

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.002

基于层级优化点云配准的飞机整机测量技术研究

李红卫¹, 王岩²

(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 飞机产品的精度要求越来越高, 这使飞机零件的精确制造和精密装配变得越来越重要。随着数字化测量技术的发展, 三维激光扫描仪被广泛应用在飞机产品的多视角局部几何形状捕捉中。将多种角度的点云对齐到同一坐标系中, 最终组成测量目标的完整形状, 该过程称为配准。因此, 多视角点云配准是飞机产品外形重建和检测的重要步骤。针对此问题, 提出了基于层级优化的多视角点云配准的通用框架。系统的输入是由位于不同站位的激光扫描仪扫描所得到的带标靶的点云数据, 各点云数据处于不同的测量坐标系下且有不同程度的重叠。用图来表达多视角点云和点云之间的重叠关系, 图中每个节点表示单站点云数据, 节点之间的边表示两点云之间的重叠关系。为使这些点云数据最终匹配到统一的坐标系下, 还提出了一系列方法来提高点云配准的精度和效率。

关键词: 点云配准; 激光扫描; 飞机检测; 多视角

中图分类号: V262.4+2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2021)03-0338-06

Hierarchical Multiview Point Cloud Registration for Aircraft Measurement

LI Hongwei¹, WANG Yan²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the aviation industry, the demand for high accuracy of the airplane product is growing, which makes precise production of airplane parts and accurate assembly become more and more important. Three-dimensional laser scanner is widely utilized to capture the local shapes, represented by 3D point clouds, of a aircraft product from different viewpoints, followed by aligning various point clouds into the same coordinate system so as to form the entire geometry of the product, which is referred to as registration. Multiview registration of point clouds is therefore a critical step for reconstruction and inspection of aircraft products. The input of the system is the point cloud data with targets obtained by laser scanners at different stations. The point cloud data are in different measurement coordinates systems and have different degrees of overlap. Furthermore, we formulate multiple scan registration refinement as an optimization problem on an undirected graph, where each node and each edge represent a single scan and a connection between two overlapped scans, respectively. The multiple scan registration problem is solved via hierarchical optimization, and thereby the entire geometry shape of the aircraft is accurately obtained. In order to register these point cloud data to a unified coordinate system, a series of methods are proposed to improve the accuracy and efficiency of point cloud registration.

Key words: point cloud registration; laser scanning; aircraft inspection; multiview

基金项目: 国家重点研究发展计划(2019YFB1707504)资助项目。

收稿日期: 2020-04-13; **修订日期:** 2021-04-13

通信作者: 李红卫, 男, 副总工程师, E-mail: tiantangtianma@126.com。

引用格式: 李红卫, 王岩. 基于层级优化点云配准的飞机整机测量技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 338-343. LI Hongwei, WANG Yan. Hierarchical multiview point cloud registration for aircraft measurement[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 338-343.

在飞机制造业中,飞机外形检测是总装生产线上的重要组成部分,如飞机对称性检测、蒙皮表面波纹度检测以及飞机装配精度检测等。随着测量技术的发展,技术人员开始使用三维激光扫描仪对飞机的整个表面进行扫描。对于像飞机这样的大型检测目标,一般采用多站扫描得到整个表面的信息。对多站扫描得到的飞机点云数据进行配准是一个基本而又关键的步骤。本文提出一套基于层级优化的多视角飞机点云配准方法,提高了飞机点云数据多视角配准精度。

