一种基于混合纹理特征的木板材表面缺陷检测方法

尹建新, 祁亨年, 冯海林, 杜晓晨

(浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要:利用计算机视觉技术检测木板材表面缺陷。提出了一种基于混合纹理特征的表面缺陷检测算法,能准确、鲁棒地检测出木板材表面图像中是否有缺陷。首先,分别使用灰度共生矩阵方法、Gabor 滤波方法和几何不变矩方法提取了10个优化后的图像纹理及尺度、平移、旋转不变特征;然后,对特征向量进行有效组合;最后,基于融合后的混合纹理特征向量,应用BP人工神经网络对样本集进行训练和检测。实验表明,该方法能准确地对木板材表面缺陷进行检测,平均检测成功率达96.2%。图 4表 1 参 12

关键词: 林业工程; 灰度共生矩阵; Gabor 滤波; 不变矩; 木板材; 缺陷检测

中图分类号: S781.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)06-0937-06

A method for wood surface defect detection based on mixed texture features

YIN Jian-xin, QI Heng-nian, FENG Hai-lin, DU Xiao-chen

(School of Information and Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: It is important to detect the wood surface defects using computer vision technology. In this paper, a defect detection method which can accurately and robustly determine whether there is defect on wood surface image or not is proposed based on mixed texture features. At first, gray level co-occurrence matrix (GLCM), Gabor filtering and invariant moment method are used to extract 10 image scale, translation, rotation invariant and texture features optimally. Then, feature vectors are mixed effectively. Finally, BP artificial neural network is used to train the sample sets and detection based on the mixed texture features. Experiments show that the proposed method can detect surface defects of wood boards accurately and the average success rate of detection is 96.2%. [Ch, 4 fig. 1 tab. 12 ref.]

Key words: forest engineering; gray level co-occurrence matrix (GLCM); gabor filter; invariant moment; wood image; defect detection

木材的节子、裂纹、腐朽等质量缺陷,这些缺陷会直接影响到木板材产品的使用价值和经济价值等。利用计算机视觉及图像处理技术快速、准确地检测木板材表面缺陷可以有效提高木板材综合利用率。木板材图像中木材本身的正常纹理和缺陷区域的纹理存在明显差异,因此,利用图像纹理特征来检测缺陷是目前的研究热点。于海鹏等[1]基于灰度共生矩阵对木材纹理特征进行提取,白雪冰等[2]也基于灰度共生矩阵对木材纹理进行了分类。另外,也有研究人员使用小波[3]、马尔可夫随机场[4]、分形[5]、局部二进制模式[6]、灰度直方图[7]对木材纹理特征提取研究作了一些有益的尝试。以上研究都只应用了一种纹理分析方法,由于木板材表面缺陷图像的多样性和复杂性,从应用效果来看,这种采用某一类特征的

收稿日期: 2011-07-01; 修回日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60970082, 60903144); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1080777, Y30 80457); 浙江农林大学预研项目(2008KF61, 2451005041)

作者简介: 尹建新,副教授,博士研究生,从事图像处理、模式识别研究。E-mail: yjx1018@zafu.edu.cn。通信作者: 杜晓晨,讲师,博士研究生,从事计算机视觉研究。E-mail: xiaochen_du@126.com

检测方法成功率尚不够理想。本研究提出了一种基于混合纹理特征的木板材表面缺陷检测方法。该方法优化组合了灰度共生矩阵法、Gabor 滤波法和不变矩法提取的图像特征,融合各种方法的优势,使算法的准确性和鲁棒性能得到有效保障。

1 灰度共生矩阵

Haralick 等^[8]根据图像中各像素之间的角度方位和距离关系构造了一个灰度共生矩阵。该矩阵按照图像灰度值的空间关系描述像素点对之间的空间结构特征及其相关性,表示相距(Δx , Δy)的 2 个灰度像素同时出现的联合分布概率。从纹理图像灰度为 i 的像素(位置为 x, y)出发,统计与其距离为 d, 灰度为 j 的像素(位置为 x+ Δx , y+ Δy)同时出现的频度 $P(i, j, d, \theta)$, θ 为灰度共生矩阵的生成方向,通常取0°,45°,90°,135°等 4 个方向。灰度共生矩阵的数学表达式可表示为:

$$P(i, j, d, \theta) = \{ [(x, y), (x + \Delta x, y + \Delta y)] | f(x, y) = i; f(x + \Delta x, y + \Delta y) = j \}_{\circ}$$
 (1)

