

# 倾斜摄影技术与 BIM 技术结合的 公路施工进度自动监测方法

刘均利<sup>1</sup>,戴宗松<sup>1</sup>,安永昌<sup>2</sup>,梁涛<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院,广西 桂林 541000;

2. 广西桂通工程管理集团有限公司,广西 南宁 530021)

**摘要:**为有效监测公路项目的施工进度,提出一种倾斜摄影技术与建筑信息模型(BIM)技术相结合监测公路项目施工进度的方法。首先基于倾斜摄影技术快速采集施工现场的信息数据,构建三维实景模型,并结合施工进度计划表进行施工模拟,构建项目计划进度 BIM 模型;然后基于平台开发施工进度分析插件,通过布尔算法实现三维实景模型与 BIM 模型的匹配切分和计算,得到施工进度报表;对比报表信息与项目计划进度 BIM 模型,直观了解施工进度偏差;最后计算边坡土方量,对计算结果进行精度分析,为控制边坡开挖进度提供重要依据。以广西平南高速公路项目为应用实例进行验证,结果表明:利用本方法可对公路施工进度进行定期监测,为施工进度监测提供新的方法;施工进度分析插件总体匹配精度为 97.27%;通过对非地面点进行修正,在一定程度上提高了土方计算精度,得到的土方计算结果与施工记录结果差值比为 2.05%。

**关键词:**施工监测;高速公路;建筑信息模型(BIM);倾斜摄影技术;施工模拟

中图分类号:TU722

文献标志码:A

## Highway construction progress monitoring method combining oblique photography and BIM technology

LIU Junli<sup>1</sup>, DAI Zongsong<sup>1</sup>, AN Yongchang<sup>2</sup>, LIANG Tao<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China;

2. Guangxi Guitong Engineering Management Group Co. Ltd, Nanning 530021, China)

**Abstract:** To effectively monitor the construction progress of highway projects, a method of monitoring the construction progress of highway projects by combining oblique photography and BIM technology was proposed. Firstly, a 3D real scene model was constructed by quickly collecting the information data of the construction site based on the oblique photography technique. Then the project schedule BIM model was obtained by constructing a BIM model based on the BIM technology and carrying out the construction simulation with the construction schedule. Secondly, a construction progress analysis plug-in was developed on the platform and the matching, segmentation and calculation of the 3D real scene model and BIM model were realized through Boolean algorithm to obtain the construction progress sheet, which was compared with the project schedule BIM model to intuitively understand the construction schedule deviation. The slope earthwork volume was calculated and the accuracy of the calculation results was analyzed to provide an important basis for controlling the slope excavation progress. The proposed method was experimented by taking the Pingnan expressway project in Guangxi as an example. The results show that this method can be used to monitor the highway construction progress regularly and provide a new method

收稿日期:2022-10-17

基金项目:广西交通运输行业重点科技项目(2022-88)

作者简介:刘均利(1978—),男,山东泰安人,副教授,博士,主要从事 BIM 技术、桥梁和道路方向的研究。

E-mail:1628450505@qq.com

for the construction progress monitoring. The overall matching accuracy of the construction progress analysis plug-in is 97.27%. By correcting the non-ground points, the accuracy of earthwork calculation is improved to a certain extent and the difference ratio between the earthwork calculation result and the construction record result is 2.05%.

**Key words:** construction monitoring; expressway; building information model (BIM); oblique photography; construction simulation

定期监测在建公路项目的施工进度,对控制工程造价、确保项目如期交付和减少施工安全隐患都具有十分重要的意义。然而,高速公路项目具有路线长和周期久的特点,如果单纯依靠人工完成施工进度监测,存在检测人员主观经验误差大、耗时、耗力和局限性大等不足<sup>[1]</sup>。

众多学者对施工进度自动监测方法进行研究,并取得了一定的成果。Han等<sup>[2]</sup>提出一种使用卷积 Siamese 网络自动监测图像变化的方法,通过观察原地面、混凝土和沥青等颜色的区别,提供关于施工进度的可靠信息,但该方法仅能从二维影像判断工程施工情况;Kielhauser等<sup>[3]</sup>发现使用无人机对商业建筑的施工进度和质量进行自动化监控是切实可行的,可以迅速带来投资回报,并指出使用无人机监控施工进度尚有很大的改进空间;孙伟伦等<sup>[4]</sup>将两次不同时间拍摄的无人机倾斜摄影数据生成点云,然后利用点云体素转换算法生成体素模型,通过两期体素模型的对比实现工程进度监测,但该方法对点云分辨率的依赖较高;贾永红等<sup>[5]</sup>基于高分辨率遥感影像对道路施工进度进行监测,利用规划矢量数据的特征达到自动提取的效果,有效地监测了道路的施工进度;郭娟等<sup>[6]</sup>基于建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术模拟建筑施工全过程,并对施工进度进行监测,但 BIM 模型是静态的,脱离了现场实际情况,不能定期、准确地监测施工进度;刘莎莎等<sup>[7]</sup>通过手动选取 BIM 模型与三维点云间的匹配点,完成室内门窗部件的施工进度半自动核查,但存在人工匹配两种模型造成的主观误差。

