

基于改进粒子群算法的苹果表面缺陷检测

Apple surface defect detection research based on improved particle swarm optimization algorithm

程 磊

CHENG Lei

(黄淮学院机械与能源工程学院, 河南 驻马店 463000)

(Mechanical and Energy Engineering, Huang Huai University, Zhumadian, Henan 463000, China)

摘要:通过适应值函数建立了粒子早熟判断机制,自适应调节粒子权重和反余弦策略调整粒子加速因子优化粒子寻优,给出苹果表面缺陷检测流程。试验仿真显示该算法检测苹果表面缺陷的轮廓较为清晰,漏检率测试指标最大为 4.5% 小于其他算法的,完成漏检率所消耗的时间最少,为苹果质量检测提供了一种新的思路。

关键词:苹果表面缺陷;粒子群算法;自适应;反余弦;检测研究

Abstract: Premature judgment mechanism of particle swarm is established with fitness function. Adaptive adjustment of particle inertia weigh and acceleration factor of anti cosine strategy are optimized particle swarm to give the apple surface defect process. Simulation results show that improved particle swarm algorithm is more clearer detecting the defect of apple surface, the maximum missing rate test index is 4.5%, and less than other algorithms, and the least time consuming in complete the missing rate, so that it is the new method for quality detection of apple.

Keywords: apple surface defect; particle swarm optimization; adaptive; anti cosine; detection research

在苹果的生长、运输、贮存过程中,由于受到外界环境以及自身因素等各方面的影响,苹果表面会出现如孔洞、病虫、黑点、压伤、刺伤、裂果等各类缺陷,将会严重影响苹果的质量和后期的经济效果^[1-2],仅靠人工在高速运行的生产线上直接进行检测无法满足市场需求。

阈值算法(Threshold Algorithm, TA)是比较简单的智能化苹果检测方法。通过阈值将苹果图像缺陷目标和背景

划分为不同部分进行分割^[3],但是阈值的选择不涉及图像整体灰度以及像素性质,对对比度特别高、特别低的苹果图像检测效果差。数学形态算法(Mathematical Morphology Algorithm, MMA)通过腐蚀运算检测出苹果边缘^[4],但对苹果图像中的噪声较敏感,容易把噪声检测为苹果边缘点。Prewitt 算法对灰度渐变的苹果图像处理效果较好^[5],但对灰度幅值较小的边缘点检测存在断开现象。Roberts 算法对边缘的定位比较精确^[6],但对灰度阶跃较小的苹果缺陷目标边缘定位较弱。

上述文献表明,通过智能算法可提高缺陷的识别效果。但由于大多缺陷果存在多个缺陷,分割阈值不易选择。粒子群具有实现容易、精度高、收敛快等优点,但在搜索后期很容易陷入早熟状态,对粒子群改进可以避免早熟状态发生。

本研究采用基于改进粒子群算法(Improved Particle swarm optimization, IPSO)对苹果表面缺陷进行检测。通过粒子群体适应值方差判断算法粒子群是否陷入早熟收敛,对粒子权重自适应控制,反余弦策略调整加速因子,然后对缺陷分割阈值进行取优,以获得最佳检测结果。

1 改进粒子群算法思想

1.1 基本粒子群算法

粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)利用粒子相互协作和信息共享对问题寻优^[7]。在 PSO 算法中,粒子群体中的粒子个体为所求问题不明确的解,其中粒子 $i(i=1,2,\dots)$ 由速度向量 $\mathbf{V}_{i,t} = \{v_{i,t}^1, v_{i,t}^2, \dots, v_{i,t}^D\}$ 和位置向量 $\mathbf{X}_{i,t} = \{x_{i,t}^1, x_{i,t}^2, \dots, x_{i,t}^D\}$ 构成, D 为所求问题空间的维数, t 为目前的迭代次数,在每一次迭代运算中, $\mathbf{P}_{i,t} = \{p_{i,t}^1, p_{i,t}^2, \dots, p_{i,t}^D\}$ 为粒子 i 搜索到的最优位置, $\mathbf{P}_{g,t} = \{p_{g,t}^1, p_{g,t}^2, \dots, p_{g,t}^D\}$ 为整体粒子搜索到的最优位置,那么速度与位置更新为:

$$\begin{cases} v_{i,t+1}^j = \omega v_{i,t}^j + c_1 r_1 (p_{i,t}^j - x_{i,t}^j) + c_2 r_2 (p_{g,t}^j - x_{i,t}^j); \\ x_{i,t+1}^j = x_{i,t}^j + v_{i,t+1}^j, \end{cases} \quad (1)$$

