

自适应变异差分算法与 Powell 算法相结合的医学图像配准

刘 哲^{1,2} 宋余庆¹ 王栋栋¹

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)¹ (吉林师范大学计算机学院 四平 136000)²

摘要 图像配准是医学图像处理中的关键技术。文中提出一种自适应差分算法(Difference Algorithm, DE)和 Powell 算法相结合的多分辨率医学图像配准方法,其不仅可以克服 Powell 算法依赖初始点的缺点,还可以降低陷入局部极值的几率。首先,对源图像进行多分辨率处理,获得包括源图像在内的三层图像;然后,在低分辨率图像上使用自适应 DE 算法进行全局变换参数的搜索,获得的变换参数作为 Powell 算法的初始点;最后,在高分辨率图像及源图像上使用 Powell 算法进行配准。与传统实验相比,该方法具有更高的精确度,能够有效避免局部收敛问题。

关键词 图像配准,差分算法, Powell 算法,互信息,多分辨率

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.11.045

Medical Image Registration Based on Self-adaptive DE Algorithm and Powell Algorithm

LIU Zhe^{1,2} SONG Yu-qing¹ WANG Dong-dong¹

(School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)¹

(School of Computer Science, Jilin Normal University, Siping 136000, China)²

Abstract Image registration is a key technology in medical image processing. This paper proposed a new multi-resolution medical image registration method based on self-adaptive difference algorithm (DE) and Powell algorithm. It can not only overcome the shortcomings of Powell algorithm depending on the initial, but also can reduce the possibility of getting into local extreme value. Firstly, the source image is processed by multi resolution, and the three layer image including the source image is obtained. Secondly, the adaptive DE algorithm is used to search the global transform parameters on the low resolution images. The transformation parameters are obtained as the initial points of the Powell algorithm. Finally, the Powell algorithm is used for registration in both high resolution images and source images. Compared with traditional experiment, this method has higher precision and can effectively avoid local convergence problem.

Keywords Image registration, DE algorithm, Powell algorithm, Mutual information, Multi-resolution

1 引言

随着医学成像技术的迅速发展,设备成像原理的不同将导致存在多种模态图像,不同模态的图像有各自的特点,如 CT 和 MRI 以较高的空间分辨率提供器官的解剖结构信息,而 PET 和 SPECT 以较低的空间分辨率提供新陈代谢功能信息^[1-2]。为了综合利用不同图像所提供的信息,需将不同图像进行融合,而融合的前提便是图像配准。配准过程中不发生形变的图像称为参考图像,发生形变的图像称为浮动图像。对于浮动图像,寻求一种空间变换,使参考图像与浮动图像对应于空间同一位置的点联系起来,探求能够使得参考图像和变换后浮动图像相似性达到最大的参数^[3-4]。

按照特征的选择可以将图像配准分为基于灰度和基于特征的图像配准^[5]。基于灰度的图像配准方法无需对特征进行

特定的提取,其直接跳过源图像的预处理过程,极大地减小了图像预处理过程中因受到干扰而给配准带来的不必要误差,但同时其具有计算量大、配准时间长等缺点,因此在寻优过程中加入多分辨率策略可以加速医学图像配准速度^[6]。在医学图像配准过程中,常用的优化算法有蚁群算法、遗传算法、Powell 算法、粒子群算法和模拟退火算法等^[7]。Panda R 等人^[8]针对互信息具有许多局部极大值的问题,引入了一个新的进化的刚体对接算法用于医学图像配准。在引入一种直接目标适应度函数的同时采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化该适应度函数,该方法对旋转和平移参数都十分有效,配准结果的精确度更高。吕晓琪等人^[9]提出将粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和改进 Powell 算法相结合的图像配准算法,对小波分解得到的最顶层图像采用 PSO 算法,寻优的结果作为改进 Powell 算法的初始点,但是

到稿日期:2017-05-12 返修日期:2017-07-01 本文受国家自然科学基金项目(61402204,61572239),中国博士后项目(2017M611737),江苏省青蓝工程,江苏大学高级人才项目(14JDG141)资助。

刘 哲(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、图像数据库;宋余庆(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为医学图像处理;王栋栋(1991—),男,硕士生,主要研究方向为医学图像处理。

