

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.034

基于近红外高光谱成像的猕猴桃早期隐性损伤识别^{*}

迟茜 王转卫 杨婷婷 刘大洋 郭文川
(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了研究识别早期隐性损伤猕猴桃的方法,以“华优”猕猴桃为对象,以 900 ~ 1 700 nm 范围近红外高光谱成像系统为检测设备,采集了完好无损和隐性损伤 1 ~ 3 h 内猕猴桃的近红外高光谱。研究发现 900 ~ 1 350 nm 内二者的反射光谱具有明显的差异。对此区域进行分段主成分分析,确定 1 050 ~ 1 200 nm 为识别损伤的最佳光谱区域。基于此最佳光谱区域内主成分图像的权重系数及波长间光谱反射值的相关性优选了 4 个特征波长(1 057、1 090、1 120 和 1 177 nm)。对该 4 个特征波长进行了二次主成分分析,并结合中值滤波、阈值分割及数学形态学处理方法提出了早期隐性损伤猕猴桃的识别算法。该算法对 70 个无损猕猴桃和 70 个隐性损伤猕猴桃的正确识别率分别为 100% 和 95.7%,平均正确识别率为 97.9%。研究结果表明,近红外高光谱成像技术可用于早期隐性损伤猕猴桃的识别。

关键词: 猕猴桃 隐性损伤 早期识别 高光谱成像 主成分分析
中图分类号: TP391.41; TP274⁺.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0235-07

Recognition of Early Hidden Bruises on Kiwifruits Based on Near-infrared Hyperspectral Imaging Technology

Chi Qian Wang Zhuanwei Yang Tingting Liu Dayang Guo Wenchuan
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To recognize early hidden bruises on kiwifruits, taking ‘Huayou’ kiwifruits as research object and near-infrared (NIR) hyperspectral imaging system as detection device, the NIR hyperspectral image of kiwifruits with no bruises and hidden bruises damaged in 3 h were collected. The sample images were covered a wavelength of 900 ~ 1 700 nm. It was found that the no bruises and hidden bruises kiwifruits had obvious reflectance value between 900 nm and 1 350 nm. Principal component analysis (PCA) was conducted on this spectral region, and it was found that 1 050 ~ 1 200 nm was the optimal band for identifying kiwifruits with hidden bruises. Based on the weight coefficients of the principal component (PC) images in the optimal band and their correlation coefficients of reflection values between wavelengths, four characteristic wavelengths, i. e. 1 057, 1 090, 1 120 and 1 177 nm, were extracted. After a secondary PCA, median filtering, threshold segmentation and mathematical morphology, recognition algorithm of kiwifruits with hidden bruises were proposed and then applied on 70 no bruises and 70 hidden bruises kiwifruits. Results showed that the correct identification rates for no bruises kiwifruits and hidden bruises kiwifruits reached to 100% and 95.7%, respectively. The average identification rate was 97.9%. This study indicates that NIR hyperspectral imaging technology is effective for identifying kiwifruits with early hidden bruises. Its results provide basic data for developing online detection system for bruised kiwifruits.

Key words: Kiwifruit Hidden bruises Early recognition Hyperspectral imaging Principal component analysis

收稿日期: 2014-07-07 修回日期: 2014-08-08
^{*} 江苏省农产品物理加工重点实验室开放基金资助项目(JAPP-2012-4)和国家自然科学基金资助项目(31171720)
作者简介: 迟茜, 讲师, 博士生, 主要从事信号与信息处理研究, E-mail: chiqian_nwsuaf@sina.com
通讯作者: 郭文川, 教授, 博士, 主要从事农产品和食品品质检测技术研究, E-mail: guowenchuan69@126.com

引言

猕猴桃在采摘、包装、贮运等诸多环节中常因碰撞或挤压造成不同程度的机械损伤^[1]。由于猕猴桃果皮颜色较深,因碰撞和挤压造成的损伤很难被肉眼识别,常称其为隐性损伤。传统的基于 RGB 成像系统的机器视觉技术已经成功地应用于识别果实的疤痕、表面缺陷、果蒂^[2-5]等方面,但很难应用于识别肉眼难以判别的隐性损伤猕猴桃。郭文川等^[6-7]提出利用近红外漫反射光谱结合化学计量学方法可识别因碰撞和挤压造成的隐性损伤猕猴桃,正确识别率高于 92.4%。但由于近红外光谱获取的是点的信息,无法全面地获取被测对象的综合信息,因此,对损伤猕猴桃的识别效果会受到检测点的影响。高光谱成像技术是一种同时获取被测对象的图像信息和光谱信息的一种新技术,已越来越广泛地应用于农产品内外部品质无损检测中^[8-11]。在水果表面损伤或缺陷检测方面,高光谱成像技术已经用于识别苹果的表面缺陷和轻微损伤^[12-18]、柑橘类果实的表面缺陷^[19-21]、草莓损伤面积的计算^[22]及外部虫伤枣的检测^[23]等。Lü 等^[24]基于可见/近红外(408~1 117 nm)高光谱图像研究了隐性损伤猕猴桃的检测方法,所建模型对损伤猕猴桃的正确判别率为 85.5%。前期研究表明,识别隐性损伤猕猴桃的最佳光谱区域为近红外区域^[6-7]。ElMasry 等^[15]、黄文倩等^[16]也得出检测苹果轻微损伤的最优波段在近红外区域。为了寻找识别隐性损伤猕猴桃更准确的方法,本文以“华优”猕猴桃为对象,探索基于近红外(900~1 700 nm)高光谱成像技术识别挤压损伤 1~3 h 内的猕猴桃的识别方法,为隐性损伤猕猴桃的工业化识别提供研究基础。

