

基于 ISO 11783 的拖拉机导航控制系统设计与试验^{*}

周建军¹ 郑文刚¹ 李素² 张漫³ 纪朝凤³ 孟志军¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 北京工商大学计算机与信息学院, 北京 100037;

3. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

【摘要】 基于 ISO 11783 标准构建了拖拉机自动导航控制系统, 系统包括 5 个电子控制单元 (ECU), 其中转向 ECU 节点可以根据从总线上接收到的转向指令来控制前轮转向。对自动导航控制系统的网络服务性能进行了分析, 并进行了使用该系统的拖拉机直线路径跟踪试验。试验表明, 基于 ISO 11783 的拖拉机自动导航控制系统能满足实时性要求, 并能较好地实现路线跟踪, 直线跟踪最大横向偏差为 11 cm。

关键词: 拖拉机 自动导航 控制系统 设计 试验

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)04-0184-05

Automatic Navigation Control System for Tractor Based on ISO 11783

Zhou Jianjun¹ Zheng Wen'gang¹ Li Su² Zhang Man³ Ji Chaofeng³ Meng Zhijun¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. College of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China

3. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

According to the specifications of ISO 11783 standard, an automatic navigation control system was built. In the system, there were five ECUs, and the hardware and software design of steering control ECU were described in detail. At last the network service performance of the navigation control system was analyzed, and line path experiments were finished with the designed navigation control system. Experiments indicated that tractor navigation control system can satisfy the need of real time and could realize line path tracking. The lateral error is less than 11 cm tractor tracking line path at a speed of 1 m/s.

Key words Tractor, Automatic navigation, Control system, Design, Experiment

引言

拖拉机是农业生产中具有多方面作业功能的主要动力机械^[1]。传感器技术、计算机技术和车辆系统的不断改进和完善, 为智能化技术在拖拉机上的应用和发展开辟了道路, 促使拖拉机作业机组向智能化方向发展。现场总线是连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络^[2]。现场总线技术应用于农业机械, 已经成为农

业装备技术组成的重要方面。近些年, 国内外开始了拖拉机自动导航技术的研究, 拖拉机自动导航可以保证较准确的作业行距和作业间距, 可减少重复作业, 从而降低成本, 减轻驾驶人员工作负荷^[3]。

20 世纪 90 年代中期, 国际标准化组织 (ISO) 以 DIN 9684 为基础, 制定了基于 CAN 2.0B 版本基础上的国际标准总线协议 ISO 11783, 即农林业机械串行数据通信与控制网络国际标准^[4-5]。国外, CASE、Fendt 等公司已开发出一些符合 ISO 11783

收稿日期: 2009-08-04 修回日期: 2009-10-13

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD11A10) 和国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2006AA10A304)

作者简介: 周建军, 助理研究员, 博士, 主要从事农业自动化、自动导航研究, E-mail: zhoujj@nercita.org.cn

通讯作者: 郑文刚, 副研究员, 主要从事农业自动化研究, E-mail: zhengwg@nercita.org.cn

标准的产品,而国内还没有出现基于ISO 11783标准的产品,且关于ISO 11783标准也鲜见文献报道。

在自动驾驶方面,已有使用数据采集卡设计的基于PC机的集中式导航系统,并在Case-IH Magnum 7220型拖拉机导航平台上进行导航控制试验的报道^[6]。但使用数据采集卡,成本较高,安装不太方便。本文在分析ISO 11783标准和CAN总线关系基础上,依据ISO 11783标准建立拖拉机自动驾驶控制系统,对控制系统的网络性能进行评价,并进行该系统的自动驾驶实车试验。

