

基于分形维和图像特征的牛肉大理石花纹等级判定模型*

陈坤杰 吴贵茹 於海明 刘德莹

(南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

【摘要】 采集135个牛胴体眼肌样本,参照中国牛肉质量标准的大理石图版,由3人评定小组评定出每一个样本的大理石花纹等级,再用数码相机采集每一个样本的数字图像。用图像处理技术对每一幅图像进行降噪、分割等处理,提取出牛肉大理石花纹,并计算出牛肉大理石花纹的面积比率、总脂肪颗粒数和大小脂肪颗粒数;然后用变尺度的方法,测定出每个牛肉大理石花纹样本图像的计盒维数和信息维数;以这些参数为基础,分别建立牛肉大理石花纹等级判定的多元线性模型和多元多项式模型。实验结果表明,利用多元线性模型和多元多项式模型判定牛肉大理石花纹等级,预测正确率分别为75%和87.5%。

关键词: 牛肉 大理石花纹 等级 判定模型 分形维 图像处理

中图分类号: TS207 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0147-05

Prediction Model of Beef Marbling Grades Based on Fractal Dimension and Image Features

Chen Kunjie Wu Guiru Yu Haiming Liu Deying

(Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

In order to establish predicting models for beef marbling grade, one hundred and thirty-five beef rib-eye samples were collected from a beef processing factory. A three-grader panel was employed to assign each sample a marbling score according to the official standard cards. Then images of each sample were captured with a CCD camera. The beef marbling images were separated and the indicators such as ratio of fat area, the total number of fat particles and numbers of the big and the small fat particles were obtained by using image processing technologies. After fractal dimensions of marbling images was calculated through the varying megascopic degree method, a multiple linear regression model and a multiple polynomial model for the prediction of marbling score were derived based on the obtained fractal dimensions and image feature parameters. Validation results showed that the correct percentage of the marbling grade predicted by the multiple linear model and by the multiple polynomial model were 75% and 87.5%, respectively, indicating that beef marbling grades can be determined by using fractal dimension and image processing method.

Key words Beef, Marbling, Grade, Prediction model, Fractal dimension, Image processing

引言

目前,国内外对牛肉大理石花纹等级是由专业的牛肉质量评定师参照牛肉大理石花纹标准图版,

根据牛胴体眼肌切面背长肌区域内脂肪的丰富程度来判定。这种人工主观判定的方法,不仅效率低,而且还存在明显的判断误差^[1]。20世纪80年代以来,随着计算机技术的快速发展,将计算机视觉和图

像处理技术应用于牛肉质量等级的自动判定,成为牛肉自动分级技术研究的主要方向^[2-6]。

牛肉大理石花纹的等级,通常是以牛胴体眼肌切面处大理石状脂肪花纹的丰富程度来判定。而大理石花纹的丰富程度包括脂肪的数量和分布状态。目前,主要是根据牛胴体眼肌切面肌内脂肪面积、脂肪颗粒数以及脂肪颗粒周长等参数建立数学模型来对牛肉大理石花纹等级进行自动判定^[7-9]。而关于牛肉眼肌切面肌内脂肪分布特征以及以脂肪分布特征参数为变量来建立判断模型的研究和报道很少。由于脂肪面积、脂肪颗粒数和脂肪颗粒周长等参数仅仅表征了牛肉大理石花纹的数量特征,不能反映其分布特征,因此,以此为基础建立的模型不能完全准确地反映出大理石花纹的丰富程度,必须以数量特征和分布特征两个方面的定量描述参数建立牛肉大理石花纹等级的判定模型,才能实现对牛肉大理石花纹等级的准确预测和判断。

作为一种自然的纹理图形,牛肉大理石花纹在一定的标度内具有显著的分形特征。根据分形理论,分形维可以描述一幅分形图像(或图形)的复杂程度,表示分形元素在一个二维平面区域的充满度^[10-12]。因此,采用分形维对具有分形特征的牛肉大理石花纹进行几何特征的描述,为一种理想的方法。

