

7-20-2022

A Modified Point Matching Method for Non-Rigid Image Registration

Jintai Shangguan

1. Dept. of Computer Science and Technology, Changzhi College, Changzhi 046011, China;, 937214035@qq.com

Yawen Dang

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

Wei Lian

1. Dept. of Computer Science and Technology, Changzhi College, Changzhi 046011, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Modified Point Matching Method for Non-Rigid Image Registration

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the registration results tend to converge to local minima due to the complexity of the relative position changes between two point sets in the non-rigid body point matching process, a joint estimation method for non-rigid body point matching based on precenter alignment is proposed, *a modified matching method for non-rigid image registration based on centre preregistration is proposed. To better achieve the point matching accuracy between two point sets, a centre preregistration step is applied before the iterative closest point matching algorithm*, which converges to a solution more close to a global optimum and thus better matching results. The simulation results show that the proposed method achieves better matching accuracy than the traditional algorithm without significantly increased computation.

Keywords

non-rigid point matching, correspondence relationship, joint estimation, centre preregistration, iterative closest point

Recommended Citation

Jintai Shanguan, Yawen Dang, Wei Lian. A Modified Point Matching Method for Non-Rigid Image Registration[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1482-1489.

非刚体图像配准中一种改进的点匹配方法

上官晋太¹, 党雅文², 连玮¹

(1. 长治学院 计算机系, 山西 长治 046011; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190)

摘要: 为了解决在非刚体点匹配过程中, 由于点集之间相对位置变化的复杂性, 导致配准结果易收敛于局部最小值点的问题, 提出了基于预中心配准的非刚体点匹配联合估计法。在用迭代最近点算法确定两个点集中的点之间的对应关系前, 通过预先进行两个点集的中心配准的方法, 可以更加合理地确定点之间的对应关系, 从而使匹配结果可以最大程度地收敛于全局最优点。仿真实验表明, 此方法和传统算法相比, 在没有明显增加运算量的前提下, 匹配效果更佳。

关键词: 非刚体点匹配; 对应关系; 联合估计; 中心预配准; 迭代最近点

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)07-1482-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0073

A Modified Point Matching Method for Non-Rigid Image Registration

Shangguan Jintai¹, Dang Yawen², Lian Wei¹

(1. Dept. of Computer Science and Technology, Changzhi College, Changzhi 046011, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Aiming at the problem that the registration results tend to converge to local minima due to the complexity of the relative position changes between two point sets in the non-rigid body point matching process, a joint estimation method for non-rigid body point matching based on precenter alignment is proposed, a modified matching method for non-rigid image registration based on centre preregistration is proposed. To better achieve the point matching accuracy between two point sets, a centre preregistration step is applied before the iterative closest point matching algorithm, which converges to a solution more close to a global optimum and thus better matching results. The simulation results show that the proposed method achieves better matching accuracy than the traditional algorithm without significantly increased computation.

Keywords: non-rigid point matching; correspondence relationship; joint estimation; centre preregistration; iterative closest point

引言

图像配准即处理图像之间的严格对齐问题: 采用合适的空间变换方法, 使得待配准图像和目标图像达到空间上的一致^[1]。图像配准从所用的方法上来看可以分为基于灰度信息的配准方法和基于图像特征的配准方法。基于灰度信息的方法由

于可以直接利用图像的灰度信息, 不存在特征提取的步骤, 所以配准方法简单可靠, 但其应用范围较窄, 不能直接应用于处理图像的非刚体形变。在非刚体配准中越来越多的使用基于特征的配准方法, 在此类方法中, 基于点特征的方法是最基本的配准方法, 这是因为点特征最为简单, 并且它是其他特征表示的基础和前提, 所以非刚体点

收稿日期: 2021-01-25

修回日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61773002); 山西省高等学校教学改革创新项目(J2018181, J2020328)

第一作者: 上官晋太(1964-)男, 博士, 副教授, 研究方向为数字图像处理。E-mail: 937214035@qq.com

匹配被广泛地应用于计算机视觉、图像分析和模式识别的过程中^[2-6]。比如图像融合^[7]就涉及到一个点匹配问题。非刚体点匹配包含两个基本过程,一个是两个点集之间的点对应关系的确定,另一个是点集之间的非刚体变换。它们之间是相互影响的,一旦一个确定了,另一个的求解就是非常简单的事情了。我们可以通过两种方法来解决非刚体点匹配问题,一是将二者分开处理,只解决其中之一,二是将两者联合处理,可以将点对应关系和空间变换看成是2个变量,用迭代的方法先保证一个变量不变来估计另一个变量,然后在得到估计量的基础上,保持这个估计量不变对先前那个不变的变量进行新的估计。在这个迭代的过程中2个变量相互改进,直至得到最优解。通常将这两种方法分别称之为独立估计法和联合估计法。

