

面向食品加工过程智能化的计算机视觉技术进展

张 淳, 秦世引

北京航空航天大学模式识别与智能系统实验室, 北京 100191

摘要 近年来, 面向食品加工过程的计算机视觉技术以其检测速度快、非接触、高精度等优势成为食品加工领域向自动化和智能化方向发展的重要因素和技术关键, 且在理论研究和工程应用方面都取得了长足的发展。本文介绍了面向食品加工过程的计算机视觉技术在过程监控、质量检测、食品安全等工程领域的应用情况; 阐释了计算机视觉技术与智能优化控制、网络化多机器人系统协作技术在食品加工过程智能化发展进程中的重要作用; 最后展望了面向食品加工过程的计算机视觉技术的发展。

关键词 计算机视觉; 食品加工; 智能化; 网络化; 多机器人

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0112-06

Computer Vision Technology for Intelligent Automation of Food Processing

ZHANG Chun, QIN Shiyin

Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Systems, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Computer vision technology plays an important role and becomes one of key technologies in the intelligent automation of food processing because of its outstanding advantages, such as its high speed of detection, contactless nature, and high precision. In recent years, both theoretical methods and practical technologies in the field of computer vision have been developed rapidly. In this paper, the research achievements and successful applications of computer vision technologies in food industry are reviewed, including some key topics, such as process monitoring, quality supervision and food safety. Moreover, the authors elucidate the significance of computer vision technologies in the intelligent optimizing controls and the cooperation and coordination of networked multi-robot food processing systems for the intelligent automation of food industry. Finally, the prospect and development trends of computer vision technologies for food processing are discussed.

Keywords computer vision; food processing; intelligence; network; multi-robot

0 引言

作为计算机科学重要的研究领域之一, 计算机视觉技术始于 20 世纪 50 年代, 在 80 年代中期进入快速发展期, 并以其高精度、非接触、高灵活性等优点首先在制造业中得到应用^[1]。随着计算机硬件系统的不断提升和成本的下降, 新型图像采集设备的发展和运用, 以及视觉处理算法的不断研究, 计算机视觉技术在食品加工领域获得了良好的应用效果, 并在过去 10 余年中取得了长足进展^[2]。虽然中国是农产品生产

大国, 水果产量、蔬菜出口量均居世界第一, 但中国食品工业仍以初加工产品居多, 精深加工产品较少; 商品化比例较低, 目前中国加工食品占消费食品的比重仅为 30%, 远低于发达国家 60%~80% 的比重。从物流角度看, 产品的后处理、精加工等环节的利润远高于生产环节, 而中国高附加值产品生产所依托的食品工业整体技术和装备相对落后, 关键技术自主创新率低^[3], 这是中国食品工业长期处于产业链不利位置的重要原因之一。

收稿日期: 2010-05-19

基金项目: 国际科技合作项目(2007DFA11530); 国家自然科学基金项目(60875072)

作者简介: 张淳, 博士研究生, 研究方向为多机器人协同优化控制、计算机视觉技术等, 电子信箱: zhangchun@asee.buaa.edu.cn; 秦世引(通信作者), 教授, 研究方向为模式识别与人工智能、智能控制理论及其运用、复杂系统与复杂性科学等, 电子信箱: qsy@buaa.edu.cn

所以,研究和总结面向食品加工的计算机视觉技术不仅是信息科学领域的理论研究重点、热点,亦具有广泛的实际工程需求背景,对中国食品工业的发展振兴具有重要意义。本文对现有的面向食品加工过程的图像处理算法和工程应用进行阐述分析,并进一步指出,与智能化控制、网络化多机器人协调协作研究相结合将是食品加工领域计算机视觉技术未来的一个重要发展方向。

1 食品加工过程智能化的特点和需求

智能化技术的引入,是食品加工领域继自动化机械取代人工操作后的又一大进步,其已引起众多食品加工企业和研究机构的高度关注。智能化技术可以在自动化技术的基础上融合计算机技术和人工智慧经验,使自动化设备不但高效、准确,同时“聪明”,能够与人工操作同样具有优秀的柔性和容错能力。

