

# 基于改进 ICP 拼接算法的柔性抛光气囊工具磨损检测方法

郑旻辉, 王振忠\*, 黄雪鹏, 李路骋

厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102

**摘要** 气囊抛光可用于加工具有纳米级表面粗糙度和亚微米级形状精度的非球面光学元件, 在光学元件加工领域应用广泛。传统气囊工具磨损检测方法成本高、耗时长、效率低, 针对该问题, 提出一种基于拼接数据采集平台的改进迭代最近点(ICP)拼接算法的气囊磨损检测方法。该方法通过点云拼接实现大尺寸气囊工具的磨损检测, 并结合气囊磨损检测算法计算磨损量。采用体素下采样和半径滤波对拼接数据进行点云预处理, 利用搭建的拼接检测数据采集平台获取良好的初始配准变换矩阵, 最后利用双向 K-D 树近邻搜索结合 ICP 算法实现点云精确配准。实验结果表明, 所提拼接算法在保证配准精度的同时可大幅提高配准效率, 并且不影响后续气囊磨损检测的精度, 为大尺寸气囊工具磨损检测提供了保证。

**关键词** 气囊抛光; 气囊磨损检测; 数据采集; 点云配准

中图分类号 TB96 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222456

## Wear Detection Method for Flexible Polishing Bonnet Tools Based on Improved Iterative Closest Point Splicing Algorithm

Zheng Minhui, Wang Zhenzhong\*, Huang Xuepeng, Li Lucheng

School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China

**Abstract** Bonnet polishing is widely used for processing aspherical optical components with nanometer surface roughness and submicrometer shape accuracy. The traditional bonnet tool wear detection method is expensive, time consuming, and has low efficiency. This study proposes a wear detection method for bonnet tools based on a splicing data acquisition platform and an improved iterative closest point (ICP) splicing algorithm. This method calculates the extent of wear in large bonnet tools using point cloud splicing and a bonnet wear detection algorithm. The point cloud preprocessing for mosaic data is conducted using voxel down sampling and radius filtering. A good initial registration transformation matrix is obtained using the splicing detection data acquisition platform. Finally, point cloud precise registration is realized using the bidirectional K-D tree nearest neighbor search combined with the ICP algorithm. Experimental results demonstrate that the stitching algorithm proposed herein can greatly enhance registration efficiency while ensuring registration accuracy. Moreover, it does not affect the accuracy of subsequent bonnet wear detection, which guarantees wear detection of large bonnet tools.

**Key words** bonnet polishing; bonnet wear detection; data collection; point cloud registration

## 1 引言

航空航天、国防军工等国家重大工程越来越多地需要高精度的大口径光学元件, 例如大型天文望远镜、高能激光系统、先进军事及空间光学系统等<sup>[1]</sup>。Bingham 等<sup>[2]</sup>提出的气囊抛光技术是一种先进的光学元件加工技术, 具有抛光效率高、保形效果好、可控性强等优势, 基本原理是通过驱动一个气压在线可控、表

面覆盖有抛光垫的柔性气囊工具完成对工件的抛光加工, 气囊工具的性能对加工结果, 尤其对大口径光学元件的加工精度影响极大。为了提高加工过程材料去除的稳定性, 必须探究高效的气囊抛光工具磨损检测方法。Pan 等<sup>[3-5]</sup>使用超景深显微镜和 KISTLE 测力仪进行气囊表面磨损检测, 通过超景深显微镜观察抛光垫表面特征, 利用 KISTLE 测力仪检测气囊工具头在抛光过程中的摩擦力的变化, 综合分析表面特征和摩擦

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-10-17; 网络首发日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金 (52075462)

通信作者: \*wangzhenzhong@xmu.edu.cn

力变化,探究气囊磨损对去除效率的影响规律。Su等<sup>[6]</sup>利用Form Talysurf表面轮廓仪对气囊抛光垫表面进行检测,通过测量抛光垫表面轮廓和曲率半径研究气囊磨损所导致的抛光过程工具材料去除特性的变化。Park等<sup>[7]</sup>借助SEM扫描电镜和接触式轮廓测量仪对抛光垫磨损进行检测,通过观察抛光垫表面形貌特征和测量表面轮廓磨损量,揭示了抛光垫磨损对材料去除的不均匀性具有显著影响的规律。Belkhir等<sup>[8]</sup>利用SEM扫描电镜设备检测气囊抛光垫磨损,通过直接观察不同抛光时间段的气囊抛光垫表面沟槽、纹理、孔隙等的前后变化,探究气囊抛光垫磨损对抛光去除效率的影响。

综上所述,目前针对气囊工具磨损的研究主要集中在探究磨损对去除的影响和抛光垫微观变化,已有研究方法主要有3种方式。一是采用接触式测量的方式借助Form Talysurf表面轮廓仪检测气囊工具头抛光垫磨损量,该方法虽然可以测出磨损的深度值,但耗时长、成本高,并且接触式测量容易导致表面轮廓仪的探针损坏;二是用SEM扫描电镜对气囊工具头表面进行拍照,通过直接观察表面形貌判断气囊磨损变化,该方法无法直接测出磨损深度值;三是通过测量抛光过程中摩擦力的变化间接测量气囊磨损变化,该方法同样无法测出磨损的深度值。三维线激光扫描技术是一种非接触的测量方法,可以对工件进行无损检测,相比接触法,效率较高,并且三维线激光扫描所需的线激光传感器轻便、适宜安装,得到的数据清晰可靠,精度相对较高,抗环境干扰能力较强,可以快速捕捉到工件表面形貌等特征并进行检测研究。针对以上传统气囊磨损检测方法存在的问题以及三维线激光扫描技术的优越性,本文从效率、检测精

度和通用性方面出发,提出一种全新的气囊磨损检测方法,即采用线激光扫描拼接检测气囊工具表面轮廓的方法。所提方法利用线激光传感器拼接测量获取气囊工具表面数据,结合气囊磨损检测算法直接计算磨损深度,为大尺寸气囊工具头磨损检测提供技术支撑。

本文结合测量工件气囊工具球体的特征,提出一种基于拼接检测数据采集平台和双向K-D树改进迭代最近点(ICP)配准的算法。首先对原始点云数据进行下采样和半径滤波,去除离群点,基于自建的拼接检测数据采集平台直接获取初始配准的刚体变换矩阵,然后利用双向K-D树融入ICP算法实现点云精配准。所提方法提高了配准精度和配准效率,利用拼接的气囊工具三维模型进行气囊磨损检测时检测结果满足实际要求,有效证明了所提拼接方法的实用性,为后续针对大尺寸气囊工具磨损检测提供了技术支持。