综上所述,相较于二维影像,从三维角度监测施工进度更为形象直观,但仅仅依靠 BIM 模型容易脱离复杂多变的施工现场。而三维实景模型与 BIM 模型在匹配过程中存在自动化程度不高的问题,容易造成匹配误差。针对上述问题,本研究以广西壮族自治区平南高速公路为依托,提出一种倾斜摄影技术和 BIM 技术结合的公路施工进度监测方法,基于 Bentley Microstation Connectedition Update 4 平台开发了施工进度分析插件,自动、精确地匹配 BIM 模型与三维实景模型,然后对模型进行切分和计算,得到项目施工进度,并自动生成施工进度报表,实现公路项目施工进度的自动监测。

## 1 倾斜摄影技术和 BIM 技术

倾斜摄影技术是近年在国际摄影测量领域发展起来的一项高新技术,通过在同一飞行平台上搭载多传感器,从不同角度进行拍摄,快速获取地物全方位、高分辨率纹理信息,再利用相应的倾斜影像数据处理软件建立大范围的三维实景模型<sup>[8-9]</sup>。与传统测绘手段对比,倾斜摄影技术具有大范围、多数据、高效率的优势,被广泛应用于公安、规划和测绘等多个领域<sup>[10-11]</sup>。

BIM 基于数字化技术,提供完整的、与实际情况一致的工程信息库。借助 BIM 模型,可提高工程的信息集成化程度,并提供工程数据交换共享平台,实现从规划、设计、施工和运营的全生命周期管理。施工进度是现场真实施工阶段中安排的各个工序与时间顺序,以及各个工序的进度。对 BIM 模型赋予时间属性,进行施工模拟,可视化展示施工过程和相关数据,为实现工程施工进度自动化监测提供技术支撑<sup>[12-14]</sup>。

## 2 施工进度监测方法的原理

本方法的原理是以倾斜摄影技术获取的三维实景模型和 BIM 模型为数据基础,采用统一的坐标系将两种模型导入 BIM 平台中,以布尔算法对两个模型进行匹配计算,从而获得施工进度。

布尔算法是数字符号化的逻辑推演法,可对多个三维实体进行求交、并和差等运算。假设  $A$ 、 $B$  分别表示两个实体,根据计算机图形学及计算几何学的推导,得到两个实体之间布尔运算的公式如下:

$$\begin{cases} A \cap B = A_{inB} + B_{inA}, \\ A \cup B = A_{outB} + B_{outA}, \\ A - B = A_{outB} + (B_{inA})^{-1}, \\ B - A = B_{outA} + (A_{inB})^{-1}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $A_{inB}$  和  $A_{outB}$  分别指实体  $A$  的表面处于实体  $B$  内和外的部分;  $(A_{inB})^{-1}$  指  $A$  的表面在实体  $B$  内的部分的补集。同理可得其他操作符号的含义。

三维实景模型和 BIM 模型匹配计算过程: 首先以 BIM 模型的构件为最小单元生成包络体; 然后利用三维实景模型对包络体进行求差布尔运算, 从而给定三维实景模型边界, 完成模型匹配; 最后在匹配的基础上, 对求差后的包络体和最小单元进行求和布尔运算, 计算求和所得体积与 BIM 构件体积的比值, 得到构件施工进度。

### 3 技术路线

倾斜摄影技术和 BIM 技术结合的公路施工进度自动监测方法包含三维实景模型的建立、基于 BIM 技术的模型构建过程、模型融合、施工进度分析和土方量计算五个部分, 图 1 展示了施工进度监测方法的技术路线图。

#### 3.1 三维实景模型的建立

三维实景模型的建立是本研究方法的基础环节。倾斜摄影技术主要分为数据采集和数据处理两部分: 在数据采集, 结合项目区域地势、范围和无人机续航能力等情况, 合理规划飞行航线, 在施工现场布设像控点和检查点, 实现三维实景模型与真实的大地坐标匹配, 将测量误差控制在 5 cm 以内; 数据处理包括多幅影像联合平差、多幅影像密集匹配和纹理映射等关键内容<sup>[15-16]</sup>。

