

一种基于 Gabor 滤波器的竹节纱检测方法

温智婕^{1,2}, 刘秀平^{*1}, 苏志勋¹, 乔万顺¹

(1. 大连理工大学 应用数学系, 辽宁 大连 116024;

2. 上海大学 理学院 数学系, 上海 200444)

摘要: 竹节纱是纺织工业中广泛使用的一种花式纱, 为了检测和提取织物中的竹节纱, 结合人眼视觉特性, 提出了一种基于 Gabor 滤波器的竹节纱检测方法. 根据竹节纱分布的方向特性, 利用 Gabor 滤波器的带通技术, 设计了一个目标函数, 通过该函数来抑制织物正常纹理的频率成分, 增强了竹节纱的频率成分, 从而达到了检测竹节纱的目的. 大量实验结果表明, 该方法获得了较好的检测效果.

关键词: 竹节纱; Gabor 滤波器; 纹理

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

0 引言

竹节纱是一种具有不规则竹节式粗细节的花式纱, 其以结构独特而被广泛用于服装、装饰用品等, 越来越受到人们的青睐, 在市场上具有很强的竞争能力和开发价值, 同时也成为牛仔布生产中的一项重要工艺(竹节牛仔布是在全幅正常经纱内按一定比例掺入竹节纱). 工业上竹节纱的检测方法一般是目测法, 这种传统的人工检测方法存在劳动强度大及受主观因素影响大等缺点, 因而急需实现其自动化.

竹节纱的粗度比正常纱线要粗, 可以看做织物表面经向或纬向的疵点. 基于 Gabor 滤波器的织物疵点检测按是否需要知道疵点先验知识分为两类: 有监督方法和无监督方法^[1~5]. 对于有监督方法来说要求知道一些关于疵点的先验知识, 比如疵点区域大小以及方向等. Kumar 等^[5]提出的有监督方法首先对待测疵点图像进行分块, 对每一块用多通道滤波器进行滤波, 对每一个滤波器建立一个目标函数, 使得目标函数取最大值的滤波器选为处理该类疵点的最佳滤波器, 然后用该滤波器滤波参考图像得到阈值, 将疵点图像经过最佳滤波器滤波得到的结果进行阈值化即得到疵

点的分割图像. 而无监督方法不需任何先验知识, 将每个通道的滤波图像进行融合, 得到包含关于疵点的所有特征的融合图像, 对融合图像进行阈值化即可得到疵点分割图像, 该方法的缺点是计算量大.

不同布料竹节长度未必相同, 而且竹节纱的分布也具有随机性. 此时不能选择有监督疵点检测方法, 因为对图像分块大小不易确定. 而无监督疵点检测方法的计算量过大, 对于竹节纱这个问题不需要复杂度那么高. 本文利用 Gabor 滤波器能够模拟人眼视觉系统分析图像的特征且具有检测方向性特征的功能, 对竹节纱图像进行滤波以增强其与背景区域的差别. 然后选取合适的阈值分割出竹节纱, 从而判别竹节纱的有无以及其均匀性和稠密性.

1 Gabor 滤波器原理

Gabor 变换是一类重要的时频分析方法, 它首先由 Gabor^[6] 在 1946 年提出. 为了提取信号 Fourier 变换的局部信息, 他引入了一个时间局部化窗函数 $g(t-b)$, 其中参数 b 用于平移窗以便覆盖整个时域. 实际上, Gabor 使用了一个高斯函数作为窗函数 g . 窗函数的选择决定了它在空域的

收稿日期: 2007-04-13; 修回日期: 2009-03-09.

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0275); 国家自然科学基金资助项目(60673006); 上海市教委重点学科建设资助项目(J50101); 上海市重点学科资助项目(S30104).

作者简介: 温智婕(1982-), 女, 博士, 讲师; 刘秀平*(1964-), 女, 博士, 副教授, E-mail: xpliu@comgi.com.

