

# 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统

刘沛, 陈军<sup>\*</sup>, 张明颖

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 为实现果园作业的自动化, 以拖拉机为研究对象, 采用激光导航方式实现了果园机械的自动导航。试验以激光扫描仪为检测设备对果树位置信息实时采集, 采用最小二乘法规划拖拉机导航路径; 拖拉机航向偏差和横向偏差作为比例控制器的输入量, 以方向盘电机的转速为输出量, 控制拖拉机沿导航路径直线行走; 系统实现了拖拉机在果园环境下的直线行走控制功能。拖拉机以 0.27 m/s 的速度直线行走 30 m, 最大横向偏差 0.15 m。试验结果表明本系统可用于果园机械的自动导航, 并具有一定的可靠性。

**关键词:** 激光应用, 导航, 自动导航, 拖拉机, 果园, 航向角, 横向偏差, 拟合路径

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.037

中图分类号: S219.1, TP242

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0196-04

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 with English abstract)

## 0 引言

20 世纪 80 年代以来, 农业机械自动导航技术得到快速发展。激光检测技术因其测量精度高, 能以较高频率提供大量准确的距离信息等优点, 在农业机械自动导航研究中得到越来越广泛的应用。

美国 Vijay Subramanian 等人, 采用激光扫描仪作为障碍物的检测设备, 利用多传感器融合技术实现了车辆在柑橘园自动直线行走, 以 3.1 m/s 速度行驶时, 平均偏差 7.6 cm<sup>[1]</sup>。卡内基梅隆大学的 Bradley Hamner 等人以 LMS 291 激光扫描仪作为导航传感器, 开发了一款用于果园的多用途自主移动机器人——APM (autonomous prime mover), 实现了车辆的果园自动导航<sup>[2]</sup>。北海道大学的 Oscar 等人采用激光扫描仪作为导航传感器, 利用 Hough 变换识别果树, 控制拖拉机在果园直线行走, 取得了横向偏差为 0.11 m, 航向偏差为 1.5°的导航结果<sup>[3]</sup>。美国 Yvan 等人采用三维激光扫描和 GPS 定位相融合技术, 实现了车辆的自动导航<sup>[4]</sup>。

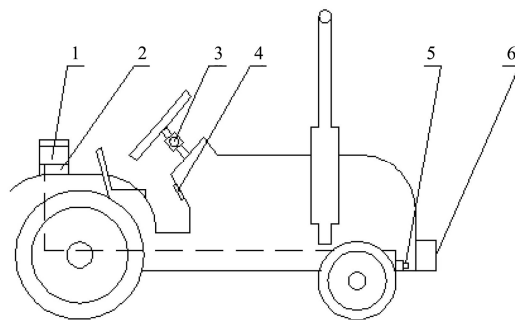
本研究以激光扫描仪为导航设备, 提出基于激光扫描提取果树信息方法; 基于最小二乘法设计了导航路径拟合算法; 通过对实际驾驶经验的分析, 建立预见控制的运动学模型; 基于 PID 控制理论设计了拖拉机果园自动导航的比例控制器。

## 1 材料与方法

### 1.1 导航系统

系统主要由拖拉机 (福田欧豹 4040 型拖拉机), 位移传感器 (台湾 TONTKO 拉线式电阻尺 HPS - M - 5V), PC 机 (联想扬天 M4600C), 直流伺服电动机驱动系统 (西安明朗 MLDS3805) 和激光扫描仪 (德国 SICK 公司 LMS-291) 组成。

激光扫描仪安装在拖拉机的车头前方, 距离地面垂直高度 0.75 m, 接线方式 RS232, 采样周期 300 ms, 波特率 38 400, 数据位 8 位, 无奇偶校验位, 停止位为 1。在正前方 180°扫描半径范围为 20 m, 扫描解析度 0.5°。各传感器的安装如图 1 所示。



