

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.029

基于边缘曲率分析的重叠番茄识别*

项荣^{1,2} 应义斌¹ 蒋焕煜¹ 饶秀勤¹ 彭永石¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 中国计量学院质量与安全工程学院, 杭州 310018)

【摘要】 为提高重叠番茄的识别正确率,提出了一种基于边缘曲率分析的重叠番茄识别方法。该方法从二值图像中提取番茄区域的边缘,并且为进一步计算出边缘点曲率,对边缘点按逆时针方向进行排序。计算出边缘点曲率后,剔除掉曲率异常的边缘点。最后通过对各剩余边缘分别进行圆回归,实现重叠番茄的识别。为减小作业环境光照变化及枝叶遮挡等因素给识别带来的影响,采用了基于归一化色差的固定阈值分割方法,6条边缘识别准则及3条圆回归准则。119幅图像的试验结果表明,存在轻微遮挡的重叠番茄识别正确率为90.9%;遮挡率大于25%且小于50%时,识别正确率为76.9%;遮挡率大于50%时,识别正确率为23%。

关键词: 采摘机器人 番茄 识别 重叠 曲率

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0157-06

Recognition of Overlapping Tomatoes Based on Edge Curvature Analysis

Xiang Rong^{1,2} Ying Yibin¹ Jiang Huanyu¹ Rao Xiuqin¹ Peng Yongshi¹

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract

In order to improve the recognition accuracy, a method of overlapping tomatoes recognition based on curvature analysis of edge points was presented. Edges of tomatoes were extracted from binary image at first. Then curvature values could be acquired after edge points were sorted counterclockwise. The edge points with abnormal curvature values were abandoned. After circle regression for remaining edges, overlapping tomatoes could be recognized. In order to decrease the negative impact on recognition aroused from environmental lighting variation and occlusion caused by leaves and branches, threshold segmentation method based on normalization aberration, 6 rules for edge recognition and 3 rules for circle regression were adopted. The experimental results of 119 images showed that the recognition accuracy for overlapping tomatoes with slight occlusion was 90.9%, it was 76.9% when the occlusion rate was between 25% and 50%, and it was 23% when the occlusion rate was larger than 50%.

Key words Harvesting robot, Tomato, Recognition, Overlapping, Curvature

引言

果蔬采摘机器人是目前农业机器人研究领域的一个研究热点^[1-5]。采摘机器人视觉系统的主要功能是识别成熟果实,获取其大小及3-D信息^[6]。由于作业环境非结构化的特点,存在很多影响成熟果

实识别正确性的因素。果实的相互重叠就是其中的一个主要因素。目前,重叠果的识别方法主要包括Hough变换^[7-9]、分水岭算法^[10-12]以及几何学方法^[13-15]。这些重叠果识别研究中,存在识别正确率不理想的问题。这主要是由于果实自然生长形态的多样性,造成果实重叠情况的多样性,因此对识别算

收稿日期:2011-06-12 修回日期:2011-07-16

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10Z257)和国家自然科学基金资助项目(61105024)

作者简介:项荣,博士生,中国计量学院讲师,主要从事采摘机器人、机器视觉检测技术研究,E-mail: xr_rongge@cjlu.edu.cn

通讯作者:应义斌,教授,博士生导师,主要从事农产品无损检测技术研究,E-mail: yingyb@zju.edu.cn

法的适用性造成了一定困难。为提高重叠果的识别正确率,本文在对番茄边缘点进行曲率分析的基础上,提出通过圆回归实现重叠番茄识别的方法。

1 材料与 方法

1.1 设备与材料

试验设备包括:加拿大 PointGrey Research 公司的 Bumblebee2 双目立体相机,图像传感器分辨率为 1 024 × 768,基线长为 120 mm,镜头焦距 6 mm。1394 采集卡,型号为 MOGE MC561,带电源适配器。计算机为 Lenovo R400,CPU 为 Intel core 2 T6570,1 GB 内存。三脚架 1 台。编程环境为 VC++6.0。

