

车金庆, 王帆, 吕继东, 等. 重叠苹果果实的分离识别方法[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 469-475.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.02.030

重叠苹果果实的分离识别方法

车金庆¹, 王帆², 吕继东², 马正华²

(1. 常州工程职业技术学院智能装备与信息工程学院, 江苏 常州 213000; 2. 常州大学信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对苹果采摘机器人重叠果实识别误差较大的问题, 设计了一种分离识别方法。首先在苹果图像分割获取其二值果实区域的基础上, 基于横、纵投影图实现重叠形态果实的判别, 而后基于边缘曲线通过 SUSAN 算法检测果实轮廓上的角点, 再通过迭代腐蚀和瓶颈准则挑选重叠果实的分离点, 并采用 Bresenham 算法连接分离点实现重叠果实的分离。提取分离果实边缘曲线的有效轮廓后, 通过改进的随机 Hough 算法拟合果实圆心及半径。最后选择 15 幅重叠果实区域二值图像, 通过不同角点检测计算结果的比较, 验证了 SUSAN 算法相比于其他角点检测方法更为有效; 通过改进的随机 Hough 算法识别 11 幅图像中的 21 个果实, 其圆心相对误差平均值、半径相对误差平均值和相对偏差平均值分别为 6.90%、4.12% 和 6.07%, 比传统 Hough 算法分别低 4.03%、2.75%、1.14 个百分点, 说明改进的随机 Hough 算法得到的拟合圆更接近实际苹果果实区域。

关键词: 苹果; 重叠果实; 目标识别; 图像处理

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)02-0469-07

Separation and recognition method for overlapped apple fruits

CHE Jin-qing¹, WANG Fan², LYU Ji-dong², MA Zheng-hua²

(1. School of Intelligent Equipment and Information Engineering, Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou 213000, China; 2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to recognize the overlapped apple fruits accurately, a method of separation and recognition of overlapping fruits for apple picking robot was designed. Firstly, on the basis of obtaining the binary image of apple fruit area, the fruit of the overlapping form was distinguished by using the transverse and longitudinal projection, and then the corner points were detected by the SUSAN algorithm based on the fruit edge curve, and then the separation points of the overlapped fruits were selected by the iterative corrosion and bottleneck criteria, and Bresenham algorithm was used to connect separation points to achieve the separation of overlapping fruit. After extracting the effective contour of separating fruit edge curve, the center and radius of fruit were fitted by the improved random Hough algorithm. Finally, 15 binary images of overlapping fruit areas were selected to verify that SUSAN algorithm was more effective than other corner detection methods

收稿日期: 2018-08-01

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20140266); 江苏省高等学校自然科学基金项目(17KJB416002); 常州市科技计划资助项目(CJ20179057、CJ20180021); 常州工程职业技术学院科研基金项目(11130300118019); 常州大学海外研修计划项目

作者简介: 车金庆(1979-), 男, 江苏南京人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为图像处理、软件开发。(E-mail)jqche@czie.edu.cn

通讯作者: 吕继东, (E-mail) vveaglevv@163.com

by comparing the results of different corner detection. The improved random Hough algorithm was used to identify 21 fruits in 11 images. The average values of relative error of the center, the relative deviation of the radius and relative deviations were 6.90%, 4.12% and 6.07% respectively, which were 4.03%, 2.75% and 1.14% lower than those acquired by the traditional Hough algorithm. This indicated that the fitting circle obtained by the improved random Hough algorithm was closer to the actual apple fruit area.