局部性,随着窗口中心的移动而得到不同位置的空域信息. 因为一个高斯窗函数的 Fourier 变换还是一个高斯函数,所以它在频域也是局部的. 可以证明,它达到了时频测不准原理的下界. Daugman^[7]将“测不准原理”运用到二维 Gabor 变换,并得到了类似的结论.

二维 Gabor 函数是由椭圆形的高斯函数和复平面波的乘积组成,其时域表达式为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \exp[2\pi j(Ux + Vy)] \quad (1)$$

式中: σ_x 和 σ_y 为高斯函数的方差,决定了滤波器的带宽; U 和 V 分别为沿 x 和 y 坐标轴的频率. Gabor 函数可以分解为偶函数 $f(x, y)_e$ 和奇函数 $f(x, y)_o$ 两部分. 即 Gabor 函数(1)可以写成

$$f(x, y) = f(x, y)_e + j f(x, y)_o.$$

Gabor 函数在频域的响应函数为

$$F(u, v) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u - u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right]\right\} \quad (2)$$

其中

$$\sigma_u = \frac{1}{2\pi\sigma_x}, \quad \sigma_v = \frac{1}{2\pi\sigma_y}, \quad u_0 = \sqrt{U^2 + V^2}$$

当 $\sigma_x = \sigma_y$ 时, Gabor 滤波器为圆对称 Gabor 滤波器. Dunn 等已经发现由于织物图像大部分是由纹理基元非对称平移得到,此时应用非对称 Gabor 滤波器比较有效^[8,9].

二维 Gabor 小波滤波器是多通道带通滤波器,它是由 Gabor 滤波器进行适当的平移、旋转和尺度变化得到的,因而具有 Gabor 滤波器的基本性质,同样在空域和频域均有较好的分辨能力. 为了对一幅图像的整个频域进行采样,可以采用具有多个中心频率和方向的 Gabor 滤波器组来描述图像. 其表达式为

$$f_{p,q}(x, y) = \alpha^{-p} f(x', y') \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} x' &= \alpha^{-p}(x \cos \theta_q + y \sin \theta_q), \\ y' &= \alpha^{-p}(-x \sin \theta_q + y \cos \theta_q); \\ \theta_q &= \frac{\pi(q-1)}{L}, q = 1, 2, \dots, L \end{aligned}$$

$\alpha > 1$; $p = 1, 2, \dots, S$. p, q 分别为尺度因子和方向因子, S, L 为总的尺度数和方向数. 系数 α^{-p} 保证能量

$$E_{p,q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |f_{p,q}(x, y)|^2 dx dy$$

与尺度因子 p 无关^[10], 因此, 滤波器组中的所有滤波器都具有同样的能量, 与尺度和方向都无关. 对于一幅输入图像 $I(x, y)$, 用滤波器 $f_{p,q}(x, y)$

对其进行滤波, 得到滤波图像为

$$I^{p,q}(x, y) = \{[f_{p,q}(x, y)_e * I(x, y)]^2 + [f_{p,q}(x, y)_o * I(x, y)]^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中 $*$ 表示二维卷积算子, $f_{p,q}(x, y)_e$ 和 $f_{p,q}(x, y)_o$ 分别表示滤波器(3)的实部和虚部.

