

高光谱图像技术在食品检测方面的研究进展

刘长虹, 王菊, 郑磊

(合肥工业大学食品科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: 高光谱图像技术是一种图像及光谱的融合技术, 可以同时获取研究对象的空间及光谱信息, 是近年来无损检测中的新兴方法。为了跟踪国内外的最新研究进展, 对高光谱图像技术的原理、系统构成、数据分析方法进行了简要介绍, 对高光谱图像技术在食品检测中的应用进行了详细总结, 并分析了现阶段的限制和未来发展方向, 以期高光谱图像技术在食品检测中的应用提供参考。

关键词: 高光谱图像; 食品; 检测

中图分类号: S126; TP391.4

Application of Hyperspectral Imaging in Food Quality and Safety Inspection: A Review

LIU Changhong, WANG Ju, ZHENG Lei

(College of Food Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Hyperspectral imaging (HSI) is an emerging platform technology that integrates conventional imaging and spectroscopy to attain both spatial and spectral information from an object. This paper provides an introduction to hyperspectral imaging: HSI equipment, image acquisition and processing are described; current limitations and likely future applications are discussed. In addition, recent advances in the application of HSI to food safety and quality assessment are reviewed, such as contaminant detection, defect identification, constituent analysis and quality evaluation.

Key words: Hyperspectral imaging; Food; Inspection

0 引言

目前, 食品品质和安全问题已日益受到社会关注, 对食品生产和加工过程进行实时检测是确保食品质量和安全的重要保障, 因此, 研究和开发食品检测技术意义重大。传统检测技术, 如高效液相色谱法 (HPLC)、质谱分析法 (MS) 等不仅费时、费力, 往往对研究对象具有破坏性。因此, 在食品加工过程中迫切需要一种快速、精确的无损检测方法。

由于机器视觉技术和光谱技术具有快速、无损、可靠的优点, 在食品无损检测中已得到广泛应用。机器视觉技术主要是对被测食品的空间信息进行分析并提取质量品质相关特征, 然后基于这些特征对研究对象进行检测。目前, 这种技术广泛应用于食品大小、形状、颜色、表面裂纹、表面缺陷及损伤等外观品质检测方面, 它虽然能得到样品的二维空间图像信息, 但常见的 RGB 图像只能反映外观, 不能反映食品的内部组分信息。与机器视觉技术不同, 光谱技术, 尤其是近红外光谱, 非常适合食品内部品质的检测, 如蛋白质、有机酸、脂肪、糖度、淀粉、水分等。然而, 近红外光谱技术所检测的区域通常是样品表面的某点或较小区域的近红外透射、漫反射信息, 缺少对象的空间信息, 样品的不均匀性通常对测定结果造成

基金项目: 博士点基金 (20120111110024)

作者简介: 刘长虹 (1982-), 女, 博士, 食品质量与安全

通信联系人: 郑磊 (1975-), 男, 教授, 环境有害物的毒理、迁移与快速检测. E-mail: zhengleihf@163.com

较大影响，从而影响系统的稳定性。

高光谱图像技术（Hyperspectral Image, HIS）是一种图像及光谱的融合技术，可以同时获取研究对象的空间及光谱信息，是近年来无损检测中的新兴方法。由于图像数据能反映食品的外部特征，而光谱数据又可以对物体内部物理结构及化学成分进行分析。因此，近几年其在食品品质及安全性无损检测中的应用引起越来越多的关注。高光谱图像技术与以上所提及的技术相比具有很多优势，如表 1 所示。本文将介绍高光谱图像技术的原理、系统构成和数据分析方法，并从高光谱反射成像技术、荧光成像技术和透射成像技术三方面重点介绍此技术在食品（水果、蔬菜、肉类、谷物等）检测中的最新研究进展。

表 1 计算机视觉技术（CV）、近红外光谱技术（NIRS）、多光谱图像技术（MSI）和高光谱图像技术（HIS）的比较

50

Tab. 1 Comparison of RGB imaging, NIR spectroscopy (NIRS), multispectral imaging (MSI) and hyperspectral imaging (HSI)

特征	NIRS	CV	MSI	HIS
空间信息		√	√	√
光谱信息	√		limited	√
多要素信息	√	limited	limited	√
对微量组分的敏感性	limited		limited	√
化学图像的构建			limited	√
光谱信息提取的适应性			limited	√

1 高光谱图像系统介绍及图像采集

55

一般认为，光谱分辨率在 $10^{-1} \lambda$ 数量级范围内称为多光谱，光谱分辨率在 $10^{-2} \lambda$ 数量级范围内称为高光谱，光谱分辨率在 $10^{-3} \lambda$ 数量级范围内称为超光谱。一个典型的高光谱图像系统如图 1 所示^[1]，主要包括三个部分：光源、光谱摄制仪和计算机。光散射装置在有些系统中并不是必须的，如 MSI 系统是采用 LED 光源来获取不同波长的光。光源的波长范围可以在紫外（200-400 nm）、可见光（400-760 nm）、近红外（760~2560 nm）以及波长大于 2560 nm 的区域。摄像机可以采用 CCD（Charge Coupled Device）传感器、CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）传感器、焦平面阵列检测器等。