基金项目:河南省科技技术厅项目(编号:182102310045);河南省基础与前沿技术研究项目(编号:1323004130343);驻马店市 2017 年工业科技公关项目(编号:17204)

作者简介:程磊(1981—),女,黄淮学院讲师,硕士。

E-mail: 1507228749@qq.com

收稿日期:2017-07-08

式中:

ω ——粒子的权重;

$c_1、c_2$ ——粒子的加速因子;

参数 $r_1 \in [0,1]、r_2 \in [0,1]$ 。

1.2 改进粒子群算法过程

在粒子群搜索过程中,粒子在相对稳定状态下搜索速度较慢,全局最优位置变化很小,这样在搜索后期很容易陷入早熟状态,如果不加以改进,粒子难以逃逸局部极小点。

1.2.1 粒子早熟状态判断机制 适应值函数用来评价粒子个体的好坏^[8],引导粒子群算法在解空间的搜索方向,计算公式为:

$$f(x,y) = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m [\sqrt{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2}], \quad (2)$$

式中:

m ——缺陷目标像素点周围的参考数, $m \leq 8$;

(x,y) ——缺陷目标像素点坐标;

(x_h,y_h) ——第 h 个参考节点坐标。

通过粒子的群体适应值方差 σ^2 判断算法粒子群是否陷入早熟收敛的标志:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_{avg})^2}{f}, \quad (3)$$

式中:

n ——粒子总数目;

f_i ——第 i 个粒子的适应值;

f_{avg} ——粒子当前的平均适应值;

$f = \max\{1, \max[|f_i - f_{avg}|]\}$ 。

σ^2 越小,群体越趋于收敛,这样通过 σ^2 小于阈值 σ_{min}^2 可判断算法陷入早熟收敛。

1.2.2 自适应 ω 控制 ω 决定了过去速度对当前速度影响的程度,较大 ω 能够拓宽粒子搜索范围,提高搜索全局性能,但得到精确解较难;较小 ω 使得局部搜索能力增强,虽然获得精确解,但是消耗时间较多^[9],因此通过自适应 ω 控制起到兼顾全局和局部搜索的作用。

设粒子 i 在第 t 代迭代时的适应值为 ω_t^i ,当前粒子群中最大适应值为 $\omega_{t,max}$,最小适应值为 $\omega_{t,min}$,则自适应控制算子 κ :

$$\kappa = \omega_{t,min} + \frac{\omega_t^i - \omega_{t,min}}{\omega_{t,max} - \omega_{t,min}} \times \ln\left(1 + \frac{t}{t_{max}}\right). \quad (4)$$

对每个粒子当前代中的权重 ω 更新为 ω' :

$$\omega' = \kappa \times \omega \times \zeta. \quad (5)$$

当 $\omega_{t,max} = \omega_{t,min}$,则:

$$\begin{cases} \omega' = \omega_0; \\ x_{t,t}^i = rand \times (x_{t,max} - x_{t,min}) + x_{t,min}; \\ v_{t,t}^i = rand \times (v_{t,max} - v_{t,min}) + v_{t,min}, \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$x_{t,max}、x_{t,min}$ ——更新边界的极值;

$v_{t,max}、v_{t,min}$ ——更新的速度最大值和最小值;

ζ ——调整因子;

ω_0 ——粒子 i 的权重初值;

