

# 基于激光视觉的温室作物茎叶量测方法\*

张瑜<sup>1</sup> 汪小昆<sup>1</sup> 孙国祥<sup>2</sup> 李永博<sup>2</sup> 孙鑫<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

**摘要:** 为实时获取温室作物生长形态参数,应用线激光,对作物整体进行非接触式扫描,通过 CCD 摄像机实时拍摄扫描过程,采用重心法计算激光光条中心,获取作物叶片与茎秆的三维点云信息,实现作物形态三维点云结构重建;提出适用于作物三维点云数据特征的迭代法,提取叶片点云子集的中心轴线,通过曲线拟合计算叶片长度;根据摄像机透视原理,提出针对细小茎秆的静态定位法计算茎秆直径。试验表明,激光视觉量测叶片长度与茎秆直径的准确率分别为 95.39% (SE 为 0.296 1,  $R^2 = 0.916$ ) 和 94.55% (SE 为 0.008 7,  $R^2 = 0.915$ )。

**关键词:** 温室 作物茎叶 形态参数 激光视觉 三维点云

**中图分类号:** S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0254-06

## 引言

设施农业的快速发展对温室环境调控提出了更高的要求<sup>[1-4]</sup>。为了使作物能够在经济管理模式下收到较高的产量以及品质,实时获取作物生长状态参数十分重要<sup>[5-8]</sup>。

机器视觉技术可以快速实时地获取作物二维图像信息,实现对作物生长状态的监测。文献[9-11]采用机器视觉技术,通过作物的颜色特征、光谱特征以及形态学特性来判断作物的营养状态,对作物的叶面积指数、冠层覆盖率与均一性等形态特征进行评估。随着机器视觉技术的发展与温室环境控制技术水平的提高,二维图像信息已无法满足温室环境控制系统对作物生长信息的要求。三维可视化测量技术在作物生长参数测量方面表现出巨大潜力。如文献[12-17]中,许多国外研究者利用大地激光雷达扫描仪,对大田作物或树木等大面积作物的整体冠层高度或体积进行测量。但是从便携性以及经济性角度考虑,这种昂贵的测量仪器不适用于环境封闭、空间有限的温室内作物,不利于温室经济化管理,同时,这种测量方法无法更好地体现单株作物的细节特征。所以,本文应用激光视觉技术,采用线状激光发生器与摄像头作为信息采集传感器,通过数字图像处理技术,研究适用于温室环境内的便携式、低成本的温室作物三维形态测量方法,实现温室单株作物形态三维点云的实时重建;提出适用于作物

点云数据特征的迭代法和针对细小茎秆直径量测的静态定位法,实现叶片长度和茎秆直径的量测。

## 1 激光视觉系统构成

激光视觉系统构成如图 1 所示,主要由 CCD 摄像机和线激光发生器组成。线激光发生器对作物进行自上而下反复扫描作物的同时,摄像机拍摄整个扫描过程,通过计算机提取每一帧图像,应用 Matlab 图像处理工具箱进行摄像机标定和点云数据处理与计算。本文针对作物生长参数中 2 个典型参数,茎秆直径与叶片长度进行计算。

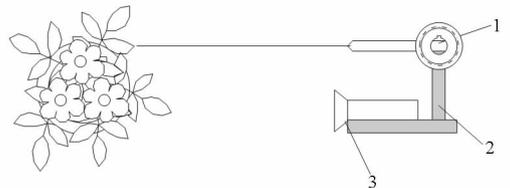


图 1 激光视觉系统构成图

Fig. 1 Laser vision system

1. 激光发生器 2. 支架 3. 摄像机

## 2 三维量测模型参数标定

结合传统的摄像机标定平面标靶与光平面标定的立体标靶,本文采用一种新的直角标定标靶,如图 2 所示。标靶由 2 个相互垂直的标准矩形平面组成。每个平面上均匀分布若干圆点和圆环,圆点直径与圆环外径均为 10 mm,圆环内径为 6 mm,中心