试验所用植株在浙江大学实验农场大棚中种植,培育在花盆中,成熟后在大棚进行图像采集。采集时使用三角架固定双目立体相机,使用 Bumblebee2 自带的 digiclops DemoII 进行图像采集。采集时为自然光照明。采集距离为 400 ~ 600 mm。

1.2 图像分割

为减小环境光照变化对图像分割的影响,采用归一化色差的固定阈值分割方法

$$s = \frac{255(2R + B)}{2(R + G + B)} \quad (1)$$

式中 $R、G、B$ ——图像的三基色分量
 s ——图像的归一化色差

$$p(x, y) = \begin{cases} 1 & (s(x, y) \geq T) \\ 0 & (s(x, y) < T) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $s(x, y)$ ——图像中 x 行、 y 列像素的色差值
 T ——图像分割阈值,试验中 T 取 160
 $p(x, y)$ ——二值图像中 x 行、 y 列的像素值

图像分割完整流程如图 1 所示。当作噪声的小区域阈值设定为最大区域面积的 1/3。不同光照条件下图像分割效果如图 2 所示。

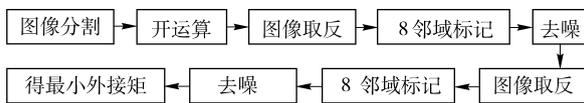


图 1 图像分割流程

Fig. 1 Flow chart of image segmentation

1.3 封闭边缘提取

目标封闭边缘直接从二值化图像中提取,有

$$e(x, y) = \begin{cases} 0 & (g(x, y) - g(x+1, y) = 0 \text{ 或 } g(x, y) - g(x, y+1) = 0) \\ g(x, y) & (g(x, y) - g(x+1, y) > 0 \text{ 或 } g(x, y) - g(x, y+1) > 0) \\ g(x+1, y) & (g(x, y) - g(x+1, y) < 0) \\ g(x, y+1) & (g(x, y) - g(x, y+1) < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $e(x, y)$ ——像素 (x, y) 的边缘标号

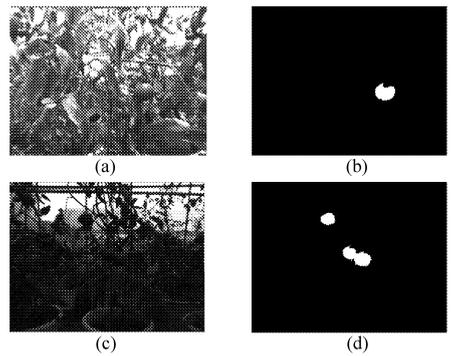


图 2 不同光照条件下图像分割效果对比

Fig. 2 Effect comparison of image segmentation under different illumination conditions

(a) 光照较强图像 (b) 图 2a 对应的二值图像
 (c) 光照较弱图像 (d) 图 2c 对应的二值图像

$g(x, y)$ ——像素 (x, y) 的区域标号
 $g(x+1, y)$ ——像素 $(x+1, y)$ 的区域标号
 $g(x, y+1)$ ——像素 $(x, y+1)$ 的区域标号

这样可以保证目标区域轮廓的连续性,以正确计算各边缘点的曲率,同时也简化了算法的复杂度。提取果实边缘后,计算各边缘点的曲率,对边缘点按逆时针方向进行排序,并记录其图像坐标,如图 3 所示。边缘排序完成后,选取最长边缘作为目标区域边缘。这样,即使当番茄边缘存在噪声导致边缘线出现打结的情况时,该边缘提取算法依然可正确提取番茄完整的封闭边缘。

