

计算机视觉技术对食品腐败检测的研究进展

王振杰, 孙 晔, 顾欣哲, 屠 康, 潘磊庆*

(南京农业大学食品科技学院, 南京 210095)

摘 要: 食品腐败变质是食品安全问题中最主要的原因之一, 据世界卫生组织(WHO)数据统计, 每年全球食品工业仅因食品腐败变质带来的经济损失就多达数百亿美元。食品发生腐败变质不仅带来巨大的经济损失, 而且给人们健康带来严重危害。食品在生产、加工、储存、运输和销售等各个环节中, 当受到微生物、酶作用、机械损伤、病害、光照、氧气等不当的贮藏条件都有可能导致腐败变质。因此, 加强对食品腐败变质的检测和监测显得尤为重要。然而, 目前现有常用的检测方法存在过程操作繁琐、时效性差或灵敏度较低等缺点, 难以满足现代快速准确检测的需要, 成为制约食品质量安全的瓶颈。本文主要介绍了计算机视觉技术对微生物、病害引起的食品原料腐败变质的检测, 来判断食品腐败变质的程度, 并介绍最新进展及研究现状, 最后展望了其应用前景。

关键词: 计算机视觉; 食品腐败; 微生物; 检测方法

Research progress on computer vision for detection of food putrefaction

WANG Zhen-Jie, SUN Ye, GU Xin-Zhe, TU Kang, PAN Lei-Qing*

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

ABSTRACT: Food putrefaction was one of the most important issues of food safety. According to the statistical data of World Health Organization (WHO), the global economic losses due to food spoilage reached up to several tens of billion dollars each year. Rotten food not only brought serious damage to people's health, but also caused huge economic losses. Serious food spoilage could be carried out in all aspects of food processes, such as processing, storage, transportation and sale, while incorrect conditions were used. Microbes, enzyme, mechanical damage, light and oxygen were also the main factors to lead food spoilage. The detection and monitoring of food spoilage were particularly important. However, traditional detection methods were tedious, time-consuming and low sensitivity, and difficult to meet the speed and accuracy requests of modern industry, which became a bottleneck of food quality and safety supervision. This paper mainly described the latest developments and research progresses on computer vision methods to detect food materials corruption caused by micro-organisms and diseases, and predicted their application prospects.

KEY WORDS: computer vision; food putrefaction; microorganism; detection methods

基金项目: 粮食公益性行业科研专项经费资助项目(201313002-01)、国家科技支撑项目(2015BAD19B03)、中央高校基本科研业务费专项(KYLH201504)和国家自然科学基金项目(31101282)

Fund: Supported by Grain Industry Public Welfare Scientific Research Special Fund (201313002-01), National Key Technology R&D Program (2015BAD19B03), Fundamental Research Funds for the Central Universities (KYLH201504) and the National Natural Science Foundation of China (31101282).

*通讯作者: 潘磊庆, 副教授, 主要研究方向为农产品无损检测。E-mail: pan_leiqing@njau.edu.cn

*Corresponding author: PAN Lei-Qing, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, No. 1, Weigang Road, Xuanwu District, Nanjing 210095, China. E-mail: pan_leiqing@njau.edu.cn

1 引言

食品安全问题一直是公众关注的焦点,食品安全直接关系到人民健康和生命安全以及社会的稳定。引起食品安全问题的主要因素之一就是食品腐败变质。食品在生产、加工、储存、运输和销售等各个环节中,当受到微生物、病害、自身酶作用、机械损伤、光、氧气等不当的贮藏条件都会引起腐败变质。

微生物污染是导致食品腐败的重要原因之一,微生物性健康危害位列食源性危害3大因素之一。动植物食品原料在收获、运输、加工和贮藏过程中,因操作不当、加工不足、或遭受虫害、污染的土壤和水等都会导致食品微生物感染。由于食品加工操作人员不良的个人卫生也会导致食品污染。由于食品原料的性质、来源以及加工处理方式不同,引起食品腐败的微生物也各有差异,引起食品腐败微生物主要有细菌、霉菌、酵母等,其中以细菌和霉菌引起的腐败比较常见。近年来,随着全社会对食品安全的高度重视,对食品微生物污染的关注程度也不断提高,对腐败微生物的分析手段逐步向实时、快速、准确的方向转变^[1]。