到目前为止,在已发表的文献中大部分只专注于解决刚体变换问题,比如已提出的惯性矩法,此法先求出数据的“质心”和“主轴”,“质心”可以用来解决空间变换中的位移问题,而“主轴”提供数据集的整体指向,由此可以解决数据集的旋转角度问题。同样只用于解决刚体变换问题的方法还有Hough变换, Hausdauff距离等。在现实需求中,非刚体配准的应用场合更广泛一些,比如医学图像配准就是典型的非刚体图像配准^[8-10]。非刚体的配准由于最优解的搜索空间维度过大,求解过程过于复杂,所以一般利用联合估计法。

在联合估计法中有一种最为常见的方法,即基于迭代最近点算法^[11]的联合估计法,此算法通过在2个点集间进行双向的最近点确认,得到对应矩阵,由对应矩阵得到模板点集到目标点集的映射位置,从而建立点对应关系。刘世光等^[12]提出的快速四点一致性点云粗配准算法,通过提取源点云和目标点云的边界,使用边界特征辅助基,取代原算法中随机选取的方案,提高了选取的基在两片点云重叠区域的概率;通过使用特征的一致性对从目标点云中获取的一致性四点基的集合

进行特征限制,去除多余的四点基,减少算法的验证时间,进一步提高了算法的运行效率。在两片点云重叠率较低的情况下,该算法效率不会有明显的下降,且对噪声等具有较强的鲁棒性。韩宝昌等^[13]提出了一种区域层次上的自动点云配准算法,此算法在区域的层次上进行点云配准,一方面,不需要利用局部几何信息计算点的特征,避免了噪声和离群点的干扰;另一方面,将全局配准分解为一系列规模更小的区域配准,然后通过可信性和一致性的相互约束,从区域配准得到全局配准,放大了重叠区域在配准中的作用,从而能够处理重叠比例更低的点云。石爱军等^[14]提出了遗传算法结合自适应阈值约束的ICP算法,此算法可以提高配准精度,同时减少配准时间,能在一定程度上满足实时性的要求。张春雷等^[15]提出了一种将三点法与迭代最近点算法结合的配准策略,其配准精度和稳定性均优于传统算法,且具备高效、易于操作的特点。以上这些改进的迭代最近点算法在某些方面的性能上都有一些提高,但是均无法解决迭代最近点算法易收敛于局部最小值点的问题。

通过分析可知,在联合估计法中2个点集之间的点对应关系的确定是解决问题的关键所在。由于2个点集之间的距离和方位的影响,确定2个点集中的点之间的对应关系会变得非常复杂,如果将同一点集中各个点之间的距离称为“集内距离”,将不同点集中的点之间的距离称为“集间距离”的话,当“集间距离”比“集内距离”大得多的时候(比如是其3倍以上),2个点之间的对应关系就会出现很多的“多对一”或“一对多”的关系,这破坏了“一一对应”的要求,对于角度(方位)的影响也有类似的情况。为了减小距离和方位对点对应关系的影响,可以借鉴前面提到的基于“质心”配准的方法,在确定2个点集中的点之间对应关系前,先对2个点集进行“质心”对齐,这样可以把“集间距离”的影响降低到最小程度,有利于点对应关系的确定,从而有助于非

刚体点匹配得到全局最优解。

1 非刚体点匹配过程

给定2个要配准的点集 Q 和点集 P ，配准的任务是将模板点集 Q 经过空间变换匹配到目标点集 P 上去。它的配准过程是这样的：①产生模板点集 Q 到目标点集 P 的对应矩阵 M_1 ，过程如下：先在点集 Q 中选取一个点，记为 q_i ，在点集 P 中寻找和点 q_i 最近的那个点，记为 p_j ，则有 $M_1(i,j) = 1$ ，遍历整个模板点集 Q ，除对应于最近点的矩阵元素为1外，其余都为0。②产生目标点集 P 到模板点集 Q 的逆向对应矩阵 M_2 ，产生过程和上面类似， M_2 中矩阵元素的行号和列号规定与 M_1 中相同，都是行号为模板点集中对应点的标号，列号为目标点集中对应点的标号。③由公式 $M = 0.5(M_1 + M_2)$ 产生双向对应矩阵 M 。④对矩阵 M 按行进行归一化得到矩阵 M' 。⑤由公式 $Q' = M' \cdot P$ 产生新的估计点集 Q' 。⑥用薄板样条插值法产生模板点集到估计点集的空间变换。⑦在空间变换得到的新点集下再一次进行对应关系的确定。这样周而复始地进行对应关系和空间变换的轮流迭代，使得配准过程最后收敛于一个全局最优点，如图1所示。

