

基于激光雷达的农业机器人导航控制研究\*

薛金林 张顺顺

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

**摘要:**以农业机器人为平台,利用激光雷达研究农业机器人在有行株距的果树与有行无株距的树木行中,特别是一侧存在行缺失情况下的导航性能。根据激光雷达获得的树行信息,机器人控制系统进行导航路径计算,确定机器人的横向偏差与方向偏角。利用模糊控制算法实现机器人的导航控制。在无株距且一侧存在4 m距离缺失的冬青树行间及在有行株距且一侧存在6.2 m距离缺失的梨树行间,分别进行3次重复的导航性能试验。试验结果表明,在整个试验距离内冬青树行距与梨树行距都不均等的试验条件下,在冬青树间的最大横向偏差为17.5 cm,在梨树间的最大横向偏差为28 cm。在一侧冬青树出现缺失时对机器人的导航性能影响较小,而在一侧梨树缺失时对机器人的导航性能影响较大。根据横向偏差的统计值与机器人行驶轨迹,表明控制算法能够控制机器人沿着中心线行驶。

**关键词:**农业机器人 激光雷达 导航

**中图分类号:** TP242; TN249; V241.62+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0055-06

引言

为实现农业现代化与农业自动化作业,农业车辆导航技术得到了快速发展,出现了以机器视觉和GPS为核心的农业机械自主导航系统<sup>[1-3]</sup>。但是机器视觉受作业环境、光照条件的影响比较大,GPS的应用则受卫星信号的影响<sup>[4-5]</sup>。而激光雷达能以较高频率提供大量准确的距离信息,可靠地提供周围物体的方位和深度信息<sup>[6-9]</sup>,目前在农业车辆导航中逐步得以应用研究。

Chateau等<sup>[10]</sup>较早提出了基于激光雷达传感器的农业车辆自主导航方法,但没有试验验证。Barawid等<sup>[11]</sup>将激光雷达传感器置于52 kW的农业拖拉机上,通过Hough变换对树行进行识别,实现拖拉机在长40 m、宽3 m的果树行间自动导航,没用自回归去噪法时横向误差值为0.21 m,采用自回归去噪法后横向误差值为0.19 m。Subramanian等<sup>[12]</sup>开发了分别基于机器视觉与激光雷达传感器的导航系统,用于引导在果树行中行走的拖拉机,然后在3.5 m宽的干草捆行间对两个导航系统进行3次重复试验,结果表明在其中一次试验中,基于激光雷达传感器的导航系统最大误差为6.1 cm,平均误差为3.1 cm。Libby等<sup>[13]</sup>利用激光雷达传感器测量农业车辆与地标间的相对位置对基于车轮编码器的车辆

预测路径进行校正,果园中试验结果表明平均误差约为20 cm,最大误差达1.2 m。在国内,陈军等<sup>[14-15]</sup>利用激光雷达传感器获取果树位置信息,分别提出果树环境下直线与曲线导航路径算法,在校园内水泥路面上分别进行景观树直线模拟试验,在9次直线试验中最大横向平均偏差为0.14 m,在曲线试验中最大偏差达0.40 m,平均偏差为0.12 m。目前,国内外将激光雷达应用于农业车辆导航的研究还较少,部分研究缺少真实环境的验证,仍处于应用探索阶段。本文以农业机器人为平台,利用激光雷达传感器获取树行位置信息,研究农业机器人在有行株距的果树行间与无株距的树行间的导航性能,特别是研究一侧存在行缺失情况的导航性能。

1 材料与方法

1.1 系统组成

本研究以农业机器人为平台,其驱动系统由电动机与链轮传动机构组成,如图1所示。所用激光雷达传感器为SICK公司的LMS291-05,其扫描频率为75 Hz。激光雷达安装在机器人前方,激光雷达传感器经RS232通信线将数据传输至上位机;上位机对数据进行处理、分析并计算出导航路径后,通过USB通信线发送指令至下位机;下位机根据上位机信号输出PWM信号至电动机驱动器以驱动机器人

收稿日期: 2013-10-09 修回日期: 2013-11-15

\* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201127)