## 2 拼接检测数据采集及预处理

### 2.1 拼接检测数据采集平台

针对气囊工具进行拼接算法实验和气囊磨损检测实验。拼接检测数据采集平台由三轴平台和线激光传感器组成,线激光传感器安装在平台的Z轴支撑板上。平台通过控制3个直线轴的移动距离和速度实现对气囊工具工件的表面数据采集。在拼接检测实验验证中,通过小量程线激光传感器采集多组点云数据,进行拼接算法实验,同时为验证拼接算法的有效性,采用大量程线激光传感器一次性检测的结果作对比。图1为拼接检测数据采集平台及两款线激光传感器,其基本参数如表1~3所示。

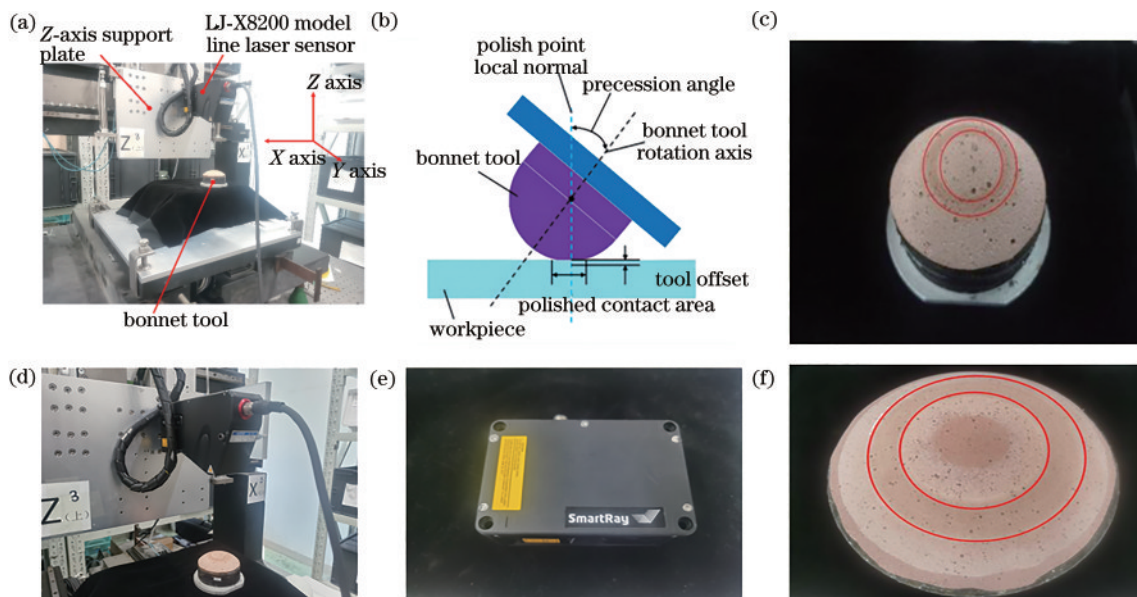


图1 数据采集平台检测示意图。(a) 三轴运动平台;(b) 气囊抛光进动示意图;(c) R40气囊工具;(d) 基恩士LJ-X8200大量程线激光传感器;(e) SmartRay ECCO95.020小量程线激光传感器;(f) R160气囊工具

Fig. 1 Schematic of data acquisition platform detection. (a) Three-axis motion platform; (b) schematic of bonnet polishing precession; (c) R40 bonnet tool; (d) KEYENCE LJ-X8200 large range line laser sensor; (e) SmartRay ECCO95.020 small range line laser sensor; (f) R160 bonnet tool

表 1 三轴平台运动参数

Table 1 Motion parameters of three-axis platform

Platform motion axis	Parameter	Precision
X axis	Maximum stroke is 430 mm	Single-axis repeatable positioning accuracy is $\pm 0.5 \mu\text{m}$
Y axis	Maximum stroke is 430 mm	Single-axis repeatable positioning accuracy is $\pm 0.5 \mu\text{m}$
Z axis	Maximum stroke is 200 mm	Single-axis repeatable positioning accuracy is $\pm 0.5 \mu\text{m}$

表 2 基恩士 LJ-X8200 型大量程线激光传感器参数

Table 2 Parameters of KEYENCE LJ-X8200 large range line laser sensor

Base distance (best test distance) /mm	Z-axis measurement range (height) /mm	X-axis measurement range (width) /mm	X-axis repeatability (width) / $\mu\text{m}$	Z-axis repeatability (height) / $\mu\text{m}$
245	211-279	64-80	3	1

表 3 SmartRay ECCO95.020 型小量程线激光传感器参数

Table 3 Parameters of SmartRay ECCO95.020 small range line laser sensor

Base distance (best test distance) /mm	Z-axis measurement range (height) /mm	X-axis measurement range (width) /mm	X-axis repeatability (width) / $\mu\text{m}$	Z-axis repeatability (height) / $\mu\text{m}$
60	50-70	22-28	0.2	0.2

为获取完整的气囊工具表面数据,要保证相邻点云片段具有足够的重叠度(相邻点云片段的重叠区域面积占点云片段总面积的百分比),减小数据采集时人为引起的误差。数据采集基本流程如下:首先,平台的移动速度和线激光测量仪采集速度保持一致,调节三轴平台 Z 轴和 X 轴参数,保证线激光传感器调到最佳测试距离,移动 Y 轴完成单次扫描,保证在一定宽度量程下完整扫描气囊工具;其次,先用 SmartRay ECCO95.020 型小量程线激光传感器进行测量,设计

相邻点云片段重叠区域的宽度为 5 mm,调节 X 轴参数,移动 Y 轴完成单次扫描,依次增加 X 轴距离 5 mm,移动 Y 轴,完成 3 次扫描;最后,采用大量程的基恩士 LJ-X8200 型线激光传感器进行测量,移动 Y 轴,只需 1 次即可完成完整的气囊工具扫描。图 2 为 R40 气囊工具数据集,图 2(a)为大量程线激光传感器一次性扫描的完整数据,图 2(b)~(d)为小量程线激光传感器的 3 次扫描数据。