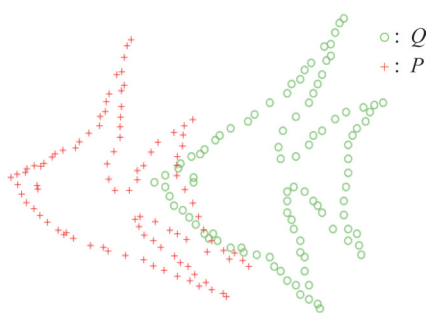
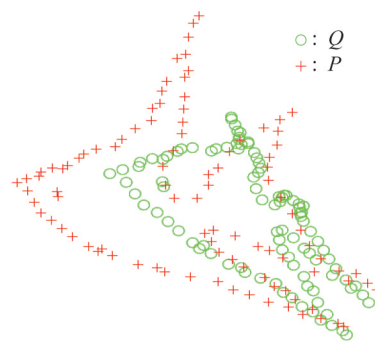


图1 需要进行配准的两个点集

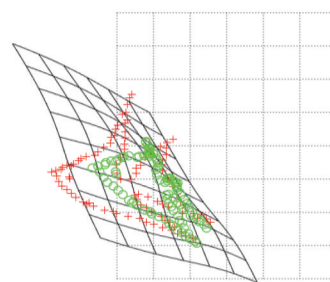
Fig. 1 Two point-sets needed to be registered

如果按前述的方法进行非刚体点匹配，可以得到如图2(a)的匹配结果，图2(b)所示为其空间变换情况，虚线网格表示原模板点集所在的空间，

变形后的情况用实线网格表示。在图2(a)中可以看到，模板点集中的大部分点没有准确地匹配到目标点集中对应的点上去。出现这样结果主要是由2个点集中点对应关系确定的不准确造成的。



(a) 配准结果



(b) 空间变换

图2 配准结果和空间变换

Fig. 2 Registration result and space transformation

受迭代最近点算法的启发，既然质心对齐的办法可以应用于刚体图像的配准，那么非刚体图像匹配中，如果在确定2个点集的点之间对应关系前，先对齐2个点集的中心将会有利于后续的对对应关系的确定。对应于灰度图像的“质心”概念在点集中就是其中心位置，可以计算一个点集的中心位置坐标 (x_0, y_0) ：

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： N 为点集中的点数。

分别计算模板点集 Q 和目标点集 P 的中心位置坐标 (x_Q, y_Q) 和 (x_P, y_P) ,然后将模板点集的所有点进行平移,使得2个点集的中心位置对齐。图1中的2个点集经此变换得到的点集如图3(a)所示。

从图3(b)中可以看到,经过中心对齐后的点对应关系更加分散,更易于建立一一对应关系的建立。图3(c)为没有进行中心对齐的原始点集的点对应关系。

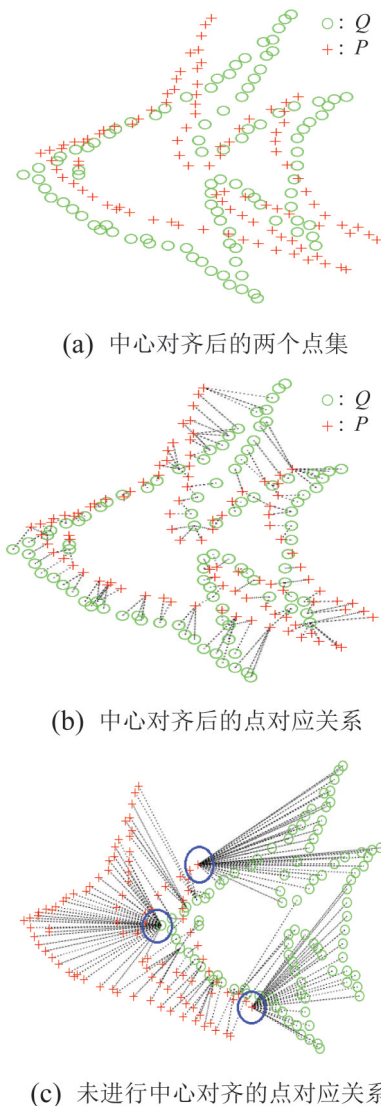


图3 中心对齐后的点集和对应关系的比较
Fig. 3 Two centre registered point sets and the comparison of correspondences

