

Application of Python Algorithm in Construction Quality Control of Road and Bridge under the Integration of 3D Real Scene and BIM

Zhencheng Hu

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

Abstract

To address challenges in road and bridge construction quality inspection—including low efficiency, insufficient precision, and data fragmentation—this study proposes a Python-based algorithm integrating real-scene 3D modeling with BIM for digitalized quality control. The methodology establishes a unified framework with standardized coordinates and feature-matching logic, developing a comprehensive algorithm system in Python. By adapting traditional ICP registration algorithms to bridge-specific requirements, the method significantly improves key component alignment accuracy. Field validation on a highway bridge project demonstrated its capability to conduct thorough cross-sectional inspections, achieving geometric dimensional tolerances within $\pm 2\text{mm}$. The automated system operates 85% faster than manual inspection while substantially reducing control costs and safety risks. This breakthrough establishes a closed-loop digitalized quality control system, providing a proven technical reference for similar engineering projects.

Keywords

real-scene 3D modeling; BIM; Python algorithm; road and bridge engineering

实景三维和 BIM 融合下 Python 算法在道桥施工质量控制中的应用

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

为了解决道桥施工质量检测效率低、精度不够、数据脱节等问题, 本文提出实景三维和 BIM 相结合的 Python 算法来实现数字化管控。首先构建深度融合的框架, 确定坐标统一、特征匹配的逻辑, 用 Python 开发全流程的算法体系, 根据道桥特点改进传统的 ICP 配准算法, 提高关键构件配准精度。通过某高速大桥工程的检验可知, 该方法可以对整个断面进行全面的质量检测, 几何尺寸误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内, 检测速度比人工检测快出 85% 以上, 明显降低控制成本和安全风险。实现了施工质量的数字化、精细化闭环控制, 给同类工程提供成熟的技术参考。

关键词

实景三维建模; BIM; Python 算法; 道桥工程

1 引言

道桥工程结构越来越复杂, 传统的手工巡检和单点测量效率低、数据分散、高空作业危险大, 不能满足精细化管理的要求。BIM 虽然可以提供设计基准, 但是和现场工况相脱离, 实景三维虽然可以高精度地还原现场, 但是没有业务属性, 不能直接判定质量合规性。现有的研究大多停留

在融合框架上, 缺少针对道桥线性特征和复杂构件的全流程自动化算法, 并且由于使用商业软件而造成灵活性不够。

Python 依靠丰富的开源库以及强大的计算能力, 给解决上述问题赋予了技术上的支持。

2 实景三维与 BIM 融合的核心技术原理

实景三维建模利用无人机倾斜摄影和地面三维激光扫描的配合工作, 前者得到大面积的真彩色影像, 后者对桥墩、支座等重要部位补充毫米级点云信息, 两者结合起来可以完全呈现现场的几何形状和空间位置。道桥 BIM 模型以 Civil3D、Revit 为基础创建, 包含路线、梁体等全部构件的几何信息和设计参数、验收规范等业务属性, 是质量管控

【基金项目】福建省住房和城乡建设科学技术计划项目 (项目编号: 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。

的设计基准和判定标准。两者融合的关键之处在于达成“设计基准”同“现场实景”的精准对接，即达成统一的工程坐标系以消除空间偏差，达成标准化的数据转换从而提高可比性，把 BIM 业务属性赋予实景模型，让几何偏差和合规性得到深入的结合。Python 算法因为高效的计算和灵活的开发，解决了商业软件流程固化的问题，成了实现多源数据自动化融合和全流程质量管控的技术支持^[1]。

3 基于 Python 的融合管控算法体系设计

3.1 多源数据预处理算法

道桥施工现场采集到的点云数据中存在大量的植被、施工机械、人员等无关噪声点，并且存在数据冗余度高的问题；BIM 模型为矢量格式，不能直接与点云数据进行匹配分析，因此需要预处理来实现数据的标准化。

对于实景点云数据，本文使用统计滤波算法（SOR）进行噪声剔除，使用 Open3D 库编写算法，核心原理是计算每一个点与它的 k 个邻域点的距离，假设距离服从高斯分布，剔除距离超过均值加上 n 倍标准差的离群点，经过工程验证，当 k 取 30、n 取 1.5 时，在保留构件几何特征的同时可以去掉 95% 以上的噪声点。同时使用体素下采样算法，对高密度点云进行精简，在保证核心特征的情况下把数据量降低 60% 以上，大大提高了后续的计算效率。

对 BIM 模型数据使用 IFCOpenShell 库读取 IFC 格式的道桥 BIM 模型，得到各个构件的几何信息，用网格化采样把 BIM 矢量模型转换成均匀密度的点云模型，使它和实点云的数据格式一致。同时根据布尔莎七参数模型建立坐标系转换算法，用三个以上的同名控制点来计算平移、旋转、缩放参数，把两类模型统一到工程独立坐标系中，消除基准偏差，核心转换公式如下所示。

