

文章编号:1000-582X(2009)06-697-04

一种新的基于互信息的图像配准方法

洪明坚^{1a}, 吕建斌^{1b}, 杨 丹^{1b}, 毛有力²

(1. 重庆大学 a. 软件学院; b. 期刊社, 重庆 400030;

2. 四川大学 数学学院, 四川 成都 610064)

摘要:针对目前基于互信息图像配准方法中存在的不足,提出结合图像二维信息(如轮廓和边缘)与互信息的图像配准算法。它首先利用小波多尺度积提取两幅图像的特征点及其角度信息,再根据得到的特征点和角度信息,定义了特征点对互信息匹配准则,得到相应的匹配点对。最后进行了仿真实验,并将结果与由相关度、对齐度准则得到的结果进行比较,所提出的算法匹配误差最小。结果表明该算法具有匹配精确、鲁棒性好和效率高等优点。

关键词:图像配准;特征点;互信息;多尺度积

中图法分类号:TP391

文献标志码:A

A new method for image registration based on mutual information

HONG Ming-jian^{1a}, Lü Jian-bin^{1b}, YANG Dan^{1b}, MAO You-li²

(1a. School of Software Engineering; b. Journal Department, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. College of Mathematics, Sichuan University, Chengdu 610064, P. R. China)

Abstract: To address the disadvantages of mutual information-based image registration, a new method for image registration is proposed that combines image edges with mutual information to form a new matching criterion. In this method, feature points as well as their orientation are extracted using wavelet multi-scale products and the mutual information mapping criteria for the feature points is defined to obtain the matching points. The experimental results show that this method yields the minimum matching error compared with that of the correlation and alignment criteria, which demonstrates that the algorithm is accurate, robust and efficient for image registration.

Key words: image registration; feature point; mutual information; multi-scale product

图像配准是图像处理的基本任务之一,用于将不同时间、不同传感器(成像设备)或不同条件下(气候、照度、摄像位置和角度等)获取的两幅或多幅图像进行匹配、叠加的过程^[1]。目前提出的用于配准的算法可以分为 3 大类型^[2]:基于灰度相关的匹配算法、基于特征的匹配算法和基于解释的相似算法。基于灰度相关的匹配算法一般不需要对图像进行复杂的预处理,而是利用图像本身具有的灰度的一些

统计信息来度量图像的相似程度。基于灰度统计特性的图像配准技术有归一化相关、FFT 相关算法、最小绝对方差、最大似然法等。主要特点是实现简单,但应用范围较窄,不能直接用于校正图像的非线性形变,在最优变换的搜索过程中往往需要巨大的运算量。基于特征的图像匹配算法是图像配准方法中的一个大类,这类方法的主要共同之处是首先要对待配准图像进行预处理,也就是特征提取的过程,

收稿日期:2009-02-20

基金项目:国家青年自然科学基金资助项目(60604007);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2009AC2057)

作者简介:洪明坚(1977-),男,重庆大学博士,主要从事图像处理方向研究,(Tel)023-65112774;(E-mail)hmj@cqu.edu.cn.
欢迎访问重庆大学期刊社网 <http://jks.cqu.edu.cn>

再利用提取到的特征完成两幅图像特征之间的匹配,通过特征的匹配关系建立图像之间的配准映射变换。但是该种匹配技术存在特征提取的多样性、相似性计算的复杂性问题。而基于解释的图像匹配需要建立在图片自动判读的专家系统之上进行,至今尚未取得突破性的进展。

近几年来,基于互信息最大化的相似性测度在图像配准中得到了成功的运用^[3-7],受到了越来越多的关注。但其主要是依据整幅图像的灰度信息,直接作用于像素进行计算的,因而计算量相当大,在搜索最优的过程中,存在着局部极大值的干扰,使得配准过程总是陷入局部极大值而导致图像的误配^[8-12];其次,大多数基于互信息的图像配准仅利用了图像的一维信息,而实际上在配准问题中,图像的二维信息(如轮廓和边缘)往往起至关重要的作用,因此,它们对图像的二维信息利用不足^[9-11]。张二虎等^[9]将互信息推广用于基于特征点的配准方法中,但其算法存在以下2个缺点:1)参数的确定将在很大程度上影响算法的匹配精度和速度;2)在最优搜索的过程中,其算法有可能陷入局部极小。针对以上不足,笔者提出了一种新颖的图像配准方法:利用小波多尺度积提取两幅图像的特征点及其角度信息,根据得到的特征点和角度信息,定义一种新的匹配准则—特征点对互信息匹配准则,得到相应的匹配点对。