PSO算法自身存在易陷入局部极值的缺点,从而导致得到的初始点不可完全信赖。

针对 Powell 算法进行图像配准时过度依赖初始点而容易陷入局部极值造成误配准的问题,本文提出将自适应 DE 算法和 Powell 算法相结合的算法,并在不同分辨率层使用了不同优化算法。与传统配准方法相比,所提算法的配准精确度有所提高,可以有效克服配准过程中陷入局部极值的问题。

2 图像配准的相关理论

2.1 互信息

医学图像配准中,相似度测度函数有多种,如互信息、梯度相关和平方差等,而互信息作为最常用的函数,其概念的提出旨在衡量两个随机变量之间的相关性,简言之,就是两幅图像的相似性大小^[10-11]。对于图像 A 和 B,采用式(1)定义其互信息值:

$$I(A,B) = \sum_{a,b} P_{A,B}(a,b) \log_2 \frac{P_{AB}(a,b)}{P_A(a) \times P_B(b)} \quad (1)$$

其中, $P_A(a)$ 和 $P_B(b)$ 分别是图像 A 和 B 的边缘概率分布。 $P_{A,B}(a,b)$ 表示联合概率分布,互信息 $I(A,B)$ 的值越大,表明图像 A 和 B 的相似性越高。

互信息也可以表示为两个随机变量之间的相关熵:

$$I(A,B) = H(A) + H(B) - H(A,B) \quad (2)$$

其中, $H(A)$ 和 $H(B)$ 分别是图像 A 和 B 的熵, $H(A,B)$ 是其联合熵。在配准中,当两幅图像的空间特征位置逐一对应时,互信息值 $I(A,B)$ 最大。

2.2 多分辨率金字塔

医学图像经过多分辨率处理,形成了不同分辨率的图像^[12],从而组成图像金字塔,图像的分辨率自上而下逐渐变大,最底层是源图像。在较低分辨率图像上进行寻优,图像信息的不完整将导致配准结果达不到期望值,但此次配准获得的参数有效地接近最优解,可以收缩搜索范围;且低分辨率图像的数据量较小,可以减少配准所需要的时间,也可以避免出现局部收敛问题,更有利于配准实验的完成。本文使用小波变换对图像进行多分辨率处理,小波分解后的低频部分保留了原始图像的基本信息,利用低频部分来近似原始图像,对低频部分再进行分解,从而建立图像金字塔^[13]。如图 1 所示,0 级表示源图像分解后的最低分辨率层,1 级表示源图像分解后的高分辨率层,2 级表示源图像。

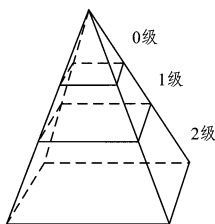


图1 图像金字塔

假设 $C_0(m,n)$ 是二维图像,则得到图像低频部分的处理公式如下:

$$C_k(i,j) = \sum_m \sum_n C_{k-1}(m,n) h(2m-i) l(2n-j) \quad (3)$$

其中, k 表示分解层数, h 和 l 分别代表小波变换函数的高通滤波和低通滤波尺度方程系数。

2.3 Powell 算法

Powell 算法作为基本模式搜索方法的一个扩展,具有无需计算导数的优势^[14]。在 n 维搜索空间顺着 n 个坐标矢量探寻极值,经过 n 次后能够取得 n 个共轭方向,再顺着这 n 个共轭方向探寻极值,在多次迭代后即可取得极值。对于已知的求解函数 $f(x)$,利用随机分配的初始点,采用共轭方向的原理和特性逐步构建共轭方向,并将其作为优化过程中的搜索方向。Powell 算法拥有较强的局部寻优能力和较快的收敛速度等,但也存在易陷入局部极值等问题,优化结果很大程度上依赖于初始点的选择。为了解决该问题,提出用 DE 算法在低分辨率图像获得 Powell 算法可以使用的初始点参数并完成医学图像配准实验。

2.4 自适应 DE 算法

DE 算法^[15] 可以动态跟踪当前的搜索情况,通过使用个体之间的合作与竞争产生的群体智能来指引优化的方向并及时调整搜索策略,从而实现寻优。

在初始种群中,选取 3 个全然不相同的个体作为父代,其中通过将任选的两个个体之间的向量差与剩下的个体加权求和来获得新个体,计算出新个体与迭代中目前个体的相似度函数值并对其值进行比较,若新个体大于当前个体,则在下一次迭代中使用新个体取代当前个体,否则仍保留当前个体。在不断地迭代进化的过程中,较优个体得到保留,较差个体被摒弃,从而引导搜索向最优解靠近,逐步获得全局最优解。