病害的发生会引起腐败的产生,并且产生有毒有害物质,影响产品品质和产量,污染环境。农产品尤其是果蔬产品感染病害后,外观会有不正常的表现如表面出现斑点、表皮及内部组织褐变、组织结构和外部形态腐烂。传统的病害诊断是依据经验,进行目测识别,这种方法主观性强、诊断结果偏差大。现代诊断是专业人员利用微生物和分子特性进行病原鉴定和侵染性测定,这种方法成本高、速度慢、实时性差^[2]。近年来,计算机视觉技术在农业和食品方面的应用逐渐增强,在病害检测方面也有一定的进展,主要通过计算机视觉技术对病害产生的不正常表现如表面出现斑点、表皮及内部组织褐变、组织结构和外部腐烂等特征进行快速识别,从而实现对病害的实时快速检测。

2 计算机视觉技术

2.1 计算机视觉技术介绍

作为计算机科学的一个分支,计算机视觉技术在近30年来发展迅速^[3],其应用范围包括工业、农业、军事、国防等多个领域,并取得了很大的成效^[4-7]。计算机视觉又称机器视觉,它是利用图像传感器来代替人眼获取目标图像,然后将图像信息转换成数字信息,结合模式识别等数据处理方法,最终达到分析和做出结论的目的。该技术是神经生物学、模拟识别、人工智能、心理物理学、图像处理、计算机科学等多领域的综合应用。在现代工业生产中,视觉检测已成为一个不可缺少的环节。视觉检测为包装、

电子、半导体、医药、汽车等众多行业提供自动化检测系统的集成化服务。计算机视觉技术得到如此快速的发展,是因为其与人类的视觉相比具有以下显著优势^[8]:自动化程度高、可实现无损检测、稳定的检测精度等。

随着计算机视觉技术理论和实践越来越成熟,计算机视觉技术在食品工业上的应用也得到快速发展。国内外学者在研究计算机视觉技术在食品工业中的应用方面主要集中在农产品质量分级、外部形态(如大小、重量、外观损伤、颜色等)的识别、内部品质和缺陷检测等方面。

2.2 计算机视觉的组成

计算机视觉系统主要由硬件和软件两部分组成,硬件由图像获取设备和图像处理设备组成。计算机视觉的硬件系统主要包括计算机、CCD 摄像头(或扫描仪)、光室、载物平台等几部分组成,如下图所示。通过摄像头获得所需要的图像信息,然后利用信号转换将获得的图像信息转变为数字图像以便计算机正确识别。图1为计算机视觉系统示意图。

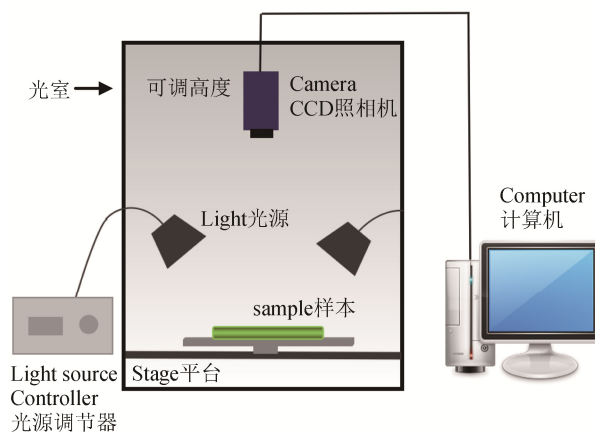


图1 计算机视觉技术检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computer vision system

其中,(1)计算机:对计算机的硬件要求不是很高,一般能够满足系统对图像处理速度的要求即可。(2)光室:主要是用来消除外界光线的干扰,内壁一般为白色背景,以便创造一个稳定的图像采集条件,可利用实验室条件自己搭建。常使用LED灯或日光灯作为光源,根据实际需要,可以选择线光源、面光源或者点光源。光源调节器进行光强度调节,一般将光源固定在顶端。(3)平台:放置样品,黑色吸光布为背景,在整个图像采集的过程中固定位置 and 高度。(4)CCD照相机:作为计算机视觉系统最为核心的一个部件,它决定了图像质量的高低,而图像质量的好坏对后期的处理效果有极其重要的影响。想要得到真实、准确的图像信息,就必须有一个高配置的相机。在图像采集过程中,相机的各种参数如焦距、曝光、高度等参数应固定下来,以保证每幅图像在相同的条件下采集。