从图3中可以看到,出现了3组明显的“一对多”或“多对一”的关系,这样的对应关系造成的最后匹配结果如前述的图2(a),经分析可知,

对应关系的混乱是造成最后非刚体点匹配结果不准确的主要原因。对于经过中心预配准的点集,用基于迭代最近点的非刚体点匹配算法进行配准,最后的结果如图4(a)所示,图4(b)是其对应的空间变换情况。将图4(a)和图2(a)进行比较,可以看出基于中心预配准的方法比直接配准效果要好。

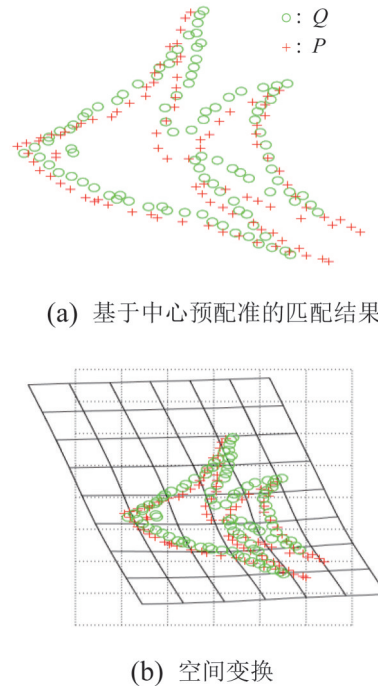


图4 基于中心预配准的匹配结果和空间变换
Fig. 4 Registration result of centre preregistration based algorithm and the space transformation

为了定量地讨论两个点集的匹配程度,定义配准误差为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N \|Q'_i - P_i\|}{N} \quad (2)$$

式中: $\|Q'_i - P_i\|$ 为最终经过非刚体空间变换后,模板点集中的点 Q'_i 与其在目标点集中的对应点 P_i 之间的距离; N 为总点数。经计算可知,图2(a)中直接进行配准的最后配准误差为0.248 1,图4(a)中经过中心预配准的最后配准误差为0.046 6。

2 配准实验

图5中从上到下选取4个不同的点集进行配准

实验, 图5(a)为原始点集, 图5(b)为用原始点集直接进行基于迭代最近点算法的配准结果, 图5(c)为中心预配准后的点集, 图5(d)为在中心预配准基础上的非刚体匹配结果。将每一行的图(b)与图(d)进行对比, 可以看到用基于中心预配准的算法进行配准, 其结果好于用普通算法配准的结果。

通过观察可以发现, 中心预配准直接影响两个点集之间的对应关系的确定, 在中心预配准的基础上确定的对应关系更加有利于一一对应的建立, 这是非刚体点匹配的最基本的要求。如果这个要求得不到满足, 后续的匹配过程将无法保证可以收敛到一个全局最优解。

图6中的每一行是一个点集的匹配情况,

图6(a)为原始点集之间的对应关系连线图, 图6(b)为其最后匹配结果的空间变换情况, 图6(c)为中心预配准后的对应关系连线图, 图6(d)为其最后匹配结果的空间变换情况。比较每一行的图(a)图和(c)图, 可以看到经过中心预配准后的对应关系更加明确且合理, 比较每一行的图(b)和图(d), 可以看到经过中心预配准后再进行配准, 其结果对应的空间变换扭曲程度更小, 匹配效果更好。

图5, 6, 7中配准所用到的2个点集都分别包含98个点, 迭代运行次数为85, 空间变换方式为薄板样条插值法, 运行软件环境为Matlab2018a, 操作系统为Windows 10(64位)。

