

# 基于图像纹理特征的牛肉嫩度预测方法研究

王 卫<sup>1</sup>, 沈明霞<sup>1,\*</sup>, 彭增起<sup>2</sup>, 陈士进<sup>1</sup>, 吴海娟<sup>1</sup>, 刘超超<sup>1</sup>, 梁 林<sup>1</sup>, 谌启亮<sup>2</sup>

(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:** 在经过图像预处理, 背最长肌与大理石花纹的分割, 并实现大理石花纹特征值的提取后, 利用灰度共生矩阵提取 4 个对嫩度剪切力贡献较大的纹理特征参数, 并统计这些参数应用多元线性回归建立牛肉嫩度剪切力预测模型。结果表明: 可见光下利用纹理特征预测牛肉嫩度的方法能够以 96% 的准确率实现嫩度剪切力等级的预测, 具有较高的商用开发价值。

**关键词:** 牛肉; 嫩度; 纹理; 灰度共生矩阵; 多元线性回归

## Prediction of Beef Tenderness Based on Image Texture Features

WANG Wei<sup>1</sup>, SHEN Ming-xia<sup>1,\*</sup>, PENG Zeng-qi<sup>2</sup>, CHEN Shi-jin<sup>1</sup>, WU Hai-juan<sup>1</sup>,

LIU Chao-chao<sup>1</sup>, LIANG Lin<sup>1</sup>, CHEN Qi-liang<sup>2</sup>

(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:** A mathematical modeling method for predicting beef tenderness utilizing image texture features under visible light was proposed. After image preprocessing, beef *longissimus dorsi* muscle and marbling were segmented, and then four marbling features that greatly influence beef shear force as a measure of meat tenderness were extracted by grey-level co-occurrence matrix (GLCM) technique and statistically analyzed to establish a multiple linear regression model for predicting beef shear force. The proposed predictive method for beef shear force allowed 96% accurate prediction of beef tenderness, indicating its high value for commercial application.

**Key words:** beef; tenderness; texture; gray level co-occurrence matrix; multiple linear regression

中图分类号: TS251.52; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)15-0061-05

牛肉是人类食用的主要肉类产品之一, 是一种营养价值较高的食物。随着经济的发展, 人民生活水平的提高, 近几年中国牛肉生产和消费持续稳定增长。人民对牛肉的食用品质的要求也不断提高, 人们大都从色、香、味、嫩等几个方面来评价, 形成了嫩度、颜色、风味、系水力和多汁性等指标<sup>[1]</sup>。其中, 肉的嫩度反映其质地及食用时口感的老嫩<sup>[2]</sup>, 由肌肉中各种蛋白质结构特性决定。牛肉嫩度评价是其食用品质质量的重要指标, 是消费者评判牛肉品质优劣的最常用指标, 直接影响牛肉的食用和商业价值。

现在对牛肉嫩度评价的主要方法有感官评价和剪切

力检测<sup>[3]</sup>。人工感官评价准备比较繁琐, 易受主观因素干扰, 通常误差较大。剪切力方法, 即使用剪切仪检测牛肉嫩度, 这种方法对肉有破坏作用, 操作时间长, 不适合工厂在线生产中应用。因此开发一种基于及其视觉的牛肉嫩度的无损、快速的在线检测技术和系统成为一种需要。

在肉制品品质无损检测中, 近红外光谱(NIR)、高光谱和可见光下的机器视觉技术都被用于嫩度检测。NIR 技术已经被应用于牛肉嫩度检测, 然而, 据预测结果分析, 与实际结果存在较大差异, 处理速度也很缓慢<sup>[4-7]</sup>。

收稿日期: 2011-07-28

基金项目: 国家现代农业(肉牛)产业技术体系项目(080600231; 080600232); 农业科技成果转化资金项目(SQ2011ECC100043); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 王卫(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机器视觉与图像处理在农产品品质检测领域中的应用。

E-mail: williamkingdom@gmail.com

\* 通信作者: 沈明霞(1964—), 女, 教授, 博士, 研究方向为机器视觉和信息农业。E-mail: mingxia@njau.edu.cn

高光谱技术最近成为嫩度及肉品质检测的一个热点,其结合检测样本的光谱与空间信息,能获取较为全面的信息,但其存在系统成本高、数据量大、处理时间长等缺点<sup>[8-12]</sup>。

