

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.046

基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法

刘理民¹ 王金字² 毛文华³ 石光智² 张晓辉¹ 姜红花²

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对果园上、中、下冠层不同稀疏度, 提出一种多传感器阵列的果树冠层信息融合方法(简称传感器融合阵列), 并进行了相关试验及验证。首先设计了果园冠层宽度信息的无线采集系统, 并对比分析了6种非接触式测距传感器的动态识别能力; 其次采用筛选出的激光传感器及超声波传感器阵列, 收集3种果园上、中、下果树冠层信息; 最后选出适合3种果园的传感器融合阵列, 依据 Box - Benhnken 中心组合试验法设计试验, 对采用同种传感器阵列与传感器融合阵列测距方案进行响应面试验, 并对得出的试验结果进行统计分析。试验结果表明: 影响果树整体测量精度显著性水平从大到小依次为测距方案、车体速度、果园类型。车速为 0.3 ~ 0.5 m/s 时, 与人工测量相比, 采用超声波传感器阵列收集果园冠层信息, 相对误差为 14.70% ~ 20.04%; 采用激光传感器阵列时, 相对误差为 9.13% ~ 16.02%, 采用传感器融合阵列时, 相对误差为 4.2% ~ 10.24%。采用传感器融合阵列比单种传感器阵列精度高, 更适合果园变量喷雾作业。

关键词: 果树冠层; 信息融合; 传感器融合阵列; 响应面试验

中图分类号: S499 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0347-07

Canopy Information Acquisition Method of Fruit Trees Based on Fused Sensor Array

LIU Limin¹ WANG Jinyu² MAO Wenhua³ SHI Guangzhi² ZHANG Xiaohui¹ JIANG Honghua²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

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

Abstract: In order to distinguish different sparse degrees of top, middle and bottom canopy in orchard, canopy information acquisition method of fruit trees was proposed based on fused sensor array. First of all, the wireless acquired system was designed, which was used to collect canopy width information in orchard. And in order to verify sensor ability to recognize objects in motion, the dynamic recognition capability of six non-contact distance sensors was compared and analyzed. Secondly, laser sensors and ultrasonic sensors array which were filtrated to collect canopy information was used, which incorporated sparse degree and width of top, middle and bottom canopy in three kinds of orchard. Finally, fused sensor array that was suitable for three kinds of orchard was selected. According to Box - Benhnken center combination test method, the orthogonal experiment was designed, including three factors and three levels. And appropriate ranging scheme was selected by response surface experiments and the results of testing were statistically analyzed. The significance level of the overall measurement accuracy of fruit trees from large to small was ranging scheme, car-body speed and orchard type in turn. When vehicle speed was 0.3 ~ 0.5 m/s, using ultrasonic sensor array to collect canopy information of orchard, the relative error was 14.70% ~ 20.04%. When laser sensor array was used to collect canopy information of orchard, its relative error was 9.13% ~ 16.02%. And when fused sensor array was used for three orchards, its relative error was 4.2% ~ 10.24%. Therefore, the fused sensor array scheme was more accurate than the single sensor array, and it was more suitable for the orchard variable spray operation.

Key words: fruit tree canopy; information fusion; fused sensor array; response surface experiment

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2015GNC112004)、山东省农业重大应用提升项目、山东省自然科学基金项目(ZR2018MC017)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700500)

作者简介: 刘理民(1994—), 男, 硕士生, 主要从事智能果园变量喷雾研究, E-mail: liulimsy2882@163.com

通信作者: 姜红花(1971—), 女, 副教授, 主要从事物联网与自动控制研究, E-mail: j_honghua@sda.u.edu.cn

0 引言

近年来随着果园变量喷雾技术的发展,出现一些新的喷药模式,对现代果园绿色可持续发展具有重要意义^[1-5]。收集果树冠层体积信息是制定变量喷雾决策的数据基础。微波雷达法、高清 X 射线扫描法、光学传感法、超声波传感法、立体视觉法和 LIDAR 等非接触式的测量方法被应用到果树冠层测量中^[6-9],其中非接触式测距传感器简单易用,得到了广泛的应用^[10-11]。

国内外相关学者对利用非接触式测距传感器测量计算冠层体积进行变量喷雾的方法,进行了相关研究^[12-18]。这些研究虽都进行了果树冠层信息提取,但由于均采用单种传感器测量,无法获取高精度的果树冠层信息。

为了获取高精度的果树冠层信息,本文分析、研究并筛选精度高、且能动态识别靶标的非接触式测距传感器。针对 3 种果园果树的上、中、下不同分区冠层,采用不同传感器阵列探测果树冠层信息,并进行信息融合(简称传感器融合阵列),以提高冠层宽度信息采集的准确度。