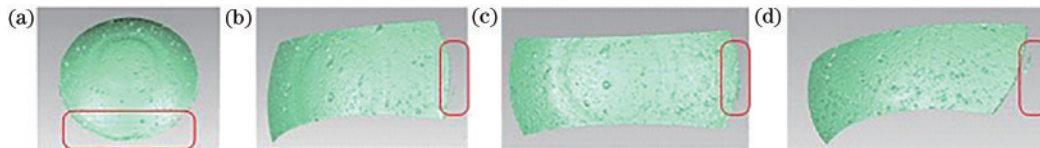


图 2 R40 气囊工具数据集

Fig. 2 R40 bonnet tool dataset

## 2.2 数据预处理

在获取点云数据时,由于设备精度、环境因素等的影响,点云数据中将不可避免地出现一些噪点和一些离主体点云较远的离散点,即离群点。从图 2 可看出扫描的气囊工具点云数据集具有非常明显的离群点,这些离群点和噪点会极大影响点云配准算法的精度。因此,为了提高配准算法的精度和效率,在预处理阶段

进行滤波,去除离群点。体素滤波减少点云数据量的同时可以保持点云的形状特征,不会破坏点云本身的几何结构<sup>[9]</sup>;半径滤波对原始激光点云数据的一些悬空孤立点或无效点有很好的去除效果<sup>[10]</sup>。综合考虑降噪的效果和效率,采用体素滤波和半径滤波进行预处理。点云预处理后的结果如表 4 所示,效果如图 3 所示。

表 4 数据预处理结果

Table 4 Data preprocessing result

Point cloud data	Number of original point clouds	Number of point clouds after preprocessing	Point cloud count reduction /%
1	1338814	5960	99.6
2	2393770	2850	99.9
3	2402175	2825	99.9
4	2349507	2833	99.8



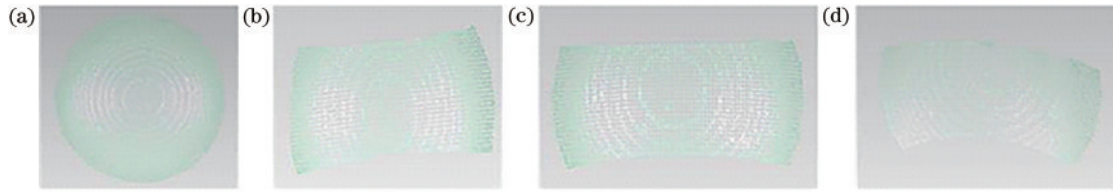


图 3 数据预处理效果

Fig. 3 Data preprocessing effect

### 3 拼接点云数据配准

#### 3.1 所提算法流程

关于点云数据的拼接,最经典的方法是由 Besl 等<sup>[11]</sup>提出的 ICP 算法,该算法对初始配准的薄片点云的位置要求较高,否则容易陷入局部最优,达不到良好的配准效果。杨宜林等<sup>[12]</sup>采用正态分布变换(NDT)对点云进行粗配准,用 3Dharris 算子检测提取待配准点云的关键点,最后利用 ICP 算法实现精配准,配准对象为经典的 Bunny 数据集。王文博等<sup>[13]</sup>从点云分块中提取尺度不变特征变换(SIFT)特征点,采用快速点特征直方图(FPFH)进行采样一致性初始配准算法(SAC-IA)粗配准,并且以块状配准点云重叠率为约束改进 ICP 算法实现精配准,其应用对象为建筑物模型数据集。杨稳等<sup>[14]</sup>基于点的邻域提取几何特征,采用 K-means 算法剔除误匹配点对,运用四元数法实现粗配准,最后用 K-D 树改进 ICP 算法实现精配准,实验对象为颅骨点云数据。刘剑等<sup>[15]</sup>利用 FPFH 特征描述与 Delaunay 三角剖分相结合的方式提取特征点,粗配准过程采用采样一致性算法,精配准过程用 ICP 算法,配准对象为汽车模型数据。刘如飞等<sup>[16]</sup>通过对点云进行分段,结合特征值与形状指数构建特征约束,提取多尺度关键点,在粗配准阶段应用 4-points congruent sets (4PCS)算法,精配准阶段应用基于 K-D 树改进的 ICP 算法,应用对象为道路点云数据。

然而,上述算法的配准精度均依赖于所提取的特征点,由于应用对象建筑物、兵马俑等曲率、法向量等特征差异明显,这些算法易于提取明显的特征点进行配准,因而配准精度较高。本文测量对象气囊工具为球体,曲率、法向量等特征差异性小,采用上述算法易产生误匹配,本文重点对 R40 气囊工具进行拼接算法研究。如图 4 所示,共扫描 3 个点云片段,相邻点云片段重叠区域的宽度为 5 mm,以图 4(b)所示点云片段为目标点云,图 4(a)和图 4(c)均为源点云,经过两次配准后,将新生成的 3 个点云片段合并融合。算法具体流程如图 5 所示,具体过程如下。

1) 基于数据采集平台的对应关系初步估计。依据数据平台提前设置平移距离,获取点云坐标单轴的平移量,使用辅助软件 CloudCompare 并结合气囊工具头表面的凹点,如图 4 所示,选取 3 个明显特征点,测量相邻点云片段中 3 个点之间的距离,依此确定平移变换矩阵,完成对应关系的初步估计。

2) 基于 K-D 近邻搜索的 ICP 算法配准。以图 4(b)所示点云片段为目标点云,构建双向 K 维树,遍历经过初始配准的源点云  $P$  和目标点云  $Q$ ,作为 ICP 精配准的初始点集,利用经典 ICP 算法求出最优刚体变换,实现点云精配准。