Key words: apple; overlapped fruits; object recognition; image processing

自然生长条件下果实通常会存在重叠遮挡现象,此类果实的识别是采摘机器人实用化的关键问题^[1]。重叠遮挡生长形态的果实识别方法不同于无遮挡形态果实以及其他生长形态的果实,在识别之前应对其形态进行判别确认,而后进行识别。尹建军等^[2]提出了基于形态重建的受控标记分水岭算法搜索靠拢或重叠生长状态的番茄分界线的方法,实现了不同生长状态下多目标番茄图像的自动分割。但由于环境的非结构性,分水岭算法会出现标记失效,且没有相关量化试验数据验证其分割效果。谢忠红等^[3]以重叠形态的桃果实为研究对象,提出了一种基于凹点搜索的快速定位和检测重叠果实目标的方法,在剔除误识别和识别丢失后其定位误差低于 7%。徐越等^[4]、王丹丹等^[5]在去除遮挡苹果果实的非真实轮廓段以及非光滑轮廓段后,利用保留下来的真实果实轮廓进行目标参数的估计及其定位,而后综合利用 K-means 算法、数学形态学和 Spline 样条插值技术,将重叠苹果果实区域的凹点检测转换为凹区域的凸点检测问题,简化了凹点检测的复杂度,平均定位误差 14.15%;同时他们还通过融合 K-means 与 Ncut 算法研究了遮挡双重叠苹果目标的分割与重建,提高了分割目标与真实目标的重合度,但计算较为复杂。李立君等^[6]则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,对于枝叶遮挡重叠油茶果的分割误差为 8.71%。罗陆锋等^[7]提出了一种双串叠贴葡萄目标识别方法,识别精准度为 87.63%~96.12%。本研究在以往相关研究的基础上,针对红、黄、绿 3 种颜色重叠苹果果实,首先对其重叠形态进行判定,而后通过角点检测、分离点匹配连接实现重叠果实的分离,再基于分离后果实的有效轮廓通过改进的随机 Hough 变换实现重叠苹果果实的识别。

1 材料与方法

1.1 图像采集与试验

试验图像从江苏省徐州市丰县苹果种植示范区自然环境下拍摄,数码相机型号为 Canon DIGITAL IXUS 200 IS,苹果品种为红富士、金元帅、王林。采集的图像包括不同光线下果实图像,图像原分辨率为 4 000×3 000 像素。从中抽选 15 幅图像进行角点

检测算法性能对比,基于 11 幅图像中 21 个果实的定位误差指标评判识别效果。图像试验在 Matlab R2013a 软件平台上进行。平台计算机硬件配置为:处理器 Intel(R)Core(TM)2 Duo CPU@ 2.40 GHz,内存 2 G。

1.2 图像分割

从所采集的图像中基于分割算法获取果实区域。由于红色苹果果实以及枝叶与其背景之间具有较大的颜色差别,为此选择基于颜色特征的果实区域获取方法。通过研究比较发现采用基于 R-G 色差因子的 OTSU 动态阈值分割方法^[8]可获得较好的分割效果。而对于黄色、绿色苹果图像,采用多区域提取而后合并的图像分割方法^[9]获取果实区域。

分割后的图像中常有孤立的小点、毛刺和小孔洞。为了减少这些噪声对后续工作的影响,以邻域标记法对图像中的连通区域进行标记并统计总数,将小于最大连通区域 1/12 的小区域去除,通过漫水填充算法填补分割区域中的孔洞。最后将图像划分为果实和背景 2 个部分。图 1 为经过上述操作获取的苹果果实区域二值图像。

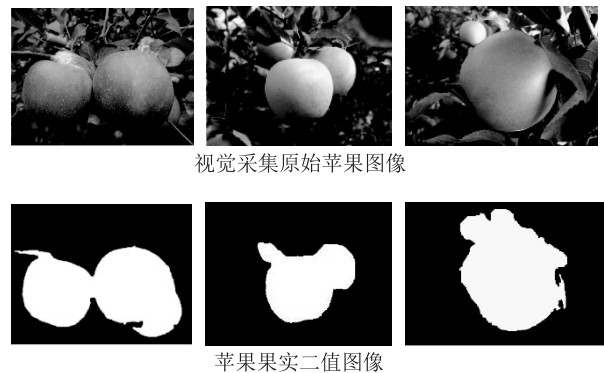


图 1 重叠苹果果实区域获取效果图

Fig.1 Extraction images of overlapped apple fruit area

1.3 重叠果实形态判定

果实形态的判定主要是对重叠形态果实区域的判定,以便后续针对此生长形态的果实进行进一步处理。首先对上述分割获得的果实区域以水平最小外接矩形框定,然后计算各个框定区域内果实图像的欧式距离图(图 2);基于对图像连通果实区域生