1 应用小波多尺度积提取边缘图像和特征点

边缘是图像最基本的特征,也是比较固定的特征,所以是图像处理中非常重要的一个问题。迄今已有很多的边缘检测方法,如梯度算子、拉普拉斯算子、Sobel算子、Robert算子、Marr算子和应用小波变换等。前面几种方法在抗噪性和边缘定位等方面往往不尽人意,这主要是边缘和噪声都是高频信号,很难在噪声和边缘中取舍。而小波变换可以从能量方面来区分边缘和噪声,使得小波变换在抗噪和边缘定位方面有独特的优势。

研究采用的是一种简单的小波多尺度积边缘检测算法^[13]。假设 $P(x, y)$ 是从图像 $f(x, y)$ 提取出来的边缘点,其在尺度 2^j 下的模和幅角分别为 $M_{2^j} f(x, y)$ 和 $A_{2^j} f(x, y)$,则特征点可以定义如下

定义1 若点 $P(x, y)$ 满足以下条件,则定义 $P(x, y)$ 为特征点:

1) $P(x, y)$ 是边缘点即模 $M_{2^j} f(x, y)$ 的局部极

大值点,且点 $P(x, y)$ 使 $M_{2^j} f(x, y) > Z$, Z 为阈值。阈值 Z 可以用来控制产生的特征点的数量;

2) $|A_{2^j} f(x, y) - A_{2^{j+1}} f(x, y)| < 5^\circ$;

3) $M_{2^j} f(x, y) = \max_{(x', y')} \{M_{2^j} f(x, y)\}$, 其中 N_p 是点 $P(x, y)$ 周围 $(2L+1) \times (2L+1)$ 大小的邻域。 L 的大小可用来控制特征点在图像中的疏密程度,即避免2个特征点距离过近。

这里条件1)限制了特征点会落在多尺度积筛选下的强边缘上;条件2)限制了方向受噪声影响大的点不被选中;条件3)限制了特征的疏密程度。

2 基于特征点对互信息的图像配准

2.1 基于互信息量的图像配准

假设两幅图像 A, B 为2个随机变量,它们的灰度概率密度分布分别为 $p_A(a)$ 和 $p_B(b)$,灰度联合概率密度分布为 $p_{A,B}(a, b)$,这些概率分布可以通过图像的直方图和联合直方图来获得。则 A, B 之间的互信息 $I(A, B)$ 可表示为

$$I(A, B) = \sum_{a,b} p_{A,B}(a, b) \log \frac{p_{A,B}(a, b)}{p_A(a) \cdot p_B(b)}. \quad (1)$$

同时,根据信息熵的定义

$$H(A) = - \sum_a p_A(a) \log p_A(a),$$

$$H(A, B) = - \sum_{a,b} p_{A,B}(a, b) \log p_{A,B}(a, b).$$

式(1)可表示为

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

从统计学的观点来看,如果 A, B 相互独立,则 $p_{A,B}(a, b) = p_A(a) \cdot p_B(b)$,且 $I(A, B) = 0$;如果 A, B 完全依赖,则 $\sum p_{A,B}(a, b) = p_A(a) = p_B(b)$,即 $H(A) = H(B) = H(A, B)$,此时 $I(A, B)$ 最大。也就是说,当两幅图像的空间位置达到一致的时候,即配准的时候,由于图像之间存在的相关性最大,灰度联合概率密度分布 $p_{A,B}(a, b)$ 最集中,图像之间的联合熵最小,互信息将最大。因此基于互信息测度下的图像配准可以表示为

$$T = \arg \max I(A, T(B)), \quad (3)$$

T 为两幅图像之间的变换关系。

2.2 基于特征点对互信息图像配准

基于互信息的以上不足,定义了一个新的匹配准则—特征点对互信息匹配准则。这个匹配准则充分利用了图像的特征点及其角度信息,只针对提取出来的特征点进行计算,计算量大大减少,同时,在得到匹配点对的过程中,无须进行最优搜索,从而避免陷入局部极值。

设待配准图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 提取出来的特征点集为

$P_{f_1} = \{ p_i = (p_x^i, p_y^i)^T \}_{i=1,2,\dots,N_1}$ 和 $P_{f_2} = \{ q_j = (q_x^j, q_y^j)^T \}_{j=1,2,\dots,N_2}$, N_1, N_2 为这 2 个特征点集中特征点的数目,则可以通过角度直方图初步估计出这两幅图像之间的旋转角度 $\hat{\theta}^{[14]}$ 。