1 材料与设备

1.1 实验材料

实验用样品为陕西省广为种植的“华优”猕猴桃。从猕猴桃果园中轻轻摘取一批成熟的猕猴桃样品,选取形状规则、无损、无病斑、直径在 35~45 mm 的猕猴桃为实验样品。将猕猴桃水平放置在电子秤平台上,将一木质平板水平放置在猕猴桃上,从上向下施加 150~300 N 的压力,以制备不同损伤程度的损伤样品(损伤部位在赤道附近)。挑选肉眼不能辨别的压伤样品 70 个,另选无损样品 70 个。在损伤样品发生压伤 1~3 h 内,在室温(24±2)℃条件下采集每个样品的高光谱图像。

1.2 高光谱图像采集系统

利用北京汉光卓立公司开发的 HyperSIS 高光

谱成像系统采集每个样品的高光谱图像数据,如图 1 所示。该系统主要由推扫型成像光谱仪(ImSpector, N17E 型,芬兰)、CCD 相机(OPCA05G 型,日本)、计算机、电动机控制箱和暗箱组成。其中暗箱包括电控移动载物台和 4 个 100 W 的白光漫反射型光源。数据采集软件为 SpectralSENS(Spectral Imaging Ltd., 芬兰),高光谱相机采集的光谱波长为 900~1 700 nm,光谱分辨率为 5 nm,光谱采样平均间隔为 3.32 nm,成像分辨率为 320 像素×250 像素。

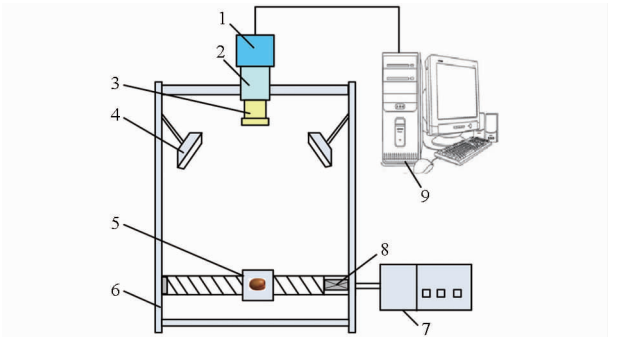


图 1 近红外高光谱图像采集系统

Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system
1. CCD 相机 2. 光谱仪 3. 镜头 4. 光源 5. 电控移动载物台
6. 暗箱 7. 电动机控制电源箱 8. 电动机 9. 计算机

1.3 高光谱图像采集

为了避免图像尺寸和空间分辨率的失真,经反复调整与校正后确定的曝光时间为 10 ms,载物台移动速度为 20 mm/s,物距为 200 mm。图像采集时,每次取一个猕猴桃,标号后放置于载物台上。光源照射放置在移动台上的样品,被照射部分的影像通过镜头被高光谱成像仪捕获。在 X 轴方向上被光谱仪分光,得到一个线状空间,同时获得每个像素在不同波长下的光谱信息。载物台带动样品在 Y 轴方向运动,线阵探测器逐行扫出完整的平面,最后获得一幅大小为 320 像素×250 像素×256 像素的高光谱图像。

1.4 图像标定与裁剪

猕猴桃表面形状的差异、各波段下光源强度分布的不均匀以及传感器中暗电流的存在会导致采集图像存在较大噪声,为此需对图像进行校正。在与采集样品图像相同的条件下,首先扫描反射率为 99% 的标准白色校正板,得到全白的标定图像 R_{White} ;然后,盖上镜头盖进行图像采集,得到全黑的标定图像 R_{Black} ;最后,对采集得到的原始绝对图像 $R_{Original}$ 进行处理,使其变成校正后的图像 R_{ref} 。

$$R_{ref} = \frac{R_{Original} - R_{Black}}{R_{White} - R_{Black}}$$

(1)

