

文章编号:1004-4213(2010)08-1359-8

# 一种结合梯度方向互信息和多分辨混合优化的多模图像配准方法\*

凌志刚,潘泉,程咏梅,张绍武,李耀军

(西北工业大学 自动化学院 西安 710072)

**摘要:**针对基于传统互信息图像配准容易产生局部极大值,同时结合梯度信息的互信息改进方法不能很好地应用于梯度幅值差异较大的多模图像配准,提出了一种新的结合梯度方向的互信息测度函数.在参量优化过程中,将具有全局优化的遗传算法和 Powell 局部优化算法动态结合,前者的配准结果为后者的算法优化提供有效的初始点以抑制局部极值,同时借鉴小波变换中多分辨率的思想,在低分辨率图像中粗略配准后,上升到高分辨率图像上进一步细化配准结果,增加算法鲁棒性并减少优化时间.多幅红外与可见光图像配准实验结果证明,提出的算法具有配准精度高和鲁棒性强等特点.

**关键词:**互信息;梯度方向;GA 算法;Powell 算法;混合优化算法

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103908.1359

## 0 引言

图像配准技术作为图像镶嵌、融合和变化检测以及目标识别等的必要前提,已经在军事、遥感、医学等领域得到了广泛的应用.随着科学技术的发展,单模态传感器图像提供的信息已不能满足目前应用的需求,而不同模态传感器图像在对成像目标的描述上具有互补性,能够提供比单一传感器图像更为丰富的信息,从而得到越来越广泛的应用.然而,由于不同传感器的成像机理不同,同一地物或目标的图像在灰度、统计特性等方面都有较大的差异,现有基于可见光图像配准方法不能直接应用于多模态图像配准,多模态图像配准成为了目前研究的热点和难点问题之一<sup>[1]</sup>.

目前,多模图像配准方法主要可分成基于图像共有特征的配准方法<sup>[2-3]</sup>和基于互信息的灰度配准方法<sup>[4-5]</sup>.前者需要较多的人工干预,不能实现全自动配准,且配准精度受特征提取质量的限制.后者能够实现全自动配准且配准精度可达到亚像素级,被大量应用于多模态图像配准,并成为了多模态图像配准的最重要方法之一.

传统的基于互信息的配准方法有明显的缺点:1)传统互信息未考虑图像间重叠区域大小的影响,而当重叠区域减小时,参与互信息计算的像素数减小而导致互信息值降低从而导致错误匹配,为此,Studholme 等人<sup>[6]</sup>提出了一种具有重叠区域大小不敏感的归一化互信息(Normal Mutual Information, NMI),并取得了较好的结果.2)传统互信息方法仅统计图像像素的灰度分布,而在图像配准过程中,需要对图像进行多次插值处理来计算互信息,而插值过程会造成联合灰度直方图分散,从而使得互信息函数容易陷入由插值误差或图像噪声造成的局部极值<sup>[7]</sup>,而且计算量大.针对互信息局部极值问题,研究学者提出了许多不同的方法来抑制或消除局部极大值,如采用多分辨思想、模拟退火算法和遗传算法<sup>[8]</sup>等全局优化方法抑制局部极值;采用 PV 插值<sup>[8]</sup>等方法来消除图像插值的影响;或在利用图像单个像素灰度信息的基础上,集合像素之间的相互关系计算高阶互信息以及集合空间信息来改进互信息.如 Rueckert 等人<sup>[9]</sup>集合图像相邻像素来构建灰度共生矩阵并计算二阶互信息;文献<sup>[10]</sup>则首先将像素及相邻像素的灰度组成一个高维向量,然后对所有图像点生成的高维向量进行降维再计算图像点的区域互信息,上述两种方法尽管集合相邻像素,在一定程度上抑制了局部极值的影响,但本质上还是统计图像灰度,依然受到插值的影响;同时,由于需要在高维空间计算互信息,计算量较大.当两图像完全配准时,不仅应该具有相同的灰度分布,而且具有

\*国家自然科学基金(60634030)、高等学校博士学科点专项科研基金(20060699032)和航空科学基金(2006ZC53037、2007ZC53037)资助

Tel:029-88431366

Email:zgling\_hunan@126.com

收稿日期:2008-12-05

修回日期:2009-02-26

相似的图像局部特征,所以,Pluim<sup>[11]</sup>及汤敏<sup>[12]</sup>等人在统计图像灰度的基础上,引入图像的空间特征信息,将归一化互信息和梯度信息有机结合构建一种新互信息测度函数(GNMI)来配准图像;而Guo<sup>[13]</sup>将梯度向量流和图像灰度结合构造出一种梯度向量流-灰度图(GVFI),然后基于GVFI图计算互信息.实验表明这些方法不仅利用了图像的灰度信息,而且还引入了图像的空间信息,很大程度上抑制了局部极值的影响,比采用标准互信息、归一化互信息和高阶互信息的配准结果更准确和鲁棒.然而,在多模图像配准中,由于成像机理的不同,图像差异比较大,梯度幅值并不能提供稳定的信息,如对边缘模糊的红外与光学图像配准问题,从而限制了图像配准性能的进一步提高.尽管Kim<sup>[14]</sup>集合边缘方向与灰度构造一种新的互信息函数,但配准计算量相对较大.

