文章编号:1001-5078(2022)03-0349-06

· 激光应用技术 ·

基于三维激光扫描的建筑模型可视化制作研究

宋培娟,高连平,任 宇 (长春光华学院,吉林长春130033)

摘 要:为提升建筑模型制作精度,以三维激光扫描为技术背景,对建筑模型可视化制作方法 展开研究。将三维激光扫描设备放置于少遮挡物且具有开阔视野的位置,经多次扫描取得多 组重合的点云数据,通过变换坐标系间关系,完成点云数据拼接,对其去噪、光顺处理后,根据 构成建筑物表面的若干个几何特征,提取截面边界与建筑特征结构,实现建筑模型可视化制 作。选取某标志性建筑物,分析布设的控制点、测站点以及标靶等指标精度,基于有效的测量 准度,制作建筑三维模型,经对比模型与实际建筑物尺寸,发现所提方法能有效实现模型可视 化制作,且大幅提升制作精度。

关键词:三维激光扫描技术;建筑模型;可视化;模型制作;点云数据 中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.007

Research on the visualization of building models based on 3D laser scanning

SONG Pei-juan, GAO Lian-ping, REN Yu

(Changchun Guanghua University, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of building model production, with 3D laser scanning as the technical background, the research on the visualization method of building model production is carried out. The 3D laser scanning device is placed in a position with few obstructions and with a wide field of view. After multiple scans, multiple sets of overlapping point cloud data are obtained. By transforming the relationship between the coordinate systems, the point cloud data can be spliced, denoising and smoothing. After processing, based on several geometric features that constitute the surface line of the building, the boundary of the section and the characteristic structure of the building are extracted to realize the visualization of the building model. Select a landmark building, analyze the accuracy of control points, survey sites, target and other indicators, and make a three-dimensional model of the building based on the effective measurement accuracy. After comparing the model with the actual building size, it is found that the proposed method can be effectively achieve the visualization of building models and greatly improve the production accuracy.

Keywords: 3D laser scanning technology; architectural model; visualization; model making; point cloud data

1 引 言

信息技术的进步创新了建筑设计方法,令有着 立体表现形式的三维建筑模型^[1]逐渐演变为建筑 领域的主流形式,在建筑场景展示中有着广泛的应 用。这种用电脑软件与网络媒体来强化设计感的建 筑模型,既可为设计者提供更直观的参考依据,也能 为使用者带来更好的应用体验,因此,构建建筑模型 课题被广泛研究。

作者简介:宋培娟(1981 -),女,硕士,副教授,研究方向为环境设计。E-mail:songpeijuan123@163.com 收稿日期:2021-04-25;修订日期:2021-05-28

基金项目:2020年吉林省高教科研课题(No. JGJX2020D439)资助。

文献[2]以机载与车载 LiDAR 数据 2.5 D 特性 为依据,采用 2.5 D 双轮廓策略,设计出一种三维精 细模型的构建方法;文献[3]利用无人机航测技术, 经匹配影像获取密集点云,对其实施配准、预处理 后,通过 3ds Max 完成精细化模型重构。文献[4]以 以室外 3 D 建筑物为研究对象,构建了结合测绘定 位与定位技术和计算机视觉边缘跟踪技术的增强现 实混合跟踪技术,构建了基于增强现实的 3 D 建筑 模型移动可视化系统。

三种文献方法均可实现建筑三维模型的精细化 构建,但已无法满足当今科技水平的模型精度要求, 为此,以三维激光扫描技术作为技术支撑,提出一种 建筑模型可视化制作方法。该项技术凭借高效率、 高精度的采集优势,已经成为一种常用的测绘技术, 在三维激光扫描技术中起着关键作用的部分就是点 云数据,与建筑模型可视化制作精度息息相关。所 以,为更好地完成点云数据采集,本文根据建筑物规 模与特征,对扫描点与采样密度进行了科学设置,为 后续的处理与制作奠定基础。

2 三维激光扫描技术下建筑模型可视化制作

利用三维激光扫描技术的激光扫描测量方法, 扫描测量建筑物的局部和整体,取得建筑物的三维 点云数据,例如线面特征与空间关系等,采集其点云 数据,实现建筑三维重建。

2.1 建筑三维点云数据采集拼接

以建筑物特征、扫描精度为依据,设定扫描点 云间隔。将三维激光扫描设备放置于少遮挡物且 具有开阔视野的位置,根据建筑物规模与特征,科 学设置扫描点与采样密度,从多个角度进行多次 扫描,取得多组重合的点云数据。为加快扫描效 率,采用相关扫描软件截取扫描的点云密度与待 扫描部分。

