

刘 好, 刘 洒, 杨长辉, 等. 无遮挡重叠柑橘目标分割与重建[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1441-1449.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.025

无遮挡重叠柑橘目标分割与重建

刘 好^{1,2}, 刘 洒², 杨长辉^{1,2,3}, 王 卓², 熊龙烨²

(1. 重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054; 2. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054;
3. 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 自然环境下重叠果实的精准识别是智能采摘面临的难题之一。本研究针对无遮挡重叠柑橘, 提出了一种基于凹区域简化和距离分析的果实分割与重建方法。该方法提取、分割果实轮廓凹区域, 对其进行多边形简化, 利用角点检测提取多边形顶点, 通过分析各顶点到轮廓凸壳曲线的距离确定轮廓分割点, 采用最小二乘圆拟合方法对分割后的轮廓进行重建。结果表明, 基于凹区域简化和距离分析的无遮挡重叠柑橘重建轮廓的平均误差为 3.12%, 不重合度为 4.55%, 时间为 0.291 s, 优于 RANSAC 算法和 Hough 变换算法, 能够满足自然环境下无遮挡重叠果实的智能识别需求。

关键词: 智能采摘; 重叠分割; 轮廓重建; 凹区域提取; 距离分析

中图分类号: TP391; S666 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)06-1441-09

Segmentation and reconstruction of overlapped citrus without blocking by branches and leaves

LIU Yu^{1,2}, LIU Sa², YANG Chang-hui^{1,2,3}, WANG Zhuo², XIONG Long-ye²

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts of Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Accurate identification of overlapped fruits in natural environment is one of the problems that need to be solved in intelligent picking. In this study, a new method of segmentation and reconstruction for overlapped citrus without blocking by branches and leaves was proposed based on concave region simplification and distance analysis. After extracting and segmenting the concave area of the fruit, the polygon was simplified, the vertexes of the polygon were extracted by using the corner point detection, and the dividing point of the contour was determined by analyzing the distance from each vertex to the convex curve of the contour. On this basis, the segmentation points of the contour were determined, and the contour was reconstructed successfully by the least-squares ellipse fitting method. The results showed that the average error, non-coincidence and time of contour reconstruction for this kind of overlapped citrus based on concave region simplification and distance analysis were 3.12%, 4.55% and 0.291 s respectively, which were better than those of RANSAC algorithm as well as Hough transform algorithm. In conclusion, this method can meet the intelligent identification requirements of overlapped fruits without blocking by branches and leaves in natural environment.

Key words: intelligent picking; overlapped segmentation; contour reconstruction; concave area extraction; distance analysis

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztxz70003); 重庆理工大学研究生创新项目(ycx2018213)

作者简介: 刘 好(1974-), 女, 四川泸州人, 博士, 教授, 主要从事山地农业机械研究。(E-mail) liuyu_cq@126.com

通讯作者: 杨长辉, (E-mail) yangchanghui@cqut.edu.cn

柑橘是中国广泛种植的水果之一, 同时也是世界贸易量较大的一种水果。目前, 柑橘采摘主要以

人工方式为主,存在季节性突出,劳动强度大,成本高等问题。随着计算机技术的迅速发展,高新技术的采摘机器人可有效减轻人工作业强度,降低生产成本,而自然环境下重叠果实的精准识别是智能采摘面临的难题之一。

国内外针对果实重叠分割和轮廓重建开展了大量的研究。吕强等^[1]利用颜色特征分割柑橘图像,并采用标记控制分水岭算法分割重叠的果实目标。Rizon 等^[2]综合运用纹理分析、形态学运算、随机 Hough 变换等方法识别芒果,并对重叠果实进行椭圆拟合和中心定位。谢忠红等^[3]提出了一种基于凹点搜索的快速定位和重叠果实检测方法。Xu 等^[4]提出了一种采用支持向量机的 HOG 算子识别重叠草莓的方法。Xiang 等^[5]提出了一种基于双目立体视觉的重叠番茄识别方法。Lu 等^[6]融合色差信息和归一化 RGB 模型,通过长度、弯曲度和凹凸度等 3 个指标筛选轮廓的有效片段,并利用椭圆拟合有效片段实现了对被遮挡果实轮廓的重建。苗中华等^[7]提出了一种自然环境下重叠果实的图像识别与边界分割的组合优化算法。Feng 等^[8]通过链码差异的变化规律,采用局部最优原则寻求有效凹点,并利用有效凹点实现了对重叠苹果的分割。宋怀波等^[9]利用基于凸壳的方法分割了重叠苹果,并利用 Spline 插值算法实现了对重叠被遮挡果实的轮廓重建。徐越等^[10]利用角点检测算法寻找重叠苹果的真实分割点,并利用真实分割点连线实现了对重叠果实的分割。彭辉等^[11]为保留未被遮挡苹果重叠部分的轮廓信息,提出了基于视差图像的重叠果实分割算法。王丹丹等^[12-13]融合 K-means 聚类算法和 Ncut 谱聚类算法对重叠苹果进行分割,该方法能够保留图像中未被遮挡苹果的全部轮廓信息,但只能实现 2 果重叠的目标分割。