本研究基于计算机图像处理技术和分形理论,以牛胴体眼肌切面背长肌区域图像的计盒维数作为描述牛胴体眼肌切面大理石花纹分布状态的定量指标,再辅以脂肪面积比、脂肪颗粒总数、大脂肪颗粒数、小脂肪颗粒数等反映大理石花纹的数量参数,以多元回归的方法建立牛肉大理石花纹等级判定的数学模型,实现牛肉大理石花纹等级的自动判定和预测。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

在山东东营大王牛肉屠宰加工厂采集经过 72 h 排酸后,第 12 和 13 肋骨间牛眼肌样本 135 个,由 3 名熟悉我国牛肉分级制度的专业人员组成大理石花纹等级判定小组,参照中国牛肉分级标准的大理石花纹等级标准图版,给出每个样本的大理石花纹等级。然后将牛肉样本置于工作台上,在自然光照条件下,用美能达 Z1 型数码相机(2 048 × 1 536 像素)对每个牛肉样本进行拍摄,得到牛肉样本的数字图像,以 RGB 格式存储于计算机。样本分为两部分,随机抽出 127 个为训练集,用于建模,其余 8 个样本为验证集,用于对模型预测精度的验证。

1.2 图像处理

将所有样本图像进行降噪、分割以及形态学等处理,提取出二值化的牛肉大理石花纹图像,再利用这些图像进行分形维、脂肪面积比、脂肪颗粒数等特征参数计算。详细的图像处理方法及步骤参照文献[13~15]。

1.3 计盒维数和信息维数的测定方法

有关研究显示^[16],牛肉大理石花纹的等级与计盒维数、信息维数密切相关,随着牛肉大理石花纹等级的升高,计盒维数和信息维数随之增大。计盒维数的测定采用文献[16~17]所述的变尺度数格子数方法:首先用一个矩形将一幅经过预处理的牛肉大理石花纹图像覆盖,再将此矩形均匀地划分成边长为 r 的若干小矩形(称为盒子),然后计算出取不同网格边长时,含有脂肪像素的网格数 $N(r)$ 。对于分形体, $N(r)$ 与 r 将满足

$$N(r) \propto (1/r)^{D_B} \quad (1)$$

式中 D_B ——计盒维数

在实际计算时,将式(1)两边取对数,绘出 $\lg N(r) - D_B \lg(1/r)$ 关系图,通过直线拟合,求出直线的斜率,即可确定牛肉大理石花纹的计盒维数 D_B 。

同样以变尺度的数格子数方法,计算牛肉大理石花纹的信息维。取不同网格边长 r 时,对分形体,脂肪信息量 $I(r)$ 满足

$$I(r) \propto (1/r)^{D_I} \quad (2)$$

通过直线拟合求斜率的方法,得到牛肉大理石花纹的信息维数 D_I 。

1.4 脂肪面积比率

脂肪面积比率是指在牛胴体眼肌切面背长肌区域中,所有脂肪区域的面积之和与整个背长肌区域面积的比值。背长肌区域面积以背长肌区域所有像素点的总和表示;脂肪面积通过统计背长肌区域脂肪像素点的数量和得到。

1.5 脂肪颗粒总数

在经过二值化处理的牛胴体眼肌切面背长肌区域图像中,每一个周边被肌肉区域(灰度为 0)包围、而与其邻近脂肪区域(灰度为 1)不连通的独立脂肪区域,称为一个脂肪颗粒。采用区域标记的方法,对独立脂肪区域进行计数,即得到脂肪颗粒总个数。

1.6 大脂肪颗粒数

在经过二值化处理的牛胴体眼肌切面背长肌区域图像中,面积大于平均脂肪颗粒面积的脂肪颗粒为大脂肪颗粒。脂肪颗粒的大小计算式为

$$F_i = 10\,000 \sum_{i=1}^n f_i / (AN) \quad (3)$$

式中 f_i ——第 i 个脂肪颗粒面积

A——背长肌区域面积

N——脂肪颗粒总数

按以上算法,首先计算出所有样本图像中脂肪颗粒的大小及平均值,然后再统计计算大于平均尺寸的脂肪颗粒个数,即得到大脂肪颗粒数。

1.7 小脂肪颗粒数

与大脂肪颗粒的定义类似,令小于平均脂肪颗粒面积的脂肪颗粒为小脂肪颗粒。

1.8 数据统计与处理

图像处理及数据分析采用主频为 1.7 GHz、128 MB 内存、30 GB 硬盘的电子计算机;图像处理程序采用 VC++ 语言编写。利用 SPSS 软件进行数据统计计算和模型的回归分析。

