

改进的尺度迭代最近点配准算法

赵夫群^{1,2}, 周明全^{2,3}

(1. 咸阳师范学院 教育科学学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127; 3. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 针对点云配准中的尺度和收敛速度问题, 提出一种改进的尺度迭代最近点(scaling iterative closest point, SICP)算法。在ICP算法中加入带边界的尺度矩阵, 解决点云配准中尺度变换的问题; 引入动态迭代因子, 自动调整配准过程中的刚体变换参数, 在不影响算法的精度和收敛方向的前提下, 减少迭代次数, 提高算法的收敛速度。实验结果表明, 与ICP算法和SICP算法相比, 改进的SICP算法能够更好地解决含尺度因素的点云配准问题, 是一种更加精确、快速的尺度点云配准算法。

关键词: 点云配准; 迭代最近点; 尺度矩阵; 动态迭代系数; 刚体变换

中图分类号: TP391.9 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2018) 01-0146-05

doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2018.01.026

Improved scaling iterative closest point registration algorithm

ZHAO Fu-qun^{1,2}, ZHOU Ming-quan^{2,3}

(1. School of Education Science, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China;
2. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China;
3. School of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Aiming at the scale and convergence rate problems in point cloud registration, an improved scaling iterative closest point (SICP) algorithm was proposed. The scaling matrix with boundary was added into ICP algorithm to calculate the scale transformation in point cloud registration. The dynamic iteration coefficient was introduced to the algorithm, which adjusted the parameters of rigid transformation automatically, and decreased iteration number and improved convergence rate without affecting the registration accuracy and convergence trend. Experimental results show that the improved SICP algorithm can solve point cloud registration with scale factor much better and achieve much higher iterative convergence rate compared with ICP algorithm and SICP algorithm. It is an accurate and fast scaling point cloud registration algorithm.

Key words: point cloud registration; iterative closest point; scaling matrix; dynamic iteration coefficient; rigid transformation

0 引言

点云配准^[1]分为两种类型, 即两组点集的配准和多组点集的配准, 多组点集的配准可以通过进行多次两组点集配准来实现, 因此这里所谓的点云配准都是指两组点集的配准。目前, 点云配准的应用领域涉及目标识别、图像裁切、碎片匹配、以及颅骨面貌复原等多个方面^[2-7]。

目前, 应用最为广泛的点云配准算法是迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法, 该算法配准精度高, 易于实现, 但是对两个点集的初始位置要求较高。国内外研究者

提出了很多改进的ICP算法^[8-14], 虽然这些算法在点云配准的精度、速度、鲁棒性以及抗噪性等方面都有了改进, 但是没有考虑尺度各异的点集的配准问题。为了解决尺度点云配准问题, S. Du等^[15]和L. Zhao等^[16]都提出了尺度迭代最近点(scaling iterative closest point, SICP)算法, 但在点集较大情况下的迭代速度较慢。针对点云配准中的尺度因素和收敛速度问题, 将带边界的尺度矩阵和动态迭代系数加入到ICP算法中, 进一步解决两个点集的尺度配准问题。首先, 在ICP算法中引入带边界的尺度矩阵, 以解决点云配准中的尺度变换问题; 然后, 再在ICP算法中加入

收稿日期: 2016-10-28; **修订日期:** 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61373117); 陕西省教育科学“十三五”规划课题基金项目(SGH16H178)

作者简介: 赵夫群(1982-), 女, 山东临沂人, 博士研究生, CCF会员, 研究方向为图形图像处理; 周明全(1954-), 男, 陕西西安人, 博士, 博士生导师, 研究方向为图形图像处理、三维重建。E-mail: fuqunzhao@126.com

