DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.040

基于邻差和的农产品 X 射线图像分割算法*

郭文川　梁　玮　宋怀波
(西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100)

【摘要】 针对图像阈值分割中二维灰度直方图和模态法的不足,提出了一种基于邻域差值之和与直方图凹面相结合的图像分割算法,并将此方法与二维直方图方法在板栗、苹果和猕猴桃的 X 射线图像分割中的效果进行了对比试验。试验结果表明,本方法的图像分割误差小于 2.1%,最大分割误差仅是二维直方图简便算法分割误差的 23.7%,能够更精确地提取果品的图像。

关键词:农产品检测　X 射线　图像分割算法　领域差值和　直方图凹面
中图分类号:TP391.41　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2012)11-0214-06

Segmentation Method of Agricultural Products' X-ray Image Based on Sum of Neighborhood Differences

Guo Wenchuan　Liang Wei　Song Huaibo
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract

In order to overcome the limitation of image segmentation methods based on 2-D histogram and modality in threshold techniques, a method based on the combination of the histogram concavity and the sum of the neighborhood differences was proposed. In addition, the comparative experiment was done when the proposed method and 2-D histogram methods were applied in segmentation on X-ray images of chestnuts, apples and kiwifruits. The results showed that the image segmentation error of the proposed method was less than 2.1%, and its biggest segmentation error was only 23.7% of that of 2-D histogram method. The proposed method could get the fruits' images more precisely.

Key words　Agricultural products detection, X-ray, Image segmentation method, Sum of neighborhood differences, Histogram concavity

引言

对农产品进行合适的产后处理与品质检测对于提高农产品的经济效益和市场竞争力具有极其重要的意义。机器视觉检测技术是农产品品质检测的一种重要方法,对此国内外学者已进行了大量的研究[1~5],但是现有的机器视觉检测技术主要是基于可见光的图像识别,其缺点是无法获取农产品的内部品质特性。而高光谱方法虽然可以检测轻微损伤[6]和农产品的部分内部品质[7],但同样不能检测内部损伤,如板栗内部的虫害损伤,苹果的黑心病,西瓜的空洞等。由于 X 射线具有穿透物料的特点,因此基于 X 射线图像识别农产品品质的研究越来越受到科研工作者的重视[8]。对 X 射线图像进行分割是成功识别水果内部品质的关键,而此领域的研究较少。

在图像分割的诸多方法中,阈值分割是一种最简单实用的分割方法,且性能稳定。然而传统的阈

收稿日期:2011-12-06　修回日期:2011-12-13
*国家自然科学基金资助项目(31171720、31000670)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QN2009043)和杨凌现代农业国际研究院科研培育项目
作者简介:郭文川,教授,博士,主要从事农产品和食品品质检测技术研究,E-mail:guowenchuan69@126.com

值分割方法，如大津(Otsu)法[9]、最佳熵法、最小错误法、边缘算子法等[10]，都是基于图像的一维灰度特征，而没有考虑到像素邻域等空间特征，因此图像的分割边缘往往并不准确。为了克服这个问题，国内外专家学者提出了二维阈值分割方法。刘健庄等[11]提出利用图像灰度级和邻域灰度平均值构成二维灰度直方图，并进行阈值分割。与一维直方图分割方法相比，这种二维直方图方法因考虑了像素邻域特征，所以分割效果有了较大提高。人们在研究中对这种方法进行了多种发展和改进[12~14]。

理论上，直方图凹面的底是十分理想的图像分割阈值[15]，然而实际中的直方图是离散的，需要进行平滑处理。特别是在有噪声干扰的情况下，可能产生多个凹面。此外，直方图凹面算法还具有很大的局限性，因为有些图像的直方图十分复杂，所以模态法(利用直方图凹面)对不同图像会产生不同分割结果。Rosenfeld 和 Torre[16]提出可以构造一个包含直方图 HS 的最小凸多边形 $\overline{HS}$，由集差 $HS-\overline{HS}$ 确定的凹面。若 $h(i)$ 和 $\overline{h}(i)$ 分别表示 HS 与 $\overline{HS}$ 在灰度级之处的高度，则 $\overline{h}(i)-h(i)$ 取局部极大值时所对应的灰度级可以作为阈值。但此方法没有利用像素邻域的性质，仍然容易受到噪声干扰，而对不同类型的图像无法保证良好的分割效果，容易得到假的凹面。

