

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.025

基于CT和图像处理的苹果贮藏期预测模型^{*}

张京平 陈锐 刘孔绚

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029)

【摘要】 应用CT技术扫描不同贮藏期的富士苹果,获取含有不同贮藏期信息的CT图像,并对CT图像及图像直方图进行对比分析。结果发现,苹果的CT图像随着贮藏时间的延长呈现增亮的趋势,直方图呈现明显的双峰特性,其中代表果肉区域的右峰随着贮藏时间的延长而呈现右移的趋势。设计了一种简单快速的图像处理算法,计算CT图像的特征点灰度均值,将其与贮藏时间相对照,建立图像平均灰度值与贮藏时间的线性关系。实验验证表明该模型的预测误差较低,平均误差1.08 d。

关键词: 苹果 贮藏期 CT无损检测技术 图像处理

中图分类号: TS255.1; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)10-0122-04

Forecast Model of Apple Storage Time Based on CT Technology and Image Processing

Zhang Jingping Chen Rui Liu Kongxuan

(College of Biosystem Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract

Computed tomography(CT) images and histograms scanned of Fushi apples in different storage time were compared and analyzed. It's found that the images were getting brighter with the storage time increased and the right peaks of the histogram were moving right. The average gray value of the CT images was calculate to design a simple and fast image processing algorithm. The linear relationship was established between the average gray value and the storage time. The prediction error of the model was low and the average prediction error was 1.08 d.

Key words Apple, Storage period, CT nondestructive test technology, Image processing

引言

水果品质对贮藏时间具有很强的依赖性^[1~2],贮藏过程中保鲜技术的好坏直接影响最终产品的品质。为了提高水果贮藏期的保鲜技术,快速准确地判断水果贮藏期的方法研究十分必要。

基于X射线的CT(X-ray computed tomography)技术在农产品检测领域的应用正在迅速发展。由于CT技术能够快速、准确地获得农产品内部的图像,并且CT图像含有丰富的农产品内部信息,其在农产品内部损伤检测的应用已经相对成熟^[3~7]。另外,基于CT值与农产品内部成分的线性关系的研

究也已见相关报道^[8~9]。CT技术已经发展成为一种快速有效的农产品无损检测技术^[10~12]。但是,关于应用CT技术预测农产品贮藏期的研究还鲜有报道。本文应用CT和图像处理技术,建立苹果贮藏期预测模型。

1 实验原理与过程

1.1 实验材料及设备

选用产自山东,采摘后一周内的红富士苹果作为实验对象,以保证红富士苹果的新鲜度,确保整个存储期数据的完整性。

实验设备: X射线放射源及成像装置 GE

收稿日期: 2009-11-20 修回日期: 2010-04-22
^{*} 浙江省自然科学基金资助项目(398240)
作者简介: 张京平,副教授,主要从事农产品无损检测、农业装备机械自动化技术研究, E-mail: zhjpzhpj@126.com

HISPEED Fx/I 型医用 CT 机,精确度为 0.01 HU;贮藏室,保证贮藏室内温度处于 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$,空气相对湿度 $(50 \pm 10)\%$ 。

1.2 实验步骤和方法

将同批次苹果分成 8 组,编号 1~8,每组 9 个,其中 6 个苹果数据用于比较及模型建立,3 个苹果数据用于模型验证。把 8 组苹果同时放置于贮藏室内贮藏,保证贮藏室的温度及湿度处于稳定状态。

从第 1 组开始,扫描苹果的中心剖面,获得 CT 图像,并将 CT 图像进行直方图处理。隔一周后,拍摄第 2 组苹果的中心剖面,获得 CT 图像,并对 CT 图像进行直方图处理。以此类推,每隔一周时间,扫描下一组苹果的中心剖面,获得 CT 图像,并对 CT 图像进行直方图处理。直至所有苹果样本数据采集完全。

