北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

计算机断层扫描马尾松缺陷及其图像解译

刘晨君 杨淑敏 薛紫荞 尚莉莉 刘杏娥 王卿平 赵德达

Computerized tomography of defects in *Pinus massoniana* and its image interpretation

Liu Chenjun, Yang Shumin, Xue Ziqiao, Shang Lili, Liu Xing’e, Wang Qingping, Zhao Deda

引用本文:
刘晨君, 杨淑敏, 薛紫荞, 尚莉莉, 刘杏娥, 王卿平, 赵德达. 计算机断层扫描马尾松缺陷及其图像解译[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):144–152. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240007
Liu Chenjun, Yang Shumin, Xue Ziqiao, Shang Lili, Liu Xing’e, Wang Qingping, Zhao Deda. Computerized tomography of defects in *Pinus massoniana* and its image interpretation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):144–152. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240007

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240007

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水曲柳节子时空分布特征与变色规律研究
Spatial and temporal distribution characteristics and discoloration law of *Fraxinus mandshurica* knot
北京林业大学学报, 2020, 42(8): 53–60. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200004

基于应力波传播速度模型的原木缺陷定量检测
Quantitative detection of log defects based on stress wave propagation velocity model
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 143–154. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190420

基于节子剖析数据的长白落叶松人工林枝条丢失年轮数研究
Number of missing–rings in branch of *Larix olgensis* plantation based on knots’ section data analysis
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 87–98. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190038

基于X–ray CT的载荷作用下木材内部形变研究
Exploring the internal deformation of wood under loading based on X–ray CT
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 160–164. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200290

基于改进YOLOv5木板材表面缺陷的定量识别
Quantitative identification of surface defects in wood paneling based on improved YOLOv5
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 147–155. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220419

古建筑墙体木柱缺陷对其安全性影响数值模拟研究
Numerical simulation on the influence of wall wood column defects on the safety of ancient building
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 132–145. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210341

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240007

计算机断层扫描马尾松缺陷及其图像解译

刘晨君[1] 杨淑敏[1] 薛紫荞[1] 尚莉莉[1] 刘杏娥[1] 王卿平[1,2] 赵德达[1,3]
（1. 国际竹藤中心，国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室，北京 100102；2. 北华大学材料科学与工程学院，吉林 长春 132013；3. 中国农业科学院农业信息研究所，北京 100081）

摘要:【目的】通过解译计算机断层扫描（CT）图像获取马尾松原木的缺陷类型、空间分布和形态特征，以实现目标缺陷的三维重建，为 CT 技术在木质材料中的应用提供技术支撑。**【方法】**设置合理的扫描参数快速完成马尾松原木扫描。针对 CT 扫描获取的马尾松原木缺陷图像，采用曲率各向异性扩散滤波去除噪声，选取合理阈值进行阈值分割，实现裂纹、虫眼的分割；采用参数形变模型算法，实现节子的分割。利用 Mimics 软件，通过三维区域生长法建立裂纹、虫眼的三维模型；基于 MITK Workbench 软件，通过 VTK 三维可视化面绘制中的移动立方体算法建立节子的三维模型。**【结果】**阈值分割法、参数形变模型法能快速准确地识别原木内部缺陷并提取缺陷特征信息，具有较高的识别效率和精度，相对误差较小，在 3.63% ~ 10.36% 范围内波动。三维区域生长法和移动立方体算法实现了原木内部裂纹、虫眼和节子的三维重建，能够快速获取缺陷的空间分布、结构特征，并量化特征信息。**【结论】**本研究提出的分析方法适用于不同缺陷的图像分割和三维可视化，可以获取缺陷在马尾松原木中的空间分布位置与特征参数，缺陷检测准确率高。研究结果为木材保护和木材利用的改进提供了技术支撑。

关键词：缺陷；断层扫描；节子；图像分割；三维；可视化；算法
中图分类号：S781.5；O434.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0144−09
引文格式：刘晨君，杨淑敏，薛紫荞，等. 计算机断层扫描马尾松缺陷及其图像解译［J］. 北京林业大学学报，2024，46(10)：144−152. Liu Chenjun, Yang Shumin, Xue Ziqiao, et al. Computerized tomography of defects in *Pinus massoniana* and its image interpretation［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 144−152.

Computerized tomography of defects in *Pinus massoniana* and its image interpretation

Liu Chenjun[1] Yang Shumin[1] Xue Ziqiao[1] Shang Lili[1] Liu Xing'e[1]
Wang Qingping[1,2] Zhao Deda[1,3]
(1. International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/ Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Beihua University, Changchun 132013, Jilin, China;
3. Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract:［**Objective**］In order to realize the three-dimensional reconstruction of targeted defects and provide technical support for the application of CT technology in wood materials, the defect types, spatial distribution and morphological characteristics of *Pinus massoniana* log were interpreted based on computerized tomography (CT) images.［**Method**］Reasonable parameters were set to quickly complete the scanning of *P. massoniana* logs. For CT image of the defects in *P. massoniana* log, the curvature anisotropic diffusion filtering was used to reduce noise. The threshold segmentation was applied to realize the segmentation of crack and insect hole by selecting reasonable thresholds, and the parametric deformation

收稿日期: 2024−01−05 **修回日期:** 2024−09−16
基金项目: 国家重点研发计划项目（2022YFD2200901）。
第一作者: 刘晨君。主要研究方向：竹藤等生物质材料。Email：lcj_197618@163.com 地址：100102 北京市朝阳区国际竹藤中心。
责任作者: 杨淑敏，研究员。主要研究方向：竹藤等生物质材料。Email：yangsm@icbr.ac.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

modeling algorithm was used to realize the segmentation of knots. Using Mimics software, the three-dimensional model of crack and insect hole was established by 3D area growth method. Based on MITK Workbench software, the 3D model of knots was established using the moving cube algorithm in 3D visualization surface rendering of VTK. [**Result**] The threshold segmentation method and parameter deformation modeling method can quickly and accurately identify the internal defects of logs and extract the defect feature information, which had high identification efficiency and accuracy. The relative error was small, fluctuating within the range of 3.63%−10.36%. The three-dimensional reconstruction of internal cracks, insect holes and knot was realized by three-dimensional region growth method and the moving cube algorithm, which can quickly obtain the spatial distribution, structural characteristics and quantify the feature information of defects. [**Conclusion**] An image segmentation and three-dimensional visualization method suitable for different defects is proposed, the spatial distribution location and characteristic parameters of the defects in *P. massoniana* logs are obtained, and the accuracy of defect detection is high. The research results can provide technical support for wood protection and utilization improvement.

