柑橘成熟度多重分形无损检测*

曹乐平
（湖南生物机电职业技术学院教务处，长沙 410127）

【摘要】 为无损检测柑橘成熟度，将柑橘主要色调分布范围 30°～120°进行了等分，形成 3 幅色调图，分析每幅色调图标度不变域及多重分形谱，以多重分形谱高度和宽度表征柑橘果皮色泽特征，并以此作为 BP 神经网络的输入，可溶性总固形物含量为输出，建立柑橘成熟度模型，映射柑橘成熟度。试验的平均正确识别率为 82%，表明通过柑橘果皮色调的多重分形谱能无损检测柑橘成熟度。

关键词：柑橘　成熟度　色调　多重分形　无损检测
中图分类号：TP391.41　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)07-0182-04

Non-destructive Detection of Maturity Degree of Citrus Fruit Based on Multi-fractal

Cao Leping
(*Office of Academic Affairs*, *Hunan Biological and Electromechanical Polytechnic*, *Changsha* 410127, *China*)

Abstract

Aimed at determining the maturity degree of citrus fruit non-destructively, three tone images were generated by dividing hue range 30° ~ 120° of fruit image equally to three parts. Scale invariance and spectra of multi-fractal were analyzed. Height and width of multi-fractal spectra were extracted as features of color and luster of pericarp of fruits, and were set as input of BP neural network. With total soluble solid contents as the output of network, the neural network maturity degree model mapped fruit image into degree of maturity. The correctness of inspection test was 82%, which showed that maturity degree of citrus fruit could be detected non-destructively based on multi-fractal spectra.

Key words　Citrus fruit, Maturity degree, Hue, Multi-fractal, Non-destructive detection

引言

采用可见光机器视觉系统的采摘机器人实施柑橘采摘作业时，其视觉系统不仅要对柑橘进行目标识别与定位，而且还要判断其成熟度，决策是否进行采摘。目前利用可见光机器视觉技术进行包括成熟度在内的水果内部品质检测研究还不多[1~8]。

柑橘果实发育过程中进行着呼吸作用和内含物的水解作用，随着果皮芳香物质形成，油胞充实，蜡质增厚，果皮和果肉着色转黄，果汁增多，果汁中含酸量减少，可溶性固形物含量增加，果实进入成熟期。参照 GB/T 12947—2008《鲜柑桔》和 NY/T 1189—2006《柑桔贮藏》，通常成熟柑橘可溶性固形物含量超过 9%，故可用可溶性固形物含量高低衡量柑橘是否成熟。文献[9]在进行柑橘糖度和有效酸度检测时发现，不同发育期柑橘色调主要分布在 30°～120°范围。因此，本文将 30°～120°色调范围三等分，研究三等分色调域的多重分形谱，以多重分形谱高度和宽度为特征值，借助神经网络映射器，无损检测柑橘成熟度，为柑橘自动化采摘提供借鉴。

1　试验方案

1.1　试验样本

本试验在湖南省园艺研究所柑橘种植基地进行

收稿日期：2010－11－23　修回日期：2011－02－24
＊湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6129)和湖南省农业厅重点课题资助项目(2007004A)
作者简介：曹乐平，副教授，主要从事农产品智能检测研究，E-mail：clp4218@126.com

采样，按不同的地势高度，选 30 株同龄期的柑橘树，每株按树的上、中、下不同高度和东、南、西、北 4 个不同方向，各采 1 果，区分形状和颜色差异，从中复选 100 个宫川温州蜜柑作为训练样本，50 个宫川温州蜜柑作为测试样本。保存 2 d，擦除表面灰尘，备图像采集与可溶性固形物含量测定。

1.2　图像处理

采集柑橘平行于果轴的两个侧面图像各 1 幅。裁切采集的图像，以提高图像处理速度；去图像背景，使柑橘特征的提取不受背景信息的影响；RGB 颜色模型转换为 HSI 颜色模型，将色调域 30° ~ 120° 等分为 30° ~ 60°、60° ~ 90°、90° ~ 120°三区间，这 3 个区域覆盖了宫川温州蜜柑果皮色泽的主要色调，舍弃了 0° ~ 360°色调范围内的其他信息，程序运行加快；对每个柑橘的 2 幅图像按已划分的 3 个色调区域生成 3 幅色调图，并进行二值化处理，形成了在 3 个色调范围内既包含色调累计信息又包含色调位置信息的二值图像。图 1 给出了生长过程中 3 种典型颜色的宫川温州蜜柑 30° ~ 120°色调图像。其中青绿果可溶性总固形物 8.0%，黄绿果 8.5%，橙黄果 9.0%。从图中看出，青绿果、黄绿果和橙黄果果皮主体颜色的色调值分别位于 60° ~ 120°、60° ~ 90°和 30° ~ 60°区域。

