

基于 Matlab 的甘蔗茎节特征分布定位与试验*

黄亦其¹ 乔 曦¹ 唐书喜² 罗昭宇¹ 张培栋¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 以 Matlab 为开发平台,提出了一种对甘蔗茎节识别的方法。通过灰度处理和 Sobel 边缘提取对甘蔗节进行预处理,再结合数学形态学中的膨胀、腐蚀再膨胀对预处理后的不连续、细小边缘进行处理,消除甘蔗茎边缘及无用小边缘,获得甘蔗节的边缘直线。通过 Radon 函数进行直线提取,得出甘蔗节在 R 取得最大值时的位置坐标,为甘蔗种茎切割防伤芽装置的控制研究提供准确信息。试验表明甘蔗节识别率达 100%,其位置精确到 0.1 mm 级。

关键词: 甘蔗茎节 Matlab 伤芽 甘蔗切割 Radon 变换

中图分类号: TP391.41; S223.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0093-05

Localization and Test of Characteristics Distribution for Sugarcane Internode Based on Matlab

Huang Yiqi¹ Qiao Xi¹ Tang Shuxi² Luo Zhaoyu¹ Zhang Peidong¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A method for identifying sugar cane internodes was proposed based on Matlab. The cane internode was pre-processed by using gray processing and Sobel edge extraction. The mathematical morphology of expansion, corrosion and re-expansion was used to eliminate the edge of the sugar cane internode and unwanted small edge, so the edge of sugarcane internodes straight line was obtained. And then, the location coordinates of sugarcane internodes were got when R had its strongest value by using Radon function for straight line extraction. A theoretical basis of device of anti-bud injury in seedcane cutting was provided. The recognition accuracy was 100%, and the position accuracy was 0.1 mm.

Key words: Cane node Matlab Bud injured Cutting sugarcane Radon transformation

引言

以甘蔗为主要原料的甘蔗产业是广西的优势和特色产业,在广西经济发展中具有举足轻重的地位,是广西经济发展的重要支柱和帮助广大蔗农脱贫致富的经济来源^[1]。世界各甘蔗产地大都在一定程度上实现了甘蔗种植的机械化。国外的种植机具备良好性能、功能趋于完善,但尚未配备专业的防伤芽切断装置。国内的种植机则更难实现在蔗种切断过程中自动防伤芽的目的。在农业机械中,计算机视觉有着广泛的应用^[2~8],因此在甘蔗切割时可运用

计算机视觉技术有效防止甘蔗种植机在切割过程中的伤芽。目前国内外在此领域的研究都还处于起步阶段。相近研究有陆尚平等基于机器视觉的甘蔗茎节特征提取与识别^[9],Moshashai 等利用灰度图像阈值分割的方法对甘蔗茎节识别作了初步研究^[10]。本文提出一种甘蔗茎节识别方法,通过灰度处理、Sobel 边缘提取、结合数学形态学中的膨胀和腐蚀,获得甘蔗茎节的边缘直线,达到识别甘蔗茎节的目的。

1 甘蔗茎节形态特征参数分析

以黑蔗、糖料蔗和白竹蔗这 3 种最常见的甘蔗

收稿日期: 2012-11-13 修回日期: 2013-03-01

* 国家自然科学基金资助项目(20100627)

作者简介: 黄亦其,副教授,博士,主要从事农业机械化及其自动化研究, E-mail: hyqgxu@tom.com

为研究对象,如图 1 所示。通过观察,甘蔗芽都是长在紧挨着甘蔗茎节旁边并在甘蔗种的一侧,在摄像头采集图像的过程中可能会拍摄不到蔗芽,因此不能直接通过识别蔗芽的方法来达到防伤芽的目的。而甘蔗种的茎节具有环绕蔗种一周的特征,不管角度如何变化都可以识别出甘蔗种的茎节。因此本文通过对甘蔗种茎节的识别间接获得蔗芽的位置以达到准确识别蔗芽的目的,为研究防伤芽控制系统提供准确信号。尤其是甘蔗种茎节在平面上的投影是一条近似直线这一特征,为蔗芽提供了识别的依据。