作者简介: 薛金林,副教授,主要从事农业车辆智能化研究,E-mail: xuejinlin@njau.edu.cn

电动机,实现机器人的行走,如图 2 所示。所用的上位机为同方全坚固型便携式计算机,下位机为 Basic Micro 公司的 BasicAtom 微控制器。

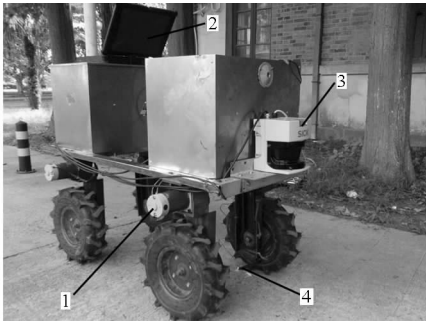


图 1 系统组成

Fig. 1 System composition

1. 驱动电动机 2. PC 机 3. 激光雷达传感器 4. 划迹装置

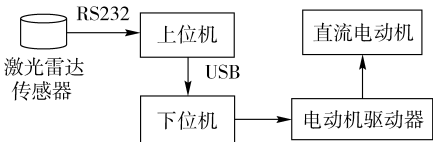


图 2 系统工作原理

Fig. 2 Principle of the system

1.2 导航路径计算

当机器人在树行间行走时,根据激光雷达传感器的信息提取出树的位置,由此计算出行中心线作为导航线。

1.2.1 信息提取

通过激光雷达获取树的位置如图 3 所示。对于两侧有行株距的树,如图中的果树行,两侧果树位置如图 3a 中激光雷达扫描包络线的  $M$ 、 $N$  等凹点。根据这些点的极坐标值就可以对果树进行定位。对于有行无株距的树木行,树行图像表现为直线,如图 3b 所示。其中右侧表示为有行无株距,左侧则为存在 4 m 的行缺失。根据直线上任一点的极坐标值可以对树行进行定位。

1.2.2 导航路径计算

对于两侧有行株距的果树,从激光雷达扫描图的左右两侧分别选取 2 个果树点,如图 4a 中的  $l_1$ 、 $l_2$  与  $r_1$ 、 $r_2$ 。根据这 4 个点的坐标信息,分别计算出左右两侧点之间的中点坐标,如图 4a 中的  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 。最后根据这 4 个中点坐标拟合出一直线,该直线表示为树行中心线,即农业机械机器人的导航线。需要说明的是,对于有一定行株距且无行缺失的情况,左右两侧的果树点分别选择最邻近激光雷达扫描图原点的 2 个果树点;对于有行无株距且无行缺失的情况,先在左右两侧各选择最邻近原点的一个点,然后以所选的点为基准,在一定距离或角度范围内选择另外一个邻近点。当然,如果左右两侧树点数选