在处理获取的影像数据过程中, 由于影像数据来源于多个角度, 多数空中三角测量系统无法准确完成, 因而需要通过多幅影像联合平差的方法来处理航测影像数据。多幅影像联合平差是指结合定位定向系统 (position and orientation system, POS) 数据, 采用从粗到精的金字塔匹配法, 提取影像上的特征点, 利用光束法对特征点进行平差。光束法平差概述如图 2 所示。

光束法平差的数学模型为共线方程:

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $x, y$  为影像像素坐标值;  $f$  为相机焦距;  $X, Y, Z$  为影像像素坐标点同名的地面控制点;  $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$  表示影像的 3 个外方位角元素  $\varphi, \omega, \kappa$  组成的 9 个方向余弦值;  $X_s, Y_s, Z_s$  是相机拍摄影像时的空间位置线元素。

共线方程为非线性模型, 将方程线性化, 按泰勒公式展开, 包含全部加密点及控制点的误差方程式以矩

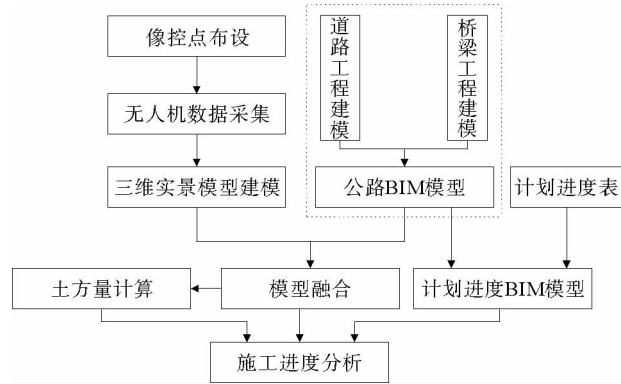


图 1 施工进度监测方法技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap for construction progress monitoring

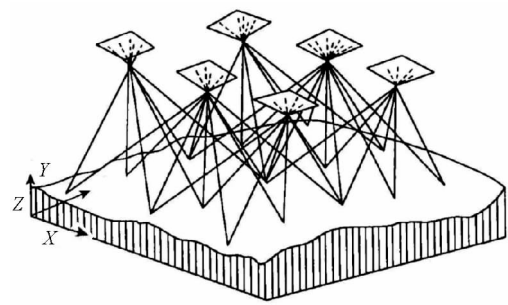


图 2 光束法平差概述图

Fig. 2 Overview of adjustment by beam method

阵的形式表示:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_s \\ dY_s \\ dZ_s \\ d\varphi \\ d\omega \\ d\kappa \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中:  $v_x$ 、 $v_y$  为所建立模型的真实坐标;  $dX_s$ 、 $dY_s$ 、 $dZ_s$  为外方位元素初始值改正数;  $d\varphi$ 、 $d\omega$ 、 $d\kappa$  为外方位角元素变量;  $dX$ 、 $dY$ 、 $dZ$  为物方点坐标改正数;  $l_x$ 、 $l_y$  为模型值和真实值的差值。

### 3.2 基于 BIM 技术的模型构建

BIM 模型的构建是有效开展高速公路项目进度监测的前提。采用 Bentley 平台构建 BIM 模型, 构建过程包括 BIM 模型和计划进度 BIM 模型构建。

#### 3.2.1 BIM 模型构建

道路工程采用 OpenRoad Designers 软件建模, 道路设计包括平、纵、横设计。利用交点法绘制道路平面线, 并在两直线的交点处插入圆曲线与缓和曲线; 通过输入坡度、桩号和竖曲线半径, 完成纵断面设计; 采用“搭积木”的方式绘制横断面, 每块“积木”通过“约束点”进行约束, 并添加附属设施和末端条件进行放坡, 最后在道路线形上加载生成道路 BIM 模型<sup>[17]</sup>。

桥梁工程采用 OpenBridge Modeler 软件建模。在对桥梁进行设计工作前, 将 OpenRoad Designers 软件绘制的道路平面线和纵断面导入桥梁设计文件中, 添加桥梁类型和放置桥墩中心线。根据设计参数, 约束各个关键点, 绘制桥梁上部结构的横断面, 在道路线形上加载生成桥梁上部结构的 BIM 模型; 提取 OpenBridge Modeler 自定义的模板库到 Microstation 中创建桥梁下部结构模板, 首先绘制二维断面形状, 然后通过拉伸创建下部结构三维实体和定义生成路径, 最后在道路线形上加载生成桥梁下部结构 BIM 模型<sup>[18]</sup>。

