

基于计算机视觉的牛肉质量分级研究进展

丁 冬¹, 陈士进¹, 沈明霞^{1,*}, 彭增起², 梁 琨¹

(1. 南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031;

2. 南京农业大学 农业部农畜产品加工与质量控制重点开放实验室, 江苏 南京 210095)

摘 要: 牛肉品质分级对于肉牛产业具有重要意义, 为克服人工评级的弊端, 客观、无损的自动分级技术成为研究热点。本文综述了国内外利用计算机视觉对牛肉大理石纹、生理成熟度、肉色和脂肪色这些指标进行分级预测的研究进展情况, 讨论了研究过程中诸如图像分割、特征提取方面存在的困难, 最后指出了计算机视觉技术在牛肉品质分级应用过程中存在的问题以及可能的发展方向。

关键词: 计算机视觉; 牛肉; 质量分级

Review of Beef Quality Grading Based on Computer Vision

DING Dong¹, CHEN Shijin¹, SHEN Mingxia^{1,*}, PENG Zengqi², LIANG Kun¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. Key Laboratory of Agricultural and Animal Products Processing and Quality Control, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Beef quality grading plays a very important role in beef cattle industry. In order to overcome the flaws of manual grading, automatic beef grading technique becomes a hot research topic because it is objective and non-destructive. This paper provides a review on recent progress made in the prediction of beef quality attributes including marbling, physiological maturation, muscle color and fat using computer vision. Difficulties in the study such as segmentation and feature extraction are also discussed. Finally, challenges and future prospects for the application of computer vision in beef quality grading are proposed.

Key words: computer vision; beef; quality grading

中图分类号: TP391.41; TS251.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 07-0251-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201507046

牛肉营养丰富, 具有低脂肪、低胆固醇、高蛋白的特点, 近年来随着消费量的增加, 其品质日益受到人们关注。依据牛肉的性状差异对其分级是牛肉生产的重要环节之一, 分级结果直接影响牛肉定价, 对肉牛的饲养、屠宰以及牛肉的加工和消费环节也有重要的导向性作用^[1]。传统牛肉分级一般是由分级员通过感官评定或简单测量^[2], 按照规定的分级标准对牛胴体或分割肉的产量和质量进行评级。虽然分级员都经过专业的训练, 但一致性差、存在主观随意性等人工评级的缺点是无法消除的^[3], 依赖经验不能量化的评级方式对消费者也缺乏说服力, 不利于建立以质论价的市场体系。因此采用更为客观的评估技术手段, 实现自动的智能评级系统成为各国牛肉分级研究的重点。

计算机视觉技术近年来在农产品检测领域得到广泛的应用^[3-5], 它通过光学成像传感器代替人眼获取被检对象的图像信息, 利用图像处理和模式识别算法模拟人的

判别准则去理解图像, 被认为是一种很有前景的食品质量客观评估方法^[5]。McDonald等^[6]最早将其引入到牛肉分级标准的量化研究上, 经过几十年的发展, 计算机视觉技术在牛肉分级领域得到深入研究, 国外已有在线检测的实际应用, 实践证明这些牛肉智能评级系统对于牛肉产量级的评定已经可以取代人工评级^[7], 但在关乎牛肉品质的质量等级预测上还需要进一步的研究和完善。虽然不同国家在牛肉质量分级的具体标准和尺度上不尽相同, 但基本原理相通, 其中有4个视觉评估指标最为常见, 即大理石纹、生理成熟度、肌肉色和脂肪色^[2-3], 基于视觉图像分析的牛肉质量分级研究主要围绕这些指标展开。

1 大理石纹等级评定

大理石纹指的是牛肉肌纤维之间沉积脂肪形成的可

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 农业科技成果转化资金项目 (2011GB2C100018); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介: 丁冬 (1980—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事农产品检测研究。E-mail: dingdong@njau.edu.cn