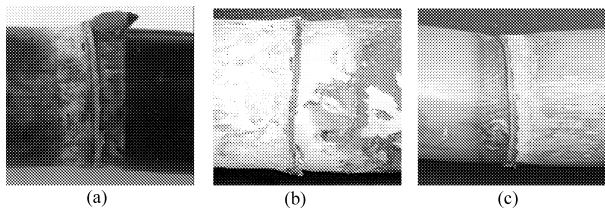


图 1 甘蔗茎节原图像

Fig. 1 Original image of sugarcane internode

(a) 黑蔗 (b) 糖料蔗 (c) 白竹蔗

2 图像分析处理

采用 MVC360MF 彩色/黑白摄像头在普通光源下采集图像,曝光时间 0.17 s。摄像头和计算机通过 USB 接口连接,采集到的图像直接存入计算机硬盘。计算机操作系统是 Microsoft Windows XP,图像处理软件为 Matlab 7.0。

为准确提取图像中的有用信息,对图像预处理是很有必要的。为了快速识别出甘蔗节,采用目前常用的灰度调整、边缘提取处理方法对原始图像进行预处理,并通过数学形态学对预处理的图像进行膨胀和腐蚀。

在 Matlab 7.0 中,可以使用 `rgb2gray` 函数进行 RGB 图像到灰度图像的结构转变。本文采用 `rgb2gray` 函数语法 `I = rgb2gray( RGB )`,将真彩色图像 RGB 转换成灰度图像 I。程序运行结果如图 2 所示。

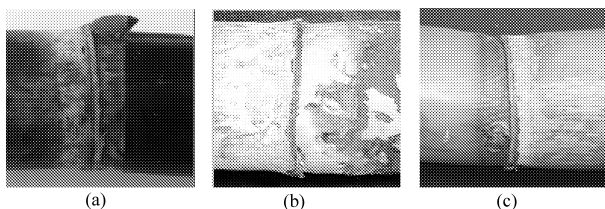


图 2 甘蔗茎节灰度处理

Fig. 2 Grayscale processing of sugarcane internodes

(a) 黑蔗 (b) 糖料蔗 (c) 白竹蔗

2.1 Sobel 算子不同方向检测比较

Sobel 算子是一组方向算子,从不同的方向检测边缘。Sobel 算子不是简单求平均再差分,而是加强

了中心像素上下左右 4 个方向像素的权重,运算结果是一副边缘图像。该算子通常由下列计算公式表示

$$f_x(x,y) = f(x-1,y+1) + 2f(x,y+1) + f(x+1,y+1) - f(x-1,y-1) - 2f(x,y-1) - f(x+1,y-1) \quad (1)$$

$$f_y(x,y) = f(x-1,y-1) + 2f(x-1,y) + f(x-1,y+1) - f(x+1,y-1) - 2f(x+1,y) - f(x+1,y+1) \quad (2)$$

$$G(f(x,y)) = \begin{cases} |f'_x(x,y)| + |f'_y(x,y)| & \text{(水平-垂直)} \\ |f'_x(x,y)| & \text{(水平)} \\ |f'_y(x,y)| & \text{(垂直)} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(x,y)$ ——图像点 (x,y) 的灰度

$f'_x(x,y)$ $f'_y(x,y)$ —— x 和 y 方向的一阶微分

$G(f(x,y))$ ——算子的梯度

求出梯度后,可设定一个常数 T ,当 $G(f(x,y)) > T$ 时,标出该点为边界点,其像素值设定为零,其他的设定为 255,Matlab 自动选择常数 T 的大小来达到理想效果。

以糖料蔗为例,使用 Sobel 算子在 3 个方向上进行了图像边缘探测,如图 3 所示。然后对 3 个方向上的边缘检测效果进行比较,选择合适的边缘检测算子。

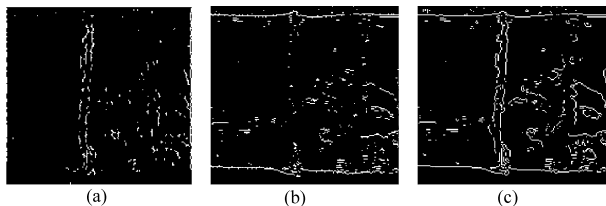


图 3 糖料蔗 3 个方向 Sobel 算子边缘检测

Fig. 3 Three directions of Sobel operator edge

detection for sugar cane

(a) 水平 (b) 垂直 (c) 水平-垂直

由图 3 可知,采用水平 Sobel 边缘检测效果最佳,可清晰识别出茎节,又可以消除甘蔗茎的外边界边缘直线的影响。采用水平 Sobel 算子边缘检测方法对黑蔗和白竹蔗进行处理,如图 4 所示。