点云配准是一个非常活跃的研究课题,国内外相关研究人员做了非常多的研究工作。例如,赵夫群^[1]提出一种全新的颅骨点云配准方法,添加尺度因子和模拟退火系数,从而改进迭代最近邻(Iterative closest point, ICP)算法,进而实现颅骨点云精细配准,大幅度提高配准精度与速度。王森等^[2]将三维激光扫描仪应用到露天矿山中,得到其点云数据。之后,将尺度不变特征变换(Scale-invariant feature transform, SIFT)算子与ICP算法结合起来,改善初始点云输入,进而实现快速精确配准,显著提高露天矿山的测量验收效率。胡章芳等^[3]针对移动机器人视觉同时定位与地图构建(Visual simultaneous location and mapping, V-SLAM)中存在配准精度较低的问题,提出一种改进的三阶段点云配准ICP算法,首先通过随机采样一致性(Random sample consensus, RANSAC)对点对进行筛选完成预处理,然后引入一种动态迭代角度因子的迭代最近邻精配准方法,明显改善配准精度。赵夫群等^[4]针对带噪声的文物三维点云模型,使用一种由粗到细的断面精确配准方法。配准测度函数的尺度参数由小到大变化,避免算法求解时陷入局部最优解,最终在兵马俑碎块上的验证实验说明了该配准算法的有效性和可行性。张旭东等^[5]使用针对基于飞行时间(Time-of-flight, TOF)原理的相机对物体表面建模时点云配准速度慢的问题,提出一种快速散乱点云配准方法。首先通过提取特征点的方法实现点云初始位置配准。之后,利用TOF相机图像梯度值寻找点云之间的最邻近点作为匹配点对,进行迭代运算获得最佳变换参数,并结合错误匹配点对去除法,实现点云的精配准。李坪等^[6]首先在轨腰上提取圆孔边界作为特征,使用一种基于异构计算语言的边界提取并行算法进行初始匹配,最后以轨腰作为基准精确匹配,解决了尖轨检测中点云配准定位难的问题。郭王等^[7]提出一种基于激光强度的点云配准方法,首先对采集到的LiDAR点云的激光强度信息进行分类,然后基于该分类结果提取特征平面,将拓扑关系与分类

结果一起作为约束条件,从而得到同名特征平面,该算法在机载与地面LiDAR同名特征几何形状不完全一致的情况下仍然可得到较好的配准效果。王天泽^[8]提出了一种针对飞机零部件点云数据的融合相似特征匹配法与基于加权欧氏距离阈值法的新型ICP配准算法,该方法对于小尺寸零件有较好的配准效果,但由于大尺寸飞机表面相对较平滑,无明显特征结构且点云尺寸较大,该方法不能提取出准确的相似特征用于配准算法,因此配准效果并不理想。闻战胜^[9]针对飞机钣金件点云配准提出了一种综合最小二乘配准法和三基准配准法的模型配准方法。该方法通过对配准模型在给定范围内限定其自由度从而加速配准算法收敛,其关键在于将检测过程中飞机零件装配定位特征转化为配准约束条件进行优化,而对于整机外形检测而言,已不存在装配特征,因此无法在此基础上实现飞机点云数据的配准优化。

本文将三维激光扫描技术引入到飞机质量检测中,提出一套基于层级优化的多视角飞机点云配准方法,从而提高飞机点云数据配准精度,最终提高飞机装配精度。

1 算法流程

本文提出的飞机点云配准方案算法流程如图1所示。其总体思路是通过层级优化的方法提高多视角点云的配准精度。首先,使用三维激光扫描仪对飞机进行全局扫描,得到多视角点云数据。将得到的数据作为本算法的输入,之后通过将每站点云和点云之间的重叠面积转化为图结构中的节点和边的权值,建立用于优化的无向图模型,特别地,提出一种改进后的点云面积度量方法,从而更加精确地估计各点云之间的重叠面积并且为图中边的权值赋值。最后通过迭代寻找和闭合新生成的回环完成整个点云数据的优化配准,并输出矩阵参数。算法的关键在于全局地选择一个多站点云合适的配准顺序,从而消除误差积累并且提高点云配准的精度。

