

基于类球形亮度变换的水果表面缺陷提取^{*}

黄文倩^{1,2} 李江波² 张 驰² 李 斌² 陈立平² 张百海¹

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 针对基于机器视觉技术的水果表面缺陷因受到亮度不均影响而提取困难的问题,以阿克苏苹果为研究对象,采用可见-近红外双 CCD 成像系统,设计了一种无需预先建模的类球形亮度变换方法,对 R 分量图像进行亮度变换,变换后的图像使整个水果表面正常区域灰度趋于一致,而缺陷区域依然保留为低灰度区,增强了缺陷和正常果皮的对比度,提高了缺陷检测精度。使用共计 100 个样本评估算法的可行性,其中 45 个缺陷果的检测精度为 93.3%,55 个正常果的检测正确率为 100%,整体检测精度达到 97%。研究结果表明,利用基于类球形亮度变换结合单阈值分割方法提取水果表面缺陷是可行的。

关键词: 苹果 机器视觉 图像处理 类球形亮度变换 表面缺陷

中图分类号: TP391.41; TP274⁺.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0187-05

Detection of Surface Defects on Fruits Using Spherical Intensity Transformation

Huang Wenqian^{1,2} Li Jiangbo² Zhang Chi² Li Bin² Chen Liping² Zhang Baihai¹

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

The non-uniform intensity distribution on the fruit's images is the main reason resulting in the difficulty and low accuracy of surface defects detection by using a machine vision system. A detection system based on Vis-NIR double CCDs was built for detecting surface defects on 'Akesu' apples. A spherical intensity transformation method (SITM) was proposed to transform the R channel image of an apple, which enhanced the intensity uniformity of the normal regions and kept the low intensity of the defected regions in an apple. The intensity contrast between the defect regions and those of normal tissue was also improved, which increased the defect detection accuracy. A defect detection algorithm was developed based on the SITM and 100 apples consisting of 45 defected apples and 55 intact apples were used to evaluate the performance of the algorithm. Results showed that 93.3% of defected apples were correctly classified and 100% of the intact apples were correctly recognized. The overall detection accuracy was 97%. It is feasible to extract the surface defects on apples using the proposed SITM combining with a single threshold segmentation method.

Key words Apple, Machine vision, Image processing, Spherical intensity transformation, Surface defects

收稿日期: 2012-06-25 修回日期: 2012-09-04

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101901)和国家自然科学基金资助项目(31071324)

作者简介: 黄文倩, 博士生, 国家农业智能装备工程技术研究中心副研究员, 主要从事农产品无损检测研究, E-mail: huangwenqian@iea.ac.cn

通讯作者: 张百海, 教授, 博士生导师, 主要从事自动控制系统理论与方法研究, E-mail: smczhang@bit.edu.cn

引言

根据水果的外部品质进行检测和分级,是水果销售、加工和贮存前的重要环节。通过机器视觉检测技术对水果进行分级不仅能够提高水果质量,而且可以有效地减少人工检测的劳动量,提高检测效率^[1-3]。目前,水果大小、颜色识别和外部缺陷检测中,前二者已经获得了很好的解决,但根据外部缺陷进行检测分级仍然是难点。水果是一个类球形的物体,根据朗伯反射定律,水果边缘的光能量主要沿着反射光线的方向传播,当反射光线与相机的夹角较大时,反射光线很难进入相机,表现为亮度较低,而缺陷本身在图像中也表现为低亮度,图像处理时边缘正常区域和中部缺陷区域容易混淆而造成误分割^[4-5]。Leemans 等采用 K 均值聚类的方法提取 RGB 图像中苹果缺陷的特征,然后采用二次判别分析的方法实现缺陷的检测^[6]。Blasco 等利用无监督区域增长算法对柑橘类水果表面缺陷进行分割,利用 3 个 CCD 相机获得的彩色图像,根据不同区域之间的马氏距离来评价区域之间的相似度从而检测出缺陷^[7]。Xing 等采用波长 400~1 000 nm 高光谱图像采集系统获得水果的图像,利用主成分分析方法进行降维,根据获得的主成分图像实现缺陷的识别^[8]。Tao 等提出了自适应球形灰度变换法,该方法补偿了水果表面曲率变化造成的反射亮度梯度,从而实现缺陷的单阈值分割^[9]。应义斌等研究了球体大小、表面颜色和图像采集位置等因素对球体图像颜色的亮度、色调和饱和度的影响,建立了摄像视区中心的球体图像亮度校正模型,并应用于柑橘图像的亮度校正^[10]。Gomez-Sanchis 等针对球形水果表面照度不均的问题,假设水果为朗伯椭圆表面,利用数字高程模型开发了一套自动亮度校正算法^[11]。Haff 等针对高光谱图像中弯曲表面造成的亮度不均问题,采用均匀的 Teflon 球体作为研究对象,研究了朗伯表面的光反射方式、光源到物体表面的距离和投影到探测器的弧面长度变化对亮度的影响,并提出了补偿算法^[12]。