2.2 小边缘膨胀腐蚀

数学形态学的 4 个基本运算是膨胀、腐蚀、开启和闭合,通过选择基本运算进行各种不同组合及针对每个运算选择不同尺寸和形状的结构元素可以实现各种不同的图像处理效果^[11-12]。

由 Sobel 边缘提取图像可知,提取茎节边缘后,茎节的边缘存在不连续、细小等现象,若直接对无用的小边缘进行腐蚀,则同时会把甘蔗茎节边缘一起



图 4 黑蔗和白竹蔗的水平 Sobel 边缘检测

Fig. 4 Level Sobel edge detection of black cane and white cane

(a) 黑蔗 (b) 白竹蔗

腐蚀掉。为了避免这种情况,本文先对 Sobel 边缘提取的图像进行膨胀处理,即

$$(f \oplus g) = \{z | (\hat{g})_z \cap f \neq \emptyset\} \quad (4)$$

运算后相当于 g 沿 f 边缘走一圈, g 的边界扫过区域加上 f 本身的区域就是膨胀的结果 z 的集合。

在 $M \times N$ 图像阵列中,定义目标 C_{ij} 的中心坐标为 (i, j) ,它与邻域目标 $C'_{ij}(k, l)$ 的邻域半径 r 可表示为

$$r = \{r | \max(|k - i|, |l - j|)\} \quad ((k, l) \in (M, N)) \quad (5)$$

为使图像膨胀后既清晰而又不至于过分夸大,采用最大邻域半径方法求结构元素,并取其中的最小值作为膨胀结构元素圆的半径,即 f 被 g 在 (x, y) 处的膨胀表示为

$$(f \oplus g)(x) = \min\{y : (\hat{g})_x + y \geq f\} \quad (6)$$

为了将图 3a 和图 4 边缘线加宽,采用像素半径为 2 的圆作为结构元素对茎节目标进行膨胀。同时边界附近的像素被赋值为零。程序为

```
se = strel('disk', 2);
```

```
WEIGHT = double(imdilate(WEIGHT, se))
```

程序运行结果如图 5 所示。

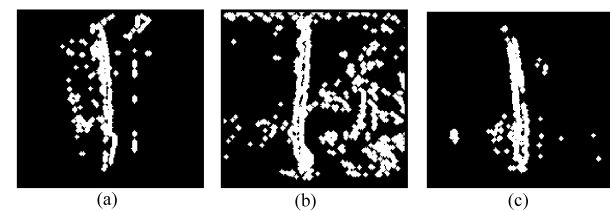


图 5 基于边界直径的方法进行膨胀

Fig. 5 Expansion based on boundary diameter

(a) 黑蔗 (b) 糖料蔗 (c) 白竹蔗

再对图像进行腐蚀处理,即

$$(f \ominus g) = \{z | (g)_z \subseteq f\} \quad (7)$$

运算后相当于 g 在 f 内行走, g 全部被 f 包含的区域就是腐蚀结果 z 的集合。在选取结构元素时,考虑需要去掉茎节主体部分以外的毛刺和小单元以及茎节主体部分趋向于一条水平的连通直线,因此本文使用两个线段结构元素: $se90$ 和 $se0$,其中 $se90$ 表示像素长 30、角度为 90° 的线, $se0$ 表示像素长

3.5、角度为 0° 的线。程序为

```
se90 = strel('line', 30, 90);
```

```
se0 = strel('line', 3.5, 0);
```

```
BW1 = imerode(WEIGHT, [se90 se0])
```