#### 3.2.2 计划进度 BIM 模型构建

采用 Synchro 4D 软件进行项目计划进度 BIM 模型构建。首先将 BIM 模型导入 Synchro 4D 软件, 结合施工进度计划表构建施工任务; 接着分配 BIM 模型构件到对应任务的 3D 资源里, 建立施工进度表与 BIM 模型的关联关系; 最后设置外观配置文件、4D 审阅等, 完成施工模拟, 得到计划进度 BIM 模型。

### 3.3 模型融合

OpenRoad Designers 建立的道路模型和 OpenBridge Modeler 建立的桥梁模型均采用 DNG 格式和 WGS84 坐标系, 直接导入 Microstation 中; 利用 Context Capture 软件建立的三维实景模型也需采用 WGS84 坐标系, 并将三维实景模型先转换为 FBX 格式的网络模型, 再导入 Microstation 中, 从而实现三维实景模型和 BIM 模型的融合。

### 3.4 施工进度分析

三维实景模型与 BIM 模型的匹配切分和计算是实现施工进度自动监测的关键。基于 Bentley 平台开发的施工进度分析插件由“构件树”“对比模型”和“报表”三大模块组成。

“构件树”模块通过定义子父节点快速建立高速公路项目“构件树”, 将节点与对应的 BIM 模型构件连接, 赋予构件面层、基层、主梁以及墩身等几何属性和功能属性, 分类汇总高速公路项目各项基础要素。

“对比模型”模块以节点对应的 BIM 模型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。由于三维实景模型本身和施工进度分析插件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。

“报表”模块生成施工进度分析结果, 采用 Excel 数据表格、折线图和饼图等展示项目的施工进度。

### 3.5 土方量计算

精确的土方量计算能够为控制工程进度提供重要依据。首先将三维实景模型和道路线形导入 Open-Road Designers 软件,提取三维实景模型的地面点,生成点云数据;然后以点云数据为基础,构建三角网地形图;最后在道路线形上放置边坡,自动计算边坡土方量。在点云数据生成过程中,存在将施工车辆和施工机械等杂物识别成地面点的错误。为此,采用目视手动修正的方法剔除错误识别的地面点,减少杂物对土方量计算的影响。

## 4 应用实例

### 4.1 工程概况

依托广西壮族自治区平南高速公路 K114+700 至 K116+200 段项目进行实例应用分析。该段包含一座大桥(旧圩大桥)和一段挖方路基,大桥左右幅分别为(5 m×20 m+4 m×20 m+5 m×20 m)和(4 m×20 m+4 m×20 m+5 m×20 m)的预应力混凝土小箱梁,路基段右侧有高度约 50 m 的高边坡。2022 年 3 月,高边坡不能如期完成开挖,导致项目的整体施工进度严重滞后,随即采用本研究方法监测项目施工进度。

采用大疆精灵 Phantom 4 RTK 多旋翼无人机搭载瑞铂公司的 RIY-D2M 五镜头相机,分别于 2022 年 3 月 22 日和 2022 年 5 月 16 日进行数据采集。无人机飞行高度为 110 m,航向重叠度和旁向重叠度均为 85%,沿公路两侧每 200 m 布置一个相控点,每次采集 11 000 张照片。采用 Context Capture 软件对照片进行处理,构建三维实景模型。图 3(a)和 3(b)分别为施工过程中拍摄构建的第一期和第二期三维实景模型,通过在试验区随机选取多个检查点,计算 GPS-RTK 实测坐标与三维实景模型对应点坐标的误差,得到的平面误差小于 5 cm,高程误差小于 2 cm。在 Microstation 平台完成了第一期三维实景模型和 BIM 模型的融合,如图 3(c)所示。