本文在传统互信息的基础上引入更稳定的梯度方向信息构建一种新的相似度测量函数,其不仅考虑了图像灰度信息,而且有效的结合了更稳定的空间信息,从而避免不稳定图像梯度幅值的影响.此外,鉴于在参量优化过程中互信息计算量大及更有效的抑制局部极值的需要,采用全局寻优的遗传算法和Powell局部寻优算法动态结合,前者的配准结果为后者的算法优化提供非常有效的初始点,提高配准精度;同时,借鉴多分辨率的思想<sup>[15]</sup>,在低分辨率图像中粗略配准后,上升到高分辨率图像上进一步细化配准结果,增加算法鲁棒性并减少优化时间.

## 1 结合梯度方向的互信息测度

给定一幅 $M \times N$ 大小的图像 $I$ ,图像点的梯度 $\nabla I(x, y)$ 幅值与方向角分别表示为

$$|\nabla I(x, y)| = \sqrt{\nabla I_x(x, y)^2 + \nabla I_y(x, y)^2} = \sqrt{(g_x(\sigma) \otimes D)^2 + (g_y(\sigma) \otimes D)^2} \quad (1)$$

$$\arg(\nabla I(x, y)) = \text{atan} \frac{\nabla I_y(x, y)}{\nabla I_x(x, y)} \quad (2)$$

式中, $\nabla I_x, \nabla I_y$ 分别为图像在 $x, y$ 方向上的梯度,通过平滑后的图像在位置 $(x, y)$ 处的梯度来估计, $\otimes$ 表示卷积, $g_x(\sigma), g_y(\sigma)$ 分别是高斯函数 $g(x, y, \sigma)$ 在 $x, y$ 方向的偏导数.由于梯度方法易受噪声的影响,因此,先对梯度幅值取阈值处理,如果图像点的梯度幅值 $|\nabla I(x, y)|$ 大于 $Th$ ,则认为该点处于灰度变化剧烈的边缘区域,否则该点处于非边缘区域或为图像噪声,其阈值 $Th$ 定义为

$$Th = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |\nabla I(x, y)|^2}{M \times N}} \quad (3)$$

为避免噪声影响,将非边缘区域点的梯度方向角设

为0,则梯度方向角可以进一步表示为

$$\arg(\nabla I(x, y)) = \begin{cases} 0 & |\nabla I(x, y)| < Th \\ \text{atan} \frac{\nabla I_y(x, y)}{\nabla I_x(x, y)} & |\nabla I(x, y)| \geq Th \end{cases} \quad (4)$$

不失一般性,当两图像完全配准时,对应点的梯度方向应该相同或相反,也即对应点之间的梯度方向角度之差为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ ,所以定义对应点的梯度方向一致性函数<sup>[11]</sup>为

$$o(\Delta\theta(a, b)) = \frac{1 + \cos(2\Delta\theta(a, b))}{2} \quad (5)$$

式中, $\Delta\theta$ 为参考图像与浮动图像中对应图像点 $a, b$ 之间的梯度方向夹角,由式(5)可知, $o(\Delta\theta)$ 取值范围为 $[0, 1]$ ,当梯度方向一致(即夹角为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ )时, $o(\Delta\theta)$ 值为1,当梯度方向垂直(即方向夹角为 $90^\circ$ )时, $o(\Delta\theta)$ 值0.可以看出,当两图像完全配准,边缘方向一致性函数 $o(\Delta\theta(a, b))$ 的分布应集中于值1处,此时不仅联合熵 $H(A, B)$ 具有最小值,而且,联合熵 $H(A, B, o(\Delta\theta))$ 也应取得最小值并等于 $H(A, B)$ .因此,基于文献<sup>[16]</sup>的思想,在图像灰度联合熵的基础上,引入图像梯度方向信息,定义一种新的互信息测度函数为

$$mI(A, B) = H(A) + H(B) + H(o(\Delta\theta)) - H(A, B, o(\Delta\theta)) \quad (6)$$

此外,为了消除重叠区域大小对计算互信息的影响,定义两图像重叠区域的整体边缘方向一致性度量函数<sup>[14]</sup>为

$$O(A, B) = \frac{2 \times \sum_{(a, b) \in (R_A \cap R_B)} o(\Delta\theta(a, b))}{N_A + N_B} \quad (7)$$

式中, $R_A, R_B$ 分别为图像 $A, B$ 中的边缘区域, $N_A, N_B$ 分别为图像 $A, B$ 中的边缘区域点个数.可以看出 $O(A, B)$ 的取值范围为 $[0, 1]$ ,表示重叠区域的整体梯度方向一致点的比例,当完全配准时,图像间所有边缘区域点的方向一致,等于1.因此,集合式(6)和(7),定义结合图像梯度方向的互信息测度函数(Orientation NMI, ONMI)为

$$I_{\text{new}}(A, B) = O(A, B) \cdot mI(A, B) \quad (8)$$

由式(8)看出,新的互信息测度函数将图像灰度信息和多模态图像间更稳定的梯度方向信息有机的结合在一起,从而能避免多模图像间图像梯度幅值差异较大对互信息计算的影响并能有效的抑制局部极值产生以提高图像配准精度.

