

·信号与信息处理·

## 一种互信息与梯度信息结合的多模图像配准方法

史聪文, 赵勋杰

(苏州大学 物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 数字化X射线图像(digital radiography, DR)与数字重建放射图像(digitally reconstructed radiography, DRR)属于不同模态图像, 实现二者的高精度快速配准是一个技术难题。在实际应用中, 往往会同时获取物体的正侧面DR和DRR图像。提出一种基于互信息与梯度信息相结合的配准算法。首先, 对正侧面图像进行小波分解, 获得低分辨率子图像并配准, 使用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法进行全局寻优; 然后, 根据配准结果, 判断互信息与梯度信息配准结果是否正确, 如果配准错误, 则在下一阶段中不使用该结果作为配准依据; 最后, 以PSO算法寻优结果作为Powell算法的寻优初始点, 对原始正侧图像进行精确配准。实验结果显示, 本算法快速完成配准, 配准精度达到2 mm, 满足实际应用要求。

**关键词:** 图像配准; 互信息; 梯度信息; 粒子群优化算法; Powell算法; DR; DRR

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0046-04

## Multi-modality Image Registration Algorithm Combining Mutual Information and Gradient Information

SHI Cong-wen, ZHAO Xun-jie

(College of Physics, Optoelectronics and Energy of Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** Digital Radiography (DR) image and digitally reconstructed radiography (DRR) image are different modality images, accurate and rapid multi-modality image registration is a technical difficulty. In practical applications, front and side DR and DRR images are generally acquired at same time. A multi-modality image registration algorithm is proposed based on combining mutual information and gradient information. Firstly, the low resolution images, which are got by wavelet transform, are registered based on particle swarm optimization (PSO) algorithm. And then, we can determine if the registration results are true. If it is not true, we don't use it at the next process. Finally, we set the results of last process as initial position of Powell and register original images. The experimental results show that the algorithm can rapidly register multi-modality image, and the registration accuracy is 2 mm. The algorithm meets the practical application requirements.

**Key words:** image registration; mutual information; gradient information; particle swarm optimization (PSO); Powell; digitally radiography (DR); digitally reconstructed radiography (DRR)

图像配准作为图像处理的一个关键性技术, 在军事、遥感、医学等方面都有着广泛的应用。由于实际应用中获取图像的技术方式不同, 会有多种模态的图像, 如可见光图像、红外图像、微波遥感图像、计算机断层扫描(CT)图像、单光子发射计算机断层(SPECT)图像、正电子发射型计算机断层

(PET)图像等<sup>[1-2]</sup>。这些不同模态的图像往往需要相结合使用, 这就需要将多模图像进行配准。多模图像配准技术在其中就发挥了重要的作用。而互信息算法是多模图像配准中重要的经典算法<sup>[3-5]</sup>。

自Viola等<sup>[6]</sup>将互信息算法应用于MRI图像配准后, 其在多模图像配准中得到了大量的应用。互

收稿日期: 2016-08-16

作者简介: 史聪文(1990-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉及应用。

信息算法的优点可归纳为以下几点:(1)配准精度高,能够达到亚像素级别;(2)鲁棒性较高,对于图像失真不敏感;(3)人工干预少,能用于自动配准。但互信息算法也有一些缺点:(1)计算量大,不适合应用于实时配准的场合;(2)互信息函数存在比较多的极值,寻优过程中容易陷入局部最优解;(3)只考虑图像灰度信息,忽略了图像的内部特征信息。

针对互信息算法的缺点,对互信息算法做出如下改进:(1)为了克服互信息算法局部极值过多和忽略图像内部特征信息的缺点,将互信息与梯度信息结合使用。但简单地将二者以相乘的方式结合使用,当二者中有一个配准结果有误时就会影响最终的配准精度。因此,在二者结合的基础上加入判断机制,去除错误配准结果,最终提高配准精度。(2)为了提高配准速度,将PSO算法和Powell算法相结合进行分步搜索。首先,借助小波变换获得低分辨率子图像并进行配准,用PSO算法进行全局寻优;然后,对原始图像进行配准,并以PSO算法寻优结果作为Powell算法寻优初始点进行局部寻优。该种混合算法可以有效的提高配准精度以及配准速度。