分析上述的研究,目前基于 RGB 图像的缺陷检测方法,存在算法复杂的问题,需要事先进行训练。采用高光谱图像进行检测,存在成本高的问题。因此,大部分研究都寻求采用标准球建立亮度校正模型来对灰度图像亮度进行校正以实现缺陷的检测,但实际生产中水果不一定表现为规则的球体,这降低了此类模型的适用范围。针对这些问题,本文采用 RGB 模型和中心波长为 800 nm 的可见-近红外双 CCD 成像系统,提出一种无需预先进行建模的类

球形亮度变换方法,对水果的灰度图像进行变换,基于变换后的图像,利用全局阈值实现水果表面缺陷检测分割。

1 实验材料

1.1 样本及预处理

实验对象为阿克苏苹果,2012 年 1 月份购于北京当地超市,共计 100 个样品,其中带缺陷的水果 45 个,正常果 55 个,直径范围为 6.5~8.5 cm。缺陷类型包括虫咬伤、冰雹伤、病害斑痕、擦伤和损伤 5 类,其中前 4 类缺陷表皮呈褐色。实验前用清水清洗苹果以便消除其表面一些非缺陷的污斑区域对检测造成影响,清洗后放置于实验室中使其自然风干,以防止水果表面水的存在增加反光。

1.2 图像采集

本研究中图像采集系统如图 1 所示。整个系统由 1 台分辨率为 1 024 像素×768 像素的可见-近红外双 CCD 相机(AD-080 GE 型, JAI, USA)、2 套功率为 36 W 的可见光和近红外长条形 LED 光源、1 个 4 口网卡、载物台和计算机等组成。AD-080 GE 型相机为以太网接口,通过 2 条网线和计算机的网卡相连。整套系统放置在一个暗箱当中,以减少环境光的影响。载物台颜色为黑色以有利于背景分割。图像数据采集时,将苹果放在载物台上,同步采集苹果的 RGB 图像和近红外(NIR)图像。为了使所采集到的水果样本图像更具有代表性,在手动样本放置时感兴趣区域(缺陷区域)与相机之间为任意角度。

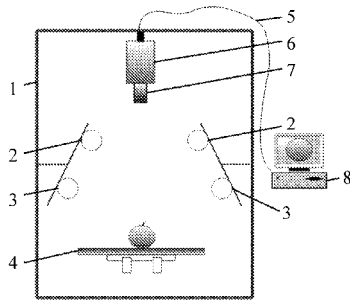


图 1 苹果图像采集系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of apple imaging system

1. 图像采集暗箱
2. 近红外 LED 光源
3. 可见光 LED 光源
4. 载物台
5. 以太网线
6. AD-080 GE 型相机
7. 镜头
8. 计算机

图像数据采集由 AD-080 GE 型相机自带的软件完成,后续的数据处理采用 Matlab 2011a(The MathWorks Inc., USA)软件。

2 数据处理与分析方法

由于 NIR 图像不受苹果表面颜色的影响,且与

背景的亮度差异较大,因此采用样本 NIR 图像构建二值化模板。同时,与其他分量及 NIR 图像相比,缺陷在 R 分量图像中与正常果皮对照更加清晰,因此基于 R 分量图像提取苹果表面缺陷信息。

2.1 类球形表面亮度变换方法

水果是一个生物体,其表面存在弯曲,光照在上面会形成中间亮边缘暗的分布。可以将水果近似看作一个朗伯体,根据朗伯反射原理,球面上任意一点的亮度与该点的法向量和该点与光源连线之间的角度 θ 的余弦呈正比^[13],即

$$I_D = I_L \cos \theta \tag{1}$$

式中 I_D ——反射光强度 I_L ——入射光强度

因为光源对称分布于水果的侧上方,相机处于水果的正上方,且相机到水果的物距远大于水果的尺寸,因此相机所获图像中水果表面各点亮度的差异主要由夹角 θ 决定。如图 2 所示,水果边缘区域反射光线与法向量的夹角 θ_2 大于中间区域的夹角 θ_1 ,因而亮度也较低。