将取得的多组重合点云数据拼接在一起组成立 体点云,其根本为联立两坐标系间的变换关系。假 设R、t分别表示旋转矩阵与三维平移向量,根据点 云含有的多个对应公共点与靶标等特征,得到对应 的法向量。在两组深度点云数据的k对平面中,设定 第i个平面法向量分别是 n_i 与 n'_i ,第i对平面特征权 重是 w_i ,若采用所得法向量对 $\sum_{i=1}^{k} w_i ||n'_i - Rn_i||^2$ 做最小化处理,即可解得旋转矩阵R;若第i个平面 的重心分别是 $m_i = m'_i$,则经最小化处理 $\sum_{i=1}^{n} w_i$ $(n'_i(m'_i - (Rm_i + t)))^2$ 后求取t的导数,即可解得 平移向量 t_o

将不在同一直线上的至少三个平面靶标放置于 两个扫描点的重合部分中,得到三组点云数据的不 同坐标,假设由同名靶标坐标得到的一组转换参数 是(λ , ϕ , ω , κ , Δx , Δy , Δz),为建立统一坐标系,令点 云数据完整,采用下列矩阵方程,对三组点云坐标实 施大地坐标^[5]转换:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda (\phi, \omega, \kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$
(1)

式中, λ 为尺度缩放系数;平移向量t的参数为 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)。

2.2 建筑三维点云数据预处理

由于车辆、行人等外界因素势必会对建筑物三 维点云数据采集产生一定影响,导致建筑物点云数 据存在无关噪声,为提升建筑模型制作精度,需根据 线扫描数据与离散点云数据^[6]两种排列形式,采用 相关去噪方法滤除部分离散点与遮挡物点云数据, 使建筑物点云数据得以保留。

2.2.1 线扫描数据去噪

针对线扫描数据,通过扫描线逐行进行去噪处 理,为精准判定此类数据中的噪声点与误差点,使用 最小二乘法^[7]将截面数据的起点和终点近似为曲 线,并获得每个数据点与两点之间的曲线之间的最 短距离。经过对比后,将大于阈值的噪声点去除,如 图1所示。



图1 线扫描噪点检查示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line scan noise inspection

拟合曲线与实际建筑物的趋近程度随着拟合多 项式次数的增加而提升,为避免发生龙格现象^[8], 满足拟合精度需求,需依据曲率变化设置拟合分 段点。

标分别为(x1, y1)、(x2, y2)、(x3, y3),圆心坐标为 设 P₁, P₂, P₃ 为平面中任意圆上的三个点, 其坐 (x_0, y_0) ,计算公式如下所示: $x_{0} = \frac{(x_{1} + x_{3})(x_{1} - x_{3})(y_{2} - y_{1}) - (x_{1} + x_{2})(x_{1} - x_{2})(y_{3} - y_{1}) + (y_{3} - y_{2})(y_{3} - y_{1})(y_{2} - y_{1})}{2[(x_{2} - x_{1})(y_{3} - y_{1}) - (x_{3} - x_{1})(y_{2} - y_{1})]}$ (2)

$$y_{0} = \frac{(x_{3} - x_{2})(x_{2} - x_{1})(x_{3} - x_{1}) - (y_{1} + y_{2})(y_{2} - y_{1})(x_{3} - x_{1}) + (y_{1} + y_{3})(y_{3} - y_{1})(x_{2} - x_{1})}{2[(x_{2} - x_{1})(y_{3} - y_{1}) - (x_{3} - x_{1})(y_{2} - y_{1})]}$$
(3)

采用下列界定公式求解中点 P_2 的曲率值:

$$k = \frac{1}{r} = \frac{1}{\sqrt{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}}$$
(4)

假设A表示待处理的扫描线点云数据集合,按 序选取三个扫描线上数据点 $P_{i,i}$ 、 $P_{i,i+1}$ 、 $P_{i,j+2}$,利 用上式即可获取点 P_{i,i+1} 曲率值, 同理可推导出全部 数据点曲率值,基于此解得集合A里间距相等的两 点间曲率差,当其比阈值超出 n 个点时,划分曲线为 (*n*+1)个段,拟合各分段的点云数据,去除比阈值 大的数据点。