综上所述,对于重叠率较高的多果分割,现有的分割方法过程复杂且鲁棒性不强,常用的角点检测、极值点求解等方法存在多检或漏检的情况。为此,本研究拟针对无遮挡重叠柑橘开展重叠分割和轮廓重建研究,以期实现自然环境下无遮挡重叠果实的精准分割与识别,其研究路线如图 1 显示。

1 材料与方法

1.1 重叠柑橘图像获取及预处理

重叠柑橘原始图像通过自主研发的采摘机器人

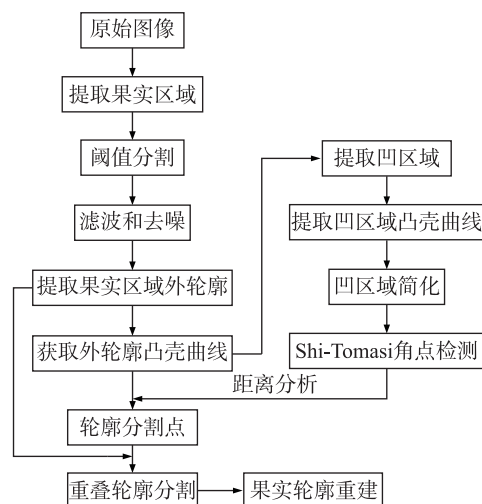


图 1 研究路线

Fig.1 Research route

视觉平台获取,该平台主要由相机(Bumblebee2)、1394 数据采集卡、计算机等组成。其中,计算机操作系统采用 Win7,图像处理软件采用 OpenCV3.10。本研究所涉及的无遮挡重叠柑橘图像均是 2018 年 12 月在重庆理工大学的柑橘种植基地通过机器人视觉平台采集的,图像的采集示意图如图 2 显示。

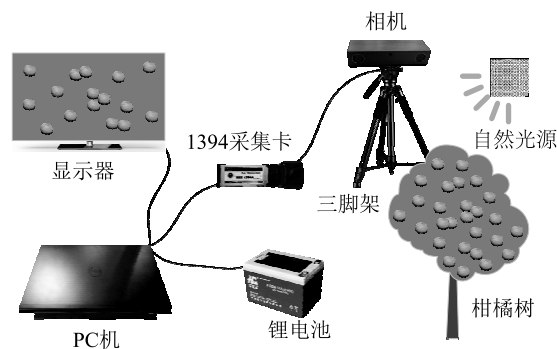


图 2 柑橘图像采集示意图

Fig.2 Schematic diagram of citrus image collection

通过对常见的颜色空间进行分析,发现 RGB 颜色模型对光线变化较为敏感,而 Lab 和 HSV 颜色模型是与设备无关的颜色空间模型,能够在一定程度上消除光线变化的影响。因此,本研究结合 Lab 和 HSV 颜色空间,基于颜色特征对柑橘区域进行提取。从 RGB 颜色模型转换到 Lab 颜色模型时,需要以 XYZ 颜色模型作为中间转换,通过公式(1)和公式(2)^[14]将柑橘原始图像转换到 Lab 颜色空间下的图像(图 3)。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412\ 55 & 0.357\ 58 & 0.180\ 42 \\ 0.212\ 67 & 0.715\ 16 & 0.072\ 17 \\ 0.019\ 33 & 0.119\ 19 & 0.950\ 23 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L = 116 \times f(Y/Y_n) - 16 \\ a = 500 \times [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b = 200 \times [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, R 、 G 、 B 分别表示 RGB、XYZ、Lab3 个颜色空间中 3 个颜色通道的灰度值; n 表示相应通道中第 n 个像素点; f 是一个校正函数, 按公式 (3)^[14] 计算。

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & x > 0.008\ 856 \\ 7.787x + \frac{4}{29} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 值由 XYZ 颜色空间的 3 个通道值决定。

