

基于改进凸壳理论的遮挡油茶果定位检测算法

李立君 阳涵疆

(中南林业科技大学机电工程学院, 长沙 410000)

摘要: 针对传统凸壳理论进行遮挡果实定位检测时由于过多剔除有效轮廓,造成目标果实定位误差较大,甚至无法识别目标果实的问题,提出了一种基于改进凸壳理论的遮挡油茶果定位检测算法。首先利用基于颜色特征的阈值分割法对油茶果遮挡图像进行目标分割,并通过预处理操作剔除图像中的背景噪声,获得目标果实的二值图像;然后采用凹点搜寻算法检测重叠目标的凹点,并根据凹点对重叠目标进行分离,获得相互独立的目标图像;再构建各独立目标的凸包,并提取凸壳,利用轮廓提取算法确定各独立目标凸壳上的有效轮廓;最后根据提取的有效轮廓求解目标果实形心坐标和半径,完成遮挡果实的定位检测。试验结果表明,改进算法平均耗时为 0.491 s,比传统凸壳方法增加了 24.07%,但其仅占油茶果采摘机器人单个果实采摘周期的 2.46%,对于图像中的遮挡油茶果目标,改进方法的识别率达到 93.21%,相比传统凸壳方法提升了 7.47 个百分点,改进算法的平均定位检测误差和平均重合度分别为 5.53% 和 93.43%,比传统凸壳算法平均定位误差降低了 6.22 个百分点,平均重合度提高了 6.79 个百分点,表明文中所提出的方法能够较好地识别和定位自然环境中的遮挡油茶果。

关键词: 凸壳理论; 油茶果; 图像分割; 轮廓重建; 遮挡果实; 凹点

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0285-08

Revised Detection and Localization Algorithm for *Camellia oleifera* Fruits Based on Convex Hull Theory

Li Lijun Yang Hanjiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: The existing method based on convex hull theory has low detecting ratio and large locating error because of failing to extract effective contour of the concave regions for occluded fruits. In order to improve recognition accuracy and reduce error of the current method, a kind of improved algorithm for detecting and locating occluded *Camellia oleifera* fruits was proposed. Firstly, in order to get a grayscale image of occluded *Camellia oleifera* fruits, different color spaces of the original image were compared and then $R-B$ chromatic aberration characteristic was chosen. The Otsu method was used to segment the grayscale image and the morphological operation was employed to remove residual noise, thus the regions of targets and backgrounds can be successfully separated by the algorithm. A kind of algorithm was used to extracte convex closure of each occluded regions and then the concave regions were obtained by subtracting the binary image from its convex closure image. The regions with pixels less than half of the biggest one in concave image were removed and the intersection points or concave points of occluded *Camellia oleifera* fruits were detected by a kind of concave point detection algorithm, then the occluded targets were separated by using Bresenham line drawing algorithm according to the intersection points. Convex closure of each separated regions was built and convex hull was extracted from it, after that a kind of ineffective contour removing algorithm was used to extracte effective contour that used to reconstruct the

收稿日期: 2016-02-29 修回日期: 2016-06-24

基金项目: 国家林业公益性项目(201104090)、湖南省高校科技创新团队支持计划项目(2014207)、湖南省研究生科研创新项目(CX2016B326)和中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX2016B12)

作者简介: 李立君(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事现代林业装备研究,E-mail: junlili1122@163.com

target contour from each convex hull. Contour reconstruction algorithm was used to rebuild the target contour of the occluded *Camellia oleifera* fruits based on the points of each corresponding effective contour, and then the reconstruction contour was merged that the distance between their centers was below the threshold value. In order to validate the performance of the improved algorithm, a comparative test was conducted, and the positioning errors were calculated. The test results showed that it needed 0.491 s to finish the recognition and location process in average by the proposed method, which accounted for only 2.46% of the total time-consuming for a single *Camellia oleifera* fruit by harvesting robot. Average recognition success rate of occluded *Camellia oleifera* fruits by the proposed method was 93.21%, which was 7.47 percentage points higher than that of the original method. Average segmentation error of the proposed method was 5.53%, which was reduced by 6.22 percentage points compared with that of the original method. Average overlap ratio of the proposed method was 93.43%, which was 6.79 percentage points less than the that of the traditional method. The test results indicated that the proposed method was feasible and effective to recognize and locate occluded *Camellia oleifera* fruits.

Key words: convex hull; *Camellia oleifera* fruits; image segmentation; contour reconstruction; occluded fruits; concave points

引言

油茶是我国年产油量最大的木本油料植物,其果实具有体积小、分布密集等特点。在自然环境下,油茶果多个果实邻接、重叠或果实部分受枝叶遮挡的现象非常严重,给目标果实的机器识别与定位带来了很大的困难。因此,有效地对遮挡油茶果进行定位检测,对于提高油茶果采摘机器人的实用性具有重大意义^[1-4]。

