

高光谱成像技术及其在木材无损检测中的研究进展

周竹^{1,2,3}, 方益明^{1,2,3}, 尹建新^{1,2,3}, 周素茵^{1,2,3}, 雒瑞森^{1,2,3}, 郑剑⁴

(1. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江 临安 311300; 3. 浙江农林大学 智慧农林业研究中心, 浙江 临安 311300; 4. 浙江农林大学 农业与食品科学学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 开展木材无损检测是提高木材利用率, 优化木材资源的重要手段。高光谱成像技术作为一种先进的无损检测技术, 能同时获取待测物的光谱与图像信息, 具有图谱合一的优点。介绍了高光谱成像技术的原理、装置以及数据处理方法, 并首次详细介绍了该技术在木材及木制品的缺陷识别、重要物理力学性质检测以及化学性质预测等方面的研究进展。通过综合分析已有的研究, 表明高光谱成像技术在木材及木制品品质无损检测中具有良好的应用前景。图4参51

关键词: 木材科学与技术; 高光谱成像技术; 木材; 物理力学性质; 化学性质; 缺陷; 无损检测; 综述

中图分类号: S781; O657.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)03-0458-09

Review of nondestructive detection of wood and wood products based on hyperspectral imaging technology

ZHOU Zhu^{1,2,3}, FANG Yiming^{1,2,3}, YIN Jianxin^{1,2,3}, ZHOU Suyin^{1,2,3}, LUO Ruisen^{1,2,3}, ZHENG Jian⁴

(1. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Research Center for Smart Agriculture and Forestry, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 4. School of Agriculture and Food Science, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Wood nondestructive detection is an important technology to increase wood utilization rate and optimize forest resources. As an advanced nondestructive detection technology, hyperspectral imaging (HSI) integrates conventional imaging and spectroscopy to attain both spatial and spectral information from an object. It has the advantages of non-destructively detecting both physical, morphological characteristics, and chemical information of the object in many fields. This paper introduced the hyperspectral imaging technology, including its principles, equipment, image acquisition, processing methods and etc. Furthermore, recent advances in the application of HSI to wood and wood products quality assessment such as defect identification, physical-mechanical properties detection and constituent analysis were reviewed comprehensively for the first time. The review indicated that HSI had good application prospects in the nondestructive detection of wood and wood products. [Ch, 4 fig. 51 ref.]

Key words: wood science and technology; hyperspectral imaging technology; wood; physical-mechanical property; chemical property; defect; nondestructive detection; review

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61302185); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ13F050006, Y3110450); 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室资助项目(2013ZHNL03); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2012FR085)

作者简介: 周竹, 博士, 从事木材智能化检测技术等研究。E-mail: zhouzhu@zafu.edu.cn

采用无损检测技术快速有效地预测木材各种物理力学性能、化学性质、解剖学性质以及各种缺陷等，对于充分合理利用木材，高效优质加工木材、挖掘木材的潜在利用价值以及加速木工企业自动化发展等方面具有重要的理论指导与实践意义。机器视觉技术和光谱技术具有无损、快速、准确等优点，是目前木材品质无损检测中的 2 种重要技术。其中，机器视觉技术提取木材及其制品的表面信息进行分析，可用于木材表面缺陷等的检测^[1-3]。该技术获取的主要是灰色或 RGB(红绿蓝)图像，反映木材表面缺陷信息有限，识别准确率有待进一步提高。与机器视觉技术不同，光谱技术尤其是近红外光谱技术，非常适合木材及其制品的物理力学性质^[4-7]、化学性质^[8-9]以及解剖学性质^[10-11]等的预测。该技术只采集被测对象一个点域的信息，缺少被测对象的空间信息，这一局限性可能会影响模型的稳定性和适应性^[12]。高光谱成像技术起源于遥感测量领域，它将二维成像和光谱技术有机融为一体，可以同时获取研究对象的空间及光谱信息。由于图像数据能反映被测物外部特征、表面缺陷等，而光谱数据可对其物理结构及化学性质进行分析，因此，高光谱成像技术是图像技术与光谱技术的完美结合^[12]。目前，涉及该技术在木材及其制品品质检测的研究尚在起步阶段，这是一个有着巨大潜力的研究领域。本文介绍了高光谱成像技术的原理、装置以及数据处理方法，并介绍该技术在木材及木制品的各种缺陷检测、物理力学性质以及化学性质预测等方面的研究进展。

1 高光谱成像原理与装置

高光谱成像是指在电磁波谱的光谱波段获取较高光谱分辨率(0.6~3.0 nm)的图像信息的过程，其理论基础是利用电磁波谱对被测物特性进行分析并以成像的方式对被测物的光谱特性进行研究^[13]。所得数据是在特定波长范围内由一系列连续的窄波段图像组成的三维图像。现有高光谱成像系统的成像光谱范围包括 400~1 000 nm, 900~1 700 nm 和 1 000~2 500 nm 等 3 个标准光谱波段。

