

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.032

农用开放式智能移动平台研制*

顾宝兴 姬长英 王海青 田光兆 郑青根 王 玲

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

【摘要】 研制了一种作为农田智能化作业前提和基础的农用履带式智能移动平台。该平台主要包括机械系统和控制系统。移动平台能够实现田间自主导航,且具有一定的开放性,可满足农田多种智能化作业的要求。用VC++6.0编写了自主导航控制程序,开发了人机交互界面。样机在江苏省丰县果园进行了导航实验。结果表明:在组合导航模式下,该智能移动平台自主导航性能稳定,直线路径最大跟踪误差为0.05 m,曲线路径最大跟踪误差为0.11 m。

关键词: 智能移动平台 导航 双目立体视觉

中图分类号: TP391.41; TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0173-06

Development of Agricultural Opening Intelligent Mobile Platform

Gu Baoxing Ji Changying Wang Haiqing Tian Guangzhao Zheng Qinggen Wang Ling

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

Abstract

The agricultural intelligent mobile platform is the premise and basis of farmland intelligent operation, so a prototype of agricultural intelligent operation was developed. It was consisted of mechanical system and control system. The mobile platform can navigate autonomously. It showed a certain openness which could meet various requirement of farmland intelligent operations. The autonomous navigation program and human-machine interface were programmed with VC++6.0. The field navigation tests of the prototype were carried out in the orchard of Feng county in Jiangsu province. Results revealed that this platform performed well in the integrated navigation mode and the error was 0.05 m during straight path movement, whereas in curved path the error increased to 0.11 m.

Key words Intelligent mobile platform, Navigation, Binocular stereo vision

引言

履带式移动平台具有接地比压小、行走不易打滑、容易实现原地转向、越野机动性能和越障性能好等优点,因此在农业机械、工程车辆和军工车辆等领域得到广泛应用^[1~2]。

目前,国内外许多研究人员已在履带式移动平台方面作过相关研究。如美国 IRobot 公司研制的便携机器人 Packbot 系列^[3],该机器人具有较好的

抗冲击能力和防水能力;Inuktun 公司开发了一种履带式可变形侦察机器人^[4],该机器人在行驶过程中可改变履带形状,此特性可增强机器人越障性能;此外,德国 TEODOR 公司研制的 MV4^[5]以及加拿大 Sherbrook 大学研制的 AZIMUT^[6]等均为国外优秀成果的代表。国内相关研究起步较晚,但经过努力,也取得了一些进展^[7~8]。如中科院沈阳自动化所研制的“灵晰-B”型排爆机器人^[9];清华大学精密仪器系及其自动化实验室设计的微小型 QH-1 型履带

收稿日期: 2011-01-11 修回日期: 2011-02-05

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z259)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201006)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ09030)

作者简介: 顾宝兴,博士生,主要从事农业机器人、机器视觉和机电一体化研究,E-mail: gbx6454@163.com

通讯作者: 姬长英,教授,博士生导师,主要从事机电一体化、农业机器人和土壤机械研究,E-mail: chyji@njau.edu.cn

式机器人^[10]等。从以上国内外研究成果看,研究主要集中在军事和安防领域,为了便于携带,这类履带式移动平台整机质量一般不超过 40 kg,但越野机动性和越障性能要求很高,而且结构复杂,成本昂贵。

农用履带式智能移动平台作业路面相对比较平坦,越野机动性和越障性能没有军事或安防领域要求那么严格,因此在满足农田作业要求前提下,移动平台力求结构简单,成本低廉。综上所述,现有研究成果并不适合作为农用智能移动平台。

为了解决以上问题,本文结合农田常规作业要求,提出一种农用履带式智能移动平台设计方案。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

农用履带式智能移动平台由机械结构和控制系统两大部分组成。机械结构主要包括履带式行走装置、机架、固定平台、减速器等。控制系统主要包括工控机、运动控制卡、双目摄像机、IEEE-1394 型转接卡、GPS、AHRS、编码器、电动机驱动器以及控制电路等,具体结构如图 1 所示。