1 信息采集系统设计

信息采集系统的流程如图 1 所示,具体为:首先检查上位机与下位机 ARM 嵌入式微控制器的通信状态,若通信状态不良,查看 WiFi 的连接情况及上下位机的通信协议;若通信状态良好,将微控制器收集并处理过的传感器数据,通过 WiFi 传至上位机并存储,其中测距传感器实时扫描检测其与树木冠层间的距离,速度传感器实时发送机体速度,屏蔽除测距传感器及速度传感器(视具体情况判断)之外的数据。WiFi 选择 USR-WIFI232-602 V2 串口转 WiFi 服务器,具备 TCP/IP 网络接口及 RS-232 串口,具有 WiFi 数据的双向透明传输功能,最大传输距离为 300 m,采用串口异步通信,9 600 b/s,数据位 8,停止位 1,无校验位;ARM 嵌入式微控制用 LQFP 封装,工作温度范围 -40~85℃;上位机客户端在 Android studio 平台开发设计,通过 Socket 实现无差错接收下位机信息。

2 非接触式测距传感器选择与计算

实现果园变量喷雾,需实时检测果树冠层体积信息,即冠层高度、长度及宽度。其中冠层高度为非接触式测距传感器在变量喷雾机上的竖直安装间距 h_0 ;本文选用欧姆龙 E6B2-CWZ10 型旋转编码器实时检测机体行进速度,其分辨率为 1 000P/R,DC

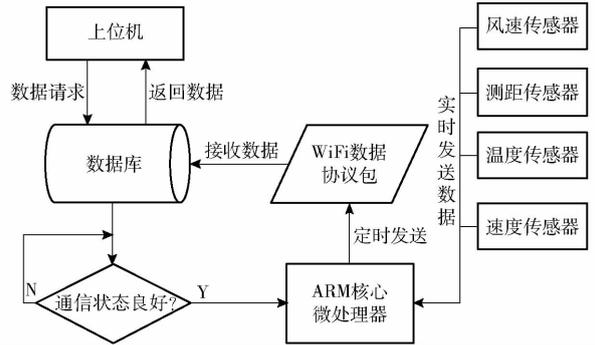


图 1 非接触式测距传感器系统采集数据流程图

Fig. 1 Flow chart of data acquisition with non-contact distance sensor system

5~24 V 供电(集电极开路输出型),冠层长度为机体行进速度与采集时间的乘积;冠层宽度由非接触式测距传感器采集,由微处理器计算得到;通过对 3 类非接触式测距传感器进行相关试验,优选出最适合的传感器。

2.1 非接触式测距传感器选择

非接触式传感技术相比其他的冠层体积探测技术,具有控制简单、电路易实现、成本低等优点,且可组合多种非接触式传感器阵列,能实现果树冠层外貌的检测^[19]。超声波传感器、红外传感器及激光传感器是进行变量喷雾探测果树冠层的 3 类常用的非接触式测距传感器。三者都具有相对应的功能特点及应用的局限性,本文通过对比试验验证,优选适用的探测传感器,提高靶标检测的精准性,为变量喷雾决策提供数据支撑。

2.2 非接触式测距传感器试验

综合考虑传感器的性能、使用量和精度等方面,本文选择了 6 种具有代表性的非接触式测距传感器进行了相关试验验证,针对不同类型果园果树的上下冠层选择合适的非接触式测距传感器。6 种非接触式测距传感器为:GQ6M-A2-X7 型红外测距传感器、NU40F30TR-1MD 型超声波传感器、NU112F30TR-1MD 型超声波传感器、GLS-B80 型激光传感器、Leica DISOTM 系列的 D510 型激光测距传感器和 SICK-DX35 型激光测距传感器。

2.2.1 动态识别测试试验

非接触式测距传感器动态识别能力是实现果园变量喷雾的基础。试验时,选择直径为 (20 ± 2) mm 及 (30 ± 3) mm 的竹竿各 5 根,竹竿距离非接触式测距传感器的垂直水平距离为 50 cm,每次试验竹竿相距 L 为 20、30、40、50 cm,如图 2 所示,以 0.3 m/s 的速度移动果园变量喷雾试验台,检测并记录 6 种非接触式测距传感器的返回值,整理每次测得的竹竿数量并记录,试验重复 3 次,取 3 次试验的平均值记录在表 1 中。



(a) 测距传感器返回值的测量 (b) 50 cm水平距离时的测量

图2 非接触式测距传感器动态识别测试试验

Fig.2 Dynamic identification test using non-contact range sensor

表1 车速 0.3 m/s 时 6 种非接触式测距传感器测到的竹竿根数

Tab.1 Number of bamboo root measured by six non-contact distance sensors at speed of 0.3 m/s

