

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.006

# 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统\*

张铁民 李辉辉 陈大为 黄鹏焕 庄晓霖

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:**为解决四轮独立驱动农用小车在设施农业和畜牧业的物料运输和信息采集中的导航及控制问题,构建了农用小车导航控制系统,优化配置多个传感器,提出了基于 CCD 图像传感器、加速度计、电子罗盘及超声波等多传感器信息融合的导航控制方法。通过 CCD 获取标识路径信息,通过加速度计、电子罗盘获取小车姿态信息,通过超声波传感器判断障碍物,并给出路径特征提取、识别、多源信息融合自主导航控制和超声避障等算法,实现了小车的路径跟踪的导航控制,实验结果表明构建的导航控制系统及导航控制方法正确、有效。

**关键词:** 导航 路径跟踪 多传感器 信息融合 模糊控制

**中图分类号:** TP242; S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0037-06

## Agricultural Vehicle Path Tracking Navigation System Based on Information Fusion of Multi-source Sensor

Zhang Tiemin Li Huihui Chen Dawei Huang Penghuan Zhuang Xiaolin

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Four-wheel independent drive agricultural vehicles are widely used in facility agriculture and animal husbandry of material transportation and information collection, but the navigation and control are difficult. A navigation and control method based on optimized information fusion of multiple sensors was proposed. The proposed system was consisted of CCD, acceleration sensor, electronic compass and ultrasonic. The marked path information was obtained by using CCD. The vehicle posture information was got by using acceleration sensor and electronic compass. And the obstacles were judged by using ultrasonic sensor. Meanwhile, several algorithms were presented, including extraction of road signs feature, multi-source information fusion and ultrasonic obstacle avoidance algorithm. The proposed system can identify and avoid obstacles automatically. On the basis of above, a fuzzy control system was adopted to accomplish the car navigation path tracking control. The experimental results show that the method of information fusion and navigation control is correct and effective.

**Key words:** Navigation Path tracking Multiple sensors Information fusion Fuzzy control

### 引言

四轮独立驱动的农用小车广泛应用于设施农业和畜牧业的物料运输和信息采集,近年来国内外学者围绕着农用小车进行了广泛而深入的研究,基于农田的非结构化特征导航是农用小车导航的关键技术之一<sup>[1-3]</sup>,其中标识路径导航已成为农用小车导

航研究的热点<sup>[4-5]</sup>。

设施农业生产需要劳动力多,作业环境差,研发设施农业等室内物料运输或作业的自主导航移动机器人有较大的市场和技术需求。

为此,本文采用 STM32F107 嵌入式控制器加入 DM642 图像处理器构建路径识别系统,通过加速度计、电子罗盘检测小车姿态,通过超声波传感器检测

收稿日期: 2014-08-17 修回日期: 2014-10-24

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013AA1024406-03)

作者简介: 张铁民,教授,博士生导师,主要从事机电一体化、智能检测与控制技术和机器人技术研究, E-mail: tm-zhang@163.com

障碍物,构建多源传感器信息检测和导航控制系统,加上适当的信息融合算法,实现小车路径跟踪导航控制<sup>[6-8]</sup>。

## 1 系统组成

### 1.1 多传感器结构配置

在小车上安装多个传感器感知环境和小车自身的状态<sup>[9]</sup>,如图1所示。

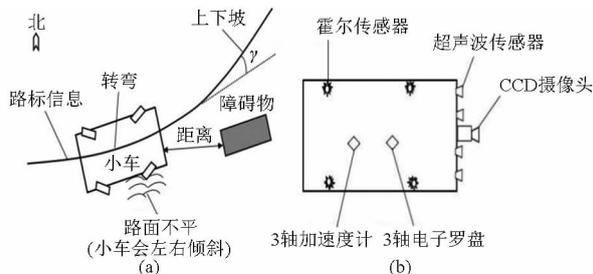


图1 小车作业环境和多传感器配置

Fig.1 Working environment and sensor configuration

(a) 作业环境 (b) 多传感器配置

CCD摄像头安装于小车前上方,以获取标识路径信息;4个超声波传感器并排安装于小车正前方,用于检测小车前方障碍物的距离 $L$ ;4个霍尔传感器分别装于小车4个驱动轮毂电动机上,用于检测小车行驶速度;一个集成3轴电子罗盘和3轴加速度传感器安装于车身顶端的几何中心,用于检测小车航向角 $\alpha$ 、侧倾角 $\beta$ 、俯仰角 $\gamma$ 及小车航向角加速度 $a_1$ 、侧倾角加速度 $a_2$ 、俯仰角加速度 $a_3$ 。

