

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.039

基于图像几何校正的番茄茎生长角自动测量技术*

孙红 李民赞 钱喜艳 张彦娥 杨玮

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为快速、无损地获取温室番茄植株生长形态特征, 研究提出了基于图像几何校正的番茄茎生长角自动测量方法。分别应用线性模型和双线性模型对失真图像进行几何校正, 结果表明: 未进行几何校正之前, 失真图像测量番茄茎夹角与活体番茄实际茎夹角间 R^2 为 0.50; 经线性校正后二者 R^2 为 0.625; 经双线性校正后 R^2 为 0.723。说明双线性校正模型对失真图像的几何校正效果优于线性校正模型。基于双线性模型图像校正结果, 应用 Otsu 阈值分割算法对 S 分量番茄植株图像进行了分割, 采用“中值滤波 + 闭-开运算”算法对分割后的二值图像进行滤波, 经细化运算获取了番茄植株茎秆的最基本信息, 并提取和计算了茎生长角参数, 自动测量结果表明, 活体植株手工测量结果与图像自动测量结果呈线性相关, R^2 为 0.703。基于图像手工测量结果与图像自动测量结果间 R^2 为 0.985。研究可为自动测量和分析番茄生长形态参数提供支持。

关键词: 番茄长势 茎生长角 图像处理 几何校正 自动测量

中图分类号: S126; TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0209-06

Measurement of Tomato Plant Stem Angle Based on Digital Image Processing

Sun Hong Li Minzan Qian Xiyan Zhang Yane Yang Wei

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to measure the morphological characteristics of crop non-destructively, the stem angle of tomato plant was measured by using digital image processing. The image of tomato plant was acquired in greenhouse and the image processing algorithm was discussed based on the geometric correction algorithm. The linear and bilinear model was applied and the results showed that the correlation coefficient (R^2) between measurement of original image and plant was 0.50 with absence of geometric correction; when the linear and bilinear model was applied, the R^2 was 0.625 and 0.723 separately. The corrected image was processed following the color space transformation, image segmentation, binary image filtering, straight line fitting and the angle calculation. The saturation image was selected and segmented by Otsu method. A good result was gained by combination the median filtering and close-open morphological method. After image thinning, the stems of the plant were simulated by straight lines based on least squares method. The angle between main stem and branch was calculated. The experiment result showed that there was linear relationship between the calculated by image processing technology and manual measurement with R^2 of 0.703. The manual and automatic measurement result also showed good correlation with R^2 of 0.985. It provided a method for the automatic measurement and analysis of tomato growth.

Key words: Tomato growth status Stem angle Image processing Geometric correction Auto-measurement

收稿日期: 2013-06-28 修回日期: 2013-07-09

* 国家自然科学基金资助项目(31271619)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102303)

作者简介: 孙红, 讲师, 主要从事作物长势智能检测研究, E-mail: sunhong@cau.edu.cn

通讯作者: 李民赞, 教授, 博士生导师, 主要从事现代精细农业研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

引言

番茄是我国主要的温室种植蔬菜品种之一,监测植物生长过程中形态结构的特点,为合理设置种植密度,改善栽培管理,指导番茄精细管理具有重要的意义,也是温室番茄种植信息化和自动化的重要发展方向^[1-2]。

与传统的测量方法相比,应用计算机图像处理技术测量作物植株形态具有无损、快速的优点,因此开展了大量的相关研究^[3-12]。尽管已有成果为研究番茄植株形态奠定了基础^[13-14],但是由于番茄植株生长形态变异是“芽”生理活动的结果,主茎上顶芽不断生展形成多蔓分枝,因此对番茄植株形态的图像分析特别是番茄植株分枝茎生长角、叶片基角等参数的提取和自动测量提出了新要求。

为了实时、无损地获取番茄植株生长图像,本文应用计算机图像处理技术对表征番茄植株形态特征的茎生长角参数进行自动测量分析,提出基于几何校正图像提取茎生长角参数的图像处理算法,通过对图像颜色空间变换、图像分割、二值图像滤波、茎秆图像细线化、茎秆直线拟合和茎生长角测量等算法的研究,实现番茄植株茎生长角参数自动获取。

