

亚像素级图像配准算法研究

黎俊 彭启民 范植华

(中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家级重点实验室, 北京 100080)

摘要 在很多应用领域, 要求图像配准的精度达到亚像素级。对现有的亚像素级图像配准算法进行了分类, 介绍了几种最主要的亚像素级精度的配准方法, 包括基于插值的方法、扩展的相位相关法、解最优化问题法, 并对这些算法的思路、性能特点和最新进展进行了综述。然后从几个评价标准对各种算法进行了比较, 分析了各自影响性能的因素和性能提升的空间。最后对未来的发展趋势进行了展望。

关键词 图像配准 亚像素 相位相关 内插 最优化

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)11-2070-06

A Survey of Sub-pixel Image Registration Methods

LI Jun, PENG Qi-min, FAN Zhi-hua

(National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

Abstract Sub-pixel image registration is required in many applications. In this paper, firstly recent sub-pixel registration algorithms as well as classical algorithms are classified into three categories: interpolation based method, extension of phase correlation and method that formulates the problem as an optimization problem. Basic theories, performance characteristics, and recent improvements of the three methods are presented in detail. Secondly, the reviewed methods are evaluated in some criterions, factors affecting performance are analyzed. And lastly future development is discussed.

Keywords image registration, sub-pixel, phase correlation, interpolation, optimization problem

1 引言

图像配准是一项基本而又关键的图像预处理技术, 广泛应用在需要从多个数据源提取信息的多个领域。在过去的几十年中, 来自于许多不同领域的学者从不同角度、不同应用背景出发对图像配准问题做了很多研究。文献[1]、[2]先后对图像配准的方法给出了详细的总结和分类。但这些方法大多是像素级精度的。而对于如遥感(多模图像融合、目标检测、超分辨率图像生成)、高精度3D重建、视觉定位、医学图像等应用中的许多关键问题, 依赖于更高精度的配准, 即亚像素级的图像配准。

亚像素级图像配准的研究主要有两个推动力: 一是图像获取设备的分辨率很低的情况, 如分辨率为50m的遥感图像, 像素级的配准精度将导致 $\pm 25\text{m}$ 的误差, 这将是难以容忍的, 要减少误差, 必须提高配准的精度; 二是待配准图像的差异非常微小的情况, 如序列图像帧间的微小运动, 只有亚像素级的配准才能检测出这些微小的差异。由于亚像素级配准具有非常重要的应用价值, 该问题近年来得到了普遍关注。

2 亚像素级图像配准算法

按算法的基本思想将现有的亚像素级配准算法

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA703219)

收稿日期: 2007-04-11; 改回日期: 2007-05-31

第一作者简介: 黎俊(1982~), 女。中国科学院软件研究所计算机应用专业博士研究生。主要研究方向为图像处理与分析、计算机视觉等。E-mail: lijun04@mails.gucas.ac.cn

分为 3 类:基于插值的方法^[3~6],扩展的相位相关法^[7~19]和解最优化问题法^[20~29]。其中,基于插值的方法通过在离散样本点之间插值来获得亚像素级精度;扩展的相位相关法基于相位相关原理,通过理论分析将其扩展到亚像素级精度;解优化问题法定义一个目标函数,迭代精确求解变换参数使其达到最优值。值得提起注意的是,近年来各种非刚性配准的方法得到了很快的发展,但由于高精度不是非刚性配准的内在性质,因此不在本文的讨论范围之列。

2.1 基于插值的方法

基于插值的方法是最早提出的亚像素精度配准方法,也是最直观最常用的一种方法。通常需要配合具体的配准算法使用,其适应性由采用的配准算法决定。

按插值的对象,基于插值的方法可以分为相似性函数内插法和图像灰度内插法。

2.1.1 相似性函数内插法

相似性函数是待配准的两幅图像之间相似性的一种度量,它可以是相关函数、图像绝对差、图像差平方等。通常相似性函数的最大(或最小)值对应的位置即为配准位置。

对于相似性函数内插法,首先由像素级配准算法粗定位到像素级配准位置,然后以该位置为中心对相似性函数作二次函数内插,以内插后的最大(或最小)值作为配准位置,由此可以达到亚像素级配准精度。

