

基于改进分水岭算法的苹果识别方法

魏亚辉¹, 黄耿楠², 吴福培²

(1. 汕头技师学院, 汕头 515000; 2. 汕头大学 智能制造技术教育部重点实验室, 汕头 515000)

摘要: **目的** 针对自然生长环境下重叠苹果的识别问题, 提出一种基于距离变换机制的改进分水岭算法。**方法** 首先, 通过对比实验优选出苹果在 RGB、HSI 和 Lab 颜色空间的图像处理模型; 然后, 采用距离变换和归一化处理对苹果的位置特征进行内部标记; 进而基于锐化方法提高原图像的边缘强度, 并结合内部标记符改进分水岭算法, 实现苹果轮廓的分离; 最后, 基于最小外接圆法提取苹果的单连通区域, 实现重叠苹果的识别。**结果** 简化了目标与背景的分割过程, 通过内部标记法改进了分水岭算法, 实现重叠目标的轮廓重建, 解决重叠苹果的过度分割问题。**结论** 实验结果表明, 该算法对重叠苹果的准确识别率高于 92%, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 重叠苹果; 颜色空间; 距离变换; 分水岭

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)08-0255-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.08.034

Apple Recognition Method Based on Improved Watershed Algorithm

WEI Ya-hui¹, HUANG Geng-nan², WU Fu-pei²

(1. Shantou Technician College, Shantou 515000, China;

2. Shantou University, Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Shantou 515000, China)

ABSTRACT: Considering the recognition problem of overlapping apples in natural growing environment, an improved watershed algorithm based on distance transformation mechanism was proposed. Firstly, the image processing models of apple in RGB, HSI and Lab color space are optimized through comparative experiments. Then, the distance transformation and normalization methods were used to evaluate the internal label of apple's position characteristics. Then, the edge intensity of the original image was improved based on the sharpening method, and the watershed algorithm was improved based on the internal label to realize the separation of apple contours. Finally, the simply connected region of the apple was extracted based on the minimum enclosing circle method to realize the recognition of overlapping apples. The proposed method simplifies the segmentation process of target and background, improves the watershed algorithm through internal labelling method, realizes the contour reconstruction of overlapping targets, and solves the problem of over-segmentation of overlapping apples. The experimental results show that the accuracy of the algorithm is higher than 92%, which invalidates the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: overlapping apple; color space; distance transformation; watershed

农业服务机器人工作过程主要包括信息感知、路径规划和自主作业, 在提高生产力, 实现农业的规模

化, 精准化具有极大的优越性。由于农业生产类型多样化, 农业服务机器人具有多样性的特点, 其中水果

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 广东省科技计划项目 (190805145540361); 广东省自然科学基金项目 (2018A0303130188); 广东省普通高校重点领域专项 (2020ZDZX2005)

作者简介: 魏亚辉 (1992—), 男, 河南人, 硕士, 汕头技师学院讲师, 主要研究方向为机器视觉。

通信作者: 黄耿楠 (1997—), 男, 广东人, 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室硕士生, 主攻方向为机器视觉。

采摘机器人在降低成本、提高作业效率方面发挥越来越重要的作用。视觉系统作为水果采摘机器人不可分割的部分,在识别和分选中起关键作用。对果实识别和精确定位一直是采摘机器人视觉部分研究的热点和难点,关系到机器人的工作效率^[1-3]。然而,自然环境中,光照变化、果实重叠、被枝叶遮挡等外界因素均对图像质量及图像分割结果带来诸多挑战。

目前,针对重叠果实的识别与定位问题的研究已取得了明显进展。如文献[4]基于光谱聚类算法解决水果重叠问题,通过 Hough 变换实现识别定位,针对多个重叠果实的场景,其分割误差较大;文献[5]采用极值法实现重叠水果的定位,该方法在特定情景下具有较好的定位精度,却未考虑果实轮廓不完整的情况,因此,其适用性受限。文献[6]通过改进最大类方差法识别重叠果实,针对未被遮挡的果实,该方法可得出精确的目标边界,却未能有效分割被遮挡部分,且对自然光有一定的依赖性。文献[7]提出基于局部最大值对重叠圆定位方法,采用快速算法计算边缘最小距离,并通过最小距离确定半径和中心位置实现目标定位,但在果实边缘被枝叶遮挡情况下,易导致中心定位不准确。