动态迭代因子, 可以自动调整配准过程中的刚体变换参数, 并在不影响算法的精度和收敛方向的前提下, 减少迭代次数, 提高算法的收敛速度。

1 ICP 算法

对于两个给定的点集: 模型集合 $\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_i\}$ 和数据集合 $\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_j\}$, $i = 1, 2, \dots, N_m$, $j = 1, 2, \dots, N_d$, N_m 和 N_d 分别表示点集 \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 的大小。那么, \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 的配准问题就是寻找一个变换 \mathbf{T} , 使得它们能够最佳匹配, 可以用最小二乘 (least square, LS) 法来计算, 计算式如下

$$\min_{\mathbf{T}, j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{T}(\mathbf{d}_i) - \mathbf{m}_j\|_2^2 \right) \quad (1)$$

ICP 算法解决的就是两个点集的配准问题, 即寻找从点集 \mathbf{D} 到点集 \mathbf{M} 的刚体变换 (包括旋转矩阵和平移矢量), 使得两个点集能够达到最佳配准。ICP 算法可以有效地实现两个覆盖率较高的点集的刚体配准。

令式 (1) 中的 \mathbf{T} 为刚体变换, 即旋转和平移变换, 那么有

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}\mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_j\|_2^2 \right) \quad (2)$$

$s. t. \quad \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_m, \det(\mathbf{R}) = 1$

式中: \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移矢量。

ICP 算法分两个基本步骤实现, 具体如下:

(1) 首先建立点集的相关性, 计算式如下

$$c_{k+1}(i) = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \|\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k - \mathbf{m}_j\|_2^2 \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N_d$ 。

(2) 然后计算点集 \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 的新的旋转和平移变换, 计算式如下

$$(\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*) = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_m, \det(\mathbf{R}) = 1, \mathbf{t}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}(\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k) + \mathbf{t} - \mathbf{m}_{c_{k+1}(i)}\|_2^2 \right) \quad (4)$$

并更新新的旋转变换 \mathbf{R}_{k+1} 和平移变换 \mathbf{t}_{k+1} , 计算式如下

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{k+1} = \mathbf{R}^* \mathbf{R}_k \\ \mathbf{t}_{k+1} = \mathbf{R}^* \mathbf{t}_k + \mathbf{t}^* \end{cases} \quad (5)$$

重复以上两个基本步骤, 直到满足算法的终止条件为止。

2 SICP 算法

虽然 ICP 算法是一种精度较高的点云配准算法, 但是它没有考虑尺度因素。在实际情况中, 有时要考虑尺度配准的问题, 也就是既有尺度变换又有刚体变换的情况, 其数学描述如下

$$\chi' = \mathbf{T}(\chi) = \mathbf{R}\mathbf{S}\chi + \mathbf{t} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{S} = \operatorname{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m)$ 是一个尺度矩阵, \mathbf{R} 是一个正

交矩阵, \mathbf{t} 是一个平移矢量。

现在将式 (6) 代入到式 (1) 中, 则有

$$\min_{\mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{t}, j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_j\|_2^2 \right) \quad (7)$$

那么, 式 (7) 就描述了尺度配准的问题, 式中正交矩阵 \mathbf{R} 表示旋转变换。为了避免一个点集收敛到另外一个点集中的一个很小的子集情况, 也就是尺度矩阵为 $\mathbf{0}$ 矩阵的情况, 就必须为尺度矩阵 \mathbf{S} 设置边界。于是该配准问题又进一步转换成如下的求解问题

$$\min_{\mathbf{S}, \mathbf{R}, \mathbf{t}, j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_j\|_2^2 \right) \quad (8)$$

$s. t. \quad \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_m, \det(\mathbf{R}) = 1$

$\mathbf{S} = \operatorname{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m), s_j \in [a_j, b_j]$

式中: \mathbf{S} 是一个带有边界的尺度矩阵, \mathbf{R} 是一个旋转矩阵。

与 ICP 算法一样, SICP 算法的实现也分为两个步骤:

(1) 通过当前的变换 ($\mathbf{S}_k, \mathbf{R}_k, \mathbf{t}_k$) 来建立相关性, 计算式如下

$$c_{k+1}(i) = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \|\mathbf{R}_k \mathbf{S}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k - \mathbf{m}_j\|_2^2 \quad (9)$$