2.2.2 离散点云数据过滤

由于离散点云数据间没有显著的几何关系,故 需先就拓扑关系复杂性,完成离散数据点与任意平 面的投影, Dirichet 域分割后, 连接存在公共边界的 离散点,建立 Delaunary 三角剖分^[9],将优化后的三 角网格映射回三维空间。根据架构的数据点领域, 求解该点与剩余点的方差,对比方差与阈值,去除相 应噪声点。

假设u,v,h是域中心点P(即原点)的局部坐 标系,法矢是坐标轴h,以局部坐标系(u,v,h)为目 标,完成全局坐标(x,y,z)的转换,根据概率统计理 论^[10],获取图 2 所示的正态分布 N(μ,σ) 样本形 状,形状位置与坐标系原点变化由均值μ决定,形状 开口与噪声程度由复合方差 σ 决定,两者之间呈正 相关,数值大时开口大,噪声越大,反之亦然;与阈值 对比,将复合方差 σ 大于阈值的数据点去除,完成 去噪处理。已知以下方程组,推导出复合方差 σ 的 界定表达式,如式(5)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{u}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} u_{i}^{2} \\ \sigma_{v}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_{i}^{2} \end{cases}$$
(5)

$$\left[\sigma_{h}^{2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}h_{i}^{2}\right]$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{u}^{2} + \sigma_{u}^{2} + \sigma_{h}^{2}}$$
(6)



图 2 正态分布样本示意图

Fig. 2 Schematic diagram of normal distribution samples

去除噪声时,若复合方差 σ 大于阈值,则利用 下列计算公式分别求解局部坐标系(u.v.h)各方向 上的 Δ_{μ} 、 Δ_{r} 、 Δ_{h} :

$$\Delta_{u} = \max\{ |u_{i}|, i = 1, 2, \cdots, n \}$$
(7)

$$\Delta_{v} = \max\{|v_{i}|, i = 1, 2, \cdots, n\}$$
(8)

$$\Delta_{h} = \max\{|h_{i}|, i = 1, 2, \cdots, n\}$$
(9)

通过式(7)~(9)删除所有方向上的最大噪声 点,将新的坐标系的原点设置为邻域的中心,并通过 迭代循环删除所有噪声点。

2.2.3 曲面拟合光顺处理

为获取更趋近于真实建筑的模型曲面,保持光 顺性,引入高斯滤波算法^[11],通过二次平滑处理点 云数据的噪声误差。

利用三角剖分与邻域,建立三角差值曲面,降低 平滑运算量,提升处理质量。假设控制顶点 V₀₀₃、 V_{0.3.0}、V_{3.0.0}为空间三角形的三个角点,对应法矢分 别是 n₀₀₃、n₀₃₀、n₃₀₀,则边界剩余9个控制顶点 的计算公式如下所示:

$$\begin{cases}
V_{2,1,0} = V_{3,0,0} + f(V_{3,3,0}, n_{3,0,0}) \\
V_{1,2,0} = V_{0,3,0} - f(V_{3,3,0}, n_{0,3,0}) \\
V_{0,2,1} = V_{0,3,0} + f(V_{0,3,3}, n_{0,3,0}) \\
V_{0,1,2} = V_{0,0,3} - f(V_{0,3,3}, n_{0,0,3}) \\
V_{1,0,2} = V_{0,0,3} + f(V_{3,0,3}, n_{0,0,3}) \\
V_{2,0,1} = V_{3,0,0} - f(V_{3,0,3}, n_{3,0,0}) \\
V_{3,3,0} = V_{0,3,0} - V_{3,0,0} \\
V_{0,3,3} = V_{0,0,3} - V_{3,0,0} \\
V_{3,0,3} = V_{0,0,3} - V_{3,0,0}
\end{cases}$$
(10)

式中,曲面控制顶点是 $V_{i,j,k}$;对应法矢是 $n_{u,v,h}$ 。则 推导出下列 $f(V_{i,j,k}, n_{u,v,h})$ 的函数表达式:

$$f(V_{i,j,k}, n_{u,v,h}) = \frac{V_{i,j,k} - (V_{i,j,k} \times n_{u,v,h}) \times n_{u,v,h}}{3 | V_{i,j,k} - (V_{i,j,k} \times n_{u,v,h}) \times n_{u,v,h} |} \times | V_{i,j,k} |$$
(11)

