

# 图像处理技术在竹木复合材料性能评估中的应用展望

孙建平,梁 懿,蒋志林,柳婧如

(广西大学 资源环境与材料学院,广西 南宁 530004)

**摘 要:**从灰度共生矩阵、马尔可夫随机场、傅里叶变换、Gabor 变换、小波变换、Contourlet 变换方面回顾了图像处理技术在木质材料研究中的研究现状。结合目前企业采用传统的检测方法对竹木复合材料进行力学性能检测,既耗时长还会破坏材料增加成本现状,指出竹木复合材料性能检测的必要性以及图像处理技术的优势,提出将图像处理技术运用在竹木复合材料的无损检测上的研究思路。

**关键词:**竹木复合材料;图像处理技术;性能检测

**中图分类号:**S795      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)02-0246-04

## Application and Prospect of Performance Evaluation for Bamboo-wood Composite Materials Based on Image Processing Technology

SUN Jian-ping, LIANG Yi, JIANG Zhi-lin, LIU Jing-ru

(School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** From the aspects of gray level co-occurrence matrix, Fourier transform, Gabor transform, wavelet transform, contourlet transform, current researches and development of image processing technology used in the study of wood materials were reviewed. Nowadays, enterprises often use destructive testing technology to detect the mechanical properties of bamboo-wood composite materials and this way not only is time consuming but also would destroy the material to increase costs. The necessity of bamboo-wood composite material performance testing and the advantage of image processing technology were put forward. Finally, the paper advanced a new research thinking that image processing technology could be applied to nondestructive testing for bamboo-wood composite materials.

**Key words:** bamboo-wood composite material; image processing technology; performance test

### 1 竹木复合材料

竹木复合材料<sup>[1]</sup>是指竹材与木材以相同或不同的结构单元形式进行组合及胶接而成的复合板材或方材。木材是人类不可或缺的材料,而竹材和木材一样都是天然生长的一种可再生资源,它具有强度大、韧性好、耐磨、分布广、生长周期短、材性良好等特点。将竹材和木材结合制备的竹木复合材料能够合理地发挥两种材料各自的特性,甚至在很多方面

优于原材料,具有很大的发展潜力。竹木复合材料具有复合效应,可充分发挥 2 种材料各自的优势,且复合材料的物理力学性能优良,主要作为结构材应用于实践中。竹木复合材料作为结构材,对其物理力学性能要求很高,为了竹木复合材料的使用更加科学合理,必须对材料的使用性能和质量进行检测,尤其是在物理力学性能方面。无损检测技术因其实用、快捷、准确等特点被广泛的应用于木制品以及人造板的性能检测,特别是由于不破坏材料的特点,无

收稿日期:2018-05-01 修回日期:2018-06-17

基金项目:生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学)开放基金(SWZCL2016-05);国家自然科学基金(31660174);广西科技重大专项(桂科 AA17204087-16)。

作者简介:孙建平,男,博士,教授,研究方向:生物质复合材料。E-mail:sjp\_jpcn@163.com

损检测技术也逐渐应用于竹木复合材料的性能检测与控制。例如高燕秋<sup>[2]</sup>等以竹木复合集装箱底板为对象进行在线无损检测,研究采用 PLC(可编程控制器)与工控机相结合的方法对竹木复合集装箱底板进行接触式弹性模量无损检测;孙丰文<sup>[3]</sup>研究竹木复合集装箱底板在弯曲载荷下的破坏模式,并提出了底面拉伸破坏和芯层剪切破坏这 2 种破坏形式下的底板静曲强度理论预测模型,还通过统计回归模拟方法建立静曲强度和弹性模量的相关模型。对竹木复合材料的检测主要集中在材料的弹性模量,把图像处理技术用于竹木复合材料性能检测的研究较少。

## 2 图像处理技术

图像处理技术是指利用计算机技术实现模拟图像信号向数字信号的转变,通过计算机对数字图像进行压缩、平滑、移和旋转等操作,有针对性的对图像进行分析<sup>[4]</sup>。在图像处理与分析的过程中始终保持图像的再现,且处理精度高可以满足大多数应用需求;另外还具有其适用面宽、灵活性高的特点,凡是可以数学公式或逻辑关系来表达的一切运算均可用数字图像处理实现。在图像处理技术中,图像特征提取是一个最基础、最重要的步骤,国内外的学者利用灰度共生矩阵、马尔可夫随机场、傅里叶变换、Gabor 变换、小波变换、Contourlet 变换等方法研究木质材料的缺陷识别与检测,以及木材种类识别等。