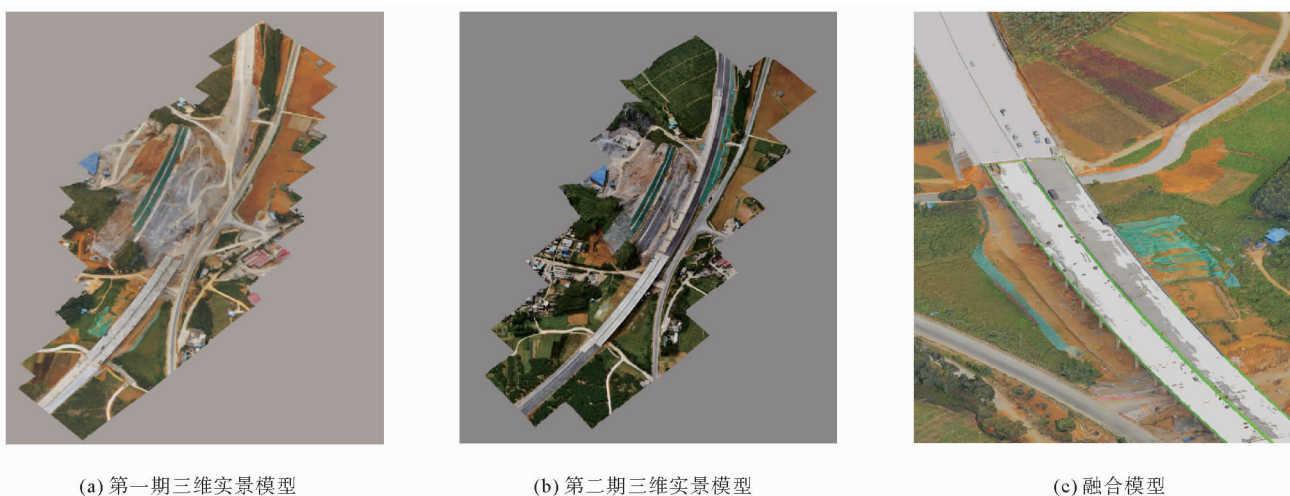


图 3 倾斜摄影技术和 BIM 技术结合应用概况

Fig. 3 Overview of experimental application combining oblique photography and BIM technology

### 4.2 应用结果分析

基于本研究提出的公路施工进度监测方法,对第一期三维实景模型和 BIM 模型进行匹配分析,得到项目施工进度详细报表。将桥梁工程的构件进行分类,导出各类构件的施工进度信息。表 1 为旧圩大桥左幅主梁施工进度表,可以看出:第一到第八跨主梁施工完成;第九到第十四跨主梁横向连接的混凝土并未浇筑,施工进度低于 90%。图 4 为全桥的护栏施工进度,由图 4 可以看出大桥右幅右侧第一到第七跨和第九、第十跨施工进度均在 97% 以上,右幅左侧第一到第七跨施工进度均高于 95%。

表1 旧圩大桥左幅主梁施工进度

Table 1 Construction progress of left main girder of Jiuwei Bridge

主梁	混凝土体积/m <sup>3</sup>	完成工程量/m <sup>3</sup>	进度/%	主梁	混凝土体积/m <sup>3</sup>	完成工程量/m <sup>3</sup>	进度/%
1	152.360	150.830	99	10	152.852	131.451	86
2	150.440	148.930	98	11	152.053	129.223	85
3	154.330	152.880	99	12	151.662	130.079	86
4	154.240	152.719	98	13	151.245	128.559	85
5	154.440	153.119	98	14	151.142	128.549	85
6	153.138	152.119	99	15	151.452	12.196	8
7	153.532	142.391	96	16	152.433	0	0
8	153.222	142.496	96	17	152.402	0	0
9	152.966	149.942	89	18	151.952	0	0

道路工程施工进度分析以 150 m 为一个区段。将桩号 K114+700-K115+150 道路施工段分为 3 个区段: K114+700-K114+850, K114+850-K115+000, K115+000-K115+150(图 5)。图 5(a)区段中,道路左右幅的基层施工进度均高于 90%,表示施工即将完成;图 5(b)区段中,道路右幅的基层施工进度低于 80%,表示在施工中;图 5(c)区段中,道路右幅的底基层施工即将完成,而道路左幅的基层正在施工,施工进度低于 60%。

为验证施工进度分析插件匹配的可靠性,对现场的施工进度信息进行采集,然后对比插件得到的施工进度报表,分析插件的匹配精度。表 2 为公路项目施工进度匹配精度。由表 2 可以看出,匹配的施工完成构件数为 110 个,正在施工构件数 31 个,未施工构件数 79 个;实际的施工完成构件数 113 个,正在施工构件数 29 个,未施工构件数 78 个。在本次应用分析中,项目匹配的构件总数为 220 个,错误匹配 6 个,施工进度分析插件的总体匹配精度为 97.27%。

根据施工进度计划表进行施工模拟,得到 2022 年 3 月 22 日桥梁工程的计划进度 BIM 模型如图 6 所示。表 3 为施工进度分析插件导出的桥梁护栏施工进度报表。通过对比发现,施工进度计划要求完成桥梁左右幅前三跨主梁的护栏,但现场实际完成的护栏仅有右幅主梁的前七跨和右幅右侧的第九、第十跨,施工进度存在滞后现象。