结合解得的9个控制点,得到下列中心控制顶 点 V_{1,1,1} 计算公式:

$$V_{1,1,1} = \frac{V_{2,0,1} + V_{1,0,2} + V_{0,2,1} + V_{0,1,2} + V_{1,2,0} + V_{2,1,0}}{4} - \frac{V_{0,0,3} + V_{0,3,0} + V_{3,0,0}}{6}$$
(12)

综上所述,推导出下列三次三角曲面方程表达式:

$$p(u, v, w) = \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3-i} V_{i,j,k} B_{i,j,k}^{3}(u, v, w)$$
$$= \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3-i} \frac{3!}{i!j!k!} V_{i,j,k} u^{i} v^{j} w^{k}$$
(13)

式中,三角域中心坐标用参数 u,v,w 表示。 2.3 建筑模型可视化重建

重建建筑模型的依据是构成建筑物表面面线的 若干个几何特征,只有完成规则结构与不规则结构 尖锐边界的所有几何特征提取^[12-13],才能保证建筑 模型制作精度。基于处理后的建筑三维点云数据, 可视化重建建筑模型的具体流程描述如下:

(1)截面边界提取:以图 3 为例,假设图中方体 是灰色标准平面 P 截断建筑模型 M 得到的左部分; AB 为 a 面与 b 面的相交边界线;C 为截面与模型 M 的截面曲线,截面与边界线 AB 交于点 p'。单位化 a 面点与p'构成的线段,可在 a 面上得到圆心 p'、半径 1 的半圆α,同理得到 b 面上的半圆β,依据不共线三 点可以确定一个平面的定理,利用p'点构建平面P, 则截面曲线 C 即由平面 P 与模型 M 相交所得。经推 导各方向截面,验证出曲线特征边界点就是点p',完 成截面边界提取。采用多尺度方法对提取到的截面 做优化处理,生成边界线。



图 3 截面边界提取示意图 Fig. 3 Schematic diagram of cross-section boundary extraction

(2)建筑特征结构提取:找到建筑物表面特征 线后,根据点到面的微分几何性质与三维空间数据 结构,扩展平面数据,利用线面实现建筑物外轮廓制 作^[14-15]。若待处理扫描线点云数据集合A与常数c的矩阵方程分别如式(14)、(15)所示,则平面方程 F(x,y,z)满足下列等式,且Ac = 0:

$$F(x, y, z) = c_1 x + c_2 y + c_3 z + c_4 = 0$$
(14)

$$A = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_k & y_k & z_k & 1 \end{bmatrix}$$
(15)
$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix}$$
(16)

方程 Ac = 0 经特征向量估计法计算,通过下式 奇异值分解矩阵 $A^{T}A$:

 $A^{T}A = U \text{diag}[\omega_{1}, \omega_{2}, \omega_{3}, \omega_{4}]V^{T}$ (17) 式中,正交矩阵是 $U \setminus V'$;矩阵特征向量分别为 ω_{1} , $\omega_{2}, \omega_{3}, \omega_{4}$ 。

利用相关图形绘制软件,处理建筑物外轮廓点 云数据,完成建筑模型外部轮廓的可视化生成。

3 建筑模型可视化构建实验

3.1 准备阶段

选取某标志性建筑物,采用 Trimble 仪器及 Point Scape 扫描软件实现扫描过程,经测得该建筑物大地 坐标,通过布设控制点,完成测站点坐标与标靶坐标 测量。扫描识别三个标靶后,解得标靶中心的三维坐 标,利用 Point Scape 扫描软件对扫描的点云密度与待 扫描部分进行截取,经 Auto CAD 与 3Ds max 等软件 处理采集到的点云数据,形成模型外部轮廓。

表1、2、3均是对制作精度有直接影响的指标误 差统计结果,从各项数据可以看出,所有指标偏差均 处于可以忽略不计的范围中,精度较为理想,能够满 足该建筑三维模型的可视化制作要求。

表1 配准精度误差统计表

(单位:毫米)

Tab. 1 Statistical table of registration accuracy error

(Unit:mm)

	1 号测站点	2 号测站点	3 号测站点
1号标靶	0. 87	1.45	1.26
2 号标靶	1.1	0. 82	1.09
3 号标靶	0. 64	0. 97	1.32

