

基于邻域曲率改进的迭代最近点激光雷达目标点云配准

李艳红^{1,2*}, 闫建国², 王晓燕³¹咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000;²西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072;³西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055

摘要 为解决激光雷达目标点云配准技术中精确配准步骤中所存在的匹配速度慢和匹配误差大的问题, 提出了一种基于邻域曲率改进的迭代最近点(ICP)精准化匹配算法。初始配准采用传统的主成分贴合法, 给精确配准找到一个较好的初始位置, 精配准采用基于邻域曲率改进的 ICP 算法。以斯坦福兔子和场景点云作为实验研究对象, 配准结果和数值分析共同表明, 基于邻域曲率改进的 ICP 算法在点云配准中的可行性, 且与其他算法相比, 所提算法的配准速度更快、匹配精度更高, 为三维数据重建和目标识别技术提供一种更高效的新方法。

关键词 遥感; 激光雷达; 邻域曲率; 精确配准; 迭代最近点算法; 点云数据重建

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212521

Lidar Target Point Cloud Alignment Based on Improved Neighborhood Curvature with Iteration Closest Point Algorithm

Li Yanhong^{1,2*}, Yan Jianguo², Wang Xiaoyan³¹School of Physics & Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China;²School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;³School of Electrical and Mechanical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract To solve the problems of slow matching speed and large matching error in the precise alignment step of lidar target point cloud alignment technology, an iteration closest point (ICP) precision matching algorithm based on neighborhood curvature improvement is proposed. The registration provides a good initial position; the neighborhood curvature is introduced into the traditional ICP algorithm to achieve the fine registration. Perform registration and numerical analysis experiments on the Stanford Bunny and the scene point cloud. The experimental results demonstrate that the improved ICP algorithm based on the neighborhood curvature can efficiently perform the point cloud alignment, and compared with other algorithms, the alignment speed of the proposed algorithm is better than the alignment matching accuracy, which provides an efficient method to improve the 3D reconstruction and target recognition technology.

Key words remote sensing; lidar; neighborhood curvature; precision matching; iteration closest point algorithm; point cloud data reconstruction

1 引言

在激光三维成像技术和激光三维扫描技术中, 点云配准起着非常关键的作用, 尤其是三维重建、零件制造、目标识别、地貌测量及水下目标探测等工程领域^[1-5]。

目前, 点云配准过程分为初始配准和精确配准两

步。初始配准通常采用主成分分析(PCA)^[6]来完成, 为了减小源点云与目标点云的相对坐标误差而快速估算一个大致的坐标变换关系, 为精确配准提供一个良好的初始位置^[7]。精配准是在初始配准的基础上, 利用已知的初始变换矩阵, 通过对点云数据进行迭代计算得到较为精确的解, 提高两片点云信息的匹配精度是研究的热点和难点^[8]。在精配准算法中, Besl 等^[9]很

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(61271110)、咸阳市科技局项目(2020k02-72)

通信作者: *33241318@qq.com

早以前提出了迭代最近点算法(ICP),并得到了广泛应用,但该算法对点云的初始位置敏感且运行速度低,针对该缺点,国内外学者在ICP算法的基础上提出了不同的改进算法。戴静兰等^[10]提出了一种基于特征点的改进ICP算法,该算法将曲率特征和k-d树相结合寻找最近点,虽然提高了ICP算法的效率,但忽略了配准精度。钟莹等^[11]用点云数据的欧氏距离阈值改进ICP算法,提高了配准的速度和精度,但该算法对数据集的要求高。王帅等^[12]使用谱聚类按几何结构特征对各视角点云区域进行分割,采用改进的ICP算法来完成具有高重叠率区域点云的精确配准步骤。杨稳等^[13]引入动态迭代系数,提高了ICP算法的收敛速度,但该算法对复杂模型适用性不高。