### 2.1 灰度共生矩阵

灰度共生矩阵是指图像在统计空间上具有某种位置关系的一对像素灰度对出现的频度,是一种纹理二阶统计分析方法。一些学者<sup>[5-6]</sup>通过构造相关性矩阵分析灰度共生矩阵特征参数间相关性,筛选出相关性大的特征参数组成最佳特征参数组合。还有一些学者采用其他方法选取特征参数,如戴维和戴丹<sup>[7]</sup>在改进的模拟退火算法的基础上采用最近邻分类器的识别率作为评价指标,通过 FS-ISA 算法选取特征参数组合;白雪冰<sup>[8]</sup>等采用角二阶矩、对比度、相关、熵、方差、逆差矩等特征参数描述木材纹理,并用竞争神经网络对木材纹理进行聚类识别。除了木材识别之外,灰度共生矩阵还使用于木材缺陷识别,而选取的特征参数也有所差异,如吴东洋<sup>[9]</sup>等选取灰度共生矩阵的角二阶矩、惯性矩、均值和、聚类阴影、方差和 5 个特征参数实现数据降维,对产生的特征数据集分别利用 k-means 算法及 AP 算法进行聚类和分析从而进行木材表面缺陷自动识别。日本学者 K. Kobayashi<sup>[10]</sup>等选取 13 个由 Haralick

等人提出的参数和 2 个由 F. Albregtsen<sup>[11]</sup>提取的参数来识别日本传统雕塑木材。目前的研究主要集中在利用灰度共生矩阵不同参数组合进行木材纹理、木材种类和木材表面缺陷的识别。

### 2.2 马尔可夫随机场

马尔可夫随机场模型是建立在 MRF 模型和 Bayes 估计基础上,可以通过适当定义的邻域系统引入结构信息,是提供一种用来表达空间上相关随机变量之间相互作用的模型,由此得到的参数可以用来描述图像纹理不同方向、不同形式的集聚特征,常用的 2 个模型为吉布斯和高斯马尔可夫随机场模型(GMRF)。王克奇<sup>[12]</sup>和石岭<sup>[13]</sup>等建立了吉布斯-马尔可夫随机场模型,研究这一模型的参数估计过程,并求出木材表面纹理样本的特征估计参数,从而描述不同树种的纹理。王再尚<sup>[14]</sup>采用高斯-马尔可夫随机场模型提取木材表面缺陷图像的纹理参数,结合 BP 神经网络识别了死节、活节和虫眼这 3 种木材表面缺陷类型。王克奇<sup>[15]</sup>等针对 4 种木材表面纹理特征构建了高斯-马尔可夫随机场模型,研究这一模型的参数估计过程,通过提取的参数描述红松、柞木、水曲柳和落叶松 4 种木材的纹理从而进行木材识别。研究主要集中在利用马尔可夫随机场提取图像特征值,对木材表面缺陷及树种进行检测。

### 2.3 傅里叶变换

傅里叶变换(FT)是把图像从空间域变换到频域的方法,通过 FT 把信号通过频谱的方式进行准确定量的描述,主要参数包括幅值谱、相位谱和功率谱,其中功率谱最常被使用于对纹理特征的提取。许多学者通过傅里叶变换获得功率频谱图从而对木材图像进行特征提取、分类与识别等,比如方益明<sup>[16]</sup>等通过傅里叶变换得到木材显微图像的傅里叶变换功率谱图,然后进行独立成分分解得到功率谱图的独立基,所提取的特征就是木材显微图像的功率谱图在独立基上的投影系数,最后利用支持向量机对待识别图像在独立基上的投影系数进行分类从而实现木材识别;王金满<sup>[17]</sup>等用快速傅立叶变换(FFT)图像处理得到图像在时域空间的功率谱图,将木材横切面细胞排列规律性和周期性的特征量化提取出来进行定量地比较、识别和分类等;多化琼<sup>[18-20]</sup>等利用傅里叶变换获得其能量光谱图,测量出阔叶材纤维细胞尺寸、阔叶材横切面纤维细胞排列和阔叶材闽楠木材纤维细胞尺寸。这些研究主要利用快速傅立叶变换分析图像频谱特征,从而实现木材识别。