1 数据采集

试验在中国农业大学温室展开,番茄采用基质栽培方式,基质蛭石与草炭比1:1,种植槽内植株行间距为30 cm,番茄苗定植20 d后,施专用缓效复合肥。番茄植株茎生长角定义为番茄植株生长主茎与分枝茎秆之间的夹角。对番茄植株茎生长角采用标准量角器测量作为评价标准。获取生长期番茄植株图像采用全自动 CCD 数码相机(Cannon, IXUS 95 IS 型),镜头为伸缩式变焦方式辅助灯光圈范围F2.8~4.9,采用可充电锂电池供电。采集图像分辨率为3 648 像素×2 048 像素,获取图像为BMP格式。试验采用白板作为背景减少拍摄影响,为了辅助观测所采集图像是否存在失真,设计了黑色正方形模板作为参考物,连接于番茄植株体。如图1所示为番茄植株图像采集场景。

2 图像几何校正

实际测量中,由于被测植株与相机镜头间位置无法保持垂直,拍摄图像会产生几何失真,因此通过空间变换和灰度插值对拍摄图像进行几何校正处理。

2.1 空间变换

设原图像中点 $f(x, y)$ 失真后变为 $g(x', y')$ 。



图1 番茄植株图像采集

Fig. 1 Image acquisition of tomato stem angle

图像失真坐标表示为 $x' = s(x, y)$, $y' = t(x, y)$ 。设线性失真时, $s(x, y)$ 和 $t(x, y)$ 分别为

$$s(x, y) = ax + by + c \quad (1)$$

$$t(x, y) = dx + ey + f \quad (2)$$

则失真点坐标为

$$x' = ax + by + c \quad (3)$$

$$y' = dx + ey + f \quad (4)$$

式中 a, b, c, d, e, f 分别为由原始图像变换到失真图像坐标系的常数。

设双线性(非线性)失真时, $s(x, y)$ 和 $t(x, y)$ 为

$$s(x, y) = ax + by + cxy + d \quad (5)$$

$$t(x, y) = ex + fy + gxy + h \quad (6)$$

则失真点坐标为

$$x' = ax + by + cxy + d \quad (7)$$

$$y' = ex + fy + gxy + h \quad (8)$$

式中 g, h 分别为由原始图像变换到失真图像坐标系的常数。对于线性失真模型由式(3)、(4)可知,需要3个约束对应点,对于双线性失真模型由式(7)、(8)可知,需要4个约束对应点,从而可以计算各函数中的系数,建立两幅图像像素点空间位置的对应关系。因此,通过鼠标可以获取四边形的4个顶点坐标作为空间变换校正用的4个约束点,采用双线性失真模型实现图像空间变换校正模型如图2所示。

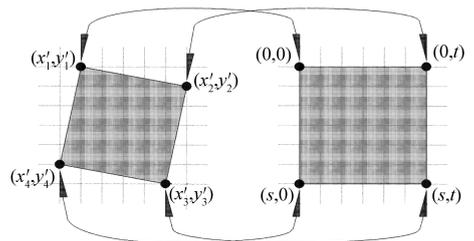


图2 空间变换校正模型示意图

Fig. 2 Space correction transform model

2.2 灰度插值

进行图像空间变换后,还需要对各像素赋予相

应的灰度以恢复原位置像素点的灰度。将图像灰度从经过变换的不失真图中映射到实际采集的失真图像像素上,即利用上述空间变换的逆运算:令变换后的图像与失真图像中相应的位置像素灰度相等;若映射至非整数处(图 3),则利用插值算法计算出该位置的灰度。研究采用后向映射的双线性插值算法实现。对图 3 中 (x',y') 点,利用其 4 个最近邻像素的灰度来计算 (x',y') 点处的灰度,图 4 所示灰度计算公式经简化为^[15]

$$d(x,y) = (1-q)[(1-p)d([x],[y]) + pd([x]+1,[y])] + q[(1-p)d([x],[y]+1) + pd([x]+1,[y]+1)] \quad (9)$$