1.1 智能化食品加工系统的基本组成与特点

一套基于视觉系统的智能化食品加工系统一般包括照明设备、图像采集设备、计算机硬件、软件系统、执行机构及其控制系统等部分^[4]。Muhammedali 等^[5]构建的肉饼识别处理系统、Jin 等^[6]建立的胡桃果壳分离系统均为典型的基于视觉系统的智能化食品加工系统。

1.2 计算机视觉技术的关键性作用

目前,传统的农业生产正在逐渐与工业技术融合,使食品加工工业得到深入研究和推广普及。视觉信息具有直观、形象的优点,其信息量大,具有较强的环境适应能力。计算机视觉技术拥有对光谱的敏感范围广、测量精度高、动态响应特性好、视觉信号易于输入计算机处理等优势^[7],并通过一次采集可同时完成多种技术指标的检测,更为算法的开发提供较大的空间,为软件的编制带来灵活性。基于计算机视觉信息的食品加工系统在实际工程中得到了广泛应用,不但提高效率,而且减少了人力消耗及其对产品所造成的质量影响。在食品加工系统中,计算机视觉部分作为信息源之一往往成为系统的重点。视觉设备的质量和视觉算法的优劣直接影响系统运行的效果、速度和稳定性。

2 面向食品加工的计算机视觉技术研究进展

计算机视觉信息处理过程通常可分为两个阶段。第一阶段为图像处理过程,针对图像采集设备所得到的二维图像信息,首先进行图像校正,随后在图像噪声分析的基础上对图像去噪,最后根据任务需求完成图像分割。第二阶段在特征空间内完成计算,即感知计算过程。第一步为特征提取,即从图像中提取有效的特征;第二步为模式识别,即将提取的特征进行处理分析,进而对特征辨识解释;第三步为目标判读,即综合特征的分析结果,对待分析的目标给出视觉感知结果;最后,参考上述处理所得到的结果,执行机构按照给定的操作设置对相应目标进行处理,全过程如图 1 所示。

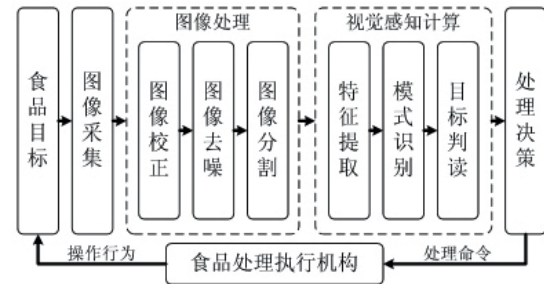


图 1 食品加工过程中的图像处理与感知计算

Fig. 1 Image processing and aware computing for food handling process

2.1 图像采集

二维图像采集过程是外界目标所发出(反射)的光线经过相机透镜组折射,在相机内部 CCD(或 CMOS)感光元件上形成实像,并利用感光元件将光信号转换成电信号输出的过程。该过程实现了世界坐标系下三维目标向摄像机坐标系下二维平面的映射。

图像采集设备与照明设备紧密配合。照明设备的质量很大程度上决定了图像采集的效果。使用不同的照明设备会使图像特征发生改变,进而影响图像处理的算法和效果。优秀的照明设备应具有如下作用:①减少图像阴影、反射;②降低图像噪声;③增强图像特征;④节约图像处理时间等^[8]。目前常用的照明设备包括荧光灯、发光二极管(LED)、激光发射器、X 射线管、红外发光管等。不同的照明设备配以对应的图像采集设备,以完成给定波段的信息采集。