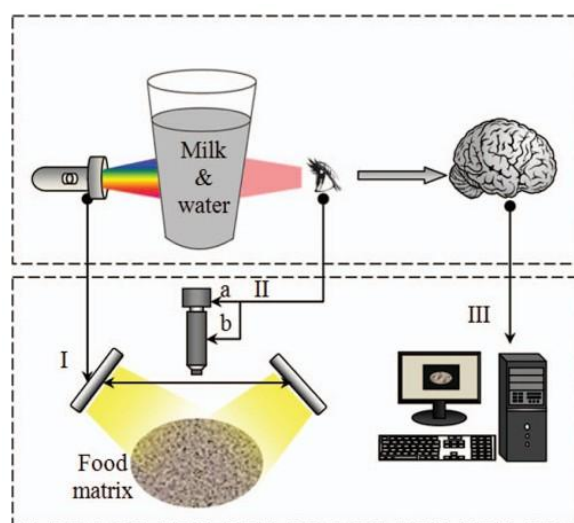


图 1 典型高光谱图像系统的配置

65 Fig. 1 Configuration of a typical hyperspectral imaging system. I: light source; II: spectrograph (a: imaging unit; b: wavelength dispersion apparatus); III: information processor.

由高光谱图像系统所得到的最终数据是在特定波长内由一系列连续的窄波段图像组成的三维图像数据块，有时称为 Super Hypercube，如图 2 所示。图中， x 和 y 表示二维平面坐标轴， λ 表示波长信息坐标轴。可以看出，高光谱图像既具有某个特定波长下的图像信息，并且针对平面内某个特定像素又具有不同波长下的光谱信息。因此，高光谱图像集图像信息和光谱信息于一身。每个波长下图像平面内像素的灰度值与其在该波长下的光谱值相对应。一般而言，某个特定波长下感兴趣区域 (ROI) 与正常区域之间的光谱值会存在很大差异，因此，在此波长下的图像灰度也存在一定的差异。

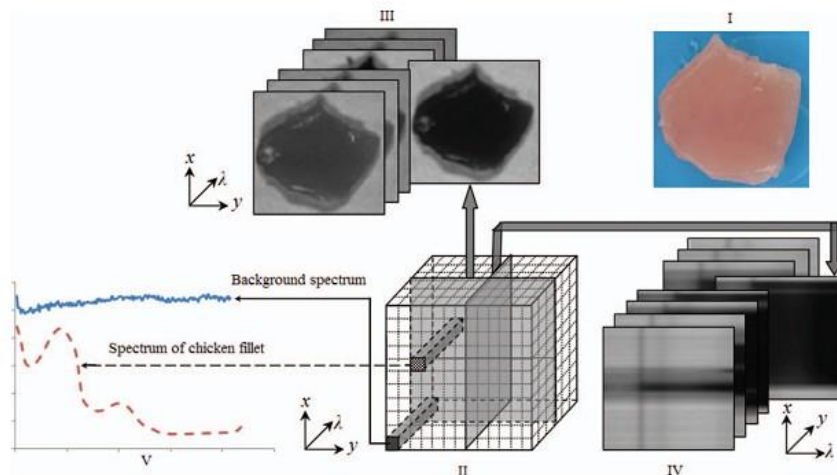


图 2 三维图像数据块

Fig. 2 Different ways of understanding a hypercube. I: RGB image of a chicken breast fillet slice; II: the spatial structure of a hypercube; III: front view of the hypercube; IV: side view of the hypercube; V: Spectra of pixels in different portions.

2 高光谱图像数据分析

2.1 图像标定

由于光源的强度在各波段下分布不均匀、样品的形状不规则以及摄像头中暗电流的存在，造成在光源强度分布较弱的波段所获得的图像含有较大的噪声。因此，需要对所获得的高光谱图像进行黑白标定。在与样品采集相同的系统条件下，扫描标准白色校正板得到全白的标定图像记为 I_{white} ，关闭相机镜头进行图像采集得到全黑的标定图像记为 I_{dark} ，按照下式对原始图像 I 进行标定得到标定图像 I_c (Lu and Chen, 1998):

$$I_c = (I - I_{dark}) / (I_{white} - I_{dark})$$

2.2 数据处理

由于高光谱图像同时含有光谱信息和图像信息，因此，数据处理过程分为光谱处理和图像处理两块^[1]，其流程如图 3 所示。

流程图的具体实现步骤大致如下:

①对象提取: 在进行光谱分析时，首先要从感兴趣区域 (ROI) 提取出特征光谱，一般对单一波段或不同波段比的图片采用阈值转换。对于图像分析来说，首先需要选择处理图片，为了能进行快速计算，一般选择不超过 10 张图片。

②预处理: 光谱分析和图像分析的预处理是为了移除光谱信息中的非化学偏差(如表面不均匀引起的散射影响) 和为进一步的数据处理做准备。光谱分析预处理通常采用如多项式基线校正，单位方差等，图像分析一般采用阈值转换和掩蔽方法从图像块中移除大量的背景

信息。

③特征提取：为得到这些特征波长下的图片，通常对原始的或预处理过的光谱波段的峰谷点进行分析，结合其他统计方法，如主成分分析（PCA）、偏最小二乘回归（PLSR）来提取特征光谱。另外，其他数据压缩方法，如傅里叶变换、奇异值分解等也被用来进行高光

100 谱图像的处理。
④建立模型：建模过程首先要降低噪声以提高信噪比，在高光谱分析技术中多采用多元散射校正和标准正态变换来消除由于样品物理特性所引起的光散射影响(如表面不均匀引起的散射影响)。建模分为定性模型和定量模型，定性模型是将同类型的样品归为一类，常采用的方法有：有主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）、偏最小二乘判别分析（PLS-DA）、Fisher 判别分析（PLD）、人工神经网络（ANN）、支持向量机（SVM）和模糊推理（FI）。定量分析是为了判断不同样品间物理、化学或生物参数间的变化，常采用的方法有：多元线性回归（MLR）、偏最小二乘回归（PLSR）、主成分回归（PCR）、人工神经网络（ANN）等。

110 ⑤模型校正：最后一般采用交叉验证或外部验证对所建模型进行校正。

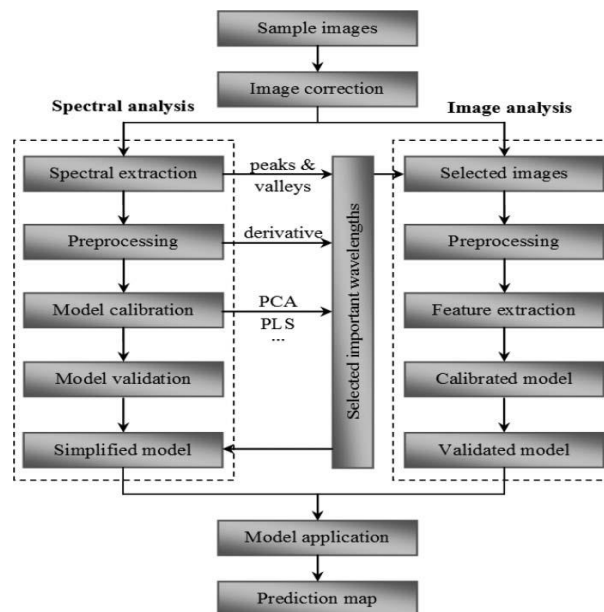


图3 高光谱图像的处理流程图

Fig. 3 Flow chart of the routine for hyperspectral imaging processing.

115 3 高光谱图像系统在食品检测方面的应用

食品检测可分为食品综合品质检测和食品卫生安全检测，食品综合品质检测又分为外在品质检测和内在品质检测，外在品质检测如水果、蔬菜表面损伤、淤痕；内部品质检测如水果的可溶性固形物含量、水分含量、硬度，猪肉、牛肉的嫩度，鳕鱼的新鲜程度，杏仁的内部好坏等；而食品安全检测主要指食品中是否含有可能损害或威胁人体健康的物质，如苹果、哈密瓜表面排泄物污染检测，鸡肉排泄物污染检测，玉米、辣椒等黄曲霉毒素检测等。目前，高光谱图像系统在食品检测方面已得到广泛应用，如表2所示。高光谱图像技术在食品检测的应用中一般采用三种模式即反射成像模式、荧光成像模式和透射成像模式。

表2 高光谱成像技术对食品品质及安全性的检测

Tab. 2 Application of hyperspectral imaging in food quality and safety inspection

