

利用计算机视觉技术实现对温室植物生长的无损监测

李长缨¹, 滕光辉¹, 赵春江², 乔晓军², 武聪玲¹

(1. 中国农业大学, 北京 100083; 2. 国家农业信息技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 利用计算机视觉技术对温室植物生长进行无损监测, 获取植物生长状态信息, 对于提高温室的智能化控制水平具有重要意义。在实验温室中设计了一套计算机视觉系统, 对黄瓜幼苗生长进行无损监测, 同时利用 VC++ 6.0 编制的图像分析处理软件, 提取植物的外部形态特征: 叶冠投影面积和株高。通过对两组无土栽培的黄瓜幼苗叶冠投影面积的连续监测, 发现叶冠投影面积的变化趋势可以较好的反映植物的缺肥情况。用图像处理测量植株的平均株高与人工测量结果的相关系数可以达到 0.927。研究表明, 计算机视觉技术应用于温室植物生长的无损监测是可行的, 具有广阔的应用前景。

关键词: 计算机视觉; 无损监测; 叶冠投影面积; 株高

中图分类号: TP242.62; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0140-04

1 引言

随着温室产业的不断发展, 如何提高温室的智能化控制水平, 已经成为各国学者研究的重点。早在 1989 年, 日本学者 Hashimoto^[1] 就提出了 SPA (Speaking Plant Approach) 的控制思想, 其核心是利用图像传感器, 对温室植物的生长进行无损测量, 通过采集植物的实时生长信息并反馈给控制器, 再结合人工智能的方法 (如专家系统、神经网络和遗传算法等) 从而实现温室的智能化控制。美国学者 K. C. Ting^[2] 等人也提出了由保护地栽培向建立“植物生产工程系统”的新概念, 这实际上是一种基于信息和知识来管理复杂的设施园艺系统的技术思想, 其实现也依赖于计算机视觉对植物生长信息的获取。因此, 生物信息采集新型传感器技术与植物生长过程监测研究已经成为近年来的研究热点^[3]。而计算机视觉与图像处理技术由于可以实现连续、无损监测、测量精度高、速度快, 再加之近年来随着计算机的成本不断下降, 此方法应用前景十分广阔^[4]。

国外在利用计算机视觉技术监测温室植物生长方面已经开展了许多研究, 近年来代表性的研究成果有: Hack^[5] (1988) 在温室条件下利用图像处理技术测量生菜在初期生长阶段的叶面积, 为了消除背景干扰, 他采用 750~1100 nm 波段的近红外光采集植物图像, 并且根据一天中不同光照度相应调整图像的灰度, 从而提高叶面积测量精度, 最后得到较满意的测量叶面积与植物鲜重的回归曲线。Mayer 和 Davison^[6] (1987) 研究了利用数字图像分析作为一种无损测量的手段, 以获取单株植物在不同生长阶段的生长参数, 从而为建立植物生长模型提供依据。Seginer^[7] (1992) 利用计算机视觉技术

监测西红柿叶尖垂直运动, 进而建立起了叶尖运动与植物缺水的关系, 为及时灌溉提供了依据。Shimizu^[8] 等人 (1995) 利用安装了近红外滤镜的 CCD 摄像机和近红外照明设备对植物白天和夜间生长分别进行监测, 得到植物白天和夜间的平均生长率。Tarbell 和 Reid^[9] (1991) 研究了利用计算机视觉技术对玉米生长发育状态进行分析的系统。不过, 由于他们选用 35 毫米胶片拍摄的图像经过扫描仪转化成数字图像后再进行分析, 因此分析的精度必将受到很大影响。P. Ling^[10] (1996) 在温室条件下对生菜在幼苗阶段进行连续监测, 发现叶冠投影面积的变化可以反映出植物的缺肥情况。

国内在此领域也开展了一些有益的尝试: 陈晓光^[11] 等人在实验室里研究了应用图像处理技术对蔬菜苗的轮廓线进行识别, 从而为蔬菜生产过程中的移栽、间苗等作业提供必要的信息; 徐贵力^[12] 等也探索了无损测量叶面积的方法, 但是只能将番茄等长叶茎作物的叶片伸入光照箱测量, 缺乏灵活性和可操作性。