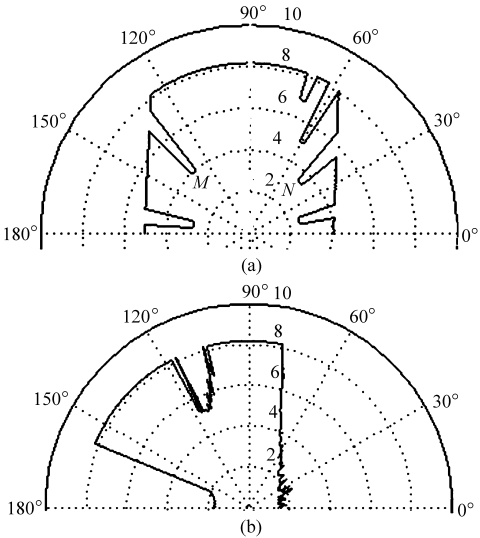


图 3 树行扫描图

Fig. 3 Scanning map of crop rows

(a) 两侧有明显行株距的树行信息  
(b) 无株距且存在行缺失情况的树行信息

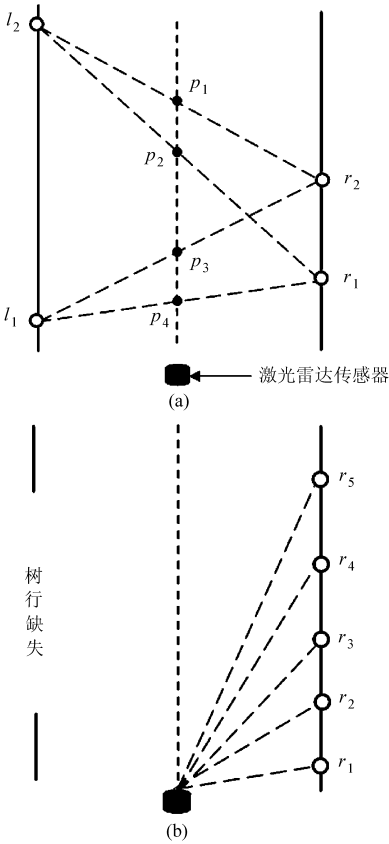


图 4 导航路径的计算

Fig. 4 Calculation of navigation path

(a) 无行缺失时 (b) 有行缺失时

为 3 点,则得出的中点坐标数达 9 个,这样拟合的计算量稍大。

当一侧出现较长距离行缺失时,则根据无行缺失信息进行导航路径的计算。对有行株距的果树情况,在一定扫描距离或角度内,选择无行缺失侧距离原点最近的果树点。如果果树行内株距小,则点数

可以多选,否则要少选。对于有行无株距的树木,先选好最邻近原点的树点,再根据一定间隔扫描距离或角度选择其它点。对于一侧冬青树出现一段行缺失的试验场景的导航路线计算,本文选用5点,如图4b中 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$ 。首先计算出最邻近原点的 $r_1$ 点;然后以 $r_1$ 点为基准点分别找出0.3~0.5 m间隔内的最邻近点 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$ 等;最后根据 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$ 点信息计算出无行缺失侧的树行线。再根据已知的树行距值,或农业机器人偏离树行行走的期望距离值,计算出农业机器人的导航路径。

对于两侧无行缺失的有行株距的果树,及两侧无行缺失的有行无株距树木的传感器扫描图及导航

路径计算的结果如图5a、5b所示,它们是对相应扫描图的局部放大。图中4个红点为左右两侧所找出的4个树点 $l_1$ 、 $l_2$ 与 $r_1$ 、 $r_2$ 之间的中点坐标,红线为由这4个红点直线拟合后的导航中心线。根据拟合好的导航中心线与激光雷达扫描中心线,可以计算出农业机器人的航向偏角;而激光雷达扫描原点到导航中心线的距离定为机器人的横向偏差。这时,根据两侧无行缺失的树行扫描信息计算出树行线,如图中的红线。然后由树行线与激光雷达扫描中心线确定航向偏角,而激光雷达扫描原点至树行线的距离与树行距的一半值或期望距离值的差值为机器人的横向偏差。

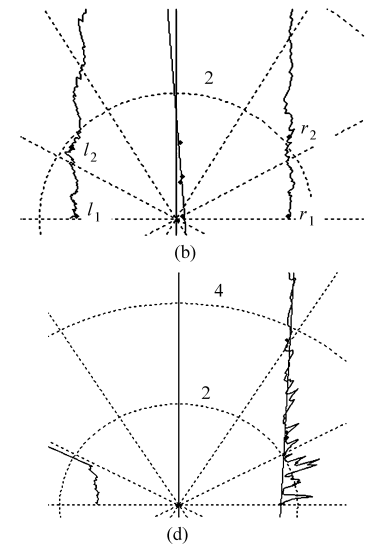
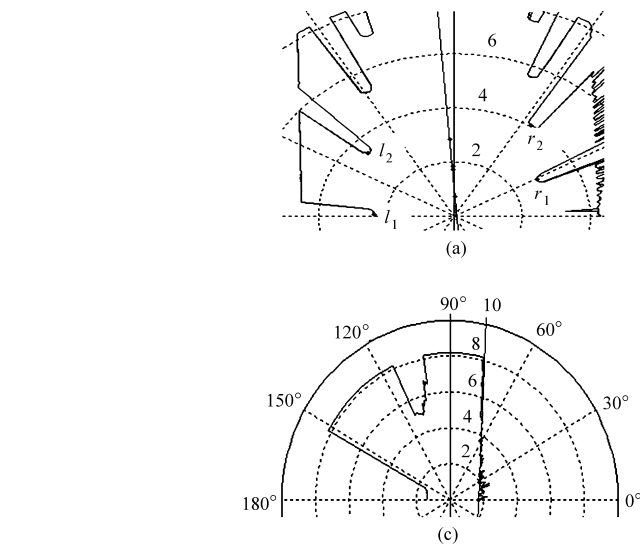


