

基于相位信息的对称性检测算法

肖志涛¹⁾ 侯正信²⁾

¹⁾(天津工业大学信息与通信工程学院 天津 300160)

²⁾(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘 要 提出一种基于相位信息的对称性检测新方法,将对称性检测问题转化为频域中的相位分析.文中的可行性分析、PSD 的定义及其合理性证明为该算法奠定了理论基础.实验证明:该算法可直接应用于原始图像,不需要图像的任何先验知识,不需分割等任何预处理;具有旋转、亮度和对比度不变性;可以同时检测镜像对称、旋转对称、曲线对称等多种对称性.

关键词 相位信息;对称性检测;计算机视觉

中图法分类号 TP391

Phase Based Symmetry Detection Algorithm

XIAO Zhi-Tao¹⁾ HOU Zheng-Xin²⁾

¹⁾(School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

²⁾(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract A new method of symmetry detection, based on phase information, is proposed in this paper. In this way, symmetry detecting is converted to phase analysis in the frequency domain. The feasibility analysis, Phase-based Symmetry Detection (PSD) definition, and rationality demonstration establish the theoretic foundation for this algorithm. Experimental results show that it can apply directly to original images and it need no segment and any other preprocessing. And it is invariant to rotation, brightness and contrast. Finally, it can detect bilateral symmetry, rotational symmetry, curve symmetry and others.

Keywords phase information; symmetry detection; computer vision

1 引 言

自然的和人工的物体通常会引起人的对称性的感觉.我们对对称性的感觉如此强烈,使得大多数的人工制造的物体都是对称的,并且心理学上认为对称性是感知的一个基本原则.环顾四周,我们的直接感受就是几乎所有感兴趣的区域都是由各种形式的对称组成的.由于对称性的普遍存在,对理解和解释自然界的图像来说,检测对称性具有重要意义.对称性检测与利用已成为计算机视觉中重要的研究方向.

对称性在感知问题上起很重要的作用.例如,当视觉模式出现“对称性”时,大脑活动就会出现与之对应的峰值.一块区域的对称性越强,越容易被看成图形^[1].对称性本质上是一种规则性.在军事伪装中常用不同颜色和不同形状去破坏物体原有的图案(例如迷彩服)就是这一规则的应用.

在图像中很容易标识的两种对称形式为镜像对称(bilateral symmetry)和旋转对称(rotational symmetry).还有一种曲线对称(curve symmetry).这三种对称如图 1 所示.

目前的绝大多数对称性检测算子都是在空间域

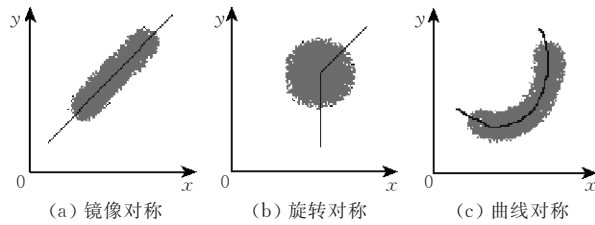


图 1 三种类型的对称

利用图像的亮度或灰度梯度进行的,存在的主要问题是:在进行所有的对称性分析之前都需要进行物体分割.文献[2,3]把对称性检测问题转化为协方差矩阵的特征值分解问题,而且文献[2]还要求物体的对称轴与图像二值化时的对称轴相同.文献[4]由功率谱得到复数矩表示对称性,并给出离散复数矩表示.文献[5,6]使用方向直方图和梯度信息进行对称性检测. Atallah^[7]的方法需要把物体表示为点、线段和圆,然而形态学方法如中轴变换、细化等,只能应用于二值化物体. Xia^[8]对这些方法进行了概括.形态学方法的难题是对物体轮廓的微小变化特别敏感,物体轮廓中的一个凹槽会形成几个对称轴,使得物体的表征复杂化. Reissfeld^[9]提出一种为数不多的不需要物体分割或识别的对称性检测方法,该方法的缺点是除取决于几何形状以外,还取决于对比度. Kovesi^[10]利用相位信息研究了对称性检测问题,得出了一些有益的结果.但是在检测结果中同时包括物体和背景,这显然不是所希望的.

综上所述,目前的大多数对称性检测算子主要存在以下三方面的问题.

首先,它们都是针对只包含一个物体的图像设计的.当图像包含多个物体时就需要进行分割,而我们在处理图像以前并不知道图像中包含多少物体,因此这类算子具有很大的局限性.