3 计算机视觉技术对食品腐败变质检测的相关应用研究

引起食品腐败变质的主要因素包括微生物污染、病虫害、机械损伤、不当贮藏等多种因素引起。本节主要介绍计算机视觉技术对微生物、病害引起的食品原料腐败变质的检测。

3.1 对食品腐败微生物的检测

微生物是引起食品腐败最主要的原因之一。由于不同的食品营养成分比例不同,引起腐败的微生物类群也不同,主要原因是微生物分解各类营养物的能力不同,变形杆菌、青霉等分解蛋白质能力较强,容易污染富含蛋白质的食品如肉、鱼等;曲霉属、根霉属、乳酸菌、啤酒酵母等分解碳水化合物能力较强,容易污染含糖较高的食品;而脂肪含量较高的食品,易受到分解脂肪能力很强的黄曲霉和假单胞杆菌等的污染而发生酸败变质。近年来,计算机视觉技术和图像处理技术得到快速发展,在微生物快速检测中的应用也越来越多,目前主要是针对微生物微生物菌落的处理。食品工业中计算机视觉技术在微生物检测方面的研究和应用主要以研究单个细胞为主,并取得了一定的进展。

殷涌光等^[9]针对蔬菜中的活菌总数研制出一种快速检测系统,实验综合了计算机视觉、活体染色、人工神经网络等技术。实验结果表明该系统操作方便,并且可以很好地应用于农产品安全现场快速检测。Bayraktar等^[10]等利用计算机视觉和模式识别技术对李斯特菌菌落形成散射图案进行分类。Wang等^[11]等开发了一种利用选择性生长培养基和基于计算机视觉的方法,用于快速鉴定从食品中选择性分离出的金黄色葡萄球菌。该方法在食品安全控制和微生物检测的应用中发挥了巨大的潜力。殷涌光等^[12]基于计算机视觉技术对食品中大肠杆菌快速定量检测,通过大肠杆菌发酵乳糖所产生的酸与伊红美兰混合液反应产生沉淀、液体颜色发生改变的特性,设计了一套基于颜色特征识别技术的食品中大肠杆菌快速定量检测系统,通过16 h培养后,随着溶液颜色的变化程度来判断待测液中大肠杆菌的数目。试验结果表明:该方法的检测结果比传统方法的相关性好,大大缩短了检测时间,有效提高了产品品质。Deininger等^[13]采用相等时间段测定培养基上的细胞密度,然后通过计算机技术建立时间和细胞密度之间的动态关联,利用该关联可以预测和自动检测微生物的生长情况,如通过计算机控制自动定量采集检测对象,然后分析菌落的边缘形态,计算机可以显示被检测菌落的具体位置,并且根据动态关联,计算机视觉系统可以同时处理多个不同的样品。郭培源等^[14]利用计算机视觉技术识别猪肉表面微生物数量,结果显示该方法的结果与国标方法检测的结果显著相关,并且该技术可以有效计算微生物的数量。鲁静^[15]和

刘侃^[16]通过显微镜和图像采集仪器,扫描并获取乳制品图像,然后利用图像处理对获取的图像特征和微生物数量进行识别,通过此技术对微生物数量的识别结果来判断乳制品质量是否达标,并对产品进行分级。Peng等^[17]应用高光谱反射成像和最小二乘支持向量机,对猪肉中的活菌总数进行预测。该预测模型预测的相关度 $r=0.87$ 。Peng等^[18]又开发了一个高光谱散射系统,结合多元线性回归(multi-linear regression, MLR)分析方法,检测牛肉中的腐败菌,取得了更好的结果($r=0.96$ 、 $SEP=0.23$)。检测中涉及到氧合血红蛋白的吸收带,对于猪肉中活菌总数的预测十分有用。此外,为了更充分地利用高光谱成像技术检测微生物腐败菌,需要对腐败区域进行空间识别和定位,从而有助于食品中腐败位置的检测,以便对肉类食品安全程度做出正确评估。Gomez-Sanchis等^[19]使用机器学习技术探测由青霉菌属真菌引起的柑橘类水果腐败的检测,采用人工神经网络数据处理方法,结果显示检测正确率达到98%。

3.2 对病害的检测

农产品原料如水果蔬菜在生长及采后常有病害的发生,病害可分为侵染性病害和非侵染性病害,侵染性病害主要有病原微生物侵染引起的病害,如真菌、细菌、病毒、寄生性种植植物等引起的病害;非侵染性病害又叫生理病害,主要是由于产品自身或外界环境条件的恶化引起的病害,如温度过高或过低、水分含量、大气、土壤污染等引起的病害;病害的发生会引起腐败的产生,并且产生有毒有害物质,影响产品品质和产量,污染环境等。农产品尤其是果蔬产品感染病害后外观会有不正常的表现如表面出现斑点、表皮及内部组织褐变、组织结构和外部形态腐烂。通过计算机视觉检测技术对农产品病害的检测可以有效预防发生病害的食品原料流入市场,减少损失和危害,还可以通过计算机视觉对已发生病害的产品进行区分别除。下面主要介绍计算机视觉技术近年来对农产品病害的检测。