## 1 互信息配准方法

互信息是信息理论中的一个基本概念,用来描述两个系统间的统计相关性,或者是一个系统中所包含的另一个系统信息量的多少。两幅图像的互信息定义为

$$MI(A,B) = H(A) + H(B) - H(A,B) \quad (1)$$

式中, $H(A)$ 和 $H(B)$ 分别代表图像 $A$ 、 $B$ 的熵; $H(A,B)$ 代表图像 $A$ 、 $B$ 的联合熵。图像 $A$ 、 $B$ 的熵以及联合熵计算如下

$$H(A) = \sum_a -P_A(a) \lg P_A(a) \quad (2)$$

$$H(B) = \sum_b -P_B(b) \lg P_B(b) \quad (3)$$

$$H(A,B) = \sum_{a,b} -P_{A,B}(a,b) \lg P_{A,B}(a,b) \quad (4)$$

式中, $P_A(a)$ 和 $P_B(b)$ 分别代表图像 $A$ 、 $B$ 的灰度分布; $P_{A,B}(a,b)$ 代表图像 $A$ 、 $B$ 的灰度联合分布。

对于多模图像配准,虽然两幅图像来源不同,但是它们都反映了同一物体的信息,所以当二者完全配准时,两幅图像的互信息值达到最大。在实际配准中,参考图像与浮动图像重叠部分往往会发生

变化,针对这一问题Studholme等<sup>[7]</sup>提出了归一化互信息,其可以在一定程度上减少参考图像与浮动图像重叠部分发生变化带来的影响,归一化互信息如下

$$NMI(A,B) = \frac{H(A) + H(B)}{H(A,B)} \quad (5)$$

## 2 梯度信息方法

互信息在图像配准应用很广泛,但其只利用了图像的灰度信息并未使用图像内在特征信息。当图像部分缺失、变形或者图像噪声较大时,其配准精度就会下降。若结合图像梯度信息使用,则可增强图像配准的鲁棒性<sup>[8]</sup>。虽然在多模图像配准当中,以不同成像方式获取的同一物体图像往往会在图像灰度、分辨率以及尺寸方面有较大的差异。但是同一物体在不同成像方式下获得的图像,其边缘特征是基本确定的,所以同一物体边界上像素点的梯度方向应该是相同或者相反的。因此,两幅图像像素点间梯度向量夹角的整体平均可以反映出两幅图像的相似程度,作为图像配准依据。

对于图像 $A$ 、 $B$ ,点 $x$ 为图像 $A$ 中点,点 $x'$ 为点 $x$ 经变换后图像 $B$ 中与之对应的点。点 $x$ 与 $x'$ 的梯度向量夹角可以表示为

$$\alpha_{x,x'} = \arccos \frac{\nabla x \cdot \nabla x'}{|\nabla x| |\nabla x'|} \quad (6)$$

式中, $\nabla x$ 表示点 $x$ 的梯度向量; $|\nabla x|$ 表示点 $x$ 的梯度向量模。求解图像梯度常用的算子有Roberts算子、Prewitt算子和Sobel算子等,文中算法使用Sobel算子获得图像梯度。

不同模态的图像,对于同一物体的灰度分布会有所不同。因此,不同模态图像相对应点的梯度方向可能有所不同。尽管如此,由于这些图像都是描述同一物体,不同图像间对应于同一位置的像素点应该有相同或相反的梯度方向<sup>[9]</sup>。因此,使用式(7)定义权重函数,当夹角为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时权重最大,表明此时两幅图像最相似,图1显示了夹角与权重的关系为

$$\omega(\alpha) = \frac{\cos(2\alpha) + 1}{2} \quad (7)$$

尽管不同模式下,同一物体在图像中的高频梯度信息可能有所不同。但所关注的是在两幅图像中同时出现的高频梯度信息,所以两幅图像间的梯

度信息相似度量可表示为

$$G(A,B) = \sum_{(x,x') \in (A \cap B)} \omega(\alpha_{x,x'}) \min(|\nabla x|, |\nabla x'|) \quad (8)$$