Key words: defect; tomography; knot; image segmentation; three dimensional; visualization; algorithms

木材缺陷降低了木材的强度和耐久性，造成了木材的大量浪费，因此在加工过程中需要被去除。节子、裂纹和虫眼是木材中典型的天然缺陷类型，节子会降低木材的拉伸和弯曲强度[1−3]，裂纹深度是木梁抗弯承载性能削弱的重要影响因素[4]，深浅不一的虫眼会导致木材在受力时发生弯曲或变形。因此，可以通过无损检测手段合理剔除木材缺陷，提高木材利用率，实现木材资源的有效利用。

传统的木材或木质材料缺陷检测方法通常要破坏木材结构的完整性，检测效率低且成本高，不能满足木材工业生产中快速无损检测和持续检测的生产需要。目前，目标检测网络已经可以实现大量木材图像的快速检测。张瑞峰等[5]基于 CNN 神经网络对木材缺陷的识别准确率达 90% 以上，Ling 等[6]建立的 ResNet-v2 木材缺陷检测模型可对板材表面的虫眼、活节、死节进行分类，Wang 等[7]改进的 YOLOv3 模型对木材表面裂纹、虫眼、节子缺陷检测准确率达 86.49%，王正等[8]基于 YOLOv7 建立的 Wood-Net 模型也可达到较好的缺陷检测精度。以上基于机器视觉的木材缺陷检测方法改善了利用人工方式识别木材或木质材料缺陷效率低、成本高的现状，但同传统无损检测方法一样，以表面缺陷检测为主，更多地应用在板材表面缺陷检测领域。常用的无损检测方法中，超声检测通过分析超声波回波信号实现缺陷检测，激光检测通过分析激光扫描成像硬件系统获取的图像实现缺陷检测，红外成像检测通过材料的热导率实现缺陷检测，声发射适用于材料结构损伤的实时动态监测，3D 扫描仪对木材的缺陷量化和可视化仅限于木材表面缺陷[9]。以上方法均无法实现木材内部缺陷的可视化。

计算机断层扫描（computerized tomography，CT）可以采集到木材内部结构信息并实现其可视化，此技术为原木内部缺陷的无损检测提供了可能。目前的研究主要集中在木材缺陷识别的准确率、缺陷类型分类、平面几何尺寸测量等方面。何潇[10]应用灰度直方图分析法处理色木槭（*Acer pictum*）、白蜡（*Fraxinus chinensis*）的 CT 图像，准确识别出其心边材、节子、腐朽；高明宇等[11]基于卷积神经网络实现了云杉（*Picea asperata*）7 种不同节子的识别；Longuetaud 等[12]基于图像分割技术和计算机测量方法，获取节子的直径、体积和倾斜度等信息，成功实现了对于针叶材节子缺陷完整且准确的几何学描述。利用 CT 图像快速、准确获取缺陷的特征信息、空间分布的关键在于可视化三维模型的构建，这方面需要进一步的研究。

为获取原木内部缺陷空间信息并构建可视化三维模型，本研究利用 CT 对马尾松（*Pinus massoniana*）原木进行检测，重点关注内部裂纹、虫眼和节子；利用图像处理技术解译获取的原木缺陷 CT 图像，实现不同缺陷特征的三维可视化；将获得的缺陷类型、数量、尺寸、分布情况与实测情况进行比较。本研究通过 CT 图像的解译实现目标缺陷的三维重建，为 CT 在木质材料无损检测中的应用提供技术支持。

1　材料与方法

1.1　材　料

马尾松采集自安徽省安庆市林场，高 11.8 m，原木样本从马尾松根部向上截取，平均含水率 8%，平均气干密度 0.69 g/cm^3，扫描原木试样平均长 95.60 cm，平均长径 37.92 cm，平均短径 24.05 cm。选取具有裂纹、虫眼、节子的 4 组马尾松原木样本作为试验材料。

1.2 CT 扫描方法

试验采用美国通用电气 BrightSpeed Excel 4 螺旋 CT，沿马尾松原木轴向进行扫描。扫描参数为管电压 120 kV、管电流 160 mA、层厚 1.25 mm、曝光时间 5.50 ~ 11.24 s，扫描时间 5 ~ 6 min。采用 STD(statistical dropped)重建算法，窗宽(CT 图像所显示的 CT 值范围)为 2 000，窗位(观察的中心 CT 值)为 30，图像大小为 512 × 512 像素，像素间距 0.64 mm；对投影图像进行 CT 重建，每个试样连续扫描，共重建 545 幅断层图像。使用 BrightSpeed Excel 4 螺旋 CT 工作站自带的软件测定图像各点的平均 CT 值。

1.3 缺陷实测方法

根据《原木缺陷》(GB/T 155—2017)标定的原木常见缺陷，通过目测，结合胸径尺、钢卷尺和透明坐标纸对原木缺陷进行绘制、测量、计算，获取各缺陷的实际测量数值。