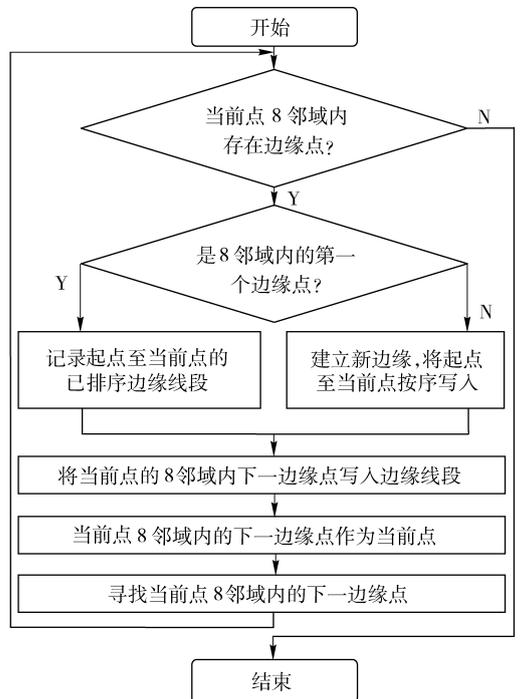


图 3 边缘排序算法流程图

Fig. 3 Flow chart of edge sorting algorithm

1.4 重叠果识别

重叠番茄包括前后重叠和粘连这两类生长状

态。重叠区域在果实边缘交界处，边缘点曲率会发生突变，被枝叶遮挡形成的边缘同样具有相似特征，利用这一特征可实现重叠区域边缘的分割。图4a中，2个粘连的番茄经图像分割后的二值图像如图4b所示，经边缘提取和排序后，可得到各边缘点的曲率^[15]。

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) & (x_2 > x_1 \text{ 且 } y_2 \geq y_1) \\ \pi + \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) & (x_2 < x_1) \\ 2\pi + \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) & (x_2 > x_1 \text{ 且 } y_2 < y_1) \\ \frac{\pi}{2} & (x_2 = x_1 \text{ 且 } y_2 > y_1) \\ \frac{3\pi}{2} & (x_2 = x_1 \text{ 且 } y_2 < y_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_2, y_2 ——后采样点的坐标
 x_1, y_1 ——前采样点的坐标
 θ ——两相邻采样点连线与 x 轴夹角

$$C = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2v + 1} \quad (5)$$

式中 v ——采样间隔，本研究中设为5
 θ_1 ——当前点到前一点连线与 x 轴夹角
 θ_2 ——后一点到当前点连线与 x 轴夹角
 C ——当前采样点的曲率

由图5可见，在粘连的2个交界点附近，边缘点的曲率明显异于非交界区域。将曲率异常点去除后，剩余的2段连续曲线分别为2个番茄区域的正常边缘，图4c中白色边缘为曲率正常边缘，不连续边缘为曲率异常边缘。

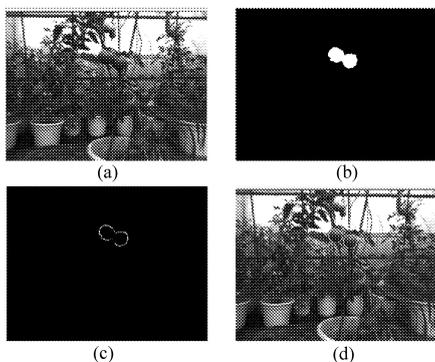


图4 重叠番茄识别过程

Fig.4 Process of recognition for overlapping tomatoes

(a) 原图 (b) 二值化图 (c) 边缘识别结果 (d) 圆回归结果

由于番茄轮廓近似圆形，所以利用圆回归实现其边缘拟合，进而实现重叠区域的相互分离^[16]。圆的一般方程为

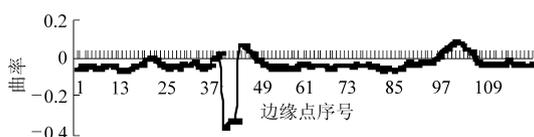


图5 番茄边缘曲率分布

Fig.5 Edge curvature distribution of tomatoes

$$E = x^2 + y^2 + bx + cy + d = 0 \quad (6)$$

式中 x, y ——圆上点坐标
 b, c, d ——方程系数

由于各边缘点不一定都恰好在同一圆上，因此不能保证所有边缘点的 E 值都恰好为0。各点与回归圆上相应点的偏差为

$$E_i = x_i^2 + y_i^2 + bx_i + cy_i + d \quad (7)$$

式中 x_i, y_i ——轮廓边缘点坐标

为使回归圆与番茄边缘最为接近，运用最小二乘原理，使各点偏差平方和最小，即

$$\sum_{i=1}^N E_i^2 = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + bx_i + cy_i + d)^2 \quad (8)$$