高光谱图像的采集方式包括逐点扫描式、线推扫式以及面帧式^[14]。目前，应用最多的是线推扫式。一个典型的线推扫式高光谱成像系统如图 1 所示，由电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)探测器、成像光谱仪、镜头、光源及其控制器、可调载物台、步进电机、运动控制系统和图像采集系统等组成。其中，成像光谱仪以光栅型为主，是高光谱成像系统的核心部件，其内部有一个棱镜-光栅-棱镜(prism-grating-prism, PGP)单元，如图 2 所示。在推扫过程中，该单元能将待测物一个窄带空间内的有效入射光散射成不同波长，色散后的光信号成像到 CCD 探测器上。其中的一个方向提供空间信息，另一个方向提供光谱信息，这样就得到了此窄带空间位置上多个像元点的光谱图像。对推扫过程中多个窄

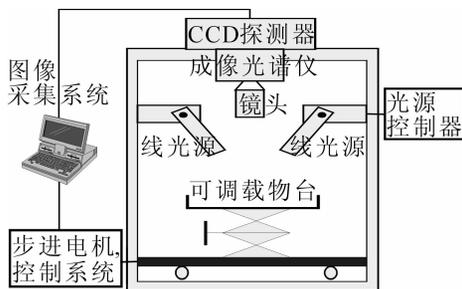


图 1 高光谱成像系统示意图

Figure 1 Schematic of hyperspectral imaging system

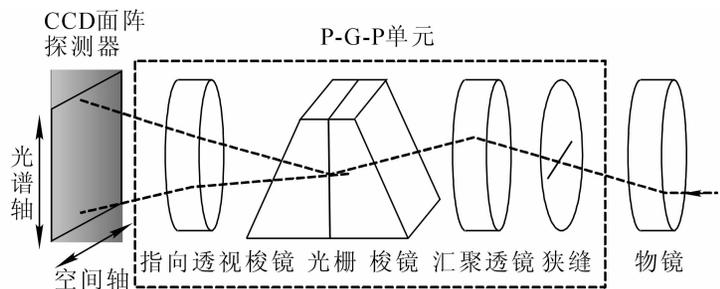


图 2 P-G-P 分光原理图

Figure 2 Operating principles of P-G-P imaging spectrograph

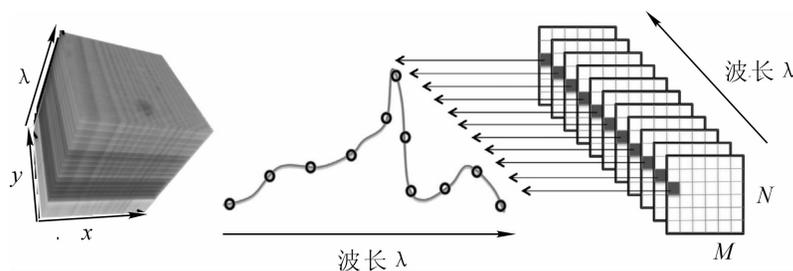


图 3 木材的高光谱图像数据块

Figure 3 Hyperspectral imaging datacube for lumber

带空间区域的光谱图像进行拼接,可获得整个待测物的高光谱图像。图3给出了一种蓝变木材的高光谱图像数据^[15],其中第1维和第2维是木材样品的空间位置信息(以 x 和 y 表示),第3维是波长信息(以 λ 表示)。

根据高光谱成像系统中光源的类型以及传感器与光源的不同配置方式,可获取4种不同类型的高光谱图像,分别是:反射图像、散色图像、荧光图像和透射图像。目前,高光谱反射图像是木材品质无损检测应用研究的重点。

2 高光谱图像数据的处理方法

高光谱图像数据处理的一般流程如图4所示^[16]。由于高光谱图像既包含光谱信息,又包含图像信息,因此,高光谱图像数据的分析方法很多。归纳起来,可以分为以下几个步骤。

第一,数据校正与预处理。原始高光谱图像数据是光子强度信息,需进行反射校正获取相对反射率^[17]。对于一些球状或类球状待测物,其形状差异会使高光谱图像数据存在空间差异,可在图像维采用曲率校正方法^[18-19]或者在光谱维采用光谱预处理方法^[20-21]减弱或消除该影响。此外,由于高光谱图像的数据量较大(可达数个GB),可通过裁剪、合并等方法减少无用信息从而降低数据量。

第二,数据降维。在图像维,可根据待测物的光谱特性,直接提取反映待测物品质的一个或几个波长下的图像^[22];也可通过一些数据降维方法如主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[23]、独立成分分析法^[24]或最小噪声分离法^[25]等获取关键的特征图像;还可在上述特征波段基础上,采用波段比算法^[23]、差分算法^[26]等计算特征图像。图像维的处理方法常见于被测对象的表面缺陷检测研究。在光谱维,在剔除了异常像元后,可对指定像元区域的光谱或者所有像元的光谱进行平均,计算平均光谱或偏差光谱进行分析;也可提取每个像元的光谱信息,用于像素级的分类分析。光谱维的处理方法可用于被测物内部品质和外部缺陷检测等。

第三,模型建立。在图像维,可采用数字图像处理技术对图像进行分割处理从而获取目标,提取特征参数建立相关模型^[27];在光谱维,可将平均光谱或偏差光谱与待测品质关联,通过一些化学计量学方法如偏最小二乘法(partial least squares, PLS)^[17]、支持向量机^[24]、神经网络^[28]等,建立待测物品质的定量或定性分析模型。