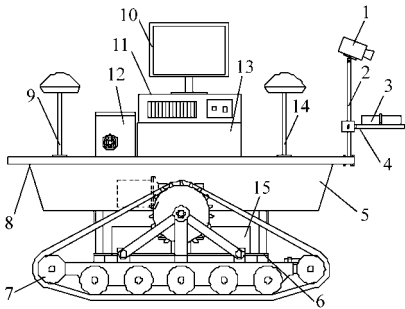


图 1 履带式智能移动平台结构简图

Fig. 1 Structure of caterpillar intelligent mobile platform

1. 双目摄像机 2. 摄像机机架 3. AHRS 4. AHRS 固定座
5. 前箱体 6. 机架 7. 履带式行走装置 8. 固定平台 9. GPS 接收机 I 10. 显示器 11. 工控机 12. 电动机驱动器 13. 电气控制柜 14. GPS 接收机 II 15. 锂电池系统

1.2 工作原理

智能移动平台工作时,双目立体视觉系统采集路面图像,主控制器工控机通过串口分别读取 AHRS 的航向信息和 GPS 的位置坐标及航向信息,然后由主控制器对所采集的数据进行分析和决策计算,求出移动平台到达目标位姿所需的航向角、横向偏差等导航参数。根据移动机器人逆运动学模型,可求出到达目标位姿两个驱动轮所需的转角,再结合减速器减速比、伺服驱动器电子齿轮比以及编码器的分辨率即可推算出到达目标位姿各驱动电动机所需的控制脉冲速度和脉冲量。运动控制卡根据主控制器要求的脉冲速度和脉冲量向伺服驱动器发送

控制脉冲,完成移动平台的前进、后退、转向等动作。

当主控制器通过双目摄像机检测到农田作物行特征逐渐减少至消失,同时 GPS 检测到智能移动平台中心点坐标已到达地头,主控制器调用转向控制函数,移动平台完成地头自动转向。当系统再次检测到作物行特征时,移动平台继续跟踪行特征,并结合 AHRS 与 GPS 的数据信息,继续执行自主导航动作过程。

1.3 主要技术参数

根据农田常规作业运输承载的实际需要,按最大坡度 40°、上坡载荷 300 kg 计算,动力采用 4 kW 的安川电动机。移动平台主要技术参数如表 1 所示。

表 1 性能指标和技术参数

Tab. 1 Performance indexes and technical parameters	
参数	数值
驱动电动机功率/kW	4
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	2 200×1 200×1 200
整机质量/kg	≤500
前进速度/m·s ⁻¹	≤1.0
爬坡角度/(°)	≤40
最小转弯半径/mm	0
水平载荷/kg	≤450
上坡载荷/kg	≤300

2 主要工作部件

2.1 履带式行走装置

为获取准确的行驶路径和障碍物距离等信息,双目摄像机采集图像时应尽可能减小移动平台行驶过程中的振动。为此,在满足强度要求前提下,采用减震性能较好的橡胶履带。另外,为避免橡胶履带与钢制驱动轮配合造成橡胶履带磨损过快的缺陷,驱动轮也采用超高分子聚乙烯材料。

履带式行走装置结构如图 2 所示,由电动机驱动,系统只需改变驱动器设置,便可实现直流供电和交流供电的切换,大大减少某些农田环境没有三相交流电的使用限制。

2.2 传动系统

移动平台的动力传递路线如下:首先由电动机将动力传递给减速器,然后由减速器输出轴将动力传递给驱动轮,最后再由驱动轮将动力传递给橡胶履带,具体结构如图 3 所示。

减速器输入轴的轴端加工成带键槽的内孔,孔径按驱动电动机输出轴尺寸定制。减速器输出轴加

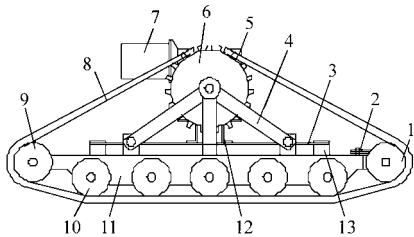


图 2 履带式行走装置结构简图

Fig. 2 Structure sketchers of caterpillar moving device

1. 张紧轮 2. 张紧机构 3. 支撑板 4. 轴承座支撑架 5. 减速器 6. 驱动轮 7. 安川电动机 8. 橡胶履带 9. 导向轮 10. 承重轮 11. 履带支撑梁 12. 减速器固定座 13. 横梁

