文章编号:1674-2869(2026)03-0316-04

基于几何一致性的点云快速配准方法

张 平,沈梦洁,郑明辉,李德龙,郑亚雨,廖 青*
武汉工程大学光电信息与能源工程学院,光学信息与模式识别湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:针对三维重建中多视角点云误匹配率高,导致拼接不稳定、效率低的问题,提出了一种基于几何一致性的点云快速配准方法。该方法通过在两个视角中分别随机提取3组潜在匹配点对构建三角形,并引入全等三角形判据判断两组标志点的几何一致性,若满足判据,则判断为有效匹配点对,用于计算旋转矩阵和平移向量。否则,跳过本次迭代,从而避免了误匹配带来的错误计算。实验结果表明,所提方法在配准精度与传统方法持平的情况下,平均配准时间从1.205 3 s降到0.147 4 s,算法拼接效率提升了约88%。该方法结合搭建的三维重建硬件系统可以很好地对工业零部件进行三维重建,有助于精确测量零部件的尺寸、形状等参数,为智能制造提供了技术支持。

关键词:点云配准;随机抽样一致性;几何一致性;标志点;刚体变换
中图分类号:TN209 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202504010

Geometric consistency-based fast point cloud registration method

ZHANG Ping, *SHEN Mengjie*, *ZHENG Minghui*, *LI Delong*, *ZHENG Yayu*, *LIAO Qing**
School of Optical Information and Energy Engineering, Wuhan Institute of Technology; Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China

Abstract: To address the issues of unstable stitching and low efficiency caused by high mismatch rates in multi-view point cloud registration for 3D reconstruction, in this paper we proposed a fast point cloud registration method based on geometric consistency. The method started by randomly selecting three putative correspondences to form triangles in both views, whose geometric consistency was assessed using triangle congruence criteria. If the conditions were met, the point pairs were considered valid and used to compute the rotation matrix and translation vector; otherwise, the iteration was skipped to avoid miscalculations caused by mismatches. Experimental results showed that the proposed method achieved registration accuracy comparable to that of conventional approaches, while reducing the average registration time from 1.205 3 s to 0.147 4 s—an improvement in registration efficiency of approximately 88%. When integrated with a custom 3D reconstruction hardware system, the proposed method effectively performed 3D reconstruction of industrial components, thereby facilitating accurate measurement of parameters such as dimensions and shape and offering valuable technical support for intelligent manufacturing.

Keywords: point cloud registration; random sample consensus; geometric consistency; marker points; rigid transformation

为落实《关于全面推进实景三维中国建设的通知》提出的于2025年实现全国陆地及主要岛屿地形级实景三维建模的目标,高效的点云拼接技术不可或缺[1]。目前,三维重建技术[2]已广泛应

收稿日期:2025-04-16
基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2024079)
作者简介:张 平,硕士研究生。Email: 18298060662@163.com
***通信作者**:廖 青,博士,教授。Email: liaoqing@wit.edu.cn
引文格式:张平,沈梦洁,郑明辉,等.基于几何一致性的点云快速配准方法[J].武汉工程大学学报,2026,48(3):316-319,328.

用于文物保护[3-4]、工业零部件测量[5-6]、医学检查[7]、虚拟现实[8]等多个领域，其优势在于可以高精度、高效率地获取物体表面完整的三维形貌。

然而在实际应用中，由于硬件测量设备的视角范围有限，以及物体间遮挡的存在，单次测量往往难以获取完整的点云数据，因此需将多视角下具有重叠区域的点云数据拼接至同一坐标系下[9]。在此过程中，受物体材质和测量视角等因素的限制[10-11]，通常需借助基于标志点的方法辅助拼接[12]。该方法依据标志点间欧氏距离的不变性，通过在不同视角下识别几何关系一致的标志点对，并计算其变换矩阵，实现多视角点云的坐标系统。

在已有的研究中，罗先波等[13]利用标志点在空间中具有欧氏距离不变性，通过构造标志点之间的欧氏距离矩阵寻找潜在匹配点对，但该方法误匹配率较高。雷玉珍等[14]在使用欧氏距离矩阵构造潜在匹配点对的基础上，引入随机抽样一致性（random sample consensus，RANSAC）算法，随机选取3组匹配点对计算变换矩阵，有效抑制了噪声与测量误差导致的误匹配，提升了点云拼接的精度与稳定性。杨英保等[15]针对点云拼接中的误差累积问题，引入光束法平差以减小拼接偏差，但该方法较依赖初始配准结果，若初始配准偏差较大，易陷入局部最优，从而导致拼接失败。

