

基于机器视觉的胡萝卜表面缺陷识别方法研究

谢为俊 魏 硕 王凤贺 杨光照 丁 鑫 杨德勇

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 胡萝卜在生长与收获运输过程中,不可避免会出现一些外观缺陷,缺陷胡萝卜的剔除是胡萝卜上市销售前的重要环节。目前缺陷胡萝卜主要依靠人工分选,具有分选标准不稳定、劳动强度大、成本高等缺点。为了快速、准确、无损地检测缺陷胡萝卜,将机器视觉技术引入到胡萝卜分选过程中,以提高分选准确率和效率。胡萝卜表面缺陷包括青头、弯曲、断裂、分叉和开裂等,缺陷特征互不相同,所以不同缺陷需要不同的检测算法。青头检测利用胡萝卜正常区域与青头区域的颜色差异实现,胡萝卜图像在 HSV 颜色空间下,利用统计方法确定青头区域 H 、 S 和 V 的判别阈值;弯曲、断裂和分叉识别是根据正常胡萝卜与缺陷胡萝卜之间的形状差异实现,凸壳算法、Hu 不变矩和 Harris 角点检测算法分别用来检测胡萝卜弯曲、断裂和分叉缺陷;开裂检测则是利用胡萝卜正常与开裂区域的纹理差异实现,Sobel 水平边缘检测算子、Canny 边缘检测算子结合形态学操作实现胡萝卜开裂区域提取。结果表明青头、弯曲、断裂、分叉和开裂的识别准确率分别为 100%、91.14%、90.57%、94.57% 和 95.45%,总体识别准确率达 94.91%,满足胡萝卜在线分选精度要求。

关键词: 胡萝卜; 表面缺陷; 机器视觉; 无损检测

中图分类号: TP391.4; TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0450-07

Machine Vision Based Detection Method of Carrot External Defects

XIE Weijun WEI Shuo WANG Fenghe YANG Guangzhao DING Xin YANG Deyong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of growth, harvest and transportation of carrots, it is inevitable that carrots appear some external defects. The elimination of defect carrots is an important link before carrot marketing. However, carrots mainly rely on manual grading nowadays, which has the inherent disadvantages of unstable grading standards, high labor consumption and high cost. In order to detect defective carrots quickly, accurately, and non-destructively, machine vision technology was introduced into carrot grading process to improve the classification accuracy and efficiency. Carrot external defects included green shoulder, bending, broken, furcation, and cracking. Different detection algorithms were proposed for different defects, since the different defects had different characteristics. The detection of green shoulder was realized by color difference between normal area and green shoulder area. In the HSV color space of carrot image, the threshold values of H , S , and V in region of green shoulder were determined by statistical method. Moreover, the recognition of bending, broken, and furcation were based on the shape difference between normal and defect carrots. The algorithm of convex hull, Hu moment invariants, and Harris corner detection methods were used to identify bending, broken, and furcation respectively. Furthermore, the detection of cracking was recognized by the difference texture of carrot. Sobel and Canny edge detection algorithm combined with morphologic operator to extract cracking region of carrot. The experimental results showed that the recognition accuracy of green shoulder, bending, broken, furcation, and cracking were 100%, 91.14%, 90.57%, 94.57%, and 95.45% respectively, and the overall recognition rate was 94.91%. The proposed defect recognition algorithm of carrot can provide algorithm reference for subsequent defect carrot online detection.

Key words: carrots; external defects; machine vision; non-destructive detection

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0700102-02)

作者简介: 谢为俊(1994—),男,博士生,主要从事农产品智能加工技术研究,E-mail: BS20193070629@cau.edu.cn

通信作者: 杨德勇(1970—),男,副教授,博士生导师,主要从事农产物物理特性研究,E-mail: ydy@cau.edu.cn

0 引言

胡萝卜 (*Daucus carota* L.) 是全世界主要蔬菜之一,因其富含胡萝卜素、多酚及钙等多种矿物质元素,受到越来越多消费者的喜爱。我国是世界上胡萝卜产量最大的国家,同时出口也最多。2018 年全球胡萝卜产量达 4 000 万 t 以上,其中中国大陆地区产量达 2 000 万 t,接近世界总产量的一半 (<http://www.fao.org>)。然而,由于土壤、水分、环境、收获、运输的原因,胡萝卜会出现青头、弯曲、断裂、开裂、分叉和病虫害等多种缺陷^[1-2]。缺陷胡萝卜会降低胡萝卜整体销售价格,影响消费者购买欲望,减少种植企业利润^[3]。为了提高胡萝卜销售价格、市场竞争力和农民种植积极性,胡萝卜需要进行分选销售。而胡萝卜具有产量大、含水率高和易损伤等特点,因此需要开发一种快速无损检测方法。

