

基于计算机视觉的葡萄茎直径高精度测量方法^{*}

曾庆兵¹ 刘成良¹ 苗玉彬¹ 王世平² 黄丹枫²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

【摘要】 提出了基于计算机视觉的葡萄茎直径测量方法, 采用双边滤波降低图像噪声, 通过 Otsu 阈值分割和 BloB 分析实现葡萄茎与背景的分离, 应用基于特征点的定位方法得到茎直径测量位置, 由茎直径所包含像素数和尺寸当量计算出茎直径值, 从而实现茎直径连续测量。实验和现场应用表明, 系统测量重复精度可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

关键词: 葡萄 茎直径 计算机视觉 非接触测量 图像处理

中图分类号: TP391.41; S126

文献标识码: A

High Accuracy Measurement of Grape Stem Diameter Based on Computer Vision

Zeng Qingbing¹ Liu Chengliang¹ Miao Yubin¹ Wang Shiping² Huang Danfeng²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

For non-contact and high accurate measurement of grape stem diameter, a method based on computer vision was proposed. Bilateral filtering was implemented for smoothing original grayscale images. Furthermore, the grape stem was extracted from the background by Otsu and BloB analysis. According to the localized feature point, the position of stem diameter was determined. Then the stem diameter was calculated by the pixel size coefficient and the pixels of the stem diameter. Consequently, continuous stem diameter measurement was achieved. Field applications and experimental results show that the repeatability accuracy of the system achieves $\pm 0.5 \mu\text{m}$.

Key words Grape, Stem diameter, Computer vision, Non-contact measurement, Image processing

引言

植物茎直径现有测量仪器主要为游标卡尺和线性位移传感器 (linear variable displacement transducers, 简称 LVDTs), 也有研究者如 Splinter 提出用电子微量计监测植物茎直径变化^[1]。游标卡尺不能连续测量茎直径, 且不易控制茎上测量位置和卡尺夹持力度, 会给测量结果带入误差; 线性位移传感器在茎直径测量中应用较多, 其测量精度能达到微米级, 且能连续测量茎直径。国内外研究者已使用该传感器对植物生长与生长环境间关系进行过许多研究^[2~3], 但测量时传感器与葡萄茎接触, 不可避免对植物生长造成影响^[4], 另外该产品基本

为国外进口。基于机器视觉的测量技术已成为一种速度快、精度高、受环境变化影响小的几何测量方法, 能对植物的生长特征参数进行非接触、非破坏式测量, 在现代农业领域中已得到广泛应用^[5~6]。

本文在考虑葡萄茎结构形态和现场环境基础上, 提出基于计算机视觉的非接触、高精度葡萄茎直径测量方法。

1 系统组成

葡萄茎直径测量系统由软、硬件两部分组成。硬件部分包括 CMOS 工业相机、光学镜头、背光光源、计算机和工作台等。软件为自编程序, 主要包括图像预处理、图像二值化、葡萄茎区域提取、茎直径

定位及茎直径计算等。

测量系统采用西安市方城公司生产的 FC-IDI30M 型 CMOS 工业相机, 该相机分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$, 像素尺寸为 $5.2\ \mu\text{m} \times 5.2\ \mu\text{m}$, 速率最高可达 30 帧/s, 输出图像为 JPG、BMP 等多种格式。本研究中采用 BMP 图像格式, 采集的图像通过 USB2.0 接口传输至计算机指定目录。光源是计算机视觉测量中的重要组成部分, 为获得高质量图像信号, 选用了上海市纬朗光电科技有限公司的 BGLD50 型红色背光光源, 光源亮度可调。测量时在方形背光光源上放置一个圆形透明玻璃罩, 防止光源离茎太近导致图像中茎边缘部分模糊。另外测量时用软布在相机周围形成封闭环境, 减少自然光干扰图像采集。图 1 为测量系统示意图。