2 Gabor 滤波器方向性特征增强机理

Gabor 滤波器具有检测方向性特征的功能, 主要基于以下事实: Gabor 变换所采用的核与哺乳动物的视觉皮层简单细胞 2D 感受野剖面极其相似. 本文以人眼的视觉系作为仿生对象, 考虑了生物学家对人眼研究的一些最新成果. 人类视觉系统具有多通道多分辨特性^[11], 其处理初级视觉信息的方式如下: 人眼首先将投影于视网膜上的外界图像经过一族滤波器(对应于人眼的简单视觉皮层细胞)滤波, 然后将这些多通道成分进行综合. 人眼的每一简单视觉皮层细胞, 仅对频域上位于一定极角和极径范围内的频率产生响应, 即人眼所采用的每一滤波器只覆盖外界图像频域上某一定区域. 整个图像频域平面可被分割成许多个这种小区域, 每一区域覆盖一定范围的极角和极径. 若将图像频域平面以极坐标形式表示, 则这些区域可表示为 $[\theta_i, \theta_j] \times [\rho_k, \rho_l]$, 其中 θ_i 和 θ_j 为极角, ρ_k 和 ρ_l 为极径. 非均匀 Gabor 基函数在频域和空域都有良好的局部化能力, Gabor 滤波器在频域上的形状为中心不在原点的椭圆, 图 1 和 2 分别清晰地展示出二维可分离 Gabor 基函数在笛卡尔坐标系^[12]和对数极坐标系^[13]中的空间频域形状. 如图 2 所示, 对数极坐标系下更能体现出 Gabor 滤波器的方向性. 研究表明, 人眼对不同方向 θ 上空间频率变换的敏感程度是不同的, 这样就可以有选择地选取感兴趣的纹理区域. 换个角度而言, Gabor 滤波器是带通滤波器, 若其带通区域内一种纹理的功率谱能量占绝对优势, 而另一种纹理处于相对弱势, 则经过该滤波器滤波后, 图像中这两种纹理的边缘会获得一定的增强效应. 而 Gabor 滤波器的方向性特征增强效应也正是基于这种原因.

对织物图像来说^[14], 纬向方向性特征斑点, 其中心频率一般位于频域 y 轴附近, 因为该方向斑点能量有较大集中; 对于经向特征斑点, 由于斑点能量较多地集中于频域 x 轴附近, 其带通区域则应位于频域 x 轴附近. 那么关键在于选择适当的滤波器, 即可增强竹节纱和背景区域的差别, 从而经过阈值化后得到竹节纱分割图像.

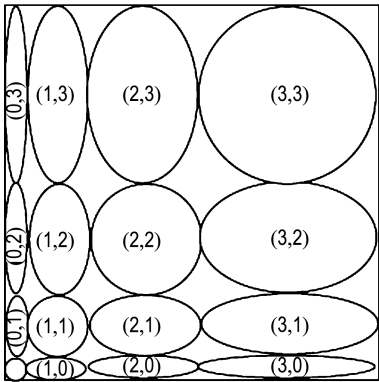


图 1 笛卡尔坐标系下空间频域划分
Fig. 1 Cartesian spatial-frequency partition

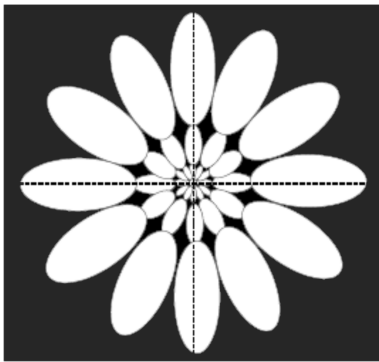
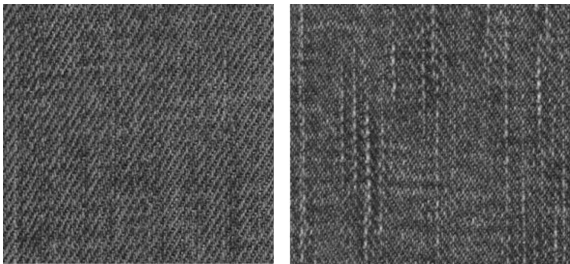


图 2 对数极坐标系下空间频域划分
Fig. 2 Log-polar spatial-frequency partition

3 Gabor 滤波器设计及检测算法

3.1 竹节纱图像特征分析

所谓竹节纱,即在细纱机纺出的粗细均匀的纱线上,纺出长短、粗细各不相同的竹节.在纺织工业上,竹节纱的形成是前后罗拉速比发生瞬时变化的结果^[15,16].竹节纱图像上呈现出来的效果就是,有竹节处的纱线要比正常纱线粗,经过打磨操作以后就会显现得更亮一些,如图 3 所示,图 (b)中发白的线就是竹节.这些灰度偏亮一些的竹节具有区别于背景纹理的频率.



