

# 水草全自动清理船控制系统\*

刘会贵<sup>1</sup> 赵德安<sup>1,2</sup> 孙月平<sup>1</sup> 张军<sup>1</sup> 吴波<sup>1</sup>

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 机械工业设施农业测控技术与装备重点实验室, 镇江 212013)

**摘要:** 为了满足河蟹养殖对水草定期修剪清理的要求以及提高水草收割的效率,设计了一种基于 ARM 的中小型智能化 GPS 自主导航的水草清理船,阐述了其割收一体化的机械结构与工作原理,以及无舵明轮推进器、回旋式切割装置、割深自动调节器的结构特点。采用智能移动机器人 PI 与 PD 控制和高精度 GPS 导航控制等技术,设计了其 GPS 自主导航控制系统。实验结果表明,该船的直线航迹误差控制在  $\pm 30$  cm 范围内。在满足收割要求的基础上,能够有效避免偏航导致的重复切割或漏割。

**关键词:** 河蟹养殖 水草清理船 GPS 导航

**中图分类号:** TP242.6; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0281-06

## 引言

河蟹养殖多采用种草养殖的模式,水草的种植与维护对于养殖河蟹的成败起着关键作用。水草不仅是河蟹栖息、避敌、蜕壳的场所,也是河蟹喜食的饵料,同时还可以增加水中的溶解氧,降解水中有害物质,吸附重金属,净化水质。但是,每年的5月至9月高温时段,水草生长迅速,覆盖面积大,露出水面的水草会阻碍波浪的产生,不利于空气中的氧气进入水体;水草末端也容易死亡腐败,易导致水质恶化。为解决上述问题,目前普遍采用人工收割的物理方法来清理水草。但由于人工收割效率低下,费时费力,因此机械清理就成为理想的水草清理方式<sup>[1]</sup>。目前,国内外市场出现了一些典型产品,但都存在一些局限性。例如,美国的 Advanced Aquatics Company 公司生产的多功能水草收割船,是一种大型机械,不适用于中小型水域的水草收割;美国的 Joshua Britton 水草收获系统,割收分开,漏收率高,易造成二次污染<sup>[2]</sup>;宁波农业机械研究所研制的 WH1800 型河道清草机,以螺旋桨作为推进器,不仅易缠绕水草而且不适合在浅水域工作<sup>[3]</sup>。内蒙古农业大学研制的 9GSCC-1.4 型水生植物收割机船队以及上海电气集团现代农业装备成套公司开发的 GC2230 型河道割草保洁船,均采用人工操作,自动化程度不高<sup>[4-7]</sup>。关于船舶自动控制系统的研究也不多<sup>[8-15]</sup>。其中,天津大学研制的 GPS 导

航无人测绘船<sup>[8]</sup>采用了较为复杂的 Bang-Bang 控制算法,但其跟踪偏差较大,跟踪效果一般。为了满足中小型水域河蟹养殖对水草的定期清理以及提高水草收割的效率,降低重割率和漏割率,本文设计一种适用于河蟹养殖的中小型智能化高精度 GPS 导航的无舵明轮驱动水草清理船。

## 1 结构与原理

### 1.1 总体结构

全自动水草清理船主要由船体、明轮推进器、切割装置、输送装置与割深调节器等组成,其本体结构如图 1 所示。为实现割收连续工作,船体采用单体船式,具有排水量大、吃水深度小等优点。由于水上作业对船速要求不高,为了在满足浮力的同时降低阻力,船头以及船尾都采用撬型结构,船体前端配置水草切割装置,船体中间为集草舱,船体两侧使用明轮推进,船体尾部配置 48 V 锂电池以及用于投饵喂料的自动投饵机,可以降低重心,提高船的稳定性。主要技术参数如表 1 所示。