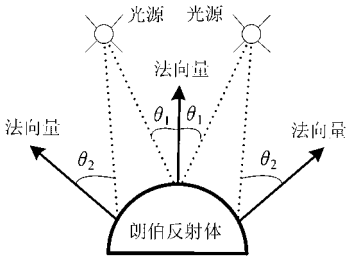


图 2 朗伯反射模型图

Fig.2 Diagram of Lambertian reflection model

如图 3 所示,对于类球形的水果,沿着半径 r 的梯度方向,宽度为 Δr 的圆环区域 A 的亮度可以近似认为是均匀的,该区域的平均亮度为

$$I_m = \frac{1}{N} \sum_{i \in A(\Delta r)} I_i \tag{2}$$

式中 N ——环形区域像素点个数
 I_i ——像素点 i 的光强度

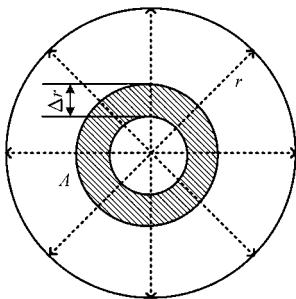


图 3 类球形亮度变换方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of spherical intensity transformation method

当计算出平均亮度 I_m 后,将原始环形区域内所有像素点 i 的光强度 I_i 均除以 I_m ,再乘以 255,可获

得该区域变换后的亮度图像 R_c ,即

$$R_c = 255(I_i/I_m) \quad (i \in A(\Delta r)) \tag{3}$$

由于对光反射和吸收效应的不同,同一宽度为 Δr 的圆环区域 A 内,缺陷的亮度比正常果皮的亮度要低,缺陷位置的亮度除以平均亮度后,亮度会降低,正常果皮区域的亮度除以平均亮度后,亮度则保持不变或提高,这样就提高了缺陷和正常果皮的对比度,有利于后续的缺陷提取。当 Δr 的长度逐渐缩小至一个像素点时,可以获得最高精度的亮度变换后的图像。

实际计算时,采用 NIR 图像进行背景分割获取二值图像作为掩膜,然后获取掩膜图像的外接矩形的最大宽度 Y 作为循环终止的条件。程序步骤为:①提取掩膜图像的边缘 B_e 。②利用 RGB 图像中的 R 分量图像 I_r 与获得的二值化边缘 B_e 做点乘运算,获取 R 分量的边缘像素 R_e 。③按照式(2)求这些边缘灰度像素 R_e 的平均亮度 I_m 。④用 R 分量的边缘像素 R_e 除以该平均亮度 I_m ,再乘以 255,获得变换后的边缘亮度图像 R_c ,如式(3)所示。⑤完整的变换后的图像为各次边缘亮度图像 R_c 的累加。⑥二值图像减去 B_e ,若循环次数 n 小于 $Y/2$,重复步骤①~⑤。

2.2 缺陷提取

获取变换后的亮度图像后,首先采用高斯模糊滤波对图像进行滤波,然后采用单阈值分割的方法提取缺陷区域,最后通过形态学开运算去除一些小的噪点。将该方法应用于所有的样本,统计检测精度。

3 结果与讨论

3.1 R 分量图像提取和二值化模板构建

图 4a 为 AD-080 GE 型相机采集到的苹果的 RGB 图像,整个苹果图像呈现中间亮边缘暗的趋势。从 RGB 图像中提取的 R 分量图像如图 4b 所示,缺陷区域与正常果皮区域对照较为清晰。图 4c 为 NIR 图像,缺陷在 NIR 图像中和周围的正常果皮亮度几乎一致,无法对缺陷进行有效提取。然而,NIR 图像的整体亮度与背景的亮度差异较大,利用单阈值非常容易实现背景和苹果的快速分割,便于二值化掩膜图像的构建,如图 4d 所示。

3.2 类球形亮度变换及阈值分割

图 5a 为 R 分量图像,其上的白线为剖面线,对应的剖面图如图 5c 所示。从剖面图可以看出,整个苹果图像呈现中间亮边缘暗,且边缘亮度变化是一个上升的斜坡,当进行单阈值分割时,边缘正常果皮区域会被当成缺陷提取出来造成误判。图 5b 为分割阈值等于 45 时所得到的二值化分割图,其中边缘