式中 N ——边缘点数

对各系数求偏导

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^N x_i(x_i^2 + y_i^2 + bx_i + cy_i + d) \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^N y_i(x_i^2 + y_i^2 + bx_i + cy_i + d) \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial d} = 2 \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + bx_i + cy_i + d) \end{cases} \quad (9)$$

当满足

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial c} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N E_i^2}{\partial d} = 0 \quad (10)$$

可求得圆回归方程的系数。运用高斯消元法，求解

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) x_i \\ - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) y_i \\ - \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

进而求得圆的回归方程,实现番茄边缘圆拟合。为验证拟合效果,将回归圆叠加到原图上,如图4d所示。

在实际作业环境中,由于枝叶遮挡、光照变化等原因,造成重叠果区域边缘经常存在噪声。单纯依据曲率进行边缘识别,会带来误判,因此,本文以如下准则作为番茄正常边缘的判断依据。将不满足其中任意一条准则的边缘判为伪边缘。其中,将被遮挡(包括因番茄相互重叠产生的自遮挡和被枝叶遮挡这两类情况)边缘称为伪边缘,将无遮挡边缘称为正常边缘。边缘识别准则:

(1) 准则1:边缘点曲率在 $[c_{\min}, c_{\max}]$ 范围内。

(2) 准则2:相邻边缘点的曲率差绝对值小于 c_t 。

(3) 准则3:相邻边缘点的曲率差累加和的绝对值小于 c_{tsum} 。

(4) 准则4:连续满足准则1~准则3的边缘点的点数大于等于 t_p 。

(5) 准则5:若两正常边缘线段间的伪边缘点数小于 f_p ,则将该伪边缘改判为正常边缘。

(6) 准则6:线段长度大于等于轮廓上边缘点总数的 $1/n$ 。

其中, c_{\min} 、 c_{\max} 、 c_t 、 c_{tsum} 分别表示无遮挡边缘曲率的最小值、最大值,两相邻边缘点曲率差绝对值的最大值,起始点到当前点相邻边缘点曲率差累加和绝对值的最大值。 t_p 指起始点到当前点,同时满足准则1~3的连续边缘点数的最小值。 f_p 指两正常边缘间连续伪边缘点数的最大值。 n 指边缘总长与被当作正常边缘的长度最小值的比值。准则1~3用于判断边缘点曲率及其变化趋势是否正常。准则4用于去除伪边缘上误判为正常的噪声点。准则5可避免正常边缘点被误判为伪边缘点。准则6用于去除长度较短且被判为正常的边缘。图6a为图7a中的区域边缘经准则1~3识别后的结果,白色的为正常边缘。图6b为图6a经准则4~6处理后的结果,图6a中短白色边缘被去除,而两长白色边缘间的误判为伪边缘的短边缘被判为正常边缘,使两白色边缘合并为1条。

应用上述边缘识别准则提取出番茄正常边缘后,一个番茄的边缘经常会被分成多段,若直接进行圆回归,则会得到多个回归圆。为解决此类问题,制定了如下圆回归准则:

(1) 准则1:回归圆半径大于 r_{\max} 或小于 r_{\min} ,认为该圆异常,加以去除。

(2) 准则2:2个回归圆圆心间距小于 d_{n1} 或小于 d_{n2} 且半径都小于 r_{n1} ,认为相应2条正常边缘属于同

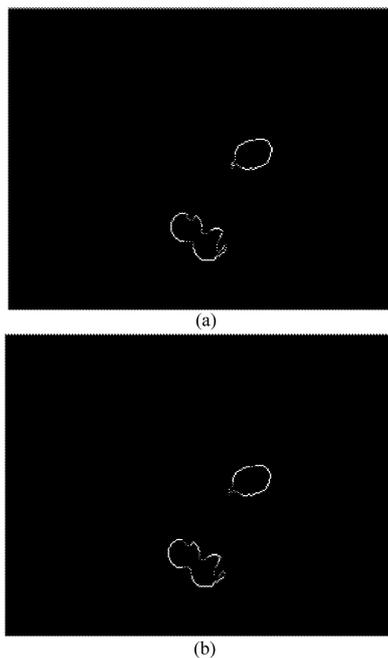


图6 边缘识别准则应用效果

Fig.6 Applications of edge recognition rules

(a) 番茄边缘 (b) 应用边缘识别准则后的番茄边缘

一番茄,将这2条边缘合并后,重新进行圆回归。

(3) 准则3:当由准则2合并得到的回归圆半径大于 r_{n2} 时,将该回归圆对应的多条正常边缘分别进行圆回归。

其中, r_{\max} 、 r_{\min} 表示圆半径的极值,通过对实际可能的最值留适当余量设定。 d_{n1} 表示认为两边缘属于同一番茄的回归圆圆心间距的最大值。 d_{n2} 表示当两边缘对应的回归圆半径小于 r_{n1} ,且回归圆圆心间距大于 d_{n1} 时,认为两边缘属于同一番茄的回归圆圆心间距的最大值。 r_{n2} 表示图像中番茄的最大半径。准则1用于去除半径异常的回归圆;图7d为图7a圆回归的结果,重叠区域存在2个半径较小的异常回归圆,图7e为图7b的圆回归结果,其中存在1个半径较大的异常回归圆,应用准则1后异常圆均被去除,分别如图7g、7h所示。当1个番茄的边缘被分成若干条线段时,应用准则2可实现该番茄边缘的圆回归;图7d中,单个番茄边缘经圆回归后,有2个回归圆,应用准则2后,合并为1个回归圆,如图7g所示。当2个果实区域重叠得较多的时候,应用准则2会错误地将2个重叠番茄识别为1个番茄,应用准则3可解决该类问题。图7f为图7c圆回归的结果,重叠区域内2个回归圆被错误地合并为1个回归圆,应用准则3,合并形成的大回归圆被拆分为合并前的2个回归圆,如图7i所示。