为了减小数据处理的运算量,应用 ENVI 软件

(V.4.8, Research System, Inc., 美国)对校正后的图像数据进行裁剪,去除多余的背景信息,裁剪后的图像大小为 106 像素 × 106 像素 × 256 像素。

1.5 软件

除了以上提及的高光谱图像数据采集应用的 SpectralSENS,损伤区域分割方法采用 Matlab 2011a (The MathWorks Inc., 美国)外,其他数据处理皆基于 ENVI 软件。

2 结果与讨论

2.1 猕猴桃图像信息

图 2 为单一损伤猕猴桃样品在发生挤压损伤前和损伤后 1 h 去皮前后的图像。由图 2 可以看出,发生损伤前后,猕猴桃的外部特征无任何差异,但其内部果肉颜色已经发生了较明显的变化。相对于无损区的果肉,损伤区果肉颜色较深,但仅凭外部图像信息很难识别出损伤猕猴桃。

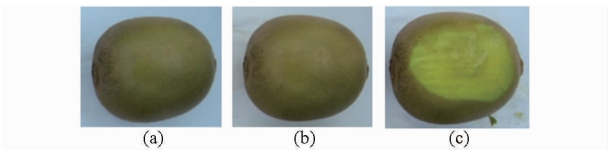


图 2 某一损伤猕猴桃样品在损伤前、损伤 1 h 去皮前后的图像

Fig.2 Images of a kiwifruit before damaged, before and after peeling skin after damaged in 1 h
(a) 损伤前 (b) 损伤 1 h 去皮前 (c) 损伤 1 h 去皮后

2.2 无损与损伤区域的反射光谱

为了减小光照不均匀及不同部位组织成分差异对光谱强度的影响,在损伤样品损伤部位和完好无损样品的赤道附近选取 20 像素 × 20 像素的区域为感兴趣区域 (Region of interest, ROI)。任取 20 个损伤样品和 20 个无损样品,求其 ROI 的平均反射光谱,如图 3 所示。图 3 表明,在整个光谱区域内,无损区域的光谱反射率比损伤区域高。950 nm 以下光谱噪声明显,950 ~ 1 350 nm 间损伤区域与无损区域的光谱反射率有较大的差别,而当大于 1 350 nm 时,二者的光谱曲线比较接近乃至有部分混合,说明该区域不能很好地识别无损和损伤区域。为此,本文后续对 950 ~ 1 350 nm 的高光谱图像进行分析。该结果与 Lu^[12]对损伤苹果近红外高光谱数据分析结果相同。

2.3 主成分分析

950 ~ 1 350 nm 间的高光谱有 121 个波段,数据量大且相邻波段之间的相关性强,造成信息的冗余。本文选择主成分分析法 (Principal component analysis, PCA)对高光谱数据降维。PCA 降维的原

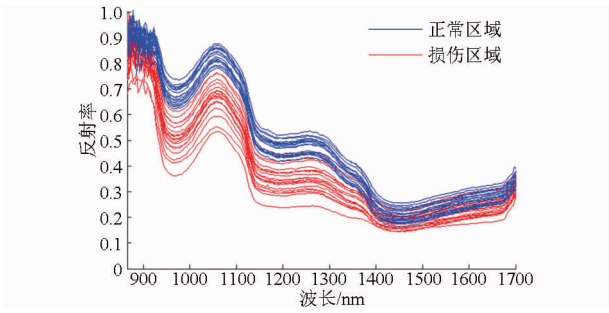


图 3 无损和损伤猕猴桃的反射光谱 (900 ~ 1 700 nm)

Fig.3 Reflection spectra (900 ~ 1 700 nm) of no bruises and hidden bruises kiwifruits

理是沿着协方差最大的方向由高维数据空间向低维数据空间投影,得到互相独立的主成分向量,能最大限度地表征原始数据的信息。通过 PCA 处理,既可以实现数据的降维,又消除了原始数据中的冗余信息,因此,PCA 是一种十分有效的多维数据降维方法。

为了能准确地找到代表损伤信息的特征波长,根据反射谱的变化规律,在 950 ~ 1 350 nm 间以 1 050 nm 和 1 200 nm 为节点进行分段主成分分析,即分为 950 ~ 1 050 nm、950 ~ 1 200 nm、950 ~ 1 350 nm、1 050 ~ 1 200 nm、1 050 ~ 1 350 nm、1 200 ~ 1 350 nm 6 个子波段。各子波段分别对应或包含反射谱的波谷区域、波谷和波峰区域、全波段区域、反射谱差异明显区域及谱线变化平缓区域,对 6 个子波段分别进行 PCA,得到每段的主成分图像 (PC 图像),通过对其分析,确定用于检测损伤区域的最佳光谱。处理结果说明,在 950 ~ 1 050 nm 及 1 200 ~ 1 350 nm 波段没有发现可用于检测损伤的信息。图 4 分别是其余各子波段优选出的含有损伤区域信息的主成分图像 (PC)。950 ~ 1 200 nm、950 ~ 1 350 nm、1 050 ~ 1 200 nm 和 1 050 ~ 1 350 nm 的主成分图像分别是第 6 (PC6)、第 11 (PC11)、第 5 (PC5) 和第 9 (PC9) 主成分图像。这些主成分图像都含有损伤信息,且与背景的亮度反差较大,利于损伤区域的检测。经比较,确定使用波段数较少,同时又包含损伤区域信息的 1 050 ~ 1 200 nm 范围内的 PC5 来识别完好无损和损伤样品的图像。

