

基于相位信息和主成分分析的对称性检测方法

肖志涛 史文静 耿磊 吴骏* 张芳
(天津工业大学电子与信息工程学院 天津 300387)

摘要: 对称性检测在图像分析与模式识别中具有重要意义。该文提出一种基于相位信息和主成分分析的对称性检测方法。首先在不同尺度、不同方向上计算相位对称性,其次在每个方向上将所有尺度的相位对称性进行融合,再次利用主成分分析提取各个方向的主要特征,最后利用非极大值抑制和自适应滞后阈值处理得到最终的对称性检测结果。实验证明:该文方法可直接对原始图像进行处理,不需要图像的任何先验知识,对于多目标图像不需分割等任何预处理;可以同时检测亮目标和暗目标的镜像对称、旋转对称、曲线对称;对图像亮度和对比度不敏感。

关键词: 模式识别; 相位对称性; 对称性检测; 主成分分析; 相位信息

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2041-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01598

Symmetry Detection Based on Phase Information and Principal Component Analysis

Xiao Zhi-tao Shi Wen-jing Geng Lei Wu Jun Zhang Fang

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Symmetry detection plays an important role in image analysis and pattern recognition. Based on phase symmetry and principal component analysis, a new image symmetry detection method is proposed. Firstly, phase symmetry is computed on different scales and orientations. On each orientation, the phase symmetry values of different scales are merged together. And then the main feature of different orientations is extracted by using principal component analysis. Finally, the results of symmetry detection can be obtained by using non-maximal suppression and adaptive hysteresis thresholding. The experiments show that the proposed method can be applied directly to original images and it does not need segmentation or any preprocessing. And it is insensitive to rotation, brightness and contrast. It also can detect mirror symmetry, rotational symmetry and curve symmetry at the same time, whether bright or dark objects.

Key words: Pattern recognition; Phase symmetry; Symmetry detection; Principal Component Analysis (PCA); Phase information

1 引言

在自然界和日常生活中,存在着不同形式的对称性,而且人们对对称性的感觉非常强烈。因此,对于理解和解释自然界的图像来说,检测与利用对称性具有重要意义。现阶段在机器视觉领域中,对称性检测已得到广泛应用,不仅可以对物体进行定位、识别^[1]、分割^[2]、匹配^[3]和追踪,而且在3维物体的重建中也发挥着重要作用。

依据几何变换理论,对称性主要可分为镜像对称、旋转对称和曲线对称。对这些对称性的检测,

国内外文献提出了大量方法。它们主要是根据由边缘、轮廓和特征点提取后形成的代表点的集合进行对称性检测。如文献[4]提出的模式匹配法和文献[5]提出的优化搜索法,这些方法的缺点在于都依赖高质量对称点的获取和优化函数的单峰性,并且对噪声敏感。文献[6]提出利用主成分分析检测对称性,把对称轴方向求解转化为协方差矩阵的特征值分解,这种方法受原图像的对比度和噪声的影响较大。文献[7]将物体的对称性检测问题转化为对隐含多项式函数的研究,该方法抗噪性强,计算量较小,但是当物体存在多个对称轴时,则不能完全检测出所有的对称轴。文献[8]利用尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)算法提取特征点,提出基于局部特征的对称性检测方法,该方法只能检测镜像对称和旋转对称。文献[9]利用

2013-10-16 收到, 2014-02-18 改回

国家自然科学基金(61102150), 天津市科技支撑计划重点项目(13ZCZDGX02100)和高等学校博士学科点专项科研基金(20131201110001)资助课题

*通信作者: 吴骏 zhenkongwujun@163.com

广义快速径向对称 (Generalized Fast Radial Symmetry, GFRS) 变换进行对称性检测, 该方法只适用于检测旋转对称性。上述方法都是在图像的空间域中进行分析的, 在图像的频率域里也存在一些有效的方法。如文献[10]提出的利用傅里叶-梅林变换检测对称性, 文献[11]提出的利用角相关 (Angular Correlation, AC) 检测对称性, 这些方法都是利用图像的全局信息, 因此只能检测含有单一目标的图像。文献[12]提出弗里兹扩张 (Frieze-Expansion, FE) 方法, 将旋转对称性检测转换为 1 维信号的对称性检测, 但该方法只适用于检测旋转对称性。