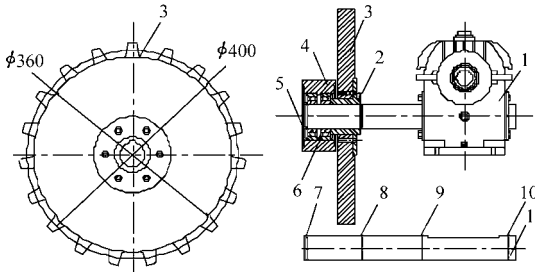


图 3 传动系统结构简图

Fig. 3 Structure of drive system

1. 减速器 2. 联接法兰 3. 驱动轮 4. 轴承座 5. 橡胶密封盖 6. 深沟球轴承 7. 卡簧槽 I 8. 卡簧槽 II 9. 卡簧槽 III 10. 卡簧槽 IV 11. 驱动轴

工成带键槽的空心轴,驱动轴尺寸根据空心轴相关尺寸定制。这种结构设计可省掉 2 个联轴器,降低设备制造成本,简化驱动电动机与减速器、减速器与驱动轴之间传动结构设计。

3 控制系统设计

3.1 硬件设计

根据农用智能移动平台作业要求和开放式设计理念,设计了如图 4 所示的开放式农用智能移动平台控制系统。该控制系统采用上位机和下位机 2 层结构,上位机采用工控机,下位机采用四轴运动控制卡。智能移动平台只需使用运动控制卡的两轴,其他两轴可作为功能拓展,若拓展所需自由度较多,可更换自由度较多的控制卡,也可使用 CAN 总线控制技术,利用总线多个节点来实现多自由度执行机构的控制。

3.1.1 上位机控制器和下位机控制器

控制系统的上位机控制器为研华 IPC610-H 型,其 CPU 为 Core2 双核,主频为 2.66 GHz,内存 2 GB,主板为工业级主板 AIMB-766。下位机控制器采用研华 PCI240U 型高速四轴运动控制卡,其配备内容丰富、功能强大的运动控制函数库,用户可方便地完成电动机的运动控制。

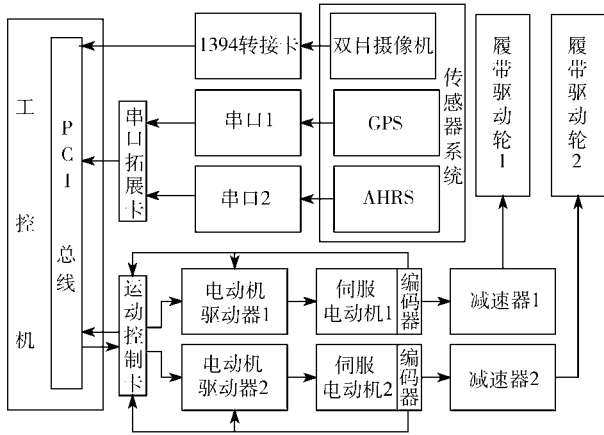


图 4 控制系统结构框图

Fig. 4 Structure diagram of control system

3.1.2 传感器系统

传感器系统主要由双目摄像机、AHRS、GPS、编码器等组成。双目摄像机采用 Point Grey Research 公司生产的 Bumblebee2,其焦距为 3.8 mm,基线长 120 mm。摄像机通过 IEEE-1394 转接卡与计算机进行数据传输。AHRS 采用 INNALABS 公司生产的 AHRS-M2。该系统可在三维空间测量移动平台的航向角、俯仰角。特别设计的软件可对 AHRS 进行磁场校准,消除移动平台铁质材料造成的磁场偏移。GPS 采用 JAVAD 公司的产品,接收机型号为 DELTA-G2T 和 DELTAD-G2D,接收机天线型号为 GPS702-GG。基准站 PCC 电台型号为 PDL35W,移动站 PCC 电台型号为 PDL2W。该系统既可实现精确定位也可实现精确测向,位置数据、航向数据的更新率均为 50 Hz。差分定位精度为厘米级,航向精度为 $(0.2/L)^{\circ}$, L 为天线间距^[11]。