食品种类	检测模式	检测对象	分类算法	参考文献
------	------	------	------	------

苹果	反射成像	表面粪便污染	波段比值 (BR)	Liu et al., 2007 ^[2]
苹果	反射成像	表面粪便污染	波段差异 (BD)	Mehl et al., 2004 ^[3]
苹果	反射成像	苦痘病	偏最小二乘 (PLS)	Nicola iet al., 2006 ^[4]
苹果	反射成像	表面损伤	主成分分析 (PCA)	Xing et al., 2005 ^[5]
苹果	反射成像	果梗/萼识别	主成分分析 (PCA)	Xing et al., 2007 ^[6]
苹果	反射成像	表面损伤	偏最小二乘法和逐步判别分析	EIMasry et al., 2008 ^[7]
苹果	反射成像	表面损伤	主成分分析	Xing et al., 2007 ^[8]
苹果	反射成像	冷害	神经网络	EIMasry et al., 2009 ^[9]
苹果	反射成像	苦痘病、黑腐病、腐烂和灼斑病	人工神经网络	Ariana et al., 2006 ^[10]
桃	反射成像	硬度	多元线性回归	Lu and Peng, 2006 ^[11]
柑橘	反射成像	冷害	偏最小二乘 (PLS)	Menesatti et al., 2005 ^[12]
柑橘	反射成像	青霉菌感染	主成分分析和分类识别树	G ómez-Sanchis et al., 2004 ^[13]
橘子	反射成像	腐烂	遗传算法和分类识别树	G ómez-Sanchis et al., 2008 ^[14]
柚子	反射成像	溃疡病斑	光谱信息散度分类理论和主成分分析	Qin et al., 2009 ^[15]
草莓	反射成像	含水量、可溶性固形物、pH	多元线性回归	EIMasry et al., 2007 ^[16]
草莓	反射成像	硬度	逐步多元线性回归	Tallada et al., 2006 ^[17]
草莓	反射成像	表面损伤	波段差异 (BD)	Nagata et al., 2006 ^[18]
草莓	反射成像	硬度、可溶性固形物	逐步多元线性回归	Nagata et al., 2004 ^[19]
香蕉	反射成像	含水量、硬度、可溶性固形物含量	偏最小二乘和多元线性回归	Rajkumar et al., 2012 ^[20]
番茄	反射成像	成熟度	线性判别分析 (LDA)	Polder et al., 2002 ^[21]
番茄	反射成像	表面损伤	偏最小二乘判别分析和遗传算法	Xing et al., 2006 ^[22]
黄瓜	反射成像	采摘时受到机械应力而产生的损伤	波段比值 (BR)	Ariana et al., 2006 ^[23]
黄瓜	反射成像	冷害	综合主成分分析和 Fishers 判别分析	Cheng et al., 2004 ^[24]
黄瓜	反射成像	冷害	波段比值	Liu et al., 2005 ^[25]
白蘑菇	反射成像	表面损伤	主成分分析	Gowen et al., 2008 ^[26]
玉米	反射成像	油酸、亚油酸浓度	偏最小二乘	Weinstock et al., 2006 ^[27]
玉米	反射成像	硬度	主成分分析和偏最小二乘判别分析	Williams et al., 2009 ^[28]
小麦	反射成像	正常小麦与受损小麦 (发芽粒和被虫叮咬粒)	基于主成分分析的多元图像分析, 统计判别分类器	Singh et al. 2009 ^[29]
小麦	反射成像	正常小麦与被虫叮咬小麦	线性判别分析和二次判别分析	Singh et al., 2009 ^[30]
小麦	反射成像	正常麦粒和萌芽的或已发芽的麦粒	双波段比, 主成分分析	Xing et al., 2010 ^[31]
大麦、小麦和玉米	反射成像	杂质	遗传算法	Wallays et al., 2009 ^[32]
谷物	反射成像	麦角	偏最小二乘判别分析	Vermeulen et al., 2013 ^[33]
猪肉	反射成像	猪肉质量	人工神经网络	Qiao et al., 2007 ^[34]
禽肉	反射成像	粪便污染	偏最小二乘回归	Lawrence et al., 2006 ^[35]
禽肉	反射成像	粪便污染	波段比值	Park et al., 2006 ^[36]
禽肉	反射成像	污染物分类	光谱角分类	Park et al., 2007 ^[37]
禽肉	反射成像	粪便及摄取物污染	主成分分析	Park et al., 2002 ^[38]