*通信作者: 沈明霞 (1964—), 女, 教授, 博士, 主要从事机器视觉和信息农业研究。E-mail: mingxia@njau.edu.cn

见花纹^[3,8]，其等级是依据指定眼肌切面中背最长肌区域内脂肪的含量和分布情况进行评定，形成的大理石纹愈丰富，对应级别愈高^[8]。大理石纹等级是决定牛肉质量等级的主要权重因素，利用计算机视觉系统代替人工评级需解决两个关键问题：一是如何将大理石纹从复杂的背景中精准地提取出来，二是如何将大理石纹的丰富程度量化成合适的特征指标，并建立等级预测模型。

1.1 大理石纹的提取

分割提取背最长肌区域内的大理石纹是后续等级评定的前提，比较常用的分割算法有阈值法、数学形态学法、边缘检测法、基于区域和基于聚类的分割算法等^[9-10]。一般步骤是先去除背景，再区分出肌肉和脂肪像素，最后提取出背最长肌作为目标区域，实现大理石纹的提取。其中，分割肌肉和脂肪以及提取背最长肌区域是研究的重点。

1.1.1 肌肉和脂肪像素的分割

基于肌肉和脂肪的颜色差异，利用全局阈值法将眼肌图片二值化是区分两者的常见做法，对于阈值的计算方法国内外作了很多研究。Yoshikawa等^[11]最早引入基于最小二乘原理的Otsu算法计算了牛肉脂肪与肌肉像素的最优全局阈值，该方法简单快捷，在亮度均匀的情况下可以得到很好的分割效果。Jackman等^[12]结合聚类算法，通过增强对比度、调整图片亮度等方法经过多次计算，确定出肌肉和非肌肉像素的阈值。Huan等^[13]则引入Renyi熵计算出分割阈值，并结合形态学操作实现了肌肉像素的自动提取。

除阈值法外，Jeyamkondan等^[14]发现模糊C均值聚类算法（fuzzy C-mean clustering, FCM）能有效模仿人类的视觉，适合于将肌肉和脂肪进行聚类分割，分割误差小于5%，低于传统阈值分割15%~16%的误差水平。Shiranita等^[15]则用神经网络算法在4位灰度图像中区分出脂肪和肌肉像素，二值化图与原图对比证明了方法的有效性，但算法较为复杂。

国内对牛肉自动分级技术开展研究较晚，在分割算法上多是借鉴国外已有的研究。文献[16-20]采用阈值法分割肌肉和脂肪像素，文献[21-24]则是运用了FCM算法。仇金宏等^[24]将传统FCM算法中的隶属函数、聚类数等参数进行优化，提高了算法的准确性和稳定性。除了这两种经典算法，Chen Kunjie等^[25]设计了一套视觉测试卡，将人类视觉阈值运用到区域生长法中，从而实现自适应分割，提高了分割效果的稳定性。赵文琦^[26]和牛四杰^[27]等针对生物体图像弱对比度问题，引入了水平集方法对牛肉眼肌图像进行分割，实现了眼肌边缘的准确提取。水平集方法拓扑适应性强，能够分割结构复杂的生物组织图片^[27]，这种基于边缘检测的图像分割方法值得进一步研究。

上述方法中，基于阈值的分割算法简单、稳定且运算速度快，更能适应在线检测的需求，但在光照不均等复杂环境下分割效果还有待改进。因此，结合聚类或其他模式识别方法，在合理选择颜色空间的基础上实现最优阈值的快速选取，是将来肌肉和脂肪像素分割研究的一个重要方向。

1.1.2 背最长肌区域的提取

大理石纹评级是基于眼肌切面中背最长肌区域进行的，这一区域作为后续评级的感兴趣区域（region of interest, ROI）必须单独提取出来。最常用的提取方法是基于数学形态学的图像处理法，即在二值化图片上采用标记、反复腐蚀和膨胀等操作，先将ROI与眼肌外围脂肪、附生肌等区域分离出来，然后通过区域面积标记、选取最大连通区域来实现ROI提取。Subbiah等^[28]根据背最长肌的凸形特征对目标区域的提取条件进行了改进，借鉴了计算几何的凸包生成算法，通过判断多次腐蚀、膨胀迭代后凸包中目标区域的面积比率，实现了ROI提取，分割错误率仅为1.97%。

