

基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取

田有文¹, 程 怡¹, 王小奇², 栗庆吉¹

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学植物保护学院, 沈阳 110866)

摘 要: 利用高光谱成像技术, 明确苹果虫害无损检测的最优特征向量, 以实现苹果虫害的快速、准确、无损检测。本文首先对 646 nm 波长的特征图像进行阈值分割、膨胀与腐蚀运算获得掩膜图像, 并利用掩膜图像对高光谱图像进行掩模和主成分分析, 对获得的 PC1 (the first principal component, 第一主成分) 图像进行最大熵阈值分割以有效提取虫害区域。然后对比分析虫害区域与正常区域图像的纹理特征, 提取灰度共生矩阵的 4 个方向的 4 个纹理参数 (能量、熵、惯性矩和相关性), 并且采用基于高光谱图像的光谱差值获取了 2 个特征波长对应的光谱相对反射率作为光谱特征。优化组合纹理特征和光谱特征成 4 个特征向量组, 采用 BP (back propagation, 反向传播) 神经网络对正常苹果和虫害苹果进行检测。结果表明, 融合 0 度方向的能量、熵、惯性矩和相关性的纹理特征和 646、824 nm 波段的相对光谱反射率的光谱特征进行检测识别效果最好, 正常果的识别率为 100%, 虫害果的识别率为 100%, 并且速度快、误差小。该研究所获得的特征向量可为开发多光谱成像的苹果品质检测和分级系统提供参考。

关键词: 无损检测; 主成分分析; 图像处理; 光谱特征; 高光谱成像

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.12.016

中图分类号: TP391.41; TP274+.52

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-12-0132-08

田有文, 程 怡, 王小奇, 等. 基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 132—139.

Tian Youwen, Cheng Yi, Wang Xiaoqi, et al. Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 132—139. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国是苹果生产大国, 苹果的种植面积和总产量均居世界第一^[1]。然而中国苹果在国际市场上, 因为采后检测、分级技术落后等, 导致品质较差、在国际市场上缺乏竞争力, 苹果出口占总产量的比重非常低^[2]。为了解决此问题, 就必须严格把关中国苹果的缺陷检测, 尤其是苹果虫害的检测。苹果在生长中, 果实有时会受到食心虫等虫害的侵入, 从而使其正常新陈代谢受到干扰, 其生理机能、组织结构等被破坏, 极大影响苹果的品质和销售, 因此苹果虫害作为苹果质量分级的重要指标之一^[3], 其检测尤为重要。害虫侵入苹果果实后, 往往在其内部进行驻洞, 在表面形成虫眼^[4]。目前, 中国对水果缺陷的检测仍停留在主要依靠人工目测、抽样切片或常规可见光机器视觉检测的阶段^[5], 误判率

较高, 且不能满足水果在线检测应具备的无损性、快速性、直观性等要求^[6]。因此, 亟需开发一种快速、无损、高效的苹果虫害检测方法。

由于高光谱成像技术融合了图像处理和光谱分析的优点, 可以快速、无损地检测研究对象内外特性, 因此近年来在农产品品质与分级中获得了广泛的应用^[7-10], 尤其为农产品受虫害后的检测带来了新的途径和方法^[11]。Ronald P. Haff等^[12]研究了一种受果蝇侵染的芒果高光谱图像进行分析和识别其上斑点的方法, 该方法经反复优化参数, 最终结果为最低总体识别错误率为12.3%。Singh C B等^[13]利用近红外光谱成像区分正常小麦与虫蛀小麦的损害, 使用线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 和二次判别分析 (quadratic discriminant analysis, QDA) 对健康小麦与虫蛀小麦判别, 结果表明正确分类率达85%~100%。Wang J. 等^[14]应用高光谱成像技术实现了对枣的外部虫害的检测, 总体正确识别率为97%。Xing J等^[15]利用高光谱透视图像和反射光谱数据研究酸樱桃的内部虫害 (象鼻虫) 的无损检测, 采用偏最小二乘判别分析法正确识别樱桃的内部虫害的准确率分别为82.11%和81.3%。在国内吴龙国^[16]等利用近红外

收稿日期: 2014-02-12 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 科研专项资助项目 (201103024); 辽宁省教育厅科学技术研究资助项目 (L20111114)

作者简介: 田有文 (1968—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士后, 中国农业工程学会会员 (E041200502S), 主要从事图谱分析在农产品品质检测的应用研究。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110866。
Email: youwen_tian10@163.com

