

# 融合 BIM 与三维重建的施工进度数字孪生跟踪方法初探

周绍杰<sup>1,3</sup>, 潘鹏<sup>1</sup>, 顾栋炼<sup>2</sup>, 林佳瑞<sup>1,\*</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京科技大学城镇化与城市安全研究院, 北京 100083; 3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**【摘要】**施工进度是贯穿工程建造全过程的关键指标, 对工程管控意义重大。传统施工进度跟踪主要依赖人工记录, 耗时耗力, 容易出错, 难以满足工程高效管控需求。本研究将建筑信息模型(BIM)技术与三维重建技术结合, 研究并验证了基于数字孪生的施工进度自动跟踪方法。以当前三维重建设备数据采集为基础, 研究首先引入三维点云语义分割模型自动识别主要工程构件, 从而实现三维点云与 BIM 模型的快速配准, 以构建施工现场数字孪生模型; 同时, 提出基于 BIM 与点云重叠率的施工进度判断方法, 实现施工进度的快速提取。最后, 以某新建建筑四层场景为案例, 验证本研究方法的可行性。

**【关键词】**施工进度跟踪; BIM; 点云配准; 点云语义分割; 数字孪生

## 1 引言

在土木工程建设项目中, 施工进度的跟踪和管理起着至关重要的作用, 高效和准确的施工进度跟踪能够推进工程的顺利进行, 反之会影响工程的按时交付和成本控制。但在实际情况中, 施工进度往往受到各部门各单位、自然因素、施工技术与管理水平等多方面的影响<sup>[1]</sup>, 对施工进度的准确跟踪提出了更高的要求。

传统的施工进度跟踪依靠人工为主, 需要专门的人员对每日的施工情况进行测量和记录, 并且往往基于文本, 体现为以下几个特点: 劳动密集、耗时、低效、易错(受到人主观因素的影响)<sup>[2]</sup>。同时, 受到人工统计的限制, 传统的施工进度跟踪和报告的平均频率为月度, 但建筑施工中任何施工活动的平均持续时间都是以天为单位进行度量的<sup>[3]</sup>, 这都会导致不够高效和不够准确的施工进度跟踪, 造成建筑行业的时间浪费和成本超支。

但随着信息化、数字化的快速发展, 近年来数字孪生技术被广泛应用于建筑行业的各个领域, 解决行业内固有的问题<sup>[4]</sup>。计算机视觉技术和 BIM 技术就是其中重要的技术组成,

**【基金项目】**国家自然科学基金资助项目(项目号)

**【作者简介】**林佳瑞(1987-), 男, 助理研究员。主要研究方向为智能建造、数字孪生与数字防灾技术。E-mail: lin611@tsinghua.edu.cn

被用于建立与真实世界对应的数字模型，获取动态的建筑信息。因此本研究提出一种融合 BIM 与三维重建的施工进度数字孪生跟踪方法，实现施工进度的获取。该方法基于施工现场三维重建的点云数据，引入语义分割算法提取主要的工程构件，并在此基础上配准点云模型和 BIM 模型，而后基于模型重叠率判断各构件的施工进度。最终，本文通过一个真实案例的应用与分析，验证了所提出方法的可行性。

## 2 研究现状

早期的施工进度跟踪研究可以追溯到 2009 年 Mani Golparvar-Fard 等<sup>[5]</sup>提出的 D4AR 模型（4-Dimensional Augmented Reality Model）。该研究开展较早，为施工进度自动跟踪理论奠定了思路。Varun Kumar Reja 等<sup>[6]</sup>筛选了 2014 年后发表的 24 篇有关施工进度自动跟踪的文献进行荟萃分析（meta-analysis），总结了基于计算机视觉进度跟踪方法的基本流程，如图 1 所示，包括三个部分：数据的获取与三维重建、计划模型和实际模型的对比如和施工进度的量化和可视化。



