

基于匹配 Gabor 滤波器的规则纹理缺陷检测方法

贡玉南¹⁾ 华建兴²⁾ 黄秀宝¹⁾

¹⁾(东华大学纺织学院 上海 200051) ²⁾(上海交通大学自动化所 上海 200030)

摘要 许多工业产品表面纹理都可以被认为是由基本纹理单元在空间按照一定的规则进行排列组合的结果,但由于各种原因,这些有规则纹理图象经常出现一些缺陷,因而检测这些有规则纹理图象的缺陷是机器视觉检测的重要内容.为了对这种缺陷进行有效地检测,在对这类纹理图象进行功率谱分析的基础上,根据人眼的视觉原理,设计了两类匹配 Gabor 滤波器,即正常纹理匹配 Gabor 滤波器和缺陷纹理匹配 Gabor 滤波器.前者能够突出正常纹理,抑制缺陷纹理;而后者恰恰相反.在将这两类滤波器用于规则纹理图象缺陷的自动检测时,均获得了良好的检测精度和速度.

关键词 匹配 Gabor 滤波器 缺陷检测 功率谱分析 规则纹理

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)07-0624-05

Regular Texture Defect Detection Based on Matched Gabor Filters

GONG Yu-nan¹⁾ HUA Jian-xing²⁾ HUANG Xiu-bao¹⁾

¹⁾(College of Textiles, Donghua University, Shanghai 200051)

²⁾(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

Abstract The surfaces of many industrial products are formed from the textural primitives by placement rules on the image field. It is an important task of automatic vision inspection to detect the defects in these regular textures. In the paper, two types of matched Gabor filters, that is normal texture matched Gabor filters and defect matched Gabor filters, are designed based on power spectrum of the regular normal texture and the abnormal texture. The normal texture matched Gabor filters, whose band-pass area is positioned on the dominant frequency components of the normal texture, are designed to uplift the normal texture while suppress the defect texture. On the other hand, the defect matched Gabor filters, the band-pass area of which guarantees the predominance of frequency components of the defect texture, have the effects of uplifting the defect texture while suppressing the normal texture. Taking advantage of the recent progress of study on principle of human vision, a novel adaptive filter design method is presented. Experiments on edge enhancement for defect detection using these matched Gabor filters have yielded satisfactory results, as far as both the precision and the speed are concerned.

Keywords Matched Gabor filter, Defect detection, Power spectral analysis, Regular texture

0 引言

表面纹理缺陷是影响产品质量的关键因素.长期以来,其检测均由人眼进行判别.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,因而亟需发展新颖、快速和准确的表面纹理缺陷

自动检测方法.在缺陷检测过程中,不仅需要判别产品表面是否含有缺陷,而且还希望能够提供缺陷的位置信息和形状信息.目前研究较多的基于 Fourier 频谱特征的缺陷自动检测方法仅在频域上对纹理进行分析,它不能提供任何关于所检出缺陷的空域信息,即在判断纹理表面有无缺陷的同时,还能提供缺陷的空域信息. Dewaele 等人虽已将 K-L 变换用于

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(99025508)

收稿日期:2000-03-21; 改回日期:2000-09-18

检测规则纹理的缺陷^[1],但由于缺乏快速算法的支持,致使该检测方法速度很慢,离散正交小波作为一种纹理缺陷检测手段^[2],虽具有较高的速度,但其对缺陷边缘的增强效果并不理想。

针对规则纹理图象的缺陷,提出一种基于 Gabor 滤波器的自动检测方法。该方法实际上是一种无监督的图象纹理分割方法,即首先采用 Gabor 滤波器对规则纹理图象进行边缘增强,然后对增强后的图象进行阈值化,以提取缺陷的位置和形状信息,但这种 Gabor 滤波器必须经过适当的设计后,才能用于规则纹理图象的边缘增强。基于 Gabor 滤波器的纹理图象边缘增强方法可大致分成如下两类:第一类为多通道 Gabor 分解法^[3],第二类为匹配 Gabor 滤波器(matched filter)滤波法^[4]。基于多通道 Gabor 分解的图象边缘增强方法必须保证所采用的 Gabor 滤波器带通区域能够覆盖整个图象频域,以防止图象在分解过程中丢失信息。这种方法的最大不足在于它的计算量很大,因为它涉及到大量的图象滤波运算。基于匹配 Gabor 滤波器的纹理边缘增强法不仅可以减少所需的滤波器数量,而且保证了滤波器的质量,即滤波器能与待处理纹理相匹配。考虑到规则纹理缺陷检测一般是一项在线实现的任务,它要求算法既准确又快速,因而必须设计一种与纹理相匹配的 Gabor 滤波器以用于规则纹理图象缺陷检测。