(2) 令 $\mathbf{S} = \operatorname{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m)$, 计算新的变换 ($\mathbf{S}_{k+1}, \mathbf{R}_{k+1}, \mathbf{t}_{k+1}$), 计算式如下

$$(\mathbf{S}_{k+1}, \mathbf{R}_{k+1}, \mathbf{t}_{k+1}) = \operatorname{argmin}_{s_j \in [a_j, b_j], \mathbf{R}, \mathbf{t}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_{c_{k+1}(i)}\|_2^2 \right) \quad (10)$$

重复以上步骤 (1) 到步骤 (2), 如果 \mathbf{S} 的变化量 $\Delta \mathbf{S} = \|\mathbf{S}_{k+1} - \mathbf{S}_k\|$ 小于阈值 ϵ 或达到最大迭代次数 $\operatorname{Step}_{\max}$, 则停止该迭代过程。

3 改进的 SICP 算法

为了进一步提高 SICP 算法的迭代速度, 这里通过在算法中加入动态迭代因子 h 来实现。动态迭代因子 h 是指一个可以自动调整旋转和平移变换参数的值, 通常取大于等于 0 的整数, 它可以在不影响配准精度的前提下, 减少迭代次数, 提高收敛速度。

将动态迭代因子 h 引入到 SICP 算法中的具体实现步骤如下:

(1) 首先, 计算 SICP 算法的刚体变换矢量 $\mathbf{q} = [\mathbf{R}_k \mid \mathbf{t}_k]^T$, 并对 \mathbf{q}_k 求解其相邻两次迭代的变化量 $\Delta \mathbf{q}_k$;

(2) 然后, 针对 SICP 算法第 (2) 步中的 ($\mathbf{S}_{k+1}, \mathbf{R}_{k+1}, \mathbf{t}_{k+1}$), 采用 $\Delta \mathbf{q}_k$ 对其更新 h 次。

改进 SICP 算法的基本步骤如下:

(1) 设置刚体变换初值 \mathbf{R}_0 和 \mathbf{t}_0 , 记作 $\mathbf{q} = [\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0]^T$, 动态迭代系数初值 $h=0$, 迭代次数 $k=0$;

(2) 利用式 (8) 建立点集 \mathbf{M} 和 \mathbf{D} 的相关性 $c_k(i)$, $i =$

1, 2, \dots, N_m;

(3) 计算 q_k 及其相邻两次迭代的变化量 Δq_k ;

(4) 判断动态调整因子 h , 若 $h > 0$, 则利用式 (9) 计算新的变换 $(S_{k+1}, R_{k+1}, t_{k+1})$, 并执行 $\Delta q_k(S_{k+1}, R_{k+1}, t_{k+1})$ 共 h 次来进一步更新变换, 即用 Δq_k 更新 $(S_{k+1}, R_{k+1}, t_{k+1})$ 共计 h 次;

(5) 对于均方根误差 (root mean square, RMS) RMS , 判断其变化量的绝对值, 如果 $|RMS_{k+1} - RMS_k| > \epsilon'$, 则令 $h = h + 1$, 否则令 $h = 0$, RMS 的定义如下

$$RMS = \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|R_{k+1} S_{k+1} d_i + t_{k+1} - m_{c_{k+1}(i)}\|_2^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

(6) 判断算法的终止条件, 若均方根误差变化量的绝

对值满足 $|RMS_{k+1} - RMS_k| \leq \epsilon'$ 或迭代次数 k 大于最大迭代次数 $Step_{max}$, 算法则停止迭代, 否则令 $k = k + 1$ 并转到步骤 (2)。

4 实验结果与分析

4.1 2D 点集配准

该配准实验采用如图 1 所示的两组 2D 点集实现, 图 1 (a) 是 2D 数据点集, 图 1 (b) 是 2D 模型点集, 图 1 (c) 是 ICP 算法的 2D 点集配准结果, 图 1 (d) 是 SICP 算法的 2D 点集配准结果, 图 1 (e) 是改进 SICP 算法的 2D 点集配准结果。图 2 是 ICP 算法、SICP 算法和改进 SICP 算法对这两组 2D 点集配准的迭代收敛曲线。

