

基于光度立体法的翘板黑瓜子识别方法研究

李昊宇, 李 伟^{*}, 徐小波

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 针对目前翘板黑瓜子依赖手工检测效率低下的问题, 提出了一种利用光度立体视觉算法进行翘板瓜子识别的方法。首先利用实物表面重建的方法标定了图像采集系统的精度; 然后针对黑瓜子表面中间区域与周边区域颜色有巨大差异的特殊形态, 分区域三维重建了黑瓜子表面; 最后通过试验确定表面面积为识别特征, 识别阈值为 9, 在误识率小于 5% 的情况下, 翘板瓜子识别率达 90%。试验结果表明应用光度立体视觉算法可以有效地进行翘板黑瓜子的识别。

关键词: 机器视觉; 表面三维重建; 光度立体法; 翘板黑瓜子识别

中图分类号: TN911.73; TP242.62

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0159-05

李昊宇, 李 伟, 徐小波. 基于光度立体法的翘板黑瓜子识别方法研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 159-163.

Li Haoyu, Li Wei, Xu Xiaobo. Method for identification of wrinkled black melon seeds using photometric stereo[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 159-163. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

黑瓜子作为一种大众化的休闲食品, 翘板率的高低直接决定其商品等级的优劣。然而目前, 在黑瓜子商品化生产过程中, 翘板瓜子的自动化检测一直没有得到实现, 很多时候依靠手工挑拣。

近年来, 机器视觉技术以其速度快、信息量大、功能多等特点在农产品品质检测中得到了广泛的应用, 极大地提高了农产品品质检测的精度和效率。应义斌、景寒松等(1998)^[1]通过计算机视觉摄取黄花梨图像, 针对使用细化及收缩膨胀算法识别果梗速度较慢的缺点, 提出了一种快速算法。试验结果表明, 该算法可以 100% 判断果梗是否存在, 判断果梗是否完好的准确率达到 93%, 判断速度提高 4~6 倍, 其算法对旋转、果位不敏感。蔡健荣等^[2]利用计算机视觉开发了烟叶质量分选系统, 该系统检测准确率在 80% 以上。其中烟叶大小形状的特征主要有面积、长度、残伤及对烟叶轮廓线展开后的分布特征。Panigrahi S. 等^[3]为了精确快速地测量玉米种子的尺寸, 提出了一种从背景中分辨玉米种子图像的自动选择技术。张书慧、陈晓光^[4]通过建立图像数据采集与分析系统及相关的农副产品图像数据库, 实现对

农副产品品质(表面颜色、形状、缺陷)的准确分级, 对 100 个富士苹果进行检测, 准确率达 96% 以上。

目前, 机器视觉技术在农产品品质检测中的应用主要基于形态学及颜色参数, 然而翘板黑瓜子与正常形态黑瓜子的主要区别在于表面平整度的不同, 形态学及颜色参数很难反映两者的差别, 因此通过瓜子二维图像提取其表面三维形状信息是翘板黑瓜子检测的关键。近年来, 随着被动立体测定技术的发展, 人们提出了许多通过二维图像恢复三维立体信息的机器视觉算法。如阴影恢复形状算法, 它适用于入射照明能被控制, 对表面反射可精确建模的情况^[5]; 由纹理恢复形状算法要求纹理元素具有统计特性^[6]; 利用随机微分方程进行三维表面重建, 主要适用于非连续性的表面重建^[7]; 另外, 还有采用小波理论进行 3D 表面重建, 它是阴影恢复形状理论的延伸^[8]。

光度立体法^[9]作为一种非接触式三维重建方法, 在卫星遥感领域和地形地貌恢复中应用较多^[10], 在纺织行业也有应用, 杨晓波等^[11]应用光度立体视觉算法对织物表面进行了三维重建, 并采用 4 个特征参数定量地描述了织物的起皱程度。目前, 光度立体视觉算法在农业生产领域的应用很少, 本文利用光度立体法进行了黑瓜子表面三维重建的研究, 并通过试验分析了该方法用于翘板黑瓜子识别的可行性。

