

# 一种聚类改进的迭代最近点配准算法

周文振 陈国良 杜珊珊 李飞

中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 为了满足高精度的室内位置服务需求,提出了一种利用 K-means 聚类改进的迭代最近点(ICP)算法来构建结构化的二维室内地图。通过对二维激光扫描仪获取的点云数据的聚类分析,将每一帧的数据进行聚类,并通过几何中心的平移对点云数据进行预配准,利用聚类及预配准的结果对点云数据进行精确配准得到全局最优解。聚类改进的 ICP 算法相比于传统的 ICP 算法,在仅使用单一的二维激光扫描仪采集的点云数据为数据源时,能获得较高精度的配准结果。实验表明,该算法具有适用性强、配准精度高等优点,有助于在单一传感器下快速、精准地构建室内地图。

**关键词** 测量; 迭代最近点; K-means 聚类; 点云配准; 室内地图

**中图分类号** TP249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.051202

## An Improved Iterative Closest Point Algorithm Using Clustering

Zhou Wenzhen Chen Guoliang Du Shanshan Li Fei

*School of Environment Science and Spatial Informatics,*

*China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*

**Abstract** In order to meet the demand of indoor location service, a new iterative closest point (ICP) algorithm based on K-means clustering is proposed to construct a structured two-dimensional indoor map. Based on the clustering analysis of the point cloud data obtained by the two dimensional laser scanner, the data of each frame is clustered, and the cloud data is pre-registered by the translation of the geometric center. The global optimal solution is obtained by the accuracy registration of the cloud data after clustering and pre-registering. Compared with the traditional ICP algorithm, the improved ICP algorithm can obtain higher accuracy registration results when the point cloud data is collected by a single 2D laser scanner. Experiments show that the algorithm has the advantages of strong robustness and high registration accuracy, which can help to construct the indoor map quickly and accurately under the single sensor.

**Key words** measurement; iterative closest point; K-means clustering; point cloud registration; indoor map

**OCIS codes** 120.5800; 280.3420; 140.3290

## 1 引言

构建高精度的室内地图是实现室内定位及满足位置服务需求的重要前提,对于结构化的室内环境,建筑物的平面坐标加上楼层信息就足以满足人们对于室内位置的需求。传统的室内地图构建方法多是基于三维激光扫描仪获取的三维点云数据处理获得<sup>[1-3]</sup>。此时获取的室内地图相对于人们所需求的位置信息有一定的冗余,而且三维激光扫描仪设备昂贵,所采集的点云数据量大,对于相关设备的存储及计算能力有一定要求。相比于三维激光扫描仪,二维激光扫描仪在设备价格及对相关设备的性能要求上具有明显优势,因此在

**收稿日期:** 2015-11-19; **收到修改稿日期:** 2015-12-18; **网络出版日期:** 2016-03-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(41371423)、国家 863 计划(2013AA12A201)、江苏高校优势学科建设工程(SZBF2011-6-B35)

**作者简介:** 周文振(1990—),男,硕士研究生,主要从事室内地图更新方面的研究。E-mail: zhou0558@126.com

**导师简介:** 陈国良(1977—),男,博士,副教授,主要从事室内外无缝定位技术、室内地图更新等方面的研究。

E-mail: chglcumt@163.com

研究中将使用二维激光扫描仪。

受限于仪器及室内环境的限制,单次测量无法获得建筑物的完整信息,因此在后期点云处理中就需要对各帧数据进行配准<sup>[4]</sup>。点云配准中应用最为广泛的是迭代最近点算法(ICP)及其改进算法<sup>[5-8]</sup>,传统的改进算法多是基于三维点云数据的几何特征考虑点云的曲率及曲面的法向量等信息<sup>[9-12]</sup>,然而这些对于二维点云数据的精确配准就不具有现实意义。文献[13]提出利用贯序扫描匹配的方法配准二维点云提高了配准精度,但此方法增加了配准次数无疑会损失配准的时间效率,文献[14]提出基于环境划分的局部 ICP 配准方法构建二维平面图,能有效解决大范围下 ICP 算法的实时性,但该方法并不是对 ICP 算法的改进。而传统的 ICP 算法容易陷入局部极值、对点云数据的初始位置反应灵敏等。因此本文在前人研究的基础上结合二维点云数据的特点提出一种利用聚类改进的 ICP 算法,改善二维点云数据配准精度,提高配准的时间效率。