成的距离图进行横向和纵向投影,获取横、纵向投影图(图3);最后基于横、纵向投影图中的峰点数量判断是否为重叠形态果实。只要任一投影图中的最大峰点数量多于2,即可认为该区域果实为重叠形态果实。从图3中可以看出,投影图最大峰点数为2,由此可以判定图像中的果实为重叠形态的果实。

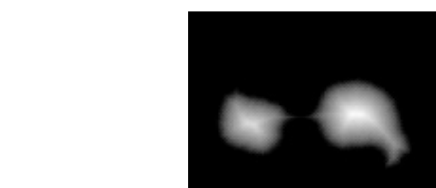
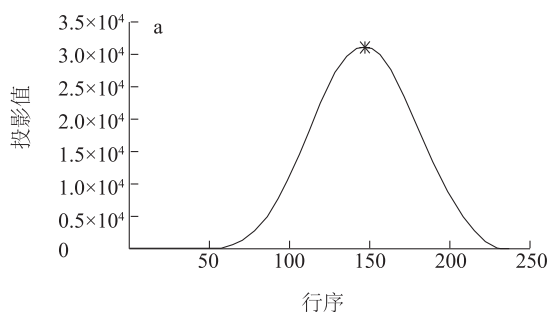
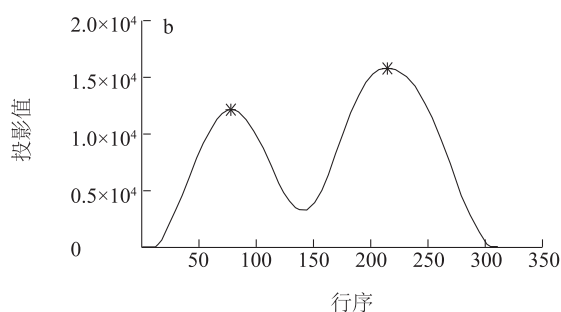


图2 重叠苹果果实欧式距离图

Fig.2 Euclidean distance image of overlapped apple fruits



a:横向投影图;b:纵向投影图。

图3 基于重叠苹果果实欧式距离图像的投影图

Fig.3 Projection images based on euclidean distance image of overlapped apple fruits

1.4 重叠区域角点检测

由于生长状态、光照度不同,分割出的果实区域形状不规则。这时如果直接对边缘曲线上的点进行两两匹配寻找分离点,计算量大且不稳定。为此首先根据重叠果实区域的边界曲线寻找角点作为后续分离点匹配的预选点组。通过 Canny 算子获取边界曲线。Canny 算子相对于其他算子,例如 Roberts 算子、Sobel 算子和 Prewitt 算子等,检测出来的边缘线较细,边缘连接程度较佳,且目标细节表现明晰、完整,更容易检测出真正的弱边缘^[10]。

采用 SUSAN 角点检测算法在获得的边缘轮廓上寻找角点。SUSAN 算法根据像素灰度,运用一个圆形模型检测与像素点相关的局部区域,该局部区域被定义为 USAN 区域,是指圆形模板中与中心像素亮度相同或相似的像素所组成的区域。SUSAN 角点检测就是根据不同位置时 USAN 区域面积判断当前像素点是否为区域角点。具体过程如下:用 5×5 圆形模板扫描检测区域。为了避免检测结果受亮度影响,采用式(1)计算模板内像素点响应的相似度值。

$$c(x, y, x_0, y_0) = e^{[f(x, y) - f(x_0, y_0)]^6} \quad (1)$$

式中, c 是相似度函数, (x, y) 为模板内任意像素点的坐标, $f(x, y)$ 为相应的灰度值, (x_0, y_0) 为模

板中心像素点的坐标, $f(x_0, y_0)$ 为中心像素点的灰度值。计算相应 USAN 区域的面积。USAN 区域的面积,就是模板内所有像素点对应的相似度值的总和,可以表示为:

$$n(x_0, y_0) = \sum_{(x, y)} c(x, y, x_0, y_0) \quad (2)$$

设置固定阈值 g , 采用 USAN 区域面积与固定阈值比较,根据式(3)获得初始角点 R 。式(3)中, g 为 $3/4$ 模板的像元数量。

$$R(x_0, y_0) = \begin{cases} g - n(x_0, y_0), & n(x_0, y_0) < g \\ 0, & n(x_0, y_0) \geq g \end{cases} \quad (3)$$