国内外学者<sup>[13-17]</sup>也开发了基于及其视觉的肉制品嫩度检测技术,研究了肉色、大理石花纹信息、反映图像纹理信息的灰度矩阵特征与牛肉嫩度的预测关系,结果表明利用灰度共生矩阵提取的纹理特征对牛肉嫩度预测结果有较大的贡献值。国内,孙永海等<sup>[13]</sup>把牛肉分为两类,对大理石花纹丰富的牛肉采用大理石花纹信息预测,而对大理石花纹不丰富的,则采用灰度空间矩阵法预测牛肉嫩度。

基于以上研究经验,可见光下牛肉切面的纹理特征参数与牛肉嫩度有密切联系,牛肉切面的大理石花纹特征参数也一定程度上影响着牛肉嫩度值,将两者结合建立牛肉嫩度预测模型能够更好的预测各种不同牛肉样本的嫩度值。本实验结合使用剪切仪测量的牛肉样本眼肌切面的嫩度剪切力值,利用灰度共生矩阵提取出图像各纹理等特征值,并提取出牛肉眼肌切面图片的大理石花纹特征值,采用主成分分析方法,优化选择了角二阶矩、惯性矩、局部平稳性、熵、花纹面积以及花纹周长特征变量,并应用多元线性回归建立剪切力预测模型,实现在线的牛肉嫩度预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 牛肉样本

牛肉样本取自安徽省瀚森荷金来肉牛集团,选择的牛种类为西门塔尔牛。取样过程为:90头牛龄在54~72个月之间的西门塔尔牛屠宰前对其编号,屠宰后,经过2d的排酸后,进行分割,取胴体二分体之一第12~13根肋骨之间的西冷和眼肌牛肉,经过工作人员修剪后,即可进行图片采集。此部位较其他部位的食用价值高,且牛肉大理石花纹一般比较丰富,故重点对此区域的眼肉和外脊肉进行分析和判别。其中50片为眼肌牛肉,用于建立多元线性回归模型以训练样本;其余40片为非眼肌区域的外脊牛肉,用于验证判别模型的判别效果。在采集牛肉切面图片后,装袋编号冷藏,供测剪切力值使用。

### 1.2 仪器与设备

图像采集系统(MVC2900F USB2.0 CCD工业相机、PENTEX H614镜头以及的HPD-150SW LED圆顶照明光源) 美国CCS公司;C-LM3B数显式肌肉嫩度仪 东北农业大学研制;便携式的移动终端 南京农业大学研制。

肌肉嫩度仪获取牛肉样本的剪切力,用于建立预测

模型以及检验比较模型的准确性。放置连接各硬件后,将牛肉样本置于工作台上,调节光源亮度和方向,调节相机焦距和光圈使图像最为清晰,保证纹理和花纹信息的充分获取,记录、固定这些实验条件和硬件参数,并在实验中保证这些硬件参数的一致性。便携式的移动终端用以采集牛肉切面图片信息,传输至服务器端,判级后将嫩度等级回传至便携式移动终端。

### 1.3 图像的处理

牛肉图片信息往往含有一些畸变和噪声,为便于在稳定的图片信息下更好的获取牛肉切面图片特征信息,需要对这些噪声进行预处理。通过实验,采用滤波锐化的效果较好。在对牛肉图像进行预处理后,进行对各个特征参数的提取以及处理分析。

#### 1.3.1 大理石花纹特征

首先,对牛肉切面图片使用加权平均算法实现图片的灰度化,利用自适应阈值法二值化图片<sup>[18]</sup>。背最长肌的以及大理石花纹的分割的方法有很多<sup>[19-21]</sup>,本研究中实现背膘脂肪和背最长肌的分割,再利用模糊C均值等算法实现大理石花纹的分割。

其次,根据大量实验数据,为了能获取较全面的大理石花纹信息,同时避开背膘脂肪和背景对大理石花纹信息的提取的影响,分析选取图片中的最优目标区域。最终规定了特征提取时图像某一固定矩形区域<sup>[22]</sup>,用以获取像素灰度信息。