第四,目标分类。根据建立的模型对待测物品质进行可视化预测研究,建立组分含量分布图像或分类图像。

第四,目标分类。根据建立的模型对待测物品质进行可视化预测研究,建立组分含量分布图像或分类图像。

3 研究进展

3.1 缺陷检测

3.1.1 应力木检测 应力木是树木中的非正常木材组织,会严重影响木材的加工利用,导致木材资源浪费并造成经济损失。目前,应力木尤其是干燥之后的应力木的检测较为困难,现有方法主要为人工检测^[29]、高频电磁辐射分析法^[30]等,均存在一定局限性。机器视觉技术可用于新鲜状态下应力木检测,而对于干燥后的应力木检测效果较差^[31]。由于应力木中木质素、半乳糖含量高于正常木,可利用它们在近红

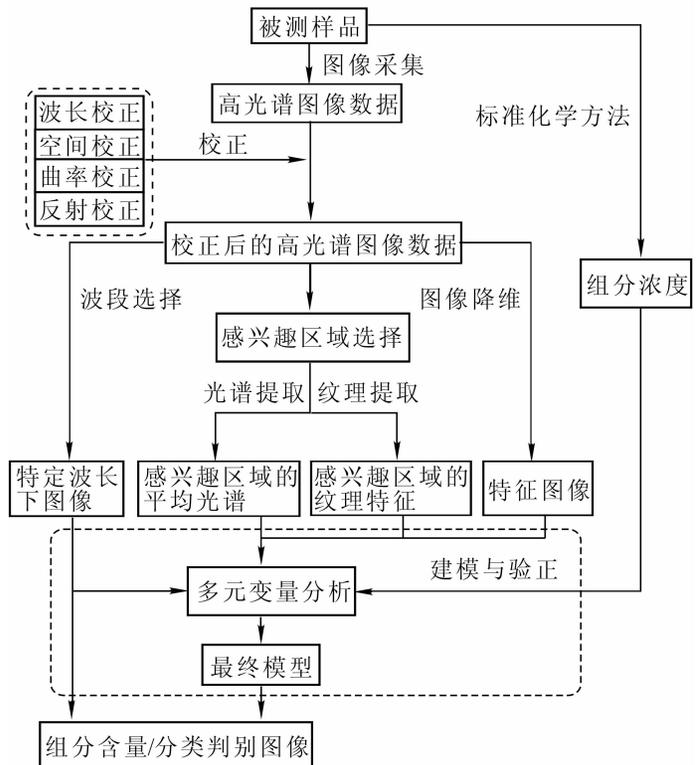


图4 高光谱图像数据的典型分析流程

Figure 4 Flowchart of a series of typical steps for analyzing hyperspectral image data

外光谱区域的吸收作用, 通过光谱分析法进行检测^[32-33]。然而光谱法需要大量数据, 花费时间较长, 且不具有空间信息, 难以得到应力木在木材中的空间分布。大量研究表明, 高光谱成像技术可用于木材应力木的判别。Hagman 等^[34]最早采用高光谱成像技术判别应力木。实验木材来自 3 株挪威云杉 *Picea abies* 和 5 株欧洲赤松 *Pinus sylvestris*。成像波段为 400~720 nm。首先采用主成分分析法(PCA)对高光谱图像进行分析, 发现第 2 和第 3 主成分得分图能区分净木、应力木和黑节。随后提取此 3 类样本的光谱并采用偏最小二乘法(PLS)和多元线性回归法建立识别模型, 识别正确率均高于 92%。Jan Nyström 和 Hagman 等^[32]在相同的波段范围研究了经干燥预处理的挪威云杉应力木的实时检测方法。采用 PLS 建立了应力木、非应力木(早材、晚材以及暗色缺陷)的判别模型, 使用该模型对 14 个样本进行在线预测时, 11 个被正确区分。作者认为, 通过调整光照方式、扩展成像光谱范围以及提升硬件性能还可进一步提高识别性能。同时研究指出将试样扩充到云杉生材, 可以为该技术的工业应用奠定基础。Duncker 等^[35]在 400~1 000 nm 波段范围内应用高光谱成像技术研究了挪威云杉圆盘横截面应压木的空间分布。从圆盘高光谱图像中提取重度应力木、中度应力木、正常木以及背景或裂缝区域的平均光谱组成标准光谱集, 采用光谱角算法对高光谱数据进行逐元判别。结果显示: 光谱角算法对中度和重度应力木的分类效果较好, 识别准确率为 91%, 高于采用红绿蓝(RGB)图像的分类结果。上述研究成像波段均在可见/近红外光谱区域。Meder 等^[33]则在 1 000~1 700 nm 范围内研究了辐射松 *Pinus radiata* 圆盘应力木分布的高光谱成像检测方法。该研究将应力木程度分为 5 级, 采用 PLS 建立判别模型, 并将模型应用于高光谱图像, 能够准确描述圆盘中的应力木分布。作者指出, 若通过该技术对原木多个连续部位的应力木程度及分布进行可视化描述, 有助于木材形成的解释, 同时也可作为锯木厂木材切割部位优化提供参数。