### 1.2 工作原理

水草清理船到达工作区域后,按照规划好的路径开始工作,根据传感器采集到的经纬度、船速、航向角、割深、吃水深度、障碍物距离等信息,实时调节航向角、转速、割台高度,启动切割与传送装置。然后以船的作业速度前行,进行切割、打捞、滤水、收集水草。当水草集满后,将切割装置抬离水面,并自动

收稿日期: 2014-07-26 修回日期: 2014-08-25

\* 江苏省科技支撑计划(农业)资助项目(BE2013402)和江苏高校(农业工程)优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘会贵,硕士生,主要从事水产养殖智能机器人研究,E-mail: liuhuigui123@163.com

通讯作者: 赵德安,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化技术研究,E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

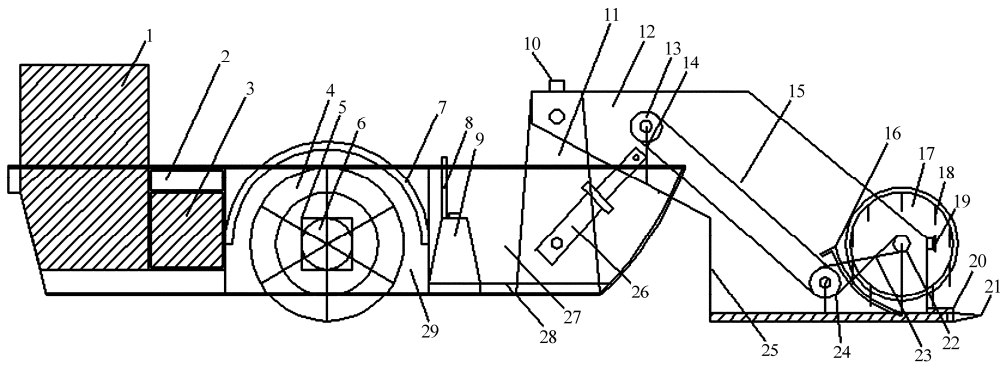


图1 水草清理船本体结构图

Fig.1 Structure diagram of aquatic plant cleaning ship body

1. 自动投饵机 2. 中央控制器 3. 锂电池 4. 明轮推进器 5. 减速装置 6. 无刷直流电动机 (BLDCM) 7. 防水保护壳 8. 导水管 9. 水泵 10. 超声波传感器 11. 切割固定架 12. 割台 13. 上端齿轮 14. 支撑杆 15. 网状传输带 16. 水草挡板 17. 滚筒 18. 滚筒链齿 19. 视觉传感器 20. 水位传感器 21. 不锈钢割刀 22. 滚筒转轴 23. 交叉皮带 24. 下端齿轮 25. 割草机支架 26. 割深调节器 27. 集草舱 28. 滤水挡板 29. 船体

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
配套动力/kW	3.0
明轮动力/kW	1.5
船体尺寸(长×宽×高) /mm×mm×mm	4 000×1 600×700
船航行速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.5
船作业速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.0
割台调节角速度/( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.22
割幅/m	1.5
平均切割面积/( $\text{m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ )	100
输送带线速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.0~1.5
割深范围/cm	1~30

返航。

### 1.3 主要结构特点

#### 1.3.1 明轮推进器

由于水下螺旋桨的缠绕问题很难解决而空气螺旋桨的制造工艺和维护要求又较高,本船使用明轮作为推进器,既可防止水草缠绕,又可产生船体两舷侧内旋的水流,将水草集中于割台中央以方便收割,是水草清理船理想的推进器。明轮结构为定蹼式,结构简单,成本较低,并在旋转与非旋转部件间隙处设有防缠绕罩。本船采用带减速装置的无刷直流电动机驱动明轮,通过两侧明轮的转速差控制船的前进、后退以及转向。

#### 1.3.2 切割与输送装置

基于效率的考虑,本船设计了一种回旋式切割装置,刀片沿一个方向运动,利用惯性力切割,无需克服往复式割刀惯性形成的换向阻力,能够大幅度地降低切割装置的功率消耗。其个体切割力为 $1.0\sim 2.5\text{ N}$ ,切割阻力为 $0.5\sim 1.5\text{ N}$ 。该装置安