容易看出,这种方法的精度取决于相似性函数在最大值(或最小值)的邻域内的形状接近于二次函数的程度,因此其不可避免的有一定的统计偏差。文献[5]指出该方法的平均误差约为 0.13 像素。实验显示,该方法简单,有效,但精度不是很高,适合于对原有像素级配准算法进行扩充。

2.1.2 图像灰度内插法

Tian & Huhns 最先提出了内插参考图像来达到亚像素级配准的方法^[3]。其方法是对参考图像以一定倍率重采样后得到新的高分辨率的参考图像,再进行配准。如进行 100 倍分辨率重采样,则可达到 0.01 像素的精度。显然,这种方法的缺点是计算量太大,包括内插算法的计算量以及内插后图像规模扩大使配准算法增加的计算量。

在待配准图像比参考图像小时,可采取下面两

种方法减少计算量:一为先定位到像素级配准位置,在该位置的邻域作高分辨率内插,然后再进行精细配准;二为用内插模板(待配准图像)代替内插参考图像^[4],其思想是生成模板的多个平移版本,配准时,先用原始版本对参考图像进行配准,得到像素级的配准位置,然后在这个配准位置上依次用各个平移版本进行配准,比较得出配准效果最好的版本,像素级配准位置加上最佳版本的偏移值就是最终的亚像素级配准位置。方法 2 在待配准图像预知且保持不变的情况下特别适用,多个模板可预先计算存储,有利于算法的实时实现。

图像灰度插值的方法的优点是精度高,缺点是计算量大,且性能依赖于内插算法的质量。内插算法的质量和计算复杂度是一对矛盾量,质量好的内插算法的计算复杂度往往很高,因此在应用时应根据具体情况进行权衡取舍。

2.2 扩展的相位相关法

相位相关法^[30]基于傅里叶变换的良好特性,即图像平移、旋转和尺度变换均在频率域有对应特征。传统的相位相关法能定位出整数(像素级)的平移。近年提出了扩展的相位相关法把配准精度提高到亚像素级。扩展的相位相关法继承了相位相关法的优点,对灰度差和窄带噪声均不敏感,但由于其在频域内估计变换特征,支持的变换模型仅限于平移、旋转和尺度变换,对更复杂的变换,如仿射、透视变换等则无法进行计算。

扩展法又分为空域求解和频域求解法。这里只给出图像间仅存在平移的情况,文献[31]给出了扩展到含有旋转、平移、尺度变化的方法。

2.2.1 空域求解的相位相关扩展

亚像素级的平移可以认为是采样率低、采样间隔过大(降采样)造成的^[14]。Foroosh 等人通过理论分析得出,在图像信号为带限的情况下,降采样的图像对(已达到像素级配准)的归一化互功率谱是一个过滤的单位脉冲,其傅里叶反变换为 2 维 Dirichlet 函数^[7,8],可用 sin 函数近似 Dirichlet 函数:

$$C(x, y) = \frac{\sin(\pi(Mx - x_0))}{\pi(Mx - x_0)} \frac{\sin(\pi(Ny - y_0))}{\pi(Ny - y_0)} \quad (1)$$

式中, M , N 分别为 x , y 方向的降采样倍数, x_0 和 y_0 分别为 x , y 方向的平移量,也是 2 维 Dirichlet 函数的中心点。

由式(1),可解得

$$\Delta x = \frac{x_0}{M} = \frac{C(1,0)}{C(1,0) \pm C(0,0)} \quad (2)$$

式(2)中的两个解中属于 $[-1,1]$ 区间的解即为 x 方向的平移量。同理可求出 y 方向的平移量。

Foroosh 的方法在信号为严格带限的情况下取得了非常好的结果。文献[8]中给出的实验精度大约为 0.05 像素,且该方法的计算量几乎等同于经典的相位相关算法。

Stone 等人把 Foroosh 的方法扩展到非带限信号的情况。非带限信号引起的频谱混叠严重影响了上述方法的精度,对此,Stone 等人提出选择未受频谱混叠影响的频率分量进行计算,并给出了挑选频率分量的具体准则^[9,11]。另外,Takita 等人提出对 $C(x,y)$ 进行加权处理,如高斯函数加权,强调信噪比更高的低通分量,能使峰值更加尖锐,进一步提高配准的精度^[12]。2 维傅里叶变换的边缘效应也是影响配准精度的一个重要因素,应对图像进行加窗处理,使其上下边缘、左右边缘连续^[11,12,17]。窗函数可以采用 Blackman 窗、Blackman Harris 窗、Hanning 窗等。经上述优化处理后,配准的精度达到了 0.01 pixels^[12]。