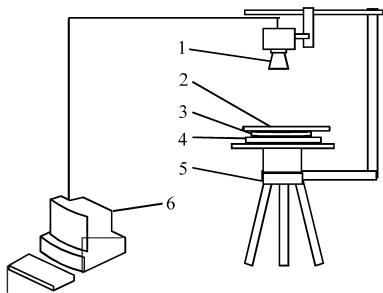


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic graph of the measurement system

1. 工业相机 2. 葡萄枝茎 3. 透明玻璃罩 4. 背光光源 5. 支撑架 6. 计算机主机

2 茎直径测量

2.1 系统标定

为确定测量系统中每一像素所对应目标尺寸的大小, 需对测量系统进行标定。对于茎直径测量, 采用被测量葡萄茎为标定物, 测量前用游标卡尺在茎的同一位置多次测量茎直径, 取多次测量结果的平均值为茎直径 D_s 。利用数字图像处理求得茎图像中卡尺测量位置处茎直径所包含像素数 D_d , 由 D_s 和 D_d 得到系统的尺寸当量

$$k = \frac{D_s}{D_d} \quad (1)$$

2.2 图像预处理及分割

葡萄茎图像采集过程如下: 将葡萄茎平放于玻璃罩上, 调整好光源亮度、镜头光圈和焦距等, 使得采样图像清晰、对比度高, 然后设置图像采集时间间隔并启动采集。考虑到茎直径大小为微变, 将采集时间间隔设为 30 min。采样图像如图 2a 所示, 其中黑色区域为葡萄茎。

由于受到种种条件限制和随机干扰, 采集的图像存在噪声, 需进行降噪处理, 以利于边缘提取。由

于低通滤波容易模糊图像的边缘特征, 从而影响测量精度, 采用双波滤波对茎图像降噪。双边滤波^[7]是一种非线性的、非迭代的、局部的和简单的滤波, 它在滤除噪声的同时还能很好地保持图像的边缘特征。在茎图像降噪时, 首先采用 5×5 中值滤波去除图像中存在的椒盐噪声^[8], 然后再应用双边滤波对图像进行滤波处理, 滤波后图像如图 2b 所示。经过降噪后, 图像中噪声得到抑制。

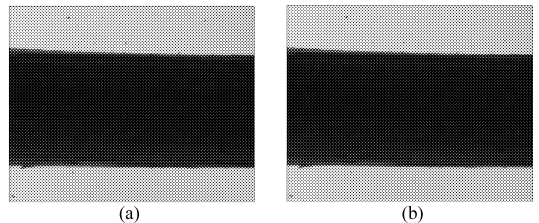


图 2 图像预处理

Fig. 2 Image pre-processing

(a) 原始图像 (b) 降噪后图像

为了测量需要, 需将葡萄茎对象从背景中分离出来。基于阈值的分割是常用图像分割方法, 目前有 P 参数法、双峰法、迭代法、Otsu 法等多种阈值分割算法。选用 Otsu 法分割茎图像, 图 2b 茎图像阈值分割后结果如图 3a 所示, 结果图像中背景像素值为 1。为图像分析方便, 将图 3a 图像取反得到新图像, 新图像 4 条边界上像素值为 1, 图像边界与葡萄茎为同一区域。为便于后续图像处理, 将新图像的 1~10 列, 1 270~1 280 列像素点的值赋为 0。新图像中除了葡萄茎外, 还包含许多细小对象区域, 这些区域是降噪过程中未被过滤掉的大尺寸噪声点在阈值分割后形成的。图像中对象区域分为目标区域和不相关区域, 其中茎对象为目标区域, 而目标区域外的其他区域为不相关区域。利用目标区域和不相关区域在图像尺寸的差异, 采用 BloB 算法提取目标区域。BloB 是指具有相似图像特征而且在空间上连通的像素组成的块。通过对二值图像中所有对象进行一次遍历, 遍历后生长一个动态链表, 记录了图像中各个 BloB 的大小信息。然后在链表中找到尺寸最大的 BloB, 如果其尺寸超过设定阈值, 则认为是目标区域。通过 BloB 分析提取出葡萄茎区域, 葡萄