## 2 聚类改进的 ICP 算法

### 2.1 传统的 ICP 算法

ICP 算法是一种直接的点云拼接算法,通过将两片具有一定重合区域的点云数据,利用最小二乘法优化思想,多次迭代,使其对应的最近点重合,其基本的算法流程如图 1 所示。 $Q$  是原始点云数据集, $P$  是待配准点云数据集,由于测量误差的存在,两片点云不可能完全配准,因此当旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  满足

$$\min [f(\mathbf{R}, \mathbf{T})] = \sum_{i=1}^n \|q_i - (\mathbf{R} \times p_i + \mathbf{T})\|^2 \quad (1)$$

时认为配准效果达到最优,停止迭代运算或迭代次数达到限值停止迭代运算,此时  $\mathbf{R} \times P + \mathbf{T}$  即为配准后的点云数据集。(1)式中  $q$ 、 $p$  分别为原始点云数据集和待配准点云数据集中的点, $n$  为  $Q$  和  $P$  同名点的个数, $f(\mathbf{R}, \mathbf{T})$  为配准后两点云数据对应点集的欧式距离。

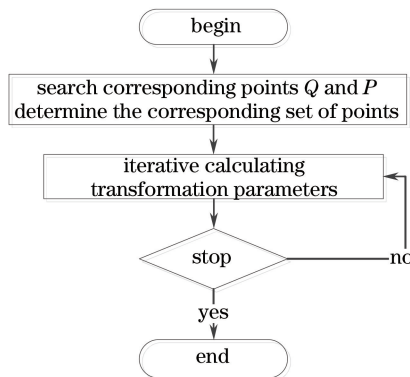


图 1 ICP 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of ICP algorithm

### 2.2 K-means 聚类分析

从 ICP 算法流程图可以看出,算法得以实现的首要条件是确定原始点云和待配准点云间相互重合的对应点集,文献[7]也指出搜索两点云间最近点对是整个算法的关键,也是最终快速、准确地得到配准结果的保证。传统的 ICP 算法在最近点搜索时,将两个点云数据集中的元素一一进行对比判断,在此过程中算法将耗费一定时间,且全局性的搜索将会引入错误同名点对,显然这将会影响到点云配准的精度。在考虑到结构化的室内环境中二维激光扫描仪所采集的点云数据也将呈现一定的结构化特征,此时将聚类分析的方法引入点云数据的预处理中,将点云数据按其几何结构划分,分类进行点云数据集的搜索,再按每一类进行精确配准,最后选取合适的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  使点云配准精度达到最优。

K-means 聚类<sup>[15]</sup>的算法思想较为简单、实现过程易于描述,且 K-means 算法是以距离作为相似性的评价指标,在一定程度能反映点云数据的几何特征,因此被采用。然而 K-means 算法的聚类质心的选择对于聚类结果有直接的影响<sup>[16]</sup>。如图 2 所示,两张图均为 K-means 算法在  $K=3$  时对第一帧点云数据进行两次聚类的结果,从图中可以看出两次聚类的结果在几何结构上有明显差异,图 2(a)中红色和蓝色的点云分别

是以走廊两侧作为分类标准,绿色点云是以距离激光扫描仪几何距离远近作为分类依据,而图 2(b)中绿色、蓝色和红色的点云则分别都是以距离激光扫描仪的几何距离远近为依据进行划分。因而图 2(b)中的聚类结果更符合室内环境的几何构造。