El-Helly等^[20]利用计算机视觉技术并结合人工神经网络作为分类器,对黄瓜的白粉病和霜霉病进行识别,取得了较好的结果。Yutaka Sasaki^[21]采用计算机视觉技术并结合遗传算法对黄瓜炭疽病进行研究,从分光反射特性和形状特性组建识别参数,并实现了病害的识别。Nicolai等^[22]使用近红外高光谱成像系统(900~1700 nm)成功检测了肉眼看不到的苹果苦痘病。然而,该系统不能很好区别苦痘病与木质化。Mehl等^[23]采用高分辨率高光谱成像系统进行包括腐烂、瘀伤、患病、污点、结痂、霉菌、真菌和土壤污染物等在内的苹果缺陷检测,发现在682~900 nm的光谱范围不仅可以检测苹果损伤,还可以检测苹果病害和污染。Kim等^[24]使用颜色共生的方法来检查柚子皮病,结果显示,该方法可以很好识别发生病变的柚子,经过验证准

确度高达 96.7%。结果表明,传统的计算机视觉系统和纹理特征分析可以用于柚子皮的疾病的分类。Zhao 等^[25]描述了一种类似的方法,用色调、饱和度、强度即为 HIS 色彩空间检测柑橘皮病。通过使用 HIS 的模型和算法实现了 95%的最佳总体分类精度。结果表明,共生矩阵的特征可以有效鉴别柑桔皮的状况。Nicolai 等^[26]利用近红外光谱成像和偏最小二乘法数据分析方法对苹果的苦痘病进行检测。Lee 等^[27,28]利用近红外光谱成像技术对苹果腐斑、伤口、腐病检测,准确率达到 92.42%。Qin 等^[29]开发的双波段光谱成像系统实时检测柑橘溃疡病。结果表明检测准确率达 95.3%。房俊龙等^[30]结合运用计算机视觉技术、遗传算法、人工神经网络技术,对发生病害的番茄果进行自动识别。试验表明,通过番茄形状的准确识别可以很好的对其分级,并且该技术对生理病害的番茄果识别准确率可以达到 100%。严深海等^[31]利用计算机视觉技术对发生病害的脐橙进行监测,结果表明,通过计算机视觉技术能够快速识别出脐橙溃疡病病斑,并且很好的实现了脐橙溃疡病的自动识别。贾建楠等^[32]研究了基于图像处理的方法对黄瓜细菌性角斑病和黄瓜霜霉病叶片病害识别,采用人工神经网络数据处理技术对病斑形状识别分析,结果显示该方法对黄瓜细菌性角斑病和黄瓜霜霉病叶片病害识别正确率高达 100%。刘涛等^[33]利用计算机视觉和图像处理技术对水稻叶部 15 种主要病害分析,尤其是相似病害的判断,提出了病斑交界特征参数和病斑识别流程,该方法明显提高了病斑的识别率。田有文等^[34]通过提取分析黄瓜病斑的形状、颜色、质地、发病时期等特征进行分析,采用支持向量机对黄瓜病害进行分类,结果表明,该方法在处理小样本分类效果上较好。赵进辉等^[35]利用计算机视觉技术获取甘蔗苗期赤腐病和环斑病图像,基于图像处理方法对甘蔗病害图像进行分割,并开发一种新的算法,结果表明,该算法能有效提取出赤腐病和环斑病病斑特征,对环斑病图像分割和赤腐病图像分割正确率分别达到 93%和 95%。

3.3 对其他腐败原因或指标的检测

新鲜度可以作为一个食品腐败变质的重要指标,尤其是肉制品和蛋品。肉制品营养丰富,是人类摄取蛋白质的主要来源,但易发生腐败变质。通过对食品新鲜度的检测可以评价食品是否腐败变质以及腐败变质的程度。

Soltani 等^[36]利用光谱学和机器视觉技术对鸡蛋新鲜度进行检测。通过 2 种方法的结合可以很好地评价鸡蛋的新鲜度,且可以有效剔除不新鲜的鸡蛋。Dowlati 等^[37]通过机器视觉基于鳃和眼睛的颜色变化来评估乌鲷鱼海鲷新鲜度,通过图像处理分析鱼鳃和鱼眼颜色的变化来判断乌鲷鱼海鲷的新鲜度。Huang 等^[38]使用近红外多光谱成像技术无损检测猪肉新鲜度指标,通过光谱特征波段的分析,此方法可以很好地评价猪肉的新鲜度。孙永海等^[39]利用计算机视觉技术对冷却牛肉的新鲜度进行分析研究,计算机视