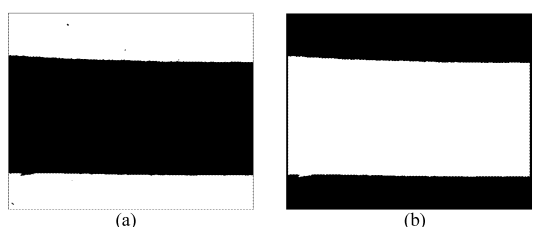


图 3 茎图像分割

Fig. 3 Image segmentation

(a) Otsu 阈值分割 (b) 葡萄茎区域

茎区域如图 3b 所示,白色区域为葡萄茎。

2.3 测量

在 2.2 节中得到只包含茎的二值图像,为得到茎直径大小需确定茎直径位置并求取茎直径包含的像素数。茎直径确定后,根据茎直径所包含的像素数和标定过程中确定的尺寸当量计算茎直径。视觉测量茎直径时,由于茎表面有死皮,图像中茎的上、下边界呈现出凹凸不平,同时生长葡萄茎在图像中位置会发生移动,因此在茎直径的生长监测过程中,很难保证每次计算茎直径的上、下边缘点都为相同点,可见准确定位茎直径测量位置是茎直径测量的难点。为解决此难题,在测量前去除茎表面死皮时在茎的适当位置保留一小块死皮,并将死皮折起,确定茎直径位置时将死皮顶点选为边缘点,该边缘点称为特征点。然后以特征点为基础点,找到构成茎直径的另一边缘点。

2.3.1 特征点确定

定位标记点时,对图 3b 二值图像从左至右($i = 11, \dots, 1269$)对整幅图像进行逐列扫描,统计每列扫描线中值为 1 的像素数 $l(i)$,并找到 $\max(l(i))$ 扫描线的位置。找出该扫描线中最靠近图像下边界值为 1 的像素点,该点即为特征点 M_1 。实践表明不管生长中葡萄茎位置如何变化,通过该算法均可准确定位特征点。

2.3.2 对应边缘点确定

特征点确定后,根据特征点确定另一边缘点位置,也即对应边缘点。对应边缘点与特征点相对于茎的中心轴对称,确定对应边缘点时先确定茎的中心轴。找到茎的左右两边界线的中间点,左边界线上、下端点分别为 A 和 B ,坐标分别为 (X_A, Y_A) 和 (X_B, Y_B) ,左边界线上中间点 O_1 坐标为 (X_{O_1}, Y_{O_1}) , O_1 坐标由点 A 和 B 坐标计算得到

$$\begin{cases} X_{O_1} = \text{round}((X_B - X_A)/2 + X_A) \\ Y_{O_1} = \text{round}((Y_B - Y_A)/2 + Y_A) \end{cases} \quad (2)$$

同样,依据右边界线 CD 计算出右边界线中间点 O_2 坐标 (X_{O_2}, Y_{O_2}) ,由点 O_1 和 O_2 确定出对称轴 O_1O_2 方程

$$y = \frac{Y_{O_2} - Y_{O_1}}{X_{O_2} - X_{O_1}}x + Y_{O_1} - \frac{Y_{O_2} - Y_{O_1}}{X_{O_2} - X_{O_1}}X_{O_1} \quad (3)$$

