文章编号:1001-5078(2023)01-0034-07

· 激光应用技术 ·

结合形态描述和直方图特征改进的点云配准

黄 鹏1,丁海勇1,刘春雷2

(1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,江苏南京210044;2. 南京龙测测绘技术有限公司,江苏南京210031)

摘 要:针对点云配准过程中配准效率和精度无法兼得的问题,提出一种将内部形态描述 (ISS)特征点和二进制方向直方图(BSHOT)特征描述符相结合的改进的点云配准算法。该算 法先采用体素格网下采样和 ISS 算法提取特征点;然后通过二进制的方向直方图(BSHOT)特 征描述符结合汉明距离和随机采样一致性算法(RANSAC)进行粗配准;最终利用改进的 ICP 算法进行精确配准。利用多组点云数据对该方法进行验证。结果表明,在相同条件下,改进后 的算法在配准时间和配准精度上均优于其他算法。说明所提出的方法具有较高的配准效率与 精度,且随着点云数量的增多,配准精度的提高效果会增强。

关键词:ISS 特征点;BSHOT 直方图特征描述符;ICP 配准;点云配准

中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.005

Improved point cloud registration combining morphological description and histogram features

HUANG Peng¹, DING Hai-yong¹, LIU Chun-lei²

 $(1.\ School\ of\ Remote\ Sensing\ \&\ Geomatic\ Engineering\ , NUIST\ , Nanjing\ 210044\ , China\ ;$

(2. Nanjing Longce Measurement Technology Co. , LTD, Nanjing 210031, China)

Abstract: In this paper, an improved point clouds registration algorithm combining intrinsic shape signatures (ISS) features and binary signatures of the histograms of orientations(BSHOT) is proposed to address the problem that registration efficiency and accuracy cannot be achieved simultaneously during the point clouds registration process. Firstly, the feature points are extracted by voxel grid sampling and ISS features; then, the BSHOT are combined with Hamming distance and RANSAC algorithm for rough registration; finally, exact registration is performed using the improved ICP algorithm. The results show that the improved algorithm is superior to other algorithms in terms of registration time and accuracy under the same conditions. It shows that the proposed method has higher registration efficiency and accuracy, and the registration accuracy is enhanced with the increase of the number of point clouds.

Keywords: ISS feature point; BSHOT histogram feature descriptor; ICP registration; point cloud registration

1 引 言

目前,三维激光扫描技术已被广泛应用于各种 场景的测量与三维重建。使用三维激光扫描技术可 快速获取建筑物、文物^[1]、工程构件的完整几何信 息,便于后续测量处理。但在实际扫描过程中,由于 扫描对象所处的位置及自身的形状遮挡了光线,无 法得到扫描对象的完整点云,只能获取对象表面部 分点云信息^[2]。利用点云配准技术可以将不同角

作者简介:黄 鹏(1998-),男,硕士研究生,研究方向为三维点云数据处理。

通讯作者:丁海勇(1974-),男,教授,博士,研究方向为点云三维建模,土地利用与变化检测。E-mail:hyongd@163.com **收稿日期:**2022-02-21;修订日期:2022-03-30

度获取的点云数据进行配准,从而得到扫描对象的 完整点云。

目前广泛应用的点云配准算法是 Besl 等提出 的迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法^[3]。 但该算法对配准点云的初始位置依赖性较强,初始 位置较差会陷入局部最优状况,导致配准效果不佳。 为避免上述情况,有学者采用粗配准与精配准相结 合的策略。利用特征描述符来获取点与点的对应关 系进行粗配准,如点特征直方图(Point Feature Histograms, PFH)^[5]和快速点特征直方图(Fast Point Feature Histograms, FPFH)^[6]、以及方向直方图(Signatures of Histograms of Orientations, SHOT)^[7] 等。 采用特征点与特征描述符相结合的方法,以提高点 云配准效率。如李仁忠等将 ISS(Intrinsic Shape Signatures)特征点和 FPFH 相结合^[8];李宇翔等将 ISS 特征点和 SHOT 特征描述符相结合^[2];荆路等将 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 特征点和 FPFH 特征描述符相结合^[9];刘雷等将 SIFT 特征点 与 BSHOT(Binary Signatures of Histograms of Orientations)特征描述符相结合^[10]。这些配准方法具有较 好的整体配准效果,但这些方法中使用了 SIFT 法提 取特征点或利用 SHOT、FPFH 特征描述符进行 SAC - IA 粗配准,均会导致配准时间较长。