现有算法大多都针对ICP初始位置及加速搜索进行改进,而对配准中错误点对的影响研究较少。为进一步提高点云配准算法的速度和精度,本文在基于PCA实现初始匹配的基础上,提出了一种基于邻域曲率的ICP算法。该算法利用对应点对的邻域曲率相似度去除错误的匹配对,从而提高配准速度和精度。

2 点云匹配的基本原理

点云配准的基本过程,就是寻找一个坐标变换矩阵来实现两个点云之间的变换,利用坐标变换矩阵,把源点云变换到与目标点云相同的坐标系下:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{R}_{3 \times 3} \mathbf{X} + \mathbf{T}_{3 \times 1}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_{3 \times 1} = [t_x \quad t_y \quad t_z]^T, \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 和 \mathbf{X}' 分别为原点集和目标点集; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矩阵; α 、 β 、 γ 分别表示点沿 x 、 y 、 z 轴的旋转角度; t_x 、 t_y 、 t_z 分别表示点沿 x 、 y 、 z 轴平移量。将 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ 、 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ 、 \mathbf{X} 和 \mathbf{X}' 代入式(1),有

$$\begin{bmatrix} X'_i \\ y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由式(4)可知,刚性变换矩阵中出现了6个未知数: α 、 β 、 γ 、 t_x 、 t_y 、 t_z 。为求解这6个未知参数,可在待匹配点云重叠区域找出3组不共线的对应点对,构建6个线性方程来求解6个未知参数。即点云配准问题可以转换成最小二乘法最优解。将整个问题分为两部分:

首先是初始匹配,主要是对两片点云进行初始变换,使两个点集大致重合,为精确配准提供一个比较准确的初值;其次是精确配准,利用初始匹配提供的初值,用最邻近算法找到最优的点对,然后依次反复迭代对 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 进行优化,直到达到要求。

3 主成分贴合法点云初始配准

主成分贴合法是数学上对数据降维的一种方法,能够通过方差信息有效地提取出模型的主要成分和结构,滤除噪音和干扰^[14]。在对点云进行粗匹配时,点云矩阵中的3个主成分也可用协方差矩阵(对称矩阵)来度量。通过计算点云集的特征值和特征向量,用特征值的大小调整特征向量,将两片点云的主轴方向匹配在一起,对点云集进行一个初始的位姿校正,具体步骤如下:

- 1) 对中心化的目标点集 \mathbf{P} 与源点集 \mathbf{Q} 求协方差矩阵;
- 2) 通过协方差矩阵计算出特征值与特征向量,将特征值从大到小进行排列,并将特征向量也对应排列;
- 3) 对两点集的特征向量进行点乘判断方向,由此确定旋转矩阵 \mathbf{R} 及平移矩阵 \mathbf{T} 。

4 基于邻域曲率改进的ICP算法精配准

4.1 迭代最近点标准算法

ICP算法是一种基于形状特征点配准方法,利用在原点集中找到的与目标点集最近的点,通过多次迭代,再最小化对应点均方距离度量来确定变换矩阵,从而进行匹配。算法的基本原理如下:在目标点云 \mathbf{P} 与源点云 \mathbf{Q} 中,首先在 \mathbf{Q} 中找到 \mathbf{P} 的最近邻点 q_i (q_i 是 \mathbf{Q} 中的一个点),然后利用设置的阈值进行迭代,计算出最优匹配参数 \mathbf{P} 和 \mathbf{T} ,使两片点云最大程度重合。在判断重合度时用误差函数来衡量,误差函数越小越好。误差函数可描述为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (\mathbf{R}p_i + \mathbf{T})\|^2, \quad (5)$$

式中: \mathbf{P} 中点 p_i 与 \mathbf{Q} 中 q_i 是对应的匹配对。标准的ICP算法在求解最优目标函数时,很容易陷入局部最优,且算法搜索速度慢。针对ICP算法存在的缺陷,本研究在标准ICP算法的基础引入邻域曲率对算法进行改进。