### 1.2 多源传感器信息融合系统的组成

以STM32F107嵌入式作为主控制器,采用混合型信息融合结构<sup>[10-12]</sup>,融合多传感器信息。为提高主控制器运行效率,CCD采集的图像信息预先经过DM642处理后由串口传给主控制器STM32F107,其他位姿和超声波传感器通过I<sup>2</sup>C总线与主控制器STM32F107通信,系统组成如图2所示。

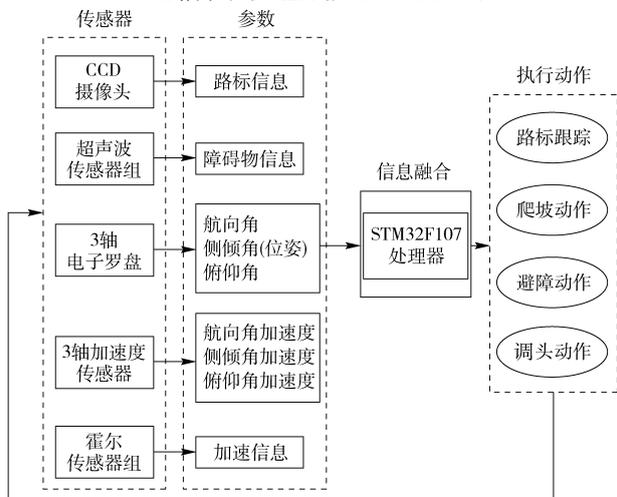


图2 系统的组成

Fig.2 System composition

### 1.3 多源传感器信息融合方法

对安装于小车正前方的4个超声波传感器检测到的信息进行融合,用于探测小车前方的障碍物。现有的4个超声波传感器纵向可以探测小车前方50 cm至500 cm的障碍物,横向探测范围大于车身宽度,探测区域如图3所示。

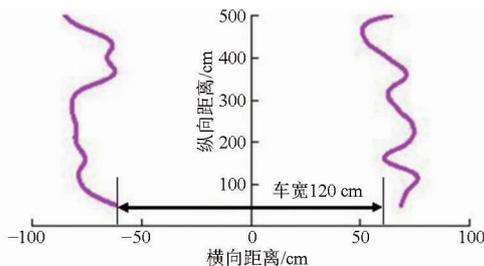


图3 多超声波信息融合探测区域

Fig.3 Multisensor detection area

## 2 系统控制算法

### 2.1 主程序

主程序根据各个传感器获取的信息,判断是否执行路径跟踪、爬坡、避障、调头等子程序,流程如图4所示。

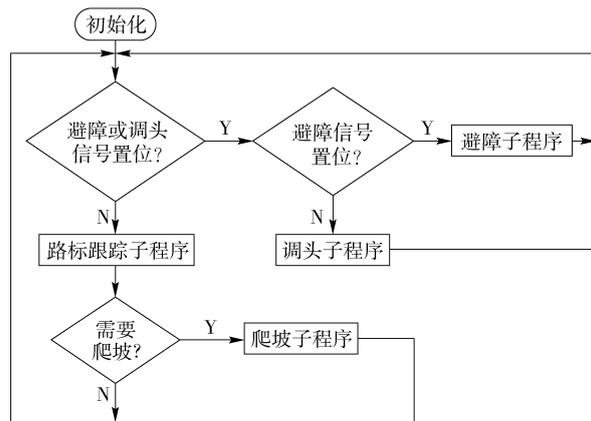


图4 主程序流程图

Fig.4 Flow chart of main control program

### 2.2 路径跟踪算法

#### 2.2.1 路径获取方法

采用CCD图像传感器获取路面标识的图像<sup>[13-14]</sup>,并对由CCD获取的路面标识图像进行预处理,滤掉路面的孔洞和干扰块;对图像每一行从左到右进行扫描,获取标识路径每一行的左边界点和右边界点,求出这2个边界点的中间值作该行扫描后的路径点;最后,依次将路径点连线并提取作为导航基准线,如图5所示。