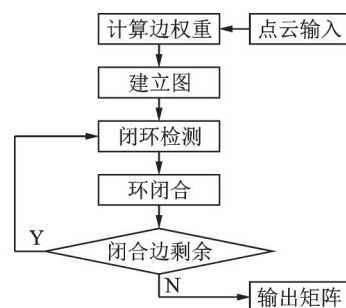


图1 飞机点云配准方案

Fig.1 Point cloud registration of aircraft

2 基于图的层级优化配准方法

使用三维激光扫描仪获得飞机多视角点云数据,如图2所示。多视角点云配准最主要的问题存在于配准误差的积累,每一对点云的配准较之理想结果都有一定微小偏差。对于多视角点云配准情况,定义集合 $\{V_n|n=1:N\}$ 为包含有 N 个视角点云的集合,转换矩阵 $\{\theta_i: V_i \cdot \theta_i \rightarrow V_{i+1}$ 为两点云之间的配准结果,如果线性的将点云从 V_1 依次配准到 V_n ,二者之间很有可能产生很大的配准误差,从而导致整个配准结果的 inconsistency,这就是飞机多视角点云配准中需要解决的闭环问题。

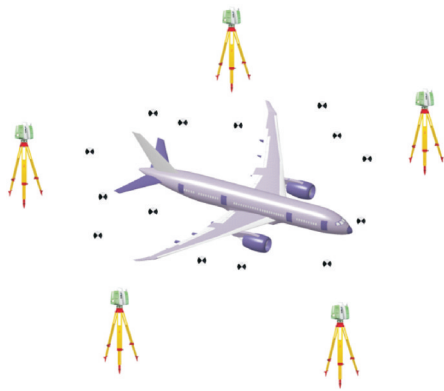


图2 多视角飞机点云数据的采集

Fig.2 Acquisition of multiview point cloud data of aircraft

受到 Tang 等^[10]的启发,本文采用图优化的方法选择合适的配准次序从而消除误差累积。以每个视角的点云作为图中的一个节点,有重叠关系的相邻节点之间以边相连从而构成一个多视角点云的无向图。通过图论的优化方法,迭代选定包含若干个首尾相接的节点作为一个回环并进行闭合,从而形成一个新的节点直至图中没有剩余节点为止,完成飞机点云的全局优化配准工作。

2.1 自适应密度面积估算

在图的建立过程中,每个边权值的计算是整个优化过程中很重要的一环,因为这决定了接下来图中回环闭合的顺序,而这会影响最后点云的配准精度。本文提出了一个稳健的定义重叠面积大小的度量方法,该方法对点云密度在计算重叠面积过程中的影响是鲁棒的。

对于图中边的权重, Tang 等^[10]采用计算点云数量来表示重叠区域的面积,其中点对产生于 ICP 配准时的匹配点。这种方法对于较小物体可以快速计算出重叠面积的大小,然而对于全机扫描而言,需要考虑飞机尺寸对扫描结果的影响。由扫描仪的工作原理可知,扫描仪沿水平和竖直方向以固定频率发射激光,通过激光反射来计算从物体反射

表面到扫描仪的距离,因此点云密度会随着距离呈平方级数衰减,所以在某些情况下,比如离扫描仪较近且激光入射角度较小的平面的点对数量会远远大于离扫描仪距离较远且激光入射角度很大的相同尺寸的平面,显然这种方法不适用于飞机点云的重叠面积估计。

由于点云的密度与扫描仪的距离高度相关,为解决所得飞机点云数据密度不均匀的问题,本文采用可以高效判断点云重叠区域面积的度量方法,给定重叠区域点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,在 ICP 配准环节,可以得到重叠区域点云的配准残差 $r(\theta) = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。根据文献[11]可以得到可变带宽核密度为

$$f_{\theta}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h(\theta)} K\left(\frac{x - r_i}{h(\theta)}\right) \quad (1)$$