2 实验结果与讨论

2.1 牛肉大理石花纹等级判定的多元线性回归模型

以脂肪面积比率、脂肪颗粒总数、大脂肪颗粒数、小脂肪颗粒数及计盒维数为自变量,以牛肉大理石花纹等级为应变量,构成多元线性方程

$$Y = b + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 \quad (4)$$

式中 Y——牛肉大理石花纹等级

X_1 ——计盒维数

X_2 ——脂肪面积比率

X_3 ——大脂肪颗粒数

X_4 ——小脂肪颗粒数

X_5 ——脂肪颗粒总数

b——截距

a_i ——待定系数

为获得最优拟合模型,采用 R^2 最优准则从所有

可能的回归方程中筛选最优回归方程。分别采用 2 个、3 个、4 个和 5 个自变量构建牛肉大理石花纹等级预测的回归模型,并对模型进行显著性检验,不同自变量回归模型的决定因子如表 1 所示。

表 1 R^2 最优准则下不同自变量回归模型的决定因子

Tab.1 Determining factors of regression models with different variables at R^2 rule

变量个数	变量	最优 R^2
2	计盒维数、脂肪面积比率	0.618
3	计盒维数、脂肪面积比率、大脂肪颗粒数	0.623
4	计盒维数、脂肪面积比率、大(小)颗粒数、颗粒总数	0.623
5	计盒维数、脂肪面积比率、大颗粒数、小颗粒数、颗粒总数	0.623

回归分析表明,所有回归模型都在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下高度显著,显示牛肉大理石花纹等级可以用多变量的线性方程进行预测。同时,表 1 还显示出,采用计盒维数、脂肪面积比率和脂肪颗粒数 3 个自变量构建模型,其相关因子 R^2 达到最大值 0.623,当采用 4 个和 5 个变量构建模型,模型的拟合度没有得到进一步改善,因此,牛肉大理石花纹等级的预测模型,可以表示为以计盒维数、脂肪面积比率和脂肪颗粒数为自变量的三元线性回归方程,即

$$Y = 7.161 - 0.627X_1 - 18.715X_2 + 0.009X_3 \quad (5)$$

2.2 牛肉大理石花纹等级判定的多元多项式模型

大理石花纹等级、脂肪面积比率、脂肪颗粒总数、大脂肪颗粒数、小脂肪颗粒数、计盒维数及信息维数 7 个变量之间的相关系数如表 2 所示。

表 2 各变量相关系数

Tab.2 Correlation coefficient of variables

	大理石花纹等级	计盒维数	信息维数	脂肪面积比率	大脂肪颗粒数	小脂肪颗粒数	脂肪颗粒总数
大理石花纹等级	1.000 0	-0.475 8	-0.404 2	-0.784 2	-0.689 9	-0.458 1	-0.527 0
计盒维数		1.000 0	0.938 6	0.543 9	0.565 5	0.693 1	0.711 9
信息维数			1.000 0	0.479 2	0.517 7	0.653 6	0.668 5
脂肪面积比率				1.000 0	0.907 5	0.543 1	0.640 8
大脂肪颗粒数					1.000 0	0.607 9	0.714 5
小脂肪颗粒数						1.000 0	0.989 9
脂肪颗粒总数							1.000 0

由表 2 可知,图像的计盒维数与信息维数、脂肪面积比率与大脂肪颗粒数、脂肪颗粒总数与小脂肪颗粒数之间高度显著相关,彼此之间存在严重的共线性问题。另外,计盒维数与大理石花纹等级的相关程度大于信息维数与大理石花纹等级的相关程

度;脂肪面积比率与大理石花纹等级的相关程度大于大脂肪颗粒数与大理石花纹等级的相关程度;脂肪颗粒总数与大理石花纹等级的相关程度大于小脂肪颗粒数与大理石花纹等级的相关程度。将有严重共线性关系的参数进行合并,取计盒维数、脂肪面积