1 光度立体法基本原理

所谓光度立体法, 是根据在不同光源方向情况下拍摄的多幅图像的光强来计算物体表面的方向梯度, 从而获得图像的三维信息。

收稿日期: 2006-05-29 修订日期: 2006-06-08

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20050019005)

作者简介: 李昊宇(1981-), 男, 山西大同人, 研究方向: 视觉检测。
北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: lihaoy1128@163.com
^{*}通讯作者: 李 伟, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机视觉检测技术, 农业自动化装备技术。北京市海淀区清华东路 17 号
中国农业大学工学院, 100083。Email: gxy5@cau.edu.cn

对于全扩散表面,即理想的朗伯表面,在平行光照下的反射分布函数为^[12]:

$$R(p, q) = \frac{Q(1 + pp_s + qq_s)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (1)$$

根据图像的辐照度方程 $E(x, y) = R(p, q)$, 可得到表面方向与图像亮度之间的对应关系:

$$E(x, y) = \frac{Q(1 + pp_s + qq_s)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (2)$$

式中 $E(x, y)$ —— 图像点 (x, y) 的亮度; $R(p, q)$ —— 物体表面反射强度; Q —— 反射常数; (p, q) —— 物体表面的方向梯度, $p = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y}$; (p_s, q_s) —— 光源的方向, $p_s = -\cos V_0 \tan H_0$, $q_s = -\sin V_0 \tan H_0$; (V_0, H_0) —— 光源的倾角与仰角。

对于在 3 个不同的光源条件下得到的 3 幅光照图像, 可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} E_1(x, y) = \frac{Q(1 + pp_1 + qq_1)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_1^2 + q_1^2}} \\ E_2(x, y) = \frac{Q(1 + pp_2 + qq_2)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_2^2 + q_2^2}} \\ E_3(x, y) = \frac{Q(1 + pp_3 + qq_3)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_3^2 + q_3^2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $E_1(x, y), E_2(x, y), E_3(x, y)$ —— 分别对应三幅图像像素点 (x, y) 的归一化亮度(灰度值与图像上最大灰度值之比); $(p_1, q_1), (p_2, q_2)$ 和 (p_3, q_3) —— 分别为 3 幅图像的光源方向。

通过对方程组的求解, 得到图像上各像素点的表面方向梯度 (p, q) 及 Q , 在实际情况中, 由于图像已离散化, 因此 $\frac{\partial z(x, y)}{\partial x}$ 与 $\frac{\partial z(x, y)}{\partial y}$ 可用它们的一次差分近似地表示:

$$p = \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = z(x + 1, y) - z(x, y) \quad (4)$$

$$q = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = z(x, y + 1) - z(x, y) \quad (5)$$

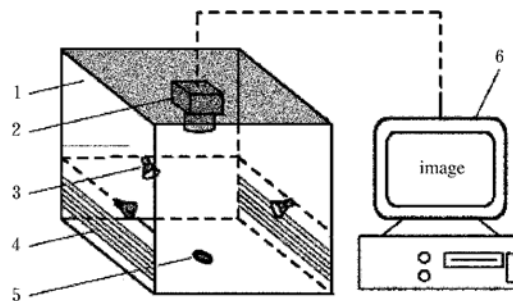
设起始点 (x_0, y_0) 高度为 Z_0 (起始点通常为图像中心点), 则可以求出 $(x_0 + 1, y_0), (x_0 - 1, y_0), (x_0, y_0 + 1), (x_0, y_0 - 1)$ 四个相邻点的高度值, 并进一步扩散, 得到所有离散图像点的高度值, 从而最终恢复物体的表面形状。

2 黑瓜子表面三维重建

2.1 图像采集系统的构建

图像采集系统示意图如图 1 所示, 采用嘉恒 AC1300 型逐行扫描摄像机和 RGB10B 图像采集卡, 摄像机的焦距 $f = 16 \text{ mm}$, 摄像机到物体的距离 $Z_0 =$

745 mm, 光源为 3 个 50 W 的白色聚光灯。计算机采用方正电脑, Intel P4 处理器, 2.4GHz 主频, 256MB 内存, 软件采用 VC++ 6.0 编写实现。