装在船体前端,方便割收一体化,降低水草漏收率。输送装置包括拨禾轮和输送带。水草通过切割装置分离,由拨禾轮把切断的水草以及附带水上漂浮物等喂入输送带,送入集草舱,最后直接上岸或输送到运输船上。为防止堵刀,输送的速度大于切割的速度。

#### 1.3.3 割深调节器

割深调节器,即割台升降装置,采用无刷直流电动机加蜗轮蜗杆结构,利用无刷直流电动机的调速性能以及蜗轮蜗杆的自锁功能,实现整个割台的上下位移。该装置分为工作模式和保养模式。工作模式下,利用超声波测距传感器,测量船的吃水深度,实现割刀深度的闭环控制,从而控制割深。由于船吃水深度的变化是个缓慢和渐近的过程,因此,该装置对割深调节的速度没有较高要求,采用速度开环控制,其割台调节的角速度为 $0.22\text{ rad/s}$ 。保养模式下,割台自动抬升至水面,将残留在切割装置上的水草收集至水面,减少二次污染。

## 2 控制系统

该水草清理船控制系统的原理如图2所示,主要由微处理器模块、传感器采集模块、运动控制模块和功能执行模块等组成。微处理器模块采用一款基于ARM920T核的低成本高性能32位嵌入式处理器S3C2440作为核心控制器。其将传感器模块采集的数据,经过导航控制算法后,发出控制命令至运动控制模块和功能执行模块执行,并协调控制明轮推进器、割深调节器等多电动机的启停调速或正反转。同时,可以在人工操纵、半自动遥控和全自动控制3种模式中进行切换。传感器采集模块包括GPS模块、AHRS姿态模块以及超声波测距传感器。GPS

模块负责接收解析 GPS 的 UTC 时间、经纬度和地面速率等信息, AHRS 姿态模块负责测量该船的航向角, 超声波测距传感器负责测量吃水深度以及船与障碍物的距离, 以确保水草清理船的安全航行。

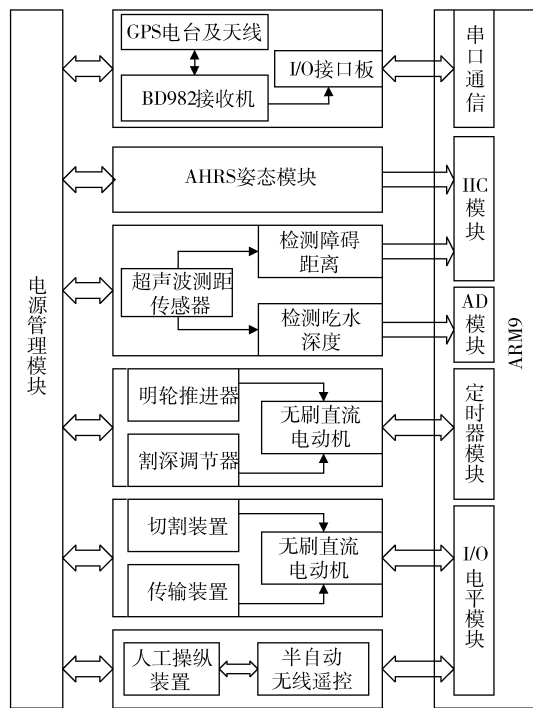


图2 控制系统总体设计框图

Fig.2 Overall design diagram of control system

## 2.1 主要硬件设计

### 2.1.1 微处理器模块

Samsung 半导体公司推出的由 S3C2440 芯片、电源电路、复位电路、晶振电路、JTAG 接口电路以及外围接口电路等组成的微处理器模块, 是整个控制系统的核心。该芯片的工作频率可高达 533 MHz, 处理速度快, 实时性高, 扩展性强。同时 S3C2440 片上资源丰富, 主要包括了 3 通道 UART, 2 通道 SPI, 1 通道 IIC 总线接口, 8 通道 10 位 ADC, 4 通道 PWM 定时器, 60 个中断源以及多路 I/O 口等硬件资源, 能够满足此控制系统的控制功能。