本文的目标: 在温室条件下建立一套计算机视觉系统, 对单株植物进行无损实时监测, 利用图像处理技术实现对植物的叶冠投影面积和株高的自动测量。

2 材料与方法

2.1 植物生长环境设计

试验是在国家农业信息技术研究中心的实验温室中进行的。温室尺寸为 3 m × 3 m × 2.5 m, 温室环境由智能化控制系统自动控制, 可以实现对温室内温度、湿度、光照和灌溉的自动控制。室内白天温度控制在 (26 ± 1) °C, 夜间控制在 (18 ± 1) °C, 相对湿度白天为 70%, 夜间为 60%, 室内 CO₂ 浓度保持在 450~700 μL/L 之间。白天光照期保持在 14 h, 采用 400 W 的高压钠灯补光。

选用黄瓜为试验监测植物, 品种为国家蔬菜工程技术研究中心研制的北京 401。黄瓜种子在 72 孔的穴盘内培育, 播种后 5 d 待黄瓜幼苗两片子叶完全展开后, 选择长势基本一致的 30 株移栽至直径为 15 cm 的营养钵内, 培养基质为草炭与质石。为比较植株对缺肥的反映, 将 30 株黄瓜苗分为 2 组, 第 1 组 (1~10 株) 用营养液浇灌, 第 2 组 (11~30 株) 用蒸馏水浇灌。

收稿日期: 2002-09-16

基金项目: 北京市科技计划项目——工厂化高效农业研究与示范“温室生物环境信息自动采集分析系统研究”(H020720010230)

作者简介: 李长缨, 硕士生, 北京市清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

通讯作者: 滕光辉, 男, 博士, 副教授, 北京市清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院 210#, 100083

定植后 10 d, 待黄瓜幼苗长第 3 片真叶基本展开后, 开始对 16 株植物实行监测。

2.2 计算机视觉系统设计

计算机采用 Intel P 4 处理器, 内存 256M, 操作系统为 Windows 2000 Server, 软件开发平台为 VC++ 6.0。图像采集用 SONY DSC P9 数码相机, 拍摄图像分辨率为 1600 × 1200 的 24 位真彩色数字图像, 由 USB 数据线及接口将图像直接传至计算机。

照相机用三脚架固定, 距苗床高度为 77.5 cm, 每次拍摄时保持固定焦距。为减少拍摄误差, 对每株植物分别旋转 120 度拍摄 3 张图像, 叶冠投影面积取平均值。为了在图像分割时把植物叶冠和背景很好地区分开来, 设计直径为 15 cm 的圆纸板, 中间挖直径 1 cm 的孔, 黄瓜幼苗从中穿过, 从而使植物与背景形成较好的对比度。

拍摄光源为全波段的 400 W 的高压钠灯。

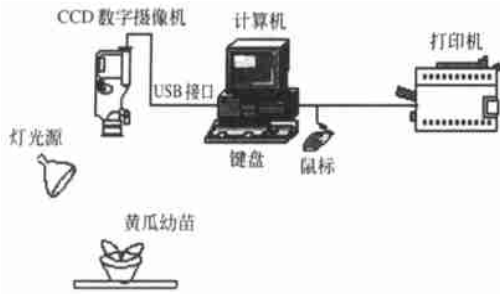


图 1 计算机视觉系统物理框图

Fig 1 Schematic diagram of the computer vision system

在拍摄前用已知面积白色圆滤纸片进行标定, 然后用已知面积的矩形白纸片测定系统测量精度, 结果表明: 系统测量的最大误差为 1.5%。

2.3 图像处理算法

利用该系统测量叶冠投影面积的程序流程图^[13]如图 2 所示。

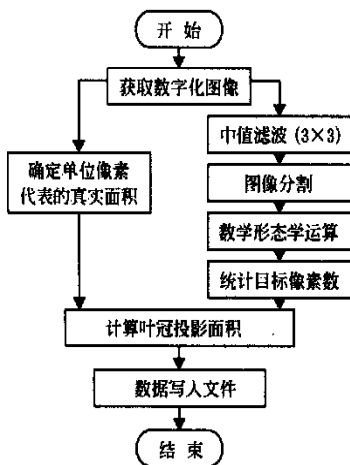


图 2 叶冠投影面积计算流程图

Fig 2 Flow chart of computing the top projected leaf area

2.3.1 中值滤波

图像信息在采集过程中往往受到各种噪声源的干

扰, 这些噪声在图像上常常表现为一些孤立像素点。这种干扰如不经过滤波处理, 会给以后的图像区域分割、分析、判断带来影响。与通常的线性滤波器(如低通滤波器)相比, 非线性滤波器能够更好地解决某些图像处理问题。中值滤波^[14]是排序滤波器的一种, 它既可做到噪声抑制, 滤除脉冲干扰及图像扫描噪声, 又可以克服线性滤波器所带来的图像细节模糊, 保持图像边缘信息。中值滤波的思想是将一个包含有奇数个像素的窗口 A 在图像上依次移动, 在每一个位置上对窗口内像素的灰度值由小到大进行排列, 然后将位于中间的灰度值作为窗口中心像素的输出值。可表示为:

$$g(i, j) = median[f_A(i, j)]$$

其中 $g(i, j)$ —— 输出值; $f_A(i, j)$ —— 以像素 (i, j) 为中心的 A 窗口下的各个灰度值。

在本试验中, 我们选用 3 × 3 模板的中值滤波, 可以取得较好的预处理效果。

2.3.2 叶冠与背景的分割

如图 3 所示为植物生长图像的灰度统计直方图, 可以看出虽然图像的灰度直方图有明显的峰值, 但是代表植物叶冠的第 3 个峰值与代表背景的第 4 个峰值有较多的重叠, 而且会受到光照条件的较大影响, 分割后往往会把背景当作叶冠面积统计进来或将叶冠部分像素丢失, 造成最后叶冠投影面积统计的较大误差。由于叶

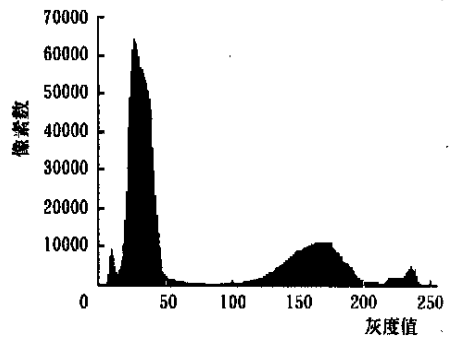


图 3 灰度直方图

Fig 3 Gray histogram

冠为绿色, 而背景为黑色, 我们考虑利用图像的颜色信息来分割图像。由于 HSV (色度, 饱和度, 光强) 颜色坐标系中的 H 分量代表颜色信息, 不受光照的影响, 所以我们采用 H 分量来分割叶冠。将采集的 RGB (红绿蓝) 图像转化为 HSV 图像, 转化公式为:

$$I = \frac{R + G + B}{3} \tag{1}$$

$$\begin{cases} H = W, B < G \\ H = 2\pi - W, B > G \end{cases}$$

$$W = \cos^{-1} \left\{ \frac{2R - G - B}{2[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}, \tag{2}$$

$B > G$

$$S = 1 - \frac{3 \ln(R, G, B)}{R + G + B} \tag{3}$$

图 4 为植物图像的 H 分量直方图, 可以看出, 直方图存在明显的峰值, 第 3 个峰值代表植物叶冠。试验表

明, Hue 最小阈值选取 37, 最大阈值选取 90 时, 可以将植物叶冠较好的从背景中分离出来。

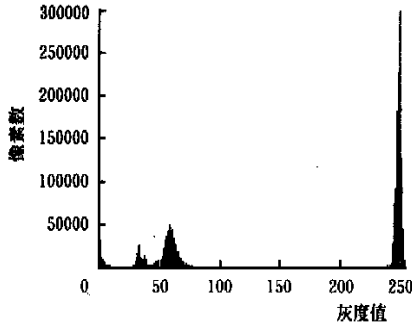


图 4 色度直方图
Fig 4 Hue histogram

2.3.3 数学形态学运算

分割后的二值图像存在一些噪声点和孔洞, 我们采用数学形态学运算^[15]中的开闭运算来进行噪声去除和孔洞填充。开闭运算是腐蚀和膨胀运算的组合运算。开启运算定义为先腐蚀后膨胀: $A \cdot B = (A \ominus B) \uplus B$

闭合运算定义为先膨胀后腐蚀: $A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B$

实验表明, 对分割后的二值图像进行两次开运算和一次闭运算后可以取得较为满意的结果。图 5 和图 6 分别为运算前和运算后的效果图。



图 5 运算前有噪声
Fig 5 Noise image before morphological operation



图 6 两次开运算
一次闭运算后消除噪声
Fig 6 Final binary image after morphological operation

2.3.4 叶冠投影面积的计算

分割处理后的二值图像白色区域灰度值为 255, 代表叶冠; 黑色区域灰度值为 0, 代表背景。叶冠投影面积的计算即统计灰度值为 255 的白色区域的像素的个数。由前面白色圆纸片的标定结果, 根据下式计算叶冠投影面积:

$$\frac{A_1}{N_1} = \frac{A_2}{N_2}$$

式中 A_1 —— 标定用的标准白色圆纸片的真实面积, mm^2 ; N_1 —— 图像分割处理后的白色圆纸片所占的像素数, pixel; A_2 —— 需计算的叶冠投影面积, mm^2 ; N_2 —— 图像分割处理后的叶冠所占的像素数, pixel