尽管RANSAC算法能够有效剔除错误匹配点对，但在迭代次数较少时，该算法可能无法在终止前找到正确的匹配点对。这一现象在测量幅面较大的物体时尤为明显：由于标志点数量增加，潜在匹配点对增多，较少的迭代次数容易导致配准失败。为此，本文在RANSAC算法中引入全等三角形判据，对潜在匹配点对进行几何一致性筛选。仅当潜在匹配点对满足几何一致性条件时，才进一步求解变换矩阵（包括旋转矩阵和平移向量），从而避免无效计算。该方法可显著提高大幅面物体点云配准中的成功率和效率，降低因迭代不足导致的失败风险，增强配准过程的稳定性和实用性，适用于实际工程中对高可靠性与高效率有需求的三维重建任务。

1　基于标志点进行点云辅助拼接的基本原理

使用基于标志点的点云拼接方法，需要在待测物体表面布设具有显著特征的人工标志点，这些标志点在不同测量视角下满足欧氏距离不变性原则。依据该原则，假设存在一对具有重叠标志点的待拼接点云视角（视角A和视角B），视角A中的标志点三维坐标集合可表示为 $P_{\mathrm{A}}=\{p_i|i=1,2,\cdots,n\}$，$n\geqslant 3$，其中 $p_i=\{x_i,y_i,z_i\}$，x_i,y_i,z_i 为集合中第 i 个标志点的坐标。视角B中对应的标志点集合记为 $Q_{\mathrm{B}}=\{q_j|j=1,2,\cdots,m\}$，$m\geqslant 3$，其中 $q_j=\{x_j,y_j,z_j\}$，x_j,y_j,z_j 为集合中第 j 个标志点的坐标。为求解视角A与视角B之间的变换矩阵，即旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与平移向量 $\boldsymbol{t}$，至少需获取3对在两个视角下具有对应关系且非共线的标志点。若不满足该条件，则无法唯一确定变换矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与 $\boldsymbol{t}$。

在点云配准过程中，集合中的标志点并非严格一一对应的潜在匹配点对。根据标志点在三维空间中满足的欧氏距离不变性原则，并考虑到三维重建过程中存在的系统测量误差，通常设定当两个标志点之间的欧氏距离误差小于欧氏距离误差阈值 ε（0.3 mm $\leqslant\varepsilon\leqslant$ 0.5 mm）时，即认为两段距离相等。基于上述准则，获取视角A与视角B中的标志点三维坐标集合后，根据式（1）求得 P_{A} 中任意两标志点之间的欧氏距离 D。

$$D=|p_m-p_n|=\sqrt{(x_m-x_n)^2+(y_m-y_n)^2+(z_m-z_n)^2} \tag{1}$$

求得任意两个标志点之间的欧氏距离后可得到欧氏距离矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}$：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}=\begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix}$$

同理，可计算 Q_{B} 中任意两点之间的欧氏距离，并构建欧氏距离矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}$。随后，将欧氏距离矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}$ 中的每一行和 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}$ 中的每一行进行比较，若对应行中欧氏距离的差值不超过欧氏距离误差阈值 ε，即判定两距离相等。例如，将 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}$ 中的第1行距离值与 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{B}}$ 中的第5行距离值进行比较，在允许的欧氏距离误差阈值范围内，相等距离值的数量不小于3（含自身点），则认为 p_1 与 q_5 是一对潜在的匹配点对。通过遍历所有可能的行组合，可从视角A和视角B对应的标志点三维集合中筛选出潜在匹配点对集合 $P'_{\mathrm{A}}=\{p_{i_1},p_{i_2},\cdots,p_{i_k}\}$，$Q'_{\mathrm{B}}=\{q_{j_1},q_{j_2},\cdots,q_{j_k}\}$，其中 P'_{A}、Q'_{B} 分别是 P_{A} 和 Q_{B} 的子集，且每一对 p_{i_k} 与 q_{j_k} 均为潜在的匹配点对。

2　基于空间几何一致性的误匹配剔除与高效匹配方法

2.1　基于RANSAC算法的标志点误匹配处理

基于欧氏距离矩阵法获取潜在匹配点对时，

存在两方面的误匹配：标志点通过人工粘贴的方式布置时，若标志点在物体表面呈现等距离或其他不合理布局，则可能无法有效区分不同标志点，易导致错误的匹配；受面结构光测量设备的系统噪声及环境光干扰等因素影响，标志点的三维坐标计算可能出现偏差，从而导致欧氏距离矩阵计算产生误差，引起误匹配现象[16]，这些误匹配点的存在，会降低变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$的求解精度，最终影响点云拼接的整体质量。为了降低误匹配点对拼接结果的影响，采用RANSAC算法对基于欧氏距离矩阵方法得到的潜在匹配点对中存在的误匹配点进行过滤，以提高点云拼接的稳定性和精确性。使用RANSAC算法进行匹配点对优化的详细步骤如下：(1)在潜在的匹配点对集合P'_{A}与Q'_{B}中，分别随机选取3对潜在匹配点，计算A、B两个视角下点云拼接的变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$；(2)将视角A下的点云设为目标点云，视角B下的点云为源点云，利用所求变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$对视角B下点云进行空间变换：