针对点云配准过程中配准效率和精度无法兼得 的问题,本研究提出一种将内部形态描述 ISS 特征 点和二进制方向直方图 BSHOT^[11]特征描述符相结 合的改进的点云配准算法。该方法先对点云进行体 素格网下采样,再采用 ISS 算法提取特征点,降低点 云数量。然后对 ISS 特征点计算 SHOT 局部特征描 述符,并将其转化为二进制的 BSHOT 方向直方图特 征描述符,再采用随机采样一致性算法(RANSAC) 去除误匹配点对,获得点云配准的初始变化矩阵。 最后利用改进的 ICP 算法进行精配准,即将传统 ICP 的输入值改变为源点云特征点与整体目标点云 进行点云配准。

2 特征点算法

2.1 形态描述特征点

特征点是指通过一定的数学运算和标准获取具 有丰富信息、稳定且独特的点集,其数量远小于原始 点云数量。内部形态描述 ISS 提取特征点是利用邻 域内协方差矩阵的特征值之间关系来选取具有代表 性和稳定性的点集。主要计算过程如下^[2]:

(1)对点云数据每个点 *p_i* 建立局部坐标系。搜索半径区域为 *r* 内的所有点 *p_j*,计算其与中心点 *p_i* 的距离权值 *w_{ii}*,如式(1):

$$w_{ij} = \frac{1}{\|p_i - p_j\|}, \|p_i - p_j\| < r$$
(1)

(2)计算 *p_i* 与邻域内所有点 *p_j* 的协方差矩阵
 cov(*p_i*),如式(2):

$$\operatorname{cov}(p_{i}) = \frac{\sum_{\|p_{i}-p_{j}\| < r} w_{ij}(p_{i} - p_{j})(p_{i} - p_{j})^{T}}{\sum_{\|p_{i}-p_{j}\| < r} w_{ij}} \qquad (2)$$

(3)计算 cov(p_i)特征值,从大到小排序为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ,并设定阈值 ε_1 、 ε_2 (其值均小于1),若满足 式(3)关系,则该点为 ISS 特征点:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq \varepsilon_1 \\ \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \leq \varepsilon_2 \end{cases}$$
(3)

2.2 直方图特征描述

3D 特征描述符中 SHOT 是较为先进、描述性较好的直方图特征描述符。但由于 SHOT 最终的向量特征整体维度较高(352 维),会导致在后续配准中耗时较长,降低配准效率。因此将 352 维的 SHOT 直方图向量特征转化为 352 位的二进制数表示的BSHOT 直方图特征描述符。该方法不仅大幅度减少内存空间的占用率,而且使计算复杂度降低,可提高后续配准的计算效率。将 SHOT 特征描述符转化为 BSHOT 特征描述符,主要是将 352 维的 SHOT 特征描述符按 4 个为一组进行二进制转化^[11]。设SHOT 特征描述符为 $\{S_0, S_1, \dots, S_{351}\}$,每四个为一组分为 $A_1, A_2 \dots A_{88}$,每组的和为 S_{sum} ,则转化规则如下^[12]:

①若A 中任意 $S_i = 0$,则对应的 B_i 也为0;

②当 A 不满足①时,若存在 S_i 大于 90 % 的 S_{sum},则对应的 B_i = 1,其余为0;