觉技术优于实验室分析方法,准确率有明显提高,并且操作方便,是一种更高效的牛肉新鲜度评价方法。黄星奕等^[40]研究了利用计算机视觉技术对鱼的新鲜度进行快速无损检测。研究结果表明,计算机视觉技术应用于鱼新鲜度的检测具有一定可行性,比传统的检测新鲜度的方法更方便、省时且无损。周炜等^[41]建立了基于计算机视觉技术的猪肉图像采集系统,通过对猪肉图像消噪方法和猪肉图像特征参数的优化,建立了基于计算机视觉技术的猪肉新鲜度识别模型。郑丽敏等^[42]利用计算机视觉技术对鸡蛋的新鲜度、贮藏期进行无损检测,在鸡蛋生产、流通、加工领域具有重要意义。实验过程中采用背向照明方式得到鸡蛋的透射图像以及蛋黄和气室的图像信息,实验结果说明,这种方法可以预测鸡蛋的新鲜度和贮藏期。Pace 等^[43]利用计算机视觉系统非破坏性评估鲜切莴苣质量和氮含量,对鲜切莴苣的新鲜度检测有重要意义。

果蔬在采摘、加工生产、运输的过程中都有可能受到人为或机械损伤,一旦发生损伤就会导致腐败,失去商品价值,通过计算机视觉技术对受到机械损伤的果蔬进行检测分级剔除对产品有重要意义。王树文等^[44]为了提高番茄损伤检测与分类的准确率和效率,综合运用计算机视觉技术和 BP 人工神经网络技术,实现番茄损伤的自动检测与分类。该计算机视觉系统节省了时间,提高了精度,试验结果证明该方法对番茄损伤检测和分类的准确率要高于 90%。梁伟杰等^[45]为检测梨的果面的坏损区域,提出了一种利用多台摄像机在多个角度进行拍摄,对多幅采集后的图像进行切割,提取各自特征并进行拼合的算法。识别梨坏损区域数的正确率为 89%,可以满足系统设计的要求。刘禾等^[46]根据苹果光学反射特性建立了一套适于苹果坏损自动检测的计算机图像系统。该系统对坏损检出有较高的识别率,且有效地消除果梗区和花萼区对坏损区域结果判别的影响,且该检测方法具有较强的鲁棒性。王江枫等^[47]探讨了应用计算机视觉技术进行芒果重量及果面坏损检测的方法。对桂香芒、紫花芒果面坏损分级准确率分别为 76%和 80%。ElMasry 等^[48]根据不同的背景颜色使用高光谱成像技术实现对苹果损伤的检测,准确率达到 93.95%。Blasco 等^[49,50]利用计算机视觉和贝叶斯判别分析对柑橘果皮损伤进行检测,准确率达到 86%。Xing 等^[51]进行了利用高光谱计算机视觉系统,检测苹果挫伤的实验。采用主成分分析和偏最小二乘判别分析方法来提取高光谱图像中在 400 nm 和 1000 nm 之间的区域的光谱和空间特性。实验证明了图像处理和化学计量学工具的结合对苹果瘀伤的检测中有一定潜力。Donis-González 等^[52]针对新鲜板栗,使用计算机断层摄影图像来分析内部腐烂。结果证明通过此技术可以很好地对板栗新鲜度进行评估。

4 总结及展望

机器视觉技术是目前主要用于食品工业检测外部的质量特性,比如尺寸和体积,形状,颜色,纹理,缺陷等等。然而,随着食品安全问题的出现和消费者对食品安全问题更清晰的认识,利用计算机视觉检测技术对食品腐败的检测应用也逐渐增多。

引起食品腐败的原因主要有微生物、病害、机械损伤等多种因素,由于传统的检测方法价格昂贵、费时费力等多种弊端。这就需要一种快速、简便的检测技术,计算机视觉检测技术能够实时、快速对微生物、病害、机械损伤等的检测。如对微生物的检测,目前使用计算机视觉技术对微生物的检测主要结合化学方法和光学方法。通常对食品中的微生物进行分离培养,通过培养所得菌落形态大小、颜色、纹理等多种特征来判断微生物的数量和种类。事实证明利用计算机视觉技术与化学方法的结合处理对微生物的识别准确率较高。在对病害和机械损伤的检测过程中,由于病害和机械损伤产生的特征较明显,通常会有较为明显的病斑、腐烂、颜色等多种表面特征发生变化,对发生病害和机械损伤的样品进行图像摄取,通过图像处理和模式识别等技术的结合对图片进行处理,建立相应的识别模型,能够取得很高的识别率。利用计算机视觉技术对肉类新鲜度的检测并结合多种化学指标能够很好地判断肉类的新鲜程度及腐败变质程度。