2 试验结果分析与讨论

对采集距离约为500 mm的70幅番茄图像中的

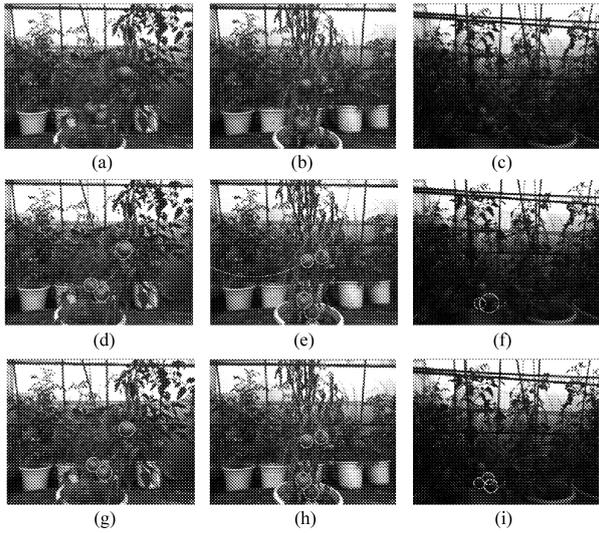


图 7 圆回归准则应用结果

Fig. 7 Applications of circle regression rules

(a) 情况 1 原图 (b) 情况 2 原图 (c) 情况 3 原图
 (d)、(e)、(f) 原图圆回归结果
 (g)、(h)、(i) 圆回归准则应用结果

71 个重叠区域进行试验,其中,1 幅图像存在 2 个重叠区域,其余 69 幅图像各存在 1 个重叠区域。70 幅图像中,25 幅图像中的 26 个重叠区域无被枝叶遮挡的情况,45 幅图像中的 45 个重叠区域存在被枝叶轻微遮挡的情况(被枝叶遮挡边缘长度与番茄轮廓周长比值小于 25%)。另外,70 幅图像中,3 幅图像的 3 个重叠区域同时存在粘连和前后重叠情况。试验结果如表 1 所示。算法的运行时间为 150 ~ 400 ms,且与图像采集距离及图像中番茄区域个数有关。表 1 的参数组 1 各参数设置如下:正常边缘识别准则中参数 c_{\min} 为 -0.15, c_{\max} 为 0, c_t 为 0.08, c_{tsum} 为 0.08, t_p 为 2, f_p 为 2, n 为 26。圆回归准则中参数 r_{\max} 为 30, r_{\min} 为 6, d_{l1} 为 10, d_{l2} 为 15, r_{n1} 为 15, r_{n2} 为 20。其中, c_{\min} 、 c_{\max} 、 c_t 、 c_{tsum} 、 f_p 、 r_{\max} 、 r_{\min} 、 d_{l1} 、 d_{l2} 、 r_{n1} 、 r_{n2} 的设定是参考 400 ~ 600 mm 采集距离范围内,图像中无遮挡番茄的相应参数,经试验设定。 t_p 、 n 的设定是在考虑去除较短伪边缘的同时,尽可能多地保留有用边缘的基础上经试验设定。参数的设置值对于在 400 ~ 600 mm 范围内采集的图像具有较好的适用性,而当图像采集距离偏离该范围时,则算法识别的准确性会相应降低。

表 1 重叠番茄识别试验结果

Tab. 1 Test results of overlapping tomatoes recognition

参数组号	类型	区域数	番茄数	正确数	正确率/%	平均正确率/%
1	粘连	39	92	85	92.4	84.0
	前后	35	82	62	75.6	
2	粘连	39	92	82	89.1	90.9
	前后	35	82	76	92.7	

为比较圆回归准则中的参数设置对两类重叠区域识别效果的影响,在表 1 参数组 2 的参数设置中,将圆回归准则 2 中的参数值调整为: d_{l1} 为 8, d_{l2} 为 12, r_{n1} 为 10,其余参数值不变。

试验结果表明,当参数设置为参数组 1 时,该方法对粘连果的识别正确率相对较高。粘连区域中,1 个果实后面有 1 个小番茄,造成该番茄轮廓变大,导致回归圆偏大;2 个番茄由于轮廓边缘存在颜色相近的枯叶,导致将枯叶边缘误判为正常边缘,并与番茄正常边缘合并,使回归圆半径偏大;4 个番茄由于果形为扁平椭圆,其曲率超出正常范围,导致所提取的正常边缘偏短,使回归圆偏小。20 个前后重叠番茄识别错误是由于前后重叠的番茄,重叠的面积较大造成对应回归圆的圆心间距过小,满足圆回归准则 2,导致 2 个番茄边缘合并为一段边缘,使回归圆覆盖了整个重叠区域。因此圆回归准则 2 中的参数设置过大会引起前后重叠番茄识别正确率下降。当参数设置为参数组 2 时,该方法对前后重叠果的识别准确率相对较高。粘连区域中,新增了 5 个错误识别的番茄,同时减少了 2 个因边缘存在枯叶而被错误识别的番茄。前后重叠区域中,减少了 14 个错误识别的番茄。因此,圆回归准则 2 中的参数 d_{l1} 、 d_{l2} 设置过小,会造成粘连番茄识别正确率下降。

为验证本算法对枝叶遮挡较严重(遮挡率大于 25%)情况下的重叠番茄的识别效果,对 49 幅图像中的 59 个存在较严重遮挡的重叠区域进行试验,结果如表 2 所示。

表 2 存在遮挡的重叠番茄识别试验结果

Tab. 2 Test results of occluded and overlapping tomatoes recognition

区域数	番茄数	遮挡率/%	番茄数	正确数	正确率/%
59	127	<25	27	26	96.3
		<50	39	30	76.9
		>50	61	14	23.0

遮挡率小于 25% 的番茄中,1 个番茄由于提取的正常边缘偏短造成回归圆偏小;遮挡率大于 25%,且小于 50% 的番茄中,6 个番茄的回归圆偏小,3 个番茄由于提取的正常边缘过短造成无相应的回归圆;遮挡率大于 50% 的番茄中,35 个番茄无相应的回归圆,8 个番茄的回归圆偏小,3 个番茄由于提取的正常边缘不正确导致回归圆位置不正确,1 个番茄的两回归圆由于圆心间距较大而没有合并。因此,枝叶遮挡造成所提取的番茄正常边缘偏短或过短是造成该类情况下重叠番茄识别错误的主要原因。