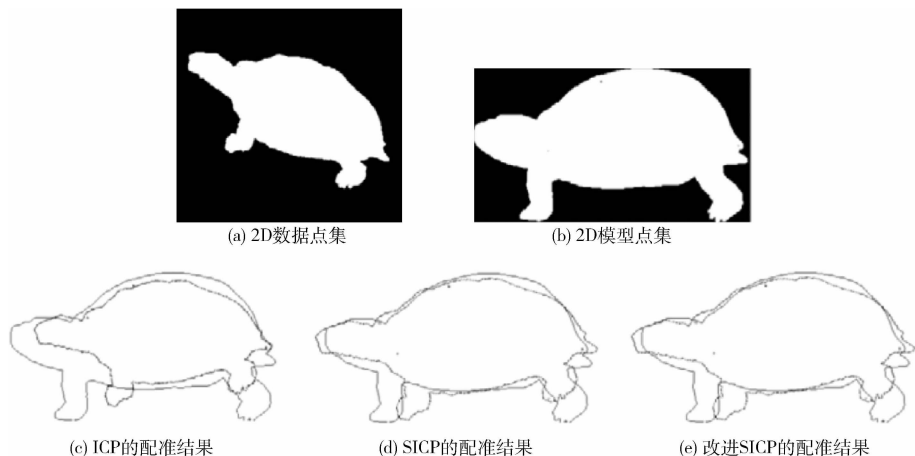


图 1 2D 点集的配准结果

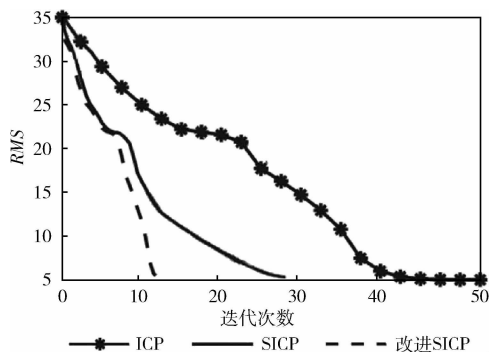


图 2 3 种算法的迭代收敛曲线

从图 1 的配准结果来看, ICP 算法不能解决点云配准中的尺度问题, 而 SICP 算法和改进的 SICP 算法可以解决点云配准中的尺度问题。从图 2 的算法迭代收敛曲线可见, 改进的 SICP 算法的收敛速度明显比 ICP 算法和 SICP 算法的收敛速度要快, 而且对算法的配准精度影响没有什么影响。因此说, 改进的 SICP 算法是一种有效的 2D 尺度点云配准算法。

4.2 3D 点集配准

该配准实验采用如图 3 和图 4 所示的两组 3D 点集实现, 实验数据源于 Stanford 3D Scanning Repository^[17]。图 3 是 3D 兔子点集, 图 3 (a) 是待配准的点集, 图 3 (b) 是 ICP 算法的配准结果, 图 3 (c) 是 SICP 算法的配准结果, 图 3 (d) 是改进 SICP 算法的配准结果。图 4 是 3D 龙点集, 图 4 (a) 是待配准的点集, 图 4 (b) 是 ICP 算法的配准结果, 图 4 (c) 是 SICP 算法的配准结果, 图 4 (d) 是改进 SICP 算法的配准结果。两组点集的 ICP 算法、SICP 算法和改进 SICP 算法的具体配准参数见表 1。

从图 3 和图 4 的配准结果来看, SICP 算法和改进的 SICP 算法均能实现不同尺度的 3D 点云数据的配准, 但是 ICP 算法的配准结果很不理想, 不能解决 3D 点云配准中的尺度问题。此外, 从表 1 的配准参数来看, 跟 ICP 算法和 SICP 算法相比, 改进 SICP 算法的迭代次数和耗时有了明显的降低, 而且配准精度基本不受影响。因此说, 改进的 SICP 算法是一种有效的 3D 尺度点云配准算法。