1.4 CT 图像处理方法

1.4.1 CT 图像预处理

CT 值是指被检测物体各部位对 X 射线的吸收能力的相对值，是反映材料密度的物理量。可通过映射函数，将 CT 值转化为灰度值，从而生成不同的灰度图像，利用灰度图像来进行图像分析。原始 CT 图像对比度低、高斯噪声多，采用曲率各向异性扩散滤波器(图 1a ~ d)进行预处理，有效保存木材图像的边缘和缺陷细节，噪声也得到了有效的处理，同时去除了主体部分背景，可减少后续图像计算量。预处理后的结果见图 1e ~ h。

1.4.2 CT 图像分割

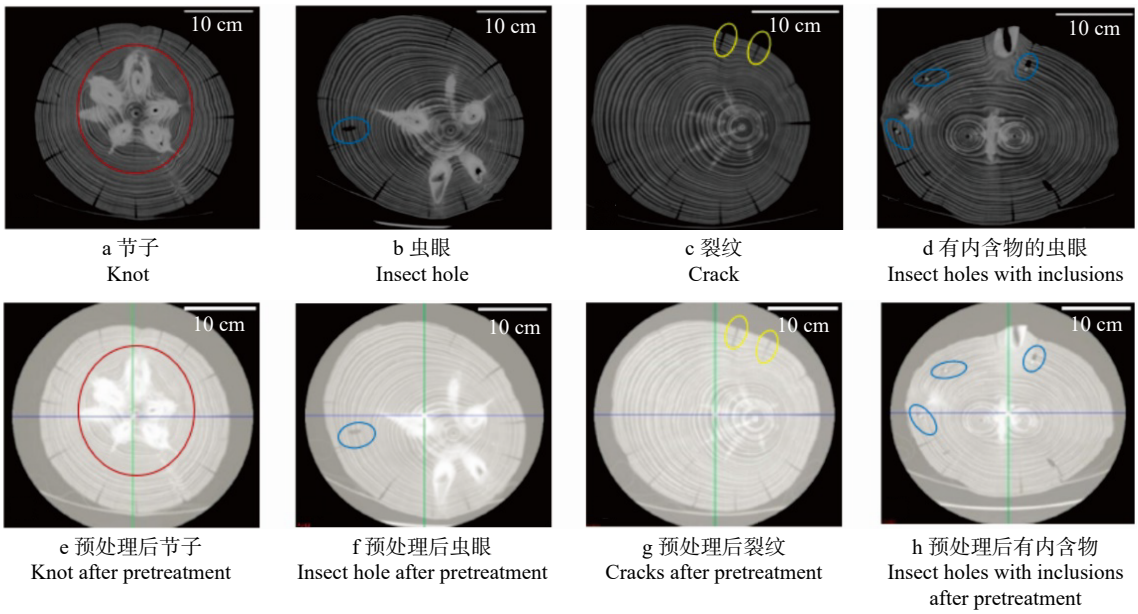
根据木材缺陷的不同特点，分别采用基于直方图的阈值分割法和参数形变模型算法对裂纹、虫眼和节子进行分割。

(1)基于直方图阈值的裂纹、虫眼图像分割

阈值分割算法因操作简单、计算量小、性能稳定而成为应用最广泛的分割技术，适用于目标和背景占据不同灰度级范围的图像，而裂纹、虫眼图像区域和图像背景一样由空气形成，与原木周围组织密度差异显著，适合此算法进行分割。分别选取图 2a ~ c 所示红线部分，对无缺陷原木、裂纹及虫眼图像进行 CT 值测定(图 2d ~ f)，并对 CT 值变化曲线进行分析对比。图 2d 无缺陷部分 CT 值变化曲线呈均匀分布排列，CT 值变化幅度稳定，在−674 ~ 26 之间；裂纹和虫眼位置 CT 值明显低于其他木质部(图 2e，f)，分别在−824 ~ −724 、−1 000 ~ −924。使用图像处理软件 Mimics 分割裂纹、虫眼的像素点，在−1 000 ~ −724 范围内选定阈值。

(2)基于参数形变模型算法的节子图像分割

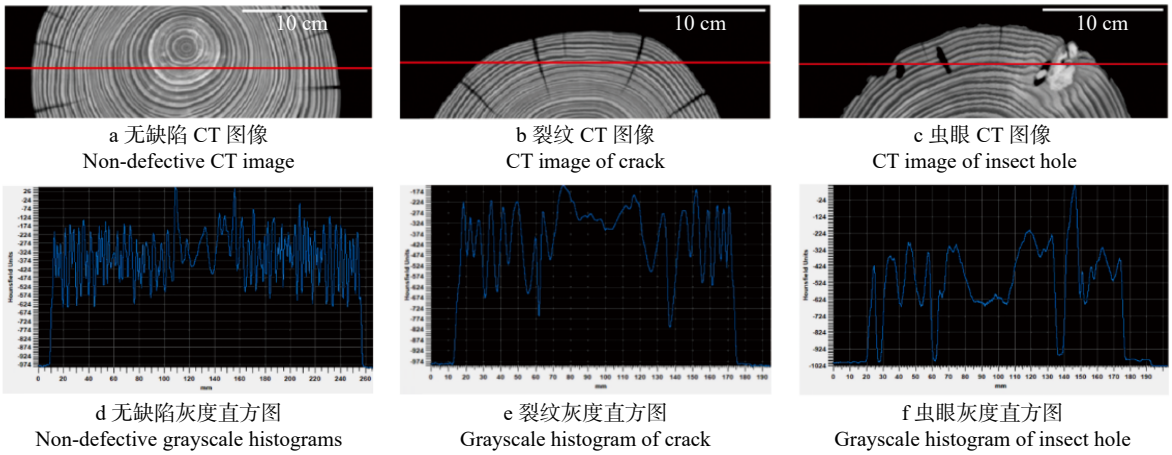
节子表面轮廓形状复杂，且部分节子边缘区域的 CT 值与原木晚材 CT 值相近，采用参数形变模型算法对原木 CT 体数据中的节子进行分割。根据原木 CT 体数据信息计算图像能量函数，由图像能量驱动调整曲线轮廓的形状，最后得到连续的边界信息。木材缺陷检测中常用的边缘检测不能保证边缘的连续性和封闭性，在高细节区域存在大量的碎边缘，而参数形变模型算法在驱动连续轮廓收缩过程中，通过干预使轮廓与目标节子的边缘相一致。利



红圈为节子，蓝圈为虫眼，黄圈为裂纹。The red circle means knot, the blue circle means insect hole, the yellow circle means crack.

