DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)01-0127-06.

点云数据处理方法的地铁变电站可视化建模研究

陈楚炼[1]，袁金海[2]，郭智生[1]，刘庆华[1]，张伟萌[3]

(1.佛山市铁路投资建设集团有限公司,广东 佛山 528000；
2.广东威恒输变电工程有限公司,广东 佛山 528000；
3.广州诺地工程咨询有限公司,广东 广州 510000)

摘 要: 为有效监控变电站运行状态、保障地铁运行的平稳性,研究基于点云数据处理方法的地铁变电站可视化建模方法。在通过无人机倾斜摄影采集变电站的三维点云数据后,对点云数据实施处理,并利用ICP算法完成数据匹配。然后将点云数据导入Revit软件构建可视化基础模型,再经利用包裹贴图渲染方法无缝拼接后得到整体模型。最后通过双线性光强插值方法的增强处理获得最终的变电站可视化模型。实验结果表明,该方法构建的模型具有稳定性和流畅性,明暗度适中,内部细节呈现清晰,可用于实际的地铁变电站监控工作,保障地铁平稳、安全运行。

关键词: 地铁变电站；可视化建模；点云数据处理；ICP算法；Revit软件
中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)01-0127-06

Research on Visualization Modeling of Subway Substation Based on Point Cloud Data Processing Method

CHEN Chu-lian[1], YUAN Jin-hai[2], GUO Zhi-sheng[1], LIU Qing-hua[1], ZHANG Wei-meng[3]

(1. Foshan Railway Investment Construction Group Co., Ltd., Foshan 528000 China;
2. Guangdong Weiheng Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Foshan 528000 China;
3. Guangzhou Nuodi Egineering Consulting Co., Ltd., Guangzhou 510000 China)

Abstract: In order to effectively monitor the operation status of the substation and ensure the stationarity of subway operation, a visual modeling method of subway substation based on point cloud data processing method is researched. After collecting the 3D point cloud data of the substation by UAV tilt photography, the point cloud data are processed, and the ICP algorithm is used to complete the data matching. Then the point cloud data is imported into Revit software to build the basic visual model, and then the whole model is obtained by seamless stitching using the parcel map rendering method. Finally, the final substation visual model is obtained through the enhancement processing of bilinear light intensity interpolation method. Experimental results show that the model constructed by this method has stability and fluency, moderate brightness and darkness, and clear internal details, which can be used in the actual subway substation monitoring work to ensure the stable and safe operation of subway.

Keywords: subway substation; visual modeling; point cloud data processing; ICP algorithm; revit software

0 引言

地铁电力系统逐步向现代化智能化发展,作为地铁电力系统日常管控中的关键一环,变电站监控工作的实际执行效果会直接影响到电力系统的稳定运行。为此,需有效提升地铁变电站的实际监控能力,确保地铁电力系统的平稳运行,为地铁的安全、平稳运行及乘客的安全乘坐提供保障[1-2]。

以往的地铁变电站监控工作大多采取相关人员现场监控的方式完成,随着地铁变电站规模的逐步扩大,此种方法已难以满足变电站的实际监控需求[3]。为此,需应用更高技术的地铁变电站监控方法,以满足当前规模日益扩大的变电站监控需求。在这一背景下,可用于地铁变电站监控的可视化模型应运而生[4]。

构建有效的变电站可视化模型能够帮助工作人员实时、高效地监控变电站运行状况,不仅节省人工,而且可满足大规模变电站的实时监控需求[5-6]。当前已有诸多学者针对变电站可视化模型的构建展开了相关的研究。由龙丽娟[7]等人提出的三维激光扫描点云数据的变电站建模方法,该方法主要是将手动与3ds Max两种建模方式相结合,运用三维激光扫描所获得的变电站点云数据实

*基金项目:佛山市城市轨道交通三号线工程3214标主变电所工程(WHS-02-2019-WWF-2019-068)
收稿日期:2023-09-28

现对三维模型的构建。该方法所构建模型的整体流畅性较为理想，但清晰度有待进一步提升；李仙琪[8]等人研究的通过ORB-SLAM算法实现变电站的三维模型构建方法，此方法重点通过所提算法获取变电站图像内的特征，以此将变电站三维点云生成，达到构建变电站三维模型的目的。但此方法所构建模型质量稍差，建模精度不够理想；由刘千宽[9]等人提出的变电站数字化二次设备建模方法，是通过结合建模语言和相关建模工具，完成变电站设备的数字化建模。该方法所构建模型的流畅性较好，但清晰度不佳，综合效果稍差。