收稿日期: 2014-04-15 修回日期: 2014-05-23

\* 国家自然科学基金资助项目(61273227)

作者简介: 张瑜, 博士生, 主要从事检测技术及自动化装置研究, E-mail: zhangyu64@hotmail.com

通讯作者: 汪小昆, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物环境模拟与控制、农业电气化与自动化等研究, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

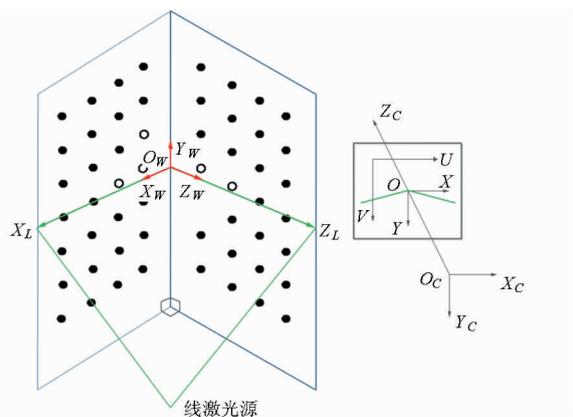


图2 系统标定原理示意图

Fig.2 Sketch of calibration

间距为 50 mm。标靶长 420 mm,高 594 mm。将标靶固定在墙角使两平面严格相互垂直。取两平面相交线为 Y 轴,交线的中点为世界坐标系原点,按照右手定则分别在两标定平面作 OX 和 OZ 垂直于 OY,OX 和 OZ 则分别为 X 轴和 Z 轴。2 个标定板上圆点和圆环在物空间坐标系中的坐标均已经确定,记为  $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ 。根据激光视觉空间定位原理<sup>[18]</sup>,有如下关系

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \\ a_w x_w + b_w y_w + c_w z_w + d_w = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $a_x, a_y$ ——相机焦距  $u_i, v_i$ ——图像坐标系

$u_0, v_0$ ——相机主点坐标

$r_1, \dots, r_9$ ——旋转矩阵参数

$t_x, t_y, t_z$ ——平移矩阵参数

$x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}$ ——世界坐标系

$a_w, b_w, c_w, d_w$ ——激光平面方程系数

各项参数均可通过 Matlab 标定工具箱获得。

得到的图像坐标系与摄像机坐标系变换矩阵  $K$  和摄像机坐标系与世界坐标系变换矩阵  $H$  分别为

$$K = \begin{bmatrix} 1875.9045 & 0 & 1024.6569 \\ 0 & 1875.9045 & 768.2801 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.9233 & -0.1016 & -0.3704 & -114.5437 \\ -0.2219 & -0.9282 & -0.2986 & 141.4496 \\ -0.3135 & 0.3597 & -0.8796 & 591.5722 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

关闭线激光发生器,互成直角的标定标靶在计算机屏幕上呈现一张平面图像,各圆点和圆环中心在计算机坐标系中的坐标也可以确定下来,记为  $(u_i,$

$v_i)$ 。标靶固定不动,打开线激光发生器,使激光平面在标靶上相交成一条光线,该条光线在 CCD 摄像机中的成像显示在计算机屏幕上为两条相交的直线。两条直线上的点分别为标靶上 XY 平面上的点,记为  $(x_{wi}, y_{wi}, 0)$ ,YZ 平面上的点,记为  $(0, y_{wi}, z_{wi})$ 。将已知点的计算机屏幕坐标和实际空间坐标代入式(1),利用最小二乘法解超定方程组,求出参数  $a_w, b_w, c_w$  和  $d_w$ ,得到世界坐标系下激光平面方程,即为所求。

### 3 作物三维结构重建

#### 3.1 激光条纹图像分割

采用帧差法对激光条纹图像进行分割,分别拍摄有激光光条与无激光光条图像,首先将两幅图像灰度化,然后做差分运算,去除背景。接着对图像进行高斯滤波去除噪声以及帧差处理后可能留下的多余亮斑;最后针对扫描时的不同光照环境设定阈值  $H$ ,将图像中灰度低于阈值的像素点全部设置零,作为激光图像的背景,而灰度值高于或等于阈值的点不作任何操作。图 3 为原图与分割出来去噪后的激光光条。