禽肉	反射成像	禽肉皮瘤	主成分分析, 核判别分析和离散小波变换	Xu et al., 2007 ^[39]
禽肉	反射成像	表面粪斑及摄取物	单波段和双波段比	Cho et al., 2007 ^[40]
牛肉	反射成像	嫩度	主成分分析和共生矩阵	Naganathan et al., 2008 ^[41]
牛肉	反射成像	嫩度	偏最小二乘法	Naganathan et al., 2008 ^[42]
羊肉	反射成像	三种不同部位的羊肉	主成分分析	Kamruzzaman et al., 2011 ^[43]
鲑鱼	反射成像	新鲜的和冷冻过的鲑鱼	主成分分析, K-邻近分类器, 偏最小二乘回归	Sivertsen et al., 2011 ^[44]
脐橙	反射成像	表面农药残留	主成分分析	薛龙等, 2008 ^[45]
茶叶	反射成像	茶叶质量	主成分分析	陈全胜等, 2008 ^[46]
柑橘	反射成像	果锈	波段比算法	蔡健荣等, 2009 ^[47]
脐橙	反射成像	表面溃疡	主成分分析和波段比算法	李江波等, 2010 ^[48]
苹果	荧光成像	苹果品质	波段比算法	Noh and Lu, 2007 ^[49]
苹果	荧光成像	粪便污染	主成分分析	Kim et al., 2001 ^[50]
苹果	荧光成像	粪便污染	均衡能量变换法	Lefcote and Kim, 2006 ^[51]
哈密瓜	荧光成像	粪便污染	主成分分析	Vargas et al., 2005 ^[52]
黑胡桃	荧光成像	黑胡桃壳和肉	高斯核函数方法	Jiang et al., 2007 ^[53]
胡桃	荧光成像	胡桃壳和肉	独立成分分析和近邻取样理论	Zhu et al., 2007 ^[54]
玉米	荧光成像	含有黄曲霉毒素的玉米粒和正常玉米粒	Maximum likelihood, binary encoding	Yao et al., 2010 ^[55]
玉米	荧光成像	含有黄曲霉毒素的玉米粒和正常玉米粒, 黄曲霉毒素浓度	多元线性回归	Yao et al., 2010 ^[56]
辣椒	荧光成像	含有黄曲霉毒素的红辣椒和正常红辣椒	multilayer perceptron, 最小冗余和最大相关	Atas et al., 2011 ^[57]
鸡肉	荧光成像	鸡酮体皮瘤	模糊算法	Kim et al., 2004 ^[58]
鸡肉	荧光成像	鸡酮体皮瘤	离散小波变化和主成分分析	Kong et al., 2004 ^[59]
樱桃	透射成像	凹陷	人工神经网络	Qin and Lu, 2005 ^[60]
黄瓜	透射成像	内部机械损伤	图像阈值	Ariana and Lu, 2006 ^[61]
玉米	透射成像	含水量、含油量	偏最小二乘	Cogdill et al., 2004 ^[62]
鲑鱼鱼片	透射成像	线虫	偏最小二乘	Heia et al., 2007 ^[63]
杏仁	透射成像	内部损坏和正常的杏仁	不同特征波段比	Nakariyakul and Casasent, 2011 ^[64]

125

3.1 高光谱反射成像模式在食品检测方面的应用

反射成像模式是基于高光谱图像系统的最常见的高光谱图像获取技术, 获取的图像范围通常在可见-近红外波段 (400-1000 nm) 或者近红外波段 (1000-1700 nm), 常用来检测水果、蔬菜和肉制品的品质。

- 130 ElMasry 等^[16]应用 400-1000 nm 的可见-近红外高光谱反射成像技术对草莓品质和成熟阶段进行了检测, 偏最小二乘法用来提取最佳波长, 然后采用多元线性回归模型预测含水量、可溶性固形物含量和 pH 值, 相关系数分别为 0.87、0.80 和 0.92。采用灰度共生矩阵对草莓成熟阶段进行分类, 结果显示 0° 的分类准确度达到了 89.61%。Polder 等^[21]研究结果表明 396-736 nm 的高光谱反射成像技术对番茄成熟水平的鉴别优于 RGB 图像技术。Ariana 等^[23]
- 135 应用近红外高光谱反射成像技术对黄瓜的表面损伤进行了检测, 结果表明受损伤组织的反射光强度比正常组织低, 且检测的准确度与受损伤后的时间有关, 不同算法比较发现波段比法和最优波段差值法优于主成分分析法。

高光谱反射成像技术除了用在检测果蔬损伤、硬度、水分含量等品质外，还可用于果蔬、肉制品表面粪便污染及真菌感染的研究。Gómez-Sanchis 等^[13]研究表明可见-近红外高光谱图像系统可用于检测柑橘果实的早期青霉菌感染，采用主成分分析和分类识别树可使预测准确率达到 80%。Park 等^[36]应用可见-近红外高光谱反射成像系统对禽肉表面的粪便污染进行了检测，结果表明双波段比法的检测准确率较高，达到了 94.6%。

3.2 高光谱荧光成像模式在食品检测方面的应用

许多天然物质在合适波长的激发光诱导下会发射荧光，通过对这些荧光光谱分析从而达到对食品质量检测的目的。Lefcote 和 Kim^[51]应用高光谱荧光成像技术对苹果表面的粪便污染进行了检测，采用均衡能量变换法进行图像处理，污染区域与苹果区域的灰度值对比增强，检测结果较好。Yao 等^[55]应用高光谱荧光成像技术来检测含有黄曲霉毒素的玉米和正常玉米，采用 Maximum likelihood 和 binary encoding 两种算法对黄曲霉毒素含量进行了检测，并与 HPLC 检测结果进行对比，结果表明 binary encoding 比 Maximum likelihood 分类准确。Kim 等^[58]应用高光谱荧光成像系统来检测鸡酮体皮瘤，通过模糊算法可使皮瘤的正确检出率达到 76%。