其次,它们主要利用图像的梯度信息,而这不符合人类视觉感知特性.比如,在同样的背景下有两个灰度不同的圆,如果用基于梯度的对称性检测算子进行度量,则这两个圆的对称性必然与其梯度有关,即这两个圆的对称性不同,对比度大的圆对比度小的圆“更圆”.这显然与客观不符.大多数算子都可以保证具有旋转不变性,而对于对比度和亮度的变化则不具有不变性,根本原因就是利用图像的梯度信息进行计算.

最后,它们一般只能检测某一类或两类对称性,比如只能检测镜像或旋转对称,或者镜像和旋转对称,而对其它类型的对称则无能为力,即通用性较差.

本文提出的基于相位信息的对称性检测(Phase-based Symmetry Detection, PSD)算法完全可以克

服上述问题,即直接应用于原始图像,不需要图像的任何先验知识,不需分割等任何预处理;具有旋转、亮度和对比度不变性;可以同时检测镜像对称、旋转对称、曲线对称等多种对称性,通用性强.

2 利用相位信息进行对称性检测的可行性

对称性的一个重要方面是物体在结构上呈现出周期性,因此,使用基于频率的方法分析图像中的对称性也是很自然的.一些简单函数的傅里叶级数的表现形式使得这个问题很明确,在对称点处,很容易发现可标识的相位模式.用相位信息检测对称性的可行性,可通过观察、分析方波和三角波的傅里叶级数表示来说明,如图2所示.相位一致性模型和局部能量模型^[10]正是利用在方波的阶跃点的所有的正弦波都同相这个特性来检测阶跃边缘的.利用相位信息应该也可以检测对称点,例如,在方波的中点、三角波的峰点存在一个镜像对称点,所有正弦波在该点也都是最对称的点.因此,利用相位信息检测对称性是可行的.

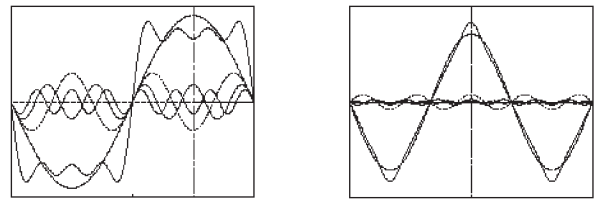


图 2 矩形波和三角波的傅里叶级数展开

3 基于相位信息的对称性检测

需要说明的是,本文只考虑图像亮度值的局部对称性,即对称的低层视角,不考虑图像中整体的几何对称性.

由上述的可行性论证可知,对于暗背景中的亮物体,对称点的相位为 0,对于亮背景中的暗物体,对称点的相位与之反相,应该为 π .为叙述简便,这里只针对暗背景中的亮物体的对称性检测.如果进行亮背景中的暗物体的对称性检测,情况类似.

3.1 背景知识

考虑一维信号.对于信号 $I(x)$,其傅里叶级数展开为

$$\begin{aligned} I(x) &= \sum_n A_n \cos(n\omega x + \phi_{n0}) \\ &= \sum_n A_n \cos(\phi_n(x)), \end{aligned}$$

这里的 A_n 为第 n 次谐波余弦分量的幅值, ω 是常数 (一般为 2π), ϕ_{n0} 是 n 次分量的相位偏移量或初始相位. 函数 $\phi_n(x)$ 表示 x 点的傅里叶分量的局部相位. 则相位一致性和局部能量^[10] 分别为

$$PC(x) = \max_{\bar{\phi}(x) \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n},$$

$$LE(x) = \sqrt{I^2(x) + H^2(x)},$$

其中 $H(x)$ 为信号 $I(x)$ 的 Hilbert 变换.

文献[12]中提出了改进的局部能量模型, 即对称局部能量模型, 可以克服局部能量模型本身固有的局限性. 为了叙述方便, 这里将对称局部能量数学模型的定义重述如下.

定义 1. 对称局部能量 SLE 将像素 p 、尺度 n 、方向 o 映射为能量 $LE_{n_j o_i}(p)$ 和对称相位 $\phi_{n_j o_i}(p)$:

$$SLE(p, n, o) = (LE_{n_j o_i}(p), \phi_{n_j o_i}(p)),$$

$$LE_{n_j o_i}(p) = \{\max_{k, q} LE_{n_k o_q}(p) \mid \forall k, q\},$$

其中要同时满足以下条件:

- ① 对称相位由 $\phi_{n_j o_i}(p) \in \left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, -\frac{\pi}{2}\right\}$ 给定;
- ② 相位是一致的; 在所有尺度和方向下的相位 $\phi_{n_j o_i}(p)$ 是相同的;
- ③ $LE_{n_j o_i}(p)$ 是最大值.

否则, $SLE(p, n, o) = 0$.