### 2.4 Gabor 变换

Gabor 变换克服了傅里叶变换的局限性,不仅

可以有效地提取纹理特征,还能降低纹理特征的信息冗余度。有学者通过 Gabor 变换获得图像的频率特征向量来描述图像,进而达到识别效果,例如杨旭<sup>[21]</sup>提出了一种新的具有较好识别精度的 Gabor 结合主成分分析(PCA)研究木材纹理特征提取方法;孙洪飞<sup>[22]</sup>利用 Gabor 变换图像,使用循环特征移动方法移动 Gabor 纹理特征矢量,然后利用欧式距离度量转换移动前后纹理特征向量的差别,从而提取图像纹理特征;王林<sup>[23]</sup>介绍了针对木材表面纹理分析的 Gabor 滤波器核函数选择和参数设置的方法,并使用该滤波器对木材表面缺陷图像进行变换,获得图像各像素点的 Gabor 频率特征向量。目前的研究主要利用 Gabor 变换研究木材表面缺陷。

2.5 小波变换

小波变换也是在傅里叶变换的基础上发展而来,它克服了傅里叶变换不具有局部分析能力的缺陷。一些学者<sup>[24-25]</sup>采用 symlets4 小波基对木材样本图像进行二级分解,提取了一级分解的水平细节 HL1、垂直细节 LH1、对角细节 HH1、二级分解的近似 LL2、水平细节 HL2、垂直 LH2 和对角细节 HH2 子图像的小波系数,子图小波系数的均值和标准差以及整幅图像的熵作为特征参数对木材纹理进行分析。还有一些学者选用二进正交小波对木材纹理图像进行多层分解得到特征向量,并利用这些特征向量研究图像水平、垂直和对角方向上的纹理频率分布特点;例如于海鹏<sup>[26]</sup>等利用小波变换比较针叶材与阔叶材、木材径向与弦向纹理的统计差异,杨福刚<sup>[27]</sup>等则结合 SVM 分类器对木材纹理进行识别。另外,有些研究者<sup>[28-30]</sup>通过整数小波变换对木材纹理进行分解,利用特征参数分析木材纹理频率分布特征,比较了针叶材与阔叶材、径向与弦向切面的木材纹理的差异,发现小波小波能量值、能量分布比例和 EHL/ELH 值可作为木材纹理方向性参数,如整数 5/3 小波变换和整数 9/7 小波变换等。小波变换还可以结合其他方法对木材进行图像处理,例如:孙建平<sup>[31]</sup>等把小波和人工神经网络相结合用于木质材料的无损检测研究;王克奇<sup>[32]</sup>等用 symlets4 小波基对木材图像进行了 2 级分解,提取图像的 23 个特征参数构成多尺度参数体系,再通过多层前馈神经网络(back propagation, BP)神经网络进行纹理分类验证;多化像<sup>[33]</sup>等提出了基于 SCN-MSE 的木材图像超分辨率重建方法,结合小波变换和 SVM 多项式核函数的方法对樟子松及其树皮进行识别,提高了识别率。研究主要集中在利用小波提取特征参数对木材纹理和树皮进行识别,对木质材料性能进行无损检测。

2.6 Contourlet 变换

Contourlet 变换是 2002 年 M. N. Do<sup>[34]</sup>提出的一种可以很好地体现图像几何结构的“真正”二维图像表示方法。它是在小波变换的基础上发展而来,不但保持了小波变换的多尺度和时频局部特性,还具有多方向性的特点,并且能够很好地表示图像的各向异性特征,更好地捕捉图像边缘及纹理特征。通过 Contourlet 变换获得图像的子带系数,计算这些系数的参数来表达图像的信息从而形成图像的纹理特征描述。比如,任洪娥<sup>[35]</sup>等提出了一种基于木材显微细胞图像的宏观识别方法,该方法首先对图像进行非下采样 Contourlet 变换得到各子带系数,然后提取模极值作为图像纹理特征向量实现木材显微细胞图像的分类,并通过该方法成功识别了白桦、柏木、长白落叶松、大青杨和红皮云杉 5 个树种。李超<sup>[36]</sup>等通过对纹理图像进行 Contourlet 变换 3 层分解,得到 1 个低频子带、6 个中频子带和 8 个高频子带,分别计算低频和中频系数矩阵的均值和方差,并与高频系数矩阵的能量组成 22 个特征表达纹理信息,以此达到纹理识别的目的。目前的研究利用 Contourlet 变换得到各子带系数对木材显微细胞图像和木材纹理进行识别。