针对上述问题,本次研究建立基于改进分水岭算法方法,解决多个苹果重叠或苹果被枝叶遮挡导致无法识别的问题。通过设计图像处理流程和优化算法参数,简化了目标区域与背景的分割过程,采用欧式距离变换和归一化处理方法进行内部标记,并结合改进的分水岭算法重建苹果轮廓,最后基于最小圆覆盖算法提取苹果的单连通域,实现目标识别。该算法有效解决了原始分水岭算法过分割问题,适用于苹果重叠或被遮挡的情形。

1 重叠苹果的识别算法

第一,建立苹果在 RGB、HSI 和 Lab 空间的颜色模型,运用形态学操作和阈值处理分割目标,通过对比分割结果选出苹果在上述三种空间中的最优分割模型。其次,将优选出的结果图像与原图层进行逻辑位与运算获得彩色苹果的分割图,进而通过拉普拉斯锐化方法增强重叠苹果边缘的对比度。第二,采用距离变换和归一化操作,将苹果的内部像素点与苹果边缘轮廓间的最短距离,以灰度值量化,苹果内部像

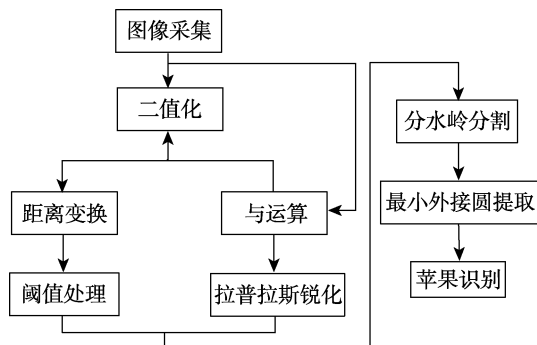


图1 苹果识别流程

Fig.1 The flow chart of apple identification

素点距离边缘轮廓越远,灰度值越高,从而在距离苹果边界最远的中心位置形成一块亮斑。第三,将变换得到的灰度图像进行二值化处理和形态学运算,形成重叠苹果的内部标记符,并结合锐化后的彩色分割图像进行分水岭算法处理,实现对重叠苹果轮廓的重建。第四,采用最小外接圆提取苹果单连通域,从而实现苹果的识别。基于上述设计思路,设计了重叠苹果的识别算法流程,见图1。

2 目标提取方法

在自然环境中,由于苹果被叶子、树枝遮挡或其他苹果相互重叠,采摘机器人无法精确定位每个苹果位置,需将苹果与背景分离,形成单独的目标区域,进而实现苹果区域的提取。本次研究通过图像二值化方法将苹果与背景分离,进而采用形态学运算、噪声消除、孔洞填充等方法处理图像中的空孔与噪声,为后续采用距离变换和分水岭算法处理图像建立基础。

从文献分析可知,颜色模型的选用直接影响彩色图像的二值化分析结果。在 HSI 模型中,对 H、S 通道分别进行 Otsu 动态阈值和固定阈值分割,并将分割后的图层进行合并可获得完整的目标区域。RGB 模型中,R-G 色差分量通过固定阈值分割可将苹果和背景分离。Lab 模型中 a^* 分量对图像红色区域较敏感,可有效地提取苹果区域^[8-11]。三种颜色模型的二值化结果见图2。

实验在 RGB 颜色模型中,计算 R-G 色差分量简单快捷,在目标与背景色差明显的情况下,具有良好

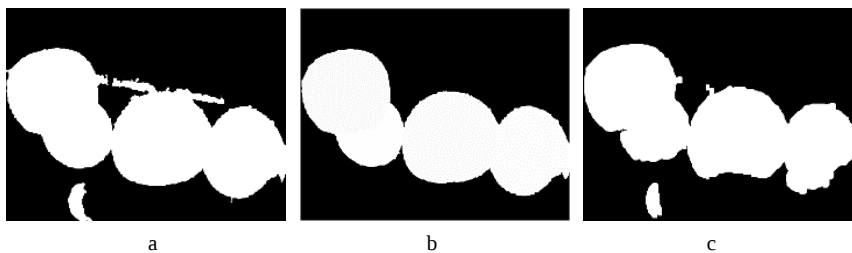


图2 三种颜色模型的二值化结果

Fig.2 Binarization results of three color models

表 1 对比不同颜色空间的分析结果
Tab.1 The analysis results comparison of different color spaces