### 2.1.2 导航模块以及传感器模块

导航模块由 GPS 模块和 AHRS 姿态模块组合导航。GPS 模块选用的是 Trimble 公司的 BD982 型高精度 GNSS 接收机模块及其 IO 接口板。其定位精度高, 自带卡尔曼滤波。采用 RTK 定位测量模式, 基站和移动站通过 PDL 电台进行差分测量, 定位精度高达 1 ~ 2 cm。地面速率误差在 0.02 m/s。值得注意的是, GPS 的接收天线易受外界电磁干扰影响, 故应尽量远离强电或开关频率高的功率器件。AHRS 姿态模块采用的是 MPU6050 和 HMC5883L 组合的 9 轴陀螺仪, 其航向角精度误差为 1° ~ 2°。测距传感器模块选择 KS103 型超声波传感器, 其平

均测量精度为 3 mm, 探测频率为 500 Hz。安装在船头、船弦两侧的 KS103 用来避障; 安装在船尾探测方向朝下的 KS103 用来检测船的吃水深度。

### 2.1.3 运动控制模块和功能执行模块

运动控制模块包括明轮推进器和割深调节器。其中明轮推进器采用的是 2 只 48 V/500 W 无刷直流电动机配合行星减速箱, 减速比为 1:10。割深调节器采用的是 48 V/300 W 蜗轮蜗杆无刷直流减速电动机。功能执行模块包括切割装置、传输装置等功能模块, 上述模块均采用无刷直流电动机, 根据控制特性控制输出相应的 I/O 逻辑电平至无刷直流电动机驱动器, 实现电动机的启停及正反转运行, 简化了控制器的设计。

## 2.2 软件设计

船在水中的受力与车在地面上的受力不同。对于船的控制不仅要考虑船体本身的偏差, 还要克服船在水中的惯性作用实现船在水中的准确转弯。船速控制采用 PI(比例-积分)控制, 因为船速在行驶中需要保持不同负载下的转速一致, 加入积分环节能使船舶在进入某一速度的稳态后消除稳态误差。航向控制采用的是 PD(比例-微分)算法。微分环节能够减小航向角的超调量, 克服振荡使其趋于稳定。由于船舶的运动是大惯性系统, 船舶克服偏航误差的变化总是落后于偏航误差变化, 故在引入比例项的同时, 还需要增加微分项来预测误差变化的趋势, 提前抑制误差, 从而避免被控量超调。

本控制系统采用 ADS 1.2 开发环境对 ARM 进行编程, 在软件的体系结构上, 考虑采用分层结构, 如图 3 所示, 整个软件结构划分为信息采集层、运算

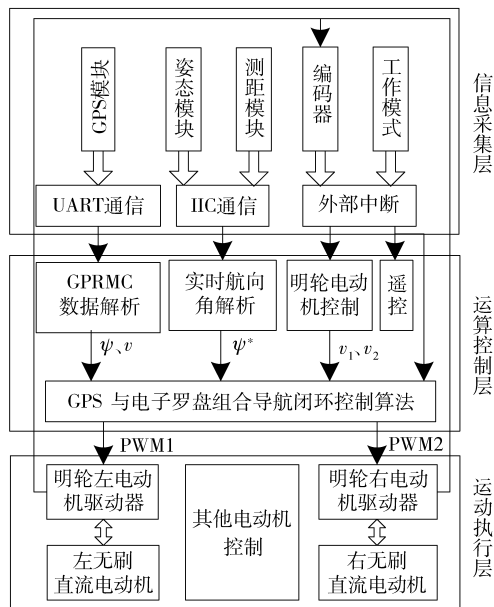


图3 控制系统软件控制框图

Fig.3 Software controls diagram of control system

控制层以及运动执行层。

信息采集层主要是读取系统正常运行时 GPS 的 GPRMC 数据格式、姿态模块的实时航向角  $\psi^*$  以及编码器的转速等。该 GPRMC 数据格式包含经纬度  $X(K)$ 、 $Y(K)$  和船速  $n^*$ 。