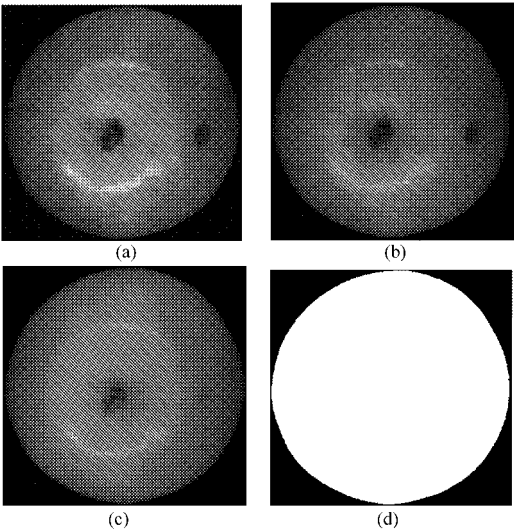


图4 R 分量图像提取和二值化模板构建
Fig.4 R channel image extraction and binary mask
image construction

(a) 苹果的RGB图像 (b) R 分量图像
(c) NIR图像 (d) 二值化掩膜图像

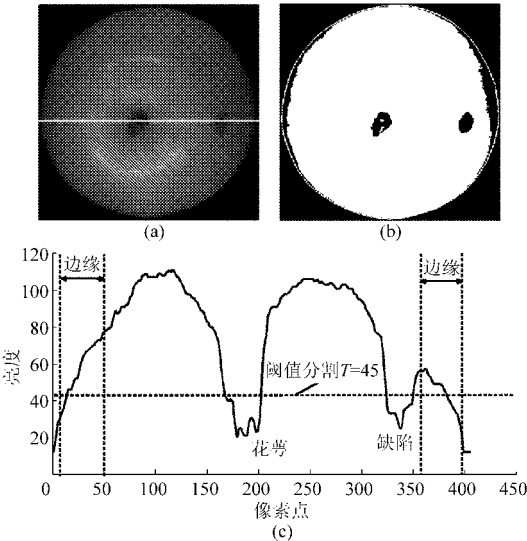


图5 R 分量图像的剖面图和单阈值分割结果
Fig.5 Profile of R channel image and result of
single threshold segmentation

(a) R 分量图像的剖面线 (b) 单阈值分割后的 R 分量二值图像
(c) R 分量图像剖面图

的圆为轮廓线,可以看出正如所分析的,边缘区域很大一部分正常果皮被误分割为缺陷。

图6a为 R 分量图像经过类球形亮度变换方法变换后得到的亮度图像,其上的黑线为剖面线,对应的剖面图如图6c所示。从剖面图可以看出,整个苹果图像的亮度均得到了提高,但缺陷区域仍保持较低的亮度。当进行单阈值分割(阈值为140)时所得到的二值化图像如图6b所示,可以看出边缘正常果皮区域没有发生误分割,仅仅分割出花萼和缺陷区域。

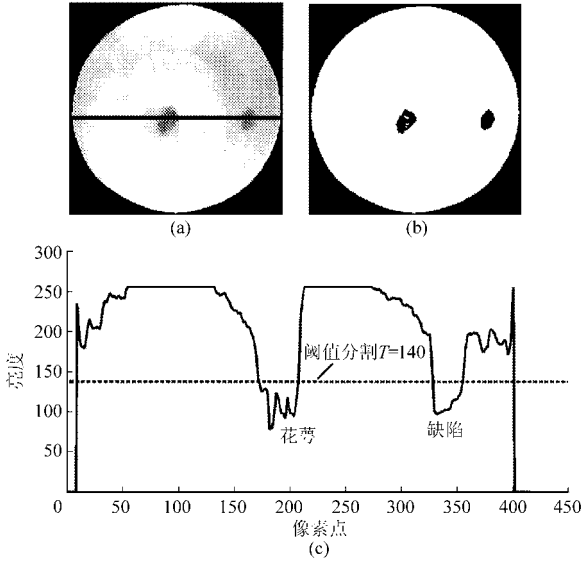


图6 亮度变换后图像的剖面图和单阈值分割结果
Fig.6 Profile of intensity transformation image and
result of single threshold segmentation