表2 施工进度匹配精度

Table 2 Construction progress matching accuracy

施工完成构件个数/实际个数	正在施工构件个数/实际个数	未施工构件个数/实际个数	匹配精度/%
110/113	31/29	79/78	97.27

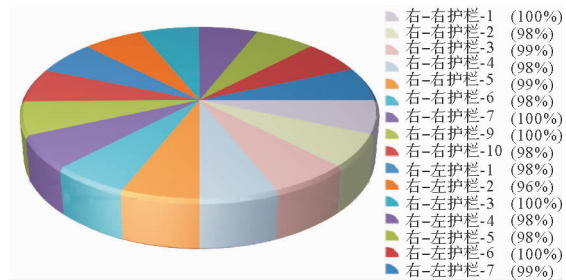
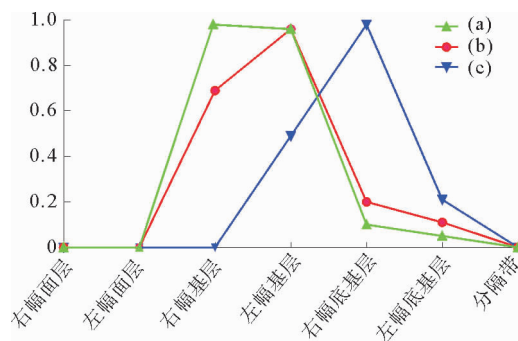


图4 旧圩大桥护栏施工进度

Fig. 4 Construction progress of guardrail of Jiuwei Bridge



(a)K114+700-K114+850;(b)K114+850-K115+000;  
(c)K115+000-K115+150

图5 道路施工进度比例

Fig. 5 Proportion of road construction progress

施工进度计划要求完成桥梁左右幅前三跨主梁的护栏,但现场实际完成的护栏仅有右幅主梁的前七跨和右幅右侧的第九、第十跨,施工进度存在滞后现象。

经调查,施工进度滞后的主要原因:①技术人员投入较少和施工机械不足;②设计人员对高边坡土石方工程量的计算有误,使得高边坡开挖进度滞后,影响了整体施工进度。采取的措施:针对原因①,建议加大人力和机械投入,保证工程按施工进度计划完成任务;针对原因②,结合倾斜摄影技术和 BIM 技术快速、精确计算高边坡土方开挖剩余量,为高边坡开挖进度控制提供数据参考。

图 7 为利用本研究方法对两期三维实景模型进行处理生成的地形图。计算得出点云修正前后两期三维实景模型高边坡土方量计算结果:修正点云前,第一期三维实景模型高边坡土方开挖剩余量为 67 541 m<sup>3</sup>;修正点云后,第一期和第二期三维实景模型高边坡土方开挖剩余量分别为 63 559 和 11 254 m<sup>3</sup>。

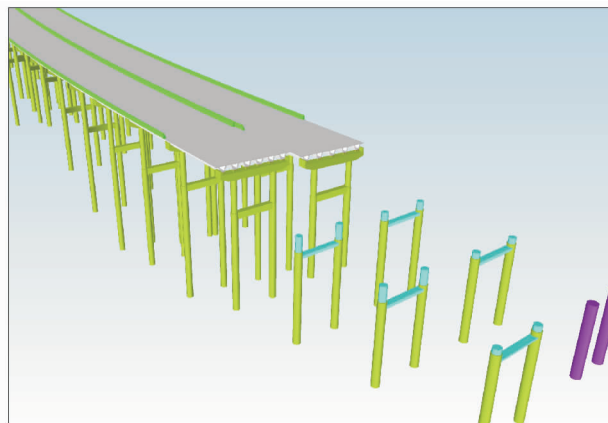
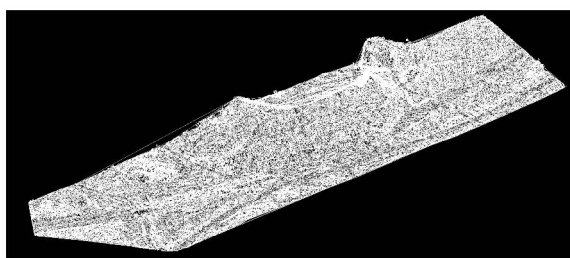