颜色空间	A ₁ =385	A ₂ =326	A ₃ =284
正确分割/颗	373	312	265
R-G 分量 不能分割/颗	12	14	19
识别率	96.8%	95.7%	93.3%
正确分割/颗	378	315	271
a*分量 不能分割颗	7	11	13
识别率	98.1%	96.6%	95.4%
正确分割/颗	361	297	254
HS 分量 不能分割/颗	24	29	30
识别率	93.7%	91.1%	89.4%



图 3 原始图像 图 4 分割图像

Fig.3 The original image Fig.4 The segmented image

的分割效果。R-G 分量见图 2a。在 Lab 模型中，色域空间比 RGB 模型宽阔，a*分量包括从深绿色到亮粉红色区域，对成熟苹果的颜色可敏感识别，同时受光照强度的影响较小。Lab 空间的 a*分量见图 2b。HSI 颜色空间可平衡亮度与色调的敏感程度，H 分量与 S 分量之间相互补充，可弥补两个分量之间的检测缺点，具有良好的识别效果。HS 分量见图 2c。

为进一步分析与对比不同颜色模型的分割结果，选取无遮挡、有枝叶遮挡和重叠有遮挡三种情况的苹果图片包含 995 颗苹果信息。A₁ 为无遮挡的苹果数；A₂ 为有枝叶遮挡的苹果数；A₃ 为重叠且枝叶遮挡的苹果数，对比实验后的数据见表 1。

由表 1 可知，基于 Lab 颜色空间的 a*分量正确分割背景的概率，明显优于其他 2 种颜色模型，能对 3 种不同情况的苹果图像实现背景分离，具有较高的识别率。因此，在目标提取时，将图像转换到 Lab 颜色模型中，仅在 a*通道进行处理。

3 苹果边缘轮廓特征的增强方法

基于 Lab 颜色模型，通过对 a*分量二值化处理，将图像中的苹果区域与背景分离，但目标区域均为白色，粘连苹果之间不存在颜色梯度，难以对重叠苹果轮廓进行重建。论文通过二值图像和原图层进行位与运算操作，提取彩色苹果区域，即白色区域转换为彩色苹果图像，背景区域保持零像素值。具体表达如下：

$$R = B \& O \tag{1}$$

式中，R 为分割图像；B 为二值图像；O 为原图。

通过图层像素值之间的逻辑运算，将图 2b 和图 3 进行与运算，结果见图 4。

为增加重叠苹果之间的对比度，本次研究通过增大苹果边缘领域间像素的差值，使边缘部分变得更加明显，有利于后面分水岭算法分割重叠轮廓操作。

选用二阶微分 Laplace 算子进行图像锐化处理，该算子的邻域中心像素灰度值与它所在邻域平均灰度值呈正相关^[12]，且保持响应作用与图像突变方向无关，具有各同向性的特点。

一个二维图像函数 $f(x,y)$ 的拉普拉斯算子可定义为：

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{2}$$

x 方向上：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1,y) + f(x-1,y) - 2f(x,y) \tag{3}$$

y 方向上：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x,y+1) + f(x,y-1) - 2f(x,y) \tag{4}$$

将式（3）与（4）代入式（2），可得图像锐化的拉普拉斯算子：

$$\nabla^2 f(x,y) = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \tag{5}$$

进一步，通过式（5）的拉普拉斯算子系数，可得对应四邻域矩阵模板如下：

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

论文采用 H 模板进行锐化，处理结果见图 5，重叠苹果边缘对比明显增强。

4 图像特征的距离变换及归一化

通过分割获取彩色苹果区域，由于苹果相邻之间处于粘连状态，直接使用分水岭算法会导致过度分割。基于苹果轮廓特征，论文采用距离变换及归一化处理对苹果的位置特征进行内部标记，并结合分水岭算法实现苹果轮廓重建。

距离变换是针对二值图像的一种变换，处理的结果为一幅灰度图像，图像中每个像素的灰度值为目标区域内部像素点到背景轮廓最短距离的映射，距离背景边缘越远像素点灰度值越大^[13]。距离变换算法有欧式距离、城区距离和棋盘距离，其中，欧式距离是二维空间中两点之间的最短距离，计算精度高，本次研究采用该方法对二值分割图像进行处理。假设连通域边缘像素点坐标集合 $A\{(i,j)\}$ ，连通域内部像素点集合 $B\{(t,s)\}$ ，欧式距离计算公式为：