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$$

式中： X_T, Y_T, Z_T 为目标坐标系坐标； X_S, Y_S, Z_S 为源坐标系坐标； λ 为尺度参数； r_x, r_y, r_z 为旋转参数； $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为平移参数。

3.2 改进的 ICP 模型精准配准算法

模型配准是实景三维与 BIM 融合的关键部分，模型配准的好坏会直接影响到质量检测的精度。传统的迭代最近点（ICP）算法对于初始配准位置比较敏感，容易陷入局部最优，对于道桥工程中的线性构件以及关键特征点的配准精度不够高。本文提出一种基于特征加权的改进 ICP 算法，用 Python 实现了两步式配准流程

第一步是粗配准。使用 SIFT 算法提取出实景点云和 BIM 点云的特征点，用特征描述子匹配得到同名点对，用随机采样一致性（RANSAC）算法剔除错误匹配对，求解初

始变换矩阵，给精准配准提供良好的初始值，避免算法陷入局部最优。

第二步就是精准配准。对传统的 ICP 算法进行加权优化，根据道桥工程中重要的控制部位（桥墩中心线、梁体边缘、支座中心点、路线线形控制点）赋予不同的权重因子，核心构件的权重取 2.0，一般构件取 1.0，在迭代过程中优先保证关键特征点的配准精度。改进后的目标函数为：

$$E(R,t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \|Rp_i + t - q_i\|^2$$

目标误差函数用旋转矩阵 R、平移向量 t 来表示，其中 p_i 是实景点云中的一个点， q_i 是 BIM 点云中的对应最近点， ω_i 是对应点的权重因子，n 是点云的数量。

通过迭代求解使目标函数最小的变换矩阵，得到模型的精确配准，经过工程验证，配准后整体均方根误差（RMSE）可以控制在 mm 以内，满足道桥施工质量控制精度的要求^[2]。

3.3 施工质量量化管控分析算法

根据配准后的融合模型，本文对道桥施工质量管控的关键指标进行了全自动化的量化分析算法，主要分为四个模块：

第一部分为几何尺寸偏差检测算法。利用 KD-Tree 空间索引结构，用 NumPy 进行批量并行计算，快速求解实景点云中每一个点到 BIM 模型表面的最短欧式距离，也就是该位置的施工偏差值。同时嵌入了《公路工程质量检验评定标准第一册土建工程》（JTGF80/1-2017）的偏差允许阈值，自动识别出超差区域，用 Matplotlib 生成偏差热力图，直观显示偏差分布，实现全构件、全覆盖的面状检测，代替传统的单点抽样检测。

二是线形平顺性分析算法。对道桥路线中心线、纵坡、横坡等主要线形参数进行 BIM 模型设计线形参数提取，用多项式拟合得到设计线形方程；从实景点云中提取路面、梁体边缘特征点，拟合得到实际施工线形，对比计算平面偏差、高程偏差、曲率偏差，自动评定线形平顺性是否满足设计和规范要求。

三是构件安装精度分析算法。对预制梁、支座、伸缩缝等预制安装构件进行 BIM 模型提取设计安装位置、角度参数，从实景点云中提取出对应构件的特征角点和中心线，计算构件的空间位置偏差、平面扭转角、竖向倾角等安装精度指标，判断是否符合验收标准，生成标准化的安装精度检测报告。

第四类为动态变形监测算法。根据施工过程中得到的多期实景三维数据，用算法自动配准之后，计算出桥墩、梁体等重要构件的沉降量、水平位移量，对施工过程中的结构变形进行实时监测，当发现变形量超过预警阈值时立即发出预警信号，保证施工过程中的结构安全^[3]。

4 工程实践应用

4.1 工程概况

本文以某省高速公路主线大桥工程为例,该大桥全长1286m,主桥采用(65+120+65)m预应力混凝土连续刚构,引桥采用30m预制预应力混凝土小箱梁,桥面宽度26m,设计时速100km/h。工程位于山区,地形复杂,桥墩最高达58m,高空作业较多,施工难度大,施工质量控制精度和效率要求高。传统的手工检测方式存在着检测范围小、效率低、高空作业安全风险大等优点,因此采用本文提出的方法对施工全过程进行质量控制。

4.2 应用实施流程

根据Civil3D和Revit软件建立全桥参数化BIM模型,包含路线、承台、桥墩、梁体、支座、桥面铺装等全部构件,将各个构件的设计参数、验收标准等属性信息集成到BIM模型中,作为质量控制的设计基准。