1. PC 机 2. 电源 3. 转向控制电机 4. 直流电机驱动器 5. 拉线位移传感器 6. 激光扫描仪

图 1 供试车辆及控制系统配置图

Fig.1 Layout diagram of supplied vehicle and control system

激光扫描仪检测拖拉机前方果树位置信息; 拉线位移传感器检测拖拉机前轮转角大小<sup>[5]</sup>, 转向控制电机控制拖拉机的转向。

### 1.2 导航路径的规划

路径规划是自动导航中的重要部分, 直接决定着控制

收稿日期: 2010-08-19 修订日期: 2010-03-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金支持 (QN2009041)

作者简介: 刘沛 (1983—), 男, 陕西杨凌人, 主要从事自动控制方面的研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。

Email: liupeil2403076@163.com

\*通信作者: 陈军 (1970—), 男, 宁夏固原人, 副教授, 博士, 主要从事智能化农业装备研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。Email: chenjun\_shx@yahoo.com.cn

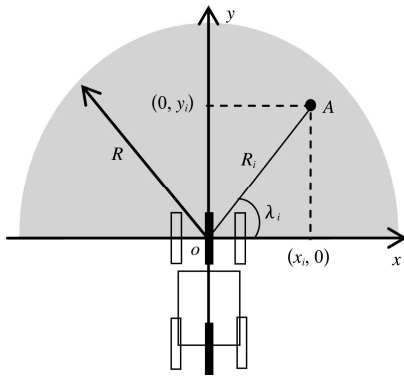
精度的好坏，路径越准确，导航精度越高。

### 1.2.1 果树定位

为实现果园环境下拖拉机自动导航，首先必须确定出果树及树行相对于拖拉机的位置。在果园中，可以将果树看做为障碍物，利用激光扫描进行检测。通过对扫描图像的分析，发现果树位置出现在图像中内凹点位置，凹陷部分越大，表明树干的直径越粗；基于此特征进行果树位置的筛选<sup>[6]</sup>。

设  $R_i$  表示扫描到的第  $i$  个点距激光扫描仪的距离； $\lambda_i$  表示第  $i$  个点与坐标轴形成的夹角， $\lambda_i = 0.5(i-1)$ ；当  $R_{i-1} < R_i < R_{i+1}$  时，将  $R_i$  及所对应的  $\lambda_i$  保存； $i=2, 3, 4, \dots, 361$ 。

对上述信息进行直角坐标转换，取激光扫描仪的安装位置为  $(0, 0)$  点，拖拉机的轴向为  $y$  轴，建立直角坐标系，如图 2 所示。



注：A 为障碍物；R 为扫描半径； $R_i$  为 A 的扫描距离； $\lambda_i$  为  $OA$  与  $x$  轴的夹角； $x_i, y_i$  为 A 点在直角坐标系下的横纵坐标

图 2 扫描直角坐标系

Fig.2 Scanning rectangular coordinates system

通过式 (1)，完成果树位置信息从极坐标到直角坐标的转化。

$$\begin{cases} x_i = R_i \cos \lambda_i \\ y_i = R_i \sin \lambda_i \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2.2 导航路径拟合

取两行果树的中线作为导航路径，完成果园环境下拖拉机的自动导航。从两行果树中，分别取拖拉机左右侧距离拖拉机最近的 3 棵果树点，两两组合，组成 9 组，求取中点坐标，作为拖拉机行走路径的拟合数据点；利用式 (2) 求取每组组合点的的中点坐标。

$$\begin{cases} x_k = \frac{x_{Lm} + x_{Rn}}{2} \\ y_k = \frac{y_{Lm} + y_{Rn}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $(x_{Lm}, y_{Lm})$ 、 $(x_{Rn}, y_{Rn})$  分别为左右两行果树的第  $m$  个点和第  $n$  个点的坐标， $m, n \in (1, 2, 3)$ ， $(x_k, y_k)$  为组合点  $(x_{Lm}, y_{Lm})$  和  $(x_{Rn}, y_{Rn})$  的中点坐标， $k \in (1, 2, \dots, 9)$ 。