机器视觉因其快速、准确、无损和低成本的特点大量应用于农产品收获和采后处理环节^[4-5]。机器视觉识别物体主要是根据物体的颜色特征、纹理特征和几何特征^[6-7]。大量学者已经在农产品加工领域采用颜色^[8-9]、纹理^[10-11]和几何形状^[12-13]特征进行农产品缺陷识别方法研究,并取得了令人满意的效果。早在 20 世纪 90 年代已经有学者开始研究如何使用机器视觉进行胡萝卜在线分选,但限于当时的软硬件条件限制,离胡萝卜在线分选应用还有很远的距离^[14-15]。近年来,有学者基于机器视觉技术对胡萝卜缺陷识别和分级进行了研究,这些算法均是基于 Matlab 平台开发,其算法运行速度较低,缺陷识别算法总体识别率低于 92%^[1,16]。随着软硬件的飞速发展,越来越多的学者将机器视觉技术应用于农产品生产加工过程。赵博等^[17]利用机器视觉技术获取苏叶图像,进而获取叶片最小外接圆及其直径信息,并根据转换系数获得苏叶尺寸,实现了苏叶按照尺寸分级的目标。高彤等^[18]采用近红外光谱技术结合化学计量学方法建立了单粒玉米种子成熟度快速鉴别模型,模型分类准确率可达 92%。吕少中等^[19]针对荞麦剥壳机剥壳时不能随原料种类变化而适时调整砂盘间隙和转速的问题,提出一种基于机器视觉的荞麦剥壳性能参数在线检测方法,为荞麦剥壳机自适应最优控制提供数据反馈。ARAKERI 等^[20]利用机器视觉技术构建了一套番茄分级系统,该系统可以判别每个番茄的缺陷和成熟度,再将番茄自动分到相应等级箱,系统分类准确率达 96.47%,满足实际生产的要求。MOMIN 等^[21]利用机器视觉技术分析杂质和缺陷大豆在不同颜色分量上的灰度分布集中情况,选取合适的阈值识别并

剔除缺陷大豆和杂质。WANG 等^[22]设计了白蘑菇在线自动分级系统,利用分水岭算法、Canny 算子和形态学操作获取白蘑菇的直径,从而根据蘑菇直径进行分级,该系统每分钟可以处理 102.41 个蘑菇,分级准确率达 97.42%。上述研究表明,利用机器视觉技术实现农产品的在线分级是可行的,可以提高农产品加工企业的生产效率,提高农产品市场竞争力。

本文利用机器视觉技术对胡萝卜的不同缺陷实现自动识别,根据胡萝卜不同缺陷特征设计不同的缺陷检测算法。利用胡萝卜青头区域与正常区域的颜色差异实现青头识别;根据正常胡萝卜与缺陷胡萝卜之间的形状差异实现弯曲、断裂和分叉的正确检测;通过胡萝卜正常与开裂区域的纹理差异实现开裂检测。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为 2019 年河北省某农场种植的胡萝卜,其中青头、弯曲、断裂、分叉、开裂和正常胡萝卜分别为 139、79、106、129、132、142 个,总计 727 个,放置于 4℃ 冷库中保存直到实验开始。胡萝卜形态种类如图 1 所示。

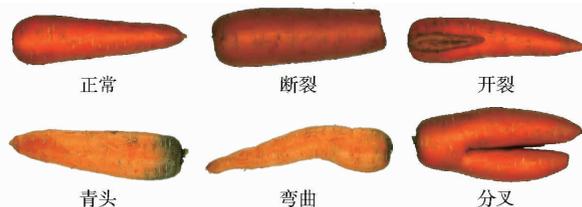


图 1 胡萝卜形态图

Fig. 1 Images of carrots

胡萝卜图像由彩色 CCD 相机 (DFK - 33UX265) 采集,图像尺寸为 1920 像素 × 1080 像素,采用 8mm 镜头 (映美精公司,德国)。为了获得清晰的图像,对相机的曝光时间和增益进行了计算调整^[23]。图像处理软件为 Python 3.7 和图像处理库 OpenCV 4.0.0;计算机配置为 Intel Pentium 3558U @ 1.70 GHz,4 GB 内存,500 GB 硬盘,操作系统为 Windows 8.1。胡萝卜在线检测示意图如图 2 所示,该系统在光照箱中放置了两块互呈 120° 角的平面镜,当胡萝卜从两块平面镜中间通过时,上方的相机可一次性捕捉到 3 幅胡萝卜图像,以尽可能多地获得胡萝卜表面信息,提高检测结果的可靠性。本文所提出的胡萝卜缺陷检测方法可移植到胡萝卜在线检测系统中。