运算控制层主要是处理 GPS 与 AHRS 姿态模块组合导航控制算法,其工作流程框图如图 4,图中包括两个反馈控制环节:

船速闭环,首先经由公式

$$D = L \arccos(\sin\varphi_A \sin\varphi_B + \cos\varphi_A \cos\varphi_B \cos(\theta_B - \theta_A)) \quad (1)$$

式中  $D$ ——两点地表距离, m

$L$ ——地球平均半径, m

$\varphi_A$ ——A 点经度, rad

$\theta_A$ ——A 点纬度, rad

$\varphi_B$ ——B 点经度, rad

$\theta_B$ ——B 点纬度, rad

计算两点间地表距离确定是否小于 100 cm 范围内,若小于则认为已经接近目标点,则将船速减小,若未

进入目标区域,则通过上位机给定的船速  $n$  与 GPS 解析出的实际转速  $n^*$  的误差  $\Delta n$  作外环 PI 控制算法的输入量,输出控制量,实现速度闭环。

航向闭环,根据目标点与实时点计算出目标航向角  $\psi$ ,与姿态模块解析出的实时航向角  $\psi^*$  作偏差,得到  $\Delta\psi$  的值,再通过 PD 控制算法,得到控制变量  $\Delta v$  作为右电动机的速度纠偏量,若船向正北方行驶,目标航向角  $\psi^*$  大于实际航向角  $\psi$ ,则偏差量  $\Delta\psi$  的值为正,右电动机的转速控制量  $\Delta v_2$  为原右电动机的速度控制量  $v_2$  减去纠偏量  $\Delta v$  的值,此时  $v_1$  与  $\Delta v_2$  产生差速,同时  $v_1 > \Delta v_2$ ,则船向东纠偏航向。两个反馈环节相互独立,相互关联,可达到良好的控制效果,实现轨迹跟踪。

运动执行层主要是利用 GPS 导航控制算法得到的控制量  $\Delta n$  和  $\Delta v$ ,通过 PWM 占空比的形式调节左、右电动机转速。其中,为保证船能够正常转弯,PWM 的占空比应尽量不超过 70%。然后经电动机的编码器测速,驱动器经过编码器的速度 PI 反馈闭环,实现电动机稳速运行。

