

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.038

基于改进 Freeman 链码的柑橘簇生区域数量判别方法*

龚爱平 陈吉 裘正军 何勇

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

【摘要】 水果簇生区域的数量判别是图像处理技术的难点。提出了一种改进的 Freeman 链码,即在 Freeman 8 邻域链码的基础上插入了 3 个新的链码元素“S”、“8”和“9”。识别过程中,首先获得水果簇生区域二值图像的改进 Freeman 8 邻域链码,然后计数链码中“8”出现的次数,再根据研究对象的轮廓特性,计算出簇生区域的数量。利用该方法对柑橘树数字图像中簇生区域的柑橘数量进行了判别,实验结果表明,该方法对 2~5 簇生判别效果好,效率高,其中 2,3 簇生识别正确率为 100%。

关键词: 柑橘 重叠 簇生区域 图像识别 Freeman 链码

中图分类号: TP391.41; S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0203-06

Quantity Qualification of Overlapped Region for Citrus Image Based on Modified Freeman Chain Code Algorithm

Gong Aiping Chen Ji Qiu Zhengjun He Yong

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

Abstract

A modified Freeman chain code algorithm to determine the number of overlapped regions in citrus binary images was proposed. Three components, including S, 8, and 9, were inserted in the original Freeman code. During the identification process, the improved chain code was first obtained. Then the appeared times of code “8” was computed. The number of fruits in the overlapped regions can be obtained according to the outline of the fruits. The improved chain code algorithm was applied to evaluate the citrus images. The experimental results showed that the proposed algorithm was effective in identifying the overlapped fruits when the number of overlapped regions was between 2 and 3 where it achieved accuracy of 100%.

Key words Citrus, Overlap, Overlapped region, Image recognition, Freeman code

引言

预测柑橘产量是柑橘精细生产管理的重要内容^[1]。随着计算机技术的发展,机器视觉技术成为农产品估产研究中的一个热点^[2-4]。而快速与有效的图像分割识别一直是该邻域的瓶颈。对于自然条件下生长的果实,由于簇生,通常会存在相互重叠、遮挡等情况^[5-6]。邻接果实的识别成为基于机器视

觉技术判别的难点^[7],是影响果实估产准确率的关键因素之一。

目前,学者们对重叠区域的物体进行数量判别的研究大致可以分为两类。第一类是基于轮廓的方法,比如霍夫曼分割法、椭圆分析法、凹面分析法、生态分割法^[8-12]。在这些方法中,最经典的是霍夫曼分割法。霍夫曼分割法比较适合于寻找研究对象的轮廓,该物体的轮廓能参数化形成一个特殊的图形,

收稿日期: 2012-05-08 修回日期: 2012-06-11

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012AA101903)、国家自然科学基金资助项目(30600371)和教育部科学技术研究重点项目(109090)

作者简介: 龚爱平, 博士生, 主要从事基于嵌入式系统的生物生长信息采集处理技术研究, E-mail: 10913012@zju.edu.cn

通讯作者: 裘正军, 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息技术研究, E-mail: zjqiu@zju.edu.cn

如圆和椭圆。缺点是计算任务繁重,需要消耗比较多的时间和计算机内存^[13]。第二类是分水岭分割法^[14-18],被广泛用于分离重叠或接触的物体。优点是能够对每一个图像区域产生完整的封闭的轮廓曲线,但由于该方法不能解决图像中存在的噪声,因而容易引起超估。

链码是图像处理及模式识别中一种常用来表示线条、平面曲线及区域边界的编码技术^[19]。Freeman 链码因具备再现物体外形信息和缩减冗余数据的特性^[20-21]而被广泛用来代表一个物体外形。一条以数字代表方向向量的链码曲线,可以用来对物体的外形特性进行识别研究^[22]。本文通过对 Freeman 链码的 8 邻域链码进行改进,探讨一种适合识别簇生区域水果数量的方法。