2.2 图像处理

首先对由采集设备所得到的进行图像校正处理,即按已知的相机畸变模型对原始图像上存在的各种畸变进行校正。畸变主要包括径向畸变、切向畸变、薄棱镜畸变等,其特点为距离图像中心越远处越显著。一般认为,径向畸变由透镜组曲率误差引起^[9],造成图像中心与边缘的放大率不同,从而产生桶形失真或枕形失真;切向畸变和薄棱镜畸变由透镜组的制作装配误差产生。当对图像测量精度要求较高时,需要考虑对其进行畸变校正。常用的校正方法为通过相机拍摄靶标获取一系列控制点,将理想点坐标与实际点坐标进行对比,利用样条插值^[10]等方法实现图像校正。

相机在信号转换、量化、传输过程中均会产生噪声,尤其在拍摄环境较暗的情况下,噪声更为明显^[11]。另外,外界光照不理想、感光元件上的坏点等因素也会降低图像质量。对图像进行去噪操作有助于减小噪声对后续处理的影响,提高后续处理精度。目前常用的图像去噪算法包括均值滤波、中值滤波、高斯平滑滤波、形态学滤波、维纳滤波等。另外,近年小波去噪算法发展非常迅速^[12],通过小波分解,可将图像中的噪声和信号部分在不同尺度表现,从而较好地保留图像中的低频平滑区域和高频边缘信息,同时消除高频噪声。近年来基于偏微分方程的去噪算法^[13]和基于脉冲耦合神经网络(Pulse Cou-

pled Neural Network, PCNN)的去噪算法^[14]等也在理论和实践中取得了长足的发展。

图像分割旨在将图像中特性相似的区域相区分,在食品加工领域通常指从图像中提取感兴趣区域,将其与背景区域分开的过程。图像分割的结果取决于特性的界定,如以灰度图像的像素灰度直方图作为分割依据,常选择适当的灰度阈值将图像中的每个像素分为“前景”和“背景”。最常用的灰度分割方法有大津阈值法及其各种改进算法等。对于彩色和多光谱图像,可将颜色或光谱信息加入作为图像分割的参考依据,以增加分割的准确率。其他分割依据包括边缘信息、纹理信息等。对于序列图像,可采用混合高斯背景模型(Gaussian Mixture Models, GMM)建模的方法进行目标分割,该方法可以融合背景在时间、空间上的分布信息,获得更为鲁棒的背景模型^[15]。

2.3 视觉感知计算

视觉感知计算过程不再面向图像的灰度或颜色信息,而是在特征空间中进行处理。对图像中目标区域进行特征提取是目标识别的基础,特征选择的优劣直接影响识别精度,常用的图像特征信息包括颜色特征、纹理特征和形状特征等^[16]。

模式识别是对目标辨认、分类、解释的过程。模式识别的研究主要包括3个分支:建立在经典决策理论上的统计模式识别、基于形式语言理论的结构(句法)模式识别和以模糊数学理论为基础的模糊模式识别^[17]。分类器的构建是决定识别精度的关键因素,常用的分类器包括 Bayes 分类器、神经网络分类器、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、Adaboost 等。

在模式识别的基础上按照给定或学习的策略可对目标进行判读,并根据实际生产加工要求及执行机构的行为模式和运行状态对判读目标进行处理决策,决策所得到的处理指令通过专用线缆或网络发送至执行机构,由执行机构对目标进行一定的操作,完成对目标的处理。

2.4 基于视觉感知分析的加工过程监控

随着现代化加工工具在食品加工过程中应用的逐步普及,水果、蔬菜、牛肉、家禽等食品正逐步由人工分拣加工升级为自动化流水线作业。在食品加工系统的信息采集部分中,通常视觉传感器是不可或缺的,通过视觉采集和处理,系统可对加工过程中的产品进行监控,对其质量进行监测,从而保障产品的质量和一致性。