程序运行结果如图 6 所示。

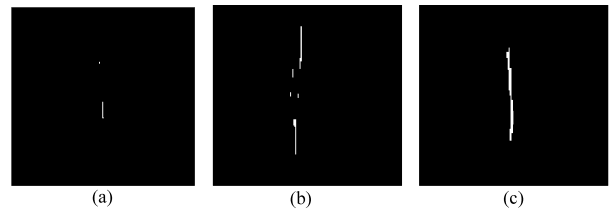


图 6 基于边界长度的方法进行腐蚀

Fig. 6 Corrosion based on boundary length

(a) 黑蔗 (b) 糖料蔗 (c) 白竹蔗

由图 6 可知,为了彻底去除无用的小边缘,也会对甘蔗茎节造成一定程度的腐蚀,甘蔗茎节的边缘被腐蚀成一段段小短线,这不利于后面的直线提取。因此对甘蔗茎节边缘图像进行基于结构因素为线段即基于边界长度的膨胀。结构因素选用 $se90$ 。程序为

```
BW2 = imdilate(BW1, [se90])
```

程序运行结果如图 7 所示。

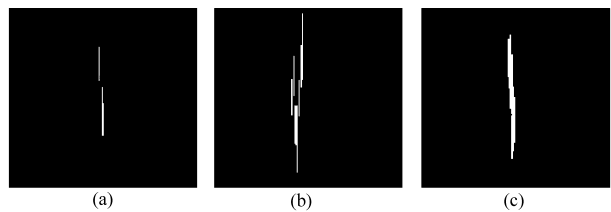


图 7 基于边界长度的方法进行膨胀

Fig. 7 Expansion based on boundary length

(a) 黑蔗 (b) 糖料蔗 (c) 白竹蔗

3 直线提取和甘蔗茎节位置定位

经处理后的目标图像线特征明显,而 Radon 变换函数在提取线特征方面具有很强的抗噪能力。一个二元函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换是该函数沿包含该函数的平面内的一组直线的线积分^[13],即

$$R_\theta(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (8)$$

式中 x' ——坐标原点 O 到直线的距离

θ ——直线与坐标轴之间的夹角,且 $\theta \in [0, \pi)$

而式(8)中 x', y' 分别与 x, y 有如下关系

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta + y \sin \theta \\ y \cos \theta - x \sin \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

把式(9)代入式(8)得

$$R_{\theta}(x\cos\theta+y\sin\theta)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x,y)d(y\cos\theta-x\sin\theta)$$

(10)

函数任意角度 Radon 变换的几何关系如图 8 所示。

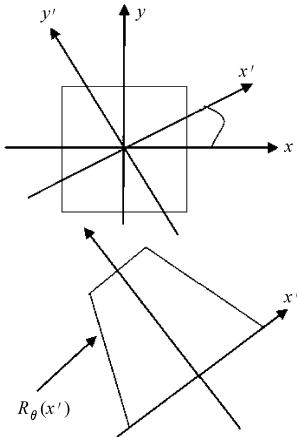


图 8 任意角度 Radon 变换的几何关系

Fig. 8 Geometric relationships of any-angle Radon transform

式(10)是将 $f(x,y)$ 沿着过原点角度为任意 θ 值的直线进行积分,以获得在任意 θ 处 $f(x,y)$ 沿着该直线的求和。

3.1 利用 Radon 变换检测甘蔗茎节边缘直线

以糖料蔗为例,建立如图 9 所示的坐标图像,图片像素为 180×170 ,中心像素即坐标原点在 (90, 85) 处。

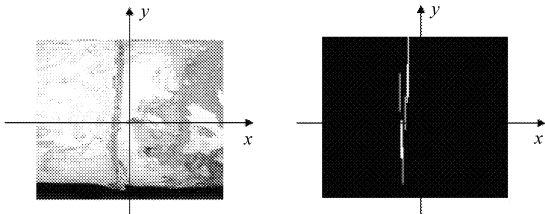


图 9 糖料蔗茎节原图像与边缘图像坐标

Fig. 9 Sugarcane internode of original image and edge image coordinates

利用 Matlab 中的 Radon 函数对糖料蔗的 Sobel 边缘图像进行直线提取。采用的 Radon 函数语法: $[R, xp] = \text{Radon}(I, \text{theta})$, 计算图像 I 在 theta 矢量指定的方向上的 Radon 变换, R 的各行返回 theta 中各方向上的 Radon 变换值, xp 矢量表示沿 x 轴相应的坐标值。图像 I 的中心在 $\text{floor}((\text{size}(I)+1)/2)$, 在 x 轴对应 $x=0$ 。