ω' ——粒子 i 的当前权重;

t_{max} ——最大迭代次数。

这样在粒子进行局部最优搜索时,如果粒子搜索到局部最优值,则对粒子当前位置和速度进行更新,从而促进了粒子对全局最优值搜索的能力,提高了搜索精度。

1.2.3 反余弦策略调整加速因子 加速因子 c_1 影响粒子所记忆最好位置对自身个体飞行的程度, c_2 影响整个粒子群所记忆最好位置对群体飞行的程度^[10]。采用反余弦策略来调整加速因子,在群体迭代前期设置比较小的 $c_1、c_2$ 值,让粒子能够以较快速度进入局部搜索,后期通过设置较大的 c_2 值,保持粒子群的多样性,扩大搜索空间,反余弦策略调整加速因子过程为:

$$\begin{cases} c_1 = 2.5 - 2 \left[1 - \frac{\arccos\left(\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right]; \\ c_2 = 2.5 + 2 \left[1 - \frac{\arccos\left(\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

2 检测模型建立

2.1 苹果缺陷区域选择

输入苹果图像,中值滤波后,采用形态学腐蚀运算获取苹果缺陷区域^[11],结构元素选取 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 黑点块,腐蚀图像将使物体的边界沿周边减少一个像素,令 A 为图像, B 为结构元素, B_z 为 B 平移 z 个距离后的结果, B' 为 B 关于图像中心点的对称集合:

$$B' = \{-b; b \in B\}. \quad (8)$$

则腐蚀运算的定义:

$$A \ominus B' = \{Z; B_z \subseteq A\}. \quad (9)$$

数学形态学提取边界的算子:

$$ED(A) = A - (A \ominus E), \quad (10)$$

式中:

E —— $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的结构元素;

$ED(A)$ ——图像 A 的边界。

获取腐蚀图像后再用原图像减去腐蚀图像即可获得缺陷区域。

2.2 苹果缺陷边缘定位

通过边缘定位获得目标区域的精确位置^[12],计算公式:

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_l; \\ y' = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m y_l, \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$x_m、y_m$ ——目标质心坐标;

$x_l、y_l$ ——第 l 个像素的坐标;

m ——缺陷边缘周围像素的总数,为计算方便,选取 8 方向像素点即 $m = 8$ 。

2.3 苹果缺陷区域分割阈值选取

设大小为 $M \times N$ 的图像中像素点 (m,n) 的灰度级为 $f(m,n)$, $g(m,n)$ 为 8 方向邻域的平均灰度级^[13]。用 (a,s) 表示二元对 $\{f(m,n), g(m,n)\}$, $a,s = 0,1,\dots,L-1$,其中 $r(a,s)$ 为 (a,s) 出现的概率, L 为图像的灰度

级,则 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 的联合概率为:

$$\begin{cases} p(a, s) = r(a, s) / (M \times N); \\ \sum_{a=1}^{L-1} \sum_{s=1}^{L-1} p(a, s) = 1. \end{cases} \quad (12)$$

分割前后图像信息的差异通过非对称 Tsallis 交叉熵 $D_f = [D_a \ D_s]$ 表示, D_a 和 D_s 分别为分割前后图像在 a 方向和 s 方向上的交叉熵,在阈值为 t' 时的交叉熵分割准则函数:

$$\xi'(t') = P_{0(t')} \mu_{0(t')} \log \mu_{0(t')} + P_{1(t')} \mu_{1(t')} \log \mu_{1(t')}, \quad (13)$$

式中:

$P_{0(t')}, P_{1(t')}$ ——原图像在阈值为 t' 时缺陷目标、图像背景的先验概率,

$\mu_{0(t')}, \mu_{1(t')}$ ——原图像在阈值为 t' 时缺陷目标、图像背景的灰度均值。

对于 8 方向邻域平均图像,在阈值为 t'' 时的交叉熵分割准则函数:

$$\xi''(t'') = P_{0(t'')} \mu_{0(t'')} \log \mu_{0(t'')} + P_{1(t'')} \mu_{1(t'')} \log \mu_{1(t'')}, \quad (14)$$

式中:

$P_{0(t'')}, P_{1(t'')}$ ——8 方向邻域平均图像在阈值为 t'' 时缺陷目标、图像背景的先验概率;