式中 p,q 分别表示 (x',y') 点与 (x,y) 的横、纵坐标距离。

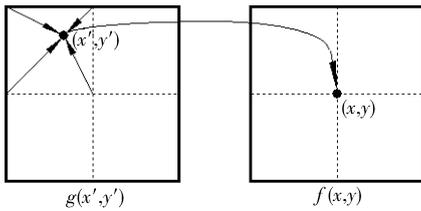


图 3 灰度映射示意图

Fig. 3 Gray value mapping

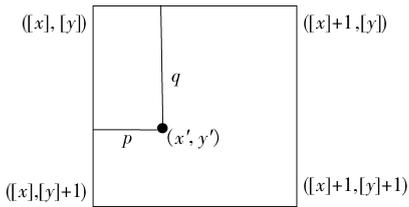


图 4 双线性插值运算示意图

Fig. 4 Bilinear interpolation

3 番茄茎生长角提取图像处理算法

为提取和测量茎生长角,对经过几何校正后的数字图像进行了图像颜色空间分析、图像二值化、图像滤波、茎秆图像细化、茎秆直线拟合,进而提取和计算茎生长角,流程如图 5 所示。

本研究中将 RGB 颜色空间图像变换到了 HSV 颜色空间,并主要应用了 H 和 S 分量的特征对所采集的番茄植株图像进行了分析。HSV 色彩空间是基于色相(Hue, H)、饱和度(Saturation, S)和明度(Value, V)对确定颜色的一种表达,它是一种与人类对颜色的感知更接近的模型。

基于选取的颜色空间分量灰度图像,应用最大类间方差(Otsu)自适应阈值分割算法分割番茄植株图像。由于 Otsu 算法可对每幅图像自动获取最佳分割阈值 T ,因此在本研究中将大于 T 的像素为番茄植株设为 0(黑色),小于 T 的像素为背景和参考

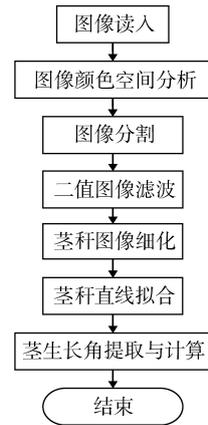


图 5 番茄植株茎生长角图像处理流程图

Fig. 5 Flow chart of image processing

模板设为 255(白色),得到分割后的二值图像。

进一步对分割后的二值图像进行处理,主要包括图像滤波和茎秆图像细化两部分^[15]。二值图像滤波分两步完成,首先采用 3×3 模板的中值滤波算法对图像进行平滑,然后采用 7×7 对称正方形结构元素的形态学开运算和闭运算组合去除背景和番茄植株图像中空洞和点状噪声。细化运算将二值图像内番茄植株缩成线条,逼近茎秆中心线,直到留下要计算的茎秆的最基本信息,以便进一步提取和测量。

分析细线化后的番茄茎秆图像,所测量的番茄茎生长角由番茄主茎和分枝茎相交构成,定义图像中垂直方向茎为番茄植株主茎,与主茎相交且向左右斜侧生长茎秆为分枝,确定茎秆交点的约束条件为:当细线化后某点邻接点个数大于等于 3,且该点左或右邻点的邻接点个数不为 0。基于上述主茎和分枝定义与交点约束条件,采用最小二乘法对番茄主茎秆和检测目标分枝茎秆直线拟合。

拟合后,对番茄植株茎生长角的测量就变成对两条直线夹角的计算。如果将主茎秆与分枝茎所拟合的直线看成如图 6 所示的两向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} ,则

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta = (x_1 - x_0)(x_2 - x_0) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_0) \quad (10)$$

$$\theta = \arccos \frac{(x_1 - x_0)(x_2 - x_0) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_0)}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}} \quad (11)$$

其中, θ 是要计算的茎夹角值,其取值范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, (x_0, y_0) 是两直线交点坐标, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别是两直线位于图像边界的像素点坐标。

4 结果分析与讨论

4.1 图像几何校正

本试验中采集的图片由于摄像头未垂直于所需

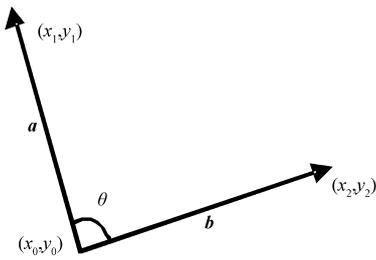


图6 番茄植株茎生长角计算原理图

Fig. 6 Principle of tomato stems growth angle calculation

要测量的基角平面而产生几何失真,如图7a所示。分别采用线性模型和双线性模型对其进行几何校正,并依照双线性插值恢复图像像素灰度后图像分别如图7c、7e所示。由图中观察可知,经线性模型校正后,图像7c中正方形模板仍存在一定的变形,而图7e中基本恢复了正方形模板的原始形状,几何失真校正结果较好。