比率和脂肪颗粒总数为自变量,进行二次多项式回归拟合。设拟合方程为

$$Y = b + a_1 X_1 + a_2 X_3 + a_3 X_6 + a_4 X_1 X_3 + a_5 X_1 X_6 + a_6 X_3 X_6 + a_7 X_1^2 + a_8 X_3^2 + a_9 X_6^2 \quad (6)$$

回归分析结果显示,方程在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下高度显著。表明牛肉大理石花纹等级可以用二次多项式模型进行预测。

为进一步分析各自变量对回归方程中各项回归系数的影响,进行回归系数 t 检验分析,结果如表 3 所示。分析表 3 可知,方程(6)中回归系数 a_6 、 a_7 和 a_9 对方程的影响不显著。因此,将与这些系数对应的变量从方程中剔除后,再进行回归拟合,并再次对

方程进行 F 检验,对方程中各项回归系数进行 t 检验。结果表明,回归方程和各项回归系数均在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下高度显著,表明方程中各项因子均对大理石花纹的等级存在显著影响。因此,牛肉大理石花纹等级判定的多元多项式模型可以表示为

$$Y = 7.9338 - 1.6196X_1 + 60.9414X_3 - 0.0255X_6 - 32.2785X_1X_3 + 0.0150X_1X_6 - 103.2656X_3^2 \quad (7)$$

计算式(7)的相关因子,可得: $R^2 = 0.6857$, 明显大于多元线性回归模型的相关因子。表明在进行牛肉大理石花纹等级判定时,多元多项式模型明显优于多元线性模型。

表 3 回归系数的 t 检验结果

Tab. 3 Result of t test of regression coefficient

变量	回归系数	标准系数	偏相关系数	标准误差	t 值	显著水平
b	9.3809		6.2543	1.4999	0.1363	
a_1	-3.4534	-0.4747	-0.0326	9.7959	-0.3525	0.7251
a_2	69.769	3.2850	0.2720	22.823	3.0570	0.0028
a_3	-0.0294	-2.8550	-0.1811	0.0148	-1.9913	0.0488
a_4	-40.524	-3.2376	-0.2256	16.181	-2.5044	0.0136
a_5	0.0198	3.5033	0.1627	0.0111	1.7831	0.0771
a_6	0.0159	0.3051	0.0507	0.0290	0.5495	0.5837
a_7	0.4822	0.2022	0.0116	3.8412	0.1255	0.9003
a_8	-104.399	-1.1217	-0.3312	27.494	-3.7968	0.0002
a_9	0	-0.5135	-0.0798	0	-0.8657	0.3884

2.3 模型的验证

为验证模型并对多元线性模型和多元多项式模型的预测能力进行比较分析,分别用得到的多元线性模型和多元多项式模型对验证集中的样本进行牛肉大理石花纹等级预测,结果如表 4、5 所示。

表 4 多元线性模型的判定结果

Tab. 4 Predicting result for beef marbling with multiple linear model

样本序号	实际等级	计算结果	判定等级
1	2	2.238312	2
2	3	3.663352	4
3	4	4.284016	4
4	4	4.178258	4
5	5	5.687574	6
6	5	4.916638	5
7	6	5.780152	6
8	7	6.508566	7

表 4 和表 5 显示,在全部 8 个样本中,多元线性模型的计算结果有 6 个与实际等级相一致,判定的正确率为 75%;多元多项式模型的计算结果有 7 个

表 5 多元多项式模型的判定结果

Tab. 5 Predicting result for beef marbling with multiple polynomial model

样本序号	实际等级	计算结果	判定等级
1	2	1.5962	2
2	3	3.7748	4
3	4	4.3866	4
4	4	4.2989	4
5	5	5.3126	5
6	5	5.2201	5
7	6	5.6083	6
8	7	6.5018	7

与实际等级相一致,判定正确率为 87.5%。根据 Cross^[1] 等对全美 11 个州 56 家工厂所做的调查,牛肉等级的人工误判率高达 21%,正确率不到 80%,高于本研究的多元线性模型,但明显低于多项式模型。由于本模型验证实验采用了独立的验证样本集,验证结果的可信度较高。因此,87.5%的判定正确率表明,多元多项式模型有较好鲁棒性和预测精度,可以用于牛肉大理石花纹等级的判定。