3.1.3 电动机驱动系统

以往日产伺服驱动器供电多采用三相 380 V 转三相 200 V 的三相隔离变压器,这种变压器不仅笨重,而且发热量大,能耗高。本设计中采用最新研制的智能伺服变压器,驱动电路如图 5 所示。实验表明,这种智能伺服变压器完全满足使用要求,而且使移动平台总体质量减小 25%,变压器本身成本降低 50%,整个平台能耗也随之降低 30% 左右。

3.2 软件设计

多线程处理不仅使程序的响应速度更快,而且可分别设置各个线程的优先级,还可随时停止某一个或几个线程,因此程序设计方便灵活。鉴于以上优点,本平台控制系统软件的设计也采用多线程设计思想,程序流程图如图 6 所示。图 6 中 2 个虚线框所述的控制策略详见图 7。

在视觉导航控制中,摄像机采集路面图像后,系统首先对图像进行灰度化,采用最大类间方差法进

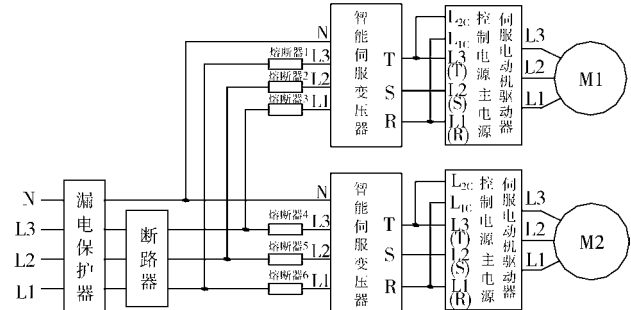


图 5 伺服电动机驱动电路

Fig. 5 Driver circuit of servo motor

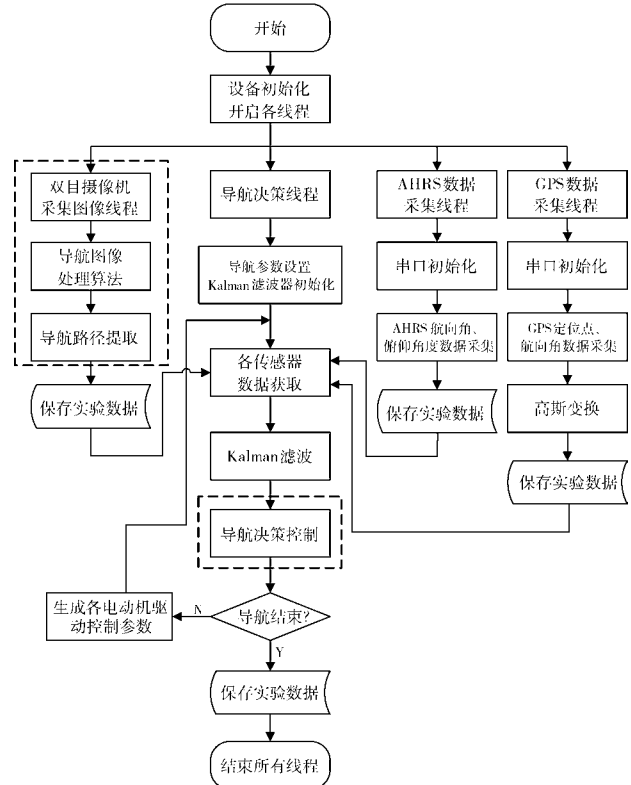


图 6 上位机程序流程图

Fig. 6 Flow chart of program of upper computer

行阈值分割,接着采用 Sobel 算子对二值图像进行边缘检测,提取导航所需的离散中心点簇(图 8 中的虚线),然后用 Hough 变换检测导航中心线。根据 AHRS 检测的航向信息和双目摄像机采集的图像信息,上位机可推算出移动平台的横向偏差,进而推算出移动平台两个驱动电动机的转速。最后由上位机将转速信号换算成电动机的控制脉冲速度和脉冲量,并通过运动控制卡将脉冲信号发送至伺服驱动器,最终完成平台的导航控制。