再次,对以上的牛肉切面目标区域,分析提取大理石花纹的面积和以及大理石花纹的周长和。并依此确定参数牛肉大理石花纹面积和密度以及大理石花纹周长比例。

$$\sigma = \frac{A_m}{A_i}; \lambda = \frac{C_m}{A_i} \quad (1)$$

式中: $A_i$ 为牛肉眼肌切面目标区域面积; $A_m$ 为各个样本的大理石花纹面积和; $\sigma$ 为样本的大理石花纹密度; $C_m$ 为大理石花纹周长和; $\lambda$ 为样品大理石花纹比例。

#### 1.3.2 牛肉图像纹理特征

牛肉嫩度除了与大理石花纹脂肪含量有关,往往与牛肉眼肌切面肌肉的肌束纤维的直径、密度、横截面积及其分布密切相关。肌肉纤维越细,密度越大,牛肉越嫩。因此,需要研究牛肉背最长肌眼肌区域切面图片的信息,分析纹理特征,提取纹理特征,并筛选对嫩度值贡献大的特征,用以预测牛肉嫩度。纹理是一种反映像素的空间分布属性的图像特征<sup>[23]</sup>,通常表现为局部不规则而宏观有规律的特性。

现在技术较成熟且应用广泛的图像纹理分析的方法为灰度共生矩阵方法(GLCM),最早由Haralick等<sup>[24]</sup>在

1973年首次提出,其检测结果比光谱法以及灰度游程方法更好。该方法广泛应用于图像纹理特征的提取,例如暴雨过程中的卫星云图纹理特征提取<sup>[25]</sup>,以及基于纹理特征的图像检索研究<sup>[26]</sup>。故本实验选择灰度共生矩阵来提取分析牛肉眼肌切面的纹理特征。

灰度共生矩阵为图像像素灰度二阶统计的度量。其共生矩阵基元 $P(i, j, d, \theta)$ 为在相距 $d$ 个像素距离,  $\theta$ 方向上,分别出现灰度值为 $i$ 和灰度值 $j$ 的两个像素点的频数。对于距离 $d$ 而言,若与纹理粗糙度相比较小,像素间灰度比较平滑,亮度趋于相似,则共生矩阵 $P(i, j, d, \theta)$ 的元素在对角线附近分布密集;若 $d$ 较大,像素间灰度分布不均,则共生矩阵 $P(i, j, d, \theta)$ 元素将离开对角线分散在各处。本实验中选择 $d$ 为2,  $\theta$ 为0。灰度共生矩阵的定义公式如下:

$$P(i, j, d, \theta) = \{[(x, y), (x + \Delta x, y + \Delta y)], f(x, y) = i; f(x + \Delta x, y + \Delta y) = j; x = 640; y = 480\} \quad (2)$$

式中:  $(x, y)$ 为像素点坐标; 640和480为图像像素的列和行的数目。

获取的牛肉图片为3通道的8位彩色灰度级的图片,每通道具有256个灰度级。如果直接使用灰度共生矩阵来提取各个特征,计算量将非常大,消耗不必要的系统资源。为此,根据研究表明<sup>[13]</sup>,需要将图像像素灰度级降为16级。经过简化的图像信息精度有所损失,但是不影响纹理特征的提取。灰度正规化公式如式(3)所示。

$$F(x, y) = \text{INT} \left[ \frac{f(x, y) \times 15}{255} \right] + 1 \quad (3)$$

通过数据分析以及主成分分析遴选Haralick提出的14种纹理特征,选择4个对牛肉嫩度值贡献较大的特征,分别如下:

1)角二阶矩

$$f_1 = \text{ASM} = \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} P^2(i, j)$$

2)惯性矩

$$f_2 = \text{CON} = \sum_{i=0}^{15} (i - j)^2 \{ \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} P(i, j) \}$$

3)局部平稳性

$$f_5 = \text{IDM} = \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} \frac{P(i, j)}{(i - j)^2 + 1}$$

4)熵

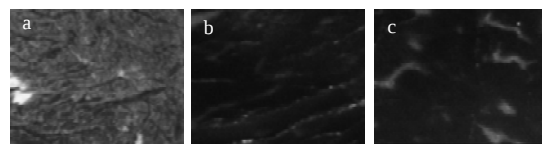
$$f_9 = \text{ENT} = - \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} P(i, j) \lg P(i, j) \quad (4)$$

