

现代成像技术在食品/农产品无损检测中的研究进展

孙 力, 林 颢, 蔡健荣*, 赵杰文, 陈全胜
(江苏大学 食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 现代成像技术是应用物理技术、电子技术、计算机技术和材料科学等多种技术相互渗透的产物, 近些年来也开始应用于食品、农产品的品质检测。本文介绍了现代成像系统的基本构成, 阐述了可见光成像技术、光谱成像技术、X 射线线性扫描成像技术、CT 成像技术、超声成像技术、核磁共振成像技术的特点, 及其在食品、农产品检测中的研究应用情况。最后对现代成像新技术在食品、农产品检测中的发展趋势进行了展望。
关键词: 现代成像技术; 食品; 无损检测

Progress research of advanced imaging technique and its application in food and agricultural product non-destructive detection

SUN Li, LIN Hao, CAI Jian-Rong*, ZHAO Jie-Wen, CHEN Quan-Sheng
(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: Advanced imaging techniques are kinds of product from physics technology, electronic technology, computer technology and materials science and other technologies. In recent years, they were increasingly used in food, agricultural products quality field. This paper intends to introduce the advanced imaging system, characteristics of several advanced imaging techniques (e.g. visible imaging, hyperspectral imaging, soft X-ray imaging, CT imaging, ultrasound imaging magnetic resonance imaging). Further more, their application in food and agricultural product field were also introduced. Finally, the modern imaging technology in food and agricultural products detection development trend is prospected.

KEY WORDS: advanced imaging technique; food; non-destructive detection

人类视觉的形成是由视网膜上的感光细胞将光信号转换成神经信号, 传入大脑进行处理。现代成像技术的形成原理类似于人类视觉, 是通过电荷耦合设备 (CCD) 捕捉一定波长范围的电磁波将光信号转换到电信号, 并量化记录进入电脑处理^[1]。随着科技水平的进步, 现代成像技术的组成各要素都在不断

更新, 不仅能实现在人眼可见光范围物体成像, 在红外、紫外、X 线、电磁波等可见光范围外也实现了受测物的成像, 拓宽了人的感知范围^[2]。随着计算机技术和现代传感器技术的发展, 现代成像技术的应用对象也在逐步的拓宽。在 20 世纪 60 年代起, 现代成像技术逐步应用于食品、农产品的自动检测。各类

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD29B04-4)

Fund: Supported by the "Twelfth Five-Year" Plan key projects supported by National Science and Technology (2012BAD29B04-4)

*通讯作者: 蔡健荣, 教授, 主要研究方向为农产品无损检测及收获机器。E-mail: jrcai@ujs.edu.cn

*Corresponding author: CAI Jian-Rong, Professor, School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China. E-mail: jrcai@ujs.edu.cn

新兴的成像技术正越来越多地得到应用,为食品、农产品自动化检测提供了多方位的解决方法和思路。

1 现代成像系统构成

现代成像系统通常由光源、镜头、成像芯片、采集处理卡、计算机等部分组成。光源发射器发出光波照射在受检食品(农产品)上,经反射、折射或透射后进入光学镜头分光处理,光信号经成像芯片转换为模拟图像信号,通过图像采集卡获取原始的模拟图像,并将模拟信号转换成数字信号^[3-4]。计算机接收到图像的数字信号后,将其存入内存存储区,通过相关的图像分析技术进行进一步处理。光源是成像系统非常重要的组成部分,对食品、农产品的成像方式以及能否进行稳定、清晰、高对比度成像起着关键作用。用于食品、农产品成像的光源有可见光光源、红外光源、紫外光源、X线光源、电磁波光源等。

镜头将三维被测食品、农产品和它周围的环境光学成像并投影在摄像机的二维图像传感器平面上。镜头有着较长的发展史,已经是比较成熟的技术,但随着机器视觉技术的应用领域不断拓宽,在一些领域的应用也对这个传统技术提出了新的挑战。这主要表现在:有些机器视觉系统为了结构紧凑需要设计出复杂的光学系统;在某些应用上对镜头的畸变率及色差提出了很高的要求;多种特殊镜头的出现,如远心镜头、晶相镜头、变焦变倍镜头、多 CCD 镜头、高放大倍率镜头、大靶面镜头(12 K 甚至更高)等。