为此，本文针对图像阈值分割方法中二维灰度直方图和模态法的不足，提出一种新的图像分割方法，并将其应用于板栗、苹果和猕猴桃 X 射线图像的分割中。

1　基于邻差和-凹面的图像分割算法

以板栗的 X 射线图像为对象，从基于灰度偏差的二维直方图出发，通过计算各灰度级下像素邻域差值之和(简称邻差和)的均值，建立灰度级邻差和均值直方图，并且结合图像直方图的凹面求出最佳判定比，从而得到最佳阈值。

1.1　邻差和概念

在基于灰度-邻域平均灰度的二维直方图分割方法中，采用邻域灰度的均值代表像素的相关性与一致性。此算法认为当像素灰度与邻域灰度均值相似时，体现出一致性较强，属于背景或目标区域；反之，像素灰度与邻域均值不相似时，体现出一致性较弱，属于边缘区域或者是噪声。但是邻域均值有时和像素本身的灰度差别很小甚至相等，因此邻域均值不能够突出表现图像的一致性。而且在取得阈值的算法上十分复杂。如图 1 所示，图中像素灰度为 2，而其邻域均值也为 2，这时就不能准确分割而出现误差。更重要的是这种方法将大津法推广到了二维的情况，使得算法的复杂性大大增加，运行时间长，占用资源大，实时性差。

2	3	4
1	2	3
1	1	1

图 1　像素灰度及其邻域均值与邻差和

Fig. 1　Pixel's gray-level value and its neighborhood mean and sum of neighborhood differences

邻域差值之和是将像素与其 8 邻域差值的绝对值相加而得到的，因为其反映了像素和其邻域差值的绝对值而不是代数和，所以能够比邻域均值更能体现图像灰度的变化。邻差和 S 的计算公式为

$$S=\sum_{n=1}^{8}|G_0-G_n| \tag{1}$$

式中　G_0——像素灰度

G_n——像素 8 邻域中第 n 个像素的灰度

在双峰较为明显的图像中，图像的边缘和图像背景、目标物体的邻差和明显不同。在属于背景、目标物体的像素中，图像灰度的变化较小，从而具有较小的邻差和；而边缘处变化剧烈，从而具有较大的邻差和。本文中为了计算简便，仅仅将其求和，而没有再除以 8 计算邻域差值的均值。如图 1 所示的邻差和为 8。邻差和为寻找图像的边缘提供了思路。

从图 1 可以看出，邻差和能够比邻域均值更好地反映出像素的邻域特点。如果是图像边缘，邻差和明显比背景、目标物体大很多。而且与二维直方图方法相比，邻差和方法在实现上要简单许多，使得实时性大大提高，为将来工业化的应用提供了可能。