3.1.2 变色检测 由木材中有色菌丝引起的蓝变以及由太阳光辐射、温度、湿度等气候因子综合作用引起的木材表面变色均会影响木材的外观, 降低木材及木制品的品级和价值。目前, 已有学者尝试利用高光谱成像技术对木材变色进行研究。Burud 等^[15]在实验室条件下应用高光谱成像系统定量检测挪威云杉木制品表面的蓝变。致蓝病菌为黑酵母菌 *Aureobasidium pullulans* 和枝状枝孢菌 *Cladosporium cladosporioides*。所用试材包括 3 种类型: 一类样品表面覆盖了不含防腐剂的水性醇酸树脂改性丙烯酸涂料; 一类样品表面涂有不含防腐剂的溶剂型醇酸漆; 另外一类作对照未经任何处理。光谱成像区域为可见/近红外区(400~1 000 nm)和短波近红外区(1 000~2 500 nm), 数据处理方法为 PCA。研究发现, 可见/近红外高光谱图像的第 1 主成分得分图像以及近红外高光谱图像的第 2 主成分图像均能识别蓝变区域。其中, 可见/近红外光谱区域获取蓝变木材的颜色信息, 这与 RGB 图像信息一致。当高光谱图像中存在异于蓝变的其他颜色时, 会引起误判。而近红外波段则可以获取致蓝真菌的水分含量信息, 由于黑酵母菌和枝状枝孢菌在近红外谱区表现不同的光谱特性, 这为不同致蓝真菌种类的识别提供了理论基础。在此研究基础上, 该团队从 2013 年 8 月开始采用该技术在室外条件下, 开展在不同木材基底上受多种病菌浸染下真菌的生长状态研究^[36]。Agresti^[37]采用高光谱成像技术研究白杨 *Populus alba* 木材颜色与人工模拟自然光照时间的变化关系。测量波长范围为 400~1 000 nm 和 1 000~2 500 nm。研究发现在 500~900 nm 范围内的木材光谱变化主要反映其不同光照时间下的颜色变化, 光照 24 h 前后的差异显著, 而在 1 005~2 500 nm 范围内的木材光谱变化则反映了其化学成分如木质素、纤维素含量随光照时间的变化。对 2 个波段范围内的光谱采用偏最小二乘-判别分析方法建立的判别模型, 能准确的判别 0, 216 和 504 h 等 3 个不同光照时间下的木材。研究认为短波近红外波段光谱携带了反映木材主要化学成分含量随光照时间变化的信息, 所建模型性能更好。

3.1.3 其他缺陷检测 木材缺陷(包括节子、腐朽、虫眼等)会直接影响木材产品的强度、外观和档次。机器视觉技术是木板表面缺陷识别的有效技术之一^[38]。然而, 由于木材的外观变化较大, 不存在色彩或纹理特征完全相同的板材, 因此, 木材表面缺陷的机器视觉自动分类识别存在很多挑战。近红外光谱分析技术也可用于木材表面缺陷的检测^[39-41], 但是其检测区域一般仅是木材表面的某点或较小区域(不具备空间信息), 木材的各向异性会影响检测结果^[41]。高光谱图像数据同时具备光谱信息和空间信息, 这为木板表面的表面缺陷检测提供了一种新的技术。Bharati^[42]采用高光谱成像技术研究了离线和在线情况下的木板表面缺陷的检测方法, 包括香脂冷杉 *Abies balsamea*, 白云杉 *Picea glauca* 和斑克松 *Pinus banksiana* 等 3 个树种的软木, 缺陷则包括不同类型的节子、裂缝、衰败、沥青和夹皮。成像波段

为1 144~1 670 nm, 研究方法为多元图像主成分分析法。作者同时获取了该批样本的RGB图像, 采用相同的分析方法进行了比较分析。研究表明: RGB图像仅能反映木材正常部位和某些缺陷部位(节子、裂缝)的颜色差异, 只能判别是否存在缺陷, 而高光谱图像则反映了木材不同部位的化学信息、物理性质等, 这为化学成分、物理性质不一的不同缺陷类型的判别(如节子和裂缝, 活节和死节)提供了可能。Lundqvist等^[43]在1 000~2 500 nm波段范围内采集了欧洲赤松生材盘圆高光谱图像, 直接对原始高光谱图像进行主成分分析, 发现前3个主成分图像就可以准确的区分心材、边材、油污带和木材退化层。

3.2 物理力学性质检测

含水量和密度是木材的重要物理力学性质评价指标。其中, 纤维饱和点以下的含水量会严重影响木材的强度、刚性、耐腐蚀性、机械加工性能、导电性等^[5]; 而密度可用来评估木材的质量、判断木材的工艺性质和物理力学性质(硬度、强度、干缩以及湿胀等)^[6]。

Hikaru等^[44]在400~1 000 nm波段范围内采用高光谱成像技术检测欧洲山毛榉 *Fagus sylvatica* 和欧洲赤松2种木材干燥过程中的水分含量分布。分别采集2树种各10个样本在7个不同水分含量阶段的高光谱图像, 提取平均光谱并采用PLS建立水分含量模型。研究认为标准正态变量变换(SNV)光谱预处理能突出水分在980 nm下的特征光谱, 可消除因水滴和木材表面结构差异引起光散射的影响, 采用该预处理方法所建模型分别对相应树种下的高光谱图像进行逐像元预测。研究结果显示, 在干燥过程中, 欧洲山毛榉与欧洲赤松的早材部位与晚材部位表现出不同的水分含量分布, 印证了2个树种在解剖学上的差异。

