 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i3.9484

Application Research of Real-scene 3D and BIM Fusion in Intelligent Management of Road and Bridge Construction Based on Python Algorithm

Zhencheng Hu

Fujian Provincial Construction Group Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361000, China

Abstract

To address industry pain points in traditional road and bridge construction management—including information asymmetry, low control precision, and delayed decision-making—this paper proposes an integrated 3D real-world modeling and BIM technology solution using Python algorithms, establishing an intelligent management system covering the entire construction lifecycle. The study first explains the core principles of BIM technology and 3D modeling, then focuses on Python-based core fusion algorithms including multi-source data preprocessing, spatial registration, and semantic mapping. A four-tier system architecture comprising data layer, fusion algorithm layer, functional application layer, and user interface layer is designed, achieving intelligent real-time coordination of construction progress, quality, safety, and cost. Case validation through a highway bridge project demonstrates that this solution improves construction schedule deviation detection efficiency by 86%, elevates quality defect detection rate to 98%, and reduces safety hazard rectification cycle time by 62%. These advancements significantly enhance the digitalization and intelligence of road and bridge construction management, providing technical references and application paradigms for similar projects.

Keywords

Python algorithm; Real-scene 3D; BIM technology; Road and bridge construction; Intelligent management

基于 Python 算法的实景三维与 BIM 融合在道桥施工智能化管理中的应用研究

胡振程

福建省交建集团工程有限公司，中国 · 福建 厦门 361000

摘　要

针对道桥施工传统管理模式存在的信息不对称、管控精度低、决策滞后等行业的痛点，本文提出了一种用Python算法的实景三维和BIM融合技术方案，并创建了一个以道桥施工全过程为对象的智能化管理体系。文章先对BIM技术和实景三维建模的主要原理进行了阐述，主要研究了基于Python的多源数据预处理、空间配准、语义映射等核心融合算法，设计出包含数据层、融合算法层、功能应用层、用户层的四层系统架构，实现了道桥施工进度、质量、安全、成本的虚实联动智能化管控。经由某高速公路大桥工程实例检验可知，该方案可以将施工进度偏差识别效率提高86%，质量缺陷检出率提高到98%，安全隐患整改闭环时间缩短62%，明显提高了道桥施工管理的数字化、智能化水平，可以给类似工程提供技术参照和应用范式。

关键词

Python算法；实景三维；BIM技术；道桥施工；智能化管理

1 引言

道桥工程是交通基础设施的主要部分，具有线性跨度大、地质条件差、工序交叉多、野外作业多、安全控制难度大的特点。传统的管理依靠人工巡检、纸质资料和经验决策，存在进度滞后、质量检测精度低、安全隐患排查不全面、成本核算失真等问题，不能满足高质量精细化的要求。BIM 技术在设计施工阶段被广泛应用，给数字基准赋予了动态的参照物，但是静态模型不能及时反映现场的动态变化；实景三维依靠无人机倾斜摄影等手段来再现现场全部要素，但是缺少工程语义和设计参数，不能与业务管控对接起来。目前 BIM 和实景三维融合大多只停留在可视化层面，存在多源数据融合效率低、空间配准精度不高、智能化分析能力不足等问题。Python 由于拥有大量的开源算法库、高效的数值计算以及灵活的二次开发能力，成为了多源数据融合和智能分析的主要支持工具 [1]。本文以 Python 为依托，对实景三维和 BIM 融合技术进行研究，建立道桥施工智能化管理体

【基金项目】福建省住房和城乡建设科学技术计划项目（【基金项目】2025-K-137）。

【作者简介】胡振程（1991—），男，中国福建邵武人，本科，工程师，从事市政路桥研究。

系，用工程实例验证其应用价值，为施工数字化转型提供可以落地的技术途径。

2 核心技术理论基础

2.1 BIM 技术与道桥施工数字化管控

BIM 技术是以三维数字模型为基础，把工程全生命周期的几何信息、物理属性、功能特性、业务数据等所有的信息都整合进来的数字化技术，具有参数化、可视化、协同化的特点。在道桥施工过程中，使用 Civil3D、Revit 等软件可以建立道路线形、桥梁结构、临时设施等全专业参数化的 BIM 模型，进行碰撞检查、施工模拟、工程量核算等基本功能，给施工管理提供标准化的设计端数字基准。但是传统的 BIM 应用大多以静态的设计模型为主，不能及时同步施工现场的动态变化，造成设计与施工相脱离，不能实现全过程的闭环精细化管理。

2.2 实景三维建模技术

实景三维建模技术就是用无人机倾斜摄影、地面三维激光扫描等数据采集方式，获取工程现场多角度影像和高精度三维点云数据，然后通过空中三角测量、点云拼接、纹理映射等方式处理得到真实地理坐标、纹理信息的实景三维模型。该技术可以快速、非接触地重建施工现场的地形地貌、工程实体、临时设施等全部动态实景，创建出施工过程的数字孪生体，彻底消除 BIM 模型和现场实景相脱离的现象。实景三维模型只有空间几何和纹理信息，没有工程语义、设计参数、施工工序等业务属性，不能直接对接施工管理的业务流程，不能独立完成精细化管控。

