

基于计算机图像处理技术的叶面特征参数无损测量研究进展

林雪梅¹, 刘迎湖¹, 谢利², 郭和蓉^{2*} (1. 华南农业大学理学院, 广东广州 510642; 2. 华南农业大学农学院, 广东广州 510642)

摘要 相比传统方法计算叶片特征参数, 无损图像处理技术无需采摘叶片, 在保持植株完整株型的前提下为下一次数据测量提供了保障并应用先进的计算技术准确计算植株的各种特征值, 无损图像处理技术逐渐成为国内外学者研究植物生长形态的重要手段。介绍基于数码技术的叶面积计算方法和基于图像处理的叶片轮廓建模方法, 概述数码技术应用于叶面积计算的国内外研究进展, 总结归纳叶片轮廓提取方法和拟合方法的优缺点, 并指出应用图像处理技术计算叶面积仍需进一步解决的问题。

关键词 无损测量; 叶面积计算; 图像处理; 轮廓建模

中图分类号 S176 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)23-08029-03

The Research of the Leaf Characteristic Value for Non-destructive Measurement Based on Digital Image

LIN Xue-mei, GUO He-rong et al (College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642; College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642)

Abstract Compared with the traditional method to determine the leaf area and the geometrical model of leaf shape, the digital leaf image can make leaf non-destructive and calculate various characteristic parameters of plants efficiently, conveniently and accurately. The method to calculate the leaf area based on digital technology and the leaf contour modeling based on image processing were introduced. The research advances of digital technology at home and abroad were reviewed, the advantages and disadvantages of leaf contour extraction and fitting methods were summarized. The problems of using image processing technology to calculate leaf area were pointed out.

Key words Non-destructive measurement; Leaf area calculation; Image processing; Contour modeling

叶片是植物光合作用的主要器官, 其发育状况和叶面积大小直接影响作物生长、抗病性及产量, 叶片特征研究是植物生长研究的重要内容。获取叶片特征参数, 一般采用两种方法: 一种是传统的破坏性测量, 即随机选取某一植株, 有损地测量其叶面积、叶长等叶片特征参数及其干、鲜重量。此测量方法的结果虽准确但较为耗时繁琐, 不能大规模地搜集数据, 且不能对同一植株进行连续的生长测量并破坏植株的生长平衡。二是采用接触式传感器测量植株叶面特征参数等。此方法虽然方便, 但是成本高, 传感器的开发难度大, 且在接触植物的过程中不可避免地影响植物的生长状态。因此, 如何对植物生长连续快速地进行无损检测, 成为国内外学者的热点研究内容。为此, 笔者概述了国内外对无损测量中叶面积计算和叶片轮廓提取与模拟等方面的最新研究进展, 并进一步指出相关研究还需解决的问题。

1 叶面积无损测量技术

1.1 图片采样技术 图片的采样方法主要包括扫描采样法、相机采样法。其中, 扫描采样法在计算叶面积的像素法中应用较广泛。自由路等通过扫描技术应用数字图像法建立了测算叶面积的方法^[2-6]。数字图像法能快速、便捷、精确地计算叶面积, 但应用也存在局限性: ①不能一次测出多片叶子的单个面积; ②受参照物面积的影响比较大, 有时需要对计算结果进行校正才能得到准确的实际叶面积; ③由于从获取图片到计算叶面积整个过程需要较多的时间, 并不适合大量的叶面积测量工作; ④叶片需要离体测量、破坏植物

和采集图像, 如果出现倾斜则失真等。2002年鲍雅静等首次提出利用普通相机采集照片通过像素法计算草片的实际面积, 但需要将叶片剪下来^[7]。

如何解决叶片图像采样过程中存在有损采样、图像失真以及计算技术等缺陷, 成为国内外学者研究的热点。

1.2 无损测量叶面积的计算方法

1.2.1 像素法。像素法是根据图片像素在总像素中所占的比例得出图像面积的一种计算方法, 该方法源于网格法, 主要应用于数字图像。FematI-Diaz等采用扫描仪获得叶片的彩色图像, 与图像处理方法相结合, 用像素法计算叶面积^[8]。