表2 控制点对中误差统计表(单位:米)

Tab. 2 Statistical table of control point alignment

	测站点与 观测点间距	测站点与 后视点间距	对中误差	观测误差
1号控制点	35. 496	26. 452	0.005	0.001
2 号控制点	56. 513	26. 452	0.007	0.001
3 号控制点	30. 657	26. 452	0.002	0.001
4 号控制点	37. 165	26. 452	0.008	0.001

error(unit:m)

表3 基于扫描仪的各项误差统计表(单位:米)

Tab. 3 Statistics of various errors based

	测站点与 观测点间距	后视误差	定向误差	扫描误差
1 号观测点	8.013	0.0018	0.0003	0.0035
2 号观测点	15. 165	0.0016	0.0005	0.0037
3 号观测点	5.013	0.0008	0. 0001	0.0032
4 号观测点	28.376	0.001	0. 0009	0. 0036

on the scanner(unit:m)

3.2 建筑模型可视化制作精度分析

从制作成功的建筑模型中(见图4)任选五个特征点的点云数据,将其与实际建筑物作对比,整理得出尺寸误差统计表(表4)。



图 4 制成的建筑模型示意图 Fig. 4 Schematic diagram of the made building model

表4 模型与实际建筑物尺寸误差统计表 (单位:米)

Tab. 4 The statistical table of the size error between the model and the actual building(unit:m)

特征点序号	建筑模型	实际建筑物
1号特征点	(124,85,254)	(124,86,255)
2 号特征点	(154,103,265)	(155,103,265)
3 号特征点	(65,54,352)	(65,55,353)
4 号特征点	(116,157,312)	(116,158,312)
5 号特征点	(143,165,238)	(144,165,238)

结合图表可以看出,建筑三维模型精度比较理 想,这是因为所设计方法利用三维激光扫描技术,采 集建筑物的三维点云数据,经拼接、去噪以及光顺处 理等操作,利用灰色标准平面截断策略,根据点到面 的微分几何性质与三维空间数据结构,扩展平面数 据,精准提取到截面边界与建筑特征结构,通过相关 图形绘制软件,优化处理了建筑物外轮廓点云数据。 综上所述,三维激光扫描技术不仅实现了建筑模型的 可视化制作,而且为模型制作提供了精准的三维点云 数据与几何特征细节,使模型制作更高效、更精准。

4 结 论

三维激光扫描技术凭借无接触、高精度、高效率 等诸多优势广泛应用于建筑领域的各个环节中。建 筑模型的可视化制作可以使设计表现程度得到大幅 提升,使设计者思想得到充分展示,是建筑设计领域 发展的主要推动力。实际生活中多为结构复杂的建 筑物,特征因素较多,需将特征提取精度的提升作为 下一步的研究重点;由于外界遮挡的存在会导致部 分区域细节特征缺失,应通过进一步优化提升模型 制作精度;在今后的工作中,应将可视化制作方法应 用到更多的建筑物种类中,比如桥梁、隧道等,拓展 其适用性与应用前景。

参考文献:

 Ma Xiaoqiu, Liu Dandan. 3D reconstruction simulation of BIM building based on perspective augmented reality[J]. Computer Simulation, 2020, 37 (3): 229 - 233. (in Chinese)

马小秋,刘丹丹. 基于透视式增强现实的 BIM 建筑三 维重建仿真[J]. 计算机仿真,2020,37(3):229-233.

- [2] Yan Li, Li Yao, Xie Hong. Automatic reconstruction of LoD3 city building model based on airborne and vehiclemounted LiDAR data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(4):100 - 104. (in Chinese)
 闫利,李瑶,谢洪. 基于机载与车载 LiDAR 数据的 LoD3 城市建筑物模型自动重建[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4):100 - 104.
- [3] Ren Cheng, Gao Limin, Feng Yaolou, et al. An attempt of building 3D modeling based on UAV tilt photography[J].
 Bulletin of Surveying and Mapping, 2019, (2): 161 – 164. (in Chinese)

任诚,高利敏,冯耀楼,等.基于无人机倾斜摄影的建 筑物三维建模尝试[J].测绘通报,2019,(2): 161 - 164.

