

基于 RISC-V 的嵌入式智能小车行进控制系统^①



杨金宇^{1,2}, 张浩天¹, 张玲玲¹, 顾 晖¹, 梁惺彦¹

¹(南通大学 信息科学技术学院, 南通 226019)

²(郑州大学 网络空间安全学院, 郑州 450002)

通讯作者: 梁惺彦, E-mail: liang.xy@ntu.edu.cn

摘 要: 本文介绍了基于 RISC-V 的嵌入式智能小车控制系统的硬件连接方案、基于状态机的智能小车状态分析方法和不同应用场景下的电机控制方案. 系统以运行 RISC-V 软核的 FPGA 开发板作为智能小车的主控板, 通过 RISC-V 的 GPIO 模块采集智能小车的超声波传感器和红外传感器信号来分别检测小车前方和后方的障碍物, 利用 GPIO 中断对碰撞检测传感器和倾斜角传感器信号作出快速响应, 利用 PWM 模块实现不同场景下的电机控制. 测试结果表明, 本文介绍的控制能够实现智能小车的自主避障、碰撞检测和姿态检测等功能.

关键词: RISC-V; 行进控制; 智能小车; 电机控制; 碰撞检测

引用格式: 杨金宇, 张浩天, 张玲玲, 顾晖, 梁惺彦. 基于 RISC-V 的嵌入式智能小车行进控制系统. 计算机系统应用, 2021, 30(11): 41-45. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8350.html>

Embedded Motion Control System in Intelligent Car Based on RISC-V

YANG Jin-Yu^{1,2}, ZHANG Hao-Tian¹, ZHANG Ling-Ling¹, GU Hui¹, LIANG Xing-Yan¹

¹(School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

²(School of Cyberspace Security, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This study introduces the hardware connection scheme for an embedded intelligent car control system based on RISC-V, the state analysis method of an intelligent car based on a state machine, and the motor control scheme in different application scenarios. The system takes the FPGA development board running the RISC-V softcore as the main control board of the intelligent car and collects the signals from the ultrasonic sensor and infrared sensor of the intelligent car through the GPIO module of RISC-V to detect the obstacles in front and rear of the car respectively. Moreover, it uses the GPIO interrupt to respond quickly to the signals from the collision detection sensor and tilt angle sensor and adopts the PWM module for the motor control in different scenarios. The test results show that the control system introduced in this paper can fulfill the functions of the intelligent car, such as autonomous obstacle avoidance, collision detection, and attitude detection.

Key words: RISC-V; motion control; intelligent car; motor control; collision detection

1 引言

由于 RISC-V 指令集架构具有免费、开源、简洁

与模块化等特点, 近年来基于 RISC-V 的处理器在国内
外得到快速应用. 本文利用 FPGA 硬件可编程^[1]的特

① 基金项目: 南通大学教学改革研究课题 (2019B35, 2019B40); 江苏省大学生创新训练项目 (161503202734387523); 江苏省高校品牌专业建设工程二期项目

Foundation item: Teaching Reform Research Project of Nantong University (2019B35, 2019B40); College Student Innovation Training Program of Jiangsu Province (161503202734387523); Second Phase Construction Project of Sign Discipline in High Education of Jiangsu Province

本文由“RISC-V 技术与生态”专题特约编辑武延军研究员、李玲研究员以及邢明杰高级工程师推荐.

收稿时间: 2021-04-28; 修改时间: 2021-05-21, 2021-06-08, 2021-06-11; 采用时间: 2021-06-15; csa 在线出版时间: 2021-10-22

性,在 Xilinx XC7A100T 上移植了基于 RISC-V 指令集架构的蜂鸟 E203 开源软核微处理器^[2,3],构成完整的片上系统.该系统包含多种外设接口模块,如 GPIO 和 PWM 等,并通过外设接口模块搭载多种传感器,可将采集的数据进行快速处理,实现面向各种场景的控制方案.

