

# 利用 FPGA 协处理器提高控制系统设计的通用性

*Improving the universality of Design for Control System Using FPGA as Coprocessor*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 马天波 薛旭成 郭永飞  
MA Tian-bo XUE Xu-cheng GUO Yong-fei

**摘要:** 本文提出一种以 FPGA 作为协处理器辅助主控制器 DSP 的控制系统设计方案,详细阐述了系统的组成和硬件设计,并利用 FPGA 设计实现地址译码、底层高速率算法和数据通信,给出了仿真结果。程序下载到 FPGA 芯片后,控制系统工作稳定、可靠。实验结果表明 FPGA 能够协助主控制器 DSP 完成控制和通信功能。本系统可以简化 DSP 的设计,在大多数控制系统中具有通用性。

**关键词:** 控制系统; FPGA; 协处理器

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** B

**Abstract:** This paper proposes a design scheme of the control system which based on the coprocessor FPGA that can assist the main controller DSP. The system composition and the hardware design are described in detail. Address decoding, bottom high-speed algorithm and data communication are implemented with FPGA. The simulation result is given in this paper. After the program is downloaded in the FPGA chip, the control system works well. Experimental results indicate that FPGA can assist the main controller DSP with the functions of control and communication. This system reduces the complication of DSP design. In most of the control system, this system is universal.

**Key words:** Control system; FPGA; Coprocessor

## 1 引言

当今数字系统日益复杂,单一处理器已经无法满足系统要求,随着集成电路技术、微电子技术、计算机技术和网络技术的不断发展,系统已经从以微处理器为核心控制器和以专用芯片 ASIC 为核心处理器的模式,发展成为一种主从结构的处理器结构(如 DSP+FPGA,MCU+FPGA 等)。FPGA 是在 ASIC 的基础上发展起来的,它克服了专用 ASIC 不够灵活的缺点,与其它中小规模集成电路相比,其优点主要在于它有很强的灵活性,即其内部的具体逻辑功能可以根据需要配置,对电路的修改和维护很方便。目前,FPGA 的容量已经跨过了百万门级,使得 FPGA 成为解决系统级设计的重要选择方案之一。在这种架构下,本文将提出一种利用 FPGA 作为协处理器的控制系统的设计方法,应用 FPGA 来辅助主控制器 DSP 完成控制和通信。

## 2 FPGA 作为协处理器的设计

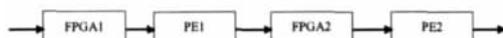


图 1 FPGA 作为处理单元的系统结构

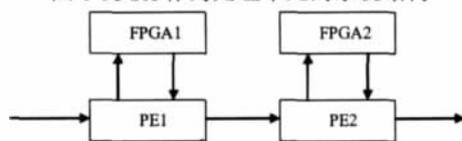


图 2 FPGA 作为协处理器的系统结构

硬件要完成某种应用方式,必须依赖于相应的系统结构。FPGA 在数字信号处理设计中最典型的应用有两种:一种是作为整个数据处理系统中的一个“单元节点”,数据沿着线型结构

被不断加工处理,FPGA 在这里作为处理单元来应用,独立地完成算法中的某些功能。如图 1 所示,图中的 PE 一般为 DSP 或单片机。

图 2 中 FPGA 作为协处理器,FPGA 辅助 PE 工作,PE 的一部分任务由 FPGA 分担。PE 像调用软件中的函数一样调用 FPGA。只是函数内部写的不是完成该功能的语句,而是向 FPGA 传送参数,再从 FPGA 接收处理后的数据。硬件的速度一般要快于 PE 的指令操作,可以认为将数据送出后马上就可得到处理后的结果,这种结构可以大幅度提高 PE 的处理速度。

在实际应用中,一个复杂的系统要做的处理比较多,在确定 FPGA 协处理器的任务时要整体把握,确定影响整体速度的瓶颈是哪部分,选择最有潜力可挖的部分。硬件分担的任务不是越多越好,这里面要综合考虑 FPGA 设计的难度,系统的实际要求等。FPGA 的任务太多,可调性变差,如果只能被调用很少的几次,它对整体速度的提高就不会有多少贡献,而且会增加 FPGA 设计的工作量。考虑到 DSP 本身不擅长大量的逻辑构建,我们可以用 FPGA 来发挥硬件速度快的特点完成底层的、大量重复使用的任务。FPGA 就像一个硬件函数,这种结构既可以发挥硬件的高速性,又利用了软件的灵活性。两者的结合可以极大地提高整体处理速度,而且开发周期短,修改方便。站在 DSP 的角度上看,DSP 可以像调用软件函数一样在上层实时调用 FPGA,而速度像汇编语言一样快,这样有效地克服了 DSP 的指令层次上效率低的不足。