去除伪角点。计算 USAN 区域重心与模板中心之间的距离,如果距离较小则该模板中心是伪角点。若模板中心与 USAN 区域重心之间的连线所经过的像素点全部属于该 USAN 区域,则该模板中心即为符合要求的角点(图4)。



方块为检测出来的角点。

图4 重叠苹果果实角点检测

Fig.4 Corner detection for overlapped apple fruits

1.5 分离点匹配

分离点匹配即找出能够作为分离重叠果实的角点,而能够作为分离点的角点必须在果实区域中轴线两端,且所在局部曲线的曲率变化较大。通过迭代腐蚀的方法,获取重叠果实区域里每个果实的中心,连接之后构成中轴线,然后将检测的角点基于瓶颈准则进行两两匹配。迭代腐蚀法是将迭代算法与腐蚀算法结合对图像进行形态学处理的组合方法。具体是指每次操作都将二值图像腐蚀 1 层,每次迭代用 1 次 4 邻域结构元和 1 次 8 邻域结构元腐蚀上一次迭代腐蚀操作后得到的连通区域,直到再经过一次迭代腐蚀操作连通区域个数为 0,也就是只保留最中间的区域。在上述过程中考虑到迭代腐蚀算法可能会造成连通区域的减少,需要每次迭代腐蚀结束后恢复消失的连通区域并且重新标记连通区域。

采用 SUSAN 算法保留了局部曲率变化较大的点作为预选角点,使瓶颈点定位效率提高,准确性更高,减少了计算量。用 A 和 B 表示重叠区域边缘曲线上的角点,瓶颈准则可用式(4)表示:

$$E(A, B) = \frac{\text{dist}(A, B)}{\min[\text{length}(A, B), \text{length}(B, A)]} \quad (4)$$

式(4)中, $\text{dist}(A, B)$ 表示 A, B 两点间欧式距离, length 表示边缘曲线的距离。由于边缘曲线闭合,根据顺、逆时针方向计算,会有 2 个不同的值,即 $\text{length}(A, B)$ 和 $\text{length}(B, A)$, 瓶颈准则公式中选取较小的曲线距离。选择 $E(A, B)$ 值最小时的 A^* 、 B^* 点作为瓶颈点。

图 5a 中 O_1, O_2, O_3 分别表示迭代腐蚀得到的 3 个白色区域的质心, $O_1 O_2, O_2 O_3$ 即为所作中轴线, $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, C$ 是 SUSAN 算法检测出的角点。基于瓶颈准则选定的分离点见图 5b, 去除了一些无效角点。

1.6 分离点连接

分离点匹配后,要将重叠果实分离,还需要作出分离线。采用 Bresenham 算法^[11]连接所匹配的分离点。Bresenham 算法是计算机图形学领域使用最广泛的直线生成方法,不仅速度快、效果好,而且理论上证明它是目前同类各种算法中最优的。通过该算法作出分离线后,将分离线像素取反,与果实区域的二值图像进行与运算,即可将重叠果实区域分离(图 6)。