针对叶片图像采样过程中图像存在有损测量的缺陷, 曹志刚等利用数码相机和手持标准面积板获取叶片图像, 通过运行VB程序分析图像计算叶面积, 进行无损测算^[9]。范克俊等对此方法进行了改良, 利用数码相机拍照获取叶片和直尺的图像, 利用Photoshop软件对图像进行处理, 统计叶片的像素数和每平方米面积的像素数, 从而计算叶片的实际面积^[10]。

在无损测量中, 采用数码相机获取图像的方法得到广泛的应用。马彦平等以数字图像处理技术与Visual C++6.0相结合进行区域标记与区域像素数统计, 从而获得玉米叶片实际面积^[11]。Chen等用数码相机获取叶片的数字图像, 通过图像处理技术获得叶片的图像像素点总数, 根据叶片像素点总数与参考面像素点的总数之比得出叶面积系数, 从而获得单片叶片的总面积^[12]。此方法对于表面有缺陷例如洞、烤焦等的叶面同样适用。

随着科技的发展, 应用智能手机计算叶片面积得到发展。Han等通过智能手机采集叶片图像, 以边长为3的长方形为参考物, 在手机上通过OTSU方法分离叶片区域和背景, 最后根据叶片区域与参考物长方形的像素比例求出该叶片的叶面积。试验结果表明, 该方法与传统方法数码相机和

基金项目 广东省教育部产学研结合项目(2011B090400510); 广东省教育部产学研结合项目(2012B091100480)。

作者简介 林雪梅(1989-), 女, 广东阳江人, 硕士研究生, 研究方向: 生物数学与微分方程应用。*通讯作者, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 从事花卉栽培、能源植物资源与能源转化技术以及草坪生态与环境管理研究。

收稿日期 2014-07-03

电脑相比具有同等精度^[13]。

1.2.2 CCD 测量面积法。CCD 法(Charge - coupled Device)又称为 CCD 图像传感器,是一种计算不规则平面物体面积的有效方法。它能把光学影像转化为数字信号,将植入的微小光敏物质作像素,像素越多,提供的画面分辨率越高。很多研究学者把 CCD 图像传感器与计算机相结合,得出所要计算图片中图像像素,从而得到图像的面积。

张全法等以 CCD 为图像传感器与计算机相结合统计所得叶片图像的像元数,通过测量选定标准物体的面积得到图像面积的比例系数,从而计算出叶片的实际面积。虽然 CCD 法具有测量精度高、测量范围大、使用方便等特点,但测量精度会受到很多因素影响,如几何畸变等^[14]。针对图像存在几何畸变的缺陷,左欣等基于改进的 Hough 变换提取控制点,采用双线性空间变换进行几何校正,从而改进了张全法等 CCD 测量面积法,更加适应野外植物叶片面积的非破坏性测量的需要^[15]。

1.2.3 CAD 图形分析法。随着二维绘图软件 AutoCAD 的快速发展和普及使用,许多学者利用 AutoCAD 程序中的 area 命令计算叶片图像的面积。田青等在对阔叶类和针叶类植物叶面积的测量中,采用数码相机获取叶片的数字图像,应用 AutoCAD 软件计算植物叶面积^[16]。刘浩等利用扫描仪获取番茄和青椒叶片图像后,通过 AutoCAD 计算叶片实际面积^[17]。AutoCAD 叶片面积图像处理技术精度高,不受叶片大小、形状和厚度等因素的影响,不仅可以测定像青椒等规则叶片,还可以对如番茄等不规则叶片和针叶类等叶片进行准确测定。