高光谱成像系统采集正常长枣与虫眼枣图像, 利用特征波长主成分分析法结合波段比算法进行虫眼枣识别, 识别率达到90%。而国内外针对苹果虫害检测的研究尚鲜有报道。本文研究的目的是通过高光谱成像技术, 探索有效提取能正确识别苹果虫害的特征向量, 从而为后续实现苹果虫害的快速、无损检测, 构建基于多光谱成像技术的苹果品质在线检测与分级系统提供理论依据。

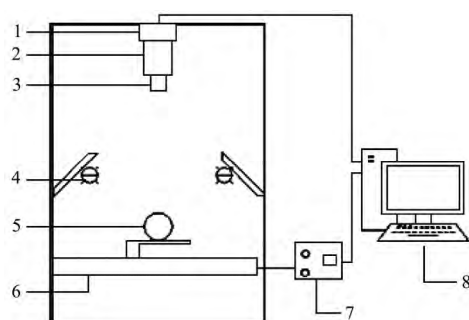
1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选取红富士苹果作为试验的研究对象。从沈阳市沈北新区苹果种植示范园采集苹果 160 个。这些果实果型匀称, 直径范围在 68.5~88 mm, 质量范围在 128~211 g, 其中 80 个为有虫害的苹果, 虫孔直径约 2 mm, 另外 80 个为正常苹果。从虫害和正常苹果中各随机拣选 50 个用于检测苹果虫害算法构建, 其他样本用于算法的验证。

1.2 高光谱成像系统

本研究中高光谱成像系统如图 1 所示。整个系统由高光谱成像光谱仪 (ImSpector V10E, Spectral Imaging Ltd)、一架 1 392 像素×1 040 像素的面阵 CCD 相机 (IGV-B1410M, IMPERX Incorporated)、一套位移台及控制平台 (IRCP0076-1 COM)、两个 150 W 的光纤卤素灯 (3900 Illuminator, Illumination Technologies)、一个暗箱 (120 cm×50 cm×140 cm) 和一台计算机 (DELL Vostro 5560D- 1528) 等组成。高光谱摄像头的光谱范围为 400~1100 nm, 光谱分辨率为 2.8 nm。



1. 相机 2. 光谱仪 3. 镜头 4. 光源 5. 样本 6. 平移台 7. 位移平台控制器 8. 计算机
1. Camera 2. Spectrometer 3. Shot 4. Light source 5. Sample 6. Stages 7. Displacement platform controller 8. Computer

图 1 高光谱成像系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

1.3 高光谱图像采集

利用高光谱成像系统获取苹果高光谱图像, 首先设定好物距、光源强度、镜头光圈度数、相机曝光时间、移动平台速度, 以确保采集的图像清晰且

不失真。最终确定镜头到苹果表面的距离 (即物距) 为 260 mm, 在高光谱图像数据采集软件 Spectral Image 中设定相机曝光时间为 68 ms, 平台移动速度为 0.8 mm/s。然后将反射率为 99% 标准白色校正板 (Spectralon, Labsphere Inc.) 进行采集得到全白的标定图像 I_w , 再拧上镜头盖且关闭光源采集到全黑的标定图像 I_D 。最后逐个将苹果放置于移动平台上, 且有虫眼位对准镜头, 若是正常苹果将赤道位对准镜头。通过高光谱图像数据采集软件 Spectral Image 将获得苹果每个空间位置的整个光谱区域的光谱信息。

2 高光谱图像数据处理方法

数据处理采用 ENVI 4.7 (Research System Inc., 美国)^[17]、MATLAB 7.1 (The MathWorks Inc., 美国)^[18] 和 Excel 2011 (Microsoft, 美国)^[19] 软件。

2.1 黑白板校正

为了消除高光谱摄像头中暗电流及不均匀光强产生的噪声, 应对高光谱成像装置进行黑白板校正。按照下列公式 (1) 计算可得校正后图像 R ^[20]。

$$R = \frac{I_s - I_D}{I_w - I_D} \times 100 \quad (1)$$

式中: R 为校正后的高光谱图像的相对反射率, %; I_s 为原始的苹果高光谱图像; I_D 为黑板标定图像; I_w 为白板标定图像。

2.2 主成分分析

主成分分析 (principal components analysis, PCA) 是非常有效的多变量分析技术^[21], 常用来数据降维。由于采集的高光谱数据首尾有噪声, 故本研究利用 PCA 只对可见—近红外 (450~950 nm) 光谱区域的苹果高光谱图像数据进行降维, 以获得各 PC 图像。根据苹果各主成分 (principal components, PC) 图像表面虫害区域和正常区域的对比度, 确定用于后续分割的 PC 图像。另外, 根据苹果高光谱图像的虫害区域与正常区域各个波段的光谱反射率的差异, 确定用于后续处理的特征波长, 并以此确定单波段特征图像。