图 1 预处理前后的马尾松缺陷 CT 图像

Fig. 1 CT images of defects in *Pinus massoniana* before and after pretreating



a 无缺陷 CT 图像　Non-defective CT image
b 裂纹 CT 图像　CT image of crack
c 虫眼 CT 图像　CT image of insect hole
d 无缺陷灰度直方图　Non-defective grayscale histograms
e 裂纹灰度直方图　Grayscale histogram of crack
f 虫眼灰度直方图　Grayscale histogram of insect hole

灰度直方图对应 CT 图像中的红线处。The grayscale histogram corresponds to the red line in the CT image.

图 2　不同区域的马尾松缺陷 CT 图像和灰度直方图

Fig. 2　CT images of defects in *Pinus massoniana* and grayscale histograms in different regions

用参数形变模型算法分割后的节子断层图像（某一断层同一位置不同轴测视图）见图 3。

1.4.3　图像重建

三维模型弥补了断层图像缺少的空间信息，使缺陷的定位和识别更加精确。其中任意截面信息的获取，缺陷之间、缺陷与原木实质之间相对位置的测量，都可以为位置信息的需求提供有效参考。

（1）基于体绘制的裂纹、虫眼图像重建

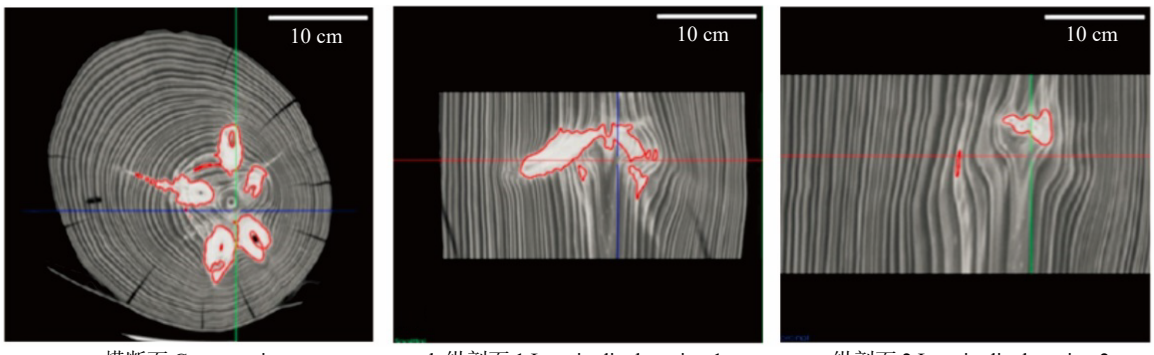
连续断层图像导入 Mimics 软件，利用阈值选取技术、三维区域增长技术获得新的蒙板（Mask）。在 Mimics 软件中，将阈值分割的结果保存为 Mimics 的一个对象，称为蒙板（Mask），蒙板是独立于原始断层图像的二维图像。与原始断层图像一一对应的二值蒙板组成一个三维体数据集，其体素的值为 0 和 1。以蒙板为基础经体绘制法重建原木内部裂纹、虫眼的三维实体模型。区域生长法利用该区域内图像的相似属性以及该区域与其他区域的差异性提供良好的边界信息，将区域生长法由二维分割层面扩展到三维分割层面，在阈值分割的基础上，可提高原木中裂纹、虫眼部分重建的三维模型精度。

（2）基于面绘制的节子图像重建

相较于体绘制面向所有体数据，面绘制是提取图像中需要重建部分的表面轮廓信息，只重建物体的表面，显著提高了三维模型重建的速度。因此可视化工具包（visualization toolkit，VTK）中的面绘制三维重建算法—移动立方体算法，适用于进一步处理参数形变模型法得到的等值面信息。基于 MITK Workbench 软件，采用 VTK 中的移动立方体算法完成原木 CT 体数据的三维可视化渲染、软件的交互以及节子信息的分析与统计。

1.5　统计分析

对马尾松原木各项缺陷的特征参数进行定量分析。通过解译 CT 图像，测定各缺陷的 CT 值、尺寸、面积。通过 Mimics 软件和 MITK 软件重建三维模型后，得到各缺陷的体积和空间坐标。实测数据通过网格纸描点进行测量计算。应用 Origin 19 对原木缺陷实测数据和 CT 测定数据进行相关性分析，计算 CT 测定数据的准确率。



a 横断面 Cross section
b 纵剖面 1 Longitudinal section 1
c 纵剖面 2 Longitudinal section 2

b 和 c 分别为 a 中沿绿线、蓝线剖开的纵剖面。b and c are the longitudinal sections dissected along the green line and the blue line in a, respectively.