1. 照明室 2. CCD 摄像机 3. 聚光灯(3 个)
4. 照明灯管 5. 试验物放置区 6. 计算机

图 1 图像采集系统示意图

Fig. 1 Sketch map of image capturing system

2.2 系统精度标定

为了标定该系统下利用光度立体法进行表面三维重建的精度, 本文采用实物验证的方法。实物表面为一球冠, 其底部直径 $d = 25.67 \text{ mm}$, 高 $h = 4.18 \text{ mm}$, 设 (x_0, y_0) 为球冠顶点坐标, $z(x_0, y_0)$ 为球冠顶点高度, 则根据几何知识, 可计算球冠表面各点的高度 $z_0(x, y)$:

$$z_0(x, y) = z(x_0, y_0) - \left(\frac{h}{2} + \frac{d^2}{8h} \right) + \sqrt{\left(\frac{h}{2} + \frac{d^2}{8h} \right)^2 - [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]} \quad (6)$$

图 2 为球冠表面的三幅光照图像, 利用前述光度立体算法重建球冠表面, 可得到重建表面各点的高度 $z_g(x, y)$, 比较同一点的 $z_0(x, y)$ 和 $z_g(x, y)$, 可以验证系统的精度。为了进行定量描述, 采用总体平均误差、总体均方差、总体极差、均方差率和准确率 5 项统计值^[13]来衡量重建表面的误差。表 1 为重建表面与实物表面误差对照表, 从表中可以看到, 实物表面与重建表面的总体平均误差小于 1 mm, 准确率在 90% 以上, 表明重建表面可以较准确地反映实物表面的形状, 在该系统下利用光度立体法进行表面三维重建有较高精度。

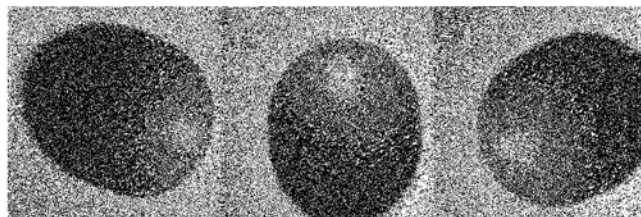


图 2 实物光照图片

Fig. 2 Photometric images of calibration substance

表1 实物表面与重建表面对照误差表

Table 1 Error between original and reconstructed surface of melon seeds

光源倾角 /(°)			光源仰角 /(°)			总体平 均误差 /mm	总体 均方差 /mm	总体 极差 /mm	均方差 率 /%	准确 率 /%	
-	20	90	192	66	53	63	0.700	0.044	0.376	3.77	96.23
1	90	179	68	51	58		0.738	0.074	0.093	6.28	93.72
3	90	171	60	52	68		0.777	0.063	0.178	5.34	94.66

本文识别翘板瓜子的关键在于翘板瓜子与正常形态瓜子表面平整度的不同, 因此对表面重建的总体平均误差和准确率有较高要求, 比较表1中相关数据, 本文在接下来的瓜子表面重建过程中光源参数定为 $S_1(66^\circ, -20^\circ)$, $S_2(53^\circ, 90^\circ)$, $S_3(63^\circ, 192^\circ)$ 。图3为球冠表面在该光源参数下的重建图(用MatLab制作)。



图3 实物重建表面

Fig. 3 Reconstructed surface of calibration substance

2.3 瓜子表面重建

图4所示为一粒黑瓜子的三幅光照图片(依次开启3个光源), 由于光源的方向性, 从图4中可以看到瓜子图像周围有不同程度的阴影, 如果直接对光照图片处理, 则很难准确地分割出瓜子区域。于是采集每粒瓜子光照图片后, 保持瓜子相对镜头位置不变, 然后利用均匀光源获得瓜子的定位图片(如图5所示), 则定位图片上各点与光照图片各点一一对应。

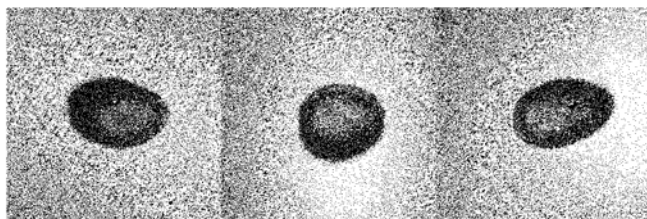
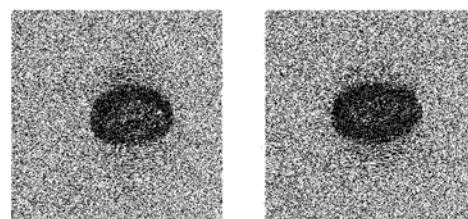