假设特征点对 $\{ p_i \leftrightarrow q_j \} (p_i \in P_{f_1}, q_j \in P_{f_2})$ 的角度差为 $\theta_{i,j}$, $f'_2(x, y)$ 是 $f_2(x, y)$ 以特征点 q_j 为中心旋转 $\theta_{i,j}$ 角度后得到的图像(如图 1 所示),则特征点对的互信息量可定义如下。

定义 2 特征点对 (p_i, q_j) 的互信息量定义为 $FI(p_i, q_j, \theta_{i,j}) = I(f_1(x, y), f'_2(x, y)) = H(f_1(x, y)) + H(f'_2(x, y)) - H(f_1(x, y), f'_2(x, y))$ 。

由上面得到的特征点对互信息量和两幅图像之间的大致旋转角度,给出匹配点对的定义,再由得到的匹配点对确定图像之间的变换关系。

定义 3 对待配准图像 $f_2(x, y)$ 中的特征点 q_j , 在另一幅待配准图像 $f_1(x, y)$ 的特征点集 P_{f_1} 中确定它的特征点 p_i 。当且仅当 p_i 与 q_j 满足下面条件

- 1) $|\theta_{i,j} - \hat{\theta}| < 5^\circ$, 其中 $\theta_{i,j} = \theta_{p_i} - \theta_{q_j}$;
- 2) $FI(p_i, q_j, \theta_{i,j}) = \max_{p_i \in P_{f_1}} FI(p_i, q_j, \theta_{i,j})$, P_{f_1} 为 $f_1(x, y)$ 的特征点集,

- 3) $FI(p_i, q_j, \theta_{i,j}) > T'_a$, T_a 为阈值;

$\{ p_i \leftrightarrow q_j \}$ 才成为匹配点对。

从图 1 中可以看出,将 f_2 以某个特征点为中心进行旋转并与 f_1 中对应的特征点重合时,有一些点落在了图像 f_1 之外,为了使特征点对互信息值计算的更为准确,令出界点的灰度等于距离其最近的边界点的灰度^[8]。

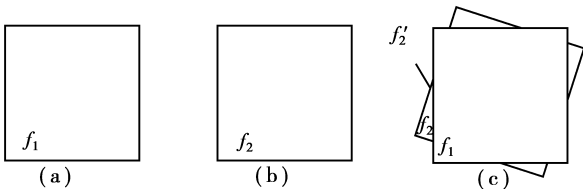


图 1 (a),(b)分别是两幅待配准的图像 (c)是将两幅图像的一对特征点重合并将(b)旋转一定的角度(特征点对角度差)得到的图像

3 实验及结果分析

为了验证所定义的特征点对互信息的准确性、有效性,将对 Lena 图像做仿真实验,并将其结果和

由相关度准则^[13]、对齐度准则^[15]得到的结果进行比较。

图 2(a)是从 512×512 的标准 Lena 图像中剪切出的一幅 256×256 的图像,图 2(b)是从旋转 11° 的相同的 Lena 图像中剪切出的一幅 256×256 的图像,图 2(c)是提出的算法进行配准后拼接而成的图像。

图 3(a)是由图 2(a),2(b)提取出特征点后得到的角度直方图,图 3(b)是展现了所有特征点对互信息量。从图 3(a)可以看出,所得到的角度直方图在 10° 左右有一个明显的峰值,几乎可以作为旋转角度,所以,将它引入特征点对互信息的定义中进一步保证了得到匹配点对的正确性。从 3(b)所展现的互信息量与特征点对之间的关系图可以看出,有少部分特征点对的互信息量远大于其它特征点对的互信息量。

图 4(a),4(b)分别画出来通过算法提取出的五对匹配点对,从这五对匹配点对可以看出提出的匹配准则的正确性。

表 1 将提出的特征点对互信息匹配准则与互相关准则、对齐度准则分别在 x 方向, y 方向以及旋转角度 θ 作了相应的误差比较。结果表明提出的匹配准则匹配误差最小,基于相关度准则的匹配误差最大。



图 2 (a)是从 512×512 的标准 Lena 图像中剪切出的一幅 256×256 的图像,(b)是从旋转 11° 的相同的 Lena 图像中剪切出的一幅 256×256 的图像, (c)是用提出的算法进行配准后拼接而成的图像。