$$q'_j = \boldsymbol{R}q_j + \boldsymbol{t} \tag{2}$$

(3)借助K维空间树计算源点云中每个点与目标点云之间的最近邻欧氏距离D_K，设定最近邻距离误差阈值ϵ，如果$D_K < \epsilon$，则判定该点是内点，否则视为外点；(4)统计本次迭代中内点数量N_{inlier}，若内点数量超过历史最大值，则更新变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$；(5)重复步骤(1)~步骤(4)，直到达到预设最大迭代次数K；(6)迭代结束后，使用最终确定的内点集合重新计算变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$，进一步提升拼接的精度。

2.2 基于全等三角形判据的变换矩阵求解

在使用RANSAC算法对潜在匹配点对进行初步误匹配剔除的基础上，本文进一步引入了基于全等三角形判据的几何约束方法。在RANSAC算法每次迭代过程中，从潜在的匹配点对集合中随机选取3对对应点，并分别构成两个三角形，随后采用全等三角形的几何判据对其进行一致性校验。考虑到测量设备存在的系统误差与噪声干扰，设定合理的三角形边长距离误差阈值δ($0.1\,\mathrm{mm} \leqslant \delta \leqslant 0.3\,\mathrm{mm}$)作为判断条件：当两个视角下构成的三角形各边长度之差均小于该阈值时，认为其满足几何一致性要求，进一步进行变换矩阵$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{t}$的求解；否则，直接跳过当前迭代，以此提升变换矩阵求解的效率与稳定性。

3 点云配准实验验证与分析

3.1 设备与参数设置

为验证本文方法的有效性，搭建了基于双目视觉的面结构光三维成像硬件系统[17]，并利用该系统完成了实验数据的采集。系统硬件部分包括两台ME2L-161-61U3C型工业CMOS相机、一台DLP4710型工业投影仪，以及定制的支架和数据传输线。在约0.49 m的实验距离下，该成像系统单次测量的幅面约为600 mm×400 mm，测量误差约为0.03 mm。

3.2 实验步骤

首先，在贴有标志点的被测物体上采集两个视角下的点云数据，分别采用文献[13]、文献[14]及本文方法进行拼接实验，该步骤旨在验证本文方法可以有效去除误匹配点对以及提高拼接速率；随后，对贴有标志点的被测对象进行全视角拼接实验，测试算法的鲁棒性。

3.3 结果比较

搭建的实验测量系统和贴有标志点的Venus实验对象模型，如图1所示。

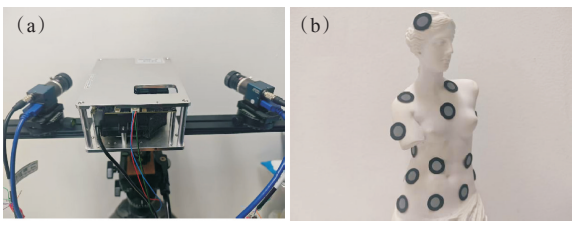

图1 实验测量系统(a)和Venus实物模型(b)

Fig. 1 Experimental setup: measurement system (a) and Venus model (b)

首先，使用图1所示的实验测量系统对贴有标志点的Venus模型的正面进行点云数据采集，即视角A。随后，将Venus模型旋转一定的角度，采集视角B的点云数据。视角A、视角B下的点云数据如图2所示。

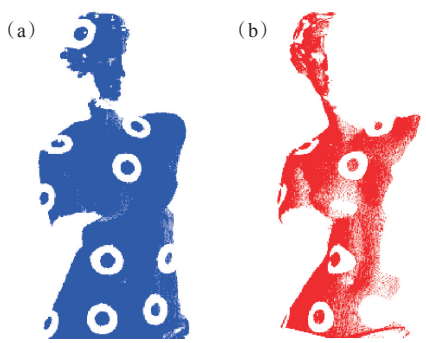

图2 不同视角下点云数据：(a)视角A，(b)视角B

Fig. 2 Point cloud from different viewpoints: (a) viewpoint A, (b) viewpoint B

距离矩阵的计算旨在提取基于距离相似性的潜在匹配点对，结果如表1所示。

表1　潜在匹配点对

Table 1　Potential matching point pairs

P	0	1	1	2	2	3	3	3	4	5	5	5	8	8	8	8
Q	0	1	2	3	4	1	3	6	5	3	4	6	1	2	4	6
距离相等点个数	6	4	7	3	6	3	3	6	6	8	3	3	6	4	3	3