3) 对 3 帧相邻点云重复以上过程,之后将所有源点云拼接到目标点云上并进行合并融合,构建完整的气囊工具三维表面轮廓。

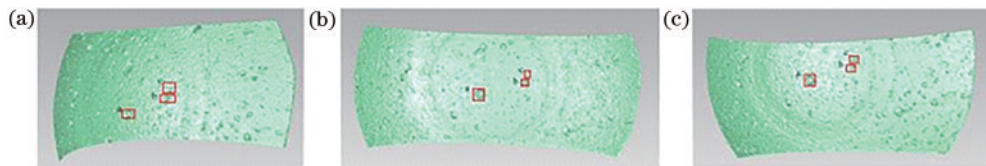


图 4 三帧相邻点云

Fig. 4 Three frames of adjacent point clouds

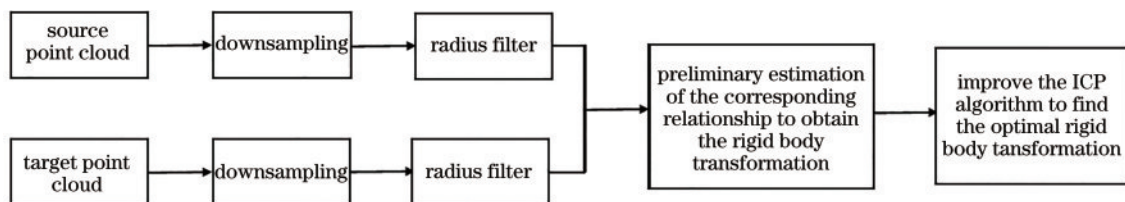


图 5 算法具体流程

Fig. 5 Specific process of the algorithm

### 3.2 基于双向 K-D 树近邻搜索的 ICP 配准

在进行 ICP 精配准之前,需要进行粗配准和刚体变换,为精配准提供良好的初始值。本文配准对象气囊工具为球体,其局部特征如曲率、法向量的差异性较小,并且采集的点云数据数量达百万级。针对配准对象气囊工具的特点,设计和搭建拼接检测数据采集平台,提出一种基于拼接检测数据采集平台的对应关系初步估计配准方法。依据拼接检测数据采集平台的参数设置,理论上只改变单轴的平移量,没有进行旋转变换,默认旋转角度为 0,粗配准具体实现步骤如下:首先,依据拼接检测数据平台提前设置单轴平移距离,获取点云坐标单轴的平移量;其次,依据点云单轴的平移量,在 CloudCompare 软件上进行单轴平移变换,获取其余两轴的平移误差,误差值小于 0.05 mm 时可忽略不计;最后,计算三轴的平移量,求出平移矩阵。

#### 3.2.1 双向 K-D 树近邻搜索法原理

假设源点云为  $P$ , 目标点云为  $Q$ , 粗配准后的源点云为  $P'$ , 传统的基于 KD-tree<sup>[17]</sup> 的近邻搜索法核心在于以欧氏距离为判断标准, 剔除欧氏距离大于阈值的配准关键点, 保存配准精度高的点。通过剔除配准误差较大的点以及优化剩余关键点的质量, 实现配准点云精度优化的粗处理, 为后续细处理提供基础。但是, 在配准计算时, 由于最近点对存在多对一的问题, ICP 算法的配准效率不高, 为此提出一种基于双向构建 KD-tree 的改进 KD-tree ICP 算法, 提高配准效率。该算法的具体步骤为

- 1) 分别构建  $P'$  和  $Q$  点云的 KD-tree;
- 2) 在  $Q$  内搜索  $P'_i$  的最近点  $Q_i$ ;
- 3) 若在  $P'$  内搜索  $Q_i$  的最近点为  $P'_i$ , 则说明  $P'_i$  和  $Q_i$  为一对具有一一对应关系的最近点;
- 4) 若在  $P'$  内搜索  $Q_i$  的最近点不为  $P'_i$ , 则继续寻找下一点  $Q_{i+1}$  在  $Q$  内的最近点;
- 5) 遍历点云  $P'$  内各点。

双向 KD-tree 的优势在于能够确定一一对应的最近点对, 算法的迭代时间得到了大幅缩减, 该算法特别适用于配准数据量大的点云模型。

#### 3.2.2 利用双向 KD-tree 的 ICP 算法精配准原理

利用粗配准刚体变换后的源点云  $P'$  和目标点云  $Q$  作为 ICP 算法精配准的输入点云集, 设定阈值  $\epsilon$  和最大的迭代次数  $K_{max}$ , 算法的具体步骤如下。

1) 利用 KD-tree 搜索近邻点, 在  $Q$  内搜索  $P'_i$  的最近点  $Q_i$ , 同时在  $P'$  内搜索  $Q_i$  的最近点, 遍历点云  $P'$  内各点, 直至  $P'$  内搜索  $Q_i$  的最近点也为  $P'_i$ , 之后将  $P'_i$  和  $Q_i$  构成对应点对。

2) 计算对应点对集之间的旋转矩阵  $R$  和平移矩阵  $T$ , 并计算变换矩阵后的均方误差  $d_i$ , 使得  $d_i$  最小, 其中,

$$d_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|Q_i - (RP_i + T)\| \quad (1)$$

3) 判断迭代的终止条件, 预先设定阈值  $\epsilon$  和最大的迭代次数  $K_{max}$ , 用步骤 2) 计算得到的变换矩阵对源点云  $P'$  进行变换, 获得新的点云集  $P''$ , 求出  $P''$  和  $Q$  的距离误差。若该距离误差收敛于设定的阈值  $\epsilon$  (即  $d_i - d_{i-1} < \epsilon$ ) 或者已达到最大迭代次数  $K_{max}$  则终止迭代, 否则就重复步骤 1)~3), 直至满足条件为止。

## 4 气囊磨损检测算法原理

所提气囊磨损检测算法依赖 MATLAB 软件, 通过拼接检测数据采集平台获取两组气囊工具数据, 一组数据为大量程线激光传感器一次性扫描获得的气囊工具点云数据, 另一组为拼接后的气囊工具点云数据, 分别计算两组数据, 求取气囊磨损深度并进行验证。由于气囊工具为规整的球体, 球冠半径为 40 mm, 磨损区域为环形, 因此, 可以通过提取两条互相垂直且过气囊工具头圆心的轮廓求取磨损深度。所提气囊磨损检测算法的具体流程如图 6 所示, 具体实现步骤如下。

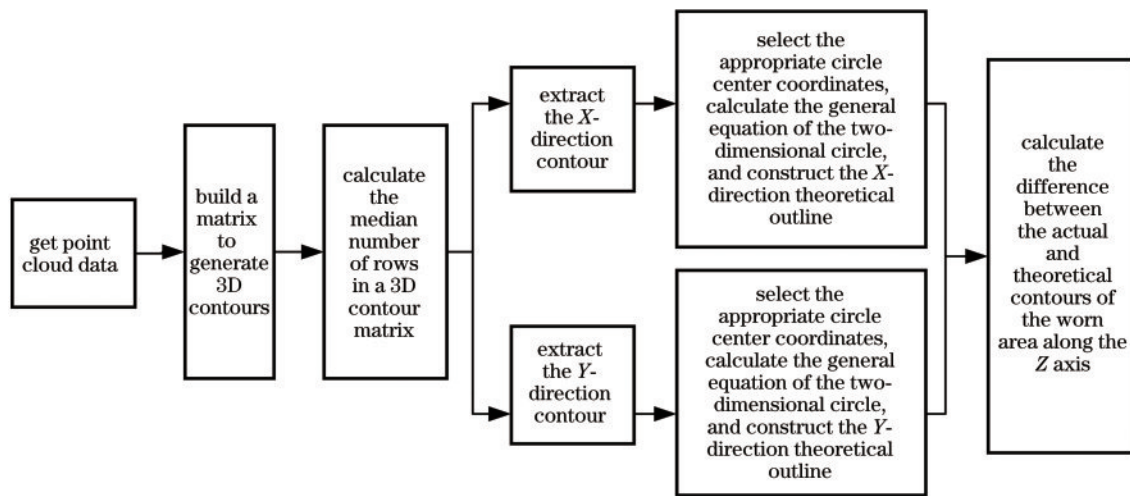


图 6 气囊磨损检测算法的流程

Fig. 6 Flow chart of bonnet wear detection algorithm

1) 通过拼接检测数据采集平台获取点云数据,构建矩阵  $Z(X_i, Y_j)$ , 将三维点云数据用矩阵  $Z(X_i, Y_j)$  的形式表现;