③当 A 不满足①和②时,若存在 S_i + S_j大于
 90 %的 S_{sum},则对应的 B_i = B_j = 1,其余为0;

④当A不满足①、②和③时,若存在S_i+S_j+S_k
 大于90%的S_{sum},则对应的B_i=B_j=B_k=1,其余为0;

⑤若 A 对于①~④均不满足,则任意 S_i 所对应

的 *B*_i 均为 1;

⑥将 88 个组的 *B_i* 组合成 352 位的 BSHOT 特 征描述符 { *B*₀ , *B*₁ , … , *B*₃₅₁ } 。

3 点云配准

点云配准过程分为两部分:粗配准和精配 准^[13]。粗配准常用于位置未知的情况,对两片点云 进行配准,获取较好的位置姿态,为精配准提供良好 配准环境。而精配准是在粗配准基础上进行二次配 准,使点云在配准后误差达到最小。

3.1 粗配准

在粗配准中结合形态描述 ISS 法和 BSHOT 直 方图特征完成粗配准。两者的结合一方面可以降低 点云配准时所需的数量,另一方面可减少后续配准 点相似性计算的复杂度。

在计算配准特征的相似性时,常用欧式距离来 衡量。但本研究采用汉明距离计算相似性确定匹配 点对。通过对二进制数值进行简单的异或运算,统 计结果为1的个数,总数即为汉明距离。当汉明距 离最小时,可认为对应的两个特征点为同一匹配对。 汉明距离的计算如式(4):

$$d = \sum_{i} x_i \bigoplus y_i \tag{4}$$

式中, *d* 为汉明距离; *x* 和 *y* 表示两片点云中对应的 BSHOT 直方图特征描述符; ① 表示异或运算,即相 同则为0,不同则为1。

由于点云的稀疏性、噪声等影响,仅采用汉明距 离计算相似性匹配容易形成错误匹配对。为避免此 类情况,研究中也引入随机采样一致性(RANSAC) 算法去除点云中错误的匹配对,从而估计初始变化 矩阵。

3.2 精配准

传统的点对点 ICP 配准算法中,可分为两种情况:(1)未使用特征点时,将全部的源点云数据与目标点云数据进行点与点的计算配准,但该方法由于 是全部点云参与计算,其配准精度较高,但耗时较长。(2)引入特征点时,采用两片点云的特征点作 为参与值,其配准速度较快,但精度不如使用全部点 云配准效果好,易受特征点影响。

因此在 ICP 精配准中本研究将上述两种方法结 合形成一种新的改进的 ICP 算法,即在精配准过程 中,源点云使用特征点,而目标点云使用全部点数 据,作为 ICP 配准的输入值。该方法既采用了特征 点的代表性又结合了全部点的整体性,一方面可保 留一定的配准精度,另一方面也可减少参与配准的 点云数量,使配准时间缩小。

3.3 配准过程

点云配准流程图如图1所示。



图1 点云配准算法流程

Fig. 1 Point cloud registration algorithm flow

研究中的点云配准其主要过程为:①使用体素 格网对初始点云下采样,减少点云数量。②使用形 态描述 ISS 提取方法提取特征点。③使用 SHOT 特 征描述符对特征点进行描述。④使用二进制转换规 则将 SHOT 特征描述符转化为 BSHOT 直方图特征 描述符。⑤使用汉明距离寻找对应的特征点点对。 ⑥使用 RANSAC 剔除错误特征点点对,获取初始变 化矩阵。⑦使用改进的 ICP 算法进行迭代配准,获 取最终精确变化矩阵,完成点云配准。

改进的配准算法在粗配准时采用 BSHOT 直方 图特征描述符和汉明距离相似性度量方法,相比于 传统的 SAC – IA 算法可减少配准时间。因此基于 配准时间较短的基础上,采用改进的配准方法可提 高点云最终配准的精度,形成一个较高效率性与精 确性共存的点云配准算法。