4.2 点云的邻域曲率

点云的曲率^[15]是点云的主要特征之一,描述了点云的局部形状和点云曲面的凹凸性质。本研究利用协方差分析法求采样点的曲率,具体步骤如下:

- 1) 对于目标点云中任意一点 p_i ,其局部邻域点为 $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}$,则点 p_i 邻域点集的三维质心为

$$\bar{p}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k p_{ij}. \quad (6)$$

- 2) 计算 p_i 的协方差矩阵:

$$C = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\mathbf{p}_{ij} - \bar{\mathbf{p}}_i) \cdot (\mathbf{p}_{ij} - \bar{\mathbf{p}}_i)^T. \quad (7)$$

3) 根据协方差矩阵求解特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 设 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$, 则 \mathbf{p}_i 点的曲率为

$$\sigma(\mathbf{p}_i) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}. \quad (8)$$

4.3 基于邻域曲率改进的 ICP 算法

点云局部特征判断, 可使用点云的邻域曲率来实现, 通过比较对应点对的局部邻域曲率的相似度, 去除错误的点对, 不仅可以提高点云的配准精度还可以提高点云的配准速度。对应点对的曲率相似度为

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\sigma(\mathbf{p}_i)}{\sigma(\mathbf{q}_i)} - 1 \right|. \quad (9)$$

ε_i 越接近 0, 点 \mathbf{p}_i 和 \mathbf{q}_i 的相似度越大。基于邻域曲率改进的 ICP 算法的具体步骤如下:

- 1) 设置曲率相似阈值为 ε_0 , 最大迭代次数为 τ , 相邻两次配准误差比值的阈值为 e_0 ;
- 2) 经过粗匹配变换后, 目标点云为 \mathbf{P}' , 源点云为 \mathbf{Q} , 依次计算 \mathbf{P}' 和 \mathbf{Q} 的邻域曲率;
- 3) 在 \mathbf{Q} 中搜索出与 \mathbf{P}' 中的每一点距离最近的点, 计算每个点对的相似度, 求出 \mathbf{P}' 和 \mathbf{Q} 的误差 e_1 ;
- 4) 将计算出的相似度值与设定的阈值 ε_0 进行比较, 当相似度大于阈值时, 则移除该点对, 当相似度小于或等于阈值时, 则保留该点对, 最终得到点集 \mathbf{P}_{temp} 和对应点集 \mathbf{Q}_{temp} ;
- 5) 计算 \mathbf{P}_{temp} 和 \mathbf{Q}_{temp} 的变换矩阵 $[\mathbf{R}' \quad \mathbf{T}']$;
- 6) 通过 $[\mathbf{R}' \quad \mathbf{T}']$ 对 \mathbf{P}' 进行变换得到 \mathbf{P}'' , 重复步骤 3)~5), 计算出 \mathbf{P}'' 和 \mathbf{Q} 的误差 e_2 , 计算 $|e_2 - e_1|$, 如果得

出的数小于阈值 e_0 则停止, 否则回到步骤 3), 直至迭代完成。

5 点云配准仿真

利用 PCL 库和 Visual studio 2015 环境下的 C++ 语言实现基于邻域曲率改进的 ICP 算法在三维点云匹配中由粗到精的匹配过程, 算法的参数设置如表 1 所示, 配准精度采用均方根误差 (RMSE) 函数来评价:

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|\mathbf{P}_j - \mathbf{Q}_j\|^2}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{Q}_j 是点云 \mathbf{Q} 中与 \mathbf{P}_j 匹配的点; N 为匹配点对数。

表 1 点云配准参数设置

Parameter	ε_0	τ	e_0
Value	0.025	50	10^{-8}

为验证所提算法的可行性与优越性, 对不同视角 0° 和 45° 下的 Bunny 及不同视角的 Airplane 用 PCA 方法进行粗匹配, 再根据粗匹配的结果采用不同的方法进行精配准, 匹配结果如图 1 所示。