视觉导航受光线影响较大,精度相对较低,但避障灵活。GPS 对光线影响不敏感,在无遮挡情况下导航精度高,但无法灵活避障。组合导航模式能够取长补短,具体实现流程如图 7b 所示。

控制系统的人机交互界面如图 8 所示。系统控

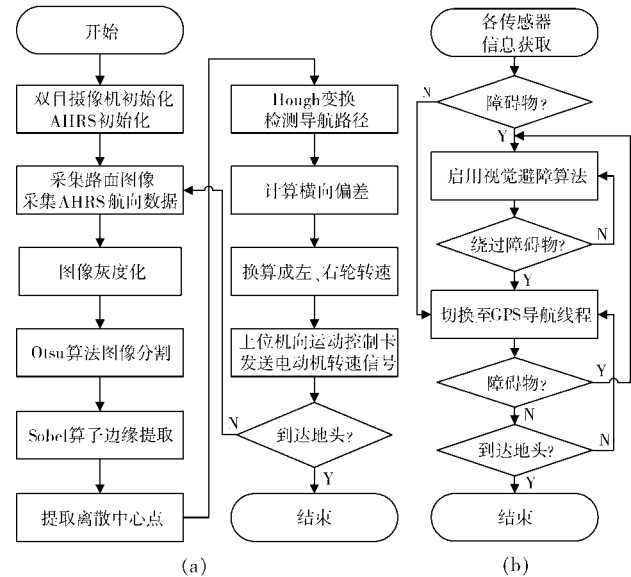


图 7 导航控制策略流程图

Fig. 7 Flow chart of navigation control strategy

(a) 视觉导航控制 (b) 组合导航控制

制软件设计成自主导航和手动控制 2 种模式,自动导航模式设计了 3 种子模式:视觉导航、GPS 导航和组合导航。手动控制模式操作方法有 2 种:通过鼠标点击控制界面上的动作控制按钮和手动控制键盘上的方向键,进而实现运动控制函数的调用,完成移动平台前进、后退、转向和停止动作。



图 8 控制系统人机界面

Fig. 8 Human-computer interface of control system

4 实验与分析

实验地址选在江苏省丰县大沙河镇,具体实验环境与平台如图 9 所示。实验时间为 2011 年 10 月 16、18 日。双目摄像机采集的图像大小为 640 × 480 像素, AHRS 和 GPS 数据传输速度均设为 115 200 b/s,图像处理的算法实现、传感器系统的信号采集以及移动平台运动控制等所有软件程序及人机交互界面的开发均在 VC + +6.0 中进行。

导航实验测试的内容主要有:智能移动平台是



图 9 农用履带式智能移动平台

Fig. 9 Agricultural caterpillar intelligent mobile platform

否能够完成自主导航;智能移动平台的导航精度与路径跟踪的鲁棒性;智能移动平台的操控性和爬坡能力。

图 10 中的曲线为果树行中心线,点 1、4、5 为移动站 GPS 采集的基准点,点 2 为移动站 GPS 采集的移动定位点。点 1 与点 4 确定的直线设为 k ,点 2 与点 3 确定的直线设为 m ,直线 k 与直线 m 相互垂直。移动定位点到理想行走路径的距离为移动平台的横向偏差 δ 。点 4 到点 6 之间的圆弧半径为 R (R 为行间距的 $1/2$),点 5 为圆弧的圆心,点 3 的坐标设为 (x,y) ,其他点 n 的坐标设为 (x_n,y_n) 。

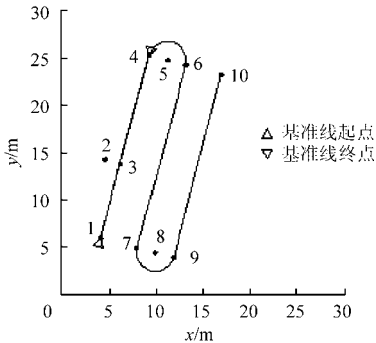


图 10 果树行中心线

Fig. 10 Center line of fruit trees

由以上条件可知直线 k 与 m 的方程分别为

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_4 - y_1}{x_4 - x_1} \tag{1}$$

