

基于 CAN 总线的拖拉机导航控制系统设计与试验

黎永键¹ 赵祚喜² 黄培奎² 关伟¹ 吴晓鹏²

(1. 广东农工商职业技术学院, 广州 510507; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为提高农业机械导航控制的准确性,在东方红-X804型拖拉机平台上设计了一种基于CAN总线的导航控制系统,该系统包括导航控制器、GPS定位系统、转向系统以及CAN通信模块。上位机节点采用嵌入式ARM处理器AT91SAM9261,以双闭环PID控制算法实现转向控制,并基于收发控制芯片SN65HVD1050D设计了CAN接口电路。功能节点分别实现转向控制、油门开度控制、制动控制、角速度测量以及机具升降控制。根据CAN2.0总线协议制定了主动节点和从动节点的数据传输通信协议。进行了CAN通信试验以及田间作业试验。结果表明,CAN总线系统能保证信号及命令传输,东方红拖拉机能按照规划路径进行行驶、转向、变速等操作。其中,转向系统的方波信号角度跟踪稳态时平均误差 0.41° ,跟踪时间为1.32s;拖拉机田间试验过程中,直线行驶的横向跟踪误差平均值为0.021m,地头转向的横向跟踪误差平均值为0.016m。

关键词: 拖拉机; 导航; CAN总线; 全球定位系统; 通信协议; 控制方法

中图分类号: F323.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0035-08

Design and Experiment of Navigation Control System for Tractor Based on CAN Bus

Li Yongjian¹ Zhao Zuoxi² Huang Peikui² Guan Wei¹ Wu Xiaopeng²

(1. Guangdong AIB Polytechnic College, Guangzhou 510507, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: An automatic navigation control system based on controller area network was designed on Dongfanghong X-804 tractor, which includes the navigation controller, GPS system, steering system and CAN communication system. The navigation controller, which used ARM processor AT91SAM9261 embedded CPU, was used to realize automatic navigation control based on double closed-loop PID algorithm, and the CAN interface circuit was designed by using a control chip transceiver SN65HVD1050D. The function nodes realized steering control, speed control, brake control, and machine lift control respectively. Then, a communication protocol of CAN2.0 was presented for distributed control network. Finally, CAN communication experiment and field test were carried out based on Dongfanghong X-804 tractor. Experimental results demonstrated that the CAN bus system was able to transfer data well, and the double closed-loop control solved the control overshoot well and the average error was 0.41° , with 1.32 s tracking time. The field test result showed that the average lateral tracking error of positioning was 0.021 m in line tracking and 0.016 m in headland turning.

Key words: tractor; navigation; CAN Bus; global positioning system; communication protocol; control method

引言

农业机械导航是现代农业机械装备的重要支持

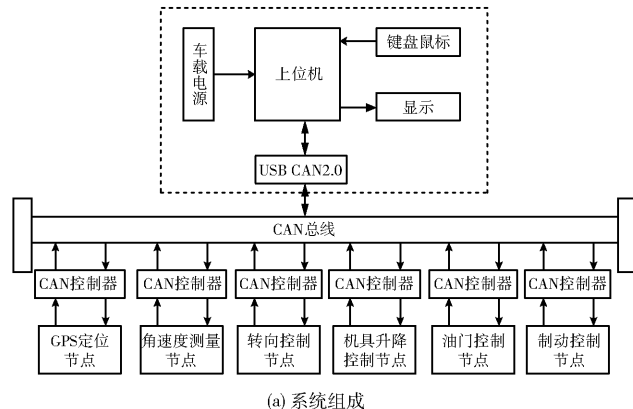
技术之一,对于提高精细农业作业效率、减轻驾驶员疲劳程度具有重要意义^[1]。近年来,传感器技术、电子通信技术和现代控制方法广泛应用于农业机械

导航,对传感器、控制单元和执行器之间的数据传输提出了新的要求^[2]。实践证明,控制局域网(Controllor area network,CAN)技术较好地解决了系统信息传输与处理的问题^[3]。纪朝凤等^[4]开发了基于CAN总线的农业车辆自动导航控制系统。胡炼等^[5]在Kubota SPU-68型插秧机平台上设计了基于CAN总线的分布式导航控制系统,直线跟踪误差不超过0.2 m。吴晓鹏等^[6]设计了基于CAN总线实现拖拉机自动转向控制,其信号跟踪误差最大不超过1.1°。以上研究主要存在以下问题:①功能节点的控制芯片较多采用单片机C8051F040系列,数据处理速度较难满足要求,应考虑采用性能更高的芯片作为处理器。②农业车辆田间作业具有非线性特征,动态下超调量较大,要改进控制算法,就必须加入更完善的传感器信号。因此,要实现更好的控制效果,有必要设计更完善的总线网络。

