包围盒算法快速排除不相交的模型，结合射线投射法进行相交检测，基于 Cesium 进行软件开发，实现了满足投资估算到施工图预算的不能阶段的工程模型实体工程量的自动化计算，适用于多种工程类型，通过精确的空间坐标采集、智能化的进度计算算法和多源数据验证机制，实现了工程进度的实时量化监控，为项目管理提供数据支持。

### 3.3. 系统开发设计

系统开发涉及的分层架构主要是数据采集层、支撑平台层、业务应用层，从数据采集到决策支持的闭环，通过模块化设计支持工程进度管理的核心业务场景，系统开发架构图如图 2 所示。

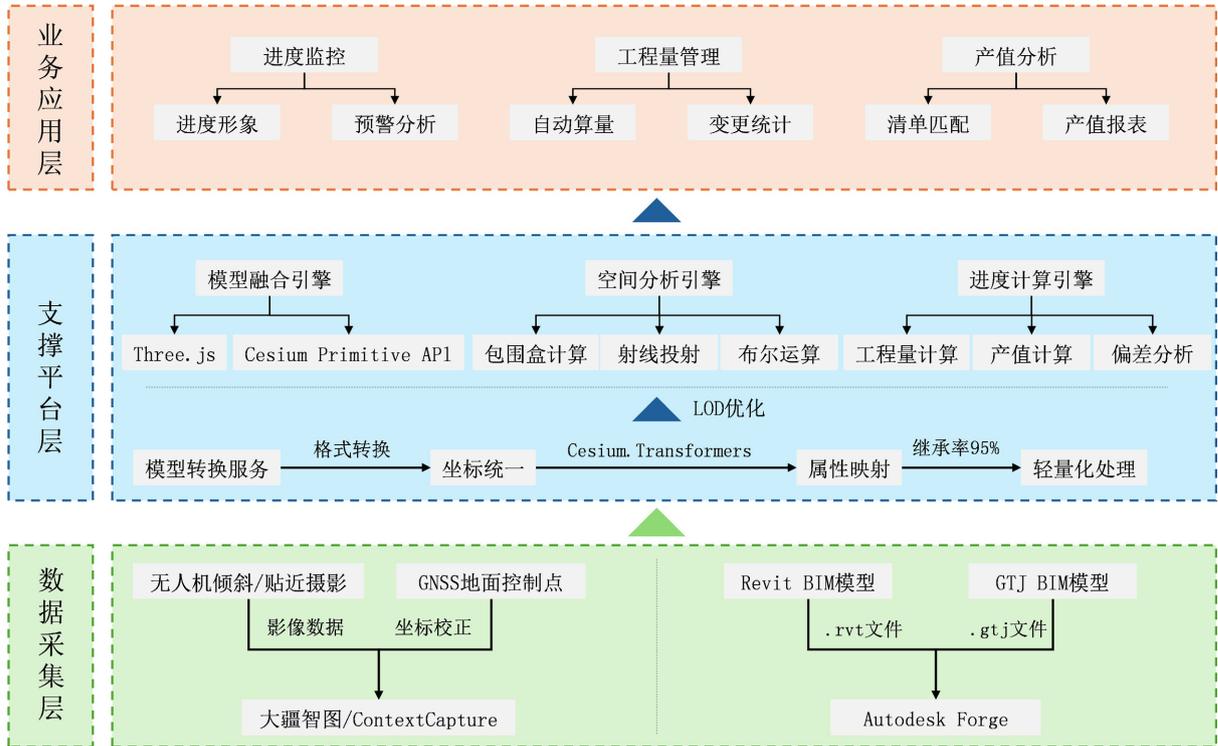


Figure 2. Software system development architecture diagram

图 2. 软件系统开发架构图

## 4. 应用实例

整合模型以及模型融合后比对分析算法, 依托信息化技术, 开发并形成了公司的数字孪生工程平台, 打通 BIM 与 GIS, 联通分析模型, 做到真实三维实景环境下的自动化计算工程量和产值统计, 并依托梁子湖应急水厂工程进行实例应用。