上述这种区域提取方法也有缺陷，反复膨胀、腐蚀操作会导致目标区域的面积、周长等形态参数出现精度误差，对于雪花牛肉这类肌肉脂肪比较丰富的品种，算法的适应性较差，易出现过分割或欠分割现象，影响后期评级的准确性。针对这个问题，Huan等^[13]先利用8链码从二值化图片中提取出眼肌肌肉的边缘轮廓，然后基于轮廓曲线进行角点检测，在对凹凸点的位置情况进行判断后，选择性地连接一些边缘凸点，从而提取出ROI。这种方法能够有效克服因条状脂肪伸入背最长肌而引起的过分割现象，分割效果与专家手工分割比较，错误率为2.63%。

国内方面，文献[17-22]都采用了常规的形态学腐蚀、膨胀以及区域面积标记的方法，关于ROI过分割和欠分割的相关研究还很少。赵杰文等^[21]为克服欠分割问题，采用不断扩大的圆结构元素去腐蚀图片的方法，可以去除背最长肌附近黏连的附生肌区域，但对于算法引入的面积误差文献中没有讨论。孟祥艳^[29]先在H分量下对牛肉眼肌图片进行形态学梯度等预处理，再利用改进的分水岭算法实现大理石纹的分割，与传统算法比较，图像分割不足的现象明显减少，误分率的平均值为9.44%。

1.2 大理石纹特征提取和等级预测

从分割图像中提取出有效反映大理石纹丰富程度的特征参数，并将这些特征与大理石纹等级之间建立数学模型，从而实现对未知样本的等级预测，这是实现牛肉自动评级的关键步骤。表1归纳了一些国内外研究者提取的大理石纹等级特征和采用的建模方法。

表1 牛肉大理石纹特征和预测模型
Table 1 Beef marbling features and prediction models

作者及参考文献	提取特征	建模方法	预测准确率/%
Yohsikawa等 ^[11]	归一化的肌肉和肌内脂肪的步长步数矢量	多元线性回归	95.80
Shiranita等 ^[15]	肌内脂肪面积比、大脂肪颗粒数、脂肪分布系数	多元线性回归	80.00
刘木华等 ^[23]	图像特征像素灰度矩	支持向量机	89.20~100.00
陈坤杰等 ^[30]	计盒维数、肌内脂肪面积比、脂肪颗粒数(总数、大颗粒数)	多元线性回归 多元多项式回归	75.00 87.50
孟祥艳 ^[30]	肌内脂肪面积密度、平均粒径、花纹分布离散度、大花纹面积比、Blaschke系数的离散度	Hopfield神经网络	87.23
Pang Bin等 ^[31]	肌内脂肪面积比、大小脂肪颗粒面积比和数量比	支持向量机	86.05
周彤等 ^[32]	大、中、小脂肪颗粒数和密度、肌内脂肪面积比、分布均匀度	主成分分析 Fisher线性判别	91.20

大理石纹等级特征主要有两大类,一类是基于大理石纹面积、颗粒数目等统计的数量特征值,另一类是反映大理石纹分布均匀程度的分布特征值。如果只采用肌内脂肪面积比这类数量指标表征大理石纹等级,会造成未知样本预测正确率不高的情况^[3],因此需要结合评级员的先验知识,在数量统计的基础上将肌内脂肪的分布情况考虑进来,采用区域的脂肪像素方差^[15]、脂肪颗粒分布密度^[18,32]、纹理特征值^[23]、分形维度特征值^[30]或花纹的粗糙度、细密度^[33]来表征大理石纹分布的丰富度和均匀度。随着特征值数量的增加,还需对特征值进行优化筛选。陈坤杰等^[30]通过变量相关性分析,将有严重共线性关系的特征参数进行合并,保留了与等级结果相关程度更高的3个特征值。周彤等^[32]对提取的10个特征值先进行主成分分析,只采用贡献率较大的前3个主成分参与建模。