图 3　参数形变模型算法分割后马尾松节子 CT 图像

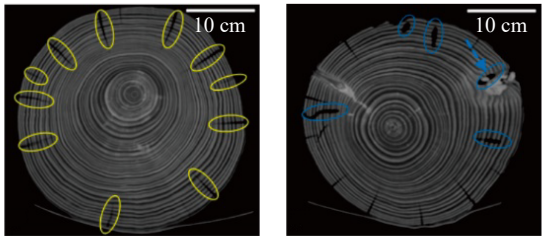
Fig. 3　CT images of knots in *Pinus massoniana* after segmentation by parametric deformation modeling algorithm

2 结果与分析

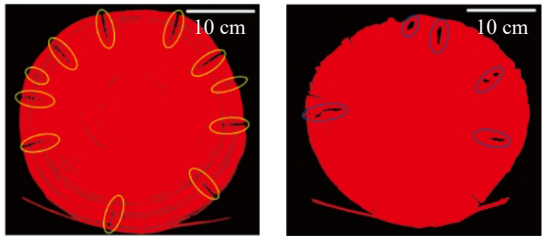
2.1 马尾松缺陷提取和可视化

2.1.1 裂纹、虫眼

根据直方图的阈值差异，对裂纹和虫眼进行分割(图 4)。裂纹和虫眼分割图像呈现与图像背景环境相同的黑色，将无缺陷原木区域用红色区别显示；对比分割前后图像，能够准确地从断层图像中区别出裂纹和虫眼，整体分割效果较好。图 4 中根据阈值标定的缺陷区域中，黄色标注框内黑色部分为裂纹，蓝色标注框内黑色部分为虫眼。裂纹由靠近韧皮部部位向内扩展，呈环状排列，延伸长度区别较大(图 4a)。裂纹深度范围在 14.2 ~ 51.3 mm，除两处深度小于 24.82 mm(原木端面直径 248.2 mm 的 1/10)的裂纹为浅裂外，剩余裂纹均为深裂。虫眼分布规律与裂纹类似，集中分布在边材靠近韧皮部位置，呈环状排列，心材处并未见虫眼(图 4b)。



a 分割前裂纹 Cracks before segmentation　b 分割前虫眼 Insect holes before segmentation



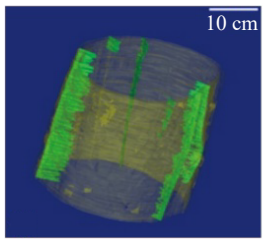
c 分割后裂纹 Cracks after segmentation　d 分割后虫眼 Insect holes after segmentation

黄圈为裂纹，蓝圈为虫眼。The yellow circle means crack, the blue circle means insect hole.

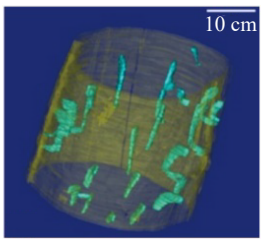
图 4 马尾松缺陷 CT 图像的分割

Fig. 4 CT image segmentation of defects in *Pinus massoniana*

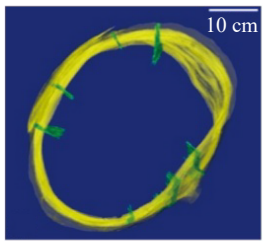
原木的材身和端面出现径向开裂(图 5a，c)，属于原木干燥过程中的干裂缺陷。综合分析裂纹深度范围发现，开裂程度和发生位置的随机性较大，但轴向高度范围基本一致。裂纹对结构构件造成的损伤不容忽视，严重时可危及建筑的耐久性和安全性，所以通过三维重建实现裂纹空间分布情况的准确检测尤为重要[13]。虫眼数量较多、分布缺少规律性，且以往研究多集中于虫眼的尺寸和分布密度。大量虫眼在边材韧皮部附近呈环状分布(图 5d)，虫眼三维模型的测量得到：与虫眼横截面相切的矩形范围为(4.47 ~ 56.06) mm × (4.84 ~ 42.13) mm，轴向高度范围为 6.25 ~ 76.27 mm。轴向观察虫眼三维模型发现，每个虫眼的形态特征并不规则，整体随蛀蚀方向在原木内部沿轴向延伸或沿木射线方向由外向内延伸一段距离后继续沿轴向扩展(图 5b)。对每个虫眼的完整形态进行区分和定位，虫眼深度较浅，对木材强度及使用影响不大，特别是原木经锯解、旋切后，虫眼可随边皮一起去掉。



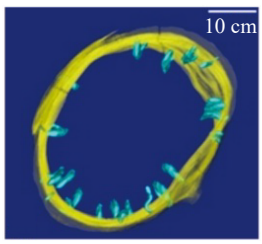
a 轴向裂纹三维分布 Axial 3D distribution of cracks



b 轴向虫眼三维分布 Axial 3D distribution of insect holes



c 横向裂纹三维分布 Axial 3D distribution of cracks



d 横向虫眼三维分布 Axial 3D distribution of insect holes

绿色为裂纹，蓝色为虫眼，黄色为原木轮廓。The green means crack, the blue means insect hole, and the yellow means log outline.

图 5 马尾松裂纹和虫眼的三维重建视图

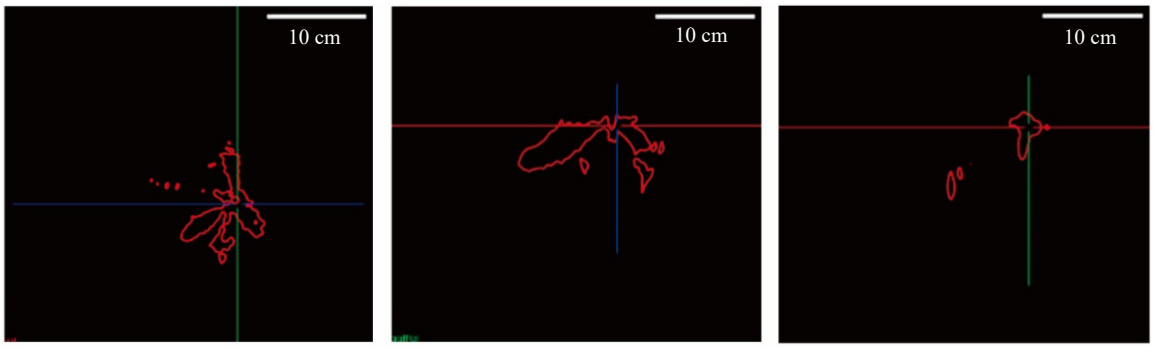
Fig. 5 Three-dimensional reconstruction view of cracks and insect holes in *Pinus massoniana*

