引文格式：桑旦,潘恺. 基于SIFT点的改进ICP点云自动配准算法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):12-15. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.04.003

基于SIFT点的改进ICP点云自动配准算法研究

桑　旦[1,2]，潘　恺[1,2*]

（1. 上海市测绘院，上海 200063；2. 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室，上海 200063）

摘　要：随着三维点云技术在工程测量、建模等方面应用的不断深入，对点云配准技术提出更高的要求。因此从实际应用的角度出发，对点云数据自动配准算法进行研究，针对常用的粗配准方法的不足，将尺度不变特征转换（SIFT）算法应用于三维点云粗配准中，研究了基于SIFT关键点的粗配准方法；针对传统的迭代最近点（ICP）算法存在的问题，将迭代系数和法线特征约束引入传统的ICP算法中提高配准的效率，实现了对传统ICP精配准算法的改进。实际应用结果表明，基于SIFT点的改进ICP点云自动配准算法可以有效提高配准效率和精度，具有较好的应用价值。

关键词：点云配准技术；SIFT算法；改进ICP算法

中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0012-04

Research on Improved ICP Point Cloud Automatic Registration Algorithm Based on SIFT Points

SANG Dan[1,2], PAN Kai[1,2]

(1. Shanghai Institute of Surveying and Mapping, Shanghai 200063, China;
2. Key Laboratory of Spatial-temporal Big Data Analysis and Application of Natural Resources in Megacities, MNR, Shanghai 200063, China)

Abstract: With the continuous deepening of 3D point application technology in engineering measurement, modeling, and other fields, higher requirements are put forward for point cloud registration technology. We studied the automatic registration algorithm for point cloud data from the perspective of practical applications. In response to the shortcomings of commonly used coarse registration methods, we applied the scale invariant feature transform (SIFT) algorithm to coarse registration, and studied a coarse registration method based on SIFT key points. In response to the problems existing in the traditional iterative closest point (ICP) algorithm, we introduced the iteration coefficients and normal feature constraints into the traditional ICP algorithm to improve the efficiency of registration, and achieved improvements to the traditional ICP precision registration algorithm. The practical application results show that the improved ICP point cloud automatic registration algorithm based on SIFT points can effectively improve registration efficiency and accuracy, and has good application value.

Key words: point cloud registration technology, SIFT algorithm, improved ICP algorithm

目前，点云数据的配准方法主要有3种，分别是手动配准方法、仪器配准方法和自动配准方法。在实际应用中，自动配准方法相较于手动和仪器配准的方法，具有很好的灵活性，自动配准方法通常是从初始配准（即粗配准）和精配准入手[1]。

粗配准工作是将处于不同的坐标系的2个点云数据调整到同一坐标系下，并使2个点云数据尽可能靠近，为后面的精配准提供较好的初始位置。常见的粗配准方法主要分为两类，分别为基于随机采样检测的配准方法和基于几何特征的配准方法，虽然取得了一定成效，但采用的实验数据有一定的局限性，均未对数据量不同、重叠度不同的地面建筑的点云数据进行粗配准研究[2]。

点云数据的精配准是在粗配准的基础之上，通过对点云之间的位置关系的进一步调整，改善整体点云的配准效果。现有的精配准算法一般是基于ICP算法从同名错误点对剔除、搜索算法效率的提升等某一方面来提高精配准方法的性能，但实验对象单一，具有一定的局限性，并且由于增加了配准的计算量，导致耗时较长。因此，在待配准点云数据量不同，重叠度不同的情况下，如何提高精配准算法的速度和精度，增加配准方法的实用性，值得进一步深入研究[3-5]。

项目来源：上海2021年度社会发展科技攻关项目（21DZ1204100）；上海2022年度社会发展科技攻关项目（22DZ1202900）。
第一作者简介：桑旦（1996—），本科，助理工程师，从事点云数据的处理与应用工作，E-mail：shsdcl@qq.com。
通信作者：潘恺（1993—），硕士，工程师，从事点云数据的处理与应用工作，E-mail：1069944904@qq.com。

1　数据采集与预处理

1.1　点云数据获取

本文项目采用的仪器是瑞格VZ400三维激光扫描仪，使用该仪器作业时无需外接电脑，只需外接电池供电后配合机身自带的操作面板即可完成作业。

具体扫描操作步骤如下：

1）根据扫描的对象大小，选择扫描的站点。

2）将扫描仪固定到三脚架上，连接到外接的电源。

3）扫描仪开机自检，打开平板电脑中与仪器配套的软件RISCAN PRO，设置扫描的密度和范围，开始扫描目标。

4）本站点的扫描工作完成以后，保存扫描的点云数据，将仪器移动到下一个站点，重复步骤2）~3），直到所有站点的扫描工作完成。

本文选用某工程项目中的乌龟驮御碑石像数据作为研究对象，并在选用数据时，考虑降低不同站点采集的点云数据重叠度。实际采得三片点云数据，第一站的点云数据共计194 050个点，第二站共计434 442个点，第三站共计501 172个点，每两站点云重叠度约为40%~50%。