综上所述, 目前大多数对称性检测算子的共同瓶颈在于, 它们只对含有单个目标的图像有效, 而且只能检测某一类或两类的对称性。对于包含多个目标的图像, 则需要事先进行分割。如果用基于梯度的对称性检测算子, 对于在同样背景下的两个不同灰度的圆, 对比度大的圆会拥有比对比度小的圆更强的对称性, 这显然有违客观事实。

文献[13]利用相位信息对对称性检测进行了研究, 该方法可以直接对原始图像进行处理, 不需要图像的任何先验知识, 对于多目标的图像也不需要物体进行识别或分割, 而且具有亮度和对比度不变性。但是在该方法的检测结果中既有物体的对称性, 又有背景的背景对称性。文献[14]对此进行了改进, 提出了对称相位对称性检测算子 (symmetry Phase Symmetry Detection, PSD), 但是该方法需要预先知道图像是属于亮背景下包含暗物体还是暗背景下包含亮物体。

针对以上方法的局限性, 本文提出了一种结合相位信息与主成分分析的对称性检测方法, 本方法可以克服上述问题, 即可直接应用于原始图像, 不需要分割等预处理; 可以同时检测亮物体和暗物体的镜像对称、旋转对称、曲线对称等多种对称性; 对图像的亮度和对比度不敏感。

2 相位对称性

2.1 利用相位信息检测对称性的可行性

物体在结构上呈现出周期性是对称性的一个重要方面, 因此采用基于频率的方法识别和分析图像中的对称性是可行的。这一问题可以由一些简单函数的傅里叶级数的表现形式得以证明。如图 1 所示, 方波的对称点 (方波的中点)、三角波的对称点 (三角波的峰值点), 对应于所有正弦分量处于最大或最小值的点, 该点对于所有正弦波来说也都是最对称的。由此可见, 对称点在局部相位上会产生易识别的、可确定的模式。因此, 利用相位信息检测对称性是可行的。

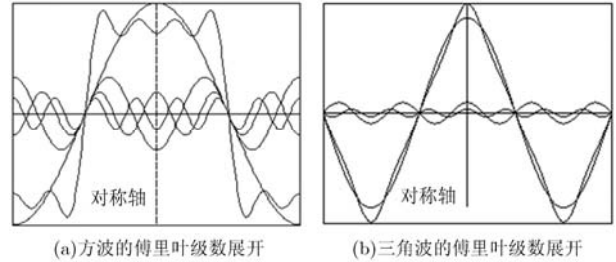


图1 方波和三角波的傅里叶级数展开(这里只给出了前几项)

需要说明的是, 本方法只考虑图像的局部对称性, 即对称的低层视角, 而不考虑图像中整体的几何对称性。

2.2 相位对称性原理

相位一致性是一种起源于傅里叶分析的低层特征检测器, 它将图像傅里叶分量相位一致的点作为特征点。它是一个无量纲的量, 因此不受图像亮度或对比度变化的影响。受相位一致性特征的启发, 文献[13]提出相位对称性模型, 其表达式为

$$\text{Sym} = \frac{\sum_n [A_n(x) [|\cos(\phi_n(x))| - |\sin(\phi_n(x))|] - T]}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} = \frac{\sum_n [|\text{even}_n(x)| - |\text{odd}_n(x)|] - T}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (1)$$

其中, A_n 为尺度 n 上的幅值; ε 是为了防止分母为 0, 其值设为 0.0001; $\text{even}_n(x)$, $\text{odd}_n(x)$ 分别为在尺度 n 上滤波器的偶对称部分和奇对称部分, 在对称点处, $\text{even}_n(x)$ 的绝对值会很大, $\text{odd}_n(x)$ 的绝对值会很小; T 为噪声补偿, 其计算公式为

$$T = k \bar{A}_0 \sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{m^n}} \quad (2)$$

这里, k 是用来从平均振幅估计噪声最大响应振幅的因子, 通常取 2.5; \bar{A}_0 为最小尺度小波对的平均噪声响应估计; N 为小波尺度的数量; m 为系列小波之间的尺度因子。