计算机视觉技术在食品工业中的研究及应用也存在多种问题。如检测指标有限、兼容性差、检测性能受环境条件制约等多方面不足。食品腐败的检测技术正朝着高效、快速、高精度的方向快速发展,传统的检测技术已经不能满足现代社会的需要,随着光学成像快速检测技术的不断发展,以及系统数据处理性能的提升,通过多种技术如高光谱、电子鼻等多种技术和计算机视觉技术的结合,能够进一步提高对食品腐败的检测精度。通过对食品腐败的早期检测来进一步控制食品质量安全,对人类健康饮食与疾病预防等方面做出更大的贡献。

参考文献

- [1] GB/T 4789.3-2008 食品卫生微生物学检验大肠菌群测定[S]. GB/T 4789.3-2008 The food hygiene microbiology test determination of fecal coliform [S].
- [2] 田有文,李天来,李成华,等.基于支持向量机的葡萄病害图像识别方法[J].农业工程学报,2007,23(6):134-136.
Tian YW, Li TL, Li CH, et al. Grape disease image recognition method based on support vector machine (SVM) [J]. T CSAE, 2007, 23(6): 134-136.
- [3] 孙京新,李晓峰,于海峰,等.肉品中菌落总数和大肠菌群快速检测试纸片的研究[J].肉类研究,2009,7:23-26.
Sun JX, Li XF, Yu HF, et al. Colony and total coliform bacteria in meat rapid test piece of research [J]. J Meat Res, 2009, 7: 23-26.
- [4] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis and machine vision [M]. California, USA: PWS publishing, 1999.
- [5] 刘传才.图像理解与计算机视觉[M].厦门:厦门大学出版社,2002.
Liu CC. Image understanding and computer vision [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2002.
- [6] Krutz GW, Gibson HG, cassens DL, et al. Colour vision in forest and wood engineering [J]. Landwards, 2000, 55(1): 2-9.
- [7] 岳晓峰.计算机视觉技术及其在工业中应用的研究[D].长春:吉林大学,2006.
Yue XF. Computer vision technology and its application in industrial research [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [8] 曾爱群.基于计算机视觉与神经网络的芒果等级分类研究[D].桂林:桂林工学院,2008.
Ceng AQ. Mango based on computer vision and neural network classification research [D]. Guilin: Guilin Institute of Technology, 2008.
- [9] 殷涌光,丁筠.基于计算机视觉的蔬菜中活菌总数快速检测[J].农业工程学报,2009,25(7):249-254.
Yin YG, Ding J. Vegetable based on computer vision in the total number of living bacterium rapid detection [J]. T CSAE, 2009, 25 (7): 249-254.
- [10] Bayraktar B, Banada PP, Hirlleman ED, et al. Feature extraction from light-scatter patterns of *Listeria* colonies for identification and classification [J]. J Biomed Opt, 2006, 11(3): 34006
- [11] Wang Y, Yin YG, Zhang CN. Selective cultivation and rapid detection of *Staphylococcus aureus* by computer vision [J]. J Food Sci, 2014; 79: M399-M406.
- [12] 殷涌光,丁筠.基于计算机视觉的食品中大肠杆菌快速定量检测[J].吉林大学学报(工学版),2009:344-348.
Yin YG, Ding J. Based on computer vision of *E. coli* in food fast quantitative detection [J]. J Jilin Univ (Engineer Sci Edit), 2009: 344-348.
- [13] Deininger RA, Jyoung LJ. Rapid detection of bacteria in water [C]. Proceed of SPIE, 2002, 47(22): 21-25.
- [14] 郭培源,毕松,袁芳.猪肉新鲜度智能检测分级系统研究[J].食品科学,2010,31(15):68-72.
Guo PY, Bi S, Yuan F. Pork freshness intelligent detection classification system research [J]. J Food Sci, 2010, 31 (15): 68-72.
- [15] 鲁静.乳品微生物自动检测系统的设计[J].湖北第二师范学院学报,2010,27(8):115-117.
Lu J. Dairy microbial automatic test system design [J]. J Hubei Second Norm Coll, 2010, 27(8): 115-117.
- [16] 刘侃.鲜奶含菌量快速检测系统[D].武汉:华中科技大学,2008.
Liu K. Fresh milk bacteria content rapid detection system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [17] Peng Y, Wang W. Prediction of pork meat total viable bacteria count using hyperspectral imaging system and support vector machines [Z]. Proceedings of the Proceedings of the Food Processing Automation Conference, 28-29 June 2008, Providence, RI, 701P0508cd, doi:10.13031/2013.24558.
- [18] Peng Y, Zhang J, Wu J, et al. Hyperspectral scattering profiles for prediction of the microbial spoilage of beef [Z]. Proc SPIE 7315, 2009. Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety, 73150Q (28 April 2009); doi: 10.1117/12.819424.
- [19] Gomez-Sanchis J, Martin-Guerrero JD, Soria-Olivas E, et al. Detecting rotteness caused by *Penicillium* genus fungi in citrus fruits using machine