2 智能小车系统简介

图 1 是本文搭建的智能小车^[4]系统实物图,包括以下 5 个部分:控制智能小车运行的运行 RISC-V 的 FPGA 主控板、采集外界信号的各种传感器、驱动小车的电机、控制超声波传感器转向的舵机和智能小车的电源.为实现自主避障、碰撞检测等功能,本文利用 RISC-V 的 GPIO 处理各传感器信号(具体方案见第 5.1 节),并设计相应算法实现智能小车行进控制:障碍物检测的超声波避障算法^[5]、不同场景下的小车行进策略及相应电机控制算法和利用 RISC-V 软核的 GPIO 中断实现碰撞-行进姿态检测算法.

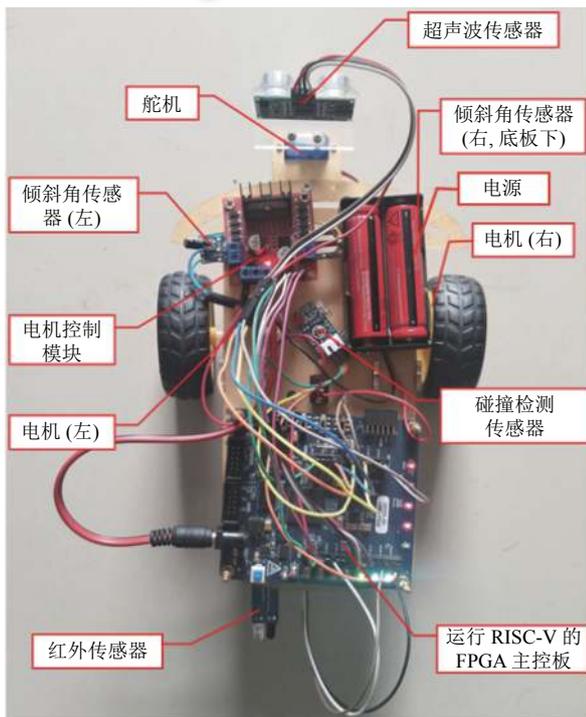


图 1 智能小车系统实物图

3 智能小车控制系统

3.1 逻辑结构

小车主控采用 Xilinx 公司的 XC7A100T 芯片,移植构造了基于蜂鸟 E203 的开源 RISC-V 软核微处理

器,支持 RV32C 指令集,表 1 是实验条件下利用 vivado 综合生成的 FPGA 内部资源占用情况,表中同时给出了本设计采用的外接内存资源:软核利用 AXI4 总线外接 256 MB 的系统内存 RAM,并采用 2 块 FlashROM 支持固件 ROM 和用户程序 ROM 的独立更新下载.在此基础上,将 FPGA 的 IO 引脚映射为软核 GPIO 与 PWM 输出,分别连接倾斜角传感器、红外传感器、超声波传感器、碰撞传感器和电机驱动模块等,构成智能小车的状态检测模块和电机控制系统,图 2 给出本方案的硬件逻辑结构示意图.检测信号利用 FPGA 的 IO 引脚实现 RISC-V 的 GPIO 数据采集,舵机和电机由 RISC-V 软核的 PWM 模块产生的输出信号驱动,进而可结合具体算法实现不同场景下的小车控制方案.

表 1 主控板硬件核心资源

主器件	内部资源(型号)	利用数量(规格)
FPGA	LUTs	9141
	Flip-Flops	6664
RAM	MT41K128M16JT	128 M×16 bit
FlashROM	N25Q064A	2片 64 Mb

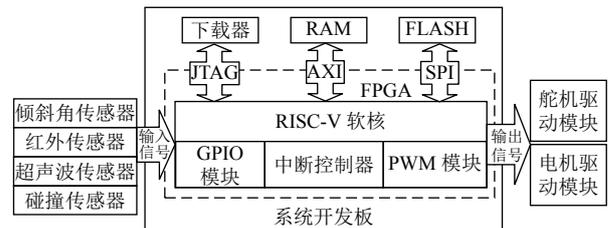


图 2 智能小车硬件系统逻辑结构

3.2 控制信号处理方案与 RISC-V 参数设定

在实现智能小车行进控制中,主要利用了 RISC-V 中可复用的 GPIO 模块实现信号的输入输出,利用外部 IO 中断实现系统响应的强实时性.在蜂鸟 E203 为蓝本的 RISC-V 软核中,共有 32 个 GPIO 引脚,每个 GPIO 引脚由 32 位配置寄存器的 1 位控制,各寄存器的基地址为 0x1001_2000.表 2 说明了本文用到的 GPIO 配置寄存器的情况.