传感器名称	(20 ± 2) mm 竹竿				(30 ± 3) mm 竹竿			
	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
GQ6M - A2 - X7 型	5	5	5	5	5	5	5	5
NU40F30TR - 1MD 型	3	4	5	5	3	3	5	5
NU112F30TR - 1MD 型	4	5	5	5	3	4	5	5
SICK - DX35 型	5	5	5	5	5	5	5	5
GLS - B80 型	0	0	0	0	0	1	0	0
Leica DISOTM 系列 D510 型	0	0	0	0	1	1	2	0

声波传感器测得的竹竿数目与竹竿间的间距有关,随着竹竿相互间距的增加,测得竹竿数目准确性提高。

2.2.2 非接触式测距传感器精度的主要影响因素

非接触式测距传感器的作业精度受果园复杂作业环境的影响,需进行 SICK - DX35 型激光传感器、NU40F30TR - 1MD 型超声波传感器和 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器探测精准性影响因子的测定。

(1) 不同束波角对超声波传感器的影响

NU40F30TR - 1MD 型超声波传感器束波角为 30°, NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器束波角为 15°,为验证束波角对超声波传感器静态测试精度的影响,如图 2a 所示将竹竿放置在距离超声波传感器 25、35、...、185、195 cm 处,回收返回的测量值,试验重复 3 次取平均值,将实测值与实际值的相对误差绘制成图 3。当探测值与实际距离之间的相对误差小于 15% 时认为能够准确探测。由图 3 知, NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器符合相对误差小于 15% 的要求,可用于果园变量喷雾信息的采集。

(2) 光照对 SICK - DX35 型激光传感器的影响

果园作业过程中自然光等对 SICK - DX35 型激光传感器测量精度产生影响,需进行试验验证。于 2017 年 8 月 10 号,天气晴,最高气温 33℃,最低气温 26℃,在山东省泰安市果树研究所天平湖试验示范基地进行了相关试验验证,测试现场如图 4 所示。

由表 1 可知:果园变量喷雾试验台行驶速度为 0.3 m/s 时, GLS - B80 型激光传感器、Leica DISOTM 系列 D510 型激光测距传感器无法回收正确的竹竿数目,不能用于果园实地喷雾作业的信息收集工作;GQ6M - A2 - X7 型红外测距传感器、SICK - DX35 型激光传感器和超声波传感器都可传回正确的竹竿数目,但 GQ6M - A2 - X7 型红外测距传感器无法测量靶标与传感器间距离;而 NU40F30TR - 1MD 型及 NU112F30TR - 1MD 型超

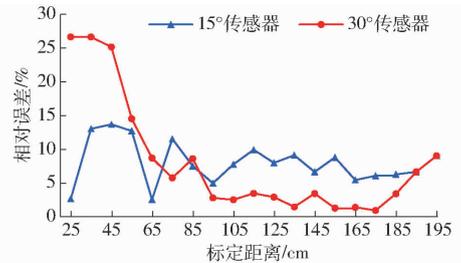


图3 不同束波角超声波传感器相对误差

Fig.3 Relative error of ultrasonic sensors with different beam angles



(a) 光度计测试图

(b) 硬件连接图

图4 光照对激光传感器影响测试现场图

Fig.4 Field diagrams of influence of light on laser sensor

试验方法:通过测试 2 种传感器在背光(光强 93 100 lx)、逆光(光强 786 000 lx)和室内(光强 37 400 lx)不同光照强度下对不同距离、不同位置进行探测,确定其稳定性和精准性,试验重复进行 3 次,每次测量回收 50 个数据取平均值,再取 3 次的平均值,绘制成图 5。该过程通过无线串口服务器接收数据。

由图 5 知,不同光强下,光照对 SICK - DX35 型激光传感器的影响较小,符合果园实时作业的要求。

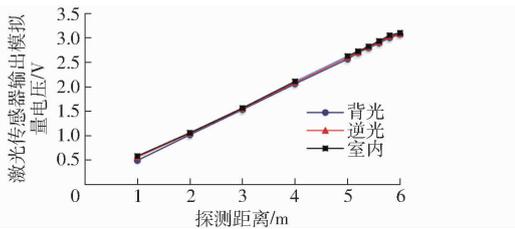


图5 光照对 SICK - DX35 型激光传感器的影响

Fig. 5 Influence of light on SICK - DX35 laser sensor



图6 不同类型果园实地照片

Fig. 6 Photos of different types of orchards

3 传感器融合阵列试验

3.1 传感器阵列信息采集方案设计与试验

于2017年7月31日,气温 $25 \sim 31^{\circ}\text{C}$,在山东省泰安市果树研究所天平湖试验示范基地,选择如图6所示有代表性的连续型密集果园、纺锤型稀疏果园和单株型稀疏果园3种果园进行试验,标定好1000 cm区间,用竹竿将黄色玻璃绳拉直,玻璃绳与树干平行,距离地面160 cm,竹竿距离树干中心位置160 cm;该果园果树种植行间距400 cm,株距100 cm;通过步进电动机控制 SICK - DX35 型激光传感器及 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器的行进速度为0.4 m/s,收集冠层宽度信息。其中测距传感器信号线与微处理器相连,微处理器通过无线模块,将传感器信号传输给手机显示并存储。2种传感器在3种果园上、中、下层测得的模拟电压,绘制成图7所示的数据散点图。