2) 计算矩阵  $Z(X_i, Y_j)$  的行和列的中间值, 分别提取  $X$  向实际轮廓和  $Y$  向实际轮廓;

3) 选取合适的圆心坐标  $(a, b)$  和圆半径  $R$ , 计算二维圆的一般方程, 构建  $X$  向理论轮廓和  $Y$  向理论轮廓;

4) 计算磨损区域实际轮廓和理论轮廓沿  $Z$  轴的差值, 取磨损区域内所有差值的平均值为磨损深度。

## 5 磨损检测实验验证与分析

所提拼接算法旨在为后续针对大尺寸气囊工具磨损检测提供技术支撑, 因此, 判断所提拼接算法是否满足实际要求需要经过两方面的比较验证: 一是对所提拼接算法和其他主流拼接算法进行精度、效率和拼接效果的比较实验; 二是同时对所提拼接算法拼接而成的气囊工具和大量程线激光传感器一次性完整扫描的气囊工具进行磨损检测, 分别计算出气囊磨损深度, 判断两者所求气囊磨损深度的误差是否满足要求。由于线激光传感器量程的限制, 只能对 R40 气囊工具同时进行拼接算法实验和气囊磨损检测实验, 并且为进一步验证所提拼接算法的有效性和实用性, 对大尺寸

R160 气囊工具进行拼接算法实验, 因而所提拼接算法实验部分使用 R40 气囊工具数据集和 R160 气囊工具数据集, 其中 R40 气囊工具点云数据达百万级, R160 气囊工具点云数据达千万级。

实验的软件环境为 Visual Studio2017+PCL1.9.1+MATLAB2022a, 运行于具有 AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics 2.90 GHz 处理器、16 GB 内存、64 位 Win10 操作系统的电脑上。选取特征直方图(PFH)-ICP<sup>[18]</sup>、快速点特征直方图(FPFH)-ICP<sup>[19]</sup>、正态分布变换(NDT)-ICP<sup>[20]</sup>、三维形状上下文(3DSC)-ICP<sup>[21]</sup>这几种应用较为广泛的配准方法作为对比方法, 并且, 为进一步验证所提精配准部分改进 ICP 算法的优越性, 选取所提粗配准方法和传统 ICP 进行对比。所提拼接算法围绕磨损的 R40 气囊工具和 R160 气囊工具展开, 将从旋转误差、平移误差、配准效率、配准效果 4 个方面进行比较, 评价所提拼接算法的优越性; 对 R40 气囊工具进行气囊磨损检测实验, 评价所提拼接算法的有效性和实用性。

### 5.1 拼接算法比较实验

#### 5.1.1 误差分析

使用对比方法和所提算法对 R40 和 R160 气囊工具点云数据进行配准, 求出配准点云相对于目标点云在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的旋转误差和平移距离误差, 结果如表 5~8 所示。

表 5 R40 气囊工具的两两配准平均旋转误差

Table 5 Average rotation error of two registrations for R40 bonnet tool

unit: (°)

Algorithm	X	Y	Z
PFH-ICP	0.1292	0.0092	-0.7553
FPFH-ICP	0.0852	0.0174	-0.7694
3DSC-ICP	0.1145	0.0088	-0.7789
NDT-ICP	0.1851	0.2904	-0.7503
Proposed crude registration algorithm-ICP	0.00003	0.0005	-0.7485
Proposed algorithm	0.00002	0.0004	-0.7358

表 6 R160 气囊工具的两两配准平均旋转误差

Table 6 Average rotation error of two registrations for R160 bonnet tool

unit: (°)

Algorithm	X	Y	Z
PFH-ICP	0.0613	0.3383	-0.7677
FPFH-ICP	0.0413	0.3626	-0.7664
3DSC-ICP	0.1142	0.0498	-0.7735
NDT-ICP	0.3574	0.2896	-0.7803
Proposed crude registration algorithm-ICP	0.0007	0.0008	-0.7448
Proposed algorithm	0.0005	0.0004	-0.7248

由表 5~8 可以看出: 不管是平均旋转误差还是平均平移误差, 所提算法的误差最小; 综合评价来看, 所提算法的整体表现最好, 配准精度最高, NDT-ICP 表现最差, 这是由于本文在粗配准阶段通过数据采集平台获得较为精确的初始配准变换, 避免点云数据的局

部特征差异性较小而产生的误匹配, 进而提高了整体配准精度; 此外, 从所提粗配准算法-ICP 的结果可看出, 当粗配准算法相同时, 所提改进的 ICP 算法相比传统 ICP 算法, 精度更高, 进一步验证了所提算法的优越性。



表 7 R40 气囊工具的两次配准平均平移误差

Table 7 Average translation error of two registrations for R40 bonnet tool

unit: mm

Algorithm	X	Y	Z
PFH-ICP	0.0016	-0.2978	-0.1985
FPFH-ICP	0.0015	-0.2985	-0.1998
3DSC-ICP	0.0018	-0.2997	-0.1993
NDT-ICP	0.0153	-0.2982	-0.1956
Proposed crude registration algorithm-ICP	0.0006	-0.2968	-0.1945
Proposed algorithm	0.0005	-0.2950	-0.1931

表 8 R160 气囊工具的两次配准平均平移误差

Table 8 Average translation error of two registrations for R160 bonnet tool

unit: mm

Algorithm	X	Y	Z
PFH-ICP	0.0023	-0.2949	-0.1963
FPFH-ICP	0.0092	-0.2975	-0.1988
3DSC-ICP	0.0018	-0.2999	-0.1994
NDT-ICP	0.0065	-0.2942	-0.1985
Proposed crude registration algorithm-ICP	0.0006	-0.2935	-0.1931
Proposed algorithm	0.0004	-0.2915	-0.1911