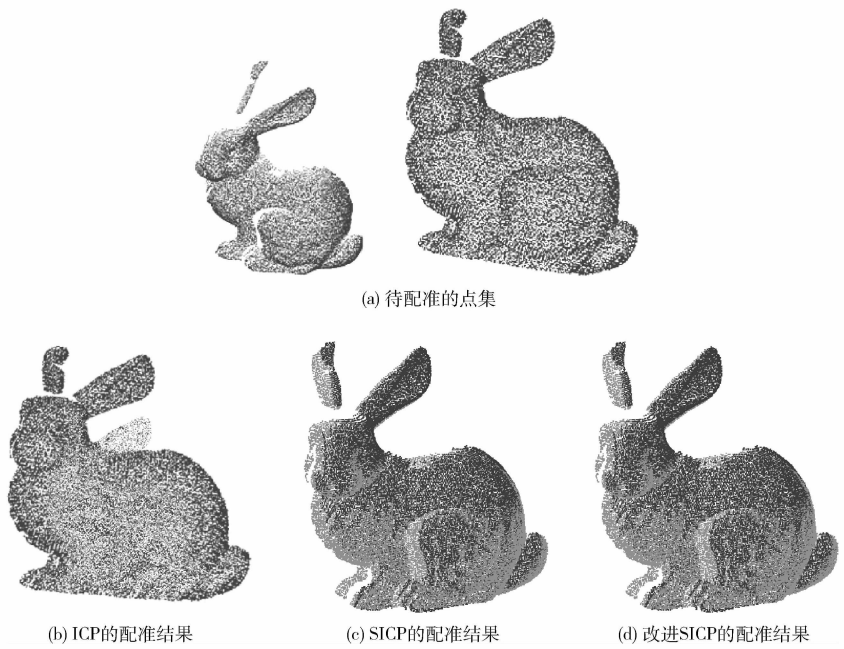


图 3 兔子点集

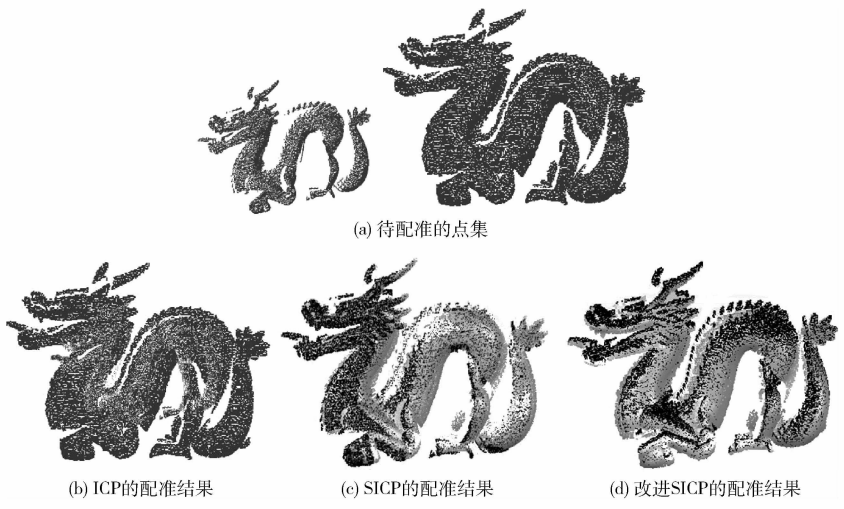


图 4 龙点集

表 1 3 种算法的具体配准参数

点集类型	点集大小	配准算法	匹配点对数	配准误差/mm	迭代次数	耗时/s
兔子点集	20128, 20048	ICP	3566	0.3496	77	5.9
		SICP	8712	0.0182	58	4.7
		改进 SICP	8694	0.0189	26	2.1
龙点集	20920, 17418	ICP	1317	0.3592	79	6.4
		SICP	6113	0.0203	63	5.2
		改进 SICP	6076	0.0211	27	2.3

5 结束语

点云配准技术研究已久，应用领域也日益广泛。针对点云配准中的尺度各异的问题，提出了一种快速准确的尺

度点云配准算法。该算法不仅通过设置带边界的尺度矩阵解决点云配准中的尺度问题，而且还引入了动态迭代系数以提高尺度点云配准算法的收敛速度。该算法既适用于 2D 点集数据的配准，也适用于 3D 点集数据的配准，是一种有