1 Gabor 滤波器的参数表示

二维 Gabor 滤波器 $h(x, y)$ 及其 Fourier 变换 $\hat{h}(u, v)$ 具有如下的一般形式^[5]:

$$h(x, y) = g(x', y') \exp\{2\pi j(Ux + Vy)\} \quad (1)$$

$$\hat{h}(u, v) = \exp\{-2\pi^2[(u' - U')^2\lambda^2 + (v' - V')^2]\} \quad (2)$$

其中

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma\lambda} \exp\left\{-\frac{(x/\lambda)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

高斯函数具有如下形式

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} U' \\ V' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

(U, V) 为滤波器带通区域中心频率, λ 为高斯函数

的长径比;参数 σ 和 θ 用于控制 Gabor 滤波器带通区域的伸缩和旋转。设 (F, φ) 对应于 (U, V) 的极坐标形式,为了方便起见,通常假设 $\theta = \varphi$,于是式(1)和式(2)可改写为

$$h(x, y) = g(x', y') \exp\{2\pi jFx'\} \quad (5)$$

$$\hat{h}(u, v) = \exp\{-2\pi^2\sigma^2[(u' - F)^2\lambda^2 + (v')^2]\} \quad (6)$$

这里, $\hat{h}(u, v)$ 可被解释为中心频率位于 (F, φ) , 长径比为 λ 的一种椭圆形带通滤波器。

定义 B 为滤波器沿极角 φ 方向(径向)的半峰频率带宽,如下式所示

$$B = \log_2 \left\{ \frac{\pi F \lambda \sigma + \alpha}{\pi F \lambda \sigma - \alpha} \right\} \quad (7)$$

其中, $\alpha = \sqrt{(\ln 2)/2}$ 。任一特定二维 Gabor 滤波器均可通过参数 (F, φ, B, λ) 唯一表示。

2 匹配 Gabor 滤波器纹理缺陷边缘增强效应

就带通滤波器而言,如果其带通区域内一种纹理的功率谱能量占绝对优势,而另一种纹理却处于相对弱势,那么经过该滤波器滤波后,图象中这两种纹理的边缘会获得一定的增强效应,而 Gabor 滤波器的边缘增强效应也正是基于这种机理。通过分析规则纹理图象缺陷功率谱,发现正常纹理功率谱能量聚集区和缺陷功率谱能量聚集区一般不会发生重叠。通过适当配置带通滤波器的带通区域,可以在该带通区域内形成正常纹理功率谱能量和缺陷功率谱能量的不均衡,从而使该滤波器对纹理缺陷具有边缘增强效应。大家知道, Gabor 滤波器的带通区域既可以位于正常纹理功率谱能量聚集区,也可以位于缺陷功率谱能量聚集区,其前者称为正常纹理匹配 Gabor 滤波器,其带通区域内正常纹理功率谱能量相对较强,而缺陷功率谱能量则相对较弱;后者称为缺陷匹配 Gabor 滤波器,其带通区域内正常纹理功率谱能量处于弱势,缺陷功率谱能量却占相对优势。一般来说,正常纹理匹配 Gabor 滤波器大量通过正常纹理的功率谱能量,抑制缺陷的功率谱能量,因而对纹理图象中正常纹理区域具有较大的幅值响应,对缺陷纹理区域的幅值响应较小;而缺陷匹配 Gabor 滤波器则恰恰相反。Gabor 滤波器是一种具有明确解析表达式的带通滤波器,它能够在频域和空域内同时获得良好的局部性。其对缺陷检测来说,若频域局部化越好,则更能区别不同纹理间的差别,

即更易发现缺陷;空域局部化越好,则有助于缺陷的精确定位和形状描述.这两类 Gabor 滤波器在对纹理图象频率进行精确选择的同时,也保证了良好的空域精度,这对缺陷边缘增强也是至关重要的.

3 匹配 Gabor 滤波器的设计方法

一般 Gabor 滤波器的性能由其参数确定,设计 Gabor 滤波器就是确定这些参数,即确定滤波器的 F, φ, B 和 λ . 在这些参数中,最重要的参数为 F 和 φ , 它们决定了滤波器带通区域中心在频域上的位置;其次为参数 B , 它反映了滤波器在空域和频域上的局部化程度,即 B 越小,则滤波器频域局部性越好,空域局部性越差;参数 λ 用于控制 Gabor 滤波器高斯“帽”的长径比,它影响滤波器的方向性,这里可使它等于 1.