在建模方法上,经典的多元线性回归是比较常用的方法,神经网络和支持向量机等人工智能算法也被越来越多地使用。艾虎^[34]曾在两种特征值选取方案下,对人工神经网络模型与多元线性回归模型的性能进行了比较,结果发现实测值与预测值之间相关系数的平均值都是人工神经网络模型较高,但这一结论还需要大量样本来验证。

2 生理成熟度等级评定

生理成熟度是评定肉牛胴体质量等级的一个重要指标,表征了牛胴体各部位的生长发育状况,一般情况下,牛胴体的生理成熟度越小,牛肉品质越好,其等级越高^[35]。有研究表明随着生理成熟度的提高,牛肉肌原纤维变粗,剪切力值变大,牛肉的蒸煮损失也呈增大趋势^[36]。

肉牛生理成熟度可依据门齿的变化以及脊椎骨棘突末端软骨的骨质化程度来判断^[35,37]。随牛龄的增大,门齿状况会发生变化,脊椎骨质化程度也会有规律性地增强,表现为胸椎末端软骨的颜色会随之变化^[35-36]。在实际生产中,门齿判定法在操作上具有一定难度,而骨质化程度判定法可以依靠视觉评估直接判定,相对方便易

行,这也是美国、澳大利亚等许多国家牛肉分级体系中使用的方法^[37]。但人工视觉评定依赖主观经验,会用诸如“少量骨化”、“小部分骨化”等一些模糊用语进行表述^[35],不能实现对骨质化程度的定量判定。

2003年,Hatem等^[38]曾对基于计算机视觉的牛肉生理成熟度检测进行过初步的研究,提取出表征软骨颜色变化的特性曲线,并基于平均色调值这一特征建立神经网络模型,对于只含有两个成熟度等级的样品组,模型预测正确率为75%,对于含有5个成熟度等级的样品组,预测正确率为65.9%。2010年,孟祥艳^[35]在识别出软骨区域的基础上,优选出复杂形状参数、凹性率两个分类参数,利用BP神经网络模型预测生理成熟度等级,5个等级的预测正确率达到86.0%。

目前,软骨和硬骨区域的图像分割是自动评级过程中面临的主要难点。因为软骨区域的颜色与其周围的脂肪组织非常相似,所以采用传统的阈值法达不到很好的分割效果。Hatem等^[39]利用HSL颜色空间中的H分量和CIELab颜色空间中的 a^* 分量分别进行软骨和硬骨区域的分割,再结合形态学操作和区域几何特征提取目标区域,分割正确率为83%。国内刘木华等^[40]基于Ohta颜色空间中的I2、I3分量对图像进行二值化、腐蚀和区域填充等一系列操作,利用面积阈值分割出牛胸椎骨图像中软骨和硬骨区域。这些结果证明利用颜色空间转换的方法分割软、硬骨区域是可行的。另外,孟祥艳^[35]在传统的RGB图片上分析软骨的形状特征,提取了7个不变矩参数作为识别软骨区域的特征值,并利用Hopfield神经网络完成软骨区域的检索,识别正确率为92.31%。

3 肌肉色和脂肪色等级评定

肉的外观颜色包括肌肉、脂肪的颜色和光泽,能够表征肉的生理、生化和微生物学的变化,虽然在正常范围内对肉的营养成分影响不大,但消费者往往会把肉色同新鲜度、风味或肉的质量联系起来^[41],所以颜色是肉类分级时必须考量的重要指标之一。Girolami等^[42]通过评估小组对比分析了计算机视觉系统和色差计对牛肉、猪肉和鸡肉颜色的评估能力,结果发现色差计有其局限性,而计算机视觉系统对颜色的测量更贴近真实颜色。