图 6 桥梁计划进度 BIM 模型  
Fig. 6 BIM model of bridge schedule

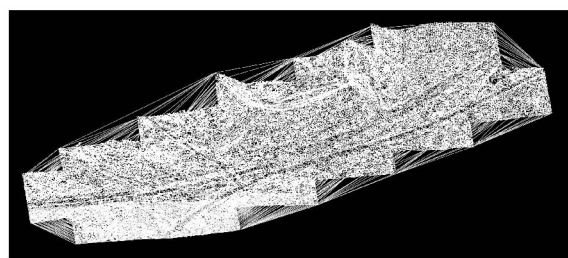
表 3 护栏施工进度

Table 3 Guardrail construction progress

跨号	构件编码	混凝土体积/m <sup>3</sup>	完成工程量/m <sup>3</sup>	进度/%	跨号	构件编码	混凝土体积/m <sup>3</sup>	完成工程量/m <sup>3</sup>	进度/%
1	右幅-右侧	7.120	7.119	100	10	右幅-右侧	7.114	6.972	98
2	右幅-右侧	7.150	7.007	98	1	右幅-左侧	7.106	6.964	98
3	右幅-右侧	7.200	7.128	99	2	右幅-左侧	7.208	6.920	96
4	右幅-右侧	7.117	6.975	98	3	右幅-左侧	7.188	7.116	98
5	右幅-右侧	1.215	7.143	99	4	右幅-左侧	7.146	7.003	98
6	右幅-右侧	7.188	7.044	98	5	右幅-左侧	7.159	7.158	100
7	右幅-右侧	7.154	7.154	100	6	右幅-左侧	7.258	7.113	98
9	右幅-右侧	7.144	7.073	99	7	右幅-左侧	7.420	7.272	98



(a) 第一期三维实景模型地形图



(b) 第二期三维实景模型地形图

图 7 点云生成地形

Fig. 7 Terrain generated by point cloud

为验证土方计算的准确性,将两期三维实景模型的土方计算结果相减,得到该时间段高边坡开挖的土方量,然后利用项目施工记录的土方数据验证土方量计算结果,如表 4 所示。本次项目施工记录的土方挖方量为 53 400 m<sup>3</sup>,通过对比分析可以发现:①由于测区存在施工车辆和施工机械等非地面数据,这些非地面数

表 4 土方量计算结果对比表

Table 4 Comparison of earthwork calculation results m<sup>3</sup>

名称	点云修正前的土方 计算结果	点云修正后的土方 计算结果
第一期三维实景模型	67 541	63 559
高边坡开挖的土方量	56 284	52 305
与施工记录数据的差值	2 884	1 095

据会被提取,并错误识别成地面点云。直接利用这些错误识别的地面点云进行土方计算时,会导致其挖方量明显大于实际的挖方量,产生计算误差;②将施工记录结果和点云修正后开挖的土方计算结果对比,得出点云修正后高边坡开挖的土方量与施工记录结果的差值比为 2.05%。

## 5 结论

基于平台开发施工进度分析插件,提出一种基于倾斜摄影技术和 BIM 技术结合的公路施工进度监测方法,实现了公路项目施工进度自动监测。依托广西平南高速公路项目工程验证表明:

1) 基于倾斜摄影技术能快速采集施工现场数据,利用 Context Capture 软件处理影像数据并对构建的三维实景模型进行测量,验证其平面误差和高程误差均在 5 cm 以内,满足施工进度监测要求。

2) 将施工进度分析插件应用于公路项目的施工进度监测中,快速得到施工进度信息,有效减少了施工进度监测的工作量,提高了监测的自动化程度,为监测施工进度提供新的思路。