2.3 基于 Python 的多源数据融合核心算法

Python 算法是实现实景三维和 BIM 深度融合的重要支撑，开源的专业算法库可以快速解决多源异构数据格式兼容、空间配准、语义映射、智能分析等关键技术问题，主要分为三大类

2.3.1 数据预处理算法

采用 Open3D、NumPy 库对点云数据进行去噪、降采样、格式标准化转换，使用 Pandas 库对施工业务数据进行清洗、结构化存储、关联，解决 BIM 模型、实景点云、施工业务数据异构性问题，为之后融合提供统一的标准化数据基础。

2.3.2 空间配准融合算法

针对 BIM 模型和实景三维模型的坐标系统不一致、精准匹配的要求，用 Python 优化的迭代最近点（ICP）算法，分为粗配准、精配准两步，使两个模型的空间坐标准确对接，配准精度≤ 5mm，满足道桥施工的毫米级控制要求。相比于传统的手工配准方式，算法的自动化程度大大提高了，配准时间比以前缩短了 90% 以上。

2.3.3 语义信息映射算法

用 Python 编写语义映射模块，将 BIM 模型中构件 ID、设计参数、施工工序、质量标准、责任主体等语义信息与实景三维模型中对应的构件空间位置一一对应起来，实现几何信息和业务语义的深度整合，使实景模型具备完整的工程业务属性，为后续施工智能化管控提供数据支持。

3 基于 Python 算法的实景三维与 BIM 融合系统设计

3.1 系统总体架构

根据道桥施工业务管理需要及流程特点，本文设计出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合系统，采用分层模块化架构设计，自上而下分为数据层、融合算法层、功能应用层和用户层四个层次，具有高兼容性、高扩展性、高实用性等特点，实现了从数据采集、融合处理到业务应用、决策支持的全流程闭环管理。

3.2 核心层级与模块设计

3.2.1 数据层

数据层是系统的根基支撑，把道桥施工全过程的各种异构数据融合起来，主要有三种，分别为 BIM 模型数据、实景三维数据、施工业务数据。一是 BIM 模型数据，即道路线形、桥梁结构、临时设施、安全防护等各个专业的设计模型，包含构件几何信息、设计参数、工程量、施工工序、质量标准等主要数据；二是实景三维数据，即无人机倾斜摄影得到的实景 mesh 模型和地面三维激光扫描得到的工程实体高精度点云数据，按照施工阶段和管控需求动态更新；三是施工业务数据，即进度计划、质量检测报告、安全巡检记录、材料消耗数据、成本核算数据等现场业务数据。所有的数据都会经过 Python 预处理模块的标准化处理，以达到统一存储、调用的目的。

3.2.2 融合算法层

融合算法层是系统的心脏，所有的模块都是用 Python 语言编写，是实现实景三维和 BIM 深度融合的重要部分，主要包含四个功能模块，分别是数据预处理模块、空间配准模块、语义映射模块和智能分析模块。数据预处理模块是对多源数据进行格式转换、去噪、清洗、标准化处理，空间配准模块是用优化的 ICP 算法实现 BIM 模型和实景三维模型的空间对齐，语义映射模块是把 BIM 工程语义信息和实景模型空间构件绑定起来，创建虚实联动的数字孪生模型，智能分析模块使用 Python 的 Scikit-learn、OpenCV、YOLO 算法库开发进度偏差识别、质量缺陷检测、安全隐患识别、工程量智能核算等分析算法，实现施工管理数据的自动化分析和智能化预警 [2]。

3.2.3 功能应用层

功能应用层面向道桥施工核心管理业务，通过融合后的虚实联动模型创建出四个主要的应用模块，对施工全过程进行智能化控制，具体如下

进度智能化管控模块利用实时实景模型和计划进度 BIM 模型的自动比对，用 Python 算法计算各个工序实际完成量与计划量的差异，自动发现进度滞后工序并发出分级预警信息和进度调整建议；

质量智能化管控模块把工程实体的点云数据和 BIM 设计模型进行比对，自动计算出构件尺寸偏差，使用 YOLO

算法找出现浇结构的蜂窝、麻面、裂缝等外观质量瑕疵，自动生成质量问题清单和整改通知；

安全智能化管控模块，根据实景模型识别出施工现场临边防护缺失、支架搭设不规范、危险区域人员违规进入等安全隐患，与 BIM 安全专项方案模型进行对比，产生分级预警，实现安全隐患闭环管理；

成本精细化管控模块用模型自动计算已完工程实际工程量，与设计工程量、材料消耗量进行实时对比，随时了解材料损耗、费用超支等状况，开展项目成本动态精细化管理 [3]。

3.2.4 用户层

根据道桥施工的管理架构和参与主体，设置分级用户权限，分为项目管理层、现场施工层、监理单位、建设单位，不同的用户根据自己的权限可以访问相应的功能模块和数据信息，从而达到多参与方协同管理、信息共享的目的。