1.2.4 Mapinfo 方法。Mapinfo 是美国 Mapinfo 公司推出的桌面地理信息系统软件,提供了屏幕矢量化功能,广泛应用于众多领域。吴玉德等是我国将该软件应用于叶面积测算的第一人,通过扫描仪参照标准计算纸采集树木叶片栅格图像,通过 Mapinfo 软件的屏幕矢量化功能得到树木叶片轮廓矢量图,进而通过该软件的内置菜单得到树木叶面积^[18]。Mapinfo 方法具有严谨的科学性,其显著优点是快速、精确,可用于所有叶片,不受叶片大小、形状、厚度等因素的影响。不足之处是必须采用标准计算纸,叶面积的测定精度受标准计算纸本身精度的影响比较大,因此必须保证标准计算纸的精度。

1.2.5 机器视觉技术法。机器视觉是一种应用计算机模拟目标外显或宏观视觉功能的技术,是用图像创建或回复显示目标,用计算机来局部实现人的视觉功能和在一定场合拓宽或辅助人的视觉功能。将图像处理与机器视觉技术结合后可以实现连续、快速的无损检测,可对植物叶面积、叶柄夹角、茎秆直径等生长特征参数进行有效检测。

He 采用双目立体视觉,对甘薯幼苗进行了无损检测^[19]。陈鼎才等将此方法进一步改进后的方法能更好地适应野外活体叶面积的测量计算,具有较高测量精度和较低测量难度,还可以对叶面积数据进行管理和分析,为作物生长检测提供有力的数据支持,从而具有广泛的应用前景^[20]。基于

机器视觉的无损测量,通过采集大量的植物生长信息,统计并比较出不同品种植物在不同生长条件或不同生长时期的生长速率,进而指导环境控制,提供合理的生长所需,合理筛选出适合培育的品种,帮助指导实际生产,减少盲目性。

2 图像处理在叶片轮廓建模中的应用

叶片形状是辨别不同植物的另一个重要特征,是植物识别的重要工具,因此,植物叶片轮廓曲线形状研究十分重要。Wang 等应用分割与形态学运算可自动控制标点的分水岭算法,分割具有复杂的背景图像,然后通过所提取的二值图像中的形状特征点,得出完整叶片特征点^[21]。Caballero 等对植物叶片轮廓的提取进行了探索^[22]。Li 等指出,采用 snakes 技术与细胞神经网络系统相结合,可灵活准确地提取植物叶片的叶脉^[23]。王静文等采用 Williams 和 Shah 提出的贪心算法,通过对轮廓点周围的局部近邻进行检索选取具有更小 Snake 模型能量的新轮廓,改进了 Snake 模型。该方法提取标本叶片轮廓,排除了原来的阴影区域,保留了原来叶片图像的细节,比传统模型提取的轮廓更加精确^[24]。

用图像技术中的轮廓检测有以下几项要求:①轮廓的定位要高;②不同尺度的轮廓应有良好的响应,并尽量减少漏检;③应对噪声不敏感;④检测灵敏度应受轮廓方向影响小。目前,主要的边缘检测提取方法有边界跟踪法和边缘检测算法。

2.1 边界跟踪法 边界跟踪法的基本原理是先根据图像特征,大步距地寻找边缘起始点,再从起始点开始,小步距递进式地找出各个要素点,最后将这些要素点连成平滑的曲线。Michael 和 Suen 于 1981 借鉴该思想提出一个较为完善的边界跟踪算法,但算法的描述以及终止的判别条件并不严格。邓小同等对 Michael 和 Suen 的算法做了一些改进,提供了较为严格的数学描述,并给出算法正确性以及封闭性的证明^[25]。此后,相关边界跟踪法的研究更多。贺忠海等提出的方法是在图形较简单的情况下,可完成与传统边缘检测方法相同的工作^[26]。周秀芝等针对传统边界跟踪算法易出现漏跟踪或者跟踪断裂的确定,利用交叉点描述边界跟踪的不同方向,形成以交叉点为结点的目标边界的树结构描述,通过对树的遍历获得目标边界的跟踪序列^[27]。

传统的边界跟踪算法主要包括虫跟踪法、光栅扫描法以及 T 算法^[28]。目前,用于叶片轮廓检测的典型轮廓跟踪法是方向邻域法,主要有四邻域^[29]、八邻域^[30]、十六邻域^[31]。