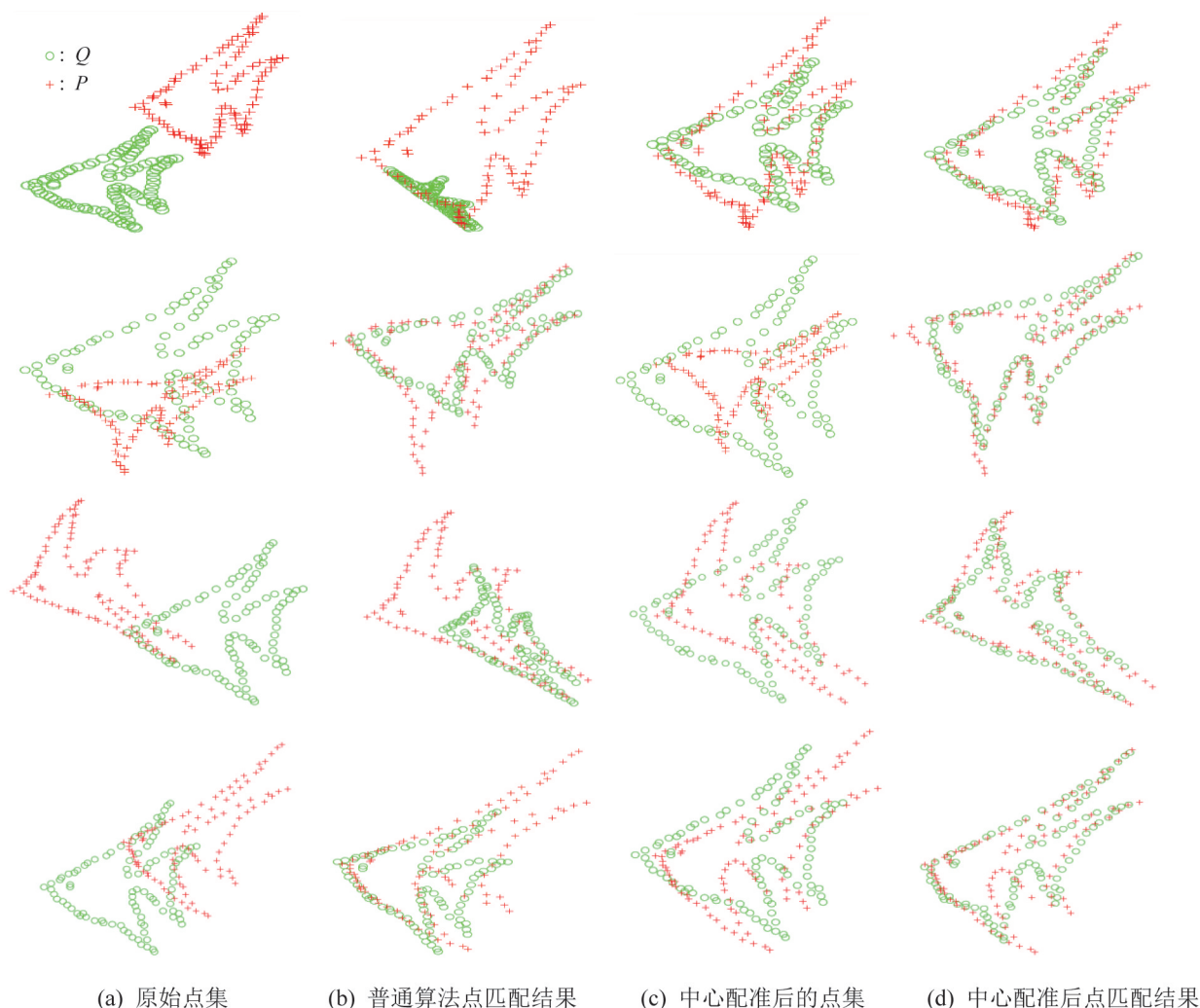


图5 基于中心预配准算法的配准结果和普通算法配准结果的比较

Fig. 5 Comparison of the registration results based on the centre preregistration algorithm and those of conventional algorithm