## 2 多分辨混合优化算法

图像配准本质上是一个多参量的相似性测度函数最优化过程,即寻找互信息达到最大时的配准参

量.目前,图像配准中使用最多的优化算法主要有单纯形法、Powell法、模拟退火算法和遗传算法(GA)等.这些优化算法各有优点,但也都存在不足之处,单纯形法与Powell法都不需要计算导数,但单纯形法的收敛速度则太慢,而Powell算法搜索速度比较快,局部寻优能力极强,在局部搜索中精度要高于其它的优化算法,但Powell存在初始点依赖问题,最终的优化结果很大程度上依赖于初始点所在的位置,使得Powell法的优化过程很容易落入局部最优而得到错误的配准参量.模拟退火算法能够跳出局部最优陷阱但是计算时间较长,并且有时会进入错误的搜索方向而不能得到最优解.而遗传算法具有很强的全局搜索能力,但容易出现“过早收敛”问题,此外,遗传算法对于系统中的反馈信息利用不够,遗传算法在搜索的初期具有较高向最优解收敛的速度,但当求解到一定范围时往往做大量无谓的冗余迭代,求最优解的效率显著降低.为了克服这些算法的缺点和充分利用其优点,大量的混合算法被采用<sup>[8,12]</sup>.

针对互信息计算过程中容易受到局部极值的干扰和计算量大等问题,在参量优化过程中采用如下两方面的改进措施:1)借助多分辨率思想,首先对图像进行小波分解,在配准初始阶段采用较粗分辨率

的图像,以提高配准的速度;而后在较高分辨率的图像进行精配准以提高配准精度,以避免局部极值的干扰;2)结合遗传算法和Powell算法各自的优点,采用动态切换的混合优化算法对参量进行优化,首先利用GA算法搜索得到最优值附近的解,然后再用Powell方法进行局部搜索,从而得到最佳的配准参量.但由于遗传算法搜索的随机性,当接近最优解的时候收敛速度非常慢,并且也难以确定终止条件,一般是设定迭代的次数,为了防止过早或过晚结束遗传算法过程,更快速、有效的保证在最佳时机实现遗传算法到Powell算法的切换,采用两种算法动态切换控制策略为:

- 1) 设定遗传算法最小迭代次数  $G_{min}$  和最大迭代次数  $G_{max}$ .
- 2) 在遗传算法迭代过程中统计子代群体的进化率.
- 3) 当迭代次数在设定的最小遗传迭代次数和最大遗传迭代次数范围之间时,如果连续代,子代群体的进化率都小于  $TH_{G_{min}}$ ,说明此时遗传算法的收敛速度较慢,可终止遗传算法切换到Powell算法.

### 3 算法具体步骤

算法具体流程图如图 1.

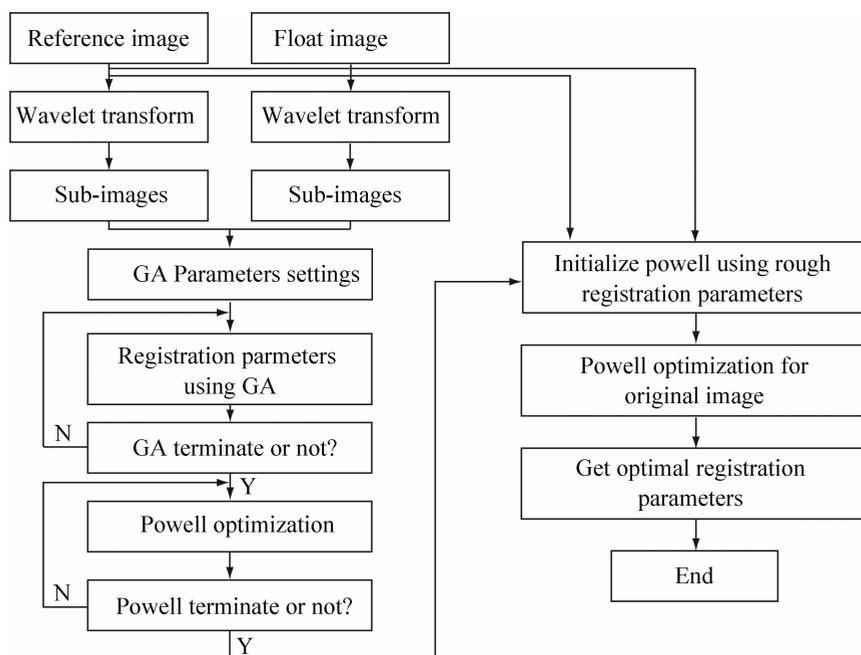


图 1 算法流程图  
Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

### 4 实验仿真结果

为了验证本文方法的有效性,采用了大量的可见光和红外图像对进行配准实验,限于篇幅,只给出两对图像(不妨称为图像对 1 和图像对 2),如图 2,

图像大小为 ,实验平台采用主频为 Pentium4 3.0 GHZ,内存为 768M,运行 Windows XP 的 PC 机,编程语言为 matlab7.1,同时认为图像之间为六参量的仿射变换.

