

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.034

基于超声波传感技术的温室草莓冠层三维重构与测量*

祁力钧¹ 梁霞¹ 冀荣华² 王俊³ 李慧¹ 王沛¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种基于超声波传感技术的温室草莓冠层三维重构与测量方法,用 Matlab 软件的 `interp1()` 函数、`quad` 函数、`surf` 函数等进行温室草莓冠层曲线、曲面的拟合并完成面积、体积的计算。以 6 垄温室草莓冠层作为试验对象,采用该系统对其进行 3 次重复试验,与人工测量结果进行对比。分析结果表明,检测结果的可重复性较好 (R^2 为 0.927 5, RMSE 为 $0.135 8 \text{ m}^3$),与人工测量结果相一致 (R^2 为 0.941 1, RMSE 为 $0.134 5 \text{ m}^3$),该方法具有较高的稳定性及可行性。

关键词: 温室 草莓冠层 超声波传感技术 三维重构

中图分类号: TP391.41; S668.4; S625 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0193-05

3-D Reconstruction and Measurement of Greenhouse Strawberry Canopy Based on Ultrasonic Sensors

Qi Lijun¹ Liang Xia¹ Ji Ronghua² Wang Jun³ Li Hui¹ Wang Pei¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A crop canopy 3-D reconstruction and volume measurement method that based on the ultrasonic sensing technology was proposed. The functions of `interp1()`, `quad` and `surf` in Matlab were introduced for crop canopy description and the volume calculation. Indoor measurements were conducted on six ridges of greenhouse strawberry by 3 times repeats and the results were compared with manual measurement. The result showed the experiments presented good repeatability (R^2 was 0.927 5, RMSE was $0.135 8 \text{ m}^3$), which showed consistent with the manual measurement (R^2 is 0.941 1, RMSE was $0.134 5 \text{ m}^3$). Therefore, the proposed measuring system was stabilized and feasible.

Key words: Greenhouse Strawberry canopy Ultrasonic sensor technology 3-D reconstruction

引言

草莓冠层三维重构和测量在温室自动化施药、肥料精准施用和果产预估等温室草莓精细管理中具有重要的研究意义^[1],但由于温室草莓冠层形状的不规则性和复杂性,常规方法无法有效地进行植株的冠层测量。

目前,超声波传感器作为一种常用的测距装置,主要集中在应用在室外大型树木测量方面^[2-7]。超声

波传感技术在温室作物冠层的三维重构与测量中的应用还鲜见报道。

为了解决常规方法无法有效进行温室作物冠层测量的问题,本文以温室草莓冠层为研究对象,提出一种温室作物冠层三维重构与测量的新方法。采用超声波传感器测量距离,获得草莓冠层轮廓点三维坐标数据,并重构草莓冠层三维轮廓以及进行测量计算。

收稿日期: 2012-09-24 修回日期: 2012-10-08

* 农业部公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203025)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(2012YJ262)

作者简介: 祁力钧,教授,主要从事现代农业装备与计算机测控研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验方法

利用多个超声波传感器同时测量其与作物冠层间的最短距离,得到垂直于 y 轴的不规则截面边界点信息,所得数据通过 Matlab 软件 `interp1()` 函数一维插值进行拟合,便可得到冠层不规则边界的拟合曲线、4 次多项式拟合表达式及截面面积。随着超声波传感器组在行走机构上沿 y 轴移动的测量,得出冠层各截面的轮廓拟合曲线及面积,再利用 Matlab 软件 `surf` 函数中的三次样条二维插值法进行插值,生成温室草莓冠层曲面函数,得出温室草莓冠层三维重构与体积值,原理示意图如图 1 所示。设定沿垄宽的方向为 x 轴、沿垄长的方向为 y 轴,垂直地面的方向为 z 轴,起始测量截面左下端边界点为坐标原点 O ,图中传感器高度为 H_1 ,垄高为 H_2 ,相邻传感器间距为 D_1 ,传感器与作物轮廓最短距离为 D_2 。