对比裂纹、虫眼三维重建视图和二维分割图像，裂纹的分布与端面和原木外表面裂隙一致，虫眼形态和分布随机性更强。实际检测中仅能通过观察切割原木的端面粗略统计虫眼，但三维重建后，统计结果更加精确，还可对裂纹、虫眼的横截面积进行计算。

2.1.2 节 子

参数形变模型法分割提取的封闭、光滑的节子边缘曲线(图 6)可清晰地显示节子的横断面直径、轴向高度，能够为木材的质量分析提供准确的数据支持。横断面图像(图 6a)测量得到节子最大直径为 163.3 mm，纵剖面 1、纵剖面 2 图像(图 6b、c)测量可得节子轴向最高高度为 64.2 mm。

马尾松原木中节子的组成具有多样性和表面形态的不规则性(图 7a)。同一节子不同部位连接处较小(图 7b)，不同节子可能在同一截面交叉分布(图 7c)，使得仅凭分割后图像对完整节子数量、形态进行分辨存在难度，影响木材节子检测的准确性。节子主要结构附近存在杂乱的针状突出(图 7c)，在传统肉眼检测中极易被忽略。VTK 中自动进行的

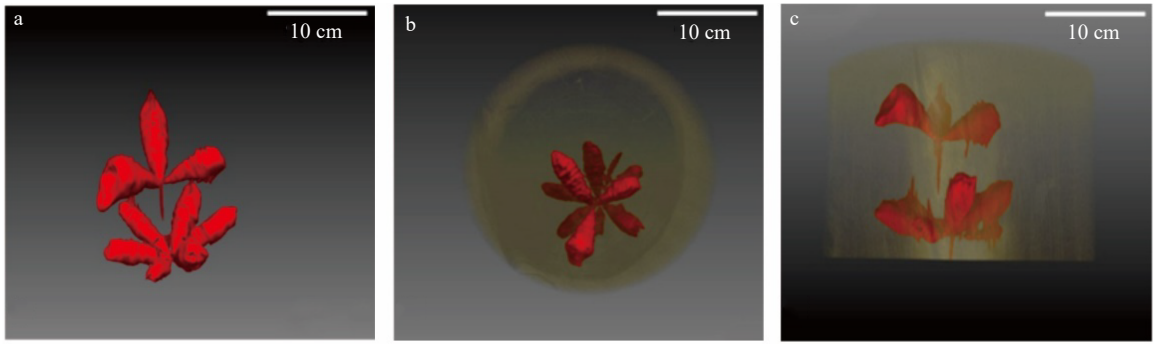


a 横断面 Cross section　　b 纵剖面 1 Longitudinal section 1　　c 纵剖面 2 Longitudinal section 2

b 和 c 分别为 a 中沿绿线、蓝线剖开的纵剖面。b and c are the longitudinal sections dissected along the green line and the blue line in a, respectively.

图 6　马尾松节子 CT 图像分割提取

Fig. 6　CT image segmentation and extraction of a knot in *Pinus massoniana*



a 主视图 Front view　　b 俯视图 Top view　　c 侧视图 Lateral view

图 7　马尾松节子三维重建视图

Fig. 7　Three-dimensional reconstruction view of knots in *Pinus massoniana*

原木 CT 体数据三维可视化渲染可以快速、有效地解决这一问题，图 7 为采用移动立方体算法生成的双层节子三维模型，红色部分为节子的三维模型，棕色半透明外轮廓为原木部分，据此可以了解节子在原木内部的实际分布。双层节子之间距离小于 100 mm，远小于试材长度，密集程度较高（图 7c）。采用 VTK 自动实现原木 CT 体数据的三维可视化，为节子参数的测量和体积值的自动获取提供了便利。

2.2　马尾松缺陷定量分析

2.2.1　马尾松心材、边材、节子的平均 CT 值

木竹材密度与 CT 值之间存在正相关关系[14]，根据图像不同区域的平均 CT 值，可对心边材部位与节子的密度差异进行无损比较。马尾松心材平均 CT 值范围在−391.25 ~ −229.53 之间，边材平均 CT 值范围在−391.10 ~ −351.20 之间，节子平均 CT 值范围在 157.10 ~ 174.42 之间（表 1）。比较各部分 CT 均值，马尾松节子与心边材密度差异均较大，心材与边材密度差异较小，密度值区间为节子 > 心材 > 边材。节子平均 CT 值波动范围较小，且均大于马尾松心边材 CT 值，说明节子本身均未腐朽或破坏，可能为健全节。而心材 CT 值大于边材的原因主要在于边材向心材转化过程中生活细胞死亡，细胞腔中出现沉积物，水分疏导系统阻塞。

表 1　马尾松原木各部位平均 CT 值

Tab. 1　Average CT values of different parts in *P. massoniana* log

序号 No.	CT值 CT value		
	心材 Heartwood	边材 Sapwood	节子 Knot
1	−229.53	−351.20	157.10
2	−391.25	−369.50	165.00
3	−358.15	−391.10	172.60
4	−320.60	−373.75	174.42
均值 Average value	−324.88	−371.38	167.28