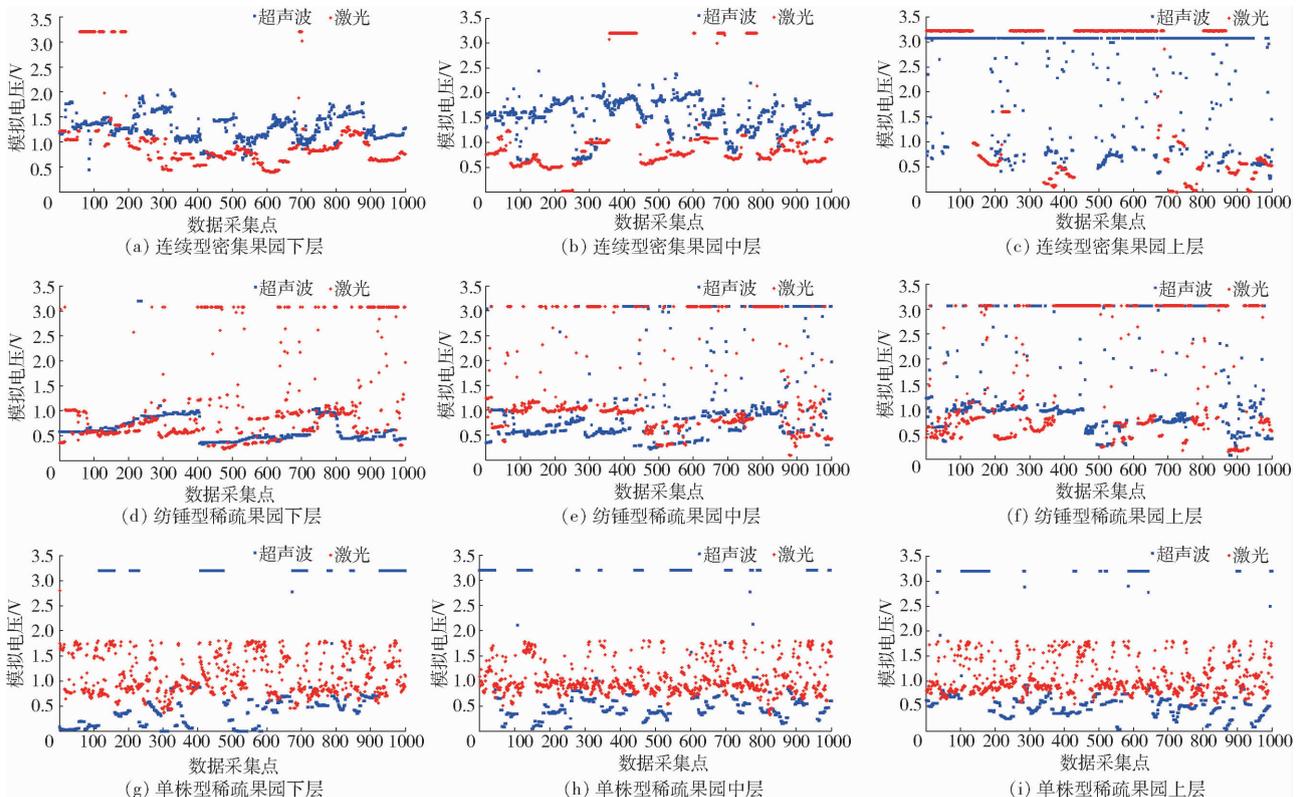


图7 3种果园上、中、下冠层信息点云图

Fig. 7 Cloud maps of information points in top, middle and bottom canopy of three orchards

当 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器电压大于 2.75 V 时, SICK - DX35 型激光传感器电压大于 1.49 V 时,探测位置经计算应为空隙。图6a所示的连续性密集果园的下层实际没有空隙,中层空隙小,而由 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器探测值计算,无空隙;图6b所示纺锤型稀疏果园上、中层皆有较大空隙,下层有较小的空隙,由图7d、7e、7f知,激光传感器可较好地表示出空隙;单株型稀疏果园上、中、下层较为连续且枝叶稀疏,由图7g、7h、7i知,激光探测数据散乱,而超声波能较好地表示空隙。

NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器发出较大截面的球形波,将返回发射截面接触到的最近冠层并返回,无法穿过面积较小的空隙;而 SICK - DX35 型激光传感器发出直径大约为 10 mm 的激光束,激光束直径小,可以穿过较小的冠层空隙,返回较大的电压,甚至发射至较远的位置,造成部分数据无法回收, SICK - DX35 型激光传感器只能按默认最大电压输出。将测得的冠层宽度与实际冠层宽度进行比

较,得到的相对误差如表 2 所示。

表 2 上中下果树冠层相对误差

Tab. 2 Relative error of crown layer of upper, middle and lower fruit trees %

冠层	连续型		纺锤型		单株型	
	激光	超声波	激光	超声波	激光	超声波
上层	16.4	14.7	11.4	26.1	21.8	11.6
中层	12.6	11.5	13.3	21.7	19.9	10.5
下层	10.4	16.9	19.5	17.0	11.3	14.8

由表 2 及上述知,连续型密集果园的最佳探测传感器融合阵列为:上、中层选择 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器,下层选择 SICK - DX35 型激光传感器;因纺锤型果园下层空隙小,应选择 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器,而中、上层空隙较大,应选择 SICK - DX35 型激光传感器;单株型稀疏果园中 SICK - DX35 型激光传感器能较好地反应冠层信息,而 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器能较好地反应冠层空隙,其下层应选择 SICK - DX35 型激光传感器,中、上层应选择 NU112F30TR - 1MD 型超声波传感器。

3.2 响应面试验与分析

为研究测距方案(因素 X_1)、果园类型(因素 X_2)及车体速度(因素 X_3)三因素对冠层测试精度的影响,根据 Box - Benhnken 试验原理使用 Design-Expert 试验设计三因素三水平的响应面试验^[20-21]。总共 17 个试验点,其中包括 12 个分析因子,5 个零点估计值,具体试验设计如表 3 所示。其中测距方案中 -1、0、1 分别对应激光测距、超声波测距及传感器融合阵列测距;果园类型中 -1、0、1 分别对应连续型密集果园、纺锤型稀疏果园及单株型稀疏果园;车体速度 -1、0、1 分别对应车体速度为 0.3、0.4、0.5 m/s;响应值为传感器测得值与人工测量值的相对误差。

根据表 3 中的数据样本,利用 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行多元回归分析,寻求最佳冠层测量相对误差的回归方程为

$$Y = 20.08 - 2.69X_1 - 0.062X_2 + 1.53X_3 - 1.45X_1X_2 - 0.32X_1X_3 + 0.075X_2X_3 - 6.64X_1^2 + 2.09X_2^2 - 1.76X_3^2 \quad (1)$$

由表 4 可知,影响因素显著水平由大到小依次为 X_1 、 X_3 、 X_2 。响应面模型中的冠层测量相对误差模型的 P 小于 0.01,表明该回归模型高度显著;失拟项均大于 0.05,表明回归方程拟合度高;其决定系数 R^2 为 0.912 4,表明该模型可以解释 95% 以上的评价指标。因此,该模型是可行的。根据求得的

回归方程(1),绘制出相应的三维响应面,研究不同测距方案下,各因素对响应值的影响,如图 8 ~ 10 所示。

表 3 试验设计方案及响应值

Tab. 3 Test design scheme and response value

序号	因素			相对误差/%
	测距方案	果园类型	车体速度	
1	0	1	-1	13.7
2	-1	-1	0	11.6
3	0	1	1	16.7
4	0	-1	1	18.6
5	0	0	0	19.4
6	1	0	1	10.2
7	1	-1	0	9.3
8	0	-1	-1	15.9
9	1	1	0	8.2
10	-1	1	0	16.3
11	0	0	0	18.9
12	0	0	0	19.8
13	-1	0	-1	12.5
14	0	0	0	20.6
15	-1	0	1	16.4
16	0	0	0	21.7
17	1	0	-1	7.6

表 4 回归方程方差分析

Tab. 4 Analysis results of variance of regression equation

方差来源	自由度	平方和	F	P
模型	9	35.28	19.95	0.000 3
X_1	1	57.78	32.67	0.000 7
X_2	1	0.031	0.018	0.898
X_3	1	18.61	10.52	0.014 2
X_1X_2	1	8.41	4.76	0.065 6
X_1X_3	1	0.42	0.24	0.64
X_2X_3	1	0.022	0.013	0.913 4
X_1^2	1	185.64	104.96	<0.000 1
X_2^2	1	18.39	10.4	0.014 6
X_3^2	1	13.12	7.42	0.029 6
残差	7	1.77		
失拟值	3	2.52	2.09	0.244 8
误差	4	1.21		
综合	16			

图 8 为全采用激光传感器测量时,车体速度及果园类型的相对误差响应面图;图 9 为全采用超声波传感器测量时,车体速度及果园类型的相对误差响应面图。图 8a 及图 9a 的山峰型 3D 曲面表明,一定范围内探测的果园类型,由连续密集型转变为纺锤稀疏型到单株稀疏型时,测量的相对误差呈现先增加后减小的趋势。由图 8b 知,全采用激光传感器阵列测距时,等高线较稀疏,说明该方案受车体速度及果园类型的