3.3 高光谱透射成像模式在食品检测方面的应用

高光谱透射成像模式在食品检测方面的研究比较少，但高光谱透射成像模式对在线检测食品内部损坏、缺陷有很大的应用前景。Qin 和 Lu^[60]应用高光谱透射成像技术对樱桃的凹陷进行了检测，光源安装在载物台下方，光线透射穿过待测樱桃被检测器检测。通过对樱桃四个不同方向的检测发现样品的摆放位置和颜色对检测结果无显著影响，这对食品的在线检测具有重要意义。

Cogdill 等^[62]应用近红外高光谱透射成像技术对玉米的含油量和含水量进行了检测，结果表明此技术用来预测含水量准确度高，但不能准确预测含油量。Heia 等^[63]应用高光谱透射成像技术和偏最小二乘模型对鳕鱼鱼片中的线虫进行了检测，结果表明此技术可用于辨认鳕鱼鱼片表面下 0.8 cm 深处的线虫，这比人工检查深度大了 2-3 mm。Nakariyaku 和 Casasent^[64]应用高光谱透射成像技术对内部损坏杏仁和正常杏仁进行了分类，结果表明采用不同特征波段比分类准确率高。

高光谱透射成像技术也可用来检测移动中的样品。Ariana 和 Lu^[61]应用高光谱透射成像技术对黄瓜的内部损伤进行了检测，待测黄瓜放在一个旋转的载物台上，光从载物台下方透射过黄瓜，载物台上方安装三台检测器，每台之间的夹角是 120°。用阈值转换法对图像进行处理的检测准确率高于偏最小二乘法，达到了 94.3%。

4 高光谱图像技术的现阶段局限性及展望

高光谱图像技术融合了测量对象的图像空间信息与光谱信息，为食品检测提供了强大平台。然而，其在食品工业的广泛应用在当前还存在两个主要障碍：

第一，高光谱图像系统成本较高，特别是国外的高光谱图像系统，价格昂贵，不利于推广应用。因此，开发国产的高光谱图像仪器，对于推动该技术在我国的产业化应用，是至关重要的。另外，将来还可针对食品检测中样品的特性，开发专用的高光谱图像系统，从而进一步降低成本。并可在高光谱图像的基础上挑选敏感波长，从而开发相应的多光谱图像系统，大大降低成本，使得该技术最终大量应用于生产实践中。

第二，高光谱图像数据量大，图像获取、处理及分类耗时长，一般需要 2 到 4 min，且

处理和分类时间还取决于计算机的硬件和软件性能。将来可以通过提高照相机的性能、更高的计算机硬件配置及更精确有效的算法来缩短图像的处理和获取时间,使高光谱图像系统能够实时检测食品的加工过程。另外,高光谱图像技术的优点在于能够实现在线检测,因此对于在线检测仪器的实时校正、模型的更新传递、配套机械控制系统的开发等方面,还需要进行深入的研究。

5 结论

在我国,目前高光谱图像技术多用于农产品,特别是鲜活产品如水果的检测较多,而对于加工产品的检测。作为具有在线检测潜力的技术,高光谱图像技术在农产品原材料收购、产品分级及食品加工在线检测方面具有广阔的应用前景。另外,目前国内外大多数研究团队主要是应用高光谱反射成像技术或者荧光成像技术或者透射成像技术 3 种独立的技术对食品外部或者内部品质进行检测,很少有文献报道联合其两种或者三种技术同时对食品进行检测,然而高光谱技术最大的优势是内外部品质的同时检测。因此如何有效地利用高光谱图像技术同时对食品内外品质进行综合评价可能是未来的一个研究方向。

[参考文献] (References)