Haralick 等从灰度共生矩阵中提取出了 11 个纹理特征参数: 角二阶矩、对比度、相关、方差、逆差矩、均值和、方差和、和熵、熵、差的方差、差熵。根据仿真实验。在这 11 个特征中,对比度、方差和、角二阶矩、均值和这 4 个特征最有代表性,可较好地表示木材纹理的强弱、纹理的周期、纹理的粗细均匀以及纹理图面的明暗^[2]。为了优化纹理特征,不让最终纹理特征向量的维数过高,本研究只选用这 4 个纹理特征。

角二阶矩:

$$\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} [p(i, j, d, \theta)]^{2}_{\circ}$$
 (2)

对比度:

$$\sum_{n=0}^{l-1} n^{2} \left[\sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} p(i, j, d, \theta) \right], \quad |i-j| = n_{\circ}$$
 (3)

均值和:

$$\sum_{k=2}^{2l} k \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} p(i, j, d, \theta)_{\circ}$$
 (4)

方差和:

$$\sum_{k=2}^{2l} (k-f_3)^2 \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} p(i, j, d, \theta)_{\circ}$$
 (5)

在灰度共生矩阵算法的应用过程中,步长 d 和生成方向 θ 是 2 个影响纹理特征质量好坏的重要参数。正常木板材表面图像在 4 个方向生成的灰度共生矩阵如图 1 所示。文献[2]验证了在木材图像的应用中,针对 512 × 512 的图像大小,d 适合取 4, θ 则适合取 0° 和 90° 。

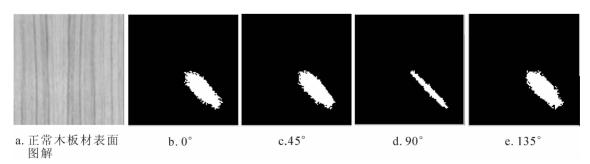


图 1 在 4 个方向生成的步长为 4 的灰度共生矩阵

Figure 1 Generated GLCM on four directions with d=4

2 Gabor 滤波

灰度共生矩阵是一种基于图像空域的纹理特征提取方法,而 Gabor 变换能够很好地同时在时域和频域中兼顾对信号的整体分析并刻画局部信息。这对于非稳定信号(如缺陷图像)能进行有效的检测,同样

也是一种经典的纹理特征提取方法^[9]。因此,本研究将灰度共生矩阵与 Gabor 滤波法相结合,以提高缺陷检测的成功率。

由于 Gabor 滤波可以看做是一种小波变换,因此,可以从小波变换的角度定义该滤波器组。设图像 f(x, y),它的二维小波变换为:

$$I_{m/pq} = \left[f(x, y)\varphi_{ml}(x - p\Delta x, y - q\Delta y) dxdy_{\circ} \right]$$
(6)

式(6)中: Δx 和 Δy 是空间采样间隔,通常设 $\Delta x = \Delta y = 1$ 。p 和 q 是图像像素点的位置。m 和 l 分别定义了小波变换的方向和尺度。即 m = 0 , … , M - 1 ; l = 0 , … , L - 1 。而 $\varphi_m(x, y)$ 由小波变换的母波得到:

$$\varphi_{nl}(x, y) = a^{-m}\varphi(x', y')_{\circ} \tag{7}$$

式(7)中: $x'=a^{-m}(x\cos\theta+y\sin\theta)$, $y'=a^{-m}(-x\cos\theta+y\sin\theta)$ 。母波 $\varphi(x,y)$ 通过 a^{-m} 尺度发生变化,方向 θ 变化的定义为:

$$\theta = l\Delta\theta$$
, $\Delta\theta = 2\pi/L_{\odot}$ (8)

这个定义使得所有的滤波器具有相同的能量。当把 Gabor 函数作为母波时, Gabor 滤波就可以看成小波变换,即:

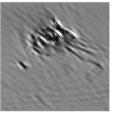
$$g(x, y) = (\frac{1}{2\pi\sigma_{x}\sigma_{x}})\exp\left[-\frac{1}{2}(\frac{x^{2}}{\sigma_{x}^{2}} + \frac{y^{2}}{\sigma_{x}^{2}}) + 2\pi jW_{x}\right]_{o}$$
(9)

式(8)中: W 定义了滤波器的带宽。由神经物理学的研究,W=0.5,即取数字最高频率的一半时,完全符合人类的视觉系[10]。图 2 显示了松软节缺陷表面图像在 W=0.5, θ =3 π /4 时的滤波结果。