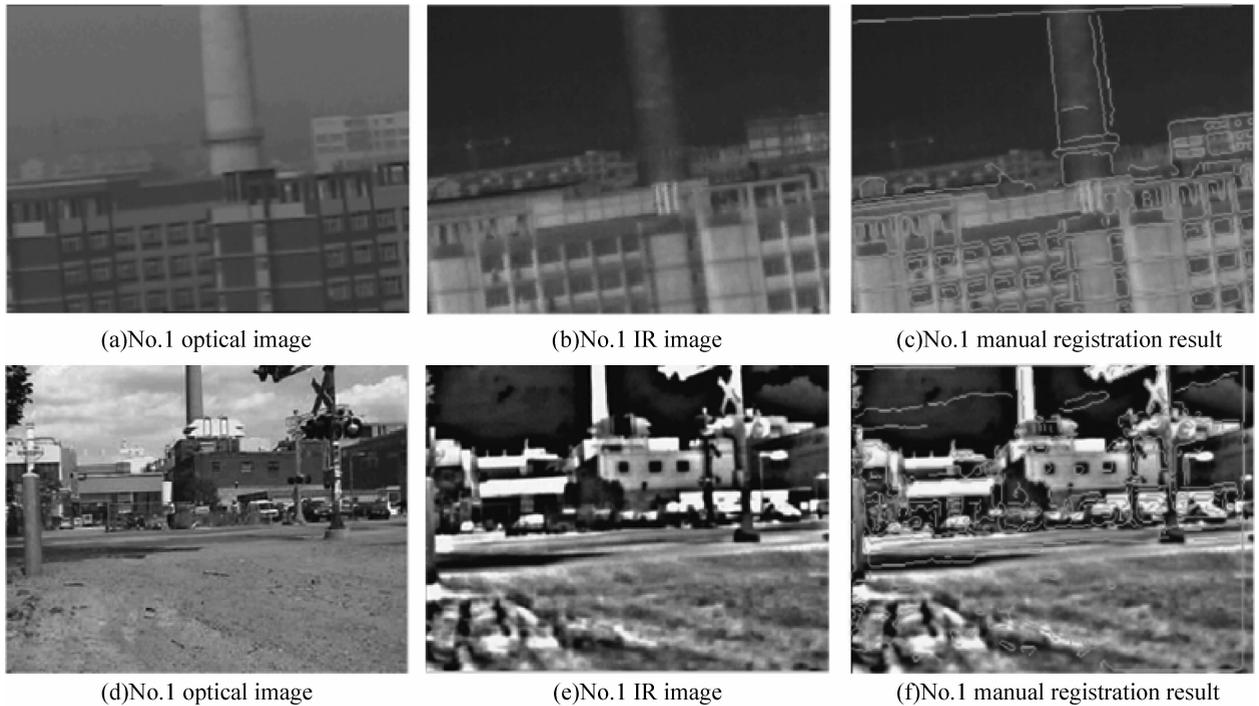


图 2 光学图像与红外图像以及手动配准结果

Fig. 2 Optical, IR images and manual registration results

实验中首先分别对可见光和红外图像进行小波分解,在分解后的子图像中先采用遗传算法进行参量优化处理,然后切换到 Powell 算法获得准确的配准参量,为简单起见,基于获得的粗配准参量在上级图像中直接用 Powell 算法做进一步参量优化.其中遗传算法采用实数编码,随机产生初始种群,并采用

随机选择法和单点交叉,交叉率取 0.7,变异率取 0.05,群体数目取 30,最小迭代次数  $G_{\min}$  取 10 次,最大迭代次数  $G_{\max}$  取 50 次,进化率阈值  $TH_{G\_ratio}$  为 0.03 以及  $t=3$ ,实验配准结果如图 3(c)和(f),由图可以看出,ONMI 方法能取得很好的配准结果.