由对称轴 O_1O_2 及特征点 M_1 ,求得经过点 M_1 且与对称轴 O_1O_2 垂直的直线 l_0 的方程

$$y = -\frac{1}{k_0}x + Y_{M_1} + \frac{1}{k_0}X_{M_1} \quad (4)$$

其中 $k_0 = \frac{Y_{O_2} - Y_{O_1}}{X_{O_2} - X_{O_1}}$

直线 l_0 与二值图像上边界交于点 M_2 ,连接线段 M_1M_2 并将其上像素值赋为 0,对称轴 O_1O_2 及线段 M_1M_2 位置如图 4a 所示。这样, M_1M_2 将图像中葡萄茎分成 S_1 和 S_2 两部分,通过 BloB 分析得到茎的 S_2 区域。对 S_2 区域进行左右逐列扫描得到直线 l_0 与茎上边界交点 M_3 ,线段 M_1M_3 即为茎直径位置。 S_2 区域及线段 M_1M_3 位置如图 4b 所示。由 M_1M_3 所包含像素数和尺寸当量可计算出茎直径。

为增加测量的精确性和可靠性,选择一定长度茎的直径平均值为测量的茎直径。为此以 M_1M_3 和 O_1O_2 的交点 O_3 为起始点,沿茎对称轴 O_1O_2 向 O_2 点方向移动 1 100 个像素确定出 O_1O_2 上点 O_4 。过点 O_4 作与对称轴 O_1O_2 垂直的直线,该直线与图像上、下边界分别交于点 N_1 和 N_2 ,点 O_4 及线段 N_1N_2 位置如图 4c 所示。线段 N_1N_2 平行于 M_1M_2 ,将 N_1N_2 上像素赋值为 0,这样 S_2 区域被分成 S_{21} 和 S_{22} 两区域。对 S_2 区域执行 BloB 分析得到 S_{21} 区域,然后左右逐列扫描 S_{21} 区域得到 N_1N_2 与茎的上、下边界的交点,交点分别是 N_3 和 N_4 ,线段 N_3N_4 为茎的最右端直径。二值图像中线段 M_1M_3 、 N_3N_4 以及茎的上、下边界所夹区域 S_{21} 即是茎直径测量的感兴趣区域, S_{21} 区域如图 4d 所示。统计 S_{21} 区域中像素数,将 S_{21} 区域像素总数除以 1 100 得到茎平均直径包含像素数,然后由茎平均直径所包含像素数乘尺寸当量 k 计算出茎直径。

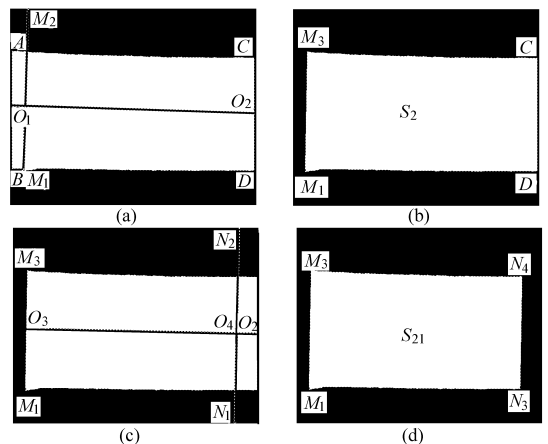


图 4 茎直径大小计算

Fig. 4 Calculation of the stem diameter

(a) 对称轴 O_1O_2 及线段 M_1M_2 位置 (b) S_2 区域
(c) 点 O_4 及线段 N_1N_2 位置 (d) S_{21} 区域

3 应用实例

于 2008 年 6 月 25 日~7 月 8 日在玻璃温室中对一株 3 年生巨峰葡萄茎进行监测,测量前对葡萄进行滴灌,保证土壤水分充足。安装好系统并对系

统进行标定,得到尺寸当量 k 。

连续采集 8 幅葡萄茎图像,依据图像测得的茎直径值确定系统测量的重复精度。利用本文算法计算出茎直径最大值 D_{\max} 为 11.033 1 mm,最小值 D_{\min} 为 11.032 0 mm, $\Delta = D_{\max} - D_{\min} = 1.1 \mu\text{m}$,由 Δ 得到测量重复精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,可见测量系统具有很好的精度和稳定性。茎直径重复测量数据如图 5 所示。