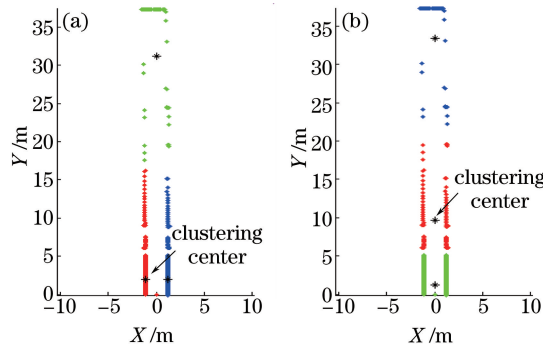


图 2 不同分类依据的 K-means 聚类结果。(a) 分类依据 1; (b) 分类依据 2

Fig. 2 K-means clustering results with different classifications. (a) Classification one; (b) classification two

为此在对各帧点云数据进行 K-means 聚类时,将点云的初始聚类中心设定为点云所在区域内的任意点,而非限定于点云数据内的点。经过实验验证,对于图 2 所示的结构化的点云数据,其每帧点云数据的聚类结果均呈现为图 2(b)所示的样式。

### 2.3 改进算法的实现步骤

为了解决传统 ICP 算法对于待配准点云数据集初始位置敏感的问题,在进行精确配准以前,分别对原始点云数据集和待配准点云数据集计算其几何中心,将待配准点云数据集按其与原始点云数据集几何中心之差( $T_{center}$ )进行整体平移,使其与原始点云数据集的几何中心重合,称为预配准。随后,将原始点云数据集和待配准点云数据集用 K-means 聚类算法分成同等数量的类别,分别记为  $q_i$  和  $p_j$  ( $i=j=1, \dots, k$ ) (下同),  $k$  为类别数,计算其聚类中心  $c_{q_i}$  和  $c_{p_j}$ ,并按照图 3 伪代码所示对聚类后的点云数据集进行配对。

由前面的论述可知对两点云数据集的分类都是以距离激光扫描仪的几何距离为依据,因此成功配对的点云数据集,每一对都包含一定的重叠区域且大大减少了重叠区域以外的点云数量。将计算的复杂度从  $O(Q \times P)$  降低到  $O[\sum_{i=1}^k (q_i \times p_j)]$ , 其中  $\sum_{i=1}^k q_i = Q$ 、 $\sum_{j=1}^k p_j = P$ ,  $q_i$  与  $p_j$  为同一类点云且成对出现。

将配对后的点云数据集分别进行精确配准并计算其局部最优旋转矩阵  $R_i$  和平移向量  $T_i$ , 计算配准后的点云数据集的公式为:

$$P_{new} = R_i \times (P + T_{center}) + T_i, \quad (2)$$

式中  $P_{new}$  表示为配准后的点云数据集。将  $P_{new}$  按照(1)式的准则选取使得  $f(R, T)$  最小的  $R_i$  和  $T_i$ , 此时  $R_i$  和  $T_i$  即为全局最优解。K-means 聚类改进的 ICP 算法的基本流程如图 4 所示。

```

1 input Q,P;
2 (q,center_q)=K-means(P,K);
3 (q,center_p)=K-means(P,K);
4 for i=1:k
5 for j=1:k
6 distance=||q_i-p_j||;
7 if distance=min
8 output q_i contact p_j;
9 end
10 end

```

图 3 配对点云的伪代码

Fig. 3 Pseudo code of pairing point cloud

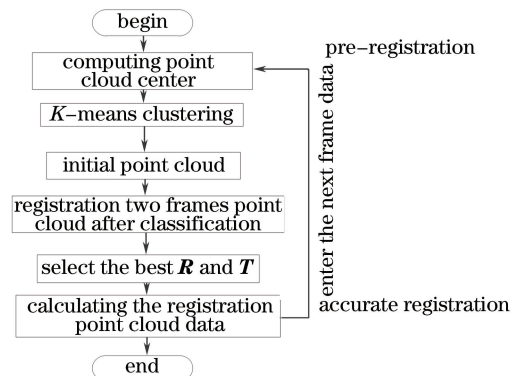


图 4 改进算法流程图

Fig. 4 Flow chart of improved algorithm

### 3 实验与分析

为了验证所提算法的有效性,实验采用如图 5(a)所示的二维激光扫描仪(SICK LMS511-20100)。实验时通过 SOPAS 软件设置扫描的角度范围为  $-5^{\circ}\sim 185^{\circ}$ ,角度分辨率为  $0.1667^{\circ}$ ,扫描频率为 25 Hz,因此一帧点的个数为 1141 个。