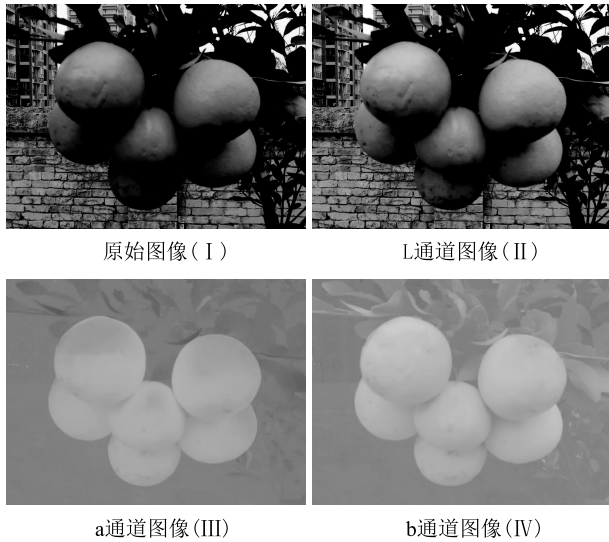


图 3 Lab 颜色空间柑橘图像

Fig.3 Lab color space citrus image

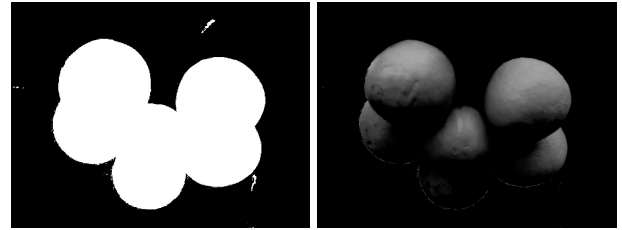
图 3 显示, L 通道图像中果实区域和背景不能很好地被区分, 而 a 通道图像和 b 通道图像中, 果实区域和背景差异较大, 容易区分。因此, 考虑在 a 通道和 b 通道中设定合适的阈值, 通过对重叠柑橘图像进行阈值分割而实现柑橘区域的提取。阈值分割式如公式 (4) 所示。

$$\begin{cases} dst = 255 & (L_a \leq a \leq H_a) \cap (L_b \leq b \leq H_b) \\ dst = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, L_a 、 H_a 分别为 Lab 颜色空间中 a 通道分割阈值的上限、下限, L_b 、 H_b 分别为 Lab 颜色空间中 b 通道分割阈值的上限、下限, dst 为目标图像的像

素值。

通过大量的柑橘图像分割试验, 得到 a 通道阈值为 $[8, 93]$, b 通道阈值为 $[3, 93]$ 。图 3(I) 图像经阈值分割后的结果如图 4(I) 显示。在此基础上, 为提取柑橘区域的彩色图像, 以便对目标进行二次分割, 对图 4(I) 与图 3(I) 进行图像掩膜操作, 结果如图 4(II) 显示。



阈值分割图像(I)

柑橘区域彩色图像(II)

图 4 柑橘区域初提取

Fig.4 Initial extraction of citrus areas

为了得到较好的分割结果, 将得到的柑橘区域彩色 RGB 图像通过公式 (5)、公式 (6) 和公式 (7)^[15] 转换到 HSV 颜色空间再进行后续分析。图 5(I)、图 5(II) 和图 5(III) 分别为图 4(II) 在 H 、 S 和 V 颜色通道下的柑橘图像。

$$H = \begin{cases} \arccos \left[\frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] & B \leq G \\ 2\pi - \arccos \left[\frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} \quad (6)$$

$$V = \frac{\max(R, G, B)}{255} \quad (7)$$

式中, H 、 S 、 V 分别指 HSV 颜色空间 3 个颜色通道的灰度值, R 、 G 、 B 分别指 RGB 颜色空间 3 个颜色通道的灰度值。

忽略 V 、 S 通道的阈值设定所引起的光线变化对图像分割的影响, 经过大量的柑橘图像分割试验, 确定 H 通道的分割阈值为 $[2, 30]$, 而具体的阈值分割式如公式 (8) 所示。

$$\begin{cases} dst2 = 0 & L_H \leq H \leq H_H \\ dst2 = 255 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_H 、 H_H 分别为 H 通道分割阈值的上限、下限, $dst2$ 为最终目标图像的像素值。

经阈值分割及滤波去噪后的图像如图 5(IV) 显

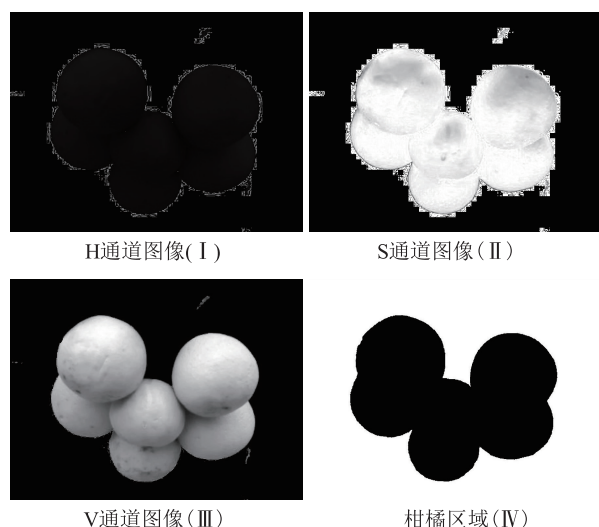


图 5 柑橘区域最终提取

Fig.5 Final extraction of the citrus area

示,柑橘区域提取效果较好。

1.2 基于凹区域简化和距离分析的方法

1.2.1 凹区域简化 在提取重叠柑橘轮廓凹区域前,需要提取轮廓的凸壳,采用卷包裹凸壳算法^[16]提取凸壳,结果(图 6)显示,凸壳曲线将柑橘完整地包围起来,说明凸壳提取是有效的。

