

文章编号: 1006-2467(2009)12-1898-06

基于主色直方图特征匹配的蔬果分类方法

李长勇^{1,2}, 曹其新¹, 郭峰¹

(1. 上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240; 2. 新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830008)

摘要: 针对蔬果分级系统, 提出了一种基于主色直方图特征匹配的蔬果颜色分类算法. 首先在 OHTA 颜色空间进行图像分割, 确定蔬果范围, 并通过改进的矢量中值滤波法滤除彩色图像中的噪音; 其次将彩色蔬果图像由 RGB 颜色空间转化为符合人类视觉特点的 HSV 颜色空间, 将蔬果颜色在 HSV 颜色空间非等间隔量化, 通过变换将三维颜色矢量降为一维颜色矢量, 产生新的索引颜色, 通过聚类的方法提取蔬果的主色特征, 并以颜色直方图表示. 通过把被检测蔬果的主色直方图与各等级的标准蔬果图像直方图比较, 实现对蔬果的分级. 该分类方法实现简单, 不必进行特定训练, 简化了分类器的设计, 具有一定通用性. 试验结果表明, 分级精度达到 97%, 满足了实用要求.

关键词: 蔬果分级; 直方图匹配; 主色; 机器视觉; 特征提取

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A

Method for Fruits and Vegetables Classification Based on Dominant Color Histogram

LI Chang-yong^{1,2}, CAO Qi-xin¹, GUO Feng¹

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: The dominant color histogram matching method for fruits and vegetables classification was proposed. Firstly, through the image segmentation in OHTA color space, the fruit's shape is separated from the image, and the noises in the color images are filtered through the improved vector median filtering algorithm. Then the color image is transferred from RGB color space to HSV color space which matches human's vision, and the fruit's colors are non-interval quantified to get new index colors. The dominant color features are picked up via clustering method, and represented in color histogram. By comparing fruit's color histograms with the standard grading color histograms, the fruits are classified easily. In this way, there is no request for specific training on machine, and the design of classification machine is simplified. The experimental results show that the classification accurate rate is up to 97%, which can satisfy practical requirements.

Key words: fruit and vegetable sorting; histogram matching; dominant color; machine vision; feature extraction

收稿日期: 2008-12-08

作者简介: 李长勇(1976-), 男, 山东齐河人, 博士生, 主要研究方向为机器视觉和智能控制. E-mail: LLCYong@126.com.

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34206790; E-mail: qhcao@sjtu.edu.cn.

蔬果的表面颜色是反映蔬果品质的一个重要的特征,它反映了蔬果的成熟程度、糖度、酸度以及口感等内在品质。近年来,国内外的学者对于基于机器视觉技术的蔬果颜色分级进行了相关的研究。例如:Miller 等^[1]首先将桃子通过照明箱时拍摄的彩色图像数字化,然后将 RGB 值标准化为二维色度坐标以消除光照变化带来的影响,最后通过计算与各级分类标准的色度坐标之间的距离,确定桃子的成熟度;Tao 等^[2]利用色度特征的统计识别算法成功地对苹果、土豆进行分级;杨秀坤等^[3]通过提取苹果表面颜色的色度特征,建立遗传神经网络系统,实现了苹果成熟度的自动判别;何东健等^[4]在分析果实表面颜色色相分布特性的基础上,提出将果实色相分布曲线作为模式处理,用人工神经网络进行果实表面颜色分级的方法;冯斌等^[5]以各色度在水果表面分布的分形维数作为特征,通过建立的人工神经网络识别模型对富士苹果进行了分级。

上述的各种分类方法都是基于分类器的定性分类方法,需要对分类器进行特定的训练,分类过程较为复杂。本文提出了一种基于主色直方图特征匹配的蔬果分类方法。该方法使蔬果分类不需要训练,并且由于直方图是一种统计特征,具有一定的视觉不变性,故分类的精度更高。本文以番茄为样本,介绍基于主色直方图特征匹配的蔬果分类方法。