表 2 GPIO 配置寄存器说明

寄存器名称	偏移地址	描述
GPIO_VALUE	0x000	写入pin的值
GPIO_INPUT_EN	0x004	pin输入使能
GPIO_OUTPUT_EN	0x008	pin输出使能
GPIO_PORT	0x00C	pin输出值
GPIO_IOF_EN	0x038	I/O复用使能
GPIO_IOF_SEL	0x03C	复用IOF(0或1)
GPIO_RISE_IE	0x018	上升沿中断触发使能

在 RISC-V 中, 引脚默认功能是 GPIO, 并可通过配置寄存器 GPIO_IOF_EN 和 GPIO_IOF_SEL 实现诸如 PWM 等其他复用功能. 因此本设计按以下 3 个步骤实现具体 GPIO 的引脚操作: 引脚功能复用配置、输入/输出配置和引脚值读/写. 图 3 是引脚功能配置过程示意图.

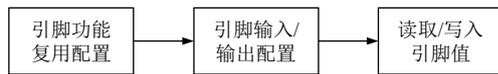


图 3 引脚 (pin) 配置流程

下面介绍本系统所用输入输出引脚 pin 的具体连接和功能, 如表 3 所示.

表 3 GPIO pin 功能及配置说明

pin 序号	功能	寄存器配置
0	红外传感器输入信号	使能GPIO_INPUT_EN pin位 读取GPIO_PORT pin位的值
1	超声波传感器 触发 (Trig) 信号	使能GPIO_OUTPUT_En pin位 写入GPIO_VALUE pin位的值
2	超声波传感器 反馈 (Echo) 信号	使能GPIO_INPUT_EN pin位 读取GPIO_PORT pin电平时长
4	倾侧传感器中断信号	使能mie寄存器的外部中断
5	碰撞传感器中断信号	使能GPIO_RISE_IE
19	电机 (左) 控制信号	使能GPIO_IOF_EN
20	电机 (右) 控制信号	复用GPIO_IOF_SEL为PWM1
21	舵机控制信号	配置GPIO_PORT输出

(1) 红外传感器用来实现倒车时障碍物的检测. 本系统采用查询机制, 仅判定固定距离的障碍有无, 通过使能 0 号 pin 引脚输入并捕捉 GPIO_PORT 相应位电平变化来实现.

(2) 超声波模块是实现智能小车自主避障功能的基础, 物理原理可用式 (1) 表示^[6]:

$$d = (t \times v) / 2 \quad (1)$$

其中, d 表示智能小车与障碍物的距离, t 表示从发射超声波信号到返回的时间差, v 是声速.

本设计利用 RISC-V 的 GPIO 模块的 1-2 两个引脚分别控制超声模块的发射 (TRIG)、接收 (ECHO) 两组信号实现障碍物的测距, 具体步骤包括: 1) 通过使能 GPIO_OUTPUT_EN 寄存器的第 1 位, 写入 GPIO_VALUE 相应位触发超声波传感器 TRIG 信号. 使能 TRIG 10 μ s 以上的高电平信号来触发测距, 超声波模块开始自动发送 8 个 40 kHz 的方波, 记录此时计数寄

存器 (MTIME) 的值 $X1$; 2) 使能 GPIO_INPUT_EN 寄存器的第 2 位, 读取 GPIO_PORT 相应位, 检测是否有信号返回, 当有信号返回时, GPIO 接收 ECHO 输出的高电平信号, 再次记录此时计数寄存器 (MTIME) 的值 $X2$; 3) 通过计算计数寄存器两次理论差值, 再乘以时钟频率, 可得超声波信号往返时长 t ; 4) 根据式 (1), 计算小车与障碍物间的距离.