1.2　点云数据的去噪

点云数据的去噪采用离群点滤波方法，该方法是一种使用统计分析的技术，从测量的点云数据集中移除测量噪声点的方法，通过对点云数据中的每个点进行统计分析，考虑每个点到邻近点的距离分布情况并计算得出各个点到它 K 个临近点的平均距离。通过标准差设置和均值设置得到一个高斯分布，将计算得出的平均距离与标准距离进行比较，如果平均距离大于标准距离，那么就会被定义为离群点而被删除。

2　点云数据的配准

2.1　基于SIFT关键点的粗配准方法

SIFT算法是一种应用电脑视觉来描述影像局部特征的算法[6-8]。SIFT关键点提取的实现过程分为以下3个步骤：

1）点云数据输入与参数设置。加载实验所需要处理的点云，设置尺度空间标准偏差、高斯金字塔中组的数目、每组计算的尺度数目和限制关键点检测的阈值。

2）进行关键点的检测。依据所设参数，对点云数据构造尺度高斯金字塔，再根据高斯差分算子构造高斯差分金字塔将原始图像进行降阶采样，从大到小，由下到上构成金字塔模型，将差分金字塔中每一个点都与周围一定数量的点进行比较，如果该点为极点，则把该点作为候选的关键点。

3）筛选关键点。利用三维的二次函数定位点云数据中的关键点，通过对比分析去除低对比度的关键点，最终得到SIFT关键点的集合。

本文研究的粗配准方法是一种将SIFT关键点提取与FPFH+SCA-IA的粗配准方法相结合的方法，通过对两片点云数据的参数设置，进行SIFT关键点计算，然后用计算所得的SIFT关键点进行FPFH的计算，将点云数据和FPFH描述的特征向量输入到SCA-IA算法中进行粗配准，其算法流程如图1所示[9-10]。

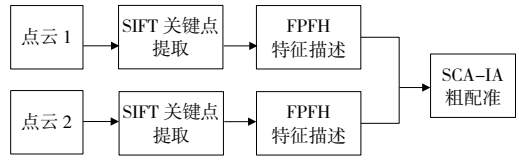


图1　基于SIFT关键点的粗配准算法流程

2.2　基于法线改进的ICP算法

本文针对传统ICP算法在计算数据量较大的点云数据时迭代次数较多，迭代时间较长，对点云数据的初始位姿要求高，配准过程中因错误点对的匹配导致配准的误差大等问题，在迭代次数以及曲率特征约束方面对ICP算法进行改进[11-12]。在传统ICP算法中加入动态迭代因子，同时为避免配准过程中由于错误点对等因素可能造成的局部最优解或精度不佳、配准效果不理想等问题，加入点云的法线计算，通过点云目标的实际曲面特征进行两点云之间错误点对的删除，在误差项中考虑最近对应点的曲率差值以及法线角度差[13-15]，并将其作为配准的约束条件。其实现过程为：

1）计算出半径内所有点 v_i 的均值与协方差：

$$\mu_i^s=\frac{1}{\|v_i\|}\sum_{p_i\in v_i}p_i \tag{1}$$

$$A_i^s=\frac{1}{|v_i|}\sum_{p_i\in v_i}(p_i-\mu_i)^{\mathrm{T}}(p_i-\mu_i) \tag{2}$$

2）对协方差矩阵进行奇异值分解（SVD），从小到大排列特征值：

$$A_i^s=R\begin{bmatrix}\lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3\end{bmatrix}R^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

该点的法向量为最小特征值对应的特征向量，曲率为：

$$k_i=\frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2} \tag{4}$$

3）根据所计算的法线向量和曲率进行匹配点对的约束，将周围法线过于杂乱的点进行删除，将法线角度的差值以及曲率差值过大的点对进行删除，提高配准的准确率，曲率差值约束和法线角度约束公式如下。

$$\left|\log k_i^c - \log k_j^r\right| < \varepsilon_k \tag{5}$$

$$\arcsin\left(\frac{n_i^T \times n_j}{|n_i| \times |n_j|}\right) < \varepsilon_n \tag{6}$$

4）利用ICP算法对匹配点进行迭代，并加入动态迭代因子，计算点云变换的矢量以及迭代变换过程中最近的2次变换量，即 $\mu_i^s = \frac{1}{\|v_i\|}\sum_{p_i \in v_i} p_i$ 中的变化量 Δf，然后，根据变化量 Δf 来更新从 P_k 到 P_{k+1} 的过程，需要将 $P_{k+1} = \Delta f_k(P_{k+1})$ 重复执行 a 次（a 值一般取1~4的整数）。