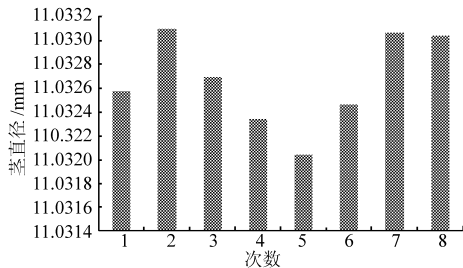


图 5 茎直径测量重复精度

Fig. 5 Repeatability precision of the stem diameter measurement

每隔 0.5 h 采集一帧葡萄茎图像,由茎的图像计算该时间点的茎直径值,6 月 25 日~7 月 8 日葡萄茎直径日变化如图 6 所示。每日葡萄茎直径最大值出现在 5:00~8:00,然后由于太阳辐射的增强,饱和水气压差上升,蒸腾作用加强,葡萄茎直径逐渐收缩,在 12:00~18:00 达到最小。在此之后,随着太阳辐射强度的减弱,饱和水气压差下降,蒸腾速率逐渐减小,茎直径开始恢复,次日清晨茎直径恢复到最大,茎直径变化与国内外科技工作者采用线性位移传感器测量得到的规律一致。在 14 d 实验中,天

气经过雨天、雨转晴、晴天 3 阶段变化。从图 6 还可看出,不同天气条件下茎直径变化存在明显差异,主要表现在每日最大收缩量 (maximum daily shrinkage, 简称 MDS) 上,晴天的 MDS 值高于下雨天。造成 MDS 差异的原因是太阳辐射强弱影响作物冠层能量变化,而冠层能量的增加或减少直接影响植株茎秆的收缩和膨胀。

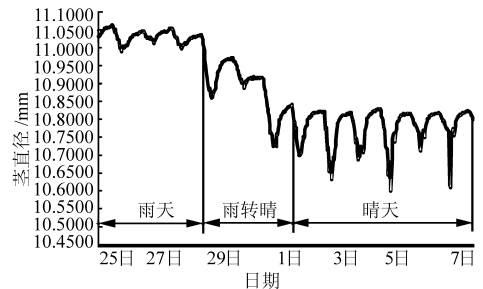


图 6 茎直径日变化曲线

Fig. 6 Daily curve of grape stem diameter

现场实验表明,通过监测茎直径变化可以了解植株的水分状况。

4 结束语

数字图像采集系统采集葡萄茎图像时无需接触葡萄茎,保证葡萄茎的正常生长。用 Otsu 阈值分割和 BloB 分析能避免噪声影响并提取出葡萄茎区域,基于特征点的茎直径定位法能准确获取茎直径包含像素数,保证茎直径测量不受茎形状差异、位置移动的影响。实验结果表明茎直径测量的重复精度能达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,监测茎直径变化可以了解植株的水分状况。

参 考 文 献

- Splinter W E. Electronic micrometer continuously monitors plant stem diameter[J]. *Agricultural Engineering*, 1969, 50: 220~221.
- Intrigliolo D S, Castel J R. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1):49~59.
- Gallardo M, Thompson R B, Valdez L C, et al. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato[J]. *Irrigation Science*, 2006, 24(4):241~255.
- 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)
- Biskup B, Schar H, Schurr U, et al. A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies[J]. *Plant Cell and Environment*, 2007, 30(10):1 299~1 308.
- 何东健,张海亮,宁纪锋,等. 农业自动化领域中计算机视觉技术的应用[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 171~175.
- Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]// *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision*, Bombay: IEEE Press, 1998.
- Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*[M]. 2ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- 王传宇,赵明,阎建河. 基于双目立体视觉的苗期玉米株形测量[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5): 145~148, 144.
Wang Chuanyu, Zhao Ming, Yan Jianhe. Measurement of maize seedling morphological traits based on binocular stereovision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(5):145~148, 144. (in Chinese)