2 实验结果

2.1 不同贮藏期苹果 CT 图像的比较

通过对 8 组苹果处于不同贮藏期的 CT 图像比较后发现,随着贮藏时间的增长,CT 图像由暗逐渐变亮,即 CT 图像的整体灰度值随着贮藏时间的增长而呈现增长趋势,如图 1 所示。分析各贮藏期苹果 CT 图像对应的直方图后发现,直方图呈现明显的双峰结构,左侧像素较少,称为左峰,而右侧的像素明显多于左侧,称为右峰,左峰与右峰之间存在明显的峰谷。将 CT 图像与对应的图像灰度图比较后,不难发现,CT 图像中果核的区域灰度值较低,且像素较少,对应的是直方图中的左峰。而果肉区域的像素情况恰好相反,像素灰度值较大,且像素较多,对应的是直方图中的右峰。另外,将不同贮藏时间的图像灰度直方图进行比较,可以发现随着贮藏时间的增长,直方图的双峰距离随之拉大,而且右峰随着贮藏时间的增长呈现右移的趋势,而左峰的位置基本保持不变,如图 2 所示。直方图中代表多数像素的右峰随着贮藏时间增长逐渐右移,这与 CT 图像随着贮藏时间的增长逐渐增亮的现象相吻合。

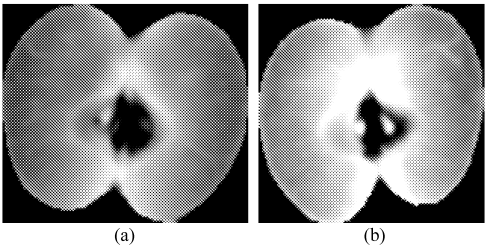


图 1 不同贮藏期苹果 CT 图像对比

Fig. 1 Comparing of apple CT images in different storage time

(a) 贮藏第 1 周 (b) 贮藏第 6 周

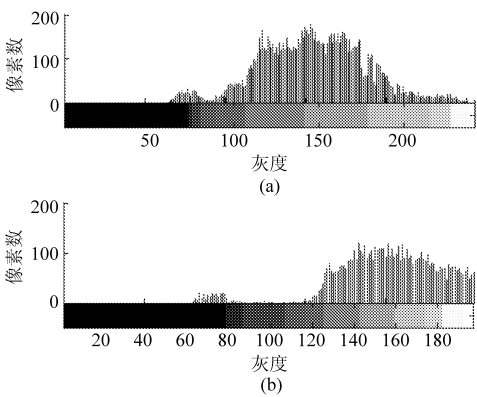


图 2 不同贮藏期苹果 CT 图像的直方图对比

Fig. 2 Comparing of apple CT images histogram in different storage time
(a) 贮藏第 1 周 (b) 贮藏第 6 周

2.2 CT 图像灰度均值与贮藏时间关系模型的建立

为了定量计算上述苹果 CT 图像与直方图图像随着贮藏时间而发生的变化,进而根据计算结果推测苹果的贮藏时间,设计了一种图像处理算法,并将其与贮藏时间相比较,建立相关预测模型。

随着贮藏时间的增长,苹果表现出 CT 图像增亮,直方图中右峰右移。因此图像处理算法建立在图像整体灰度值随着贮藏时间的增长而增大的基础上。算法的主要思想即计算出苹果 CT 图像的特征点灰度均值,以此来反映图像整体灰度的情况。在特征点的确定上,根据直方图的双峰特性,取峰谷位置的灰度值作为选取阈值 T ,灰度值大于阈值 T 的像素,即直方图中位于峰谷右侧的所有像素均为被选取的特征点。综上,CT 图像特征点灰度均值的计算公式为

$$G_{AVE} = \frac{\sum_{i=T}^{255} iN_i}{\sum_{i=T}^{255} N_i}$$

式中 G_{AVE} ——特征点灰度均值
 T ——直方图中峰谷位置的灰度值,即选取特征点的灰度阈值
 N_i ——灰度为 i 的像素数

通过上述算法计算出不同贮藏期苹果 CT 图像的特征点灰度平均值,发现 CT 图像的灰度平均值与贮藏期之间存在显著的线性相关性,如表 1 所示。以 X 表示苹果 CT 图像灰度平均值, Y 表示该苹果所处的贮藏时间,建立线性相关模型 $Y = 128.089\,68 + 1.354\,95X$,决定系数 $R^2 = 0.987\,7$,如图 3 所示。