1 Freeman 链码原理

Freeman 链码包括 4 邻域链码和 8 邻域链码(图 1),该链码沿着边界像素以 4 邻接或 8 邻接的方式移动,其交叉的中心点为当前边缘点,下一个边缘点必定在该点的邻域内,当前边缘点的上一个边缘点也在当前边缘点的 8 邻域内。4 邻域链码即链码沿着边界像素在垂直和竖直 4 个方向上移动,以数字集 $\{i|i=0,1,2,3\}$ 编码表示与 x 轴正向呈 $90^\circ i$ 的夹角,如图 1a 所示。图 1b 为 8 邻域链码,每一个移动方向由数字集 $\{i|i=0,1,\dots,7\}$ 进行编码,表示在与 x 轴正向的 $45^\circ i$ 夹角方向上移动。边界像素寻找过程和数码分配如图 1。

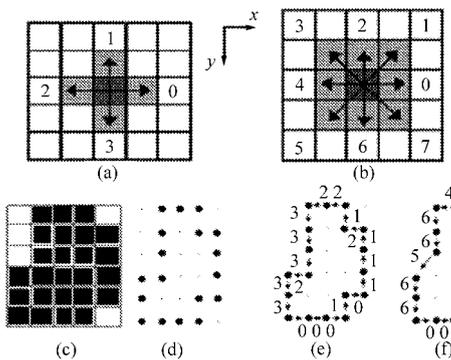


图 1 Freeman 链码表达物体轮廓示意图

Fig.1 Object outline with Freeman code

- (a) 4 邻域链码 (b) 8 邻域链码 (c) 物体二值图像
(d) 二值图像边界 (e) 4 邻域链码表示示意图
(f) 8 邻域链码表示示意图

这种用链码表示的边缘能够唯一表达原图像,从而在图像压缩、图像匹配、轮廓追踪等方面应用较多。如二值图像(图 1c),其 Freeman 4 邻域链码和 8 邻域链码的表示法分别是 223332330001011121 和 446656600012223。对于同一物体的边缘轮廓,

4 邻域链码表示法的链码比 8 邻域链码表示法的链码长。这导致 4 邻域链码对物体轮廓追踪的分析和处理时间要比 8 邻域链码长,而且,要消耗更大的内存。此外,8 邻域链码能从 8 个方向搜寻下一个链码,比 4 邻域链码表达的物体轮廓更形象。因而,8 邻域链码被更多应用。本文也是在 8 邻域链码的基础上进行改进。

2 实验材料与方法

实验设备包括: Dell 计算机(CPU E2200 @ 2.20 GHz, 2 GB 内存, 120 GB 硬盘, Win7 操作系统), 800 万像素 Sony 照相机, 集成开发套件 Eclipse (Eclipse Foundation), 面向对象的 Java (Sun Microsystems)。由于赣南脐橙为我国十大优势农产品之一,而永春芦柑则占福建省产量第一位,故实验材料选取 11 月底赣南脐橙(江西省赣州市,如图 2a 所示)和永春芦柑(福建省永春县,如图 2b 所示)。实验图片分别于 11 月底(柑橘成熟前两周)的晴天和阴天的早上 8:00~9:00 拍摄,共 50 幅,图片分辨率设置为 960 像素 \times 720 像素。

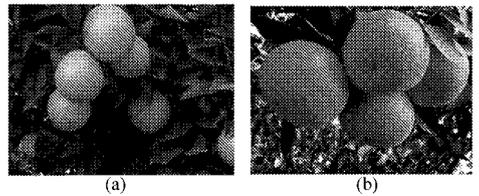


图 2 实验材料

Fig.2 Experiments materials

- (a) 赣南脐橙 (b) 永春芦柑

2.1 改进的 Freeman 链码

编码追求的目标是使被编成码的结构能够在更多的场合应用。因此提出一种新的链码编码方法以实现这一目标。为了便于识别簇生区域柑橘的数量,对 Freeman 8 邻域链码进行了改进,其方法是在 Freeman 8 邻域链码的基础上,增加 3 个新的链码元素,设为 S、8 和 9,其中“S”和“9”点分别代表二值图像轮廓的上端点和下端点,“8”点是寻找图像边缘轮廓的拐点。其具体操作过程为:

(1) 搜索起始点“S”,即上端点。选取研究区域图像像素中坐标 Y 值最小的点作为起始点,并标上符号“S”。如有几个点同时为最小值点,则选取其中 x 值最小的点为“S”。

(2) 边界搜索,寻找反向转动的拐点。即当某一边界点发生方向相反变化时,如由向上方向(包括正上、左上和右上)改为向下(包括正下、左下和右下)方向,或向左方向(包括正左、上左和下左)改

成了向右方向(包括正右、上右和下右)时,在变化点插入数字“8”。

(3) 选取分界点“9”,即下端点。在该区域图像中坐标 Y 值最大的点上标数字“9”作为分界点。如有几个点同时为最大值点,则选取其中 x 值最小的点为“9”。

(4) 重复步骤(2),直至搜索到“S”点,使链码形成一个封闭的链。

图 3a 所示二值图像的 Freeman 8 邻域原链码是 45556776001122323,改进 Freeman 8 邻域链码是 S45556877690011228323。常见的搜索顺序是按照顺时针方向从 0 开始搜索,搜索的目标就是下一个边缘像素点。目标边缘是未知的。有些应用^[23]也会根据具体的应用场合设定相对固定的搜索顺序,这种搜索的优点是针对性强,缺点是只对具体的应用有效。本文按照从上到下、先左后右的顺序扫描图像。当然也可以按照由下到上、从右到左的顺序。两者的区别只是扫描的顺序和起点不同,对下一个边缘点的搜索原理是一样的。

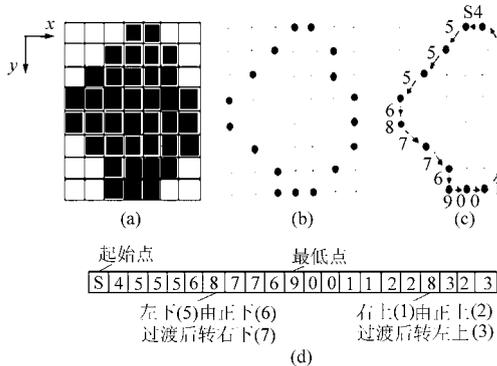


图 3 改进的 Freeman 8 邻域链码表达物体轮廓示意图

Fig. 3 Schematic diagram of object outline with modified Freeman 8-connectedness

Freeman 8-connectedness

(a) 物体二值图像 (b) 二值图像边界

(c) 链码表达物体轮廓示意图 (d) 编码过程

2.2 图像边缘平滑

图像的边缘质量对链码跟踪效果影响很大,因而,图像边缘平滑是保证算法稳定的关键。图像边缘平滑主要是为了消除图像中的噪声。在二值图像中,噪声通常表现为不规则的边界、小孔,丢失的角点和孤立点^[24]。图像平滑处理有很多种算法,其中数学形态学是根据形态学概念发展而来具有严格数学理论基础的科学,并在图像处理和模式识别邻域得到了成功应用。除了通常作为一种抽取图像中区域形状特征,如边界、骨骼和凸壳等的工具外,也经常用于图像的预处理和后处理,如形态学滤波、细化和修剪等。其基本的运算包括:二值腐蚀、膨胀、开和闭运算^[25-26]。

2.3 识别过程和判别方法

识别过程是首先将簇生区域的柑橘从以树枝和树叶等为背景颜色的图片中分割出来并二值化。然后对二值图像进行一次腐蚀和开运算处理。再在二值图像中的研究区域寻找起点和搜寻接下来的链码元素。获得改进的链码后,统计链码中“8”的个数,再根据研究对象的外形特性,可做进一步的判断分析,判别出簇生区域研究对象的数量。如柑橘和苹果的轮廓都是类椭圆形的,一个完整柑橘或苹果的轮廓,其改进 Freeman 链码中,“S-9”或“9-S”中只有一次“8”出现,也就是边缘的 x 值最小的点有一次由左向右的变化或 x 值最大的点有一次由右向左的变化。

