

基于激光图像分析的苹果表面损伤和内部腐烂检测^{*}

陈育彦 屠康 柴丽月 潘磊庆

(南京农业大学食品科技学院, 南京 210095)

【摘要】 利用波长 650 nm、功率 25 mW 的半导体激光及计算机视觉技术,初步探讨了利用激光图像分析检测苹果(嘎拉)采后表面损伤和内部腐烂检测的可行性。利用钢球砸伤,模拟苹果在采收和运输过程中受到的损伤;利用微量注射器从苹果底部将 15 μL ($10^5/\text{mL}$ 孢子浓度)的青霉菌液注入果心部位使其腐坏,模拟苹果内部的腐烂。进行激光图像检测试验,结果表明,受损伤后苹果图像像素数 S_3 在 36 h 达到最高值(3 964),且在 1~84 h 内与对照差异显著 ($P \leq 0.05$);接种后的苹果随着内部的腐烂,在第 4 d 时像素数 S_3 达到最高值(3 682),而后开始下降,第 7 d 与对照差异显著 ($P \leq 0.05$)。初步验证本方法检测苹果表面的损伤和内部腐烂是可行的。

关键词: 苹果 损伤 内部腐烂 计算机视觉 半导体激光

中图分类号: S123; TP391.41

文献标识码: A

Apple Surface Damage and Inner Decay Detection Based on Laser Scattering Image Analysis

Chen Yuyan Tu Kang Chai Liyue Pan Leiqing

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract

The semiconductor laser beam and computer vision technology were used to monitor the surface damage and inner decay of apples (*c. v. gala*). In the experiments, the damage was produced by falling of a spherical steel ball (diameter: 16 mm, weight: 96 g) on the apples from a height of 20 cm, to simulate the damage caused during the picking and transportation. In order to simulate the inner decay, 15 μL suspensions at $10^5/\text{mL}$ conidia of *Penicillium expansum* was injected into the inner of the apples by a micro-injection. The laser scattering image analysis indicates that the number of the pixels of the images (S_3) reached the maximum (3 964) after 36 hours after damaged, and had significant differences with the control group during 84 hours after damaged ($P \leq 0.05$). After injecting the suspensions, the number of the pixels of S_3 reached the maximum (3 682) on the 4th day, and showed significant differences with the control group on the 7th day ($P \leq 0.05$). This trial laid a theoretical basis for applying low power laser beam to monitor the surface damage and inner decay of apples.

Key words Apple, Surface damage, Inner decay, Computer vision, Semiconductor laser

引言

表面损伤是果蔬最为常见的机械损伤^[1]。由于苹果损伤通常发生在表皮下,对于深色苹果不易

被察觉,采用视觉自动检测分级也易被混淆和误判。内部腐烂及生理失调多发生在果心及其附近,一般情况下无法从外表分辨出来,目前对成批样品的检测方法是随机抽样并进行破坏观察。已有人将近红

收稿日期: 2008-06-05 修回日期: 2009-03-02

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z213)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2006707-2)、国家自然科学基金资助项目(30771512)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-05-0491)

作者简介: 陈育彦,硕士生,主要从事农产品贮藏加工研究, E-mail: inzaghi82@sina.com

通讯作者: 屠康,教授,博士生导师,主要从事农产品检测、贮藏、加工研究, E-mail: KangTu@njau.edu.cn

外光谱技术、高光谱图像和反射光谱等检测技术应用于苹果损伤、水心病和梨的褐心病检测^[2-7]。在国内,也有人将拉曼光谱分析技术与近红外连续透射光谱技术应用于苹果表面损伤及内部褐变的无损检测^[8-9]。然而,这些检测设备大多过于昂贵,数据分析处理也较为繁琐,因此,有必要进一步研究开发简单、快速、廉价的无损检测技术。