1.7 果实识别

由于果实目标区域的特殊性,分割得到的果实

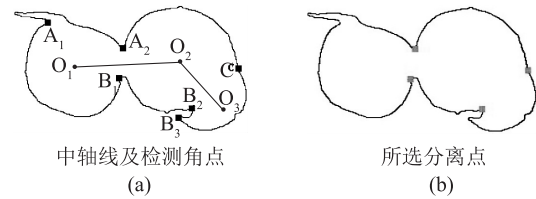


图 5 重叠苹果果实分离点匹配效果图

Fig.5 Separation point matching effect images for overlapped apple fruits

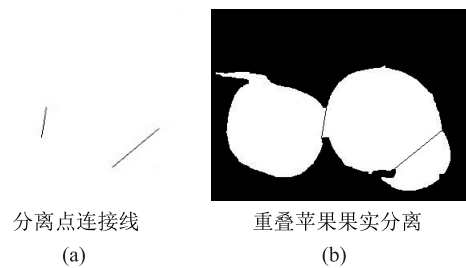


图 6 重叠苹果果实分离效果图

Fig.6 Separation effect images for overlapped apple fruits

区域不是完整规则的圆形,采用传统拟合方法则会导致拟合圆的区域相对于实际果实目标区域过大或过小,为果实的识别定位带来较大的误差,不利于机器人采摘。为此先提取各个分离果实区域的有效圆弧轮廓,然后基于所提取的有效圆弧轮廓,采用改进的随机 Hough 变换方法重建圆形轮廓和圆心。

有效轮廓是指果实区域边缘上曲率相同的圆弧曲线。由于分割的果实区域边缘曲线较复杂,直接从边缘曲线上提取有效轮廓的计算量较大。为了减少计算量,通过果实的凸壳图像来提取有效轮廓。有效圆弧轮廓的相邻凸壳顶点形成的直线斜率变化较小,接近拟合圆的圆弧;无效轮廓上相邻凸壳顶点形成的直线斜率存在突变或者有较大间距^[12]。提取果实区域有效轮廓的方法如下:(1)以逆时针方向跟踪凸壳顶点,按照检测顺序排序并确定各个顶点的位置。(2)根据序号大小计算相邻顶点间距(D)和所有顶点间距的平均值(T_D)。若 $T_D < D$,则认为两顶点间线段为无效轮廓并去除;反之则该线段作为预选有效轮廓。(3)计算预选有效轮廓的线段斜率(k),并计算相邻预选有效轮廓线段斜率的绝对差值(S)和所有斜率绝对差值的均值(T_S)。(4)若相邻预选有效轮廓线段的绝对差值(S)符合 $0 < S < T_S$,则该相邻的两段线段为有效轮廓,否则为无效轮廓,并去除。图 7b 即为在图 7a 凸壳图基础

上获取的有效轮廓图。

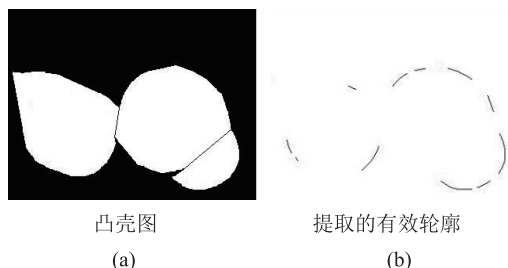


图7 重叠苹果果实有效轮廓提取效果图

Fig.7 Effective contour extraction effect images of overlapped apple fruits

Hough 变换是图像特征检测和识别中常用的一种方法,其主要优点是对图像中的噪声点不敏感,可

有效地滤除噪声以提高检测结果的可信度。主要缺点是存储空间大,运算时间长^[13-14]。随机 Hough 方法在图像空间随机选取不共线的 3 个特征点映射成参数空间的 1 个点,是多到 1 的映射,从而避免了传统 Hough 变换 1 到多映射的庞大计算量。本研究基于上述提取的有效轮廓,采用改进的随机 Hough 变换拟合果实区域。具体方法如下:将单个果实的有效轮廓等分成 E 份,按逆时针方向从各等份有效轮廓中任选一点作为特征点,确定特征点的位置,并按逆时针方向排序。按照序号以步长 S 提取相应的特征点,每 3 个点作为一组,设为 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$ 。利用式(5)计算出每组特征点相应的圆心坐标 $O(x, y)$,同时该圆心坐标对应的累加器 $A(x, y)$ 加 1。

$$\begin{cases} x = \frac{(y_2 + y_1)k_1k_2 + (x_2 + x_1)k_2 - (y_3 + y_1)k_1k_2 + (x_3 + x_1)k_1}{2k_1k_2(k_2 - k_1)} \\ y = \frac{(y_3 + y_1)k_1^2k_2 + (x_3 + x_1)k_1^2 - (y_2 + y_1)k_1k_2^2 + (x_2 + x_1)k_2^2}{2k_1k_2(k_1 - k_2)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, k_1 、 k_2 分别是弦 P_1P_2 、 P_2P_3 的斜率。