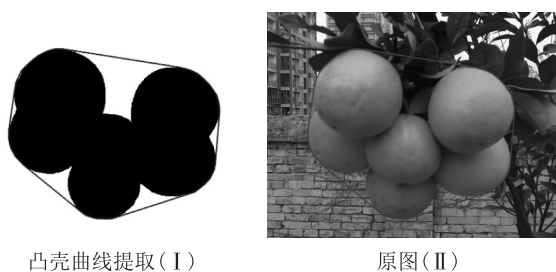


图 6 柑橘区域凸壳提取

Fig.6 Extraction of citrus hull

将凸壳曲线围成的区域和柑橘区域按公式(9)进行像素运算操作,即可得到凹区域。

$$\begin{cases} h(x,y) = 255 & f(x,y) = g(x,y) \\ h(x,y) = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $f(x,y)$ 、 $g(x,y)$ 、 $h(x,y)$ 分别表示图 7 (I)、图 7 (II) 和图 7 (III) 在 (x,y) 处的灰度值。

进一步对所获得的凹区域进行多边形简化及顶点检测,结果(图 8)显示,图 8 (I) 是凸壳曲线提取结果,图 8 (II) 是凹区域的多边形简化结果,图 8 (III) 是通过 Shi-Tomasi 角点检测算子^[17]所提取得到的多边形顶点。



图 7 凹区域提取

Fig.7 Extraction of concave area



图 8 凹区域简化及顶点检测

Fig.8 Concave area simplification and vertex detection

1.2.2 点到柑橘轮廓的距离分析 提取多边形顶点后,将其映射到柑橘轮廓曲线和凸壳曲线上,结果如图 9 显示。其中,内部线条为轮廓曲线,外围线条为凸壳曲线。

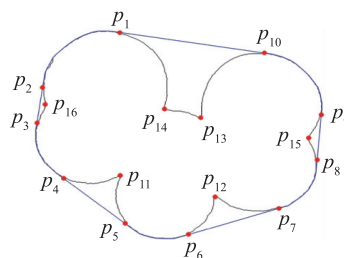


图 9 多边形顶点映射

Fig.9 Polygon vertex mapping

本研究计算像素点到柑橘轮廓距离的算法流程如下:

第一,获取轮廓上所有像素点坐标 (x_i, y_i) ,并将轮廓分割为很多无穷小片段 S_i 。

第二,从所有像素点中找出横坐标值最小的点(当有多个像素点横坐标值相同时,从中选取纵坐标值最小的点)作为轮廓的起始点 $Q(x_0, y_0)$,并将轮廓点序列方向设定为逆时针方向。

第三,从起始点 Q 开始,沿逆时针方向,依次遍历所有轮廓像素点。记相邻 2 个点的坐标分别为 $A(x_i, y_i)$ 、 $B(x_{i+1}, y_{i+1})$,平面上任意点 P 的坐标为 (x_p, y_p) 。

第四,按照公式(10)定义 h ,根据其计算结果,确定点 P 与有向线段 \overrightarrow{AB} 的相对位置关系。

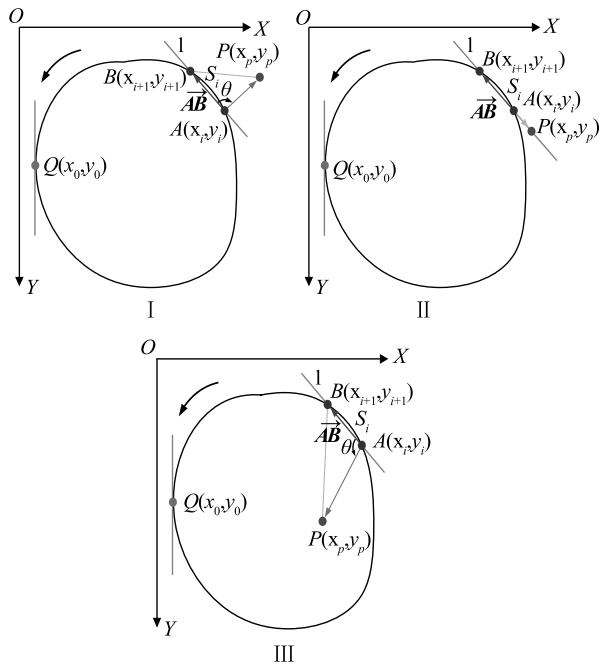
$$h = |\overrightarrow{AB}| \times |\overrightarrow{AP}| \sin \theta \quad (10)$$

式中, $\overrightarrow{AB} = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$ 、 $\overrightarrow{AP} = (x_p - x_i, y_p - y_i)$, θ 为 \overrightarrow{AB} 到 \overrightarrow{AP} 的转角, 取值范围为 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 逆时针为正, 顺时针为负。因此, 公式 (11) 所示的关系成立。

$$\begin{cases} h > 0 & \theta \in (0, 180^\circ) \\ h = 0 & \theta \in \{-180^\circ, 0, 180^\circ\} \\ h < 0 & \theta \in (-180^\circ, 0) \end{cases} \quad (11)$$

式中, h 为 \overrightarrow{AB} 和 \overrightarrow{AP} 2 个向量的叉乘, θ 为 \overrightarrow{AB} 到 \overrightarrow{AP} 的转角。