图 1 施工进度跟踪方法的基本流程

大多数与施工进度跟踪相关的研究都围绕上述基本流程展开，在具体的方法上略有不同。杨彬等<sup>[7]</sup>和 Jaehyun Park 等<sup>[8]</sup>采用了图像与 BIM 进行比较的方法判断施工进度；刘莎莎等<sup>[9]</sup>和 Mani Golparvar-Fard 等<sup>[10]</sup>则基于点云模型体素化的结果来判断不同构件的施工情况；Kevin Han 等<sup>[11]</sup>和 Zoran Pučko 等<sup>[12]</sup>将现场获取的点云模型转化为 BIM 构件，逐构件判断施工情况。可以看出，这些方法虽然都基于视觉数据建立虚拟模型，但由于语义信息的缺失或模型的简化，与真实建筑的对应关系较弱，无法达到数字孪生的技术要求。

## 3 研究方法

本研究所构建的施工进度数字孪生跟踪方法在整体上也遵循上一节中提到的基本流程，但加入了语义分割算法获取点云的建筑语义，一方面构建了与真实建筑更为相似的虚拟模型，另一方面辅助了点云模型与 BIM 模型的配准以及后续施工进度的推断。图 2 展示了该方法的完整过程，包括视觉三维重建、点云语义分割、点云跨源配准和构件进度推断四个部分。

在这个过程中，为了克服传统点云配准方法耗时耗力和跨源点云配准精度低的问题，本研究开发了基于语义分割结果的配准算法，快速和准确地配准了重建点云与 BIM 模型。在此基础上，本研究构建了基于模型重叠率的施工进度判断方法，根据各构件的施工情况获得整体的施工进度。

[键入文字]

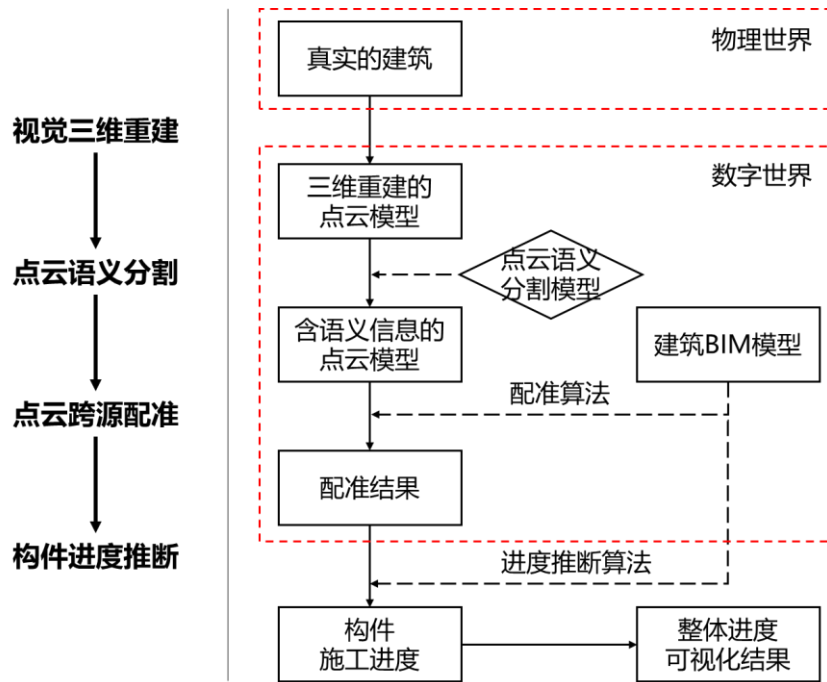


图2 施工进度数字孪生跟踪方法流程

## 4 案例应用

为了验证所提出方法的可行性，本研究选取某新建建筑四层场景进行案例应用与分析，整个应用过程按上节所述分为4个部分。

### 4.1 视觉三维重建

本研究采用激光进行三维重建，所使用的设备是四维深时激光相机，该相机搭载3个905nm的激光传感器，点云精度可以控制在±1cm左右。在三维重建过程中，围绕建筑四层的走廊一圈，共选取了50个点位进行扫描。最终获得整个建筑四层的PLY点云模型如图3所示，其中包含点30,102,499个。