使用 FPGA 作为协处理器的最大优势在于可根据具体算法的实际需求来为 PE 定做合适的硬件函数。由于控制系统的基本功能比较固定,FPGA 需要辅助 PE 完成的主要是控制和通信,所以利用 FPGA 作为协处理器的设计方案在控制系统中具有通用性。

马天波: 硕士研究生

### 3 系统结构

本系统的原理框图如图 3 所示。该系统利用 FPGA 作为协处理器,结合 FPGA 的可重配置特性,可最大限度地实现控制系统的软件化,提高控制系统的通用性。

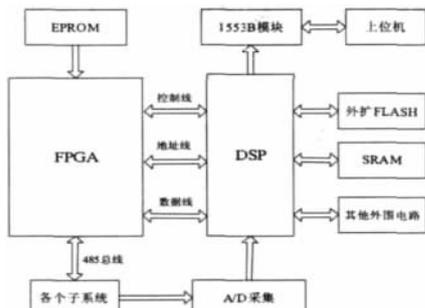


图 3 系统原理框图

本系统的硬件系统主要由 DSP 和 FPGA 组成。DSP 选用 TI 公司的 TMS320LF2407 芯片, FPGA 选用 XILINX 公司的 Virtex 系列的 XCV600, 两者通过双向数据总线连接, DSP 负责与上位机和各个子系统进行数据通信, 控制各个子系统工作状态及必要的数据处理, FPGA 协助 DSP 完成地址译码、底层高速率算法和数据通信。除了核心器件 DSP 和 FPGA 以外, 外围电路主要包括 FLASH、串并转换器、A/D 转换器、JTAG 接口、时钟电路、电源电路、信号整形电路和运放电路等。

本系统与上位机的连接采用 1553B 总线。MIL-STD-1553B 总线是一个时分制指令/响应式多路传输数据总线, 具有很高的可靠性和灵活性。本系统选用 DDC 公司的 BU-61580 芯片。FPGA 通过完成片外地址译码将 1553 模块映射到 DSP 的对应工作空间上, DSP 通过对该区域的读写来实现对 BU-61580 的初始化和收发数据控制。

控制系统主要完成两方面的任务: 通信和控制。通信主要是指将上位机指令按通信协议解析后转发给各个子系统、将子系统数据上传给上位机或转发给其它子系统; 控制主要是指根据上位机的不同指令控制各个子系统的工作状态。

在整机系统联调过程中, 将该控制系统与各个子系统和上位机连接, 上位机每发送一帧数据, 控制系统都可以正确的接收该数据, 也能够正确的发送数据至上位机; 同时该系统可以正确的根据上位机发送的命令来控制各个子系统的工作状态, 也可以正确的接收子系统发送的数据并将数据转发给其它子系统和上位机; 并能够根据从上位机接收到的指令控制各子系统的工作状态。

### 4 FPGA 功能模块的内部实现

FPGA 作为一个外部协处理器使用, 通过数据总线和地址总线与 DSP 处理器连接, 主要实现的功能是地址译码、底层高速率算法和数据通信。FPGA 协处理器内部的程序采用模块化设计。其中底层高速率算法模块是完成比较固定经常使用于底层的运算。下面具体分析地址译码模块和数据通信模块的设计。

地址译码模块主要完成对特定地址总线上数据的读取和向特定地址总线上写入所需数据。为了保证数据总线不冲突, 不读和不写数据总线时, 高阻数据总线。模块设计后, 利用 ModelSim 软件进行了地址译码数据、地址总线的仿真如图 4 所示。在 is\_n/I/O 使能信号和 we\_n 写使能信号均为低电平有效时, 根据地址总线的值 dsp\_addr 将数据总线上的数值 dsp\_data 存储

于 control\_data 作为控制和通信信号。而在 is\_n/I/O 使能信号和 rd\_n 读使能信号均为低电平有效时, 根据地址总线的值 dsp\_addr 将其它模块处理后的数据发送到数据总线 dsp\_data 上。在本仿真中设置地址总线为 8000H 时, 数据总线的值 5555H 能够在写状态时被有效地存储, 而当地址总线为 8001H 时, 在读状态有效时又能将处理后的数据 AAAAH 发送到数据总线上。仿真结果表明地址正常译码, 总线数据可以正常读写。