对图 7 中糖料蔗图进行直线提取,运行结果如图 10 所示。计算出 Radon 变换矩阵中的峰值,这些峰值对应于图 9 边缘图像中的直线。

采用同样的方法对黑蔗和白竹蔗茎节进行直线检测。

3.2 甘蔗茎节位置定位

在图 10 中可以清晰看出茎节边缘直线投影的峰值,峰值所对应的坐标即甘蔗茎节位置坐标。在识别甘蔗茎节时,通过 Radon 变换获得的投影直线的峰值来间接判断甘蔗茎节,从而确认正确的茎节位置。

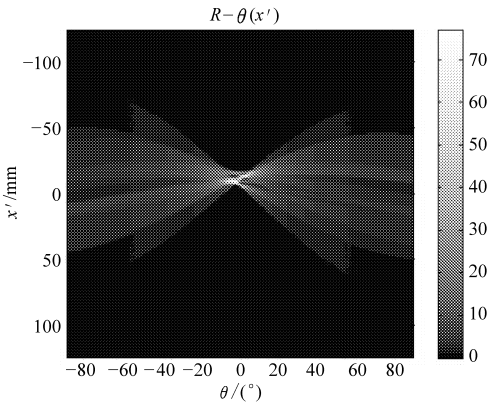


图 10 糖料蔗边缘图像的 Radon 变换

Fig. 10 Radon transform of sugarcane edge image

由 Radon 变换而来的图像可知,亮度占有一定区域或存在一个以上的亮点,这说明:茎节直线有重合或有多根直线,但这多根直线挨得很近并都是在甘蔗茎节节宽范围内,所以并不影响本文对甘蔗茎节位置的确认。

以糖料蔗为例(图 10),现在要求出当 R 取最大值时,对应的 x' 的值,即茎节直线距离坐标中心的距离。R 是一个 180×170 的二维矩阵, R 的最大值就出现在这个二维矩阵中最大元素的位置。故可通过 Matlab 编程求出 R 的最大值,并求出该点的坐标。即当 $\max R = 75.2418$ 时, $x' = -12 \text{ mm}$, $\theta = 3^\circ$ 。

之所以 θ 角是个非零值,是因为在图 10 中看到图像中有两根线,这两根线在 $\theta = 4^\circ$ 这个角度投影时 R 取得最大值。

同理,可求出黑蔗和白竹蔗的最大值 R 对应的 x' 和 θ 值。对于黑蔗:当 $\max R = 42.8505$ 时, $x' = 0$, $\theta = 4^\circ$; 对于白竹蔗:当 $\max R = 90.7042$ 时, $x' = -2 \text{ mm}$, $\theta = 4^\circ$, Matlab 从存储设备读入图像到算出茎节位置坐标的时间为 0.043491 s 。

4 试验结果及误差分析

从大量的甘蔗种中随机抽取 20 组糖料蔗试验样品进行试验,将实际茎节坐标 x 与通过 Radon 提取的边缘直线的位置 x' 进行统计分析,如图 11 和表 1 所示,验证本文所提出的甘蔗种茎节识别的准确性。

图 11 中 Radon 变化坐标值与人工测量的坐标值相隔不远,有的甚至重合在一起。

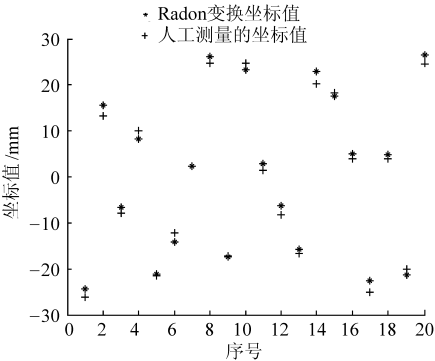


图 11 Radon 变换坐标值与人工测量值比较
Fig.11 Coordinate values comparison of Radon transform and manual measurement