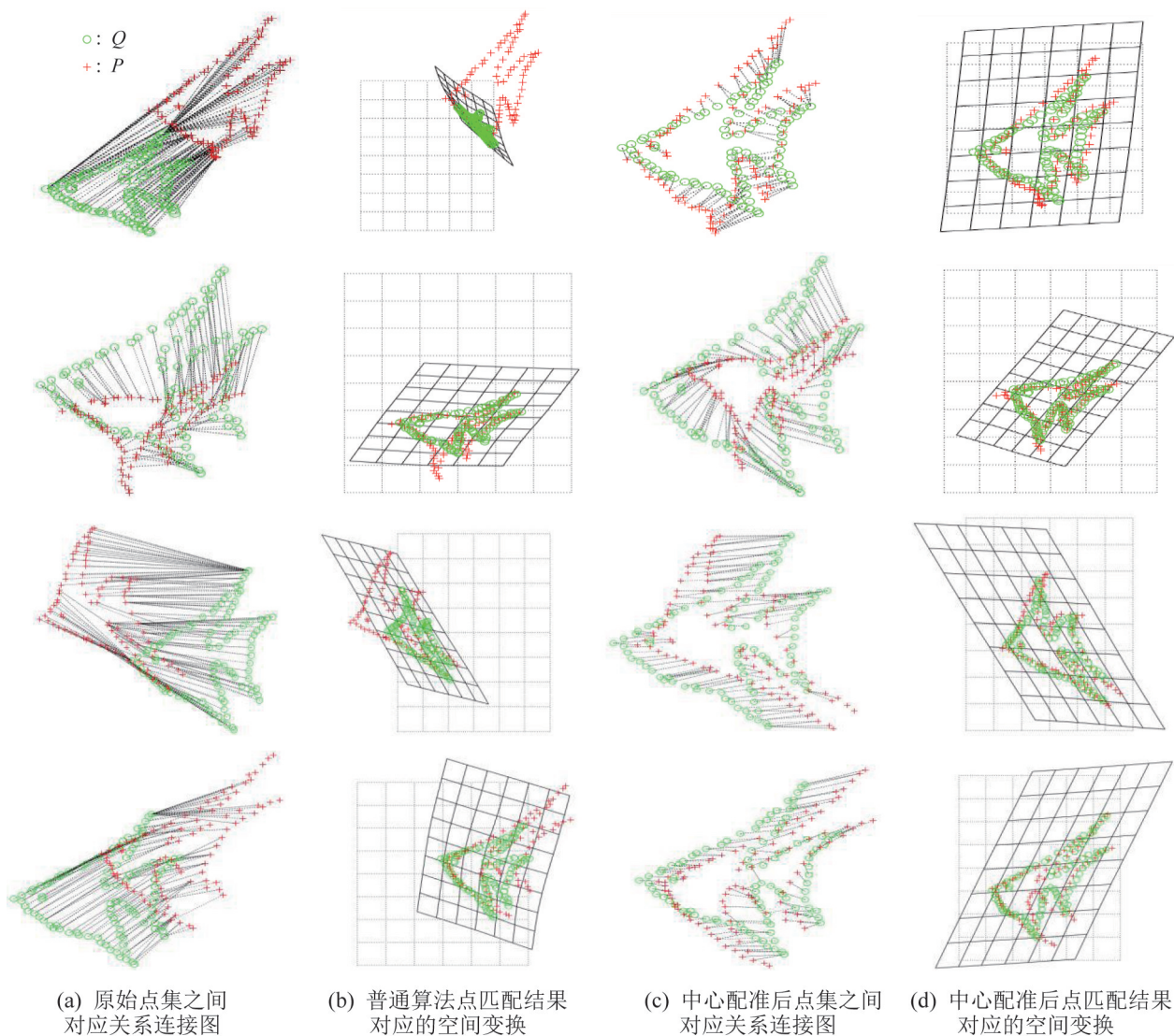


图6 基于中心预配准算法和普通算法对对应关系和空间变换的影响比较
Fig. 6 Comparison of the influence of the centre preregistration algorithm and the original algorithm on the correspondence relationship and space transformation.

3 配准结果的统计分析

在确定对应关系矩阵 M 时, 为了避免最终配准结果陷入一个局部最小值点, 需要在其上加一个随机扰动, 随机扰动的加入, 一方面可以最大程度的使匹配结果收敛于全局最优点, 另一方面也使得配准结果最后归结于一个概率问题, 也即每次的配准结果都不一定能保证完全相同, 而是一个概率分布。对图 7 中的 8 组点集进行配准实验, 每组分别用有中心预配准和无中心预配准的

方法进行 25 轮的非刚体点匹配, 每次计算其匹配误差, 表 1 为有中心预配准的统计结果, 表 2 为无中心预配准的结果。

为了定量地分析采用中心预配准对非刚体点匹配配准效果的改善程度, 定义改善系数为

$$a = \frac{e_2}{e_1} \tag{3}$$

式中: e_1 为表 1 中的配准误差均值; e_2 为表 2 中的配准误差均值。可计算对应于图 7 中的 8 个图集, 采用中心预配准后的配准误差改善情况如表 3 所示。