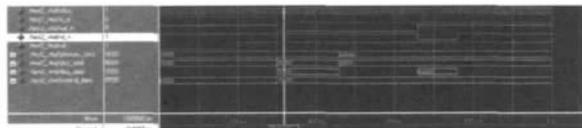


图 4 地址译码读写总线数据时序仿真图

数据通信模块的设计, 用户数据总线宽度为 16 位, 该设计提供自顶向下的方法, 首先按功能分为接收 1553 数据模块、解析为 485 数据格式模块、接收各个子系统的工作状态参数模块、解析各个子系统的工作状态为 1553 数据格式模块 4 个子模块, 再分别对各模块进行设计和调试, 最后进行顶层模块的综合调试。其中接收 1553 数据模块和接收各个子系统的工作状态参数模块主要是完成数据接收和重排数据格式, 而解析为 485 数据格式模块和解析各个子系统的工作状态为 1553 数据格式模块根据具体提供的具体通信协议内容分析接收到的数据。图 5 给出了数据接收后格式转换的仿真图, 可以看出本模块在信号 sndcmd 为高电平有效时, 可以正确将接收到的二进制数据串行输出。



图 5 数据接收转换仿真图

485 数据通信协议和 1553B 通信协议针对不同的系统在具体协议内容上会有不同, 但是整个设计的编程思想相对固定, 具有很强的通用性。通过 FPGA 完成对通信协议的解析, 节省 I/O 资源, 减轻处理器负担, 提高系统的整体性能。以上设计提高了系统的灵活性和通用性, 降低了开发成本, 可作为一个独立模块使用。

### 5 结论

本文给出了一种利用 FPGA 作为协处理器设计的控制系统, 由于它设计输入方式灵活, 设计周期短, 片内资源丰富, 可无限次加载等特点, 很适合对具体的任务进行设计。针对控制系统主要完成的功能, FPGA 协助其完成通信和控制, 通过 FPGA 软件编程实现地址译码和数据通信, 完成上位机、各个子系统与 DSP 的数据通讯功能, 显著简化了系统的外围电路, 节省了硬件布线空间, 降低了成本, 并且数据通讯的性能更稳定、抗干扰能力更强。由于 FPGA 的内部逻辑在线的可重构性, 根据用户不同需求可以填入或修改功能, 同时, 文中提出的 FPGA 软件设计结构, 具有很好的模块化特性, 提高了控制系统设计的通用性。

参考文献

- [1] 马森, 尚媛园, 倪琴琴, 刘峥. 基于 FPGA 设计 DSP 的实践与改进[J]. 微计算机信息. 2009, 25(1-2): 84-86
- [2] 戴碧, 华卓立. FPGA 作为协处理器的中断扩展管理[J]. 计算机科学与技术. 2007, 25(4): 38-40
- [3] 赵佳明, 来晓岚, 卢焕章. FPGA 作为协处理器在实时系统中的应用[J]. 电子技术应用. 2000, 3: 10-12

(下转第 153 页)

小于  $T_2$  时,视觉进入搜索路标状态,当视野范围内出现路标后,位姿置信度因视觉信息的融入得到提高。

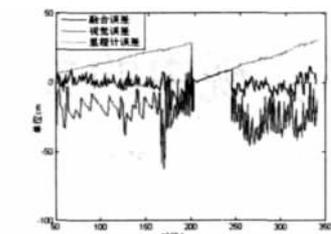


图4 机器人位姿误差图

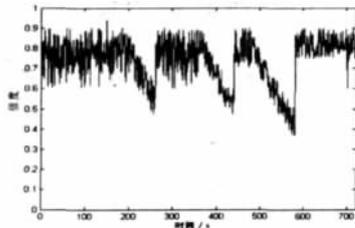


图5 机器人位姿置信度变化曲线图

## 4 结论

本文设计了一种基于位姿信度的公共环境下机器人主动定位算法。该算法以信度为线索,进行里程计和视觉的融合定位,获得机器人的位姿。该算法的优越性在于:①当机器人位姿信度大于可信度阈值  $T_1$  时,机器人只利用里程计进行定位,大大节省了主机资源;②当机器人位姿信度在  $[T_2, T_1]$  内,视觉信息具有较高的灵活性,即视野内如果存在路标,则融合定位,如果不存在,也不需要主动搜索路标;③当机器人位姿信度小于  $T_2$  时,视觉主动寻找路标,用来提高机器人位姿信度,使该算法更具人性化;④采用“福牛机器人”在机场候机楼模拟环境中验证本文算法,机器人定位的融合位姿,误差不超过 30cm,满足机场服务机器人的定位精度要求。