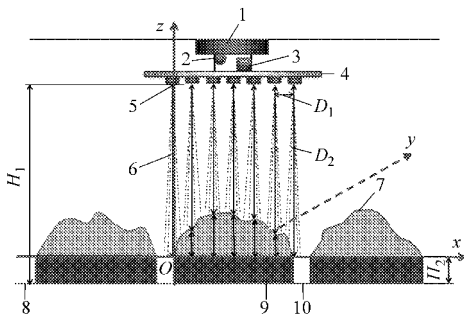


图 1 温室草莓冠层测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of strawberry canopy measurement system

1. 导轨 2. 行走机构 3. 电控箱 4. 桅杆 5. 超声波传感器组
6. 超声波 7. 温室草莓植株 8. 地面 9. 垄 10. 垄沟

1.2 试验平台

试验平台包括行走机构、测量机构和控制机构。行走机构主要由导轨和步进电动机等组成,速度在 $0 \sim 21 \text{ m/min}$ 内可调,行走方向可设定为前进、后退和自动返回 3 种模式。由电控箱中的电动机控制模块和 MCU 主控板通过步进电动机进行控制,主要搭载测量机构进行可移动连续测量。测量机构由多个超声波传感器、微处理器和用于输出超声波传感器读数的 2 个串行通信端口组成。超声波传感器组在行走机构行驶过程中完成温室草莓冠层轮廓点三维坐标数据采集,数据以 FAT16 格式记录在 SD 卡上,系统采样速率为 $1 \sim 10 \text{ Hz}$,实测数据存储速率 $100 \sim 200 \text{ kb/s}$,满足实时记录要求。在 PC 机上采用 Matlab 软件编写程序计算温室草莓轮廓数据,重构草莓冠层三维轮廓图像,拟合轮廓曲线并给出曲线的 4 次多项式拟合表达式,最后得出面积和体积计

算值。控制机构包括单片机、PC 和 LCD 显示器,其中单片机选用 STC12C5A60S2,它集成了 8 路数模转换器,支持串行通信。单片机对传感器采集到的数据进行分析处理,并将处理后的数据通过 MAX232 电路传输给 PC 机作后续的数据处理,最后 LCD 显示器实现结果输出,测量装置如图 2 所示。



图 2 温室草莓冠层测量装置图

Fig. 2 Measurement apparatus of strawberry canopy

2 试验结果与分析

试验在北京市昌平区草莓种植基地随机选取的日光温室中进行。草莓温室长 80 m ,宽 8 m ,顶高 3.2 m ,占地 640 m^2 ,试验地为沙质壤土,pH 值 6.5,土质优良,肥力中等,灌溉时用地下水。采用高垄栽培,垄宽 76 cm ,垄高 18 cm ,垄沟宽 30 cm ,南北走向,覆盖地膜,每垄种植 2 行,行距 45 cm ,株距 12 cm ,每 640 m^2 定植 10 000 株左右。

供试品种为“全明星”,该品种早熟、高产、抗病性强且品质好。测量试验在 5 月进行,草莓处于加速生长期,根系生长缓慢,部分根枯死,同时开始抽生少量匍匐茎。此时,应加强管理,进行除草和防治病虫害。日光温室中,无风,温度 $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 25% ,大气压力 101.3 kPa 。

2.1 传感器数目设定

选用深圳市欧赛龙科技有限公司生产的 80E60TR-1 型超声波测距模块,其为收发一体机,检测范围 $0.25 \sim 6 \text{ m}$,方向角 $7^\circ \pm 2^\circ$ (全角)。试验中传感器与被测冠层间最大距离小于 1.5 m ,为减少相邻超声波传感器信号间产生的干扰,两超声波传感器间的最小距离不得小于 0.15 m ;而传感器数目较少又会导致拟合不准确,故将传感器数目分别设定为 3、4、5、6、7。选择 1 垄长势较好的温室草莓冠层,选用其 25 m 长的区域作为试验的测量对象,行走机构速度设定为 1 m/s ,超声波传感器设定为每 2.0 s 进行一次测量,将测量的 10 个截面按顺序分别标号为 S1 ~ S10,对应同一传感器数目分别测量 3 次求平均值,截面面积参考值采用人工手动测量,将截面近似成若干小矩形求和,试验结果如图 3 所示。