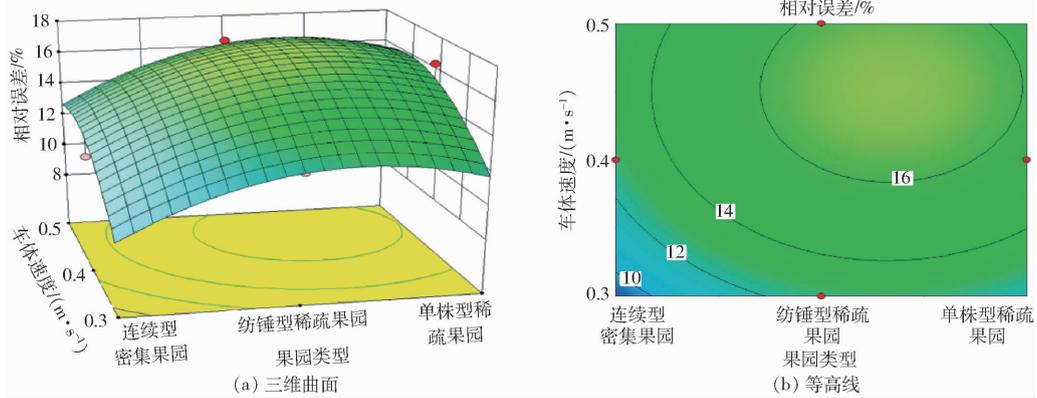


图8 激光测距时果园类型及车速对测量相对误差的影响

Fig. 8 Influence of orchard type and speed on relative measurement error in laser ranging

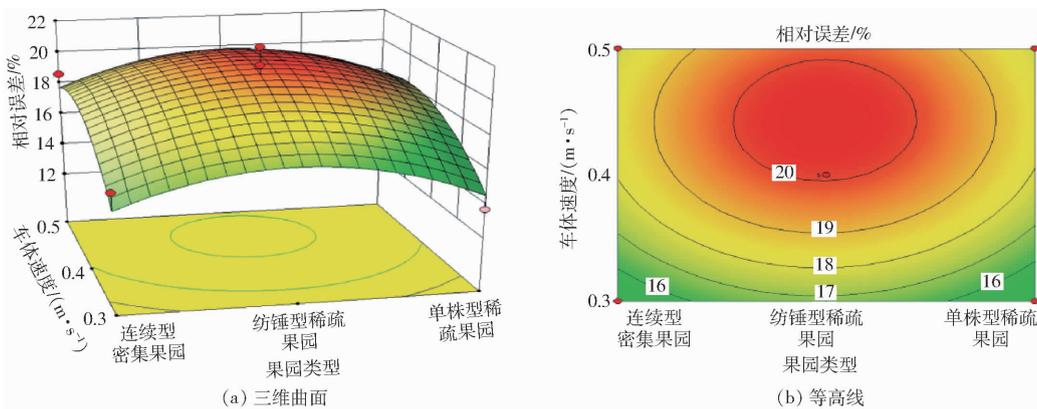


图9 超声波测距时果园类型及车速对测量相对误差的影响

Fig. 9 Influence of orchard type and speed on relative measurement error during ultrasonic distance measurement

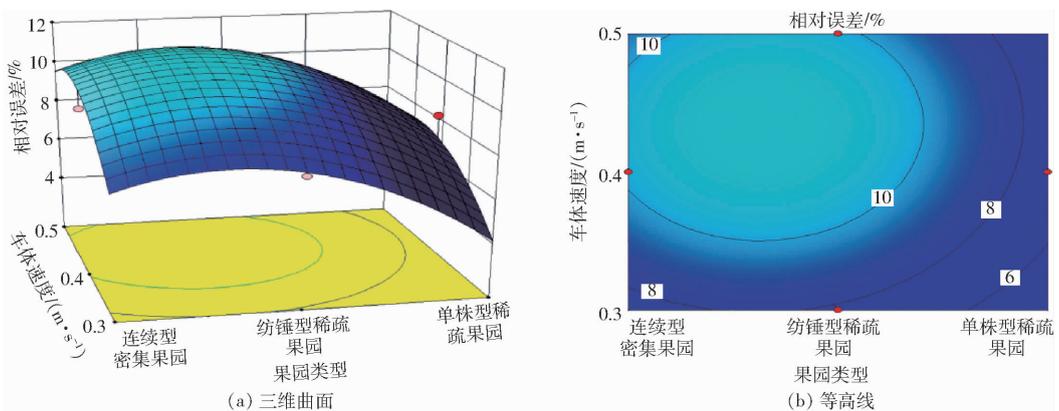


图10 融合测距时果园类型及车速对测量相对误差的影响

Fig. 10 Influence of orchard type and speed on relative measurement error during fusion distance measurement