空域求解的相位相关扩展的配准精度高,计算量小。但其要求先用像素级配准算法配准到像素级精度后才能使用,可用于从粗到精的配准过程。其适用的变换模型限于平移、旋转和尺度变换。

2.2.2 频域求解的相位相关扩展

对有些图像获取设备,如 MRI、SAR 等,原始数据本身就是频谱数据。如果能在频域内直接进行配准,在计算效率上具有很大的优势。另外,频域的混叠现象在反变换后分布在空域形成失真,增加了空域求解的误差和不确定性。解决的办法是不进行反变换,直接在频域估计配准参数。

在仅存在平移即 $I_1(x,y) = I_2(x-x_0,y-y_0)$,设 $F_1(k,l)$, $F_2(k,l)$ 分别为 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 的傅里叶变换函数。由傅里叶平移特性,有

$$\begin{aligned} F_2(k,l) &= F_1(k,l) \times \exp\{-j(kx_0 + ly_0)\} \\ &= F_1(k,l) \times Q(k,l) \end{aligned} \quad (3)$$

称 Q 为相位矩阵。频域求解的相位相关扩展主要就是研究如何通过矩阵 Q 计算出平移参数。

Hoge 在 2003 年最先提出了直接在频域内估计配准参数的方法^[17],并扩展到高维数据的亚像素级

配准^[18,19]。文献[32]指出:在没有噪声的情况下, Q 为一个秩 1 矩阵。根据这一性质,Hoge 提出了对 Q 进行秩 1 估计的方法^[17]。具体做法为对 Q 进行 SVD 分解,用最大奇异值和相对应的奇异向量估算出平移参数。秩 1 估计也是一种过滤,只是它过滤的对象是奇异值。奇异值的最大分量受噪声干扰相对最小,因此由其计算出的平移参数比较精确。该方法还可以和 Stone 的方法^[11]结合使用,通过滤除矩阵 Q 中不可靠的高频分量,可进一步提高精度。

Hoge 的秩 1 估计法提出后,引起了学者的广泛关注。其中 Foroosh 和 Balci 对矩阵 Q 的性质进行了进一步的理论分析和推导,指出 Hoge 算法中的 SVD 分解和相位展开都是不必要的。他们指出相位矩阵是一个 2 维锯齿函数^[15],并提出相位矩阵的角分量 $\Phi = [\angle Q(m,n)]$ 的两个轴上的重复周期数与平移参数的关系^[16]。改进的算法仅需检测周期数即可,大大减少了计算量,并提高了抗噪声能力。

频域求解的相位相关扩展的优点是配准精度高,计算量小。文献[15]给出的实验精度达到 0.02 像素。该方法可以一步定位出偏移量很大的位移,经实验,秩 1 估计法在平移量达到图像尺寸的 30% 时,仍能精确的一步定位,且计算量很小,特别是在原始数据为频谱数据时,无需进行傅里叶变换和反变换。但其适用的变换模型也仅限于平移、旋转和尺度变换。

2.3 解最优化问题法

配准问题也可以视为一个多参数优化问题。目标函数可定义为衡量两幅图像相似程度的任意函数,由于对参数的选择没有任何限制,理论上它可支持任意变换模型。

常用的目标函数如两图像的差的平方和 SSD (sum of squared differences),在灰度保持的情况下,可以表示为

$$\chi^2(P) = \|I_1(x,y) - I_2(f_1(x,y,P), f_2(x,y,P))\|^2 \quad (4)$$

问题化为求解参数向量 P 使目标函数达到最小值,即以下方程的解。

$$\frac{\partial \chi^2(P)}{\partial P} = 0 \quad (5)$$

对式(5)的求解通常采用迭代的方法。常用的方法有 Newton-Raphson 法、梯度下降法、Levenberg-Marquardt (LM) 法^[20,21]等。

另一种方法为梯度法^[22~24]。梯度法常用于运动检测,实际上配准问题也可视为对摄像机的运动检测。当两幅图像的差异很小时,可对图像差 $I_1(x, y) - I_2(f_1(x, y, \mathbf{P}), f_2(x, y, \mathbf{P}))$ 进行一次泰勒展开(线性化):

$$\Delta I = I_1(x, y) - I_2(x, y) = \sum_{p_j \in \mathbf{P}} \frac{\partial I_2}{\partial p_j} p_j \quad (6)$$