在肉禽类产品监控方面,Heck^[18]介绍了一套用于切割鸡胸肉的处理系统,该系统首先利用视觉信息得到切割目标,然后确定最优化切割方案,最后通过高压水枪完成切割。Marino^[19]开发了一种用于罐头生产线末端质量监控的视觉处理算法,针对鱼罐头外形建立模型,并在线对产品图像进行处理,得到每个产品质量信息,最后通过模糊规则判断是否接受该产品。Du 等^[20]介绍了基于红外图像处理的肉鸡产品皮肤瘤的监测方法,通过自动选取最佳波段以得到最明显的皮肤瘤特征,然后通过 SVM 分类器实现样品的检测。

在水果产品监控方面,Vijayarekha 等^[21]开发了一套苹果

表皮擦伤检测系统,利用苹果表皮多光谱信息准确地检测定位擦伤区域。Qin 等^[22]开发了一套红外检测系统,对 450-930nm 波段图像进行分析,并利用光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID)方法有效检测柑橘表面的溃烂部分,其检测精度高,并能够区分溃烂与黑变病、结疤、污点、虫蛀等其他问题。

2.5 基于模式识别的产品质量检测与分级

产品分级是计算机视觉技术在食品加工工程中又一重要应用,建立食品分级系统,可以有效地引导市场消费,规范食品生产与流通,形成优质优价体系^[23],增强中国产品在国际市场的竞争力,从而保障和促进中国食品工业健康快速发展。

目前在该领域研究与应用较为深入和广泛的包括果蔬产品检测和牛肉质量分级等。面向水果的检测分级研究,如 Blasco 等^[24]研制的石榴处理系统可将分解后的石榴果肉部分和果皮、内膜等无用部分识别并分离,进而利用图像彩色信息对果肉进行分级,该系统处理速度最高可达 75kg/h; Lee 等^[25]介绍的果品分拣系统视觉部分采用近红外传感器,以果品大小、表皮缺陷为分级标准,实现果品的工业级分拣。针对蔬菜的检测分级研究,如 Tu 等^[26]提出了一种椰菜(Broccoli)分级算法,该方法以椰菜的色泽、形状等信息为特征,利用神经网络算法实现分级; Chong 等^[27]介绍了其所开发的茄子分级系统,其传感器部分用 6 个摄像机从不同角度对传送带上的茄子进行拍摄,并以茄子的长度、直径、体积、弯曲度、色泽、花萼颜色、花萼范围和表面缺陷作为分级特征,其速度可达 0.3s/个。

牛肉分级是计算机视觉技术在食品分级中的重要应用,也是牛肉生产过程中的重要环节。牛肉的分级依据主要包括大理石花纹、牛肉色泽、牛肉的生理成熟度及牛肉的脂肪色等^[28]。Chen 等^[28]通过视觉信息与电子鼻采集信息相结合的方法对牛肉进行检测,并利用判别函数分析(Discriminant Function Analysis, DFA)算法对数据进行分析,从而得到牛肉分级结果。李志^[29]采用多元回归分析、径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络、简易区间法等建立颜色等级判别模型,并使用最优模型对牛肉眼肌切面肌肉、脂肪颜色进行评定,建立了基于彩色视觉传感器的牛胴体眼肌切面自动检测分级系统。

2.6 面向食品安全的异物检测技术

中国消费者食品安全意识快速提高迫切要求食品生产厂商具有更加专业完善的食品质量安全检验体系。食品的污染危害包括物理、化学和微生物 3 个方面,其中物理危害包括食品中隐藏的金属、毛发、沙石等;化学危害包括生存环境污染、农兽药残留、生产过程中添加剂超标等;微生物危害包括沙门氏菌、大肠杆菌等^[30]。基于计算机视觉技术的食品质量检测方法包括可见光检测、X 射线检测、X 射线荧光检测等。

可见光检测方法主要面向透明产品,特别是瓶装液态产品的质量检验^[31],该技术目前广泛应用于饮料、酒类及医药产品的质量检验过程。Lu 等^[32]设计了一套基于计算机视觉的玻璃