3) 通过对比计划进度 BIM 模型与施工进度分析插件得到的施工进度报表,能直观分析施工进度的偏差,及时指导和协调后续施工,提高工程管理水平 and 效率。

4) 对高边坡土方开挖剩余量进行快速计算,有效解决了杂物遮挡对土方计算精度的影响,得到的点云修正后高边坡开挖的土方量与施工记录结果的差值比为 2.05%。

本研究提出的公路施工进度监测方法可对道路工程和桥梁工程施工进行自动监测,后续将尝试结合三维激光扫描技术对隧道工程进行研究。

## 参考文献:

- [1] 任万鹏,王会芳,朱其涛.公路工程施工信息化管理应用的探索[J].公路,2020(9):382-387.
- [2] HAN D,LEE S B,SONG M,et al.Change detection in unmanned aerial vehicle images for progress monitoring of road construction[J/OL].Buildings,2021,11(4).DOI:10.3390/buildings11040150.
- [3] KIELHAUSER C,MANZANO R R,HOFFMAN J J,et al.Automated construction progress and quality monitoring for commercial buildings with unmanned aerial systems:An application study from Switzerland[J/OL].Infrastructures,2020,5.DOI:10.3390/infrastructures5110098.
- [4] 孙伟伦,朱凌,耿源浩.倾斜摄影测量与建筑施工进度监测研究[J].北京建筑大学学报,2020,36(4):100-105.  
SUN Weilun,ZHU Ling,GENG Yuanhao.Research on oblique photogrammetry and building construction progress monitoring[J].Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2020,36(4):100-105.
- [5] 贾永红,周伟伟,周明婷.结合规划矢量的高分辨率遥感道路施工进度监测[J].测绘地理信息,2020,45(2):106-110.  
JIA Yonghong,ZHOU Weiwei,ZHOU Mingting.Road construction monitoring based on vector data and high-resolution remote sensing images[J].Journal of Geomatics,2020,45(2):106-110.
- [6] 郭娟,鄢莉.基于 BIM 技术的节能建筑工程项目进度监测方法[J].现代电子技术,2021,44(10):148-152.  
GUO Juan,YAN Li.BIM-based progress monitoring method of energy saving construction project[J].Modern Electronics Technique,2021,44(10):148-152.
- [7] 刘莎莎,朱庆,汤圣君,等.室内三维点云与 BIM 集成的建筑施工进度监测方法[J].地理信息世界,2019,26(5):107-112.  
LIU Shasha,ZHU Qing,TANG Shengjun,et al.Construction progress monitoring based on the integration of indoor 3D point cloud and BIM[J].Geomatics World,2019,26(5):107-112.
- [8] 李晓斌,林志军,杨玺,等.基于激光扫描和倾斜摄影技术的三维实景融合建模研究[J].激光杂志,2021,42(8):166-170.  
LI Xiaobin,LIN Zhijun,YANG Xi,et al.Research on 3D real scene fusion modeling based on laser scanning and oblique photography[J].Laser Journal,2021,42(8):166-170.
- [9] 刘唐,江涛,郭连杰.基于 MODIS 的三江源地区不同类型草地草产量的遥感监测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(5):18-26.  
LIU Tang,JIANG Tao,GUO Lianjie.MODIS-based remote sensing monitoring of different types of grassland in three-river headwater region[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018,37(5):18-26.
- [10] 牛磊,谭文辉,邱健壮,等.基于 Smart3D 无人机倾斜摄影三维建模方法研究[J].中国农业信息,2021,33(5):59-66.



- NIU Lei, TAN Wenhui, QIU Jianzhuang, et al. Research on 3D modeling method of UAV tilt photography based on Smart3D [J]. China Agricultural Informatics, 2021, 33(5): 59-66.
- [11] 李悦, 周长银. 基于贝叶斯信息更新的无人机目标搜索策略研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 71-76.  
LI Yue, ZHOU Changyin. Research on unmanned aerial vehicle search strategy based on Bayesian information update[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Nature Science), 2020, 39(6): 71-76.
- [12] 赵顺清, 孙辉. BIM+在公路工程项目管理中的应用研究[J]. 公路, 2020(9): 231-236.  
ZHAO Shunqing, SUN Hui. Research on the application of BIM+ in highway engineering project management[J]. Highway, 2020, 65(9): 231-236.
- [13] 吴佳明, 陈健, 陈国良, 等. 基于 BIM 技术的地铁基坑工程施工仿真模拟方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(增 1): 553-566.  
WU Jiaming, CHEN Jian, CHEN Guoliang, et al. Construction simulation method of metro foundation pit based on BIM technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 553-566.
- [14] 王胜军. BIM 4D 虚拟建造在施工进度管理中的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(3): 145-149.  
WANG Shengjun. Application and research of BIM 4D virtual construction method on pumped storage hydropower station projects[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 145-149.
- [15] 相诗尧, 王甲勇, 李振江, 等. 无人机倾斜摄影精细格网土方计算研究[J]. 公路, 2020(5): 42-46.  
XIANG Shiyao, WANG Jiayong, LI Zhenjiang, et al. Research on calculation of earthwork volume based on fine grid of UAV oblique photography technology[J]. Highway, 2020(5): 42-46.
- [16] 李行义, 李海云, 姚萌萌, 等. 基于无人机可见光影像的杆塔施工自动化进度检测技术[J]. 测绘通报, 2021(增 2): 47-51.  
LI Xingyi, LI Haiyun, YAO Mengmeng, et al. Construction progress monitoring based on the integration of indoor 3D point cloud and BIM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(S2): 47-51.
- [17] 梁小龙. EICAD 路线设计软件与 Bentley 平台交互数据接口程序[J]. 公路, 2019(12): 62-66.  
LIANG Xiaolong. Program for interactive data interface between EICAD route design software and Bentley platform[J]. Highway, 2019(12): 62-66.
- [18] 漆志军, 徐云龙, 汪庆明, 等. 基于 BIM+ 倾斜摄影技术的监控平台在华丽高速公路中的应用[J]. 公路, 2021(6): 284-287.  
QI Zhijun, XU Yunlong, WANG Qingming, et al. Application of monitoring platform based on BIM+ tilt photography technology in Huali Expressway[J]. Highway, 2021(6): 284-287.

(责任编辑:高丽华)