#### 2.2.2 确定横向偏差和航向偏差

CCD图像中小车实际路径与提取的标识路径的水平距离是小车的横向偏差,用来衡量小车偏离标识路径的程度,以便小车及时修正偏差,使其沿标

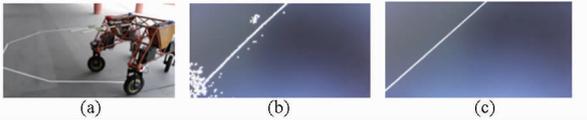


图 5 提取的导航路径

Fig. 5 Navigation path extraction

(a) 原图 (b) 预处理 (c) 处理后

识路径行驶。CCD 图像中导航小车实际路径和标识路径的交角是小车的航向偏差<sup>[15]</sup>, 用来衡量标识路径的弯曲程度, 以此预判车轮的转角和方向, 使小车沿标识路径转向。

### 2.2.3 模糊控制器的设计

横向和航向偏差作为模糊控制的输入量, 本文对四轮独立驱动的农用小车制定一个 7 行 7 列的模糊控制规则表<sup>[16]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 偏差输入与转向输出的模糊控制列表

Tab. 1 Fuzzy control list of deviation input and output

航向 偏差	横向偏差						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	3	3	2	2	1
-2	3	3	3	2	2	0	-1
-1	3	3	1	1	0	-2	-2
0	3	2	1	0	-1	-2	-2
1	2	1	0	-1	-2	-2	-3
2	1	0	-2	-2	-3	-3	-3
3	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3

对于横向偏差控制规则, 当从 CCD 提取的标识路径偏离实际路径左侧最远时, 其横向偏差等级为负大(-3); 当从 CCD 提取的标识路径与实际路径重合时, 横向偏差等级为零(0); 当从 CCD 提取的标识路径偏离实际路径右侧最远时, 其横向偏差等级为正大(3)。航向偏差控制规则与此类似。

输入量偏差和输出量各自分为 7 个等级: 负大(-3), 负中(-2), 负小(-1), 零(0), 正小(1), 正中(2), 正大(3)。

当输入量等级分别处于 -3、-2、-1 时, 其对应的输出量分别是 3、2、1, 此时应使车轮向右转向; 当输入量处于 3、2、1 时, 对应的输出量是 -3、-2、-1, 此时应使小车向左转向; 0 级不用修正。

(1) 如图 6a 所示, 车身在标识路径左方而且行驶方向偏左时, 小车尽量往右转向。

(2) 如图 6b 所示, 车身在标识路径右方而且行驶方向偏左, 由于航向偏差的等级离 0 远一点, 横向偏差抵消了部分的航向偏差, 但是总体还是受航向偏差的影响, 所以最终车头要向右转, 但不需要像图 6a 的转角那么大。

(3) 如图 6c 所示, 车身在标识路径左方而且行

驶方向偏右, 但是由于航向偏差的等级离 0 远一点, 横向偏差抵消了部分的航向偏差, 但是总体还是受航向偏差的影响, 所以最终小车要向左转, 但不需要像图 6a 的转角那么大。

(4) 如图 6d 所示, 车身在标识路径右方而且行驶方向偏右, 所以要求小车转角尽量往左转向。

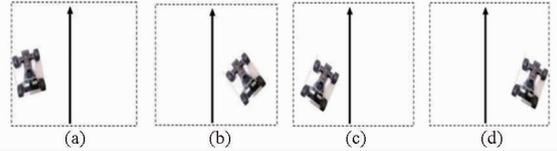


图 6 小车-标识路径相对位置的 4 种场景图

Fig. 6 Car and identify path relative location

(a) 车身和行驶方向都偏左 (b) 车身偏右, 行驶方向偏左 (c) 车身偏左, 行驶方向偏右 (d) 车身和行驶方向都偏右

模糊控制列表的输出量可根据实际情况调整, 其输出量从列表中心向右下角逐渐减小; 从列表中心向左上角逐渐增大。

根据小车转向的输出量, 制定的模糊控制列表, 如表 2 所示。将小车速度输出量从低到高分 4 个等级: 4、5、6、7; 其对应的实际平均速度分别约为: 20、30、35、45 cm/s。小车转弯半径越小, 对应的小车速度就会越小, 在车速控制的模糊列表中, 车轮转向输出的等级离 0 越远, 车速输出就越小。