目前,国内外学者对遮挡果实定位检测算法进行了大量研究^[5-11]。于丹丹等^[12]提出了一种融合 K-means 与 Ncut 的双重叠苹果分割方法,该算法目标果实平均分割误差和平均重合度分别为 4.20% 和 94.95%, 但该算法无法对有枝叶遮挡的重叠果实进行目标分割与重建,算法通用性不高;谢忠红等^[13]提出了一种基于凹点搜索的快速定位和检测重叠果实的方法,果实正确识别率达到 90.0%, 但该算法的定位效果对轮廓采样点的选取比较敏感;项荣等^[14]提出了一种基于边缘曲率的重叠番茄识别方法,对于有轻微遮挡的重叠番茄其识别正确率为 90.9%, 但是其识别效果随算法中圆回归准则参数的变化而有较大的波动;李昕等^[15]提出了一种应用于油茶果定位识别的改进类圆形随机 Hough 变换方法,该方法相比传统 Hough 变换算法在识别率和识别速度方面都有一定提升,但在光照条件较差的情况下,算法识别效果略差,对环境的适应性有待提高;姚立健等^[16]利用广义 Hough 变换对部分遮挡的茄子进行了目标识别,但由于目标投影与目标形状并不唯一对应,算法容易对目标姿态造成误判;蔡

健荣等^[17]采用圆形 Hough 变换实现了对柑橘的形心及半径等参数的求解,但由于 Hough 变换需要对所有轮廓可能性进行投票,而该算法在进行 Hough 变换之前没有对遮挡处的凹陷轮廓进行剔除,因此其定位误差略大;宋怀波等^[18]提出了一种利用凸壳理论进行遮挡苹果定位检测的方法,算法在 K-means 聚类分割的基础上,基于凸壳理论分割重叠苹果,试验结果表明,该方法的目标果实平均定位误差为 4.28%, 相比 Hough 变换有一定优势,但无法检测到处于重叠果实凹区域的目标,算法实用性还有待提高。

利用传统凸壳算法对遮挡果实进行定位检测时,无法提取重叠目标凹区域的有效轮廓,导致算法定位精度不高,甚至出现无法识别目标果实的情况。针对传统凸壳理论算法所存在的不足,本文提出一种基于改进凸壳理论的遮挡油茶果定位检测算法。该算法利用基于颜色特征的阈值分割法和形态学预处理方法获得目标果实的二值图像,通过凹点搜寻算法检测重叠目标区域的凹点,并根据凹点对重叠目标进行分离,获得相互独立的目标区域,在此基础上构建各独立目标的凸壳,并利用轮廓提取算法剔除凸壳上的无效轮廓,根据提取的有效轮廓,求解目标果实的形心坐标和半径,完成遮挡果实的识别和定位检测,最后通过试验验证所提出算法的有效性。

1 油茶果颜色特征分析与图像分割

1.1 油茶果颜色特征分析与提取

由于图像中的噪声、光照强度和阴影等因素都会影响到目标分割质量,并对后续油茶果目标的识

别产生影响,因此准确提取油茶果的颜色特征是图像分割的关键。为了能够把油茶果从背景图像中准确分割出来,首先要分析油茶果的颜色分布特征。油茶果的颜色主要以红色为主并不同程度地泛有绿色。在油茶果的 RGB 颜色模型中 R 分量所占的比重最大, G 分量次之, B 分量最小,通过试验发现在 $R-B$ 图像中,油茶果灰度和背景灰度差别较大,可以把油茶果与背景较好地区分开,其色差灰度图像直方图的分布具有双峰特性,所以选择 $R-B$ 色差特征作为图像运算子。这样就把彩色图像的三维处理问题转换为灰度图像的一维问题,便于后续进行图像分割处理。

1.2 基于油茶果颜色特征的目标分割

由于油茶果图像的 $R-B$ 色差灰度图像的直方图具有双峰趋势,适合采用最大类间方差法对图像进行分割处理。最大类间方差法又称 Otsu 法^[19],是在灰度直方图的基础上用最小二乘法原理推导出来的,具有简单、速度快等特点,是一种常用的阈值选取方法。最大类间方差法基本思想是用阈值把图像划分为 2 类,根据这 2 类图像类间方差来确定最佳阈值。对于具体图像而言,设图像 I 的灰度级范围为 $\{0, 1, \dots, L-1\}$, 各灰度级出现的概率为 P_i 。设定阈值 $T(k) = k, 0 < k < L-1$, 将图像阈值化处理分为 C_1 和 C_2 2 类, C_1 由图像中灰度在范围 $[0, k]$ 内所有的像素组成, C_2 由灰度在范围 $[k+1, L-1]$ 内所有像素组成。利用阈值 $T(k)$ 处理图像, 像素被分到类 C_1 、类 C_2 的概率分别为

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k P_i \quad P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} P_i$$

式中 $P_1(k)$ ——像素归到类 C_1 的概率

$P_2(k)$ ——像素归到类 C_2 的概率

i ——图像灰度级

与阈值 $T(k)$ 对应的类 C_1 、类 C_2 的像素平均灰度分别为

$$m_1(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k iP_i \quad m_2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} iP_i$$

整个图像的像素平均灰度为

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i$$

类间方差 $\sigma_B^2(k)$ 的定义表达式为

$$\sigma_B^2(k) = P_1(k)(m_1(k) - m_G)^2 + P_2(k)(m_2(k) - m_G)^2 \quad (1)$$

利用式(1)即可求解 $T(k)$ 使得 $\sigma_B^2(k)$ 取得最大值,那么该 $T(k)$ 就是分割目标与背景的最佳阈值。

图 1a 为目标油茶果原始图像,图 1b 为图 1a 的

$R-B$ 图像,图 1c 为利用 Otsu 法对图 1b 进行目标分割后的结果,从图中可以看到,完成目标分割处理后所获得的二值图像中不仅含有油茶果目标,通常还存在枝叶、土地和光斑等噪声,还需要进一步处理。