1.2 图像预处理

图像预处理是图像处理过程中必不可少的一个

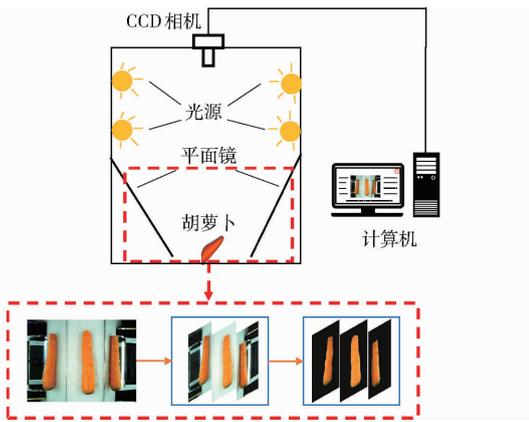


图2 胡萝卜图像采集系统

Fig.2 Carrot image acquisition system

环节,经过预处理后图像质量会得到提高,缺陷特征会更加明显。图像预处理将胡萝卜区域图像提取出来,删除其他无关区域。首先根据胡萝卜的灰度直方图(图3b)将胡萝卜从背景中分割,分割阈值为

$$t = \frac{p_{k1} + p_{k2}}{2} \quad (1)$$

式中 t ——分割阈值

p_{k1} 、 p_{k2} ——灰度直方图的两个峰值

如果图像某点像素值大于阈值 t ,则将其像素值设为 255,否则设为 0。为了使胡萝卜的形态表达不受影响,在胡萝卜边缘处保留 10 个像素,最后得到去除无关区域的二值图(图3c)。然后将二值图转换为三通道彩色图,二值图作为掩膜与原图进行形态学“与”操作得到了去除背景的胡萝卜彩色图像(图3d)。经过图像预处理后,胡萝卜图像既去除背景,同时保证胡萝卜无变形,保留原始图像的拓扑结构,避免识别结果受胡萝卜变形的影响。

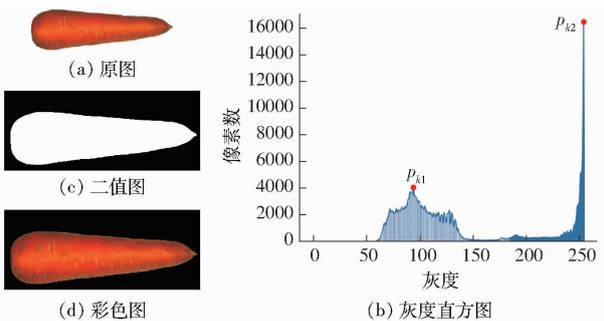


图3 图像预处理

Fig.3 Image pre-processing

1.3 缺陷识别算法

1.3.1 青头识别算法

青头是胡萝卜的主要缺陷,具体表现为胡萝卜顶部出现青绿色或紫色,这会导致胡萝卜食用口感和品质下降,因此胡萝卜青头在市场上不容易被消费者或加工厂接受,需要在销售前剔除。实验发现,胡萝卜青头区域与正常区域在 HSV 颜色空间下饱

和度(S)和明度(V)存在明显差异,如图4所示。统计结果表明青头区域识别颜色范围为

$$\begin{cases} 0.05 \leq H \leq 0.31 \\ 0.38 \leq S \leq 1 \\ 0.05 \leq V \leq 0.59 \end{cases} \quad (2)$$