激光技术,由于其优异的方向性、单色性及能量高度集中等特点,成为各行业研究应用的热点。我国在激光应用的许多领域开展了大量的工作^[10],特别是在对生物体的研究,近十年来发展较为迅速。目前,使用较多的是 N_2 、 CO_2 和 He-Ne 激光。由于半导体激光具有体积小、能耗低等优点,可以使许多激光生物试验有可能从实验室扩展到实际环境,形成新的应用领域^[11]。目前利用半导体激光进行水果内、外部缺陷进行无损检测的研究在国内外鲜见报道。本文设计一种基于半导体激光的检测系统,

利用激光图像像素数的变化检测苹果表面损伤及内部病变的情况。

1 激光图像检测原理

当激光照射到苹果表面时,一部分光直接从表面被反射,另一部分光则进入苹果内部,经过吸收、散射后通过一个香蕉形的路径从入射点附近被折射回表面^[12]。通过计算机视觉系统采集图像将得到有明暗不同的近似圆形图像。利用激光图像对苹果品质的研究表明^[13],波长 650 nm、功率 25 mW 光源的激光散射图像与硬度、糖酸比等品质参数有较好的相关性。采用同样光源得到图 1 所示的图像,分析发现像素数 S_1 受果实品质影响大,而像素数 S_2 与激光光源关系密切。进一步分析发现,通过测定其外围圆环像素数 S_3 ,即 $S_1 - S_2$,可以检测苹果表面损伤和内部腐败。

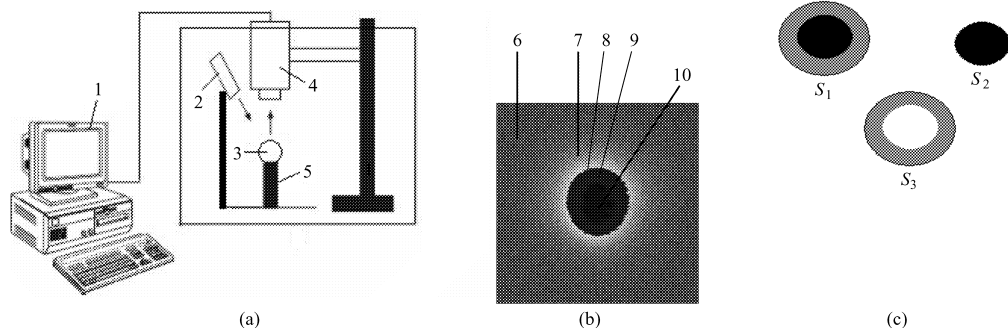


图 1 苹果激光图像采集系统及其图像分割

Fig. 1 Image-acquisition system and image segmentation

(a) 图像采集系统 (b) 获取的散射图像 (c) 图像分割

1. 计算机 2. 激光发射器 3. 样品(苹果) 4. CCD 摄像头 5. 载物台 6. 背景 7. 光环 8. 外环 9. 外圆 10. 小圆

2 试验

2.1 材料

试验选用的苹果品种为嘎拉(山东省烟台市),成熟度基本一致,色泽相近,无机械损伤。当天采收即运回南京农业大学实验室,进行分组编号处理后置于 $0^{\circ}C$ 进行冷藏,试验前取出置于试验条件下。

2.2 处理方法

供试苹果分为对照组、损伤组和腐烂组,每组 10 个,置于 $(20 \pm 1)^{\circ}C$ 、相对湿度 65% 的恒温恒湿箱贮藏。损伤组的苹果在受到损伤后 1 h 采集 1 次激光图像后,每隔 12 h 采集 1 次;腐烂组的苹果每隔 24 h 采集 1 次激光图像。试验重复 3 次。

2.3 仪器设备

半导体激光发射装置(南京来创激光科技有限公司定制);彩色摄像头(TK-C1381 型,日本 JVC);图像采集卡(Matrox II 型,加拿大)。计算机

系统: P IV 1.7 GHz CPU, 256 MB DDR 内存, GeForce 4MX440 显卡。

2.4 试验方法

2.4.1 表面损伤模拟

参照 Pajuelo 等人^[14]的试验,利用一颗直径为 16 mm、质量为 96 g 的小钢球,从 20 cm 的高度垂直自由下落至苹果表面使其损伤,为了防止对应面产生伤痕,在苹果下方放置泡沫垫增加缓冲。在苹果果面赤道取 4 个对称的损伤点。并置于 $(20 \pm 1)^{\circ}C$ 、相对湿度 65% 的恒温恒湿箱贮藏。