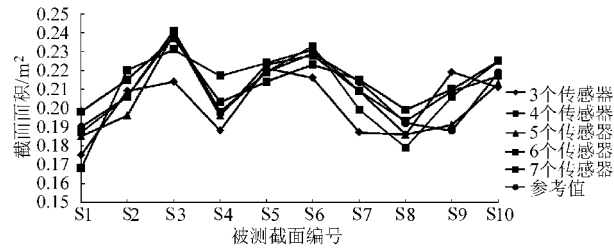


图3 截面面积与传感器数目关系曲线

Fig. 3 Relationship between sectional area and number of ultrasonic sensor

在选定的传感器数目范围内,当传感器数目为5个时,测量所得截面面积与参考值最为接近;同时,通过计算不同传感器数目测量值与参考值的平均相对误差进行定量分析,得出应用3、4、5、6、7个传感器进行测量产生的平均相对误差分别为5.90%、3.08%、2.00%、3.59%、5.00%,即在相同的测量环境

下,选用5个传感器进行测量可达到最优测量效果。

2.2 一维插值法选择

插值是在已知数据之间寻找估计值的过程,常用插值方法有线性插值、三次样条插值及三次多项式插值等。不同方法在执行速度、占用内存大小和获得数据的平滑度方面各有优劣,本试验选取传感器数目为5的轮廓点坐标数据,分别采用线性插值、三次样条插值及三次多项式插值3种方法,根据Matlab软件的interp1()函数建立轮廓点坐标数学模型,生成10组拟合曲线图形及函数表达式,再利用Matlab软件的quad函数进行曲线定积分计算,由拟合曲线函数表达式算出温室草莓冠层截面面积。随机选取S7截面数据结果进行插值方法的比较,S7截面面积参考值为1540.96 cm³,结果如表1所示。

表1 S7截面3种插值方法比较

Tab. 1 Comparison of three interpolation methods with S7 data

对比项	插值方法		
	线性插值	三次样条插值	三次多项式插值
拟合曲线图			
轮廓曲线4次多项式拟合表达式	$y = p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6$ <p>式中</p> $p_1 = 3.4071$ $p_2 = -9.414 \times 10^{-5}$ $p_3 = 0.0091925$ $p_4 = -0.40223$ $p_5 = 7.9098$ $p_6 = -33.551$	$y = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5$ <p>式中</p> $p_1 = -3.2134 \times 10^{-5}$ $p_2 = 0.0051617$ $p_3 = -0.28269$ $p_4 = 6.1143$ $p_5 = -20.069$	$y = p_1x^4 + p_2x^3 + p_3x^2 + p_4x + p_5$ <p>式中</p> $p_1 = -2.2377 \times 10^{-5}$ $p_2 = 0.0035944$ $p_3 = -0.20045$ $p_4 = 4.5423$ $p_5 = -12.2$
曲线积分估算面积/m ²	1301.48	1510.95	1490.89
最大残差模	10.754	5.906	13.014
测量误差/%	15.54	2.01	3.25

由表1可知,三次样条插值法可以产生最光滑的拟合曲线结果,其次为三次多项式插值法,线性插值法最差。三次样条插值法的轮廓曲线4次多项式拟合的最大残差模最小仅为5.906,与参考值对比,截面面积估算的误差也最小,为2.01%。总之,三次样条插值法的计算精度最高,故选用其作为软件中插值的固定算法进行编程,通过Keil编译器编译生成二进制文件,通过串口将程序固化到STC1205A60S2的EEPROM中。在今后的测量运行中,可由超声波传感器测得的数据直接得到温室草