1.2　基于邻差和-凹面的分割算法

为了找到最适合分割的灰度级作为分割阈值，需要克服模态法的缺点，并且利用邻差和对边缘敏感的特点。为此，本文将二者结合起来。

1.2.1　计算各灰度对应的平均邻差和与判定比

各灰度级所对应的邻差和的均值 $\overline{S}_i$ 定义为

$$\overline{S}_i=\frac{\sum S_i}{N(i)} \tag{2}$$

式中　$\overline{S}_i$——i 灰度级下所有像素邻差和的均值

S_i——i 灰度级下某像素的邻差和

$\sum S_i$——i 灰度级下所有像素的邻差和的总和

$N(i)$——i 灰度级下所有像素的总数

通过计算各灰度级对应的平均邻差和，就可以得到灰度级邻差和均值直方图。理论上如果某灰度级的所有像素拥有的平均邻差和最大，该灰度级是

十分理想的分割阈值。然而实际应用中发现,单凭邻差和还不足以找出图像的边缘,这是因为在灰度级邻差和均值直方图中有十分明显的误差。图 2 是某个板栗 X 射线图像的灰度直方图和灰度级邻差和均值直方图。图 2a 中,直方图两端的像素数目较少,因而所包含的背景噪声更容易表现出来,换句话说,就是式(2)中分母 $N(i)$ 较小,因而其 $\overline{S}_i$ 较大。该原因造成了灰度级邻差和均值直方图两端的高峰。图 2a 直方图对应的完整的灰度级邻差和均值直方图如图 2b 所示。以图 2b 灰度级邻差和均值直方图中最右侧的高峰灰度级 230 和 232 为例,灰度 230 的像素个数为 3,该灰度下的平均邻差和均值为 145;灰度 232 的像素个数也为 3,平均邻差和均值为 159。图 2b 左侧的高峰同理。实际上,两侧的高峰正是本文要避免的误差区域。因而不能仅仅将拥有最大邻差和均值的灰度级作为图像边缘,进而作为分割阈值,而是要结合图像直方图的凹面,才能找出最佳的分割阈值。同时,从图 2 还可以看出,灰度直方图中的高峰部分及背景部分区域的邻差和较小,比如图 2a 中灰度为 201 ~206 的部分。

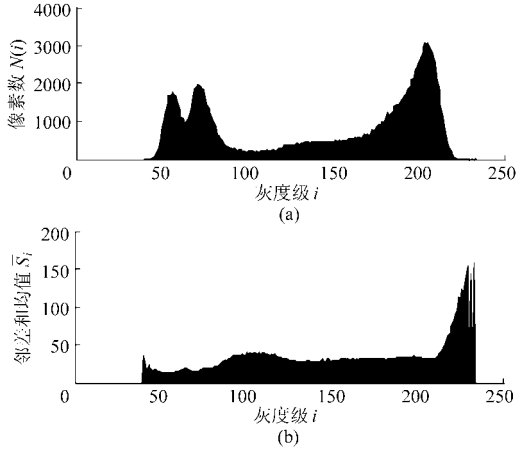

图 2 图像的直方图与灰度级邻差和均值直方图

Fig. 2 Histogram and histogram of average of gray-level difference sum

(a) 图像直方图 (b) 灰度级邻差和均值直方图

由于直方图中的像素数越少越接近凹面底,也就越接近最佳分割阈值,而邻差和越大也就越接近最佳的分割阈值。因此,本文将两者结合,将某灰度级下的邻差和均值除以该灰度级下的像素数作为判定比值,得到灰度级判定比直方图。判定比定义为

$$P_i = \frac{\overline{S}_i}{N(i)} \tag{3}$$

式中 P_i——i 灰度级对应的判定比

通过上面的分析可以看出,以最大判定比所对应的灰度级作为图像分割的阈值应是比较理想的。

1.2.2 排除误差范围

不难发现,根据式(3)得到的判定比 P_i 会加大图 2b 中已经存在的两端“翘起”所造成的误差,这时就需要将两端的误差范围排除在外,求得判定比的有效范围。

首先,找到灰度直方图中的最高峰。接着以图像的灰度均值为界,将灰度直方图分为左右两部分。如果最高峰在直方图右半部分,那么就从直方图的最左侧开始寻找一个最靠左侧的高峰。以图 2a 为例,最左侧高峰的灰度级为 56。为表达方便,暂称该高峰为“异侧峰”。判定比的有效范围必在最高峰和异侧峰之间,也就是在灰度级 56 和 203 之间,因为直方图两端像素数过少的误差范围已经被排除在外了。同理可分析当直方图的最高峰在均值左侧时的情况。

