

基于变论域模糊控制算法的仿真与 FPGA 优化实现

林前进^{1,2}, 杨波^{1,2}, 余跃^{1,2}, 王成明^{1,2}, 蔡彬^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 中国航天科技集团有限公司 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘要: 针对单力臂模型的复杂动力学行为, 设计了一种不依赖于被控对象的精确数学模型的变论域模糊控制器。在闭环系统中, 角位移量的跟踪偏差和其变化率作为系统输入, 并将控制器的初始论域设为 $[-3, 3]$, 其值可通过伸缩因子来调节。基于 Matlab 软件仿真, 验证单力臂模型对预期指令的跟踪性能。另外, 基于现场可编程门阵列(FPGA)硬件, 采用移位操作和分段线性化两种方法对控制器进行优化。由此, 无乘法器和片上内存零占用的设计结构显著降低了硬件资源负担。实验结果表明: 本文所提变论域模糊闭环控制方法在精确度(低于 0.02)、自适应性以及实时性等方面性能较优越, 具有一定工程应用价值。

关键词: 变论域; 模糊控制; 现场可编程门阵列(FPGA); 单力臂; 分段线性化; 硬件资源

中图分类号: TP 241.3; V 19

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.014

Variable Universe Fuzzy Control Algorithm Based Simulation and FPGA Optimization Design

LIN Qianjin^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, YU Yue^{1,2}, WANG Chengming^{1,2}, CAI Bin^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China; 2. Infrared Detection Technology Research and Development Center, China Aerospace Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract: A variable universe fuzzy controller is designed to deal with the complex dynamic behavior of the single-arm model in this paper. This controller does not depend on the precise mathematical model of a controlled object. In the closed-loop system, the tracking deviation of angular displacement and its variation rate are used as system inputs. At the same time, the initial domain of the controller is set as $[-3, 3]$, which can be changed by a scaling factor. Furthermore, a Matlab simulation verifies the tracking performance of the single-arm model to the expected command. In addition, the controller can be optimized by the methods of shift operation and piecewise linearization based on the field-programmable gate array (FPGA) hardware. Therefore, the structure design of a multiplier-free and zero-footprint of chip memory significantly reduces the burden of hardware resources. The experimental result shows that the proposed controller based on the variable universe fuzzy closed-loop control method is superior to several other methods in accuracy (less than 0.02), adaptability, and real-time efficiency. It can be further applied in the field of engineering.

Key words: variable universe; fuzzy control; field-programmable gate array (FPGA); single arm; piecewise linearization; hardware resources

0 引言

随着计算机科学与自动控制科学的迅速发展, 机器人技术广泛应用于工农业生产制造、医疗、空间探测以及生活娱乐等领域。机器人主要代替人

工解决耗时冗余的重复性工作和恶劣环境下作业。机器人技术的关键在于机器人的数学模型建立和机器人控制系统。通过确定机器人的机械结构和机械参数建立动力学模型, 其数学模型是一个高度

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2019-12-20

作者简介: 林前进(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为控制科学与工程、神经网络与人工智能等。

复杂的非线性系统。机械手主要由连杆、活动关节和其他部件组成,单力臂模型作为最简单的机器人,反映了机械系统的基本动力学特性,是机器人复杂系统的研究基础^[1]。单力臂控制系统的作用在于调节活动关节的控制力矩,使得机器人的位置、速度等状态变量能够按照预期的轨迹设定进行逼近跟踪。与一般机械系统一样,通过确定机械结构以及对应机械参数,将机械臂的动力学行为以合适的数学模型进行描述。

近年来,学术领域和工业领域对于机械臂轨迹跟踪进行了相关研究,提出了一系列控制策略^[2-4],例如有经典PID控制、模糊控制、模糊PID控制、神经网络控制、迭代学习控制、变结构控制以及反演控制等设计方法。PID控制算法得力于控制律简单且易于实现,但是过分地依赖于人工调节,控制器参数整定过程费时、费力,难以保证受控系统的动态特性和静态品质^[5]。对于精确数学模型难以建立的复杂系统,神经网络控制和模糊控制的优势尤其明显,具有高度的非线性逼近及预测能力,可以对系统动力学行为中未知部分进行预测逼近,从而实现机械臂的高精度跟踪,但是神经网络控制的局限性在于神经网络结构的不确定性、网络规模与工程应用的矛盾性以及数据样本依赖性等方面^[6-8]。变结构控制具有快速响应、对参数变化及噪声不灵敏、物理实现简单等优点,但是容易造成系统抖震,即控制误差在零点附近时,变结构控制策略存在较强的抖动现象,使得系统不稳定^[9]。迭代学习以及反演控制有利于解决非线性、强耦合和模型参数难以确定的控制系统,对于机械臂轨迹跟踪系统具有先进的理论研究意义^[10],但在物理实现和工程应用上条件局限。因此,本文提出运用人工智能的模糊控制算法,简化控制器参数的整定过程并解决模型不确定等问题,但是模糊控制设计也是一个相对复杂的过程,尤其是变论域的确定和隶属度函数形式的选择都对设计者造成了困难,面对此挑战,变论域的自适应模糊控制思想的引进给模糊控制器设计师带来了极大的便利^[11-12]。在整个闭环控制策略设计中,单力臂根据预期设置的控制指令进行轨迹跟踪,单力臂的角位移量与预期控制指令的偏差和偏差变化量被选取为反馈变量,实现误差控制。