Fernandes等^[45-46]采用高光谱成像技术对海岸松 *Pinus pinea* 木材的密度进行检测研究。波段范围为400~1 000 nm, 光谱分辨率为0.6 nm, 空间分辨率为79 μm 。他们首先以1株海岸松为研究对象, 提取152个密度测量点的光谱数据建立主成分得分-人工神经网络模型, 该模型用于测试集(365个测量点)时, 决定系数为0.96, 平均绝对误差为0.041 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。随后该团队扩大样本进行研究, 实验样本取自34株海岸松的胸高处(1.3 m), 树龄范围为3~44年生, 包含了边材和心材。提取平均光谱采用PLS进行20次随机建模, 最终所得20个模型对测试集的决定系数的平均值为0.81, 预测均方根误差的平均值为 6.52×10^{-2} $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。该团队还进一步比较了不同建模方法对模型性能的影响, 并确定了最优的建模方法^[47], 为木材年代学和木材气候学的研究提供了一种新的技术与方法。

不同于上述研究所用波段范围, Mora等^[48]在1 000~1 700 nm范围内采用高光谱成像技术检测火炬松 *Pinus taeda* 圆盘的基本密度和水分含量。试样材龄为13~19 a。将每个圆盘高光谱图像中无缺陷区域的数据进行平均, 采用PLS建立模型。密度模型的预测决定系数为0.81, 预测均方误差为23.6 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 水分模型的预测决定系数为0.77, 预测均方误差为2.10%。该研究还与近红外光谱技术进行了对比。研究发现: 虽然高光谱图像数据所建密度和水分模型的精度略低于近红外光谱技术所建同类模型, 但高光谱图像具有空间信息, 且不受被测样本形状限制。作者指出: 通过采用高精度的相机, 拓展成像波段和确定特征波段可以进一步提高密度、水分模型的精度。

3.3 化学性质检测

木材是复杂的天然聚物质, 其化学组成是木材最基本的性质, 与木材材性和纸浆性能密切相关。因此, 寻找一种快速、准确的木材化学性质预测方法对于木材原料的最佳使用期或用途的分析具有理论意义和实用价值。

Thumm等^[49]采用高光谱成像技术研究了辐射松原木圆盘主要化学成分的含量及空间分布情况, 所用成像波段区域为900~1 700 nm。提取平均光谱并采用PLS建立木质素、半乳糖、葡萄糖的定量模型, 3种成分模型的决定系数分别为0.84, 0.87, 0.87, 预测标准偏差分别为14.8, 9.5和6.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。将所建模型用于3组分的空间分布预测时, 发现在木材内部3种成分的含量在空间分布不一致, 验证了木材内部为非匀质体。特别是将3组分模型应用于应压木部位时, 发现木质素和半乳糖含量升高而葡萄糖含量降低。研究表明: 高光谱成像技术能对具有各向异性的木材的一些化学指标进行可视化展示, 有利于木材不同部位的材性变化研究, 从而更好地解释外界环境对木材生长的影响。

瑞士Innventia公司的研究团队搭建了一套近红外光谱成像系统(1 000~2 500 nm), 用于落叶松 *Larix decidua* 横截面生长轮上木质素含量的分布预测。直接对高光谱图像进行主成分变换, 发现前3个主成

分图像可以很好地描述木质素在各个年轮上的分布。从高光谱图像中提取平均光谱建立 PLS 模型进行逐像素预测, 也能准确描述木质素的分布^[43]。该团队还将该技术应用于树种识别、应压木检测以及纸张主要成分含量变异检测, 均取得了不错的效果。

高光谱成像技术除了用于以上研究以外, 还可用于木材油浸性能的检测。Geladi 等^[50]以欧洲赤松为研究对象, 采用高光谱成像技术对边材和心材的径切面、弦切面受亚麻籽油油浸前、后的状态进行研究。成像波段为 982~2 498 nm。对所有试样进行 PCA 分析时, 发现油浸前、后木材差异显著, 容易区分。单独对油浸前、后样本进行 PCA 分析时, 发现在木材油浸前, 径切面和弦切面样本容易区分, 而在木材油浸后, 边材和心材样本容易区分。作者指出: 采用高光谱成像技术可以形象地刻画木板油浸之后亚麻籽油在其表面的附着状态, 可为下一步在线评价防腐油在木材中的浸润分布提供技术参数。

4 总结与展望

高光谱成像技术可以同时获取待测物较丰富的图像和光谱信息, 能对木材及木制品的多种物理、化学性质以及缺陷进行无损检测, 是对被测物材料属性的局部变化进行可视化刻画的理想工具^[50]。随着数字图像处理技术、光谱分析技术、化学计量学技术以及模式识别技术等快速发展和融合, 该技术将在木材以及木制品品质无损检测中具有良好的应用前景。然而, 高光谱成像技术是近 10 多年发展起来的一项技术, 需要在实践应用中不断走向完善与成熟。