式中 H ——图像色调

根据式(2)可正确识别胡萝卜青头区域,识别结果如图5所示。

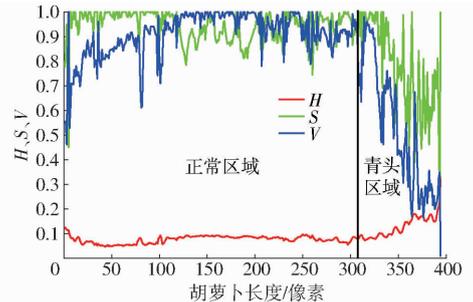
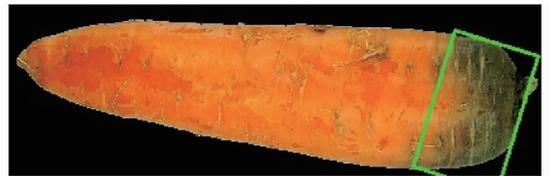
图4 胡萝卜正常区域与青头区域的 H 、 S 、 V 值Fig.4 Values of H , S and V in normal and green-shoulder region of carrot

图5 胡萝卜青头识别结果

Fig.5 Detection result of green-shoulder

1.3.2 弯曲识别算法

弯曲是胡萝卜常见缺陷之一,因土壤环境变化,导致胡萝卜主根下扎及肉质根膨大受阻而不能正常发育。虽然不会影响胡萝卜主要营养成分,但是弯曲会影响消费者购买欲望,弯曲胡萝卜应在上市销售前剔除。图6b为弯曲胡萝卜,由图可知弯曲胡萝卜边缘会有明显的凹陷区域,根据该特点利用凸壳算法^[24]可实现弯曲检测,具体检测步骤如下:①图像预处理,去除图像背景。②利用凸壳算法拟合胡萝卜区域,得到拟合后区域 R_1 (绿色轮廓)。③计算得到胡萝卜区域(红色轮廓)面积 A_{rea} 和区域 R_1 的面积 A_{rea_1} 。④定义胡萝卜形状规则度 B 为胡萝卜面积与凸壳算法拟合面积之比。形状规则度 B 越大表示胡萝卜越规则。图6a为正常胡萝卜,其形状规则度为 0.96,图6b弯曲胡萝卜的形状规则度为 0.83。

1.3.3 断裂识别算法

断裂是胡萝卜在收获或运输过程中由外力作用导致的缺陷,在断裂处,胡萝卜内部肉质直接与外界接触,高湿环境容易滋生细菌,造成胡萝卜品质下降,食用可能会对身体产生不利影响,此外断裂胡萝卜还可能影响正常胡萝卜品质,因此在胡萝卜储藏

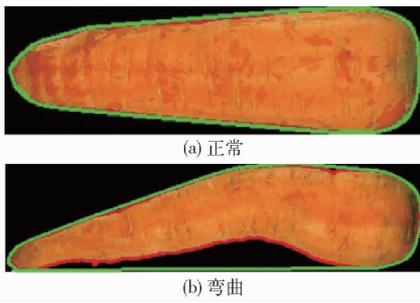


图 6 正常与弯曲胡萝卜图

Fig. 6 Images of normal and bend carrots

运输前需要将断裂的胡萝卜剔除。通过观察发现,断裂胡萝卜的断裂面通常是与胡萝卜对称轴垂直的平面,如图 7b 所示,因此断裂胡萝卜与正常胡萝卜在形状上存在差异。本算法选择一个正常胡萝卜图像(图 7a)作为标准匹配模板,利用图像的 Hu 不变矩^[25]将待检测胡萝卜与标准匹配模板和该胡萝卜的最小外接矩形进行图像匹配,得到两个图像匹配系数,根据匹配系数判别胡萝卜是否为断裂胡萝卜。

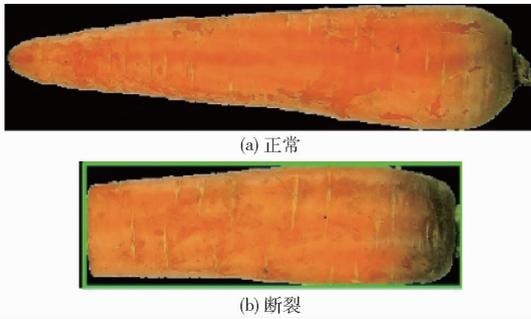


图 7 正常与断裂胡萝卜图像

Fig. 7 Images of normal and broken carrots

Hu 不变矩定义如下:

对于一个离散的数字图像 $f(x, y)$, 图像 $p+q$ 阶几何矩定义为

$$m_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M x^p y^q f(x, y) \quad (p, q=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