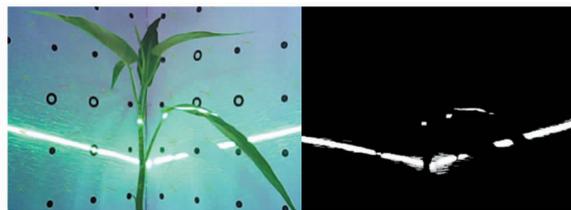


图3 激光光条提取

Fig.3 Laser line extraction

#### 3.2 激光光条中心点计算与三维点云重建

采用重心法提取激光光条中心<sup>[19-23]</sup>,其表达式为

$$I_c = \frac{\sum_{v=1}^N I_v n}{\sum_{v=1}^N I_v} \quad (2)$$

式中  $I_v$ ——像素  $v$  上的光强度

$I_c$ ——激光光条中心

遍历激光光条图像的所有列,每一列自上而下,标记第 1 个灰度不为零的点和此后第 1 个灰度为零的点,两点之间均为激光光条上的有效点。将这些有效点经过高斯滤波进一步去除噪声,计算光条能量重心,即为激光光条的中心。光条中心提取效果如图 4 所示。

经过上述处理后,提取到的激光光条中心由二维像素坐标转换至三维坐标,便可获得扫描的作物三维点云结构<sup>[24-26]</sup>,如图 5 所示。

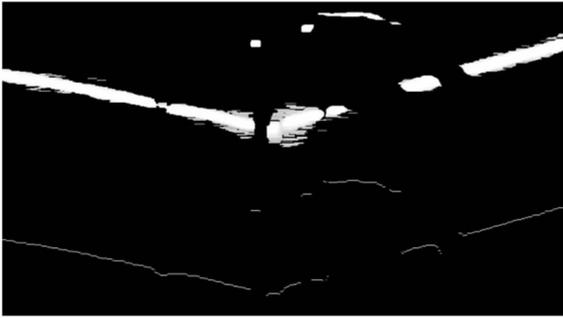


图4 激光光条中心提取结果  
Fig. 4 Laser line center extract

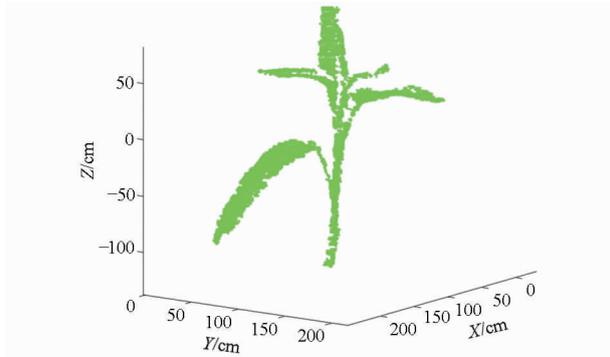


图5 作物三维点云结构图  
Fig. 5 3D point cloud

## 4 作物形态量测

### 4.1 叶片长度

提出了一种适用于作物点云特征的迭代法,提取叶片点云的轴线,利用曲线拟合计算叶片长度。具体步骤如图6所示。

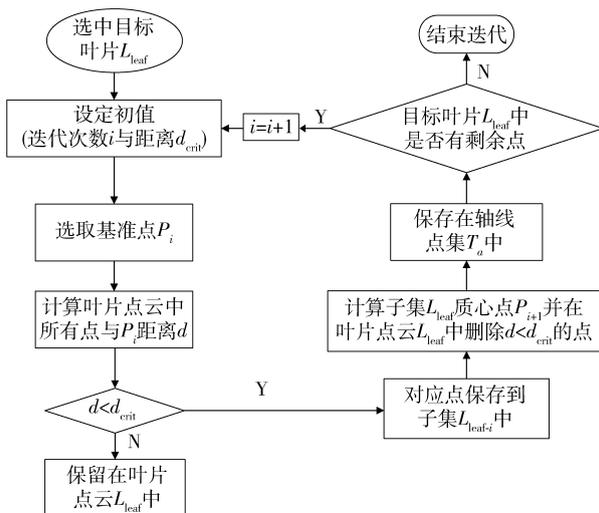


图6 叶片长度计算流程图

Fig. 6 Flow chart of leaf length calculation

首先,选中目标叶片,将该叶片从主视图中分割开,保存为叶片子集  $L_{leaf}$ 。选取一个基准点  $P_0$ ,该点由鼠标任意点击选取,通常选取在叶片点集端点。在第一步迭代中,设  $i = 1$ ,  $P_0$  为叶片轴中的第一个

