

果园移动机器人曲线路径导航控制*

陈军¹ 蒋浩然¹ 刘沛¹ 张勤²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 华盛顿州立大学精细与自动化农业研究中心, 普罗塞 99350)

【摘要】 为实现移动机器人在果园非结构化环境下的自动行走,对果园移动机器人在复杂环境中的导航控制进行了研究。利用激光扫描获取果树位置信息,提出了一种果园环境下曲线导航路径的拟合算法;构建了以横向偏差和航向偏差为输入的模糊控制器;实现了移动机器人在曲线路径中的自动行走。机器人以 0.54 m/s 的速度沿正弦曲线行走,最大横向偏差为 0.40 m,平均偏差为 0.12 m。试验结果表明该系统路径拟合和导航控制算法性能良好。

关键词: 果园 移动机器人 激光导航 曲线路径 模糊控制

中图分类号: TP242; V249.32⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0179-04

Navigation Control for Orchard Mobile Robot in Curve Path

Chen Jun¹ Jiang Haoran¹ Liu Pei¹ Zhang Qin²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Center for Precision & Automated Agricultural System, Washington State University, Prosser 99350, USA)

Abstract

The over goal of this study was to develop a laser scanner based automatic navigation system capable of guiding an autonomous mobile robot traveling in the orchard. An automatic navigation system, which consisted of a laser scanner, an inertial sensor, a DC PWM servo motor and a computer was developed and mounted on the mobile robot. A program based on quadratic curve was developed as the algorithm to planning navigation path. A controller based on fuzzy control was designed. The performance of the control system was tested in sinusoid condition at the travel speed of 0.54 m/s, the maximum error was 0.40 m and the mean error was 0.12 m in the test. The test result demonstrated that the system could navigate the mobile robot to traverse a curve alleyway of a simulative orchard condition with a relatively good accuracy.

Key words Orchard, Mobile robot, Laser navigation, Curve path, Fuzzy control

引言

自动驾驶策略研究作为果园移动机器人开发的基础工作,受到各国学者重视。日本生研中心分别基于电磁导航和机械导航原理开发出多款果园无人植保机,大大降低了作业的劳动强度^[1-2]。但由于果园中需要铺设大量管道或电缆,限制了这类导航系统进一步的应用。有学者基于视觉图像信息丰

富、目标信息完整的特点,提出了多种用于果园移动机器人导航的图像处理算法^[3-6],但视觉导航系统对设备要求较高,同时易受环境噪声信号影响。在果园这种特殊环境中,利用激光扫描果树位置信息为移动机器人提供导航信息,可保证导航信息的完整性和精确性。有学者开发了基于激光的果园移动机器人导航系统,实现了机器人在果树行间的直线行走^[7-10]。Khot 等结合激光、RTK-GPS 以及 DMU

收稿日期: 2011-06-28 修回日期: 2011-07-11

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QN2009041)和陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2009JM3018)

作者简介: 陈军,教授,博士生导师,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn

感知机器人周围环境,并通过改进的卡尔曼滤波融合多种传感器信息,得到果树定位误差为4.4 cm的试验结果^[11]。

本文以激光扫描仪为导航传感器,实时采集果园道路两侧果树位置信息,提出基于激光扫描图像的果树位置确定方法;考虑到曲线路径情况,基于二次曲线法实时拟合导航路径;基于模糊控制原理设计移动机器人导航控制器,并进行实车试验。

1 系统组成

以改装后的拖拉机(福田欧豹4040)为研究平台,在拖拉机正前方安装二维激光扫描仪(SICK LMS291型),用以检测果树位置信息。在拖拉机前轮转角处安装拉线位移传感器(HPS-M-5V型),用以测量移动机器人前轮偏转角。将各传感器检测到的信息通过RS232串口传递给计算机,计算机进行运行路径规划算法和导航控制算法后,发送控制指令驱动方向盘电动机(西安明朗)控制拖拉机的转向。导航系统结构如图1所示。