图5 锐化结果
Fig.5 The result after sharpening

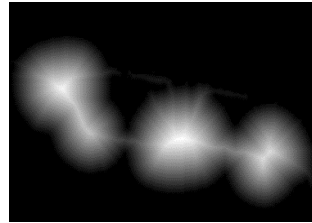


图6 距离变换结果
Fig.6 The result of distance transformation



图7 标记
Fig.7 The tag figure

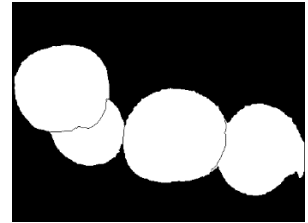


图8 轮廓分割图
Fig.8 The contour segmented figure



图9 边缘收缩
Fig.9 Edge contraction

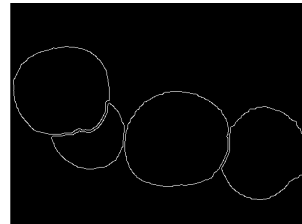


图10 边缘提取
Fig.10 Edge extraction

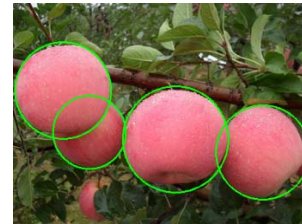


图11 目标提取
Fig.11 Target extraction

$$D[(i, j), (t, s)] = \sqrt{(i-t)^2 + (j-s)^2} \quad (7)$$

将目标区域中每个内部像素点到背景轮廓的最短距离构成集合 $S(x, y)$, Max 、 Min 为集合 $S(x, y)$ 中的最大值和最小值, $G(x, y)$ 为距离变换后连通域中像素点对应灰度值, 可得距离变换公式为:

$$G(x, y) = 255 \times \{S(x, y) - Min\} / (Max - Min) \quad (8)$$

为消除奇异样本数据产生的误差, 对距离变换后图像采用归一化处理, 将数据限定在 $[0, 1]$ 范围内, 其公式如下:

$$G(x, y)_{norm} = \frac{G(x, y) - G(x, y)_{min}}{G(x, y)_{max} - G(x, y)_{min}} \quad (9)$$

其中 $G(x, y)_{norm}$ 、 $G(x, y)_{max}$ 、 $G(x, y)_{min}$ 分别为归一化后数据、原始数据最大值和最小值。通过距离变换并归一化处理的结果见图 6。处理结果为一幅灰度图像, 在距离苹果边缘最远的中心位置的灰度值最高。

5 苹果轮廓特征的分割与提取

5.1 基于改进分水岭算法的苹果轮廓分割

为实现苹果轮廓分离, 本次研究采用分水岭算法实现粘连苹果轮廓的重建。分水岭算法是基于拓扑理论的数学形态学的分割方法, 基本思路是把数字图像映射为地形地貌图, 采用浸水模型^[14]实现对图像的分割, 本质上是一种从图像的局部极小值开始增长的区域增长算法, 但噪声和梯度变化不规律易造成过度分割, 其分割结果直接影响算法后续处理, 是当前亟需解决的问题。

为解决过度分割问题, 本次研究提出基于距离变换机制的内部标记, 改进了分水岭算法分割效果。采用标记符控制的分水岭算法是寻找一些内部标记和外部标记来引导算法, 防止过度分割, 要求内部

标记应在感兴趣物体的内部, 外部标记处于图像背景中, 采用内外部标记改进了图像梯度的规律, 并在该梯度模型上采用分水岭算法分割苹果轮廓^[15]。

通过欧式距离变换和归一化处理方法进行内部标记, 见图 7, 图中白色小区域是真正的内部标记符, 为方便观察将内部标记符叠加到分割图上, 彩色分割图像中的梯度规律发生变化, 并采用分水岭算法, 实现轮廓的分割和每个苹果区域颜色填充。

通过距离变换标记的分水岭算法, 可成功地实现重叠苹果轮廓的重建, 见图 8。

5.2 基于最小外接圆的苹果轮廓提取方法

通过分水岭算法得到每个苹果的边界, 为获取单个苹果的连通区域, 运用腐蚀方法缩进每个单连通域面积, 将粘连的苹果独立分离, 见图 9, 并采用 Canny 算子^[16]建立目标区域的边缘映射, 获取每个苹果有效边缘信息, 见图 10。

