

# 基于隐马尔科夫模型的苹果分级方法研究

## Study on method of apple grading based on hidden Markov model

谢锋云 周建民 江炜文 张慧慧 唐宏兵

XIE Feng-yun ZHOU Jian-min JIANG Wei-wen ZHANG Hui-hui TANG Hong-bing

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西南昌 330013)

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**摘要:**提出了一种基于隐马尔科夫模型的苹果分级方法。以 3 种不同颜色和形状的苹果为研究对象,提取苹果的六角锥体模型(HSV)作为苹果的颜色特征,提取苹果 Hu 不变矩作为苹果的形状特征,将这些特征量采用 Lloyd 算法编码,并将它们作为隐马尔科夫模型(HMM)的输入。依据 HMM 模式识别方法,对不同颜色和形状的苹果进行了分类识别,进而完成苹果分级。试验表明,该方法完成的分级识别率为 100%。

**关键词:**苹果;分级;隐马尔科夫模型;HSV;Hu 不变矩

**Abstract:** In order to adapt to the request of apple grading technology, a classification method for apple grading was proposed based on hidden Markov model (HMM). Three different colors and shapes of apples were studied. The hexagonal pyramid model (HSV) was extracted as the color features of the apple, and the Hu invariant moment was extracted as shape features of the apple. These features of the apple were coded by Lloyd algorithm, which was used as the inputting of HMM. According to the HMM pattern recognition method, the different colors and shapes of apples were identified and classified, and then the apple grading was completed. The tests showed that the apple grading results were correct by the proposed method.

**Keywords:** apple; grading; HMM; HSV; Hu invariant moment

中国是世界最大的苹果生产国,栽培面积和产量分别占世界苹果总量的 2/5 和 1/3。但受品种、气候、土壤及环境等因素的影响,苹果的颜色和形状会存在较大差异<sup>[1-2]</sup>,从而影响苹果的品位<sup>[3]</sup>,不管从商业还是工业加工角度出发,都需要对苹果进行分级处理。为了改变传统苹果人工分级中劳动强度大、效率低的缺点,国内外学者对分级方法进行了大量的研究:殷勇等<sup>[4]</sup>提出了基于机器视觉的苹果分级中特

征参量选择方法,通过基于主成分的多特征提取方法,使识别率有所提高;李先锋等<sup>[5]</sup>提出了基于 D-S 证据理论的特征融合苹果分级方法,通过对 80 个测试样本的分级试验表明,苹果分级正确率为 92.5%;赵茂程等<sup>[6]</sup>提出了基于神经网络的苹果自动分级模式识别方法,通过对 40 个苹果的分级试验表明,苹果分级正确率为 95%,不足之处是分级精度不高。

根据 GB/T 10651—2008 描述,影响鲜苹果等级的特征主要有水果颜色和形状等,但由于提取的特征是单一的颜色<sup>[7]</sup>或者形状<sup>[8]</sup>,使识别准确率不高。本研究拟以 3 种不同颜色和形状的苹果为研究对象,通过图像处理提取表征苹果颜色特征的 HSV 及表征苹果形状特征 Hu 不变矩,以隐马尔科夫模型(HMM)作为苹果分级模式识别模型,实现苹果多特征融合,以提高识别准确率,最终为苹果自动分级提供方法。

### 1 基于 HMM 的苹果分级方法

隐马尔科夫模型(HMM)由 Baum 和 Peterie 在 1966 年提出,它是一个双重随机过程,其中一个描述状态转移序列,另一个是描述状态与观测序列之间的关系。HMM 可记为  $\lambda = (N, M, A, B, \pi)$ ,其中  $N$  为模型的隐状态数目, $M$  为每个隐状态对应的可能观测值数目, $A$  为状态转移概率矩阵, $B$  表示观察值概率矩阵, $\pi$  表示初始状态概率分布。HMM 具有极强的建模能力和模式分类能力,已广泛应用于语音识别、模式分类、健康状态评估与预测中<sup>[9]</sup>。本研究利用 HMM 来构建苹果分类识别模型,进而完成苹果分级。基于 HMM 的苹果分级方法见图 1。