目前国内外基于计算机视觉进行牛肉颜色自动评级的研究主要涉及的是肌肉颜色。Gerrard等^[43]最早对美国农业部牛肉颜色等级进行研究,提取牛排肌肉R、G分量平均值作为特征值,预测了60个样本的颜色等级,决定系数达到0.86。Larraín等^[44]利用数字图像技术评估了牛肉样本CIE颜色空间的特征值,结果表明计算机视觉提取的 a^* 、色相角和色度3个分量值与色度计的测量值有较高的相关性,决定系数都在0.93以上。国内方面,贾渊等^[45]对

牛肉颜色的RGB分量进行了采样和统计分析,并对每个肉色等级的颜色特征及其分布规律进行了初步的研究。陈坤杰等^[46]提取了160份牛肉图片中肌肉区域的R、G、B、H、S、I颜色分量的平均值和标准偏差共12个特征值作为肉色的描述参数,又建立了5人评级小组,对所有样本进行牛肉颜色等级评定,以BP神经网络建模对牛肉颜色等级进行预测,预测的平均正确率达到了95%。Sun Xin等^[47]在陈坤杰工作的基础上,对提取的12个特征值采用了逐步回归的方法,筛选出R颜色分量均值这一特征,并对比了线性回归和支持向量机两种建模方法对肉色等级的预测效果,结果显示支持向量机模型的预测正确率(94.7%)要好于线性回归模型(86.8%)。

目前关于脂肪色等级自动评定的研究比较少,Chen Kunjie等^[48]以牛肉图像中脂肪像素点R、G、B、H、S、I的均值和标准差为输入参数,利用支持向量机建模方法进行了脂肪色等级预测,参数优化后的模型对脂肪色等级的预测正确率为97.4%。

4 结 语

计算机视觉是一项可以客观评定牛肉质量等级的检测技术,具有无损、高效、成本低等特点,基于这一技术的分级系统已在美国、澳大利亚、加拿大等肉牛业发达的国家进入实际应用阶段。然而,要推广计算机视觉分级技术,并取代人工评级员,还有许多工作要做。1) 保证牛肉图像的质量是首要的问题。许多研究都发现,牛肉成像过程会受光源、样品位置、环境反光乃至肉表面碎屑等多种因素的影响^[3,49],这些因素在实际生产环境中往往带有不可控性,导致采集的图片质量不一致,从而影响等级预测的准确性。因此需要对图像采集装置进行优化设计,既要便于操作,又能屏蔽外界干扰,使之适应企业的实际生产环境。同时企业在牛肉分割的操作规范上也需要相应规范,使牛肉生产工艺与自动分级技术相配套。2) 如何高效、精准地提取大理石纹和背最长肌区域仍然是计算机视觉应用于牛肉分级过程中需要解决的关键问题之一,系统内嵌的一种分割算法面对的是复杂多变的牛肉图像,易造成过分割或欠分割的情况。因此在图像分割算法上还要做更多的基础性研究,进一步寻找对图像差异敏感度较低的分级特征,提高分割算法的鲁棒性和预测模型的准确性。

除了将计算机视觉用于牛肉分级,还有研究将其用于牛肉嫩度、多汁性、适口性等食用品质的预测^[50-52],这些口感指标中尤以嫩度最受关注。目前牛肉质量指标对嫩度的分类预测并不理想,牛肉等级与适口性之间相关性的研究也并不多^[53-54]。因此如何利用现有的质量指标更