$\mu_{0(t'')}, \mu_{1(t'')}$ ——8 方向邻域平均图像在阈值为 t'' 时缺陷目标、图像背景的灰度均值。

当 $D_a + D_s = 2 \sqrt{D_a D_s}$ 时, D_a 与 D_s 之和的最小值作为最佳分割阈值 (t', t''), 达到最佳分割效果, 即:

$$(t', t'') = \operatorname{argmin} [D_a + D_s], \quad (15)$$

其中: $0 \leq a, S \leq L-1$ 。

经过分割,原图像变成二值图像,然后对二值图像轮廓提取算法,如果原图中有一点为黑,且它的 8 个相邻点都是黑色时,判定该点是图像的内部的点,将该点标记删除。

算法流程:

- ① 粒子群随机初始化,设置粒子的位置和速度;
- ② 进行自适应 ω 控制和调整加速因子操作,更新粒子的位置和速度,计算新一代的粒子群中每个粒子的适应值;
- ③ 粒子群体适应值方差 σ^2 是否小于阈值 σ_{\min}^2 ,如果是,则进行步骤②,否则进行步骤④;
- ④ 若达到设定的最大迭代次数或 D_a 与 D_s 之和达到最小值,则停止迭代,进行步骤⑤,否则跳转到步骤②;
- ⑤ 将得到的最优解作为最优分割阈值。

3 试验仿真

采用 Matlab 仿真,设定初始参数:粒子数为 160, ω 最大为 0.9,最小为 0.01,迭代最大次数为 100, c_1 最大为 1.5,最小为 0.04, c_2 最大为 2,最小为 0.5,参数 $r_1 = 0.9, r_2 = 0.5$,调整因子 ζ 为 0.98,以 Matlab 7.0 为试验仿真平台。

3.1 缺陷检测分析

对具有缺陷的苹果进行不同算法对比检测分析,缺陷类型包括:孔洞、病虫、黑点、裂果,算法包括:TA、MMA、Prewitt、Roberts、IPSO,见图 1。

从图 1 的对比试验中可以看出,本研究算法可以很好地识别出孔洞、病虫、黑点、裂果缺陷,检测出的缺陷轮廓较为清晰,缺陷边缘能够得到较好的保护,且不受噪声干扰。其他算法检测效果差,不能正确识别出缺陷轮廓边缘,检测结果受到了噪声的影响,因此会检测出很多噪声点的边缘,没有区分缺陷区域和背景。

3.2 定性分析

3.2.1 漏检率测试 为了评价本系统的检测效果,通过漏检率测试指标进行分析,漏检率按式(16)计算:

$$\eta = \frac{U_1}{U_2}, \quad (16)$$

式中:

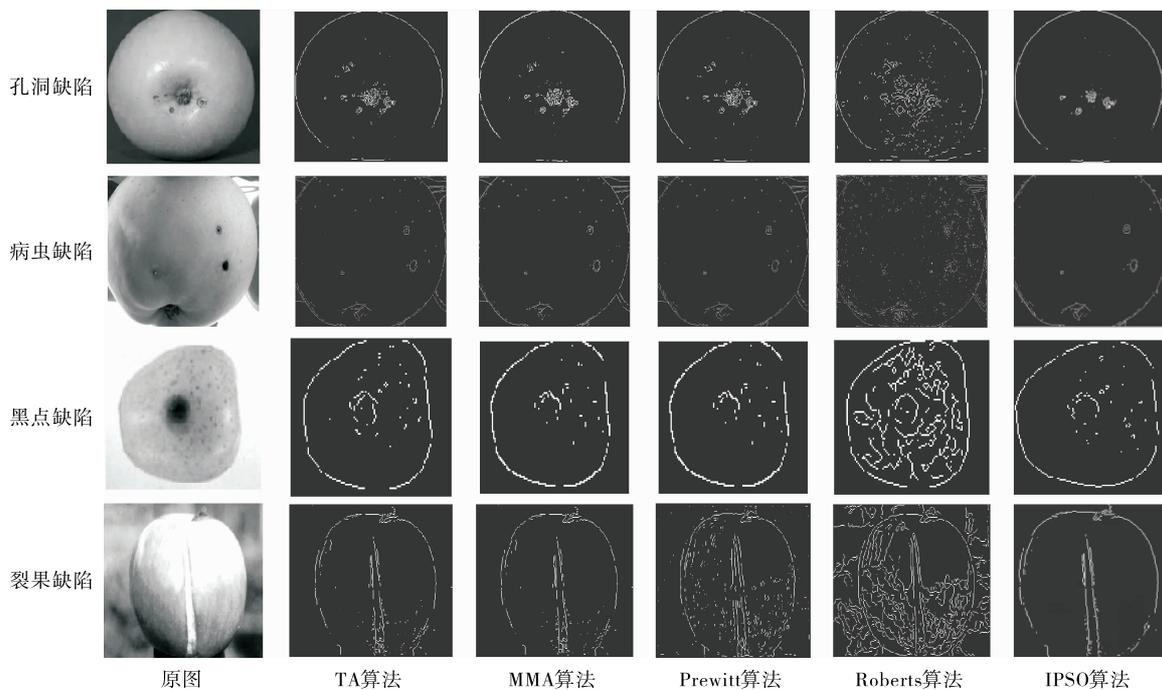


图 1 苹果表面缺陷检测分析
Figure 1 Detection and analysis of apple surface defects

η ——漏检率, %;

U_1 ——未能正确检出的苹果个数;