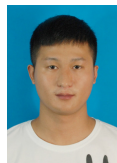
- learning techniques [J]. *Expert Sys Appli*, 2009, 39(1): 780–785.
- [20] El-Helly M, El-Beltagy S, Rafea A. Image analysis based interface for diagnostic expert systems[C]. *Proceedings of the Winter International Symposium on Information and Communication Technologies*, Trinity College Dublin, 2004, 1–6.
- [21] Yutaka Sasaki, Tsuguo Okamoto, Kenji Imov, *et al.* Automatic diagnosis of plant disease recognition between healthy and diseased leaf [J]. *J TSAM*, 1999, 61(2): 119–126.
- [22] Nicolai BM, Lötze E, Peirs A, *et al.* Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2006, 40(1): 1–6.
- [23] 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]. *J Food Engineer*, 2004, 61(1): 67–81.
- [24] Kim DG, Burks TF, Qin J, *et al.* Classification of grapefruit peel diseases using color texture feature analysis [J]. *Int J Agr Biol Engineer*, 2009, 2(3): 41–50.
- [25] Zhao X, Burks T F, Qin J. Digital microscopic imaging for citrus peel disease classification using color texture features [J]. *Appl Engineer Agr*, 2009, 25(5): 769–776.
- [26] Nicolai, B M, Lotze E, Peirs A, *et al.* Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2005, 40(1): 1–6.
- [27] Lee DJ, Schoenberger R, Archibald J, *et al.* Development of a machine vision system for automatic date grading using digital reflective near-infrared imaging [J]. *J Food Engineer*, 2008, 86(3): 388–398.
- [28] Lee K, Kang S, Delwiche SR, *et al.* Correlation analysis of hyperspectral imagery for multispectral wavelength selection for detection of defects on apples [J]. *Sens Instru Food Qual Saf*, 2008, 2(2): 90–96.
- [29] Qin JW, Burks TF, Zhao XH, *et al.* Development of a two-band spectral imaging system for real-time citrus canker detection [J]. *J Food Engineer*, 2012, 108(1): 87–93.
- [30] 房俊龙, 张长利, 潘伟, 等. 用遗传算法训练的人工神经网络识别番茄生理病害[J]. *农业工程学报*, 2004, (3): 113–116.
- Fang JL, Zhang CL, Pan W, *et al.* Using genetic algorithm training the neural network recognition tomato fruit physiological disease [J]. *T CSAE*, 2004, (3): 113–116.
- [31] 严深海. 脐橙溃疡病的一类数字图像识别算法的设计与应用[J]. *赣南师范学院学报*, 2012, (6): 37–41.
- Yan SH. Navel orange canker of the design and application of digital image recognition algorithm [J]. *J Gannan Norm Univ*, 2012, (6): 37–41.
- [32] 贾建楠, 吉海彦. 基于病斑形状和神经网络的黄瓜病害识别[J]. *农业工程学报*, 2013, (z1): 115–121.
- Jia JN, Ji HY. Based on neural network and the disease spot shape of cucumber disease recognition [J]. *T CSAE*, 2013 (z1): 115–121.
- [33] 刘涛, 仲晓春, 孙成明, 等. 基于计算机视觉的水稻叶部病害识别研究[J]. *中国农业科学*, 2014(4): 664–674.
- Liu T, Zhong XC, Sun CM, *et al.* Rice leaf disease recognition based on computer vision research [J]. *China Agr Sci*, 2014 (4): 664–674.
- [34] 田有文, 牛妍. 支持向量机在黄瓜病害识别中的应用研究[J]. *农机化研究*, 2009, (03): 36–39.
- Tian YW, Niu Y. The application of support vector machine (SVM) in cucumber disease recognition study [J]. *J Agr Mech Res*, 2009, (3): 36–39.
- [35] 赵进辉, 罗锡文, 周志艳. 基于颜色与形状特征的甘蔗病害图像分割方法[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(9): 100–103, 133.
- Zhao JH, Luo XW, Zhou ZY. Based on color image segmentation method and shape characteristics of sugarcane disease [J]. *J Agr Mach*, 2008, 39(9): 100–103, 133.
- [36] Soltani M, Omid M. Detection of poultry egg freshness by dielectric spectroscopy and machine learning techniques [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 62(2): 1034–1042.