1 基于 OHTA 颜色空间的图像分割

在提取蔬果的颜色特征前,需要对生产线上所获得的蔬果检测数字图像进行图像分割。选择合适的颜色空间对于彩色图像的分割有着重要意义,本文采用的 OHTA 颜色空间是由 Ohta 等^[6]提出的一组适用于多种彩色图像分割的正交颜色特征集。与传统的 HSI、HSV 颜色空间相比,OHTA 颜色空间与 RGB 颜色空间的换算关系是线性的,在使用时不会出现非线性颜色空间与 RGB 颜色空间转换时出现的色彩奇异性问题,而且计算简单,因此在彩色图像分割中取得了广泛的应用。

OHTA 与 RGB 颜色空间的转换公式:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= (R + G + B) / 3 \\ I_2 &= (R - B) / 2 \\ I_3 &= (2G - R - B) / 4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

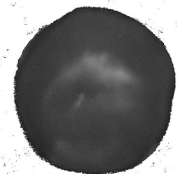
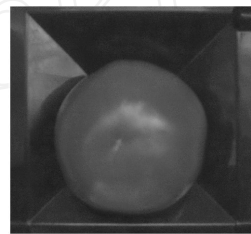
式中: $R、G、B$ 为 RGB 颜色特征; $I_1、I_2、I_3$ 为 OHTA 颜色空间的正交特征,其中, I_1 反映图像的灰度特征, $I_2、I_3$ 则反映图像的颜色特征。

将 RGB 图像分别转换为 $I_1、I_2$ 和 I_3 通道的图像并进行分割试验,结果表明,在 I_2 通道中进行蔬

果图像的分割效果最好。由于蔬果图像的采集是在光照强度比较均匀的光照箱中进行的,故在 I_2 通道中蔬果图像和背景之间的差别比较明显。因此,本文选用固定的阈值进行分割,即

$$G_k(i, j) = \begin{cases} G_k(i, j) & T \leq I_2(i, j) \\ 255 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $G_k(i, j)$ 为图像中像素点 (i, j) 处的各颜色分量的灰度值, $k \in \{R, G, B\}$; $I_2(i, j)$ 为图像中像素点 (i, j) 在 OHTA 颜色空间中的 I_2 值; T 为阈值。若 $I_2 \geq T$, 则表明像素点 (i, j) 属于水果,原颜色值不变;若 $I_2 < T$, 则表明该点属于背景,将像素点 (i, j) 设置为白点。从而将水果与背景分割开,获得图像中水果部分的范围。根据式 (2) 进行水果彩色图像分割,分割的效果如图 1 所示。



(a) 原始图像 (b) 分割后的结果
图 1 基于 OHTA 颜色空间的图像分割结果

Fig. 1 The image segmentation result based on OHTA color space

2 彩色图像滤波

由于来自于系统外部或内部的干扰,水果分级流水线上采集到的图像不可避免地存在一定程度的噪声,这对后续算法的准确度造成了一定的影响,故需对图像进行滤波。

传统的彩色图像滤波方法是对含噪声图像的各个颜色通道分量进行分别滤波,然后再将滤波后的结果合成,输出目标图像。这种方法有可能产生原图像所没有的颜色,从而造成原图像的颜色失真。矢量滤波法将像素颜色作为一个三维矢量来处理,通过各通道颜色分量之间的联系来处理像素的颜色,不会产生原图像所没有的颜色。因此,通常认为彩色图像矢量滤波法较标量滤波法更合理、有效。

矢量中值滤波^[7]是一种有效的非线性滤波方法,对图像中的脉冲噪声、扫描噪声等有很好的滤除效果,并且能较好地保留图像的细节。本文针对水果分级的实际情况改进了矢量中值滤波算法,并对水果图像中的噪音进行滤除。其算法步骤如下:

(1) 依次读取图像中像素的颜色值,以像素点

(i, j) 为中心取一大大小为 $(2r + 1)(2r + 1)$ 的滑动窗口, 其中 r 为窗口半径, 且 $r \geq 1$ 的整数.