实验的场地设置在如图 5(b)所示的结构化走廊环境下进行,实验采集的点云数据如图 2 所示,由于激光扫描仪角度分辨率固定,因而从图中可以看出点云的分布并不均匀。实验采用的对比算法为传统的 ICP 算法,对比实验仅考虑两帧点云间的配准结果。

为验证所提的改进算法,选取激光扫描仪前进方向上相差 7.1 m 的两帧点云数据进行配准实验,分别测试分析传统的 ICP 算法、中心平移的 ICP 算法(T-ICP)、无中心平移的聚类改进算法(KICP)和有中心平移的聚类改进算法(T-KICP),图 6 是 T-KICP 分类配准结果,4 种算法的总体配准结果如图 7 所示。



图 5 (a) 仪器; (b) 场地

Fig. 5 (a) Apparatus; (b) field

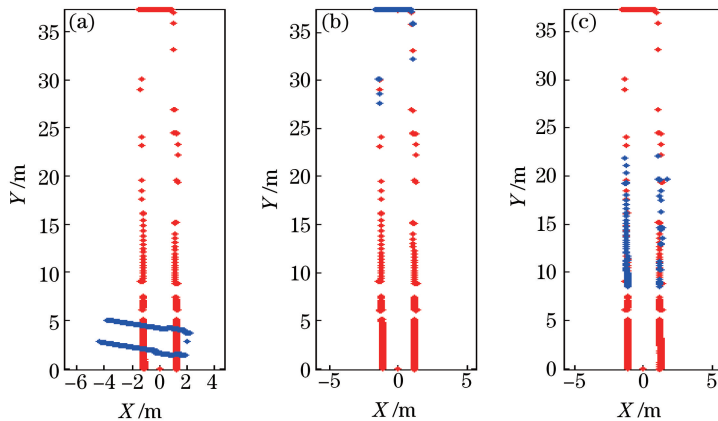


图 6 T-KICP 算法分类配准结果。(a) 情况一; (b) 情况二; (c) 情况三

Fig. 6 Registration results of T-KICP algorithm. (a) Situation one; (b) situation two; (c) situation three

图 6 蓝色点云为待配准点云配准后的效果,红色点云为原始点云数据集(下同),从图中可知分类配准结果的效果并不都符合实际情况,图 6(a)的配准结果已严重失真,图 6(c)的配准结果在 X 方向上具有较好的精度,但在 Y 轴方向上明显与实际位置相偏离,图 6(b)相较于图 6(a)、(c)具有很好的配准精度。因此其总体配准的  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  就是图 6(b)中该类的局部配准  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ ,总体的配准结果如图 7(d)所示。图 7(a)、(b)和(c)分别是应用 ICP、T-ICP 和 KICP 算法配准的结果,从图中可以看出 ICP 算法并不能正确地配准两帧点云数据,对于平移向量  $\mathbf{T}$  的计算存在严重失真;T-ICP 算法相比于 ICP 算法在前进方向上的误差相对减小(中心平移的引入),但也看出 ICP 算法对于点云的初始位置过于敏感,其旋转矩阵  $\mathbf{R}$  相比于 ICP 算法有较大改变;KICP 算法在一定程度上缩小了配准误差,但是由于初始位置的影响,其结果和真实值仍有较大出入。

图 8 所示是 4 种算法配准两帧点云所耗费的时间,4 种算法迭代次数的最大值均设置为 100 次,实验中 ICP 和 T-ICP 算法迭代次数均为 100 次;KICP 算法的迭代次数分别为 100 次、17 次和 5 次;T-KICP 算法的迭代次数分别为 34 次、22 次和 25 次。从算法耗时和迭代次数可以看出当点云的初始位置接近于真实位置时,能有效减少计算量将时间效率提高 25% 以上;分类配准的方法也能将配准的时间效率提高 20% 以上,因