通过寻找点集拐点的办法来寻找异侧峰。如果最高峰在均值的右侧,则需要在左侧寻找异侧峰。从灰度直方图的最左侧开始,以 4 为步长,依次计算从灰度级 i 开始的连续 4 个灰度级的像素数之和。设该和为 $X(i)$,定义为

$$X(i) = \sum_{k=0}^{3} N(i+k) \quad (i = 0,4,8,12\cdots) \tag{4}$$

式中 i——灰度级 k——变量

以图 2a 为例,从灰度级 0 开始向右依次计算 $X(i)$值,此时 $X(i)$处在异侧峰左侧“爬坡”的过程,每次得出的 $X(i)$都比 $X(i-4)$要大,而一旦越过异侧峰的峰顶,$X(i)$就会小于 $X(i-4)$,这样就可以检测出异侧峰的位置。为排除误差并提高运算效率,当 4 个灰度级中的某灰度级像素数不足总像素数的 1/1 000时,跳过计算。同理,当最高峰在均值左侧时可检测出右侧的异侧峰。

1.2.3 通过曲线拟合寻找最佳阈值

找到灰度级判定比直方图中位于最高峰和异侧峰之间判定比最大的灰度级,就找到了最适合作为阈值的灰度级。然而如图 3 所示,灰度级判定比直方图中的尖峰是粗糙的,存在很多噪声,为了求得最佳分割阈值,还需要对灰度级判定比直方图进行拟合。拟合曲线的最大峰值对应的灰度级就是最佳阈值。

为了得到拟合曲线,本文采用最小二乘法对灰

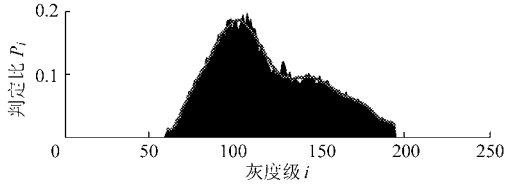

图 3 灰度级判定比直方图

Fig. 3 Histogram of grey decision ratio

度级判定比直方图进行拟合。其原理为对于一组数据(x_i, y_i) $(i = 0, 1, \cdots, m)$，在函数类 $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_n\}$ 中寻找一个函数 ，使其误差平方和 $\| \delta \|_2^2$ 最小。误差平方和定义为

$$\| \delta \|_2^2 = \sum_{i=0}^{m} \delta_i^2 = \sum_{i=0}^{m} (S^*(x_i) - y_i)^2 = \min_{S(x) \in \varphi} \sum_{i=1}^{m} (S(x_i) - y_i)^2 \quad (5)$$

其中，$S(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + \cdots + a_n\varphi_n(x)$ $(n < m)$，一般 $S(x)$ 采用多项式。

拟合结果如图 3 中的曲线所示，该拟合曲线最大值所对应的灰度级就是最佳分割阈值。以上就是所提出的分割方法。

2　试验

2.1　试验材料和方法

试验材料为陕西镇安产的大红栗。本文利用医用 X 射线机得到板栗的 X 射线照片。采用 Matlab 2007a 编程以进行数据分析。

2.2　结果和分析

在分割板栗图像的过程中，因为板栗 X 射线图像的边缘轮廓不十分清晰，使得一些常用的图像分割方法失效或者不能准确分割，而常用的二维直方图算法也存在较大的分割误差。

使用 Matlab 2007a 对二维直方图算法和本文算法进行编程，分割结果如图 4 所示。为了更加直观地比较两种方法的分割结果，先对分割结果的二值图像进行了边缘检测，而后在原始图像上以黑线表示分割边缘，如图 4c 和 4e 所示。图 4f 为本文算法分割后得到的图像减去用二维直方图算法分割后得到的图像。由图 4 可以看出，二维直方图方法得到的分割结果出现了欠分割的现象，即将本来属于板栗的部分错划入图像的背景中去，这可能在进一步的处理中产生误差甚至错误，比如模式识别或者农产品的分级。出现欠分割的原因是由于板栗图像的目标区域大，而背景部分少，从而导致分割结果不稳定、不准确。相比于二维直方图方法，本文方法取得了较好的分割效果，其分割边缘十分准确地与图像的边缘部分重合。由图 4f 也可以明显看出，与本文算法相比，二维直方图算法有较大的误分割部分。