瓶装注射液质量在线检测系统,可以通过移动目标的探测和识别快速检测出掺杂于液体中的异物。朱惠峰等^[33]介绍了其开发的异型瓶装溶液杂质检测系统,并阐述了系统原理和硬件构成;Zhang 等^[34]提出一种用于啤酒瓶瓶口部位破损检测的图像处理算法,并以其检测速度快、精度高的优点达到了生产线检测的要求。另外,可见光图像分析方法在鸡蛋检测中也得以应用,Wang 等^[35]通过对鸡蛋透射光图像中卵黄、气室等区域的识别分析,可以高准确率地判别该鸡蛋的新鲜程度。

X 光检测技术不但可以检测到食品包装中的石块、骨头等异物,还可以筛查漏装产品的包装袋。Kwon 等^[36]研究了干燥食品 X 射线图像,提出一种可应用于生产线的基于图像纹理特征分析的未知异物检测算法,实验表明该方法计算量小,检出率高。张道武等^[37]开发了一套应用于食品异物检测的 X 光检测设备,通过神经网络方法对异物进行识别,取得了良好的实验效果。

X 射线荧光法是通过外界 X 光辐射激发,使样品发出荧光,通过检测荧光便可以获知样品元素种类含量等信息。Vives 等^[38]通过 X 射线荧光法检测佛手瓜、莴苣、马铃薯、香蕉、大米等样品,能够得到 Cr、Cu、Zn、Pb 等元素含量,当 Cr、Pb 等元素超标时及时报警。Vives 等^[39]还对皮拉西卡巴河(Piracicaba River)中的鱼类样品通过全反射 X 射线荧光分析(Total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis, TXRF)方法进行检测,有效检测出样品中的物质,分为基本元素、微量元素、有害元素 3 类,该方法可对渔产品及其所处自然环境的污染情况进行监控。

3 食品加工过程智能自动化的发展趋势

食品是最常见的消费产品,根据联合国粮食与农业组织统计,全世界农业商品贸易总值超过 5825 亿美元^[40]。食品不仅总体规模庞大,而且非常复杂。一方面农副产品的加工对象往往具有结构复杂、硬度韧性低、易于变质等特点,同时不同对象间存在相对较大的个体差异,这要求食品加工过程在机械上更加灵巧,在控制上需要融入更多的知识和经验;另一方面,消费者的需求与偏好各不相同,这要求生产者要为特定的消费群体生产符合其需求的产品。因而,依赖人工、大批量生产、品种单调的传统食品加工生产模式需要变革和升级。在自动化取代人工完成简单重复性工作的基础上,更加智能的食品加工系统成为研究的热点和需求的趋势被越来越多的人关注。

3.1 网络环境下的集成式智能管控一体化

目前,工业设备的网络能力不断提高,愈来愈多的新型设备支持网络远程连接,这为系统实现网络化集成智能管控提供了可能。通过网络,系统的设备层、控制层和管理层可紧密地连接,使系统的性能、安全性等大幅提高。网络环境下的控制系统从传统的 4-20mA 串行电缆通信,向以 Profibus (Process Field Bus)、FF (Foundation Fieldbus)、CAN (Controller Area Network) 总线等为代表的现场总线控制系统,以及符合

IEEE 802.3 标准的工业以太网,和以 ZigBee、Wi-Fi、Bluetooth、RFID (Radio-frequency Identification)、GPRS (General Packet Radio Service) 等为代表的工业无线网络转化。

通过网络接口,视觉传感器可直接连入高速以太网,如文献[41]介绍的食品检测系统利用千兆以太网将摄像头与计算机相连,通过识别食品包装箱标识检测产品的信息,从而保障产品的出厂质量。