3 结束语

通过曲率分析的方法对重叠番茄识别进行了研究。为提高算法的环境适应能力,建立了6条边缘识别准则及3条圆回归准则。经70幅存在轻微遮挡的重叠番茄图像试验后,识别准确率达90.9%,表明本方法可较好地解决轻微遮挡下重叠番茄的识别问题。49幅存在较严重遮挡的重叠番茄图像试

验结果表明,当遮挡率大于25%且小于50%时,识别正确率为76.9%;当遮挡率大于50%时,识别正确率为23%。对前后重叠区域较大及存在较严重遮挡情况下的重叠番茄识别是目前研究存在的主要难点。另外,由于准则中各参数值的设置与图像采集距离有关,因此在以后的研究中,考虑利用双目立体视觉技术获取重叠番茄区域的粗略深度信息,融合该深度信息实现不同图像采集距离下参数值的自动选择。

参 考 文 献

- Jiménez A R, Ceres R, Pons J L. A survey of computer vision methods for locating fruit on trees[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1911~1920.
- van Henten E J, van Tuijl B A J, Hoogakker G J, et al. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 317~323.
- Foglia M M, Reina G. Agricultural robot for radicchio harvesting [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(6): 363~377.
- Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65~72.
- Rath T, Kawollek M. Robotic harvesting of *Gerbera Jamesonii* based on detection and three-dimensional modeling of cut flower pedicels [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 85~92.
- Kondo N, Ting K C. Robotics for plant production[J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1~3): 227~243.
- 谢志勇,张铁中,赵金英. 基于Hough变换的成熟草莓识别技术[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 106~109.
Xie Zhiyong, Zhang Tiezhong, Zhao Jinying. Ripened strawberry recognition based on Hough transform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 106~109. (in Chinese)
- 蔡健荣,周小军,李玉良,等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 175~178.
Cai Jianrong, Zhou Xiaojun, Li Yuliang, et al. Recognition of mature oranges in natural scene based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 175~178. (in Chinese)
- 姚立健,丁为民,赵三琴,等. 广义Hough变换在遮挡图像识别中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 97~101.
Yao Lijian, Ding Weimin, Zhao Sanqin, et al. Applications of the generalized Hough transform in recognizing occluded image [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 97~101. (in Chinese)
- 尹建军,毛罕平,王新忠,等. 不同生长状态下多目标番茄图像的自动分割方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 149~153.
Yin Jianjun, Mao Hanping, Wang Xinzhong, et al. Automatic segmentation method for multi-tomato images under various growth conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 149~153. (in Chinese)
- 赵金英,张铁中,杨丽. 西红柿采摘机器人视觉系统的目标提取[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 200~203.
Zhao Jinying, Zhang Tiezhong, Yang Li. Object extraction for the vision system of tomato picking robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 200~203. (in Chinese)
- 周天娟,张铁中,杨丽,等. 基于数学形态学的相接触草莓果实的分割方法及比较研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 164~168.
Zhou Tianjuan, Zhang Tiezhong, Yang Li, et al. Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 164~168. (in Chinese)
- Plebe A, Grasso G. Localization of spherical fruits for robotic harvesting [J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1): 70~79.
- Hui Gu, Lu Yaya, Lou Jilin, et al. Recognition and location of fruit objects based on machine vision [C] // 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, ICAT 2006, 2006: 785~795.
- 荀一,陈晓,李伟,等. 基于轮廓曲率的树上苹果自动识别[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007, 28(6): 461~464.
Xun Yi, Chen Xiao, Li Wei, et al. Automatic recognition of on-tree apples based on contour curvature [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2007, 28(6): 461~464. (in Chinese)
- 饶秀勤. 基于机器视觉的水果品质实时检测与分级生产线的关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.