U_2 ——总苹果数。

数据样本: 孔洞苹果数量为 1 086 个、病虫苹果数量为 1 046 个、黑点苹果数量为 981 个、裂果苹果数量为 1 165 个,

漏检率测试对比仿真试验见图 2。

从图 2 可以看出, 本研究算法对孔洞、病虫、黑点、裂果缺陷检测的漏检率最小, 有助于缺陷苹果识别率的提高。

3.2.2 检测时间分析 对图 2 中各种算法能够完成各自漏检率所消耗时间分析, 其结果见图 3。

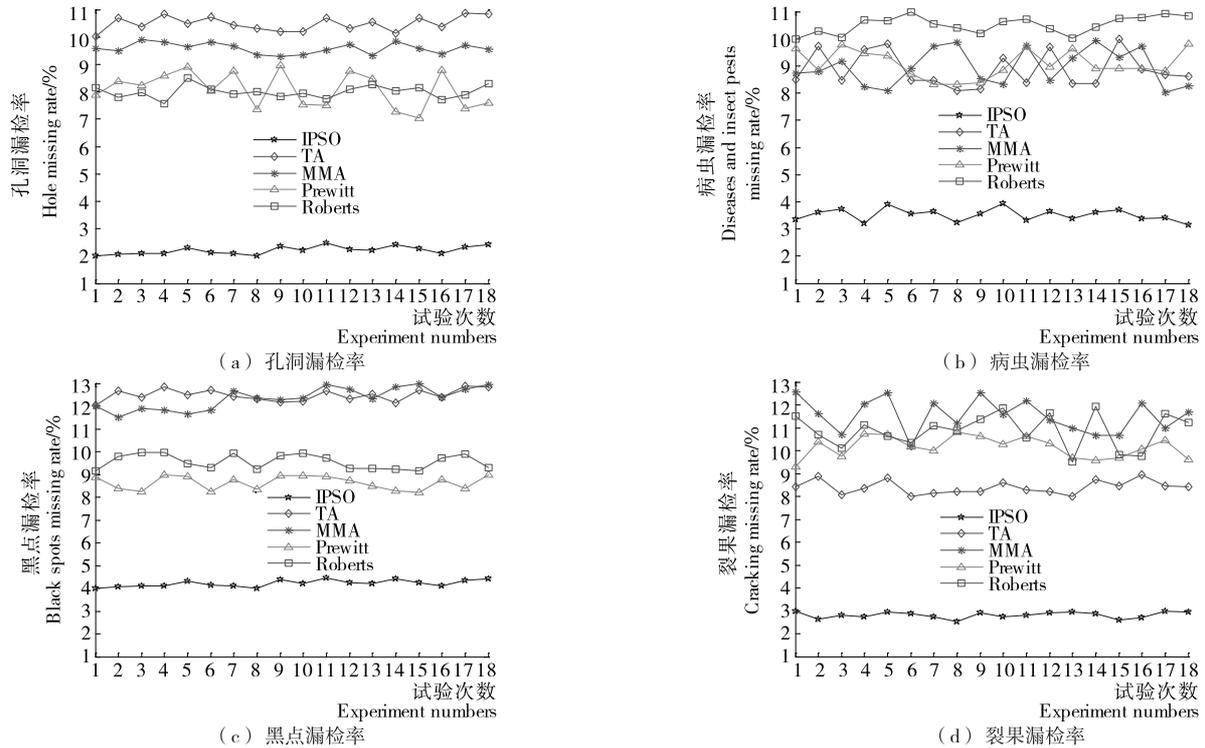


图 2 漏检率测试对比仿真试验结果

Figure 2 Missing rate test contrast simulation results

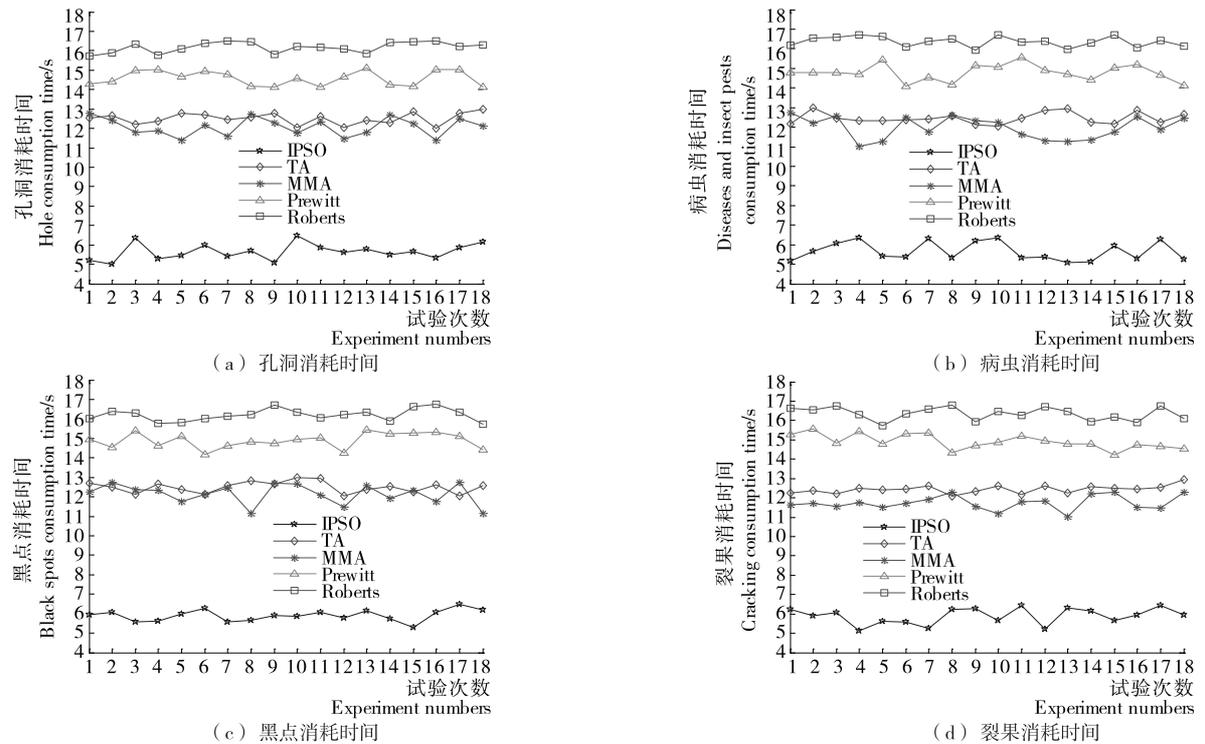


图 3 各种算法能够完成漏检率所消耗时间

Figure 3 Complete the time consuming of missing detection rate

从图 3 可以看出,本算法完成各种漏检率所消耗的时间最少,能够解决苹果检测数据处理量大和检测实时性之间的矛盾。

4 结论

(1) 针对基于智能算法苹果表面缺陷识别过程中存在的问题,本试验提出一种基于改进粒子群算法的苹果表面缺陷识别方法。通过缺陷区域选择、定位、阈值分割,然后用改进粒子群算法获得最优分割阈值。试验结果表明,能够识别各种缺陷,漏检率较低,说明该方法在缺陷苹果识别中十分有效。