2.2 边缘检测算子 一般导数用来描述连续函数的变化。因此,可以使用偏导数描述边缘的检测算子,并且可以用图像函数最大增长方向的梯度来描述图像函数的变化。边缘检测首先检测出图像局部特性的不连续,然后将这些不连续的边缘像素连成完整的边界。边缘检测算子的实质是检测出符合边缘特性的边缘像素点。

目前,主要的边缘检测算子有一阶微分边缘检测算子和二阶微分边缘检测算子。其中,一阶微分边缘检测算子包括差分边缘检测算子、Roberts 交叉微分算子、Sobel 微分算子、Prewitt 微分算子。二阶微分边缘检测算子包括 Laplacian 算

子、Wallis 算子、LOG 算子、canny 微分算子。

现有的边缘检测算子十分成熟,但这些算子都有图像质量及环境的限制。例如,Roberts 算子边缘定位准,但对噪声敏感,可用于边缘明显而且噪声较少的图像。Sobel 算子对噪声具有平滑作用,能够提供较为精确的边缘信息,但由于局部平均的影响,也会检测出许多伪边缘,且得到的边缘较粗,定位不高。Laplacian 算子基于二阶导数的零交叉,具有各向同性,即与坐标轴方向无关,坐标轴旋转后梯度结果不变,因此边缘检测效果较好,但是其对噪声比较敏感^[32-34]。

2.3 轮廓线的拟合 植物叶形的建模是研究虚拟植物的重要组成部分,定量描述植物叶片形态结构可更好地确定植物叶片形状的几何模型。同时,拟合叶片的轮廓曲线可更好地刻画植物叶片形状。目前,关于拟合叶片曲线的研究已取得了一定的进展。

根据不同叶片轮廓表现出来的不同形状特征,研究者用不同的数学方法解决了相应的数学问题。Chi 等将叶片的轮廓表示成径向角的函数,采用三次 Bezier 曲线作为叶形几何建模的基本元素,既提高了计算量,又复杂了叶片轮廓的几何特征^[35]。曾茂林等以植物叶片轮廓的建模为例,先构造出刻画叶片轮廓形态的形状函数,再利用小波分析法快速重构不同叶片的轮廓形状函数,成功地对植物叶片轮廓进行几何建模。该方法具有数据存储容量小、建模速度快等优点,并且适用于锯齿形状的叶片^[36]。

拟合轮廓线的方法中,应用最为广泛的是多项式样条函数。例如,苏礼楷等通过边缘扫描算法提取边界点,然后利用三次样条曲线建立了植物叶片的几何模型,具有数据量少、几何特征简单等优点,但不能很好地适用于锯齿形叶片^[37]。鉴于该思想,谢秋菊等利用边缘检测技术提取出大豆叶片形态数据,通过计算机图形学中的三次参数样条曲线拟合大豆叶片的轮廓曲线,得到了更具有真实感的大豆叶片模型,为静态虚拟植物叶片建模研究提供必要的方法,具有一定的实践价值^[38]。除此之外,王静文等提取叶片图像的角点作为轮廓特征点,利用三次均匀 B 样条曲线进行初步插值拟合,并根据拟合误差采用改进的节点插入算法进行反复迭代,达到所要求的拟合精度。该方法能够更快地达到逼近精度,具有良好的模拟效果,有一定的实际应用价值^[39]。杜德彭等结合三次均匀 B 样条曲线的特征,利用功能特征组合得到基本型值点,拟合出叶片的轮廓曲线,并反求控制点,得到了基本叶形特征的轮廓模型,提高了对叶片轮廓边缘的控制和交互调节^[40]。

3 结语

综上所述,通过数码技术离题采集叶片图像,利用图像处理技术计算叶面积,不仅快速、可靠和准确,而且降低成本,可推广到其他大田作物,应用到实际生产生活中,为农业生产生活及广大农业科研人员提供切实可行的科学方法。但与传统的抛物线法以及复印称重法相比较,用图像处理法计算叶片面积的结果与实际的结果有一定的差距,原因在于图像处理方面还没有很好地解决叶片倾向、叶片变形、叶片