图 1 油茶果目标分割结果

Fig. 1 Results of segmentation for *Camellia oleifera* fruits

2 基于改进凸壳理论的遮挡目标重建方法

2.1 油茶果图像的预处理

为了剔除图像中的背景噪声,便于提取果实有效轮廓,需要对所获得的目标果实二值图像进行预处理^[20]。首先对目标特征区域内部进行填充,消除特征区域内部的噪声孔洞;将最大目标特征区域像素点个数的 1/4 设定为外部噪声剔除阈值,对特征区域外部像素点个数小于该阈值的区域进行填充,以剔除较小的非粘连性噪声;最后利用形态学腐蚀和膨胀运算消除特征区域粘连噪声。

以图 1c 为例,对图像进行上述预处理后,得到如图 2a 所示只包含目标特征区域的二值图像。图中特征区域由 2 个重叠目标构成,不仅在特征区域外侧边界上存在有效轮廓,而且在两重叠目标相互靠近的凹区域边界上同样包含大量的有效轮廓。传统的凸壳方法只提取了特征区域外侧边界上的有效轮廓,重建轮廓在凹区域的形状得不到有效地控制,往往导致较大的果实定位误差。因此,为提高果实识别率和定位精度,应该同时提取外侧边界和凹区域的有效轮廓,并在此基础上求取目标果实形心坐标和半径。

2.2 基于距离最短的凹点搜寻方法

为了提取外侧边界和重叠凹区域 2 部分的有效轮廓,需要将重叠的目标区域进行分离,并构建各独立目标区域的凸壳,再从凸壳中提取有效轮廓。本文通过距离最短的方法^[21-22]来搜寻凹点(即重叠目标边界相交点),并根据凹点的位置来分离重叠目标区域。

基于距离最短的凹点搜寻算法基本思想如下:

(1) 标记各重叠区域,利用极限腐蚀的方法计算重叠目标核心参数,得到核心坐标及核心个数。

(2) 合并相互间距离小于阈值 G (单位:像素)的核心,检测各核心所代表的目标区域之间是否粘连。

(3)对于无粘连的图像,直接跳转至后面提到的有效轮廓提取步骤,否则继续下面的步骤提取重叠目标凹区域的凹点。

(4)利用 Graham 凸包算法构建重叠区域的凸包,通过布尔运算提取重叠区域凸包内部的凹区域。

(5)提取各凹区域轮廓,结合重叠目标核心坐标值,寻找并配对凹点。

图2为对图1a中的重叠目标区域提取凹点并进行分离的过程。可以从图2f中观察到,分离后各独立目标区域边界上存在一部分与实际轮廓重合度高的有效轮廓,利用该部分有效轮廓求解目标果实拟合轮廓的圆心和半径,就可以完成目标果实的定位检测。

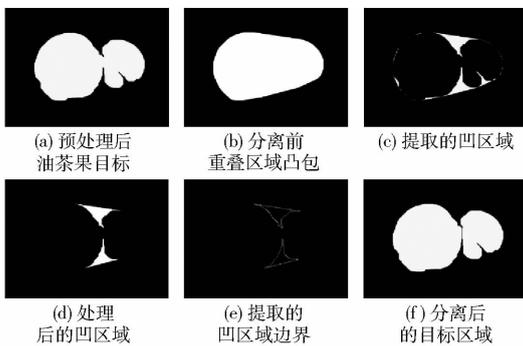


图2 油茶果重叠区域的分离

Fig. 2 Separation process of *Camellia oleifera* fruits overlapped region

2.3 基于凸壳理论的有效轮廓提取方法

针对各独立目标区域建立凸包,并提取凸壳。图3a为图2f中各目标的独立凸包图像,图3b为提取到的各目标凸壳。从图3b中可以得到,对于有效轮廓区域,即凸壳轮廓上与实际目标轮廓重合度较高的部分,其凸壳顶点排列密集,相互间距较小,且相邻凸壳顶点所构成的直线段之间斜率变化小,而对于其余无效轮廓,相邻凸壳顶点之间间距较大或相邻凸壳顶点连线之间的斜率存在突变。

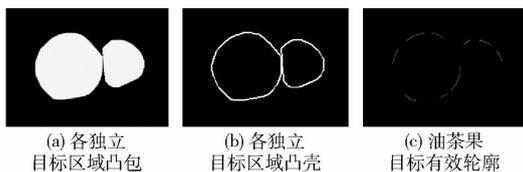


图3 油茶果各独立目标有效轮廓的提取

Fig. 3 Extraction of effective contours of separated *Camellia oleifera* fruit

根据上述凸壳轮廓的特点,本文提出一种自适应的有效轮廓提取算法以获得目标有效轮廓。算法具体步骤如下:

(1)对于各独立的目标凸壳,以凸壳最左上角点为起点,按照逆时针方向进行轮廓跟踪,确定各凸

壳顶点的位置序号。

(2)按照凸壳顶点序号大小计算相邻轮廓点的距离 D ,以所有距离的均值作为距离阈值 T_D 。

(3)若凸壳两顶点间的距离满足 $T_D < D$,则认为两凸壳顶点间的线段为无效轮廓加以剔除,否则认为是候选有效轮廓进入下一步处理。

(4)根据凸壳顶点序号求取候选有效轮廓的斜率 K ,并计算相邻直线段之间斜率的绝对差值 S ,以所有斜率绝对差值的均值作为斜率阈值 T_S 。

(5)如果两相邻直线段之间斜率差值满足 $0 < S_i < T_S$,则认为两直线段是有效轮廓予以保留,否则作为无效轮廓予以剔除。

如图3b所示的独立目标凸壳图像经上述方法处理后,可以提取到如图3c所示的有效轮廓,从该图中可以得到,上述操作不仅提取了位于重叠区域外侧边界上的有效轮廓,而且成功获得了凹区域边界上的有效轮廓,且得到的有效轮廓基本与实际轮廓吻合。

2.4 轮廓重建特征点的选取与形心重建算法

果实采摘机器人在工作过程中常以目标果实的形心作为末端执行器目标点的参考点。由于成熟油茶果为类球形,因此要确定其形心坐标,可以构建目标实际轮廓的拟合圆轮廓,以该轮廓的圆心作为目标果实的形心。

根据圆周上任意2条不平行弦的中垂线必相交于圆心的性质,可以确定圆心的坐标和半径。设一组选定特征点为 $p_1(x_1, y_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3)$,圆心为 $O(x, y)$ 。圆心坐标表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{(y_2 + y_1)k_1k_2 + (x_2 + x_1)k_2 - (y_3 + y_1)k_1k_2 + (x_3 + x_1)k_1}{2k_1k_2(k_2 - k_1)} \\ y = \frac{(y_3 + y_1)k_1^2k_2 + (x_3 + x_1)k_1^2 - (y_2 + y_1)k_2^2k_1 + (x_2 + x_1)k_2^2}{2k_1k_2(k_1 - k_2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 k_1 —— p_1 、 p_2 构成的弦的斜率

k_2 —— p_2 、 p_3 构成的弦的斜率

圆心与某轮廓点之间的距离作为该组特征点所确定圆轮廓的候选半径,表达式为

$$r = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (3)$$

式中 r ——重建轮廓候选半径,像素

x_i, y_i ——第 i 个轮廓点的坐标,像素

x, y ——重建轮廓的圆心坐标,像素

由上面分析可知,该方法所构建的圆轮廓精度对于特征点的选取较为敏感,当选取的特征点与实际轮廓点重合度高时,可以获得良好的重建效果。

因此,本文采用限制相邻特征点相对距离的方法,避免由于选取的特征点相互位置过于紧凑而造

成误差放大。采用遍历投票的方法确定轮廓参数,以减少误差较大的特征点对轮廓参数的影响。果实轮廓重建算法具体步骤如下:

(1) 首先将各独立目标有效轮廓分为 E 等份,在各等份中随机选定某轮廓点作为特征点,将选定的特征点按照有效轮廓提取算法中轮廓点的序号大小重新标注序号。

(2) 根据步长 S 按序号大小提取 3 个特征点作为一个特征点组,通过该操作获得所有步长为 S 的特征点组,利用式(2)求取所有特征点组所对应的候选圆心坐标 $O(x, y)$,并使对应的累加器 $A(x, y)$ 加 1。

(3) 如果步长 $S < E/3$,则步长 S 加 1,并重复步骤(2),否则转至步骤(4)。

(4) 找出 $A(x, y)$ 数组中和值大于阈值 M 的极值区域,求取极值区域平均值 $O_a(x_a, y_a)$,作为目标重建轮廓圆心坐标。

(5) 根据所求得的圆心坐标和各轮廓点坐标,利用式(3)求取各轮廓点所对应的候选半径 r ,并使对应的累加器 $B(r)$ 加 1。

(6) 找出数组 $B(r)$ 中和值大于阈值 N 的极值区域,求取极值区域平均值 $B_a(r_a)$,作为果实的圆轮廓半径。

利用上述方法对图 3c 所示的目标有效轮廓进行重建,结果如图 4 所示,可见重建轮廓与目标实际轮廓重合度高,定位效果良好。



图 4 油茶果目标轮廓重建结果

Fig. 4 Reconstruction contours of *Camellia oleifera* fruits

3 试验结果分析与讨论

3.1 试验方案

为了验证本文提出的改进方法的有效性和实用性,选取 60 幅遮挡油茶果图像进行试验。试验图像于 2015 年 10 月下旬采集于长沙市雪峰油茶产业基地。图像采集天气均为晴天,采集设备为尼康 D5200 数码相机,采集图像均为 JPEG 格式,图像尺寸 600×400 (像素数)。为获得图像中被遮挡油茶果的准确像素个数,在采集了处于初始状态的目标果实图像后,固定相机和被遮挡果实,移除遮挡物并拍摄被遮挡油茶果的图像,用该图像计算被遮挡油茶果真实像素个数^[5]。试验硬件平台是处理器主频为 3.6 GHz、内存为 16 GB 的计算机,软件平台为