本文以东方红-X804型拖拉机为平台,设计一种基于CAN总线的分布式导航控制系统。从电路设计、硬件设计、总线通信协议的规定以及系统控制算法的设计等方面进一步完善,以期提高农业车辆田间导航控制精度。

1 CAN总线技术的关键特征

CAN总线是一种有效支持实时分布式控制的串行通信网络,具有传输速率快、容错性、抗电磁干扰等优点。德国最先于1986年提出了基于CAN2.0协议的农业机械总线标准DIN9684。20世纪90年代以来,国际标准化组织(ISO)制定了CAN2.0B协议的国际标准总线协议ISO 11783,规定了与农业机械相关的总线协议标准,包括网络层、管理层、控制终端规范以及数据包规范等。目前,ISO 11783已作为农业导航领域数据传输的一种重要通用标准^[7]。



(a) 系统组成

CAN总线技术的关键特征如下:

(1)通信介质可采用同轴电缆、双绞线或光纤,最高传输速率可达1 MB/s。

(2)采用基于报文的通信方式。该方式优点是:报文可发送到系统内需要此数据的任何部分。

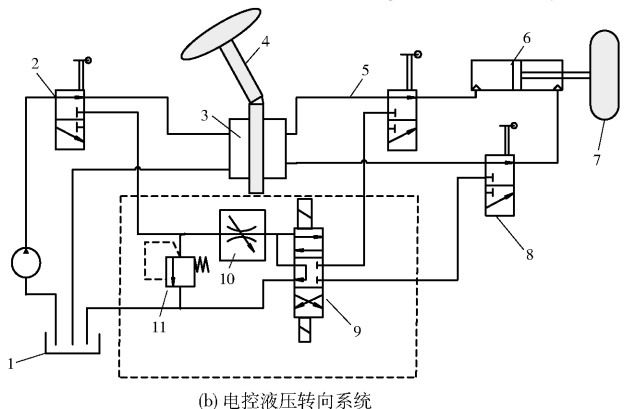
(3)节点的网络结构。CAN网络由主节点和功能节点组成,各节点对总线的访问权是相同的。网络内的任何节点均可以向总线发送信息,总线上的其他控制单元收发器均能接收到此信息,并由相应的控制单元判断是否为需要的数据。

(4)容错处理。采用循环冗余校验(CRC),有较好的检错效果。其原理是:节点检测到错误时将生成“错误报文”,分别计算出总的出错次数、总的成功次数,再求出两者差值,连续出错则让该节点处于“断开状态”,以不影响系统整体工作性能。

2 导航系统整体设计

系统的整体设计如图1a所示,可分为机械系统模块、控制系统模块、CAN网络模块。控制系统模块采用上位机和下位机的分布式结构。上位机即导航控制器,主要负责处理GPS位置信息、传感器信号和拖拉机机具升降信息,根据已有的程序决策并发出控制指令。下位机是各功能节点控制器。CAN网络模块共有6个节点:上位机安装的CAN接口卡为主节点;下位机各控制器对应一个功能节点,包括转向控制节点、油门控制节点、制动控制节点、角速度测量节点以及机具升降控制节点。每个节点被赋予一个ID号之后挂接到网络上。

定位系统是基于载波相位差分全球定位系统(Real time kinematic differential global positioning system,RTK-DGPS,Trimble5700^[8])与姿态航向参考系统(Attitude and heading reference system,



(b) 电控液压转向系统

图1 导航系统整体结构图

Fig.1 Schematic diagram of navigation system

1. 油箱 2. 手动切换阀 3. 转向器 4. 方向盘 5. 油管 6. 转向油缸 7. 转向前轮 8. 手动切换阀 9. 三位四通电磁阀 10. 比例阀 11. 溢流阀

AHRS, Crossbow 公司 AHRS500GA^[9]) 的组合, 对拖拉机的位置和航向参数进行测量。其中, RTK - DGPS 提供车体实时定位, AHRS500GA 提供航向角以及姿态角信息。

转向控制系统采用电控液压转向设计, 结构如图 1b 所示。转向控制原理如下: 液压转向器由步进电机驱动, 具有自动控制模式和手动控制模式。当选择自动控制模式时, 控制系统自动切换油路, 由手动控制油路变为自动控制油路。采用电控比例阀控制油液流量以调整转向速度, 换向电磁阀控制油路切换以控制前轮转向, 溢流阀作用是防止油压过载。

3 上位机设计与控制方法

上位机主要实现以下功能: ①采集 RTK - DGPS 定位数据、AHRS500GA 姿态航向角信息以及各传感器信号, 处理、分析并根据控制算法决策行驶路径, 并将控制指令发送到 CAN 总线上。②通过反馈