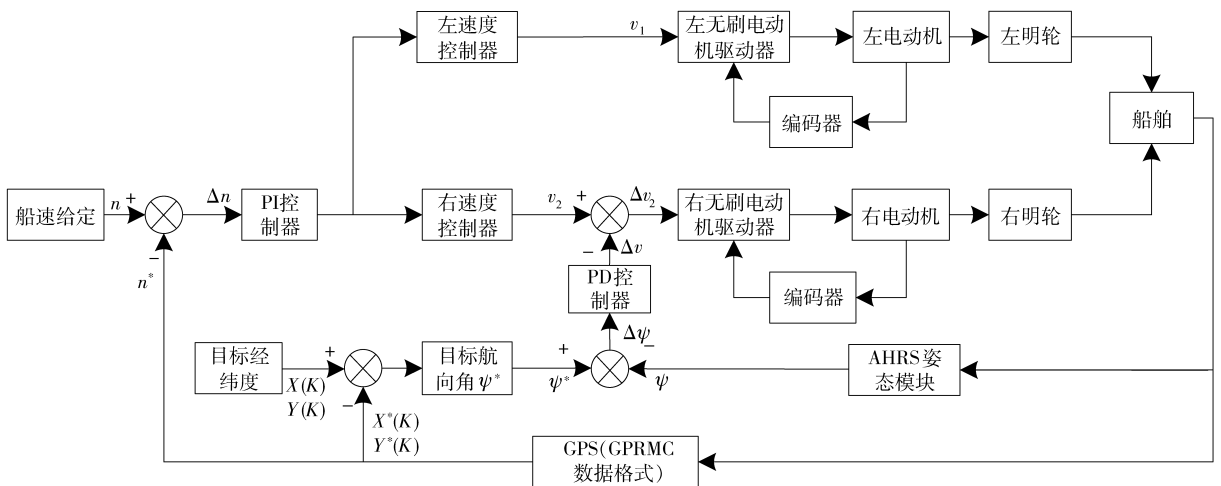


图 4 GPS 导航闭环控制框图

Fig. 4 Closed loop control block diagram of GPS navigation

### 3 实验

采用如图 5 所示长、宽、高为 1.4、0.85、0.4 m 的 600 W 功率的明轮动力移动平台模拟该船的控制系统进行实验。首先对 GPS 的原始数据进行采集,通过串口连接计算机上位机采集,选择实验水体一侧的 A、B 两点。B 点距离 A 点 10 m,以 AB 为边做一长度为 5 m 的直角边 BC。采集到的 A、B、C 三点经纬度信息经平均处理后得到 A 点经度为 119.504 364 650 7°,纬度为 32.199 270 021 6°。B 点经度为 119.504 469 254 1°,纬度为 32.199 255 129 7°。C 点经度为 119.504 476 737 0°,纬度为 32.199 299 487 8°。经由两点之间距离公式(1)验证得到,A 到 B 点的距

离为 9.981 314 0 m,与实际误差相差 0.018 686 m。B 点到 C 点的距离为 4.982 071 5 m,误差为 0.017 928 5 m。

将上述 A、B、C 3 个点组成的折线作为该明轮动力移动平台的轨迹,给定航迹经 ARM 微处理器给出相应的电动机控制信号,控制两电动机转速,驱动该移动平台航行。航行轨迹为直线和折线。其中移动平台在 A—B 直线行走时的实时轨迹与 A—B 直线所规划的轨迹对照如图 6 所示,实时轨迹基本上能按照所规划的直线路径不断调整,到达 B 点附近 10 cm 范围内则认为已到目标点。由点到直线的距离公式得到图 7 的平均直线轨迹的绝对值误差曲线。可知移动平台在直线行驶的最大误差不超过

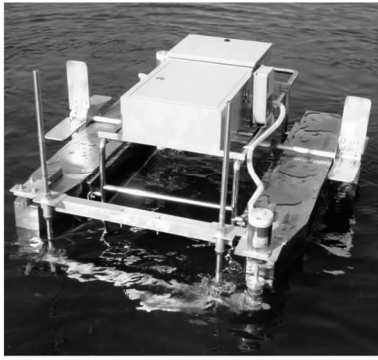


图5 明轮动力移动平台

Fig. 5 Mobile platform of wheel drive

30 cm。图8为移动平台直线行驶时的速度曲线,从图中可看出速度的跟踪效果良好,速度的稳态误差不超过0.1 m/s。图9为移动平台折线行驶时的轨迹路径,由于船转弯时需要1.5~3倍的船身长度的转弯半径,但明轮可以牺牲速度实现原地转弯,综合考虑,程序里所允许的距离误差比在直线上所要求