4 实验与分析

4.1 实验数据

实验数据采用斯坦福大学扫描的 Bunny 数据、 Armadillo 数据和 Dragon 数据,三组点云数据如图 2。 实验平台为 Intel(R) Core(TM) i7 - 10700 CPU@ 2.90GHz 处理器,16G 运行内存,操作系统为 Windows10 64 位操作系统,编译环境为 Visual Studio 2017 C++,并结合第三方工具开源点云库 PCL1.9.。



(a) Bunny原始点云
 (b) Armadillo原始点云
 (c) Drage
 图 2 原始配准点云图
 Fig. 2 Original registration Point cloud

4.2 实验结果与分析

由于三组点云的数据量较大, bunny 数据共 35, 947 个点, armadillo 数据共 172,974 个点, dragon 数 据更是高达 437,645 个点。而大量点云会降低配准 效率,因此实验过程中先进行体素格网下采样,再提 取关键点来降低点云数量,提高点云配准效率。

为验证算法的高效率性与精确性,将所提出算 法与文献[10]的 SIFT + BSHOT 算法、文献[8]的 ISS + FPFH + SAC - IA 算法、以及 ISS + SHOT + SAC - IA 算法进行对比。为更好对比实验,控制体素格 网下采样和关键点提取的点云个数保持一致。对三 组点云,四种算法进行点云的粗配准结果如图 3 所示。



(a) SIFT+BSHOT

(b) ISS+FPFH+SAC-IA



(c) ISS+SHOT+SAC-IA
 (d) 本文算法
 图 3 四种算法的粗准结果图
 Fig. 3 Rough registration results of the four algorithms

本文算法在精配准中使用改进的 ICP 精配准方 法,其余三种对比算法采用传统的点对点 ICP 配准 方法。为确保实验算法的可比性,精配准中相关参 数设置一致。对三种不同数量点云,利用四种算法 进行精配准。为便于体现最终效果的差异,我们仅 截取局部区域(Bunny 的嘴部; Armadillo 的右臂; Dragon 的头部)进行显示,其结果如图 4。





为验证配准精度,通过计算配准后两点云间的 均方根误差 RMSE 对比不同算法的精度, RMSE 的 计算如式(5):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{N} ||Tp_{i} - q_{i}||^{2}}{N}}$$
(5)

式中, N表示点云总数; T表示最终变化矩阵; Pi 和 p_i分别表示源点云与目标点云。

不同算法对点云的配准效果不同,本研究在配 准精度和时间两个方面进行量化对比评估,表1、表 2、表3分别代表三组不同数量点云的配准结果统 计表。

将不同算法配准效果评估表中的精配准均方根 误差和配准时间用直方图表示,可明显对比其精确 性和高效性,如图5所示。

表1 Bunny 点云数据的不同算法配准效果评估表 Tab. 1 Evaluation table of registration effect of different algorithms of Bunny point cloud data

Taxi I Dialation and of Togotanion encor of amotoric algorithms of Dami, point croad and						
算法	下采样点云 (源/目标点云)	特征点个数 (源/目标点云)	均方根误差/mm (粗/精配准)	提取特征点时间/s	总配准时间	

算法	「禾梓点云 (源/目标点云)	将征点个致 (源/目标点云)	均力根误差/mm (粗/精配准)	提取特征点时间/s	总配准时间/s
SIFT + BSHOT	12 906/16 357	327/591	6. 43/2. 07	52. 181	56. 280
ISS + FPFH + SAC - IA	12 906/16 357	327/591	2. 11/1. 31	4. 457	12. 386
$\mathrm{ISS} + \mathrm{SHOT} + \mathrm{SAC} - \mathrm{IA}$	12 906/16 357	327/591	3.74/1.09	4. 449	15. 321
本文算法	12 906/16 357	327/591	25.69/1.01	4. 470	8. 182