1 ISO 11783 标准

1.1 CAN

控制器局域网(controller area network,简称CAN)属于现场总线的范畴,它是一种有效支持实时分布式控制的串行通信网络。在20世纪90年代初,Bosch CAN规范被提交作为国际标准^[6-7]。1993年国际标准化组织颁布了CAN的国际标准ISO 11898,并先后对该标准做了补充和修改。目前CAN总线已在汽车、制造业、建筑管理、医疗设备、航空等领域得到了广泛的应用。CAN总线有两种不同的帧格式,不同之处为标识符域的长度不同:标准帧含有11位标识符,扩展帧含有29位标识符。CAN总线报文传输有4个不同类型的帧:数据帧、远程帧、错误帧和过载帧。数据帧由7个不同的位域组成:帧开始、仲裁域、数据域、CRC域、应答域、帧结尾^[8]。数据域的长度可以为零。CAN为多主方式工作,网络上任一节点均可在任意时刻主动向网络上其他节点发送信息,而不分主从。在报文标识符上,CAN上的节点分成不同的优先级,可满足不同的实时要求。

1.2 ISO 11783

ISO 11783是一种农林业机械专用的总线标准。ISO 11783标准参照SAE J1939和DIN 9684标准,以控制局域网总线协议即CAN 2.0B作为网络协议,规定了CAN总线在农机上应用的高层协议。通过ISO 11783协议,可以使拖拉机和农机具上的电子控制单元,诸如传感器、控制单元、存储单元、显示终端等,实现传输数据和传输方法的标准化。这不仅使农业信息数据交换与共享成为可能,还给农业机械电子设备的集成组装与维护带来极大便利。ISO 11783标准共由14个部分构成,分别是:概论、物理层、数据链路层、网络层、网络管理、虚拟终端、机组信息应用层、电源信息、拖拉机ECU、任务控制、数据词典、诊断、文件服务和自动化。下面就其

中的部分规范进行介绍。

CAN 2.0B描述了两种信息帧格式,标准帧和扩展帧,而ISO 11783只按扩展帧定义了标准化信息帧。ISO 11783采用协议数据单元PDU来定义信息帧格式。在传输过程中,先将PDU分隔成一个或多个CAN数据帧,然后通过物理介质传输到其他网络挂接设备上。ISO 11783 PDU数据格式由7个部分构成:优先权Priority(P)、保留位Researd(R)、数据页Data page(DP)、PDU格式(PDU format, PF)、特定PDU(目标地址、组扩展或专用)、源地址(DA)和数据域。这些域的信息由应用层提供。

2 自动驾驶控制系统设计

2.1 系统总体设计

使用GPS和电子罗盘作为拖拉机自动驾驶传感器,依据事先定义好的路径,从实时获取的GPS数据中得到车辆的位置信息,从实时获取的电子罗盘和角度传感器数据计算得到拖拉机的车身航向及前轮角度,通过导航算法计算出当前车辆航向偏差和横向偏差,再通过控制算法计算车辆的转角,最后执行机构按要求完成前轮转向,就可以实现拖拉机自动驾驶。基于ISO 11783标准设计了自动驾驶控制系统,该系统网络结构如图1所示。系统包括角度传感器ECU、GPS ECU、转向控制ECU、控制终端ECU和电子罗盘ECU 5个部分。角度传感器ECU可以连续采集前轮的转角,并把角度数据通过总线发送到控制终端。转向ECU可以接收控制终端的转向命令,并控制前轮的转向。电子罗盘ECU可以连续采集车身的航向信息并把数据发送到控制终端。GPS ECU可以连续采集GPS位置信息并发送到控制终端。系统以1 Hz的采样频率实时采集GPS信号和5 Hz的频率采集电子罗盘信号,确定拖拉机当前位置和运动方向,并与预定义的路线对比,根据控制算法控制拖拉机运动。