点云数据是指在同一空间范围内，分布点与特征点构成的集合[10]。简单来讲，就是通过激光雷达获取的带空间坐标的采样点的一个集合，由于数量大且密集因此称之为“点云”。利用点云数据可以实现地形图测绘、构建数字高程模型、电力巡线、管道走廊规划与维护、立面测量等工作。为此，本文以点云数据处理为核心技术，结合ICP算法，在Revit软件中，匹配得到变电站各空间的三维点云数据，从而构建地铁变电站可视化模型，为变电站的大规模实时监控提供支撑，保障地铁电力系统及地铁的平稳安全运行。其中，Revit软件属于一种专业的建筑信息模型(BIM)软件，同时也是BIM技术的关键核心建模软件，能够实现设备、建筑构件及结构等的可视化建模，其特点为具备庞大的对象库与表现优越的用户界面、操作模式简单等[11]。ICP(Iterative closest point，最近点迭代)算法属于一类自由形态曲面的匹配方法，其具有较高的层次，主要是通过相邻点搜寻的方式，完成点云数据的配准任务，它的主要特点包括匹配精度高、用途广泛、运用简单等[12]。

1 地铁变电站可视化建模方法

1.1 可视化建模基本原理分析

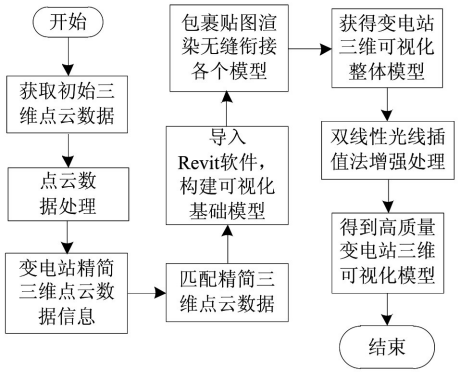


图1 地铁配套变电站三维可视化模型构建原理图

地铁变电站可视化模型应具有可视化清晰、实际应用性强、与实际变电站的空间及时间的一致性的特点。为满足以上要求，本文在Revit软件中构建地铁变电站可视化模型，获得高清晰度、高质量、高应用性以及与实际变电站高吻合度的三维可视化模型，本文的主要建模原理如图1所示。

主要建模原理可概述为：

(1) 通过无人机倾斜摄影技术采集变电站不同角度的点云数据信息及影像数据；

(2) 运用空间网格量化处理所获取到的变电站初始三维点云数据信息，得到预处理后的变电站精简点云数据信息；

(3) 通过ICP算法匹配量化处理后的变电站精简三维点云数据信息；

(4) 向Revit软件内导入匹配后的变电站各空间三维点云数据，获得变电站各个空间的三维可视化基础模型；

(5) 采取包裹贴图的渲染方法无缝衔接基础模型，得到渲染后的地铁变电站三维可视化整体模型；

(6) 结合双线性光强插值方法调整渲染后整体模型的明暗度，完成对整体模型的增强处理，获得最终的高质量变电站三维可视化整体模型。

1.2 可视化建模实现

1.2.1 地铁变电站点云数据采集与处理

采集并处理地铁变电站点云信息是可视化建模的基础与关键[13]。为此，选用无人机倾斜摄影技术实现对目标变电站各个角度点云数据信息与影像的有效采集，同时结合三台以上的SLAM(Simultaneous Localization And Mapping，即时定位与地图构建)设备以高于120°的扫描角度，对所获取的变电站三维点云数据信息实施扫描与对接处理之后，获得具备持续性特性的三维点云数据信息和影像，以此保障所获取的变电站三维点云数据信息能够达到可视化的建模所需。

为保障后续构建可视化模型的过程中，所获得模型具有一致性的空间特征，需对所获取的变电站三维点云数据信息实施合理匹配。但因实际获取的三维点云数据信息量庞大，为降低匹配过程的烦琐性，提升匹配效率，需在去噪处理和量化处理的基础上匹配此类点云数据信息。

对于含有噪声点云数据实施降噪处理，一方面是采用噪声抑制手段直接去除，另一方面，对于特征比较明显的噪声，采用抑制手段工作量是比较大的。因此，本文针对这类噪声点云数据进行预处理，具体实现步骤如下所示：