- [1] Feng Y Z, Sun D W. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(11): 1039-1058.
- [2] Liu Y, Chen Y R, Kim M S, et al. Development of simple algorithms for the detection of fecal contaminants on apples from visible/near infrared hyperspectral reflectance imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(2): 412-418.
- [3] Mehl P M, Chen Y R, Kim M S, et al. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(1): 67-81.
- [4] Nicolai B, Peirs A, et al. Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 40(1): 1-6.
- [5] Xing J, Bravo C, Jancsok P, et al. Detecting bruises on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(1): 27-36.
- [6] Xing J, Jancsok P, De Baredemaeker J. Stem-end/calyx identification on apples using contour analysis in multispectral images[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(2): 231-237.
- [7] 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.
- [8] Xing J, Saeyns W, De Baerdemaeker J. Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 56(1): 1-13.
- [9] Elmasry G, Wang N, Vigneault C. Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 52(1): 1-8.
- [10] Arianad, Guyer D E, Shrestha B. Integrating multispectral reflectance and fluorescence imaging for defect detection on apples[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 50(2): 148-161.
- [11] Lurf, Peng Y K. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2): 161-171.
- [12] Menesatti P, Urbani G, Lanza G. Spectral imaging Vise-NIR system to forecast the chilling injury onset on citrus fruits[M]. In: F. Mencarelli, & P. Tonutti (Eds.), *ISHS Acta Horticulturae 682: V International Postharvest Symposium* (pp. 1347-1354). ISHS, 2005.
- [13] Gomez-sanchis J, Molto E, Gomez-chova L, et al. Hyperspectral computer vision system for the detection of *Penicillium digitatum* in citrus packing lines[C]// *CIGR International Conference*, Beijing, China, October 11-14, 2004.
- [14] Gomez-sanchis J, Gomez-chova L, Aleixos N, et al. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 89(1): 80-86.
- [15] Qin, J, Burks, T F, Ritenour M A, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 183-191.
- [16] El Masry G, Wang N, El Sayed A, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(1): 98-107.
- [17] Tallada J, Nagata M, Kobayashi T. Non-destructive estimation of firmness of strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.) using NIR hyperspectral imaging[J]. *Environment Control in Biology*, 2006, 44(4): 245-255.
- [18] Nagata M, Tallada J, Kobayashi T. Bruise detection using NIR hyperspectral imaging for strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.)[J]. *Environment Control in Biology*, 2006, 44(2): 133-142.
- [19] Nagata M, Tallada J G, KOBAYASHI T, et al. Predicting maturity quality parameters of strawberries using hyperspectral imaging[C]// *ASAE/CSAE annual international meeting*, Ottawa, Ontario, Canada, Paper number: 043033, 2004.

- [20] Rajkumar P, Wang N, Elmasry G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194-200.
- 235 [21] Polder G, Heijden G, Young I. Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45: 1155-1161.
- [22] Xing N, Ngadi M, Wang N, et al. Wavelength selection for surface defects detection on tomatoes by means of a hyperspectral imaging System[C]// An ASABE Meeting presentation, Paper Number: 063018, 2006.
- 240 [23] Ariana D, Lu R, Guyer D E. Near-infrared hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on pickling cucumbers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(1): 60-70.
- [24] Cheng X, Chen YR, Tao Y, et al. A novel integrated PCA and FLD method on hyperspectral image feature extraction for cucumber chilling damage inspection[J]. Transactions of ASAE, 2004, 47(4): 1313-1320.
- [25] Liu Y, Chen Y R, Wang C Y, et al. Development of simple algorithm for the detection of chilling injury in cucumbers from visible/near-infrared hyperspectral imaging[J]. Applied Spectroscopy, 2005, 59(1): 78-85.
- 245 [26] Gowen A, Odonnell C, Taghizadeh M, et al. Hyperspectral imaging combined with principal component analysis for bruise damage detection on white mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. Journal of Chemometrics, 2008, 22(3-4): 259-267.
- [27] Weinstock B A, Janni J, Hagen L, et al. Prediction of oil and oleic acid concentrations in individual corn (*Zea mays* L.) kernels using near-infrared reflectance hyperspectral imaging and multivariate analysis[J]. Applied Spectroscopy, 2006, 60(1): 9-16.
- 250 [28] Williams P, Geladi P, Fox G, et al. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 653(2), 121-130.
- [29] Singh C B, Jayas D S, Paliwal J, et al. Detection of sprouted and midge-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(3): 256-260.
- 255 [30] 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 Research, 2009, 45(3): 151-158.
- [31] Xing J A, Symons S, Shahin M, et al. Detection of sprout damage in Canada Western Red Spring wheat with multiple wavebands using visible/near-infrared hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 188-194.
- 260 [32] Wallays C, Missotten B, DE Baredemaeker J, et al. Hyperspectral waveband selection for on-line measurement of grain cleanness[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 1-7.
- [33] Vermeulen P H, Fernanaez Pierna J A, Van Egmond H P, et al. Validation and transferability study of a method based on near-infrared hyperspectral imaging for the detection and quantification of ergot bodies in cereals[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 10.1007/s00216-013-6775-7.
- 265 [34] Qiao J, Ngadi M O, Wang N, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 10-16.
- [35] Lawrence K C, Windham W R, Park B, et al. Partial least squares regression of hyperspectral images for contaminant detection on poultry carcasses[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2006, 14(4): 223-230.
- 270 [36] Park B, Lawrence K C, Windham W R, et al. Performance of hyperspectral imaging system for poultry surface fecal contaminant detection[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 340-348.
- [37] Park B, Windham W R, Lawrence K C, et al. Contaminant classification of poultry hyperspectral imagery using a spectral angle mapper algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(3): 323-333.
- [38] Park B, Lawrence K, Wingham W, et al. Hyperspectral imaging for food processing automation[C]// Sylvia S. Shen (Ed.). Proceedings of SPIE, Seattle, WA, 2002, 4816: 308-316.
- 275 [39] Xu C, Kim I, Kim MS. Poultry skin tumor detection in hyperspectral reflectance images by combining classifiers. Image Analysis and Recognition[C]// Proceedings 4th International Conference, ICIAR 2007. (Lecture Notes in Computer Science vol. 4633), 2007, 1289-1296.
- [40] Cho B K, Chen Y R, Kim M S. Multispectral detection of organic residues on poultry processing plant equipment based on hyperspectral reflectance imaging technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57(2): 177-189.
- 280 [41] Naganathan G K, Grimes L M, Subbiah J, et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 225-233.
- [42] Naganathan G K, Grimes L M, Subbiah J, et al. Partial least squares analysis of near-infrared hyperspectral images for beef tenderness prediction[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(3): 48-58.
- 285 [43] Kamruzzaman M, Elmasry G, Sun D W, et al. Application of NIR hyperspectral imaging for discrimination of lamb muscles[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(3): 332-340.
- [44] Sivertsen A H, Kimiy A T, Heia K. Automatic freshness assessment of cod (*Gadus morhua*) fillets by Vis/Nir spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 317-323.
- 290 [45] 薛龙,黎静,刘木华.基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J].光学学报,2008, 28(12): 2277-2280.
- [46] 陈全胜,赵杰文,蔡健荣, SARITPORN V. 利用高光谱图像技术评判茶叶的质量等级[J].光学学报, 2008, 28(4): 669-674.
- 295 [47] 蔡健荣,王建黑,陈全胜,赵杰文.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.
- [48] 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.
- [49] Noh H, Lu R. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(2): 193-201.