判别方法是计算链码中“8”的出现次数 n ,判别原则是

$$Q = n/4 \quad (n \in \mathbf{N}) \quad (1)$$

式中, Q 是识别的柑橘数量, Q 值如果是小数则进位取整。除数取 4 是因为在柑橘图像中,正常情况下,单个柑橘的改进 Freeman 编码有 2 次“8”出现,2 簇生情况下有 6 个“8”出现,每增加 1 个柑橘便会增加 4 个“8”,即柑橘簇生区域新的 Freeman 链码中,有 $4n + 2$ 个“8”出现。自然环境下生长的柑橘树图像中,果实可能存在被树叶和树枝遮挡的情形。图像分割的过程中,这些树叶或树枝会给果实留下凹陷或把果实边缘削平。经过 50 幅图的实验分析,验证除数取 4 可以最大限度地消除这些干扰,也可以保证判别结果接近真实值。

在改进的链码中,还可以计算出单边的水果数量。同样计算链码中“8”的出现次数,此时的判别原则为

$$Q' = n'/2 \quad (n' \in \mathbf{N}) \quad (2)$$

式中, Q' 是识别的柑橘个数, Q' 值如果为小数则进位取整。除数取 2 的原理与式(1)中取 4 一样,每增加半个柑橘,链码中会出现 2 次“8”。

图 4d 所示改进 Freeman 8 邻域链码的简码中,“S-9”中“8”出现 6 次,由式(2)可判别有 3 个柑橘簇生。而“9-S”中“8”出现 10 次,由式(2)可判别有 5 个柑橘簇生。为了验证链码的计算结果,本方法还可以计算“S-9”中的单个柑橘总像素,再用该计算结果估计图中簇生区域的总柑橘数。可进一步验证该簇生区域存在 4 个柑橘,与链码识别结果相符。

3 算法应用

3.1 结果分析

为了验证改进 Freeman 8 邻域链码的实用性,

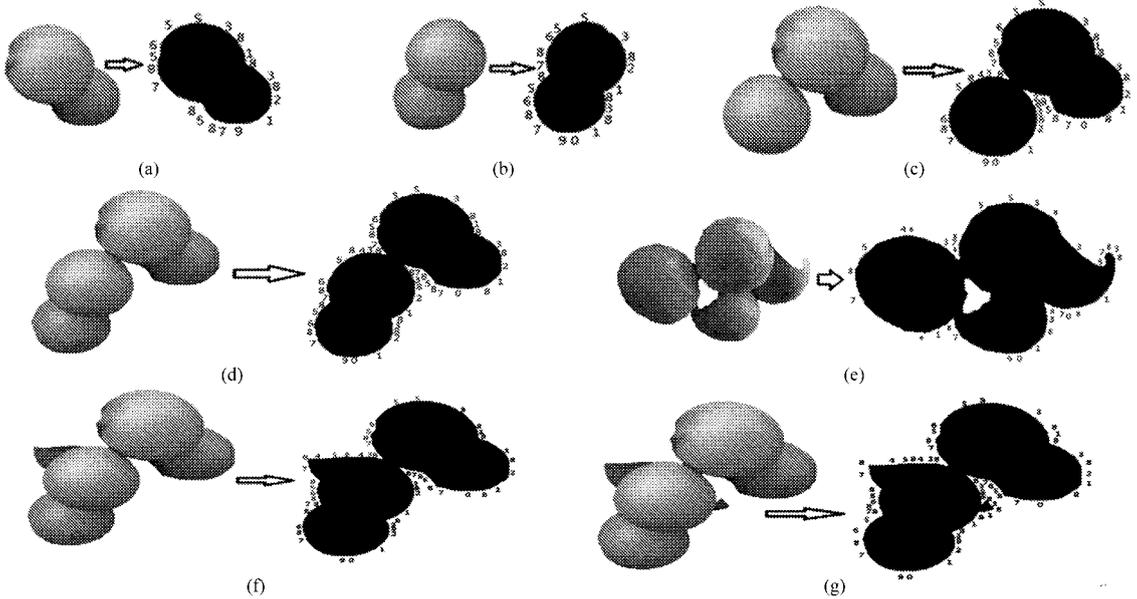


图4 2~6簇生改进 Freeman 8邻域链码简码

Fig. 4 Simplified and modified Freeman 8-connectedness of 2~6 overlapped citrus

(a) S565878587912838183 (b) S5687856879018381283 (c) S56587834856879012838785870812838183