2.4.2 内部腐烂模拟

试验采用在 $0^{\circ}C$ 下冷藏两星期后的苹果。选用的病原菌为扩展青霉(*Penicillium expansum*),购于中国普通微生物菌种保藏管理中心。将菌种在 $20^{\circ}C$ PDA 培养基培养 10 d 后,用含 0.05% Tween-20 的无菌水冲洗下菌落上的分生孢子,借助血球计数板将孢子悬浮液调整为 10^5 /mL。利用微量注射

器从苹果底部将 15 μL 的菌液注入果心部位,并置于 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 65% 的恒温恒湿箱贮藏。

为了和试验组保持一致,在对照组苹果内部注入同样量的无菌水。

2.4.3 苹果腐烂程度的计算

为了评价苹果内部腐烂的程度,通过测量腐烂面积和腐烂边缘距果面的距离来评价腐烂的程度^[14]。前者计算圆形面积;后者测量腐烂的边缘距果面的最小距离。

2.4.4 呼吸强度测定

采用碱液吸收法,测定时温度为 20°C 。

2.4.5 激光参数设置及图像分割

试验的半导体激光器(红光)的波长 650 nm,光斑直径 6 mm,发射光源与被照样品呈 15° 角,距离 15 cm,摄像头位于样品正上方 30 cm 处。通过预试验,并且考虑到图像成像质量,照射苹果的激光功率为 25 mW,具体试验装置与文献[13]类似(图 1)。

图像采用阈值分割法,采用通用图像处理系统 image sys3.0(北京现代富博科技有限公司)对图像进行分割处理,激光波长以红色为主要基色,因此可以通过 R 分量来区分外环和小圆,而忽略 B 分量的重叠。通过多次重复预试验,确定分割大圆的 R

值为 120,分割小圆的 R 值为 65,其分割效果达到最好。像素数 S_3 与品质参数相关性最好^[13],故计算其分割后的像素数分析与表面损伤和内部缺陷的关系。

2.4.6 统计分析

采用 SAS8.2(SAS Institute, 2002)软件做统计分析,对照组与损伤组图像参数比较采用邓肯氏新复极差法(Duncan's multiple range test)。

3 结果与分析

3.1 像素数 S_3 和呼吸强度的变化

试验中,对照组苹果在贮藏期间激光图像的像素数 S_3 呈缓慢上升趋势(图 2),这与文献[14]的试验结果一致,即激光图像像素数随着贮藏时间的增加呈现递增趋势。而苹果表面受到损伤后, S_3 变化比较明显,损伤 1 h 后就有显著的增加,在 36 h 达到最高值 3 964(图 2a)。在随后的贮藏期间,像素数值迅速下降;同样,如图 2b 所示,苹果内部接种后,随着腐烂的发生,其激光图像像素数在前 4 d 逐渐上升,达到最高值(3 682)后从贮藏第 5 d 起到贮藏末期一直呈下降趋势。这与 Belie 等人^[15]研究苹果在贮藏末期激光图像像素数下降的变化规律相同。