4.1 加强高光谱成像技术在木材品质检测中的应用研究

高光谱成像技术在木材无损检测中的研究在国内尚无, 在国外仅处于起步阶段, 且大多数为实验室研究, 虽然取得了较好的预测效果, 在应用上表现出了很大的潜力, 但是距离实际应用尚有差距。因此, 需要研究实际应用和实验室条件的区别, 分析和消除木材各种因素如树种、水分含量、纹理、表面粗糙度、切面部位、仪器参数和工作环境等对高光谱成像检测的影响, 尽快将实验室模型推广到实际应用中。

4.2 拓展高光谱图像采集方式及成像波段范围

现有的木材及其制品的品质检测研究主要采用反射高光谱图像, 采用其他类型高光谱图像如荧光图像或散射图像进行研究的较少。此外, 现有的成像波段范围一般限制在 400~1 000 nm 或者 1 000~2 500 nm 某个范围内, 在 400~2 500 nm 全波段范围以及紫外光谱区内进行研究的并不多。研究人员可联合几种高光谱图像采集技术并扩大成像波段范围开展木材及其衍生品的品质检测研究, 从而为中国木材新型检测装备的研制提供理论基础和技术支撑。

4.3 开发便携式、预测准确性高的多光谱成像检测仪器

高光谱成像系统要处理海量数据, 对计算机系统的硬盘、内存以及运算速度等要求很高, 直接应用于在线检测的高光谱成像系统较少。在一些农产品检测领域, 研究人员对被测农产品的高光谱图像进行分析, 根据检测指标获取了一些有效特征波长, 并设计出实时、无损的多光谱成像系统^[51]。在木材品质高光谱成像检测研究方面也可借鉴该思想, 从而开发出便携式、预测准确性高、适应性广的多光谱成像仪器, 实现在复杂工作环境中的木材品质实时在线快速检测。

5 参考文献

- [1] 尹建新, 祁亨年, 冯海林, 等. 一种基于混合纹理特征的木板材表面缺陷检测方法[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 937 - 942.
YIN Jianxin, QI Hengnian, FENG Hailin, *et al.* A method for wood surface defect detection based on mixed texture features [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2011, 28(6): 937 - 942.
- [2] 杜晓晨, 尹建新, 祁亨年, 等. 基于颜色直方图和 LBP-TD 算子的木板材结疤缺陷区域检测[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 71 - 75.
DU Xiaochen, YIN Jianxin, QI Hengnian, *et al.* Defective region detection for wood based on color histogram and LBP-TD operator [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, 34(3): 71 - 75.
- [3] CHEN Lijun, WANG Keqi, XIE Yonghua, *et al.* The segmentation of timber defects based on color and the mathematical morphology [J]. *Optik Int J Light Elect Optic*, 2014, 125(3): 965 - 967.

- [4] COGDILL R P, SCHIMLECK L R, JONES P D, *et al.* Estimation of the physical wood properties of *Pinus taeda* L. radial strips using least squares support vector machines [J]. *J Near Infrared Spectrosc*, 2004, **12**(4): 263 – 270.
- [5] 江泽慧, 黄安民. 木材中的水分及其近红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(8): 1464 – 1468.
JIANG Zehui, HUANG Anmin. Water in wood and its near infrared spectroscopic analysis [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2006, **26**(8): 1464 – 1468.
- [6] 江泽慧, 黄安民, 王斌. 木材不同切面的近红外光谱信息与密度快速预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(6): 1034 – 1037.
JIANG Zehui, HUANG Anmin, WANG Bin. Near infrared spectroscopy of wood sections and rapid density prediction [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2006, **26**(6): 1034 – 1037.
- [7] DIESEL K M F, da COSTA F S L, PIMENTA A S, *et al.* Near-infrared spectroscopy and wavelength selection for estimating basic density in *Mimosa tenuiflora* [Willd.] poiret wood [J]. *Wood Sci Technol*, 2014, **48**(5): 949 – 959.
- [8] JONES P D, SCHIMLECK L R, PETER G F, *et al.* Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy [J]. *Wood Sci Technol*, 2006, **40**(8): 709 – 720.
- [9] ISHIZUKA S, SAKAI Y, TANAKA-ODA A. Quantifying lignin and holocellulose content in coniferous decayed wood using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *J For Res*, 2014, **19**(1): 233 – 237.
- [10] 赵荣军, 张黎, 霍小梅, 等. 基于近红外光谱技术预测径/弦切面粗皮桉木材微纤丝角[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(9): 2355 – 2359.
ZHAO Rongjun, ZHANG Li, HUO Xiaomei, *et al.* Microfibril angle prediction of *Eucalyptus pellita* wood samples based on radial and tangential section by near infrared spectroscopy [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2010, **30**(9): 2355 – 2359.
- [11] 江泽慧, 费本华, 杨忠. 光谱预处理对近红外光谱预测木材纤维素结晶度的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **24**(3): 435 – 438.
JIANG Zehui, FEI Benhua, YANG Zhong. Effects of spectral pretreatment on the prediction of crystallinity of wood cellulose using near infrared spectroscopy [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2007, **24**(3): 435 – 438.
- [12] 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(8): 2021 – 2026.
LI Jiangbo, RAO Xiuqin, YING Yibin. Advance on application of hyperspectral imaging to nondestructive detection of agricultural products external quality [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2011, **31**(8): 2021 – 2026.
- [13] 贺霖, 潘泉, 邸犇, 等. 高光谱图像目标检测研究进展[J]. 电子学报, 2009, **37**(9): 2016 – 2024.
HE Lin, PAN Quan, DI Wei, *et al.* Research advance on target detection for hyperspectral imagery [J]. *Acta Electron Sin*, 2009, **37**(9): 2016 – 2024.
- [14] QIN Jiangwei, CHAO Kuanglin, KIM M S, *et al.* Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality [J]. *J Food Eng*, 2013, **118**(2): 157 – 171.
- [15] BURUD I, GOBAKKEN LR, FLØ A, *et al.* Hyperspectral imaging of blue stain fungi on coated and uncoated wooden surfaces [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2014, **88**(1): 37 – 43.
- [16] WU Di, SUN Dawen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review—part I: fundamentals [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2013, **19**(1): 1 – 14.
- [17] 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, **43**(2): 128 – 133, 185.
ZHOU Zhu, LI Xiaoyu, GAO Hailong, *et al.* Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology [J]. *Trans Chin Soc Agric Mac*, 2012, **43**(2): 128 – 133, 185.
- [18] GÓMEZ-SANCHIS J, MOLTÓ E, CAMPS-VALLS G, *et al.* Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits [J]. *J Food Eng*, 2008, **85**(2): 191 – 200.
- [19] TAGHIZADEH M, GOWEN A, O'DONNELL C P. Prediction of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) moisture content using hyperspectral imaging [J]. *Sens Instrum Food Qual Saf*, 2009, **3**(4): 219 – 226.
- [20] KAWANO S, HAFF R, SARANWONG S. Methods for correcting morphological-based deficiencies in hyperspectral