3 研究展望

从目前的研究来看,图像处理技术在木材科学研究领域的应用主要集中在利用灰度共生矩阵、马尔可夫随机场、傅里叶变换、Gabor 变换、小波变换、Contourlet 变换等特征提取方法对木质材料进行特征提取,研究木质材料的缺陷、物理力学性能检测、木材识别等。竹木复合材料端面图像包含大量的材料结构信息,如竹材层的位置、层数、比例等,以及木材单板的位置、厚度、树种等,这些信息决定了竹木复合材料的物理力学性能。由于图像处理技术已经在木质材料领域得到广泛的应用,也必将在竹木复合材料的研究中得到广泛应用。

3.1 基于图像处理技术的竹木复合材料端面图像特征提取

利用计算机图像处理技术,通过灰度共生矩阵、马尔可夫随机场、傅里叶变换、小波变换、Gabor 变换、Contourlet 变换等方法对竹木复合材料端面图像特征向量进行有效的提取;例如,可以研究每一种算法或者几种方式相结合提取竹木复合材料断面的特征参数。

可以利用图像分割与边缘提取等图像处理方法计算材料如竹材、木材所占的面积以及位置参数,研究不同材料所占的比例与材料性能之间的关系。

### 3.2 竹木复合材料结构优化设计与力学性能无损评价

通过计算机图像处理技术探索竹木复合材料端面特征参数与其顺纹和横纹的抗拉强度、弹性模量、静曲强度、抗冲击性等物理力学性能之间的内在关系,寻找这些纹理特征参数和物理力学性能的联系和规律。

利用计算机图像处理技术结合多元回归分析、人工智能技术,构建竹木复合材料端面特征参数与材料物理力学性能之间的智能模型,探索材料图像特征参数与性能之间的本构关系,实现材料结构和物理力学性能的优化设计。同时可以预测竹木复合材料的力学性能性能,实现竹木复合材料质量的在线控制与无损评价。

#### 参考文献:

[1] 江泽慧,王戈,费本华,等. 竹木复合材料的研究及发展[J]. 林业科学研究,2002,15(6):712-718.

[2] 高燕秋,王兆伍,孙丰文. 竹木复合集装箱底板弹性模量的无损检测[J]. 南京林业大学学报,2001,25(6):69-72.

GAO Y J, WANG Z W, SUN F W. Nondistructive testing for MOE of the bamboo wood composite container floorings [J]. Journal of Nanjing Forestry University,2001,25(6):69-72. (in Chinese)

[3] 孙丰文. 竹木复合集装箱底板静曲强度的预测模型[J]. 南京林业大学学报,2006,30(5):10-14.

SUN F W. Predicting models of MOR for bamboo wood composite container flooring [J]. Journal of Nanjing Forestry University,2006,30(5):10-14. (in Chinese)

[4] 李健,焦志勇. 计算机图像处理技术在现实生活中的应用[J]. 电子技术与软件工程,2018(1):152.

[5] 于海鹏,刘一星,张斌,等. 应用空间灰度共生矩阵定量分析木材表面纹理特征[J]. 林业科学,2004,40(6):121-129.

YU H P, LIU Y X, ZHANG B, *et al.* Application of spatial gray level cooccurrence matrix in wood surface texture quantitative analysis [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(6): 121-129. (in Chinese)

[6] 高程程,惠晓威. 基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J]. 计算机系统应用,2005,19(6):195-198.

[7] 戴维,戴丹. 基于改进模拟退火算法的木材类型识别方法[J]. 湖南文理学院学报:自然科学版,2017,29(4):27-30.