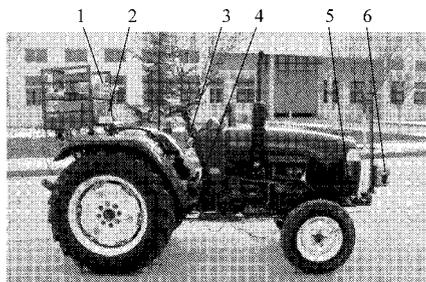


图1 导航系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of guidance system

1. 直流稳压电源
2. 计算机
3. 方向盘驱动电动机
4. 蓄电池
5. 转角传感器
6. 激光扫描仪

本文所设计的导航路径拟合算法,以株行距为4 m × 4 m的标准化果园为例,需要检测移动机器人前方3棵果树的最长扫描距离为12.17 m,为了能够扫描到需要的果树数量,设置激光扫描仪检测距离和扫描解析度分别为20 m和0.5°,其扫描角度范围为180°。激光扫描示意图如图2所示,图中R为激光扫描半径, L_i 为障碍物到激光的距离, λ_i 为障碍物与X轴的夹角。

2 机器人路径规划

2.1 果树位置信息确定

以激光扫描仪的安装位置为原点,移动机器人的航向为y轴,建立直角坐标系,将激光扫描到的果树极坐标位置点转换到直角坐标系,提取直角坐标系内所有果树树干位置参数。

在扫描果树行获取果树位置信息时,由于激光

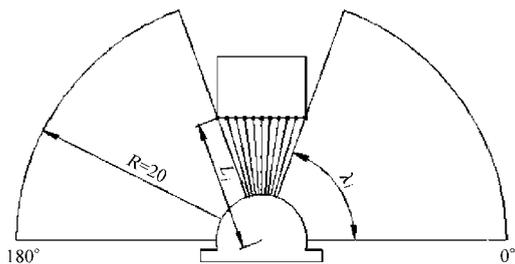


图2 激光扫描示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser scanning

扫描距离设置为20 m,而标准化果园的株行距为4 m × 4 m,激光会扫描到其他果树行位置信息,为消除这类干扰,在扫描角度为0°时,设置一个距离阈值 $H_0 = 3$ m,对于激光扫描得到的果树距离信息,计算机只保存处理小于 H_0 的数据,扫描角度 $\lambda_i = 0.5(i-1)$, $i = 1, 2, \dots, 361$ 。随着扫描角度的变化,设置的距离阈值也随之改变, $H_i = |H_0 / \cos \lambda_i|$ 。

2.2 机器人导航路径拟合

果园环境复杂多变,具有非结构化的特点。目前对于移动机器人行间直线行走的研究已取得一定成果^[7-10],但对曲线路径这种情况研究相对较少。考虑到果园弯道曲率不大以及二次曲线法的特点,本文针对曲线路径的情况进行研究,采用二次曲线法拟合导航路径。

设拟合路径为 $x = ay^2 + by + c$,在移动机器人前方两侧的果树行上,每行取3棵果树,可得到3个中点,作为路径的拟合点,设3个中点的坐标为 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) 、 (a_3, b_3) ,代入拟合路径方程得

$$\begin{cases} a_1 = ab_1^2 + bb_1 + c \\ a_2 = ab_2^2 + bb_2 + c \\ a_3 = ab_3^2 + bb_3 + c \end{cases}$$

求解方程得

$$\begin{cases} a = \frac{a_1(b_2 - b_3) + a_2(b_3 - b_1) + a_3(b_1 - b_2)}{(b_3 - b_1)(b_3 - b_2)(b_1 - b_2)} \\ b = \frac{b_1^2(a_2 - a_3) + b_2^2(a_3 - a_1) + b_3^2(a_1 - a_2)}{(b_3 - b_1)(b_3 - b_2)(b_1 - b_2)} \\ c = \frac{b_1 b_2 (b_1 - b_2)(a_1 - a_3) + b_1 b_3 (b_1 - b_3)(a_2 - a_1)}{(b_3 - b_1)(b_3 - b_2)(b_1 - b_2)} \end{cases}$$

取移动机器人行驶路径的切线作为导航路径;对 $x = ay^2 + by + c$ 两边关于y求导,得 $x' = 2ay + b$; x' 为路径切线的直线斜率,得到移动机器人导航路径的切线方程;并以此切线方程引导机器人通过曲线路径。移动机器人路径规划如图3所示,切线与y轴形成的夹角为移动机器人的航向偏差 θ ,车辆后轴中心与切线的距离为移动机器人的横向偏差d。图中s为机器人目标路径;v为机器人当前速度。

当机器人前方两侧果树行的果树数量少于3棵

时,两侧果树行的 2 棵果树形成 2 个中点,连同直角坐标系原点作为路径拟合点,设 2 个中点坐标为 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) ,代入方程得