(3) PWM 模块实现智能小车系统的电机与舵机控制. 通过使能 GPIO_IOF_EN 和 GPIO_IOF_SEL 寄存器的相应位, 将 19-21 位 pin 复用为 PWM1 模块, 生成 3 组 PWM 信号中有 2 组用来分别控制左右电机, 1 组用来控制舵机. 小车行进时, 可通过调节 19 和 20 位输出的 PWM 脉宽比值, 控制小车左右电机转速比, 实现行进状态控制; 通过调节第 21 位的 PWM 占空比, 控制舵机转向, 进而控制超声信号探测方向.

4 智能小车的工作状态与电机控制方案

将传感器数据作为输入参数, PWM 作为输出信号, 本文设定智能小车有以下 5 种工作状态. 图 4 是智能小车工作状态转换示意图.

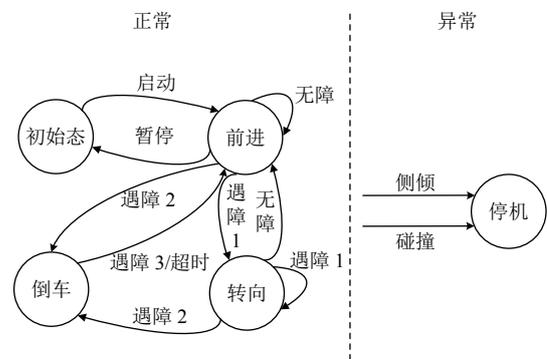


图 4 智能小车工作状态转换示意图

1) 初始态: 电源上电后, FPGA 加载 RISC-V 软核并完成初始化后, 小车进入初始态. 此时, 指示灯点亮, 小车等待启动.

2) 前进: 这是小车启动后的默认状态, 当未检测到障碍物, 保持此状态.

3) 转向: 在小车前进过程中, 当超声波传感器探测到左前方或右前方一定范围内有障碍物时 (障 1), 小车切换到此状态.

4) 倒车: 当小车倒车时, 红外传感器^[7,8]探测到左前方和右前方较短距离内有障碍物时, 表明小车前方

周围均有障碍物,使小车进入倒车状态,当后方遇到障碍物(障3)时停止倒车,小车切换到前进状态。

5) 停机: 此状态为异常状态. 若小车在正常行进过程中, 遇到碰撞、侧倾或被中止等异常事件时, 小车从当前状态切换到停机状态。

本文针对智能小车行进过程中的不同场景, 为该系统设计了5种电机控制方案。

1) 正常行驶: 小车启动后, 以正常速度前进直至遇到障碍物减速或者转向. 正常行驶时, 主控板输出左右电机的PWM控制信号占空比为50%。

2) 快速行驶: 若探测到前方 $D1$ 距离内未发现障碍物时, 尝试加速行进. 加速行进时, 主控板连续缓慢的调节左右电机的PWM占空比, 占空比从50%增至80%, 每200ms增长1%. 直到前方探测到障碍物切换状态。

3) 慢速行驶: 若探测到前方 $D1$ 距离内有障碍物时, 则减速至慢速行驶. 此时主控板输出的控制左右电机的PWM占空比为25%。

4) 转向行驶: 利用超声波传感器分别探测距左前方和右前方障碍物的距离, 经比较后选择转向. 转向采用左右两路电机的差速控制, 本系统采用对左右电机输出相差30%的PWM信号实现定弧度转弯。

5) 倒退行驶: 当小车上前方和右前方 $D2$ 距离内都有障碍物, 选择倒车控制, 两路电机由占空比25%的PWM信号进行反转, 当后方遇到障碍物时停止倒车. 同时为避免一直倒车, 设定后方无障碍物时的最长倒车时间 T_s , 超时停止倒车。

5 主要场景的控制算法

5.1 智能小车的行进避障

智能小车行进过程中前方障碍物的探测通过安装在舵机上的超声波传感器实现, 后方障碍物的探测通过红外传感器实现. 智能小车行进过程中通过调用超声波探测算法, 判断与障碍物的距离, 使智能小车自动调节行进方向, 实现智能小车的自主避障. 图5是超声波探测算法流程. 图6是智能小车行进避障流程。