根据图 4 计算得到的灰度直方图、灰度级邻差和均值直方图和灰度级判定比直方图如图 5 所示。由图 5 可以发现，灰度级邻差和均值直方图几乎与灰度直方图成反比，而灰度级判定比直方图与灰度级邻差和均值直方图相比，其峰值更加突出，便于从中选取最佳的分割阈值。图 5c 中的实线为拟合曲线，只要将该曲线最大值的位置作为最佳分割阈值，就可以成功地分割图像，该图中的最佳分割阈值为灰度级 104。

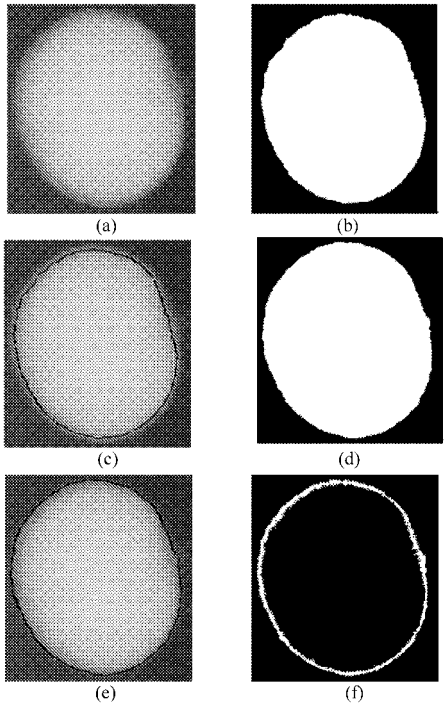

图 4　原始图像及不同分割方法分割结果

Fig. 4　Original image and segmentation results under different methods

(a) 原始图像　(b) 二维直方图分割结果
(c) 二维直方图分割边缘　(d) 本文方法分割结果
(e) 本文方法分割边缘　(f) 两方法之差

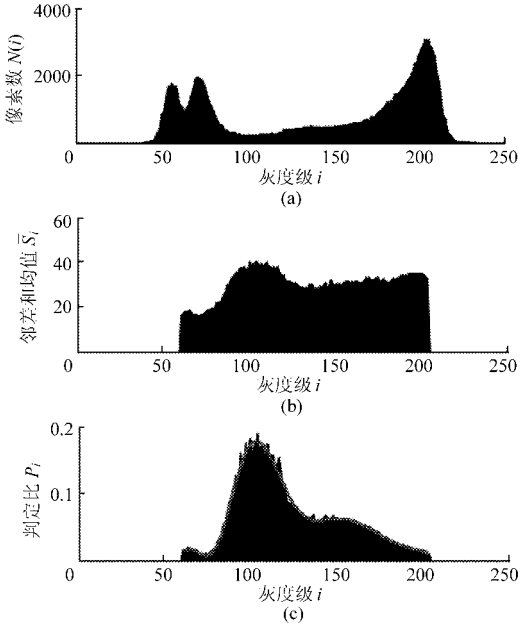

图 5　直方图

Fig. 5　Histogram

(a) 灰度直方图　(b) 灰度级邻差和均值直方图
(c) 灰度级判定比直方图

2.3 在几种水果图像分割中的应用

为了进一步验证本文分割方法的准确性,将本文算法和二维直方图算法[17]的分割结果在几种果品中应用,进行定量的对比。为比较两算法的误差,首先计算出两算法的分割面积与真实面积之差,取绝对值,而后除以真实面积就可以算出误差占真实面积的百分比 E,以 E 作为评价分割误差大小的标准。E 定义为