(2) 噪音像素点判定公式:

$$f(i, j) = \begin{cases} 1 & |R(i, j) - \mu_R| \geq \frac{3}{4} R \\ 1 & |G(i, j) - \mu_G| \geq \frac{3}{4} G \\ 1 & |B(i, j) - \mu_B| \geq \frac{3}{4} B \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ_i 为窗口内所有像素各颜色分量的平均值,

$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_{ij}, i \in \{R, G, B\}$, c_i 为窗口中各像素的 R, G, B 灰度值; i 为窗口内所有像素的各颜色分量的最大值与最小值之差, 即:

$$i = \max c_i - \min c_i$$

根据式(3)判定窗口中心像素是不是噪音像素点, 如果 $f(i, j) = 0$, 表示该像素点不是噪音点, 则执行步骤(1), 继续对下一个像素操作; 如果 $f(i, j) = 1$, 表示该像素点为噪音点, 则判别窗口内其他像素点是否为噪音像素, 然后执行步骤(3).

(3) 计算滑动窗口内所有像素的 RGB 分量的加权平均值, 构成一个加权平均值矢量, $V_a = (\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$, 其中 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 值分别定义为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i r_i \\ \bar{g} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i g_i \\ \bar{b} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i b_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: w_i 为权重值, 噪音像素点的权重值 $w_n = 0$;

$N_w = \sum_{i=1}^N w_i$; N 为窗口内的像素数.

(4) 对窗口中所有非噪音像素的颜色矢量计算其到 V_a 的距离, 取其中距离最小的颜色矢量来替换窗口所有噪音像素的颜色矢量, 即

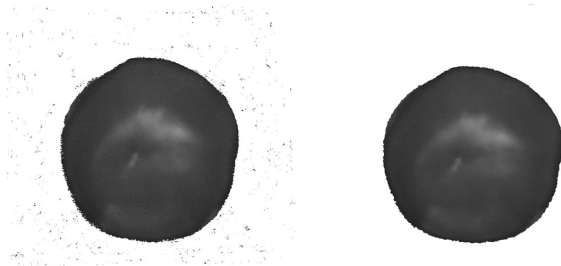
$$V_c = \arg \min |V_i - V_a| = \arg \min \sqrt{(r_i - \bar{r})^2 + (g_i - \bar{g})^2 + (b_i - \bar{b})^2} \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$; V_i 为窗口内像素的颜色矢量; V_c 为窗口中心像素的颜色矢量. 滤噪效果如图 2 所示.

3 主色特征提取

3.1 选取颜色空间

在蔬果的自动颜色分级中, 所获取的蔬果数字



(a) 含有噪声的图像 (b) 滤噪后的结果

图 2 图像滤噪效果

Fig. 2 The noise filtering result

图像一般都是基于 RGB 空间表达的, RGB 颜色模型计算比较简单. 但是, 由于 RGB 模型只能通过三基色的加权混合将颜色的色度和亮度信息合成在一起, 而人眼则是通过颜色的亮度、色调以及饱和度来区分物体的, 不能直接感觉基色的比例, 故 RGB 颜色模型与人眼的视觉感知存在差异. 因此, 本文采用更接近于人对颜色主观认识的 HSV 颜色空间.

HSV 颜色空间是一种与人眼的视觉感知相一致的模型^[8], 其通过色调、饱和度和亮度 3 个与视觉特征有关的量计算描述. 色调 H 是由物体反射光线中占优势的波长决定, 不同的波长产生不同的颜色感觉; 颜色的饱和度 S 是指颜色的深浅程度, 即在纯色中包含的白色光的成份; 亮度 V 是颜色的明暗程度. 图 3 所示是从 RGB 颜色到 HSV 颜色空间的变换示意图. 图中, $H \in [0^\circ, 360^\circ]$, $S \in [0, 1]$, $V \in [0, 1]$.