好地表征牛肉食用品质,建立与消费者感知一致的分级体系,这也是今后牛肉分级需要研究的方向之一。

近年来高光谱图像技术正逐渐成为无损检测领域的研究热点^[55]。它结合了光谱分析和光学成像技术的优势,能同时检测样品的内在信息和外部特征,还可以将品质信息进行可视化表达,因此在食品和农产品品质检测方面具有独特的优势。在肉品检测领域,爱尔兰孙大文教授的团队构建了波段为900~1 700 nm的反射式高光谱成像系统,对猪肉、牛肉的一些质量指标比如颜色、pH值、嫩度以及蛋白质、水分和脂肪这些化学成分的含量进行了预测^[56-59],取得了很好的效果;还通过主成分分析,对3种不同品质的猪肉^[60]和3种不同部位的羊肉^[61]进行判别分级,正确率分别达到96%和100%。国内彭彦昆教授的团队则是基于400~1 100 nm波长范围的高光谱数据,以光谱散射曲线的拟合参数作为特征,对牛肉的剪切力值、颜色^[62]以及猪肉的嫩度^[63]、新鲜度^[64]进行了预测,对牛肉表面微生物腐败^[65]和猪肉表面大肠杆菌污染的评定^[63]也进行了研究。另外,Qiao Jun等^[66]在430~1 000 nm波段对40个猪肉样本的大理石花纹进行成功分级,Li Yongyu等^[67]筛选出530 nm波长作为特征波段,实现牛肉大理石纹等级的判定。

相较于传统的RGB图像,高光谱数据能提供几百个按波长顺序排列的光学图像集合,因此在肉的色泽、纹理、表面缺陷和污染等外观品质检测方面具有更大的潜力,相信图谱合一的高光谱图像技术将为计算机视觉在肉类品质检测和分级中的应用带来新的机遇。

参考文献:

- [1] 李玮姿,朱近,杨德吉,等.基于图像的牛肉大理石纹理自动评级方法研究[J].食品科学,2011,32(9):40-45.
- [2] 汤晓艳,王敏,钱永忠,等.牛肉分级标准及分级技术发展概况综述[J].食品科学,2011,32(19):288-293.
- [3] TAN Jinglu. Meat quality evaluation by computer vision[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61: 27-35.
- [4] JACKMAN P, SUN Dawen, ALLEN P. Recent advances in the use of computer vision technology in the quality assessment of fresh meats[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(4): 185-197.
- [5] 孙大文,吴迪,何鸿举,等.现代光学成像技术在食品品质快速检测中的应用[J].华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(10):59-68.
- [6] McDONALD T P, CHEN Y R. Visual characterization of marbling in beef rib-eyes and its relationship to taste parameters[J]. Transactions of the ASABE, 1991, 34(6): 2499-2504.
- [7] 刘超超,沈明霞,彭增起.机器视觉预测牛肉产量级研究现状及展望[J].食品科学,2011,32(9):324-328.
- [8] NY/T 676—2010 牛肉等级规格[S].
- [9] 陈坤杰,姬长英.牛肉自动分级技术研究进展分析[J].农业机械学报,2006,37(3):153-156.
- [10] 陈坤杰,秦春芳,姬长英.牛胴体眼肌切面图像的分割方法[J].农业机械学报,2006,37(6):155-158.
- [11] YOSHIKAWA F, TORAIICHI K, WADA K, et al. On a grading system for beef marbling[J]. Pattern Recognition Letters, 2000, 21(12): 1037-1050.