3.2 基于相位信息的对称性检测算子 (Phase-based Symmetry Detector, PSD)

本文利用 log Gabor 小波^[11] 对图像进行分析. 在对称点处, 偶对称滤波器输出的绝对值将很大, 奇对称滤波器输出的绝对值会较小; 在反对称点处, 偶对称滤波器输出的绝对值将较小, 奇对称滤波器输出的绝对值会很大. 因此, 这里的能量是偶对称滤波器输出的绝对值减去奇对称滤波器输出的绝对值. 同时考虑对称性与相位的关系, 可得下面的定义.

定义 2. PSD 将像素 p 、尺度 n 、方向 o 映射为 $symPC(p)$ 、相位 $\phi_{n_j o_i}(p)$:

$$PSD(p, n, o) = (symPC(p), \phi_{n_j o_i}(p)),$$

式中

$$symPC(p) = \frac{sumE(p)}{sumA(p) + \epsilon}, \quad \phi_{n_j o_i}(p) = 0,$$

即只考虑相位为 0 的点, 同时可以保证相位的一致性. 其中

$$sumE(p) = \left\{ \sum_{k, q} SLE_{n_k o_q}(p) \mid \phi_{n_k o_q}(p) = 0, \forall k, q \right\},$$

即所有尺度和方向下相位一致且相位为 0 的点的对称能量之和;

$$sumA(p) = \left\{ \sum_{k, q} A_{n_k o_q}(p) \mid \phi_{n_k o_q}(p) = 0, \forall k, q \right\},$$

即所有尺度和方向下相位一致且相位为 0 的点的幅度之和;

ϵ 为小的正的常数, 防止分母为 0.

4 基于相位信息的对称性检测(PSD)的合理性证明

设信号为 $I(x)$, 正交滤波器对为 k_{no} , 其中 n 表示尺度, o 表示方向. 则尺度为 n 、方向为 o 时的局部能量为

$$LE_{no}(x) = \|I(x) \times k_{no}\| = \|I_{no}(x)\|.$$

由于 log Gabor 小波^[11] 在空间域不存在可析表示, 这里用墨西哥草帽小波、通过两个例子证明 PSD 的合理性. 该小波在空间域的形式为

$$g_n(x) = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{x^2}{n^2}\right) e^{-\frac{x^2}{2n^2}}.$$

(1) 首先考虑位于原点的冲激函数 (Delta 函数). 这是大小为 0 的理想对称物体, 卷积结果是滤波器本身. 对于尺度 n , 在原点的卷积结果是 $I_n(0) = \frac{1}{n} + 0i$. 因此, 局部相位 $\phi_n(0) = 0$, 局部能量 $LE_n(0) = \frac{1}{n^2}$. 根据 PSD 的定义, 对称相位为 0, 这与定义一致.

(2) 考虑矩形函数

$$h(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq t \\ 0, & |x| > t \end{cases},$$

这是一个位于原点的、大小为 t 的对称物体. 对于尺度 n , 在原点的卷积结果为

$$I_n(0) = \left(\int_{-t}^t g_n(x) dx \right) + 0i,$$

因此, 在原点的相位为 $\phi_n(0) = 0$, 这也与定义一致.

5 PSD 性能分析及比较

这里通过实验对 PSD 的性能进行分析. 需要强调的是, 本文给出的关于 PSD 的所有实验结果都使用了相同的参数.

(1) 可以直接应用于原始图像, 不需要图像的任何先验知识, 不需分割等任何预处理, 如图 3 所示. 对于含有多个物体的图像, 常规的对称性检测算子都需要图像分割等预处理.

(2) 具有旋转、亮度和对比度不变性, 如图 4 所示.

(3) 可以同时检测镜像对称、旋转对称、曲线对称等多种对称性, 具有很好的通用性, 如图 5 所示.

KSD 表示 Kovesi^[10] 的对称性检测算子, KSD 的局限性是不但检测到希望的物体的对称性, 同时包括不希望的物体间隙的对称性, 这使得检测结果

特别混乱, 效果较差. 而 PSD 只检测到所希望的物体的对称性. PSD 与 KSD 的比较如附图 1 所示.