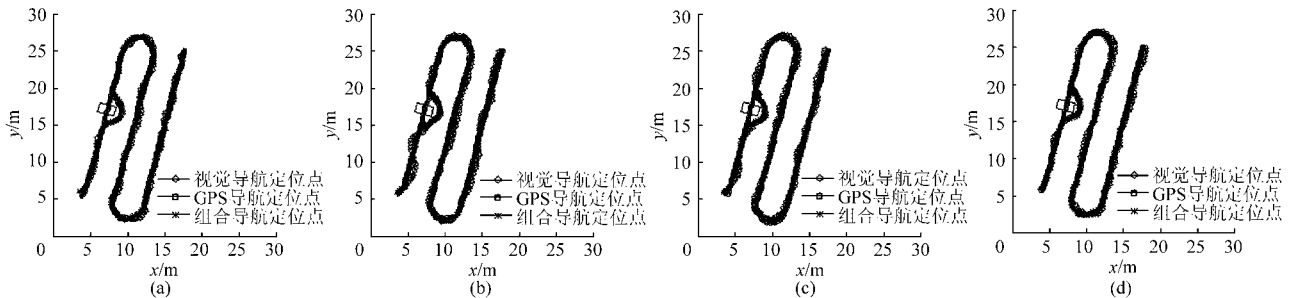


图 11 导航路径

Fig. 11 Navigation path

(a) 16 日、上午、阴天 (b) 16 日、下午、阴天 (c) 18 日、上午、晴天 (d) 18 日、下午、晴天

$$\frac{y - y_2}{x - x_2} \frac{y_4 - y_1}{x_4 - x_1} = -1 \tag{2}$$

联立式(1)和(2),解方程组,可得

$$x = \frac{(x_4 - x_1)^2 x_2 + (y_4 - y_1)^2 x_1 + (y_2 - y_1)(y_4 - y_1)(x_4 - x_1)}{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} \tag{3}$$

$$y = y_1 + \frac{(y_4 - y_1)^2 (y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)(y_4 - y_1)(x_4 - x_1)}{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} \tag{4}$$

由于点 1、2、4 为 GPS 采集的定位点,所以 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_4, y_4) 为已知点。由式(3)和式(4)可求出点 (x, y) 。

当移动平台在点 1 与点 4 之间移动时,横向偏差为

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \tag{5}$$

当移动平台在点 4 与点 6 之间移动时,点 5 为移动站 GPS 采集的基准点(已知),横向偏差为

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_5)^2 + (y_2 - y_5)^2} - R \tag{6}$$

图 10 中其他点的坐标值无需 GPS 测得,可由行间距、行长度以及已知点 1、4、5 坐标来推算,多行路径跟踪横向偏差的计算方法以此类推。

图 11 分别为 2011 年 10 月 16 日和 2011 年 10 月 18 日不同时段、不同天气条件、3 种导航模式下移动平台的行走路径,实验时移动平台的前进速度为 0.5 m/s。图 11 中的矩形框为实验时放置的绿色纸箱(作为障碍物)。视觉导航模式下行走路径是由 GPS 测量的定位点生成(此时 GPS 只用来测量行走路径,并未参与导航)。在组合导航模式下,当双目视觉系统检测到前进方向无障碍物时,系统自动切换到 GPS 导航模式。如果双目视觉系统检测前进方向有障碍物且平台距离障碍物小于等于 2 m,障碍物高度大于 22 cm(离地间隙为 23 cm)时,系统自动切换到视觉导航模式。此时,主控制器便会将

检测的障碍物长度、宽度、高度、距离平台的深度、相对小车的方位、路面宽度以及 GPS 与 AHRS 检测的平台当前位姿等信息进行分析计算。如果计算结果显示可以避障,主控制器便会根据以上信息进行避障的路径规划,移动平台绕过障碍物后系统再次自动切换至 GPS 导航模式。如果计算结果显示无法避障,平台自动停在原地,并向远程监控客户端发出警报。如此往复,直到导航结束。