(d) S565878348568785687901283812838785870812838183 (e) S58783845878187901838708183878383

(f) S56587834854878568785687901283812838785870812838183 (g) S5658783485487856878568790128381818385838785870812838183

本研究采用 Java 语言编写了上述算法并在集成开发环境 Eclipse 中成功调试。对自然条件下拍摄的 50 幅柑橘簇生的图像进行了识别实验。图 4 是柑橘 2~6 簇生的改进 Freeman 8 邻域链码的简化链码结果。这些简化的链码把详细链码中的重复数字进行了精简。从表 1 可以看出,该方法的识别结果和真实结果一致。

表 1 改进 Freeman 8 邻域链码判别柑橘簇生数量的结果
Tab. 1 Quantitation analysis results of overlapped citrus according to improved Freeman 8-connectedness

图像	改进 Freeman 8 邻域链码	"8"个数	识别数	真实数
图 4a	S565878587912838183	6	2	2
图 4b	S5687856879018381283	6	2	2
图 4c	S56587834856879012838785870812838183	12	3	3
图 4d	S565878348568785687901283812838785870812838183	16	4	4
图 4e	S58783845878187901838708183878383	13	4	4
图 4f	S565878348568785687901283812838785870812838183	18	5	6
图 4g	S56587834856878568790128381818385838785870812838183	21	6	6

表 2 是 2~6 簇生各 10 幅图的识别结果。2 簇生和 3 簇生可以全部准确无误的判别;4 簇生有 1 次失败,其判别数量比实际数量少 1 个;5 簇生有 2 次失败,其 2 次判别数量比实际数量都少 1 个;6 簇生有 4 次失败,错误判别识别出的平均值为 4.25。

因为实验对象选取的原因,7 簇生以上的现象很难找到,故没有提供相应的实验数据。

表 2 2~6 簇生柑橘各 10 幅图的识别结果

Tab. 2 Discriminant analysis results of 2~6 overlapped citrus

簇生数/个	错误识别数/幅	错误识别平均值/个
2	0	0
3	0	0
4	1	3
5	2	4
6	4	4.3

造成上述误判的原因有:① 柑橘果实被树叶和树枝多次遮挡切割,图像分割后,其一边轮廓变成一条直线。② 一个或几个柑橘正好落在重叠区域的正中,被其余 4 个柑橘包围,提取的图像轮廓中没有该柑橘的成分。③ 柑橘相互靠得比较紧凑,图像轮廓的 Freeman 链码方向改变点不明显,有的甚至被完全覆盖。④ 对二值图像做腐蚀和开运算处理过程中,一些转折点被抹去。

其中第 2 点是造成误判的主要原因。本方法由于引入了单个柑橘面积估算,即使是误判,判别的结果也比较接近真实值。

3.2 树叶遮挡分析

树叶遮挡产生的边缘突变也是影响计数准确的关键因素,但研究发现树叶和树枝的遮挡对本算法

造成的影响不是很明显。如图 5a 所示的 3 簇生图中, 柑橘 1 和 3 被不同的树叶遮挡。对图 5a 进行图像分割后, 叶尖在图像中产生了 2 个凹陷和 2 个凸显。柑橘 3 的图像轮廓中一个改进 Freeman 8 邻域链码的拐点被树叶消除了。此外, 柑橘 3 还有一拐点被柑橘 2 所遮挡。图 5a 最终的改进 Freeman 8 邻域链码的简码为 S56876856870810879128348564832812834854832434, 其中“8”出现 12 次, 根据式(1), 判断其为 3 簇生, 与实际相符。图 5b 为被多片树叶遮挡的 4 簇生情况, 柑橘 1 和 2 被同一树叶遮挡, 并把其各自二值图像轮廓的一个拐点消除; 柑橘 1 和 4 的交点被一树叶遮挡, 该树叶还把柑橘 1 的图像轮廓的一个拐点消除, 同时产生了 4 个新的拐点; 柑橘 4 还被另一树叶遮挡, 但此树叶遮挡不影响柑橘