由图 1 可知,基于 HMM 的苹果分级过程为:首先通过摄像机获取不同种类苹果图像,然后将采集的图像传送给计



图 1 基于 HMM 的苹果分级结构框图

Figure 1 The structure diagram of apple grading based on HMM

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:51565015)

**作者简介:**谢锋云(1976—),汉,华东交通大学副教授,博士。

E-mail: xiefyun@163.com

**收稿日期:**2015—11—16

算机,经过图像处理系统提取所需关键特征量,编码后选取一部分作为标准样本训练初始 HMM,剩下部分作为测试样本代入训练优化后的 HMM,最后比较 HMM 输出对数似然值大小,依据 HMM 模式识别方法,得出苹果分级结果。

## 2 苹果图像特征提取

由于单一特征量不能全面反映苹果的品位,本试验提取影响苹果品质最重要因素颜色和形状作为特征,结合 HMM 进行多特征信息融合及识别,以提高苹果分级的准确率。

### 2.1 HSV 模型

常见的提取颜色特征的模型有 RGB 模型,其中 R、G 和 B 分别代表三原色中红、绿和蓝色。RGB 模型缺点是与直观的颜色概念如色调、饱和度和亮度没有直接的联系。HSV 是根据颜色的直观特性创建的一种颜色空间,它描述了颜色的色调(Hue)、饱和度(Saturation)和亮度(Value)3种属性。HSV 模型的三维表示从 RGB 立方体演化而来,体现了人类观察色彩的方式,比较好地反映了人对颜色的感受,同时它将亮度(V)与反映色彩本质特性的两个参数色调(H)和饱和度(S)分开。HSV 与 RGB 空间的转换关系为:

$$V = \frac{1}{3}(R + G + B), \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)], \quad (2)$$

$$H = \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)]}{2} \right. \\ \left. \left[ \frac{1}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}. \quad (3)$$

基于上述分析,采用 HSV 模型提取苹果颜色特征。

### 2.2 Hu 不变矩

Hu 不变矩用来获取图像的形状特征的模型之一。Hu 不变矩是 Hu、M.K 在 1962 年提出,具有旋转、缩放和平移不变性特点,不会因为物体的位置、方位及尺度变化而发生改变,对于物体的形状描述得比较好,因而被广泛应用于图像识别中,尤其是图像轮廓匹配中。设大小为  $M \times N$  的数字图像函数  $f(x, y)$ , 图像的  $p+q$  阶几何矩定义为:

$$m_{pq} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M x^p y^q f(x, y) \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

$p+q$  阶中心距定义为:

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy, \quad (5)$$

其中  $\bar{x} = m_{10}/m_{00}$ ,  $\bar{y} = m_{01}/m_{00}$  为图像重心坐标。归一化的中心距定义为:  $\eta_{pq} = \mu_{pq}/(\mu_{00}^{\rho})$ , 其中  $\rho = (p+q+2)/2$ 。利用二阶和三阶归一化中心距构造了 7 个不变矩  $M_1 \sim M_7$ <sup>[10]</sup>。

$$M_1 = \eta_{20} + \eta_{02}, \quad (6)$$

$$M_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \quad (7)$$

$$M_3 = (\eta_{30} - \eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2, \quad (8)$$

$$M_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2, \quad (9)$$

$$M_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (2\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2], \quad (10)$$

$$M_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}), \quad (11)$$

$$M_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]. \quad (12)$$

本试验将从提取苹果图像的 7 个 Hu 不变矩中,选取最能体现现状的特征量作为苹果形状分级的特征量,作为后续苹果分级的重要依据。

### 2.3 特征提取

HSV 对图像的形状特征不敏感,而 Hu 不变矩对纹理比较丰富的图像的纹理描述不够完整。将 HSV 提取颜色特征与 Hu 不变矩提取形状特征能力结合在一起,能有效提高识别率。

为了验证提出的分级方法,以黄、绿、红 3 种不同颜色和形状的苹果为研究对象,见图 2。



图 2 3 种不同颜色和形状的苹果

Figure 2 Three different colors and shapes apples

由于试验环境对苹果特征有重要影响,为了保证试验条件一致,试验是在相同的光照度下进行的。通过 CCD 摄像机分别获取 3 种苹果图像,然后对采集的图像进行预处理,消除获取图像中的噪声信息,计算出每幅图像的 3 个特征量及 7 个 Hu 不变矩变量,组合成多特征量。在每一种颜色苹果中选择 3 个作为研究对象,提取相应的特征量,见表 1。