由图 11、12 可看出,视觉导航模式下的晴天下午和阴天上午光线较好,导航效果较好,而晴天上午和阴天下午光线分别太强和太暗,导航效果欠佳;

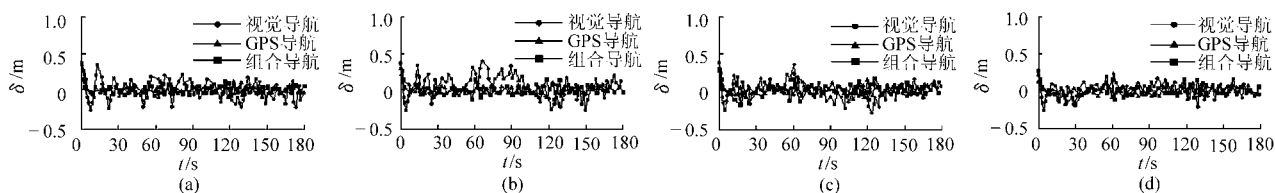


图 12 路径跟踪误差

Fig. 12 Error of tracking path

(a) 16 日、上午、阴天 (b) 16 日、下午、阴天 (c) 18 日、上午、晴天 (d) 18 日、下午、晴天

5 结论

(1) 根据农田智能化作业的需要,开发了农用履带式智能移动平台的机械本体,该平台具有结构简单、质量小、行驶平顺、动作灵活、爬坡能力强等优点。

(2) 开发了农用开放式智能移动平台控制系统,并在 VC++6.0 中编写了自主导航控制程序和人机交互界面。

(3) 移动平台能够实现自主导航,而且具有一

定的开放性。在不同季节,只需更换不同的执行机构和控制程序,智能移动平台便可实现除草、喷药、施肥等多种智能化作业,大大提高智能移动平台的综合利用效率。

(4) 在组合导航模式下,系统综合了视觉导航避障灵活和 GPS 导航精度高的优点,克服了视觉导航对光线敏感、导航精度低的缺点,也解决了单纯依靠 GPS 导航无法灵活避障问题,从而为农田非结构化环境下的作业提供一种可行的自主导航方案。

参考文献

- 1 罗均,谢少荣,翟宇毅,等. 特种机器人[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- 2 陈淑艳,陈文家. 履带式移动机器人研究综述[J]. 机电工程,2007,24(12):109~112.
Chen Shuyan, Chen Wenjia. Review of tracked mobile robots[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2007,24(12): 109~112. (in Chinese)
- 3 Yamauchi B M. PackBot: a versatile platform for military robotics [C] // Unmanned Ground Vehicle Technology VI, Proceedings of SPIE, 2004, 5422: 228~237.
- 4 Kim Jeehong, Lee Changgoo, Kim Gunho. Study of machine design for a transformable shape single-tracked vehicle system [J]. Mechanism and Machine Theory,2010,45(8): 1 082~1 095.
- 5 莫海军,吴少伟. 排爆机器人及相关技术[J]. 机器人技术与应用,2005(4):31~36.
- 6 François Michaud, Dominic Létoirneau, Martin Arsenault, et al. Multi-modal locomotion robotic platform using leg-track-wheel articulations [J]. Autonomous Robots,2005,18(2): 137~156.
- 7 周俊,程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报,2011,42(8):154~158.
Zhou Jun, Cheng Jiayu. Moving obstacle detection based on machine vision for agricultural mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(8):154~158. (in Chinese)
- 8 陈无畏,王檀彬,焦俊,等. 基于信息融合的多智能体混合体系智能车辆导航[J]. 农业机械学报,2011,42(6):1~5.
Chen Wuwei, Wang Tanbin, Jiao Jun, et al. Design and application for navigation multi-agent of intelligent vehicle based on information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):1~5. (in Chinese)

(下转第 187 页)

- 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 Francis. Intrinsic surface properties from surface triangulation [C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 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, Deroose 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导航系统[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)