图4 瓜子光照图片

Fig. 4 Photometric images of melon seeds

从图5可以看到瓜子表面中部为浅黄色, 周边为黑色, 两部分反射率有很大的不同, 但是在每个区域内, 颜色大致相同, 反射率可以看作常数, 于是本文拟对中部与周边区域分别应用光度立体法, 然后重建瓜子表面。



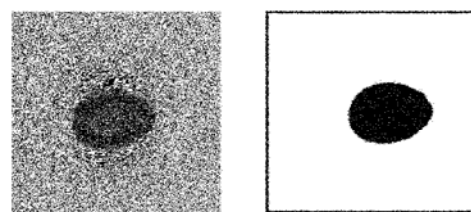
a. 翘板瓜子

b. 正常形态瓜子

图5 瓜子定位图片

Fig. 5 Location images of melon seeds

把瓜子定位图片(RGB模型)转化为灰度图片, 由于瓜子区域与背景灰度值的巨大差异, 利用自动迭代阈值分割的方法可准确地分割出瓜子区域(如图6所示)。



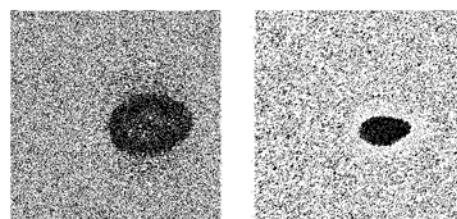
a. 灰度定位图片

b. 瓜子区域

图6 定位图片背景分割

Fig. 6 Background segmentation of location image

从图6中也可以看到定位图片灰度化后, 瓜子的中间区域与其周边区域灰度相差不大, 用传统的阈值分割的方法已不能把两个区域分割开来。由于中间区域与周边区域颜色有明显差异, 因此, 如图7所示, 本文把定位图片转化为色度灰度图, 利用阈值分割的方法予以分割(所谓色度灰度图就是把定位图片转化为HIS模型后, 以其H值为灰度的灰度图片)。



a. 定位图片

b. 色调灰度图

图7 定位图片与其色调灰度图

Fig. 7 Location image and its gray hue-image

定位图片中瓜子区域及瓜子中间区域准确分割后, 分别计算每幅光照图片中两个区域各点的归一化亮度。依据式(3), 可计算出瓜子区域各像素点的表面方向梯度 (p, q) , 设起始点 (x_0, y_0) 为瓜子区域中心点, 高度为 $z_0 = 0$, 则可计算出瓜子表面各点的相对高度。

图8所示为图5瓜子的表面重建图(相对高度), 从

图中可以看到分区域重建瓜子表面的方法准确地反映了瓜子表面的三维形状。

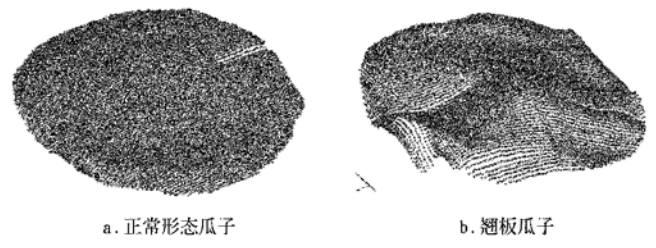


图 8 瓜子表面重建图像
Fig. 8 Reconstructed images of melon seeds

3 试验与分析

由上述分析可知分区域应用光度立体法重建黑瓜子表面可以比较准确地反映黑瓜子表面的三维信息, 本文拟通过试验选取有效特征, 并测试基于光度立体法的翘板识别精度。

3.1 特征的提取与选择

选取正常形态瓜子与翘板瓜子各 150 粒(通过人工筛选), 作为训练样本, 分别利用光度立体法重建表面, 然后分别提取横向表面面积、纵向表面面积、粗糙度^[14]、扭曲度^[15]、平均偏移量^[15] 5 个反映平整度的特征参数, 分析比较各特征的识别率及误识率, 选择识别率较高的特征, 并确定识别阈值 T 。