2.3 苹果 CT 图像灰度均值与贮藏时间线性关系的验证

为了验证上述过程得出的无损检测模型的正确

表 1 贮藏期苹果 CT 图像的灰度均值

Tab.1 Average values of CT images of apples during storage time

编号	贮藏时间/d							
	1	7	14	22	28	35	42	48
1	128.896 6	139.716 0	146.385 1	155.099 5	165.907 5	179.278 8	180.077 3	196.981 1
2	128.149 9	135.195 3	147.944 2	152.583 7	165.800 3	175.296 7	185.061 6	193.140 2
3	127.580 7	136.635 6	148.539 9	151.366 6	166.142 6	176.381 6	182.957 3	194.032 5
4	133.581 7	139.787 9	147.285 3	157.186 6	166.553 0	176.786 0	186.378 7	192.154 6
5	131.137 6	136.591 4	148.725 1	153.654 6	164.826 7	178.221 7	185.160 6	194.819 2
6	132.212 6	138.642 3	151.065 1	154.207 9	165.383 8	177.968 1	183.945 6	194.426 7
平均值	130.259 9	137.761 4	148.324 1	154.016 5	165.769 0	177.322 2	183.930 2	194.259 1

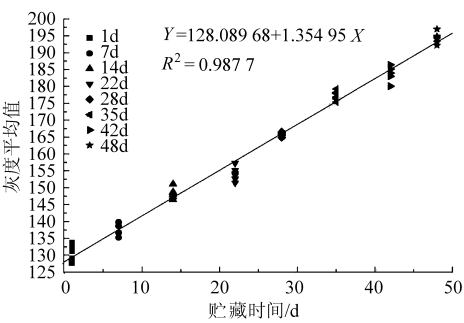


图 3 贮藏时间与灰度均值的线性关系

Fig.3 Linear relationship between the storage time and the average gray value

性及利用 CT 图像判断富士苹果贮藏期的可行性,将实验过程中每组用于验证的苹果 CT 图像通过上述算法计算出各自的灰度平均值,并利用线性模型 $Y = 128.089\ 68 + 1.354\ 95X$ 预测苹果的贮藏时间,记为预测贮藏时间。将预测贮藏时间与实际贮藏时间进行比较,预测贮藏时间与实测贮藏时间之差的绝对值记为估计差,误差分析如表 2 所示。由表可以看出,预测模型的最大估计差为 1.66 d,最小估计差为 0.23 d,平均估计差为 1.08 d。实验证明该线性模型的误差率较低,能够较准确地预测苹果贮藏时间。

表 2 预测模型估计差

Tab.2 Error analyzing of the forecasting model

编号	贮藏时间/d							
	1	7	14	22	28	35	42	48
1	1.256 62	0.323 34	1.146 47	1.254 83	1.659 15	1.092 97	1.323 90	1.520 24
2	1.003 86	1.229 65	0.910 51	1.087 02	1.138 97	0.939 57	1.330 21	0.996 61
3	1.078 11	1.220 93	0.225 80	0.839 14	0.679 54	1.385 63	0.450 83	1.248 09

2.4 结果分析

随着贮藏时间的增长,富士苹果内部的主要成分发生了变化,主要表现为含水率降低,糖度升高,同时可滴定酸的含量降低。其中苹果的含水率变化最为显著,平均含水率由贮藏初期的 92.6% 降至贮藏末期的 88.4%,含水率的减小以及其他成分的变化显著地影响到了苹果内部的密度分布,进而使得苹果对 X 射线的吸收率增大。根据 X 射线穿过物体,其强度衰减情况所遵循的朗伯(Lambert)定律,X 射线吸收率的增大使所得到的 CT 图像整体灰度值上升。因此随着贮藏时间的增长,苹果的 CT 图像逐渐变亮,同时又由于成分的变化主要集中在果肉部分,果核部分的主要成分变化不大,于是出现了直方图中代表果核区域的左峰位移量并不明显,代表果肉区域的右峰出现了右移的现象。直方图左峰

的灰度均值由贮藏初期的 64.248 1 变化为贮藏末期的 68.497 2;直方图中右峰的灰度平均值由贮藏初期的 130.259 9 增长至贮藏末期的 194.259 1。