信息形成闭环控制, 拖拉机按照规划路径行驶。

3.1 上位机硬件设计

采用 ATMEL AT91SAM9261 嵌入式微处理器。AT91SAM9261 是 ARM9E 32 位处理器, 运算速度可达 200 MIPS, 并集成了 64 MB SDRAM^[10]。从性能上, AT91SAM9261 可以作为上位机的控制芯片。

3.2 上位机 CAN 节点电路设计

在导航系统工作过程中, 上位机 CAN 节点负责 CAN 总线接口初始化、信息包的接收和发送等。对 CAN 总线各寄存器进行初始化, 需要设定中断、数据传输波特率、采样周期等参数。为实现上位机节点和各功能节点的通信, 设计 CAN 总线收发控制器, 其接口电路设计如图 2 所示。CAN 收发控制芯片采用 SN65HVD1050D (美国 TI 公司生产), 基本参数如下: 传输速率可达 1 MB/s, 标准工作电压 5 V, 兼容 CAN2.0B 标准, 具有光电隔离的防干扰技术^[11]。

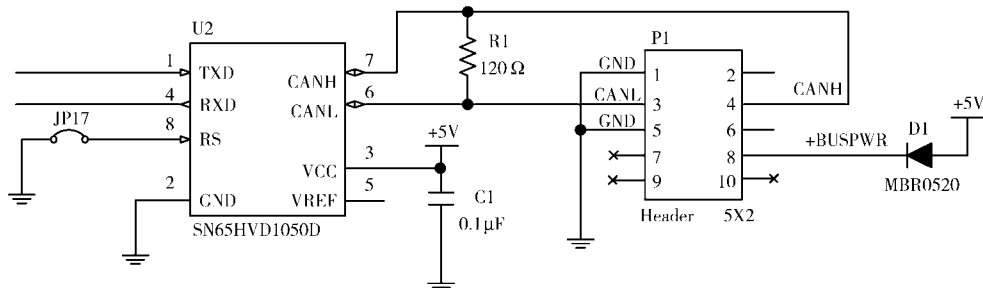


图2 CAN接口电路图

Fig. 2 CAN interface circuit

3.3 导航控制方法设计

本文设计了基于双闭环 PID 控制算法, 其框图如图 3 所示。首先对拖拉机行驶路径进行规划, 生成平面坐标储存在上位机存储器中以形成数据库。在田间作业时, 启动自动导航的模式, GPS 节点负责测量拖拉机当前位置的坐标, AHRS500GA 测量车体姿态角和航向角, 上位机收集以上信息以计算横向偏差、目标航向角。以横向偏差和目标航向角为输入量 1, 由转向系统的控制器 1 决策出目标角速

度, 并且计算出角速度的偏差; 由角度传感器测量出当前转向轮转角, 角速率传感器测量出当前转向轮的角速度。以角速度偏差和当前转向轮转角为输入量 2, 由控制器 2 决策出目标转向角。在以上控制决策基础上, 上位机通过 CAN 总线发送控制指令至转向节点; 转向控制器收到控制指令后, 通过电控液压系统实施转向动作。当拖拉机行驶至每行地头转向点附近时, 上位机发送转向行走速度指令和机具提升指令, 拖拉机完成转向动作。上位机利用反馈

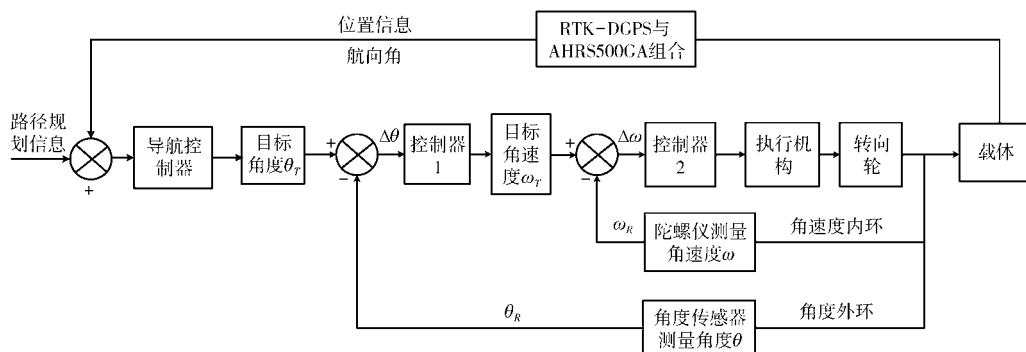


图3 整体控制策略框图

Fig. 3 Control block diagram of whole system

传感器监测,形成闭环控制系统。

文献[6]验证了拖拉机转向过程中的非线性。为抑制转向过程的超调现象,提高转向控制性能,设计双闭环转向控制算法如下:

(1) 角度控制外环

基于 KMA199 测量转向轮转角,实现测量值 θ_R 与目标值 θ_T 比较,由控制器 1 实现角度控制。设 e_θ 为两者差值,则

$$e_\theta = \theta_T - \theta_R \quad (1)$$

由比例-积分-微分控制(Proportion integration differentiation, PID)算法,有关系式

$$\theta_T = K_{\theta P} e_\theta + K_{\theta I} e_{i\theta} + K_{\theta D} e_{d\theta} \quad (2)$$

$$\text{其中 } e_{i\theta} = e_{i\theta_b} + e_\theta t_s \quad (3)$$

$$e_{d\theta} = (e_\theta - e_{\theta_b})/t_s \quad (4)$$

式中 $K_{\theta P}$ 、 $K_{\theta I}$ 、 $K_{\theta D}$ ——角度控制的比例、积分、微分的系数

e_{θ_b} ——上一时刻的转向角误差

$e_{i\theta}$ ——转向角误差积分

$e_{i\theta_b}$ ——上一时刻的转向角误差积分部分

$e_{d\theta}$ ——转向角误差的微分部分

t_s ——外环采样时间

(2) 角速度控制内环

基于 ADIS16300 内置陀螺仪测量转向角速度 ω_T ,由控制器 2 通过积分的方法实现速度控制,作用是实现转向轮以平稳速度运行到目标转向角度。设内环输出量为 L_I , e_ω 为角速度误差,由 PID 算法可得

$$L_I = K_{\omega P} e_\omega + K_{\omega I} e_{i\omega} + K_{\omega D} e_{d\omega} \quad (5)$$

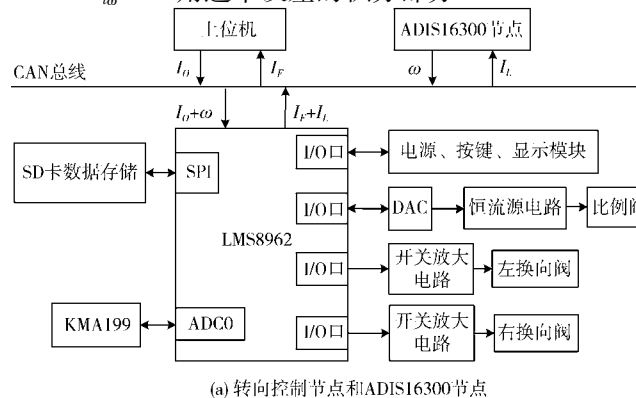
$$\text{其中 } e_{i\omega} = e_{i\omega_b} + e_\omega t_s \quad (6)$$

$$e_{d\omega} = (e_\omega - e_{\omega_b})/t_s \quad (7)$$

式中 $K_{\omega P}$ 、 $K_{\omega I}$ 、 $K_{\omega D}$ ——角速度控制的比例、积分和微分的系数

e_{ω_b} ——上一时刻的角速率误差

$e_{i\omega}$ ——角速率误差的积分部分



$e_{i\omega_b}$ ——上一时刻的角速率误差积分部分

$e_{d\omega}$ ——角速率误差的微分部分

t_s ——内环采样时间

联立式(2)~(7)求解,即可得到输出量 L_I 。

4 下位机控制器硬件设计

4.1 转向控制器

转向控制节点和 ADIS16300 节点设计如图 4a 所示。图 4a 中, I_0 是上位机控制指令; I_F 是向上位机反馈角度信息; ADC 是模拟/数字转换器; DAC 是数字/模拟转换器; SPI 是串行外设接口控制器; I/O 是输入输出。控制芯片采用基于 ARM7-v7 架构的 Cortex-M3 内核微处理器 LM3S8962。LM3S8962 最高运算速度可达 70MIPS, 具有运算能力强、低功耗的特点^[12]。采用美国 ADI 公司的 MEMS 惯性测量模块 ADIS16300 和非接触磁阻效应传感器 KMA199 联合测量转向角。KMA199 作为角度传感器,测得转向轮实时转角^[13],其信号通过 ADC 接口输入给主控单片机 LMS8962。LMS8962 通过 CAN 总线控制器与导航控制器通信获得转向控制指令,进行分析、运算和决策,得到控制比例阀开度的 DAC0 控制量和左、右换向阀通断控制量,输出指令控制比例阀和换向阀动作以控制前轮动作。前轮动作后, KMA199 又实时检测和反馈给 LM3S8962,计算结果通过 CAN 总线反馈给上位机。

4.2 角速度测量模块控制器

采用 MEMS 惯性测量模块 ADIS16300 作为转向角速度测量单元^[14],以 STM32 系列的 STM32F103C4 芯片作为控制器。ADIS16300 节点通过 CAN 总线与 LMS8962 通信,实现角速度测量控制指令的发送和角速度的接收。