式中: $h(\theta)$ 表示带宽, $K(\cdot)$ 表示内核。在此基础上, Wang 等^[12]通过式(2)来估算区域密度

$$\omega = \frac{f_{\theta}(\theta)}{\sigma(\theta)} \quad (2)$$

为了使点云面积的表达式域所在区域点云的密度不相关,对其表达式进行改进,有

$$\omega(\theta) = \frac{f_{\theta}(\theta)}{\sigma(\theta)} \cdot \sqrt{|N| \bar{d}} \cdot \sum_{e_i \in E} |e_i| \quad (3)$$

式中: $|N|$ 为重叠区域点的数量, \bar{d} 为点云质心与原点间的距离, E 为所有聚类生成边的集合, $|e_i|$ 为第 i 个边的边长。由此本文可以对每个重叠区域的面积进行评估,从而根据比较结果得出图中优先级最高的回环进行闭合。其中,边长之和的计算步骤如下:

(1) 对于关联点集合 A ,取集合中的一点放入集合 C ,应用 KNN 方法计算其与周围 k 个点之间线段的距离之和,并将这 k 个点放入集合 B 中。

(2) 取 B 中每个点 E ,计算其在 A 中的 k 个相邻点及其 k 个边长之和 S_i ,并将 E 放入集合 C 中,其他 k 个点则放入 B 中。

(3) 返回步骤(2),如果集合 A 非空,且迭代 m 次集合后 A 为空,跳出循环至步骤(4)。

(4) 计算 $\sum_1^m S_i$,即为重叠区域所有边长总和。

通过以上步骤,可以计算出每个有邻接关系点云之间的重叠面积的表达并为图中每个边的权值赋值。通常,所计算得到的边长之和越大,代表所在重叠区域点云的面积越大,从而配准次序的优先级就更高,配准误差就不容易在较大重叠面积的区域上产生累积。

2.2 环形闭合

单个回环闭合是层级优化配准的基础。因此,

运用带闭环约束的目标函数解决闭环一致性问题:首先对每对点云进行配准,得到两点云相对的变换矩阵,之后求取每个点云之间的重叠面积表达,以此作为图中各边的权值。最后运用图优化的方法每次闭合图中一个优先级最高的回环,直到所有点云都配准完毕。

用 ICP 方法计算两点云之间的变换矩阵 θ , 而闭环所要解决的就是对于一个包含 N 个视角的点云数据 $\{V_n | n=1:N\}$, 如何调整 ICP 配准的转换矩阵 $\{\theta_i\}: V_i \cdot \theta_i \rightarrow V_{i+1}$ 满足 $V_{n+1} = V_1$, 并且满足 $\theta_1 \cdot \theta_2 \cdots \theta_n = I$, 其中 I 为单位矩阵。值得注意的是, 用 ICP 方法得到的初始配准矩阵 θ_i 并不会作用于现有的点云上, 而是为下一步优化做准备。为使闭环满足一致性要求, 引入了以下约束条件

$$\min(\hat{\theta}) \sum_{i=1}^N \|\hat{\theta}_i - \theta_i\|^2 \quad \theta_1 \cdot \theta_2 \cdots \theta_n = I \quad (4)$$

式中: $\hat{\theta}_i$ 为 V_i 到 V_{i+1} 的优化变换矩阵, 其目的是使得其与对应的初始配准矩阵差距尽可能小的前提下满足闭环一致性要求, 由于在上一小节回环的选取中, 一般都会选择路径数目最少的作为闭合对象, 因此待闭合环只包含少数几个视角的点云, 以此通过偏导数求解的方法可以求得优化后的 $\hat{\theta}_i$ 值。