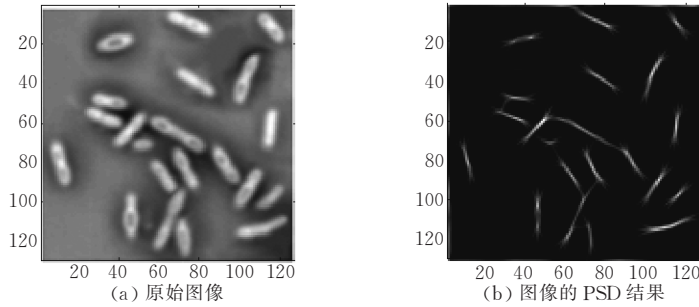


图 3 不需图像的任何先验知识、不需分割等任何预处理情况下的检测

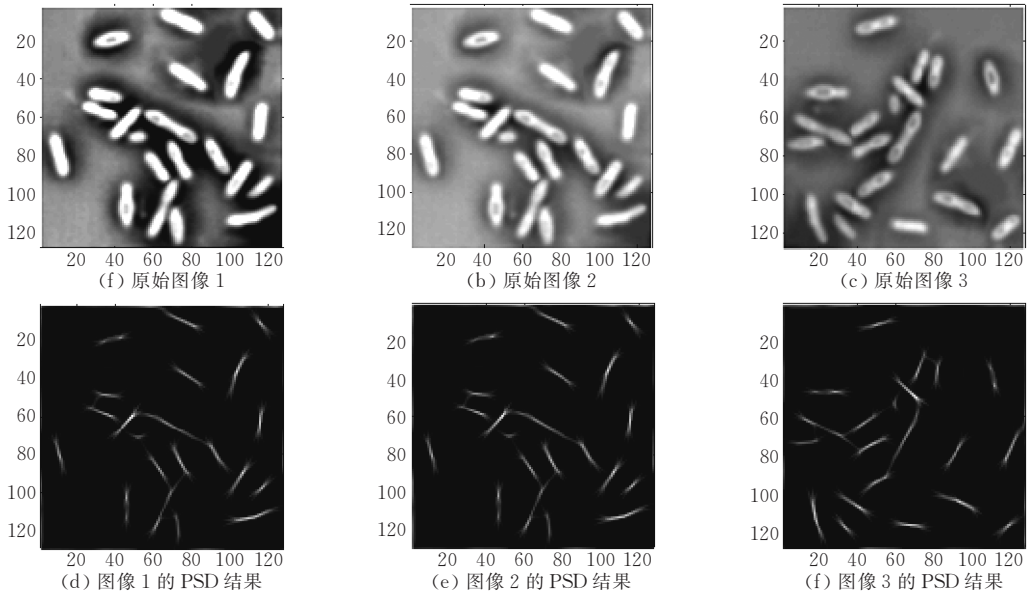


图 4 旋转、亮度和对比度不变性示意

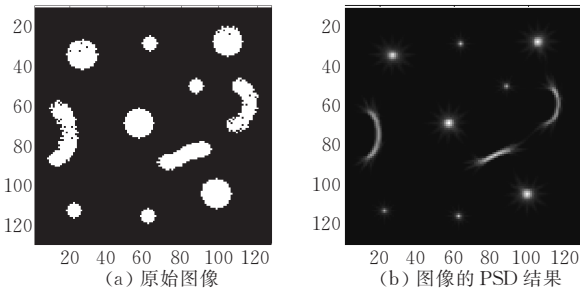


图 5 多种对称性下的检测

可直接应用于原始图像, 不需任何先验知识, 不需分割等任何预处理; 对图像的旋转、亮度、对比度具有不变性; 可以同时检测镜像对称、旋转对称、曲线对称等多种对称.