Matlab 2014a。

文中算法的主要功能是为遮挡油茶果提供定位检测,找到目标果实形心,为采摘机器人末端执行器目标点提供参考。但是在试验过程中,很难准确获取目标果实的实际形心位置,不适合以形心位置误差来评价算法的定位精度。因此,采用拟合轮廓与目标实际轮廓面积分割误差和重合度来评价算法的定位效果。

分割误差的计算公式为

$$E_i = |Q - Q_i| / Q \times 100\% \quad (4)$$

式中 E_i ——算法分割误差, %

Q_i ——拟合轮廓内部面积,像素

Q ——目标果实真实面积,像素

i ——对应改进凸壳方法与传统方法

重合度计算公式为

$$C_i = |Q \cap Q_i| / Q \times 100\% \quad (5)$$

式中 C_i ——算法重合度, %

试验主要步骤如下:

(1) 设定改进算法等分数 $E = 15$,步长 $S = 3$,阈值 $M = N = 5$, $G = 20$ 。分别利用改进方法和传统方法对所采集到的图像进行目标定位检测,获得各目标形心坐标和半径。

(2) 根据各目标形心坐标和半径值重建目标轮廓,分别求解改进方法重建轮廓内部像素 Q_1 和传统方法重建轮廓内部像素 Q_2 。

(3) 利用 Photoshop 多次提取采集图像中的油茶果目标,将多次提取的目标区域平均像素个数作为目标区域实际像素 Q 。

(4) 根据实际像素 Q 、算法求得的重建轮廓内部像素 Q_1 、 Q_2 ,计算分割误差和重建轮廓与目标原始图像的重合度,并进行试验结果对比分析。

3.2 试验结果

采集的 60 幅图像中共包含目标油茶果实 128 个,按照目标油茶果与环境物体之间的关系,可以将测试图像分为 3 类:第 1 类是如图 5a 所示的多个果实轮廓连接在一起但未被枝叶遮挡的相互邻接目标果实;第 2 类如图 5b 所示,果实之间未相互遮挡,但果实部分区域被枝叶遮挡而导致轮廓不完整的目标果实;第 3 类如图 5c 所示,果实之间有相互遮挡,同时果实部分区域被枝叶遮挡的目标果实。

利用改进方法与传统方法分别重建目标轮廓,示例结果如图 5 所示。图 5a ~ 5c 为目标果实原始图像,图 5g ~ 5i 为利用改进方法所建立的目标果实凸包,从图中可以看出,改进算法对各粘连的目标图像进行了分离,并分别建立了凸包,图 5j ~ 5l 为改进方法所提取的目标果实有效轮廓,算法不仅提取

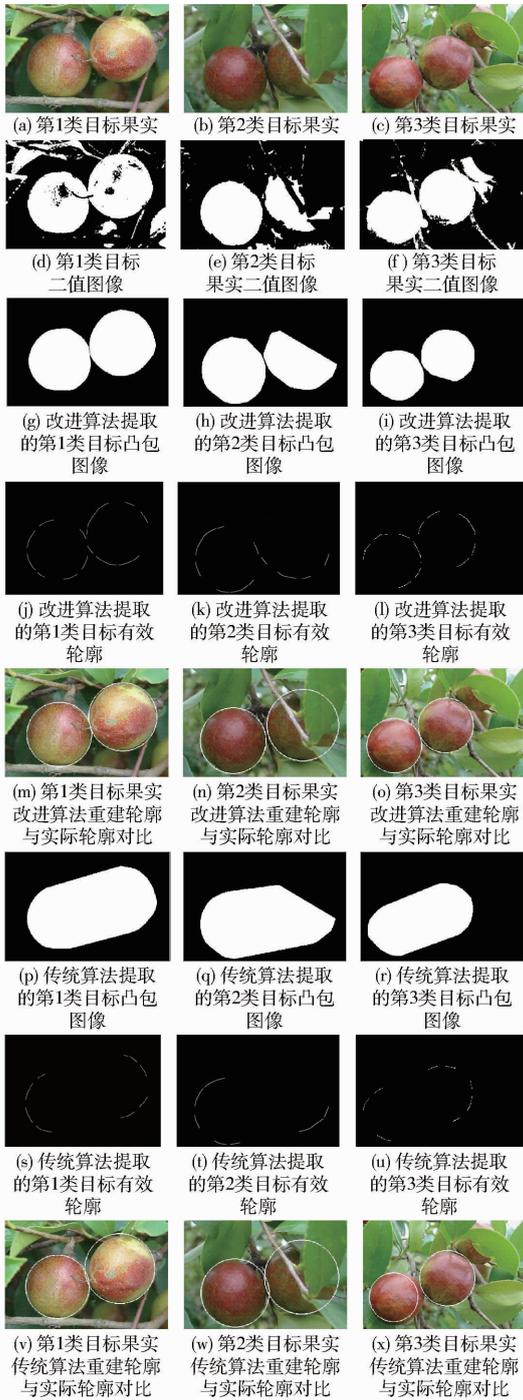


图5 自然场景下遮挡油茶果目标重建结果

Fig. 5 Segmentation and reconstruction of occluded *Camellia oleifera* fruits in nature scenes