2.4 特征波长的选取

在上面主成分分析中,1 050 ~ 1 200 nm 范围内共有 45 个波段参与了运算,大量波段的参与大大降低了检测速度,使其很难被应用于在线检测中。基于少量特征波段的隐性损伤猕猴桃识别算法是开发在线快速检测系统的关键。主要的特征波长选择方法通常是根据主成分分析后得到的主成分图像的权重系数确定的^[16,19,21]。

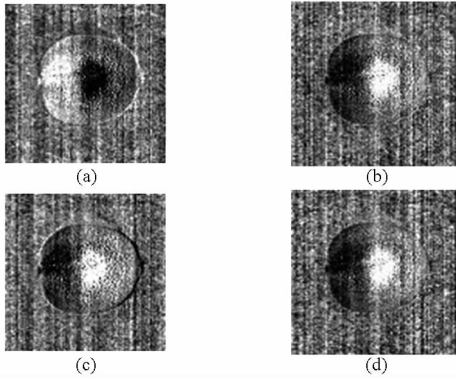


图 4 不同光谱区域优选出的 PC 图像

Fig.4 Optimal principal component images at different spectral areas on a bruised kiwifruit

(a) PC6(950 ~ 1 200 nm) (b) PC11(950 ~ 1 350 nm)
(c) PC5(1 050 ~ 1 200 nm) (d) PC9(1 050 ~ 1 350 nm)

主成分图像是由原始高光谱图像数据中各个波长下的图像经过线性组合而形成的,即

$$P_{C_m} = \sum_{i=1}^n a_i R_{ref} \tag{2}$$

式中 P_{C_m} ——第 m 个主成分
 a_i ——该主成分的权重系数
 n ——参与运算的波长图像的个数,取 45

关于权重系数 a_i 的计算方法可参照文献[25]。

在确定 1 050 ~ 1 200 nm 为优选的 PCA 光谱区域后,选取有利于损伤分割的 PC5 图像进行分析。图 5 为 PC5 图像的权重系数图。曲线中每一处局部极大值或极小值都代表了一个显著的波段,这些波段所代表的图像对 PC5 的贡献率较大^[21,26]。权重系数局部极值点对应的波长被选为特征波长。由图 5 可知,曲线的局部极值点在 1 057、1 084、1 090、1 120、1 147、1 177 和 1 187 nm。

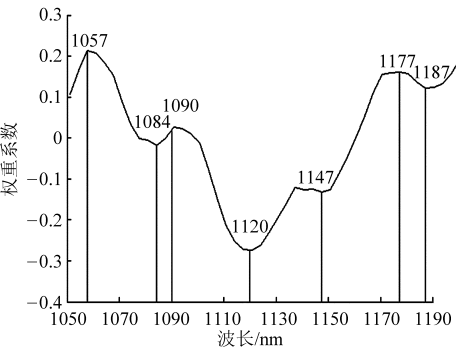


图 5 PC5 图像权重系数图(1 050 ~ 1 190 nm)

Fig.5 Weighting coefficients of PC5 (1 050 ~ 1 190 nm)

由于相关性强的波长具有相近的光谱反射率^[16],造成了信息的冗余。为了得到数量更少而又能代表损伤信息的特征波长,本文对 7 个局部极值点对应波长下的光谱反射率进行相关性分析。表 1 是计算得到的 7 个波长图像之间的相关系数。由

表 1 可以看出,1 177 nm 与 1 187 nm 的相关性最高(0.999 5),进而导致 1 147 nm 与 1 187 nm 及 1 147 nm 与 1 177 nm 的相关系数相同。1 084 nm 与 1 090 nm 之间仅差 2 个波段,也表现出了较高的相关性。为了避免信息冗余,在相关系数大的波长中选择权重系数绝对值大的波长作为特征波长。最终确定 1 057、1 090、1 120、1 177 nm 为特征波长。图 6 给出了这 4 个特征波长下的原始图像,它们组合成一个新的三维图像块。依据这 4 个特征波长研究隐性损伤猕猴桃的识别算法。

表 1 局部极值点对应波长下光谱反射率的相关系数
Tab.1 Correlation coefficients of reflection values at some wavelengths with local extremum