莓冠层轮廓拟合曲线及截面面积。

2.3 温室草莓冠层三维重构

由离散的轮廓数据重构曲面的计算方法有很多,如各种插值算法和拟合算法^[8-10],用Matlab软件surf函数进行温室草莓冠层曲面拟合,该方法属于函数插值拟合,计算量相对较少。由于用surf函数绘制三维曲面图时,要求数据(x,y)是均匀分布的网格点坐标,但实际采样点数据是凌乱分布的,故采用meshgrid函数插值网格点(x_i,y_i),并在这些点的基础上采用griddata函数计算均匀分布网格点的

z_i 坐标,再用 surf 函数进行拟合,具体方法如下^[11]:

$$t_i = \min(\mathbf{x}) : 0.5 : \max(\mathbf{x});$$

$$t_j = \min(\mathbf{y}) : 0.5 : \max(\mathbf{y});$$

$$[x_i, y_i] = \text{meshgrid}(t_i, t_j);$$

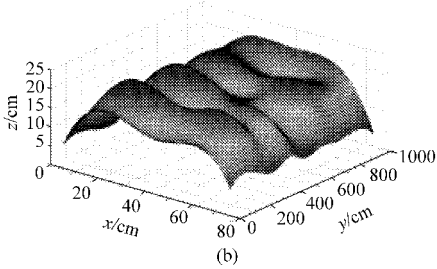
$$z_i = \text{interp2}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, x_i, y_i, \text{'spline'});$$

$$\text{surf}(x_i, y_i, z_i);$$

其中, \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 、 \mathbf{z} 为轮廓数据三维坐标构成的向量; t_i 、 t_j 为轮廓数据在 x 轴和 y 轴上的等分点,温室草莓冠层轮廓数据重构的图形如图 4 所示。



(a)



(b)

图 4 温室草莓冠层三维重构图形

Fig. 4 3-D construction of greenhouse strawberry canopy

(a) 原始图 (b) 模拟图

2.4 温室草莓冠层体积计算

采用超声波传感器测量温室草莓冠层时,体积可以描述为温室草莓冠层外围轮廓与垄平面所包含的冠层体积。温室草莓冠层外围轮廓由温室草莓冠层三维重构获得,为规定坐标系下的三维冠层坐标。由于同一垄表面波度变化不大,故同一垄温室草莓测量数据对应的垄面轨迹点可看作在同一个平面上,设温室草莓在坐标系 xy 平面上的投影区域为 S ,则温室草莓体积可由曲面方程的积分求得。选用 6 垄长势较好的温室草莓冠层作为试验测量对象,依次编号为 P1 ~ P6,3 次超声波检测结果以 U1、U2、U3 表示,人工手动测量 3 次,取平均值,测量值及求得的平均值均保留到小数点后第 2 位,结果如图 5、6 所示。

由对 6 垄温室草莓冠层体积的 3 次超声波测量结果进行相关分析,3 次测量结果决定系数 R^2 最小为 0.927 5,相应均方根误差 RMSE 为 $0.135 8 \text{ m}^3$,见图 5。显著性 t 检验显示 3 次超声波测量结果差异不显著,可见采用本文超声波测量系统测量温室草

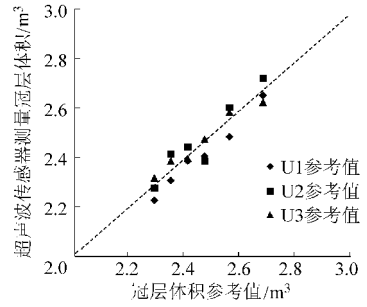


图 5 3 次超声波检测结果线性回归

Fig. 5 Linear regression of three ultrasonic measurement results

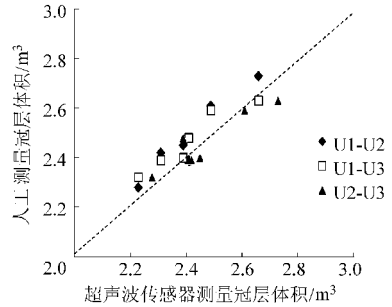


图 6 6 垄草莓冠层体积人工测量与超声波测量结果

Fig. 6 Ultrasonic and manual measurement results for six ridges of greenhouse strawberry canopy

莓冠层体积具有较高的可重复性。

对温室草莓冠层体积超声波测量结果和人工测量结果进行相关分析,见图 6,结果显示温室草莓冠层体积超声波测量结果与人工测量结果有着较强的相关关系, R^2 为 0.941 1,相应均方根误差 RMSE 为 $0.134 5 \text{ m}^3$ 。显著性 t 检验显示人工测量结果与超声波测量结果差异不显著,可见采用本文超声波测量系统测量温室草莓冠层体积具有较高的准确性。