由于苹果的轮廓接近圆形, 本次研究考虑用轮廓最小外接圆方法提取苹果轮廓特征。将边缘算子提取的轮廓生成点集, 基于最小圆覆盖算法^[17], 实现对轮廓点集最小外接圆的提取。最小圆覆盖算法中, 给定有限点集 S , 则点集 S 的最小圆 B 满足:

$$B(c, r) = \{x: \|x - c\| \leq r\} \quad (10)$$

基于 n 个点的最小圆覆盖算法, 首先, 任意选取三个点 A 、 B 、 C 确定一个圆 R , 并找出距离该圆圆心最远的另外一点 D , 若点 D 在圆 R 的圆内或圆周上, 则圆 R 为所求的最小圆, 否则在 A 、 B 、 C 、 D 中选 3 个点, 求出包含这四个点的最小圆, 然后利用求得的最小圆, 继续寻找距离圆心最远的另外一点, 以此循环直到找出包含第 n 个点的最小圆。

通过最小覆盖圆算法处理, 提取轮廓最小外接圆 (见图 11), 最终成功实现对重叠苹果识别, 见图 12。

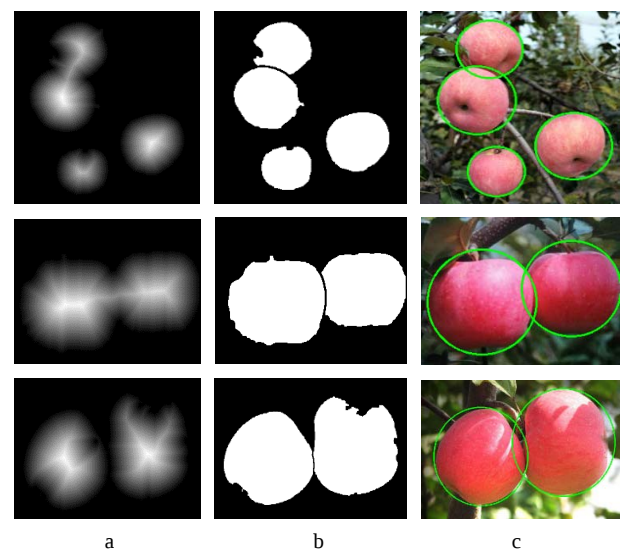


图 12 重叠果实识别结果
Fig.12 The recognition results of overlapping fruits

表 2 识别结果
Tab.2 The results of identification

	重叠遮挡	无遮挡	总计
苹果总数/颗	354	372	726
正确识别/颗	328	361	689
识别率/%	92.6	97.1	94.9
平均运算时间/s	0.213	0.184	0.198

6 实验结果与分析

本算法采用 C++语言实现，编译环境是 VS 2013 并配合 OpenCV2.4.9 软件库，所用计算机配置为 Window10 专业版，16G RAM，i5-10400F CPU。为了进一步检验所提算法的有效性和可靠性，随机采集 285 幅重叠苹果图片进行实验，其中包含 726 颗苹果信息。

识别结果见表 2。由表可得，在测试两组实验数据中，成功识别苹果共 689 颗，正确的识别率高于 92%，平均运算时间在 0.2 s 左右，证明该方法的可行性和高效性。其中测试图片分辨率大小影响算法运行时间，图片分辨率越低运算时间越短。本次研究算法在分辨率 500×500 以下的图片运算平均时间可控制在 0.2 s 以下。同时重叠遮挡情况下苹果的正确识别率为 92.6%，被遮挡区域的灰度值偏暗，在阈值分割和分水岭算法处理时会产生误差，影响识别率，算法对完整无遮挡苹果的识别具有良好的准确性，但存在边缘毛刺和噪声容易导致提取的外接圆偏大，影响目标定位精度。

7 结语

本次研究针对在非结构环境下重叠、被遮挡苹果

识别问题，提出一种基于欧式距离变换机制的改进分水岭算法识别重叠苹果的方法。(1) 通过对比实验优选出不同颜色模型的处理图像，并采用图层之间逻辑运算将彩色苹果区域提取出来，简化了目标与背景的分割过程；(2) 针对苹果区域粘连问题，采用距离变换和归一化方法进行内部标记改进图像梯度，并结合分水岭算法实现对苹果轮廓重建，可有效分割粘连苹果；(3) 基于最小圆覆盖算法，提取目标区域边缘点集的最小外接圆实现对苹果的识别。

通过实验结果显示，所提算法的准确识别率高于 92%，平均运算时间控制在 0.2 s 左右，验证了本算法的有效性和可靠性，对采摘机器人的视觉感知具有一定的通用性，为农作业产量预测与监控系统提供了可能解决方案和技术支持。

参考文献：

[1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18.
LIU Ji-zhan. Analysis on the Research Progress of Greenhouse Picking Robot Technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1-18.