## 3 苹果分级

基于 HMM 的苹果分级步骤:

- ① 求取观测输入特征向量;
- ② 构建不同种类的苹果 HMM 模型;
- ③ 训练不同种类的苹果标准样本;
- ④ 基于 HMM 识别不同种类的苹果测试样本;
- ⑤ 不同种类的苹果测试样本分级。

由表 1 可知,试验中获取的不同种类的苹果 HSV 特征值有着明显的区别<sup>[1]</sup>。其中 3 个特征量中基本情况为:  $H$  量大小分别为:红色苹果 > 绿色苹果 > 黄色苹果;  $S$  量大小分别为:黄色苹果 > 绿色苹果 > 红色苹果;  $V$  量大小分别为:红色苹果 > 绿色苹果 > 黄色苹果。从试验中也容易看出,不同种类的苹果 Hu 不变矩特征量  $M_1 \sim M_4$  也有着明显的区别<sup>[10]</sup>,其中  $M_1$ 、 $M_2$  对苹果形状中椭圆度较敏感,  $M_3$  苹果形状中圆度较敏感,  $M_4$  对苹果形状中椭圆度和圆度较敏感。而试验中获取的不变矩  $M_5 \sim M_7$  带来的误差比较大,区分困难,故舍弃了这 3 个特征量。将  $H$ 、 $S$ 、 $V$  3 个特征量及  $M_1 \sim M_4$  4 个特征量作为 HMM 的观测输入值,利用 Lloyd 算法进行编码<sup>[11]</sup>,从而得到不同类的苹果观测输入特征向量,见表 2。

表 1 3 种不同颜色和形状苹果特征值

Table 1 The feature value of three different colors and shapes apples

| 苹果颜色 | 序号 | 苹果特征值   |         |         |                |                |                |                |                |                |                |
|------|----|---------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|      |    | H       | S       | V       | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> |
| 黄色   | 1  | 0.086 7 | 0.583 6 | 0.781 5 | 1.159E-03      | 4.458E-07      | 7.099E-12      | 7.066E-12      | 1.662E-25      | -3.091E-17     | 3.092E-25      |
|      | 2  | 0.080 8 | 0.555 5 | 0.761 3 | 1.195E-03      | 1.161E-07      | 8.825E-12      | 7.923E-12      | 3.787E-23      | 2.626E-15      | -5.436E-23     |
|      | 3  | 0.080 7 | 0.466 8 | 0.861 8 | 1.026E-03      | 1.238E-07      | 6.394E-12      | 6.453E-12      | 4.056E-23      | 2.253E-15      | 1.127E-23      |
|      | 4  | 0.083 9 | 0.540 7 | 0.788 7 | 1.067E-03      | 3.980E-07      | 6.762E-12      | 6.667E-12      | 7.802E-23      | 1.042E-16      | 1.654E-24      |
| 绿色   | 5  | 0.127 5 | 0.447 7 | 0.794 7 | 9.611E-04      | 1.892E-08      | 4.234E-13      | 8.539E-13      | 1.020E-24      | -1.990E-17     | -9.312E-25     |
|      | 6  | 0.166 9 | 0.506 8 | 0.805 9 | 9.536E-04      | 4.480E-09      | 1.775E-13      | 7.902E-13      | -2.953E-25     | 3.336E-17      | 1.887E-26      |
|      | 7  | 0.094 4 | 0.329 7 | 0.857 3 | 7.919E-04      | 3.957E-09      | 1.146E-13      | 4.822E-13      | 7.579E-24      | 3.697E-18      | 1.862E-23      |
|      | 8  | 0.143 2 | 0.312 2 | 0.828 7 | 9.191E-04      | 3.378E-09      | 1.540E-13      | 8.659E-13      | 5.828E-25      | 1.342E-16      | -8.126E-25     |
| 红色   | 9  | 0.429 6 | 0.190 3 | 0.914 2 | 7.827E-04      | 1.003E-08      | 6.557E-11      | 4.340E-12      | -2.168E-23     | -4.235E-16     | 7.051E-24      |
|      | 10 | 0.491 2 | 0.216 3 | 0.862 1 | 8.114E-04      | 2.231E-08      | 2.095E-11      | 4.339E-12      | -8.602E-23     | -9.587E-16     | -2.966E-23     |
|      | 11 | 0.456 5 | 0.095 8 | 0.895 1 | 7.389E-04      | 5.382E-09      | 4.383E-11      | 1.318E-12      | 1.934E-24      | 4.973E-17      | 2.509E-24      |
|      | 12 | 0.476 1 | 0.135 7 | 0.903 2 | 7.303E-04      | 4.796E-08      | 3.026E-11      | 2.816E-12      | 6.406E-23      | 3.168E-17      | -5.148E-24     |