图 10 显示, 当 $h < 0$ 时, 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的右侧处; 当 $h = 0$ 时, 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的延长线上; 当 $h > 0$ 时, 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的左侧。



I: 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的右侧; II: 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的延长线上; III: 点 P 在有向线段 \overrightarrow{AB} 的左侧。

图 10 点 P 与有向线段 \overrightarrow{AB} 的相对位置关系

Fig.10 Relative positional relationship between point P and directed line segment \overrightarrow{AB}

第五, 以图 10(III) 为例, 固定点 P 位置, 分析点 P 到轮廓曲线的距离。图 11 中, l_i, l_{i+1} 分别为过点 A, B 垂直于有向线段 \overrightarrow{AB} 的直线, $\overrightarrow{AM}, \overrightarrow{BN}$ 分别为直线 l_i, l_{i+1} 上的有向线段。设 M, N 2 点的坐标分别为 (x_M, y_M) 、 (x_N, y_N) , 则 $\overrightarrow{AM} = (x_M - x_i, y_M - y_i)$,

$$\overrightarrow{BN} = (x_N - x_{i+1}, y_N - y_{i+1})。$$

显然, P 点相对于直线 l_i, l_{i+1} 的位置关系有 3 种。当点 P 在有向线段 \overrightarrow{BN} 右侧时 (图 11 I), 参照公式 (10) 定义 $h' = |\overrightarrow{BN}| \times |\overrightarrow{BP}| \sin \beta$, 其中 $\overrightarrow{BP} = (x_p - x_{i+1}, y_p - y_{i+1})$, $\overrightarrow{BN} = (x_N - x_{i+1}, y_N - y_{i+1})$, β 为 \overrightarrow{BN} 到 \overrightarrow{BP} 的转角, 逆时针为正, 顺时针为负, 由此可知 $h' < 0$ 。当点 P 在直线 l_i, l_{i+1} 之间时 (图 11 II), 此时过点 A, B 的直线方程如公式 (12) 所示。当点 P 在有向线段 \overrightarrow{AM} 左侧时 (图 11 III), 参考公式 (10) 定义 $h'' = |\overrightarrow{AM}| \times |\overrightarrow{AP}| \sin \gamma$, 式中, $\overrightarrow{AP} = (x_p - x_i, y_p - y_i)$, γ 为 \overrightarrow{AM} 到 \overrightarrow{AP} 的转角, 逆时针为正, 顺时针为负, 由此可知 $h'' > 0$ 。

$$(x_{i+1} - x_i)(y - y_i) - (y_{i+1} - y_i)(x - x_i) = 0 \quad (12)$$

由数学知识可知, 点 P 到轮廓片段 S_i 上的距离 d_i 可近似为到有向线段 \overrightarrow{AB} 上的距离, 所以依次遍历所有轮廓片段 S_i , 则点 P 到整段轮廓的最小距离为 d_{\min} 。

$$d_i = \begin{cases} \sqrt{(x_p - x_{i+1})^2 + (y_p - y_{i+1})^2} & h' \leq 0 \\ \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} & h'' \geq 0 \\ \frac{|(y_p - y_i)(x_{i+1} - x_i) - (x_p - x_i)(y_{i+1} - y_i)|}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$d_{\min} = \min(d_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

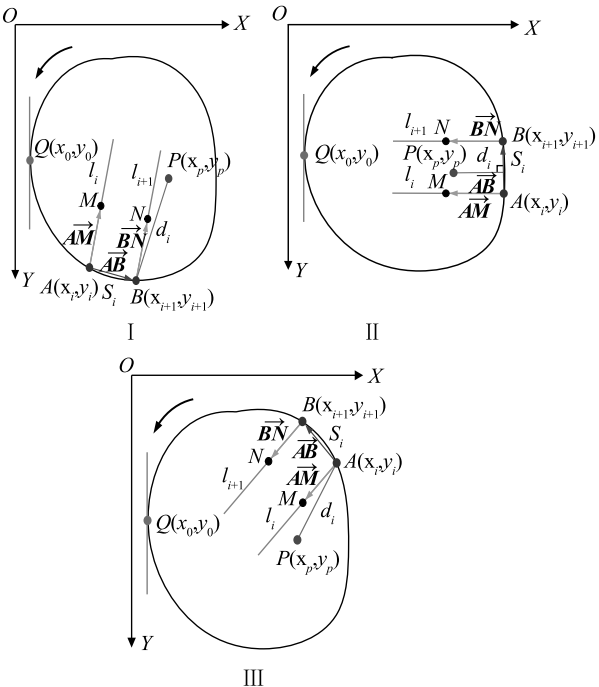
为便于判断点 P 相对于轮廓的位置, 对 d_{\min} 的符号进行约定: 当点 P 在轮廓内时, d_{\min} 取正值; 当点 P 在轮廓外时, d_{\min} 取负值; 当点 P 在轮廓上时, d_{\min} 取零。记含有符号的 d_{\min} 为 d'_{\min} , 即

$$d'_{\min} = \begin{cases} d_{\min} & h \geq 0 \\ -d_{\min} & h < 0 \end{cases} \quad (15)$$