3 几何不变矩

尺度、平移、旋转的不变性是衡量纹理特征性能的重要指标之一,同时在木板材表面缺陷检测应用中也有重要意义。因为同一种缺陷在图像中的大小不尽相同,缺陷在图像中位置也不一致,图像在获取时的水平角度可能不统一,所以本研究考虑采用几何不变矩方法再提取若干尺度、平移、旋转不变的特征,与灰度共生矩阵和 Gabor 法提取的纹理特征进一步结合,以增强算法的鲁棒性,减少算法在图像获取环节的局限性。





a.松软节缺陷表面 b.Gabor滤波结果

图 2 W=0.5, θ =3 π /4 时的 Gabor 滤波结果 Figure 2 Filtered result by Gabor with W=0.5 and θ =3 π /4

Hu^[11]首先提出了图像识别的不变矩理论,并通过对几何矩的非线性组合,导出了一组对于图像平移、旋转和尺度变化不变的矩。不变矩是图像的一种统计特征,利用图像灰度分布的各阶矩来描述图像灰度的分布特性。

对离散数字图像 f(x,y)的 p+q 阶矩定义为:

$$m_{pq} = \sum_{x} \sum_{y} x^{p} y^{q} f(x, y)_{\circ}$$
 (10)

其p+q 阶中心矩定义为:

$$\mu_{pq} = \sum_{x} \sum_{y} (x - \bar{x})^{p} (y - \bar{y})^{q} f(x, y)_{\circ}$$
(11)

式(10)(11)中: $\bar{x}=m_{10}/m_{00}$, $\bar{y}=m_{01}/m_{00}$ 表示图像的区域重心,中心矩表示图像内不同灰度级的像素相对于其重心是如何分布的,因此中心矩具有位置无关性。为了获得图像缩放无关的性质,可以对该中心距进行规格化操作:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{\text{om}}^{\gamma}} \, (12)$$

式(12)中, $\gamma=(p+q)/2+1$,p+q=2,3,…。该中心规格矩对于物体缩放、平移和旋转保持不变。Hu 在此基础上定义了7个不变矩。文献[12]进一步对该7个不变矩进行了推广,导出了4个不变矩,同时证明

了它们有更优的性能。

$$\phi_8 = 2 \left\{ \eta_{11} \left[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \right] - (\eta_{20} + \eta_{02}) (\eta_{30} + \eta_{12}) (\eta_{21} + \eta_{03}) \right\}; \tag{13}$$

$$\phi_{5} = [(\eta_{30} - \eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})](\eta_{20} + \eta_{02}) + 2\eta_{11}[(3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})];$$
(14)

$$\phi_{10} = (\eta_{04} - \eta_{40} - 6\eta_{22})^2 + 16(\eta_{31} - \eta_{13})^2; \tag{15}$$

$$\phi_{11} = (\eta_{04} - \eta_{40} - 6\eta_{22}) \left[(\eta_{20} - \eta_{02})^2 - 4\eta^2_{11} \right] + 16\eta_{11} (\eta_{31} - \eta_{13}) (\eta_{20} - \eta_{02})_{\circ}$$

$$(16)$$

4 基于混合纹理特征的缺陷检测

首先,在 0°和 90°这 2 个方向上生成灰度共生矩阵,分别计算这 2 个共生矩阵的角二阶矩、对比度、均值和方差和,以各参数的均值作为该方法提取的纹理特征值,分别记为 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 ; 然后,设带宽为 0.5,方向为 $3\pi/4$ 对原图像进行 Gabor 变换,在变换后的图像中提取均值和方差作为该方法提取的纹理特征值,分别记为 f_5 , f_6 ; 最后使用几何不变矩方法提取图像的 4 个不变矩 ϕ_8 , ϕ_9 , ϕ_{10} , ϕ_{11} 作为尺度、平移、旋转不变特征值,分别记为 f_7 , f_8 , f_9 , f_{10} .

在用 3 种方法得到各自的特征向量后,需要将得到的 3 组特征向量进行有效融合,映射到统一的空间。本研究使用高斯归一化方法,其特点是少量超大或超小的元素值对整个归一化后的元素值分布影响不大。假设向量 $F=[f_1,f_2,\cdots,f_{10}]$ 的分量值符合高斯分布,计算出其均值 m 和标准差 σ ,然后利用下式可将 F 归一化至 [-1,1] 区间:

$$f_{i}' = \frac{f_{i} - m}{\sigma} \, . \tag{17}$$

在得到最终的特征向量 $F'=[f_1',f_2',\dots,f_{10}']$ 后,建立正常木板材表面图像和木板材表面缺陷图像样本集,使用 3 层 BP 人工神经网络作为分类器对样本进行学习,训练得到木板材表面缺陷的检测模型,并最终应用于缺陷检测环节。整体算法示意图如图 3 所示。