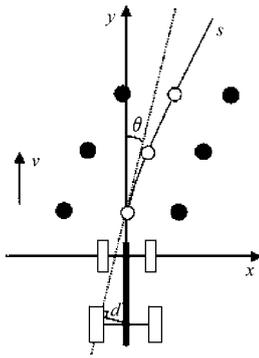


图 3 移动机器人路径规划

Fig. 3 Path planning of mobile robot

$$\begin{cases} a_1 = ab_1^2 + bb_1 + c \\ a_2 = ab_2^2 + bb_2 + c \\ c = 0 \end{cases}$$

求解方程得

$$\begin{cases} a = \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{b_2^2 b_1 - b_1^2 b_2} \\ b = \frac{a_1 b_2^2 - a_2 b_1^2}{b_1 b_2^2 - b_2 b_1^2} \end{cases}$$

由于移动机器人在导航路径点 $(0, 0)$ 处的切线斜率为零,所以取机器人在 $(0, 0.1)$ 处的切线斜率作为该点的斜率,该情况仅在果园地头出现,近似求解对系统的导航精度影响较小。

3 导航控制方法

由于果园环境复杂、地况较差、具有非结构化的特点,同时拖拉机本身是一个具有大延迟、非线性的系统^[12],难以建立精确的数学模型。模糊控制把具体领域的专家知识以模糊规则的形式方便地表达出来,通过模糊推理对系统的实时状态作出正确的决策,无需系统精确的数学模型,并对系统的参数变化有着良好的鲁棒性和适应性^[13-14],能在一定程度上解决上述问题。

本文基于模糊控制理论设计导航控制算法,构建以移动机器人的航向偏差 θ 和后轮中心的横向偏差 d 作为输入量,以理论前轮偏转角 Φ 为输出量的模糊控制器。控制系统框图如图 4 所示。模糊控制器的算法中选用 7 个语言变量描述输入、输出变量,分别为正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZE)、负小(NS)、负中(NM)和负大(NB)。横向偏差的论域选择为 $[-60 \text{ cm}, 60 \text{ cm}]$ (x 轴左侧为正,右侧为负);航向偏差的论域选择为 $[-45^\circ, 45^\circ]$ (x 轴正方向为 0° ,逆时针方向为正,顺时针方向为负);理论前轮偏转角选择为 $[-45^\circ, 45^\circ]$ (逆时针方向为正,顺时针方向为负)。选用三角隶属度函数,利用经验知识和多次试验,确定模糊控制器的 49 条控制规则如表 1 所示。

利用隶属度最大原则进行反模糊化,得到理论前轮偏转角 Φ ;通过计算与实际前轮偏转角的差值,计算出实际的前轮调整角度 $\Delta\Phi$;使用 PWM 控

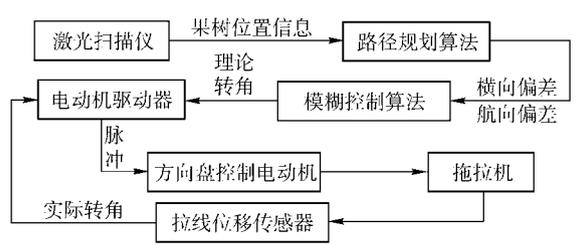


图 4 导航控制系统框图

Fig. 4 Structure of navigation control system

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Rule of fuzzy control

航向 偏差	横向偏差						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	NS
NM	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NS
NS	PB	PM	PS	PS	NS	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NB
PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
PB	PS	ZE	NS	NM	NM	NB	NB

制,将调整角度转变为调整电压增量 Δu ,控制方向盘转动。

4 实车试验

4.1 试验条件及方法

为了验证路径拟合算法和导航控制器的精度,进行了实车试验,试验在西北农林科技大学校内进行,利用 PVC 管模拟果树树干,PVC 管高度为 1.2 m,直径为 40 cm。路径用函数 $y = 0.5 \sin x$ 设定振幅为 1.91 m、波长为 24 m 的正弦波,模拟果树行间距为 3 m,株间距为 2.5 m,如图 5 所示。拖拉机的速度设置为 0.54 m/s。