(2) 在苹果表面缺陷的分割图像中,存在多个分割阈值,采用改进粒子群算法能够计算出最优分割阈值,避免了非最优分割阈值的存在,大大地提高了识别结果。

(3) 本试验只是针对苹果表面缺陷进行检测,并未对缺陷作进一步分类,这将是今后研究的一个方向。

参考文献

- [1] 程荣花, 马飞, 石梦. 基于颜色特征的苹果表面质量检测系统设计与实现[J]. 辽宁农业科学, 2014(3): 22-24.
- [2] 李丽娜, 赵武奇, 曾祥源. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 37-41.
- [3] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.
- [4] 刘燕妮, 张贵仓, 安静. 基于数学形态学的双直方图均衡化图像增强算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 215-219.
- [5] 唐伟伟, 陆海林, 葛俊祥. 基于 Prewitt 算子的抗雷达同频干扰法设计与 FPGA 实现[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(27): 42-47.
- [6] 文永革, 何红洲, 李海洋. 一种改进的 Roberts 和灰色关联分析的边缘检测算法[J]. 图学学报, 2014, 34(4): 637-641.
- [7] 陈汉武, 朱建锋, 阮越, 等. 带交叉算子的量子粒子群优化算法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 23-29.
- [8] 王飞. 带时间窗车辆调度问题的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(6): 226-229.
- [9] 杨进, 高飞, 马良. 基于改进并行粒子群算法的彩色图像匹配[J]. 计算机应用研究, 2015, 33(10): 35-42.
- [10] 白晓波, 吉晓民, 胡月. 多工况条件下滚针轴承的改进粒子群优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1900-1908.
- [11] 张聪, 汤伟. 基于粒子群优化算法与形态学的纸病图像检测方法[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(2): 60-64.
- [12] 刘慧忠, 汤伟. 基于 FPGA 的纸病检测预处理算法的实现[J]. 中国造纸学报, 2014, 29(1): 53-57.
- [13] 吴一全, 王凯, 曹鹏祥. 蜂群优化的二维非对称 Tsallis 交叉熵图像阈值选取[J]. 智能系统学报, 2015, 10(1): 103-112.
- [14] 程荣花, 马飞, 石梦. 基于颜色特征的苹果表面质量检测系统设计与实现[J]. 辽宁农业科学, 2014(3): 22-24.
- [15] 李丽娜, 赵武奇, 曾祥源. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 37-41.
- [16] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.
- [17] 刘燕妮, 张贵仓, 安静. 基于数学形态学的双直方图均衡化图像增强算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 215-219.
- [18] 唐伟伟, 陆海林, 葛俊祥. 基于 Prewitt 算子的抗雷达同频干扰法设计与 FPGA 实现[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(27): 42-47.
- [19] 文永革, 何红洲, 李海洋. 一种改进的 Roberts 和灰色关联分析的边缘检测算法[J]. 图学学报, 2014, 34(4): 637-641.
- [20] 陈汉武, 朱建锋, 阮越, 等. 带交叉算子的量子粒子群优化算法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 23-29.
- [21] 王飞. 带时间窗车辆调度问题的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(6): 226-229.
- [22] 杨进, 高飞, 马良. 基于改进并行粒子群算法的彩色图像匹配[J]. 计算机应用研究, 2015, 33(10): 35-42.
- [23] 白晓波, 吉晓民, 胡月. 多工况条件下滚针轴承的改进粒子群优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1900-1908.
- [24] 张聪, 汤伟. 基于粒子群优化算法与形态学的纸病图像检测方法[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(2): 60-64.
- [25] 刘慧忠, 汤伟. 基于 FPGA 的纸病检测预处理算法的实现[J]. 中国造纸学报, 2014, 29(1): 53-57.
- [26] 吴一全, 王凯, 曹鹏祥. 蜂群优化的二维非对称 Tsallis 交叉熵图像阈值选取[J]. 智能系统学报, 2015, 10(1): 103-112.
- [27] 贾振宇, 崔英德, 黎新明, 等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 化工进展, 2004, 23(5): 468-471.
- [28] 王静, 陈萍, 任常菲. 以冷水溶性凝胶为载体的细菌快速检测纸片的凝胶剂优化[J]. 卫生研究, 2012, 41(2): 300-302.
- [29] 廖茂彬, 陈向标, 赖明河. 食品中菌落总数的国标法测定注意事项及微生物快速测试卡法检测[J]. 中国食品与营养, 2013, 19(7): 16-18.
- [30] 傅廷振, 林雨晨. 无油空压机技术为食品行业带来纯净气源[J]. 食品安全导刊, 2016(7): 72-73.
- [31] 阿特拉斯-科普柯公司. 阿特拉斯-科普柯公司在中国推出全新系列高效能压缩机[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 70.
- [32] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. Screw compressors: Mathematical modeling and performance calculation[M]. Berlin: Springer, 2005: 32-34.
- [33] SU Shyh-haur, TSENG Ching-huan. Synthesis and optimization for rotor profiles in twin rotor screw compressors[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 543-552.
- [34] WU Yu-ren, FONG Zhang-hua. Rotor profile design for the twin-screw compressor based on the normal-rack generation method[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 42601-42608.
- [35] 何雪明, 戴进, 刘洪园. 基于自由曲线的螺杆转子型线的正反向设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2752-2757.
- [36] ZAYTSEV D, FERRIRA C A I. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line[J]. International Journal of Refrigeration, 2005(28): 744-755.
- [37] ZAYTSEV D, FERRIRA C A I. Screw compressor rotor profile generation method based on pre-defined meshing line[C]// 3rd International Compressor Technique Conference (ICTC 2001). Wuxi: [s.n.], 2001: 117-127.
- [38] 卜啸华, 邹友金, 孟尔镛. 螺杆压缩机型线设计的逆命题法[J]. 上海理工大学学报, 1986(3): 43-51.
- [39] 何雪明, 童洁, 戴进, 等. 双螺杆转子型线的反向优化设计及应用[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 151-157.
- [40] 何雪明, 姜振钢, 武美萍, 等. 双螺杆压缩机转子啮合线与型线关系研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(7): 763-770.
- [41] PIEGL L A, TILLER W. 非均匀有理 B 样条[M]. 2 版. 赵罡, 穆国旺, 王拉柱, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 86-93.
- [42] 邢诚, 王建强, 贾志强, 等. 多种数值积分方法比较分析[J]. 城市勘测, 2010(1): 104-106.
- [43] 刘玉娟, 陈应祖, 卢克功. 龙贝格积分法及其应用编程[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2007, 9(1): 97-99.
- [44] LEE H T. Screw-rotor machine with an ellipse as a part of its male rotor: US, A4890992[P]. 1990-01-02.