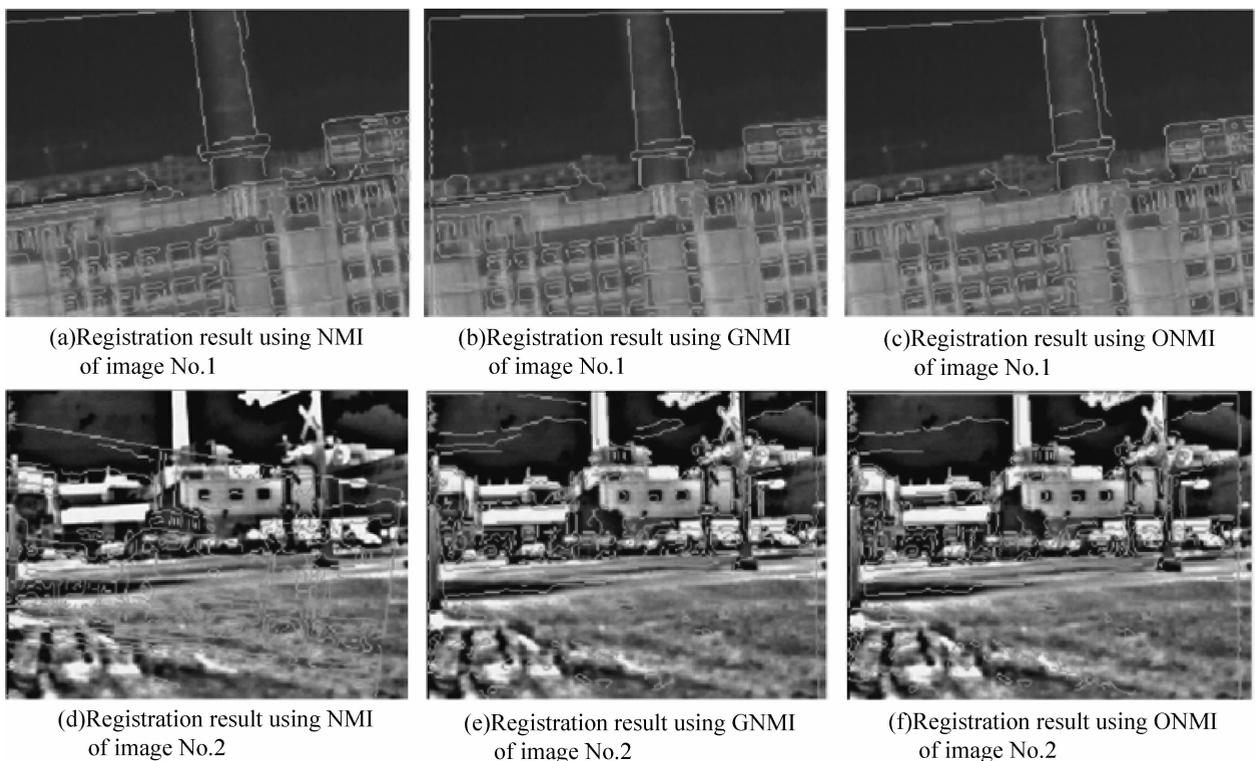


图 3 采用遗传与 Powell 混合优化算法和 NMI、GNMI 和 ONMI 三种不同测度函数的配准结果

Fig. 3 Registration results using NMI, GNMI and ONMI based on multi-resolution hybrid optimization algorithm

为了进一步验证算法的配准精度和鲁棒性,设计了两类对比实验:1)基于同一优化算法,分别采用 NMI、GNMI 以及 ONMI 三种不同互信息测度函数进行配准对比实验;2)基于 NMI、GNMI 以及 ONMI 三种不同的互信息测度函数,分别采用混合优化算法和 Powell 优化算法进行配准对比实验.实验结果如图 3 和 4,由图像配准结果可以看出,无论采用混合优化算法和 Powell 算法,ONMI 均能取得较好的配准结果,尤其是采用基于混合优化算法时,配准精度更高,而 NMI、GNMI 方法配准精度明显要低,NMI 方法甚至无法配准图像.图 5 给出了图像对 1 基于遗传与 Powell 混合优化算法下,NMI、GNMI 和 ONMI 方法的最优 6 参量的曲线对比图,

可以看出,ONMI 方法曲线图与 NMI、GNMI 曲线图相比,曲线更加光滑,局部极值问题得到改善,这是由于 ONMI 方法在统计图像灰度值的同时,引入匹配点之间的更稳定梯度方向信息,在较大程度上降低了多模图像间梯度幅度信息不稳定对互信息计算的影响,从而能够有效的避免局部极大值的产生,对比实验显示了 ONMI 具有更强鲁棒性.而对混合优化算法和 Powell 优化算法的对比实验结果看出,无论是采用 NMI、GNMI 及 ONMI 互信息测度函数,混合算法均能获得更好的配准精度,因为混合算法采用全局优化和局部优化动态结合,有效的抑制了局部极值和提高了配准精度.