- [12] JACKMAN P, SUN Dawen, ALLEN P. Automatic segmentation of beef *longissimus dorsi* muscle and marbling by an adaptable algorithm[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 187-194.
- [13] HUAN L N, CHOI S, CHO S I, et al. Automatic extraction of lean-tissue contours for beef quality grading[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(3): 251-264.
- [14] JEYAMKONDAN S, RAY N, KRANZLER G A, et al. Beef quality grading using machine vision[C]// Proceedings of the Conference on Biological Quality and Precision Agriculture II, Boston, USA, 2000: 91-101.
- [15] SHIRANITA K, HAYASHI K, OTSUBO A, et al. Grading meat quality by image processing[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(1): 97-104.
- [16] 张丽, 李艳梅, 孙宝忠, 等. 边缘检测、二值化处理进行牛肉分级的应用[J]. 肉类研究, 2013, 27(4): 10-14.
- [17] 陈坤杰, 姬长英. 基于图像运算的牛肉大理石花纹分割方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 195-196.
- [18] 李玮姿. 基于图像处理技术的牛肉大理石纹理自动分级研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 23-34.
- [19] 吴海娟, 彭增起, 张海东, 等. 机器视觉技术在牛肉大理石花纹识别中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 10-13.
- [20] 逢滨, 孙啸, 刘德营, 等. 牛肉眼肌图像在线采集和实时分割系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 189-193.
- [21] 赵杰文, 刘木华, 张海东. 基于数学形态学的牛肉图像中背长肌分割和大理石纹提取技术研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 143-146.
- [22] 刘木华, 段武貌, 黎静, 等. 基于图像处理和支向量机分类的牛肉大理石纹等级评定[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(6): 650-654.
- [23] 刘木华, 赵杰文, 张海东. 基于模糊C均值聚类的牛肉图像中脂肪和肌肉区域分割技术[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 161-163.
- [24] 仇金宏, 沈明霞, 彭增起, 等. 基于改进型FCM算法的牛肉大理石花纹提取方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 184-188.
- [25] CHEN Kunjie, QIN Chunfang. Segmentation of beef marbling based on vision threshold[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 62(2): 223-230.
- [26] 赵文琦, 贾渊, 彭增起. 基于边缘流的水平集牛胴体眼肌图像分割方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(4): 202-205.
- [27] 牛四杰, 贾渊, 刘鹏程. 应用改进的CV模型分割牛肉眼肌图像[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(11): 150-152.
- [28] SUBBIAH J, KRANZLER G A, RAY N, et al. Computer vision segmentation of the *longissimus dorsi* for beef quality grading[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(4): 1261-1268.
- [29] 孟祥艳. 基于改进分水岭算法及Hopfield神经网络的牛肉大理石纹等级评级方法[J]. 食品科学, 2013, 34(1): 140-145.
- [30] 陈坤杰, 吴贵茹, 於海明, 等. 基于分形维和图像特征的牛肉大理石花纹等级判定模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 147-151.
- [31] PANG Bin, SUN Xiao, YE Changwen et al. Grading of beef marbling based on image processing and support vector machine[J]. Computer Modelling and New Technologies, 2013, 17(3): 87-92.
- [32] 周彤, 彭彦昆. 牛肉大理石花纹图像特征信息提取及自动分级方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 286-293.
- [33] 刘瓊瑛, 沈明霞, 彭增起, 等. 雪花牛肉大理石花纹粗糙度和细密度的测定[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 170-174. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201318034.
- [34] 艾虎. 基于计算机视觉的人工神经网络和图像处理技术的牛肉大理石花纹自动分级研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009: 102-103.
- [35] 孟祥艳. 牛肉物理特性与品质的检测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 79-89.
- [36] 汤晓艳, 周光宏, 徐幸莲. 大理石花纹、生理成熟度对牛肉品质的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 114-117.
- [37] 潘超, 彭增起, 周光宏. 中国黄牛生理成熟度和大理石花纹预测[J]. 畜牧与兽医, 2007, 38(10): 32-34.
- [38] HATEM I, TAN J, GERRARD D E. Determination of animal skeletal maturity by image processing[J]. Meat Science, 2003, 65(3): 999-1004.
- [39] HATEM I, TAN Jinglu. Cartilage and bone segmentation in vertebra images[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(5): 1429-1434.
- [40] 刘木华, 赵杰文, 邹小波. 牛胸椎骨图像中软骨和硬骨区域的自动分割技术[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 110-113.
- [41] WU Di, SUN Dawen. Colour measurements by computer vision for food quality control: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 29: 5-20.
- [42] GIROLAMI A, NAPOLITANO F, FARAONE D, et al. Measurement of meat color using a computer vision system[J]. Meat Science, 2013, 93(1): 111-118.