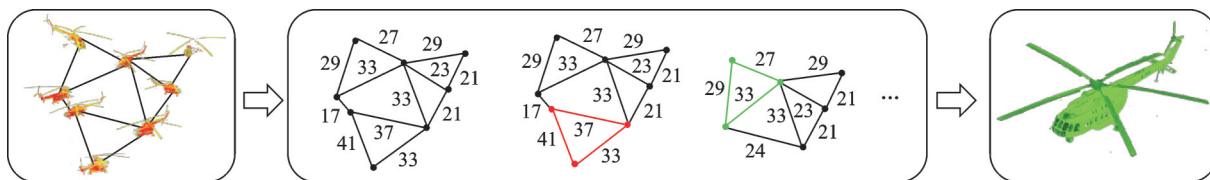


图 3 飞机点云数据层级精配准方法

Fig.3 Hierarchical registration method of aircraft point cloud data

3 实验结果与分析

本节进行一系列实验证明所提出算法对大尺寸飞机点云数据处理的可行性和鲁棒性。图 4 给出了对两种不同机型的点云数据进行处理时所得到的图以及最终配准的结果。从中可以看出, 不同机型对应着不同的图, 这些图大部分是由三角形 (Strip) 为单位构建起来的, 扫描的站数以及相邻站点点云之间的重叠关系决定了图之间的拓扑关系。从配准结果可以看到, 对于不同机型及其相应的图来说, 本文方法都可以通过迭代更新图中的定点和边的权值, 以此闭合高优先级的回环从而成功完成高精度的多视角配准。

为了检验该配准算法对于飞机点云数据处理的性能, 对现实中的飞机进行扫描得到数据。算法的输入是在 12 个不同的站位获取的飞机局部点云数据, 单站点云数据平均包含 1 900 万个点。为了

2.3 算法流程

在得到带有权值的多视角点云图之后, 通过逐个选择和闭合环配准整个点云数据, 得到全局最优配准结果。整个层级优化配准的具体步骤如图 3 所示。

- (1) 用 Kruskal 算法从图中提取最大生成树;
- (2) 取不在最大生成树中的边的集合中边长最大的一条加入到最大生成树中;
- (3) 对于最大生成树, 每加入一条边都会引入至少一个环, 在新生成的环中先闭合路径最短的一个并形成一个新的节点 N ;
- (4) 合并之后得到新的图, 计算所有与 N 相邻的节点权重;
- (5) 重复步骤 (2) 直到没有边可以加入到目前的图中, 结束配准。

通过以上步骤, 在每次闭环时可以得到优化后的转换矩阵, 在次过程中, 整体配准误差都得到了最大程度的减小。而且局部闭环之后的点云与相邻点云的重叠面积变得更大, 增加了参与 ICP 计算中关联点的数目, 从而使含有噪声以及初始位姿不佳的点云配准结果更为精确。

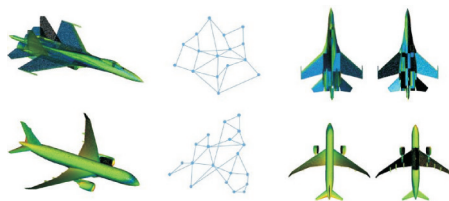


图 4 两种不同类型的飞机点云配准结果

Fig.4 Registration results from two different types of aircraft

表明算法对飞机点云数据处理的性能, 截取飞机前机身机头的区域进行结果比对, 因为飞机大部分区域为曲率较小的自由曲面组成, 在配准过程中容易沿曲面切平面方向滑动, 使得配准误差容易在飞机头部累积, 所以这个区域的配准质量能够明显地反应整机的配准效果。如图 5 所示, 图 5(a) 是飞机点云输入数据, 图 5(b) 是未经过层级优化配准步骤的配准结果, 图 5(c) 是使用层次多视图刚性配准

(Hierarchical multiview rigid registration, HMRR)方法得到的配准结果,图5(d)是未针对不同点云密度进行面积估算来调整配准策略的配准结果。从图5(b)中看出,由于没有经过优化配准的过程,配准结果显示出了较大的误差,而在没有考虑点云密度变化对配准结果带来影响的情况下,图5(c)经过优化配准的步骤,结果还是存在一些微小的配准误差,而从图5(d)中可以看出本文所提出的方法成功地解决了以上问题。