3 结果与讨论

对两组对比植物共 30 株进行连续 5 d 监测, 标号

为 1~ 10 的为蒸馏水浇灌的黄瓜幼苗, 标号为 11~ 30 的为营养液浇灌的黄瓜幼苗。图像采集间隔为 24 h, 每天上午 10: 30 采样。黄瓜从穴盘定植到营养钵的日期为 8 月 23 日, 从定植后 10 d 后开始对这 30 株植物连续监测。从图 7 及表 1 可以看出, 前 10 株的叶冠投影面积和增长率均明显小于后 20 株的平均值。第 1 天前 10 株的叶冠投影面积的平均值为 $1\ 974\ \text{mm}^2$, 而后 20 株叶冠投影面积的平均值为 $2\ 611\ \text{mm}^2$, 后者比前者高 32%。第 5 天前 10 株的叶冠投影面积的平均值为 $2\ 413\ \text{mm}^2$, 而后 20 株叶冠投影面积的平均值为 $6\ 059\ \text{mm}^2$, 差别达到 151%。前 10 株 5 d 的叶冠投影面积的增长率为 22%, 而后 20 株 5 d 的增长率为 132%。第 1 组叶冠投影面积的增长率明显低于第 2 组的增长率, 第 1 组 2 - 1 天甚至出现负增长。从这些数据可以看出, 蒸馏水与营养液的不同处理可以在叶冠投影面积上明显的反映出来, 尤其是叶冠投影面积的变化率更能反映出植物的缺肥情况。

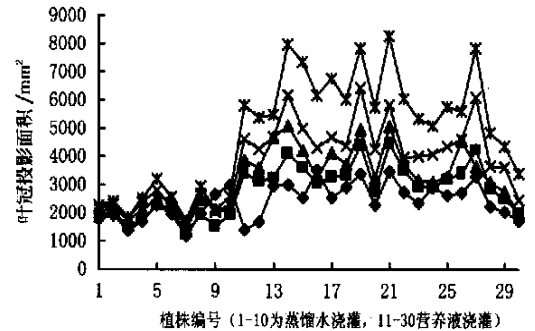


图 7 30 株植物叶冠投影面积的连续 5 d 监测
Fig 7 Changes of the top projected leaf area (TPLA) by monitoring 16 plants in five consecutive days

表 1 两组叶冠投影面积平均值及增长率比较

Table 1 Comparison of the TPLA and the growth rate between the two groups

	第 1 d 平均值	第 2 d 平均值	第 3 d 平均值	第 4 d 平均值	第 5 d 平均值
第 1 组	1974	1813	2112	2219	2413
增长率/%		- 8.1	16.4	5.1	8.7
第 2 组	2611	3315	3755	4576	6059
增长率/%		26.9	13.3	21.9	32.4

为了检验图像处理方法测量的平均株高的测量精度, 对 30 株黄瓜幼苗分别用图像处理方法和手工测量方法进行株高测量, 回归曲线如图 8 所示, 测量数据如表 1 所示。试验中我们定义株高为植株的最高点到基部的距离。结果表明图像处理方法的测量结果与手工测量结果有很好的相关性 ($R^2 = 0.927$), 二者的相关关系为: $Y = 0.9949X - 0.2182$ 。对于有些偏差较大的点, 主要是由于光照不均匀, 造成分割时把营养钵的部分像素也包括进来, 所以下一步要进一步提高测量精度就需要改善光照条件, 提高分割精度。

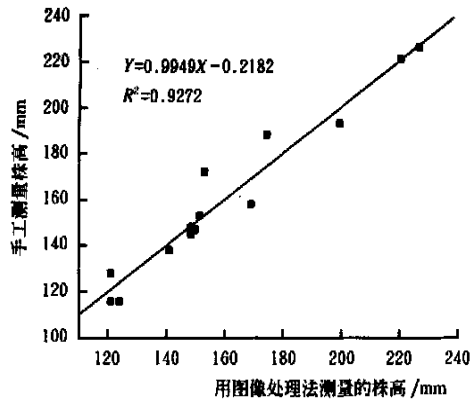


图8 图像处理方法测量结果与手工测量结果相关性
Fig 8 Relationship between shoot heights measured by computer vision and by hand