1.3 重叠柑橘轮廓分割点确定及轮廓重建

为获取重叠柑橘轮廓的分割点, 对顶点到凸壳曲线的距离进行了分析。图 9 中的各顶点到轮廓凸壳曲线的距离 (d'_{\min}) 计算结果如表 1 显示。

在本研究中, 为了削弱轮廓分割带来的噪声影响, d'_{\min} 的阈值为 2 个像素, 即当 $|d'_{\min}| \geq 2$ 时, 该点即为轮廓分割点。经距离筛选后获得图 9 的轮廓分割点如图 12(I) 中的点 $p_{11} \sim p_{16}$, 最终的轮廓分割效果如图 12(II) 显示。可见, 重叠柑橘的轮廓被分割成轮廓片段 $S_1 \sim S_6$ 。



I :点 P 在有向线段 \overrightarrow{BN} 右侧; II :点 P 在有向线段 \overrightarrow{BN} 、 \overrightarrow{AM} 之间;
III :点 P 在有向线段 \overrightarrow{AM} 左侧。

图 11 点 P 与直线 l_i 、 l_{i+1} 的相对位置关系

表 1 顶点到凸壳曲线间的距离

顶点序号	d'_{\min} (像素)
p_1	-0.221 231
p_2	0.442 462
p_3	0.589 522
p_4	0.465 947
p_5	0.498 826
p_6	0.440 908
p_7	0.025 195
p_8	-0.364 699
p_9	-0.104 200
p_{10}	-0.318 806
p_{11}	84.183 800
p_{12}	69.344 300
p_{13}	176.548 000
p_{14}	168.068 000
p_{15}	23.054 200
p_{16}	11.648 700

分割后的柑橘轮廓是不完整的,为了还原柑橘

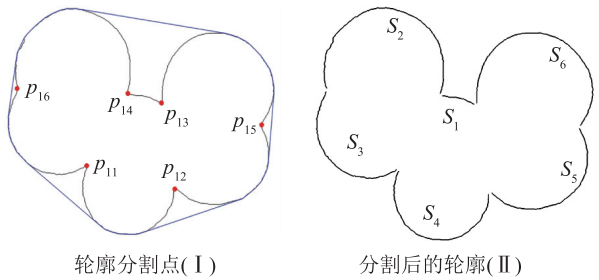


图 12 重叠柑橘轮廓分割

果实目标,采用基于最小二乘法的圆拟合插值算法
重构柑橘轮廓^[18]。结果(图 13)显示,设圆心坐标
为 (x_o, y_o) ,轮廓拟合的圆周曲线方程为:

$$R^2 = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 \tag{16}$$

展开为:

$$R^2 = x^2 - 2x_o x + x_o^2 + y^2 - 2y_o y + y_o^2 \tag{17}$$

记 $m = -2x_o, n = -2y_o, k = x_o^2 + y_o^2 - R^2$, 则

$$x^2 + y^2 + mx + ny + k = 0 \tag{18}$$

根据参数 $m、n、k$,可求得圆心坐标和半径参
数为:

$$x_o = -\frac{m}{2}, y_o = -\frac{n}{2}, R = \frac{1}{2}\sqrt{m^2 + n^2 - 4k}$$

记轮廓曲线上的点 (x_i, y_i) 到圆心的距离为
 d_i^2 ,即

$$d_i^2 = (x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 \tag{19}$$

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = x_i^2 + y_i^2 + mx_i + ny_i + k \tag{20}$$

$$H(m, n, k) = \sum \delta_i^2 = \sum (x_i^2 + y_i^2 + mx_i + ny_i + k)^2 \tag{21}$$

根据公式(21)求出 $H(m, n, k)$ 取最小值时参数
 $m、n、k$ 的值,即可得到拟合圆的圆心 (x_o, y_o) 和半
径 R 。

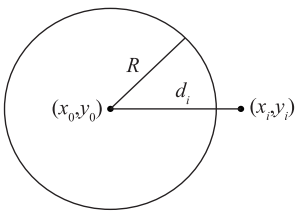
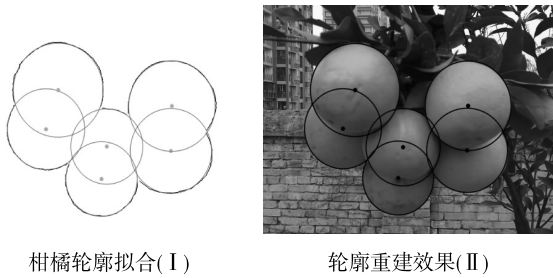


图 13 最小二乘圆拟合法

用最小二乘圆拟合法分别计算出图 12(II) 所
示轮廓片段 $S_1 \sim S_6$ 拟合圆的圆心和半径,然后利用
圆心和半径进行圆周拟合插值运算,即可得到单个
柑橘目标的重构轮廓(图 14)。



柑橘轮廓拟合(I)

轮廓重建效果(II)