2.2.2　马尾松缺陷体积

裂纹体积在 1.18 ~ 6.49 cm^3 之间，占原木体积的 0.01% ~ 0.06%，所占比例极小（表 2）。虫眼数量较裂纹更多，单个体积小，体积范围在 0.78 ~ 4.31 cm^3 之间，占原木体积的 0.01% ~ 0.07%，所占比例极小（表 3）。节子体积范围在 148.70 ~ 361.64 cm^3 之间，占原木体积百分比的 2.35% ~ 3.55%，相对整段原木体积，节子的实际占比较小（表 4）。每个区域节子数

表 2 马尾松原木中裂纹体积参数值

Tab. 2 Volumetric parameter values of cracks in *P. massoniana* log

序号 No.	裂纹体积 Volume of crack/cm^3	原木体积 Volume of log/cm^3	裂纹占原木体积百分比 Percentage of cracks in volume of log/%
1-1	1.78	6 143.05	0.03
1-2	2.98	6 143.05	0.05
1-3	1.65	6 143.05	0.03
1-4	2.07	6 143.05	0.03
1-5	1.18	6 143.05	0.02
2-1	2.81	9 783.06	0.03
2-2	6.49	9 783.06	0.06
2-3	2.02	9 783.06	0.02
2-4	1.28	9 783.06	0.01

表 3 马尾松原木中虫眼体积参数值

Tab. 3 Volumetric parameter values of insect holes in *P. massoniana* log

序号 No.	虫眼体积 Volume of insect hole/cm^3	原木体积 Volume of log/cm^3	虫眼占原木体积百分比 Percentage of insect holes in volume of log/%
1-1	1.98	6 143.05	0.03
1-2	1.17	6 143.05	0.02
1-3	1.07	6 143.05	0.02
1-4	4.31	6 143.05	0.07
1-5	1.37	6 143.05	0.02
1-6	1.96	6 143.05	0.03
1-7	0.78	6 143.05	0.01
1-8	1.57	6 143.05	0.03
2-1	1.02	9 783.06	0.01
2-2	2.33	9 783.06	0.02
2-3	1.76	9 783.06	0.02
2-4	1.66	9 783.06	0.02
2-5	0.80	9 783.06	0.01
2-6	2.77	9 783.06	0.03
2-8	0.80	9 783.06	0.01

表 4 马尾松原木中节子体积参数值

Tab. 4 Volumetric parameter values of knots in *P. massoniana* log

序号 No.	节子数量 Knot number	节子体积 Knot volume/cm^3	原木体积 Log volume/cm^3	节子占原木体积百分比 Percentage of knots in volume of log/%
1	7	310.00	8 055.75	3.84
2	6	212.10	5 857.49	3.62
3	9	266.44	9 201.68	2.89
4	4	361.64	1 0173.00	3.55
5	5	148.70	6 304.89	2.35

量 4 ~ 9，且位于原木内部，部分隐生节无法通过直接观察得到。原木节子数量越多，动态弹性模量值就小，木材的力学性能变差[15]。利用节子与心边材 CT 值之间的差异，作为区分 CT 扫描图像中节子与其他区域的灰度阈值，对原木内节子可能存在的区域进行预测，进而对节子进行三维重建。三维重建将节子的形态和分布可视化，并量化其体积。

2.2.3 CT 测定与实测缺陷面积的比较

节子的实测面积范围 788 ~ 1 029 mm^2，在横截面中占比较小，仅占 2.54% ~ 3.44%；裂纹的实测面积范围 292 ~ 857 mm^2，占横截面的 2.42% ~ 5.02%；虫眼的实测面积范围 639 ~ 1 805 mm^2，占横截面的

6.26%～7.55%，占比较大，容易被精准识别。各缺陷面积波动范围大，说明节子、裂纹和虫眼缺陷的形成均具有不确定性，难以分析其分布规律。测量不同木段上节子、裂纹、虫眼缺陷的面积，并对比 CT 测定面积和实测面积，求得 CT 测定面积与实测面积的相对误差。相对误差绝对值在 3.63%～10.36% 范围内波动，说明 CT 测定面积与实测面积的相对误差较小，CT 测定面积适用于马尾松缺陷分析。

运用 Origin 软件对表 5 中缺陷的实测面积(y)和 CT 测定面积(x)进行回归分析，数据拟合得到 $y = 1.069\,1x - 46.465\,7$($R^2 = 0.963\,7$)，模型拟合程度较好(图 8)。

表 5　节子、裂纹和虫眼的 CT 测定与实测面积比较

Tab. 5　Comparison of the measured area of knots, cracks and insect holes with the area tested by CT

类型 Type	试样编号 Specimen No.	横截面半径 Cross-sectional radius/mm	横截面面积 Cross-sectional area/mm²	实测面积 Measured area/mm²	CT测定面积 Area tested by CT/mm²	相对误差 Relative error/%
节子 Knot	4-1	85.37	22 884.17	788(3.44%)	857.51(3.75%)	8.82
	4-2	108.71	37 109.63	1 029(2.77%)	1 113.42(3.00%)	8.20
	4-3	108.71	37 109.63	941(2.54%)	975.13(2.63%)	3.63
裂纹 Carck	5-1	71.30	15 962.79	802(5.02%)	763.12(4.54%)	−4.85
	5-2	83.50	21 892.87	857(3.91%)	790.62(3.61%)	−7.75
	5-3	62.00	12 070.16	292(2.42%)	274.51(2.27%)	−5.99
	5-4	61.75	11 973.02	300(2.51%)	271.14(2.26%)	−9.62
虫眼 Insect hole	6-1	87.25	23 903.45	1 805(7.55%)	1 617.98(6.77%)	−10.36
	6-2	57.00	10 201.86	639(6.26%)	698.71(6.08%)	9.34

注：括号内数值为缺陷面积在横截面面积中的占比。Note: values inside the parentheses are the proportion of defect area to the cross-sectional area.