4.3 其他控制器

如图 4b 所示,油门控制节点、制动控制节点以及机具升降控制节点采用 Cygnal 公司 51 系列单片

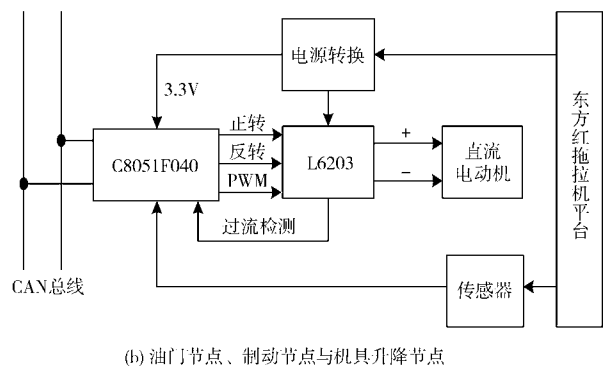


图 4 功能节点设计示意图

Fig. 4 Design description of function nodes

机 C8051F040 作为控制芯片。该芯片是基于 CIP-51 内核,峰值速度可达 25MIPS,在硬件上完全支持 CAN2.0B 的 CAN 控制器^[15]。

5 CAN 通信协议设计

由于 LMS8962、AT91SAM9261 等控制器的 CAN 协议数据寄存器有 8 个字节,节点之间的数据帧最多发送 8 个字节^[16]。设计与硬件相适应的应用层 CAN 网络通信协议,其作用是将系统的数据帧转换成完整的 CAN 数据帧发送,并返回各节点的反馈信息帧。设计函数 `can_transfer_data()` 实现以上功能,该函数包括输入、返回值部分,定义为如下 2 种数据结构:

```
struct command_data
{
    char C;
    unsigned long n;
    char T;
    char ID0;
    float Tcmd;
    float Tfeed;
}

struct feedback_data
{
    char F;
    unsigned long n;
    char T;
    float Tcmd;
    float Tm;
    float Tpn;
}
```

(1)CAN 通信协议机制。根据功能节点,CAN 总线内部进行传输的数据有 5 种类型,即 GPS 数据、AHRS 数据、ADIS16300 数据、KMA199 数据和控制指令。CAN 总线传输的数据是通过 ID 号识别,为各功能节点设计一个独立的报文 ID 号,采用 11

位识别字符的标准帧格式。根据 ISO 900 制定的 CAN 通信协议仲裁机制可知,ID 号小的节点具有高的优先权^[17]。因此,根据拖拉机自动导航工作过程,设定各功能节点优先级顺序由高到低依次为转向控制节点、油门控制节点、刹车控制节点、液压系统执行器控制节点、ADIS16300 节点、机具升降控制节点。

(2)CAN 传输数据包的格式定义。考虑到数据存储的规范性,对控制指令包格式和反馈信息包格式进行以下规定。控制指令包的格式内容如图 5a 所示。规定“T”为转向控制指令标识,“S”为速度控制指令标识,“U”为机具升降指令标识。信息反馈指令的作用是表示各功能节点在控制过程中的状态数量,反映各节点对于控制指令的执行情况。某一节点在 CAN 总线发送数据包时,首先确定该数据包的标识符,通过发送函数发送给其他 CAN 节点;节点通过接收函数接收该数据包时,首先识别其标识符,判断数据包的来源,并对数据包进行解析以获取有效信息。

反馈信息包的格式如图 5b 所示。反馈信息包含有控制指令和反馈信息指令。函数 `can_transfer_data()` 首先将结构体 `command_data()` 拆解为转向控制指令、速度控制指令、刹车控制指令和机具升降控制指令,按照功能节点的 ID 号优先顺序加上检验码发送到 CAN 总线上,再将接收到的最新 CAN 消息经过校验解码后按照图 5b 格式组成状态信息帧。