2.3 图像分割方法

图像分割是图像处理最重要的步骤之一, 此过程的精确性很大程度上影响后续的数据处理。本研究分割的目的是一是分割出苹果与背景, 二是从苹果中分割出虫害部位。本文首先对特征图像采用 Otsu 阈值分割方法形成二值化图像, 并对其进行腐蚀膨胀处理, 获取掩膜图像。然后对高光谱图像进行掩膜处理^[22], 并对掩膜高光谱图像进行主成分分析, 确定主成分图像。最后结合二值化图像对主成分图

像进行阈值分割,实现苹果虫害区域分割,从而确定虫害区域的像素点位置。该图像分割方法系列操作步骤如图 2 所示。

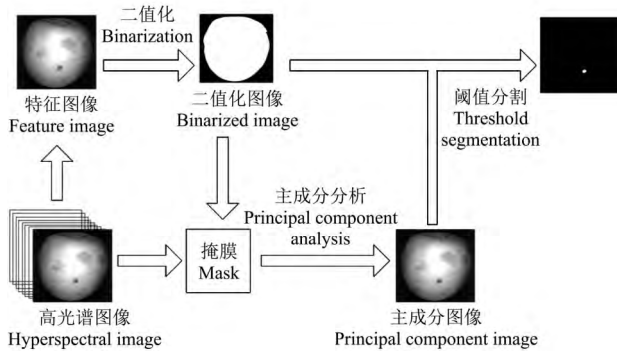


图 2 图像分割流程图

Fig.2 Flow chart of image segmentation

2.4 图谱特征分析

通过观察得知,苹果表面虫害区域和正常区域的纹理有所差异,所以采用纹理特征来描述这种差异。区域灰度共生矩阵是描述图像纹理信息的有效特征,反映像素相对位置的空间信息^[23],用纹理图像中某方向相隔 d 像素距离的分别具有灰度级 i 和 j 一对像素出现的概率来表示,即 $p(i, j/\theta, d)$,记为 p_{ij} 。本研究采用描述灰度共生矩阵 4 个纹理参数,即能量、熵、惯性矩和相关性,分别在 4 个方向 0°、45°、90°、135°上的纹理特征,参数具体计算见文献^[23]。

通过观察发现,在苹果高光谱图像数据中,每点的像素都对应于一个全波段的光谱信息。如图 3 所示,苹果表面虫害区域与正常区域的 400~1 000 nm 光谱曲线有明显的差异,因此可以分别在可见光区域和近红外区域选取相对反射率差异比较大的波段的相对反射率作为光谱特征。

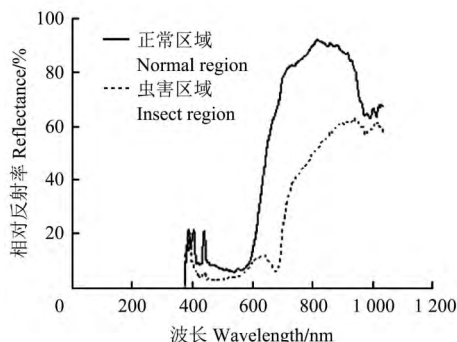


图 3 光谱相对反射率曲线

Fig.3 Curve of spectral relative reflectance

2.5 检测模型

BP (back propagation, 反向传播) 人工神经网络是前向神经网络的有监督学习算法^[24],是由输入层、输出层和若干中间隐含层组成的多层无反馈的

连接网络^[25]。它具有自组织、自学习、联想存储的功能和高速寻找优化解的能力,在模式识别、图像处理、人工智能等领域有广泛的应用。其主要特点是信号向前传递,误差反向传播^[26]。对于苹果虫害检测问题,可以看作是输入苹果虫害特征到输出是否是虫害的非线性映射问题。通过将学习样本提供给 BP 神经网络,完成网络的训练后,即可根据苹果表面的纹理与光谱表现特征,通过神经网络的测试检测出苹果是否存在虫害。