了目标外侧边界上的有效轮廓,而且成功提取了重叠果实凹区域的有效轮廓,为获得较好的目标定位精度提供了基础。对比图5m~5o和图5v~5x可知,由于改进方法提取了目标凹区域的有效轮廓,使重建轮廓在凹区域的形状得到了很好的控制,改进算法所重建的轮廓与目标实际轮廓非常吻合,明显比传统方法重建轮廓更接近实际轮廓。

3.3 结果分析与讨论

传统方法与改进方法目标识别速度对比如表1

所示。从表中可以看出,改进算法的平均耗时为0.491 s,比传统凸壳方法平均耗时增加24.07%。

表1 目标识别速度对比

类型	传统凸壳方法耗时	改进凸壳方法耗时
第1类	0.389	0.515
第2类	0.392	0.431
第3类	0.407	0.528
平均值	0.396	0.491

导致改进方法相比传统凸壳方法耗时增加的主要原因是传统凸壳算法在进行遮挡目标识别时只提取重叠目标外侧边界上的有效轮廓,所以仅需进行一次凸壳提取运算,而改进算法为提取第1类、第3类图像中遮挡果实凹区域的有效轮廓,需要先对目标整体提取凸壳,并利用算法找到目标重叠区域的凹点后再分别对各目标提取凸壳,算法流程有所增加。虽然改进方法相比传统方法增加了耗时,但对比油茶果采摘机器人20 s左右的单个果实采摘周期,其所占比例仅为2.46%,因此改进方法仍具有竞争力。从表1中还可以观察到,改进算法对第2类图像的目标定位检测耗时明显低于其他2类图像,这是因为第2类图像中目标果实不存在粘连,算法只需提取各独立目标的凸壳,省略了求取目标整体凸壳和重叠区域凹点的步骤。

表2为改进方法与传统方法目标识别率比较,从表中可以发现,改进方法对遮挡油茶果的平均正确识别率达到93.21%,相比传统方法提升了7.47个百分点,表明改进算法在自然环境下能够较好地识别遮挡油茶果目标。

表2 目标识别结果比较

类型	实际个数/个	正确识别个数/个		正确识别率/%	
		改进方法	传统方法	改进方法	传统方法
第1类	42	40	39	95.23	90.48
第2类	37	35	33	94.59	89.19
第3类	49	44	39	89.80	77.55
平均值	128	119	111	93.21	85.74

从表2可以观察到改进方法对第3类图像的目标识别率为89.80%。如图5o所示,改进方法未能成功识别图5c中的全部目标,通过分析图5f、5i可以发现目标识别失败主要是由于目标被遮挡面积过大,在进行图像预处理的过程中,腐蚀运算误将目标区域当成粘连噪声加以剔除而导致的。通过归纳试验数据发现,当目标果实被遮挡面积超过70%时,改进算法通常会出现识别失败的情况。

同时从表2中还可以看到,对于第3类图像的

目标果实,改进方法识别率比传统方法提高了 12.25 个百分点。如图 6 所示,传统凸壳方法未能成功识别处于重叠果实区域中部的目标。经过分析发现原因在于传统凸壳方法直接对重叠目标果实区域提取凸壳,因此无法获得处于凹陷区域的有效轮廓,造成目标果实识别失败,而改进方法在分离各重叠目标区域的基础上,针对各独立目标提取凸壳和有效轮廓,避免了传统方法存在的问题,提高了目标识别率。



图 6 传统方法识别失败示例

Fig. 6 Sample of failed recognition for traditional method

利用式(3)、(4)分析试验图像,可得如表 3 所示的改进凸壳方法与传统方法目标果实分割误差和重合度的对比。从表中可以观察到,改进算法的平均分割误差为 5.53%,平均重合度为 93.43%,比传统算法平均定位误差降低了 6.22 个百分点,平均重合度提高了 6.79 个百分点,整体定位精度明显提高。证明本文所提出的算法能够较为准确地进行遮挡油茶果定位检测。

表 3 目标分割误差及重合度比较

Tab. 3 Comparisons of location error and overlap ratio for different methods %

类型	改进方法		传统方法	
	分割误差	重合度	分割误差	重合度
第 1 类	4.74	95.31	9.53	89.16
第 2 类	4.13	93.63	10.27	88.05
第 3 类	8.71	91.34	15.46	82.72
平均值	5.53	93.43	11.75	86.64

从表 3 中可以看到改进算法对第 2、3 类图像目标果实的定位检测效果还有待提升。图 7a 为改进方法定位效果较差的目标果实原始图像,通过分析发现,在果实背光区域光线不足或果实成熟度不高时,果实与背景之间的颜色特征不明显,文中所采用的基于色差的阈值分割法难以准确提取目标图像,导致出现如图 7b 所示的分割图像。从图 7c、7d 可以看到,图 7b 中下方目标果实的误分割区域凸壳边界被作为有效轮廓保留了下来,这是因为该果实误分割区域呈较小的波浪形状,因此目标果实误分割区域的凸壳是由波浪边界外侧顶点构成的,顶点之间距离较小,而轮廓提取算法是通过求取平均值确定距离阈值 T_d 和斜率阈值 T_s 的,这就导致距离较小