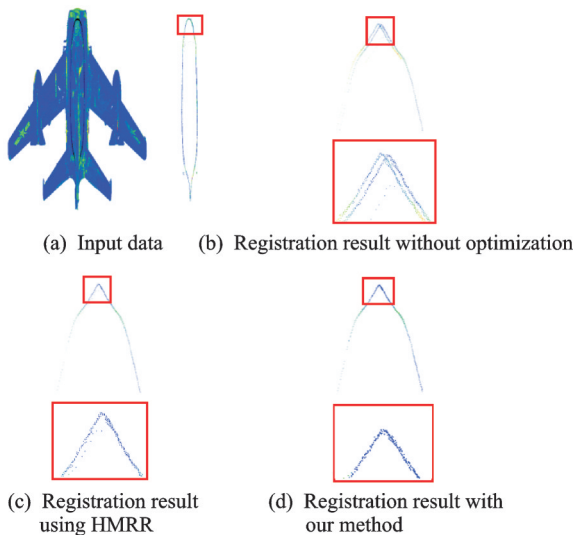


图5 飞机点云配准结果

Fig.5 Registration results from scans of aircraft

在定性的对比算法中每个步骤对配准结果的贡献之后,本文与其他3个具有代表性的配准算法进行了定量的对比。特别地,本文用飞机理论模型人工生成了一些实验数据用于对比实验。Pulli^[13]提出的多视角配准算法(Multiview registration, MLR)在应用虚拟配准对的基础上采用增量式的配准方法实现多视角点云的配准。Liu等^[14]提出的全局一致刚性配准(Globally consistent rigid registration, GCRR)将多视角配准问题转化成基于图理论的优化问题求解,使得全局配准结果有更好的一致性。Tang等^[10]提出的HMRR采用层级优化的方法来解决多视角配准问题。本文在Tang^[10]的方法基础上进行了改进,针对大尺度飞机点云密度不均问题,重新设计了多视角点云重叠面积的估算方法。图6为4种方法的配准迭代次数和均方根误差(Root mean square error, RMSE)的实验结果。从结果中可以看到本文所采用的方法配准误差最低。其中,Pulli^[13]由于没有解决误差累积的原因,表现出了较大的误差。而Liu等^[14]的方法受限于飞机尺寸的影响,无法将误差较好地分配到每个视

角。此外Tang^[10]的方法没有考虑点云密度分布对配准结果的影响,无法得到准确的判断点对重叠信息,使得算法容易陷入局部最优,配准精度也低于本文的方法。在算法运行时间方面,从图6中可以看出表现较好的算法为HMRR算法和本文的方法,由于本文算法和HMRR都是基于层级配准,需要更多的时间优化配准过程,此外图的权值计算也会增加时间消耗。本文算法时间比HMRR多15%,但从表1可以看出,绝对算法时间只增加了1.33 s,这对于大尺寸飞机数据的处理来说在可接受范围内(传统方法在无法保障精度的情况下需要30 s以上的配准时间)。从表1还可以看出本文算法最后配准精度收敛于0.001 8 mm,因此本文算法拥有更高的精度和稳定性。该实验表明,在增加少量时间的代价下,本文算法配准精度高于其他多视角配准算法,对于飞机点云数据配准是合适的。

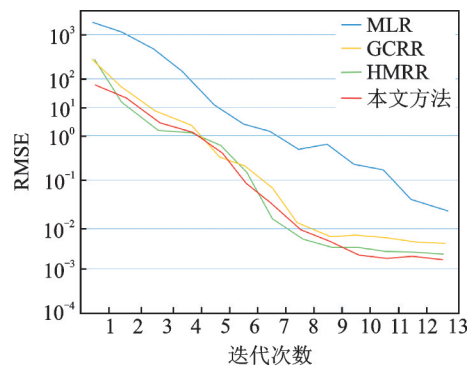


图6 不同配准方法RMSE对比

Fig.6 Comparison of RMSE of four registration methods

表1 不同配准方法精度与效率对比

Table 1 Comparison of accuracy and time consuming of different registration methods