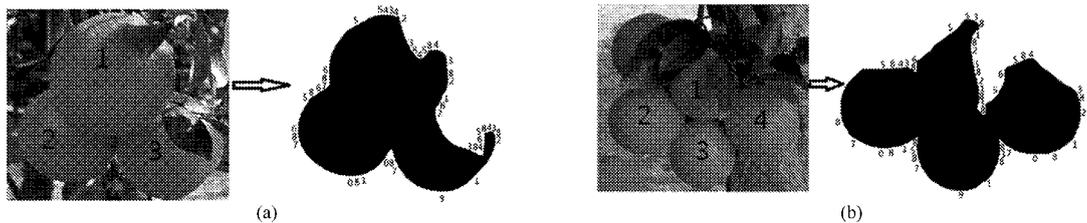


图 5 树叶遮挡情况分析

Fig. 5 Analysis of leaves shelter

(a) 3 簇生 (b) 4 簇生

4 结束语

提出了一种数字图像中柑橘簇生区域柑橘数量的判别方法。首先对 Freeman 8 邻域链码进行了改进。然后再根据柑橘的改进 Freeman 8 邻域链码计算柑橘簇生数量。该方法有以下优点: 计算量小, 转

4 的轮廓拐点。图 5b 最终改进 Freeman 8 邻域链码的简码为 S568348587081858791838708128348565838128328183, 其中“8”出现 16 次, 根据式(1), 判断其为 4 簇生, 与实际相符。

3.3 算法运行时间

运行时间是所有算法实用性评估的重要性能指标之一。本文提及的识别方法, 对二值图像进行一次腐蚀和开运算处理后, 只需再对图像进行二次扫描, 便能准确的识别出簇生区域的果实数量。而使用比较常见的 Canny 边缘检测算法都需要 3 次以上扫描。把彩色图像分割并转化为二值图像后, 利用本方法在 Dell 计算机 (CPU E2200 @ 2.20 GHz, 2 GB 内存, 120 GB 硬盘, Win 7 操作系统) 上运行, 所需时间不到 1 s。

化为二值图像后, 只需 2 次全图扫描, 便可以根据该链码进行判别; 合理地引入了 3 个链码元素, 使得算法的判别更贴近实际; 实验表明该算法能高效、准确的识别出 2 簇生和 3 簇生柑橘的数量, 4 簇生和 5 簇生的识别率也很高, 6 簇生的错误判别结果也接近真实值。