从图 1 和图 2 可以看出, NDT 算法的配准效果明显很差, ICP 算法在一些小的细节方面也出现了偏差, 文献 [12] 算法和所提改进的 ICP 算法都很好实现了精配准。同时, 为了更加直观对比各算法的配准效果, 4 种算法配准结果的量化结果如表 2 所示。

从表 2 可知: 所提改进的 ICP 算法所对应的匹配误差最小, 运行速度最快。在配准过程中, 在匹配误差上, 所提改进算法比 NDT、ICP 和文献 [12] 算法分别平均减小了约 69.5%、40.8% 和 5.3%。在匹配速度上, 所提改进算法比 NDT、ICP 和文献 [12] 算法分别提升了

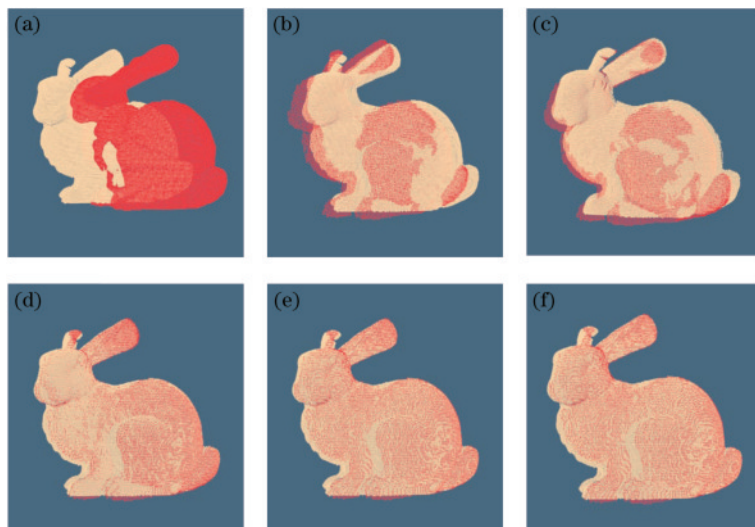


图 1 Bunny 在不同算法下的配准结果。(a) Bunny 原点云; (b) PCA 粗配准; (c) NDT 算法; (d) ICP 算法;

(e) 文献 [12] 算法; (f) 所提改进 ICP 算法

Fig. 1 Registration results of Bunny in different algorithms. (a) Bunny origin cloud; (b) PCA coarse registration; (c) NDT algorithm; (d) ICP algorithm; (e) algorithm in reference [12]; (f) proposed improved ICP algorithm

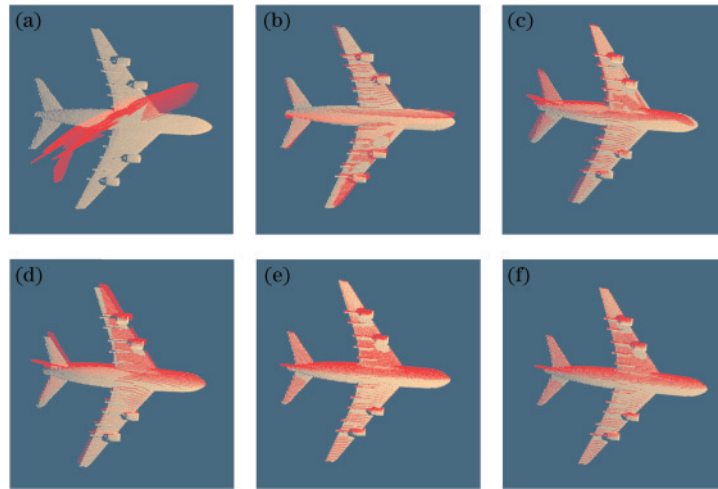


图 2 Airplane 在不同算法下的配准结果。(a) Airplane 原点云;(b) PCA 粗配准;(c) NDT 算法;(d) ICP 算法;(e) 文献[12]算法;(f) 所提改进 ICP 算法