3.1 正常纹理匹配 Gabor 滤波器

正常纹理匹配 Gabor 滤波器带通区域中心频率可以配置于正常纹理功率谱的某谐波点,因为对于规则正常纹理来说,其功率谱能量在其谐波处一般有较大集中,但是,由于滤波器边缘增强效应实际取决于正常纹理和缺陷在其带通区域内功率谱能量的差异程度,而与功率谱上某一点的具体值并没有直接的关系,因而该方法是一种比较粗略的方法. 本文将正常纹理功率谱区域能量着手,确定正常纹理匹配 Gabor 滤波器带通区域的中心频率.

这种方法最先被用于确定图象的“自然尺度”中^[5],它以人眼的视觉系统作为仿生对象,并且在设计中考虑了生物学家对人眼研究的一些最新结果,其中最主要的依据事实为:

(1) 人类视觉系统处理初级视觉信息的方式为:人眼首先将投影于视网膜上的外界图象经过一族滤波器(对应于人眼的简单视觉皮层细胞)进行滤波,然后将这些多通道成分进行综合,最终形成判决.

(2) 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象频域上某一定区域. 整个图象频域平面可被分割成许多这种小区域,每一区域均覆盖一定范围的极角和极径. 若将图象频域平面以极坐标形式表示,则这些区域可表示为 $[\theta_k, \theta_j] \times [\rho_k, \rho_i]$, 其中, θ_k 和 θ_j 为极角, ρ_k 和 ρ_i 为极径.

(3) 人眼对频域的分格是一种基于信号的自适应方法.

以上述事实为基础,并考虑频域的共轭对称性,根据经验首先将频域的上半平面(第 1 象限和第 2 象限)沿极角划分成 m 个等极角间隔的扇形区,用 $C_i, i=0, 1, \dots, m-1$ 表示;然后在每一扇形区内,再根据该扇形区内各频率成分的重要程度(对整个图象而言),将扇形区沿极径方向划分为若干个首尾相接的环形区域. 在同一环形区域内,各频率成分具有同等的重要性. 扇形区沿极径方向的这种划分是一种基于信号的自适应方法. 为了描述这种方法,假设极径和极角分别用 ρ 和 θ 表示,则扇形区 C_i 内,极径范围为 $(0, \rho_{sup})$, 其所表示区域的频谱能量 $\eta_{C_i}(\rho_{sup})$ 可表示为

$$\eta_{C_i}(\rho_{sup}) = \frac{\iint_{C_i} |R_{\sigma-1}(\rho, \theta)| d\rho d\theta}{\iint_{C_i} |R_{\sigma-1}(\rho, \theta)| d\rho d\theta} \quad (8)$$

其中, ρ_{sup} 为极径上限; $|R_{\sigma-1}|$ 表示经过 σ 值为 1 的 Gaussian 函数平滑过的输入图象的 Fourier 频谱; 重积分符号 \iint_{C_i} 表示在 C_i 扇形区内,沿极径从零到 ρ_{sup} 对 $|R_{\sigma-1}(\rho, \theta)|$ 的积分; 重积分符号 \iint_{C_i} 表示在整个 C_i 扇形区范围内对 $|R_{\sigma-1}(\rho, \theta)|$ 的积分. 很显然, $\eta_{C_i}(\rho_{sup})$ 为极径上限 ρ_{sup} 的单调递增函数. 当积分 \iint_{C_i} 的上界 ρ_{sup} 达到或离开上述所谓的环形区域时, η_{C_i} 的增长率(即 η_{C_i} 的一阶导数 η'_{C_i})会发生明显变化,而这种导数的变化正好对应于 η_{C_i} 的二阶导数 η''_{C_i} 的极值位置点. η''_{C_i} 的极值,不论是极大还是极小值,均对应于上述环形区域的边界点,且该一维离散序列二阶导数可通过近似的计算方法获得^[7]. 假设 η''_{C_i} 的极值点位置为

$$\rho_0 < \rho_1 < \rho_2 < \dots < \rho_n$$

那么,通过这些极值点位置,便可将 C_i 划分成一族扇形环,并用 Ch_j 表示 (Ch 即通道), 其对应的极径区域分别为 $(\rho_{j-1}, \rho_j), j=1, 2, \dots, n$.