6 试验结果与分析

6.1 CAN 通信试验

试验目的:验证 CAN 总线通信的有效性。上位机发送控制指令,下位机的执行机构能够响应控制指令,并保证较高准确度。

试验方法:上位机 AT91SAM9261 通过 CAN 总线向转向控制器发送控制指令信号,设置发送指令

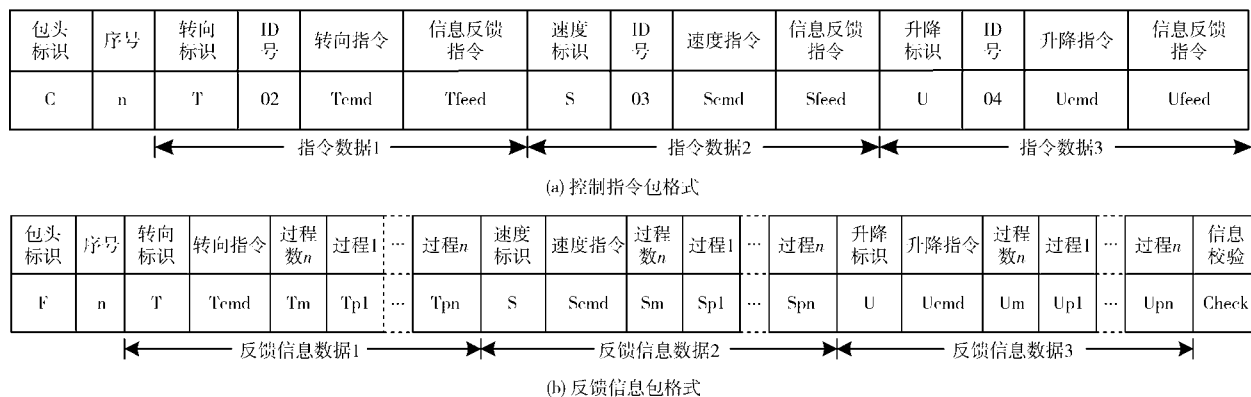


图 5 CAN 数据包格式

Fig. 5 Format of CAN data packet

和接收指令的频率均为 10 Hz。转向执行机构按照目标转向角度实施转向动作,导航控制系统记录转向角速率、转向角等信息,该信息保存在 SD 卡内,相关数据通过 PC 端进行分析,观测控制信号追踪结果。图 6 为 1 次典型跟踪试验结果,跟踪的对象为波幅 $\pm 10^\circ$ 的方波信号。本文将文献[8]试验结果与本试验结果进行对比,见表 1。

(1)从图 6a 的角度跟踪曲线可知,当右转向时,角度变小,转向角度与方波信号变化规律总体保持一致,只在反向转动过程中出现角度偏差。图 6b 角度误差曲线可知,误差在 0° 附近波动,超调得到控制;出现类似于三角波的较大误差是跟踪过程未

达到稳定状态的结果。数据统计结果是,跟踪测量值平均误差为 0.41° ,平均跟踪时间为 1.32 s。相对于 PD 控制算法,转向角度的跟踪误差最大值与平均值均减少,跟踪时间相对变长,其原因是双闭环控制算法加入了微分控制部分。

(2)图 6c 是方波信号角速率跟踪曲线,图 6d 是该信号的角速率跟踪误差曲线。统计数据表明稳态时平均误差 $1.10^\circ/\text{s}$,延时时间平均值为 0.2 s。转向过程中,当转向轮反向运动时,由于振荡出现较大的误差,最大误差达到 $5.10^\circ/\text{s}$ 。由表 1 可知,相对于 PD 算法,角速率的控制准确度有所提高。表明角速度内环控制有良好的效果。

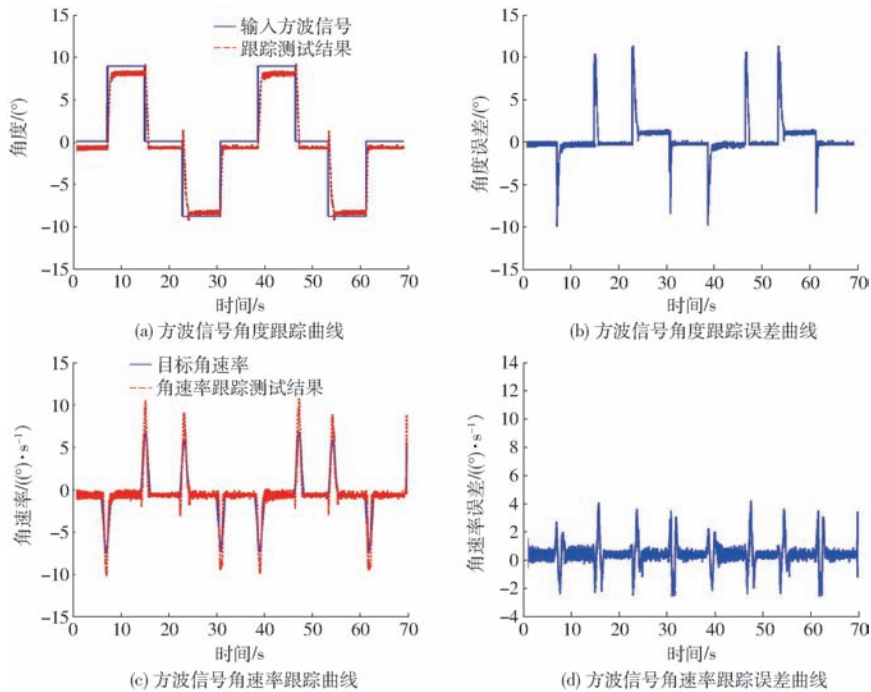


图 6 方波信号响应与跟踪误差

Fig. 6 Square signal response and tracking error

表 1 转向信号跟踪统计结果

Tab. 1 Statistical results of turning signal tracking

控制算法 类型	跟踪时间 平均值/s	跟踪时间 最大值/s	角度误差 平均值/ $(^\circ)$	角度误差 最大值/ $(^\circ)$	角速率平均误差/ $((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$	角速率最大误差/ $((^\circ)\cdot\text{s}^{-1})$
PD 算法	0.95	1.30	0.50	0.87	1.33	5.85
双闭环算法	1.32	1.65	0.41	0.60	1.10	5.10