成像芯片可直接将光学信号转换为数字电信号,实现图像的获取、存储、传输、处理和复现,是现代成像系统组成器件中最活跃的元素。目前,成像芯片领域正在向高速、高分辨率、高灵敏度、紧凑设计、低功耗等方向发展。电荷耦合元件(CCD)芯片有先天的成像质量优势,但设计开发成本较高;互补金属氧化物半导体芯片(CMOS)拥有高速、低功耗、高集成度和开发成本相对较低的优势,在成像器件中所占的比例将会越来越大。同时成像芯片的传感器正不断由可见光感应范围向非可见的光谱范围拓宽,在红外、紫外、电磁波领域有越来越多的应用。同时, CameraLink、USB、IEEE1394 和光纤接口等标准化接口技术的发展,为高速远距离数据传输提供可靠保证。

采集卡的作用是采集被测物质的模拟图像信号,并将模拟信号转换成数字信号。计算机接收到图像的

数字信号后,将其存入内存存储区,供下一步处理分析。随着计算机技术的发展和硬件水平的不断提高,图像采集的速度(频率)越来越高,可获取的数据量也越来越大,数据采集和转换的精度也越来越高,采集卡的接口技术越来越多样化,在采集卡上所做的处理功能也越来越多,且功能日益强大,DSP 技术、PowerPC 技术及最新 FPGA 技术的发展,并行处理技术的发展,高速总线的发展,使得大数据量实时处理、大数据量复杂运算的实时处理都变为可能,满足应用中的各种需要。图像的采集、Bayer 滤波运算、压缩、记录等构成一个连续过程,在整个过程中需要保持高可靠性。将来可能发展到图像的大数据量无线传输、光纤传输和图像检索技术,在这些复杂的大系统硬件处理技术尤为重要。另外就是触发、采集和传输的可靠性要求,多路 I/O 的控制与处理,图像系统与上、下位机控制系统的融合。

2 现代成像技术在食品、农产品质量检测中应用研究进展

从 20 世纪 60 年代开始,可见光成像技术开始应用于食品、农产品的品质检测中。随后,一些新的成像技术也陆续得到应用,如光谱成像、X 线成像、CT 成像、超声成像、核磁共振成像等。这些技术为食品、农产品的品质检测提供了新的思路,极大的拓宽了检测范围。现简要介绍几个现代成像技术及其在食品、农产品检测的应用特点及现状。

2.1 可见光成像技术

人眼可以直接感知的电磁波波长范围大致在 400~780 nm,并在脑中形成各种颜色。其中红(R)绿(G)蓝(B)称为三原色。三原色刺激对应的感光细胞,再由大脑进行分析复合形成各种不同的颜色。可见光波段内的三原色技术成像,是最接近人类视觉成像原理的技术。只使用单 CCD 镜头可形成灰度级图像。使用 3 CCD 镜头时,通过分光设备(如滤光镜)分离出三原色,分别捕捉各自的强度,经过颜色模型的转换就可以很好地还原真实物体的色彩。常规彩色成像技术是指在人眼可以直接感知的电磁波波长范围内,通过图像摄取装置(CCD 和 CMOS)将被摄取目标转换成图像信号,传送给专用的图像处理系统。

常规彩色成像技术是目前最为成熟的现代成像技术,由于研究便利,成本较低,已占有食品、农产

品成像技术检测的大部分市场。可见光成像技术已在多种食品、农产品的品质检测和分级上应用多年。大部分图像处理和识别的基本算法都来源于常规成像技术, 并扩展至其他成像方法。可见光成像技术适合对食品、农产品形状、大小、颜色和纹理等较为显著的外部特征进行分析^[5-8]。经过几十年的发展, 现代成像技术在食品、农产品无损检测中的应用已较为成熟, 在苹果、罗望子、土豆等物料上已实现在线质量检测和分析^[9-12]。

但是, 可见光成像技术除了对某些具有一定透光性的农产品能进行内在品质检测外, 对大部分农产品的内在品质检验无能为力。鉴于其局限性, 几种可实现内部品质特征检测的成像技术也逐步被引入食品、农产品品质的检测和分级中。