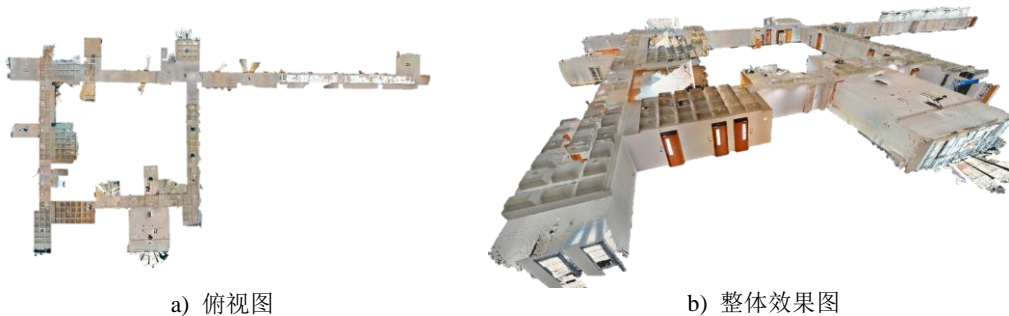


图3 建筑四层三维重建结果

## 4.2 点云语义分割

在上述三维重建的基础上，本研究将利用点云语义分割模型从中提取建筑语义。首先，为了保证算法的适应性，排除尺度大小对模型分割结果的影响，将 4.1 中重建的点云模型分割为 19 个房间尺度的场景。接下来，利用预训练完成的 DGCNN (Dynamic Graph Convolutional Neural Network) 深度学习模型对各个场景进行语义分割，保存分割结果并可视化。图 4 展示了其中名为 Hall\_1 的场景的语义分割结果。

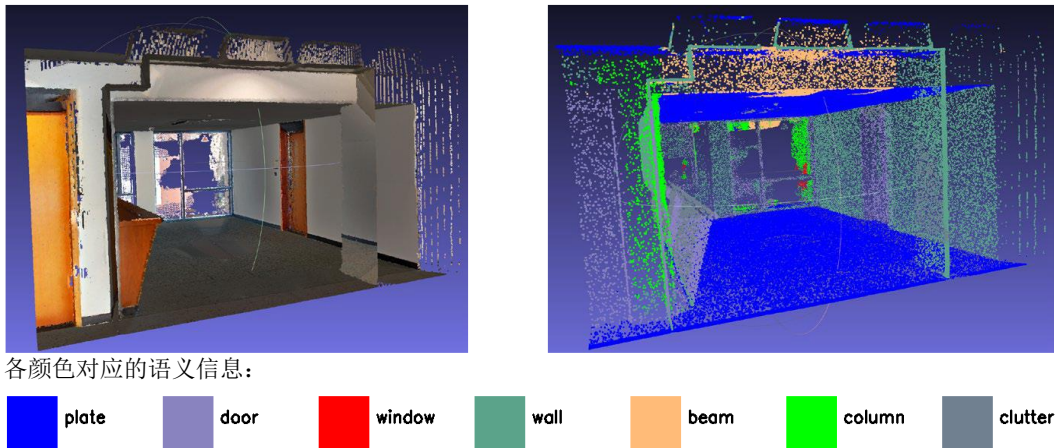


图 4 Hall\_1 场景真实点云与语义分割结果

## 4.3 点云跨源配准

有了语义分割的结果，利用本研究所提出的配准方法可以将点云模型与 BIM 模型统一到相同坐标系下。这里以 Hall\_1 场景为例，整个配准过程如图 5 所示。首先从语义分割后的点云模型和四层 BIM 模型中提取相应位置“门”的构件，利用 PCA 粗配准和 ICP 精配准实现构件尺度的点云配准，获得变换矩阵  $T_0$ ，接下来，将该矩阵  $T_0$  作为初始变换矩阵输入到场景尺度的 GICP 算法中，实现 Hall\_1 场景与四层 BIM 模型的配准，最终配准结果如图 6 所示。通过上述方法，可以构建起一个包含建筑语义的数字孪生模型，与真实建筑拥有相同的施工状态，可进一步用于施工进度的推断。