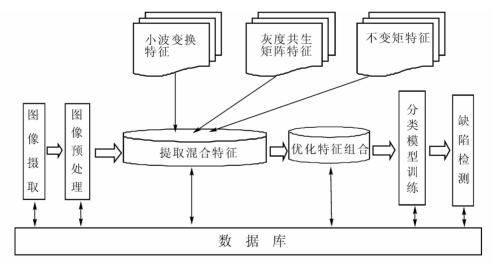


图 3 整体算法示意图

Figure 3 Schematic diagram of the overall algorithm

5 实验结果

选择 15 种缺陷,分别通过缩放、平移、旋转各得到 9 幅灰度级为 256,大小为 512 mm × 512 mm 的木板材表面缺陷图像,共 135 幅;再采集正常的木板材表面图像共 100 幅。图 4 中显示了部分实验图像样本。为了验证算法性能,每种缺陷图像随机选择 6 幅作为训练样本,3 幅作为测试样本;正常的木板材表面图像中随机选择 70 幅作为训练样本,30 幅作为测试样本。

在 Matlab 7.0 的环境下,分别使用灰度共生矩阵、Gabor 滤波、不变矩和本研究方法对 15 种常见的木材表面缺陷进行了检测,检测结果如表 1 所示。可以看到,单独使用灰度共生矩阵法或 Gabor 滤波法也能取得较好的检测结果,而不变矩法由于得到的不是纹理特征,所以单独使用在本应用中检测结果不理

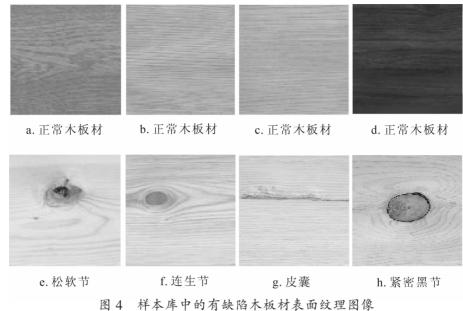


Figure 4 Defective wood surface texture images in sample library

想。将3种方法优化组合后,本研究方法的检测成功率进一步提升,平均检测成功率达到了96.2%。以连 生节缺陷为例,单独使用 Gabor 滤波法的情况下,仅分析了图像时域和频域中的局部信息,检测成功率 只能达到93.9%,结合灰度共生矩阵法后,有效补充了算法对图像空域中的纹理特征分析能力,再结合 不变矩法对图像缩放、平移、旋转等干扰的排除能力,最终检测成功率提高到了100%,这说明本研究方 法有效融合了各个方法的特性。综上所述,本研究提出的检测方法在准确性、鲁棒性方面的表现令人满意。

在算法实时性方面,由于本研 究的方法分为样本训练和检测2个 环节,而样本训练可看作程序初始 化阶段, 所以当分类模型建立后, 算法在实时性方面的表现主要依赖 于图像特征提取算法的执行效率。 因此, 本研究的方法的检测运行时 间为3种算法的图像特征提取运行 时间之和。通过实验, 在配置为双 核 Pentium(R), 主频 2.2 GHz, 内存 2 G 的电脑下, 本研究的方法的平均 检测运行时间仅为 1.56 s。若用传统 的灰度共生矩阵法分别在步长为2 和 4, 方向为 0°, 45°, 90°, 135°分 别提取全部 11 个纹理特征, 以各个 均值作为最终纹理特征向量的话, 平均运行时间为 1.83 s。该数据表 明:由于本研究的方法分别应用3 种算法提取图像纹理特征后, 在特征 选择环节进行了优化(如针对灰度共 生矩阵法, 只在步长为 4, 0°和 90° 这2个方向上生成灰度共生矩阵,

表 1 实验结果

Table 1 Laboratorial results

Table 1 Embratorial Testits				
木材缺陷种类	检测成功率/%			
	灰度共生矩阵	Gabor	不变矩	本研究方法
边缺	84.8	90.9	63.6	97.0
脱落节	87.9	93.9	69.7	100
活节	81.8	87.9	57.8	90.9
机械凿痕	84.8	87.9	66.7	93.9
尖节	90.9	97.0	66.7	100
紧密黑节	93.9	100	63.6	100
连生节	90.9	93.9	69.7	100
裂节	93.9	100	63.6	100
漏刨	78.8	81.8	60.6	84.8
皮囊	87.9	90.9	66.7	93.9
青变	75.8	84.8	60.6	90.9
树脂纹	90.9	93.9	63.6	100
撕裂纹	81.8	87.9	54.5	90.9
灼焦	87.9	90.9	63.6	100
松软节	90.9	93.9	60.6	100
平均检测成功率	86.9	91.7	63.4	96.2