图像中心位置为

$$\begin{cases} \bar{x} = m_{10}/m_{00} \\ \bar{y} = m_{01}/m_{00} \end{cases} \quad (4)$$

图像 $p+q$ 阶中心矩定义为

$$\mu_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) \quad (5)$$

式中 N, M ——图像的高度、宽度, 像素

μ_{pq} ——图像 $p+q$ 阶中心矩

x, y ——图像中任一点坐标值

\bar{x}, \bar{y} ——图像中心点坐标值

归一化的中心矩定义为

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^\rho} \quad (6)$$

其中

$$\rho = \frac{p+q}{2} + 1$$

式中 η_{pq} ——图像归一化的中心矩

μ_{00} ——图像 0 阶矩

ρ ——归一化系数

Hu 不变矩定义如下

$$\begin{cases} M_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \\ M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ M_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ M_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \\ M_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (3\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \cdot [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \\ M_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{12} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) \cdot [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \end{cases} \quad (7)$$

式中 $M_1 \sim M_7$ ——图像不变矩

分别将待检测胡萝卜与标准匹配模板(图 7a)和待检测胡萝卜最小外接矩形(图 7b)进行匹配,得到两个匹配系数 r_{et} 和 r_{et1} 。胡萝卜是否断裂的判别条件为

$$\begin{cases} r_{et} \geq 1.2 \text{ 且 } r_{et1} \leq 0.12 & \text{(断裂)} \\ r_{et} < 1.2 \text{ 或 } r_{et1} > 0.12 & \text{(正常)} \end{cases} \quad (8)$$

1.3.4 分叉检测算法

土壤坚硬、透气性差、酸性强容易导致胡萝卜的肉质根皮孔突起,造成胡萝卜出现分叉的现象。虽然分叉不会影响胡萝卜主要营养成分,但是分叉胡萝卜卖相不佳且分叉处易折断,滋生细菌导致胡萝卜变质腐烂,因此需要将其剔除。通过观察发现分叉一般都是分布在胡萝卜根部位置,因此检测时需要判断胡萝卜的朝向。利用胡萝卜图像直径方向的积分图(图 8)判断胡萝卜朝向,胡萝卜直径最大处位于胡萝卜肩部位置。分叉胡萝卜

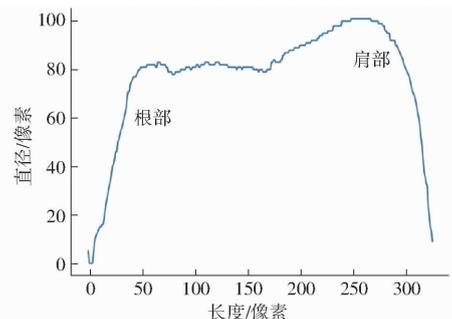


图 8 胡萝卜直径与长度关系曲线

Fig. 8 Variation curve of carrot diameter

卜在形状上具有多个角点,可以利用 Harris 角点检测算法^[26]进行检测。Harris 角点检测是取图像上某个像素的一个邻域窗口,当这个窗口在各个方向上进行小范围移动时,灰度变化都是最大的,该点即是角点。具体原理如下

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) (I(x + u, y + v) - I(x, y))^2 \quad (9)$$

式中 $E(u, v)$ ——像素灰度变化值

$w(x, y)$ ——高斯窗口函数

$I(x, y)$ ——Sobel 梯度函数

对 $I(x + u, y + v)$ 进行二维泰勒级数展开得

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) (I(x + u, y + v) - I(x, y))^2 = \sum_{x, y} w(x, y) (uI_x + vI_y)^2 = (u, v) \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y I_y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\text{设 } \mathbf{M} = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y I_y \end{bmatrix}, \text{ 则角点响应度}$$