参 考 文 献

- 张亚静, 邓烈, 李民赞, 等. 基于图像处理的柑橘测产方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 97~99.
Zhang Yajing, Deng Lie, Li Minzan, et al. Estimation of citrus yield based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 97~99. (in Chinese)
- 张艳诚, 毛罕平, 胡波, 等. 作物病害图像中重叠斑分离算法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 112~115.
Zhang Yancheng, Mao Hanping, Hu Bo, et al. Separate algorithm for overlapping spots in crop disease image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 112~115. (in Chinese)
- 凌云, 王一鸣, 孙明, 等. 基于流域算法的谷物籽粒图像分割技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 95~98.
Ling Yun, Wang Yiming, Sun Ming, et al. Application of watershed algorithm to paddy image segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 95~98. (in Chinese)
- 洪添胜, 杨洲, 宋淑然, 等. 柑橘生产机械化研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 105~110.
Hong Tiansheng, Yang Zhou, Song Shuran, et al. Mechanization of citrus production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 105~110. (in Chinese)
- 王雅琴, 高华. 自然环境下水果图像分割与定位研究[J]. 计算机工程, 2004, 30(13): 128~129, 162.
Wang Yaqin, Gao Hua. Study on the segmentation and orientation of fruit image under natural environment[J]. Computer Engineering, 2004, 30(13): 128~129, 162. (in Chinese)
- 张亚静, 李民赞, 刘刚, 等. 基于机器视觉和信息融合的邻接苹果分割算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 180~183.
Zhang Yajing, Li Minzan, Liu Gang, et al. Separating adjoined apples based on machine vision and information fusion[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 180 ~ 183. (in Chinese)
- 7 项荣, 应义斌, 蒋焕煜, 等. 基于边缘曲率分析的重叠番茄识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 157 ~ 162.
Xiang Rong, Ying Yibin, Jiang Huanyu, et al. Recognition of overlapping tomatoes based on edge curvature analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 157 ~ 162. (in Chinese)
- 8 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 175 ~ 178. (in Chinese)
- 9 Wang Y C, Chou J J. Automatic segmentation of touching rice kernels with an active contour model[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1 803 ~ 1 811.
- 10 Mao K Z, Zhao P, Tan P H. Supervised learning-based cell image segmentation for P53 immunohistochemistry[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(6): 1 153 ~ 1 163.
- 11 Whittaker A D, Miles G E, Mitchell O R, et al. Fruit location in a partially occluded image[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3): 591 ~ 597.
- 12 Li S, Tan Y L. One rapid segmentation algorithm for quasi-circular fruits[J]. Recent Advances in Computer Science and Information Engineering, 2012, 128: 287 ~ 293.
- 13 Shen L, Song X, Manabu I, et al. A method for recognizing particles in overlapped particle images[J]. Pattern Recognition Letters, 2000, 21(1): 21 ~ 30.
- 14 陈英, 李伟, 张俊雄. 基于图像轮廓分析的堆葡萄果粒尺寸检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 168 ~ 172, 121.
Chen Ying, Li Wei, Zhang Junxiong. Overlapped grapes berry size inspection based on image contour analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 168 ~ 172, 121. (in Chinese)
- 15 吕强, 蔡健荣, 赵杰文, 等. 自然场景下树上柑橘实时识别技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 185 ~ 188, 170.
Lü Qiang, Cai Jianrong, Zhao Jiewen, et al. Real-time recognition of citrus on trees in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 185 ~ 188, 170. (in Chinese)
- 16 Beucher S, Lantuéjoul C. Use of watersheds in contour detection[C]//Proceedings of the International Workshop on Image Processing, Real-time Edge and Motion Detection/Estimation, Rennes, France, 1979.
- 17 Meyer F, Beucher S. Morphological segmentation[J]. Journal of Visual Communication and Image Represent, 1990, 1(1): 21 ~ 46.
- 18 Vincent L, Soille P. Watersheds in digital space: an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583 ~ 598.
- 19 Gao H, Lin W, Xue P, et al. Marker-based image segmentation relying on disjoint set union[J]. Signal Processing: Image Communication, 2006, 21(2): 100 ~ 112.
- 20 刘勇奎. Freeman 链码压缩算法的研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1 294 ~ 1 298.
Liu Yongkui. Research on the compression algorithm for Freeman chain code[J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(12): 1 294 ~ 1 298. (in Chinese)
- 21 Shahab W, Al-Otum H, Al-Ghoul F. A modified 2D chain code algorithm for object segmentation and contour tracing [J]. The International Arab Journal of Information Technology, 2009, 6(3): 250 ~ 257.
- 22 Freeman H. On the encoding of arbitrary geometric configurations [C]//Proceedings of IRE Translation Electron Computer, New York, 1961: 260 ~ 268.
- 23 Wilson G. Properties of contour codes[C]//Proceedings of IEEE Visual Image and Signal Processing, 1997: 145 ~ 149.
- 24 李君, 王敏, 黄心汉. 二值图像的自动表述[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(4): 74 ~ 76.
Li Jun, Wang Min, Huang Xinhan. Automatic representation of binary image[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(4): 74 ~ 76. (in Chinese)
- 25 King S F, Gonzalez R C, Lee C S G. Robotics: control, sensing, vision, and intelligence[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1987.
- 26 Burger W, Burge M J. 数字图像处理: Java 语言算法描述[M]. 黄华, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.