- [43] GERRARD D E, GAO X, TAN J. Beef marbling and color score determination by image processing[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(1): 145-148.
- [44] LARRAÍN R E, SCHAEFER D M, REED J D. Use of digital images to estimate CIE color coordinates of beef[J]. Food Research International, 2008, 41(4): 380-385.
- [45] 贾渊, 汤晓艳, 姬长英. 牛肉颜色的RGB特征[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 86-89.
- [46] 陈坤杰, 孙鑫, 陆秋琰. 基于计算机视觉和神经网络的牛肉颜色自动分级[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 173-178.
- [47] SUN Xin, CHEN Kunjie, BERG E P, et al. Predicting fresh beef color grade using machine vision imaging and Support Vector Machine (SVM) analysis[J]. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2011, 10(12): 1504-1511.
- [48] CHEN Kunjie, SUN Xin, QIN Chunfang, et al. Color grading of beef fat by using computer vision and support vector machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 27-32.
- [49] 沈振宁, 高峰, 李春保, 等. 基于计算机视觉的牛肉分级技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2008, 29(6): 304-306.
- [50] JACKMAN P, SUN Dawen, DU Chengjin, et al. Prediction of beef eating qualities from colour, marbling and wavelet surface texture features using homogenous carcass treatment[J]. Pattern Recognition, 2009, 42: 751-763.
- [51] JACKMAN P, SUN Dawen, ALLEN P. Prediction of beef palatability from colour, marbling and surface texture features of *longissimus dorsi*[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(1): 151-165.
- [52] JACKMAN P, SUN Dawen, DU Chengjin, et al. Prediction of beef eating quality from colour, marbling and wavelet texture features[J]. Meat Science, 2008, 80(4): 1273-1281.
- [53] JACKMAN P, SUN Dawen, ALLEN P, et al. Correlation of consumer assessment of *longissimus dorsi* beef palatability with image colour, marbling and surface texture features[J]. Meat Science, 2010, 84(3): 564-568.
- [54] WULF D M, PAGE J K. Using measurements of muscle color, pH, and electrical impedance to augment the current USDA beef quality grading standards and improve the accuracy and precision of sorting carcasses into palatability groups[J]. Journal of Animal Science, 2000, 78(10): 2595-2607.
- [55] 彭彦昆, 张雷蕾. 农产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 137-145.
- [56] ELMASRY G, SUN Dawen, ALLEN P. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 127-140.
- [57] ELMASRY G, SUN Dawen, ALLEN P. Chemical-free assessment and mapping of major constituents in beef using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(2): 235-246.
- [58] BARBIN D F, ELMASRY G, SUN Dawen, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1162-1171.
- [59] BARBIN D F, ELMASRY G, SUN Dawen, et al. Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 719: 30-42.
- [60] BARBIN D F, ELMASRY G, SUN Dawen, et al. Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 259-268.
- [61] KAMRUZZAMAN M, ELMASRY G, SUN Dawen, et al. Application of NIR hyperspectral imaging for discrimination of lamb muscles[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(3): 332-340.
- [62] WU Jianhu, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 267-273.
- [63] TAO Feifei, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Simultaneous determination of tenderness and *Escherichia coli* contamination of pork using hyperspectral scattering technique[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 851-857.
- [64] 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254-259.
- [65] PENG Yankun, ZHANG Jing, WANG Wei, et al. Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(2): 163-169.
- [66] QIAO Jun, NGADI M O, WANG Ning, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 10-16.
- [67] LI Yongyu, SHAN Jiajia, PENG Yankun, et al. Nondestructive assessment of beef-marbling grade using hyperspectral imaging technology[C]//New Technology of Agricultural Engineering (ICAE), Zibo: International Conference on IEEE, 2011: 779-783.