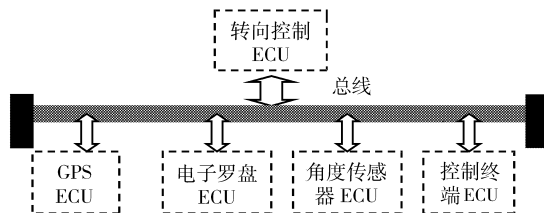


图1 自动驾驶控制系统结构图

Fig.1 Framework of automatic navigation control system

2.2 转向控制节点设计

转向控制节点主要实现拖拉机前轮的定量转动,通过步进电动机控制全液压转向器的转阀开度,定向、定量将油液输入转向油缸左或右腔,推动导向

轮实行动力转向^[9,10],这样就可通过控制步进电动机来控制拖拉机前轮的自动转向。

图2是转向控制ECU的硬件原理图,该ECU主要由CPU、收发器82C250、程序存储器和电压转换电路组成。CPU芯片选用P87C591,由于P87C591芯片只能烧写一次,故在板上扩展一片Winbond公司的W27C512的ROM芯片,该芯片可用于存储程序,可以实现程序的多次烧写。高速光电耦合器采用6N137,这样很好地实现了总线上各节点的电气隔离。为了提高数据通信的抗干扰性,总线的两端接有2个120Ω的匹配电阻。82C250为CAN总线收发器,是CAN控制器与CAN总线的接口器件,对CAN总线差分发送。P87C591芯片P1口的P1.3连接步进电动机的方向端,P1.4连接步进电动机的脉冲端,从板卡上引一个5V电源连接步进电动机的公共端。

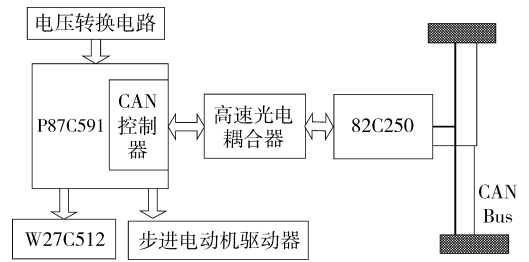


图2 转向控制 ECU 硬件原理图

Fig.2 Hardware principle of steering control ECU

2.3 通信协议

2.3.1 地址分配

ISO 11783 标准的 Part1 的附录 B 对地址标识分配进行了规定,例如虚拟终端的源地址规定为 26 (HEX)。按照标准角度传感器 ECU、转向控制 ECU、电子罗盘 ECU、GPS ECU 和控制终端 ECU 的源地址分配如表 1 所示。

表 1 各个 ECU 节点的 ID 定义

Tab.1 Definition of all ECUs

ECU	P	DP	PDU 格式(8 位)	特定 PDU(8 位)	源地址 (SA,8 位)	参数组 PGN	PDU 标识
GPS	6	0	0xE6	0xDB	0xD7	00E6DB	18E6DBD7
电子罗盘	6	0	0xE9	0xDB	0xD8	00E9DB	18E7DBD8
角度传感器	6	0	0xEA	0xDB	0xD9	00EADB	18EADB D9
转向控制	6	0	0xE8	0xDB	0xDA	00E8DB	18E8DBDA
控制终端	3	0	0xE7	0xDA	0xDB	00E7DA	0CE7DADB

2.3.2 应用层通信协议设计

系统采用单帧格式,每一帧有 8 个字节,如表 2 所示。

表 2 应用层通信协议

Tab.2 Application communication protocol

字节	1	2	3	4	5	6	7	8
含义	命令	方向	转角	保留	保留	保留	保留	保留

注:命令:0x90 表示发送脉冲,控制步进电动机转动。0x05 表示正转;0x02 表示反转;转角即期望的转角。

脉冲使用 I/O 口产生,P1.3 输出方向信号,P1.4 输出脉冲信号。转向控制 ECU 使用前需要进行标定,根据控制终端节点发送的命令执行不同的转向操作。

2.4 转向控制 ECU 节点工作流程

节点程序使用 C 语言编写,程序主要包括一个主函数和一个 CAN 数据接收中断函数。程序中使用一个标志来记录当前 CAN 总线有没有接收到数据。在程序的主函数(main 函数)中循环判断数据接收标志,如果标志为 1,表示接收到了转向命令,根据转向命令发送要求数量的脉冲,发送完后把接

收标志置为 0,退出循环。中断处理函数的流程如图 3 所示,当节点接收到其他节点发送的数据后,首先判断数据的第 1 个字节是不是 0x90,如是则保存接收到的数据,并置标识符为 1。