类别	传统方法	MLR	GCRR	HMRR	Ours
算法时间/s	>30	10.6	9.95	11.23	12.91
配准精度/mm	0.264	0.059	0.008 6	0.004 5	0.001 8

4 结 论

针对飞机点云配准精度低的问题,本文设计并实现了一种精准的多视角点云配准方案。通过消除大规模点云中密度变化的影响改善传统的层次配准方法,使得点云位置精确对齐,显著提高配准精度。实验结果证明,即使在存在大量自由曲面的情况下,本文方法准确性和一致性方面明显优于现有方法,因此是飞机检测的可靠方法。

参考文献:

[1] 赵夫群. 由粗到细的颅骨点云模型配准方法[J]. 测

- 绘通报,2018(12): 26-29.
- ZHAO Fuqun. Registration method from coarse to fine of skull point cloud model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(12): 26-29.
- [2] 王森,何群,刘善军,等. 基于地面三维激光扫描的露天矿采剥工程量计算方法[J]. 金属矿山, 2018(12): 134-139.
- WANG Sen, HE Qun, LIU Shanjun, et al. Stripping volume calculation method based on terrestrial 3D laser scanning technique [J]. Metal Mine, 2018(12): 134-139.
- [3] 胡章芳,漆保凌,罗元,等. V-SLAM中点云配准算法改进及移动机器人实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019(1): 170-177.
- HU Zhangfang, QI Baoling, LUO Yuan, et al. Improved point cloud registration algorithm and mobile robot experiment in V-SLAM system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019(1): 170-177.
- [4] 赵夫群,周明全. 文物点云模型的优化配准算法[J]. 计算机应用研究, 2017(12): 371-374.
- ZHAO Fuqun, ZHOU Mingquan. Optimal registration algorithm for point cloud model of cultural relics [J]. Application Research of Computers, 2017(12): 371-374.
- [5] 张旭东,吴国松,胡良梅,等. 基于TOF三维相机相邻散乱点云配准技术研究[J]. 机械工程学报, 2013(12): 8-16.
- ZHANG Xudong, WU Guosong, HU Liangmei, et al. Adjacent scatter point cloud registration technology research based on three-dimensional camera of time of flight[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(12): 8-16.
- [6] 李坪,王培俊,吕东旭,等. 一种新的尖轨点云配准方法及算法加速研究[J]. 计算机仿真, 2018(6): 141-145.
- LI Ping, WANG Peijun, LYU Dongxu, et al. A novel point cloud registration method of tongue rail and algorithm acceleration [J]. Computer Simulation, 2018(6): 141-145.
- [7] 郭王,程效军. 基于激光强度分类的机载与地面激光雷达点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018(6): 409-416.
- GUO Wang, CHENG Xiaojun. Registration method for airborne and terrestrial light detection and ranging point cloud based on laser intensity classification [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018(6): 409-416.
- [8] 王天泽. 产品装配质量可视化预评估技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- WANG Tianze. Research on visual pre-evaluation technology of product assembly quality [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [9] 闻战胜. 飞机钣金件数字化检测中的模型配准技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WEN Zhansheng. Research on model registration in digital inspection for aircraft sheet metal part [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [10] TANG Y, FENG J. Hierarchical multiview rigid registration [J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(5): 77-87.
- [11] WAND M P, JONES M C. Kernel smoothing [M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [12] WANG H, CHIN T J, SUTER D. Simultaneously fitting and segmenting multiple-structure data with outliers [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(6): 1177-1192.
- [13] PULLI K. Multiview registration for large data sets [C]//Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging & Modeling. [S.l.]: IEEE Computer Society, 1999.
- [14] LIU Y, ZHOU W, YANG Z, et al. Globally consistent rigid registration [J]. Graphical Models, 2014, 76(5): 542-553.

(编辑:刘彦东)