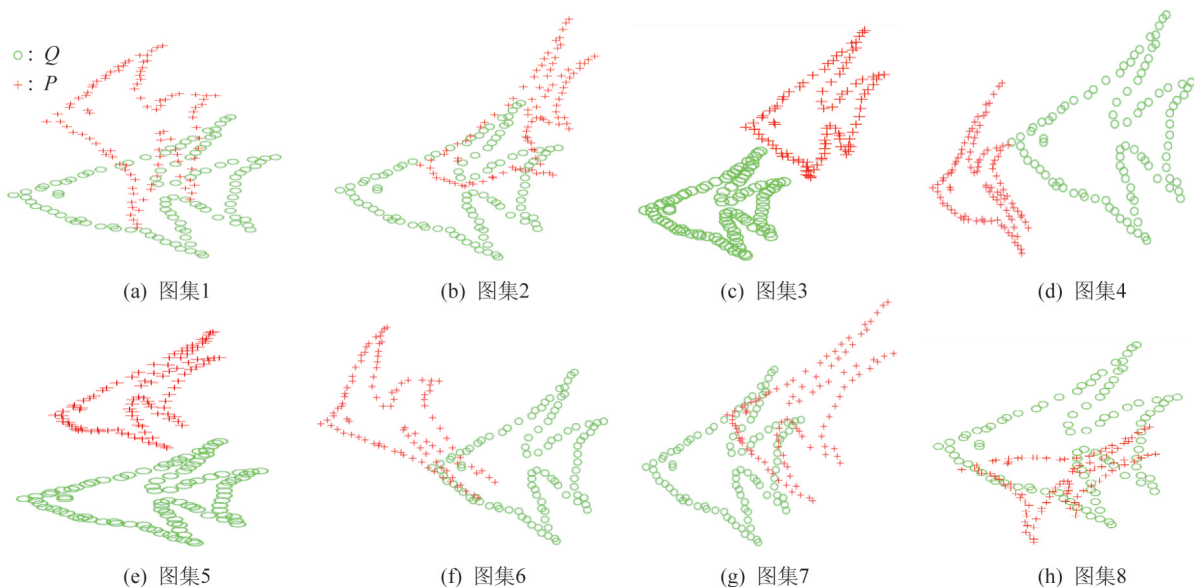


图7 用于配准结果统计分析的图集

Fig. 7 Point-sets for statistical analysis of registration results

从表1~3中统计数据可以看出，采用中心预配准后对于不同的图集，其配准效果都有一定程度的改善。

表1 有中心预配准的非刚体点匹配配准误差分析
Table 1 Registration error analysis of non-rigid point matching with centre preregistration

图集	均值	方差
1	0.035 7	0.029 2
2	0.021 1	0.000 6
3	0.071 6	0
4	0.063 6	0
5	0.022 9	0.006 4
6	0.035 0	0.000 1
7	0.034 4	0.000 6
8	0.042 4	0

表2 无中心预配准的非刚体点匹配配准误差分析
Table 2 Registration error analysis of non-rigid point matching without centre preregistration

图集	均值	方差
1	0.159 1	0.000 3
2	0.042 3	0.001 3
3	0.318 2	0
4	0.235 0	0
5	0.038 0	0
6	0.223 4	0.001 4
7	0.170 2	0.001 1
8	0.119 8	0

表3 采用中心预配准后配准误差改善情况
Table 3 Improvements of registration with centre preregistration

图集	<i>a</i>
1	4.456 6
2	2.004 7
3	4.444 1
4	3.695 0
5	1.659 4
6	6.382 9
7	4.947 7
8	2.825 5

4 结论

非刚体图像配准，由于其空间形变和刚体图像配准比较起来更加复杂，导致了其配准更加困难。在基于点特征的非刚体配准问题中，首先要解决的是2个点集中各个点之间的对应关系问题，如果直接对2个点集中的点，进行非刚体点匹配，会因为集间距离过大使得点之间的相对关系变得模糊，这将不利于点之间关系的确定。我们的做法是在两个点集配准前，将它们预先进行中心配准。这样可以最大限度地减小集间距离在点对应关系确定过程中的影响，使得点之间的对应关系