#### 1.4 剪切力评估

在进行牛肉切面图像的采集和处理后,对牛肉剪切力进行测量。取样本称量,将其装入塑料袋,在肌肉中心避开结缔组织和脂肪插入温度弹头,放入水中,进行水浴,其温度控制在75~80℃,加热至探头温度70℃,取出样本称量;之后,用保鲜膜包装好,放置于4℃条件下冷却24h。顺牛肉肌肉纤维方向切取剪切样本10

个,长度为5mm,用特制刀具切取的切面尺寸控制在10mm×10mm,对每个牛肉样本的10个剪切样本垂直肌肉方向置于嫩度仪刀片下,剪切后,记录下实验数据,求取该10个剪切力的平均值作为该牛肉样本的嫩度值。

将实验中的32个样本的平均剪切力与人工感官评价的得分对比分析,得出牛肉剪切力小于6kg的为嫩牛肉;牛肉剪切力介于6~9kg之间的为中等牛肉;牛肉剪切力大于9kg的为老牛肉。分别赋他们的等级为A、B、C。图1是3个不同嫩度等级的牛肉切面的纹理图片。



a.A级嫩度; b.B级嫩度; c.C级嫩度。

图1 3种不同等级的牛肉切面纹理图像

Fig.1 Three representative beef texture images of different tenderness grades

## 2 建立多元线性回归数学模型

### 2.1 统计数据

令 $f_{15} = A_m$ ,  $f_{16} = C_m$ , 结合 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_5$ 和 $f_9$ , 经过牛肉图片相关参数的提取和剪切力的测量得出了对应牛肉样本的统计数据。选其中10个样本, 统计数据如表1所示。

表1 牛肉图片嫩度特征参数提取实验结果

Table 1 Extraction of parameter values from beef images related to beef tenderness

| 图片编号 | 角二阶矩     | 惯性矩      | 局部平稳性    | 熵        | 花纹面积 | 花纹周长 | 熟肉嫩度 |
|------|----------|----------|----------|----------|------|------|------|
| 1    | 0.500620 | 0.395161 | 0.848072 | 1.042961 | 1357 | 262  | 6.92 |
| 2    | 0.642611 | 0.223168 | 0.898934 | 0.749746 | 1484 | 240  | 6.2  |
| 3    | 0.611244 | 0.343438 | 0.878791 | 0.856202 | 1518 | 429  | 8.29 |
| 4    | 0.478878 | 0.400128 | 0.839275 | 1.134859 | 1755 | 332  | 9.34 |
| 5    | 0.546010 | 0.366070 | 0.859510 | 0.983262 | 1518 | 269  | 8.18 |
| 6    | 0.623125 | 0.246581 | 0.894195 | 0.809260 | 1098 | 240  | 7.58 |
| 7    | 0.532866 | 0.278518 | 0.874677 | 0.954853 | 1352 | 236  | 7.33 |
| 8    | 0.518989 | 0.293651 | 0.865769 | 0.996725 | 1504 | 168  | 6.38 |
| 9    | 0.574497 | 0.260322 | 0.881198 | 0.882212 | 1573 | 291  | 8.57 |
| 10   | 0.666617 | 0.209441 | 0.908225 | 0.697957 | 1349 | 218  | 7.98 |
| 11   | 0.610997 | 0.237097 | 0.895081 | 0.804502 | 1313 | 218  | 7.6  |
| 12   | 0.743104 | 0.177637 | 0.927986 | 0.567819 | 2744 | 567  | 7.00 |
| 13   | 0.599946 | 0.341818 | 0.876069 | 0.878764 | 2807 | 402  | 9.10 |
| 14   | 0.539101 | 0.378484 | 0.857550 | 0.998846 | 1908 | 392  | 9.60 |
| 15   | 0.583009 | 0.363162 | 0.870690 | 0.910893 | 2211 | 606  | 7.7  |
| 16   | 0.723871 | 0.278375 | 0.914190 | 0.626768 | 2786 | 402  | 9.00 |
| 17   | 0.602284 | 0.285042 | 0.880524 | 0.855267 | 2670 | 726  | 7.20 |