颤动和自然光变化对图像带来的阈值分割误差等问题,读取图片过程容易丢失数据,计算叶面积不免存在误差。所以,今后的研究任务是:选取可靠、快捷、准确的彩色图像获取方法,探索出基于图像处理的最佳轮廓提取及其拟合方法,并且把叶面积无损测量与叶片轮廓建模有机地结合起来,把抛物线法计算叶面积的原理应用到叶片面积的计算中,应用积分理论计算叶长,实现特征值的计算机可视化,不仅可以提高计算精度,而且可为计算叶片特征值提供新方法、新思路。

参考文献

- [1] 冯冬霞, 施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报[J]. 中国农学通报, 2005, 121(6): 150-152, 155.
- [2] 自由路, 杨俐萍. 基于图像处理的植物叶面积测定方法[J]. 农业网络信息, 2004(1): 36-38.
- [3] 肖强, 叶文景, 朱珠, 等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 711-714.
- [4] 杨劲峰, 陈清, 韩晓日, 等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 155-158.
- [5] 石剑飞, 殷瑾艳, 冷锁虎, 等. 采用数码图像处理法测定油菜叶面积的方法探讨[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3): 379-382.
- [6] 李宝光, 陶秀花, 倪国平, 等. 扫描像素法测定植物叶面积的研究[J]. 江西农业学报, 2006, 18(3): 78-81.
- [7] 鲍雅静, 李政海, 张颖. 单草叶面积测量方法的比较[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2002, 33(1): 62-64.
- [8] FEMAT-DIAZ A, VARGAS-VAZQUEZ D, HUERTA-MANZANILLA E, et al. Scanner image methodology (SIM) to measure dimensions of leaves for agronomical applications[J]. African Journal of Biotechnology, 2013, 10(10): 1840-1847.
- [9] 曹志刚, 冯仲科, 龙春玲, 等. 基于数字摄影与计算机图形技术的植物叶面积测量方法[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(1): 39-41.
- [10] 苑克俊, 刘庆忠, 李圣龙, 等. 利用数码相机测定果树叶面积的新方法[J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 829-832.
- [11] 马彦平, 自由路, 高祥照, 等. 基于数字图像的玉米叶面积测量方法研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 329-334.
- [12] CHEN B, FU Z, PAN Y, et al. Single leaf area measurement using digital camera image[M]//Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 525-530.
- [13] HAN D, ZHANG F. Leaf area measurement embedded in smart mobile phone[M]//Advances in Intelligent Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 207-213.
- [14] 张全法, 冯绚, 何金田, 等. 植物叶面积测量系统的设计及应用[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(4): 383-386.
- [15] 左欣, 韩斌, 程嘉林. 基于数字图像处理的植物叶面积测量方法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 27(2): 194-221.
- [16] 田青, 曹致中, 张睿. 基于数码相机和 AutoCAD 软件测定园林植物叶面积的简便方法[J]. 草原与草坪, 2008(3): 25-28.
- [17] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 基于 AutoCAD 软件确定番茄与青椒叶面积的简易方法[J]. 中国农学通报, 2009, 25(5): 287-293.
- [18] 吴玉德, 张鹏. 基于 Mapinfo 的树木叶面积测定方法[J]. 林业调查规划, 2005, 30(6): 23-24.
- [19] HE D. Development of a plug-transplant production system and an image analysis system for use in sweet potato[D]. Japan: Chiba University, 2002.
- [20] 陈鼎才, 王定成, 查金水. 基于机器视觉的现实叶片面积测量方法的研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(5): 1226-1228.
- [21] WANG X F, HUANG D S, DU J X, et al. Classification of plant leaf images with complicated background[J]. Applied Mathematics and Computation 2008, 205(2): 916-926.
- [22] CABALLERO C, ARANDA M C. Plant species identification using leaf image retrieval[C]//Proceedings of the ACM International Conference on Image and Video Retrieval. ACM, 2010: 327-334.
- [23] LI Y F, ZHU Q S, CAO Y K, et al. A leaf vein extraction method based on snakes technique[C]//China Neural Networks Council (CNNC), IEEE Computational Intelligence Society Beijing Chapter. Proceedings of 2005 International Conference on Neural Networks & Brain (ICNN&B05). China Neural Networks Council (CNNC), IEEE Computational Intelligence Society Beijing Chapter, 2005: 4.