- images of round objects [J]. *J Near Infrared Spec*, 2012, **19**(6): 431 – 441.
- [21] GASTON E, FRIAS J M, CULLEN P J, *et al.* Prediction of polyphenol oxidase activity using visible near-infrared hyperspectral imaging on mushroom (*Agaricus bisporus*) caps [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, **58**(10): 6226 – 6233.
- [22] EIMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Non-destructive determination of water-holding capacity in fresh beef by using NIR hyperspectral imaging [J]. *Food Res Int*, 2011, **44**(9): 2624 – 2633.
- [23] 周竹, 李小昱, 陶海龙, 等. 基于高光谱成像技术的马铃薯外部缺陷检测[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(21): 221 – 228.
- ZHOU Zhu, LI Xiaoyu, TAO Hailong, *et al.* Detection of potato external defects based on hyperspectral imaging technology [J]. *Trans. Chin Soc Agric Eng*, 2012, **28**(21): 221 – 228.
- [24] YU Keqiang, ZHAO Yanru, LI Xiaoli, *et al.* Identification of crack features in fresh jujube using Vis/NIR hyperspectral imaging combined with image processing [J]. *Comput Electron Agr*, 2014, **103**(1): 1 – 10.
- [25] 张保华, 黄文倩, 李江波, 等. 基于高光谱成像技术和 MNF 检测苹果的轻微损伤[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(5): 1367 – 1372.
- ZHANG Baohua, HUANG Wenqian, LI Jiangbo, *et al.* Detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging and MNF transform [J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2014, **34**(5): 1367 – 1372.
- [26] ZHAO Jiewen, OUYANG Qin, CHEN Quansheng, *et al.* Detection of bruise on pear by hyperspectral imaging sensor with different classification algorithms [J]. *Sensor Lett*, 2010, **8**(4): 570 – 576.
- [27] 陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2602 – 2607.
- CHEN Quansheng, ZHANG Yanhua, WAN Xinmin, *et al.* Study on detection of pork tenderness using hyperspectral imaging technique [J]. *Acta Optica Sin*, 2010, **30**(9): 2602 – 2607.
- [28] EIMASRY G, WANG Ning, VIGNEAULT C. Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2009, **52**(1): 1 – 8.
- [29] YUMOTO M, ISHIDA S, FUKAZAWA K. Studies on the formation and structure of the compression wood cells induced by artificial inclination in young trees of *Picea glauca*: IV. gradation of the severity of compression wood tracheids [J]. *Res Bull Coll Exp For Hokkaido Univ*, 1983, **40**(2): 409 – 454.
- [30] SCHINKER M G, HANSEN N, SPIECKER H. High-frequency densitometry—a new method for the rapid evaluation of wood density variations [J]. *IAWA J*, 2003, **24**(3): 231 – 240.
- [31] NYSTRÖM J, KLINE D E. Automatic classification of compression wood in green southern yellow pine [J]. *Wood Fiber Sci*, 2000, **32**(3): 301 – 310.
- [32] NYSTRÖM J, HAGMAN O. Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies* [J]. *J Wood Sci*, 1999, **45**(1): 30 – 37.
- [33] MEDER R, MEGLÉN R R. Near infrared spectroscopic and hyperspectral imaging of compression wood in *Pinus radiata* D. Don [J]. *J Near Infrared Spec*, 2012, **20**(5): 583 – 589.
- [34] HAGMAN O. Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph [J]. *Holz Roh Werkst*, 1997, **55**(6): 377 – 382.
- [35] DUNCKER P, SPIECKER H. Detection and classification of Norway spruce compression wood in reflected light by means of hyperspectral image analysis [J]. *IAWA J*, 2009, **30**(1): 59 – 70.
- [36] BURUD I, GOBAKKEN L R, FLØ A, *et al.* Hyperspectral imaging: a new tool for detecting and quantify mould growth on wood surfaces [C]//SANDAK A, SANDAK J. *Application of NIR Spectroscopy for Wood Science and Technology Research “NIR & Wood-Sounds Good”*. San Michele all’Adige: NIR, 2014: 53 – 56.
- [37] AGRESTI G, BONIFAZI G, CALIENNO L, *et al.* Surface investigation of photo-degraded wood by colour monitoring, infrared spectroscopy, and hyperspectral imaging [J]. *J Spectrosc*, 2013, **1**(1): 1 – 13.
- [38] 胡硕飞, 周建徽, 云虹, 等. 基于灰度共生矩阵参数的柳杉材表面节疤缺陷识别[J]. 木材加工机械, 2011, **22**(5): 11 – 15.
- HU Shuofei, ZHOU Jianhui, YUN Hong, *et al.* Detection of sound knots and dead knots on Sugi timber using grey level co-occurrence matrix parameter [J]. *Wood Pro Mac*, 2011, **22**(5): 11 – 15.
- [39] 杨忠, 陈玲, 付跃进, 等. 近红外光谱结合 SIMCA 模式识别法检测木材表面节子[J]. 东北林业大学学报,