步骤1：对含有噪声的点云数据进行栅格化处理，给定一个阈值r，将所有格子中的点数与r进行对比。当小于r时，则需要去除格子内的噪声；

步骤2：计算与处理后的点云数据顶点最近的N个点，并在这N个点的基础上拟合得到一个二次曲面：

$$Z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dyz + Ex + Fy + G \tag{1}$$

式中，三维坐标系为(x,y,z)，A、B、C、D、E、F、G分别表示二次曲面上的点。

为二次曲面上的点与点云数据顶点的垂直距离设定一个阈值t，小于t的点为非噪声点，大于t的点看作是噪声点，对其进行去除即可。

在此基础上，结合空间网格理念量化处理所获取的变电站三维点云数据信息，如图2所示。

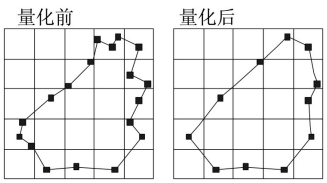


图2 空间网格量化处理变电站三维点云原理图

空间网格量化处理变电站三维点云数据信息的过程为：

步骤1：将尺寸恰当的方格区间由三维空间内虚拟分割出来，运用此方格区间对所获取的变电站三维点云的各个数据信息点实施方格分割；

步骤2：与此同时，设定相同方格区间内的各个数据信息点类似，并以此为依据，通过合并相同方格区间内的各个数据信息点，获取到全新的数据信息点；

步骤3：以此类推，在分割并合并全部变电站三维点云数据信息点后，实现变电站三维点云数据信息的量化处理，有效降低三维点云的数据信息量。

1.2.2 构建可视化基础模型

通过ICP算法匹配量化处理后的全部变电站三维点云数据后，在Revit软件内实现匹配后变电站三维点云数据与影像的有效融合，实现变电站三维点云数据的可视化，完成地铁变电站各个空间可视化基础模型的构建。

在构建变电站三维可视化基础模型的过程中，由于变电站实际空间环境内所包含的房间与楼层数量过多[14]，导致变电站的总体空间遭到分割，需针对分割后的各个空间依次构建模型，同时对应生成数个工程文件；在此基础上，通过半自动拼接方式以现实变电站空间位置为依据，完成各个工程文件点云数据集合的调整，以此保障最终所构建的变电站各个空间可视化基础模型的连续性。

本文采用ICP算法匹配变电站三维点云数据。由量化处理后的变电站三维点云数据中随机选取两个三维点云数据集合，并设二者分别通过A与B表示，且$A=\{a_1,a_2,\cdots,a_m\}$，$B=\{b_1,b_2,\cdots,b_m\}$；通过ICP算法对A与B两个三维点云数据集合之间的差异度$e(U,S)$实施运算，则有：

$$e(U,S)=\sum_{i=1}^{m}\left\|Ua_1+i-b_i\right\| \tag{2}$$

式中，i表示三维点云数据；S与U分别表示点云坐标的平移与旋转量。在运用ICP算法匹配变电站三维点云数据时，需对差异度$e(U,S)$阈值实施设定，当任意两个三维点云数据的坐标差异度值比此阈值高时，那么这两个三维点云数据不匹配，反之则二者能够匹配。依据此方式对量化处理后的全部变电站三维点云数据均实施匹配后，将匹配后的变电站三维点云数据导入Revit软件内，获得变电站各个空间可视化基础模型。Revit软件的变电站可视化基础模型构建过程可概述为：

步骤1：设定时钟计时功能，保证所融合的变电站三维点云数据与影像时间统一，以此保障所获得的变电站各空间可视化基础模型在时间上具备一致性；

步骤2：在相同时刻提取出导入到Revit软件内的变电站三维点云数据与影像，并通过空间坐标转换获得具有空间一致性的变电站各个空间可视化基础模型。

1.2.3 可视化基础模型渲染增强

对上述得到的基础模型进行渲染增强处理，得到渲染增强后的可视化整体模型。结合包裹贴图方法，运用色彩处理的方式改善基础模型，并以贴图坐标为依据，调整基础模型的尺寸与所处位置，达到无缝衔接变电站可视化基础模型的目的，实现基础模型的有效渲染处理。在对基础模型实施包裹贴图时，可能会存在基础模型内非规则物体的中心同基础模型的中心有误差产生的现象，此类现象易干扰到包裹贴图的渲染效果。为降低此类现象对渲染效果的影响程度，需设定此类误差的测定方程式，此方程式可表示成：

$$D\geq\left(l_1+l_2\right)\Big/2 \tag{3}$$

式中，选取基础模型的中心当作基准点，任意两个空间的三维可视化基础模型的相对面边长分别利用l_1与l_2表示；二者的间距利用D表示。通过式(3)实时测定并有效降低各基础模型的中心误差，对模型的渲染效果予以有效保障。