- 300 [50] Kim M S, Chen Y R, Mehl P M. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 721-729.
- [51] Lefcote A M, Kim M S. Technique for normalizing intensity histograms of images when approximate size of the target is known: Detection of feces on apples using fluorescence imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 135-147.
- 305 [52] Vargas A M, Kim M S, Tao Y, et al. Detection of fecal contamination on cantaloupes using hyperspectral fluorescence imagery[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(8): E471-E476.
- [53] Jiang L, Zhu B, Rao X, et al. Discrimination of black walnut shell and pulp in hyperspectral fluorescence imagery using Gaussian kernel function approach[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(1): 108-117.
- [54] Zhu B, Jiang L, Jin F, et al. Walnut shell and meat differentiation using fluorescence hyperspectral imagery with ICA-kNN optimal wavelength selection[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2007, 1(3): 123-131.
- 310 [55] Yao H, Hruska Z, Kincaid R, et al. Single aflatoxin contaminated corn kernel analysis with fluorescence hyperspectral image[J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7676: 76760D1-76760D10.
- [56] Yao H, Hruska Z, Kincaid R, et al. Correlation and classification of single kernel fluorescence hyperspectral data with aflatoxin concentration in corn kernels inoculated with *Aspergillus flavus* spores[J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2010, 27(5):701-709.
- 315 [57] Atas M, Yardimci Y, Temizel A. Aflatoxin contaminated chili pepper detection by hyperspectral imaging and machine learning[C]// Proceedings of the SPIE, 2011, 8027, DOI: 10.1117/12.883237.
- [58] Kim I, Kim M S, Chen Y R, et al. Detection of skin tumors on chicken carcasses using hyperspectral fluorescence imaging[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1785-1792.
- 320 [59] Kong S G, Chen Y R, Kim I, et al. Analysis of hyperspectral fluorescence images for poultry skin tumor inspection[J]. Applied Optics, 2004, 43(4): 824-833.
- [60] Qin J, Lu R. Detecting pits in tart cherries by hyperspectral transmission imaging[J]. Proc. SPIE 5587, Nondestructive Sensing for Food Safety, Quality, and Natural Resources, 153 (November 19, 2004), doi:10.1117/12.571359.
- 325 [61] Ariana D, Lu R. Visible/near-infrared hyperspectral transmittance imaging for detection of internal mechanical injury in pickling cucumbers[C]// ASABE Annual International Meeting, Paper No. 063039, July 2006.
- [62] Cogdill R, Hurburgh C, Rippke G. Single-kernel maize analysis by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1): 311-320.
- 330 [63] Heia K, Sivertsen A, Stormo S, et al. Detection of nematodes in Cod (*Gadus morhua*) fillets by imaging spectroscopy[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(1): E011-E015.
- [64] Nakariyakul S, Casasent D P. Classification of internally damaged almond nuts using hyperspectral imagery[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(1): 62-67.