量值 R 为

$$R = \det(\mathbf{M}) - k(\text{trace}(\mathbf{M}))^2 \quad (11)$$

式中 $\det(\mathbf{M})$ ——矩阵 \mathbf{M} 的行列式值

$\text{trace}(\mathbf{M})$ ——矩阵 \mathbf{M} 的迹 k ——常量

当图像某点的角点响应度量值 $R \gg 0$ 时,该点即为图像角点。

求出胡萝卜根部 Harris 角点数,需要对相邻角点进行合并,当合并后角点数大于 2 时,即判断胡萝卜为分叉缺陷,如图 9 所示。

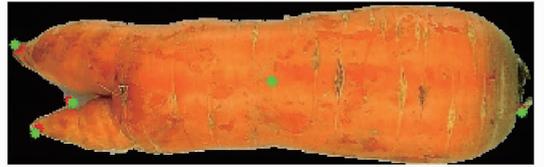


图 9 分叉缺陷检测结果

Fig.9 Detection result of furcation carrot

1.3.5 开裂检测算法

胡萝卜开裂缺陷是由土壤水分及生长环境变化导致,不仅影响胡萝卜的外观品质,还可能将泥土和细菌带到胡萝卜内部并且难以清洗干净,因此在分选过程中要将其剔除。开裂检测算法利用 Sobel 水平边缘算子、Canny 边缘检测算子结合图像形态学操作^[27]进行开裂区域边缘提取,具体检测流程如图 10 所示。胡萝卜开裂区域对称轴通常是和胡萝卜对称轴互相平行,因此首先使用 Sobel 水平算子进行边缘提取(图 10e),再和 Canny 算子提取的边缘(图 10f)执行形态学“和”操作得到更精确的边缘(图 10h)。在此过程中胡萝卜边缘一直存在,要准确提取出胡萝卜开裂区域边缘就要消除胡萝卜边缘的干扰。首先将胡萝卜二值图(图 10b)进行形态学“膨胀”操作得到膨胀图(图 10c),然后将胡萝卜二值图进行形态学“腐蚀”操作得到腐蚀图(图 10d),再将膨胀图与腐蚀图进行形态学“异或”操作得到加粗的胡萝卜边缘图(图 10g)。最后将含有胡萝卜边缘的缺陷检测图(图 10h)减去胡萝卜加粗边缘图(图 10g)得到去除胡萝卜边缘的检测图(图 10i),精确提取出开裂区域边缘。边缘提取完成后,根据最后的检测图像素点数量判断胡萝卜是否开裂。

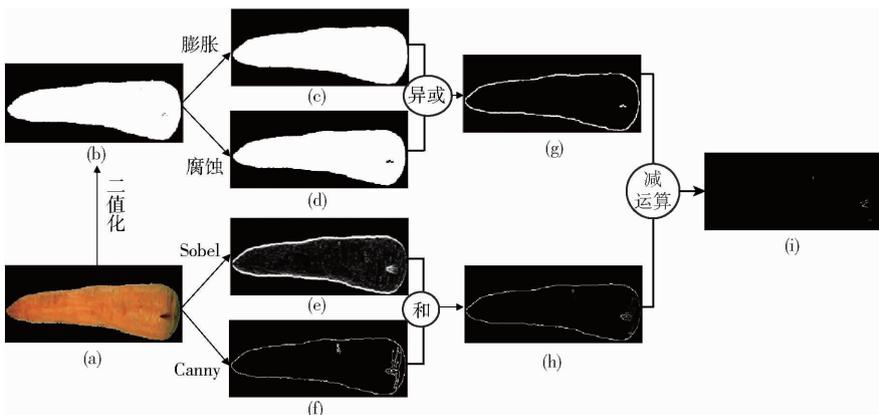


图 10 胡萝卜开裂检测算法结构图

Fig.10 Detection of crack carrot

2 结果与分析

为验证检测算法的准确性,收集青头、弯曲、断裂、分叉、开裂和正常胡萝卜分别 139、79、106、129、132、142 个,总计 727 个,识别结果如表 1 所示。由表

1 可得,青头是最容易识别的,识别准确率最高,达 100%,检测速度最快,达 23.25 幅/s。青头与胡萝卜正常颜色有明显差异,因此青头识别算法最简单。弯曲是胡萝卜较为普遍的一种缺陷,根据胡萝卜形状规则度 B 值来判别,判别阈值根据图 11 确定为 0.9。因