Fig. 2 Registration results of Airplane in different algorithms. (a) Airplane origin cloud; (b) PCA coarse registration; (c) NDT algorithm; (d) ICP algorithm; (e) algorithm in reference [12]; (f) proposed improved ICP algorithm

表 2 不同方法下的 Bunny 和 Airplane 配准效率
Table 2 Registration efficiency of Bunny and Airplane for different methods

Method	Bunny		Airplane	
	Ave-matching error / (10^{-6} m)	Time-consuming /s	Ave-matching error / (10^{-6} m)	Time-consuming /s
NDT	16.26	89.6	43.92	180.5
ICP	6.82	65.5	20.85	110.6
Reference [12]	5.13	32.2	14.38	69.2
Proposed improved ICP	4.88	20.1	13.61	58.4

约 72.5%、58.2% 和 26.5%。可见所提基于邻域曲率改进的 ICP 算法在点云精配准中是可行且优越的。

为了验证所提改进算法的通用性,对特征细节差异大的建筑物场景点云 Land 1 和 Land 2 用 PCA 方法进行粗匹配,再根据粗匹配的结果采用不同的方法进行精配准,匹配结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在视觉效果上场景点云 Land 在 NDT 算法下的配准效果最差,所提改进 ICP 算法和其他两种算法都很好地实现了精配准。为了更加直观对比各算法的配准效果,4 种算法配准结果的量化结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,所提改进算法对场景点云的配准效率最高:在匹配误差上,相比 NDT、ICP 和

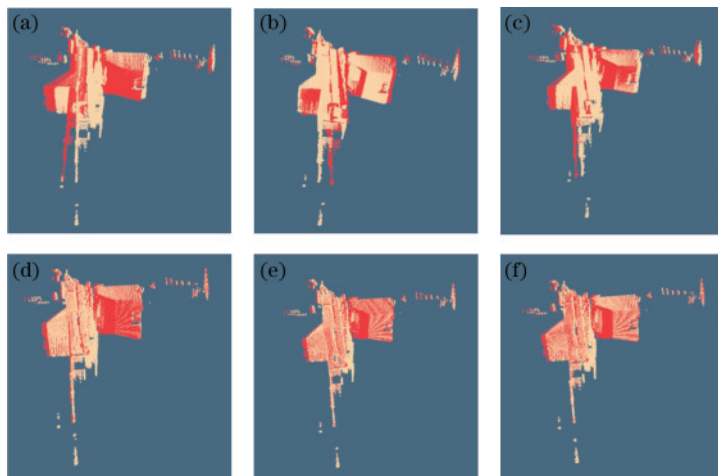


图 3 Land 在不同算法下的配准结果。(a) Land 原点云;(b) PCA 粗配准;(c) NDT 算法;(d) ICP 算法;(e) 文献[12]算法;(f) 所提改进 ICP 算法

Fig. 3 Registration results of Land in different algorithms. (a) Land origin cloud; (b) PCA coarse registration; (c) NDT algorithm; (d) ICP algorithm; (e) algorithm in reference [12]; (f) proposed improved ICP algorithm

文献[12]算法,所提改进算法分别减小了约 60.2%、10.2% 和 5.9%;在匹配速度上,相比 NDT、ICP 和文献[12]算法,所提改进算法分别提升了约 71.7%、52.1% 和 22.8%。可见所提基于邻域曲率改进的 ICP 算法对特征细节差异大的场景点云也可以很好配准,验证了该算法的通用性。

表 3 不同方法下的 Land 配准效率

Table 3 Registration efficiency of Land for different methods

Method	Ave-matching error / (10^{-2} m)	Time-consuming / s
NDT	5.98	327.9
ICP	2.65	193.5
Reference [12]	2.53	120.1
Proposed improved ICP	2.38	92.6