3.2 多机器人智能化食品加工技术

随着单体机器人研究和应用逐渐成熟,其能力、可靠性等方面也愈加完善,但同时其能力的瓶颈也逐渐显现。当面对更复杂、更高效的任务需求时,许多研究者和工程师将目光转向多机器人系统。与单机器人相比,多机器人系统在空间分布、任务并发、可靠性等方面均具有特有的优势。在食品加工领域,已有一些研究机构和工厂利用多机器人系统进行操作,达到高效低成本的目的。如日本 FANUC 公司开发的利用 2 台机器人通过图像识别后,控制机械臂对传送带上的小型容器进行抓取,放入托盘指定位置的系统,实现食品、医药产品等小物品的快速分装^[42]。该系统在 2007 年获得日本经济产业省“年度机器人大奖”。图 2 为笔者所在实验室目前用于研究的多机器人协作系统,其采用视觉传感器作为信息源,多机器人、转台和控制计算机间通过网络连接通信。利用该系统可进行基于视觉信息的网络化多机器人协同控制研究,相关研究成果可应用于食品、医药产品分级、检测、包装等领域。



图 2 多机器人协作系统

Fig. 2 Multi-robot cooperation and coordination system

4 面向食品加工过程智能化的计算机视觉技术展望

食品加工领域已经成为计算机视觉技术重要的研究和应用方向,在未来几年必将吸引更多的公司和研究机构关注计算机视觉技术在该领域应用的研发,笔者认为如下几个方面的研究颇具潜力。

1) 开发更快速、更具鲁棒性的视觉处理算法。目前前沿的视觉处理算法一般均具有较高的准确率或精度,但有些算法计算量较大,无法满足工程中实时性的要求。如何在保证精度或准确率的前提下大幅减小计算量是这些算法工程化的关键因素。另外,目前一些面向食品加工的视觉处理算法

对抵抗外界干扰的鲁棒性较弱,一定程度上影响了整体系统的稳定性。因此研究更智能、更具有自学习能力的视觉处理算法将是该领域的一个研究方向。

2) 并行计算的推广和应用。并行计算机的产生使计算机的处理速度大幅提升。对于某些计算量较大的图像处理算法,将其移植到并行计算机上是其具有实时性的一种可行途径。将现有算法向并行计算机上移植和研发具有并行计算特性的图像处理算法具有重要的研究和工程应用价值。

3) 多种传感器的应用和信息融合。目前,彩色视觉传感器已经取代黑白视觉传感器在研究和工程领域普遍得到应用,而红外传感器、X光传感器等在食品加工领域也充分展现了其特性和价值。视觉传感器亦可与声音传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、力传感器等各种传感器结合使用。多种传感器的引入可大大增加系统所获得的信息量,有助于提高算法的精度或准确率。如何选取信息源、如何将多种信息有效融合、以及如何减小由于数据量增大所带来的计算量的提升等问题将是该领域的研究重点。

4) 三维技术的研究和应用。利用三维传感器的激光三角测距方法可快速同时获知样品的长度、宽度、深度和体积信息,同时得到样品表面的三维纹理信息。文献[43]和[44]介绍了三维传感器在食品检测、分级、包装等方面的应用。可以预见,三维技术将是面向食品加工领域的计算机视觉技术中重要和颇具潜力的研究和应用领域。

5 结语

通过阐述计算机视觉技术在食品加工过程领域中的关键作用及其国内外的理论研究进展,并介绍该技术在过程监控、质量检测、食品安全等工程领域的应用,提出面向食品加工过程的计算机视觉技术应进一步与智能自动化研究结合,与网络化集成智能管控、多机器人等方向相互促进,促使食品加工过程研究应用进一步向智能化方向发展。最后展望了食品加工过程领域中计算机视觉技术的发展趋势。与世界发达国家相比,中国计算机视觉技术的理论研究有较好的基础,某些方面的工作已达到世界先进水平,但在食品加工过程领域,其应用尚处于起步阶段,市场潜力巨大。因此,加大面向食品加工过程的计算机视觉技术的研究和推广对中国食品工业向智能化方向发展具有重要作用,可为推动中国民族食品工业发展,为其进一步做大、做深、做强提供必需的技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] 岳晓峰. 计算机视觉技术及其在工业中应用的研究 [D]. 吉林: 吉林大学机械科学与工程学院, 2006.
- Yue Xiaofeng. Study on computer vision technology and its application in industry fields[D]. Jilin: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2006.
- [2] Zheng C, Sun D, Zheng L. Recent developments and applications of