通过上述方法完成了对频域信号的自适应分格. 在信号处理中,由于这种频域小格子对应于带通滤波器的带通区域,因而可作为正常纹理自适应 Gabor 滤波器的近似带通区域,而格子的中心点坐标也可作为它的中心频率. 另外,由于频域上的这种格子数量太多,同时考虑到正常纹理图象的功率谱

能量也只集中在少数几个格子内,因而必须对所有的候选格子进行筛选,即选出那些能量较为聚集的重要格子,然后再用这些格子的中心点坐标作为正常纹理匹配 Gabor 滤波器的中心频率。首先确定一种能反映格子功率谱能量的度量测度,然后根据该测度对格子进行筛选,可供选择的测度有格子功率谱熵、峰值等指标,本文仅简单地选择格子所占图象总功率谱能量百分比 $w(Ch_{i,j})$ 来作为度量测度,如下式所示

$$w(Ch_{i,j}) = \frac{\iint_{Ch_{i,j}} |R_{\sigma}(p, \theta)|^2 d\rho d\theta}{\iint_{\Omega} |R_{\sigma}(p, \theta)|^2 d\rho d\theta} \quad (9)$$

其中, $|R_{\sigma}(p, \theta)|^2$ 表示经过 σ 为 1 的 Gaussian 函数平滑过的输入图象的 Fourier 功率谱;重积分符号 $\iint_{Ch_{i,j}}$ 表示在格子 $Ch_{i,j}$ 区域内进行积分; \iint_{Ω} 表示在整个频域内积分。这样,频域上与所有格子对应的 $w(Ch_{i,j})$ 值即构成一个有限模式集,通过 K-聚类分析方法将该集合聚类成两类,其中一类即是与正常纹理匹配需要的格子,且图象功率谱能量在这些格子内有较大的聚集;另一类由于所含图象功率谱能量较弱而被舍弃。正常纹理匹配 Gabor 滤波器带通区域的中心频率即可根据这些格子的中心点确定。根据样本缺陷的检测试验效果,在以这些格子中心点坐标为带通区域中心频率的正常纹理匹配 Gabor 滤波器集合中,再进一步确定最佳的一个或几个 Gabor 滤波器,以用于实际缺陷检测。

3.2 缺陷匹配 Gabor 滤波器

正常纹理匹配 Gabor 滤波器的设计仅以正常纹理所提供的信息为基础,而对缺陷纹理信息则不予考虑。从理论上讲,若预先知道缺陷的先验知识,则同时考虑缺陷纹理信息和正常纹理信息后所设计出的缺陷匹配 Gabor 滤波器,比仅以正常纹理为依据所设计出的正常纹理匹配 Gabor 滤波器对该缺

陷的增强效果更好,针对某具体缺陷的缺陷匹配 Gabor 滤波器带通区域中心频率 (F, φ) 的确定方法如下:

- (1) 取正常纹理图象样本 t_1 和具体缺陷图象 t_2 ;
- (2) 计算两种图象样本的功率谱 $P_1(u, v)$ 和 $P_2(u, v)$;
- (3) 根据 $\{P_1(u, v) - P_2(u, v)\}$, 按照上节方法选择滤波器带通区域中心频率 (F, φ) 。

在确定了 Gabor 滤波器带通区域中心频率后,滤波器带通区域在频域上的位置便确定下来,而剩下的参数则用于控制带通区域的形状,另外,半峰频率带宽 B 可通过试验效果来确定。

4 实验结果和讨论

基于匹配 Gabor 滤波器的规则纹理缺陷自动检测方法实际上是一种典型的滤波/阈值化过程,其中, Gabor 滤波器主要完成缺陷边缘的增强。边缘增强是缺陷检测的关键,它不仅关系到缺陷能不能及时发现,而且也关系到缺陷的定位,甚至分类。正常纹理缺陷经过良好的边缘增强后,通过简单的阈值处理便可完成缺陷的边缘检测。

图 1 显示了匹配 Gabor 滤波器对规则纹理图象缺陷的边缘增强效果,其中,图 1(a) 显示了正常纹理匹配 Gabor 滤波器对缺陷的边缘增强效果,滤波器参数为: $F=0.1381$ 圈/pixel, $\varphi=28.7^\circ$, $B=0.8$, $\lambda=1$ 。图 1(b) 显示了缺陷匹配 Gabor 滤波器对缺陷的边缘增强效果,滤波器参数为: $F=0.2148$ 圈/pixel, $\varphi=67^\circ$, $B=1$, $\lambda=1$ 。从图 1 可以看出,正常纹理匹配 Gabor 滤波器和缺陷 Gabor 匹配滤波器均具有良好的缺陷边缘增强能力;两者的区别在于:前者突出正常纹理,抑制缺陷纹理;而后者则恰恰相反。