2.5 控制终端

目前使用一个 USB 转 CAN 的控制模块来实现控制终端与总线上其他节点之间通信。该模块为周立功公司 USBCANII。初始化 CAN 控制器,配置波特率为 250kb/s 并启动后,就可以接收总线上的数据。软件中启动 1 个线程连续接收总线上的数据,当接收到数据后就在主界面上进行显示,并启动控制主模块程序。控制主模块程序流程如图 4 所示。程序首先获取 GPS、电子罗盘和角度传感器数据,再通过算法计算出横向偏差和航向偏差。转向控制采用模糊控制的方法^[11],根据横向偏差 E 和航向偏差 ψ 的大小和方向来进行转向控制,横向偏差和航向偏差是模糊控制器的输入,输出为前轮期望转角 U 。模糊控制可以近似为

$$U = - \langle \alpha E + (1 - \alpha) \psi \rangle \quad (\alpha \in [0, 1])$$

其中,“ $\langle \rangle$ ”表示取最小整数。通过调整 α 的值,可

以改变位置偏差 E 和航向偏差 ψ 的加权程度, 试验中取 α 为 0.6。通过模糊控制可以得到转动控制量, 组织数据帧发送到转向控制 ECU 节点。

3 试验

3.1 系统网络服务性能分析

分布式网络控制系统综合性能与网络服务性能紧密相关, 服务质量 (quality of service, 简称 QoS) 可以分为静态和动态网络服务特性。其中静态 QoS 指标指的是传输距离、传输介质、拓扑结构和传输速率等。网络传输时延是一个重要的动态指标。

导航控制系统采用 ISO 11783 推荐的通信协议, 传输率为 250 kb/s。对于 ISO 11783, 一个 8 字节的数据帧, 按最坏情况考虑共 161 位, 传输一帧的时间为 0.644 ms。每个节点完成功能的时延包括输入端节点内时延、网络时延和输出节点内时延。由于目前微控制器的运算速度越来越高, 常用的机器周期为 0.1 ~ 1.0 μ s 或者更小, 因此接口时延、控制计算时延、网关协议转换时间等的大小也在 μ s 级。较为复杂的控制算法一般也不超过 10 ms。而网络传输由于缓冲区、速率等因素的影响, 其执行时间在 ms 级。因此网络因素对端到端总执行时间影响最大。依据 ISO 11783 规定, 每个消息帧的 PDU 设定

了发送节点唯一的标识符和优先级, 这样在传输过程中, 具有较高优先级的信息帧赢得仲裁, 而较低优先级的信息帧改为只听模式, 等待总线空闲再尝试发送。表 3 列出了控制系统总线的一些性能参数, 其中发送周期指节点数据发送的周期, 时限 (D_i) 指在特定时间内完成特定的功能而不能超过这个时间, 最大延迟时间 (R_i) 指最坏情况下的执行时间。从表 4 中可以看出 $R_i < D_i$, 满足在最坏时延下的可调度性, 也就是实时性满足要求。显然, 如果提高网络传输速率, 数据帧传输时间变短, 因此可调度性更容易满足。

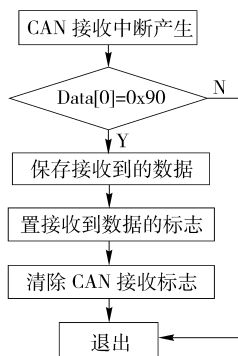


图 3 中断处理函数流程图
Fig. 3 Flowchart of interrupt process function

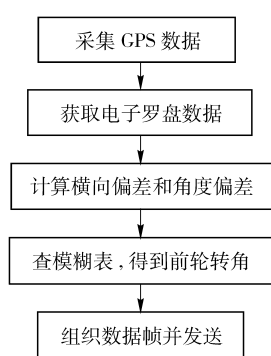


图 4 控制终端流程图
Fig. 4 Flowchart of control terminal

表 3 控制系统节点最坏传送时间

Tab. 3 Worst transmission time consuming of ECU

ms

发送源	发送周期	时限 D_i	执行时间	高优先级任务的执行时间	最大延迟时间 R_i
角度传感器 ECU	200	100	0.644	2.33	3.22
转向控制 ECU	1 000	200	0.644	8.05	9.65
电子罗盘 ECU	200	200	0.644	3.12	3.88
GPS ECU	500	200	0.644	3.14	3.65
控制终端 ECU	50	50	0.644	4.56	5.65