表 2 3 种不同颜色和形状苹果特征值编码

Table 2 The feature coding of three different colors and shapes apples

| 苹果颜色 | 序号 | 苹果特征值编码 |   |   |                |                |                |                |
|------|----|---------|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
|      |    | H       | S | V | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> |
| 黄色   | 1  | 1       | 3 | 1 | 3              | 3              | 2              | 3              |
|      | 2  | 1       | 3 | 1 | 3              | 3              | 2              | 3              |
|      | 3  | 1       | 2 | 2 | 3              | 3              | 2              | 3              |
|      | 4  | 1       | 3 | 1 | 3              | 3              | 2              | 3              |
| 绿色   | 5  | 2       | 2 | 1 | 2              | 2              | 1              | 1              |
|      | 6  | 2       | 3 | 2 | 2              | 1              | 1              | 1              |
|      | 7  | 2       | 2 | 2 | 1              | 1              | 1              | 1              |
|      | 8  | 2       | 2 | 2 | 2              | 1              | 1              | 1              |
| 红色   | 9  | 3       | 1 | 3 | 1              | 2              | 3              | 2              |
|      | 10 | 3       | 1 | 3 | 2              | 2              | 3              | 2              |
|      | 11 | 3       | 1 | 3 | 1              | 1              | 3              | 2              |
|      | 12 | 3       | 1 | 3 | 1              | 2              | 3              | 2              |

定义初始 HMM 模型  $\lambda$  中数值参量  $N=3, M=3$ , 根据本试验实际情况, 在初始模型  $\lambda$  中设  $\pi=(0.8, 0.1, 0.1)$ ,  $A, B$  在计算机上由 matlab 随机生成, 并通过 HMM 中的 Baum-Welch 算法进行参数优化<sup>[9]</sup>。从 3 种类型苹果中分别选取序号为 1、2、5、6 及 9、10 对应的特征值, 编码后分别作为标准样本输入, 代入初始模型中进行训练, 得出 3 种类型苹果对应的优化模型。图 3 为黄颜色苹果对应的迭代后输出的对数似然值图, 可以看到, 经过 8 次训练, 对数似然达到收敛状态, 这时表明黄色种类苹果初始 HMM 模型得到了优化。同样绿色及红色种类苹果通过同样的方法也可得到相应优化模型, 从而组成 3 种类型优化模型库。

将序号 3、4、7、8、11、12 对应的 6 个苹果特征值编码后作为测试样本代入优化的 HMM 中, 计算出相应的对数似然值, 最大的对数似然值对应的种类即为分类识别的结果。表 3

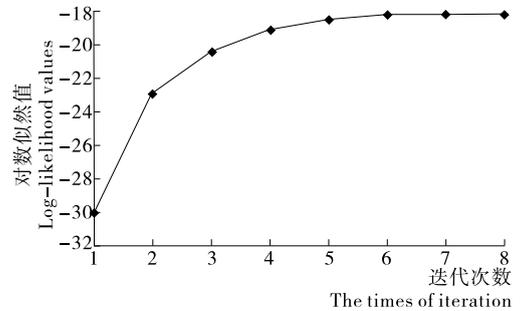


图 3 黄苹果 HMM 训练关系曲线图

Figure 3 The relationship graph of yellow apple by HMM training

表 3 HMM 计算结果

Table 3 HMM results

| 测试样本       | 黄苹果优化模型    | 绿苹果优化模型   | 红苹果优化模型   |
|------------|------------|-----------|-----------|
| 黄苹果测试样本 3  | -6.676 8   | -7.881 3  | -83.990 3 |
| 黄苹果测试样本 4  | -5.578 9   | -7.975 2  | -84.780 4 |
| 绿苹果测试样本 7  | -6.451 7   | -5.162 5  | -81.878 3 |
| 绿苹果测试样本 8  | -6.573 4   | -4.634 9  | -80.964 3 |
| 红苹果测试样本 11 | -167.925 7 | -56.244 4 | -9.134 5  |
| 红苹果测试样本 12 | -201.760 5 | -61.079 3 | -8.763 6  |