影响程度较小,连续型密集果园的测量相对误差小,为9.13%~12.7%,纺锤稀疏型果园相对误差最高,为12.51%~16.02%,单株型稀疏果园的相对误差为11.84%~15.06%;同种果园下随着车速的增加,测量的相对误差也随之增加。由图9b知,全采用超声波传感器测量时,等高线密集,说明该方案受速度及果园类型的影响程度大,纺锤型稀疏果园相对误差最高,为16.85%~20.04%,连续型密集果园及单株型稀疏果园相对误差相差不大,分别为14.88%~17.80%、14.70%~17.89%;且同种果园下随着车速

的增加,测量的相对误差随之增大,纺锤型稀疏果园相对误差增加明显。

图10为采用传感器融合阵列测距时,车速及果园类型的相对误差响应面图。图10a为斜坡型3D曲面,在一定范围内由连续密集型果园转变为纺锤稀疏型果园及单株稀疏型果园时,测量的相对误差呈现逐渐减小的趋势。由图10b知,采用传感器融合阵列测距时,等高线稀疏,说明该方案受速度及果园类型的影响程度较小。其中单株型稀疏果园相对误差最小,为4.20%~6.69%,连续型密集果园

及纺锤型稀疏果园的相对误差相差不大,分别为 7.33%~9.56%、7.79%~10.24%;且同种果园下随着车速的增加,测量的相对误差随之增大,但单株型稀疏果园误差增加不明显。

由图 8~10 对比知,当车速为 0.3~0.5 m/s 时,收集 3 种果园果树冠层信息,NU112F30TR-1MD 型超声波传感器阵列相对误差大,为 14.70%~20.04%;SICK-DX35 型激光传感器阵列精度较高,其相对误差为 9.13%~16.02%,而传感器融合阵列精度高,相对误差小,为 4.2%~10.24%,传感器融合阵列提高了纺锤型稀疏果园及单株型稀疏果园的整体测量精度,对连续型密集果园的测量精度,也有较大的提升。主要因为纺锤型稀疏果园及单株型稀疏果园上、中、下稀疏程度差异大,采用适合不同冠层的传感器,可较大程度地提高果园整体冠层信息的探测精度。

4 结论

(1)由对 6 种测距传感器进行的相关试验分

析可知:光照强度对 SICK-DX35 型激光传感器影响因素较小,而束波角越小,超声波传感器测量精度越高。

(2)为了检验测距方案、果园类型及车体速度对果树整体测量影响的显著性水平,采用 Box-Behnken 中心组合试验方法,设计了三因素三水平二次回归正交试验。建立的回归模型及统计分析表明,影响果树整体测量精度的显著水平由大到小依次为测距方案、车体速度、果园类型。

(3)设计了 3 种果园的冠层宽度信息采集方案,果园冠层信息收集的试验结果表明:车速为 0.3~0.5 m/s 时,采用超声波传感器阵列,相对误差为 14.70%~20.04%;采用激光传感器阵列时,精度较高,相对误差为 9.13%~16.02%;采用传感器融合阵列时,相对误差较低,为 4.2%~11.24%。传感器融合阵列提高了纺锤型稀疏果园及单株型稀疏果园的整体测量精度,对连续型密集果园的测量精度也有较大的提升。

参 考 文 献

- 1 白鹏. 基于 Android 的果园自动对靶风送式喷雾试验台的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016. BAI Peng. Development of automatic target detecting and air-assisted spraying test platform based on Android[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 2 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=20150309&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)
- 3 张美娜, 吕晓兰, 常有宏, 等. 果树靶标精准探测系统研究进展分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 227-233. ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, CHANG Youhong, et al. Research progress analysis of target precision system for orchards [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10): 227-233. (in Chinese)
- 4 GAO Haobu, LI Xiangrong, XUE Jiye, et al. A modification to the wave breakup model for evaporating dieselspray[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 555-556.
- 5 HEBERT V P, VICTÓRIA S A. Paper spray mass spectrometry and PLS-DA improved by variable selection for the forensic discrimination of beers[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 440: 104-112.
- 6 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送式喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 189-195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=2016s029&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189-195. (in Chinese)
- 7 卢蓬莲, 易文裕, 虞洪章, 等. 果园喷雾机械现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 36-41. LU Yingpeng, YI Wenyu, TUO Hongzhang, et al. Present state and trends of orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(19): 36-41. (in Chinese)
- 8 丁天航, 曹曙明, 薛新宇, 等. 风送式果园喷雾机发展现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(10): 221-226. DING Tianhang, CAO Shuming, XUE Xinyu, et al. Current situation and development trend of air-assisted orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(10): 221-226. (in Chinese)
- 9 李素璇, 高明, 魏东辉, 等. 精准变量喷雾控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 71-75. LI Suxuan, GAO Ming, WEI Donghui, et al. Design of variable rate fertilizer spreader [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 71-75. (in Chinese)
- 10 刘慧, 夏伟, 沈跃, 等. 基于实时传感器的精密变量喷雾发展概况[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 238-244. LIU Hui, XIA Wei, SHEN Yue, et al. Development overview of precision variable spraying based on real-time sensor technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 238-244. (in Chinese)