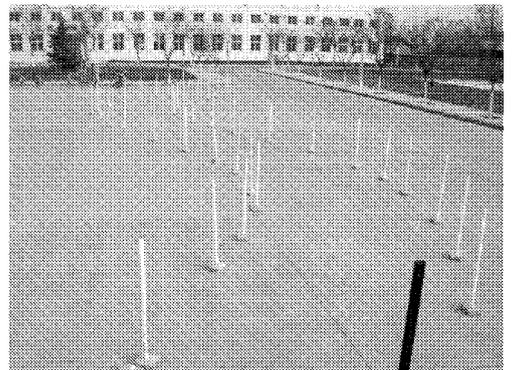


图 5 正弦波曲线模拟环境

Fig. 5 Photo of sinusoid scene

4.2 试验结果及分析

图 6 为移动机器人沿正弦波曲线行驶时的目

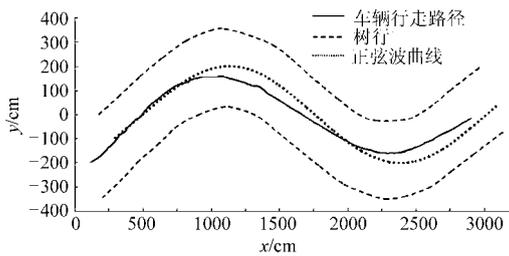


图6 正弦波曲线试验结果

Fig. 6 Result of sinusoid test

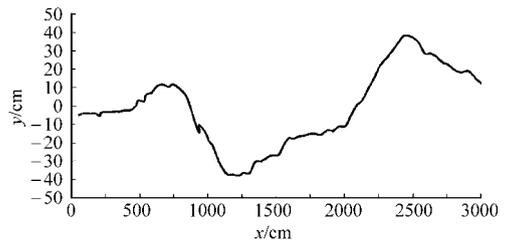


图7 正弦波曲线横向偏差

Fig. 7 Lateral error of sinusoid test

标路径和实际行驶路径。正弦波曲线试验横向偏差如图7所示,在整个行驶过程中,最大横向偏差为0.40 m,平均横向偏差为0.12 m,标准横向偏差为0.30 m。最大偏差出现在正弦波顶点处。从图6中可以看出,在顶点处有较大的误差,分析其产生的原因有两点:一是由于在顶点处曲率变化较大,要求方向盘控制响应及变化率较大,故在控制中响应时间的滞后造成控制精度变差;二是由于本研究所涉及的基于二次曲线法拟合导航路径时,考虑的是曲率变化较小的路径,而面对正弦波顶点处曲率变化很大这种情况,会产生较大的控制误差。

5 结束语

本文以激光扫描仪为导航传感器,进行模拟果园环境下障碍物信息采集,特征数据提取;利用二次曲线拟合法拟合移动机器人的导航路径,设计了以移动机器人横向偏差和航向偏差为输入量的模糊控制器。在模拟果园环境下以0.54 m/s的速度进行 $y = 0.5 \sin x$ 曲线行走试验,移动机器人行走平均横向偏差为0.12 m,最大横向偏差为0.40 m。试验结果表明,本系统能够快速、准确地采集果树位置信息,导航系统路径拟合算法和导航控制算法性能良好,可用于果园移动机器人在复杂环境中的自动导航,并具有一定的可靠性和适用性。

参 考 文 献

- 1 Tosaki K, Miyahara S, Ichikawa T, et al. Development of microcomputer controlled driverless air blast sprayer (part 1)-unmanned traveling system [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1996, 58(6): 101 ~ 110.
- 2 Okazaki K, Miyazaki M, Nagasaki Y, et al. Automation of farm work by an overhead monorail system in steep sloped citrus orchards[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1996, 58(3): 103 ~ 109.
- 3 Chen J, Yuan C, Zhang W H. Algorithms of machine vision-based guidance path recognition in orchard environment[C] // 2010 IFAC International Conference on Agri-control, Paper 0056, Kyoto, 2010.
- 4 Ruiz F G, Andersen C, Larsen M. An adaptive gain and exposure algorithm for stereo imaging[C] // 2010 ASABE Annual International Meeting, Paper 1009546, Pittsburgh, 2010.
- 5 Mas F R, Wang Q, Zhang Q. Noise reduction in stereo disparity images based on spectral analysis[C] // 2009 ASABE Annual International Meeting, Paper 096258, Reno, 2009.
- 6 杨庆华, 吴佳艺, 鲍官军, 等. 农林环境机器视觉导航路径生成算法及应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 147 ~ 151.
Yang Qinghua, Wu Jiayi, Bao Guanjun, et al. Algorithms of path guidance line based on computer vision and their applications in agriculture and forestry environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 147 ~ 151. (in Chinese)
- 7 Ryo T, Noboru N, Akira M. Automatic guidance with a laser scanner for a robot tractor in an orchard[C] // Proceedings of the 2004 Conference on Automation Technology for Off-Road Equipment, Kyoto, 2004.
- 8 Oscar C B J, Akira M, Kazunobu I, 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.
- 9 Oscar Jr B, Noguchi Noboru, Ishii Kazunobu. Calibration method for 2-dimensional laser scanner attached on a robot vehicle [C] // Proceedings of the 17th International Federation of Automatic Control (IFAC) World Congress, Seoul, 2008.
- 10 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)
- 11 Khot L R, Tang L, Blackmore S B. Navigational context recognition for an autonomous robot in a simulated tree plantation [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(5): 1 579 ~ 1 588.