- [37] Dowlati M, Mohtasebi SS, Omid M, *et al.* Freshness assessment of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by machine vision based on gill and eye color changes [J]. *J Food Engineer*, 2013, 119(2): 277–287.
- [38] Huang Q, Chen Q, Li H, *et al.* Non-destructively sensing pork's freshness indicator using near infrared multispectral imaging technique [J]. *J Food Engineer*, 2015, 154: 69–75.
- [39] 孙永海, 赵锡维, 鲜于建川. 基于计算机视觉的冷却牛肉新鲜度评价方法[J]. *农业机械学报*, 2004: 104–107.
- Sun YH, Zhao XW, Xianyu JC. Cooling beef freshness evaluation method based on computer vision [J]. *J Agric Mach*, 2004: 104–107.
- [40] 黄星奕, 吴磊, 徐富斌. 计算机视觉技术在鱼新鲜度检测中的应用研究[J]. *计算机工程与设计* 2013: 3562–3567.
- Huang XY, Wu L, Xu FB. Computer vision technology in the application of fish freshness determination study [J]. *Computer Engineer Design*, 2013: 3562–3567.
- [41] 周炜. 基于多源信息融合技术的猪肉新鲜度无损检测方法研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- Zhou W. Based on the multi-source information fusion technology of pork freshness NDT methods research [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [42] 郑丽敏, 杨旭, 徐桂云, 等. 基于计算机视觉的鸡蛋新鲜度无损检测[J]. *农业工程学报* 2009: 335–339.
- Zheng LM, Yang X, Xu GY, *et al.* Egg freshness nondestructive testing based on computer vision [J]. *T CSAE*, 2009: 335–339.
- [43] Pace B, Cefola M, Da Pelo P, *et al.* Non-destructive evaluation of quality and ammonia content in whole and fresh-cut lettuce by computer vision system [J]. *Food Res Int*, 2014, 64: 647–655.
- [44] 王树文, 张长利, 房俊龙. 基于计算机视觉的番茄损伤自动检测与分类研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(8): 98–101.
- Wang SW, Zhang CL, Fang JL. Tomato damage automatic detection and classification based on computer vision research [J]. *T CSAE*, 2005, 21 (8): 98–101.
- [45] 梁伟杰, 邓继忠, 张泰岭. 梨果面坏损区域的计算机视觉检测方法[J]. *农业机械学报*, 2005, (7): 101–103.
- Liang WJ, Deng JZ, Zhang TL. Pome surface damaged areas of computer vision detection method [J]. *J Agr Mach*, 2005, (7): 101–103.
- [46] 刘禾, 汪懋华. 用计算机图像技术进行苹果坏损自动检测的研究[J]. *农业机械学报*, 1998, (4): 82–87.
- Liu H, Wang MH. Apple badly damaged automatic detection using computer image technology research [J]. *J Agr Mach*, 1998, (4): 82–87.
- [47] 王江枫, 罗锡文, 洪添胜, 等. 计算机视觉技术在芒果重量及果面坏损检测中的应用[J]. *农业工程学报*, 1998, (04): 192–195.
- Wang JF, Luo XW, Hong TS, *et al.* Computer vision technology in mango fruit weight and its application in detecting the damaged [J]. *T CSAE*, 1998, (4): 192–195.

- [48] ElMasry G, Wang N, Vigneault C, *et al.* Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging [J]. *LWT-Food Sci Tec*, 2008, 41(2): 337–345.
- [49] Kurita M. Extraction methods of color and shape features for tomato grading [J]. *Shokubutsu Kankyo Kogaku*, 2006, 18(2): 145–153.
- [50] Blasco J, Aleixos N, Gomez-Sanchis J, *et al.* Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features [J]. *Biosys Engineer*, 2009, 103(2): 137–145.
- [51] Xing J, Saeys W, De-Baerdemaeker J, *et al.* Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples [J]. *Computer Electron Agr*, 2007, 56(1): 1–13.
- [52] Donis-González IR, Guyer DE, Fulbright DW, *et al.* Postharvest noninvasive assessment of fresh chestnut (*Castanea spp.*) internal decay using computer tomography images [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2014, 94:

14–25.

(责任编辑: 李振飞)

作者简介



王振杰, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品质量无损检测。

E-mail: 2014808123@njau.edu.cn



潘磊庆, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为农产品品质无损检测研究。

E-mail: pan_leiqing@njau.edu.cn