DAI W, DAI D. Feature selection method based on improved simulated annealing algorithm[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science: Natural Science Edition, 2017, 29(4): 27-30. (in Chinese)

[8] 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 X B, WANG K Q, WANG H. Research on the classification of wood texture based on gray level cooccurrence matrix [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1667-1670. (in Chinese)

[9] 吴东洋,业宁,苏小青. 基于灰度共生矩阵和聚类方法的木材缺陷

识别[J]. 计算机与数字工程,2010,38(11):38-41.

[10] KOBAYASHI K, AKADA M, TORIGOE T, *et al.* Automated recognition of wood used in traditional Japanese sculptures by texture analysis of their low-resolution computed tomography data[J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(6): 630-640.

[11] ALBREGTSEN F. Statistical texture measures computed from gray level cooccurrence matrices [J]. Image, 2008: 1-14.

[12] 王克奇,石岭,白雪冰,等. 基于吉布斯-马尔可夫随机场的板材表面纹理分析[J]. 东北林业大学学报,2006,34(4):8-9.

WANG K Q, SHI L, BAI X B, *et al.* Analysis of wood surface texture based on Gibbs-MRF [J]. Journal of Northeast of Forestry University, 2006, 34(4): 8-9. (in Chinese)

[13] 石岭. 基于马尔可夫随机场的木材表面纹理分类方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2006.

[14] 王再尚. 基于 Markov 随机场的木材表面缺陷模式识别方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.

[15] 王克奇,石岭,白雪冰,等. 基于高斯-马尔可夫随机场的板材表面纹理分析[J]. 林业科技,2005,30(6):46-48.

[16] 方益明,郑红平,冯海林. 基于傅里叶变换和独立成分分析的木材显微图像特征提取与识别[J]. 浙江林学院学报,2010,27(6):826-830.

[17] 王金满,曲艳杰,李坚. 傅立叶变换图像处理方法在木材解剖特征研究上的应用[J]. 四川农业大学学报,1998,16(1):176-180.

WANG J M, QU Y J, LI J. Analysis of wood anatomy characteristics by fast fourier transfer image analysis [J]. Journal of Sichuan Agriculture University, 1998, 16(1): 176-180. (in Chinese)

[18] 多化琼,王喜明. 利用傅里叶变换研究阔叶材纤维细胞尺寸[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(9):2379-2382.

[19] 多化琼,王喜明. 利用傅立叶变换研究阔叶材纤维细胞排列[J]. 西北林学院学报,2009,24(2):121-123.

DUO H Q, WANG X M. Analysis of cell arrangements in hardwood by fourier transform [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2): 121-123. (in Chinese)

[20] 多化琼,王喜明,王悦东. 利用傅立叶变换研究阔叶材纤维细胞尺寸[J]. 西北林学院学报,2009,24(3):159-162.

[21] 杨旭. 木材加工自动化中的板材缺陷检测技术研究[D]. 南京:南京林业大学,2016.

[22] 孙洪飞. 基于小波变换的图像特征提取方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.

[23] 王林. 基于 Gabor 变换的木材表面缺陷识别方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010.

[24] 马琳. 基于特征融合的木材纹理分类研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.

[25] 张怡卓,马琳,王铁滨,等. 小波变换的木材纹理在线分选[J]. 林业科技,2012,37(6):21-24.

[26] 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 H P, LIU Y X, SUN J P. Separated frequency features extraction and analysis of wood texture based on wavelet [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 100-105. (in Chinese)

[27] 杨福刚,孙同景,庞清乐,等. 基于 SVM 和小波的木材纹理分类算法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):2250-2252.

[28] 王亚超. 基于小波变换的木材图像处理技术研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[D]. 西安:长安大学,2016.

[14] 李杨,王军. 西咸新区发展报告(2011-2015)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2016:7-8.

[15] 郑新奇,付梅臣等. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010:35-36.