3.2 导航试验

使用 RTK GPS 和电子罗盘作为导航的主要传感器, 控制算法采用模糊控制, 模糊控制的输入为横向偏差和航向偏差, 输出为前轮期望转角, 使用自动导航控制系统来实现直线路径自动导航。试验在小汤山精准农业示范基地, 于 2008 年 10 月 5 日进行, 试验地面是裸土。跟踪直线的起点北京 54 坐标为 (444 826.38, 4 430 060.14), 终点北京 54 坐标为 (444 828.63, 4 429 984.12)。试验共进行了 5 组, 结果如表 4 所示, 其中一次试验的横向偏差如图 5 所示。横向偏差由 RTK DGPS 获取的位置信息和指定路径比较计算得到, 航向偏差由电子罗盘测量的车方向和制定的航向比较计算得到。航向分析试验结果可知, 当车速为 1 m/s 时, 路径跟踪横向误差小

于 11 cm, 最大误差为 9 cm, 平均误差为 4 cm。说明单独使用高精度的 RTK DGPS 可以很好地提供定位信息, 自动导航控制系统能够控制拖拉机实现自动导航。

表 4 直线跟踪的 5 组试验结果

Tab. 4 Result of line path tracking

cm

试验序号	1	2	3	4	5
最大误差	11	9	10	9	8
平均误差	5	4	4	3	3

4 结束语

依据 ISO 11783 标准, 建立了自动导航控制系统, 对系统中各个节点的地址分配进行了设计, 同时

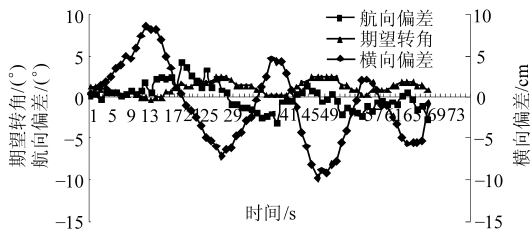


图5 一次试验的直线导航横向偏差

Fig. 5 Lateral deviation of line tracking

进行了转向 ECU 节点软硬件设计,并对总线网络进行了性能分析。对系统进行了最坏情况下相应时间的可调度性分析,结果表明导航控制系统是可调度的。最后使用该控制系统进行了 GPS 和电子罗盘组合导航的拖拉机直线跟踪试验,最大直线跟踪误差为 11 cm。试验结果表明,导航控制系统可以有效地控制拖拉机按预定的路线行驶。

参 考 文 献

- 宗伯华. 拖拉机自动变速及作业机组综合控制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Zong Bohua. Study on automated transmission and the integrated control for the tractor—implement combination [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 武洪恩, 张承瑞, 胡天亮. 基于现场总线的软件化开放式 CNC 体系结构, 山东大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 12~14.
Wu Hongen, Zhang Chengrui, Hu Tianliang. The architecture of the software open CNC system based on the fieldbus [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(2): 12~14. (in Chinese)
- 李建平, 林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 232~234.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 232~234. (in Chinese)
- Hofstee J W, Goense D. Simulation of a controller area network-based tractor—implement data bus according to ISO 11783 [J]. J. Agric. Engng. Res., 1999, 73(4): 383~394.
- Virvalo Tapio, Lammila Mika, Lehto Erkki. CAN bus applied on hydraulic computed force control [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2004, 26(5): 373~391.
- 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 Qin. Automatic guidance system for tractor interrow operations based on multiple sensors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 饶运涛, 邹继军, 郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- 陈在平, 张建峰, 贾超, 等. 基于 P87C591 的 DeviceNet 智能通信节点设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1 227~1 227.
Chen, Zaiping, Zhang Jianfeng, Jia Chao, et al. Design of a device net intelligent communication node based on P87C591 [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1 224~1 227. (in Chinese)
- 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 1~5.
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. 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)
- 王其东, 王霞, 陈无畏, 等. 汽车主动前轮转向和防抱死制动协调控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 1~4.
Wang Qidong, Wang Xia, Chen Wuwei, et al. Coordination control of active front wheel steering and ABS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 1~4. (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. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151~156. (in Chinese)