续表 1

| 图片编号 | 角二阶矩     | 惯性矩      | 局部平稳性    | 熵        | 花纹面积 | 花纹周长 | 熟肉嫩度 |
|------|----------|----------|----------|----------|------|------|------|
| 18   | 0.628689 | 0.429038 | 0.873225 | 0.853777 | 2715 | 574  | 6.80 |
| 19   | 0.753286 | 0.208735 | 0.925089 | 0.554825 | 2807 | 425  | 9.70 |
| 20   | 0.717652 | 0.244469 | 0.913493 | 0.626125 | 1870 | 441  | 7.40 |
| 21   | 0.610901 | 0.532495 | 0.861257 | 0.914938 | 2807 | 402  | 8.00 |
| 22   | 0.481973 | 0.548480 | 0.820941 | 1.153377 | 2807 | 702  | 5.20 |
| 23   | 0.509530 | 0.383271 | 0.845385 | 1.028692 | 2807 | 402  | 5.70 |
| 24   | 0.507554 | 0.456529 | 0.837507 | 1.080553 | 2807 | 410  | 5.90 |
| 25   | 0.538165 | 0.389422 | 0.855906 | 0.992127 | 2786 | 623  | 5.80 |
| 26   | 0.600354 | 0.540587 | 0.864403 | 0.924571 | 2788 | 437  | 6.10 |
| 27   | 0.548668 | 0.443053 | 0.852906 | 0.984367 | 2503 | 868  | 5.20 |
| 28   | 0.567282 | 0.606543 | 0.837688 | 1.024173 | 1919 | 444  | 6.10 |
| 29   | 0.402870 | 1.052163 | 0.773114 | 1.456690 | 2807 | 402  | 6.50 |
| 30   | 0.674005 | 0.360729 | 0.892013 | 0.749793 | 1949 | 527  | 5.80 |
| 31   | 0.531674 | 0.613655 | 0.831551 | 1.121316 | 2138 | 638  | 6.50 |
| 32   | 0.483237 | 0.784038 | 0.805505 | 1.238811 | 2764 | 824  | 5.90 |
| 33   | 0.537168 | 0.385424 | 0.832606 | 0.993515 | 2779 | 640  | 5.70 |
| 34   | 0.626211 | 0.229167 | 0.899986 | 0.748345 | 1487 | 239  | 6.30 |
| 35   | 0.627789 | 0.423089 | 0.855886 | 0.852375 | 2713 | 572  | 6.70 |
| 36   | 0.609951 | 0.231097 | 0.890109 | 0.803103 | 1315 | 216  | 7.55 |
| 37   | 0.491876 | 0.400724 | 0.840952 | 1.133485 | 1751 | 330  | 9.40 |
| 38   | 0.603291 | 0.291064 | 0.879916 | 0.835697 | 2674 | 730  | 7.10 |
| 39   | 0.533781 | 0.272519 | 0.875698 | 0.953459 | 1349 | 233  | 7.50 |
| 40   | 0.505551 | 0.460525 | 0.822106 | 1.081953 | 2806 | 408  | 5.92 |
| 41   | 0.409071 | 1.076065 | 0.774118 | 1.455269 | 2808 | 401  | 6.60 |
| 42   | 0.545094 | 0.360987 | 0.871698 | 0.984661 | 1522 | 271  | 8.30 |
| 43   | 0.612247 | 0.349737 | 0.877766 | 0.860102 | 1525 | 433  | 8.40 |
| 44   | 0.752357 | 0.202795 | 0.926087 | 0.584625 | 2801 | 421  | 9.80 |
| 45   | 0.667468 | 0.215981 | 0.903975 | 0.712067 | 1350 | 215  | 7.90 |
| 46   | 0.510595 | 0.389370 | 0.845352 | 1.022292 | 2804 | 400  | 5.60 |
| 47   | 0.586330 | 0.369234 | 0.869691 | 0.912298 | 2212 | 610  | 7.78 |
| 48   | 0.527668 | 0.442653 | 0.851907 | 0.985751 | 2502 | 863  | 5.10 |
| 49   | 0.538104 | 0.372487 | 0.858551 | 1.031425 | 1911 | 400  | 9.50 |
| 50   | 0.545091 | 0.360911 | 0.868701 | 0.984668 | 1522 | 270  | 8.20 |

## 2.2 建立嫩度预测模型

由 50 组实验数据, 用 SPSS 16.0 软件进行线性回归分析, 得出嫩度剪切力预测模拟模型, 其显著性水平小于 0.05, 相关系数  $r$  为 0.679, 其判别式如下:

$$y = -137.926 + 74.967f_1 - 12.948f_2 + 69.505f_3 + 50.635f_9 + 0.01f_{15} - 0.03f_{16} \quad (5)$$