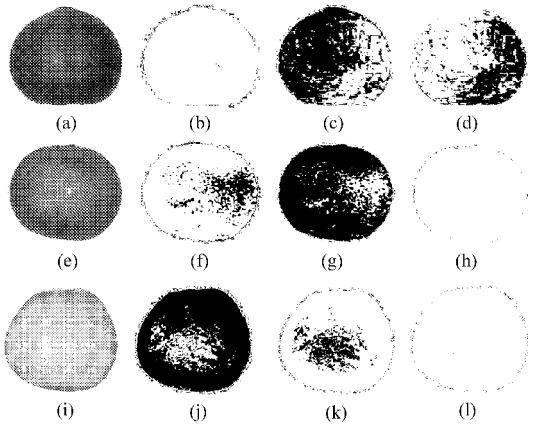

图 1　30° ~ 120°色调图

Fig. 1　30° ~ 120° hue chart

(a) 青绿果原始图像　(b) 青绿果 30° ~ 60°色调图　(c) 青绿果 60° ~ 90°色调图　(d) 青绿果 90° ~ 120°色调图　(e) 黄绿果原始图像　(f) 黄绿果 30° ~ 60°色调图　(g) 黄绿果 60° ~ 90°色调图　(h) 黄绿果 90° ~ 120°色调图　(i) 橙黄果原始图像　(j) 橙黄果 30° ~ 60°色调图　(k) 橙黄果 60° ~ 90°色调图　(l) 橙黄果 90° ~ 120°色调图

1.3　可溶性固形物含量检测

可溶性总固形物含量用上海精密仪器仪表有限公司生产的 WYT - 4 型手持糖度计测定，其测量精度 ±1°Brix，测量范围 0 ~ 80°Brix。因单果各部位内部品质的差异，试验中测量内部品质均值，取单果全部果肉榨汁搅拌均匀后进行测量，平行测定 3 次取平均值，即为果汁中可溶性总固形物含量。

2　重分形与柑橘成熟度检测

2.1　多重分形谱

柑橘着色受众多因素的影响导致果皮色泽分布不均匀，二值化后的色调图像多样，很难用简单的几何参数来表征。虽盒维数能描述这种复杂形状，但其不考虑盒子内的像素数，形状表达上较粗糙，为较精确地刻画柑橘 3 个区间内的色调统计分布信息，引入多重分形谱。

多重分形是定义在分形上的由多个标度指数的奇异测度所组成的集合，它刻画的是分形测度在支集上的分布情况，即用一个谱函数来描述分形不同层次的特征，它与单分形的区别在于其标度性质[10]。

对于边长为 ε 的正方形范围内物理量 $N(\varepsilon)$，其分布概率为 $P_i(\varepsilon)$，按 $P_i(\varepsilon)$ 大小将 $\{P_i(\varepsilon)\}$ 划分为满足幂律 $P_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha}$ 的一系列子集，定义 $N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)}(\varepsilon \to 0)$，这里 α 为奇异指数，与所在子集有关。称 $f(\alpha)$ 为多重分形谱，其物理意义是表示相同 α 值的子集分形维数。

记 $x_q(\varepsilon)$ 为一个配分函数，对概率 $P(\varepsilon)$ 用 q 次方进行加权求和，若 $x_q \equiv \sum (P_i(\varepsilon))^q = \varepsilon^{\tau(q)}$ 成立，则 $\tau(q) = \dfrac{\ln x_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}(\varepsilon \to 0)$，一般称 $\tau(q)$ 为质量指数。

对 $\tau(q)$、q 作 Legendre 变换，有：$f(\alpha) = \alpha q - \tau(q)$，$f(\alpha)$ 称为多重分形谱，式中 $\alpha = \dfrac{\mathrm{d}\tau(q)}{\mathrm{d}q}$。如果所研究的对象是单分形，则函数 $f(\alpha)$ 为一定值；如果是多重分形，则函数 $f(\alpha)$ 一般为单峰曲线。

2.2　柑橘色调特征值与成熟度无损检测

2.2.1　柑橘色调特征值

用边长为 ε 的正方形覆盖柑橘分区间的色调二值图像，计算正方形内黑色像素点数 N_{ij}，对应的概率为 $P_{ij}(\varepsilon) = \dfrac{N_{ij}}{\sum N_{ij}}$，式中，$\sum N_{ij}$ 为柑橘分色调区间的一幅色调二值图像中黑色像素数累计。取多重分形谱高度 $\Delta f = \dfrac{\ln(N_{P\max}/N_{P\min})}{\ln \varepsilon}$、宽度 $\Delta\alpha = -\dfrac{\ln(P_{\max}/P_{\min})}{\ln \varepsilon}$ 来表征柑橘色调特征。