(1) 初始化种群

初始种群可以表示成:

$$\{x_i(0) \mid x_{i,j}^L(0) \leq x_{j,i}(0) \leq x_{i,j}^U(0)\} \quad (4)$$

个体生成公式如下:

$$x_{i,j}(0) = x_{i,j}^L(0) + \text{rand}(0,1) * (x_{i,j}^U(0) - x_{i,j}^L(0)) \quad (5)$$

其中, NP 代表种群规模的大小, $x_{i,j}(0)$ 表示 $x_i(0)$ 的第 j 维分量, $\text{rand}(0,1)$ 表示区间为 $[0,1]$ 的随机函数, i 的区间和 j 的区间分别为 $[1, NP]$ 和 $[1, D]$ 。

(2) 变异操作

DE 算法的个体变异是通过差分策略实现的。任意选取种群中 3 个全然不同的个体作为父代进行变异操作而产生变异个体 $u_i(g)$:

$$u_i(g) = x_{r1}(g) + F * (x_{r2}(g) - x_{r3}(g)) \quad (6)$$

其中, F 是变异概率,取值范围一般为 $[0, 2]$,且 $i \neq r1 \neq r2 \neq r3$ 。

(3) 交叉操作

多个父代个体以一定的规则进行交叉组合,实现局部扩展。DE 利用交叉算子生成新的候选解 $v_{i,j}(g)$,称为“实验个体”。

$$v_{i,j}(g) = \begin{cases} u_{i,j}(g+1), & \text{if } \text{rand}(0,1) \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j}(g), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中, CR 是交叉概率, j_{rand} 为区间 $[1, NP]$ 中的随机整数。这

种交叉策略可以确保个体 $v_{i,j}(g)$ 中含有个体 $x_{i,j}(g)$ 的内容。

(4)选择操作

DE 算法采用贪婪选择策略来对种群进行更新,选择适应值更优的个体作为子代进入新种群:

$$x_i(g+1) = \begin{cases} v_i(g), & \text{if } f(v_i(g)) \leq f(x_i(g)) \\ x_i(g), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

由于差分算法容易出现早熟现象,为了克服该缺点,在标准 DE 算法中添加一个自适应的变异算子 F :

$$\lambda = e^{1 - \frac{G_m}{G_m + 1 - G}} \quad (9)$$

$$F = F_0 * 2^\lambda$$

在优化早期, F 较大可以增加个体的多样性,在后期其值逐渐减小,以保留较优个体,增加获得全局最优解的概率。

3 本文算法

自适应 DE 算法拥有较强的鲁棒性和全局寻优能力,可以获得全局最优解,但是收敛速度缓慢; Powell 算法有较强的局部寻优能力,但对初始点存在依赖性。因此,利用多分辨率策略将图像分解成不同分辨率层的图像金字塔,在低分辨率图像上将自适应 DE 算法进行配准得到的优化参数作为 Powell 算法的初始点,弥补了 Powell 算法的缺点。本文算法的流程图如图 2 所示,具体步骤如下:

1)利用多分辨率策略将参考图像 R 和浮动图像 F 分解成三层图像金字塔,第三层图像的分辨率最小,第一层为源图像。

2)首先对金字塔第三层图像进行配准,以互信息作为相似性测度评价结果的好坏,利用改进的 DE 算法探寻最佳的变换参数,结束后输出第三层的参数。

3)将通过 DE 算法寻优的结果作为下一步 Powell 算法寻优的初始点,本研究算法将对图像金字塔上的第二层图像和第一层图像进行配准。原理同步骤 2)。对后两层图像配准时,因为 Powell 算法寻优的初始点接近全局最优解,所以在提升配准结果精度的同时,收敛速度也较随机选定初始点的 Powell 算法快。最终获得优化参数,对浮动图像 F 按照次参数变换便可以获得配准结果图。