 Ma Xiaoqiu, Liu Dandan. 3D reconstruction simulation of BIM building based on perspective augmented reality[J].
 Computer Simulation, 2020, 37 (3): 229 - 233. (in Chinese)

马小秋,刘丹丹. 基于透视式增强现实的 BIM 建筑三 维重 建 仿 真 [J]. 计 算 机 仿 真, 2020, 037 (3): 229-233.

- [5] Fang Xuda, Zhao Wei, Shen Jun. Research on localization algorithm for outdoor environment based on 3D lidar[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(3):19-24. (in Chinese) 方徐达,赵伟,沈俊. 基于三维激光雷达的室外环境定位算法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(3):19-24.
- [6] Zhang Juan, Hou Jin, Wu Tingting, et al. Rapid surface reconstruction algorithm for 3D scattered point cloud model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(2):235 243. (in Chinese) 张娟, 侯进, 吴婷婷, 等. 三维散乱点云模型的快速曲 面重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(2):235 243.
- Zhou Guangbing, Song Huajun, Wu Yuxing, et al. A non-feature fast 3D rigid-body image registration method [J].
 Acta Electronica Sinica, 2018, 46(10):2384 2390. (in Chinese)

周光兵,宋华军,吴玉兴,等.一种非特征的 3D 图像快速刚性配准方法[J].电子学报,2018,46(10):2384-2390.

[8] He Binggao, Sun Xiangyang, Meng Fanlei, et al. Optimization design of the 3D laser scanning and locating opto-mechanical system[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(9):1048-1056. (in Chinese)
何秉高,孙向阳,孟繁磊,等. 三维激光扫描定位光机

系统优化设计[J]. 激光与红外, 2020, 50 (9): 1048-1056.

- [9] Yang Haoyu, Liu Li, Zhang Cheng, et al. Parallelism-oriented dynamic incremental delaunay triangulation algorithm[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology,2020,14(1):145-153. (in Chinese) 杨昊禹,刘利,张诚,等. 面向并行的动态增量式 Delaunay 三角剖分算法[J]. 计算机科学与探索,2020,14 (1):145-153.
- [10] Shi Yuliang, Zhou Wei, Zang Shujuan, et al. A compre-

hensive evaluation model of privacy protection based on probability statistics and Del-Entropy[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4):786-799. (in Chinese) 史玉良,周卫,臧淑娟,等. 基于概率统计与德尔熵值 法的隐私保护综合评价模型[J]. 计算机学报, 2019, 42(4):786-799.

- [11] Zhang Qiang, Gao Jun, Fan Zhiguo, et al. Fog image reconstruction using target and atmospheric polarization information [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 829-837. (in Chinese)
 张强,高隽,范之国,等.利用目标和大气偏振信息的 雾天图 像重构方法 [J].应用光学, 2019, 40(5): 829-837.
- [12] Qin Guocheng, Ren Zhiping, Zhang Xingzhi, et al. Application of BIM and 3D laser scanning technology in the design of special curtain wall[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2019, 36(5):82 - 86. (in Chinese) 秦国成,任志平,张兴志,等. BIM 结合三维激光扫描

案国成, 在志干, 张兴志, 寺. blm 4-5 二维微儿扫描 技术在异形幕墙设计上的应用[J]. 测绘科学技术学 报,2019,36(5):82-86.

- [13] Si Mengyuan, Han Daguang, Guo Jieming, et al. Road pavement deformation analysis method based on 3 D laser scanning point cloud [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24):386-391. (in Chinese)
 司梦元,韩达光,郭杰明,等. 基于三维激光扫描点云 的道路路面变形分析方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24):386-391.
- [14] Li Jinjun, Cai Zhongxiang, Zhang Qilin, et al. Application of BIM-based 3D laser scanning technology in complex mountainous foundation design [J]. Building Structure, 2020,50(18):61,127-130. (in Chinese) 李进军,蔡忠祥,张其林,等. 基于 BIM 的三维激光扫 描技术在复杂山地基础协同设计中的应用[J]. 建筑 结构,2020,50(18):61,127-130.
- [15] Yang Jianqun, Zhan Jianyong, Fang Liangbin, et al. Inversion analysis of tunnel surrounding rock parameters based on three-dimensional laser scanning technology[J]. Railway Engineering, 2019, 59(8):92-95. (in Chinese) 杨建群, 詹建勇, 方良斌,等. 基于三维激光扫描技术 的隧道围岩参数反演分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59 (8):92-95.