的错误边界被作为有效轮廓保留下来,造成目标果实定位误差。因此,文中所提出的改进方法适合应用于光线较好且果实成熟度高的条件下。

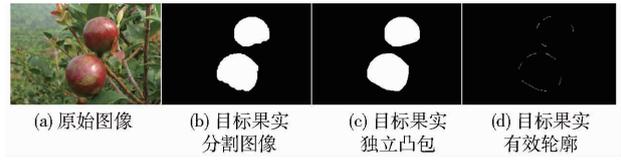


图 7 有效轮廓误提取示例

Fig. 7 Sample of failed extraction for effective contour

另外,在利用轮廓重建算法计算果实形心和半径时,轮廓特征点等分数 E 和初始采样步长 S 的取值决定了特征点组的数量和组合方式,不同的特征点组数量和组合方式也直接影响重建轮廓的精度。

综合上面的分析可知,本文所提出的算法对于颜色特征明显的遮挡油茶果图像具有较好的识别、定位能力,而对于遮挡严重、颜色特征不够明显的目标果实,定位检测失败率较高,定位精度略差。因此,后续应着重研究在光线较差的条件下目标果实图像分割算法以及适应性更强的有效轮廓提取方法。

4 结论

(1) 针对传统凸壳理论进行遮挡果实定位检测时无法提取重叠目标凹区域的有效轮廓,造成重建轮廓与实际轮廓之间存在较大误差,甚至无法识别目标果实的问题,提出了利用凹点分离重叠目标,然后对各独立目标分别提取凸包轮廓的方法,有效地解决了传统凸壳方法对凹区域有效轮廓误剔除的问题。

(2) 针对传统凸壳方法进行轮廓参数估计时因选取特征点不合适而造成重建轮廓误差较大的问题,提出了一种果实轮廓重建方法,该方法基于可变步长提取、遍历所有特征点组,最后获得圆心坐标和半径的最优解,利用该方法所获得的重建轮廓与有效轮廓重合度高。

(3) 改进凸壳方法平均耗时为 0.491 s,仅占机器人单个果实采摘周期的 2.46%,改进方法对遮挡油茶果的正确识别率达到 93.21%,相比传统方法提升了 7.47 个百分点,改进算法的平均分割误差和平均重合度分别为 5.53% 和 93.43%,分割误差比改进前算法降低了 6.22 个百分点,平均重合度提高了 6.79 个百分点,证明文中所提出的改进算法能够较为准确地识别遮挡油茶果目标并对其进行定位检测。

参 考 文 献

- 1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158-162.
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 158-162. (in Chinese)
- 2 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008,24(8):279-283.
JIANG Huanyu, PENG Yongshi, SHEN Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 279-283. (in Chinese)
- 3 熊俊涛,邹湘军,彭红星,等. 扰动柑橘采摘的实时识别与采摘点确定技术[J]. 农业机械学报,2014,45(8):38-43.
XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, PENG Hongxing, et al. Real-time identification and picking point localization of disturbance citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 38-43. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 WANG Chenglin, ZOU Xiangjun, TANG Yunchao, et al. Localisation of litchi in an unstructured environment using binocular stereo vision[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145: 39-51.
- 6 NAGLE Marcus, INTANI Kiatkamjon, ROMANO Giuseppe, et al. Determination of surface color of 'all yellow' mango cultivars using computer vision[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(1):42-50.
- 7 崔永杰,苏帅,王霞霞,等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. 农业机械学报,2013,44(5):247-252.
CUI Yongjie, SU Shuai, WANG Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247-252. (in Chinese)
- 8 XIANG R, JIANG H Y, YING Y B. Recognition of clustered tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Computer and Electrical in Agriculture, 2014, 106: 75-90.
- 9 孙国祥,汪小岳,何国敏. 基于边缘链码信息的番茄苗重叠叶面分割算法[J]. 农业工程学报,2010,26(12):206-211.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, HE Guomin. Segmentation algorithm of overlapping tomato seedling leaves based on edge chaincode information[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 206-211. (in Chinese)
- 10 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 Dean, SHEN Tian, CHEN Yu, et al. Fast tracking and recognition of overlapping fruit for apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 22-28. (in Chinese)
- 11 吕强,蔡健荣,赵杰文. 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):185-189.
LÜ Qiang, CAI Jianrong, ZHAO Jiewen. Real-time recognition of citrus on trees in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 185-189. (in Chinese)
- 12 于丹丹,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.
YU Dandan, XU Yue, SONG Huaibo, et al. Fusion of K-means and Ncut algorithm to realize segmentation and reconstruction of two overlapped apples without blocking by branches and leaves[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 227-234. (in Chinese)
- 13 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.
XIE Zhonghong, JI Changying, GUO Xiaoqing, et al. Detection and location algorithm for overlapped fruits based on concave spots searching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 191-196. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 李昕,李立君,高自成,等. 改进类圆随机 Hough 变换及其在油茶果实遮挡识别中的应用[J]. 农业工程学报,2013, 29(1):164-170.
LI Xin, LI Lijun, GAO Zicheng, et al. Revised quasi-circular randomized Hough transform and its application in camellia-fruit recognition[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 164-170. (in Chinese)
- 16 姚立健,丁为民,张培培,等. 基于改进型广义 Hough 变换的茄子果实位姿识别方法[J]. 农业工程学报,2009,25(12): 128-132.
YAO Lijian, DING Weimin, ZHANG Peipei, et al. Recognition method of position and attitude of eggplant fruits based on improved generalized Hough transforms[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 128-132. (in Chinese)
- 17 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)