- 6 Loch B I, Belward J A, Hanan J S. Application of surface fitting techniques for the representation of leaf surfaces [C] // International Congress on Modelling and Simulation. Melbourne: MODSIM Press, 2005: 1 272 ~ 1 278.
- 7 Oqielat M N, Belward J A, Turner I W, et al. A hybrid clough-tocher radial basis function method for modeling leaf surfaces [C] // International Congress on Modelling and Simulation. Christchurch: MODSIM Press, 2007: 400 ~ 406.
- 8 郑文刚, 郭新宇, 赵春江, 等. 玉米叶片几何造型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 152 ~ 154.
Zheng Wengang, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, et al. Geometry modeling of the maize leaf canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 152 ~ 154. (in Chinese)
- 9 肖伯祥, 郭新宇, 王纪华, 等. 玉米叶片形态建模与网格简化算法研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 693 ~ 697.
Xiao Boxiang, Guo Xinyu, Wang Jihua, et al. Maize leaf morphological modeling and mesh simplification of surface[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 693 ~ 697. (in Chinese)
- 10 Kazhidan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction [C] // Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing. SGP'06, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2006: 61 ~ 70.
- 11 Chen Xin, Schmitt Franseis. Intrinsic surface properties from surface triangulation [C] // Proceedings of the European Conference on Computer Version, 1992: 739 ~ 743.
- 12 Taubin G. Estimation the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation [C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision, 1995: 902 ~ 907.
- 13 Watanabe K, Belyaev A G. Detection of salient curvature features on polygonal surfaces [J]. Eurographics, 2001, 20(3): 385 ~ 392.
- 14 Meyer M, Desbrun M, Schroder P, et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds [C] // Proceedings of Vis Math, 2002: 35 ~ 57.
- 15 Eck M, Derose T, Duchamp T, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes [C] // Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH'95, New York, NY, USA: ACM, 1995: 173 ~ 182.
- 16 Floater M. Mean value coordinates [J]. CAGD, 2003, 20(1): 19 ~ 27.
- 17 Sheffer A, De Sturler E. Parameterization of faceted surfaces for meshing using angle based flattening [J]. Engineering with Computers, 2001, 17(3): 326 ~ 337.
- 18 Au O K C, Tai C L, Chu H K, et al. Skeleton extraction by mesh contraction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): (44)1 ~ 10.
- 19 Tagliasacchi A, Zhang Hao, Cohen-Or D. Curve skeleton extraction from incomplete point cloud [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): (71)1 ~ 9.
- 20 Cao Junjie, Tagliasacchi A, Olson M, et al. Point cloud skeletons via Laplacian-based contraction [C] // Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications, 2010: 187 ~ 197.

~~~~~

(上接第 178 页)

- 9 王挺, 王越超, 赵忆文. 多机构复合智能移动机器人的研制[J]. 机器人, 2004, 26(4): 289 ~ 294.  
Wang Ting, Wang Yuechao, Zhao Yiwen. R&D of a multi mechanism compound intelligent robot[J]. Robot, 2004, 26(4): 289 ~ 294. (in Chinese)
- 10 黑沫. 可变形履带机器人设计与运动分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.  
Hei Mo. Design and motion analysis of a reconfigurable tracked mobile robot [D]. Changsha: National Defense Science and Technology University, 2010. (in Chinese)
- 11 张鹏. 基于多信息融合的轮式农业机器人导航研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.  
Zhang Peng. Research on navigation system of agricultural wheeled-mobile robot using multi-information fusion [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 182 页)

- 12 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动驾驶系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148 ~ 152, 162.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 ~ 152, 162. (in Chinese)
- 13 刘俊, 陈无畏. 车辆电动转向系统的卡尔曼滤波模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 1 ~ 5.
Liu Jun, Chen Wuwei. Study on EPS using fuzzy and PID multi-mode control with Kalman filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 14 何卿. 基于多传感器融合的拖拉机行间导航系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
He Qing. Automatic guidance system for tractor inter-row operations based on multiple sensors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)