## 5.1.2 配准效率分析

通过统计粗配准阶段时间、精配准阶段时间和总

的配准时间证明所提算法的高效性。各阶段的配准时间如表 9 和表 10 所示。

表 9 R40 气囊工具两次配准的平均配准完成时间

Table 9 Average registration completion time of two registrations for R40 bonnet tool

unit: s

Algorithm	Coarse registration	Precise registration	Total time
PFH-ICP	18.137	1.044	19.181
FPFH-ICP	9.294	1.007	10.301
3DSC-ICP	2.187	10.663	12.849
NDT-ICP	1.379	21.539	22.918
Proposed crude registration algorithm-ICP	0.248	1.805	2.053
Proposed algorithm	0.248	0.931	1.179

表 10 R160 气囊工具两次配准的平均配准完成时间

Table 10 Average registration completion time of two registrations for R160 bonnet tool

unit: s

Algorithm	Coarse registration	Precise registration	Total time
PFH-ICP	327.330	6.804	334.134
FPFH-ICP	210.703	7.345	218.048
3DSC-ICP	46.185	461.184	507.369
NDT-ICP	6.345	44.387	50.732
Proposed crude registration algorithm-ICP	1.153	14.692	15.845
Proposed algorithm	1.153	7.845	8.998

由表 9 和表 10 可知:对于点云数据达百万级的 R40 气囊工具, NDT-ICP 耗时最长, 达 22.918 s, 所提算法配准耗时最短, 共 1.179 s, 在粗配准阶段耗时 0.248 s, 精配准阶段耗时 0.931 s; 对于点云数据达千万级的 R160 气囊工具, 3DSC-ICP 耗时最长, 达 507.369 s, 所提粗配准算法-ICP 在精配准阶段耗时 14.692 s, 相比之下, 所提算法在粗配准阶段耗时 1.153 s, 在精配准阶段耗时 7.845 s, 在粗配准阶段和

精配准阶段所耗时间均为最少。相比其他 5 种算法, 所提算法对数据量极大的点云模型优越性更强、配准效率更高, 这是由于所提算法在粗配准阶段通过数据采集平台直接获取变换矩阵参数, 无需进行大量的重复迭代计算来寻找相邻点云的变换矩阵参数, 并且在精配准阶段利用双向 KD-tree 改进 ICP 算法, 有效地提高了点云配准效率。

## 5.1.3 配准效果

为更加直观地展现所提算法的有效性,将 PFH-ICP 配准算法、FPPH-ICP 配准算法、3DSC-ICP 配准算

法、NDT-ICP 配准算法、所提粗配准-ICP 和所提算法的配准效果在图 7 和图 8 中展示出来。图 7 为 R40 气囊工具的配准效果,图 8 为 R160 气囊工具的配准效果。

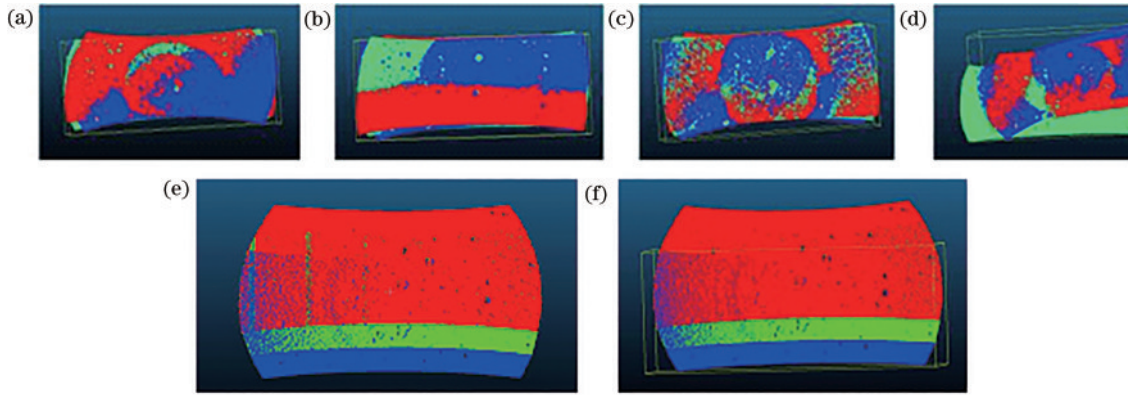


图 7 R40 气囊工具的配准效果。(a) PFH-ICP 配准算法;(b) FPPH-ICP 配准算法;(c) 3DSC-ICP 配准算法;(d) NDT-ICP 配准算法;(e) 所提粗配准-ICP 配准算法;(f) 所提算法

Fig. 7 Registration effect of R40 bonnet tool. (a) PFH-ICP registration algorithm; (b) FPPH-ICP registration algorithm; (c) 3DSC-ICP registration algorithm; (d) NDT-ICP registration algorithm; (e) proposed crude registration-ICP; (f) proposed algorithm

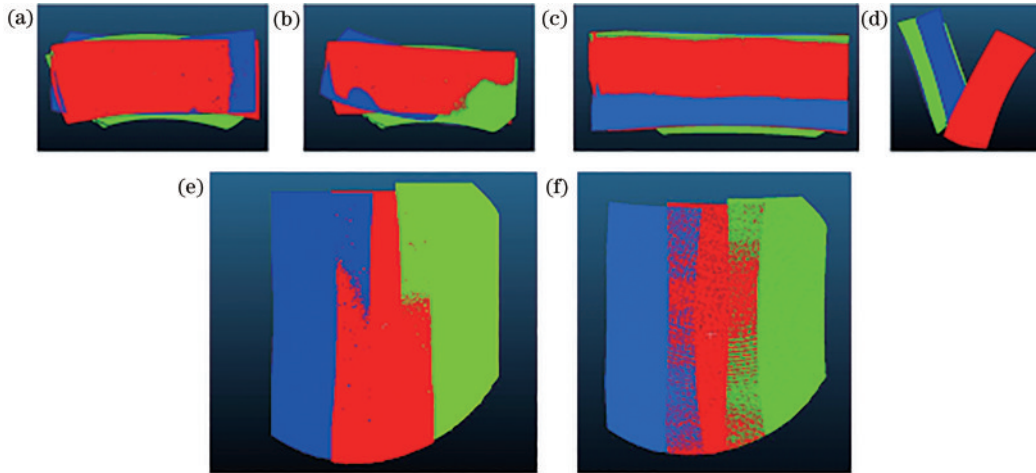


图 8 R160 气囊工具的配准效果。(a) PFH-ICP 配准算法;(b) FPPH-ICP 配准算法;(c) 3DSC-ICP 配准算法;(d) NDT-ICP 配准算法;(e) 所提粗配准-ICP 配准算法;(f) 所提算法