为序号为 3、4、7、8、11、12 对应的 6 个 HMM 输出结果。

通过对表 3 中每一行数值进行比较, 可得出对数似然值 -6.676 8, -5.578 9, -5.162 5, -4.634 9, -9.134 5, -8.763 6 分别为各行中的最大值。由 HMM 模式识别原理<sup>[9]</sup>可知, 最大对数似然值对应的状态为识别的结果。本例中黄苹果测试样本识别结果为黄苹果, 绿苹果测试样本识别结果为绿苹果, 红苹果样本识别结果为红苹果。这表明识别结果与测试样本结果一致, 即识别率为 100%, 识别结果正确。结合苹果分级标准, 即可以完成苹果分级。

(下转第 111 页)

(2) 酶活性是影响果汁贮藏品质的重要因素,与其品质变化如色泽、稳定性等密切相关。本研究尚缺对其内在联系的深入探索,综合分析影响果汁贮藏特性因素,更有利于为超高压技术在果汁加工保藏中的应用提供科学全面的理论依据。

参考文献

[1] 胡花丽,李鹏霞,王毓宁,等.气调贮藏对草莓细胞壁酶活性的影响[J].食品与机械,2011,27(1):98-101.  
 [2] 陆怡,颜惠庚,沈士明.超高压生物处理技术及装备研究进展[J].食品与机械,2007,23(5):28-29.  
 [3] 张波波,王丹,马越,等.超高压和UHT对草莓汁中多酚氧化酶活性的影响[J].食品与机械,2014,30(1):145-148.  
 [4] 段虎,潘润淑,王祎娟,等.超高压结合低温处理对牛肉组织结构及理化特性的影响[J].食品与机械,2012,28(4):152-154.  
 [5] 柳青,赵晓燕,张超,等.超高压处理对草莓汁贮藏期微生物及品质的影响[J].中国食品学报,2014,11(14):111-114.  
 [6] 曾庆梅,谢慧明,潘见,等.超高压处理对枯草芽孢杆菌超微结构的影响[J].高压物理学报,2006,20(1):83-87.  
 [7] 周婧琦,赵光远,张培旗,等.热协同超高压处理对浑浊梨汁中微生物的影响[J].食品科学,2008,29(8):50-52.  
 [8] 尹琳琳.超高压技术对哈密瓜汁风味及品质影响的研究[D].石河子:石河子大学,2010:67-78.  
 [9] ISLAM M S, INOUE A, IGURA N, et al. Inactivation of bacillus spores by the combination of moderate heat and low hydrostatic pressure in ketchup and potage [J]. Int. J. Food Microbiol., 2006, 107(2): 124-130.  
 [10] 方亮,江波,张涛.高压中温协同处理对猕猴桃果汁流变特性的影响初探[J].食品与发酵工业,2008,34(3):169-171.