将互信息与梯度信息结合使用,以解决互信息算法存在极值较多的问题,结合后的配准目标函数如下

$$I(A,B) = G(A,B) \times NMI(A,B) \quad (9)$$

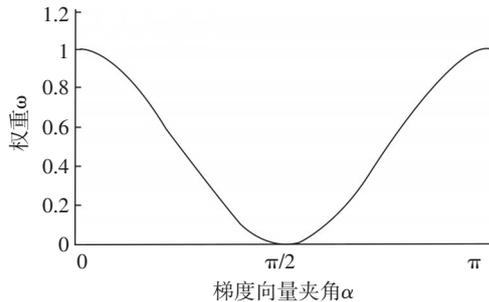


图1 梯度向量夹角与权重关系

### 3 互信息与梯度信息结合算法

简单地将互信息与梯度信息相乘,虽然可以提高图像配准精度。但是若二者中有一个相似度量函数不能正确反映实际情况,就会导致最终配准结果产生较大偏差甚至错误。为了解决此问题,采用的处理方法是:先判断二者配准是否正确后,再决定二者结合方式,以去除错误的配准。在实际应用中,都会获取物体的正侧面图像。可以看出,正侧面图像最终配准结果的纵坐标值应该是相同的。因此,可以通过正侧面初步配准结果纵坐标值来判断互信息与梯度信息配准是否正确,从而决定二者组合方式。假如只有互信息配准正确,则在精确配准时使用公式(5);若果只梯度信息配准正确,则在精确配准时使用公式(8),否则使用公式(9)。

### 4 PSO算法与Powell算法分步搜索

图像配准过程实际上是求取两个图像间像素位置、灰度变换的过程,即相似度量函数的最优化过程。图像加速搜索策略的任务就是减少这一过程的用时。常用的搜索策略有黄金分割法、遗传算法、模拟退火算法、Powell法、PSO算法等。

Powell算法不需要计算导数,收敛速度快,局部寻优能力极强,相较于PSO算法和遗传算法局部搜

索精度高。但是Powell算法寻优结果的准确性依赖于初始点的选择,寻优过程容易陷入局部最优解,可能无法得到全局最优解<sup>[9]</sup>。

PSO算法最早由Kennedy和Eberhart于1995年首次提出<sup>[10]</sup>,用于模拟鸟群飞行觅食的行为,通过鸟群个体之间的协调,从而使群体达到最优。PSO算法是一种基于群体进化的算法,具有算法简单,可并行搜索,参数设置简单的优点,常用于全局大范围寻优。但PSO算法在局部精确寻优时或者寻优后期速度较慢,局部寻优精确度也比Powell算法差。

考虑到PSO算法与Powell算法的这些优缺点,将二者结合使用可以取得比较好的效果<sup>[11]</sup>。具体步骤如下:(1)首先借助小波变换对图像进行分解,获得低分辨率子图像并进行配准,采用PSO算法进行全局寻优。(2)将步骤(1)所得的配准结果作为Powell算法寻优的初始位置,对原图像进行精度配准。

文中算法具体步骤如下:

步骤1 对正侧面浮动图像以及参考图像进行小波分解获得低分辨率子图像;

步骤2 对正侧面子图像分别以互信息和梯度信息为相似度量,用PSO算法进行初步配准;

步骤3 比较正侧面初步配准结果,判断以互信息与梯度信息为相似度量配准结果是否正确;

步骤4 根据步骤3判断结果决定互信息与梯度信息组合使用方式,获得精确配准所需要的参数;

步骤5 根据步骤4所得参数作为Powell算法寻优起点,对原图像进行配准,获得最优解。

### 5 实验结果

实验是在Windows7的环境下使用MATLAB 2014完成的。实验中所使用的数据来源于实际临床图像,总共分为60组数据,头部、颈部、盆腔各20组,每组数据分别包含了正面DR图像、DRR图像和侧面DR图像、DRR图像。其中DR图像是通过MV a-Si EPID获取的图像,实验中作为浮动图像。DRR图像是通过CT数据重建获取的图像,实验中作为参考图像。DR图像是640×640像素的8位灰度图,DRR图像是512×512像素的8灰度图像。图2、图3、图4分别显示头部、颈部、盆腔DR和DRR图像以及配准效果图(a、d为DRR图像,b、e为DR图像,c、f为配准后的融合效果图)。