- 23 高艺凡. 基于突变级数法的中国经济发展评价[J]. 系统工程, 2015, 33(12): 85-91.
GAO Yifan. Evaluation system of China's economic development based on catastrophe theory[J]. System Engineering, 2015, 33(12): 85-91. (in Chinese)
- 24 崔勇, 刘志伟. 基于 GIS 的北京市怀柔区高标准基本农田建设适宜性评价研究[J]. 中国土地科学, 2014, 28(9): 76-81, 94.
CUI Yong, LIU Zhiwei. A GIS-based approach for suitability evaluation of high standard primary farmland consolidation: a case from Huairou in Beijing[J]. China Land Sciences, 2014, 28(9): 76-81, 94. (in Chinese)
- 25 奉婷, 张凤荣, 李灿, 等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 200-210.
FENG Ting, ZHANG Fengrong, LI Can, et al. Spatial distribution of prime farmland based on cultivated land quality comprehensive evaluation at county scale[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 200-210. (in Chinese)
- 26 孙宇, 高明, 莫建兵, 等. 西南丘陵区高标准基本农田建设区域划定研究——以重庆市铜梁区为例[J]. 中国土地科学, 2016, 30(3): 20-28, 87.
SUN Yu, GAO Ming, MO Jianbing, et al. Construction area division of high-standard primary farmland in the southwest hilly area: a case study in Tongliang, Chongqing[J]. China Land Sciences, 2016, 30(3): 20-28, 87. (in Chinese)
- 27 任艳敏, 唐秀美, 刘玉, 等. 基于“生产-生态-区位”的都市区粮田布局方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 321-327.
REN Yanmin, TANG Xiumei, LIU Yu, et al. Layout method of cereal field based on production-ecology-location in metropolitan area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 321-327. (in Chinese)
- 28 朱传民, 郝晋琨, 陈丽, 等. 基于耕地综合质量的高标准基本农田建设[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 233-242.
ZHU Chuanmin, HAO Jinmin, CHEN Li, et al. Well-facilitated capital farmland construction based on cultivated land comprehensive quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 233-242. (in Chinese)
- 29 李赓, 吴次芳, 曹顺爱, 等. 划定基本农田指标体系的研究[J]. 农机化研究, 2006, 28(8): 46-48.
LI Geng, WU Cifang, CAO Shuai, et al. Study on indicators system of selecting cultivated land into prime farmland[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(8): 46-48. (in Chinese)
- 30 蔡海生, 林建平, 朱德海. 基于耕地质量评价的鄱阳湖区耕地整理规划[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 75-80.
CAI Haisheng, LIN Jianping, ZHU Dehai. Cultivated land consolidation planning based on quality evaluation of cultivated land in Poyang Lake region[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 75-80. (in Chinese)
- 31 李鹏山, 吕雅慧, 张超, 等. 基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 281-287.
LI Pengshan, LÜ Yahui, ZHANG Chao, et al. Analysis of cultivated land fragmentation in Beijing-Tianjin-Hebei region based on kernel density estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 281-287. (in Chinese)
- 32 POSTON T, IAN S. Catastrophe theory and application[M]. Lord: Pitman, 1978.
- 33 盖美, 王宇飞, 马国栋, 等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2081-2094.
GAI Mei, WANG Yufei, MA Guodong, et al. Evaluation of the coupling coordination development between water use efficiency and economy in Liaoning coastal economic belt[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2081-2094. (in Chinese)
- 34 何宜庆, 翁异静. 鄱阳湖地区城市资源环境与经济协调发展评价[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 502-509.
HE Yiqing, WENG Yijing. Assessment of harmonious development between resource, environment and urban economy in Poyang lake area[J]. Resource Science, 2012, 34(3): 502-509. (in Chinese)
- 35 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 172-177.
LIAO Chongbin. Quantitative judgment and classification system for coordinated development of environment and economy: a case study of the city group in the pearl river delta[J]. Tropical Geography, 1999, 19(2): 172-177. (in Chinese)

(上接第 292 页)

- 18 宋怀波, 何东健, 潘景朋. 基于凸壳理论的遮挡苹果目标识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 174-180.
SONG Huaibo, HE Dongjian, PAN Jingpeng. Recognition and localization methods of occluded apples based on convex hull theory[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 174-180. (in Chinese)
- 19 GONZALEZ Rafael C, WOODS Richard E. Digital image processing[M]. New York: Pearson Education International, 2007: 764-769.
- 20 GONZALEZ Rafael C, WOODS Richard E, EDDINS Steve L. Digital image processing using Matlab[M]. Knoxville, TN: Gatesmark Publishing, 2009: 810-825.
- 21 傅蓉, 申洪, 陈浩. 基于凹点搜寻的重叠细胞图像自动分离的算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(17): 21-28.
FU Rong, SHEN Hong, CHEN Hao. Research of automatically separating algorithm for overlap cell based on searching concave spot[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(17): 21-28. (in Chinese)
- 22 刘伟华, 隋青美. 基于凹点搜索的重叠粉体颗粒的自动分离算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(12): 1095-1100.
LIU Weihua, SUI Qingmei. Automatic segmentation of overlapping powder particle based on searching concavity points[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(12): 1095-1100. (in Chinese)