表1 分割处理效果图像统计

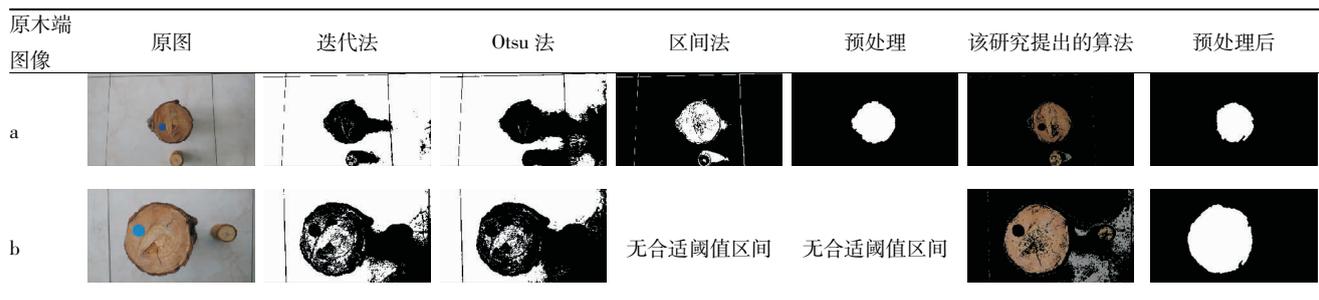


表2是用该研究提出的算法测算原木端面图像图1(a)的参数以及实际检尺的参数信息统计表。从表2分析得到,外接矩形内接椭圆算法测算的原木材积,与人工检尺得到的结果相比较,相对误差小于0.5%。

通过统计多幅图像的原木端面参数测算结果,得出该研究提出算法的原木材积测算结果与实际检尺测得结果相比较相对误差很小。

表2 原木端面参数统计

参数	标尺圆	实际检尺	内接椭圆
像素短径//pix	29.017 2		157.963 1
实际短径//cm	1.900 0	10.200 0	10.343 2
像素长径//pix	29.017 2		161.641 2
实际长径//cm	1.900 0	10.800 0	10.584 0
直径均值//cm	1.900 0	10.500 0	10.463 6
原木长度//m		10.000 0	10.000 0
原木材积//m ³		0.181 5	0.180 6
材积误差//%			0.480 0

4 结语

该研究针对在分割灰度图像的过程中,由于目标图像灰度值与阴影灰度值相近,常常产生将阴影误分割为目标的问题,提出了一种基于RGB颜色空间的彩色图像分割算法,首先在图像中选定样本,然后根据样本的彩色阈值区间对图像进行分割的算法。试验表明,该算法在保留更多原木端面图像像素点的同时,消除了大部分阴影的干扰,明显优于基于灰度图像的阈值分割方法,分割结果图像优化处理后,能够

完整地反映出原彩色图像中的原木端面,该分割算法是一种切实可行的原木端面图像分割算法。该研究为了模仿人工检尺求取原木材积的方法,采用目标图像的最小外接矩形的内接椭圆进行原木端面图像参数测算,结果表明,根据提出的算法测算得到材积大小与实际检尺测得结果相比较相对误差很小。