6 结 论

激光雷达目标点云数据配准是目标特征提取识别的关键技术,点云配准技术分为初始配准和精确配准,初始配准采用传统的主成分贴合法,给精确配准提供了一个很好的初始位置。针对精确配准,利用邻域曲率对标准的 ICP 算法进行改进,去除匹配过程中出现的错误匹配对,提高了点云配准的速度和精度。为了验证所提改进算法的可行性、优越性和通用性,分别对普通的点云数据和特征细节差异大的场景点云进行仿真,实验结果表明:对普通的点云数据,在匹配误差上,相比 NDT、ICP 和文献[12]算法,所提改进算法平均减小了约 69.5.0%、40.8% 和 5.3%,在匹配速度上,平均提升了约 72.5%、58.2% 和 26.5%;对场景点云,在匹配误差上,相比 NDT、ICP 和文献[12]算法,所提改进算法分别减小了约 60.2%、10.2% 和 5.9%,在匹配速度上,分别提升了约 71.7%、52.1% 和 22.8%。实验结果说明,所提基于邻域曲率改进的 ICP 激光雷达目标点云配准算法可以高效实现点云配准。研究结果可以为激光雷达目标三维数据重建提供技术支持,实现目标探测和识别。

参 考 文 献

- [1] Huang C H, Jhang S J, Tsai C Y. An efficient RGB-D camera based point cloud registration algorithm[C]//2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), May 13-17, 2017, Sapporo, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 558-561.
- [2] Zhao D Y, Li M, Wei Q Y, et al. Position measurement of the hole group based on point cloud registration algorithm[C]//2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), December 14-15, 2019, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2019: 19-23.
- [3] Kang G H, Zhang Q, Wu J Q, et al. Pose estimation of a non-cooperative spacecraft without the detection and

recognition of point cloud features[J]. Acta Astronautica, 2021, 179: 569-580.

- [4] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 214-228. Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 214-228.
- [5] Konoplin A Y, Konoplin N Y, Shuvalov B V. Technology for implementation of manipulation operations with different underwater objects by AUV[C]//2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), March 25-29, 2019, Sochi, Russia. New York: IEEE Press, 2019.
- [6] Zhong Y. Intrinsic shape signatures: a shape descriptor for 3D object recognition[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, September 27-October 4, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 689-696.
- [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): 202801. Long L J, Xia Y H, Huang D. Fast modeling method for substation based on 3D laser scanning point cloud data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 202801.
- [8] 韦盛斌, 王少卿, 周常河, 等. 用于三维重建的点云单应性迭代最近点配准算法[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0515003. Wei S B, Wang S Q, Zhou C H, et al. An iterative closest point algorithm based on biunique correspondence of point clouds for 3D reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0515003.
- [9] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521. Dai J L, Chen Z Y, Ye X Z. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521.
- [11] 钟莹, 张蒙. 基于改进 ICP 算法的点云自动配准技术[J]. 控制工程, 2014, 21(1): 37-40. Zhong Y, Zhang M. Automatic registration technology of point cloud based on improved ICP algorithm[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(1): 37-40.
- [12] 王帅, 孙华燕, 郭惠超. 适用于激光点云配准的重叠区域提取方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(S1): 143-148. Wang S, Sun H Y, Guo H C. Overlapping region extraction method for laser point clouds registration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(S1): 143-148.
- [13] 杨稳, 周明全, 郭宝, 等. 基于曲率图的颅骨点云配准方法[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1610002. Yang W, Zhou M Q, Guo B, et al. Skull point cloud registration method based on curvature maps[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1610002.
- [14] 尹佳琪, 王世勇, 李范鸣. 基于改进主成分分析的分焦

平面偏振图像去噪算法[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0710002.

Yin J Q, Wang S Y, Li F M. Division-of-focal-plane polarization image denoising algorithm based on improved principal component analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0710002.

[15] 赵亮, 胡杰, 刘汉, 等. 基于语义分割的深度学习激光点云三维目标检测[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710004.
Zhao L, Hu J, Liu H, et al. Deep learning based on semantic segmentation for three-dimensional object detection from point clouds[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710004.