3 结果与讨论

3.1 感兴趣区域光谱分析

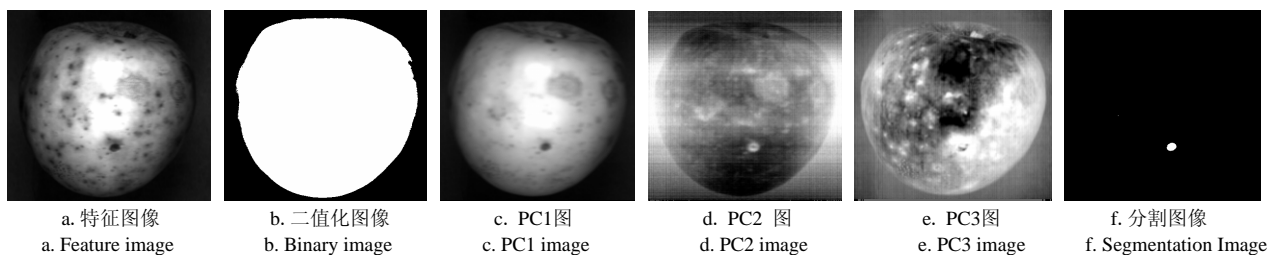
在本研究中,分别提取了 80 个苹果虫害样本和 80 个正常苹果样本感兴趣区域(region of interest, ROI)的反射率光谱曲线。从图 3 中可以看出,虫害区域的反射率在整个光谱区域内都比正常区域的反射率低。其中 680 nm 处的吸收峰主要反映了苹果的表面颜色信息,受苹果表面叶绿素的吸收影响的^[27]。苹果受虫害侵入后,在苹果表面形成孔洞,此处的叶绿素严重短缺,颜色与正常表面存在显著差别,故 680 nm 处的反射率出现明显的降低;而 970 nm 处的吸收峰则主要反映了水果表面水分含量信息,受苹果表面的水分吸收影响^[28]。苹果虫害区域水分比较短缺,故 970 nm 处的光谱反射率低于苹果正常区域的光谱反射率。

3.2 苹果虫害区域的分割

如图 3 所示,在波长 646 nm 处苹果表面虫害区域与正常区域的相对反射率有较大的差异,因此可选取 646 nm 为特征波长,选取 646 nm 波长的图像为特征图像,如图 4 a 所示。从图 4 a 中可以看出,苹果区域灰度值较高,而背景区域较低,故可应用阈值分割该图像得到二值化图像。但受苹果表面的“皮孔”与斑点的影响,分割后的苹果区域有些噪声,另外苹果边缘灰度值较低,分割后较小,对分割后的二值化图像进行膨胀与腐蚀运算,从而得到最终的二值化图像,即掩模图像,如图 4 b 所示。并应用此二值化图像对高光谱图像进行掩膜。然后对掩膜后的图像进行主成分分析。从图 3 中可以看到苹果表面 400~500 nm 和 980~1 000 nm 范围内的噪声较大,所以选取 500~980 nm 之间的波段做主成分分析,得出主成分图 1 (principal component 1, PC1)、主成分图 2 (principal component 2, PC2)、主成分图 3 (principal component 3, PC3),分别如图 4 c、4 d 和 4 e 所示。从图中可以看出,PC2 图虫害区域的灰度值较高,与周围的界限比较明显,但图像中有与虫害区域相同的灰度值,故较难分割

出虫害区域。PC3 图虫害区域的灰度值较低，与周围的界限比较模糊，而且图中有大量与虫害部位相似的灰度值。从图像 PC1 上可以明显看到一个黑点，即为虫害区域，与周围有非常明显的差异，有

利于苹果虫害区域的分割，所以选择 PC1 图作为后续处理的主成分图像。结合二值化图像对 PC1 图像采用最大熵阈值分割方法分割虫孔部位，从而确定苹果虫害位置，如图 4 f 所示。



注：PC1 为主成分图 1，PC2 为主成分图 2，PC3 为主成分图 3。

Note: PC1 is principal component 1 image, PC2 is principal component 2 image, PC3 is principal component 3 image.