表 2 转向输出量与速度输出的模糊控制列表

Tab. 2 Fuzzy control list of turn and speed

转向输出	-3	-2	-1	0	1	2	3
速度输出	4	5	6	7	6	5	4

### 2.2.4 Matlab 仿真

结合上述模糊控制器, 采用 Matlab 对车轮转向输出量进行仿真。在命令窗口中输入 fuzzy, 进入模糊工具箱界面, 选定 2 个输入变量, 1 个输出变量, 设定航向偏差、横向偏差与期望转角的隶属度函数。输入设计好的 49 条模糊控制规则, 仿真结果如图 7 所示, 结果说明设计的模糊控制规则符合小车导航要求。

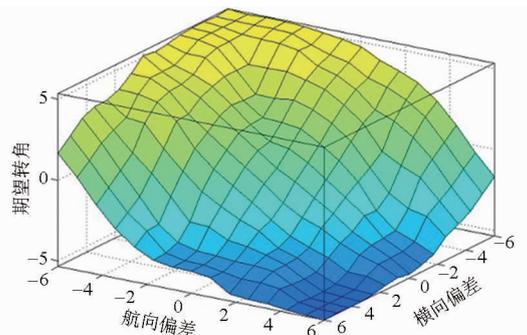


图 7 模糊控制器仿真结果

Fig. 7 Simulation result of fuzzy controller

通过多传感器信息融合得到路径跟踪所需要的航向偏差和横向偏差,然后根据设定的模糊控制规则,得到输出的期望转角<sup>[17-18]</sup>。

### 2.3 爬坡策略

用电子罗盘来检测车头的俯仰角,同时用加速度传感器作辅助,当传感器检测到车身位姿的仰角超过预定值时,增大轮毂电动机驱动力,仰角越大则驱动力越大,从而使小车完成爬坡动作。

### 2.4 避障策略

小车靠近垄头时,会遇有塑料大棚或类似墙等障碍物,采取超声波传感器组检测障碍物<sup>[19-20]</sup>,其方法如下:

(1) 如果4个超声波传感器中有1个传感器测障距离小于预定值 $L_1$ 时,小车将减速。

(2) 如果4个超声波传感器中有2个或者2个以上传感器的测障距离都小于设定值 $L_2$ 时,将刹车减速并转向。

### 2.5 调头转向策略

通过电子罗盘检测小车行驶方向,算法如下:

(1) 当小车将要执行调头动作的时候,记下此时电子罗盘的航向角 $a$ 。

(2) 在小车自转的过程中,电子罗盘不断更新航向角度,航向角记为 $b$ 。

(3) 连续计算 $a$ 与 $b$ 的绝对值 $|b-a|$ 。

(4) 当 $a$ 与 $b$ 的绝对值等于 $180^\circ$ 时,小车完成调头动作,同时将车轮归位到初始位置。

## 3 实验分析

### 3.1 基于 CCD 的路径跟踪导航实验

小车跟踪白色标识路径的实验过程如下:

(1) 小车以 $45\text{ cm/s}$ 左右的速度围绕边长为 $150\text{ cm}$ 的正十二边形白色标识路径行驶。

(2) 通过与摄像头处于同一竖直面的小车车头正中间悬挂滴漏物的方法获取小车的实际行驶轨迹。

(3) 在正十二边形路径上,沿跟踪路径方向,每间隔 $50\text{ cm}$ 测量滴漏物与白色标识路径之间的偏差,以小车前进方向为参照物,滴漏物落在标识路径左边为负值,右边为正值,部分实验数据如表3所示。

(4) 在光线不足的条件下重复上述实验,与光照正常的情况下作对比。

实验现场及其跟踪轨迹如图8所示,得出以下结果:

(1) 小车平均行驶速度为 $45\text{ cm/s}$ 时,平均跟踪偏差为 $7.47\text{ cm}$ ,最大跟踪偏差为 $9\text{ cm}$ (小车平均行驶速度为 $25\text{ cm/s}$ 时,平均跟踪偏差 $6.54\text{ cm}$ ),在现有速度范围内,小车的行驶速度对路径偏差影