2.2 光谱成像技术

光谱成像(spectral imaging)技术是采用多个光谱通道, 利用目标对象的分光反射(吸收)率在不同波段域内敏感度不同这一特性, 对其进行图像采集、显示、处理和分析解释的技术。使用特定光源或滤光设备, 选择合适的光源波长范围, 特别是可见光以外的波长, 便可增强目标对象的不同特征部位的图像特征, 从而有利于目标对象的品质检测。

光谱成像技术集图像分析和光谱分析于一身, 在食品、农产品质量与安全检测方面具有独特的优势。光谱图像是一个三维数据块, 指在特定光谱范围内, 利用分光系统同时获得一系列连续波长下的二维图像所组成, 在每个特定波长下, 光谱数据都能提供一个二维图像信息, 而同一像素在不同波长下的灰度又提供了光谱信息, 其中, 图像信息能表征大小、形状和颜色等外观特征, 光谱信息能反映内部结构、成分含量等特征信息。由此可见, 光谱成像技术能对食品、农产品的内外品质特征进行可视化分析。

随着科学技术的发展, 成像光谱分辨率的精度越来越高, 根据光谱分辨率的不同将光谱图像分为多光谱图像、高光谱图像和超光谱图像。一般认为, 光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ 数量级范围内的图像称为多光谱(multi-spectral)图像, 光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 数量级范围内的图像称为高光谱(hyper-spectra)图像, 光谱分辨率在 $10^{-3}\lambda$ 数量级范围内的图像称为超光谱(ultra-spectral)图像。可根据检测的精度和要求不同, 选用不同分辨率的光谱成像技术。通常情况下, 针对

食品、农产品质量与安全的检测, 一般选用高光谱成像技术。

高光谱技术来自于遥感技术应用的扩展, 21 世纪初才逐步在食品、农产品无损检测方面得到应用^[13]。Mehl 等^[14]采用高光谱及多光谱技术检测 3 种产地种植苹果的微损失, 最高检测率可到 95%。Cheng 等^[15]采用高光谱技术结合主成分分析方法检测冻伤的黄瓜; Zhao 等^[16]采用高光谱技术结合模式识别方法对茶叶进行分级, 取得较好的结果。高光谱成像技术也在苹果微损伤^[17], 柑橘腐烂^[18]和油菜籽品种鉴别^[19]等方面得到应用。近些年来, 高光谱成像技术在食品、农产品的应用方面也由外部特征走向内部特征, 由宏观走向微观, 在鲜肉等易腐败食品的微生物检测上已显示出其独特的优势^[20-24]。

近年来, 光谱成像技术在食品、农产品品质检测方面得到越来越多的应用, 尤其在食品、农产品内部组织、内部结构及表面细微特征检测方面的优势得到了更多的关注和认可。

2.3 X 线线性扫描成像技术

X 线和可见光一样属于电磁辐射, 但其波长比可见光短得多, 介于紫外线与 γ 射线之间。X 线的频率大约是可见光的 10^3 倍, 其光子能量比可见光的光子能量大得多, 表现出明显的粒子性。由于 X 线波长短、光子能量大的特性, 所以 X 线有很强的穿透性。X 线和其它电磁波一样, 能产生反射、折射、散射、干涉、衍射、偏振和吸收等现象。X 线穿透物质时都被部分吸收, 其强度将被衰减变弱, 吸收的程度与物质的组成、密度和厚度有关。由于样品对 X 线的吸收率或透射率取决于样品所包含材料的成分与比率, 而不同的样品材料对 X 线具有不同的不透明系数, 所以形成的灰度图像显示了被检测物体密度或材料厚度的差异。

不同的物质对 X 线的吸收能力不同, 通过 X 线性扫描(X-ray line scan)成像技术, 可以检测可见光不易得知的对象内部信息, 在对农产品内部品质进行检测上有独特的优势。通常, X 线的波长范围为 0.1~100.0 nm, 其中, 波长小于 1 nm 的电磁波称为硬 X 线, 波长大于 1 nm 则称为软 X 线。一般硬 X 线能量大, 穿透能力强, 软 X 线能量较小, 较容易被物体吸收穿透能力相对较弱。由于软 X 线可被物体强烈吸收, 能更多的表现内部细节信息, 且辐射能力