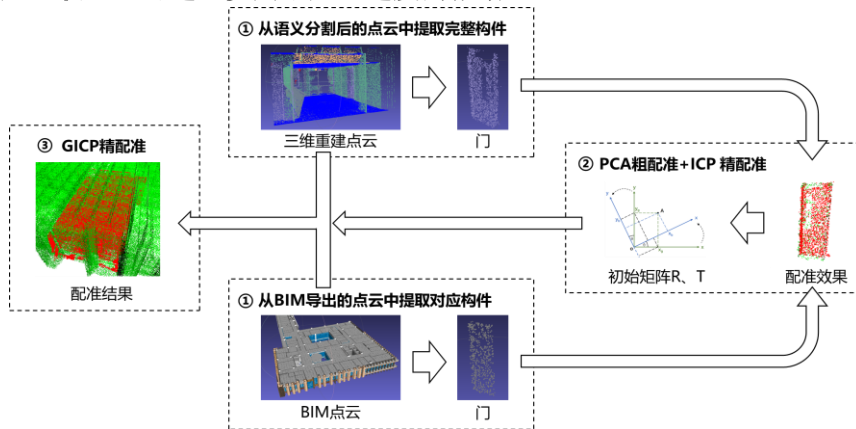


图 5 Hall\_1 点云与 BIM 模型的配准过程

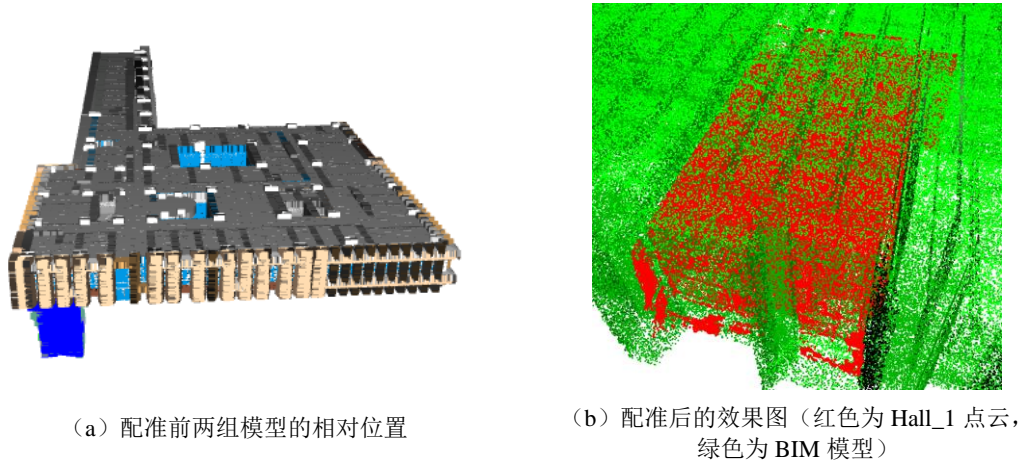


图 6 Hall\_1 点云与 BIM 模型的配准结果

#### 4.4 构件进度推断

在场景点云配准的基础上，可以根据两组模型之间的重叠占比判断各个构件的施工状态。本次案例应用选择了四个小场景作为进度推断的测试对象。由于该建筑已经施工完成，所有构件若被判断为“施工完成”则认为判断正确。运行进度判断算法使 BIM 构件遍历配准后的四个点云场景，可以获得各个构件的施工状态。表 1 给出了各类构件施工进度判断的正确率，最终所有构件的判断正确率为 90.9%。图 7 和图 8 则分别展示了算法判定为“施工完成”的构件的可视化结果和这些构件在整个四层 BIM 模型中的可视化结果。