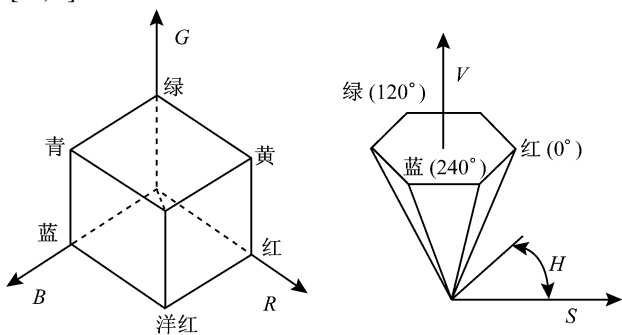


图 3 RGB 颜色到 HSV 颜色空间的变换

Fig. 3 The color space transformation from RGB to HSV

将图像由 RGB 颜色空间转换为 HSV 颜色空间的公式为:

$$h = 60 \times \begin{cases} 5 + b & (r = m) & (g = n) \\ 1 - g & (r = m) & (g = n) \\ 1 + r & (g = m) & (b = n) \\ 3 - b & (g = m) & (b = n) \\ 3 + g & (b = m) & (r = n) \\ 5 - r & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$s = (m - n/m), \quad v = m/255$$

式中:

$$m = \max(r, g, b), \quad n = \min(r, g, b)$$

$$r = \frac{m-r}{m-n}, \quad g = \frac{m-g}{m-n}, \quad b = \frac{m-b}{m-n}$$

3.2 颜色空间量化

无论是在 RGB 颜色空间中,还是在 HSV 颜色空间中都会产生大量的颜色.但实际上人对颜色的分辨能力是有限的,因为在颜色空间中当 2 个颜色之间的距离小于一定值时,人眼就不能区分出它们的差别,而认为是同一种颜色,所以,可以对颜色空间进行颜色量化,用比较少的颜色表示图像的颜色空间,然后确定从颜色空间到特定颜色集合的映射^[9].根据人的视觉感知特性,适合人眼感知的划分是否均匀,人眼分辨饱和度和亮度的能力比分辨色度的能力差.因此,根据人眼对颜色的辨别能力,结合蔬果颜色分级的实验,将 h 分为 16 份,分别为: (345, 10], (10, 25], (25, 40], (40, 55], (55, 70], (70, 105], (105, 140], (140, 165], (165, 180], (180, 215], (215, 255], (255, 275], (275, 290], (209, 315], (315, 330], (330, 345], 则 H 为 0~15. 而将 s 分为 3 份,分别为: (0, 0.35], (0.35, 0.65], (0.65, 1], 则 $S = 0, 1, 2$. v 分为 3 份,分别为: (0, 0.35], (0.35, 0.65], (0.65, 1], 则 V 为 0, 1, 2.

按照以上的量化级,把 3 个颜色矢量合成一维矢量,即:

$$I = Q_s Q_v H + Q_v S + V \quad (7)$$

式中, Q_s 、 Q_v 分别为分量 S 、 V 的量化级数,在蔬果颜色分级中, $Q_s = Q_v = 3$, 则式(7)可表示为

$$I = 9H + 3S + V$$

从而产生新的颜色集合 I , $I = [0, 143]$, 由于在蔬果分级中视觉检测的光照强度是可控且恒定,故可不考虑亮度值对分级颜色特征的影响. 则式(7)可变为

$$I = 3H + S \quad (8)$$

I 的取值范围缩小为 $[0, 47]$, 这 48 种颜色分别与相应的 h 、 s 量化区间相对应,如表 1 所示.

表 1 I 与 HSV 量化区间的映射关系
Tab.1 Color map table from HSV to I

I_i	h 和 s 的量化区间
0	h (345, 10], s (0.0, 0.35]
1	h (345, 10], s (0.35, 0.65]
...	...
46	h (330, 345], s (0.35, 0.65]
47	h (330, 345], s (0.65, 1.0]

3.3 主色聚类算法

在实际的蔬果颜色分级中,由于蔬果的表面颜色集中于少数的几种主要颜色,并且时常分级标准不统一,故需要在现有的基本量化区间划分的基础上,通过动态合并相邻的颜色区间以形成能够反映该类蔬果的分类颜色特征的几种主要颜色.其采用的聚类方法如下:

(1) 按照分级标准,人工从待检测蔬果中挑选 n 个等级的蔬果样本各 m 个,通过蔬果分级检测机器得到这些蔬果样本的图像.