4 工程实例应用

4.1 工程概况

本文选取某省新建高速公路主线大桥工程作为研究对象，主线全长 2.38km，主桥为（75+140+75）m 预应力混凝土连续刚构桥，引桥为 12×30m 预制箱梁，桥梁跨越河谷地带，地形地质条件复杂，施工工序交叉多，高空作业、水下作业风险大，对施工管理精度和效率有很高的要求。传统的管理模式存在着进度控制滞后、质量检测效率低、安全隐患排查不全面等缺点，因此本文设计出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合系统，对施工全过程进行智能化管理。

4.2 应用实施流程

4.2.1 多源数据采集与预处理

利用 Civil3D、Revit 软件建立项目全专业 BIM 模型，包含道路、桥梁、临时设施、安全防护等所有构件，完整输入设计参数、施工工序、质量标准等语义信息；其次用大疆 M300RTK 无人机搭载五镜头相机，按每月一次的频率对全场倾斜摄影数据进行采集，对桥梁主梁、墩柱等重要部位采用地面三维激光扫描仪进行毫米级点云数据采集，获得施工现场动态实景三维数据；同时采集施工进度、质量、安全、成本等全过程业务数据 [4]。所有的数据都会经过 Python 预处理模块的标准化处理，从而给模型融合提供数据基础。

4.2.2 模型融合及系统部署

使用本文基于 Python 开发的融合算法，对 BIM 模型和实景三维模型进行空间配准和语义映射，创建项目虚实联动的数字孪生模型，完成融合系统本地化部署，开通各个参与方的分级用户权限，使系统正式上线运行 [5]。

4.2.3 全流程业务应用

即在项目施工全过程里，用融合系统进行进度、质量、安全、成本的智能化控制。进度管控时，每月用实景模型和 BIM 进度计划模型自动对比，找出进度偏差并及时调整施工计划，在质量管控时，对预制箱梁、现浇梁段进行点云扫描，和 BIM 模型比对检测尺寸偏差，识别外观质量缺陷，在安全管控时，用实景模型识别支架搭设、临边防护等环节的安全隐患，自动发出预警，在成本管控时，根据融合模型按月核算已完工程量，准确控制材料消耗和成本支出。

5 应用效果分析

5.1 施工管理效率得到飞跃式提高

就进度控制而言，传统的手工现场巡检、进度核算需要 7 天才能完成，但是系统自动比对分析只需要一天就可以完成，进度偏差识别效率提高了 86%，有效地避免了工期滞后风险；就质量、安全控制来说，质量缺陷检出率由原来的 82% 提高到 98%，安全隐患整改闭环时间由原来的平均 72h 缩短到现在的 27h，缩短幅度达到 62%，大大提高了项目管控的效率和精度。

5.2 项目经济效益大为提高

经过成本精细化控制，项目钢筋、混凝土等主材损耗率由原来的 4.5% 降低到现在的 1.3%，节约了 3.2 个百分点，累计节约材料费用 286 万元，减少现场管理人工支出 18%，总体效益明显。

5.3 多主体协同管理能力明显增强

利用融合系统之后，建设单位、施工单位、监理单位可以共同在同一个模型上开展协同工作，消除了信息不对称的情况，施工过程中涉及的设计变更、工序交接、问题整改等环节的流转效率提升超过 70%，项目的管理工作变得更加透明、规范、标准。

6 结语

本文针对道桥施工传统管理模式的核心痛点，提出基于 Python 算法的实景三维和 BIM 融合技术方案，建立道桥施工智能化管理体系，用工程实例验证该方案的可行性、有效性。研究表明，Python 算法可以很好地解决实景三维和 BIM 多源数据融合的技术难题，融合后的虚实联动模型可以实现道桥施工进度、质量、安全、成本全流程智能化管控，大大提高了施工管理的效率和精细化程度，给道桥工程数字化转型提供了一种可复制、可落地的应用范式。

未来研究工作会不断优化多源数据融合算法，把深度学习、数字孪生技术加入进去，对施工过程中出现的风险展开动态预估和智能决策，将融合模型运用到道桥工程运维当中，实现工程整个生命周期的数字化、智能化管理。

参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部.公路工程施工安全技术规范JTG F90-2015 [S].北京：人民交通出版社，2015.

[2] 崔志勇,吕春磊,王艳晗,等. BIM正向设计在道路工程全生命周期中的应用研究[J].北方交通,2022,(03):54-57.

[3] 常伟斌. BIM+GIS+无人机技术在高速公路改扩建全周期管理中的应用实践[J].运输经理世界,2025,(28):36-38.

[4] 菅云硕,范文杰,许海丰,等. 铁路工程BIM模型轻量化技术研究[J].铁道运输与经济,2023,45(05):99-104.

[5] 马遥. 公路互通匝道桥梁BIM建模方法研究与应用[J].山西建筑,2021,47(05):9-14.