本方法采用 Log-Gabor 小波对图像进行检测。在线性频率尺度上, 2 维 Log-Gabor 滤波器包括两个部分: 半径滤波器和角度滤波器, 其传输函数为

$$\left. \begin{aligned} G(\omega) &= e^{-\frac{(\lg(\omega/\omega_0))^2}{2(\lg(k/\omega_0))^2}} \\ G(\theta) &= e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, ω_0 为滤波器的中心频率, k/ω_0 随着 ω_0 的变化应该保持不变; θ_0 为滤波器的方向角, σ_θ 是角度方向高斯函数的标准偏差。

3 基于相位对称性与主成分分析的对称性检测方法

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA), 又称卡洛南-洛伊(Karhunen-Loeve, KL)变换或 Hotelling 变换, 是一种经典的线性变换方法。在多维向量的研究中, 向量的数目太多, 彼此之间会有一些的相关性。PCA 可以简化这种问题, 通过减少维度可以融合一些特征。这些特征尽可能地反应了原始向量的信息, 并且互不相关。

因为图像是 2 维的, 其相位信息需要在多个方向上求得, 因此, 利用式(1)得到各个方向的相位对称性后需要将这些信息融合到一起, 提取它们的主要特征。本文采用主成分分析的方法^[15], 计算多个方向的相位对称性图像的协方差矩阵的特征值和特征向量, 取最大特征值对应的特征向量, 向去均值矩阵做投影, 得到主成分分析的结果。最后利用非极大值抑制和自适应阈值滞后处理得到最终检测结果。

方法流程:

步骤 1 读入图像, 尺寸为 $M \times N$, 用 Log-Gabor 小波分别在 n 个尺度、 s 个方向上与图像卷积, 利用式(1)计算每个方向上的相位对称性, 得到 s 幅不同方向的相位对称性图像。

步骤 2 将每幅相位对称性图像用一个含 $M \times N$ 个元素的向量 \mathbf{X}_i 表示, s 幅图像则可以用 $s \times (M \times N)$ 的矩阵表示: $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_s)^T$, 其均值向量 $\boldsymbol{\mu}$ 和协方差矩阵 \mathbf{C} 定义为

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \mathbf{X}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{s} ((\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})) \quad (5)$$

步骤 3 计算 \mathbf{C} 的特征值 d_i , $i=1, 2, \dots, s$ 和对应的特征向量 $\boldsymbol{\lambda}_i$, $i=1, 2, \dots, s$, 将特征向量 $\boldsymbol{\lambda}_i^T$, $i=1, 2, \dots, s$ 组成矩阵 \mathbf{D} , 并将其降序排列, 即 \mathbf{D} 的第 1 行的特征向量对应最大的特征值。

步骤 4 利用主成分分析法提取特征。主成分分析表达式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{D}(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}) \quad (6)$$

提取 $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_s)^T$ 的第 1 列 \mathbf{Y}_1 , 将其调整为 $M \times N$ 的图像 \mathbf{G} 。

步骤 5 对图像 \mathbf{G} 进行非极大值抑制, 得到对称点的集合 \mathbf{F} 。

步骤 6 选取高低阈值。首先统计 \mathbf{F} 中最大值 f_{\max} 和最小值 f_{\min} , 取初始阈值为 $\text{GDT}_0 = (f_{\max} - f_{\min})/4$, 然后统计 \mathbf{F} 中点 $p(x, y)$ 与周围 8 邻域点的差值 GD_i , $i=0, 1, \dots, 7$, 并将最大值记为 MGD ,

平均值记为 AGD 。如果 $\text{MGD} > \text{GDT}_0$, 则将该点计数(Count), 并将该 MGD 存储于 TH , AGD 存储于 TL 。则高低阈值的表达式为

$$T_h = \text{TH} / \text{Count} \quad (7)$$

$$T_l = \text{TL} / \text{Count} \quad (8)$$

步骤 7 利用阈值 T_h 和 T_l 对步骤 5 的结果进行滞后阈值处理, 得到最终检测结果。

4 实验结果与分析

本文分别针对人工图像和自然图像给出了相应的检测结果。对于本文所有的实验, 滤波器的参数均为: 尺度个数 $n=4$, 方向个数 $s=4$, 最小波长 $\text{minW}=3$, 小波序列的尺度因子 $m=2.1$, 对于不同的中心频率 ω_0 , $k/\omega_0=0.55$ 。