在完成以上包裹贴图的模型渲染处理基础上，继续结合双线性光强插值方法调整此时模型的明暗度[15]，实现对渲染后模型的增强处理，进一步提升变电站可视化模型的整体质量。设与渲染后变电站可视化模型的每个顶点接近的多边形矢量依次通过$P_1\sim P_m$表示，那么顶点的法向量平均值运算式为：

$$P_n=\left(P_1+P_2+\cdots+P_m\right) \tag{4}$$

通过光照模型运用式(4)所得出的法向量平均值，对渲染后变电站可视化模型顶点的光照度I实施运算，运算公式为：

$$I=I_x+I_y\left(\vec{G}\times\overrightarrow{P_n}\right) \tag{5}$$

式中，模型顶点的光学三原色的色度通过表示；模型每个顶点的横、纵坐标通过x与y表示，则顶点的x、y方向的光强分别通过I_x与I_y表示。双线性光强插值运算式为：

$$\begin{cases} I_x = \dfrac{1}{y_1 - y_2}\left[I_1(y_m - y_2) + I_2(y_1 - y_m)\right] \\ I_y = \dfrac{1}{y_1 - y_4}\left[I_1(y_m - y_4) + I_2(y_1 - y_m)\right] \\ I_i = \dfrac{1}{y_a - y_b}\left[I_a(y_b - y_m) + I_b(y_m - y_a)\right] \end{cases} \tag{6}$$

式中，模型第i个顶点的光强度利用I_i表示；模型第1、2、4个顶点的纵坐标值依次利用y_1、y_2、y_4表示；模型第a、b个顶点的纵坐标值分别利用y_a与y_b表示；模型第1、2个顶点的光强度分别利用I_1与I_2表示；模型第a、b个顶点的光强度分别利用I_a与I_b表示；模型的总顶点数量利用m表示；则模型的第m个顶点的纵坐标值利用y_m表示。

通过式(6)能够对模型各个顶点的光照度实施调控，同时以运算结果为依据，增强各个顶点的光照值，所运用的光照增强方程式为：

$$\begin{cases} \Delta I_x = (I_1 - I_2) \Big/ (y_1 - y_2) \\ \Delta I_y = (I_1 - I_4) \Big/ (y_1 - y_4) \\ \Delta I_i = (I_b - I_a) \Big/ (y_b - y_a) \end{cases} \tag{7}$$

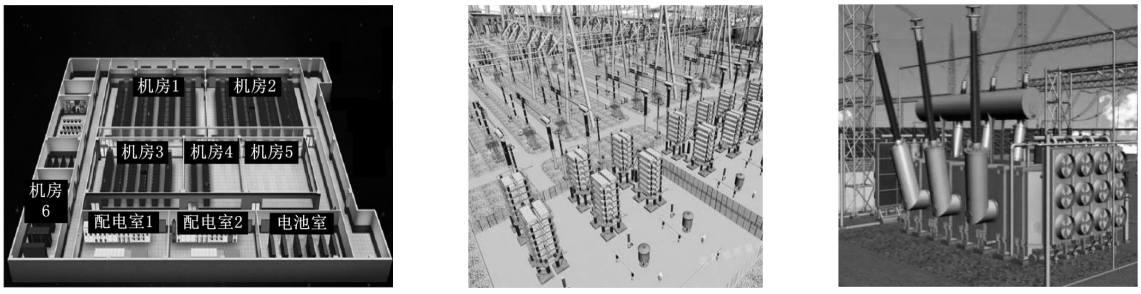
通过结合式(6)和式(7)，能够实现对渲染后变电站三维可视化模型各顶点处光照度的调控与增强处理，有效调整了可视化模型的明暗度，避免模型出现色彩突变现象，提高最终所获得地铁变电站可视化模型的逼真度，保证整体模型质量。