用最小二乘法求解方程(6),即可求得 $\mathbf{P}$ 值。也可迭代方式求得精确的解。

理论上,梯度法只能检测出一两个像素的偏移,因为偏导数只在此范围内有效^[33]。为处理偏移量较大的情况,通常采用从粗到精多级处理。

梯度法的优点是精度高,缺点是迭代过程收敛的速度和概率取决于初值,改进的方法有增加光滑性约束的最小二乘法^[23],变形系数相关的最小二乘法^[22]等。Keller 等人还提出采用二次泰勒展开提高收敛的速度和概率^[24]。

另一个受关注较多的是采用互信息量作为目标函数:

$$\chi(\mathbf{P}) = MI(I_1(x, y), I_2(f_1(x, y, \mathbf{P}), f_2(x, y, \mathbf{P}))) \quad (7)$$

互信息的方法允许图像间的辐射特性不同,经常用于多源图像的配准。

互信息方法的最常用的优化解法是 Powell 优化法和单纯形算法^[34~36]。这两种算法都不需要计算梯度。Powell 法轮流对变换参数进行优化,但缺点是很容易陷入局部最优。单纯形算法与 Powell 优化法相反,它同时考虑所有变量,但该方法的收敛速度不确定。近年来各种混合方法,如 Powell 和单纯形混合算法^[26]、Powell 和遗传混合算法^[27]、单纯形和模拟退火混合算法^[28]、Powell 和模拟退火混合算法^[29]等,相继提出来改善求解的速度和增加得到全局最优解的概率。

在实际应用中,解最优化问题法常与多分辨率和多尺度策略一起使用,以加速收敛、避免局部最优。多分辨率策略可以减少计算量、提高求解的鲁棒性,是加速算法运行的一种非常有效的方式。

解最优化问题法应用最为灵活,可用于各种空间变换模型,其中互信息法还适用于存在辐射

变换的情况,其求解精度很高,可以达到 0.01 个像素甚至更高的精度,但搜索最优解的计算量非常大,且收敛概率和寻找到全局最优解的概率需要提高。

3 算法分析比较

配准算法的性能指标包括配准精度、配准速度以及适应范围等。配准精度是决定算法好坏的最重要的因素。配准速度要求算法计算量小,本文中主要考虑的是从像素级精度提高到亚像素级精度所需增加的计算量。适用范围指的算法适应的待配准图像的不同畸变情况,包括支持的空间变换和强度变换,以及能容忍噪声和干扰的程度。

由第 2 节中的分析,根据上述几个性能指标,将第 2 节中算法的性能进行比较如表 1 所示。

由实验结果以及表 1 的分析,结合国际上本领域的研究动向,得出以下几点结论:

(1) 基于插值的算法最简单,但精度依赖于插值算法的质量,计算量大。其性能主要依赖于插值算法,提升的潜力不大,一般考虑与其他算法集成使用。

(2) 扩展的相位相关法对噪声鲁棒、实现简单、精度高、计算量小,因此代价-精度比最高,但其支持的变换模型有限,适合于刚性变换的自动配准。目前的发展方向大致有 3 个:一是寻找对应变换参数的新的频域对应特征;二是发展各种加权、频率选择算法,减少图像离散化及噪声的影响,进一步提高配准的精度;三是与其他方法结合,如频率求解的扩展相位相关法与解最优化问题法可以形成互补,可以由前者选择噪声不敏感的分量,再用最优化方法求解,可克服后者对噪声敏感的弱点。

(3) 解最优化问题法最为灵活,可支持各种变换模型,配准精度也非常高,但计算量非常大,计算速度慢,且收敛概率和寻找到全局最优解的概率需要提高。各种现代优化算法的引入以及新的高性能搜索算法的提出将有效的推动这类方法的进一步发展。