相对较弱,对受测物体安全隐患较小。因而,软X线性扫描成像技术更多的应用在食品、农产品内部品质的检测中,如检测奶酪的气泡眼^[25]、农产品的内部质量缺陷(水心、褐变、擦伤、腐烂、虫害)^[26],判断小麦籽粒内部是否发生害虫感染^[27]、识别禽畜及水产品的内部异物^[28,29]等。但由于X线扫描成像技术只能把物体内部形态投影在二维平面上,会引起成像的前后重叠,造成判断困难,在应用上有一定的局限。同时,X线对人体的辐射安全问题尚存在一定争议,在食品、农产品领域的应用中遇到一定阻力。

2.4 CT 成像技术

计算机断层扫描成像技术(computerized tomography scanner),通常简称CT,是为了克服X线性扫描成像投影重叠的问题而引进的新型成像技术。基于射线和物质的相互作用原理,首先通过围绕物体并且进行扫描,得到的大量射线吸收数据,再通过投影重建的方法得到被检测物体的断面数字图像。与常规的X线性扫描成像技术相比,CT成像技术可以表现物体内部某个剖面的形态特征,具有更高的灵敏度和分辨率,通常情况下,CT的密度分辨率比常规的X线性扫描成像技术高20倍。CT成像技术得到的横断面图像层厚准确、图像清晰,还可以通过计算机软件的处理重建,获得诊断所需的多方位(如冠状面、矢状面)的断面图像,且可通过数字化处理进行受测物体的三维重构。因此,在分析食品、农产品的内部细微特征上,具有其它技术难以替代的优点。CT图像分析技术在水产品、畜禽产品和果蔬等农产品检测中都有应用研究。

Lammertyn等^[30]采用CT成像技术无损检测分析随着储藏时间延长梨内部核的病变过程,Aleš Mohorič等^[31]采用微型CT分析谷物在蒸煮过程中的多孔变化,张京平等^[32]采用CT成像技术检测水果的内部可溶性固形物含量,为测量果蔬含水率的分布提供一条新的思路。由于设备庞大,移动不便,使用成本较高,在农产品品质检测中尚未普及。

2.5 核磁共振成像技术

核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)的原理利用生物体中的氢原子核在外加的磁场内受到射频脉冲的激发,产生核磁共振现象,经过空间编码技术,用探测器检测并接收以电磁形式放出的核磁共振信号,输入计算机,经过数据处理转换,

最后形成图像^[33]。在核磁共振成像片上,含水成分大的组织结构亮度高,而含水成分少的组织则亮度较低。核磁共振影像比CT图像有更精确的影像结果。利用核磁共振扫描成像,可以不借外力破坏而了解农产品的内部信息。

近年来,核磁共振成像技术监测柿子、柑橘、棕榈水果的成熟度、组织结构和水分等有较多的研究。Clark等^[34]利用核磁共振成像技术定性监测柿子的成熟度。Miquel等^[35]利用核磁共振成像技术分析巧克力和脂肪填料中的总质子密度 M_0 和横向弛豫时间 T_2 的差异,以无损追踪商业巧克力糖果中的脂质迁移。Lucas等^[36]采用核磁共振成像技术监测生面团在不同环境条件下的冷冻速率和均匀性,为生面团的品质控制提供支持。Otero等^[37]利用核磁共振成像技术监测由低压储藏引起的草莓破损情况。Haihsi等^[38]利用核磁共振成像装置监测苹果中被飞蛾虫蛀情况,研究表明,该方法可成功应用于完好和虫蛀苹果的识别。与普通的相机相比,核磁共振成像技术有诸多优势,例如图像的对比度强,特别是利用三维图像对样品进行脂肪和三维分析时,该技术的优势更为明显。此外,核磁共振成像技术在化学成分的分析 and 水分检测方面,同样具有优势^[39]。

目前常用的核磁共振技术是指氢原子核共振,除H原子核共振外,氮、碳、氧等各原子的核磁共振技术都在研发之中,有希望应用于生产实践。核磁共振成像技术具有任意方向直接切层的能力,对人体无辐射危害,应用潜力巨大,但目前设备成本过高,限制了其广泛使用。