图 14 柑橘轮廓重建

Fig.14 Reconstruction of citrus contour

2 结果与分析

为了验证本方法的有效性,在户外果园环境下进行重叠柑橘的分割重建试验。分别采用本研究方法、RANSAC 算法、Hough 变换算法对重叠柑橘进行了轮廓重建。结果(图 15)显示,采用本研究方法不仅能准确分割重叠柑橘,而且能精准重建重叠部分的轮廓,完全可以满足自然环境下无遮挡重叠果实的智能识别需求。为了与其他方法进行比较,分别获取重叠柑橘图像中未被其他果实遮挡的柑橘目标

面积与分割重构柑橘目标的面积,通过轮廓重建误差、不重合度和重建时间 3 个指标评价本研究方法、RANSAC 算法、Hough 变换算法对无遮挡重叠柑橘分割、重建的效果及效率。

轮廓重建误差(e)和不重合度(u)的计算公式分别为:

$$e = \frac{|S - S_i|}{S} \times 100\% \quad (22)$$

$$u = \frac{S \cup S_i - S \cap S_i}{S} \times 100\% \quad (23)$$

式中, i 是用以区分本研究方法、RANSAC 算法和 Hough 变换算法的对应参数; S 表示重叠柑橘图像中未被其他果实遮挡的柑橘目标面积; S_i 表示分割重构柑橘目标的面积; $S \cup S_i$ 表示在原始图像柑橘区域或在重建柑橘目标上的像素点个数; $S \cap S_i$ 表示既在原始图像柑橘区域上又在重建柑橘目标上的像素点个数; $S \cup S_i$ 和 $S \cap S_i$ 的像素点个数之差即为不重合柑橘区域的面积,不重合度越低说明分割重建效果越好。



原始图像(I)

本研究方法重建图像(II)

RANSAC算法重建图像(III)

Hough变换算法重建图像(IV)

图 15 无遮挡重叠柑橘轮廓重建效果对比

Fig.15 Comparison for reconstruction effect of unblocked overlapping citrus contour

选取果园环境中 20 组无遮挡重叠成熟柑橘进行分割重建,本研究方法、RANSAC 算法和 Hough 变

换算法实现重叠柑橘的轮廓重建误差、不重合度和重建时间对比结果(图 16)显示,RANSAC 算法重建

重叠柑橘轮廓的平均重建误差为 4.10%, 平均不重合度为 5.17%, 平均重建时间为 0.512 s; Hough 变换算法重建重叠柑橘轮廓的平均重建误差为 14.67%, 平均不重合度为 16.74%, 平均重建时间为 0.390 s; 本研究方法重建重叠柑橘轮廓的平均重建误差为 3.12%, 平均不重合度为 4.55%, 平均重建时间为 0.291 s, 明显优于 RANSAC 算法和 Hough 变换算法, 说明本研究提出的对无遮挡重叠柑橘进行分割和轮廓重建的方法是有效的。

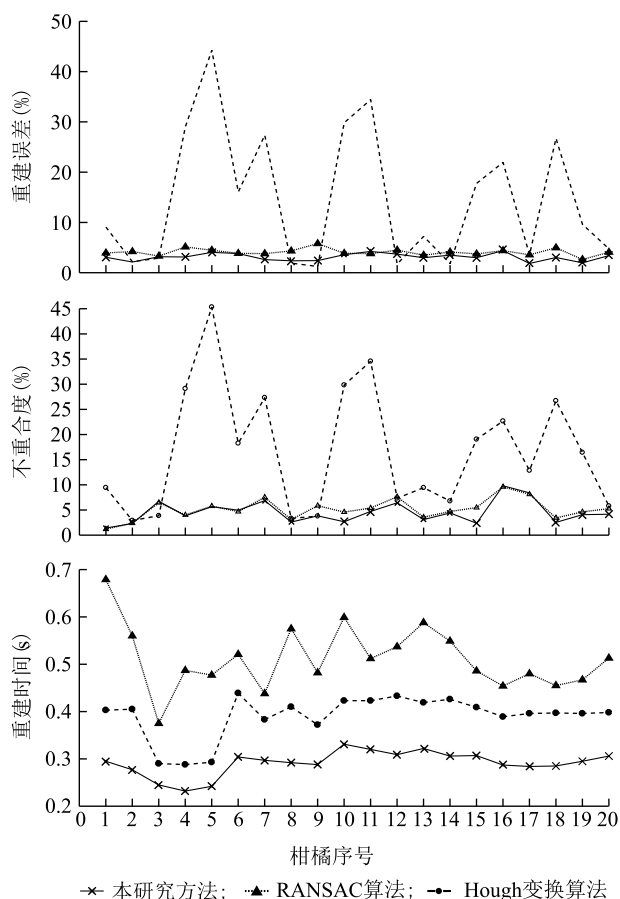


图 16 不同方法实现重叠柑橘轮廓重建的对比

Fig.16 Comparison of different methods for achieving overlapping citrus contour reconstruction