(1)算法时间:使用PSO算法与Powell算法相结

合的分步搜索算法,60组数据平均每组图像配准时为4.53 s,而使用PSO算法平均每组图像配准时间则为5.87 s。可见使用分步搜索算法,对配准速度有所提高。

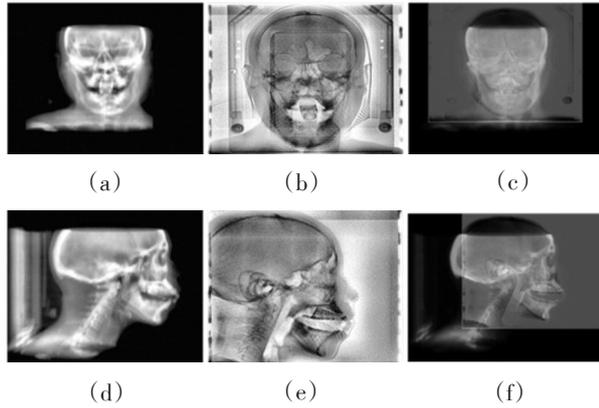


图2 头部配准效果图

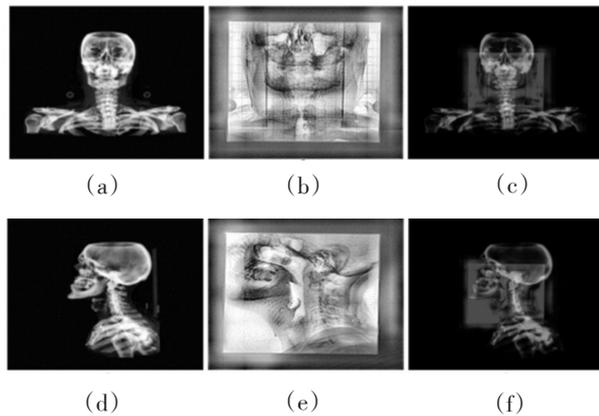


图3 颈部配准效果图

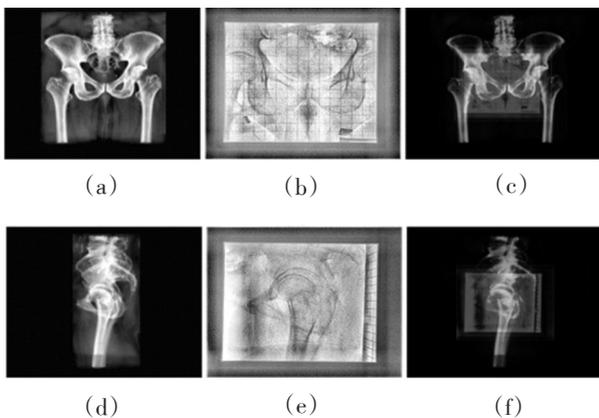


图4 盆腔配准效果图

算法、梯度信息算法和文献[8]算法。表1为各算法最终配准结果与参考配准点的误差平均值,表中误差单位为毫米。

表1 各算法配准结果

部位	互信息	梯度信息	文献[8]算法	文中算法
头部	2.98	1.57	1.41	1.15
颈部	4.68	4.08	3.46	1.79
盆腔	8.82	4.69	1.65	1.30

从表格中可以看出,互信息与梯度信息算法表现较差,文中算法配准效果最好,文献[8]算法次之。互信息算法配准效果较差,主要是由于互信息算法只利用了图像灰度信息,而DR图像与DRR图像灰度差异较大,并且DR图像有很强的噪声,图像质量不是很好,所以配准效果较差。而梯度信息配准效果不佳,主要原因在于有些图像边缘特征信息不易精确提取。但头部轮廓边缘比较清晰,所以配准效果相对较好,而颈部、盆腔轮廓边缘不清晰所以配准效果较差。文中算法克服了互信息算法和梯度信息算法的这些缺点,所以能有效的提高图像配准精度。