若 $S < E/3$, 则步长 S 加 1, 并重复步骤(2), 否则继续步骤(4)。当 $A(x, y)$ 值大于设定阈值 T_n 时, 求出 $A(x, y)$ 对应的所有圆心坐标的平均值 $O_a(x_a, y_a)$, 即为拟合圆圆心坐标。利用拟合圆圆心坐标和相应的特征点组, 用式(6)计算各个特征点组相应的半径 r , 同时将 r 对应的累加器 $B(r)$ 加 1。

$$r = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2} \quad (6)$$

式中, x_i 、 y_i 分别是有效轮廓上的第 i 个点的横纵坐标。

当 $B(r)$ 的值大于设定阈值 T_n 时, 求出 $B(r)$ 对应的所有预选半径的平均值 $[B_a(r_a)]$, 即为拟合圆的半径。图 8a 为提取的有效轮廓以及在此基础上的拟合圆, 图 8b 则是拟合圆在果实图像中实际区域的效果图。

2 结果与分析

为了说明 SUSAN 角点检测算法的有效性, 选择 15 幅图像中的重叠果实区域二值图像, 分别使用 CSS 曲率尺度空间角点检测、Harris 角点检测、SUSAN 角点检测算法进行计算。从表 1 中可知, 相比于 CSS 算法和 Harris 算法, SUSAN 算法检测得到的正确角点数较多, 丢失角点个数和伪角点个数较少。

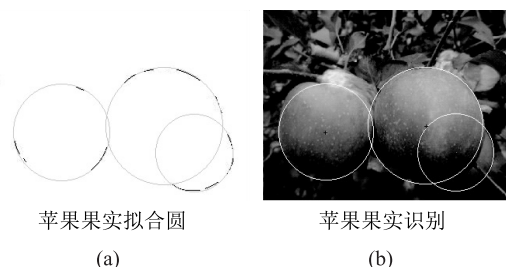


图8 重叠苹果果实识别效果图

Fig.8 Recognition effect images for overlapped apple fruits

表1 重叠苹果果实角点检测结果

Table 1 Corner detection results for overlapped apple fruits

算法	正确角点数	丢失角点数	伪角点数
CSS	40	12	60
Harris	28	24	41
SUSAN	49	3	19

机器人采摘果实时, 其采摘质量不仅与果实形状有关, 也与果实形状的中心和果实的大小有关。为了验证所设计方法的有效性, 用相对偏差 (v)^[13]、圆心相对误差 (CRE_{error}) 和半径相对误差 (RRE_{error})^[6] 作为评价识别效果的指标。

$$v = L / \sqrt{S_y} \quad (7)$$

式中, L 是果实形状的中心与拟合圆圆心的距

离, S_y 是果实实际区域的面积。

$$CRE_{error} = L / |RealR| \quad (8)$$

$$RRE_{error} = |CalR - RealR| / |RealR| \quad (9)$$

式(8)、(9)中, L 是果实形状的中心与拟合圆心的距离, $RealR$ 是果实图像的半径, $CalR$ 是拟合圆的半径。3 个误差值越小, 表示拟合圆越接近果实实际区域。

表 2 中列出了图像中 21 个果实的实际面积、形

状的中心坐标及半径、改进的随机 Hough 算法计算的拟合圆心和半径、常规 Hough 算法计算的拟合圆心和半径。表 3 是采用改进的随机 Hough 算法与传统 Hough 算法以表 2 中的数据计算得出的圆心误差和圆心距离, 以及利用式(7)、(8)、(9)计算得出的圆心相对误差、半径相对误差和相对偏差。试验中圆心距离是指坐标差值对应的直线距离, 圆心误差是指拟合圆圆心与果实形状的中心的坐标差值。