6.2 田间试验

试验目的:验证本文设计的系统在拖拉机实际工作过程中能否有效提高导航控制精度。

试验方法:田间试验在华南农业大学的一块试验田中进行,测试试验平台的拖拉机在无人驾驶状态下直线行驶以及地头转向。按以下步骤进行路径规划:①首先使用 RTK-DGPS 进行定点采样,标定试验田的 4 个顶点,测定并记录各点的坐标数据。②选取田块最长的边为基准线,划定总数 15 条平行

作业线,作业线的距离由拖拉机作业间距决定并保证相等。③依照作业顺序,将作业线节点数据储存为二维数组,并存储于导航控制器内。

驾驶员首先将拖拉机驾驶至首行,车头对准首行路径方向,然后切换到自动导航状态,拖拉机的机械速度设定为 0.5 m/s ;地头转向过程中,拖拉机的机械速度减速至 0.2 m/s 。东方红拖拉机在本文设计的导航控制系统下实现无人驾驶,由工控机记录下 GPS 以及转向系统的数据。按此方法拖拉机完

成田间作业,由控制系统的储存模块保存数据。将拖拉机实时定位的 GPS 位置坐标到当前作业行坐标的距离定义为横向跟踪误差,记为 K 。为平均定位准确度,确定以下平均指标: K 平均值 K_{avg} 、最大值 K_{max} 以及标准差 σ_K ,计算方法为

$$K_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \quad (8)$$

$$K_{\text{max}} = \max(k_1, k_2, \dots, k_n) \quad (9)$$

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{\left(K_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i\right)^2}{N}} \quad (10)$$

图 7 是东方红拖拉机在田间作业时的田间行驶实际轨迹与规划路径比较。

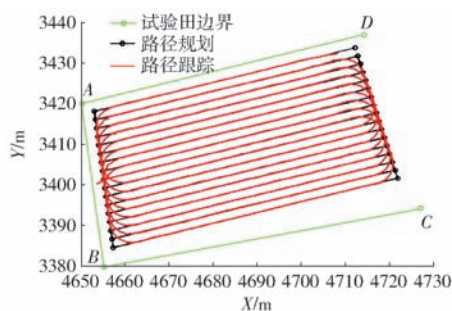


图 7 田间试验测试结果

Fig. 7 Result of field test

对试验数据进行统计分析(表 2),考虑到拖拉

机铁质材料对 AHRS500GA 航向角测量的影响,利用 Kalman 滤波器减少测量值的偏移误差。统计结果表明:路径跟踪的精度指标和不采用 Kalman 滤波处理相比,直线跟踪时,分别由 0.045 m、0.156 m 和 0.066 m 减小到 0.021 m、0.092 m 和 0.022 m;地头转向跟踪时,分别由 0.045 m、0.098 m 和 0.021 m 减小到 0.016 m、0.082 m 和 0.015 m。可知,本文提出的控制方法能有效提高导航控制精度和稳定性。

表 2 跟踪误差统计结果

Tab. 2 Statistical results of tracking error

跟踪路线类型	Kalman 滤波	K_{avg}/m	K_{max}/m	σ_K/m
直线行驶	无	0.045	0.156	0.066
	有	0.021	0.092	0.022
地头转向	无	0.045	0.098	0.021
	有	0.016	0.082	0.015