- Intelligent Systems, 2017, 17(1): 26 – 34.
- 12 张帅, 淮永建. 基于分层卷积深度学习系统的植物叶片识别研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(9): 108 – 115.
ZHANG Shuai, HUAI Yongjian. Leaf image recognition based on layered convolutions neural network deep learning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(9): 108 – 115. (in Chinese)
 - 13 TIAN Lei, FAN Chunxiao, YUE Ming, et al. Stacked PCA Network (SPCANet): an effective deep learning for face recognition [C]//IEEE International Conference on Digital Signal Processing, 2015:1039 – 1043.
 - 14 ZHONG Zhuoyao, JIN Lianwen, XIE Zecheng. High performance offline handwritten chinese character recognition using googlenet and directional feature maps[C]//13th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2015:846 – 850.
 - 15 李彦冬, 郝宗波, 航雷. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机应用, 2016, 36(9): 2508 – 2515.
LI Yandong, HAO Zongbo, HANG Lei. Survey of convolutional neural network[J]. Journal of Computer Application, 2016, 36(9): 2508 – 2515. (in Chinese)
 - 16 DONAHUE J, JIA Y, VINYALS O, et al. DeCAF: a deep convolutional activation feature for generic visual recognition[C]// Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, 2014:988 – 996.
 - 17 SZEGEDY G, VANHOUCKE V, IOFFE S, et al. Rethinking the inception architecture for computer vision[C]// Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:2818 – 2826.
 - 18 宋青松, 田正鑫, 孙文磊, 等. 用于孤立数字语音识别的一种组合降维方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 42 – 46.
SONG Qingsong, TIAN Zhengxin, SUN Wenlei, et al. Combined dimension reduction method for isolated digital speech recognition[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2016, 50(6): 42 – 46. (in Chinese)
 - 19 GIBSON E, LI Wenqi, SUDRE C, et al. NiftyNet: a deep-learning platform for medical imaging[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2018, 158:113 – 122.
 - 20 Intelligent Computing Laboratory of Chinese Academy of Sciences. Plant leaf database of intelligent computing laboratory of Chinese academy of sciences [EB/OL]. <http://www.intelengine.cn/dataset>.

~~~~~

(上接第 353 页)

- 11 许林云, 张昊天, 张海锋, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 1 – 9.  
XU Linyun, ZHANG Haotian, ZHANG Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 1 – 9. (in Chinese)
- 12 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80 – 92.  
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80 – 92. (in Chinese)
- 13 ZAMAN Q U, SALYANI M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 20(2): 173 – 178.
- 14 ESCOLÀ A, PLANAS S, ROSELL, et al. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies [J]. Sensors, 2011, 11(3): 2459 – 2477.
- 15 翟长远, 赵春江, WANG Ning, 等. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 1 – 15.  
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Ning, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 1 – 15. (in Chinese)
- 16 RICARDO S, JORDI L, ALEXANDRE E, et al. Innovative LIDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area [J]. Sensors, 2011, 11(3): 5769 – 5791.
- 17 SWALKLATE P, CROSS J, RICHARDSON G, et al. Comparison of different spray volume deposition mode using LIDAR measurements of apple orchards[J]. Biosyst. Eng., 2002, 82(3): 253 – 267.
- 18 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70 – 76.  
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70 – 76. (in Chinese)
- 19 刘慧, 李宁, 沈跃, 等. 融合激光三维探测与 IMU 姿态角实时矫正的喷雾靶标检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 88 – 97.  
LIU Hui, LI Ning, SHEN Yue, et al. Spray target detection based on laser scanning sensor and real-time correction of IMU attitude angle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 88 – 97. (in Chinese)
- 20 吴腾, 胡良龙, 王公仆, 等. 步行式甘薯碎蔓还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 8 – 17.  
WU Teng, HU Lianglong, WANG Gongpu, et al. Design and test of walking sweet potato (*Ipomoea batatas*) vines crushing and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 8 – 17. (in Chinese)
- 21 程焯焯, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 22 – 29. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract\\_view.aspx?file\\_no=2017s004&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/abstract_view.aspx?file_no=2017s004&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004.  
CHENG Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Paramater optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22 – 29. (in Chinese)