点。其次,任意定义距离  $d_{crit}$ ,遍历叶片点集  $L_{leaf}$  中的点,与  $P_0$  距离小于  $d_{crit}$  的点被保留下来,记为子点集  $L_{leaf-i}$ 。然后,计算子点集  $L_{leaf-i}$  的质心位置,记为点  $P_1$ ,该点为下一次迭代基准点。距离  $d_{crit}$  的值应该大于叶片点集宽度最大值的一半,但却不可过大,因为距离  $d_{crit}$  选取的值越大,轴线点集的点数则越少,为计算轴线长度带来一定误差。

在进行第  $i + 1$  步迭代时,叶片点集  $L_{leaf}$  中第  $i$  步迭代时距离小于  $d_{crit}$  的子集中的点均被删除,第  $i + 1$  步迭代时,只从点集中剩余的点继续选择满足条件的点,计算第  $i + 1$  个质心点的位置,该质心点作为第  $i + 2$  步迭代时的基准点。以此类推,直到叶片点集  $L_{leaf}$  中所有点被删除为止。最后,所有质心点被保存在点集  $T_a$  里,该点集中点所在曲线长度为叶片长度。然而,有时轴线点提取时,叶片的端点并不在点集  $T_a$  里,即轴线所在曲线长度明显小于叶片长度,如图7所示。此时,需要分别以叶片两个端点为基准点,进行双向迭代,计算出两个轴线点集,将两个点集中的点所在曲线长度作为叶片长度。图中红色点为第一次提取的叶片轴线,蓝色点为第2次提取的中心点。该方法对于扫描点云中中间断裂现象同样适用,不影响叶片轴线点的提取结果。

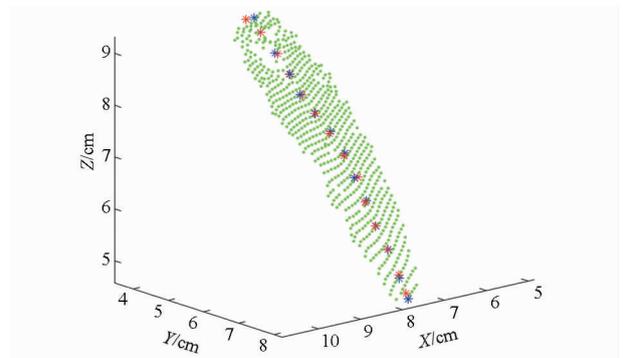


图7 叶片中心轴提取结果

Fig. 7 Leaf axis extraction

### 4.2 茎秆直径

本文提出了针对细小作物茎秆直径的计算方法。具体原理如图8所示。

图中  $l$  为标定杆,与作物到摄像机的距离分别为  $d_0$ 、 $d_1$ ,均为已知。激光光条与水平面的夹角为  $\alpha$ ,  $2\beta$  为摄像机垂直视场角。 $l$  的延长线与摄像机视场上边界相交,在摄像机中的成像为  $x_0$  过激光束与  $l$  的交点做平行线,使得该平行线与摄像机视场上边界平行,则激光光条与茎秆上端部分  $y$  被分为  $y_0$  和  $y_1$ ,根据摄像机透视原理,得