表 2 重叠苹果果实实际参数与拟合参数计算结果

Table 2 Calculation results of actual parameters and fitting parameters of overlapped apple fruits

图序号	果实形状中心 (像素)	果实半径 (像素)	果实面积 (像素×像素)	改进随机 Hough 算法		常规 Hough 算法	
				拟合圆心(像素)	拟合圆半径(像素)	拟合圆心(像素)	拟合圆半径(像素)
1	(81, 148)	64	12 412	(80, 154)	61	(81, 144)	69
	(141, 215)	76	16 775	(146, 210)	74	(212, 143)	76
	(248, 180)	51	2 385	(248, 180)	49	(249, 181)	49
2	(226, 129)	68	13 296	(226, 130)	68	(225, 131)	71
3	(138, 95)	78	9 714	(139, 94)	55	(137, 94)	56
4	(52, 122)	49	3 482	(52, 120)	47	(49, 119)	49
	(140, 129)	84	20 024	(141, 129)	80	(140, 124)	85
5	(146, 146)	79	18 093	(143, 147)	77	(143, 147)	78
6	(118, 73)	34	2 104	(120, 74)	29	(113, 81)	25
	(158, 143)	63	11 100	(162, 144)	59	(159, 141)	63
	(209, 112)	51	4 129	(217, 112)	44	(219, 110)	42
7	(150, 106)	76	15 858	(146, 107)	73	(147, 100)	80
8	(179, 129)	90	21 311	(174, 131)	87	(161, 134)	88
9	(119, 53)	19	856	(119, 55)	17	(115, 61)	26
	(138, 123)	67	12 634	(140, 122)	65	(139, 121)	67
10	(78, 121)	62	10 276	(89, 128)	62	(86, 129)	62
	(192, 108)	63	10 984	(192, 111)	63	(195, 110)	63
11	(58, 153)	33	2 905	(61, 154)	31	(61, 154)	32
	(143, 100)	42	5 288	(142, 102)	42	(145, 101)	42
	(142, 194)	28	21 628	(143, 198)	25	(145, 198)	26
	(246, 188)	34	3 496	(245, 189)	33	(247, 187)	35

从表 2、表 3 可以看出, 改进的随机 Hough 算法得到的圆心与实际圆心的距离较小, 因而圆心相对误差较小; 改进的随机 Hough 算法得到的拟合圆半径更接近果实实际半径, 因而半径相对误差也较小。改进的随机 Hough 算法得到的圆心相对误差、半径相对误差和相对偏差平均值分别为 6.90%、4.12% 和 6.07%, 常规 Hough 算法得到的这 3 个指标的平均值分别为 10.93%、6.87% 和 7.21%。与改进的随机 Hough 算法误差平均值相比, 常规 Hough 算法的圆心相对误差平均值高 4.03 个百分点, 半径相对误差平均值高 2.75 个百分点, 相对偏差平均值高 1.14 个百分点, 说明改进的

随机 Hough 算法得到的拟合圆更接近果实区域。

3 结 论

为了苹果采摘机器人能够准确识别重叠状态下的果实目标, 本研究设计了重叠苹果果实的分离识别方法。首先研究了重叠形态果实的判别方法; 而后通过角点检测、分离点匹配连接, 分离重叠形态果实, 在提取分离果实的有效圆弧轮廓后, 通过改进的随机 Hough 变换方法识别分离后的果实。最后通过试验验证了本方法的有效性。本方法对于其他重叠果蔬图像的识别也有一定的借鉴意义。