[16] 李卫锋,王仰麟,彭建,等. 深圳市景观格局演变及其驱动因素分析[J]. 应用生态学报,2004,15(8):1403-1410.  
LI W F,WANG Y L,PENG J,*et al.* Landscape spatial changes in Shenzhen and their driving factors[J]. Chin. J. Appl. Ecol. ,2004,15(8):1403- 1410. (in Chinese)

[17] 胡金龙,罗楠,周志翔,等. 漓江流域 1973-2013 年景观格局动态变化研究[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):217-223.  
HU J L,LUO N,ZHOU Z X,*et al.* Dynamic changes of landscape pattern in Lijiang river basin from 1973 to 2013[J]. Journal of Northwest Forestry University ,2017,32(4):217-223. (in Chinese)

[18] 胡珊珊,陈增文,陈文慧,等. 闽三角地区土地覆盖变化遥感监测及景观格局变化研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2018,34(1):27-37.  
HU S S,CHEN Z W,CHEN W H,*et al.* The Study on land cover change remote sensing monitoring and landscape pattern change in Fujian delta region[J]. Journal of Fujian Normal University; Natural Science Edition, 2018, 34 (1) : 27-37. (in Chinese)

[19] 胡绵好,袁菊红,蔡静远,等. 河流城市土地利用景观格局变化及其生态风险分析——以江西省德兴市为例[J]. 生态科学,2018,37(1):78-86.  
HU M H,YUAN J H,CAI J Y,*et al.* Landscape pattern changes of land-use and its ecological risks analysis of river urban;a case analysis of Dexing in Jiangxi Province [J]. Ecological Science,2018,37(1):78-86. (in Chinese)

[20] 刘鸽引. 基于土地利用的陕西省生态风险分析[J]. 水土保持通报,2011,31(3):180-189.

[21] 吴雪姣,江舒楠,白新祥. 森林城市总体规划中的“多方融合”策略——以赤水市省级森林城市建设规划为例[J]. 森林工程,2017,33(4):8-14.  
WU X J,JIANG S N,BAI X X. “Fusion”Strategy in the Planning of forest urban construction;analysis the provincial forest urban construction planning of Chishui city[J]. Forest Engineering,2017,33(4):8-14. (in Chinese)

[22] 夏南凯,乔玮,刘晟. 基于土地利用视角的区域生态风险指数评价方法分析[J]. 城市规划学刊,2011(1):53-57.  
XIA N K,QIAO W,LIU S. A land-use based analysis of regional ecological risk index assessment method [J]. Urban Planning Forum,2011(1):53-57. (in Chinese)

(上接第 249 页)

[29] 高峰,多化琼,王亚超. 基于 5 /3 小波变换的木材纹理频域特征研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2013,34(3):155-158.  
GANG F,DUO H Q,WANG Y C. Wood texture frequency-domain characterization research based on integer 5/3 wavelet [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University,2013, 34(3):155-158. (in Chinese)

[30] 王亚超,薛河儒,多化琼. 基于 9 /7 小波变换的木材纹理频域特征研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):225-228.  
WANG Y C,XUE H R,DUO H Q. Frequency feature extraction and analysis of wood texture based on the 9/7 wavelet transforms [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(1):225-228. (in Chinese)

[31] 孙建平,王逢翔,于海鹏. 小波分析与人工神经网络在木质材料无损检测中的应用[J]. 木材工业,2004,18(5):24-33.

[32] 王克奇,白雪冰,王辉. 基于小波变换的木材表面纹理分类[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(9):232-234.  
WANG K Q,BAI X B,WANG H. Classification of wood surface texture based on wavelets transform [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41 (9) : 232-234. (in Chinese)

[33] 多化豫,孙泉雄,袁云梅. 基于图像处理提高木材识别准确性的新方法[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):244-247.  
DUO H Y,SUN X X,YUAN Y M. Improvement of wood identification accuracy based on image processing [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1) : 244-247. (in Chinese)

[34] DO M N,VETTERLI M. The contourlet transform;an efficientdirectional multiresolution image representation [J]. IEEE Transaction Image on Processing ,2005,14(12):2091-2106.

[35] 任洪娥,王海丰,赵鹏. 新的木材显微细胞图像分类识别方法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(28):246-248.

[36] 李超,吕宪伟,涂文俊,等. 基于计算机视觉的实木表面智能化分选系统设计[J]. 北京林业大学学报,2016,38(3):102-109.  
LI C,LU X W,TU W J,*et al.* Design of an intelligent wood surface grading system based on computer vision [J]. Journal of Beijing Forestry University,2016,38(3):102-109. (in Chinese)