2.6 超声成像技术

超声成像(ultrasonic imaging)技术是将超声探测技术应用于受测物体,对物体组织进行测试的图像诊断技术。超声具有频率高、波长短、能量集中、方向性好、穿透能力强、安全无创等优点,在临床图像诊断中得到广泛应用。超声波成像诊断是在医学上应用比较成熟的一项技术,从20世纪90年代以后逐步在农畜产品检测上有所应用。超声波对软组织的鉴别力较高,在畜产品的脂肪含量等检测中得到一定的应用。Hashimoto等^[40]采用超声成像技术模拟口腔器官的咀嚼过程,尤其是舌头在咀嚼中的运动过程,以期得到一套基于超声成像技术的食品感官品质检测方法,辅助人工评价。Zhao等^[41]采用接触式的超

声检测剔除食品中的异物。对于利用超声技术进行食品品质中的检测来说,比较困难的是超声和检测对象之间需要介质。近年来,超声技术必须借助介质与检测对象接触的瓶颈得到突破。Harron等^[42]采用一种新型的空气耦合的超声系统检测牛肉的质量,取得较好的结果。Pallav等^[43]用空气耦合的超声系统检测食品中的添加剂和异物,该方法可用于工厂中,样品的非接触在线检测。

超声波是非电离辐射,不属电磁波,在检测使用功率范围内对受测物质无损害隐患,因此,在食品、农产品的内部组织应用研究上有较大的潜力。现代成像技术是物理学、电子技术、计算机技术、材料科学和精细化工等多种高新技术相互渗透的产物。今后,随着各项基础研究及高新技术的突破性进展,现代成像技术在食品领域将有更多的应用,更多新的成像技术将逐步引入食品、农产品的检测中,并进一步显示其在食品领域检测的重要地位。

2.7 其他成像技术

随着现代成像技术的内涵和外延不断的延伸,其在食品、农产品领域的应用也在不断的扩展和更新。电子断层成像技术、太赫兹成像技术、激光成像技术、时间序列成像技术等新的现代成像技术也开始尝试性的应用于食品、农产品领域的检测^[44]。

此外,随着各个行业科技水平的不断进步,物体的成像概念和方式也在不断的更新。新的现代成像技术不仅仅可实现对可见物质的成像,还涉及对非可见物质的成像。如嗅觉可视化技术即为对非可见物质——气体成像的一种新技术,嗅觉可视化技术利用气敏化合物(金属卟啉和原卟啉)与受测物的挥发性气体进行显色反应,通过气敏化合物的显色状况,判断气体的浓度,从而判断受测物质的质量^[46-47]。嗅觉可视化技术开始应用在食醋、黄酒、茶叶等一些挥发性较强食品中^[48]。

3 现代成像新技术在食品、农产品检测中未来发展趋势

随着新材料、电子技术、计算机技术等高新技术的持续发展,现代成像技术也在不断更新,新的成像技术也不断涌现。同时,伴随着材料科学和精细化工等技术的发展,现代成像技术的成本正逐渐降低,并逐步渗透到各个领域。在食品、农产品领域,随着

人民的饮食消费观念也由数量型转向质量型,对食品卫生质量标准提出更高的要求,对食品、农产品的检测要更精细化和精准化。近年来,现代成像技术在食品农产品品质分析中也显出明显的新的发展趋势。

3.1 现代成像技术与其它技术融合应用于食品、农产品的检测

反映农产品品质的指标是多方面的,既包括色泽、形状、损伤、虫害等外部可视化品质指标,又包括味道、香气、成分等非可视化指标。现代成像技术往往只能描述其中的一个或几个方面,不能全面地描述一个对象。在获取信息的过程中,侧重点不同带来的局限性必然影响到检测结果的精度和稳定性。受人体感官功能的启发,现代成像技术也逐步与其它现代检测技术相结合,以全面评判食品、农产品的综合品质。