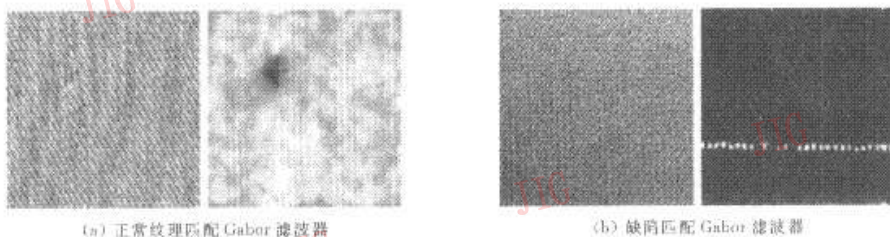


图 1 匹配 Gabor 滤波器对规则纹理缺陷的边缘增强效果

关于改变 Gabor 滤波器参数 B 对滤波器边缘增强效应的影响,通过实验发现,较大的 B 值能够使检测出的缺陷边缘与实际更接近,且更清晰.根据“测不准原理”, B 越大,则滤波器频域局部性越差,而时域局部性越好.时域局部性越好,则缺陷定位和形状反映越精确,但是过大的 B 值也会使滤波器频域局部性变差,且滤波后图象容易受到图象其他频率成分的干扰,因此在选择参数 B 时,应同时考虑滤波器在时域和频域上的局部性.

由此可见,正常纹理匹配 Gabor 滤波器和缺陷匹配 Gabor 滤波器均可应用于规则纹理缺陷的自动检测,同时纹理图象经其滤波后,缺陷边缘能够获得良好的增强,这为后续通过简单的阈值化提取缺陷提供了条件.一方面,由于 Gabor 滤波器的滤波算法可以借助快速 Fourier 变换来实现,因此算法具有较快的速度;另一方面,由于 Gabor 滤波器的设计能够保证其带通区域内正常纹理和异常纹理具有一定能量差,从而使得它具有良好的边缘检测效果.实验结果表明:对于规则纹理的缺陷检测来说,匹配 Gabor 滤波器的检测效果要明显优于基于离散正交小波变换的检测方法.

5 结束语

本文设计了两类匹配 Gabor 滤波器,并将它们应用于规则纹理缺陷的自动检测,均获得了良好的效果,同时与其他缺陷检测方法相比,这种基于匹配 Gabor 滤波器的检测方法,具有较好的检测精度和速度,它不仅能检测出具有规则纹理的产品表面有无缺陷,而且能够提供缺陷的具体位置信息和形状信息.

参考文献

- 1 Dewaele P, Gool L Van, Wambacq P *et al.* Texture inspection with self-adaptive convolution filters. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Pattern Recognition. Rome, 1998:56~60.
- 2 Warren J J, Garnier S J, Potlapalli H. Texture characterization and defect detection using adaptive wavelets. *Opt. Eng.* 1996, 35(11).
- 3 Jan A K, Farrokhnia F. Unsupervised texture segmentation using gabor filters. *Pattern Recognition*, 1991, 23(12):1167~1186.
- 4 Teuner A, Pieper O. Unsupervised texture segmentation of images using tuned matched gabor filters. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1995, 4(6):863~869.
- 5 Bovik C. Analysis of multichannel narrowband filters for image texture segmentation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39:2025~2043.
- 6 Valvia J F, Garcia J F. The selection of nature scales in 2D images using adaptive gabor filtering. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(5):458~469.
- 7 Mokhtarian F, Mackworth A. Scale based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 8(1):34~43.



黄玉南 1972年生,1994年获无锡轻工大学学士学位,1999年获东华大学工学博士学位.主要研究领域为图象处理与模式识别.现在香港理工大学从事合作研究.



华建兴 1961年生,副教授,1984年获浙江大学工学学士学位,1987年获浙江大学工学硕士学位,1997年获上海交通大学工学博士学位.主要研究方向为数字信号处理与数字控制理论与应用.现在农业银行上海市分行信息科技部工作.



黄秀宝 1935年生,教授,博士生导师.1963年获华东纺织工学院工学硕士学位,1979~1982年为英国里兹大学访问学者.主要研究方向为纺织表面纹理图象的计算机视觉分析.现在东华大学工作.