通过式 (2) 得到拖拉机导航路径的 9 个直角坐标点；再利用基于最小二乘的导航路径拟合算法，拟合拖拉机的自动导航路径。

设拟合直线方程为  $y = ax + b$ ，取偏差最小平方和

$\delta = \sum (y_k - y)^2$ ，将  $y = ax + b$  带入，得

$$\delta = \sum (y_k - ax - b)^2 \quad (3)$$

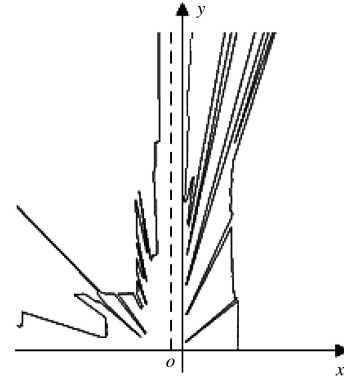
为使式 (3) 值最小，方程对  $a, b$  分别进行求导，得

$$\begin{cases} 9b + (\sum x_k)a = \sum y_k \\ (\sum x_k)b + (\sum x_k^2)a = (\sum x_k y_k) \end{cases} \quad (4)$$

对式 (4) 求解得

$$\begin{cases} a = \frac{9(\sum x_k y_k) - (\sum x_k)(\sum y_k)}{9(\sum x_k^2) - (\sum x_k)^2} \\ b = \frac{(\sum x_k^2)(y_k) - (\sum x_k)(\sum x_k y_k)}{9(\sum x_k^2) - (\sum x_k)^2} \end{cases} \quad (5)$$

拟合结果如图 3 所示。



--- 拟合的车辆行走路径  
—— 激光扫描仪扫描车辆前进方向 20 m 范围内障碍物信息，内凹点处均为果树

图 3 路径拟合结果

Fig.3 Path fitting results

图 3 中，激光扫描仪的安装位置为原点，拖拉机的航向为  $y$  轴， $x$  轴平行于地面。

## 1.3 导航控制

### 1.3.1 车辆运动学模型建立

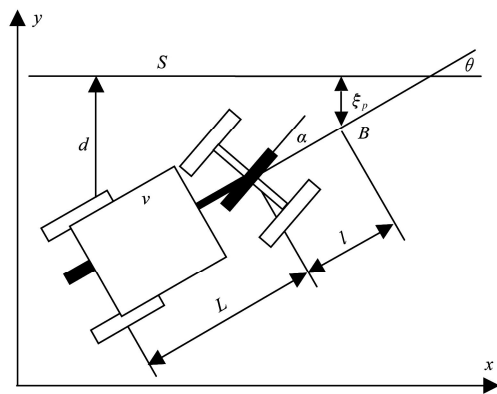
PID 控制器是一种按照偏差的比例、积分和微分进行控制的调节器，是连续系统中技术成熟、应用最为广泛的一种控制器，同时，PID 控制器具有算法和结构简单、工作稳定、参数易于调整、物理意义明确、鲁棒性强、系统无静差等优点<sup>[7]</sup>，理论分析及实际经验表明，运用 PID 控制器对相当多的工业对象进行控制时能够取得比较满意的效果。因此，本研究基于 PID 控制理论设计导航控制器。

本研究以低速行驶拖拉机为研究对象，当不考虑拖拉机行走时的侧偏和地面状况等因素影响时，建立如图 4 所示的车辆运动学模型<sup>[8]</sup>。

据图 4 车辆运动学模型，得到拖拉机运动学方程<sup>[9-11]</sup>。

$$\begin{cases} \dot{d} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \alpha \\ \dot{\alpha} = u \end{cases} \quad (6)$$

式中  $u$  为前轮转角加速度，rad/s。



注:  $S$  为目标路径;  $\theta$  为拖拉机航向偏差, rad;  $\alpha$  为拖拉机前轮转角, rad;  $l$  为拖拉机航向上点  $B$  距离拖拉机前轴中心点的距离, m;  $\xi_p$  为点  $B$  到路径的偏差, m;  $L$  为拖拉机轴距, m;  $v$  为拖拉机后轴中心点速度, m/s;  $d$  为拖拉机后轴中心点到路径的横向偏差, m