4.1 对于含有多个目标的人工图像

(1)多目标灰度图像 图 2(a)为包含不同灰度和形状的多目标图像, 本文方法可以同时检测亮目标和暗目标的镜像对称、旋转对称和曲线对称(如图 2(b)所示), 而 PSD^[14]只能检测“亮”目标的各种对称性, 文献[13]的检测结果中则不但包括目标的对称性, 还包括背景的对称性。对于多目标图像, 其他方法(如主成分分析法^[6])无法直接使用。

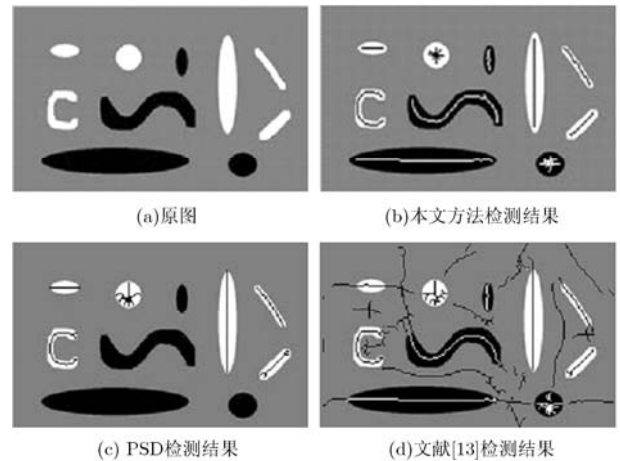


图 2 人工图像的对称性检测结果

(2)多目标二值图像 图 3(a)为包含不同形状的二值图像, 其中两个圆的大小相同, 但是左上角的圆中含有一些噪声点。从检测结果中可知, 当物体中含有噪声时, 本文方法基本没有受到影响(如图 3(b)所示), 而细化方法的结果则受影响很大(如图 3(c)所示)。

4.2 自然图像

(1)含单目标的自然图像 对于图 4(a1)中所示的飞机图片, 由于本文方法是基于图像局部信息来



图3 本文方法与细化方法的比较



图4 单目标物体的对称性检测

检测对称性的,可以检测出飞机的多条对称轴(如图4(c1)所示),而主成分分析法^[6]是基于图像的全局信息来检测对称性的,只检测到一条对称轴(如图4(b1)所示)。

(2)含多目标的自然图像 对于含有多目标的自然图像(如图5(a)所示),本方法可以直接应用于原始图像,其检测结果如图5(b)所示,而PSD^[14]则需要调整参数才能检测“暗”目标的对称性(如图5(c)所示),文献[13]的检测结果则既包含物体的对称性,又包括背景对称性(如图5(d)所示)。其他方法(如主成分分析法^[6])则需要先进行分割才能进行对称性检测。

4.3 本文方法的性能分析

(1)抗噪性能 图4(a2)和图4(a3)分别为施加强度为0.2和0.5的高斯噪声图像,主成分分析法的检测结果受噪声影响很大(如图4(b2)和图4(b3)所示),而本文方法的检测结果则基本没有受到影响(如图4(c2)和图4(c3)所示)。

(2)本文方法对图像亮度和对比度不敏感 图6和图7分别为改变了图像亮度、对比度的检测结果,可见,无论是增加还是减小图像的亮度、对比度,本方法的检测结果基本不受影响。