表3 跟踪轨迹偏差实验数据

Tab.3 Data of tracking trajectory deviation cm

距离	偏差	距离	偏差	距离	偏差
50	4	550	0	1 300	0
100	5	600	7	1 400	4
150	8	650	3	1 500	7
200	3	700	5	1 600	4
250	2	750	3	1 650	9
300	9	800	0	1 700	4
350	0	900	-2	1 750	7
400	2	1 000	-4	1 800	9
450	6	1 100	1		
500	2	1 200	5		

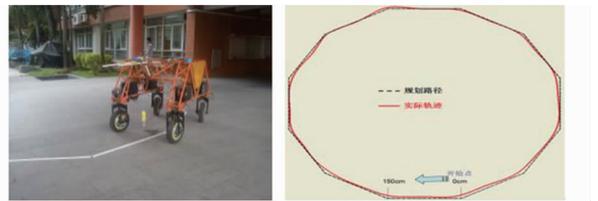


图8 路径跟踪导航实验

Fig.8 Experiment of trajectory tracking navigation

响不大。

(2) 沿直线标识路径行驶时,小车自主导航的路径偏差变化不大,小车行驶平稳;当标识路径的圆弧半径较小时,会产生较大的路径跟踪偏差,圆弧半径越小,路径跟踪偏差越大,甚至难以跟踪。

(3) 滴漏物的轨迹总体偏向于标识路径的内圈,路径跟踪明显存在固定的偏差,后续工作加以补偿即可,不影响总体跟踪效果。

(4) 在光线不足的情况下,将会影响 CCD 识别标识路径,使得小车导航精度下降,甚至无法跟踪。

### 3.2 调头转向、避障和平移导航实验

小车在田垄中作业时,通过超声波传感器检测小车与障碍物之间的距离,当距离小于预定阈值时,小车将减速避障、平移和原地 $180^\circ$ 调头转向。

#### 3.2.1 调头转向实验

通过转向电动机控制4个电动车轮先绕与轮轴垂直的方向原地自转约 $45^\circ$ ,然后启动电动车轮,小车围绕一个同心圆原地调头转向,如图9所示。调头转向实验方法如下:

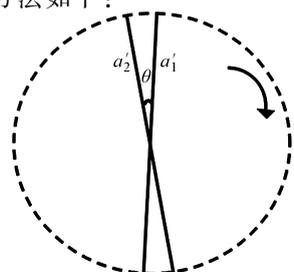


图9 小车调头前后俯视图

Fig.9 Top view before and after vehicle turning

(1) 以首次调头时车头所在的方向作为  $0^\circ$  参考点,接下来的每次实验都顺时针方向增加  $30^\circ$  作为小车调头前的初始方向。

(2) 小车调头前车头中轴线  $a'_1$  与调头后车头中轴线  $a'_2$  之间的夹角  $\theta$ ,为小车调头  $180^\circ$  的误差。

(3) 小车调头超过  $180^\circ$  时,  $\theta$  为正值;小车调头未超过  $180^\circ$  时,  $\theta$  为负值。小车多次调头实验数据如表 4 所示。

表 4 小车  $180^\circ$  调头误差

Tab. 4 Turning error of vehicle

次数	误差/( $^\circ$ )	次数	误差/( $^\circ$ )	次数	误差/( $^\circ$ )
1	-1.2	5	3.1	9	2.3
2	-2.1	6	2.9	10	4.2
3	-3.9	7	-3.5	11	3.3
4	-4.6	8	4.0	12	2.8

由上述实验数据可知:小车完成  $180^\circ$  调头的误差在  $\pm 5^\circ$  之间,待其调头完毕之后可通过对标识路径的跟踪修正小车行驶方向。

### 3.2.2 避障和平移实验

小车行驶的平均速度约为  $25 \text{ cm/s}$ ,如图 10 所示。

(1) 避障:超声波传感器检测到障碍物后,启动减速刹车指令,设定的超声波传感器感知的阈值为  $120 \text{ cm}$ ,实测小车与障碍物间的平均距离为  $113 \text{ cm}$ ,平均偏差  $7 \text{ cm}$ 。

(2) 平移:通过转向电动机控制 4 个电动车轮先绕与轮轴垂直的方向原地自转约  $90^\circ$ ,然后启动电动车轮,小车横向平移。通过设置小车行驶速度、时间调整平移距离。本实验平移距离较短,产生的偏差很小,在  $3 \text{ cm}$  以内。