(上接第 85 页)

- [15] 王晓文, 张俊伟. TTC 应用于食品菌落总数测定的研究[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2011, 38(1): 86-89.
- [16] 曹杨. 纸片法测定细菌总数——TTC 显色浓度试验[J]. 江苏食品与发酵, 2008(4): 39-40.
- [17] 刘睿哲. 食品菌落总数测定中 TTC 做显色剂的探索[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(20): 64-65.

(上接第 97 页)

- [3] 傅廷振, 林雨晨. 无油空压机技术为食品行业带来纯净气源[J]. 食品安全导刊, 2016(7): 72-73.
- [4] 阿特拉斯-科普柯公司. 阿特拉斯-科普柯公司在中国推出全新系列高效能压缩机[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 70.
- [5] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. Screw compressors: Mathematical modeling and performance calculation[M]. Berlin: Springer, 2005: 32-34.
- [6] SU Shyh-haur, TSENG Ching-huan. Synthesis and optimization for rotor profiles in twin rotor screw compressors[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 543-552.
- [7] WU Yu-ren, FONG Zhang-hua. Rotor profile design for the twin-screw compressor based on the normal-rack generation method[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 42601-42608.
- [8] 何雪明, 戴进, 刘洪园. 基于自由曲线的螺杆转子型线的正反向设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2752-2757.
- [9] ZAYTSEV D, FERRIRA C A I. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line[J]. In-