5 结束语

本文提出了结合相位对称性与主成分分析的方

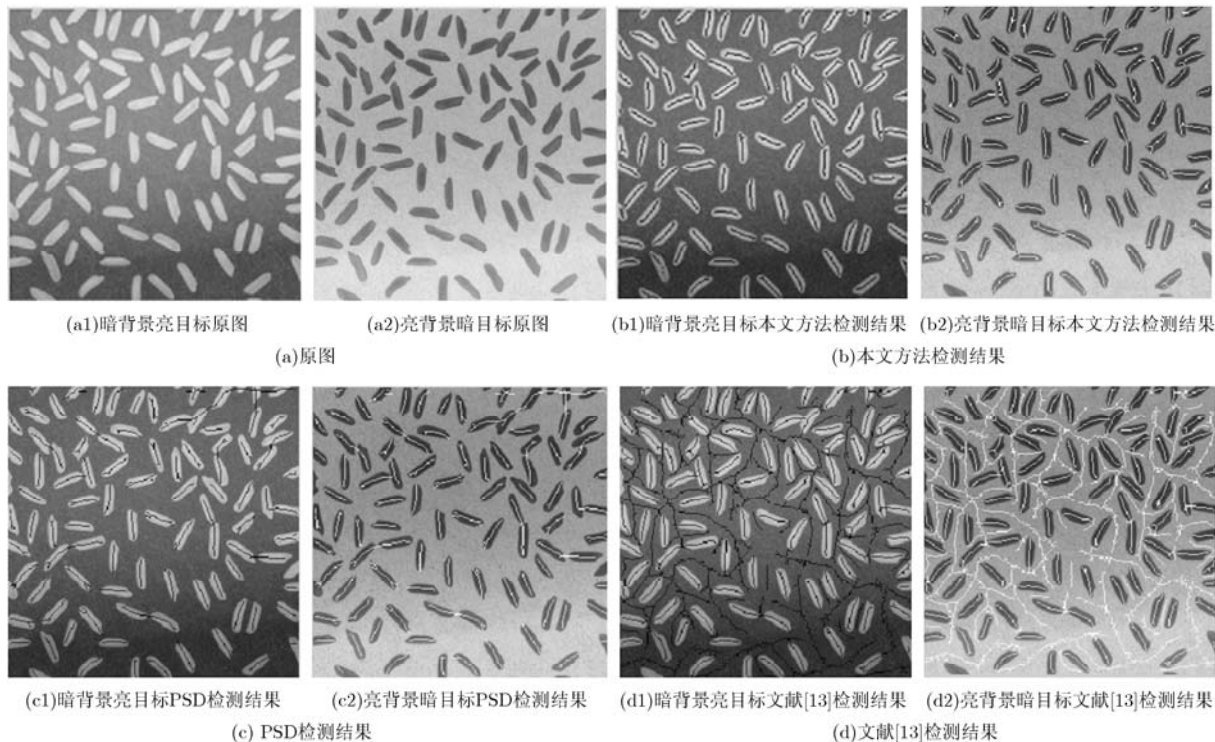


图5 含有多个目标的自然图像的对称性检测

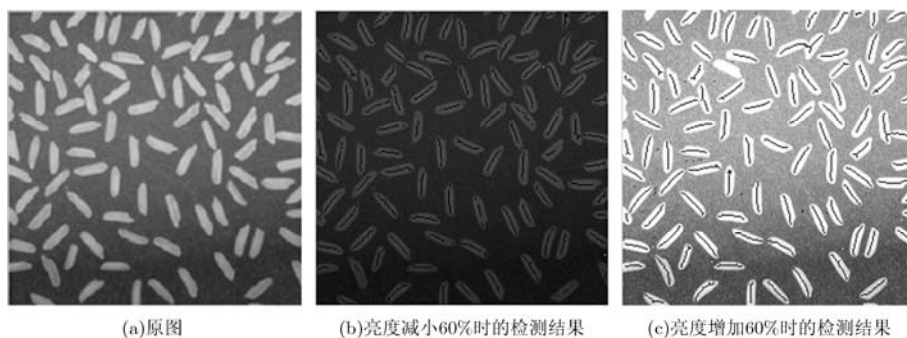


图6 改变图像亮度时的对称性检测

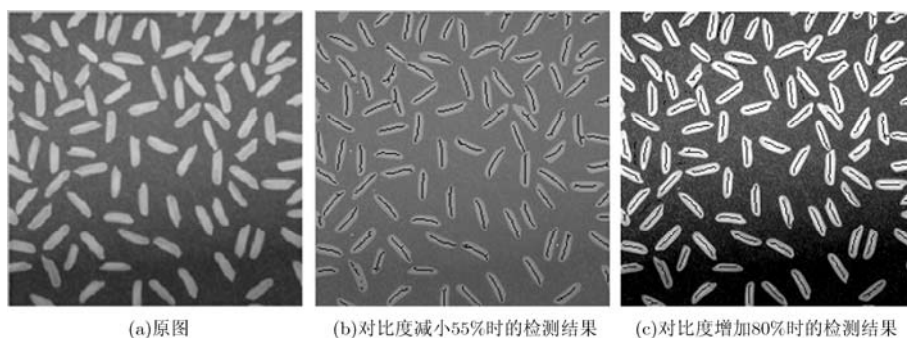


图7 改变图像对比度时的对称性检测

法检测图像的对称性。首先计算不同尺度、不同方向上的相位对称性，其次利用主成分分析融合不同方向上的相位对称性图像，最后用非极大值抑制和

滞后阈值处理得到最终检测结果。这种方法可直接对原始图像进行处理，不需要其任何先验信息，对于多目标图像不需要分割等预处理，对图像亮度和

对比度不敏感,能同时检测亮目标和暗目标的镜像对称、旋转对称和曲线对称。

参考文献

- [1] Xiang Y and Li S T. Symmetric object detection based on symmetry and centripetal-SIFT edge descriptor[C]. International Conference on Pattern Recognition, Tsukuba, Japan, 2012: 1403-1406.
- [2] Sun Y and Bhanu B. Reflection symmetry-integrated image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(9): 1827-1841.
- [3] Hauagge D C and Snavely N. Image matching using local symmetry features[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Providence, RI, America, 2012: 206-213.
- [4] Atallah M J. On symmetry detection[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1985, 34(7): 663-666.
- [5] Marola G. On the detection of the axes of symmetry of symmetric and almost symmetric planar images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(1): 104-108.
- [6] 卢春雨, 张长水, 闻芳, 等. 基于主元分析的对称性检测[J]. *电子学报*, 1999, 27(5): 25-28.
Lu C Y, Zhang C S, Wen F, *et al.* Principle component analysis-based symmetry detection[J]. *Acta Electronic Sinica*, 1999, 27(5): 25-28.
- [7] 吴刚, 李道伦. 基于隐含多项式曲线的物体描述与对称性检测[J]. *计算机研究与发展*, 2002, 39(10): 1337-1342.
Wu G and Li D L. Object representation and symmetry detection based on implicit polynomial curves[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2002, 39(10): 1337-1342.