$$y_0 = \frac{x_0 d_0}{f} \quad (3)$$

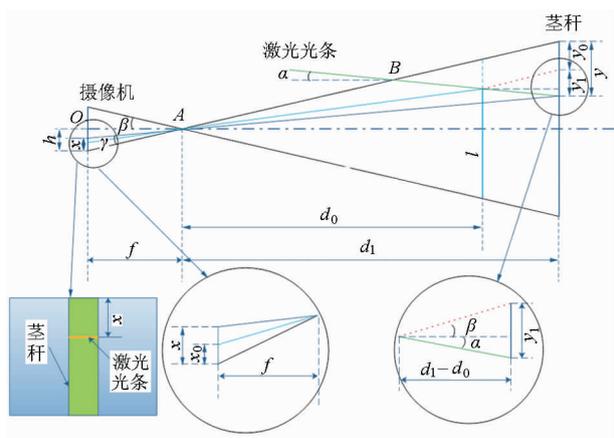


图8 茎秆测量原理图

Fig. 8 Method of stem measurement

由图7中分解小图可求 \$y\_1\$，得

$$\begin{cases} y_1 = (d_1 - d_0)(\tan\alpha + \tan\beta) \\ y_1 = \frac{xd_1}{f} \end{cases} \quad (4)$$

故被激光截取的茎秆高度 \$y = y\_1 + y\_0\$，茎秆在图像中的成像为圆柱形，光条在茎秆上距离图像顶部距离为 \$x\$，则有

$$\frac{w_p}{x} = \frac{w}{y} \quad (5)$$

其中 \$w\_p\$ 为图像中茎秆的像素宽度，\$w\$ 为茎秆的实际宽度，\$x\$ 可由式(5)求得。

### 5 结果与分析

图9为本文所搭建的激光三维信息采集模块，主要由 CCD 网络摄像机(海康威视 DS-2CD3332D-1 型)和功率为 80 mW、波长为 520 nm 绿色线激光发生器组成。CCD 摄像机拍摄图像分辨率为 \$2048 \times 1536\$、帧率为 12.5 fps。光条中心厚度约为 2 mm。线激光发生器被安装在俯仰角为 \$60^\circ\$、旋转角为

\$355^\circ\$ 云台 (PTZ W3300 型) 上。所有传感器被固定在尺寸为 \$30\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 100\text{ cm}\$ 的支撑架上。为了验证激光视觉系统对作物形态的量测准确性，于江苏省南京农业大学实验楼顶 Venlo 型三脊温室 (面积为 \$128\text{ m}^2\$) 内，对定植后生长期 (2013 年 6 月 27 日至 2013 年 7 月 20 日) 的 8 株泰国柳叶空心菜叶片和茎秆进行量测，并与人工测量结果进行比较。人工测量使用游标卡尺。



图9 作物激光测量系统实物图

Fig. 9 Laser vision system test protocol

图10分别为叶片和茎秆的激光量测与人工测量结果比较图。激光量测叶片长度和茎秆直径的准确率分别为 95.39% 和 94.55%。人工测量读数只能精确到毫米级，激光视觉量测方法可以使叶片长度和茎秆直径测量的精确度在毫米级以内，提高了量测的精确度。但是，本次试验中采用的激光光条的宽度，在一定程度上影响量测结果的误差。总体而言，基于激光视觉的作物茎叶参数量测弥补了基于二维图像信息采集在空间上的信息丢失，能够方便快捷真实地获取作物的茎叶参数。