### 4.1. 项目概况

武汉市梁子湖水厂项目占地面积 5.3 万平方米, 原水通过箱式取水头部和自流管进入水厂, 水厂新建(建)构筑物包括取水头部及自流管、取水泵房、预臭氧接触池、沉淀气浮池、臭氧接触池、活性炭滤池、超滤膜车间、纳滤膜车间、浓缩池、预浓缩池、下叠排水池、辅助用房、液氧站、1#清水池、2#清水池、吸水井及二级泵房、综合辅助车间、平衡池及提升泵房、脱水机房、综合楼、门卫等多个工程单体。施工全过程采用本研究方法监测项目施工进度。

### 4.2. 应用结果分析

#### 4.2.1. 模型融合

三维实景模型数据是利用无人机拍摄项目影像数据, 影像数据通过内业实景建模软件定时生成项目实景模型(见图 3)。项目单体采用广联达 GTJ 软件建立模型, 场地临建模型和工艺管线模型采用 Revit 建模, 其中工程量计算及产值统计暂不考虑工艺管线部分。

#### 4.2.2. 模型进度计算

模型进度计算功能通过系统的自动计算和手动配置相结合, 为项目管理人员提供了直观、数据驱动

的项目监控工具(见图 4)。用户不仅可以实时跟踪每个建筑单体的进展,还能通过详细的构件清单分析完成情况,有效提升管理效率。



Figure 3. Integration of 3D reality model with BIM model. (a) Digital twin platform convergence diagram; (b) Partial diagram of model integration

图 3. 三维实景模型融合 BIM 模型图。(a) 数字孪生的融合图; (b) 模型融合的局部图

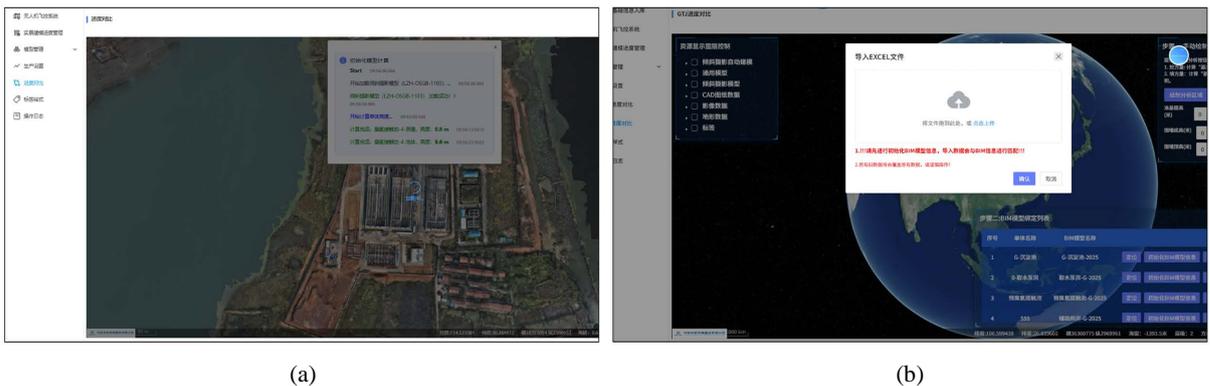


Figure 4. Model clash computing and 4D progress visualization. (a) Model fusion computing; (b) Bill of materials (BOM) upload and alignment; (c) Model clash detection and quantity takeoff; (d) Progress visualization chart

图 4. 模型比对计算与工程进度形象展示。(a) 模型融合计算; (b) 清单上传匹配; (c) 模型比对算量; (d) 工程进度形象分析图

### 4.3. 结果输出

基于本研究进行梁子湖应急水厂项目施工进度管理,三维实景模型融合 BIM 模型的工程进度管理,

比传统方法更直观地展示现场工程结构的几何形状、进度情况和异常信息。BIM 模型所含工程结构信息和工程数量, 将实景模型与 BIM 模型通过数据融合, 进行相似性比对分析, 在统一的坐标系环境下, 利用实景模型的标高作为阈值切割/提取 BIM 模型的工程信息和工程数量, 匹配上传的工程造价清单, 自动化完成进度形象的工程数量的获取, 以及生成进度工程数量和施工产值表单, 并在平台灵活提供工程数量表单的修改模式, 供合并、拆分、录入及导出功能, 服务技术人员快速生产自己想要的数内容, 创建出“进度形象 - 工程数量 - 施工产值”的内容。