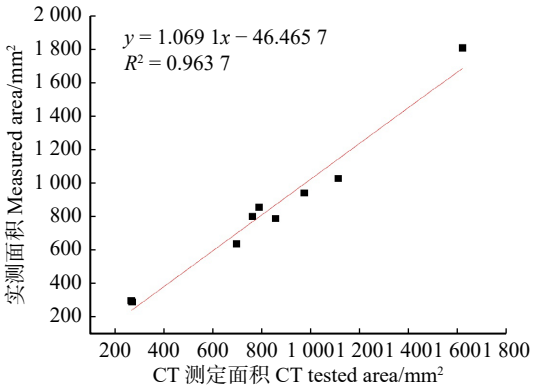


图 8　马尾松缺陷实测与 CT 测定面积比较

Fig. 8　Comparison of measured area and CT tested area of defects in *P. massoniana*

3　结　　论

鉴于当前木材缺陷检测主要依赖于二维图像的定量分析，而缺乏直观的三维显示。本研究针对原木 CT 图像，采用了不同图像预处理、分割和重建方法，确定了适用于原木内部不同缺陷的三维模型重建方法。研究得到以下结论。

(1)运用阈值分割法、参数形变模型法快速准确地识别原木内部缺陷，并提取缺陷特征信息，相对误差较小，在 3.63%～10.36% 范围内波动，具有较高的识别精度。

(2)基于体绘制、面绘制(移动立方体算法)实现原木内部裂纹、虫眼和节子的三维重建，构建了直观、准确的木材缺陷三维模型，模型可以快速提取缺陷结构特征并量化特征信息。

未来的研究可进一步扩大样本范围，结合人工智能的自动化算法，实现多种树种内部缺陷特征分布的全面检测。原木内部缺陷特征的三维可视化，不仅可以探索树龄、生长环境等因素对木材内部缺陷形成的影响，从而更全面地理解缺陷的形成机制，还可以减少资源浪费，提高生产效率，同时也为木材的健康评估和防护提供了新的技术手段。

参　考　文　献

[1] Kaiser S, Kaiser M S. Comparison of wood and knot on wear behaviour of pine timber[J]. Research on Engineering Structures and Materials, 2020, 6(1): 35−44.

[2] Kunesh R H, Johnson J W. Effect of single knots on tensile strength of 2-by 8- inch douglas-fir dimension lumber[J]. Forest Products Journal, 1972, 22: 32−37.

[3] Mäkinen H. Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland[J]. Trees, 2002, 16: 346−353.

[4] 钟丽辉, 程昱之, 孙永科, 等. 木材缺陷识别方法综述 [J]. 农业技术与装备, 2020, 371(11): 151−152.
Zhong L H, Cheng Y Z, Sun Y K, et al. Review of wood defect identification method[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2020, 371(11): 151−152.

[5] 张瑞峰, 夏坡坡. 基于 CNN 的典型木材缺陷图像识别研究 [J]. 现代化农业, 2019(1): 37−40.
Zhang R F, Xia P P. Research on image recognition of typical

wood defects based on CNN[J]. Modernizing Agriculture, 2019(1): 37−40.

[6] Ling J X, Xie Y H. Research on wood defects classification based on deep learning[J]. Wood Research, 2022, 67(1): 147−156.

[7] Wang B G, Yang C M, Ding Y C, et al. Detection of wood surface defects based on improved YOLOv3 algorithm[J]. BioRecsources, 2021, 16(4): 6766−6780.

[8] 王正, 江莺, 严飞, 等. 基于 YOLOv7 的木材缺陷检测模型 Wood-Net 的研究 [J]. 林业工程学报, 2024, 9(1): 132−140.
Wang Z, Jiang Y, Yan F, et al. Research on wood defect detection model Wood-Net based on YOLOv7[J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(1): 132−140.

[9] 赵鹏, 赵匀, 陈广胜. 基于 3D 扫描技术的木材缺陷定量化分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 171−176.
Zhao P, Zhao Y, Chen G S. Quantitative analysis of wood defect based on 3D scanning technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 171−176.

[10] 何潇. 原木心边材密度与含水率的计算机断层扫描检测研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
He X. Study on the log heartwood and sapwood density and moisture content detection based on computed tomography[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[11] 高明宇, 倪海明, 张博洋, 等. 一种基于 GoogLeNet 卷积神经网络的木节缺陷识别方法 [J]. 森林工程, 2021, 37(4): 66−70.
Gao M Y, Ni H M, Zhang B Y, et al. A method for recognizing wood knots defects based on GoogLeNet convolutional neural network[J]. Forest Engineering, 2021, 37(4): 66−70.

[12] Longuetaud F, Mothe F, Kerautret F, et al. Automatic knot detection and measurements from X-ray CT images of wood: a review and validation of an improved algorithm on softwood samples[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85: 77−89.

[13] 陈偲, 沈肇雨, 王正, 等. 正交胶合木平面剪切的开裂形貌及其破坏模式探究 [J]. 林产工业, 2022, 59(6): 7−13.
Chen S, Shen Z Y, Wang Z, et al. Study on plane shear cracking morphology and failure mechanism of cross laminated timber[J]. China Forest Products Industry, 2022, 59(6): 7−13.

[14] 王卿平, 刘杏娥, 张桂兰, 等. 基于 X 射线 CT 技术快速检测不同含水率状态下的毛竹密度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(6): 1899−1903.
Wang Q P, Liu X E, Zhang G L, et al. Rapidly detection for moso bamboo density under different moisture condition based on X-CT technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6): 1899−1903.

[15] 王亚磊, 赵茂程, 王正. 木材动态弹性模量测量中节子对于应力波传播的影响 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 183−187.
Wang Y L, Zhao M C, Wang Z. Influence of wood knots on the stress wave propagation in the dynamic measurement of elastic modulus[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 183−187.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）