3 实验与分析

本文数据使用已采集的乌龟驮御碑石像数据作为研究对象，为了减少配准的误差，使用离群点滤波方法进行噪声点去除，完成数据预处理工作的乌龟驮御碑石像的点云如图2所示。

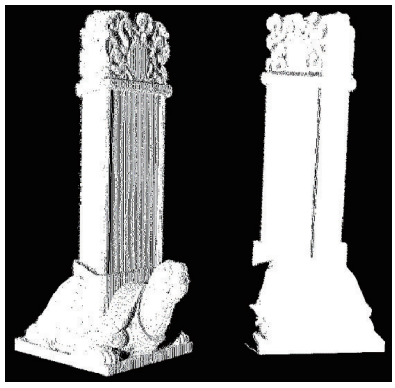


图2 石像预处理后的点云数据

3.1 点云数据粗配准

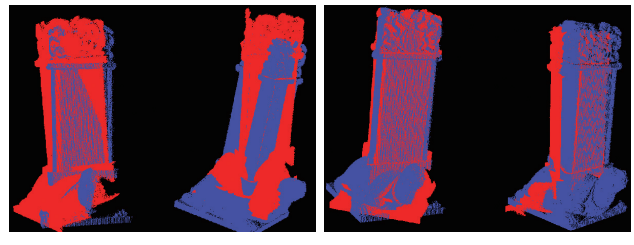
为了提取数量合适且粗配准效果较好的关键点，对SIFT算法中尺度空间标准偏差、限制关键点检测的阈值、高斯金字塔中组的数目、每组计算的尺度数目4个参数进行设置，对两块点云在不同参数下提取出的关键点进行粗配准，并且在关键点个数以及粗配准后，源点云相对于目标点云在不同坐标轴上的旋转角度误差进行比较分析，得到最优的参数，不同参数设置及粗配准性能结果如表1所示。

根据表1可知，当尺度空间标准偏差、限制关键点检测的阈值较小时，SIFT算法提取的关键点个数较多，关键点数量过少会影响对应点对的确定从而影响粗配准效果，但关键点数量过多会影响粗配准的时间。为获取数量合适的关键点进行粗配准，将尺度空间标准偏差、限制关键点检测的阈值设置为0.002进行实验，对高斯金字塔中组的数目、每组计算的尺度数目2个参数进行设置，通过对不同轴旋转角度误差的比较分析得出，当高斯金字塔中组的数目、每组计算的尺度数目都为23，Z 轴的旋转角度误差小于其他组数据的误差，综合比较本组数据的 X 轴与 Y 轴误差之和也较好于其他组的数据。

表1 关键点参数设置及粗配准结果

编号	尺度差	组数目	检测阈值	尺数目	点数	X 轴误差（°）	Y 轴误差（°）	Z 轴误差（°）
1	0.003	30	0.003	30	171 / 183	0.037	0.068	1.558
2	0.003	20	0.003	20	175 / 152	0.083	0.051	2.187
3	0.002	25	0.002	25	294 / 303	0.081	0.040	2.011
4	0.002	24	0.002	24	305 / 302	0.218	0.032	1.518
5	0.002	23	0.002	23	320 / 305	0.026	0.102	0.592
6	0.002	21	0.002	21	304 / 296	0.020	0.122	0.896
7	0.002	20	0.002	20	311 / 308	0.425	0.318	0.655
8	0.002	15	0.002	15	309 / 271	0.501	0.203	1.299
9	0.001	20	0.001	20	1 034/928	0.271	0.157	1.562

综合可知尺度空间标准偏差为0.002、高斯金字塔中组的数目为23、每组计算的尺度数目为23、限制关键点检测的阈值为0.002时，该点云数据粗配准效果最佳。为了使效果更直观，给粗配准后的两块点云赋予不同的颜色，并将本文粗配准算法效果与其他3种常用的粗配准方法进行对比，如图3所示。



a 快速直方图法 b 3DSC法 c 4PCS法 d 基于SIFT点粗配准方法

图3 粗配准效果对比

对比4种方法的粗配准效果图可以看出，由于配准的两块点云重叠度较低，图3a和图3b的粗配准效果不理想，图3c的点云粗配准也出现了一定的错误，将石像后部的点云与石像前部的点云重合在一起，而图3d的粗配准效果较为理想，很好地还原了石像的大致外观，可以为下一步精配准的实现提供较好的初始位姿。同时粗配准过程中记录不同方法所用的时间以及粗配准后源点云相对于目标点云在 X 轴、Y 轴、