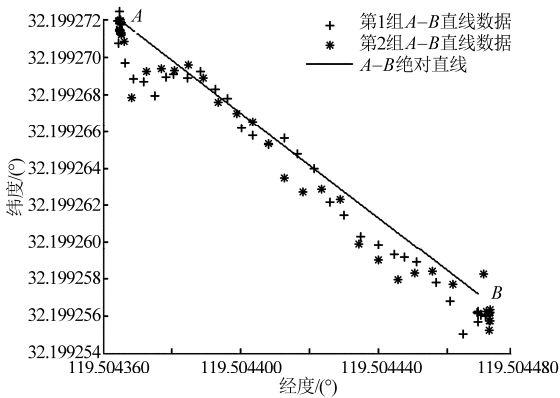


图6 A—B移动的经纬度轨迹

Fig. 6 Coordinates trajectory of A—B

的距离误差要大。降低速度同时,在到达拐点B比较大距离时就判定已到达B点,然后把C点的经纬度赋值到导航算法里进行运算,完成转弯行走。

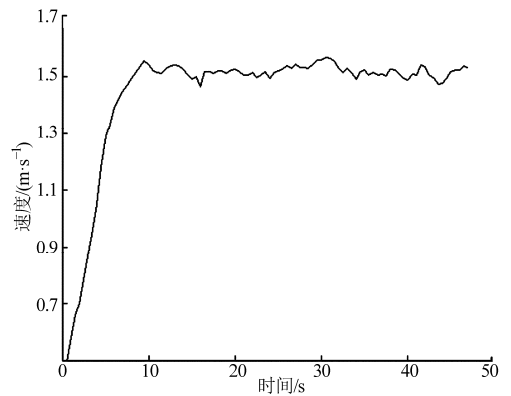


图8 移动平台直线行驶的速度曲线

Fig. 8 Speed curve of mobile platform during straight driving

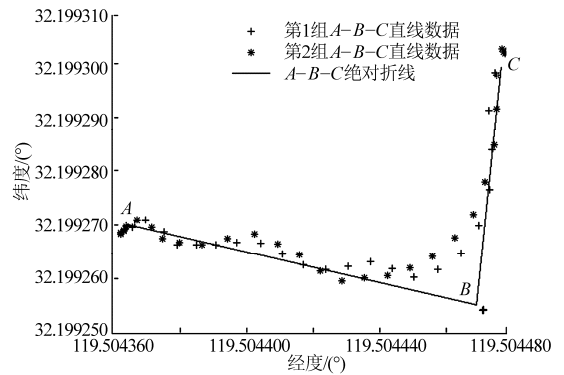


图9 折线A—B—C移动的经纬度轨迹

Fig. 9 Coordinates trajectory of line A—B—C

## 4 结论

(1)所设计的无舵明轮驱动型电动智能水草清理船,适合中小型河蟹养殖水域,且无污染,效率高,耗电少,对切割后的水草所造成的二次污染也要比其他水草收割船小。

(2)嵌入式ARM处理器,不仅成本低,性能高,处理速度快,而且可拓展性强,移植性好,适合于智能化水草清理船的自主导航。

(3)通过RTK测量模式的GPS与AHRS姿态模块组合导航算法,简单有效。实验证明,能够较好地实现水上移动平台的直线轨迹跟踪,误差不超过30 cm,同时,直线速度跟踪误差也不超过0.2 m/s。而且能很好地实现折线行走。

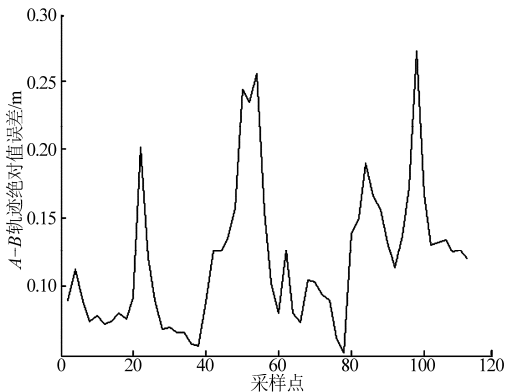


图7 直线A—B轨迹绝对值误差

Fig. 7 Trajectory error of straight line A—B

## 参考文献

- 王永鼎,沈文蕾. 虾蟹池塘水草收割打捞工艺研究[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(6): 938-942.  
Wang Yongding, Shen Wenlei. Harvesting process of aquatic for shrimo-crab-pond[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(6): 938-942. (in Chinese)
- 张丽珍,陈金稳,李俊. 水草收割机的研究现状[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(4): 486-492.