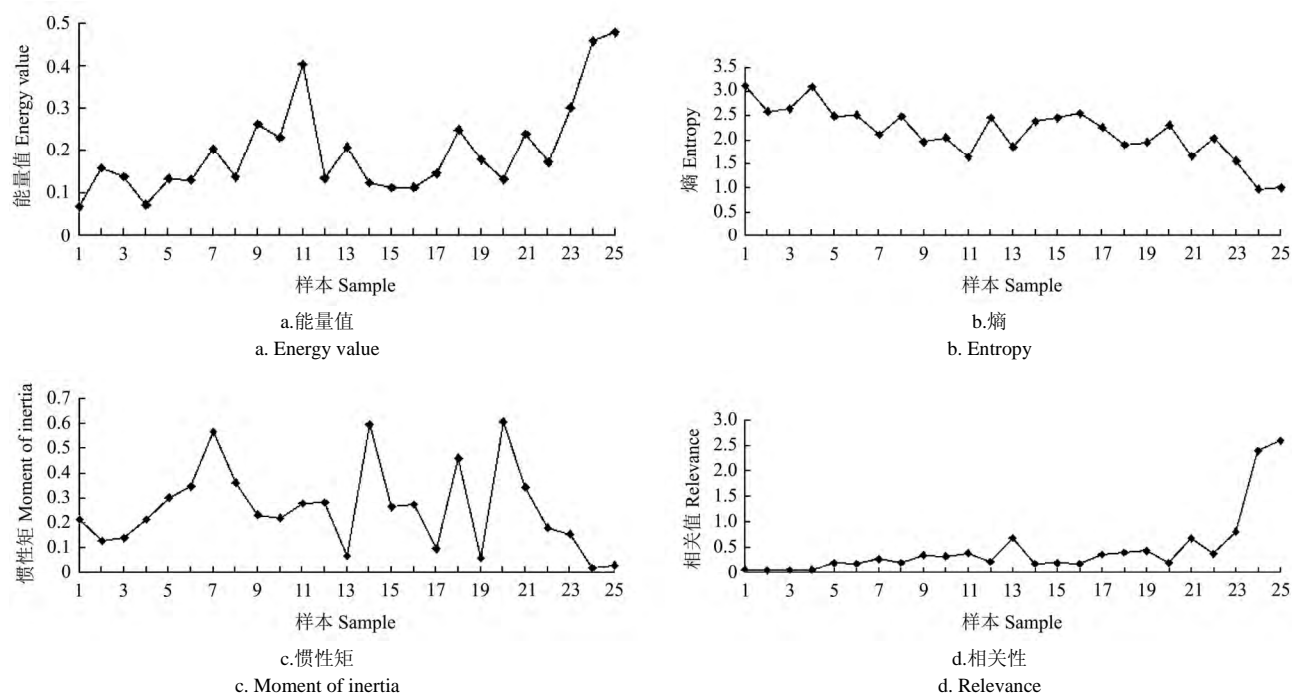
图 4 苹果虫害区域图像分割过程系列图像

Fig.4 Flow chart of image segmentation

3.3 特征向量的提取

苹果为类球形的物体，光照在整个苹果表面会呈现中间亮边缘暗的不均匀分布^[29]。为使后续的检测结果受光照不均的影响最低，根据 PC1 图像分割出虫害像素点的位置，提取其周围图像 80 像素×65 像素的感兴趣区域图像。若是正常苹果，提取 PC1 图像苹果中间部分 80 像素×65 像素大小的感兴趣区域图像。然后对感兴趣区域图像进行

纹理特征分析。在 MATLAB 中计算 4 个共生矩阵特征，即能量、熵、惯性矩和相关性，取距离为 1，角度分别为 0°、45°、90°和 135°，共 16 个纹理特征。4 个方向的能量、熵、惯性矩、相关值变化趋势相同，故选取有代表性的 25 幅感兴趣区域图像的 0 度方向的纹理特征计算结果如图 5 所示。前 12 个样本为虫害苹果的数据，后 13 个为正常苹果的数据。



注：取 25 个样本，前 12 个为虫害样本，后 13 个为正常苹果样本。

Note: Choose 25 samples, before 12 as the pest sample, after 13 as normal apple samples.

图 5 共生矩阵纹理特征值

Fig.5 Co-occurrence matrix eigenvalues

由图 5a 可知虫害苹果的能量值与正常苹果的能量值有重叠，但总体上虫害苹果的平均能量值约为 0.17，而正常苹果的平均能量值高于虫害苹果的

平均能量值，约为 0.22。这主要因为纹理越粗，能量值越大。正常苹果的纹理比虫害区域的纹理粗一些，所以正常苹果的平均能量值略高于虫害苹果的

平均能量值。由图 5b 可知虫害苹果的熵值大体上比正常苹果的熵值高，这主要因为图像的纹理越多，熵值越大。正常苹果表面光滑，有较少的纹理，所以熵值小一些。而虫害区域的纹理较多，所以熵值大一些。由图 5c 可知大部分样本虫害区域的惯性矩值与正常区域的惯性矩值分布在 0.1~0.6 之间，数值有些波动，但两个区域的平均惯性矩值相当，都为 0.26 左右。这是因为惯性矩反映图像的清晰度，虫害区域的纹理与正常区域的纹理具有同样清晰的特性，所以两个区域的平均惯性矩值总体上比较接近。由图 5d 可知虫害苹果的相关性值低于