按统计物理方法计算多重分形谱时，配分函数 $x_q(\varepsilon)$ 是对概率求 q 次方的加权和，不同的 q 表示不同子集在配分函数中具有的重要作用。理论上 q 的

范围越大越好,但实际计算过程中,随$|q|$的增大,计算量成倍增加,增大到一定程度后计算机发生溢出错误,若q的范围过小,$|q|$每增加1时,$f(\alpha)$的变化仍较大,这时的$f(\alpha)$只是多重分形谱的一部分,不能全面反应研究对象的概率分布。因此,本文取$q\in\{-7,-5,-3,-1,1,3,5,7\}$来研究柑橘色调多重分形谱[11]。图2示出了一个样本一色调域的配分函数对数曲线,Ⅰ区基本具备标度不变性,以标度不变性区域分析多重分形谱高度和宽度。图3示出了一个样本进行二次拟合的3个色调区域多重分形谱,同一样本3个色调域多重分形谱高度与宽度存在差异,这种差异取决于果皮色泽所对应的色调区域。表1为青绿、黄绿和橙黄3类宫川温州蜜柑训练样本3个色调域多重分形谱统计均值。

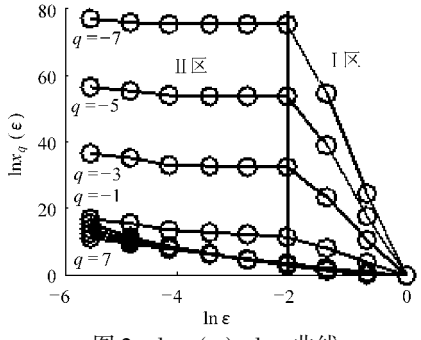

图2 $\ln x_q(\varepsilon)-\ln\varepsilon$曲线

Fig. 2 $\ln x_q(\varepsilon)-\ln\varepsilon$ curves

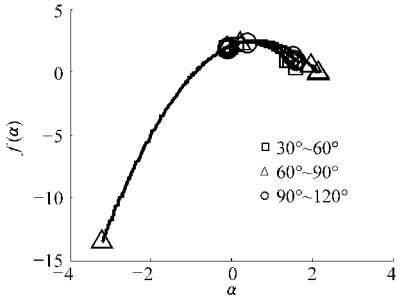

图3 多重分形谱

Fig. 3 Multi-fractal spectra

表1 柑橘多重分形谱均值

Tab. 1 Mean of multi-fractal spectra of citrus fruit

样本种类	30°~60°色调域		60°~90°色调域		90°~120°色调域	
	分形谱高度	分形谱宽度	分形谱高度	分形谱宽度	分形谱高度	分形谱宽度
青绿果	0.963 3	1.578 4	13.463 6	5.352 4	1.006 6	1.716 4
黄绿果	1.977 8	1.883 4	1.943 8	2.291 6	1.848 3	1.254 8
橙黄果	1.799 1	2.393 8	1.903 0	1.981 2	1.578 1	1.301 2

2.2.2 柑橘成熟度无损检测

BP(back propagation)神经网络是一种按误差逆向传播算法训练的多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。本文以每个柑橘2幅图像3个色调区域6个多重分形谱参数为输入,输出为柑橘可溶性总固形物含量,BP神经网络采用3层$6\times10\times1$结构,输入层到隐层和隐层到输出层传递函数分别为正切符号函数及线性函数,规划化调整算法训练神经网络。用训练好的神经网络进行50个测试样本检测,输出值超过9%的视为成熟柑橘,未成熟与成熟柑橘均存在误判,未成熟柑橘正确检测率为78.13%,成熟柑橘正确检测率为88.89%,平均正确检测率为82%。

2.3 讨论

柑橘生长发育过程中,果皮由青绿转黄,果肉中可溶性固形物含量增加,超过9%进入成熟采摘期。青绿果果皮色调分布在60°~120°区间;黄绿果果皮色调集中在60°~90°范围;橙黄果果皮色调集中在30°~60°区域。

在$\ln x_q(\varepsilon)-\ln\varepsilon$曲线中,$q\geqslant1$时$\ln x_q(\varepsilon)-\ln\varepsilon$基本保持为直线,而$q<1$时曲线分为两段:Ⅰ区,$\varepsilon$大,斜率绝对值大;Ⅱ区,$\varepsilon$小,斜率绝对值小,柑橘色调域并非在所有范围满足标度不变性。这种现象的出现与小概率呈现异常变化有关。由于盒计数中出现像素很少的图形碎片,所以随ε的下降出现$P(\varepsilon)$的快速减小,引起$q<1$时$x_q(\varepsilon)$在Ⅰ区异常增大。随ε的继续减小,只含一个像素的$P(\varepsilon)$增多,由于像素不能无限细分,使$P(\varepsilon)$不随ε的减小而减小,对应的$x_q(\varepsilon)$的下降速度开始异常缓慢,使$\ln x_q(\varepsilon)-\ln\varepsilon$曲线整体呈现两个区域,但Ⅰ区的标度不变性足够用来描述柑橘的色调多重分形特征。