- [8] Lee S and Liu Y X. Curved glide-reflection symmetry detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(2): 266-278.
- [9] Ni J, Singh M K, and Bahlmann C. Fast radial symmetry detection under affine transformations[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Providence, RI, America, 2012: 932-939.
- [10] Derrode S and Ghorbel F. Shape analysis and symmetry detection in gray-level objects using the analytical Fourier-Mellin representation[J]. *Signal Processing*, 2004, 84(1): 25-39.
- [11] Keller Y and Shkolnisky Y. A signal processing approach to symmetry detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(8): 2198-2207.
- [12] Lee S and Liu Y X. Skewed rotation symmetry group detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(9): 1659-1672.
- [13] Kovese P. Symmetry and asymmetry from local phase[C]. Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Australian, 1997: 185-190.
- [14] Xiao Z T, Hou Z X, Miao C Y, *et al.* Using phase information for symmetry detection[J]. *Pattern Recognition Letter*, 2005, 26(13): 1985-1994.
- [15] 卢振泰, 冯衍秋, 冯前进, 等. 基于主相位一致性的医学图像配准[J]. *电子学报*, 2008, 36(10): 1974-1978.
Lu Z T, Feng Y Q, Feng Q J, *et al.* Medical image registration based on principal phase congruency[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2008, 36(10): 1974-1978.
- 肖志涛: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理与模式识别、智能信号处理。
- 史文静: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为图像处理与模式识别。
- 耿磊: 男, 1982年生, 副教授, 研究方向为机器视觉理论及应用。