- Zhang Lizhen, Chen Jinwen, Li Jun. A review of aquatic weed harvesters[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(4):486-492. (in Chinese)
- 3 孙明敏. 河道水草机的研制[J]. 中国农机化, 2005(6):91-94.  
Sun Mingmin. Design and research to manufacture of aquatic plant harvester[J]. Chinese Agriculture Mechanization, 2005(6):91-94. (in Chinese)
- 4 李旭英, 尚士友, 杜建民, 等. 9GSCC-1.4H型沉水植物收割机船队的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1):59-62.  
Li Xuying, Shang Shiyu, Du Jianmin, et al. Design on 9GSCC-1.4H type submerged plants harvesting boat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1):59-62. (in Chinese)
- 5 张未. GC2230型河道割草保洁船[J]. 上海造船, 2004(2):22-24.
- 6 王宏, 艾海舟. 移动机器人体系结构与系统设计[J]. 机器人, 1993, 15(1):49-54.
- 7 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车辆定位导航系统及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- 8 Lin Xin, Jia Guixi, Wen Shiyun, et al. Research on the control strategy of unmanned tracking ship based on GPS[C]// Proceedings of the 2012 31st Chinese Control Conference, 2012:4445-4449.
- 9 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的GPS导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7):95-98.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7):95-98. (in Chinese)
- 10 赵德安, 孙月平, 薛亦安. 核电站核废物库数控遥控吊车大车同步运行控制系统研制[J]. 东南大学学报, 2010, 40(增刊1):187-191.  
Zhao Dean, Sun Yueping, Xue Yian. Synchronous running control system of remote controlled crane in storehouse for solidified nuclear waste[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(Supp. 1):187-191. (in Chinese)
- 11 Liu Jianqi, Zeng Bi, Yin Xiuwen, et al. Designation and realization of ship navigation system embedded platform based on ARM[C]// Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing, 2008:237-242.
- 12 Coste M E, Simmons R. Architecture, the backbone of A robotic systems, robotics and automation[J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000:67-72.
- 13 Brudka M, Pacut A. Intelligent robot control using ultrasonic instrumentation and measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3):454-459.
- 14 Soares dos Santos D, Nascimento C L, Cunha W C. Autonomous navigation of a small boat using IMU/GPS/digital compass integration[C]// IEEE International Systems Conference (SysCon), 2013:468-474.
- 15 Perera L P, Ferrari V, Santos F P, et al. Experimental evaluations on ship autonomous navigation and collision avoidance by intelligent guidance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014(99):1-14.

## Control System for Automatic Aquatic Plant Cleaning Ship

Liu Huigui<sup>1</sup> Zhao Dean<sup>1,2</sup> Sun Yueping<sup>1</sup> Zhang Jun<sup>1</sup> Wu Bo<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Facility Agriculture Measurement and Control Technology and Equipment of Machinery Industry, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of the periodic cutting and cleaning of aquatic plants in river crab aquaculture, a small and medium-sized intelligent automatic aquatic plant cleaning ship based on ARM was designed. Then the mechanical structure and working principle of the integration of harvest were introduced, and the ship's main structure characteristics were also put forward, such as the paddle propeller without a rudder, rotary cutting device, cut deep automatic adjustment regulator and so on. The closed loop control system of GPS navigation for the ship was designed with PD and PI control technology of intelligent mobile robot, and high precision GPS navigation control technology. The experiment results showed that the control precision of linear track could be controlled precisely within the scope of  $\pm 30$  cm. On the basis of meet harvest requirement, the control system can avoid the repeat cutting or miss cutting caused by yaw effectively.

**Key words:** River crab aquaculture Aquatic plant cleaning ship GPS Navigation