波长 /nm	波长/nm						
	1 057	1 084	1 090	1 120	1 147	1 177	1 187
1 057	1	0.995 1	0.991 9	0.956 1	0.894 7	0.884 1	0.882 1
1 084	0.995 1	1	0.998 1	0.977 1	0.928 5	0.919 4	0.918 0
1 090	0.991 9	0.998 1	1	0.983 6	0.940 5	0.932 4	0.930 8
1 120	0.956 1	0.977 1	0.983 6	1	0.985 2	0.980 8	0.980 1
1 147	0.894 7	0.928 5	0.940 5	0.985 2	1	0.999 1	0.999 1
1 177	0.884 0	0.919 4	0.932 4	0.980 8	0.999 1	1	0.999 5
1 187	0.882 1	0.918 0	0.930 8	0.980 1	0.999 1	0.999 5	1

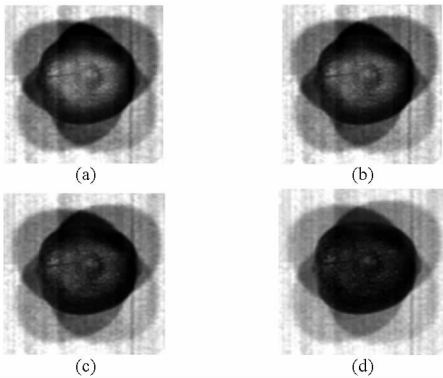


图 6 特征波长图像

Fig.6 Images of characteristic wavelengths

(a) 1 057 nm (b) 1 090 nm (c) 1 120 nm (d) 1 177 nm

2.5 高光谱图像的掩模

对提取的特征波长图像进行二次主成分分析。首先进行掩模处理以去除背景,使图像中仅含猕猴桃。为了不增加额外的波长图像,选择特征波长图像做掩模。光照的影响使得单个特征波长图像中有较大面积的阴影,不适于直接建立掩模图像。观察图 6 中各特征波长下的图像可知,在 1 057 nm 处果实部分的灰度比 1 177 nm 下高,但二者背景部分的灰度差异较小。为此,对 1 057 和 1 177 nm 下的图像应用 ENVI 软件的 Transform/Band Ratios 进行波段比运算^[20],结果如图 7a 所示。由图 7a 可见,果实和背景灰度差异明显,适合做掩模图像。对图 7a

应用 ENVI 软件的 Basic Tools/Masking 建立掩模图像,如图 7b 所示,它是由灰度为 1 和 0 组成的二值图像。将建立的掩模图像应用于特征波长图像上。掩模处理后,特征波长图像与掩模图像中灰度为 1 时的对应区域被保留,同时进行灰度拉伸以增强图像的对比度,灰度为 0 时所对应的区域变成黑色背景。对图 6 相应的各个特征波长下图像经过掩模和灰度拉伸处理后结果如图 7c ~ 7f 所示。

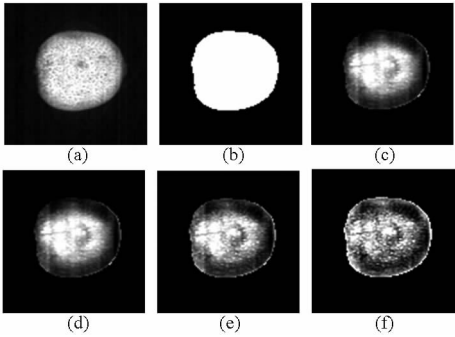


图 7 掩模处理后的特征波长图像

Fig. 7 Masked images at characteristic wavelengths

(a) 波段比运算 (b) 掩模 (c) 1 057 nm
(d) 1 090 nm (e) 1 120 nm (f) 1 177 nm

2.6 特征波长的主成分分析

对经过掩模处理的特征波长进行主成分分析。图 8 是对特征波长进行 PCA 处理后得到的第 3 (PC3)主成分图像。结果表明利用 4 个特征波段 PCA 得到的 PC3 图像含有损伤信息,且损伤区域表现出高亮,与利用 1 050 ~ 1 200 nm 波长 PCA 获得的 PC5 图像结果类似,说明所选取的特征波长图像可以用于识别隐性损伤猕猴桃。

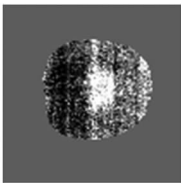


图 8 特征波长图像 PCA 后的 PC3 图像

Fig. 8 PC3 image of PCA processing on characteristic wavelengths images

2.7 损伤区域分割算法

对特征波长图像二次 PCA 后得到的 PC3 图像进行 5 × 5 中值滤波,结果如图 9a 所示。然后对 中值滤波后的图像进行阈值分割(灰度阈值为 230),结果如图 9b 所示,损伤区域被分割出来,同时背景中与损伤区域具有相似亮度的区域也被分割出来。最后进行形态学运算,去除干扰区域,完成损伤区域的检测,结果如图 9c,白色部分表示分割出的损伤区域。