表 1 图像配准误差对比表

匹配准则	x 方向误差		y 方向误差		旋转角度误差 $\Delta\theta/(^\circ)$
	最大	最小	最大	最小	
相关度准则	1.30	0.20	2.00	0.32	2.373 9
对齐度准则	1.20	0.07	1.98	0.09	1.162 1
研究的准则	0.71	0.02	1.99	0.09	0.067 2

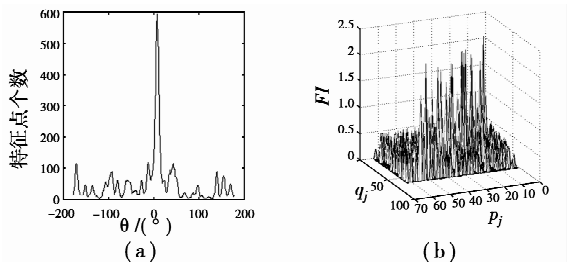


图3 (a)是由图2(a),2(b)提取出特征点后得到的角度直方图,(b)展现了所有特征点对互信息量。

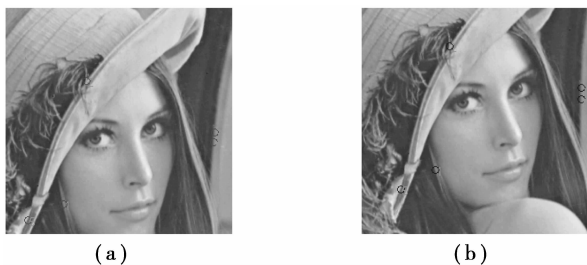


图4 (a),(b)分别画出用算法提取的三对匹配点对

4 总结

分析了基于互信息图像配准存在的不足,提出了一种新的匹配准则—特征点对互信息匹配准则。由图3(b)互信息和特征点对之间的关系以及笔者的定义3,使得提出的算法有效的避免了陷入局部极值。表1的误差对比,证实了匹配精度优于对齐度准则和相关度准则。在匹配时间上,将提出的方法与文献[4]中的互信息方法进行了比较,提出的方法比它快了将近15 s。因此,较好的解决了前面提出的基于互信息图像配准存在的几点不足。

参考文献:

- [1] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(6): 977-1000.
- [2] 雷琳,蒋咏梅,匡纲要.一种基于图像分类的遥感图像配准方法[J]. *国防科技大学学报*, 2004, 26(2):35-40.
- LEI LIN, JIANG YONG-MEI, KUANG GANG-YAO. A method of remote sensing image registration based on image classification [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(2): 35-40.
- [3] MASE F, COLLIGNON A, VANDERMEULEN D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1997, 16(2): 187-198.

- [4] PLUIM J P W, MAINTZ J B A, VIERGEVER M A. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information [J]. *IEEE Transactions on Medical Image*, 2000, 19(8): 809-814.
- [5] VIOLA P A, WELLS III W M. Alignment by maximization of mutual information [C]// *Proceedings of 5th International Conference on Computer Vision*, June 20-22, 1995, Boston, USA. [S. L.]: IEEE, 1995: 16-23.
- [6] VIOLA P A, LOZANO-PEREZ T, ATKESON C G. Alignment by maximization of mutual information [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 24(2): 137-154.
- [7] 罗述谦,李响.基于最大互信息的多模医学图像配准[J]. *中国图象图形学报*, 2000, 5A(7):551-558.
- LUO SHU-QIAN, LI XIANG. Multi-modality image registration based on maximization of mutual information [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5A(7):551-558.
- [8] 陈明,陈武凡,冯前进,等.基于互信息量和模糊梯度相似性的医学图像配准[J]. *电子学报*, 2003, 31(12): 1835-1838.
- CHEN MING, CHEN WU-FAN, FENG QIAN-JIN, et al. Medical image registration based on mutual information and fuzzy gradient similarity [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12):1835-1838.
- [9] 张二虎,卞正中.基于最大熵和互信息最大化的特征点配准算法[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(7): 1194-1199.
- ZHANG ER-HU, BIAN ZHENG-ZHONG. A new robust point registration algorithm by maximization of entropy and mutual information [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(7): 1194-1199.
- [10] 周永新,罗述谦.基于形状特征点最大互信息的医学图像配准[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(7):654-658.
- ZHOU YONG-XIN, LUO SHU-QIAN. Medical image registration based on mutual information of feature points [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(7):654-658.
- [11] 高智勇,顾滨,林家瑞.基于互信息的医学图像配准实验[J]. *生物医学工程杂志*, 2003, 20(3):476-478.
- GAO ZHI-YONG, GU BIN, LIN JIA-RUI. Implementation of mutual information based medical image registration method [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 20(3):476-478.