3 结论

(1) 针对温室草莓,提出了一种新的基于超声波传感技术的温室草莓冠层三维重构与测量法,该方法解决了常规方法无法有效进行冠层测量的问题。

(2) 根据实际的测量与试验,得出最佳的条件设置,即采用 5 个传感器进行测量可达到最优测量效果,平均相对误差仅为 2.00%;采用三次样条插值法可以产生最光滑的拟合曲线结果,其轮廓曲线 4 次多项式拟合的最大残差模最小,仅为 5.906,截面面积估算的误差也最小,为 2.01%,选用其作为软件中插值的固定算法进行编程并应用到实际测量中。

(3) 整个测量系统运用数学函数和计算机程序进行数据处理,完成了基于超声波传感技术的温室草莓冠层三维重构与测量计算,较好地达到了预期

目的。

(4)对整个测量系统的性能进行验证试验,结果表明该方法具有较好的重复性(R^2 为0.927 5, RMSE为0.135 8 m^3),与人工测量结果相一致

(R^2 为0.941 1, RMSE为0.134 5 m^3),能够用于温室草莓冠层三维重构和体积测量。此方法可进一步推广应用到其他温室作物上,实现基于温室作物冠层三维重构与测量的精细管理。

参 考 文 献

- 1 Balsari P, Doruchowski G, Marucco P, et al. A system for adjusting the spray application to the target characteristics[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2008, 10.
- 2 Zaman Q U, Schumann A W, Hostler H K. Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchards[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2007, 23(4): 449 ~ 453.
- 3 Schumann A W, Zaman Q U. Software development for real-time mapping of ultrasonic tree canopy size[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 47(1): 25 ~ 40.
- 4 Tumbo S D, Salyani M, Whitney J D, et al. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002, 18(3): 367 ~ 372.
- 5 孟志军, 付卫强, 刘卉, 等. 面向土地精细平整的车载三维地形测量系统设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊2): 255 ~ 258.
Meng Zhijun, Fu Weiqiang, Liu Hui, et al. Design and implementation of 3D topographic surveying system in vehicle for field precision leveling[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Supp. 2): 255 ~ 259. (in Chinese)
- 6 郎晓哲, 刘刚, 谢幸福, 等. 机载式农田三维地形测量系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 69 ~ 72.
Lang Xiaozhe, Liu Gang, Xie Xingfu, et al. Tractor-mounted field 3-D topography surveying system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp): 69 ~ 72. (in Chinese)
- 7 俞龙, 洪添胜, 赵祚喜, 等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 204 ~ 208.
Yu Long, Hong Tiansheng, Zhao Zuoxi, et al. 3D-reconstruction and volume measurement of fruit tree canopy based on ultrasonic sensors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 204 ~ 208. (in Chinese)
- 8 王万章, 洪添胜, 陆永超, 等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 158 ~ 161.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Lu Yongchao, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8): 158 ~ 161. (in Chinese)
- 9 胡鑫, 刁俊通, 金焯. 反向工程中散乱点云数据得自动分割与曲面重构[J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(1): 62 ~ 65.
Hu Xin, Xi Juntong, Jin Ye. Segmentation and surface reconstruction of scattered data in reverse engineering[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(1): 62 ~ 65. (in Chinese)
- 10 周会成, 陈吉红, 黄声华, 等. 用三维点云计算活塞腔的体积[J]. *现代测量与实验室管理*, 2003(2): 16 ~ 18.
Zhou Huicheng, Chen Jihong, Huang Shenghua, et al. Measuring piston cavity volume using 3-D scattered data[J]. *Advanced Measurement and Laboratory Management*, 2003(2): 16 ~ 18. (in Chinese)
- 11 张伟, 胡国清, 吴碧金. 关于点云数据分层的探索[J]. *矿山机械*, 2008, 36(18): 26 ~ 29.
Zhang Wei, Hu Guoqing, Wu Bijin. Research on cloud data delamination[J]. *Mining and Processing Equipment*, 2008, 36(18): 26 ~ 29. (in Chinese)