表 1 主要算法性能比较

Tab.1 Performance comparison of reviewed algorithms

算法类型	子类型	实验精度 (pixel)	增加的计算量	空间变 换模型	强度变 换模型	噪声 容忍度	影响精度 因素
基于插值 的方法	相似函数 内插法	0.13 ^[5]	内插最值邻域 (极小)	决定于取得相似函数的 配准算法			插值算法 的质量
	图像灰度内插法	0.02 (线性插值) ^[4]	内插图像,配准算法随图像 尺寸增大增加的计算量(大)	取决于插值后的配准算法			
扩展的相 位相关法	空域解法 Foroosh02	0.01 ^[12]	与经典相位相关 算法相同(小)	平移 尺度 旋转	线性 模型	噪声、窄 带噪声	频谱混叠 边缘效应
	频域解法 Hoge03	水平 0.02 垂直 0.34 ^[17]	SVD 分解,1 维相位展开, 矩阵乘法(小)				
	频域解法 Foroosh04	0.02 ^[15]	两次 1 维相位展开(小)				
	频域解法 Balci05	水平 0.22 ^[16] 垂直 0.47 ^[16] *	检测周期数(小)				
解最优化 问题法	梯度法	0.01 ^[22]	求梯度,图像重采样,求解矩阵 方程,以上均要迭代多次(大)	任意	不支持	敏感	初值 迭代次数 局部最优
	互信息法	水平 0.439 ^[28] 垂直 0.337 ^[28] 旋转 0.204 ^[28] 尺度 0.002 ^[28]	搜索算法(大)	任意	任意	不敏感	

注:实验精度数据来源于文献中数据求均值
*:垂直方向数据受平移图片的方式影响,参见文献[17]

4 结 语

高精度的自动图像配准因其在遥感、计算机视觉等领域有着广泛的需求,一直受到学者的广泛关注。对如何把配准精度提高到亚像素级,前人进行了很多理论分析和实践探求。本文系统的给出了亚像素级图像配准的数学描述、分类方法以及现有的几种最主要的解决方法的基本原理和最新进展,并分析了这些方法各自的性能优缺点,给出了它们的适用范围,可供相关领域的研究人员参考。如何进一步提高配准算法的代价—精度比,是值得进一步研究的课题。

参考文献 (References)

1

Brown L G. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4):325 ~ 376.

2

Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey [J]. Image Vision Computing, 2003, 21(11):977 ~ 1000.

3

Tian Q, Huhns M N. Algorithm for subpixel registration [J]. CVGIP: Graphical Model and Image Processing, 1986, 35(2):220 ~ 223.

4

Frischholz R W, Spinnler K P. Class of algorithm for realtime subpixel registration [A]. In: Proceedings of SPIE, Europto Conference[C], Munich, Germany, 1993: 1989:50 ~ 59.

5

Seitz P. Optical superresolution using solid-state cameras and digital signal processing [J]. Optical Engineering, 1988, 27(7): 535 ~ 540.

6

Chalermwat P. High performance automatic image registration for remote sensing [D], Virginia: George Mason University,1999.

7

Shekarforoush H, Berthod M, Zerubia J. Subpixel image registration by estimating the polyphase decomposition of cross power spectrum [R]. TR2707, France, INRIA Technical Report, 1995.

8

Forooh H, Zerubia J B, Berthod M. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(3):188 ~ 200.

9

Stone H S, Orchard M, Chang E C. Subpixel Registration of images [A]. In: Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on Signal, Systems, and Computers [C], Pacific Grove, CA, USA, 1999: 2:1446 ~ 1452.

10

Stone H S, Wolpov R. Blind cross-spectral image registration using prefiltering and Fourier-based translation detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(3): 637 ~ 649.