多传感信息融合技术可提高食品、农产品检测的全面性、可靠性和灵敏度。在现代多传感器融合中,在硬件层面上,如何将现代成像技术与其它传感器技术实现融合,在软件层面上,如何把多种传感信息资源,在尽可能保持原始信息不丢失情况下实现多信息统一降维、融合和综合简化,是现代传感器技术的研究趋势^[50-54]。

3.2 快速、微型专用食品、农产品品质检测成像设备的研制

目前,应用于食品领域的大部分成像技术都是从其他领域(如医学、测绘、生物学)移植过来,专用于食品、农产品检测的现代成像设备还很少。其他领域的现代成像技术为食品、农产品的检测提供新的思路,但由于研究对象的性质发生了较大差异,相关的处理方法和硬件设备都要求进行磨合和改造。根据现代成像新技术所提供的思路,结合自身的特点,研制专用于食品、农产品的成像设备,是目前的发展趋势。

由于食品、农产品数量繁多,价格相对低廉。为了降低检测成本,对成像设备的检测速度提出更高的要求。可实时、在线、快速的检测食品、农产品的现代成像设备的研制是目前研究的热点。同时,伴随着微电子技术的发展,也为了满足用户便利化的使用需求,食品、农产品的现代成像设备也逐步由大型化到小型化甚至微型化的过渡。因此,研制便携的,适用于农田果蔬生长过程中的品质检测小型或微型

成像设备,是目前的发展趋势。

参考文献

- [1] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
Gonzalez. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010.
- [2] 赵杰文, 孙永海. 现代食品检测技术(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
Zhao JW, Sun YH. Modern detection techniques for food (Second Edition) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008.
- [3] 赵杰文, 林颢. 食品、农产品检测中数据处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Zhao JW, Lin H. Data processing and analysis for the detection of food and agricultural products [M]. Beijing: Science Press, 2012
- [4] Kenneth RC. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
Kenneth RC. Digital Image Processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1998
- [5] Zou XB, Zhao JW, Li YX, *et al.* In-line detection of apple defects using three color cameras system[J]. *Comput Electron Agr*, 2010, 70(1): 129–134.
- [6] Zou XB, Zhao JW, Li YX. Apple color grading based on organization feature parameters[J]. *Pattern Recogn Lett*, 2007, 28 (15): 2046–2053.
- [7] 赵杰文, 刘文斌, 邹小波. 基于三摄像系统的苹果缺陷快速识别[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 287–290.
Zhao JW, Liu WB, Zou XB. Fast identification of apple defect based on three imaging system [J]. *J Jiangsu Univ (Natural Science Edition)*, 2006, 27(4): 287–290.
- [8] 蔡健荣, 许月明. 基于主动形状模型的苹果果形分级研究[J]. 2006, 22(6): 123–126.
Cai JR, Xu YM. Identification and classification of apple shape based on active shape models[J]. *Trans CSAE*, 2006, 22(6): 123–126.
- [9] Leemans V, Destain MF. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects[J]. *J Food Eng*, 2004, 61(1): 83–89.
- [10] Jarimopas B, Jaisin N. An experimental machine vision system for sorting sweet tamarind[J]. *J Food Eng*, 2008, 89(3): 291–297.
- [11] Razmjoooy N, Mousavi BS, Soleymani F. A real-time mathematical computer method for potato inspection using machine vision[J]. *Comput Math Appl*, 2012, 63(1): 268–279.
- [12] Al-Mallahi A, Kataoka T, Okamoto H, *et al.* Detection of potato tubers using an ultraviolet imaging-based machine vision system[J]. *Biosyst Eng*, 2010, 105(2): 257–265.
- [13] Goetz AF, Vane G, Solomon TE, *et al.* Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. *Science*, 1985, 228: 1147–1153.
- [14] Mehl P, Chao K, Kim M, *et al.* Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis[J]. *Appl Eng Agric*, 2002, 18: 219–226.
- [15] 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. *Transac[J]. ASAE*, 2004, 47(4): 1313–1320.
- [16] Zhao JW, Chen QS, Cai JR, *et al.* Automated tea quality classification by hyperspectral imaging[J]. *Appl Opt*, 2009, 48: 3557–3564.
- [17] 彭彦昆, 李永玉, 赵娟, 等. 基于高光谱技术苹果硬度快速无损检测方法的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(6): 667–671.
Peng YK, LI YY, Zhao J, *et al.* Establishment of rapid and non-destructive detection method of apple firmness using hyperspectral images[J]. *J Food Safe Qual*, 2012, 3(6): 667–671.
- [18] 李江波, 王福杰, 应义斌, 等. 高光谱荧光成像技术在识别早期腐烂脐橙中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 142–146.
Li JB, Wang FJ, Ying YB, *et al.* Application of Hyperspectral Fluorescence Image Technology in Detection of Early Rotten Oranges[J]. *Spectrosc Spectr Anal*, 2012, 32(1): 142–146.
- [19] 邹伟, 方慧, 刘飞, 等. 基于高光谱图像技术的油菜籽品种鉴别方法研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(2): 175–180.
Zou W, Fang H, Zhou KY, *et al.* Identification of rapeseed varieties based on hyperspectral imagery [J]. *J Zhejiang Univ (Agric & Life Sci)*, 2011, 37(2): 175–180.
- [20] Huang L, Zhao JW, Chen QS, *et al.* Rapid detection of total viable count (TVC) in pork meat by hyperspectral imaging[J]. *Food Res Int*, 2013, 54: 821–828.
- [21] Barbin DF, ElMasry G, Sun DW, *et al.* Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging[J]. *Inno Food Sci Emerging Technol*, 2013, 17: 180–191.
- [22] Peng YK, Zhang J, Wang W, *et al.* Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles[J]. *J Food Eng*, 2011, 102(2): 163–169.
- [23] Shi JY, Zou XB, Zhao JW, *et al.* Nondestructive diagnostics of

- nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based on near infrared hyperspectral imaging[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 138: 190–197
- [24] Zou XB, Shi JY, Hao LM. In vivo noninvasive detection of chlorophyll distribution in cucumber (*Cucumis sativus*) leaves by indices based on hyperspectral imaging[J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 706(1): 105–112
- [25] Kraggerud H, Wold J, Hoy M, *et al.* X-ray images for the control of eye formation in cheese[J]. *Int J Dairy Technol*, 2009, 62: 147–153.
- [26] 吕强, 蔡健荣, 赵杰文, 等. 基于 X 线成像技术的板栗内部品质检测[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(2): 124–128.
Lv Q, Cai JR, Zhao JW, *et al.* Detection of chestnuts internal-quality based on X-ray imaging[J]. *J Jiangsu Univ (Natural Sci Edition)*, 2009, 30(2): 124–128.
- [27] Narvankar DS, Singh CB, Jayas DS, *et al.* Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat[J]. *Bio-syst Eng*, 2009, 103: 49–56.
- [28] Tao Y, Chen Z, Jing H, *et al.* Internal inspection of deboned poultry using X-ray imaging and adaptive thresholding[J]. *Trans ASAE*, 2001, 44: 1005–1010.
- [29] Mery D, Lillo I, Loebel H, *et al.* Automated fish bone detection using X-ray imaging[J]. *J Food Eng*, 2011, 105 (3): 485–492.
- [30] Lammertyn J, Dresselaers T, Van Hecke P, *et al.* Analysis of the time course of core breakdown in ‘Conference’ pears by means of MRI and X-ray CT[J]. *Postharvest Biol Technol*, 2003, 29: 19–28.
- [31] Aleš M, Frank V, Edo G, *et al.* The effect of rice kernel microstructure on cooking behavior: A combined μ -CT and MRI study[J]. *Food Chem*, 2009, 115: 1491–1499.
- [32] 张京平, 彭争, 汪剑. 苹果水分与 CT 值相关性的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 180–182.
Zhang JP, Peng Zh, Wang J. Correlation between moisture of apples and values of CT [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 180–182.
- [33] Galed G, Fernández-Valle ME, Martine A, *et al.* Application of MRI to monitor the process of ripening and decay in citrus treated with chitosan solutions[J]. *Magn Reson Imaging*, 2004, 22: 127–137.
- [34] Clark CJ, MacFall JS. Quantitative magnetic resonance imaging of ‘Fuyu’ persimmon fruit during development and ripening[J]. *Magn Reson Imaging*, 2003, 21: 679–685.
- [35] Miquel ME, Cali S, Couzens PL, *et al.* Kinetics of the migration of lipids in composite chocolate measured by magnetic resonance imaging[J]. *Food Resv Int*, 2001, 34 (9): 773–781.
- [36] Lucas T, Grenier A, Quellec S, *et al.* MRI quantification of ice gradients in dough during freezing or thawing processes[J]. *J Food Eng*, 2005, 71: 98–108.
- [37] Otero L, Préstamo G. Effects of pressure processing on strawberry studied by nuclear magnetic resonance[J]. *Innovative Food Sci Emerg Technol*, 2009, 10: 434–440.