参 考 文 献

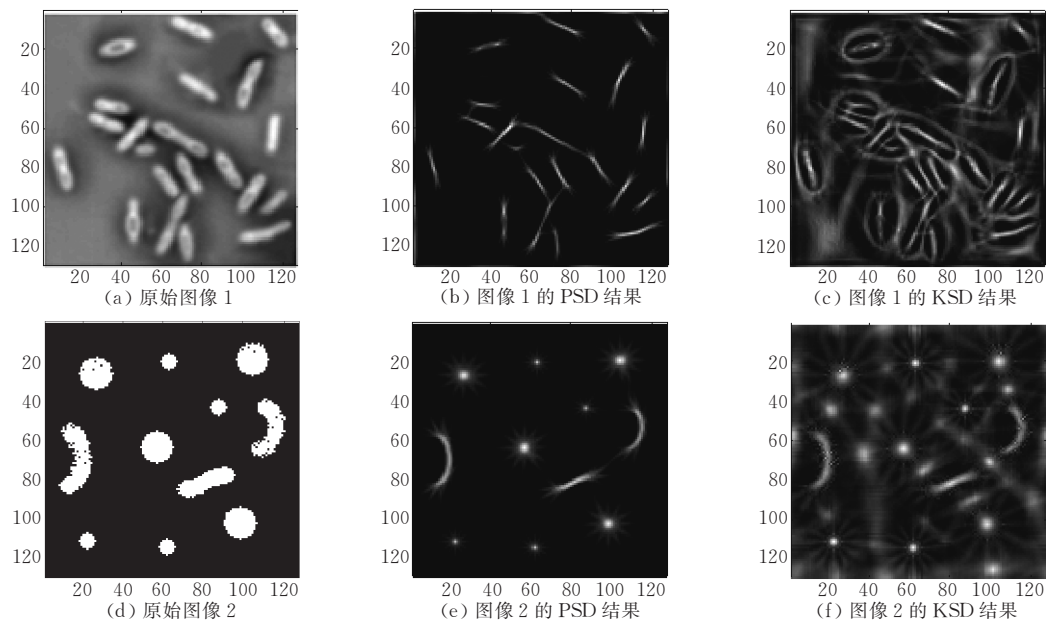
- 1 Zhang Yu-Jin. Image Comprehension and Computer Vision (Image Engineering). Beijing: Tsinghua University Press, 2000(in Chinese)
(章毓晋. 图像理解与计算机视觉(图像工程下册). 北京: 清华大学出版社, 2000)
- 2 Mara D. O., Owens R.. Measuring bilateral symmetry in digital images. In: Proceedings of the IEEE TENCON-Digital Signal Processing Applications, Australia, 1996, 151~156
- 3 Lu Chun-Yu, Zhang Chang-Shui, Wen Fang *et al.*. Principle component analysis-based symmetry detection. Acta Electronic Sinica, 1999, 27(5): 25~28(in Chinese)
(卢春雨, 张长水, 闻 芳等. 基于主元分析的对称性检测. 电子学报, 1999, 27(5): 25~28)
- 4 Thai B., Healey G.. Modeling and classifying symmetries

6 结束语

本文首先讨论了对称性检测常规方法存在的局限性, 接着分析了利用相位信息检测对称性的可行性, 提出了一种基于相位信息的对称性检测算法(PSD), 并分析了 PSD 的合理性. 最后对 PSD 进行性能分析, 并与 KSD 进行了比较. 实验证明: 该算法

- using a multi-scale opponent color representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1224~1235
- 5 Sun C., Si D.. Fast reflectional symmetry detection using orientation histogram. *Real-Time Imaging*, 1999, 5(1): 63~74
- 6 Sun C.. Symmetry detection using gradient information. *Pattern Recognition Letters*, 1995, 16(9): 987~996
- 7 Atallah J.R.. On symmetry detection. *IEEE Transactions on Computers*, 1985, C-34: 663~666
- 8 Xia Y.. Skeletonization via the realization of the fire front's propagation and extinction in digital binary shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(10): 1076~1086
- 9 Reisfeld D., Wolfson H., Yeshurun Y.. Context free attentional operators; The generalized symmetry transform. *Journal*

- of *Computer Vision*, 1995, 14: 119~130
- 10 Kovési P.. Invariant measures of image features from phase information [Ph. D. dissertation]. University of Western Australia, Perth, 1996
- 11 Xiao Zhi-Tao, Guo Cheng-Ming, Yu Ming. Research on log Gabor function and its application in human visual system characteristics. *Signal Processing*, 2002, 18(5): 399~402 (in Chinese)
(肖志涛, 国澄明, 于明等. Log Gabor 函数在人类视觉系统特性研究中的应用. *信号处理*, 2002, 18(5): 399~402)
- 12 Xiao Zhi-Tao. Research of phase based image feature detection and DSP based image matching machine [Ph. D. dissertation]. Tianjin University, Tianjin, 2002(in Chinese)
(肖志涛. 基于相位信息的图像特征检测和基于 DSP 的图像匹配处理机的研究[博士论文]. 天津大学, 天津, 2002)



附图 1 PSD 与 KSD 的比较



XIAO Zhi-Tao, born in 1971, Ph.D., associate professor. His current research interests include image processing, pattern recognition and their applications.

HOU Zheng-Xin, born in 1945, professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include video processing, HDTV, filter design and applications.

Background

This work is supported by Tianjin Higher Education Science and Technology Development Foundation under grant No. 20041304.

Symmetry exists widely in the real world and plays a remarkable role in perception problems. Symmetry is so important to our perception that most of the man-made objects are symmetric. It is one of the shape features that are often used in object recognition. Symmetry detection and application have become the important part of computer vision. Phase in-

formation is very important to human visual perception. Using phase information and log-Gabor wavelet, which is consistent with human visual characteristics, objects characteristics can be described efficiently. This is important for image retrieval assigned to human visual characteristics.

The main advantages of this work are: it can be applied to original images directly, does not need pre-knowledge, and does not need segment and other pre-processing.