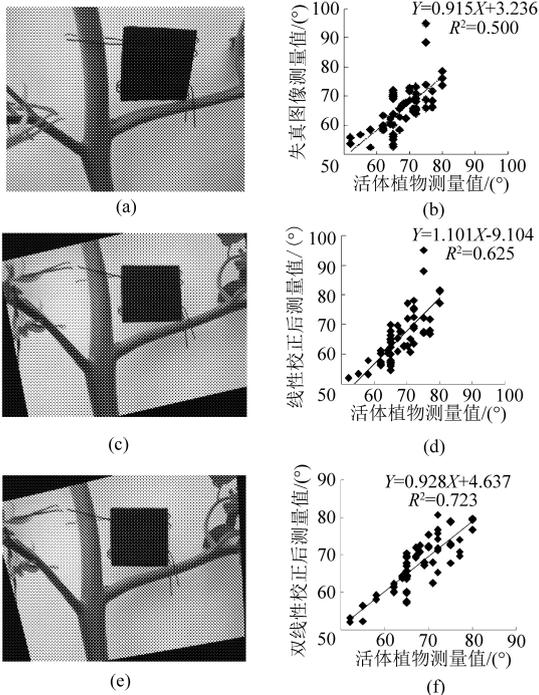


图7 图像几何校正结果

Fig. 7 Results of image geometric correction

(a) 失真图像 (b) 失真图像数据与实际测量值回归 (c) 线性模型校正后图像 (d) 线性校正后数据与量角器测量值回归 (e) 双线性模型校正后图像 (f) 双线性校正后数据与量角器测量值回归

为了比较几何校正结果,首先用量角器手工对番茄植株活体、失真图像、线性校正后图像和双线性校正后图像中的茎夹角进行了测量。对58个样本,基于图像测量的数据结果与植株活体测量的茎夹角数据进行回归,结果如图7b、7d、7f所示。回归结果表明,未进行几何校正之前,失真图像测量番茄茎夹角与活体番茄实际茎夹角间 R^2 为0.500;经线性校

正后二者 R^2 为0.625;经双线性校正后 R^2 为0.723。说明双线性校正模型对失真图像的几何校正效果优于线性校正模型。该结论与图像直观观察结果一致。因此在番茄茎生长角自动测量中,采用双线性模型对图像进行校正。

4.2 基于几何校正的番茄茎秆提取结果

目标番茄茎生长角区域原始RGB图像变换至HSV颜色空间后,番茄植株S分量灰度图像如图8a所示,由于背景和参考模板接近黑色,灰度统计位于 $[0,55]$ 区间,而番茄植株呈灰色,灰度统计集中于 $[80,200]$ 区间。该灰度分布规律可以应用Otsu自适应阈值分割算法对番茄植株S分量灰度图像进行分割,分割结果如图8b所示。结果表明,番茄植株茎秆和叶片特征被完整地分割,但也有部分背景和参考模板边缘等信息被分割和保留了下来。因此,需要对分割后的二值图像进行进一步滤波处理,去除番茄植株以外的其他信息。

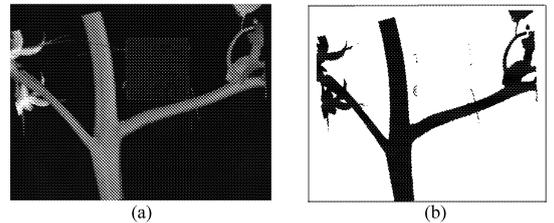


图8 图像分割结果

Fig. 8 Image segmentation results

(a) S分量直方图 (b) Otsu图像分割结果

首先,采用传统中值滤波算法,经 3×3 模板窗口进行图像平滑后,针对背景残留的点状噪声和植株体上的孔洞噪声,利用形态学闭运算和开运算进行处理。由于闭运算可降低背景点状噪声,开运算可降低前景孔洞噪声的影响,因此采用闭-开运算,即先进行一次闭运算,再进行一次开运算处理,结果如图9a所示。经细化运算将二值图像内番茄植株逼近茎秆中心线,处理结果如图9b所示,仅保留了茎秆的最基本骨架,为进一步提取番茄茎生长角奠定了基础。