图5 不同试验条件下的导航路径

Fig. 5 Navigation paths for different test conditions

(a) 两侧无行缺失的有行株距树 (b) 两侧无行缺失的有行无株距树 (c) 一侧行缺失的有行无株距树 (d) 图5c的局部放大图

1.3 导航控制

农业机器人的移动是通过下位机输出的 PWM 信号,经电动机驱动器,控制直流电动机转速而实现的。本研究中用2个电动机驱动器实现左、右两侧电动机的驱动,即实现农业机器人的差速转向。当两侧驱动器的 PWM 信号相同时,机器人直线行驶;当两侧驱动器的 PWM 信号不同时,机器人实现差速转向。

本研究采用模糊控制方式进行机器人的导航控制。导航控制的输入量为机器人横向偏差  $E$  和航向偏角  $\theta$ ,输出量  $U$  为左右两侧直流电动机 PWM 控制差值。输入与输出模糊子集都为 {NG, NM, NS, ZE, PS, PM, PG}。 $E$  的基本论域为  $[-30\text{ cm}, 30\text{ cm}]$ ,模糊论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;  $\theta$  的基本论域为  $[-30^\circ, 30^\circ]$ ,模糊论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;  $U$  的基本论域为  $[-300, 300]$ ,模糊论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。各论域中正负号规定为:横向偏差为正表示车辆偏离中心线右侧,为

负表示车辆偏离中心线左侧;航向偏角为正表示机器人航向角顺时针偏转,为负表示为逆时针偏转;PWM 控制差值为正表示左侧车轮转速大于右侧车轮转速,即机器人右转,反之机器人左转。输入输出变量均选用三角型隶属度函数、Max - Min 合成推理法、重心法解模糊化方法。模糊控制规则如表1所示。

图6为控制系统的控制算法流程。激光雷达对

表1 模糊控制规则  
Tab.1 Fuzzy control rules

| $\theta$ | $E$ |    |    |    |    |    |    |
|----------|-----|----|----|----|----|----|----|
|          | -3  | -2 | -1 | 0  | 1  | 2  | 3  |
| -3       | 3   | 3  | 2  | 2  | 1  | 1  | 0  |
| -2       | 3   | 2  | 2  | 1  | 1  | 0  | -1 |
| -1       | 2   | 2  | 1  | 1  | 0  | -1 | -1 |
| 0        | 2   | 2  | 1  | 0  | -1 | -2 | -2 |
| 1        | 1   | 1  | 0  | -1 | -1 | -2 | -2 |
| 2        | 1   | 0  | -1 | -1 | -2 | -3 | -3 |
| 3        | 0   | -1 | -2 | -2 | -3 | -3 | -3 |

树行信息进行扫描,并将扫描信息传送至上位机。上位机根据扫描信息判断树行是否存在缺失现象。对于一侧树行是否出现缺失的判断依据为:①获取左右两侧最邻近原点的扫描点的距离与角度信息。对于有行株距的树行,如果两侧都存在远低于最大扫描距离的扫描点,而这2个点至原点的垂直距离分别不超出最大株距,同时这2点至原点的水平距离之和不出最大行距,则把这2点看成是左右两侧基准树点;如果某侧找不到低于最大扫描距离的扫描点,或某侧最邻近原点的扫描点至原点的垂直距离超出最大株距,则表明这个点所在的树行存在行缺失。对于有行无株距的树行,如果两侧都存在远低于最大扫描距离的扫描点,而这2点至原点的垂直距离或这2点的角度分别低于某一较小的给定值 $d$ 或 $\alpha$ (两侧树点的角度是指它们在扫描图水平方向上小于 $90^\circ$ 的夹角),同时这2点至原点的水平距离之和不出最大行距,则把这2点看成是左右两侧基准树点;如果一侧找不到低于最大扫描距离的扫描点,或这一侧最邻近原点的点至原点的垂直距离或角度超出给定值 $d$ 或 $\alpha$ ,则表明行缺失。②查找基准点后的下一个最邻近原点的扫描点。对于有株距的树行,如果该点至基准点的垂直距离不超出最大株距,则认为是下一个树点;否则认为是行缺失。对于无株距的树行,如果该点至基准点垂直距离或角度低于给定值 $d$ 或 $\alpha$ ,则认为是下一个树点,否则认为是行缺失。判断树行是否存在缺失后,上位机根据相应的导航算法进行导航路径计算。然后,上位机将计算所得的机器人横向距离偏差与方向偏角,通过模糊控制算法输出转向控制指令至下位机。下位机一旦接收到指令就输出对应的PWM信号,调整机器人行驶方向,控制机器人沿着导航线行驶。