## 6 结论

针对多模图像配准问题,提出了使用互信息与梯度信息相结合的方式配准多模图像,并在得到初步配准结果后,通过对比正侧面图像的配准结果,来判断互信息与梯度信息配准结果是否正确,再依据判断结果进行精确配准,这样有效的提高了配准精度。对于提高配准速度方面,使用PSO算法和Powell算法结合的分步搜索算法,在一定程度上提高了配准速度。文中算法在配准精度以及速度方面达到了实际应用要求。下一步在以下方面进一步研究:(1)在低分辨率图像配准时,分别对正侧面图像进行配准,中间没有联系,应加强联系提高配准速度;(2)配准时未考虑感兴趣区域的问题,进一步工作中将考虑该问题。

## 参考文献

[1] 刘朝霞,安居白,邵峰,等. 航空遥感图像配准技术[M]. 北京:科学出版社,2014:2-6.

## 参考文献

- [1] 谭显裕. 微光夜视和红外成像技术的发展及军用前景[J]. 航空兵器, 2001(3): 29-34.
- [2] 何丽. 走进新世纪的红外热成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(12): 48-51.
- [3] 毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 228-1272.
- [4] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 100-102.
- [5] 李奇, 林衍庆. 新型红外探测技术的研究[J]. 自动驾驶

仪与红外技术, 2003(3): 2-8.

- [6] 高昕, 李建安. 应用于弹丸跟踪测量的红外器件工作波段选择[J]. 测试技术学报, 2002, 16(3): 192-195.
- [7] 李颖杰, 吕相银. 空间目标的红外辐射理论计算[J]. 红外, 2010, 31(2): 39-43.
- [8] 徐南荣, 瞿荣贞. 飞行器的红外特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 8-14.
- [9] 余常斌, 杨坤涛, 姜宏滨. 红外成像系统作用距离等效折算方法[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(3): 53-55.
- [10] 郑贤利, 王俊霖. 镍合金对  $\gamma$  射线吸收系数的测量与分析[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(1): 62-64.

(上接第26页)

统, 并分别采用同步和异步两种控制方式进行对比研究, 从输出视频稳定性讨论了异步控制方式给系统带来的误差。结果表明, 采用异步控制方式在高重频系统中能够成功消除盲区限制, 在低重频系统中会产生输出视频灰度抖动, 从而影响成像效果。

## 参考文献

- [1] 韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109001-1-0109001-7.
- [2] 曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上)—水下激光距离选通技术[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 63-69.
- [3] Fournier G R, D.Bonnier, Forand L, et al. Lucie Rovmounted laser imaging system[C]//Proc. SPIE, 1992, 1750: 443-452.

- [4] Swartz B A. Laser range gated underwater imaging advances[C]// Proc. IEEE, 1994, 2: 722-727.
- [5] Andersson A. Range Gated Viewing with Underwater Camera[D]. Sweden: Linköping University, 2005.
- [6] Weidemann A, Fournier G R, Forand L, et al. In harbor underwater threat detection identification using active imaging[C]//Proc. SPIE, 2005, 5780: 59-70.
- [7] 黄有为, 王霞, 金伟其, 等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3177-3183.
- [8] 戴路, 张晓晖. 脉冲计数可调式高重频水下距离选通成像系统[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(4): 78-82.
- [9] 杨述斌, 彭复员. 激光水下距离选通成像门控实验研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(3): 10-11.
- [10] 钟炜, 张晓晖. 水下高重频距离选通成像雷达同步控制器设计[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(3): 55-59.

(上接第49页)

- [2] 于颖, 聂生东. 医学图像配准技术及其研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2009, 26(6), 1485-1489.
- [3] 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.
- [4] Maes F, Collignon A, Vandermeulen D. Multimodality image registration by maximization of mutual information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187-198.
- [5] 张峻豪, 孙焱, 詹维伟. 基于加权互信息的多模图像配

准算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(16), 207-211.

- [6] Viola P, Wells W M. Alignment by maximization of mutual information[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24: 137-154.
- [7] Studholme C, Hill D L G, Hawkes D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1): 71-86.
- [8] Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(8): 809-814.