自动化算量的精度, 通过梁子湖应急水厂项目的多个单体对比, 暂不包含工程措施数量, 所自动统计的工程实体数量精度约为 96%, 满足快速工程进度形象定量分析的要求, 所以系统开发中辅助人工修改的功能。实景模型比对分析 BIM 模型精度涉及的主要问题有: 一是实景模型本身的精度问题, 本项目采用常规的大疆无人机, 所获得的实景模型平面与高程精度, 通过比对现场的 RTK 测量坐标, 分别检测坐标点的  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  优劣值, 对三个方向的偏差进行误差分析, 中误差控制在 5 cm, 对模型融合比对实体的工程数量计算精度影响较大, 可采用高精度测绘无人机或采用贴近摄影测量提升实景模型精度; 二是模型格式转换的信息丢失问题, Revit 模型和 GTJ 模型在转换中都存在一些参数信息保留不全, 对此系统是做了手动调改和清单导入的模式来完善信息, 对工程数量计算数量的精度影响较小, 主要影响的是需要对信息完整性进行提升以便更高效提取 BIM 构件信息。对厂商的建议是, 建议广联达公司增加 GTJ 模型导出 IFC 模型的造价属性的扩展支持以及开放 GFC 转换器源码供二次开发, 建议欧特克公司的 Revit 软件考虑优化 IFC 导入对国内造价标准的兼容性。

## 5. 结语

基于布尔运算与包围盒算法并结合射线投射法, 开展了三维实景模型融合 BIM 模型的施工进度管理研究, 深化了 BIM + GIS 在工程进度管理中的应用深度, 实现了施工过程中工程量的自动高效与精准计算, 能以定量分析的模式去进行施工进度的动态、直观三维可视化表达, 显著提升了项目进度管理的精细化水平, 为工程建设提供了有力的技术支撑, 有效辅助了项目管理者对工程进度的实时掌控与科学决策。

## 参考文献

- [1] Lo, Y., Zhang, C., Ye, Z. and Cui, C. (2022) Monitoring Road Base Course Construction Progress by Photogrammetry-Based 3D Reconstruction. *International Journal of Construction Management*, **23**, 2087-2101. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2040078>
- [2] Hu, D., Gan, V.J.L. and Yin, C. (2023) Robot-Assisted Mobile Scanning for Automated 3D Reconstruction and Point Cloud Semantic Segmentation of Building Interiors. *Automation in Construction*, **152**, Article 104949. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104949>
- [3] Kopsida, M. and Brilakis, I. (2016) BIM Registration Methods for Mobile Augmented Reality Based Inspection. In: Karlshoj, J. and Scherer, R., Eds., *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, CRC Press, 201-208.
- [4] Kavaliauskas, P., Fernandez, J.B., McGuinness, K. and Jurelionis, A. (2022) Automation of Construction Progress Monitoring by Integrating 3D Point Cloud Data with an IFC-Based BIM Model. *Buildings*, **12**, Article 1754. <https://doi.org/10.3390/buildings12101754>
- [5] Hannan Qureshi, A., Salah Alaloul, W., Kai Wing, W., Saad, S., Ali Musarat, M., Ammad, S., et al. (2023) Automated Progress Monitoring Technological Model for Construction Projects. *Ain Shams Engineering Journal*, **14**, Article 102165. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102165>
- [6] 胡静. 三维激光扫描测绘技术在矿山测绘项目施工进度监测中的应用[J]. 世界有色金属, 2020(17): 9-10.
- [7] Vassena, G.P.M., Perfetti, L., Comai, S., Mastrolemba Ventura, S. and Ciribini, A.L.C. (2023) Construction Progress Monitoring through the Integration of 4D BIM and Slam-Based Mapping Devices. *Buildings*, **13**, Article 2488. <https://doi.org/10.3390/buildings13102488>
- [8] Wei, W., Lu, Y., Lin, Y., Bai, R., Zhang, Y., Wang, H., et al. (2023) Augmenting Progress Monitoring in Soil-Foundation

Construction Utilizing SOLOv2-Based Instance Segmentation and Visual BIM Representation. *Automation in Construction*, **155**, Article 105048. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105048>

- [9] 苏鼎丁, 王佳, 周小平. BIM 模型相连构件获取方法[J]. 土木工程信息技术, 2020, 12(2): 1-6.
- [10] 韩雷, 云龙. 基于 FDH 包围盒算法的煤矿井下机器人避障最小安全距离控制[J]. 中国煤炭, 2024, 50(S1): 21-27.
- [11] 林菲, 邹玲, 张聪. 基于混合层次包围盒的快速碰撞检测算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 454-457.