4 结论

1) 对温室条件下利用机器视觉技术对植物生长进行实时无损监测研究。计算机视觉技术作为一种无损检测技术,可以对植物的形态特征诸如叶冠投影面积和株高实现无损快速测量。测量的主要误差来自光照不均匀引起的分割误差,故还应研究如何减小测量误差。

2) 这种无损监测的新技术不仅可以节省温室中的劳动力,测量植物生长参数客观、快速、准确,而且不对植物构成伤害,对经济性较高的作物来说很有意义。

3) 计算机视觉无损监测的最终目标是使温室环境控制系统通过获得这些植物的实时生长特征参数,可以针对植物的不同生长阶段和生长条件对温室植物实现更为精确的控制,从而提高作物产量和效益。

本系统的扩展性好,不仅可以对黄瓜幼苗进行监测,还可以对西红柿等其它温室植物进行叶冠投影面积和平均株高的测量。

【参考文献】

[1] Morimoto T, Hashimoto Y. AI approaches to identification and control of total plant production—for SPA & SFA to environmental control[A]. 3rd IFAC/

CIGR workshop on artificial intelligence in Agriculture [C]. Maruhari, Chiba, Japan April 24~ 26, 1998 1~ 20

[2] David H Fleisher, Sukwon Kang, Ting K C. Software for multiple crop production in advanced life support systems [C]. ASAE Paper NO: 01- 4084

[3] 汪懋华 弘扬科学精神,推进农业工程科技创新[A]. 韩鲁佳 机遇,挑战,创新——2002 农业工程青年科技论坛论文集[C]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002, 1~ 6

[4] 滕光辉,李长缨 计算机视觉技术在工厂化农业中的应用[J]. 中国农业大学学报,2002, 7(2): 62~ 67.

[5] Hack G R. The use of image processing under greenhouse conditions for growth and climate control[J]. Acta Horticulturae, 230: 215~ 220

[6] Seginer I, Elster R T, Goodrum J W, et al. Plant wilt detection by computer-vision tracking of leaf tips [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(5): 1563~ 1567.

[7] Meyer G E, Davison D A. An electronic image plant growth measurement system [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(1): 242~ 248

[8] Shimizu H, Heins R D. Computer-vision-based system for plant growth analysis [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(3): 959~ 964

[9] Tarbell K A, Reid J F. A computer vision system for characterizing corn growth and development[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(5): 2245~ 2255

[10] Kacira M, Ling P P. Design and development of an automated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(4): 989~ 996

[11] 陈晓光,于海业,周云山,等 应用图像处理技术进行蔬菜苗特征量识别[J]. 农业工程学报,1995, 11(4): 23~ 26

[12] 徐贵力,毛罕平,胡永光 基于计算机视觉技术参考物法测量叶片面积[J]. 农业工程学报,2002, 18(1): 154~ 157.

[13] Kenneth R. Castleman. Digital Image Processing 北京:清华大学出版社, Prentice Hall, 1998, 55~ 62

[14] 方如明,蔡健荣,许莉 计算机图像处理技术及其在农业工程中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999, 52

[15] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京:清华大学出版社,1999, 261~ 262

Development of non-contact measurement on plant growth in greenhouse using computer vision

Li Changying¹, Teng Guanghui¹, Zhao Chunjiang², Qiao Xiaojun², Wu Congling¹

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: Non-contact measurement and monitoring of plant growth using computer vision has great significance in improving the level of intelligent control in greenhouses. A computer vision system which can be used to monitor the growth of cucumber seedlings in a near-real-time and non-destructive way was developed in an experimental greenhouse. Image analysis software which can be used to measure the top projected leaf area (TPLA) and shoot height of the seedlings was developed using VC++ 6.0. By continuously monitoring the change of TPLA of controlled and treated seedlings, it was found that the change rate of TPLA is a good indicator of fertilizing status for cucumber seedlings. Compared with the manual measured average shoot height, the image processing results yielded a correlation of $R^2 = 0.927$. These results indicate that computer vision application in greenhouse plant growth monitoring is feasible and promising.

Key words: computer vision; non-contact measurement; top projected leaf area; shoot height