(a) 亮度变换后图像的剖面线 (b) 单阈值分割后的亮度图
(c) 亮度变换后图像的剖面图

3.3 检测结果

将所有样本采用上述的类球形亮度变换方法进行变换,然后对获得的亮度图像进行高斯滤波及形态学去噪,再采用单阈值分割方法提取缺陷,检测结果如表1所示。由于果梗/花萼与缺陷的区分并不是本研究的目的,因此检测结果不包含果梗或花萼区域。

表1 缺陷苹果和正常苹果的检测结果
Tab.1 Detection results of defected and normal apples

类型	样本数 /个	检测结果		正确率 /%
		正常果/个	缺陷果/个	
缺陷果	45	3	42	93.3
正常果	55	55	0	100

从检测结果看,缺陷果检测正确率为93.3%,正常果检测正确率为100%。缺陷果中有3个被误判为正常果,其中2个为轻微损伤,在 R 分量图像中该类型缺陷与正常果皮对照非常小,无法识别;另外一个为轻微擦伤,缺陷所在区域的苹果果皮颜色较深(呈深红色)且位于水果最边缘处,导致 R 分量图像中缺陷与该正常果皮灰度差异不大,无法进行有效区分。由此可见, R 分量图像并不适用于检测所有类型苹果表皮缺陷,对于损伤,借助高光谱成像技术可以克服这个问题^[14-16]。

4 结论

(1) 基于水果 R 分量图像,对表面亮度不均进行变换,使水果表面缺陷分割简化为单阈值法检测,

克服了传统基于 RGB 图像缺陷检测算法的复杂性，同时避免了对算法的频繁训练。

(2) 利用 100 个阿克苏苹果样本验证所开发的基于类球形亮度变换方法的检测算法,45 个缺陷果

的检测精度为 93.3% ,55 个正常果的检测正确率为 100% ,总体检测精度为 97% 。

(3) 该检测方法不受水果大小和形状的影响，较好地避免了亮度对结果造成的影响。

参 考 文 献

1 Tao Y, Heinemann P H, Varghese Z, et al. Machine vision for color inspection of potatoes and apples[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(5) : 1 555 ~ 1 561.

2 Heinemann P H, Varghese Z A, Morrow C T, et al. Machine vision inspection of golden delicious apples[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11(6) : 901 ~ 906.

3 Cubero S, Aleixos N, Moltó E, et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables[J]. Food Bioprocess Technology, 2011(4) : 487 ~ 504.

4 李江波,饶秀勤,应义斌. 水果表面亮度不均校正及单阈值得缺陷提取研究[J]. 农业机械学报,2011, 42(8) :159 ~ 163. Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Correction algorithm of illumination nonuniformity on fruit surface and defects extraction using single threshold value[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8) :159 ~ 163. (in Chinese)

5 Gowen A A, Odonnell C P, Taghizadeh M, et al. Hyperspectral imaging combined with principal component analysis for bruise damage detection on white mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Chemometrics, 2008, 22(3 ~ 4) : 259 ~ 267.

6 Leemans V, Destain M F. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1) :83 ~ 89.

7 Blasco J, Aleixos N, Molto E. Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(3) : 535 ~ 543.

8 Xing J, Baerdemaeker J D. Bruise detection on ‘Jonagold’ apples using hyperspectral imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(2) : 152 ~ 162.

9 TaoY, Wen Z. An adaptive spherical image transform for high-speed fruit defect detection[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(1) : 241 ~ 246.

10 付峰,应义斌. 球体图像灰度变换模型及其在柑桔图像校正中的应用[J]. 农业工程学报,2004,20(4) :117 ~ 120. Fu Feng, Ying Yibin. Gray level transform model of ball image and its application in citrus image correction [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4) : 117 ~ 120. (in Chinese)

11 Gomez-Sanchis J, Molto E, Camps-Valls G, et al. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects: an application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2) : 191 ~ 200.

12 Haff R, Saranwong S, Kawano S. Methods for correcting morphological-based deficiencies in hyperspectral images of round objects[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2011, 19(6) :431 ~ 441.

13 Smith W J. Modern optical engineering—the design of optical system[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.

14 Elmasry G, Wang N, Vigneault C, et al. Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging[J]. LWT – Food Science and Technology, 2008, 41(2) :337 ~ 345.

15 赵杰文,刘剑华,陈全胜,等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报,2008,39(1) :106 ~ 109. Zhao Jiewen, Liu Jianhua, Chen Quansheng, et al. Detecting subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1) :106 ~ 109. (in Chinese)

16 Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J, et al. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3) :345 ~ 355.