(2) 将每幅图像中蔬果的表面颜色转换为相对应的索引色 I , 并计算每幅图像中每个索引色所对应的像素总数,根据公式

$$N_{si} = \frac{N_i}{N_F}, \quad N_{si} \in [0, 1] \quad (9)$$

将结果归一化. 式中: N_{si} 为每一索引色对应的像素数归一化后的结果, s 为蔬果样本编号, i 为索引色编号; N_i 为每一索引色对应的像素数; N_F 为水果部分的总像素数.

(3) 依据 I 中索引色的顺序,根据

$$N_i = \frac{1}{mn} \sum_{s=1}^m N_{si} \quad (10)$$

合并所有图像中相同索引色的归一化结果,得到该类分级水果的所有表面颜色. 式中, N_i 为所有图像中相同索引色的 N_{si} 值合并后的归一化结果.

(4) 设定阈值 T , 滤去 $N_i < T$ 的颜色, 剩余为 k 种颜色.

(5) 将剩余的颜色按所对应的索引色顺序排列, 对其进行重新编号组成新的颜色集合 I , 使 I 中元素与 I 中元素一一对应, 如剩余的 I 中的颜色为 0, 1, 2, 5, 6, 对应于 I 中 1, 2, 3, 4, 5 号索引色, 从而 I 中颜色与相应的 h 、 s 量化区间相对应.

(6) 令 $x_1 = s \cos h$, $x_2 = s \sin h$, 则

$$D_{p,q+1} = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{1p} - x_{1q+1})^2 + (x_{2p} - x_{2q+1})^2} \quad (11)$$

设定距离阈值 T_d , 分级蔬果索引色集合 I 中颜色 $C_q (q \in [1, k])$, 聚类中心 $Z_p (p \in [1, k])$, 初始时, 令 $p = q = 1$, $Z_p = C_{q+1}$, 根据式(11)计算 C_{q+1} 与 Z_p 的距离 $D_{p,q+1}$ 值.

(7) 若 $D_{p,q+1} < T_d$, 则将与 Z_p 和 C_{q+1} 相对应的 H 和 S 量化区间分别合并, Z_p 与合并后的新区间对应, 令 $q = q + 1$, 然后计算 C_{q+1} 与 Z_p 的距离 $D_{p,q+1}$ 值, 重复步骤(7); 若 $D_{p,q+1} > T_d$, 令 $p = p + 1$, $q = q + 1$. Z_p 为新的聚类中心且 $Z_p = C_q$, 然后计算

C_{q+1} 与 Z_p 的距离 $D_{p,q+1}$ 值, 重复步骤 (7), 若 $q = k - 1$, 则执行步骤 (8).

(8) 计算 Z_l 与 C_k 的距离 $D_{l,k}$, 若 $D_{l,k} < T_d$, 则将与 Z_l 和 C_k 相对应的 H 和 S 量化区间分别进行合并, Z_l 与合并后的新区间对应.

(9) 产生一组代表待分级蔬果主颜色的索引颜色集合 $Z_i (i = [1, k])$, 该集合元素分别对应合并后的新的 H, S 颜色分量的量化空间.

3.4 基于主色直方图特征的分类方法

颜色直方图表征了图像各颜色的分布频率, 其对于图像的缩放、平移、旋转等变化不敏感, 具有一定的视觉不变性和具有较高的鲁棒性, 有利于准确地提取蔬果的颜色特征和进行分级. 基于直方图匹配的蔬果颜色特征分类方法, 通过对获得的蔬果图像提取被检测蔬果的主色直方图特征, 然后计算其与标准模板库中各等级蔬果主色直方图特征的相似度, 根据相似度将被检测蔬果分到具有最大相似度的类中. 相似度计算公式

$$D_{q,t} = \left[\sum_{m=0}^{L-1} (h_q[m] - h_t[m])^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

式中, $h_q[m]$ 和 $h_t[m]$ 分别为被检测蔬果和模板库中蔬果的直方图. $D_{q,t}$ 值越小, 两者相似度越大.