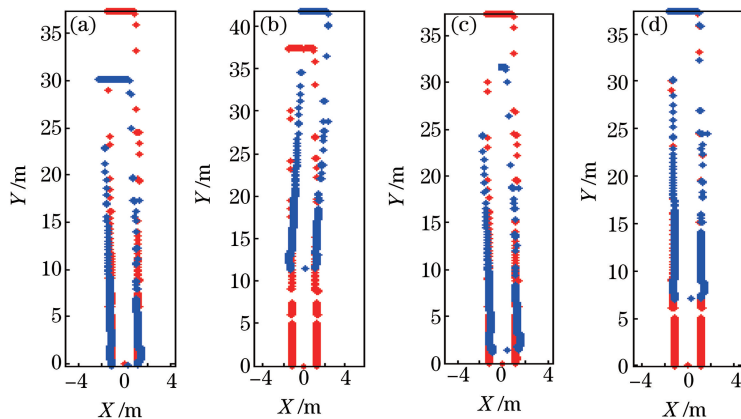


图 7 4 种算法配准结果。(a) ICP; (b) T-ICP; (c) KICP; (d) T-KICP

Fig. 7 Four algorithms registration results. (a) ICP; (b) T-ICP; (c) KICP; (d) T-KICP

而T-KICP算法相比于ICP算法在时间效率上提高了40%以上。

图9(a)、(b)和(c)分别是与前进方向上相差1.7、2.6、7.1 m的三组点云数据配准结果,从图中可知T-KICP算法由于引入了中心平移和分类配准的方法很好地克服了由于点云初始位置差异而对配准结果产生显著影响的缺点。

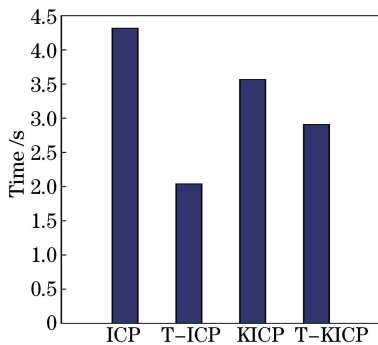


图 8 4 种算法耗时

Fig. 8 Time consuming of four algorithms

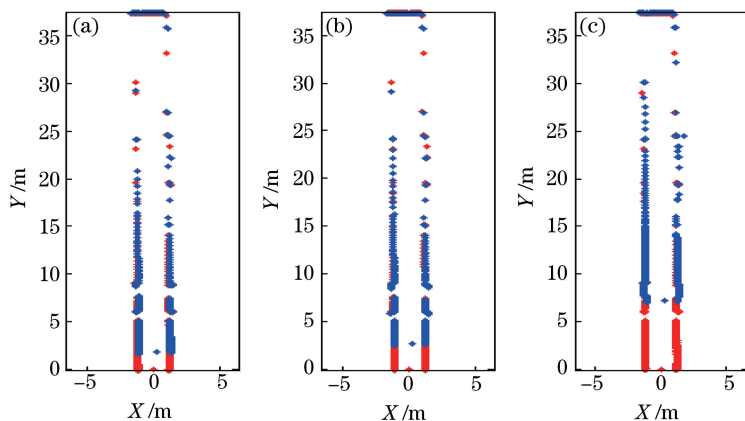


图 9 不同初始位置的配准结果。(a) 位置一; (b) 位置二; (c) 位置三

Fig. 9 Registration results for different initial positions. (a) Position one; (b) position two; (c) position three

## 4 结 论

针对在结构化的室内环境中应用二维激光扫描仪构建室内地图,提出用聚类改进的ICP算法配准二维点云。利用两帧点云间中心之差作为预配准的输入值,并将二维点云数据按照其几何特征进行聚类再分类

配准,最大限度地降低点云初始位置对于配准的影响,并减少了错误同名点对匹配的几率。实验结果表明,聚类改进的 ICP 算法对于二维点云数据配准具有很好的适用性,在提高配准精度的同时也加快了配准的效率。未来的工作是进一步研究高精度的二维点云配准方法及构建全局性的高精度室内地图。