$$E = \left| \frac{M - M_0}{M_0} \right| \times 100\% \qquad (6)$$

式中 M——某算法分割下所得面积

M_0——目标区域的真实面积

真实面积 M_0是通过 Photoshop 软件在原始图像上画出真实的目标区域,再计算面积得到的。试验采用的图像为 40 张板栗图像、6 张苹果图像和 6 张猕猴桃图像,取各种果品 E 的平均值作为分割结果,试验结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出本文算法对板栗、苹果和猕猴桃果品图像的分割误差 E 分别仅是二维直方图简便算法分割误差的 20.4%、12.9% 和 23.7%,说明本算法大大提高了分割的准确率。

然而本文算法也存在一些不足,即其对图像尖锐边缘十分敏感,使得对复杂图像进行分割时阈值的选择存在一定误差。图像中灰度变化剧烈的地方会产生较大的邻差和,从而使得判定比过大,此时如果选择最大判定比作为分割阈值就会有误差出现。

表 1 两种算法分割误差比较

Tab. 1 Comparison of image segmentation errors under two segmentation methods %

果品	二维直方图简便算法	本文方法
板栗	10.15	2.07
苹果	11.71	1.51
猕猴桃	3.72	0.88

3 结束语

研究并分析了农产品 X 射线图像,提出了一种基于邻差和的图像分割方法。通过计算图像的邻差和与寻找直方图的凹面,将两者结合起来,求出最佳的图像分割阈值。对板栗、苹果和猕猴桃 3 种果品 X 射线图像的分割效果说明,本方法的分割误差小于 2.1%,最大分割误差仅是二维直方图简便算法分割误差的 23.7%。说明本文提出的图像分割方法能够大大提高图像分割的准确率。

参 考 文 献

1 刘鹏, 屠康, 潘磊庆, 等. 基于激光图像次郎甜柿可溶性固形物含量检测[J]. 农业机械学报,2011,42(1): 144~149.
Liu Peng, Tu Kang. Pan Leiqing, et al. Non-destructive detection of "Jiro" persimmon's soluble-solids by laser imaging analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1): 144~149. (in Chinese)

2 耿楠, 于伟, 宁纪锋. 基于水平集和先验信息的农业图像分割方法[J]. 农业机械学报,2011,42(9):167~172.
Geng Nan, Yu Wei, Ning Jifeng. Segmentation of agricultural images using level set and prior information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):167~172. (in Chinese)

3 陆尚平, 文友先, 葛维, 等. 基于机器视觉的甘蔗茎节特征提取与识别[J]. 农业机械学报, 2010,41(10):190~194.
Lu Shangping, Wen Youxian, Ge Wei, et al. Recognition and features extraction of sugarcane nodes based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):190~194. (in Chinese)

4 张京平, 陈锐, 刘孔绚, 等. 基于 CT 和图像处理的苹果贮藏期预测模型[J]. 农业机械学报, 2010,41(10):122~125.
Zhang Jingping, Chen Rui, Liu Kongxuan, et al. Forecast model of apple storage time based on CT technology and image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):122~125. (in Chinese)

5 周水琴, 商德胜, 应义斌, 等. 基于核磁共振成像的水果轻微损伤识别[J]. 农业机械学报, 2010,41(8):107~110.
Zhou Shuiqin, Shang Desheng, Ying Yibin, et al. Detecting subtle bruises on fruits with nuclear magnetic resonance imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):107~110. (in Chinese)

6 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)

7 洪添胜, 李震, 吴春胤, 等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 280~285.
Hong Tiansheng, Li Zhen, Wu Chunyin, et al. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 280~285. (in Chinese)

8 吕强, 蔡健荣, 赵杰文, 等. 基于 X 射线成像技术的板栗内部品质检测[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(2): 124~128.
Lü Qiang, Cai Jianrong, Zhao Jiewen, et al. Detection of chestnuts internal quality based on X-ray imaging [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(2): 124~128. (in Chinese)

9 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 ~ 66.