正常苹果的相关性值，这主要因为所研究的对象分布越均匀，相关性值越大。苹果正常部分纹理分布均匀，而虫害区域的纹理与周围部分存在一定差异，所以虫害苹果的相关性值低于正常苹果的相关性值。

根据光谱特征选择原则，分别在可见光区域和近红外区域选取相对反射率差异比较大的 646 和 824 nm 波段的光谱相对反射率作为光谱特征。

为了确定检测苹果虫害最优的特征向量，本研究将纹理特征、光谱特征进行优化组合，分成 4 组，分别进行后续的检测试验，如表 1 所示。

表 1 特征向量组合
Table 1 Feature vector combination

组别 Group	第1组 Group one	第2组 Group two	第3组 Group three	第4组 Group four
特征量 Feature vector	0、45°、90°和135°方向的 能量、熵、惯性矩和相关性	0度方向的能量、熵、 惯性矩和相关性	646 和824 nm 波段的 相对光谱反射率	0度方向的能量、熵、惯性矩和相关性、646 和824 nm 波段的相对光谱反射率

3.4 BP 神经网络检测分析

本试验采用 BP 神经网络模型对苹果的虫害进行检测。首先将试验的 100 个训练样本的 4 组特征分别作为 BP 人工神经网络输入矢量，输入单元数与特征数一致。BP 人工神经网络隐层数为 1，含有 6 个神经单元。输入层和隐层传递函数为正切 S 型传递函数。学习方式加入趋势动量项的梯度下降

的训练函数，动量系数为 0.5。人工神经网络的训练精度设为 0.001，最大迭代次数 5 000。输出层传递函数为线性传递函数，包含 1 个神经元，若苹果带有虫眼，输出为-1；若为正常苹果，输出为 1。再将验证集中的测试样本通过训练好的 BP 神经网络模型进行检测。检测结果如表 2 所示。

表 2 虫害苹果和正常苹果的检测结果
Table 2 Detection results of insect pest apples and normal apples

特征组别 Group of feature	样本集 (160个) Samples set		检测类型 Type of detection		检测精度 Detection accuracy/%	整体检测精度 Overall detection accuracy/%	均方误差 Mean squared error	检测时间 Detection time/s
			正常果 Normal apples	虫害果 Pest apples				
第1组 Group 1	训练集 Train set	正常果 (50个)	48	2	96	98	0.056	13.42
		虫害果 (50个)	0	50	100			
	验证集 Validation set	正常果 (30个)	16	14	53.3	76.7	2.031	2.54
		虫害果 (30个)	0	30	100			
第2组 Group 2	训练集 Train set	正常果 (50个)	47	3	94	95	0.321	11.48
		虫害果 (50个)	2	48	96			
	验证集 Validation set	正常果 (30个)	20	10	66.7	81.7	1.64	12.34
		虫害果 (30个)	1	29	96.7			
第3组 Group 3	训练集 Train set	正常果 (50个)	50	0	100	100	0.0064	10.95
		虫害果 (50个)	0	50	100			
	验证集 Validation set	正常果 (30个)	30	0	100	100	0.06	11.27
		虫害果 (30个)	0	30	100			
第4组 Group 4	训练集 Train set	正常果 (50个)	50	0	100	100	0.0046	11.34
		虫害果 (50个)	0	50	100			
	验证集 Validation set	正常果 (30个)	30	0	100	100	0.036	10.89
		虫害果 (30个)	0	30	100			

表 2 检测结果表明, 所有组别的虫害果被误检测为正常果的情况很少, 检测精度为 96% 以上; 而正常果被误分为虫害果的情况比较多, 尤其对验证集的检测, 利用第 1 组和第 2 组特征向量检测的结果最差, 分别为 53.3% 和 66.7%; 而利用第 3 组和第 4 组特征向量进行检测的效果最好, 都达到 100%。这是因为能量、熵、惯性矩、相关性纹理特征虽然在一定程度上能区分正常果与虫害果, 但有些正常果受苹果表面斑点等因素的影响, 有些纹理接近虫孔的纹理, 从而被误识为虫孔。而第 3 组和第 4 组特征向量都包括光谱反射率的光谱特征, 而光谱特征选择的是正常果与虫害果光谱反射率反差比较大的波段的光谱反射率, 所以能比较好的区分正常果与虫害果。那么从均方误差和检测时间来看, 利用第 4 组特征向量进行检测的均方误差小, 检测时间短, 故最终选择第 4 组特征向量作为检测正常果与虫害果的特征向量, 即 0 度方向的能量、熵、惯性矩、相关性及 646 和 824 nm 波段的光谱相对反射率, 共 6 个特征值。