5.2 基于中断的碰撞检测和姿态检测

为保证智能小车行进过程中的平稳, 本系统利用RISC-V的GPIO中断设计了车辆姿态检测和碰撞检测以处理异常情况. 在蜂鸟E203型RISC-V中, GPIO的中断源号8-39, 可通过RISC-V的中断控制器PLIC配置中断. 本系统使用8号中断源作为侧倾事件, 9号

中断源作为碰撞事件。

图7是碰撞检测和行进姿态检测中断控制流程示意图, 系统利用GPIO中断响应车辆侧倾和碰撞事件. 行进姿态检测依靠倾斜角传感器, 当小车侧身失衡超过固定的角度 α 时, 倾斜角传感器触发跳变信号引发中断, 中断服务程序内试图调整行进策略保持小车车身平衡, 避免发生侧翻. 若小车行进过程中发生碰撞事件, 则会触发中断, 转入中断服务例程触发车辆保护机制——驻停且指示灯警报。

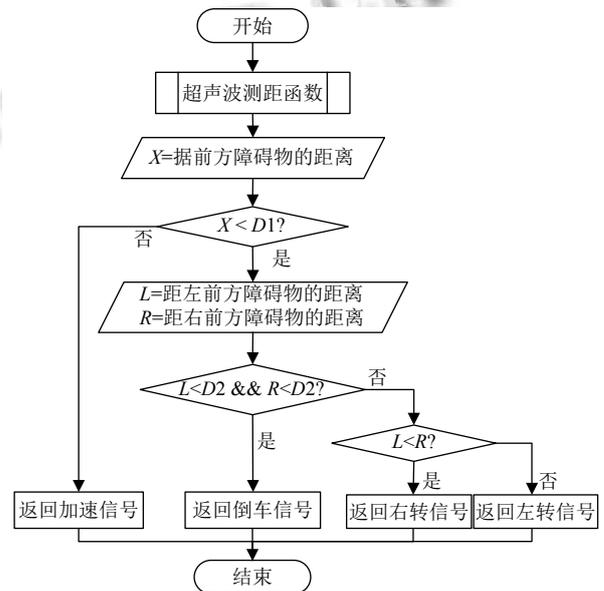


图5 超声波探测算法流程图

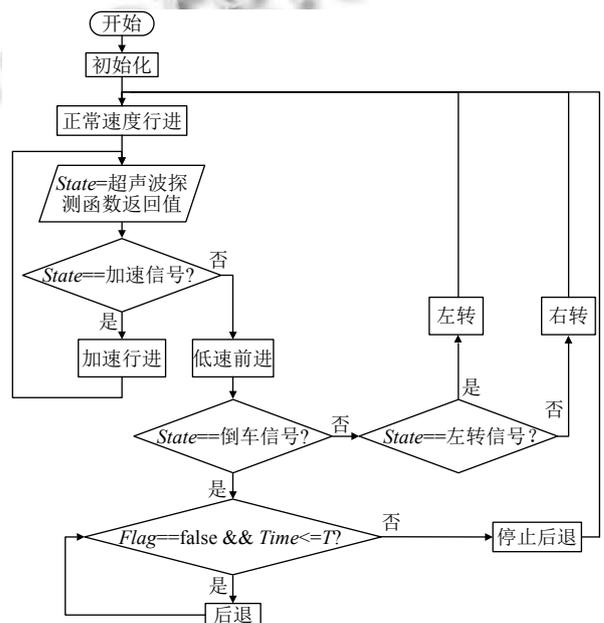


图6 智能小车行进避障控制流程

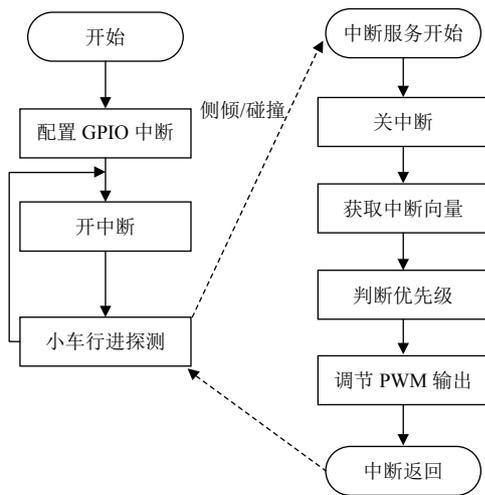


图7 碰撞检测和行进姿态检测中断控制流程示意图

6 实验测试

本系统所使用的硬件控制器是 Xilinx Artix-7 XC7A100T FPGA, 其上运行蜂鸟 E203 RISC-V 软核. 实验所用的超声波传感器型号为 HC-SR04, 红外传感器型号为 JXWHW-005, 碰撞传感器型号为 ZD01, 倾侧传感器型号为 SW-520D.