更加合理可靠, 在此基础上进行的非刚体点匹配, 可以使配准结果最大限度地收敛于一个全局最优点, 从而提高非刚体匹配的精度。本文讨论的方法的局限性在于, 它只是对要配准的两个点集之间距离比较大, 变形比较大, 相对方位变化比较复杂时会有一定效果, 对其余情况效果提升不明显, 还有一个情况是, 中心预匹配会略微增加一些运算量。这些情况在应用时应该注意。

参考文献:

- [1] 汤雯洁, 李若桐, 邓雪松, 等. ICP优化下的B样条四维CT图像弹性配准方法[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(7): 1301-1311.
Tang Wenjie, Li Ruotong, Deng Xuesong, et al. ICP Optimized B-Spline Non-Rigid Registration for 4D-CT Images[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(7): 1301-1311.
- [2] Jan Kybic, Ian Vnucko. Approximate all Nearest Neighbor Search for High Dimensional Entropy Estimation for Image Registration[J]. Signal Process (S0165-1684), 2012, 92(5): 1302-1316.
- [3] Ma Jiayi, Zhao Ji, Alan L, et al. Non-rigid Point Set Registration by Preserving Global and Local Structures [J]. IEEE Transactions on Image Processing (S1057-7149), 2016, 25(1): 53-64.
- [4] Chui Haili, Anand Rangarajan. A new Point Matching Algorithm for Non-rigid Registration[J]. Computer Vision and Image Understanding (S1077-3142), 2003, 89: 114-141.
- [5] 黄滢, 陈建胜, 汪承义. 有约束Patch-Match框架下的非刚体匹配算法[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(10): 1518-1529.
Huang Ying, Chen Jiansheng, Wang Chengyi. Improved Non-rigid Matching Algorithm Under the Framework of Constrained Patch-match[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(10): 1518-1529.
- [6] Ma Jiayi, Jiang Junjun, Zhou Huabing, et al. Guided Locality Preserving Feature Matching for Remote Sensing Image Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2018, 56(8): 4435-4447.
- [7] Ma Jiayi, Chen Chen, Li Chang, et al. Infrared and Visible Image Fusion via Gradient Transfer and Total Variation Minimization[J]. Information Fusion (S1566-2535), 2016, 31: 100-109.
- [8] 王丽芬, 成茜, 秦品乐, 等. 基于多层P样条和稀疏编码的非刚性医学图像配准方法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(8): 2557-2560.
Wang Lifen, Cheng Xi, Qin Pinle, et al. Non-Rigid Medical Image Registration Based on Multilayer P-Spline and Sparse Coding[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(8): 2557-2560.
- [9] 顾菊平, 程天宇, 华亮, 等. 面向脊柱生物建模的图像分割与配准综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(2): 167-173.
Gu Juping, Cheng Tianyu, Hua Liang, et al. Overview of Image Segmentation and Registration for Spine Biological Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 167-173.
- [10] 王雷, 郭全. 一种基于DCWPSO算法与FFD模型的心脏CT序列图像配准算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(1): 1-4.
Wang Lei, Guo Quan. Sequenced Cardiac CT Image Registration Based on DCWPSO Algorithm and FFD model[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(1): 1-4.
- [11] Paul J, Besl Neil D McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 1992, 14(2): 239-256.
- [12] 刘世光, 王海荣, 刘锦. 快速四点一致性点云粗配准算法[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(2): 1-7.
Liu Shiguang, Wang Hairong, Liu Jin. Fast 4-points Congruent Sets for Coarse Registration of 3D Point Cloud [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(2): 1-7.
- [13] 韩宝昌, 曹俊杰, 苏志勋. 一种区域层次上的自动点云配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 313-319.
Han Baochang, Cao Junjie, Su Zhixun. Automatic Point Clouds Registration Based on Regions[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(2): 313-319.
- [14] 石爱军, 白瑞林, 田青华, 等. 遗传算法结合自适应阈值约束的ICP算法[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 63-68.
Shi Aijun, Bai Ruilin, Tian Qinghua, et al. Optimized ICP Method Combining Genetic Algorithm with Adaptive Threshold Constraints[J]. OPTICAL TECHNIQUE, 2018, 44(1): 63-68.
- [15] 张春雷, 戴丽, 刘宇, 等. 基于三点法和ICP算法的手术导航系统患者配准[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1584-1590.
Zhang Chunlei, Dai Li, Liu Yu, et al. Patient Registration for Surgical Navigation System Based on Three-Point Method and ICP Algorithm[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(11): 1584-1590.