4 结 论

本文采用高光谱成像技术, 针对苹果虫害快速、无损、自动检测问题, 优选出能够进行虫害检测的特征向量, 研究表明:

1) 苹果的虫害区域和正常区域的反射光谱曲线存在明显差异, 虫害区域的反射率在整个光谱区域内都比正常区域的反射率低, 其中 680 和 970 nm 处有吸收峰。

2) 通过 646 nm 波长的特征图像进行阈值分割、膨胀与腐蚀运算得到二值化图像。然后进行掩膜, 对掩膜后的图像进行主成分分析, 并通过获得的 PC1 图像进行最大熵阈值分割, 能有效地分割出虫害区域。

3) 利用 BP 神经网络对苹果虫害进行检测的结果表明, 融合 0 度方向的能量、熵、惯性矩和相关性的纹理特征、646 和 824 nm 波段的相对反射率的光谱特征而组成的特征向量最优, 正常果与虫害果识别率为 100%, 并且速度快、误差小, 有利于后续苹果虫害快速检测的多光谱图像系统的开发。

对于苹果的果梗、花萼与缺陷进行有效的识别是在果品品质快速检测领域中一直存在的一个难题^[30], 特别是针对具有相似形状和大小的果梗/花萼与虫害区域的情况, 本文未对其检测进行研究, 因此如何正确识别虫害区域与果梗、花萼将是未来研究的重点。

[参 考 文 献]

- [1] 李光辉. 苹果近红外无损检测技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
Li Guanghui. Using NIR Spectra in Non-Invasive Measurements of Apple[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黄滔滔. 基于 CT 技术的苹果内部品质无损检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
Huang Taotao. Study of Nondestructive Test of Apple Internal Quality by Computer Tomography Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [3] GB/T 18965-2008, 地理标志产品: 烟台苹果[S].
- [4] 楚燕杰. 苹果病虫害诊治原色图谱[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2011.
- [5] 赵娟, 彭彦昆, Sagar Dhakal, 等. 基于机器视觉的苹果外观缺陷在线检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(Supp.): 260—263.
Zhao Juan, Peng Yankun, Sagar Dhakal, et al. On-line detection of apple surface defect based on image processing method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.): 260—263. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘娟娟. 基于红外和可见光图像融合的苹果缺陷检测方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2012
Liu Juanjuan. The Defects Detection Based on the Apple's Infrared and Visible Images' Fusion[D]. Nanchang: Traffic University of East China, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [7] Lorente D, Aleixos N, Gómez-Sanchis J, et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment[J]. Food Bioprocess Technol, 2012, 5(4): 1121—1142.
- [8] Elmasry G, Kamruzzaman M, Sun D W, et al. Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(11): 999—1023.
- [9] 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 with English abstract)
- [10] 朱荣光, 马本学, 高振江, 等. 畜产品品质的高光谱图像无损检测研究进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1067—1071.
Zhu Rongguang, Ma Benxue, Gao Zhenjiang, et al. Research progress in nondestructive detection of livestock product quality based on hyperspectral