2 试验与结果分析

为检验基于激光雷达传感器的农业机器人导航性能,分别以校园内冬青树(图7a)与果园内梨树(图7b)为导航农作物进行试验。试验时,机器人的初始速度为0.2 m/s。冬青树因栽种株距小且枝叶繁茂交错,故看成是有行无株距的树行。冬青树行间距因树冠修剪不齐与生长原因有变动,范围为3.15~3.3 m,高度为0.70 m,其中一侧有4 m长的行缺失。因株距大,将梨树作为有行株距的树行,传感器扫描梨树树干。梨树行间距范围为3.8~4.04 m,株距为2.84~3.32 m,其中一侧有行缺失,距离达6.2 m。激光雷达传感器安装在农业机器人的正前方,距离地面垂直高度为0.5 m,水平扫描,

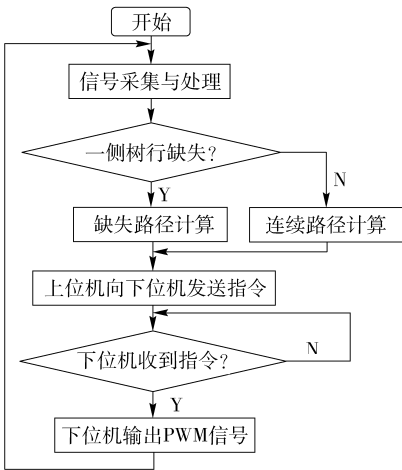


图6 导航控制流程图  
Fig.6 Flow chart of the navigation control

扫描角度为 $180^\circ$ ,扫描半径为8 m,角度分辨率为 $0.5^\circ$ 。此次试验的冬青树以及梨树的树干高度都大于0.5 m,所以激光雷达距离地面的垂直高度满足试验要求。考虑到冬青树的缺失长度及梨树的株距与其一侧缺失的情况,在上位机处理激光雷达传感器信号数据时,对于冬青树导航试验,计算 $0^\circ\sim30^\circ$ 与 $150^\circ\sim180^\circ$ 范围内的信息。对于梨树的导航试验,计算 $0^\circ\sim80^\circ$ 与 $100^\circ\sim180^\circ$ 范围内的信息,保证至少有两棵树干在测量范围内同时不需要处理过多的树干信息。需要说明的是,激光雷达传感器的安装高度可以根据导航农作物的高度而改变,而导航农作物信息的提取与导航路径的计算方法无需改变。