### 参 考 文 献

- 1 Pingbo Tang, Daniel Huber, Burcu Akinci, *et al.*. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques[J]. Automation in Construction, 2010, 19(7): 829-843.
- 2 Jaehoon Jung, Sanghyun Yoon, Sungha Ju, *et al.*. Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM[J]. Sensors, 2015, 15(10): 26430-26456.
- 3 He Wu, Lu Wei, Wang Yao, *et al.*. Player based indoor service robot map building and localization system [J]. Instrumentation Technology, 2011(5): 56-58.  
何 武, 路 巍, 汪 瑶, 等. 基于 Player 的室内服务机器人的地图构建和定位系统[J]. 仪表技术, 2011, (5): 56-58.
- 4 N Senin, B M Colosimo, M Pacella. Point set augmentation through fitting for enhanced ICP registration of point clouds in multisensor coordinate metrology[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 39-52.
- 5 Wei Shengbin, Wang Shaoqing, Zhou Changhe, *et al.*. An iterative closest point algorithm based on biunique correspondence of point clouds for 3D reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0515003.  
韦盛斌, 王少卿, 周常河, 等. 用于三维重建的点云单应性迭代最近点配准算法[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0515003.
- 6 Paul J Besl, Neil D McKay. Method for registration of 3-D shapes[C]. International Society for Optics and Photonics, 1992: 586-606.
- 7 Yang Xiaoqing, Yang Qiuxiang, Yang Jian, *et al.*. Point cloud registration based on improved ICP algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(9): 2457-2461.  
杨小青, 杨秋翔, 杨 剑, 等. 应用改进 ICP 算法的点云配准[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(9): 2457-2461.
- 8 Zhao Mingbo, He Jun, Luo Xiaobo, *et al.*. Two-viewing angle lidar data registration based on improved iterative closest-point algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128007.  
赵明波, 何 峻, 罗小波, 等. 基于改进迭代最近点算法的两视角激光雷达数据配准[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128007.
- 9 Xie Zexiao, Xu Shang. A survey on the ICP algorithm and its variants in registration of 3D point clouds[J]. Periodica of Ocean University of China, 2010, 40(1): 99-103.  
解则晓, 徐 尚. 三维点云数据拼接中 ICP 及其改进算法综述[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 99-103.
- 10 Tao Haiji, Da Feipeng. Automatic registration algorithm for the point clouds based on the normal vector[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809001.  
陶海跻, 达飞鹏. 一种基于法向量的点云自动配准方法[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809001.
- 11 Huang Yuan, Da Feipeng, Tao Haiji. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308002.  
黄 源, 达飞鹏, 陶海跻. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.
- 12 Wang Guo, Sha Congshu, Wang Jian. Study on segmentation of building facade considering local point cloud density[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061001.  
王 果, 沙从术, 王 健. 考虑局部点云密度的建筑立面自适应分割方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061001.
- 13 Wang Ke, Zhao Lijun, Li Ruifeng. Complex indoor map building based on fusion of sequential Mb-ICP[C]. Chinese Association of Automation Control Theory Professional Committee B Volume, 2011: 4023-4028.  
王 珂, 赵立军, 李瑞峰. 基于贯序 Mb-ICP 融合的机器人复杂室内地图构建[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会 B 卷, 2011: 4023-4028.
- 14 R Tiar, M Lakrouf, O Azouaoui. Fast ICP-SLAM for a bi-steerable mobile robot in large environments[C]. IEEE, 2015: 611-616.
- 15 Wu Suhui, Cheng Ying, Zheng Yanning, *et al.*. Survey on K-means algorithm[J]. New Technology of Library and Information Service, 2011, 27(5): 28-35.

- 吴夙慧, 成颖, 郑彦宁, 等. K-means 算法研究综述[J]. 现代图书情报技术, 2011, 27(5): 28-35.
- 16 Wan Jing, Zhang Yi, He Yunbin, *et al.*. Dynamic clustering algorithm based on KD-tree and K-means method [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12): 3590-3595.
- 万静, 张义, 何云斌, 等. 基于 KD-树和 K-means 动态聚类方法研究[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3590-3595.