参考文献

- [1] 梅振荣,任洪娥,朱滕.基于非线性最小二乘原理的原木端面识别算法[J].计算机工程与应用,2012,48(2):177-178.
- [2] 辛颖,薛伟.原木端面面积的数字图像检测方法研究[J].吉林林业科技,2008,37(6):36-39.
- [3] 杨康叶,郭春学.基于RGB模型颜色相似性的彩色图像分割[J].计算机系统应用,2013(3):128-131.
- [4] 刘明媚.基于区域显著性的彩色图像分割[J].电子设计工程,2013,21(18):133-135.
- [5] 刘越,彭宏京,钱素静.基于核空间LLE的彩色图像分割方法[J].计算机科学,2013,40(06A):180-183.
- [6] 梅振荣.基于端面图像处理的原木径级识别算法研究与实现[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [7] 赵亚凤,任洪娥.遗传算法和同态滤波在原木端面图像处理中的应用[J].东北林业大学学报,2014,42(2):129-132.
- [8] CHENG H D,JIANG X H,SUN Y,et al. Color image segmentation: Advances and prospects[J]. Pattern Recognition,2001,34(12):2259-2281.
- [9] 景林,林耀海,温永仙,等.结合色彩特征和空域特征的成捆原木轮廓识别[J].计算机系统应用,2013,22(7):196-199,191.
- [10] 杨璟,朱雷.基于RGB颜色空间的彩色图像分割方法[J].计算机与现代化,2010(8):147-149,171.
- [11] 刘明媚.基于区域显著性的彩色图像分割[J].电子设计工程,2013,21(18):133-135.
- [12] 林静静,魏云龙,陈建清,等.基于链码的原木端面图像检尺径级识别算法[J].厦门大学学报:自然科学版,2010(1):57-60.

(上接第8031页)

- [24] 王静文,刘弘.基于Snake模型的植物叶片面积计算方法[J].计算机工程,2013,39(1):234-238.
- [25] 邓小同,张兆璞.二值图边缘跟踪算法[J].计算机工程与设计,1985(1):7.
- [26] 贺忠海,王宝光,廖怡白,等.图像处理中的边缘跟踪法研究[J].仪器仪表学报,2001,22(3):261-262.
- [27] 周秀芝,陈洋,胡文婷.基于交叉点的树遍历二值图像边界跟踪算法[J].计算机应用与软件,2014,31(2):230-232.
- [28] 崔凤魁,张丰收,白露,等.二值图像目标邻域点法边界跟踪算法[J].洛阳工学院学报,2001,22(1):28-30.
- [29] 廖武鹏,邓俊晔,王丹.管道切片的三维重建[J].工程数学学报,2002,19(5):22-28.
- [30] 胡迪.植物叶片测量方法的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2011.
- [31] 岳利军,汪仁煌,黄颖怡.植物叶片特征参数的机器视觉提取方法[J].农机化研究,2009(5):170-173.
- [32] 刘洁玲.基于数学形态学的医学图像边缘检测[D].银川:宁夏大学,2008.

- [33] 赵芳,栾晓明,孙越.数字图像几种边缘检测算子检测比较分析[J].自动化技术与应用,2009,28(3):68-72.
- [34] 王雪,李伟,王伟.数字图像处理中边缘检测算子优缺点探讨[J].科技创新导报,2011(16):14-15.
- [35] CHI Y T,CHIEN C. Leaf shape modeling and analysis using geometric descriptors derived from bezier curves[J]. Transactions of the ASME,2003,46(1):175-185.
- [36] 曾庆茂,林慧秋,朱同林.基于小波描述子的叶片轮廓几何建模[J].计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(12):2046-2053.
- [37] 苏礼楷,王小铭.基于轮廓特征点检测的植物叶片几何建模[J].华南师范大学学报:自然科学版,2009(4):39-42.
- [38] 谢秋菊,苏中滨,孙红敏.大豆叶片三维重建及形变技术研究[J].农机化研究,2011(9):220-223.
- [39] 王静文,刘弘.基于B样条曲线的植物叶片几何建模[J].计算机应用研究,2013,30(5):1571-1573.
- [40] 杜德彭.基于功能特征的三维植物叶形构建方法研究[D].济南:山东师范大学,2013.