并只提取了角二阶矩、对比度、均值、方差和 4 个特征。Gabor 法和不变矩法也是如此), 所以最终的纹 理特征向量仅有10个分量,这使得平均检测运行时间并没有明显增长,算法实时性得到了保证。同时也 保证了在样本训练阶段不会给分类器带来明显的额外开销。

6 结论

笔者提出了一种基于混合纹理特征的木板材表面缺陷检测方法。通过实验验证了将灰度共生矩阵方法、Gabor 滤波方法以及几何不变矩方法相结合用于木板材表面纹理缺陷检测的方法在准确性、鲁棒性方面比单一方法有所提升,平均检测成功率达到了96.2%。此外,该检测方法在各个特征选择环节进行了优化,从而保证了算法在实时性方面的表现。该方法能应用于木板材加工、制造行业,进一步的工作是检测缺陷的区域并识别缺陷的类型。

参考文献:

- [1] 于海鹏, 刘一星, 刘镇波. 基于图像纹理特征的木材树种识别[J]. 林业科学, 2007, **43** (4): 78 81. YU Haipeng, LIU Yixing, LIU Zhenbo. Wood species retrieval on base of image textural features [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (4): 78 81.
- [2] 白雪冰,王克奇,王辉.基于灰度共生矩阵的木材纹理分类方法的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37 (12):1667-1670.
 - BAI Xuebing, WANG Keqi, WANG Hui. Research on the classification of wood texture based on gray level co-occurrence matrix [J]. *J Harbin Inst Technol*, 2005, **37** (12); 1667 1670.
- [3] 于海鹏, 刘一星, 孙建平. 基于小波的木材纹理分频信息提取与分析[J]. 林业科学, 2005, **41** (2): 100 105. YU Haipeng, LIU Yixing, SUN Jianping. Separated frequency features extraction and analysis of wood texture based on wavelet [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (2): 100 105.
- [4] 王克奇,白雪冰. 基于高斯-马尔可夫随机场的木材表面纹理分类[J]. 林业科学,2006, **17** (1): 57 61. WANG Keqi, BAI Xuebing. Classification of wood surface texture based on Gauss-MRF model [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **17** (1): 57 61.
- [5] 任宁,于海鹏,刘一星,等.木材纹理的分形特征及计算[J]. 东北林业大学学报,2007,35(2):9-12. REN Ning, YU Haipeng, LIU Yixing, et al. Fractal character and calculation of wood texture [J]. J Northeast For Univ, 2007, 35(2):9-12.
- [6] 业宁,丁建文,王迪,等.基于 LBP 特征提取的木材纹理缺陷检测[J]. 计算机研究与发展,2007,44 (增刊): 383 387.
 - YE Ning, DING Jianwen, WANG Di, et al. Wood texture defect detection with LBP features [J]. J Comput Res Dev, 2007, 44 (supp): 383 387.
- [7] 尹建新,楼雄伟,黄美丽.灰度直方图在木材表面缺陷检测中的应用[J].浙江林学院学报,2008,25(3):272-276.
 - YIN Jianxin, LOU Xiongwei, HUANG Meili. Application of grey histogram to wood surface defects' detection [J]. *J Zhe-jiang For Coll*, 2008, **25** (3): 272 276.
- [8] HARALICK R M, DINSTEIN I, SHANMUGAH K. Textural features for image classification [J]. *IEEE Trans Sys*, *Man Cybern*, 1973, 3 (6): 610 621.
- [9] MANJUNATH B S, MA W Y. Texture features for browsing and retrieval of image data [J]. *IEEE Trans PAMI*, 1996, **18** (8): 837 842.
- [10] 王文惠,周良柱,万建伟. 基于内容的图象检索技术的研究和发展[J]. 计算机工程与应用,2001 (5): 54 56. WANG Wenhui, ZHOU Liangzhu, WAN Jianwei. Research and development of the content-based image retrieval technology [J]. Comput Eng & Appl, 2001 (5): 54 56.
- [11] HU Mingkuei. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IRE Trans Inf Theory, 1962, 8 (2): 179-187.
- [12] 刘进,张天序. 图像不变矩的推广[J]. 计算机学报, 2004, **27** (5): 668 674. LIU Jin, ZHANG Tianxu. The generalization of moment invariants [J]. *Chin J Comput*, 2004, **27** (5): 668 – 674.