4 试验与结果

以着色度为 10% ~ 20%、30% ~ 40%、50% ~ 60%、70% ~ 80%、90% ~ 100% 的温室番茄为对象, 根据上述介绍的方法, 得出能够表示温室番茄颜色的主色, 并得出了它们的主色直方图, 如图 4 所示.

根据番茄的着色度级别, 将其分为 3 级: 着色度大于 90% 的为特等, 着色度在 20% ~ 90% 的为 1 级, 着色度小于 20% 的为 2 级. 利用研制的智能蔬

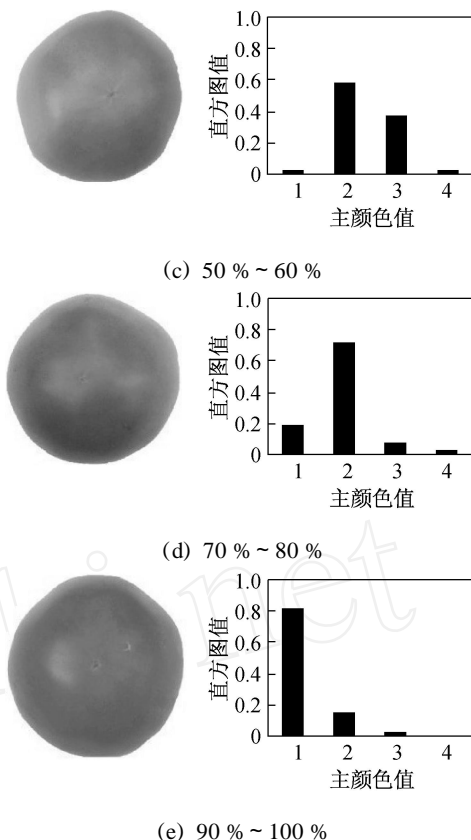


图 4 从不同成熟度的番茄中提取出的颜色直方图
Fig. 4 The extracted dominant color histogram of tomatoes with different ripeness

果分级系统, 选取 220 个番茄样本 (60 个特级, 100 个 1 级和 60 个 2 级) 进行了颜色分级试验, 每个样本根据已获得温室番茄颜色的主色索引与颜色量化区间的对应关系, 可以很快地将每个蔬果样本的表面颜色用主色表示, 求得每个蔬果的主色直方图, 并通过与数据库中已知等级蔬果的主色直方图的对比, 实现蔬果的分级, 分级结果如表 2 所示.

试验结果显示对特级蔬果的分类正确率为 97%, 1 级蔬果的分类正确率为 96%, 2 级蔬果的分类正确率为 100%. 试验结果表明, 主色直方图匹配方法具有很高的精度, 可以满足实用的要求.

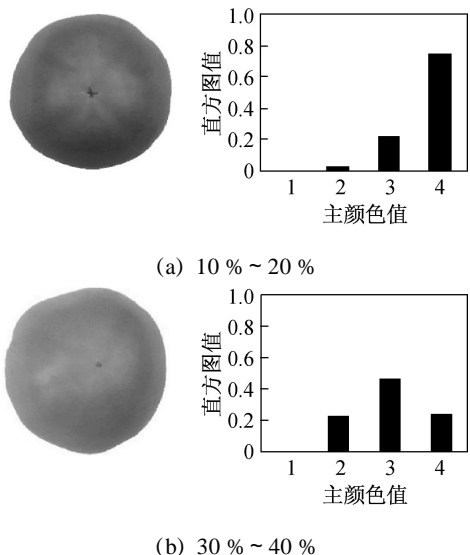
表 2 分类试验结果

Tab. 2 The color classification result

样品等级	被分到每个等级中的样本数			正确率/%
	特级	1 级	2 级	
特级	58	2	0	97
1 级	4	96	0	96
2 级	0	0	60	100

5 结 语

本文提出了一种用于蔬果分级系统的基于主色



直方图特征匹配的蔬果颜色分级方法. 首先在与人类视觉感知相一致的 HSV 颜色空间中提取蔬果的主色,并用主色直方图来描述蔬果的颜色分级特征,通过将待分级蔬果的主色直方图与已知等级的蔬果的主色直方图进行对比,将待分级蔬果划分到最相似的类中,进而实现蔬果的分级.该方法具有很高的精度和一定的通用性,可以满足实用的要求.