表 1 黑蔗茎节坐标数据

Tab.1 Data analysis of black cane internode coordinate

序号 <i>N</i>	人工测量	Radon 变化	坐标值
	坐标值 <i>x</i> /mm	坐标值 <i>x'</i> /mm	误差/mm
1	-26.1	-24.3	1.8
2	13.3	15.5	2.2
3	-7.9	-6.7	1.2
4	10.1	8.2	1.9
5	-21.5	-21.1	0.4
6	-12.1	-14.2	2.1
7	2.4	2.4	0
8	24.8	26.1	1.3
9	-17.2	-17.4	0.2
10	24.8	23.3	1.5
11	1.5	2.9	1.4
12	-8.3	-6.2	2.1
13	-16.6	-15.8	0.8
14	20.3	22.9	2.6
15	18.3	17.5	0.8
16	3.9	5.1	1.2
17	-25.1	-22.5	2.6
18	3.9	4.8	0.9
19	-20.1	-21.3	1.2
20	24.6	26.5	1.9

另表 1 的试验数据分析统计显示,计算机运算出来的数据与实际测量的数据非常接近,平均绝对误差为

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sum |x'_i - x_i|}{N} = 1.405 \text{ mm}$$

标准差为

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2}{N}} = 0.73 \text{ mm}$$

绝对误差 $\Delta x_i = |x'_i - x_i|$,最大值为 2.6 mm。

而甘蔗的茎节宽度为 (10 ± 2) mm,绝对误差和标准差都远远小于甘蔗茎节宽度。因此对后续判断的影响并不大。

Matlab 算出来的数据误差非常小,可信度非常高。图像处理算法的精度是造成数据误差的主要原因。

5 结论

(1) 水平 Sobel 边缘检测比垂直和垂直 - 水平检测效果好,可清晰识别出茎节,又可以消除甘蔗茎的外边界边缘直线的影响。

(2) 采用最大邻域半径的方法求结构元素来膨胀目标区域,使目标区域加强但不至于过分夸大,为后续的腐蚀再膨胀处理提供理想信号。

(3) 利用 Radon 变换检测甘蔗茎节边缘直线,准确定位糖料蔗茎节位置当 $\max R = 75.2418$ 时, $x' = -12 \text{ mm}, \theta = 3^\circ$ 。

(4) 对算法进行了试验验证,100% 准确识别甘蔗节,并且甘蔗节的位置精确到 0.1 mm 级。数据误差小,可信度高。整个系统从采集图像到运算出甘蔗茎节位置坐标的总时间为 0.213491 s。

参 考 文 献

1 梁 闾,方锋学,王维赞,等. 广西甘蔗机械化生产现状及对策探讨[J]. 中国糖料,2011(1): 71~74.
Liang Tian,Fang Fengxue,Wang Weizan, et al. Guangxi's sugarcane mechanized production status and countermeasures[J]. Sugar Crops of China, 2011(1):71~74. (in Chinese)

2 刘禾,汪懋华. 用计算机图像处理技术进行苹果坏损自动检测的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(4):81~86.
Liu He,Wang Maohua. Automatic detection of defects on apple with the computer image technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(4): 81~86. (in Chinese)

3 van henten E J,van Tuijl B A J,Hemming J,et al. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering,2003,86(3):305~313.

4 Bulanon D M,Kataoka T,Ota Y, et al. A segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest[J]. Biosystems Engineering, 2002,83(4):405~412.

5 Regunathan M, Lee W S. Citrus fruit identification and size determination using machine vision and ultrasonic sensors[C]//2005 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 053017,2005.

6 王勇,沈明霞,姬长英. 采摘期成熟棉花不同部位颜色识别分析[J]. 农业工程学报,2007,23(4):183~185.
Wang Yong,Shen Mingxia, Ji Changying. Model and analysis od color for different parts of ripe cotton in picking period[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(4):183~185. (in Chinese)