- imaging[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1067—1071. (in Chinese with English abstract)
- [11] 田有文, 程怡, 吴琼, 等. 高光谱成像技术在农产品病虫害无损检测方面的研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(12): 634—637
Tian Youwen, Cheng Yi, Wu Qiong, et al. Research progress on hyperspectral imaging in nondestructive detection of agricultural products disease and pest[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12): 1329—1335. (in Chinese with English abstract)
- [12] Haff R P, Saranwong S, Thanapase W, et al. Automatic image analysis and spot classification for detection of fruit fly infestation in hyperspectral images of mangoes[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86(1): 23—28.
- [13] Singh C B, Jayas D S, Paliwal J, et al. Detection of insect-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Journal of Stored Products*, 2009, 45 (3): 151—158.
- [14] 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.
- [15] Xing J, Guyer D, Ariana D, et al. Determining optimal wavebands using genetic algorithm for detection of internal insect infestation in tart cherry[J]. *Instrumentation for Food Quality*, 2008, 2(3): 161—167.
- [16] 吴龙国, 何建国, 刘贵珊, 等. 基于NIR高光谱成像技术的长枣虫眼无损检测[J]. *发光学报*, 2013, 34(11): 1527—1532.
Wu Longguo, He Jianguo, Liu Guishan, et al. Non-destructive detection of insect hole in jujube based on near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(11): 1527—1532. (in Chinese with English abstract)
- [17] 沈焕锋. ENVI 遥感影像处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [18] 杨丹, 赵海滨, 龙哲, 等. MATLAB 图像处理实例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [19] 黄崑, 骆方, 刘晓娟, 等. Excel 统计分析基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [20] Wu Di, Sun Dawen. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment A review Part I Fundamentals[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 19(4): 1—14.
- [21] Kamruzzaman M, ElMasry G, Sun D W. Application of NIR hyperspectral imaging for discrimination of lamb muscles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(3): 332—340.
- [22] Baranowski P, Mazurek W, Pastuszka-Wozniak J. Supervised classification of bruised apples with respect to the time after bruising on the basis of hyperspectral imaging data[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86(1): 249—258.
- [23] 章毓晋. 图像工程(中册): 第二版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [24] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [25] Fernandes A, Lousada J, Morais J, et al. Comparison between neural networks and partial least squares for intra-growth ring wood density measurement with hyperspectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 94: 71—81.
- [26] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [27] 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.
- [28] Abbott J A, Lu R, Upchurch B L, et al. Technologies for non-destructive quality evaluation of fruits and vegetables[J]. *Horticultural Review*, 1997, 20: 1—120.
- [29] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(1): 272—277. (in Chinese with English abstract)
- [30] 宋怡焕. 苹果果梗/花萼与缺陷的纹理特征识别方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Song Yihuan. Apple Stem/Calvx and Defect Identification by Their Texture Features[D]. Hang Zhou: Zhe Jiang University, 2012. (in Chinese with English abstract)

Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral imaging

Tian Youwen¹, Cheng Yi¹, Wang Xiaoqi², Li Qingji¹

(1. College of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. College of Plant protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Insect pestilence is one of the main defects of the apple industry, which could be caused by pest entrance during apple tree growth stages. Insect pest detection in apples is important for an automatic apple quality inspection and sorting system. In this study, we intended to determine the feature vectors that can be used for nondestructive detection of apple fruit insect pests and utilized hyperspectral imaging technology to carry out an effective method for rapid, non-invasive detection of the intact apples and insect pests. There were 160 samples of 80 intact and 80 insect infected 'red Fuji' apples to be investigated from an apple planting demonstration garden in the Shenbei New Area in Shenyang city. A hyperspectral imaging collection system with the wavelength range of 400-1 000 nm was established to acquire the hyperspectral images of these apple samples. Via the analysis of spectral reflectance of apple pest parts and the normal region, there were obvious differences in spectral reflectance at the 646 nm wavelength. So, the image of the 646nm wavelength was named the feature image. Then, the feature image was manipulated by threshold segmentation, dilation, and erosion operation, to obtain a mask image. The mask image was used for image analysis to mask and carried on principal component analysis. The optimum PC1 image was chosen and handled by the maximum entropy threshold segmentation to extract the pest region. Later, a comparative analysis of the texture feature of the insect infested region and the normal region on apples of the PC1 image, a region of interest (ROI) with 80 pixels×65 pixels of the PC1 image of each sample, was obtained. The texture features of the gray level co-occurrence matrix (of energy, entropy, moment of inertia and correlation) in four directions, which were 0, 45, 90, and 135 deg, respectively, were extracted. In addition, the spectral relative reflectance of the apple surface pests and normal regions, whether it was visible or near infrared region, had obvious difference. So the two spectral features of the spectrum relative reflectivity at 646 and 824 nm wavelength were acquired, which had larger relative reflectance differences between the apple surface pests and normal regions in the visible region and near infrared region, respectively. Feature vector selection was one of the key steps in detecting apple insect pests. For faster and more accurate detection of the apple insect pests, in this study, the optimization and integration of the texture features and the spectral feature vectors was analyzed. Four feature vector groups were posed respectively as the input vector of the BP neural network. The validation set of 30 normal apples and 30 insect infested apples was detected by using the BP neural network. The recognition rate was the highest when there was a fusion of the texture features of energy, entropy, moment of inertia, the correlation of 0 deg direction, and the spectral features of relative spectral reflectance with two feature wavelengths of 646 and 824 nm. A recognition rate of the normal apples and insect infested apples was 100 percent. Besides, in this case, the speed of detection is the fastest, and the MSE error is the smallest. Results show that the obtained feature vectors based on hyperspectral imaging technology can identify insect infestation effectively and provide a reference for apples quality detection and grading system using multispectral imaging.

Key words: nondestructive examination; principal component analysis; image processing; spectral characteristic; hyperspectral imaging