2 实验结果分析

以某城市地铁的配套变电站为例，采用本文方法构建该变电站的可视化模型，通过检验模型的实际显示效果，检验本文方法的应用性能。

实验变电站内所包含的主要设备有400 V供电系统、1 500 V直流供电系统、控制信号屏、直流屏、交流屏及蓄电池屏等，其中，400 V供电系统主要由加热器、温控器、开关柜以及配电变压器等构成，1 500 V直流供电系统重点包括排流柜、整流器、整流变压器以及直流开关柜等。

首先通过本文方法获得实验变电站内各个空间的可视化基础模型，以其中的二楼机房空间、换流站空间及变压器空间的可视化基础模型为例，呈现出本文方法的基础模型构建效果，如图3所示。



(a) 二楼机房空间　(b) 换流站所处空间　(c) 变压器所处空间

图3 本文方法构建的各空间可视化基础模型

通过图3能够看出，本文方法所构建的实验变电站不同空间可视化基础模型呈现效果清晰，能够有效展现出变电站内不同空间的现实状态，基础建模效果理想。

在以上所获得的基础模型之上，继续运用本文方法对各基础模型实施包裹贴图渲染，获得无缝衔接的整体变电站可视化模型。

为检验本文方法此部分的应用效果，选取模型帧率作为评价本文方法渲染流畅度的指标，并以三维激光扫描点云数据的变电站建模方法(文献[7]方法)、改进ORB-SLAM的变电设备三维建模方法(文献[8]方法)、变电站数字化设计的二次设备建模方法(文献[9]方法)三种方法作为本文方法的对比方法，通过对比各方法渲染模型过程中的帧率指标值变化情况，分析本文方法对模型渲染的流畅度，以此验证本文方法的模型渲染效果。设模型帧率通过表示，其运算公式为：

$$F = f_m \Big/ E_t \tag{8}$$

式中，模型帧数的持续时间通过E_t表示；所构建模型的固定帧数通过f_m表示。模型的帧率越高代表此模型在呈现时的平稳性与流畅性越佳，通常需保证模型的帧率不低于30 fps，以确保模型的流畅呈现。

各方法构建实验变电站可视化模型在一定时间内的帧率对比结果如表1所示。

由表1能够得出，四种方法所获得模型的帧率均高于30 fps，均能够满足模型呈现的基本流畅度需求；其中，本文方法所获得的实验变电站可视化整体模型的帧率在实验的5 min内始终保持最高值，且未出现过大波动，而其余三个对比方法所获得整体模型的帧率均低于本文方

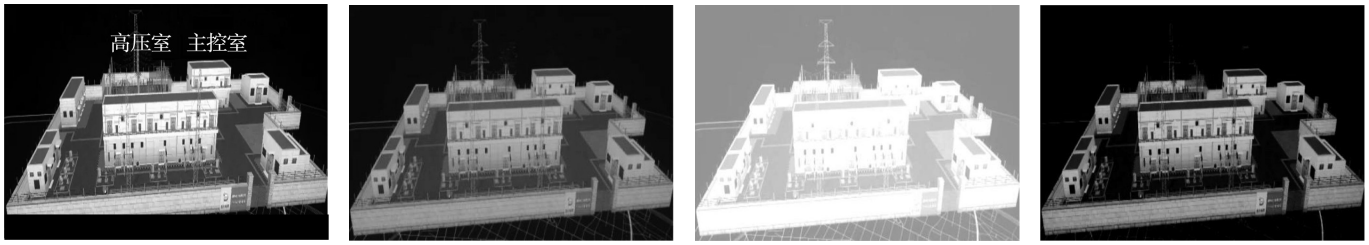
法，且帧率的波动程度均高于本文方法，由此可见，本文方法渲染所得整体的模型具有较高且稳定的流畅度，模型的渲染效果更为理想。