### 参考文献

- [1] Xu D, Li YF, Tan M. A visual positioning method based on relative orientation detection for mobile robots [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1243-1248.
- [2] 韩立伟, 徐德. 基于直线和单特征点的移动机器人视觉推算定位法[J]. 机器人, 2008, 30(1): 79-84
- [3] M. Mazo and the research group of the SIAMO project. An Integral System for Assisted Mobility. IEEE Robotics and Automation magazine. 2001, 3
- [4] 王景川, 陈卫东, 曹其新. 基于全景视觉与里程计的移动机器人自定位方法研究[J]. 机器人, 2005, 27(1): 41-45
- [5] 罗真, 曹其新. 基于视觉和里程计信息融合的移动机器人自定位[J]. 机器人, 2006, 28(3): 344-348
- [6] 中国民用航空总局. MH0005-1997. 民用航空公共信息标志用图形符号[S]. <http://www.biaozhi.net.html>, 1997
- [7] Gao Qingji, Yue Yue, Yang Guoqing. Detection of Public Information Sign in Airport Terminal Based on Multi-scales Spatio-temporal Vision Information. International Conference on Computer Science and Software Engineering, Dec, 2008, Wuhan, China
- [8] 钟志光, 易建强, 赵冬斌等. 基于运动视的移动机器人定位方法[J]. 机器人, 2004, 26(4): 325-329
- [9] Chong K, Kleeman L. Accurate odometry and error modelling

for a mobile robot [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Albuquerque, USA: 1997 (4): 2783 - 2788

[10] 蔡健荣, 李玉良, 范军等. 成熟柑橘的图像识别及空间定位研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(12-1): 224-225

作者简介: 李希(1983-), 男, 中国民航大学硕士研究生。主要研究方向: 机器人环境感知、机器人自主续能。

**Biography:** LI Xi (1983-), male, Tianjin, Civil Aviation University of China, Major: Robot Environment Perception.

(300300 天津 中国民航大学 机器人研究所) 李 希 高庆吉 (132012 吉林 东北电力大学自动化系) 王丽芳

(Department of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China) LI Xi GAO Qing-ji (Department of Automation, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China) WANG Li-fang

通讯地址: (300300 天津 中国民航大学机器人研究所) 李 希

(收稿日期: 2009.11.21)(修稿日期: 2010.02.25)

(上接第 131 页)

[4] VirtexTM 2.5V Field Programmable Gate Arrays [Z]. XILINX, 2001

[5] MIL-STD-1553B Designer's Guide [Z]. DDC, 1998

作者简介: 马天波(1984-), 女(汉族), 硕士研究生, 研究方向: 软件设计及图像处理技术。

**Biography:** MA Tian-bo (1984-), female (Han), Master, Research area: Software designing, image processing.

(130033 长春 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所) 马天波 薛旭成 郭永飞

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

MA Tian-bo XUE Xu-cheng GUO Yong-fei

通讯地址: (130033 长春经济技术开发区东南湖大路 3888 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间部 1218 室) 马天波

(收稿日期: 2009.11.21)(修稿日期: 2010.02.25)

(上接第 135 页)

[4] J. Mcallister, R. Woods, R. Walke? and D. Reilly. Multidimensional DSP Core Synthesis for FPGA [J]. Journal of VLSI Signal Processing 43, 2006. 207-221.

作者简介: 徐精华(1966-), 男(汉族), 江西南昌, 南昌航空大学电子信息工程系副教授, 硕士, 1990年毕业于浙江大学, 主要从事检测装置技术, 导航制导与控制等方面的研究。

**Biography:** XU Jing-hua (1966r-), Male (Han ethnic), Nanchang City Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, associate professor, Major in electrical and information engineering, Research in Detection technology and automation equipment, Navigation guidance and control.

(330063 江西南昌 南昌航空大学信息工程学院) 徐精华 邹 雄

(Information Engineering College, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China) XU Jing-hua ZOU Xiong

通讯地址: (330063 江西南昌 南昌航空大学信息工程学院) 徐精华

(收稿日期: 2009.11.21)(修稿日期: 2010.02.25)