(a) 正常织物 (b) 竹节纱

图 3 正常织物与竹节纱图像

Fig. 3 Normal fabric image and slub image

3.2 滤波器设计

根据竹节纱图像具有的特征,本文选用多通道滤波,由于二维 Gabor 滤波器是带通滤波器,就带通滤波器的性质而言,如果能寻找到一个最优的滤波器与竹节纱纹理相匹配,那么竹节纱与正常纹理区域通过此滤波器后的频谱能量将会有明显的差别,对响应结果进行简单的阈值化即可实现竹节纱的自动分割和识别.

设计匹配 Gabor 滤波器的目标就是使该滤波器对于竹节纱区域输出较大的频谱响应,而对正常纹理输出的频谱响应接近于零. Gabor 滤波后竹节部分被增强得越强,则表明该滤波器越调制于竹节的频率.下面给出的目标函数能够达到刻画竹节被增强的程度.

对于一幅 $M \times N$ 大小的待测图像 $I(m,n)$,首先利用方程 (4) 求得各个通道的滤波系数矩阵 $\mathbf{I}^{p,q}$. 根据竹节纱的特征及 Gabor 滤波器特性,构造如下目标函数:

$$\max_{\substack{1 \leq p \leq S \\ 1 \leq q \leq L}} J(pq) = (\mu_{p,q} \times \sigma_{p,q})^2 \quad (5)$$

其中

$$\mu_{p,q} = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I^{p,q}(m,n)$$

$$\sigma_{p,q}^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I^{p,q}(m,n) - \mu_{p,q})^2$$

$I^{p,q}(m,n)$ 表示系数矩阵 $\mathbf{I}^{p,q}$ 中第 m 行第 n 列的像素值. 选择满足目标函数的滤波器作为最优滤波器,用该滤波器对待测图像进行滤波即可得使竹节纱与背景区域得到最大程度增强的滤波图像.

3.3 检测算法

竹节纱检测算法步骤如下:

(1)对待测图像用多通道滤波器组进行滤波,得到各个通道的滤波系数矩阵 $\mathbf{I}^{p,q}$.

(2)依据目标函数 (5) 选取最优 Gabor 滤波器,用该滤波器滤波待测图像得到滤波图像.

(3)选择一幅不含竹节纱的织物图像作为参考图像.将该参考图像也用上面选择出来的滤波器进行滤波,由此得到滤波图像 $R(m,n)$.

(4)定义阈值为

$$\Psi = \max_{(x,y) \in W} |R(m,n)| \quad (6)$$

W 是参考图像中的一个子图像,子图像的选择依据是尽量避免其他斑点的干扰.

(5)阈值化第 (2) 步得到的滤波图像,阈值化后的图像便由原来的灰度图像转化为二值图像,

黑的像素值为 0,代表该处为正常纹理;白的像素值为 1,表示该处有竹节纱存在.

(6)如果所检测的布面质量不良,则图像经过阈值化后有可能在正常织物区域内形成一些孤立的像素值为 1 的像素点或小像素块.另外,有些竹节纱由于其本身的原因经过阈值化后不能完全连通在一起,此时引入形态学算子,可以去掉毛刺和孤立点以及弥补裂缝和空洞.

利用上述算法,将得到竹节纱的分割图像.

4 实验结果

为了衡量本文方法的有效性,将本文方法与文献[5]的无监督疵点检测(UWI)方法进行对比实验.实验在 P4-2.8 GHz、1 GB 内存微机下调用 Matlab 7.1 实现.所有机织布都被裁剪成 256×256 大小. UWI 方法和本文方法选用的 Gabor 滤波器个数均为 6 个(2 个方向 3 个尺度). 本文采用一些经向和纬向竹节纱来说明实验效果. 图 4 (a)为含有纬向竹节纱的图像,图 5(a)为含有经

向竹节纱的图像. 为了阐明方法的有效性,本文将检测到的竹节纱变换一种颜色覆盖到原图上(如图 4(d)和(e)),可以看出本文方法的结果更胜一筹. 同样,给出了经向竹节纱图像的测试结果(见图 5). 通过实验结果可以看出本文算法有更好的稳定性和可靠性,并且计算复杂度较低. 运行时间的计算结果为 UWI 方法 1. 275 6 s,本文方法 0. 708 9 s,UWI 方法需要对图像进行分块,对每一块都进行滤波,计算量比本文方法要大,因此本文方法在实现实时性上更近了一步.