Z轴上的旋转角度误差，如表2所示。

表2　粗配准旋转角度误差及时间

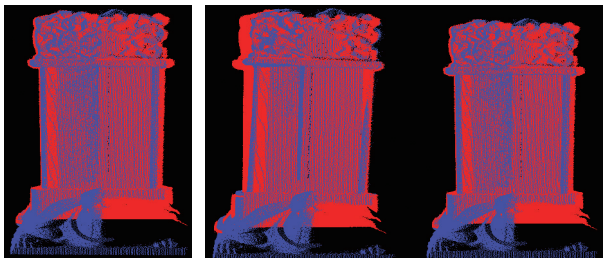
粗配准方法	X轴旋转角度误差（°）	Y轴旋转角度误差（°）	Z轴旋转角度误差（°）	配准时间/s
快速直方图法	0.044	0.680	1.440	427.2
3DSC	0.080	0.131	1.700	161.8
4PCS	2.150	0.597	0.221	197.7
粗配准改进法	0.026	0.103	0.598	104.5

由表2可知，在配准时间上，本文粗配准算法时间最短，3DSC法次之，4PCS和快速直方图法时间较长。从粗配准各个坐标轴的旋转角度误差来看，X轴旋转角度误差较大的是4PCS法，Y轴旋转角度误差较大的是快速直方图法（FPFH+SAC–IA），Z轴旋转角度误差较大的是快速直方图法和3DSC法，而本文研究的基于SIFT关键点的粗配准方法在X轴、Y轴、Z轴上的旋转角度误差较小，且均小于0.6。

3.2　点云数据精配准

使用基于SIFT点的粗配准方法所获取的具有初始位姿的乌龟驮御碑石像点云作为对象，采用基于法线的ICP改进算法进行精配准实验，为了使效果显示更直观，给两块点云赋予不同的颜色进行展示，精配准后的效果如图4所示。

为了验证本文的改进ICP精配准方法的实际效果，与传统ICP的精配准效果进行对比，并给两块点云赋予不同的颜色，对比结果如图5所示。



a 传统ICP算法　　b 改进后ICP算法

图4　精配准后的效果　图5　不同方法精配准的视图效果对比

由图5中不同视图的对比可以看出，传统ICP算法配准后的效果图，在两块点云的拼接处均存在错开的现象，石像边角部分并没有完全的吻合；而改进的ICP算法配准的效果图，两片点云的吻合度均很高，精配准效果较好。

本文的改进ICP算法比传统ICP算法的收敛曲线收敛速度更快，在迭代次数上，本文改进的ICP算法较传统的ICP算法降低46%，均方误差（RMS）降低51%，但由于本文算法在计算上考虑了法线特征的约束，需要计算法线、曲率并进行筛除错误点，所以配准时间方面与传统的ICP算法相差较小。综合迭代误差统计图和此次配准时间和精度，本文所研究的基于法线改进的ICP算法的配准效果较好。

4　结　语

本文从实际应用出发，研究了基于SIFT点的改进ICP点云自动配准算法。在粗配准方面，利用SIFT关键点提取方法对点云进行关键点提取，再通过SCA–IA算法对SIFT关键点和特征进行粗配准，有效提高粗配准的精度和速度。在精配准方面，将迭代系数和法线特征约束引入传统的ICP算法中，解决了运行时间较长，错误点对的匹配会影响精度等问题，实现了对传统ICP精配准算法的改进。实验证明，本文算法相较于传统算法，具有更好的配准精度，有效降低了配准时间，比较适用于数据量较大且重叠度不高的地面建筑点云配准工作。

参考文献

[1] 楚慧娟,李薇. 利用邻域特征点相关性的点云配准算法[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(12):189-191

[2] 侯彬,金尚忠,王赟,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(7):1-19

[3] LoweD G. Object Recognition from Local Scal Invariant Features[C]//Pro. of the 7th International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece,1999:1 150-1 157

[4] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale Invariant Interest Points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110

[5] 张洋. 基于SIFT算法的图像特征点配准技术应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2013

[6] 陈强. 基于特征空间值筛选的点云关键点提取[J]. 地理空间信息,2024,22(1):16-19

[7] 唐菲菲,王巨晖,王章朋,等. 一种顾及主方向的点云配准施工检测方法[J]. 地理空间信息,2023,21(12):43-46

[8] 赵夫群. 点云模型的优化配准方法研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018

[9] 张晗,康国华,张琪,等. 基于改进SAC-IA算法的激光点云粗配准[J]. 航天控制,2019,37(5):67-74

[10] Rusu R B, Blodow N, Marton Z C, et al. Aligning Point Cloud Views Using Persistent Feature Histograms[J]. Proceedings of IROS,2008(9):384-391

[11] 亢瑞红,胡洪,甘梦仙. 基于ICP算法的三维激光扫描点云数据配准方法[J]. 池州学院学报,2014,28(3):68-70

[12] 陈阳. 三维点云数据配准方法研究[D]. 天津:天津大学,2014

（下转第24页）