- 8 Wright J, Yang A, Ganesh A, et al. Robust face recognition via sparse representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2): 210 ~ 227.
- 9 石娜. 基于 snake 和水平集的图像分割方法的研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- 10 Li Chunming, Xu Chenyang, Gui Changfeng, et al. Level set evolution without reinitialization: a new variational formulation[J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005, 1: 430 ~ 436.
- 11 田有文. 基于纹理特征和支持向量机的葡萄病害的识别[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 1 486 ~ 1 488.
Tian Youwen. A method of recognizing grape disease based on texture feature and support vector machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 1 486 ~ 1 488. (in Chinese)
- 12 王惠明, 史萍. 图像纹理特征的提取方法[J]. 中国传媒大学学报, 2006, 13(1): 49 ~ 52.
Wang Huiming, Shi Ping. Methods to extract images texture features[J]. Journal of Communication University of China Science and Technology, 2006, 13(1): 49 ~ 52. (in Chinese)
- 13 Rauhut H, Schnass K, Vandergheynst P. Compressed sensing and redundant dictionaries[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5): 2 210 ~ 2 219.
- 14 Candes E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 489 ~ 509.
- 15 Bruckstein A, Donoho D, Elad M. From sparse solutions of systems of equations to sparse modeling of signals and images[J]. SIAM Review, 2009, 51(1): 34 ~ 81.
- 16 Donoho D. For most large underdetermined systems of linear equations the minimal l_1 -norm solution is also the sparsest solution [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(6): 797 ~ 829.

(上接第 97 页)

- 7 姚立健, 丁为民, 赵三琴, 等. 基于 SOFM 神经网络的茄子图像分割方法[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(3): 140 ~ 144.
Yao Lijian, Ding Weimin, Zhao Sanqin, et al. Method of image segmentation for eggplant based on SOFM neural network[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2008, 31(3): 140 ~ 144. (in Chinese)
- 8 乔曦, 黄亦其. Matlab 在精密排种机监测装置中的应用研究[J]. 中国农机化, 2011(2): 108 ~ 110.
Qiao Xi, Huang Yiqi. The research of precise seed metering device based on Matlab [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(2): 108 ~ 110. (in Chinese)
- 9 陆尚平, 文友先, 葛维, 等. 基于机器视觉的甘蔗茎节特征提取与识别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 190 ~ 194.
Lu Shangping, Wen Youxian, Ge Wei, et al. Recognition and features extraction of sugarcane nodes based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 190 ~ 194. (in Chinese)
- 10 Moshashai K, Almasi M, Minaei S, et al. Identification of sugarcane nodes using image processing and machine vision technology [J]. International Journal of Agricultural Research, 2008, 3(5): 357 ~ 364.
- 11 Sanet H. Connected component labeling using quadrees[J]. Journal of the ACM, 1981, 28(3): 487 ~ 501.
- 12 朱景福. 图像处理中小边缘消除方法研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(3): 79 ~ 82.
Zhu Jingfu. Research on method of eliminating small edge in image processing[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2006, 18(3): 79 ~ 82. (in Chinese)
- 13 Galigekere R R, Holdsworth D W. Moment patterns 3n the radon space[J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 1 088 ~ 1 097.

(上接第 182 页)

- 15 Gurung A, van Ginkel S W, Kang W C, et al. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: a lab-scale study [J]. Energy, 2012, 43(1): 396 ~ 401.
- 16 李秋敏, 杨斌, 张无敌, 等. 蔗糖发酵产氢与产甲烷能源转换效率的研究[J]. 云南师范大学学报, 2011, 31(增刊): 97 ~ 104.
Li Qiumin, Yang Bin, Zhang Wudi, et al. Study on the energy conversion efficiency of hydrogen and methane fermentation of saccharose [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2011, 31(Supp.): 97 ~ 104. (in Chinese)
- 17 Guerrero L, Omil F, Mendez R, et al. Anaerobic hydrolysis and acidogenesis of wastewaters from food industries with high content of organic solids and protein [J]. Water Research, 1999, 33(15): 3 281 ~ 3 289.
- 18 Lier J B V, Grolle K C, Frijters C T, et al. Effects of acetate, propionate, and butyrate on the thermophilic anaerobic degradation of propionate by methanogenic sludge and defined cultures[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59(4): 1 003 ~ 1 011.
- 19 Demirel B, Yenigün O. Two-phase anaerobic digestion processes: a review [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(7): 743 ~ 755.
- 20 Wang Q, Kuninobub M, Ogawa H I, et al. Degradation of volatile fatty acids in highly efficient anaerobic digestion [J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 16(6): 407 ~ 416.