1) 横向表面面积

$$S_h = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} |Z_{j+1,i} - Z_{j,i}|$$

式中 S_h —— 横向表面面积; N —— 行数; M —— 列数; $Z_{x,y}$ —— 高度值。

2) 纵向表面面积

$$S_z = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |Z_{i,j+1} - Z_{i,j}|$$

式中 S_z —— 纵向表面面积; N —— 行数; M —— 列数; $Z_{x,y}$ —— 高度值。

表 2 为各特征在相同误识率区间下识别率的比较, 其中识别率是指识别出的翘板瓜子占翘板样本总数的比率, 误识率是指被识别为翘板的正常形态瓜子占翘板瓜子样本总数的比率。从表 2 中可以看出, 横向表面面积可以用作识别翘板瓜子的特征值。图 9 为训练样本横向表面面积计算结果分布散点图, 从中可以确定识别阈值 $T = 9$ 。

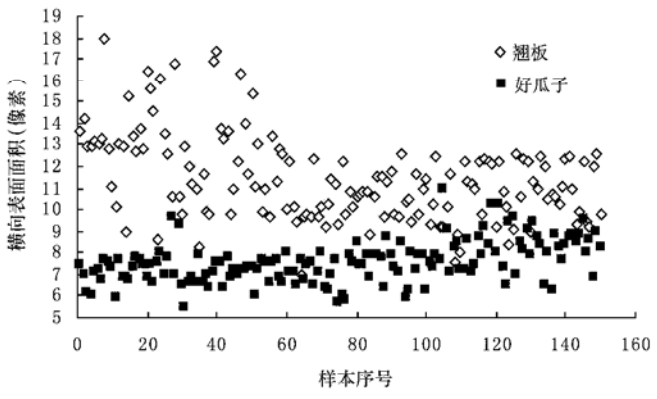


图 9 横向表面面积散点图
Fig. 9 Scatter-point graph of transverse surface areas of the sampled melon seeds

表 2 训练样本特征值识别特性

Table 2 Identification features of the characteristic values of trained samples															%	
横向表面面积				纵向表面面积				粗糙度		扭曲度		平均偏移量				
识别率	55~ 85	85~ 93	93~ 95	8~ 31	31~ 43	43~ 49	14~ 25	25~ 34	34~ 44	11~ 14	14~ 19	19~ 25	13~ 27	27~ 31	31~ 37	
误识率	0~ 4	4~ 6	6~ 10	0~ 4	4~ 6	6~ 10	0~ 4	4~ 6	6~ 10	0~ 4	4~ 6	6~ 10	0~ 4	4~ 6	6~ 10	

3.2 翘板瓜子识别精度测试

分别选取正常形态瓜子和翘板瓜子各 150 粒, 作为测试样本, 分别采集光度图片, 表面重建, 提取所选特征, 然后利用上一步的识别阈值 T 识别出其中翘板, 检验算法的翘板识别精度。测试结果见表 3。

表 3 测试样本检测结果

Table 3 Measured results of test samples					
翘板瓜子 总粒数	识别 粒数	误识 粒数	识别率 /%	误识率 /%	平均单粒 识别时间/s
150	137	7	91.3	4.7	0.086

3.3 结果讨论

本文在重建瓜子表面时, 起始点的高度设为 0, 因

此重建表面各点的高度为相对于起始点的高度, 之所以没有重建表面各点的实际高度, 是基于以下两个原因: (1) 测量起始点的实际高度, 需要瓜子表面实际点与图像点的匹配, 这个过程有一定难度, 而且操作起来比较复杂; (2) 由式(4) (5) 及积分原理可知, 起始点的高度并不影响重建表面的形状, 而翘板黑瓜子与正常形态黑瓜子主要区别在于表面平整度的不同, 因此起始点设为 0 并不影响翘板瓜子的识别, 试验也证明了这一点。