- image features for food quality evaluation and inspection—A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(12): 642-655.
- [3] 国家发展改革委, 科技部, 农业部. 全国食品工业“十一五”发展纲要(2006—2010)[R]. 2006.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. An outline of China's food industry development during the 11th five-year plan (2006~2010)[R]. 2006.
- [4] Wang H, Sun D. Evaluation of the functional properties of cheddar cheese using a computer vision method [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(1): 47-51.
- [5] Muhammedali B, Abdullah M Z, Mohd Azemi M N. Food handling and packaging using computer vision and robot [C]//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization. 2004: 177-182.
- [6] Fenghua J, Lei Q, Lu J, et al. Novel separation method of black walnut meat from shell using invariant features and a supervised self-organizing map[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88(1): 75-85.
- [7] 李庆中. 苹果自动分级中计算机视觉信息快速获取与处理技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学信息与电气工程学院, 2005.
- Li Qingzhong. Study on fast acquisition and processing technology for computer vision information in apple automatic grading [D]. Beijing: College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, 2005.
- [8] Tadhg B, Sun D. Improving quality inspection of food products by computer vision—A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(1): 3-16.
- [9] 凌伟, 王志乾, 高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 277-282.
- Ling Wei, Wang Zhiqian, Gao Fengduan. *Optics and Precision Engineering* 2007, 15(2): 277-282.
- [10] 张淳, 秦世引, 赵丹培, 等. 基于星图匹配的小视场空间图像畸变校正[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(9): 1016-1019.
- Zhang Chun, Qin Shiyin, Zhao Danpei, et al. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(9): 1016-1019.
- [11] Woo J M, Park H H, Hong S M, et al. Statistical noise analysis of CMOS image sensors in dark condition [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2481-2488.
- [12] 艾泽潭, 石庚辰. 小波变换在图像去噪中的应用 [J]. *科技导报*, 2010, 28(1): 102-106.
- Ai Zetan, Shi Gengchen. *Science & Technology Review*, 2010, 28(1): 102-106.
- [13] Seongjai K. PDE-based image restoration: a hybrid model and color image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(5): 1163-1170.
- [14] 刘远民, 秦世引. 一种新的基于 PCNN 的自适应强去噪方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(1): 108-112.
- Liu Yuanmin, Qin Shiyin. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(1): 108-112.
- [15] 王永忠, 梁彦, 潘泉, 等. 基于自适应混合高斯模型的时空背景建模 [J]. *自动化学报*, 2009, 35(4): 371-378.
- Wang Yongzhong, Liang Yan, Pan Quan, et al. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(4): 371-378.