图4 车辆运动学模型

Fig.4 Vehicle kinematics model

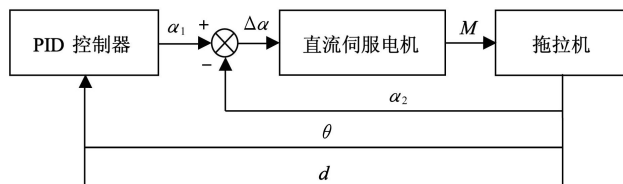
### 1.3.2 模型求解

据经验可知, 车辆在行驶中, 驾驶员往往根据前方某一点与目标路径的偏差来操纵方向盘来控制车辆行驶方向, 基于这点特征, 本研究中设  $\alpha = k_p \xi_p$ ,  $k_p$  为比例系数, 由图4的车辆运动学模型可得

$$\begin{aligned}\alpha &= k_p \xi_p = k_p (d - (L+l) \sin \theta) \\ &= k_p d - k_p (L+l) \sin \theta\end{aligned}\quad (7)$$

式中, 取  $k_1 = k_p$ ,  $k_2 = -k_p(L+l)$ ; 则有比例控制方程为

$$\alpha = k_1 d + k_2 \sin \theta \quad (8)$$



注:  $\alpha_1$  为拖拉机控制器理论输出调整角度, rad;  $\alpha_2$  为拖拉机实测前轮转角, rad;  $\Delta\alpha$  为拖拉机前轮实际调整角度, rad;  $M$  为直流伺服电机的输出转矩, N·m

图5 系统控制框图

Fig.5 Frame of control system

拖拉机的航向偏差和横行偏差为控制器输入量, 输出量为拖拉机实际前轮转角的调整量, 方向电机转速转换器将前轮转角实际调整量转化为直流伺服电机的转速信号, 发送给转向驱动电机, 通过对电机转动速度的控制, 实现车辆方向的自动控制。

## 2 试验结果与分析

试验在西北农林科技大学校内的水泥路面上进行, 道路两旁的景观树模拟果园果树; 树木2行, 每行16株, 株间距3m, 行距5.5m。通过预试验, 设定式(7)中,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 0.81$ ; 取  $L = 4.53$  m,  $l = 0$ ; 采样周期300 ms。图6为试验场景图像, 表1为9次试验统计结果, 图7

为9次试验平均偏差图。



图6 试验场景

Fig.6 Experimental scene

表1 横向偏差统计结果

Table 1 Statistical results of lateral deviation

次数	最大偏差/m	最小偏差/m	平均偏差/m	标准差/m
1	0.15	-0.09	0.03	0.05
2	0.12	-0.14	-0.01	0.02
3	0.15	-0.07	0.04	0.02
4	0.15	-0.06	0.045	0.04
5	0.14	-0.11	0.015	0.03
6	0.15	-0.12	0.015	0.02
7	0.13	-0.13	0	0.01
8	0.14	-0.08	0.03	0.05
9	0.15	-0.11	0.02	0.02
平均	0.145	-0.101	0.021	0.03

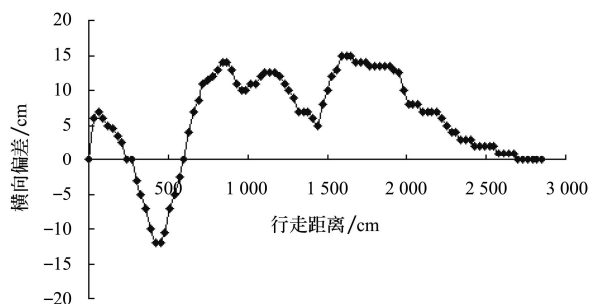


图7 横向平均偏差随行走距离的变化

Fig.7 variation of lateral average deviation with travel distance

由表1可知, 9次试验后, 正侧最大横向平均偏差为0.14 m, 负侧最大横向平均偏差为0.10 m, 平均偏差0.021 m, 标准差平均值为0.03 m。由图7可知, 车辆在2.5m后, 横向偏差负侧最大, 接近5m处, 横向偏差达到正侧最大值, 之后慢慢减小, 到30m时横向偏差基本为0。通过分析, 发现试验道路两侧的景观树因人工栽植导致两侧果树中点并不在同一条直线, 通过测量得偏差在0.12到0.15m之间; 而在5m处, 左右两行树木的中点偏离中线最大, 达0.15m, 致使计算机拟合出的导航路径存在差异, 误差增大; 因此车辆在5m处出现最大横向偏差。图7横向偏差图所反映出的结果与实际情况