效的尺度点云配准算法。在今后的研究中,还要综合考虑点云配准中更多的影响因素,如噪声因素、旋转角度的变化因素、外点的干扰因素等,设计更加合理有效的配准算法,进一步提高点云配准的精度、速度、鲁棒性和抗噪性,扩大点云配准技术的应用领域。

参考文献:

- [1] ZHENG Xiaolu, PAN Guangzhen, YANG Jian, et al. Improved ICP algorithm based on Hausdorff distance [J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36 (9): 2481-2484 (in Chinese). [郑晓璐, 潘广贞, 杨剑, 等. 基于 Hausdorff 距离改进的 ICP 算法 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36 (9): 2481-2484.]
- [2] Altantsetseg E, Matsuyama K, Konno K. Pairwise matching of 3D fragments using fast Fourier transform [J]. Visual Computer, 2014, 30 (6-8): 929-938.
- [3] Zhang L, Song M, Zhao Q, et al. Probabilistic Graphlet transfer for photo cropping [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22 (2): 802-815.
- [4] Zhang L, Song M, Yang Y, et al. Weakly supervised photo cropping [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2014, 16 (1): 94-107.
- [5] Gao Y, Wang M, Tao D, et al. 3-D object retrieval and recognition with hypergraph analysis [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (9): 4290-4303.
- [6] Gao Y, Wang M, Ji R, et al. 3-D object retrieval with hausdorff distance learning [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (4): 2088-2098.
- [7] BAI Ruyi. Craniofacial reconstruction method based on skull automatic registration [J]. Micro Computer its Applications, 2014 (2): 44-45 (in Chinese). [白茹意. 基于颅骨自动配准的颅面复原方法 [J]. 微型机与应用, 2014 (2): 44-45.]
- [8] YANG Qiuxiang, WANG Chengyuan, YANG Jian, et al. Improved ICP algorithm based on normal vector [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37 (8): 2082-2086 (in Chinese). [杨秋翔, 王程远, 杨剑, 等. 基于法矢夹角的改进 ICP 算法 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37 (8): 2082-2086.]
- [9] Zhu J, Du S, Yuan Z, et al. Robust affine iterative closest point algorithm with bidirectional distance [J]. IET Computer Vision, 2012, 6 (3): 252-261.
- [10] Zhang C, Du S, Liu J, et al. Robust 3D point set registration using iterative closest point algorithm with bounded rotation angle [J]. Signal Processing, 2015, 120 (C): 777-788.
- [11] Han J, Yin P, He Y. Enhanced ICP for the registration of large scale 3D environment models: An experimental study [J]. Sensors, 2016, 16 (2): 1-15.
- [12] Du S, Liu J, Zhang C. Probability iterative closest point algorithm for m-D point set registration with noise [J]. Neurocomputing, 2015, 157 (CAC): 187-198.
- [13] YANG Xiaoqing, YANG Qiuxiang, YANG Jian. Improved ICP algorithm based on normal vector [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37 (1): 169-173 (in Chinese). [杨小青, 杨秋翔, 杨剑. 基于法向量改进的 ICP 算法 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37 (1): 169-173.]
- [14] Zhang C, Du S, Liu J, et al. Robust iterative closest point algorithm with bounded rotation angle for 2D registration [J]. Neurocomputing, 2016, 195 (C): 172-180.
- [15] Chen E C, Mcleod A J, Baxter J S, et al. Registration of 3D shapes under anisotropic scaling: Anisotropic-scaled iterative closest point algorithm [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology & Surgery, 2015, 10 (6): 867-878.
- [16] Zhao L, Shen X, Long X. Robust wrinkle-aware non-rigid registration for triangle meshes of hand with rich and dynamic details [J]. Computers & Graphics, 2012, 36 (5): 577-583.
- [17] Thestanford 3D scanning repository [EB/OL]. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>, 1999.