$f(\alpha)-\alpha$曲线呈钟形。主体色调区域内,钟形曲线高而宽;30°~120°范围内的其他色调区域,钟形曲线矮而窄。这种关联性使得柑橘成熟度的机器识别正确率较文献[9]有所提高。

柑橘生长影响因素众多,日灼部分呈现金黄色;病虫害在果皮上的危害状也形成色斑,这都影响柑橘成熟度的机器视觉检测结果,尤其是病虫害危害状遍布总个果面时,这种影响直接导致误判。

3 结论

(1)对柑橘果皮色调划分为30°~60°、60°~

90°和 90°～120°三区间，研究 3 个色调域的多重分形谱特征，分形谱高度和宽度精细地刻画了柑橘果皮色调的统计分布信息。

（2）宫川温州蜜柑果皮色泽与成熟度间存在显著的对应关系，通过多色调域的多重分形谱特征能进行柑橘成熟度的无损检测。

参 考 文 献

1 应义斌，徐惠荣，徐正冈. 用于柑桔成熟度无损检测的色度频度序列法研究[J]. 生物数学学报，2006，21(2)：306～312.
Ying Yibin, Xu Huirong, Xu Zhenggang. Non-destructive maturity evaluation of citrus by hue frequency sequence method [J]. Journal of Biomathematics, 2006, 21(2):306～312. (in Chinese)

2 应义斌，饶秀勤，马俊福. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报，2004，20(2)：144～147.
Ying Yibin, Rao Xiuqin, Ma Junfu. Methodology for non-structure in section of citrus maturity with machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20 (2):144～147. (in Chinese)

3 曹乐平，温芝元，陈理渊. 基于统计纹理的柑橘糖度与有效酸度检测[J]. 测试技术学报，2009，23(1)：63～67.
Cao Leping, Wen Zhiyuan, Chen Liyuan. Determination of sugar content and valid acidity of citrus fruit based on statistics texture [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009, 23 (1):63～67. (in Chinese)

4 曹乐平，温芝元，陈理渊. 基于小波神经网络的柑橘 pH 机器视觉检测[J]. 中国农业科学，2008，41(11)：3 741～3 745.
Cao Leping, Wen Zhiyuan, Chen Liyuan. Citrus fruits pH value measurement based on machine vision with wavelet neural network model [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11):3 741～3 745. (in Chinese)

5 Naoshi Kondo, Usman Ahmad, Mitsuji Monta, et al. Machine vision based quality evaluation of Iyokan orange fruit using neural networks [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 29(1～2):135～147.

6 Mendoza F, Aguilera J M. Application of image analysis for classification of ripening bananas [J]. Journal of Food Science, 2004,69(9): 471～477.

7 Pedro Atencio, Germán Sánchez T, John William Branch. Automatic visual model for classification and measurement of quality of fruit: case mangiferaindical[J]. Dyna Rev. Fac. Nac. Minas, 2009, 76(160):317～326.

8 Amirulah R, Mokji M M, Ibrahim Z. Implementation of starfruit maturity classification algorithm on embedded system[C]// 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, 2010, 1:810～814.

9 曹乐平，温芝元，沈陆明. 基于色调分形维数的柑橘糖度和有效酸度检测[J]. 农业机械学报，2010，41(3)：143～148.
Cao Leping, Wen Zhiyuan, Shen Luming. Sugar content and the valid acidity test of the citrus based on the fractal dimensions of hue [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):143～148. (in Chinese)

10 彭复员，周麟，阎旭光. 基于相关的多重分形奇异性分析的红外弱目标检测[J]. 红外与毫米波学报，2004，23(1)：67～71.
Peng Fuyuan, Zhou Lin, Yan Xuguang. Infrared weak target detection based on correlation analysis of multi-fractal singularity spectral [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23 (1):67～71. (in Chinese)

11 孙霞. 分形原理及其应用[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2003：53～88.

(上接第 199 页)

8 张朋举，张纹，陈树人，等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报，2010，41(4)：56～59.
Zhang Pengju, Zhang Wen, Chen Shuren, et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 56～59. (in Chinese)

9 Thomas Bak, Hans Jakobsen. Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2): 125～136.

10 王友权，周俊，姬长英，等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报，2008，24 (7):110～113.
Wang Youquan, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24 (7):110～113. (in Chinese)