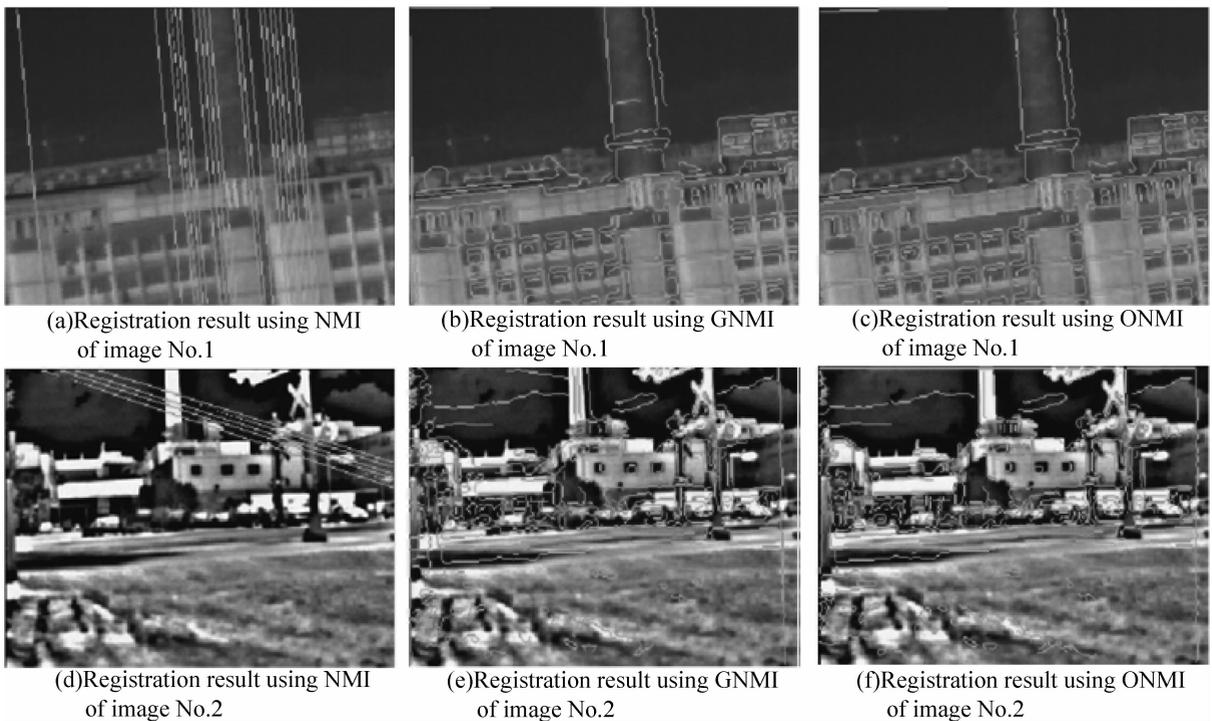
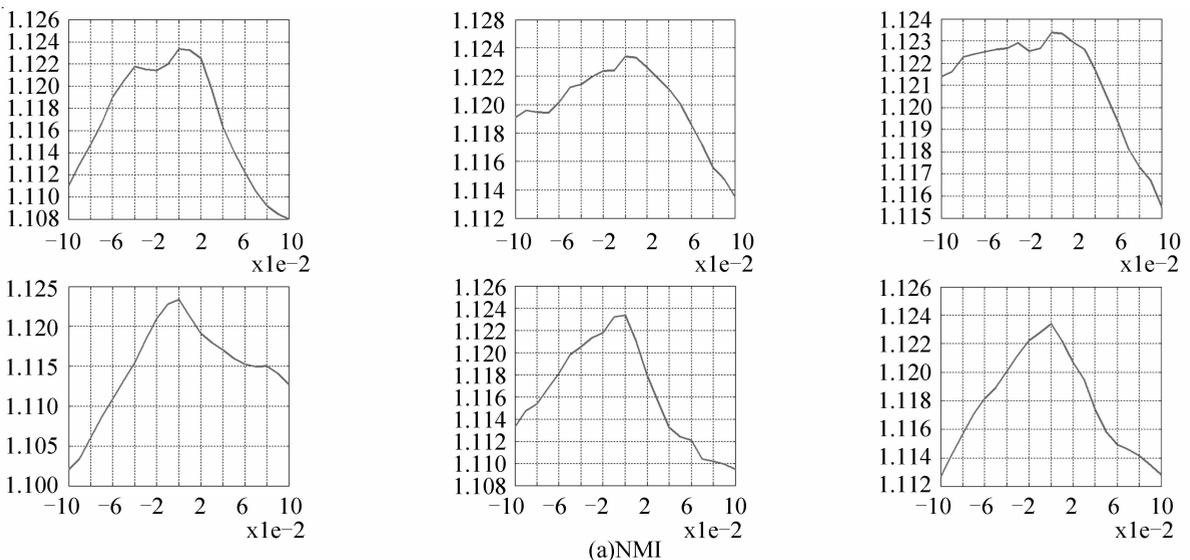


图 4 采用 Powell 优化算法的情况下 NMI、GNMI 和 ONMI 三种方法配准对比结果  
Fig. 4 Registration results using NMI, GNMI and ONMI based on Powell optimization algorithm