Fig. 8 Registration effect of R160 bonnet tool. (a) PFH-ICP registration algorithm; (b) FPPH-ICP registration algorithm; (c) 3DSC-ICP registration algorithm; (d) NDT-ICP registration algorithm; (e) proposed crude registration-ICP; (f) proposed algorithm

图 7 和图 8 中的配准效果图是三帧相邻点云经过两次配准之后合并而成的,可以看出:由于配准对象气囊工具为球体,其局部特征如曲率、法向量的差异性较小,且点云分布较为均匀,4 种对比方法都产生误匹配,无法完整地配准出气囊工具;所提算法较为完整地配准出气囊工具,并且气囊工具磨损区域配准的效果也极好。通过对所提拼接算法和其他 5 种较为主流的拼接算法进行旋转误差、平移误差、配准效率、配准效果 4 个方面的比较,有力地证明了所提拼接算法的有效性。

## 5.2 气囊磨损检测精度验证实验

同时对所提拼接算法拼接而成的 R40 气囊工具和大量程线激光传感器一次性完整扫描的 R40 气囊工具进行磨损检测,分别计算出气囊磨损深度,判断两者所得气囊磨损深度的误差是否满足要求。大量程线激光

传感器一次性完整扫描的 R40 气囊工具三维点云如图 9 所示,所提拼接算法拼接而成的 R40 气囊工具头如图 7(f) 所示。

对大量程线激光传感器一次性完整扫描的 R40 气囊工具的点云数据进行分析,提取 X 向和 Y 向的理论轮廓和实际轮廓,图 10 为 Y 向的理论轮廓和实际轮廓二维图,图 11 为 X 向的理论轮廓和实际轮廓二维图。

对所提拼接算法拼接而成的 R40 气囊工具的点云数据进行分析,提取 X 向和 Y 向的理论轮廓和实际轮廓,图 12 为 Y 向的理论轮廓和实际轮廓二维图,图 13 为 X 向的理论轮廓和实际轮廓二维图。

对上述两组气囊工具点云数据求取 X 向和 Y 向轮廓的磨损深度,分别记为  $\overline{Z_{1-x}}$ 、 $\overline{Z_{1-y}}$ 、 $\overline{Z_{2-x}}$ 、 $\overline{Z_{2-y}}$ ,规定 X



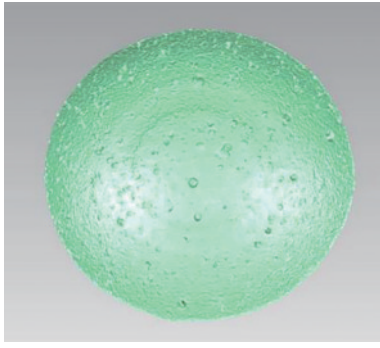


图 9 一次性完整扫描得到的气囊工具点云  
Fig. 9 Bonnet tool point cloud obtained by one-time full scanning

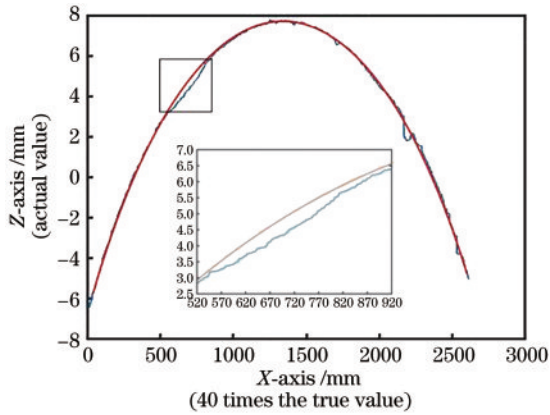


图 10 大量程线激光传感器获得的 Y 向轮廓  
Fig. 10 Contour plot in Y direction obtained by the large range line laser sensor

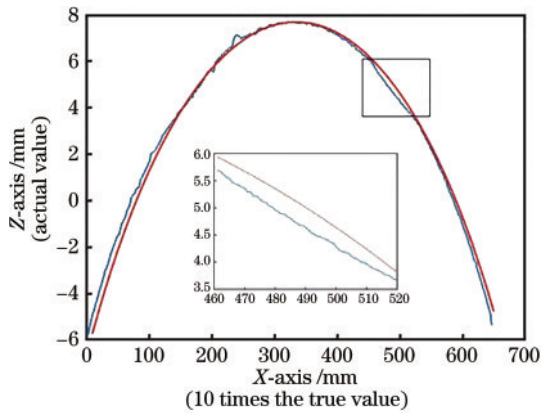


图 11 大量程线激光传感器获得的 X 向轮廓  
Fig. 11 Contour plot in X direction obtained by the large range line laser sensor

向和 Y 向轮廓的磨损深度的平均值为整个气囊工具的磨损深度值,各计算值结果如表 11 所示。

通过表 11 可知,所提拼接算法拼接和大量程线激光传感器一次性完整扫描的 R40 气囊工具的整体轮廓磨损深度误差为 0.0067 mm,满足实际要求,进一步证明了所提拼接算法的有效性和实用性,能够为后续大尺寸气囊工具头磨损检测提供技术支撑。

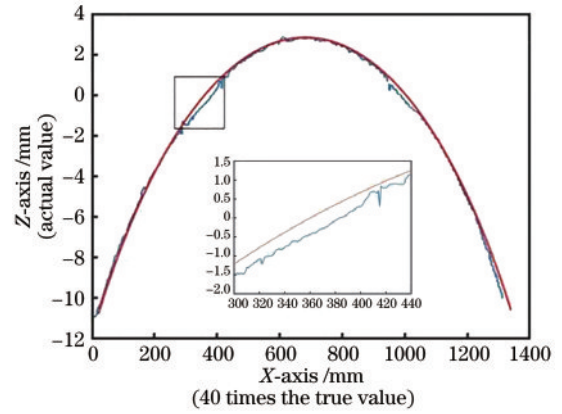


图 12 所提算法获得的 Y 向轮廓  
Fig. 12 Contour plot in Y direction obtained by the proposed algorithm