11

Stone H S, Orchard M, Chang E C, et al. A fast direct Fourier-

- based algorithm for subpixel registration of images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, **39**(10): 2235 ~ 2243.
- 12 Takita K, Aoki T, Higuchi T, *et al.* High accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation [J]. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transaction, Fundamentals, 2003, **E86-A**(8):1925 ~ 1934.
- 13 Averbuch A, Keller Y. FFT based image registration [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. Orlando, FL, USA, 2002; **4**:3608 ~ 3611.
- 14 Liu Wei-guang, Cui Jiang-tao, Zhou Li-hua. Subpixel registration based on interpolation and extension phase correlation [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, **17**(6): 1273 ~ 1277. [刘卫光,崔江涛,周利华. 插值和相位相关的图像亚像素配准方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, **17**(6): 1273 ~ 1277.]
- 15 Foroosh H, Balci M. Sub-pixel registration and estimation of local shifts directly in the fourier domain [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Singapore, 2004; **3**:1915 ~ 1918.
- 16 Balci M, Foroosh H. Estimating sub-pixel shifts directly from the phase difference [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Geneva, Italy, 2005; **1**: 1057 ~ 1060.
- 17 Hoge W S. Subspace identification extension to the phase correlation method [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, **22**(2):277 ~ 280.
- 18 Hoge W S, Mitsouras D, Rybicki F J, *et al.* Registration of multi-dimensional image data via sub-pixel resolution phase correlation [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Barcelona, Spain, 2003:14 ~ 17.
- 19 Hoge W S, Westin C F. Identification of translational displacements between N-dimensional data sets using the high order SVD and phase correlation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, **14**(7):884 ~ 889.
- 20 Thevenaz P, Ruttimann U E, Unser M. A pyramid approach to subpixel registration based on intensity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, **11**(7):27 ~ 41.
- 21 Wollberg G, Zokai S. Image registration for perspective deformation recovery [A]. In: Proceedings of SPIE Automatic Target Recognition X[C], Orlando, FL, USA, 2000, **4050**:259 ~ 270.
- 22 Li Feng, Zhou Yuan-hua. Distortion parameter-correlating least square matching algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, **33**(11):1391 ~ 1394. [李峰,周源华. 变形系数相关的最小二乘匹配算法[J]. 上海交通大学学报, 1999, **33**(8):1391 ~ 1394.]
- 23 Xu Bao-chang, Chen Zhe, Zhao Long. Improved least-squares scene matching algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2005, **31**(8):848 ~ 852. [徐宝昌,陈哲,赵龙. 一种改进的最小二乘景象匹配算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, **31**(8):848 ~ 852.]
- 24 Keller Y, Averbuch A, Kimmel R, *et al.* Motion estimation using second order gradient methods [EB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/keller02motion.html>, 2006-5-23.
- 25 Thevenaz P, Unser M. Optimization of mutual information for multiresolution image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, **9**(12):2083 ~ 2099.
- 26 Plattard D, Soret M, Troccaz J, *et al.* Patient set-up using portal images: 2D/2D image registration using mutual information [J]. Computer Aided Surgery, 2000, **5**(4):246 ~ 262.
- 27 Kagadis G C, Delibasis K K, Matsopoulos G K, *et al.* A comparative study of surface-and volume-based techniques for the automatic registration between CT and SPECT brain images [J]. Medical Physics, 2002, **29**(2):201 ~ 213.
- 28 Cao zhi-guo, Wang Yong. Multispectral image registration based on mutual information and simulated annealing-simplex method [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, **17**(21):64 ~ 67. [曹治国,汪勇. 基于互信息和模拟退火——单纯形法的多谱段图像配准[J]. 计算机工程与应用, 2005, **17**(21): 64 ~ 67.]
- 29 Jiang Jun, Yu Wen-xue, Shu Hua-zhong. Multi-Resolution 3D image registration using hybrid powell and simulated annealing optimization algorithm [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2004, **23**(3):176 ~ 178. [江军,於文雪,舒华忠. 鲍威尔和模拟退火优化算法结合的多分辨率三维图像配准[J]. 生物医学工程研究, 2004, **23**(3):176 ~ 178.]
- 30 Kuglin C D, Hines D C. The phase correlation image alignment method [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society [C], New York City, NY, USA, 1975, 163 ~ 165.
- 31 Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, **5**(8):1266 ~ 1271.
- 32 Wright G A. Magnetic resonance imaging [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1997, **14**(1):56 ~ 66.
- 33 Hui Chen. Gradient-based approach for fine registration of panorama images [J]. Journal of Computer Science & Technology, 2004, **19**(5):691 ~ 697.
- 34 Feng Lin, Guan Hui-juan, Teng Hong-fei. Advances in medical image registration based on mutual information [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2005, **22**(5):1078 ~ 1081. [冯林,管慧娟,滕弘飞. 基于互信息的医学图像配准技术研究进展[J]. 生物医学工程学, 2005, **22**(5):1078 ~ 1081.]
- 35 Josien P W, Pluim J B, Maintz A, *et al.* Mutual information based registration of medical images: a survey [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, **22**(8):986 ~ 1004.
- 36 Maes F, Vandermeulen D, Suetens P. Medical image registration using mutual information [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, **91**(10):1699 ~ 1722.