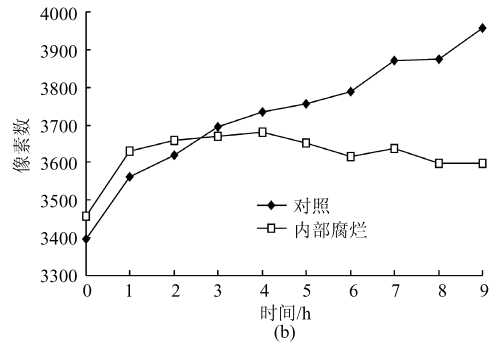
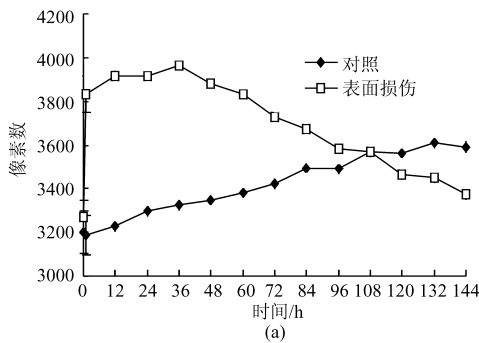


图 2 贮藏期间图像像素变化曲线

Fig. 2 Changes of pixel numbers of apple images during storage

(a) 表面损伤 (b) 内部腐烂

如图 3 所示,苹果在受到损伤(图 3a)与开始腐烂(图 3b)后,在初始时的呼吸强度与对照组相同,之后便迅速上升,且在贮藏期间一直维持在一个较高的水平。表明了外界损伤以及内部的病变都会刺激苹果呼吸强度增加。

果蔬在采收、包装、贮运过程中的任何机械损伤,即使是轻微的挤压或摩擦,轻微的跌落或果实表面的划痕,都会引起呼吸作用的升高。这种由于机械损伤而造成的呼吸加强,称为“伤呼吸”(wound respiration)。另外,病害侵染对呼吸的影响基本上与机械损伤相同,病害侵入果蔬组织,一方面本身繁殖要增加呼吸,同时也激发了果蔬组织呼吸的保卫反应。呼吸作用的提升,导致了苹果的迅速成熟、衰

老,从而导致品质的下降。另一方面,表面损伤可刺激果蔬呼吸上升引起乙烯产量增加,乙烯的增加可诱导或刺激酶反应引起伤口表面细胞栓质化或木质化,使果蔬组织坚硬粗糙^[16],从而影响其品质。

3.2 差异比较

对不同贮藏时期对照组与受到损伤及内部腐烂苹果的激光图像参数 S_3 进行差异性比较,结果如表 1、2 所示。由表 1 可知,贮藏初始两组图像的像素数没有显著差异($P \geq 0.05$),而受机械损伤后 1 h,图像像素数之间出现了显著差异($P < 0.000 1$),继续贮藏到 96 h 图像像素数又无显著差异。这表明,苹果在受到损伤后 1~84 h 之间,其激光图像像素数 S_3 将会有显著的变化。另外,如表 2 所示,

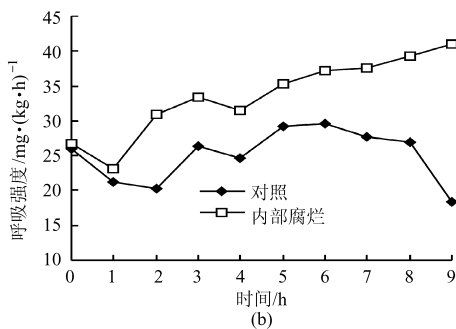
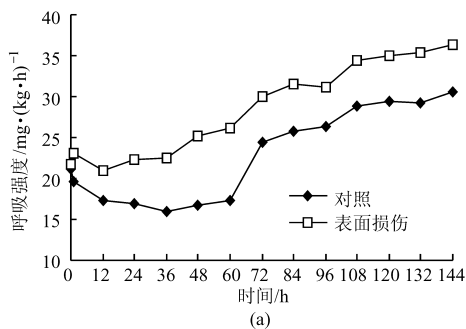


图3 贮藏期间呼吸强度变化曲线

Fig.3 Changes of respiration rate of apples during storage

(a) 表面损伤 (b) 内部腐烂

表1 对照组与损伤组比较及方差分析结果

Tab.1 ANOVA results for the comparison between the control group and surface damage group

贮藏时间/h	自由度	均方差	F 值	P 值
0	1	94 256.450	1.13	0.290 2
1	1	8 302 449.800	72.81	<0.000 1
84	1	1 073 697.800	33.73	<0.000 1
96	1	163 352.813	1.63	0.206 0