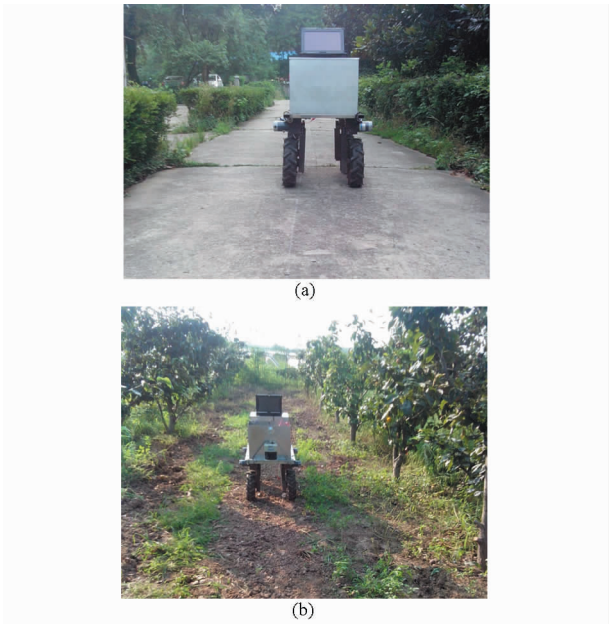


图7 试验场景  
Fig.7 Experiment scenes  
(a) 冬青树 (b) 梨树

在冬青树导航试验中,将白粉笔装在偏离机器人中心18 cm的左前链传动罩下面的划迹装置

(图1)上。当机器人行走时,在水泥路面上留下白粉笔迹印,即为车辆行走轨迹。而在梨树导航试验中,用带刀刃的钢条代替白粉笔。当机器人行走时,在地面上留下了划线,即为车辆行走轨迹。根据一侧树行与激光雷达传感器等高处的垂直投影点至划线的距离和树的行距,计算出机器人的实际横向位移偏差。对于冬青树,试验距离为18 m;对于梨树,试验距离为21 m。在同一起点处进行3次试验,每次试验后间隔30 cm进行数据测量。冬青树与梨树缺失处距试验起点的距离分别为8.4 m与7 m。表2为冬青树试验时的横向偏差统计结果;表3为梨树试验时的横向偏差统计结果。图8与图9分别为其中一次机器人行走轨迹。表2、表3与图8、图9中负值横向偏差表示机器人运行轨迹偏向右侧;图8中840 cm与1 240 cm处的垂直虚线为冬青树缺失的起点与终点,图9中700 cm与1 320 cm处的垂直虚线为梨树缺失的起点与终点。

表2 冬青树试验时横向偏差统计

Tab.2 Statistics of lateral offset in the evergreen trees tests

| 试验序号 | 最大值   | 平均值   | 标准偏差 |
|------|-------|-------|------|
| 1    | -17.5 | -7.8  | 3.6  |
| 2    | -14.5 | -9.2  | 2.9  |
| 3    | -15.5 | -10.5 | 6.3  |

表3 梨树试验时横向偏差统计

Tab.3 Statistics of lateral offset in the pear trees tests

| 试验序号 | 最大值   | 平均值   | 标准偏差 |
|------|-------|-------|------|
| 1    | -28.0 | -9.8  | 12.6 |
| 2    | 24.2  | 4.8   | 8.2  |
| 3    | -25.1 | -14.5 | 11.6 |

由表2,在冬青树行间试验时,每次试验的最大值与平均值都为负,说明机器人运行轨迹总体上是偏于右侧的,其中最大偏差为17.5 cm,这主要是由不均等的冬青树行间距对机器人导航控制影响所致。由表3,在梨树行间试验时,最大偏差出现在右侧,为28 cm,但第2次试验时最大值与平均值都为正。较大的偏差主要是与路面不平坦、不均等的梨树行距及测量误差有关。根据表2与表3中横向偏差与标准偏差值及图8与图9的运行轨迹,表明模糊控制算法能够让机器人横向误差趋于零以获得稳

定的导航行为。在项目研究中,行缺失对冬青树导航精度的影响并不明显,因为在3次试验中,最大偏差都没有出现在行缺失算法计算的区域内,且在这一区域内偏差波动也不大。但是,行缺失对梨树的导航精度有影响,因为在3次试验中,有2次的最大偏差出现在行缺失算法计算的区域内。

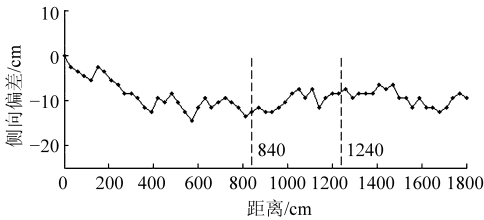


图8 冬青树试验时机器人行走轨迹  
Fig.8 One trajectory of the robot in the evergreen trees tests

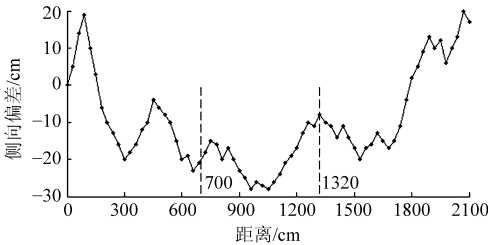


图9 梨树试验时机器人行走轨迹  
Fig.9 One trajectory of the robot in the pear trees tests

3 结束语

应用激光雷达进行农业机器人导航研究,提出了激光雷达获取树行信息的路径导航计算方法,利用模糊控制算法实现机器人的导航控制。在无株距而行距有变化且一侧存在一段距离行缺失的冬青树行间,及有株距而行距有变化且一侧也存在一段距离行缺失的梨树行间,分别对激光雷达的导航性能进行试验检验。