[11] 赵光远,李娜,白艳红,等.热协同高压处理对鲜榨桃汁品质影响的研究[J].广西轻工业,2006(6):1-3.  
 [12] POLYDERA A C, STOFOROS B N G, TAOUKIS P S. Quality degradation kinetics of pasteurised and high pressure processed fresh navel orange juice, nutritional parameters and shelf life[J]. Innov. Food Science Emerg. Tech., 2005, 6: 1-9.  
 [13] 曹霞敏,毕秀芳,李仁杰,等.超高压和热杀菌对草莓浊汁及清汁品质的影响[J].高压物理学报,2014,28(5):631-640.  
 [14] LAVINAS F C, MIGUEL M A, LOPES M L, et al. Effect of high hydrostatic pressure on cashew apple (Anacardium occidentale L.) juice preservation[J]. Food Sci., 2008, 73(6): 273-277.  
 [15] 丘苑新,叶盛英.超高压下食品组分与包装材料的相互影响[J].食品与机械,2015,31(2):178-182.  
 [16] 常彦.超高压技术对草莓汁杀菌、钝酶及品质影响的研究[D].晋中:山西农业大学,2013:36-40.  
 [17] 洪漫兴,阮征.食品流变特性研究进展[C]//广东省食品学会年会论文集.广东:广东省食品学会工作委员会,2014:190-194.  
 [18] 纵伟,赵光远.超高压对鲜切猕猴桃果片多聚半乳糖醛酸酶及品质的影响[J].食品与机械,2006,22(5):40-42.  
 [19] 宋洪波,杜吉涛,安凤平,等.柚子浓缩汁及清汁的流变学特性[J].福建农业大学学报:自然科学版,2007,34(3):422-426.  
 [20] 张波波,王丹,马越,等.超高压技术对草莓汁果胶甲酯酶钝化作用的研究[J].食品工业科技,2013,34(24):314-316.  
 [21] GOODNER J K, BRADDOCK R J, PARISH M E, et al. Cloud stabilization of orange juice by high pressure processing [J]. Food Science, 1999, 64(4): 699-700.  
 [22] 许文文,曹霞敏,刘凤霞,等.超高压处理的草莓果肉饮料在贮藏过程中的品质变化[J].高压物理学报,2013,27(2):137-144.

(上接第31页)

4 结论

为了苹果分级需要,提出了一种基于HMM的苹果分级方法。利用HSV模型提取苹果颜色特征,利用Hu不变矩提取苹果形状特征,通过Lloyd算法对提取的特征量进行编码,并将其作为HMM的输入特征向量,按照分级要求,通过标准样本进行训练,构建了3种标准状态的苹果优化模型库,利用HMM模式识别方法,将测试样本代入优化模型库中,对苹果类别进行了分类识别,在此基础上,结合苹果分级标准,完成苹果等级分级。试验结果表明,该方法分类识别结果正确。该方法提取了影响鲜苹果等级重要特征量颜色与形状,结合HMM进行信息融合及识别,是一种苹果分级有效方法。由于本试验着重于分级方法的研究,对图像采集及预处理研究较少,同时本研究未涉及的还有苹果的大小,这些可能会影响分类结果,今后可以考虑对图像采集、预处理进行深入研究,以及考虑苹果大小对识别结果影响的研究,同时可在特征提取中引入区间,通过区间提高结果的可靠性。

参考文献

[1] 饶秀勤,应义斌.水果按表面颜色分级的方法[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(5):869-871.

[2] 郭丹,韩英群,郝义.秋富红苹果冷藏期及货架期生理品质变化[J].食品与机械,2015,31(4):126-129.  
 [3] 刘璇,王沛,毕金峰,等.基于层次分析法的晚熟品种苹果脆片品质评价[J].食品与机械,2012,28(5):46-50.  
 [4] 殷勇,陶凯,于慧春.基于机器视觉的苹果分级中特征参量选择方法[J].农业机械学报,2012,43(6):118-127.  
 [5] 李先锋,朱伟兴,花小朋,等.基于D-S证据理论的决策级多特征融合苹果分级方法[J].农业机械学报,2011,42(6):188-192.  
 [6] 赵茂程,侯文军.基于神经网络的苹果自动分级方法[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(1):136-138.  
 [7] 姚立健,边起,雷良育,等.基于BP神经网络的水果分级研究[J].浙江农业学报,2012,24(5):926-930.  
 [8] 黄星奕,魏海丽,赵杰文.实时在线检测苹果果形的一种计算方法[J].食品与机械,2006,22(1):27-29.  
 [9] XIE Feng-yun, HU You-min, WU Bo, et al. A generalized interval probability-based optimization method for training generalized hidden Markov model[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 319-329.  
 [10] 周萧,王岩.基于Hu不变矩的叶片图像识别技术的研究[J].伺服控制,2011(6):70-72.  
 [11] XIE Feng-yun, HU You-min, WANG Yan, et al. A generalized Markov chain model based on generalized interval probability[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(9): 2 132-2 136.