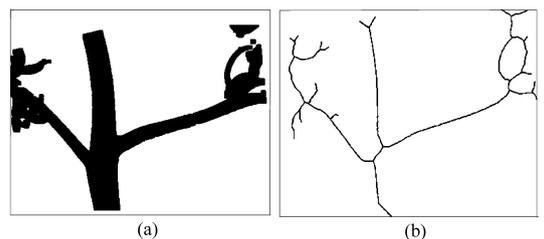


图9 二值图像处理结果

Fig. 9 Processing results of binary image

(a) 闭-开运算后结果 (b) 图像细化结果

由于番茄植株茎生长角定义为番茄植株生长主

茎与分枝茎秆之间的夹角。因此,所测量的番茄茎生长角由番茄主茎和分枝茎相交构成,依据主茎和分枝的定义以及茎秆交点的约束条件^[16],拟合番茄植株主茎干线和分枝线如图 10 所示。基于该拟合结果可应用式(11)对其计算番茄茎生长角。

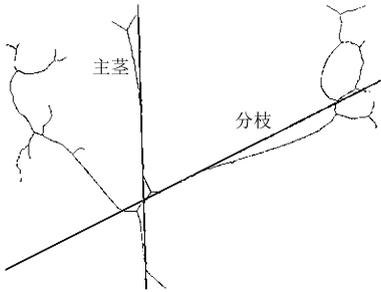


图 10 番茄植株茎秆拟合线

Fig. 10 Fitting line of tomato stems

4.3 基于几何校正的番茄茎生长角自动测量

基于几何校正后的图像,由番茄植株茎秆直线拟合结果,对番茄植株茎生长角进行自动测量。试验采集了 58 张番茄植株图像,测量结果如图 11 所示。活体植株手工测量结果与图像自动测量结果呈线性相关, R^2 为 0.703。基于图像手工测量结果与图像自动测量结果间 R^2 为 0.985。说明该方法可以用于提取温室番茄植株茎生长角,且可推广应用于叶基角、开张角等参数的提取,帮助自动测量和分析番茄生长形态参数,为高效分析番茄生长形态特征,加强温室番茄栽培精细管理提供支持。

5 结论

(1) 分别应用线性模型和双线性模型对失真图像进行几何校正结果表明:未进行几何校正之前,失真图像测量番茄茎夹角与活体番茄实际茎夹角间 R^2 为 0.50;经线性校正后二者 R^2 为 0.625;经双线性校正后 R^2 为 0.723。说明双线性校正模型对失真

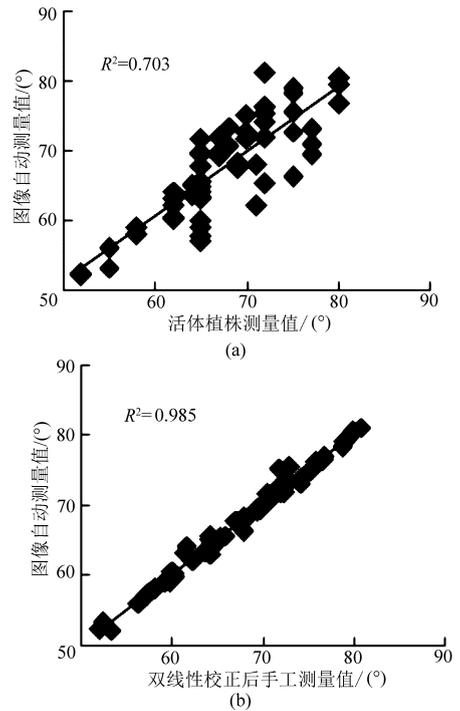


图 11 基于图像几何校正的番茄植株茎生长角测量结果

Fig. 11 Measurement result of stem angle based on geometric correction

图像的几何校正效果优于线性校正模型。

(2) 对 S 分量图像应用 Otsu 阈值分割番茄植株,并提出了“中值滤波 + 闭-开运算”滤波分析方法,经细化运算获取了番茄植株茎秆的最基本信息,采用基于邻域搜索的番茄植株主茎与分枝及二者交点的图像分析方法,并基于最小二乘法实现了茎秆直线拟合,可用于提取和计算茎生长角参数。

(3) 对几何校正后图像,对番茄植株茎生长角进行自动测量。活体植株手工测量结果与图像自动测量结果呈线性相关, R^2 为 0.703。基于图像手工测量结果与图像自动测量结果间 R^2 为 0.985。说明该方法可以用于提取温室番茄植株茎生长角。