- [38] Haishi T, Koizumi H, Arai T, *et al.* Rapid detection of infestation of apple fruits by the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura, larvae using a 0.2-T dedicated magnetic resonance imaging apparatus[J]. *Appl Magn Reson*, 2011, 41: 1–18.
- [39] Chen QS, Zhang CJ, Zhao JW, *et al.* Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety[J]. *Trens Anal Chem*, 2013, 52 : 261–274.
- [40] Hashimoto K, Shinoda K. Development of X-ray TV M-mode and reconstructed ultrasound M-mode methods for investigating tongue movement during swallowing in humans[J]. *J Oral Sci*, 1999, 41: 1–4.
- [41] Zhao B, Basir OA, Mittal GS. Detection of metal, glass and plastic pieces in bottled beverages using ultrasound[J]. *Food Res Int*, 2003, 36: 513–521.
- [42] Harron WD, Dony R. Predicting quality measures in beef cattle using ultrasound imaging[J]. *Comput Intell Image Process*, 2009: 96–103.
- [43] Pallav P, Hutchins DA, Gan TH. Air-coupled ultrasonic evaluation of food materials[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49: 244–253.
- [44] Kim SM, Hatami F, Kurian AW, *et al.* Imaging with a Terahertz Quantum Cascade Laser for Biomedical Applications[J]. *Proc SPIE*, 2006, 60(10): 1–9.
- [45] Xie LJ, Yao Y, Ying YB. The Application of Terahertz Spectroscopy to Protein Detection: A Review[J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2014, 49(6): 448–461
- [46] 赵杰文, 陈全胜, 林颢. 现代成像技术及其在食品、农产品检测中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Zhao JW, Chen QS, Lin H. Modern imaging technology and the application in quality inspection for agricultural products [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [47] Suslick KS, Rakow NA, Sen A. Colorimetric sensor arrays for molecular recognition[J]. *Tetrahedron*, 2004, 60: 11133–11138.
- [48] Neal AR, Kenneth SS. A colorimetric sensor array for odour visualization[J]. *Nature*, 2000, 406: 710.
- [49] Chen QS, Liu AP, Zhao JW, *et al.* Monitoring vinegar acetic fermentation using a colorimetric sensor array[J]. *Sens Actuators B*, 2013, 183: 608.

- [50] Richard T. Principles of effective multisensor data fusion[J]. *Mil Technol*, 2003, 27(5): 29–37. 24(3): 5–10.
- [51] Gao JB, Harris CJ. Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion[J]. *Informat Fusion*, 2002, 3 (3): 191–201.
- [52] Durrant-Whyte HF. Sensor models and multi 2 sensor integration[J]. *Int J Robot Res*, 2001, 7(6): 87–92.
- [53] Megalooikonomou V, Yesha Y. Space efficient quantization for distributed estimation by a multisensor fusion system[J]. *Inform Fusion*, 2004, 5(5): 299–308.
- [54] 陈全胜, 赵杰文, 蔡健荣, 等. 基于近红外光谱和机器视觉的多信息融合技术评判茶叶品质[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 5–10.
Chen QS, Zhao JW, Cai JR, *et al*. Inspection of tea quality by using multi-sensor information fusion based on NIR spectroscopy and machine vision [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008,

(责任编辑: 邓伟)

作者简介



孙力, 讲师, 主要研究方向为食品、农产品无损检测研究。
E-mail: sunli19861115@126.com



蔡健荣, 教授, 主要研究方向为农产品无损检测及收获机器人的研究。
E-mail: jrcai@ujs.edu.cn