- points [J]. Application Research of Computers, 2006(11):236-238.
- [5] 潘永娟, 王国瑾. 一类平面参数曲线的保单调插值[J]. 软件学报, 2003, 14(8): 1439-1447.
PAN YONG-JUAN, WANG GUO-JIN. Monotonicity-reserving interpolation with a kind of plane parameter curve [J]. Journal of Software, 2003, 14 (8): 1439-1447.
- [6] KUIJT F, DAMME R. Shape preserving interpolatory subdivision schemes for nonuniform data[J]. Journal of Approximation Theory, 2002(114):1-32.
- [7] 林意, 吴锡生. 一种图象区域边缘表达方法[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(7):77-79.
LIN YI, WU XI-SHENG. Expressing method of the edge of image region [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(7):77-79.
- [8] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 丁友东, 华宣积. 基于光顺优化的 NURBS 曲线权因子估计方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 12(5):325-329.
DING YOU-DONG, HUA XUAN-JI. Weights estimation for NURBS curves based on fairing optimization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 12(5):325-329.
- [10] 纪小刚, 龚光容. 基于半正交 B 样条小波的任意控制顶点数曲线光顺[J]. 工程图学学报, 2006(2):20-23.
JI XIAO-GANG, GONG GUANG-RONG. Curve fairing with arbitrary number of control vertices by semi-orthogonal B-spline wavelets [J]. Journal of Engineering Graphics, 2006(2):20-23.
- [11] COHEN E, SCHUMAKER L L. Rates of convergence of control polygons [J]. Computer Aided Geometric Design, 1985, 2(1/3):229-235.
- [12] SAPIDIS N, FARIN G. Automatic fairing algorithm for B-spline curves[J]. Computer Aided Design, 1990, 22(2):121-129.
- [13] MAMAR E. Shape preserving alternatives to the rational bezier mode [J]. Computer Aided Geometric Design, 2001, 18(1):37-60.
- [14] ORUC H, PHILLIPS G H. Q-bernstein polynomials and bezier curves [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics 2003, 151(1): 1-12.
- [15] ZHANG J W. C-cueves: an extension of curves[J]. Computer Aided Geometric Design, 1996, 13 (2): 199-217.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 700 页)

- [12] HSIEH J W. Image registration using a new edge-based approach [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 67(2):112-130.
- [13] 杨丹, 张小洪. 基于小波多尺度积的边缘检测算法[J]. 计算机科学, 2004, 31(1): 133-135.  
YANG DAN, ZHANG XIAO-HONG. Edge detection algorithm based on wavelet multiscale product [J]. Computer Science, 2004, 31(1): 133-135.
- [14] 葛永新, 杨丹, 张小洪. 基于特征点对齐度的图像配准方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2):425-428.  
GE YONG-XIN, YANG DAN, ZHANG XIAO-HONG. A new method for image registration based on alignment metric of edge feature points [J]. Journal of Electronic and Information Technology, 2007, 29(2): 425-428.
- [15] 葛永新, 杨丹, 张小洪. 基于边缘特征点对齐度的图像配准方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(7): 1291-1295.  
GE YONG-XIN, YANG DAN, ZHANG XIAO-HONG. A new method for image registration based on alignment metric of edge feature points [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(7): 1291-1295.
- [16] 张见威, 韩国强, 沃焱. 基于边界距离场互信息的图像配准方法[J]. 通信学报, 2006, 27(7):87-93.  
ZHANG JIAN-WEI, HAN GUO-QIANG, WO YAN. Image registration method based on mutual information about distance field of image edges [J]. Journal on Communications, 2006, 27(7):87-93.
- [17] 周竹荣, 邱玉辉, 夏磊. 基于互信息和本体的协同检索模型的研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(4):165-167.  
ZHOU ZHU-RONG, QIU YU-HUI, XIA-LEI. Research on the mutual information and ontology based collaboration retrieve model [J]. Computer Science, 2008, 35(4):165-167.

(编辑 侯 湘)