表 1 各类构件施工进度判断正确率

	门	窗	墙	梁	柱	板	总数
算法判断施工完成的构件数量	7	4	11	34	8	6	70
理论上施工完成的可见构件数量	7	7	13	36	8	6	77
判断正确率 (%)	100	57.1	84.6	94.4	100	100	90.9

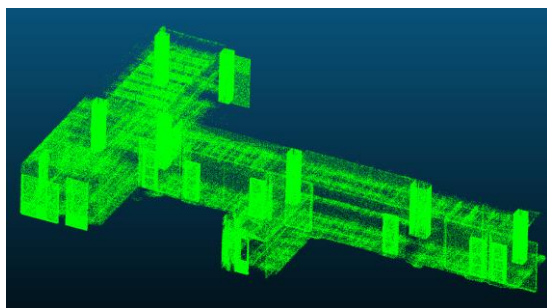


图 7 施工完成的构件的可视化结果

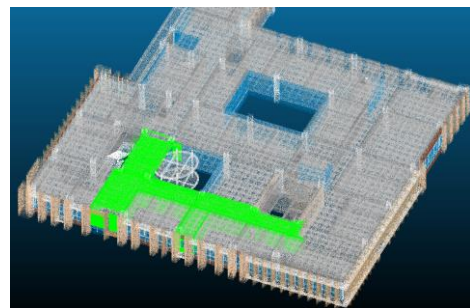


图 8 施工进度在整体模型上的可视化结果



## 5 总结

本研究构建了融合 BIM 与三维重建的施工进度数字孪生跟踪方法,将深度学习点云语义分割模型引入传统的施工进度判断过程,并开发了基于分割结果的点云与 BIM 模型的配准算法,构建起施工进度的数字孪生模型,同时提出了基于重叠率判断施工进度的方法,完成了对整体进度的提取。最终,基于该方法建立了某新建建筑四层的数字孪生模型,进度判断的正确率为 90.9%,证明了所提出方法的可行性。

### 参考文献

- [1] 周文浩,李永福. 建筑施工进度管理的重要性和控制方法分析[J]. 房地产世界, 2022(05): 149-151.
- [2] Teizer J. Status quo and open challenges in vision-based sensing and tracking of temporary resources on infrastructure construction sites[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(2): 225-238.
- [3] Greeshma A.S., Jeena B.E. Automated progress monitoring of construction projects using Machine learning and image processing approach[J]. *Materials Today: Proceedings: International Conference on Advances in Construction Materials and Structure*, 2022, 65(1): 554-563.
- [4] Tuhaise V V, Tah J H M, Abanda F H, Technologies for digital twin applications in construction[J]. *Automation in Construction*, 2023, 152: 104931.
- [5] Golparvar-Fard M, Peña-Mora F, Savarese S. Application of D4AR-A 4-Dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection[J]. *ITcon*, 2009(14): 129-153.
- [6] Reja V K, Varghese K, Ha Q P. Computer vision-based construction progress monitoring[J]. *Automation in Construction*, 2022, 138: 104245.
- [7] 杨彬,李国梁,张冰涵,等. 基于图像识别技术的真实 BIM 4D 施工进度管理技术的研究及其应用[C]//天津大学,天津市钢结构学会. 第二十届全国现代结构工程学术研讨会论文集. [出版者不详], 2020: 2-8.
- [8] Park J, S.M.ASCE, Cai H B, M.ASCE, Perissin D. Bringing Information to the Field: Automated Photo Registration and 4D BIM[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2018, 32(2): 04017084.
- [9] 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(05): 107-112.
- [10] Golparvar-Fard M, Peña-Mora F, Savarese S. Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(1): 04014025.
- [11] Han K, Degol J, Golparvar-Fard M, A.M.ASCE. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2018, 144(2): 04017110.
- [12] Pučko Z, Šuman N, Rebolj D. Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 38: 27-40.