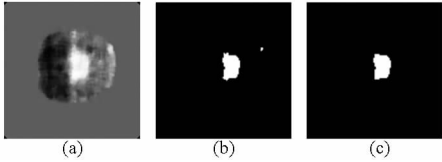


图 9 损伤区域分割

Fig. 9 Segmentation on bruised area

(a) 中值滤波结果 (b) 阈值分割结果 (c) 形态学运算结果

将上述算法用于识别 70 个完好无损样品和 70 个隐性损伤样品,并将分割结果与 1 090 nm 波长图像进行比较。由于篇幅限制,给出了 3 个无损样品(图 10)和 3 个隐性损伤样品(图 11)的处理结

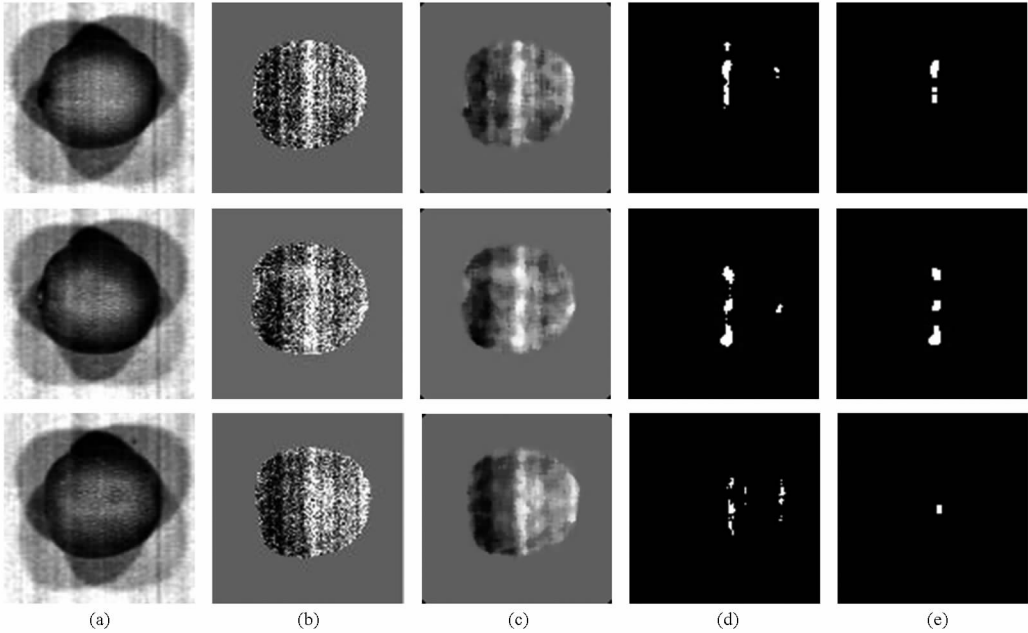


图 10 部分无损样品处理结果

Fig. 10 Processing results on intact kiwifruits

(a) 1 090 nm 波长图像 (b) PC3 图像 (c) 均值滤波 (d) 阈值分割 (e) 形态学处理

果。从图 10 可以看出 3 个无损样品被误分割出损伤区域,这可能是由于光照不均和猕猴桃表皮多毛且不光滑,导致某些区域出现了高亮而被误判。从图 11 可以看出,3 个损伤样品被正确分割出损伤区域,但分割出的损伤区域与实际的损伤区域稍有差别。除了受到光源等因素的影响外,还可能由于果皮不同果肉组织的受损程度不同,导致光的反射值不同,从而引起高光谱图像的差异。经过对所有样品分割出的可疑损伤区域的面积进行统计,并与去皮后实际损伤情况进行对照分析,提出识别完好

无损和损伤样品的面积阈值为 0.815 cm^2 ,即将当分割出的面积小于 0.815 cm^2 ,将该样品归为完好无损样品,否则为损伤样品。表 2 给出了所有样品的识别结果。所有完好样品都没有被误检测为损伤样品,正确识别率为 100%;而损伤样品有 3 个被误分为完好样品,正确识别率为 95.7%,平均正确识别率为 97.9%。这 3 个损伤样品被误分为完好无损样品的主要原因是损伤程度过轻,分割出的区域面积过小,导致误判。