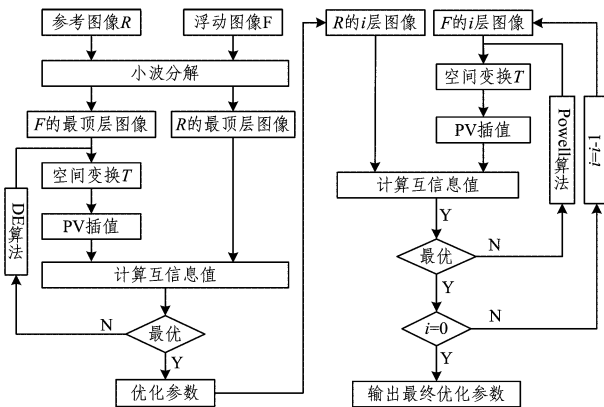


图 2 本文方法流程图

4 实验与分析

为验证本文算法的可行性,分别对单模和多模医学图像进行配准实验。实验数据来自江苏大学附属医院,实验的环

境配置为: Windows7 操作系统, Matlab2014a 开发平台。这两组实验均采用 PSO 算法^[16]、Powell 算法^[14]、自适应 DE 算法^[15]和所提方法进行配准,并对结果进行比较。

选取一组单模态脑部 CT 图像进行配准,得到的配准结果图如图 3 所示,实验结果比较如表 1 所列。其中, Δx 表示 x 轴方向的配准误差, Δy 表示 y 轴方向的配准误差, $\Delta\theta$ 表示旋转角度的配准误差。

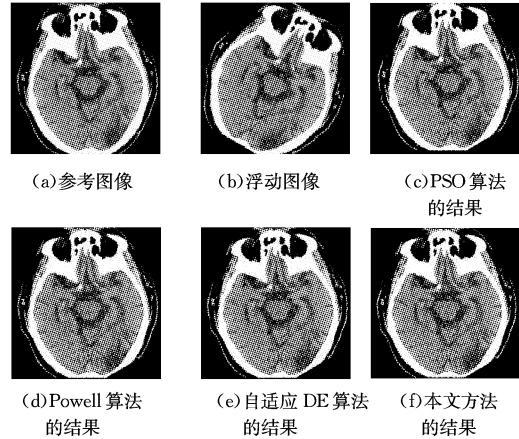


图 3 单模态图像配准结果的比较

表 1 不同算法的单模态图像配准实验结果的比较

算法	Δx	Δy	$\Delta\theta/^\circ$	时间/s	MI
PSO	0.6025	0.5303	0.3018	37.9289	2.2233
Powell	0.4181	0.6741	0.2434	40.7815	2.2685
自适应 DE	0.3287	0.2528	0.1841	60.4348	2.2816
本文方法	0.0300	0.1519	0.0014	25.0769	2.4030

同时选取了同一个人的脑部 MRI 图像和脑部 CT 图像进行多模态图像配准,4 种算法的实验结果如表 2 所列,结果图如图 4 所示,互信息值的比较如图 5 所示。

表 2 不同算法的多模态配准实验结果的比较

算法	Δx	Δy	$\Delta\theta/^\circ$	时间/s
PSO	1.4951	0.3239	0.3794	161.4941
Powell	0.8476	0.2239	0.2794	151.4941
自适应 DE	0.4629	0.1661	0.3486	270.3809
本文方法	0.0335	0.1165	0.0502	136.4703