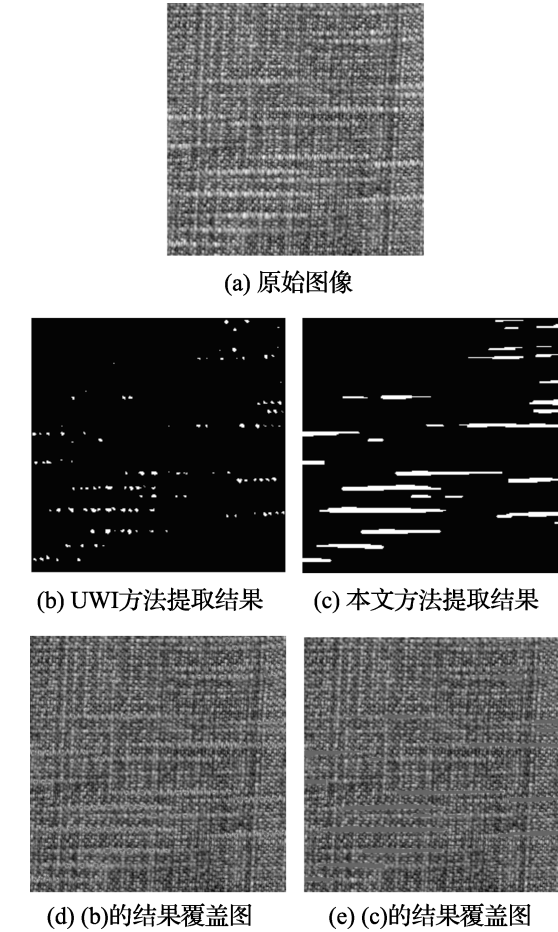


图 4 纬向竹节纱实验结果
Fig. 4 Experimental results of weft slub

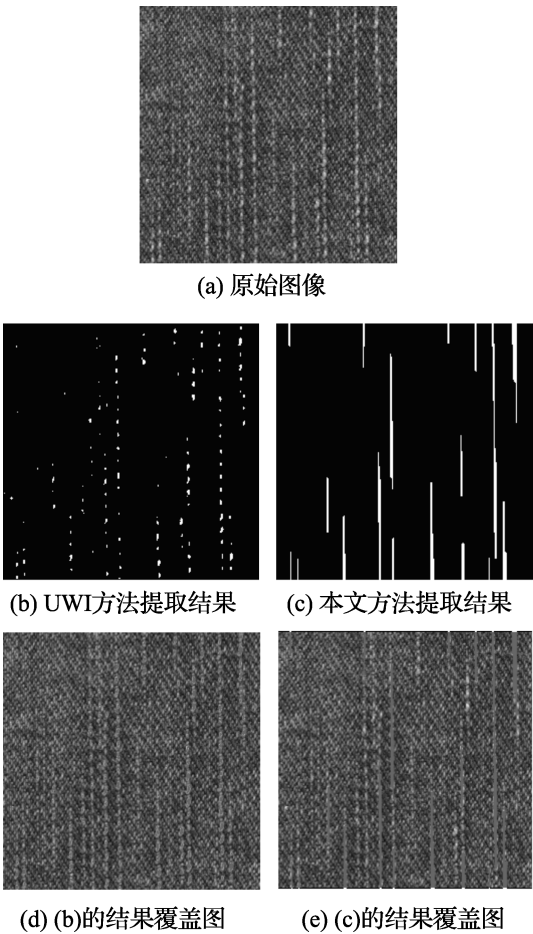


图 5 经向竹节纱实验结果
Fig. 5 Experimental results of warp slub

5 结 语

竹节纱提取技术是在开发牛仔面料识别系统中的一个非常重要的部分. 竹节纱要么分布在经向要么分布在纬向,所以本文选择方向个数为 2, 用有监督方法进行竹节纱提取时,其目标函数失效,另外,竹节纱图像不能含有大块疵点,否则影响竹节纱的提取,所以需要预处理,尽量避免其