其次,开展多源数据采集,对下部结构施工阶段,用地面三维激光扫描仪获取桥墩、承台高密度点云数据,点云精度 $\pm 1\text{mm}$;对上部结构和桥面施工阶段,用五镜头无人机倾斜摄影系统进行数据采集,飞行相对高度100m,地面分辨率2cm,获取多视角影像后,通过Context Capture软件生成实景三维模型和点云数据^[4]。

最后将BIM模型和实景点云数据导入本文开发的Python算法程序中,依次进行数据预处理、模型配准、质量偏差分析,自动生成质量检测报告、偏差热力图、超差预警清单,指导现场施工整改,形成数据采集、自动化分析、问题预警、整改复核的闭环管控体系。

4.3 核心应用场景

在下部结构施工阶段,对桥墩施工完成后质量验收时用本文的方法对桥墩截面尺寸、垂直度、顶面高程进行全断面检测,自动计算偏差值,找出2个桥墩垂直度超过规范允许偏差,及时指导现场整改,防止后续上部结构施工误差累积。

在预制梁安装阶段,采用自动化检测设备对引桥42片预制小箱梁安装位置、梁端间隙、支座贴合度进行检测,单跨梁体检测时间为15分钟,比传统的手工检测方法快很多,能够满足对梁体安装精度的要求^[5]。

桥面铺装施工完毕后,对桥面纵坡、横坡、平整度、铺装厚度进行全面检测,生成路面高程偏差热力图,准确找到平整度超差区域,给桥面精调提供数据支持,保证桥面线形的平顺性,为路面施工打下良好的基础。

5 应用效果与分析

5.1 检测精度与完整性提升

利用全站仪人工实测值对本文方法的检测结果进行验证,结果表明,该方法的几何尺寸偏差检测精度可以达到 $\pm 2\text{mm}$,桥墩垂直度检测误差小于0.01%,比传统的手工检

测高出很多倍,完全可以达到道桥工程质量验收的规范要求。同时该方法可以对全构件、全覆盖进行面状检测,代替了传统的单点抽样检测,杜绝了质量缺陷的遗漏,检测数据的完整性、全面性得到了质的飞跃。

5.2 检测效率与安全水平大幅优化

传统的人工全桥质量检测需要6名测量人员7天才能完成,而且有大量的高空作业;而使用本文的方法只需要2个人就可以完成数据的采集,并且可以自动进行分析,耗时只有4小时,检测时间比传统方法缩短了85%以上,大大缩短了检测的时间,不会影响到施工进度。而且该方法大大缩减了高空作业和野外作业时间,从而降低了施工安全风险。

5.3 经济效益与管控效果显著

根据成本测算得知,该方法人工成本比原来降低了70%,设备成本比原来降低了50%,综合成本比原来降低了超过60%,经济效益好。管控上实行BIM模型同现场数据实时对标,质量问题早发现早处理,防止出现返工损失。检测数据数字化保存并可以追溯复查,为竣工验收和运维提供支持,实现道桥施工质量的数字化、精细化管理。

6 结论

针对道桥施工质量控制的痛点,本文提出用实景三维与BIM相结合的方式,用Python算法对质量进行管控的方法,创建出多源数据融合框架,创建全流程算法体系。工程验证表明,该方法可以解决设计与现场脱节的问题,实现设计基准和施工实体的精准对接,改进ICP配准算法,使实景点云和BIM模型配准RMSE控制在2mm以内,关键构件加权优化提高核心部位检测精度。经检测可知检测精度为 $\pm 2\text{mm}$,较人工高出85%以上,大大降低管控成本、降低安全风险,达到全覆盖精细化闭环管理的目的。未来将会使用深度学习来实现混凝土裂缝等缺陷的自动识别,并且会使用物联网创建全生命周期数字孪生系统,从而进一步提高工程的智能化程度。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路工程质量检验评定标准第一册土建工程:JTGF80/1-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [2] 刘红波,裴跃雄,王龙轩,等.数字孪生与人工智能融合驱动的结构健康监测技术研究综述[J/OL].地震工程学报,1-20[2026-03-11].<https://doi.org/10.20000/j.1000-0844.20250809001>.
- [3] 杨雅钧,石轩璐,唐禧妍,等.基于BIM与机器学习的建筑智能巡检眼镜研究[J].土木建筑工程信息技术,2022,14(01):20-26.
- [4] 许可,张军,匡渝阳.基于SVR-GA模型的预应力桥梁施工接缝损伤预测研究[J/OL].中外公路,1-10[2026-03-11].<https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20251031.1853.002>.
- [5] 张新元.基于Revit+Dynamo的桥梁垫石自动布置应用研究[J].交通科技,2022,(06):72-76+95.