表 2 Armadillo 点云数据的不同算法配准效果评估表

Tab. 2 Evaluation table of registration effects of different algorithms of Armadillo point cloud data

算法	下采样点云 (源/目标点云)	特征点个数 (源/目标点云)	均方根误差/mm (粗/精配准)	提取特征点时间/s	总配准时间/s
SIFT DELIOT	10 202 /21 470	401/078	17 22/2 28	77,060	95 565
51F1 + B5H01	19 292/21 4/0	491/9/0	17.22/2.20	//. 900	65. 505
$\mathrm{ISS}+\mathrm{FPFH}+\mathrm{SAC}-\mathrm{IA}$	19 292/21 470	491/978	3. 47/0. 90	4. 998	18.712
ISS + SHOT + SAC – IA	19 292/21 470	491/978	1. 27/0. 55	4. 996	23. 412
本文算法	19 292/21 470	491/978	16. 35/0. 34	5. 025	14. 671

表 3 Dragon 点云数据的不同算法配准效果评估表

Tab. 3 Evaluation table of registration effects of different algorithms of Dragon point cloud data

算法	下采样后点云个数 (源/目标点云)	提取特征点个数 (源/目标点云)	均方根误差/mm (粗/精配准)	提取特征点时间/s	总配准时间/s
SIFT + BSHOT	20 284/24 442	581/1 109	9.91/2.38	94. 147	107. 657
ISS + FPFH + SAC – IA	20 284/24442	581/1 109	4.06/0.93	5. 329	24. 024
ISS + SHOT + SAC – IA	20 284/24 442	581/1 109	1. 78/0. 66	5. 279	29. 203
本文算法	20 284/24 442	581/1 109	10.68/0.13	5. 318	23. 125



从配准结果图、效果评估表和效果对比图分析 可知:

(1) 在特征点提取方面。本文算法采用 ISS 特征点提取方法,相较于 SIFT + BSHOT 算法中的 SIFT 提取方法具有较大的优势。从表 1 ~ 表 3 中两种特征点提取的时间可得出同样结论,在提取相同个数的特征点时,ISS 特征点由于其计算的简洁性,使得所耗费时间远小于 SIFT 特征点。

(2)在配准精度方面。本文算法基于 BSHOT 特征描述符采用汉明距离、RANSAC 算法进行粗配 准,从表1~表3可知其粗配准精度不如对比算法 中 SAC – IA 方法的精度。原因为 SHOT 特征描述 符转为二进制 BSHOT 直方图特征描述符时,存在一 定程度的信息缺失。另外从图 5(a)中可知,本文所 提出的点云配准方法提高了点云的最终配准精度。 尤其对于点数较多的点云集,其精度提高效果会更 好。从表1~表3中的精配准均方根误差可知,对 于三种不同数量的点云:Bunny、Armadillo、Dragon 数 据,本文所提出的方法相较于对比算法中精度最高 的算法(ISS + SHOT + SAC – IA 算法)的 RMSE 分别 提高了 0.08 mm,0.11 mm,0.53 mm。对于 Dragon 数据,其精度提高了约 80.3%。

(3)在配准时间方面,从图 5(b)中可知,无论 是点云数量较少的 Bunny 数据,还是 Armadillo 数 据,或是数量较多的 Dragon 数据,本文算法的总配 准时间均少于其余三种配准算法的配准时间。但随 着点云数量的增加,其配准效率优势也会减弱。从 表1和表3可知本文算法与对比算法中耗时最少的 算法(ISS + FPFH + SAC - IA 算法)的时间相比, Bunny 数据配准时间减少了4.204 s,但对于 Dragon 数据本文算法在时间方面仅减少了0.899 s。

对比分析可知,本文算法在配准耗时上,比其余 三种算法效率更高、时间更短。且算法中将形态描 述 ISS 与 BSHOT 直方图特征以及改进后的 ICP 算 法结合,其最终的配准精度也均高于其余算法精度。 这证明了本研究所提出的配准算法同时具备较高的 效率性与精确性。