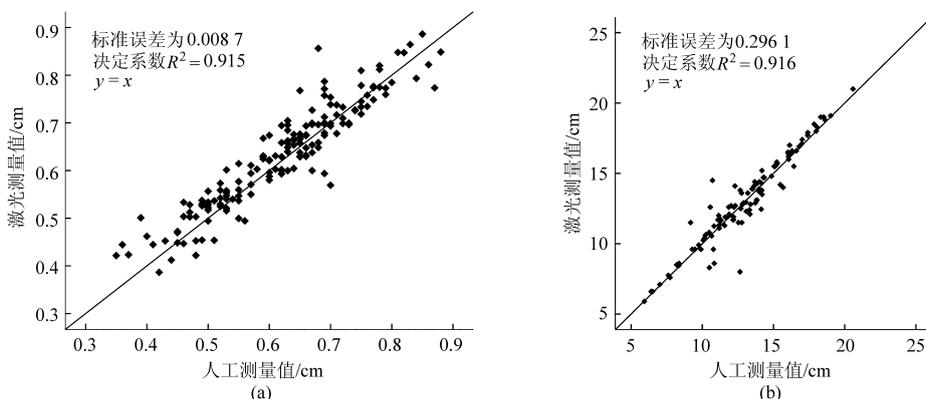


图10 激光视觉系统测量与人工测量结果比较

Fig. 10 Laser vision measurement and manual measurement

(a) 茎秆直径 (b) 叶片长度

## 6 结论

(1) 基于激光视觉技术的温室作物外部形态参数测量方法可以实时获取温室作物的叶片与茎秆参数信息。通过 CCD 摄像机实时提取扫描光条,获取作物叶片与茎秆的三维点云信息,实现作物形态三维点云信息的实时提取与重建。

(2) 采用迭代法提取叶片点云子集的中心轴线,通过曲线拟合计算叶片长度,该方法对于点云分布不均情况具有较好的鲁棒性,同时解决了简单二

维图像在叶片长度计算上的空间限制问题;提出了针对细小作物茎秆直径的计算和量测方法,避免了外界干扰给细小茎秆量测带来的影响。激光量测叶片长度和茎秆直径的准确率分别为 95.39% 和 94.55%。

(3) 本方法实现了温室作物便携式低成本三维点云信息采集,特别适用于株型矮小、分枝较少的温室作物。弥补了传统二维图像在作物茎叶表达与量测方面的不足,为温室环境控制系统提供数据支持。

## 参 考 文 献

- 1 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009,40(5):162-168.  
Ding Weimin, Wang Xiaochan, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):162-168. (in Chinese)
- 2 李永博,周伟,汪小岳,等. 基于奇异摄动理论的综合温室控制系统设计[J]. 农业机械学报,2012,43(5):184-189.  
Li Yongbo, Zhou Wei, Wang Xiaochan, et al. Greenhouse control system design based on singular perturbation theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):184-189. (in Chinese)
- 3 朱伟兴,毛罕平,李萍萍,等. 遗传优化模糊控制器在温室控制系统中的应用[J]. 农业机械学报,2002,33(3):76-78.  
Zhu Weixing, Mao Hanping, Li Pingping, et al. A fuzzy controller based on genetic optimization and its application to a distributed control system of greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3):76-78. (in Chinese)
- 4 Mario T P, Gilberto H R, Jose R M, et al. Greenhouse energy consumption prediction using neural network models [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2009, 11(1):1-6.
- 5 王定成,乔晓军,汪春秀,等. 基于作物响应的温室环境 SVMR 控制仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊2):290-293.  
Wang Dingcheng, Qiao Xiaojun, Wang Chunxiu, et al. Simulation of greenhouse environment SVMR control based on plant response [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2):290-293. (in Chinese)
- 6 Tetsuo M, Yasushi H. An intelligent control for greenhouse automation, oriented by the concepts of SPA and SFA—an application to a post-harvest process [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 29(1-2):3-20.
- 7 Alexander M S, Keith L E, Randy W, et al. Measuring canopy coverage with digital imaging [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(7-8):895-902.
- 8 Carlos C, Garcia M I, Daza C, et al. Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images [J]. Hort Science, 2010, 45(10):1459-1463.
- 9 David S, Murat K, Chieri K, et al. Lettuce calcium deficiency detection with machine vision computed plant features in controlled environments [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2):238-243.
- 10 Liu Jianguo, Elizabeth P, Stuart A. Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169:25-34.
- 11 Parsons N R, Edmondson R N, Song Y. Image analysis and statistical modelling for measurement and quality assessment of ornamental horticulture crops in glasshouses [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104:161-168.
- 12 Martin B, Jean-Luc W, Richard A F, et al. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9):1252-1266.
- 13 Dominik S, Friderike B, Dietrich H, et al. 3D-laser scanning: A non-destructive method for studying above-ground biomass and growth of juvenile trees [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(10):1305-1311.
- 14 Watanabe T, Hanan J S, Room P M, et al. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modeling [J]. Annals of Botoang, 2005, 95(7):1131-1143.
- 15 Ulrich Weiss, Peter Biber. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(5):265-273.
- 16 Van der Zande D, Hoet W, Jonckheere I, et al. Influence of measurement set-up of ground based LIDAR for derivation of tree structure [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 141(2-4):147-160.
- 17 Palleja T, Tresanchez M, Teixidó M, et al. Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11):1420-1427.
- 18 马颂德,张正友. 计算机视觉. 计算理论与算法基础 [M]. 北京:科学出版社,1998.
- 19 吕乃光,邓文怡. 大型机械零部件孔同轴度测量技术研究 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(7):694-696.