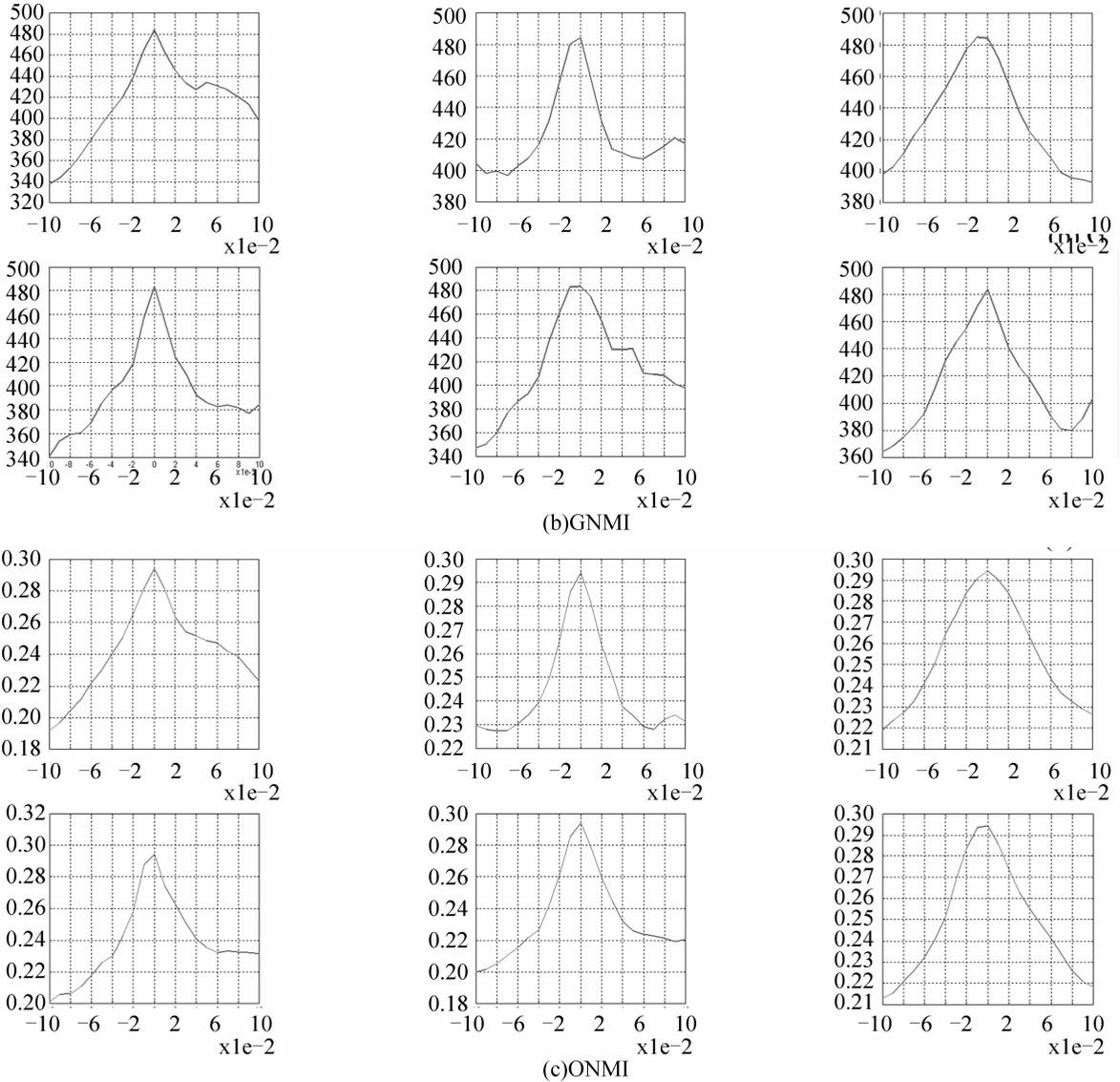


图 5 基于混合优化算法的 NMI、GNMI 和 ONMI 三种不同方法的配准最优 6 参量的曲线对比图

Fig. 5 Comparing the plot of similarity measures using NMI, GNMI and ONMI based on hybrid optimization algorithm

此外,表 1 给出不同优化算法和不同互信息度量函数下图像配准均方误差和平均运行时间对比结果. 鉴于无法准确知道图像间的真实配准参量,因此采用手动配准可见光与红外图像的结果(手动配准结果如图 2)作为评价算法的基准进行配准误差比较,可以看出,ONM 方法因为在计算互信息过程中需要剔除噪声点的影响和计算三维信息熵,与 NMI

和 GNMI 方法相比,匹配时间要略长,但配准精度明显要高;而在优化算法中,基于多分辨的思想并将全局寻优的遗传算法和 Powell 局部寻优算法动态结合,从而有效的消除局部极大值的影响,增加了算法的鲁棒性并提高了配准精度. 而 Powell 算法则因为初始值问题而导致配准错误.