他疵点的影响. 还有一个难点就是参考图像的选取, 该参考图像应与待测纹理相似度较高并且不含竹节纱. 如果能寻找到一种方法, 不需选择参考图像, 那将会是疵点检测领域的一个突破, 也就实现了自适应性.

参考文献:

- [1] ESCOFET J, NAVARRO R, MILLAN M S, *et al.* Detection of local defects in textiles webs using Gabor filters [J]. **Optical Engineering**, 1998, **37**(8): 2297-2307
- [2] AJAY K, GRANTHAM K H. Defect detection in textured materials using optimized filters [J]. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, 2002, **32**(5):553-570
- [3] 傅一平, 李志能, 袁 丁. 基于优化设计 Gabor 滤波器的边缘提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, **16**(4):481-486
- [4] 贡玉南, 华建兴, 黄秀宝. 基于匹配 Gabor 滤波器的规则纹理缺陷检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2001, **6**(7):624-628
- [5] KUMAR A, PANG G. Defect detection in textured materials using Gabor filters [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2002, **38**(2):425-440
- [6] GABOR D. Theory of communication [J]. **Proceedings of the Institute of Electrical Engineers**, 1946, **93**(26):429-457
- [7] DAUGMAN J G. Uncertainty relations for resolution in space spatial frequency and orientation optimized by two-dimension visual cortical filters [J]. **Journal of the Optical Society of America**:A, 1985, **16**(2): 1160-1169
- [8] DUNN D, HIGGINS W E, WAKELEY J. Texture segmentation using 2-D Gabor elementary functions [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1994, **16**(2):130-148
- [9] DUNN D, HIGGINS W E. Optimal Gabor filters for texture segmentation [J]. **IEEE Transactions on Image Processing**, 1995, **4**(7):947-963
- [10] MANJUNATH B S, MA W Y. Texture features for browsing and retrieval of image data [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1996, **18**(8):837-842
- [11] TAN T N. Texture edge detection by modeling visual cortical channels [J]. **Pattern Recognition**, 1995, **28**(9):1283-1298
- [12] 张贤达, 保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1998
- [13] DAUGMAN J G. Complete discrete 2-D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression [J]. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, 1998, **36**(7):1169-1179
- [14] SU Zhi-xun, WEN Zhi-jie, QIAO Wan-shun, *et al.* Automatic identification of the fabric structure based on Fourier transform [J]. **Journal of Information and Computational Science**, 2006, **3**(3):527-534
- [15] 汪 军, 黄秀宝. 转杯竹节纱竹节参数的理论研究 [J]. 中国纺织大学学报, 2000, **26**(6):35-43
- [16] 许佃林. 竹节纱的纺纱原理及工艺探讨[J]. 内蒙古科技与经济, 2000(4):76

A slub detection method based on Gabor filters

WEN Zhi-jie^{1,2}, LIU Xiu-ping^{*1}, SU Zhi-xun¹, QIAO Wan-shun¹

(1. Department of Applied Mathematics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Mathematics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Slub is widely used in fabric industry. Incorporating into the human visual characteristic, a slub detection algorithm based on Gabor filters is presented. These filters give consideration to the orientation characteristic of slub. Taking advantage of bandpass technique of Gabor filters, a cost function is designed which can restrain the frequency component of the normal texture of fabric, and strengthen the frequency component of slub, so it achieves the purpose detecting slub. The plentiful experimental results indicate that the proposed algorithm has gained fine detecting effect.

Key words: slub; Gabor filters; texture