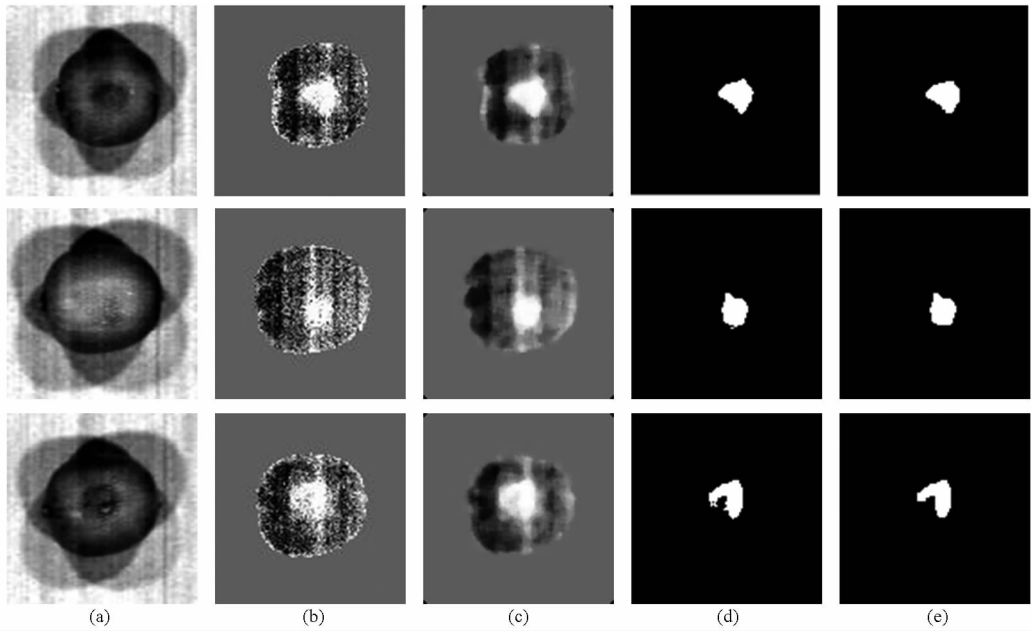


图 11 部分损伤样品处理结果

Fig. 11 Processing results on hidden bruised kiwifruits

(a) 1 090 nm 波长图像 (b) PC3 图像 (c) 均值滤波 (d) 阈值分割 (e) 形态学处理

表 2 完好无损和隐性损伤猕猴桃的识别结果

Tab. 2 Identification results on intact and hidden bruised kiwifruits

样品类别	样品数/个	识别结果		正确识别率/%	平均正确识别率/%
		无损数/个	损伤数/个		
完好样品	70	67	3	95.7	97.9
损伤样品	70	0	70	100	

3 结论

- (1) 1 050 ~ 1 200 nm 为最优光谱识别区域。
- (2) 根据 1 050 ~ 1 200 nm 主成分分析后的 PC5 图像的权重系数及波长间光谱反射率的相关性分

析,确定了 4 个特征波长,即 1 057、1 090、1 120 和 1 177 nm 为特征波长。

(3) 对 4 个特征波长下的图像进行掩模处理后再进行主成分分析,结合均值滤波、阈值分割及数学形态学处理方法,提出隐性损伤猕猴桃识别算法。

(4) 此算法对 70 个完好无损猕猴桃和 70 个隐性损伤猕猴桃的正确识别率分别为 100% 和 95.7%,平均正确识别率为 97.9%。

(5) 研究结果说明近红外高光谱成像技术可用于识别早期隐性损伤猕猴桃。本文提取的较少特征波长为开发隐性损伤猕猴桃在线快速检测系统提供了研究基础。

参 考 文 献

1 黄星奕,刘益权,赵杰文. 基于近红外图像技术的水果轻微损伤检测[J]. 微计算机信息, 2008, 23(34): 229 - 231.
Huang Xingyi, Liu Yiquan, Zhao Jiewen. Detection slight bruised fruit base on near infrared imaging [J]. Control & Automation, 2008, 23(34): 229 - 231. (in Chinese)

2 章文英,应义斌. 苹果果梗和表面缺陷的计算机视觉检测方法研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001,