注：P表示距离矩阵$\boldsymbol{M}_{\mathrm{A}}$中第$i$行所对应的标志点，$Q$表示与之匹配的另一视角中的候选标志点。

由表1可知，视角A与视角B中共有7个标志点构成潜在匹配点对。距离矩阵的每一行代表一个标志点与其他所有点之间的欧氏距离集合，通过比较行间距离的相似性可筛选潜在匹配。然而，由于同一标志点会同时满足多个距离相似条件，若仅依赖距离矩阵进行匹配，将产生误匹配。若使用错误的匹配点对求解变换矩阵$\boldsymbol{R}$与$\boldsymbol{t}$，则会引入较大误差，造成点云拼接失败。

为了验证本文所提方法在拼接成功率和误差上的优势，本文采集了Venus模型全视角下的点云数据，与文献[13]以及文献[14]所提方法通过实验进行定量比较，实验结果如图3所示。由图3可知，文献[13]所采用的欧氏距离矩阵法因存在误匹配点对，导致点云拼接失败。

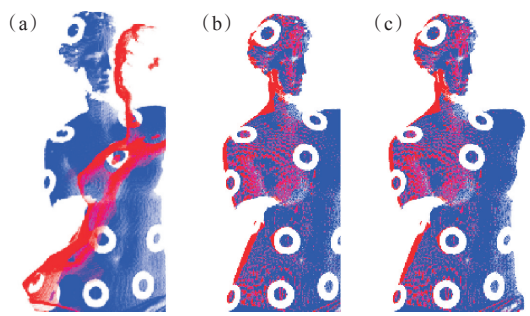

图3　不同方法点云配准结果：(a)文献[13]，(b)文献[14]，(c)本文方法

Fig. 3　Point cloud registration results using different methods: (a) Ref.[13], (b)Ref.[14], (c) the proposed method

如表2所示，文献[13]虽然在拼接时间方面具有明显优势，但其拼接成功率相对较低。相比之下，在相同迭代次数条件下，文献[14]与本文方法在拼接成功率和均方误差(mean squared error, MSE)方面表现一致。然而，文献[14]的平均拼接时间为1.205 3 s，而本文方法仅需0.147 4 s，相比缩短了约88%。

表2　Venus模型对比试验

Table 2　Comparative experimental results on the Venus model

方法	拼接成功率 / %	拼接时间 / s	MSE / mm
文献[13]	30	0.000 7	9.249 5
文献[14]	90	1.205 3	0.864 0
本文方法	90	0.147 4	0.864 0

4　结　论

本文提出了一种基于几何一致性的点云快速配准方法，解决了多视角点云拼接中因误匹配率高导致拼接不稳定、效率低的问题。通过在RANSAC算法中引入全等三角形判据，可以有效剔除误匹配点对，在保证点云拼接精度和成功率不变的前提下，减少错误计算，总体拼接效率提升约88%。在对Venus模型进行的全视角点云拼接实验中，验证了该方法在实际测量环境下的稳定性和拼接效率。该方法为点云拼接问题提供了一种稳定、高效的解决方案，同时因为效率的提升，未来可进一步探索该方法在点云实时拼接和大场景三维重建中的应用。

参考文献

[1] 武汉市测绘研究院办公室. 武汉市测绘研究院实景三维建设成果入选自然资源部和国家数据局“2024年实景三维数据赋能高质量发展创新应用典型案例”[J]. 城市勘测, 2024(4): 10.

[2] 吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的三维形貌与形变测量技术研究进展[J]. 液晶与显示, 2023, 38(6): 730-747.

[3] LUO H, ZHANG K, YANG N, et al. A robust method for multi-view 3D data stitching based on pasted marked points [J]. Measurement, 2024, 228: 114364.

[4] 顾珈静, 刘春, 周骁腾, 等. 基于视觉的明清古家具数字文化档案高精度三维重建[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(2): 22-30.

[5] 申皓, 陈洪宇, 王淇, 等. 基于条纹投影轮廓术的航空高光零件三维测量技术[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 48-54.

[6] 洪汉玉, 吴裕强, 叶亮, 等. 基于线结构光扫描的工件高精度三维测量方法[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46(1): 66-71.

[7] 曾一庭. 基于立体视觉的牙模三维重建系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[8] 李晖. 面向虚拟现实的三维测量技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.

[9] 徐兆阳. 三维重建中的点云配准技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

[10] 李仁忠, 杨曼, 田瑜, 等. 基于ISS特征点结合改进ICP的点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 111503.

(下转第328页)