[2] HE Z L, XIONG J T. A Method of Green Litchi Recognition in Natural Environment Based on Improved LDA Classifier[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140(8): 159-167.

[3] DA Zhao, WEI J. Design and Control of an Apple Harvesting Robot[J]. Biosystems Engineering, 2011(110): 112-122.

[4] 李大华, 赵辉, 于晓. 基于改进谱聚类的重叠绿苹果识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2974-2981.
LI Da-hua, ZHAO Hui, YU Xiao. Recognition Method of Overlapping Green Apples Based on Improved Spectral Clustering[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2974-2981.

[5] 赵德安, 沈甜, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人快速跟踪识别重叠果实[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 22-28.
ZHAO De-an, SHEN Tian, CHEN Yu, et al. Apple Picking Robots Fast Track and Identify Overlapping Fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 22-28.

[6] 苗中华, 沈一筹. 自然环境下重叠果实图像识别算法与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 21-26.
MIAO Zhong-hua, SHEN Yi-chou. Overlapping Fruit Image Recognition Algorithm and Experiment in Natural Environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 21-26.

- [7] JIAOY J H, LUO R. Detection and Localization of Overlapped Fruits Application in an Apple Harvesting Robot[J]. Electronics, 2020, 9(6): 1023.
- [8] LV J D, ZHAO D A. Recognition of Overlapping and Occluded Apple in Natural Environment[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(3): 2475-2484.
- [9] 王晓红, 卢辉, 黄中秋, 等. 基于颜色空间变换和 CNN 的自适应去模糊方法[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 224-233.
WANG Xiao-hong, LU Hui, HUANG Zhong-qiu, et al. Adaptive Deblurring Method Based on Color Space Transformation and CNN[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 224-233.
- [10] U J, SANG N. Detecting Citrus Fruits and Occlusion Recovery under Natural Illumination Conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015(110): 121-130.
- [11] 詹文田, 何东健, 史世莲. 基于 Adaboost 算法的田间猕猴桃识别方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 140-146.
ZHAN Wen-tian, HE Dong-jian, SHI Shi-lian. Field Kiwifruit Recognition Method Based on Adaboost Algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 140-146.
- [12] TALEBI H, MILANFAR P. Fast Multi-layer Laplacian Enhancement[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2016, 2(4): 496-509.
- [13] 徐超, 肖潇. 基于距离变换的新型骨架提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2851-2586.
- XU Chao, XIAO Xiao. A New Skeleton Extraction Method Based on Distance Transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2851-2586.
- [14] MAHMOUDI R, AKIL M, MAHMOUDI H. Concurrent Computation of Topological Watershed on Shared Memory Parallel Machines[J]. Parallel Computing, 2017(69): 7897.
- [15] 蔡强, 刘亚奇, 曹健. 一种基于自适应标记与区域间近邻传播聚类的分水岭图像分割算法[J]. 电子学报, 2017, 45(8): 1911-1918.
CAI Qiang, LIU Ya-qi, CAO Jian. A Watershed Image Segmentation Algorithm Based on Adaptive Labeling and Neighbor Propagation Clustering Between Regions[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 45(8): 1911-1918.
- [16] 李彦, 赵其峰, 李晓玲, 等. Canny 算子在 PCBA 目标边缘提取中的优化应用[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2096-2102.
LI Yan, ZHAO Qi-feng, LI Xiao-ling, et al. The Optimization Application of Canny Operator in PCBA Target Edge Extraction[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 2096-2102.
- [17] 陈洁, 方滨兴. 基于最小圆覆盖区域划分的索引过滤算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(10): 2139-2146.
CHEN Jie, FANG Bin-xing. Index Filtering Algorithm Based on Minimum Circle Coverage Area Partition[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(10): 2139-2146.