试验时,机器人的初始速度为0.2 m/s。在路面较好的冬青树行导航试验时,机器人最大横向偏差为17.5 cm,在路面较差的梨树行导航试验中,最大横向偏差为28 cm。在无株距而一侧有行缺失时,对机器人导航精度的影响较小,但在有株距而一侧有行缺失时,对机器人导航精度有较大的影响。试验表明,基于激光雷达的机器人导航方法与基于模糊控制算法的控制方法能实现农业机器人在具有一定高度树行间的自主导航。但是,本文没有针对不同初始车速对导航精度的影响进行试验。

参 考 文 献

1 Francisco B F, Alberto O, Gabriel O. Visual navigation for mobile robots: A survey [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2008, 53(3):263-296.

2 Berns K, Kuhnert K D, Christopher A. Off-road robotics-An overview [J]. Künstliche Intelligenz, 2011,25(2):109-116.

- 3 Zhang N, Wang M, Wang N. Precision agriculture—a world wide overview [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2–3):113–132.
- 4 Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1–2):169–194.
- 5 Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1–2):155–167.
- 6 刘大学. 用于越野自主导航车的激光雷达与视觉融合方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.  
Liu Daxue. A research on Ladar-vision fusion and its application in cross-country autonomous navigation vehicl [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- 7 Stavros V, Spyros F, Simon B, et al. Combining reactive and deterministic behaviours for mobile agricultural robots [J]. Operational Research, 2005, 5(1):153–163.
- 8 朱忠祥,宋正河,谢斌,等. 拖拉机队列自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8):149–154.  
Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, Xie Bin, et al. Automatic control systems of tractors platooning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):149–154. (in Chinese)
- 9 Qiu Q, Han J D. 2.5-dimensional angle potential field algorithm for the real-time autonomous navigation of outdoor mobile robots [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(10):2100–2112.
- 10 Chateau T, Debain C, Collange F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 28(3):243–257.
- 11 Barawid Jr O C, Mizushima A, Ishii K, et al. Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application [J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2):139–149.
- 12 Subramanian V, Burks T F, Arroyo A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation [J]. Computeure and Electronics in Agriculture, 2006, 53(2):130–143.
- 13 Libby J, Kantor G. Accurate GPS-free positioning of utility vehicles for specialty agriculture [C]. 2010 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 1008605, 2010.
- 14 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4):179–182, 187.  
Chen Jun, Jiang Haoran, Liu Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 179–182, 187. (in Chinese)
- 15 刘沛, 陈军, 张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3):196–199.  
Liu Pei, Chen Jun, Zhang Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3):196–199. (in Chinese)

## Navigation of an Agricultural Robot Based on Laser Radar

Xue Jinlin Zhang Shunshun

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** The navigation performance was studied for an agricultural robot based on laser radar between the crop rows with intra-row spacing and without intra-row spacing, especially in the absence of one-side crop row. According to the crop information from the laser radar, the different navigation methods were developed to calculate navigation path and thus to determine the lateral error and heading angle error for the different type of the crop rows. Then the fuzzy logic control was used to control the robot to travel along the calculated navigation path. Tests were conducted in three replications respectively while the robot traveled between the evergreen tree rows with a missing distance of 4 m in one side and the pear tree rows with a missing distance of 6.2 m in one side. Results showed that, the robot traveled successfully, with the maximum navigation errors of 17.5 cm and 28 cm for the evergreen tree tests and the pear tree tests respectively, when the inter-row spacing of the evergreen trees and the pear trees were not fixed in the respective test distance. Meanwhile, the missing distance in one side for the evergreen trees had no significant effect on the traveling of the robot, but it seemed to have an effect for the missing distance of the pear trees. According to the statistic data of the tests and the robot trajectories, it was shown that the control algorithm had ability to make the robot travel along the centerline of the crop rows.

**Key words:** Agricultural robot Laser radar Navigation