- 27(5):583–586.
- Zhang Wenying, Ying Yibin. Study on detecting methods for apple stem and defected surface with computer vision[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2001, 27(5): 583–586. (in Chinese)
- 3 李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于掩模及边缘灰度补偿算法的脐橙背景及表面缺陷分割[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 133–137.
- Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Background and external defects segmentation of navel orange based on mask and edge gray value compensation algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 133–137. (in Chinese)
- 4 Hassankhani R, Navid H, Sayedarabi H. Potato surface defect detection in machine vision system[J]. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(5): 844–850.
- 5 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 水果表面亮度不均校正及单阈值缺陷提取研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 159–163.
- Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Correction algorithm of illumination nonuniformity on fruit surface and defects extraction using single threshold value[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 159–163. (in Chinese)
- 6 郭文川, 王铭海, 谷静思, 等. 近红外光谱结合极限学习机识别贮藏期的损伤猕猴桃[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2720–2727.
- Guo Wenchuan, Wang Minghai, Gu Jingsi, et al. Identification of bruised kiwifruits during storage by near infrared spectroscopy and extreme learning machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2720–2727. (in Chinese)
- 7 郭文川, 王铭海, 岳绒. 基于近红外漫反射光谱的损伤猕猴桃早期识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 142–146.
- Guo Wenchuan, Wang Minghai, Yue Rong. Early recognition of bruised kiwifruit based on near infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 142–146. (in Chinese)
- 8 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2021–2026.
- Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Advance on application of hyperspectral imaging to nondestructive detection of agricultural products external quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2021–2026. (in Chinese)
- 9 尹小君, 李满春, 赵思峰, 等. PLS 算法在高光谱估测加工番茄白粉病色素含量中的应用[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 175–180.
- Yin Xiaojun, Li Manchun, Zhao Sifeng, et al. PLS algorithm application in hyperspectral estimation of pigment contents in processing tomato leaves under powdery mildew[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 175–180. (in Chinese)
- 10 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128–133.
- Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Gao Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 128–133. (in Chinese)
- 11 邹小波, 陈正伟, 石吉勇, 等. 基于近红外高光谱图像的黄瓜叶片色素含量快速检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 152–156.
- Zou Xiaobo, Chen Zhengwei, Shi Jiyong, et al. Rapid detection of cucumber leaves pigments based on near infrared hyperspectral image technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 152–156. (in Chinese)
- 12 Lu R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 523–530.
- 13 Xing J, Bravo C, Jancsó PT, et al. Detecting bruises on ‘Golden Delicious’ apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(1): 27–36.
- 14 Xing J, De Baerdemaeker J. Bruise detection on ‘Jonagold’ apples using hyperspectral imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(2): 152–162.
- 15 ElMasry G, Wang N, Vigneault C, et al. Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(2): 337–345.
- 16 黄文倩, 陈立平, 李江波, 等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 272–277.
- Huang Wenqian, Chen Liping, Li Jiangbo, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 272–277. (in Chinese)
- 17 赵杰文, 刘剑华, 陈全胜, 等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 106–109.
- Zhao Jiewen, Liu Jianhua, Chen Quansheng, et al. Detecting subtle bruises on fruit with hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 106–109. (in Chinese)
- 18 Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J, et al. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 345–355.

Dong Qingli, Yao Yuan, Zhao Yong, et al. Modelling establishment of the cardinal parameters model as a function of temperature, pH value and sodium lactate for *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 198–202. (in Chinese)

18 Wilks S A, Michels H, Keevil C W. The survival of *Escherichia coli* O157 on a range of metal surfaces[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 105(3): 445–454.

19 Fuster-Valls N, Hernández-Herrero M, Marín-de-Mateo, et al. Effect of different environmental conditions on the bacteria survival on stainless steel surfaces[J]. Food Control, 2008, 19(3): 308–314.

20 Perez-Rodriguez F, Begum M, Johannessen G S. Study of the cross-contamination and survival of *Salmonella* in fresh apples[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 184: 92–97.

21 Møretrø T, Heir E, Mo K R, et al. Factor saffecting survival of shigatoxin-producing *Escherichia coli* on abiotic surfaces[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 138(1–2): 71–77.



(上接第 241 页)

19 蔡健荣, 王建黑, 黄星奕, 等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 26–30.
Cai Jianrong, Wang Jianhei, Huang Xingyi, et al. Detection of rust in citrus with hyperspectral imaging technology[J]. Optoelectronic Engineering, 2009, 36(6): 26–30. (in Chinese)

20 蔡健荣, 王建黑, 陈全胜, 等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 127–131.
Cai Jianrong, Wang Jianhei, Chen Quansheng, et al. Detection of rust in citrus by hyperspectral imaging technology and band ratio algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 127–131. (in Chinese)

21 李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 222–228.
Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Detection of navel oranges canker based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 222–228. (in Chinese)

22 洪添胜, 乔军, Wang Ning, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151–155.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Wang Ning, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151–155. (in Chinese)

23 Wang J, Nakano K, Ohashi S, et al. Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging[J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(4): 345–351.

24 Lü Q, Tang M. Detection of hidden bruise on kiwi fruit using hyperspectral imaging and parallelepiped classification[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 1172–1179.

25 田野, 赵春晖, 季亚新. 主成分分析在高光谱遥感图像降维中的应用[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2007, 23(5): 58–60.
Tian Ye, Zhao Chunhui, Ji Yaxin. The principal component analysis applied to hyperspectral remote sensing image dimensional reduction[J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 2007, 23(5): 58–60. (in Chinese)

26 Vargas A M, Kim M S, Yang T. Detection of fecal contamination on cantaloupes using hyperspectral fluorescence imagery[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(8): 471–476.