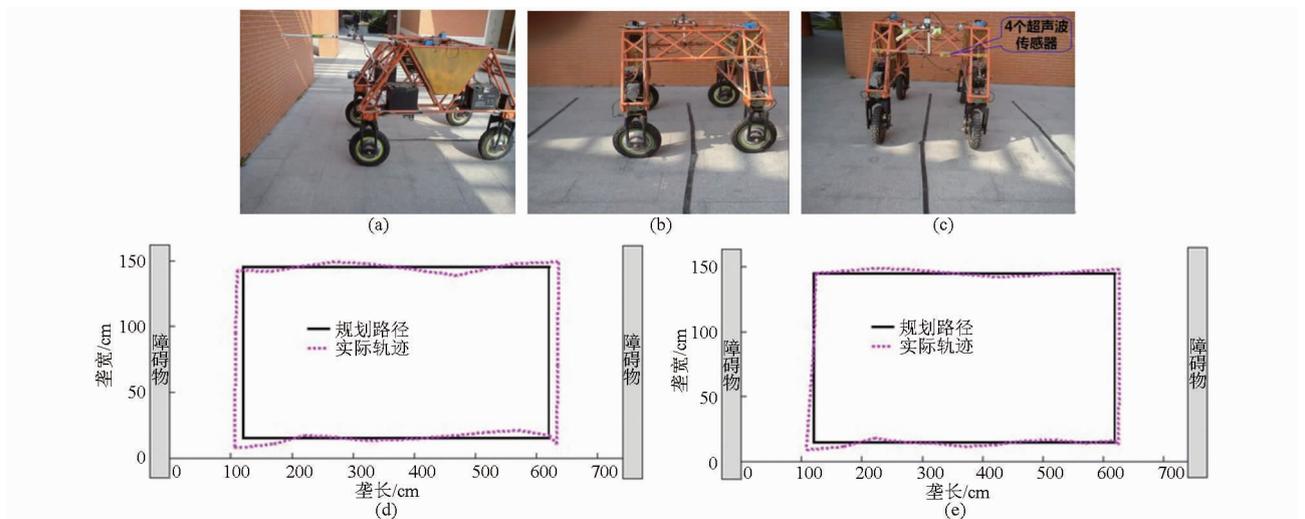


图 10 调头转向、避障和平移实验结果

Fig. 10 Experiment of turning, obstacle avoidance and translation

(a) 减速避障 (b) 垄间平移 (c) 完成  $180^\circ$  调头 (d) 改进前导航轨迹 (e) 改进后导航轨迹

### 3.3 爬坡实验

通过电子罗盘和加速度传感器得到小车的俯仰角。表 5 的实验数据记录了小车行驶的坡度与轮毂

表 5 爬坡实验数据

Tab. 5 Experimental data of climbing

坡度/( $^\circ$ )	轮毂电动机	车速
	驱动电压数字量	/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
[0,0.5)	176	30.0
[0.5,1.5)	192	33.0
[1.5,2.5)	208	35.1
[2.5,3.5)	224	37.5
[3.5,4.5)	240	41.6
[4.5,5.5)	256	40.6
[5.5,6.5)	272	41.6
[6.5,7.5)	288	44.6
[7.5,8.5)	304	41.9
[8.5, $\infty$ )	320	38.5

电动机的驱动电压以及车轮速度对应关系,变化规律如图 11 所示。

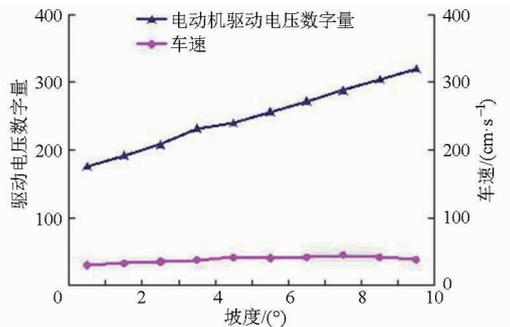


图 11 爬坡实验结果

Fig. 11 Curves of climbing

实验数据表明:小车在爬坡的过程中,随着坡度的增大而不断地自主加大轮毂电动机驱动电压,小车有足够的动力使其恒速度行驶,始终保持在约

40 cm/s的速度平稳爬坡。

## 4 结束语

通过优化配置多源传感器和构建农用小车的导航系统,采用模糊控制和多源传感器信息融合算法,实现了小车标识路径的跟踪导航、爬坡、避障、调头

转向等功能。导航实验结果表明,本文设计的导航系统及提供的算法性能稳定可靠,并能提供冗余的姿态信息。小车的行驶速度在 45 cm/s 时,路径跟踪平均偏差为 7.47 cm,误差最大值不超过 9 cm。小车能爬过 10°左右的斜坡,适合在缓坡和田垄起伏不平的农田作业,并实现自主路径跟踪导航。