为弯曲缺陷在几何形状方面与正常胡萝卜有较大的差别,因此弯曲缺陷识别准确率较高,为 91.14%。此外,部分误识别为正常是由胡萝卜弯曲不明显造成的。断裂缺陷的识别准确率最低,只有 90.57%,主要因为有些上部断裂胡萝卜会被误判为正常胡萝卜,另外一些形状短粗的胡萝卜会被误判为断裂胡萝卜。开裂检测是经过一系列的图像处理提取出开裂区域,开裂区域的总像素数如图 12 所示,由图可知开裂胡萝卜图像的最终检测像素数均大于 20,且分布范围较大,而正常胡萝卜数据比较集中,且均小于 20,因此选取 20 作为开裂判别的阈值。胡萝卜开裂缺陷识别准确率达 95.45%,仍有少量误判,因为某些胡萝卜开裂区域小、深度浅,会被误判为正常胡萝卜。分叉的识别准确率较高,达到了 94.57%,识别分叉的关键是识别出胡萝卜的根部并检测出角点,当根部角点数大于 2 时,即判定为分叉缺陷,误判现象主要发生在分叉较小且突出较小,即角点不明显处。本文提出的胡萝卜缺陷识别算法综合识别准确率达 94.91%,可以满足胡萝卜在线分选的要求。值得注意的是,本文算法是基于 Python 编程语言开发,识别速度还需要进一步提高,未来会将该算法移植到 C++ 开发平台上。另外,本文胡萝卜数据样本数量较少,未来将增加样本数量,使其在识别精度和速度方面达到胡萝卜实际在线分选需要。

表 1 算法识别结果

Tab.1 Recognition results of defect detection algorithm

缺陷类型	数量/个	识别数量/个	识别准确率/%
青头	139	139	100
弯曲	79	72	91.14
断裂	106	96	90.57
开裂	132	126	95.45
分叉	129	122	94.57
正常	142	135	95.07
总计	727	690	94.91

3 结论

(1) 利用胡萝卜青头与正常区域的颜色差异识

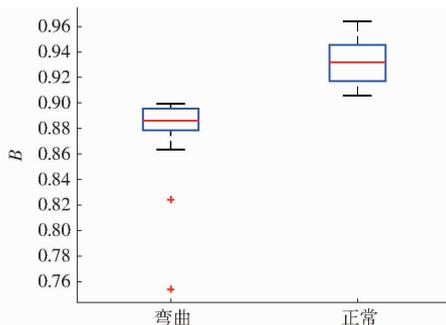


图 11 弯曲和正常胡萝卜 B 值箱线图

Fig.11 B values of bending and normal carrots

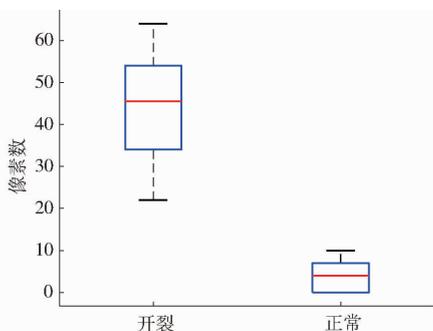


图 12 开裂与正常胡萝卜检测图像像素数箱线图

Fig.12 Total number of pixels in crack and normal carrot detection images

别出胡萝卜青头缺陷,识别准确率达 100%,识别速度为 23.25 幅/s。

(2) 根据正常与缺陷胡萝卜之间的形状差异实现弯曲、断裂和分叉的正确识别,凸壳算法、Hu 不变矩和 Harris 角点检测算法分别用来实现弯曲、断裂和分叉的正确识别,识别准确率为 91.14%、90.57% 和 94.57%。

(3) 利用胡萝卜正常与开裂区域的纹理差异实现开裂缺陷检测,利用 Sobel 水平算子、Canny 算子结合形态学操作实现胡萝卜开裂区域提取,识别准确率为 95.45%。

(4) 本研究根据胡萝卜每种缺陷特征分别设计了相应检测算法,总体识别准确率达到 94.91%,满足胡萝卜在线分选要求。

参 考 文 献

[1] XIE Weijun, WANG Fenghe, YANG Deyong. Research on carrot surface defect detection methods based on machine vision [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30): 24-29.

[2] DENG L, DU H, HAN Z. A carrot sorting system using machine vision technique[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017,33(2):149-156.

[3] LOEBNITZ N, GRUNERT K G. The effect of food shape abnormality on purchase intentions in China[J]. Food Quality and Preference, 2015, 40: 24-30.

[4] 毕松,高峰,陈俊文,等. 基于深度卷积神经网络的柑橘目标识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 181-186. BI Song, GAO Feng, CHEN Junwen, et al. Detection method of citrus based on deep convolution neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 181-186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.021. (in Chinese)

[5] 谢为俊,丁冶春,王凤贺,等. 基于卷积神经网络的油茶籽完整性识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 13-21.