综上,利用 CT 图像的特征点灰度均值判断苹果贮藏期,是针对苹果内部主要成分变化做出的判断。建立的苹果贮藏期预测模型是正确和可行的。

3 结论

(1) 通过对富士苹果不同贮藏时间的 CT 图像及 CT 图像直方图比较,发现苹果 CT 图像的直方图呈现明显的双峰特性,其中代表果核区域的左峰在不同贮藏时期内位移不显著,左峰的灰度均值由贮藏初期的 64.248 1 变化为贮藏末期的 68.497 2;而代表果肉区域的右峰在贮藏期内呈现右移的特性,右峰的灰度均值由贮藏初期的 130.259 9 增长至贮

藏末期的 194.259 1。这使得苹果的 CT 图像随着贮藏时间的增长呈现灰度增长的特性。

(2) 设计了一种简单的图像处理算法,计算苹果 CT 图像的特征点灰度均值。将灰度均值与贮藏时间相比较,发现二者存在着显著的线性相关性,线性相关模型 $Y = 128.089\ 68 + 1.354\ 95X$, 决定系数 $R^2 = 0.987\ 7$ 。通过验证发现该模型对富士苹果贮藏初期的贮藏时间预测结果较为理想,模型对苹果贮藏时间预测的最大误差 1.66 d,最小误差 0.23 d,平均误差 1.08 d。

参 考 文 献

1 Hernandez M S, Barrera J. Postharvest quality of araza fruit during low temperature storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(4): 879 ~ 884.

2 Yilmaz Mustafa. Three-year storage of oriental beechnuts (Fagus orientalis Lipsky)[J]. Eur. J. Forest. Res., 2008, 127(5): 441 ~ 445.

3 徐澍敏,于勇,王俊. 机械损伤 CT 值的实验研究[J]. 农业机械学报,2006,37(6):83 ~ 87.
Xu Shumin, Yu Yong, Wang Jun. Study on CT value of damaged apple[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(6):83 ~ 87. (in Chinese)

4 Stuppy Wolfgang H, Jessica A Maisano. Three-dimensional analysis of plant structure using high-resolution X-ray computed tomography[J]. Trends in Plant Science, 2003,8(1):2 ~ 6.

5 Longuetaud Fleur, Leban Jean-Michel. Automatic detection of the heartwood/sapwood boundary within norway spruce logs by means of CT images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 100 ~ 111.

6 Erol Sarigul, A Lynn Abbott. Rule-driven defect detection in CT images of hardwood logs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 41(1 ~ 3): 101 ~ 119.

7 Yu Lei, Qi Dawei. Analysis and processing of decayed log CT image based on multifractal theory[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 147 ~ 154.

8 Vestergaard Christian, Risum Jgen. Quantification of salt concentrations in cured pork by computed tomography[J]. Meat Science, 2004, 68(1):107 ~ 113.

9 Eufemio G Barcelon, Seishu Tojo, Kengo Watanabe. X-ray computed tomography for internal quality evaluation of peaches[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73(4): 323 ~ 330.

10 张京平,彭争,汪剑. 苹果水分与 CT 值相关性的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):180 ~ 182.
Zhang Jingping, Peng Zheng, Wang Jian. Correlation between moisture of apples and values of CT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2003,19(2):180 ~ 182. (in Chinese)

11 王会. 基于 CT 技术的富士苹果内部品质无损检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
Wang Hui. Study of nondestructive test of Fushi apple content by computer temography[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)

12 张京平,刘孔绚,王会. 富士苹果剖面 CT 值与 pH 值的关系研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2009, 35(1):89 ~ 92.
Zhang Jingping, Liu Kongxuan, Wang Hui. Research of relationship between CT and pH value for Fushi apple[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.,2009,35(1):89 ~ 92. (in Chinese)

13 张京平,刘孔绚. 基于 CT 技术的苹果贮藏期内主要成分无损检测[J]. 农业机械学报,2010,41(7):119 ~ 122.
Zhang Jingping,Liu Kongxuan. Nondestructive test of major internal components for Fushi apple during storage based on CT technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):119 ~ 122. (in Chinese)

14 张京平,张华,王会. 富士苹果主要成分的 CT 无损检测[J]. 农业机械学报,2008,39(7):99 ~ 102.
Zhang Jingping,Zhang Hua,Wang Hui. Non-destructive test of Fuji apple's major components by CT[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):99 ~ 102. (in Chinese)

15 张京平,王会. 神经网络和线性回归在苹果含水率预测中的应用[J]. 农业机械学报,2008,39(2):198 ~ 200.