- 2012, **40**(8): 70 – 72.
- YANG Zhong, CHEN Lin, FU Yuejin, *et al.* Rapid detection of knot defect in wood surface by near infrared spectroscopy coupled with SIMCA pattern recognition [J]. *J Northeast For Univ*, 2012, **40**(8): 70 – 72.
- [40] 杨忠, 黄安民, 江泽慧. 近红外光谱结合回归分析预测法判别木材的生物腐朽[J]. *林业科学*, 2012, **48**(10): 120 – 124.
- YANG Zhong, HUANG Anmin, JIANG Zehui. Discrimination of wood biological decay by NIR coupled with regression analysis prediction method [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(10): 120 – 124.
- [41] STIRLING R. *Near Infrared Detection of Decay in Post-Mountain Pine Beetle Lumber* [M]. Victoria: Pacific Forestry Centre, 2009: 27.
- [42] BHARATI M H. *Multivariate Image Analysis and Regression for Industrial Process Monitoring and Product Quality Control* [D]. Hamilton : McMaster University, 2002.
- [43] LUNDQVIST S O, THOMAS G, LARS W. Imaging NIR spectroscopy for investigation of wood and applications on wood materials [C]//SANDAK A, SANDAK J. *Application of NIR Spectroscopy for Wood Science and Technology Research “NIR & Wood-Sounds Good”* . San Michele all’Adige: NIR, 2014: 33 – 36.
- [44] KOBORI H, GORRETTA N, RABATEL G, *et al.* Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC) [J]. *Holzforschung*, 2013, **67**(3): 307 – 314.
- [45] FERNANDES A, LOUSADA J, MORAIS J, *et al.* High spatial resolution measurement of wood density using hyperspectral imaging and neural networks [C]//COST Action FP0802 Experimental and Computational Characterization Techniques in Wood Mechanics. *Mixed Numerical and Experimental Methods Applied to The Mechanical Characterization of Bio-Based Materials*. Vila Real: Thematic Workshop, 2011: 11 – 12.
- [46] FERNANDES A, LOUSADA J , MORAIS J, *et al.* Measurement of intra-ring wood density by means of imaging Vis/NIR spectroscopy (hyperspectral imaging) [J]. *Holzforschung*, 2013, **67**(1): 59 – 65.
- [47] FERNANDES A, LOUSADA J, MORAIS J, *et al.* Comparison between neural networks and partial least squares for intra-growth ring wood density measurement with hyperspectral imaging [J]. *Comput Electron Agric*, 2013, **94**(1): 71 – 81.
- [48] MORA C, SCHIMLECK L, YOON S-C, *et al.* Determination of basic density and moisture content of loblolly pine wood disks using a near infrared hyperspectral imaging system [J]. *J Near Infrared Spec*, 2011, **19**(5): 401 – 409.
- [49] THUMM A, RIDDELL M, NANAYAKKARA B, *et al.* Near infrared hyperspectral imaging applied to mapping chemical composition in wood samples [J]. *J Near Infrared Spec*, 2010, **18**(6): 507 – 515.
- [50] GELADI P, ERIKSSON D, ULVCRONA T. Data analysis of hyperspectral NIR image mosaics for the quantification of linseed oil impregnation in Scots pine wood [J]. *Wood Sci Technol*, 2014, **48**(3): 467 – 481.
- [51] QIN Jiangwei, BURKS T F, ZHAO Xuhui, *et al.* Development of a two-band spectral imaging system for real-time citrus canker detection [J]. *J Food Eng*, 2012, **108**(1): 87 – 93.