- [16] 黄志开. 彩色图像特征提取与植物分类研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学合肥智能机械研究所, 2006.
Huang Zhikai. A study of feature extraction technique based on color image & plant classification[D]. Hefei: Institute of Intelligent Machines, University of Science and Technology of China, 2006.
- [17] 张毓晋. 图像工程[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Zhang Yujin. Image engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [18] Bonnie H. Automated chicken processing—machine vision and water-jet cutting for optimized performance [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006(6): 17–19.
- [19] Perfecto M, Vicente P, Miguel S, *et al.* Can end inspection with image processing and fuzzy modelling [C]//Proceedings of the 2005 International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, 2005, 2: 666–672.
- [20] Zheng D, Myong K J, Seong G K. Band selection of hyperspectral images for automatic detection of poultry skin tumors [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(3): 332–339.
- [21] Vijayarekha K. Multivariate image analysis for defect identification of apple fruit images [C]//34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008: 1499–1503.
- [22] Qin J W, Thomas F B, Mark A R, *et al.* Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 183–191.
- [23] 陈坤杰. 基于分形理论及机器视觉的牛肉自动分级技术研究 [D]. 南京: 南京农业大学工学院, 2005.
Chen Kunjie. Study on beef automatic grading based on fractal dimension & machine vision [D]. Nanjing: College of Engineering, Nanjing Agricultural University, 2005.
- [24] Blasco J, Cubero S, Gomez-Sanchis J, *et al.* Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*punica granatum*) arils based on computer vision[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(1): 27–34.
- [25] Lee D J, Robert S, James A, *et al.* Development of a machine vision system for automatic date grading using digital reflective near-infrared imaging [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(3): 388–398.
- [26] Tu K, Ren K, Pan L Q, *et al.* A study of broccoli grading system based on machine vision and neural networks [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007: 2332–2336.
- [27] Chong V K, Kondo N, Ninomiya K. Features extraction for eggplant fruit grading system using machine vision [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24(5): 675–684.
- [28] Chen C, Li X J, Yuan H M. Quality assessment of beef based of computer vision and electronic nose [C]//8th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2007: 627–631.
- [29] 李志. 牛胴体眼肌切面分级信息检测自动化研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2008.
Li Zhi. Study on the automatic measurement for grading information on beef carcass ribeye[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2008.
- [30] Sun D W. Computer vision— an objective, rapid and non-contact quality evaluation tool for the food industry [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(1): 1–2.
- [31] Liu H J, Wang Y N. Development of glass bottle inspector based on machine vision[C]//10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008: 785–790.
- [32] Liu J, Wang Y N, Zhang J, *et al.* On-line detection of foreign substances in glass bottles filled with transfusion solution through computer vision [C]//Processing of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, 2008: 424–429.
- [33] 朱惠峰, 王耀南, 周博文, 等. 异形瓶装溶液内杂质的机器视觉在线检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 48–51.
Zhu Huifeng, Wang Yaonan, Zhou Bowen, *et al.* *Instrument Technique and Sensor*, 2009(10): 48–51.
- [34] Zhang Y P, Tao Y Z, Fan Z Y. Application of digital image process technology to the mouth of beer bottle defect inspection [C]//The 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007: 2905–2908.
- [35] Wang Q H, Deng X Y, Ren Y L, *et al.* Egg freshness detection based on digital image technology[J]. *Scientific Research and Essay*, 2009, 4(10): 1073–1079.
- [36] Kwon J S, Lee J M, Kim W Y. Real-time detection of foreign objects using X-ray imaging for dry food manufacturing line [C]//IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2008: 1–4.
- [37] 张道武. 基于 X-ray 的食品异物无损检测技术研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2007.
Zhang Daowu. Research about non-destructive detection technology of food impurity based on X-ray [D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [38] Vives A E S, Moreira S, Brienza S M B, *et al.* Synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence (SR-TXRF) for evaluation of food contamination [J]. *Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry*, 2006, 270(1): 147–153.
- [39] Vives A E S, Moreira S, Brienza S M B, *et al.* Analysis of fish samples for environmental monitoring and food safety assessment by synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence [J]. *Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry*, 2006, 270(1): 231–236.
- [40] FPI vision [EB/OL]. 2010–3–15. <http://www.fpi-international.com/fpivision.htm>.
- [41] Image processing in the food industry [EB/OL]. 2010–3–21. ftp://ftp2.imaging.de/websites/documents/applications/en_DE-Application-Kdorf-Automation.pdf.
- [42] The Robot Award Bureau. The robot award archive[EB/OL]. 2008–8–12. <http://www.robotaward.jp/archive/2007/interview/>.
- [43] Sandro M G, Emmanuel P, Viviana O S. Three-dimensional reconstruction of irregular food stuffs[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(4): 536–547.
- [44] Rahmi U, Ferruh E. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(3): 337–343.

(责任编辑 吴晓丽)