参考文献:

- [1] Miller B K, Delwiche M J. A color vision system for peach grading[J]. **Transactions of ASAE**, 1989, 32(4): 1484-1490.
- [2] Tao Y, Heinemann P H, Varghese Z, et al. Machine vision for color inspection of potatoes and apples[J]. **Transaction of the ASAE**, 1995, 38(5): 1555-1561.
- [3] 杨秀坤, 陈晓光, 马成林, 等. 用遗传神经网络方法进行苹果颜色自动检测的研究[J]. **农业工程学报**, 1997, 13(2): 173-176.
YANG Xiu-kun, CHEN Xiao-guang, MA Cheng-lin, et al. Study on automated color inspection of apples using genetic neural network [J]. **Transactions of the CSAE**, 1997, 13(2): 173-176.
- [4] 何东健, 杨青, 薛少平, 等. 果实表面颜色计算机视觉分级技术研究[J]. **农业工程学报**, 1998, 14(3): 202-205.
HE Dong-jian, YANG Qing, XUE Shao-ping, et al. Computer vision for color sorting of fresh fruits[J]. **Transactions of the CSAE**, 1998, 14(3): 202-205.
- [5] 冯斌, 汪懋华. 基于颜色分形的水果计算机视觉分级研究[J]. **农业工程学报**, 2002, 18(2): 141-144.
FENG Bin, WANG Mao-hua. Computer vision classification of fruit based on fractal color [J]. **Transactions of the CSAE**, 2002, 18(2): 141-144.
- [6] Ohta Y, Kanade T, Sakai T. Color information for region segmentation[J]. **Computer Graphics and Image Processing**, 1980, 13(3): 222-241.
- [7] Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters [J]. **Processing of the IEEE**, 1990, 78(4): 678-689.
- [8] Smith A R. Color gamut transformation pairs [J]. **Computer Graphics**, 1978, 12(3): 12-19.
- [9] Heckbert P S. Color image quantization for frame buffer display[J]. **Computer Graphics**, 1982, 16(2): 297-307.

(上接第 1897 页)

参考文献:

- [1] 赵俊, 庄天戈. CT 图像分块重建算法[J]. **上海交通大学学报**, 2004, 38(2): 197-199.
ZHAO Jun, ZHUANG Tian-ge. CT image block reconstruction algorithm [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2004, 38(2): 197-199.
- [2] Milanfar P M, Karl W C, Willsky A S. A moment-based variational approach to tomographic reconstruction [J]. **IEEE Trans on Imag Proc**, 1996, 5(3): 459-470.
- [3] Basu S, Bresler Y. Uniqueness of tomography with unknown view angles [J]. **IEEE Trans Image Proc**, 2000, 9(6): 1094-1106.
- [4] Basu S, Bresler Y. Feasibility of tomography with unknown view angles [J]. **IEEE Trans on Imag Proc**, 2000, 9(6): 1107-1122.
- [5] Wang T J, Sze T W. The image moment method for the limited range CT image reconstruction and pattern recognition [J]. **Pattern Recognition**, 2001, 34(11): 2145-2154.
- [6] Shu H Z, Zhou J, Han G N, et al. Image reconstruction from limited range projections using orthogonal moments [J]. **Pattern Recognition**, 2007, 40(2): 670-680.
- [7] Kazantsev I G, Matej S, Lewitt R M. Limited angle tomography and ridge functions [J]. **IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record**, 2002, 3(10): 1706-1710.
- [8] Kazantsev S G, Bukhgeim A A. Singular value decomposition for the 2D fan-beam Radon transform of tensor fields [J]. **Journal of Inverse and Ill-posed Problems**, 2004, 12(3): 245-278.
- [9] Wee C Y, Paramesran R. On the computational aspects of Zernike moments [J]. **Image and Vision Computing**, 2007, 25(6): 967-980.
- [10] Hwang S K, Kim W Y. A novel approach to the fast computation of Zernike moments [J]. **Pattern Recognition**, 2006, 39(11): 2065-2076.