5 结 语

针对点云配准过程中配准效率和精度无法兼得 的问题,本研究提出一种新的点云配准算法。该算 法基于内部形态描述 ISS 特征提取和 BSHOT 直方 图特征配准的快速性,再结合改进的 ICP 算法进行 精确配准。通过对不同数量点云数据(Bunny 数据、 Armadillo 数据和 Dragon 数据)进行实验对比,结果 表明所提出算法在配准精度和时间方面均高于 SIFT + BSHOT 算法、ISS + FPFH + SAC – IA 算法、以 及 ISS + SHOT + SAC – IA 算法。说明本研究提出的 算法在点云配准方面具有较高的精确性与效率性, 且当点云数量较多时,其配准精度的提高效果会有 所增强,但配准效率的优势会减弱。

参考文献:

- [1] Suo Junfeng, Liu Yong, Jiang Zhiyong, et al. Modeling of ancient building based on 3D laser scanning point cloud data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, (3): 179-185. (in Chinese)
 索俊锋,刘勇,蒋志勇,等. 基于三维激光扫描点云数 据的古建筑建模[J]. 测绘科学, 2017, (3): 179-185.
- [2] Li Yuxiang, Guo Jiming, Pan Shangyi, et al. A point cloud registration algorithm based on ISS-SHOT features [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020, (4):21 26. (in Chinese)
 李宇翔,郭际明,潘尚毅,等. 一种基于 ISS-SHOT 特征的点云配准算法[J]. 测绘通报, 2020, (4):21 26.
- [3] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2):239 – 256.

- [4] Guo Y, Sohel F, Bennamoun M, et al. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition[J]. International Journal of Computer Vision, 2013,105(1):63-86.
- [5] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Persistent point feature histograms for 3D point clouds [C]//Intelligent Autonomous Systems 10, IAS 2008. 2008:119 – 128.
- [6] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms(FPFH) for 3D registration [C]//EEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2009: 3212 3217.
- Salti S, Tombari F, Stefano L D. Shot: unique signatures of histograms for surface and texture description [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2014, 125 (8):251 -264.
- [8] Li Renzhong, Yang Man, Tian Yu, et al. Point cloud registration algorithm based on the ISS feature points combined with improved ICP algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 312 319. (in Chinese) 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 (11): 312 319.
- [9] Jing Lu, Wu Bin, Fang Xilu. Point cloud registration method based on the SIFT feature points combined with ICP algorithm[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7):944-950.

(in Chinese)

荆路,武斌,方锡禄. 基于 SIFT 特征点结合 ICP 的点云 配准方法[J]. 激光与红外,2021,51(7):944-950.

- [10] Liu Lei, Bai Yanhong, Wang Yin, et al. Point cloud registration method base on 3DSIFT and BSHOT feature [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(7):944 950. (in Chinese) 刘雷, 柏艳红, 王银,等. 基于 3DSIFT 和 BSHOT 特征的点云配准方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(7):848-852.
- [11] Prakhya S M, Liu B, Lin W. B-SHOT: a binary feature descriptor for fast and efficient keypoint matching on 3D point clouds[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015:1929 – 1934.
- [12] Tang Quan, Zuo Tao, Tao Qiang. 3D scene reconstruction based on improved B-SHOT feature descriptor[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(2):124 128, 132. (in Chinese)
 汤泉, 左韬, 陶强. 基于改进 B-SHOT 特征描述符的三 维场景重建[J]. 现代电子技术, 2019, 42(2):124 128, 132.
- [13] Xie Xiaopeng, Gu Jiawei. An improved two-dimensional ICP point cloud registration algorithm[J]. Laser & Infrared,2021,51(7):951-955. (in Chinese) 谢小鹏,古家威. 一种改进的二维 ICP 点云配准算法 [J].激光与红外,2021,51(7):951-955.