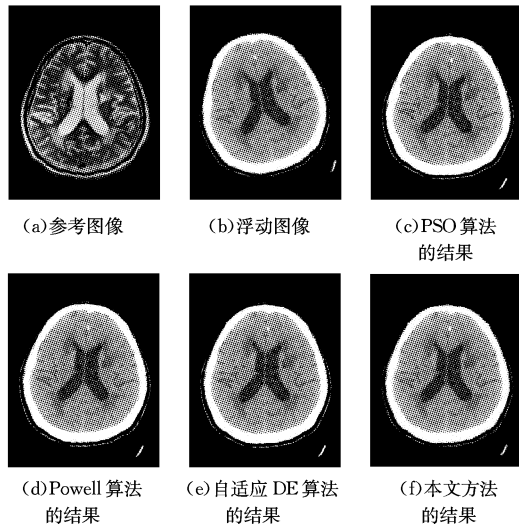


图 4 多模态图像配准结果的比较

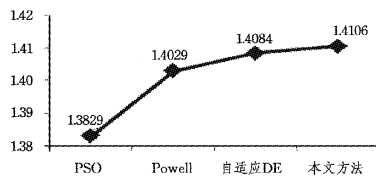


图5 互信息值的比较

从单模态和多模态的配准结果可以看出,平移向量在 x 轴方向和 y 轴方向的误差小于 1 个像素,旋转误差小于 1° ,能够达到亚像素级,配准实验结果的精度较高。相对于直接采用 PSO 算法、Powell 算法以及自适应 DE 算法的医学图像配准,本文方法不仅可以缩短时间,而且可以获得更加接近全局最优解的有效解。通过在低分辨率层使用全局寻优能力较强的自适应 DE 算法寻优后得到的变换参数,能够解决 Powell 算法依赖初始点的问题。所提方法的配准结果优于前 3 种算法的结果,并且弥补了配准结果容易陷入局部极值的缺陷。

结束语 基于互信息的配准方法是医学图像配准的研究热点,但存在局部极值等问题,而且使用 Powell 算法会过分依赖起始点,不能得到全局最优解。为了弥补上述缺陷,提出了自适应 DE 算法和 Powell 算法相结合的配准算法,此算法通过小波变换分解图像,分别对低分辨率图像和高分辨率图像及源图像使用自适应 DE 算法和 Powell 算法。以互信息作为相似性测度,对单模态和多模态医学图像进行配准实验。结果表明,所提方法的优化时间短、配准结果精度高,并且降低了陷入局部极值的概率,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] VIERGEVER M A, MAINTZ J B A, KLEIN S, et al. A survey of medical image registration-under review[J]. *Medical Image Analysis*, 2016, 33:140-144.
- [2] EL-GAMAL E Z A, ELMOGY M, ATWAN A. Current trends in medical image registration and fusion[J]. *Egyptian Informatics Journal*, 2016, 17(1):99-124.
- [3] FERRANTE E, PARAGIOS N. Slice-to-volume medical image registration; A survey[J]. *Medical Image Analysis*, 2017, 39: 101-123.
- [4] LI Y, STEVENSON R L. Multimodal Image Registration with Line Segments by Selective Search[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(5):1285-1298.
- [5] SONG H, QIU P. Intensity-Based 3D Local Image Registration [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 99(15):15-21.
- [6] GONZÁLEZ E, BIANCONI F, FERNÁNDEZ A. An investigation on the use of local multi-resolution patterns for image classification[J]. *Information Sciences*, 2016, 361-362:1-13.
- [7] PLUIM J P W, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Mutual-information-based registration of medical images: a survey [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(8):986-1004.
- [8] PANDA R, AGRAWAL S, SAHOO M, et al. A novel evolutionary rigid body docking algorithm for medical image registration [J]. *Swarm & Evolutionary Computation*, 2017, 33:108-118.
- [9] LV X Q, YU H F, ZHANG C T. Combined with the improved particle swarm algorithm Powell multi resolution 3D medical image registration [J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(12):3898-3901. (in Chinese)
吕晓琪, 于荷峰, 张传亭. 粒子群与改进的鲍威尔算法相结合的多分辨率三维医学图像配准[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(12):3898-3901.
- [10] YANG F, DING M, ZHANG X, et al. Non-rigid multi-modal medical image registration by combining L-BFGS-B with cat swarm optimization [J]. *Information Sciences*, 2015, 316 (C): 440-456.
- [11] HU Y X. Research on multimodal medical images non rigid registration based on mutual information [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
胡永祥. 基于互信息的多模态医学图像非刚性配准研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [12] LENG J, XU G, ZHANG Y. Medical image interpolation based on multi-resolution registration[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2013, 66(1):1-18.
- [13] REIN S, REISSLEIN M. Scalable Line-Based Wavelet Image Coding in Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2016, 40(p13):418-431.
- [14] ZHOU Q H, SONG Y Q, CHEN J M, et al. Medical image registration based on multi-resolution and Powell algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(4):1256-1258. (in Chinese)
周其慧, 宋余庆, 陈健美, 等. 基于多分辨率和 Powell 算法的医学图像配准[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(4):1256-1258.
- [15] LI T, PAN Q, GAO L, et al. Differential evolution algorithm-based range image registration for free-form surface parts quality inspection[J]. *Swarm & Evolutionary Computation*, 2017, 26(4):35-40.
- [16] PRADHAN S, PATRA D. RMI based non-rigid image registration using BF-QPSO optimization and P-spline[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69(3):609-621.