另外在重建瓜子表面时, 使用了 3 幅光照图片, 如能采用更多的光照图片, 则会获得更高的重建精度, 恢复效果也会更加理想。但是这样也会需要更多的处理时间, 因此, 在实际应用中, 应依据实际条件选择合适的图

像数量。

4 结 论

1) 在本课题所设计的图像采集系统中, 利用光度立体法重建物体表面有较高精度, 其总体平均误差小于 1 mm, 准确率在 90% 以上;

2) 针对黑瓜子表面中部与周边区域颜色有明显差异的特殊形态, 运用分区域重建的方法重建了瓜子表面, 试验表明有较高的准确度;

3) 选择横向表面面积作为识别特征, 在识别阈值为 9 (像素) 下, 静态下可以有效地进行翘板黑瓜子的识别, 试验表明在误识率小于 5% 的情况下, 翘板瓜子识别率在 90% 以上, 平均单粒识别时间为 86 ms。这为进一步开发机器视觉翘板黑瓜子自动检测系统打下了基础。

[参 考 文 献]

- [1] 应义斌, 景寒松. 计算机视觉技术进行黄花梨压伤的检测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 205–209.
- [2] 蔡健荣, 方如明, 等. 利用计算机视觉技术的烟叶质量分选系统研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 118–122.
- [3] Panigrahi S, Misra M K, Bern C, et al. Background segmentation and dimensional measurement of corn germplasm[J]. Trans of the ASAE, 1995, 38(1): 291–297.
- [4] 张书慧, 陈晓光. 苹果、桃等农副产品品质检测与分级图像处理系统的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 201–204.
- [5] Kyoung M L. Shape from shading with a generalized reflectance map model[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 67(2): 143–160.
- [6] Super B J, Bovik A C. Shape from texture by wavelet-based measurement of local spectral moments[J]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1992, 6: 396–300.
- [7] Nitin M V, Kim L B. Discontinuity-preserving surface reconstruction using stochastic differential equations[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 72(3): 257–270.
- [8] Jun W H. Wavelet-Based Shape from Shading[J]. Graphical Models and Image Processing, 1998, 57(4): 343–362.
- [9] Nayar S K, Lkeuchi K, Kunade T. Extracting shape from reflectance of hybrid surfaces by photometric sampling[J]. Image Understanding Workshop, 1989, 10: 563–583.
- [10] Lkeuchi K. Determining surface orientations of secular surfaces by using the photometric stereo methods[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence 3, 1981: 661–669.
- [11] 杨晓波, 黄秀宝. 基于光度立体视觉的起皱织物表面形态重建研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(2): 48–55.
- [12] 黄勇, 汪炳权, 任彬. 利用光度立体法生成真实物体的三维模型[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(10): 814–817.
- [13] 杨晓波, 黄秀宝. 基于光度立体视觉的起皱织物表面形态重建研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(2): 48–55.
- [14] Fan J, Hui P L. Objective Evaluation of Pucker in Three-Dimensional Garment Seams[J]. Textile Res J, 1999, 69(7): 467–472.
- [15] Kawabata S, Niwa M. An experiment on human sensory measurement and its objective measurement: Case of the Measurement of a Seam Pucker Level[A]. In Proc. 25th Textile Research Symposium [C]. Japan: Mt. Fuji, 1996: 85–88.

Method for identification of wrinkled black melon seeds using photometric stereo

Li Haoyu, Li Wei^{*}, Xu Xiaobo

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, the cleaning of wrinkled black melon seeds is performed manually, which has extremely low efficiency. As to the problem, a method for identifying wrinkled black melon seeds with photometric stereo is proposed in this paper. First, the accuracy of image capturing system was calibrated by constructing a testing entity surface. Then, as there was a great color difference between the central and the periphery area of the black melon seeds, the two parts of surfaces were separately reconstructed. Finally, experiments were done to determine transverse surface area as the identification feature, and the threshold is nine. It was shown that more than 90% of the wrinkled melon seeds could successfully be identified while the error rate is below 5%. From the experiments, it can be concluded that the algorithm of photometric stereo can be used to identify the wrinkled black melon seeds effectively.

Key words: machine vision; three-dimensional surface reconstruction; photometric stereo; identification of wrinkled black melon seeds