表2 对照组与腐烂组比较及方差分析结果

Tab.2 ANOVA results for the comparison between the control group and decay group

贮藏时间/d	自由度	均方差	F 值	P 值
0	1	36 481.600	0.68	0.415 9
1	1	46 991.025	1.11	0.298 3
6	1	293 779.600	3.04	0.089 4
7	1	550 137.025	5.55	0.023 8

表3 扩展青霉接种于苹果后的腐烂面积及距表面的距离

Tab.3 Decay areas and the distance to surface of blue mold on apples inoculated with *P. expansum*

参数	时间/d								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
面积/cm ²	0	0.26±0.02	0.80±0.06	1.71±0.13	2.45±0.20	3.60±0.29	4.76±0.31	6.36±0.15	7.91±0.42
距离/cm	2.42±0.38	2.02±0.27	1.73±0.21	1.36±0.17	1.14±0.15	0.61±0.09	0.49±0.07	0.28±0.04	0.11±0.01

4 结束语

通过研究表面损伤和内部腐败苹果的激光图像变化,发现受到损伤或病害的苹果的图像像素数在短期内就达到了最高值,之后一直呈下降趋势,说明苹果在高强度呼吸下迅速成熟,而后品质很快下降;又由于其表面质地改变等原因,如表面损伤导致的细胞

苹果内部发生腐烂后,与对照组苹果的 S_3 值在前几天并无显著差异 ($P \geq 0.05$),虽然其像素数在第5 d开始下降,但直到第7 d才出现了显著差异。以上这些变化也给实际检测应用提供了理论依据。

在实际生产中,苹果经过采收或运输后,在1~84 h可以试图利用激光图像分析进行检测,结合前人的研究,能将在采收和运输过程中受到表面损伤的苹果挑选出来。

3.3 苹果内部腐烂的检测

如表3所示,在苹果果心处接入菌液后,贮藏第2 d开始有病斑出现。而后病斑一直增大,直至扩展到果面。当贮藏到第5 d激光图像像素数出现下降时,腐烂面积为2.45 cm²,距离果面1.14 cm;当贮藏到第7 d腐烂组的苹果与对照组的图像像素数出现显著差异时,此时的腐烂面积为4.76 cm²,距离果面0.49 cm。以上内部腐烂在外表看来均无明显症状,因此利用激光图像技术检测苹果内部腐烂症状具有一定可行性。

栓质化或木质化,影响了激光在苹果内的吸收和散射特性。而对照组的图像像素数 S_3 在贮藏期一直呈缓慢的递增趋势,说明其正经历逐渐成熟衰老的过程。

试验条件下,所获得的图像参数 S_3 分别在表面损伤后36 h和接种后第4 d时达到最高值,而后一直呈下降趋势。损伤后1 h及模拟内部腐烂第7 d时与对照组差异显著 ($P \leq 0.05$)。

参 考 文 献

1 邓云,吴颖,李云飞. 果蔬在贮运过程中的生物力学特性及质地检测[J]. 农业工程学报,2005,21(4): 1~6.
Deng Yun, Wu Ying, Li Yunfei. Biomechanical properties and texture detection of fruits and vegetables during storage and