表 3 重叠苹果果实识别误差计算结果

Table 3 Recognition error calculation results for overlapped apple fruits

图序号	改进随机 Hough 算法					常规 Hough 算法				
	圆心误差 (像素)	圆心距离 (像素)	圆心相对 误差(%)	半径相对 误差(%)	相对偏差 (%)	圆心误差 (像素)	圆心距离 (像素)	圆心相对 误差(%)	半径相对 误差(%)	相对偏差 (%)
1	(1,-6)	6.08	9.45	4.68	5.46	(0,4)	4.00	6.25	7.81	3.59
	(-5,5)	7.07	9.30	2.63	5.46	(-2,3)	3.60	4.74	0	2.78
	(0,0)	0	0.00	3.92	0	(-1,-1)	1.41	2.76	3.92	2.89
2	(0,-1)	1.00	1.47	0.00	0.87	(1,-2)	2.23	3.28	4.41	1.93
3	(-1,1)	1.41	1.81	29.49	1.43	(1,1)	1.41	1.81	28.21	1.43
4	(0,2)	2.00	4.08	4.08	3.39	(3,3)	4.24	8.65	0	7.19
	(-1,0)	1.00	1.19	4.76	0.71	(0,5)	5.00	5.95	1.19	3.53
5	(3,-1)	3.16	4.00	2.53	2.35	(3,-1)	3.16	4.00	1.27	2.35
6	(-2,-1)	2.23	6.56	14.71	4.86	(5,-8)	9.43	27.74	26.47	20.56
	(-4,-1)	4.12	6.54	6.35	3.91	(-1,2)	2.23	3.54	0	2.12
	(-8,0)	8.00	15.69	13.73	12.45	(-10,2)	10.19	19.98	17.65	15.86
7	(4,-1)	4.12	5.42	3.95	3.27	(3,6)	6.70	8.82	5.26	5.32
8	(5,-2)	5.38	5.98	3.33	3.69	(18,-5)	18.68	20.76	2.22	12.79
9	(0,-2)	2.00	10.53	10.53	6.84	(4,-8)	8.94	47.05	36.84	30.56
	(-2,1)	2.23	3.33	2.99	1.98	(-1,2)	2.23	3.33	2.99	1.98
10	(-11,-7)	13.03	21.01	0.00	12.85	(-8,-8)	11.31	18.24	0	11.16
	(0,-3)	3.00	4.76	0.00	2.86	(-3,-2)	3.60	5.71	0	3.43
11	(-3,-1)	3.16	9.58	6.06	5.86	(-3,-1)	3.16	9.58	0	5.86
	(1,-2)	2.23	5.31	0.00	3.07	(-2,-1)	2.23	5.31	3.03	3.07
	(-1,-4)	4.12	14.71	10.71	2.80	(-3,-4)	5.00	17.86	7.14	3.40
	(1,-1)	1.41	4.15	2.94	2.38	(-1,1)	1.41	4.15	2.94	2.38
平均值	-	-	6.90	4.12	6.07	-	-	10.93	6.87	7.21

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] 李立君,阳涵疆. 基于改进凸壳理论的遮挡油茶果定位检测算法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12):285-292.
- [7] 罗陆锋,邹湘军,王成琳,等. 基于轮廓分析的双串叠贴葡萄目标识别方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6):15-22.
- [8] 马正华,申根荣,吕继东. 基于极限腐蚀的重叠苹果果实分割方法[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6):1372-1378.
- [9] 王帆,吕继东,申根荣,等. 基于 CLAHE 和开闭运算的绿色苹果图像分割[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2):141-145.
- [10] 田光兆,姬长英,王海青,等. 基于 MATLAB 的若干苹果边缘检测方法及其特性的对比研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(16):3873-3877.
- [11] 刘坤,吕晓琪,谷宇,等. 快速数字影像重建的 2 维/3 维医学图像配准[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(1):69-77.
- [12] 王鑫,胡洋洋,杨慧中. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(3):286-289.
- [13] 丁幼春,王书茂. 基于 RHT 的多圆检测改进算法[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(4):121-125.
- [14] 冯杰杰,林小竹. 基于改进 Hough 变换的指针式仪表自动识别方法研究[J]. 北京印刷学院学报, 2015, 23(4):62-66.

(责任编辑:张震林)