正好相符, 说明了系统的可靠性与精确性。试验环境与果园环境基本相符, 当最大横向偏差为 0.15 m, 也可以满足果园导航的控制要求, 具有一定的可靠性和适用性。

### 3 结 论

以激光扫描仪为导航设备, 实时采集果园环境数据进行导航路径规划, 基于 PID 控制理论设计了比例控制器, 并进行了实车试验。拖拉机以 0.27 m/s 的速度在水泥路面上行驶 30 m, 最大横向偏差 0.15 m。试验结果表明, 本系统能够快速、准确采集果树的位置信息, 用于果园车辆的自动导航具有一定的可靠性和适用性。

#### [参 考 文 献]

- [1] Subramanian V, Burks T V, Dixon W E, et al. Sensor fusion using fuzzy logic enhanced kalman filter for autonomous vehicle guidance in citrus groves[J]. Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009, 52(5): 1411—1422.
- [2] Hamner B, Singh S, Bergerman M, et al. Improving orchard efficiency with autonomous utility vehicles[C]//2010 ASABE Annual International Meeting. Pittsburgh: ASABE, 2010.
- [3] Barawid O C Jr, Akira Mizushima, Kazunobu Ishii, 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.
- [4] Beliveau Y J, Fithian J E, Deisenroth M P. Autonomous vehicle navigation with real-time 3D laser based positioning for construction[J]. Automation in Construction, 1996, 5(4): 261—272.
- [5] 朱磊磊, 陈军, 白晓鸽, 等. 基于曲柄滑块机构原理导航的农业机器人设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40: 33—36. Zhu Leilei, Chen Jun, Bai Xiaoge, et al. Design of agricultural robot navigated by the slider-crank mechanism [J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(9): 33—36. (in Chinese with English abstract)
- [6] 窦志强, 毛志怀, 魏青. 基于激光扫描的田间目标跟踪系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 220—222. Dou Zhiqiang, Mao Zhihuai, Wei Qing. Based on laser scanning of the field target tracking system[J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(12): 220—222. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈军, 鸟巢凉. 拖拉机行驶路线的自动变更研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 83—85. Chen Jun, Ryo Torisu. Automatic control of lane change for autonomous tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 83—85. (in Chinese with English abstract)
- [8] 连世江, 陈军, 贾海政, 等. 基于 PID 控制的拖拉机自动转向系统. 农机化研究. 2009, 6(6): 211—213. Lian Shijiang, Chen Jun, Jia Haizheng, et al. Automatic turning control system of tractor based on PID control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 6(6): 211—213. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈军, 鸟巢凉, 朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 101—104. Chen Jun, Torisu R, Zhu Zhongxiang, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths[J]. Transactions of the CSAM, 2005, 36(7): 104—107. (in Chinese with English abstract)
- [10] 朱忠祥, 陈军, 鸟巢凉. 基于 PD 控制的拖拉机半挂车机组自动直线倒车系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 98—101. Zhu Zhongxiang, Chen Jun, Torisu R. Based on PD control of tractor auto backup running system [J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(7): 98—101. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 116—119. Lü Antao, Song Zhenghe, Mao Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 116—119. (in Chinese with English abstract)

## Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation

Liu Pei, Chen Jun<sup>\*</sup>, Zhang Mingying

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to develop an automatic guidance system for orchard machinery, laser navigation method was used on an orchard tractor. A laser scanner was used to collect the real time information of fruit trees' location and a path planning program was developed based on the least square method. A proportional controller was designed with the information of course deviation and lateral deviation as its input and the speed of steering motor as output to navigate the tractor moving straightly. The system realized the control function of navigating the tractor to move in a straight line in alleyways of the orchard. The maximum lateral deviation was 0.15 m after the tractor moved 30 m path at the speed of 0.27 m/s. Test results indicated that the system could be applied to the automatic navigation of orchard machinery and had certain reliability.

**Key words:** laser applications, navigation, automatic guidance, tractors, orchards, heading angle, lateral deviation, fitting path