式(5)结合各个特征值的物理含义, 分析其系数与嫩度剪切力值的对应关系。 $f_1$  与嫩度剪切力值呈正相关,  $f_1$  用来度量图像纹理的分布均匀性, 其值越小说明纹理灰度变化越大, 从而对应着牛肉纹理较细、嫩度较嫩的图片; 反之, 则对应着纹理较粗嫩度较老的图片。 $f_2$  与  $y$  呈负相关, 其物理含义为图像纹理的清晰度, 其值越小纹理纹沟越浅, 越模糊, 说明嫩度越老; 反之, 则越清晰, 则牛肉嫩度越嫩。 $f_3$  与嫩度值成正相关,  $f_3$  用于衡量图像纹理的同质性, 反映局部变化大小, 其值越小, 则说明图像区域间变化大, 对应牛肉嫩度则越嫩; 反之, 则越老。 $f_9$  与嫩度剪切力成正相

关, 其值用于衡量图像所含的信息量, 若其值越小, 对应着的牛肉嫩度值越小; 反之, 则越大。 $f_{15}$  为牛肉切面大理石花纹面积和, 其值越大, 肥育时间越长, 反映着牛龄越大, 则牛肉嫩度剪切力值越大, 由于本实验中样本大致花纹不是很丰富, 则其系数偏小; 反之, 则越小。 $f_{16}$  为大理石花纹的周长和, 其值越小, 说明大理石花纹脂肪块越呈现大块状, 花纹对嫩度的影响小, 则相对而言剪切力值越大; 反之, 其值若越大, 则说明, 大理石花纹分布较均匀, 则牛肉越嫩, 剪切力值越小。

## 2.3 多元线性回归模型预测分析

根据 50 组眼肌区域切面数据和多元线性回归预测模型, 建立熟肉嫩度剪切力值与本研究模型中模型的预测结果的对比散点图, 如图 2a 所示。用另外 40 组非眼肌区域的外脊切面数据用来验证所建立模型的预测效果, 如图 2b 所示。

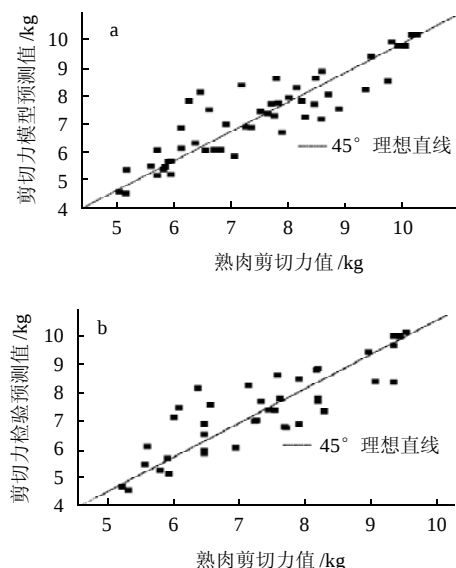


图 2 多元线性回归模型预测结果

Fig.2 Linear plots of predicted versus measured values of beef shear force revealing accuracy of the prediction model

由图 2 及其对应的数据分析, 得到模型拟合结果: 预测模型对嫩度等级 A 判别的准确率为 90.9%; 预测模型对嫩度等级 B 判别的准确率为 100%; 预测模型对嫩度等级 C 判别的准确率为 86%。对于各个等级总的预测模型判别的准确率为 96%。外脊切面图片的验证结果为: 嫩度等级 A 验证判别的准确率为 85.7%; 嫩度等级 B 验证判别的准确率为 100%; 嫩度等级 C 验证判别的准确率为 83.3%。对于各个等级总的验证判别的准确率为 92.5%。因此, 总体样本嫩度剪切力预测准确率较高, 对于机器视觉的牛肉嫩度预测效果较好, 具有较好的实用价值和现实指导意义。

### 3 结 论

国内外许多学者在可见光下对牛肉嫩度预测都做了研究, 最终的目的都是在较小的硬件投入下, 用较小的时间, 以较高的准确率预测出牛肉嫩度。本研究实现了基于牛肉切面图像纹理的灰度共生矩阵的4个特征参数以及大理石花纹的特征参数的提取, 研究了它们与牛肉嫩度剪切力值的关系。其主要结论如下:

1) 提取灰度共生矩阵的各个特征参数值, 根据主成分分析, 选取对嫩度剪切力贡献值最显著的4个特征值: 角二阶矩、惯性矩、局部平稳性和熵。

2) 结合大理石花纹提取算法, 提取出大理石花纹的2个特征参数值: 大理石花纹面积和大理石花纹周长和。利用这2个参数和上述4个参数, 对熟肉嫩度值建立多元线性回归模型。得到相关系数 $r$ 为0.679, 各个图像特征参数的系数都较好的反映了其与牛肉嫩度剪切力的对应关系。

3) 检验回归模型嫩度判级效果, 嫩度等级A判别的准确率为85.7%, 嫩度等级B判别的准确率为100%, 嫩度等级C判别的准确率为83.3%。结果表明, 利用牛肉图像纹理特征和大理石花纹特征建立的多元线性回归模型对嫩度的预测和分类是可行的, 有较高的预测率, 硬件成本合理, 处理速度很快, 对牛肉而言为无损检测, 具有较高的研究和实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] 徐霞, 成芳, 应义斌. 近红外光谱技术在肉品检测中的应用和研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1876-1880.
- [2] 周光宏. 肉品学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [3] 赵杰文, 翟剑妹, 刘木华, 等. 牛肉嫩度的近红外光谱法检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 640-642.
- [4] BOWLING M B, VOTE D J, BELK K E, et al. Using reflectance spectroscopy to predict beef tenderness[J]. Meat Science, 2009, 82(1): 1-5.
- [5] XIA J J, BERG E P, LEE J W, et al. Characterizing beef muscles with optical scattering and absorption coefficient  $s$  in VIS/NIR region[J]. Meat Science, 2007, 75(1): 78-83.
- [6] PARK B, CHEN Y R, HURSCHKA W R, et al. Near-infrared reflectance analysis for predicting beef *longissimus* tenderness[J]. Journal of Animal Science, 1998, 76(8): 2115-2120.
- [7] BYRNE C E, DOWNEY G, TROY D J, et al. Nondestructive predic-

tion of selected quality attributes of beef by near-infrared reflectance spectroscopy between 750 and 1098 nm[J]. Meat Science, 1998, 49(4): 399-409.

- [8] 陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2602-2607.
- [9] 吴建虎, 彭彦昆, 陈菁菁, 等. 基于高光谱散射特征的牛肉品质参数的预测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1815-1819.
- [10] 吴建虎, 彭彦昆, 江发潮, 等. 牛肉嫩度的高光谱检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 135-139.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 孙永海, 鲜于建川, 石晶. 基于计算机视觉的冷却牛肉嫩度分析方法[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 102-105.
- [14] 刘木华, 伍德林, 赵文杰. 计算机图像技术在牛肉品质检测中的应用(综述)[J]. 安徽农业大学学报, 2004, 13(4): 427-430.
- [15] LI J, TAN J, MARTZ F A, et al. Image texture feature as indicators of beef tenderness[J]. Meat Science, 1993, 53(1): 17-22.
- [16] CHANDRARATNE M R, SAMARASINGHE S, KULASIRI D, et al. Prediction of lamb tenderness using image surface texture features[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 492-499.
- [17] VOTE D J, BELK K E, TATUM J D, et al. Online prediction of beef tenderness using a computer vision system equipped with a BeefCam module[J]. Journal of Animal Science, 2003, 81(2): 457-465.
- [18] 谢凤英, 赵丹培. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 58-100.
- [19] 伍学千, 廖宜涛, 樊玉霞, 等. 基于KFCM和改进分水岭算法的猪肉背最长肌分割技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 172-176.
- [20] 赵杰文, 刘木华, 张海东. 基于数学形态学的牛肉图像中背最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.
- [21] 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[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 161-163.
- [22] 仇金宏, 彭增起, 沈明霞, 等. 基于非完全信息算法的牛肉大理石花纹提取方法[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 166-169.
- [23] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(4): 622-635.
- [24] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(6): 610-621.
- [25] 寿亦萱, 张颖超, 赵忠明, 等. 暴雨过程的卫星云图纹理特征研究[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 337-343.
- [26] 张建军, 李铁. 基于纹理特征的图像检索系统设计[J]. 长沙大学学报, 2009, 23(2): 83-85.