- Lü Naiguang, Deng Wenyi. The study of coaxiality measurement of holes of large scale mechanical parts [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, 12(7): 694 – 696. (in Chinese)
- 20 虞启琰, 张天虎. 利用结构光进行三维测量的新方法[J]. *应用光学*, 2000, 21(1): 42 – 45.  
Yu Qilian, Zhang Tianhu. A new method of three dimensional measurement using structured light[J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(1): 42 – 45. (in Chinese)
- 21 Remondino F. 3-D reconstruction of static human body shape from image sequence [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2004, 93(1): 65 – 85.
- 22 Fontana M, Rizzi C, Cugini U. 3D virtual apparel design for industrial applications[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(6): 609 – 622.
- 23 郭富强. 基于结构光的颅骨部位三维重建方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
Guo Fuqiang. The research of 3D reconstruction about the skull parts based on structure light[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- 24 Wilczkowiak M, Boyer E, Sturm P. Camera calibration and 3D reconstruction from single images using parallelepipeds [C] // *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001, 1: 142 – 148.
- 25 Xu Zhiqin, Tao Li, Sun Changku, et al. A rapid calibration method for the laser scanning 3D measurement system [C] // *Proceeding of ISMTI'2003*, 2003: 295 – 296, 735 – 740.
- 26 Tao Li, Sun Changku, He Li, et al. Research on the color 3D profilometry and parameter calibration technology [C] // *Proceedings of 5638: Optical Design and Testing II*, 2005: 464 – 472.

## Leaves and Stems Measurement of Plants Based on Laser Vision in Greenhouses

Zhang Yu<sup>1</sup> Wang Xiaochan<sup>1</sup> Sun Guoxiang<sup>2</sup> Li Yongbo<sup>2</sup> Sun Xin<sup>1</sup>

(1. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China*

2. *Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China*)

**Abstract:** A laser vision-based measurement system consisting of a camera and a laser sheet that scanned the plant vertically was developed to measure the stem diameters and leaf lengths automatically. The 3D point cloud was obtained with the laser sheet scanning the plant vertically, while the camera videoed the process of laser scanning. Laser line centers were extracted by improved centroid method. The 3D point cloud structure of the sample plant was obtained. For leaf length measurement, iteration method for point clouds was used to extract the axis of the leaf point cloud set. The centroid of the subset of points was calculated and taken as the next axis point. Leaf length was calculated by curve fitting on these axis points. In order to increase the accuracy of curve fitting, bi-directional starting point selection was used. To evaluate the method in a sample of 8 water spinaches, the lengths of leaves and diameters of stems were measured manually and plotted versus their automatically measured counterparts. The accuracy of leaf lengths and stem diameters are 95.39% and 94.55% respectively. The tests proved that laser vision-based method could be used on plant geometries measurement in greenhouses costly and portably.

**Key words:** Greenhouse Leaf and stem of plant Morphological parameters Laser vision 3D point clouds