- XIE Weijun, DING Yechun, WANG Fenghe, et al. Integrity recognition of *Camellia oleifera* seeds based on convolutional neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 13–21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.002. (in Chinese)
- [6] MAHENDRAN R, JAYASHREE G, ALAGUSUNDARAM K. Application of computer vision technique on sorting and grading of fruits and vegetables[J/OL]. Journal of Food Processing & Technology, S1-001. DOI.104172/2157-7110. S1-001.
- [7] XIE Weijun, WANG Fenghe, YANG Deyong. Research on carrot grading based on machine vision feature parameters[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30):30–35.
- [8] LEE D, ARCHIBALD J K, XIONG G. Rapid color grading for fruit quality evaluation using direct color mapping[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(2): 292–302.
- [9] LIANG Weizhen, KIRK K R, GREENE J K. Estimation of soybean leaf area, edge, and defoliation using color image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:41–51.
- [10] MUHAMMAD G. Date fruits classification using texture descriptors and shape-size features[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 37:361–367.
- [11] YU Xinjie, LIU Kangsheng, WU Di, et al. Raisin quality classification using least squares support vector machine (LSSVM) based on combined color and texture features[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(5):1552–1563.
- [12] GENG Jinfeng, XIAO Linfang, GAO Yingwang, et al. Separating clods and stones from potato tubers based on color and shape[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1):287–295.
- [13] KHEIRALIPOUR K, PORMAH A. Introducing new shape features for classification of cucumber fruit based on image processing technique and artificial neural networks[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(6): e12558.
- [14] HOWAITH M S. Reflectance characteristics of fresh-market carrots[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3):961–964.
- [15] HOWARTH M S, BRANDON J R, SEARCY S W, et al. Estimation of tip shape for carrot classification by machine vision[J]. J. Agric. Engng Res., 1992(53):123–139.
- [16] 韩仲志, 邓立苗, 徐艳, 等. 基于图像处理的胡萝卜青头、须根与开裂的检测方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 156–161.
HAN Zhongzhi, DENG Limiao, XU Yan, et al. Image processing method for detection of carrot green-shoulder, fibrous roots and surface cracks[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9):156–161. (in Chinese)
- [17] 赵博, 王焯, 董鑫, 等. 苏叶在线分选系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6):156–162.
ZHAO Bo, WANG Ye, DONG Xin, et al. Design and experiment of online sorting system for perilla[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 156–162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.017. (in Chinese)
- [18] 高彤, 吴静珠, 毛文华, 等. 单粒玉米种子成熟度快速判别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):399–403.
GAO Tong, WU Jingzhu, MAO Wenhua, et al. Method for quickly determining maturity of single corn seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):399–403. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s061&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.061. (in Chinese)
- [19] 吕少中, 杜文亮, 陈震, 等. 基于机器视觉的荞麦剥壳性能参数在线检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 35–43.
Lǚ Shaozhong, DU Wenliang, CHEN Zhen, et al. On-line measuring method of buckwheat hulling efficiency parameters based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):35–43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.004. (in Chinese)
- [20] ARAKERI M P, LAKSHMAN A. Computer vision based fruit grading system for quality evaluation of tomato in agriculture industry[J]. Procedia Computer Science, 2016, 79:426–433.
- [21] MOMIN M A, YAMAMOTO K, IYAMOTO M, et al. Machine vision based soybean quality evaluation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140:452–460.
- [22] WANG Fengyun, ZHENG Jiye, TIAN Xincheng, et al. An automatic sorting system for fresh white button mushrooms based on image processing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151:416–425.
- [23] MO S, LIU Q. Adaptive optimization algorithm for CDS control parameters of high-speed CCD[C]//5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2010, 76582C.
- [24] LINH K N, CHANYOUNG S, JOONGHYUN R, et al. QuickhullDisk: a faster convex hull algorithm for disks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 363: 124626.
- [25] 余泽东. 基于 Otsu 算法和 Hu 不变矩的交通信号灯识别[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4):371–376.
YU Zedong. Traffic lights recognition with Otsu algorithm and Hu invariant moments[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4):371–376. (in Chinese)
- [26] 姚远, 孟金慧, 李向阳. 大豆植株分枝数自动提取算法研究[J]. 现代农业科技, 2019(11):6–8.
- [27] HOANG N, NGUYEN Q, QUARANTA G. Metaheuristic optimized edge detection for recognition of concrete wall cracks: a comparative study on the performances of Roberts, Prewitt, Canny, and Sobel algorithms[J]. Advances in Civil Engineering, 2018: 7163580.