10 韩思奇, 王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 91 ~ 94, 102.
Han Siqi, Wang Lei. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(6): 91 ~ 94, 102. (in Chinese)

11 刘健庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19 (1): 101 ~ 105.
Liu Jianzhuang, Li Wenqing. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional Otsu method [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(1): 101 ~ 105. (in Chinese)

12 陈果, 左洪福. 图像分割的二维最大熵遗传算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(6): 530 ~ 534.
Chen Guo, Zuo Hongfu. 2-D Maximumentropy method of image segmentation based on genetic algorithm [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(6): 530 ~ 534. (in Chinese)

13 胡波, 毛罕平, 张艳诚. 基于二维直方图的杂草图像分割算法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 199 ~ 202.

14 肖刚, 应晓芳, 高飞, 等. 基于邻域灰度差值的二维 Otsu 分割方法研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1 544 ~ 1 545, 1 548.
Xiao Gang, Ying Xiaofang, Gao Fei, et al. 2D Otsu method based on difference of gray-level histogram [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1 544 ~ 1 545, 1 548. (in Chinese)

15 应义斌. 水果图像的背景分割和边缘检测技术研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2000, 26(1): 35 ~ 38.
Ying Yibin. Study on background segment and edge detection of fruit image using machine vision [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2000, 26(1):35 ~ 38. (in Chinese)

16 Rosenfeld A, Torre P De La. Histogram concavity analysis as an aid in threshold selection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, 13(2): 231 ~ 235.

17 景晓军, 蔡安妮, 孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4): 71 ~ 76.
Jing Xiaojun, Cai Anni, Sun Jing'ao. Image segmentation based on 2D maximum between-cluster variance [J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(4): 71 ~ 76. (in Chinese)

(上接第 185 页)

16 Ahmet Kürklü, Sefai Bilgin, Burhanözkan. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse[J]. Renewable Energy, 2003,28(5):683 ~ 697.

17 梁喜凤,王永维,程绍明,等. 空气流速对温室地下蓄热系统湿热传递影响试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 189 ~ 193,188.
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Cheng Shaoming, et al. Influence of air velocity in heat exchanging pipes to heat change and water vapor transformation for underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8):189 ~ 193,188. (in Chinese)

18 王永维,梁喜凤,苗香雯,等. 温室地下蓄热系统换热管道流速分布与蓄热性能研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(3):311 ~ 314.
Wang Yongwei, Liang Xifeng, Miao Xiangwen,et al. Study on the distribution of airflow velocity within heat exchange pipes and heat saving performance of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2005,31(3):311 ~ 314. (in Chinese)

19 王永维,程绍明,姜雄晖. 温室地下蓄热系统温度的分布试验[J]. 农业机械学报,2006,37(9):112 ~ 115.
Wang Yongwei, Cheng Shaoming, Jiang Xionghui. Temperature distribution of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(9):112 ~ 115. (in Chinese)

20 王永维,梁喜凤,王俊,等. 温室地下蓄热系统换热管道空气流速对蓄热效果影响[J]. 农业机械学报, 2009,40(5): 173 ~ 177.
Wang Yongwei, Liang Xifeng, Wang Jun, et al. Effects of air velocity in heat exchanging pipes on heat saving of the underground heat storage system in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):173 ~ 177. (in Chinese)

21 马承伟,苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业出版社,2005.

22 周长吉. 现代温室工程[M]. 北京:化学工业出版社,2003.

23 李萍萍,胡永光. 冬季塑料大棚多重覆盖及电加热增温效果研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):76 ~ 79.
Li Pingping, Hu Yongguang. Thermal preservation effect of multi-film covering and heating wire in plastic greenhouses in winter [J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(2):76 ~ 79. (in Chinese)