参 考 文 献

- 孙红,孙明,王一鸣. 植物生长机器视觉无损测量研究综述[J]. 农业机械学报,2006,37(10): 181~185.
Sun Hong, Sun Ming, Wang Yiming. Status and trend of research on non-destructive measurement of plant growth based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 181~185. (in Chinese)
- 徐歆恺. 计算机视觉技术在作物形态测量中的应用[D]. 北京:首都师范大学,2005: 1~101.
Xu Xinkai. The application of computer vision in plant measurement [D]. Beijing: Capital Normal University, 2005: 1~101. (in Chinese)
- 徐正进,董克. 水稻叶片基角、开张角和披垂度的同时测定方法[J]. 沈阳农业大学学报,1991,22(2): 185~187.
Xu Zhengjin, Dong Ke. Rice leaf base angle, the opening degree angle and drooping simultaneous determination [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1991, 22(2): 185~187. (in Chinese)
- 冯辉,王五宏,徐娜,等. 串番茄主要株型性状的遗传研究[J]. 中国农业科学,2008,41(12): 4134~4139.
Feng Hui, Wang Wuhong, Xu Na, et al. Inheritance of several plant type characters in truss tomato [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4134~4139. (in Chinese)
- 李万昌. 小麦株型与产量结构间的协调性分析[J]. 江苏农业学报,2009,25(5): 966~970.
Li Wangchang. Coordination between plant type and yield structure in wheat [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009,

- 25(5) : 966 ~ 970. (in Chinese)
- 6 李少昆,张弦,赵明,等. 作物株型信息多媒体图像处理技术的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(3) : 265 ~ 271.
Li Shaokun, Zhang Xian, Zhao Ming, et al. Studies on the technique of multi-media image processing for plant shape information of crop [J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(3) : 265 ~ 271. (in Chinese)
- 7 Marcel van der Veecken, Lie Tang, Jan Willem Hofstee. Automated corn plant spacing measurement at early growth stages using active computer vision [C] // 2006 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper. 063059.
- 8 毛罕平,吴雪梅,李萍萍. 基于计算机视觉的番茄缺素神经网络识别[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8) : 106 ~ 109.
Mao Hanping, Wu Xuemei, Li Pingping. Recognition of tomato nutrient deficiency using artificial neural network based on computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8) : 106 ~ 109. (in Chinese)
- 9 An Dengkui, Li Minzan, Zhang Li. Measurement of tomato leaf area using computer image processing technology [J]. Sensor Letter, 2010(8) : 61 ~ 65.
- 10 丁永军,李民赞,郑立华,等. 基于近红外光谱小波变换的温室番茄叶绿素含量预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11) : 2 936 ~ 2 939.
Ding Yongjun, Li Minzan, Zheng Lihua, et al. Prediction of chlorophyll content of greenhouse tomato using wavelet transform combined with NIR spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(11) : 2 936 ~ 2 939. (in Chinese)
- 11 丁永军,李民赞,安登奎,等. 基于光谱特征参数的温室番茄叶片叶绿素含量预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5) : 244 ~ 247.
Ding Yongjun, Li Minzan, An Dengkui. Prediction of chlorophyll content using spectral response characteristics of greenhouse tomato [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5) : 244 ~ 247. (in Chinese)
- 12 丁永军,李民赞,孙红,等. 基于多光谱图像技术的番茄营养诊断模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8) : 175 ~ 180.
Ding Yongjun, Li Minzan, Sun Hong, et al. Diagnosis model of tomato nutrient content based on multispectral images [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8) : 175 ~ 180. (in Chinese)
- 13 董乔雪,王一鸣,杨丽丽,等. 番茄三维形态结构的参数提取及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊2) : 38 ~ 42.
Dong Qiaoxue, Wang Yiming, Yang Lili, et al. Parameter identification of tomato 3D architectural model and simulation [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.2) : 38 ~ 42. (in Chinese)
- 14 冯辉,张婷,王维佳,等. 基于图像处理技术的番茄部分株型信息的获取[J]. 园艺学报, 2009, 36(6) : 923 ~ 928.
Feng Hui, Zhang Ting, Wang Weijia, et al. Some plant-type parameters measurement based on image technology in tomato [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(6) : 923 ~ 928. (in Chinese)
- 15 陈兵旗,孙明. Visual C++实用图像处理专业教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 16 章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2006.