3 讨论

很多学者针对重叠果实进行识别与分割研究。曾庆兵等^[19]利用数学形态学方法实现了重叠葡萄果实直径的测量,张艳诚等^[20]应用标记测地重建的分水岭算法对棉花重叠病斑图像进行了分离,孙国祥等^[21]提出了一种基于叶面边缘链码信息的重叠

分割算法,蒋焕煜等^[22]基于形态学的分水岭算法实现了穴盘幼苗叶片的边缘分割。上述研究多基于数学形态学、分水岭、活动轮廓模型的方法,普遍比较耗时。

同时,基于圆拟合的算法也被用于识别、分割重叠果实。司永胜等^[23]利用基于遗传算法的圆拟合分离重叠苹果目标,马晓丹等^[24]也利用该方法进行重叠苹果目标的分割,但是这种方法误识别现象较为严重,尤其是当果实重叠区域较多时。现有的针对重叠果实目标的分割方法中,最直接的方法是通过寻找果实目标重叠部分的有效凹点,并利用 2 个凹点连线分割重叠目标^[8,25],但对于多果重叠产生多个凹点时,该方法鲁棒性不强。此外,宋怀波等^[9]利用基于凸壳的方法分割重叠苹果目标,但该方法只适用于重叠方式较为简单的双果分割。徐越等^[10]提出了一种基于 Snake 模型和角点检测的重叠苹果目标分割方法,但该方法目前仅适用于无枝叶遮挡的双果重叠目标,能否用于分割自然场景中的多果重叠目标有待验证。

针对上述问题,本研究开展了针对无遮挡重叠柑橘的轮廓分割与重建研究,提出了一种基于凹区域简化和距离分析的果实分割与重建方法,实现了自然环境下重叠果实的有效分割,该方法可推广应用于其他类球形果蔬的重叠目标分割。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] RIZON M, YUSRI N A N, KADIR M F A, et al. Determination of mango fruit from binary image using randomized Hough transform[C]. Barcelona: SPIE Press, 2015.
- [3] 谢忠红,姬长英,郭小清,等.基于凹点搜索的重叠果实定位检测算法研究[J].农业机械学报,2011,42(12):191-196.
- [4] XU Y, IMOU K, KAIZU Y, et al. Two-stage approach for detecting slightly overlapping strawberries using HOG descriptor[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(2):144-153.
- [5] XIANG R, JIANG H, YING Y. Recognition of clustered tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106: 75-90.
- [6] LU J, SANG N. Detecting citrus fruits and occlusion recovery under natural illumination conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 121-130.
- [7] 苗中华,沈一第,王小华,等.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.
- [8] FENG J, WANG S, LIU G, et al. A separating method of adjacent

- apples based on machine vision and chain code information [C]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [9] 宋怀波, 张传栋, 潘景朋, 等. 基于凸壳的重叠苹果目标分割与重建算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 163-168.
- [10] 徐 越, 李盈慧, 宋怀波, 等. 基于 Snake 模型与角点检测的双果重叠苹果目标分割方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 196-203.
- [11] 彭 辉, 吴鹏飞, 翟瑞芳, 等. 基于视差图像的重叠果实图像分割算法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 167-173.
- [12] 王丹丹, 徐 越, 宋怀波, 等. 融合 K-means 与 Ncut 算法的无遮挡双重叠苹果目标分割与重建[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 227-234.
- [13] 王丹丹. 重叠及遮挡影响下的苹果目标识别与定位方法研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [14] 杨 超, 刘本永. 基于 Lab 颜色空间纹理特征的图像前后景分离[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 59-64.
- [15] 李 扬, 杨长辉, 胡友呈, 等. 基于凸壳及距离变换的重叠柑橘目标识别与定位方法[J]. 现代制造工程, 2018(9): 82-87.
- [16] 周启海. 论二维点集或线段集凸壳生成算法改进与优化的同构化方向[J]. 计算机科学, 2007, 34(7): 216-218.
- [17] SHI J, TOMASI. Good features to track [C]. Seattle: IEEE, 1994.
- [18] 陈明晶, 方源敏, 陈 杰. 最小二乘法和迭代法圆曲线拟合[J]. 测绘科学, 2016, 41(1): 194-197.
- [19] 曾庆兵, 刘成良, 苗玉彬, 等. 基于形态学图像处理的重叠葡萄果径无损测量[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 356-360.
- [20] 张艳诚, 毛罕平, 胡 波, 等. 作物病害图像中重叠病斑分离算法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 112-115.
- [21] 孙国祥, 汪小品, 何国敏. 基于边缘链码信息的番茄苗重叠叶片分割算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 206-211.
- [22] 蒋焕煜, 施经挥, 任 烨, 等. 机器视觉在幼苗自动移钵作业中的应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 127-131.
- [23] 司永胜, 乔 军, 刘 刚, 等. 基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 161-165.
- [24] 马晓丹, 刘 刚, 周 薇, 等. 基于量子遗传模糊神经网络的苹果果实识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 227-232.
- [25] BAI X, SUN C, ZHOU F. Splitting touching cells based on concave points and ellipse fitting[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2434-2446.

(责任编辑: 王 妮)