## 参 考 文 献

- 田光兆,安秋,姬长英,等.基于立体视觉的智能农业车辆实时运动检测[J].农业机械学报,2013,44(7):210-215.  
Tian Guangzhao, An Qiu, Ji Changying, et al. Real time motion detection for intelligent agricultural vehicle based on stereo vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):210-215. (in Chinese)
- 姬长英,周俊.农业机械导航技术发展分析[J].农业机械学报,2014,45(9):44-54.  
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):44-54. (in Chinese)
- 郑天鹏,陈军,夏文斌.基于红外触发的农业机器人超声波定位系统研究[J].农机化研究,2011,33(6):133-136.  
Zheng Tianpeng, Chen Jun, Xia Wenbin. Research on ultrasonic positioning system of agricultural robot based on infrared trigger [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(6):133-136. (in Chinese)
- 李光辉.移动机器人自主定位与导航构图研究[D].北京:北京建筑工程学院,2012.
- 吴琳.基于路标的室内机器人视觉导航技术研究[D].沈阳:东北大学,2007.  
Wu Lin. Based on the sign of indoor robot visual navigation technology research [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007. (in Chinese)
- 马志强.基于GPS与GPRS的车载终端的设计[D].武汉:武汉理工大学,2012.  
Ma Zhiqiang. Based on the design of vehicle terminal based on GPS and GPRS [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 王李军.GPS接收机抗干扰若干关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2006.  
Wang Lijun. Some key technologies used in GPS receiver anti-jamming [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- 罗锡文,区颖刚,赵祚喜,等.农用智能移动作业平台模型的研制[J].农业工程学报,2005,21(2):83-85.
- 陈懂,刘榕,金世俊,等.智能小车的多传感器数据融合[J].现代电子技术,2005,6(3):3-4.  
Chen Dong, Liu Rong, Jin Shijun, et al. The intelligence car of the multi-sensor data fusion [J]. Journal of Modern Electronic Technology, 2005,6(3):3-4. (in Chinese)
- 杨万海.多传感器数据融合及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- 房波.割草机器人多传感器融合与导航技术的研究[D].大连:大连理工大学,2007.  
Fang Bo. Mowing robot multi-sensor fusion and navigation technology research [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 刘国良,强文义.移动机器人信息融合技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(7):802-805.  
Liu Guoliang, Qiang Wenyi. Mobile robot information fusion technology research [J]. Journal of Harbin Industrial University, 2003,35(7):802-805. (in Chinese)
- Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25(1-2):169-194.
- 张方明.田间路径识别算法和基于立体视觉的车辆自动导航方法研究[D].杭州:浙江大学,2006.  
Zhang Fangming. Field path recognition algorithm and method of vehicle automatic navigation based on stereo vision research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 王檀彬,陈无畏,焦俊,等.多传感器融合的智能车辆导航研究[J].中国机械工程,2009,20(11):1381-1384.  
Wang Tanbin, Chen Wuwei, Jiao Jun, et al. Study on navigation of intelligent vehicles based on multi-sensor fusion [J]. China Mechanical Engineering, 2009,20(11):1381-1384. (in Chinese)
- 周建军,张漫,汪懋华,等.基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J].农业机械学报,2009,40(4):151-156.  
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Based on the fuzzy control of agricultural vehicle route tracking [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):151-156. (in Chinese)
- 李磊.基于MATLAB GUI的数字图像处理技术[M].成都:成都理工大学出版社,2012.
- Sidney Cox. information technology: the global key to precision agriculture and sustainability [C] // Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Sciences 2000 Session 6: Technology Innovation and Sustainable agriculture, 2000: 15-07.
- Chose H, Niigata K, Lazar N A. The arc-transversal median algorithm: a geometric approach to increasing ultrasonic sensor azimuth accuracy [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3): 513-522.
- Duo R C, Phang S H H, Su K L. Multilevel multisense based decision fusion for intelligent animal robot [C] // Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001,4: 3294-3299.