表 1 不同优化算法和不同互信息度量方法的图像配准均方误差和平均运行时间统计对比表

Table 1 Comparison of the registration errors and running time using different optimization algorithms and mutual information methods

Images source	Performance	Powell optimization algorithm			Hybrid optimization algorithm		
		NMI	GNMI	ONMI	NMI	GNMI	ONMI
Image No. 1	Registration error	959.00	7.57	4.59	28.87	1.36	1.18
	Running time/s	181.17	138.88	351.19	188.46	220.94	276.38
Image No. 2	Registration error	1.84e+05	3.10	2.19	6.93	2.36	1.47
	Running time/s	165.09	142.87	140.91	152.42	163.27	224.40

## 5 结论

针对基于传统互信息图像配准容易产生局部极大值、计算量大以及目前结合梯度互信息的配准方法不能很好的应用于梯度差异很大的多模图像配准等问题,提出了两个方面的改进措施,首先,在互信息基础上结合梯度方向信息作为新的图像配准测度,不仅考虑所有像素信息,而且有效结合图像更稳定的空间特征信息.其次,将遗传算法全局寻优算法和 Powell 局部寻优算法动态结合,前者的配准结果为后者的算法优化提供了非常有效的初始点,提高了配准精度.同时,借鉴小波变换中多分辨率的思想,在低分辨率图像中粗略配准后,上升到高分辨率图像上进一步细化配准结果,增加算法鲁棒性,并且减少优化时间.实验结果证明,提出算法能够有效地改善互信息配准的局部极值,大大地提高了配准精度和鲁棒性.

### 参考文献

- [1] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11): 977-1000.
- [2] YANG JING, QIU JIANG, WANG Yan-fei, et al. Feature-based image registration algorithm using invariant line moments[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1114-1117.
- [3] SHEKHAR C, GOVINDU V, CHELLAPPA R. Multisensor image registration by feature consensus [J]. *Pattern Recognition*, 1999, **32**(1): 39-52.
- [4] VIOLA P, WELLS I W M. Alignment by maximization of mutual information [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **24**(2): 137-154.
- [5] MAES F, COLLIGNON A E, VANDERMEULEN D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1997, **16**(2): 189-198.
- [6] 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.
- [7] LIU Zhe-Xing, WANG Gui-Ping, ZHAN Yu, et al. Analysis and overcome of local maxima of criteria function in mutual information-based image registration [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2003, **22**(6): 503-507.
- [8] PENG Jing-Lin, ZHAN Jing, LI Shu-Tao, et al. Medical image registration based on expanded PV interpolation and hybrid optimization algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(5): 962-965.  
彭景林, 章兢, 李树涛. 基于改进 PV 插值和混合优化算法的医学图像配准 [J]. *电子学报*, 2006, **34**(5): 962-965.
- [9] RUECKERT D, CLARK M J, HILL D L G, et al. Non-rigid registration using higher-order mutual information [C]. Proceedings of SPIE Medical Imaging: Image Processing, San Diego, Canada, 2000: 438-447.
- [10] RUSSAKOFF D B, TOMASI C, ROHLFING T, et al. Image similarity using mutual information of regions [C]. Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision (ECCV), Prague, Czech Republic, 2004: 596 - 607.
- [11] PLLUIM J P W, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information [J]. *IEEE Transaction on Medical Imaging*, 2000, **19**(8): 809-814.
- [12] TANG Min. A novel image registration method combining morphological gradient mutual information with multiresolution optimizer [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 246-250.  
汤敏. 结合形态学梯度互信息和多分辨率寻优的图像配准新方法 [J]. *自动化学报*, 2008, **34**(3): 246-250.
- [13] GUO Y, LU C. Multi-modality image registration using mutual information based on gradient vector flow [C]. Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, Hong Kong, China, 2006: 697-700.
- [14] KIM Y S, LEE J H, RA J B. Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(11): 3356-3365.
- [15] YANG Bi-Wu, GUO Xiao-Song, ZHAO Jing-Min, et al. An Algorithm on geometric global registration of parallax images based on wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 574-576.  
杨必武, 郭晓松, 赵敬民, 等. 基于小波变换的视差图像全局几何配准新算法 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 574-576.
- [16] STUDHOLME C, DRAPACA C, IORDANOVA B, et al. Deformation-based mapping of volume change from serial brain MRI in the presence of local tissue contrast change [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2006, **25**(5): 626-639.

## A Multimodal Image Registration Method Combining Gradient Orientation Mutual Information with Multi-resolution Hybrid Optimization Algorithm

LING Zhi-gang, PAN quan, CHENG Yong-mei, ZHANG Shao-wu, LI Yao-jun  
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract:** In order to solve the problem that the image registration method based on the classical mutual information may suffer from local maxima and these improved methods combining with gradient can not align the multimodal images because of the great difference on gradient amplitude, a novel multimodal image registration method is proposed. During the optimization of transform parameters, a hybrid optimization algorithm based on genetic algorithm (GA) and Powell is carried out to efficiently restrain local maxima of this new similarity measure function. The former provides the latter with effective initialization parameter, which will increase the algorithm's robustness. Multi-resolution data structure based on wavelet transform is used to expedite the registration process. Experimental results demonstrate that this new algorithm can efficiently speed up the registration process with a good registration result.

**Key words:** Mutual information; Gradient orientation; Genetic algorithm; Powell algorithm; Hybrid optimization algorithm



**LING Zhi-gang** was born in 1976. He is a Ph. D. degree candidate at Northwestern Polytechnical University, and his research interests focus on image processing and computer vision.



**PAN Quan** was born in 1961. As the dean of College of Automation at Northwestern Polytechnical University, he is also a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on multi-object tracking, information fusion, intelligent monitoring C3I system and multiscale system theory etc.