- transportation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4):1~6. (in Chinese)
- 2 Brown G K, Segerlind L J, Summitt R. Near-infrared reflectance of bruised apples[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(1):17~19.
 - 3 Upchurch B L, Throop J A, Aneshansley D J. Influence of time, bruise-type, and severity on near-infrared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(5):1 571~1 575.
 - 4 Lu R, Chen Y R, Park B. Hyperspectral imaging for detecting bruises in apples[C]. ASAE Paper 99-3120, 1999.
 - 5 Zerbini P E, Grassi M, Cubeddu R, et al. Nondestructive detection of brown heart in pears by time-resolve reflectance spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 25(1): 87~97.
 - 6 Throop J A, Rehkugler G E. Application of computer vision for detecting watercore in apples[J]. Transactions of ASAE, 1989, 32(6): 2 087~2 092.
 - 7 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 bruise on fruits with hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):106~109. (in Chinese)
 - 8 高晓阳, Paul H, Joseph I. 苹果擦伤拉曼光谱无损检测虚拟系统研究[J]. 农业工程学报,2005, 21(3):130~133.
Gao Xiaoyang, Paul H, Joseph I. Non-destructive apple bruise detection with Raman spectroscopy and its virtual instrumentation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3):130~133. (in Chinese)
 - 9 韩东海,刘新鑫,鲁超,等. 苹果内部褐变的无损光学检测研究[J]. 农业机械学报,2006,37(6):86~93.
Han Donghai, Liu Xinxin, Lu Chao, et al. Study on optical-nondestructive detection of breakdown apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 86~93. (in Chinese)
 - 10 陆治国. 中国激光近 10 年的应用发展[J]. 中国激光,1984, A11(10): 577~583.
Lu Zhiguo. Progress of laser applications of China in recent 10 years[J]. Chinese Journal of Lasers, 1984, A11(10): 577~583. (in Chinese)
 - 11 任珂,屠康,李宏文. 半导体激光对果蝇的控制效果[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1 148~1 152.
Ren Ke, Tu Kang, Li Hong Wen. Control effects of semiconductor laser on drosophila melanogaster[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(8): 1 148~1 152. (in Chinese)
 - 12 Valero C, Ruiz-Altisent M, Cubeddu R, et al. Selection models for the internal quality of fruit, based on time domain laser reflectance spectroscopy[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(3):313~323.
 - 13 陈育彦,屠康,任珂,等. 基于激光图像的苹果品质分析与模型[J]. 农业工程学报,2007, 23(4): 166~171.
Chen Yuyan, Tu Kang, Ren Ke, et al. Modeling apple quality changes based on laser scattering image analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 166~171. (in Chinese)
 - 14 Pajuelo M, Baldwin G, Rabal H, et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 40(1):13~24.
 - 15 Belie N D, Tu K, Jancsok P, et al. Preliminary study on the influence of turgor pressure on body reflectance of red laser light as a ripeness indicator for apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 16(3):279~284.
 - 16 Santana Lladó J D, Dominguez A M. The effects of peel abrasion on the postharvest physiology and commercial life banana fruits[J]. Acta Horticulture, 1998, 490: 547~553.

(上接第 152 页)

- 9 夏俊芳,李培武,李小昱,等. 不同预处理对近红外光谱检测脐橙 VC 含量的影响[J]. 农业机械学报, 2007,38(6): 107~111.
Xia Junfang, Li Peiwu, Li Xiaoyu, et al. Effect of different pretreatment method of nondestructive measure vitamin C content of umbilical orange with near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(6):107~111. (in Chinese)
- 10 陈斌,黄传旭,李国权,等. 模极大值法在食醋近红外光谱定量分析中的应用[J]. 农业机械学报,2005,36(5):65~67,52.
Chen Bin, Huang Chuanxu, Li Guoquan, et al. Application research of modulus maximum in near infrared spectroscopic analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(5):65~67,52. (in Chinese)
- 11 Liu Fei, He Yong. Classification of brands of instant noodles using Vis/NIR spectroscopy and chemometrics[J]. Food Research International, 2008, 41(5):562~567.
- 12 Wu Di, He Yong, Feng Shuijuan. Short-wave near-infrared spectroscopy analysis of major compounds in milk powder and wavelength assignment[J]. Analytica Chimica Acta, 2008,610(2): 232~242.
- 13 董一威,籍保平,史波林,等. 苹果中糖酸度的 CCD 近红外光谱分析[J]. 食品科学,2007,28(8):376~380.
Dong Yiwei, Ji Baoping, Shi Bolin, et al. CCD-NIR analysis of acidity and sugar content in apples[J]. Food Science, 2007,28(8):376~380. (in Chinese)