表1 不同方法构建的变电站可视化模型帧率对比/fps

时间/s	本文方法	文献[7]方法	文献[8]方法	文献[9]方法	时间/s	本文方法	文献[7]方法	文献[8]方法	文献[9]方法
20	38.25	36.21	32.17	33.25	180	39.12	36.85	32.67	33.06
40	38.73	35.85	30.58	34.57	200	38.87	34.09	31.59	34.27
60	38.46	36.06	33.46	34.78	220	38.52	34.58	32.95	34.22
80	38.58	35.13	32.59	34.13	240	38.67	35.67	31.74	33.58
100	38.86	34.87	33.13	34.19	260	39.13	35.68	30.95	32.89
120	39.03	35.23	30.18	33.26	280	38.71	36.24	32.57	33.52
140	39.15	35.68	33.58	33.85	300	38.69	34.77	33.48	34.08
160	38.94	36.15	32.54	34.61					

在此基础上，继续运用本文方法对渲染后的实验变电站可视化整体模型实施增强处理，并与其他三种对比方法所得的最终模型实施对比，检验本文方法的最终建模效果，结果如图4所示。

通过图4能够得出，不同方法所获得的最终实验变电站三维可视化模型在明暗度上存在明显的差距，文献[7]方法与文献[9]方法所获得的最终模型均较暗，无法更好地将内部细节清晰呈现，整体模型质量不够理想；文献[8]方法所获得的最终模型过于明亮，不仅视觉效果不好，且同样不能清晰呈现内部细节；而本文方法所获得的最终模型明暗度适中，能够将实验变电站的内部细节清晰地呈现，整体质量更为理想，具有较高的实际应用价值。



(a) 本文方法的最终建模效果　(b) 文献[7]方法的最终建模效果　(c) 文献[8]方法的最终建模效果　(d) 文献[9]方法的最终建模效果

图4 各方法最终建模效果呈现

3 结束语

地铁的安全平稳运行依赖于其配套电力系统的运行稳定性，而电力系统的运行稳定性需通过实时有效的变电站监控实现，变电站的实时有效监控则需借助可视化模型完成。为此，本文利用Revit软件，以采集并量化处理之后的地铁变电站三维点云数据信息为基础数据，经由ICP算法实施匹配后，获得变电站各个空间的可视化基础模型。在此基础上，结合包裹贴图渲染方法与双线性光强插值方法，先后完成各基础模型的渲染拼接与增强处理，获得最终的变电站可视化模型，通过实际应用实验结果检验出本文方法的变电站可视化模型构建效果理想，所得模型的帧率高，具有稳定且较高的流畅性，视觉呈现清晰，明暗度适中，能够清楚展现变电站内部细节信息，整体建模质量较高，实际应用效果理想，可用于实际地铁变电站的日常智能监控中，保障地铁电力系统以及地铁的平稳安全运行。

由于本文仅针对建模的综合质量展开实验验证，并未针对建模的效率予以实验检验。因此，在以后的研究中会继续针对此部分展开相应的实验研究，进一步检验本文方法的总体性能，完善本文方法的实际应用性能检验结果，为地铁配套变电站监控中的实际应用提供科学支撑。

参考文献：

[1] 张柏林，李希德，魏博，等.基于改进的场景分类和去粗粒化MCMC的风电出力模拟方法[J].电测与仪表，2024，61(7)：41-49，122.

[2] 沈小军，于忻乐，王远东，等.变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J].高电压技术，2021，47(2)：387-395.

[3] 陈斌，牛津文，万红，等.变电站辅助设备监控系统三维建模及展示技术研究[J].电力系统保护与控制，2020，48(13)：180-186.

[4] 龚皓，郭娜.云平台环境下多源异构大数据均衡调度仿真[J].计算机仿真，2019，36(7)：335-338.

[5] 郝晓光，耿少博，任江波，等.智能变电站二次电缆回路建模方法研究与应用[J].电力科学与技术学报，2020，35(4)：161-168.

[6] 符国晖，李福权，廖永浩.基于BIM技术的变电站信息数字化管理系统设计[J].自动化技术与应用，2024，43(5)：145-148，172.

[7] 龙丽娟，夏永华，黄德.一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J].激光与光电子学进展，2020，57(20)：361-370.

[8] 李仙琪，张俊伟，罗强，等.一种改进ORB-SLAM的变电设备在线三维建模算法[J].武汉理工大学学报，2020，42(1)：85-90.

[9] 刘千宽，刘宏君，丁晓兵，等.服务于变电站数字化设计的二次设备建模技术研究[J].电力系统保护与控制，2021，49(2)：166-172.

[10] 许乃星，陈奕，林显治，等.基于BIM技术的大尺度海绵城

(下转第162页)