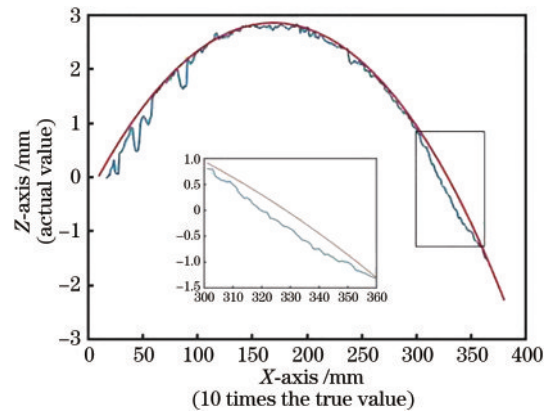


图 13 所提算法获得的 X 向轮廓  
Fig. 13 Contour plot in X direction obtained by the proposed algorithm

表 11 R40 气囊工具磨损深度

Table 11 Wear depth of R40 bonnet tool unit: mm

Method	$\bar{Z}_x$	$\bar{Z}_y$	$(\bar{Z}_x + \bar{Z}_y)/2$
One-time full scanning	0.2309	0.3372	0.2841
Proposed algorithm	0.2326	0.3222	0.2774
Wear depth error	0.0017	0.015	0.0067

## 6 结 论

利用激光扫描方式进行气囊工具表面磨损检测,点云配准是大尺寸气囊工具磨损检测的关键。针对气囊工具,提出一种改进的 ICP 拼接算法。首先,通过搭建拼接检测数据采集平台获取点云数据,对点云进行体素下采样和半径滤波等预处理;其次,通过拼接检测数据采集平台,在数据采集阶段提前获取变换矩阵参数,提前获取的变换矩阵参数可以为 ICP 算法提供良好的初始配准位置;最后,使用改进的 ICP 算法,将双向 K-D 树近邻搜索点对融入 ICP 算法,提升配准效率,实现点云精配准。从实验结果可看出所提拼接

算法的有效性和实用性,拼接后的气囊工具模型不会影响后续的气囊磨损量计算,可为大尺寸气囊工具磨损检测提供技术保证。但是所提拼接算法的精度较依赖于拼接检测数据采集平台设备本身的精度以及合理的参数设置,调节参数的过程较为费时,后续环节需要考虑对数据采集环节进行进一步优化,以此提高配准精度和效率。

## 参 考 文 献

- [1] 张际. 强激光系统光学元件损伤暗场成像检测可行性研究[D]. 成都: 四川大学, 2007: 1-10.  
Zhang J. Research of optics component damage inspection [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007: 1-10.
- [2] Bingham R G, Walker D D, Kim D H, et al. Novel automated process for aspheric surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4093: 445-450.
- [3] Pan R, Zhong B, Wang Z Z, et al. Influencing mechanism of the key parameters during bonnet polishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1): 643-653.
- [4] Zhong B, Chen X H, Pan R, et al. The effect of tool wear on the removal characteristics in high-efficiency bonnet polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 3653-3662.
- [5] 钟波. 大口径非球面元件子口径抛光去除稳定性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 23-27.  
Zhong B. Material removal stability of the sub-aperture polishing for large aspheric surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 23-27.
- [6] Su Y T, Hung T C, Horng C C. An experimental study on tool wear of hydrodynamic polishing process[J]. Wear, 2000, 246(1/2): 117-129.
- [7] Park K, Oh J, Jeong H. Pad characterization and experimental analysis of pad wear effect on material removal uniformity in chemical mechanical polishing[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(10R): 7812-7817.
- [8] Belkhir N, Bouzid D, Herold V. Morphological behavior and wear of polyurethane pads used in glass polishing process[J]. Precision Engineering, 2012, 36(4): 641-649.
- [9] 耿磊, 曹春鹏, 肖志涛, 等. 基于激光雷达的多视角点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(12): 1228004.  
Geng L, Cao C P, Xiao Z T, et al. Multiview point cloud registration method based on laser radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(12): 1228004.
- [10] 韩浩宇. 面向文物保护的三维点云配准技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2022: 8-13.  
Han H Y. Research on 3D point cloud registration technology for cultural relics protection[D]. Taiyuan: North University of China, 2022: 8-13.
- [11] 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.
- [12] 杨宜林, 李积英, 王燕, 等. 基于 NDT 和特征点检测的点云配准算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(8): 0810016.  
Yang Y L, Li J Y, Wang Y, et al. Point cloud registration algorithm based on NDT and feature point detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(8): 0810016.
- [13] 王文博, 田茂义, 俞家勇, 等. 改进的迭代最近点点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0215007.  
Wang W B, Tian M Y, Yu J Y, et al. Improved iterative nearest point point cloud alignment method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0215007.
- [14] 杨稳, 周明全, 张向葵, 等. 基于分层优化策略的颅骨点云配准算法[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0615001.  
Yang W, Zhou M Q, Zhang X K, et al. Skull point cloud registration algorithm based on hierarchical optimization strategy[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0615001.
- [15] 刘剑, 白迪. 基于特征匹配的三维点云配准算法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215005.  
Liu J, Bai D. 3D point cloud registration algorithm based on feature matching[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215005.
- [16] 刘如飞, 王飞, 任红伟, 等. 一种利用地理实体目标特征的道路场景激光点云配准方法[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1810002.  
Liu R F, Wang F, Ren H W, et al. A road scene laser point cloud registration method based on geographical object features[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1810002.
- [17] 刘江, 张旭, 朱继文. 一种基于 K-D 树优化的 ICP 三维点云配准方法[J]. 测绘工程, 2016, 25(6): 15-18.  
Liu J, Zhang X, Zhu J W. ICP three-dimensional point cloud registration based on K-D tree optimization[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(6): 15-18.
- [18] 张晓娟, 李忠科, 王先泽, 等. 基于特征点和改进 ICP 的三维点云数据配准算法[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(9): 116-118, 122.  
Zhang X J, Li Z K, Wang X Z, et al. Research of 3D point cloud data registration algorithms based on feature points and improved ICP[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(9): 116-118, 122.
- [19] 陆军, 彭仲涛, 董东来, 等. 点云 FPFH 特征提取优化配准算法[J]. 新型工业化, 2014, 4(7): 75-81.  
Lu J, Peng Z T, Dong D L, et al. The registration algorithm of point cloud based on optimal extraction of FPFH feature[J]. The Journal of New Industrialization, 2014, 4(7): 75-81.
- [20] Shi X Y, Peng J J, Li J P, et al. The iterative closest point registration algorithm based on the normal distribution transformation[J]. Procedia Computer Science, 2019, 147: 181-190.
- [21] 侯彬, 金尚忠, 王赞, 等. 点云配准方法在粗配准中的比较[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081502.  
Hou B, Jin S Z, Wang Y, et al. Comparison of point cloud registration methods in coarse registration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081502.