6.1 测试方法及结果

为获得该系统传感器的响应时延数据, 测试过程中将智能小车置于支架之上悬空, 将障碍物靠近智能小车, 模拟智能小车的主动避障和被动避障过程. 用于测定传感器触发到输出控制信号间的时差的临时数据, 如小车状态记录和计数器数值变化等, 均在响应结束后通过串口送至联调上位机, 进行统一的数据整理与分析, 计算响应时延. 实验中, 取超声波避障过程中的参数 $D1$ 的值为 30 cm, $D2$ 的值为 18 cm, 表 4 和表 5 给出了整车工作的部分实测数据及小车的状态. 其中表 4 中各个距离的响应时延为 5 次测试的平均值.

表4 基于超声波传感器的主动性避障时的响应延时

距离 (m)	响应延时 (ms)	行车状态
0.15	90.588	正常 (转向判断)
0.25	92.352	正常 (转向判断)
0.35	92.941	正常
0.50	94.706	正常
0.65	94.117	快速

6.2 测试结论与分析

因本系统采用 FPGA 实现 32 位 RISC-V 软核, 在与内存进行数据交互上利用 AXI4 总线实现 32 位数据

传输, 实验发现, 由于 FPGA 的 RAM 颗粒采用的是 16 位数据总线, AXI 控制器的两次 16 位传输才可完成一次 32 位数据读写, 数据吞吐能力稍弱, 在一定程度上影响了系统性能. 通过实验结果可以看出, 在核频 50 MHz 的条件下, 处理器和 RAM 可以良好的支持本控制方案的实现.

表5 被动性避障时的响应延时 (ms)

序号	碰撞	倒车
1	42.739	52.094
2	41.260	56.792
3	40.042	51.002
4	41.059	53.703
5	42.743	53.652
均值	41.568	53.448

7 总结展望

RISC-V 指令集因其免费开源的特点, 为发展国产自主可控的芯片提供了契机. 芯片产业的发展不仅需要提升芯片的制造工艺, 更要推进芯片软件生态的建设. 本文在自主移植 RISC-V 软核的基础上, 构建集成多种传感器和控制方案的智能小车行进控制系统, 实现了一个基于 RISC-V 的综合应用样例, 为 RISC-V 的应用生态建设做出一次有益的尝试.

参考文献

- 李毓川. 基于 FPGA 控制的智能小车的设计. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 52-56.
- SI-RISCV (2018). Hummingbird E203 opensource processor core: GitHub. https://github.com/SI-RISCV/e200_opensource. (2019-9-24).
- 胡振波. RISC-V 架构与嵌入式开发快速入门. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- 吕纯. 基于 ARM 嵌入式的智能小车控制系统设计研究. 河南科技, 2019, (29): 17-20. [doi: 10.3969/j.issn.1003-5168.2019.29.010]
- 轩亮, 杨轩, 叶志雄. 基于高尔夫球目标识别与收集的智能小车. 江汉大学学报 (自然科学版), 2020, 48(2): 65-76.
- 罗紫阳, 陈鹏. 基于单片机控制的超声波测距系统设计与实现. 数字通信世界, 2019, (6): 91. [doi: 10.3969/J.ISSN.1672-7274.2019.06.069]
- 谢作敏, 臧天, 刘俊枫, 等. 基于红外传感器的智能循迹小车设计. 科技创新与应用, 2017, (14): 16-17.
- 门筱希, 孔祥初, 等. 基于红外传感器的智能循迹小车. 通信电源技术, 2019, 36(3): 112-115, 119.