7 结束语

基于 CAN 总线的东方红拖拉机导航系统能实现有效的数据传输,下位机能按照控制指令动作,且准确度较好。在田间作业的转向过程中,稳态跟踪误差平均值为 0.41° ,超调量得到了较好的控制。本文设计的导航控制系统满足农业机械自动导航的控制要求,在精细农业的实践中有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 周俊,张鹏,宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报,2010,41(4):189-192.
ZHOU Jun, ZHANG Peng, SONG Baihua. Analysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 189-192. (in Chinese)
- 黎永键,赵祚喜,高俊文. 基于 GPS/SINS 组合的农业导航定位系统设计与研究[J]. 农机化研究,2014,36(3):16-22.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, GAO Junwen. Design and research of agricultural navigation positioning system based on GPS and SINS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 16-22. (in Chinese)
- 胡炼,罗锡文,张霖,等. 1PJ-4.0 型激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):146-150.
HU Lian, LUO Xiwen, ZHANG Lin, et al. Development of 1PJ-4.0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146-150. (in Chinese)
- 纪朝凤,刘刚,张漫,等. 基于 CAN 总线的农业车辆自动导航控制系统[J]. 农业机械学报,2009,40(9):28-32.
JI Chaofeng, LIU Gang, ZHANG Man, et al. Automatic guidance system of agricultural vehicle based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 28-32. (in Chinese)
- 胡炼,罗锡文,张智刚,等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报,2009,25(12):88-92.
HU Lian, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 88-92. (in Chinese)
- 吴晓鹏,赵祚喜. 东方红拖拉机自动转向系统设计[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):1-5.
WU Xiaopeng, ZHAO Zuoxi. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1-5. (in Chinese)
- ISO 11783-7:2002. Tractors and machinery for agriculture and forestry-serial control and communications data network[S]. 2004.
- 陈斌. 东方红-X804 拖拉机自动转向控制系统研究与设计[D]. 广州:华南农业大学,2009.
CHEN Bin. Research and design of steering control system for Dongfanghong-X804 tractor [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- Crossbow Technology, Inc. AHRS500GA-Series User's Manual; Revision B[M]. New York: Mc Graw Hill, 2007:21-25.

- 10 籍颖,刘兆祥,刘刚,等.基于卡尔曼滤波农用车导航定位方法[J].农业机械学报,2009,40(9):13-17.
JI Ying, LIU Zhaoxiang, LIU Gang, et al. Positions research of vehicle navigation system based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 13-17. (in Chinese)
- 11 Ti Inc. SN65HVD1050 data sheet [EB/OL]. (2010-01-19) [2016-01-22]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/sn65hvd1050.html>.
- 12 Luminary Micro, Inc. LM3S8962 microcontroller data sheet [EB/OL]. (2010-01-19) [2016-01-22]. <http://www.luminarymicro.com>.
- 13 NXP Inc. KMA199E product data sheet [DB/OL]. (2012-2-10) [2016-1-22]. http://www.nxp.com/acrobat_download/datasheets/KMA199E_1.pdf.
- 14 Analog Devices, Inc. ADIS16300 Datasheet [EB/OL]. (2009-04) [2010-01-28]. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16300.pdf.
- 15 DARR M J, STOMBAUGH T S, SHEARER S A. Controller area network based distributed control for autoums vehicles [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(2): 479-490.
- 16 吴晓鹏. 东方红拖拉机转向伺服控制系统设计[D]. 广州:华南农业大学,2011.
WU Xiaopeng. Steering control system design for Dongfanghong - X804 tractor [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 17 安秋,姬长英,周俊,等.基于CAN总线的农业移动机器人分布式控制网络[J].农业机械学报,2008,39(6):123-126.
AN Qiu, JI Changying, ZHOU Jun, et al. Distributed control network for CAN-based autonomous agricultural robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 123-126. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 68 页)

- 13 牛金亮,林静,邢作常,等.免耕播种机液压式加载仿形深度控制系统设计[J].农机化研究,2013,35(12):101-104.  
NIU Jinliang, LIN Jing, XING Zuochang, et al. Design of profiling potato stem chopping machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 101-104. (in Chinese)
- 14 楚杰,路海东,薛吉全,等.玉米宽窄行深旋免耕精量播种机田间试验及效果[J].农业工程学报,2014,30(14):34-41.  
CHU Jie, LU Haidong, XUE Jiquan, et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide-narrow row deep rotation and no-tillage technology [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 34-41. (in Chinese)
- 15 刘佳,崔涛,张东兴,等.玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):109-113.  
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device. [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 109-113. (in Chinese)
- 16 苑严伟,张小超,吴才聪,等.玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J].农业工程学报,2011,27(8):222-226.  
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-tillage corn planter [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222-226. (in Chinese)
- 17 王侨,陈兵旗,杨曦,等.用于定向播种的玉米种穗图像精选方法[J].农业工程学报,2015,31(1):170-177.  
WANG Qiao, CHEN Bingqi, YANG Xi, et al. Corn ears image selection method for directional seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 170-177. (in Chinese)
- 18 刘长青,陈兵旗,张新会,等.玉米定向精播种粒形态与品质动态检测方法[J].农业机械学报,2015,46(9):47-54.  
LIU Changqing, CHEN Bingqi, ZHANG Xinhui, et al. Dynamic detection of corn seeds for directional precision seeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2015, 46(9): 47-54. (in Chinese)
- 19 侯彦龙,徐丽明,陈莉明.玉米机械化定向播种技术的现状和发展趋势[J].农机化研究,2012,34(2):10-14.  
HOU Yanlong, XU Liming, CHEN Liming. The current situation and development trend of corn mechanization oriented seeding technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 10-14. (in Chinese)