3 结论

(1)以牛肉大理石花纹图像的计盒维数、脂肪面积比率和大脂肪颗粒数为特征参量构成一个多元线性模型,可以实现对牛肉大理石花纹等级自动判定,利用该模型预测牛肉大理石花纹等级的正确率

可达75%。

(2)以计盒维数、脂肪面积比率、脂肪颗粒总数为参数,可以构建一个多元多项式模型用于牛肉大理石花纹等级的自动判定,判定的正确率可达87.5%,明显高于多元线性模型的预测正确率,也明显高于人工判定的正确率。

参 考 文 献

- 1 Cross H R, Gilliland D A, Durland P R, et al. An evaluation of the accuracy and uniformity of the USDA beef quality and yield grading system[R]. A report from Science and Education Administration, Agricultural Research, USDA, Clay Center, Nebraska, to Office of Inspector General, USDA, Washington, D. C., 1980.
- 2 陈坤杰,姬长英. 牛肉自动分级技术研究进展[J]. 农业机械学报,2006,37(3):121~124.
Chen Kunjie, Ji Changying. Research on techniques for automated beef steak grading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(3):121~124. (in Chinese)
- 3 Tan J. Meat quality evaluation by computer vision[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 27~35.
- 4 Du Chengjin, Sun Dawen, Jackman Patrick. Development of a hybrid image processing algorithm for automatic evaluation of intramuscular fat content in beef *M. longissimus dorsi*[J]. Meat Science, 2008, 80(4):1231~1237.
- 5 Chen Kunjie, Sun X, 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.
- 6 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.
Chen Kunjie, Sun Xin, Lu Qiuyan. Automatic color grading of beef lean tissue based on BP neural network and computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):173~178. (in Chinese)
- 7 Yoshikawa F, Toraichi K. On a grading system for beef marbling[J]. Pattern Recognition Letters, 2000,21(12):1037~1050.
- 8 Shiraniata K, Hayashi K, Otsubo A. Grading meat quality by image processing[J]. Pattern Recognition, 2000,33(1):97~104.
- 9 Jeyamkondan S, Ray N, Kranzler G A, et al. Beef quality grading using machine vision[C]// Conference on Biological Quality and Precision Agriculture II, Boston, USA, 2000:91~101.
- 10 Borkowski W. Fractal dimension based features are useful descriptors of leaf complexity and shape[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1999,29(9):1301~1310.
- 11 Martínez-López F, Cabrerizo-Vílchez M A, Hidalgo-Álvarez R. A study of the different methods usually employed to compute the fractal dimension[J]. Physica A, 2002, 311:411~428.
- 12 Stéphane Buczkowski, Patrice Hildgen, Louis Cartilier. Measurements of fractal dimension by box-counting; a critical analysis of data scatter[J]. Physica A, 1998, 252:23~34.
- 13 Chen Kunjie, Qin Chunfang. Segmentation of beef marbling based on vision threshold[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 62(2):223~230.
- 14 陈坤杰,姬长英. 基于图像运算的牛肉大理石花纹提取方法[J]. 农业机械学报,2007,38(5):195~196,206.
- 15 陈坤杰,姬长英. 牛肉眼肌切面图像的分割方法[J]. 农业机械学报,2006,37(6):155~158.
Chen Kunjie, Ji Changying. Segmentation methods used in rib-eye image of beef carcass[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(6):155~158. (in Chinese)
- 16 陈坤杰. 牛肉大理石花纹计盒维和信息维的测定[J]. 农业工程学报,2007,23(7):145~149.
Chen Kunjie. Determination of the box-counting fractal dimension and information fractal dimension of beef marbling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(7):145~149. (in Chinese)
- 17 冯志刚,周宏伟. 图像的分形维计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报,2001,22(6):92~95.
Feng Zhigang, Zhou Hongwei. Computing method of fractal dimension of image and its application[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2001,22(6):92~95. (in Chinese)