控制策略能否及时响应是衡量该控制器在工程应用上的一项重要指标,现场可编程门阵列

(FPGA)硬件具有并行性架构特点,满足实时性高、可重配置性灵活以及开发周期短等优势^[13-15]。因此,为了保证运行速度,本文采用FPGA作为硬件基础实现变论域模糊控制器。变论域模糊控制器数学模型在实现过程中涉及大量重复的非线性函数和乘法运算,传统设计过程一般采用查找表和乘法器IP核进行实现,因而相对复杂的模型设计就会对FPGA的资源要求以及功耗提出挑战。本文提出分段线性化方法^[16-20]进行复杂函数硬件实现的功能替代,按照该方法思想,变论域模糊控制器硬件设计中所涉及的非线性函数和乘法器,均替换为复用器、移位器以及加减法器的逻辑实现,显著减轻了FPGA的硬件资源占用。Matlab仿真设计及验证表明,本文提出的变论域模糊闭环控制策略是正确有效的。FPGA物理实现表明,变论域模糊控制器的逻辑优化设计方法具有一定的工程应用价值。

1 变论域模糊控制算法的设计分析

单力臂示意图如图1所示,单力臂机械手根据运动学方程^[21]可描述为

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = -\frac{1}{I}(d\dot{\theta} + mgl\cos\theta) + \frac{1}{I}(\tau - \tau_d) \\ \tau_d = \text{sgn}(\dot{\theta}(t))(h_1|\dot{\theta}(t)| + h_2) \\ I = \frac{4}{3}ml^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为系统关节角位移量,是关于时间 t 的非线性函数; d 为机械运动的黏性摩擦系数; mg 为机械臂重力项; l 为机械臂质心距转动关节的距离; τ_d 为外加扰动的摩擦模型; τ 为控制力矩的输入; h_1 、 h_2 为外加扰动模型中的常数项; I 为运动学转动惯量。模型的具体参数值见表1。

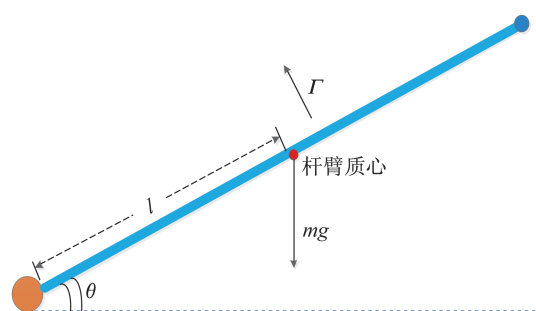


图1 单力臂示意图

Fig.1 Single-arm diagram

表 1 单力臂模型的仿真参数

Tab.1 Simulation parameter of single-arm model

模型参数	$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	l/m	m/kg	d	h_1	h_2
参数值	9.8	0.25	1.0	2.0	0.30	1.50

单力臂控制模型的仿真是基于变论域模糊控制算法设计一个主模糊控制器和一个伸缩因子模糊控制器,其中伸缩因子模糊控制器根据误差变化,自适应调节主模糊控制器论域的伸缩变换,使得单力臂系统输出不断跟踪收敛于预期给定指令。基于 Matlab 仿真平台,变论域模糊控制器设计了“主-从”二维模糊控制器进行系统的反馈闭环控制。其中,“从”模糊控制器根据其功能属性,在于调节主模糊控制器的论域变换,命名为伸缩因子模糊控制器。模糊控制器主要由“模糊化、变论域、模糊推理、去模糊化”4个解算过程构成:模糊化运算在于论域的确定和实际输入量的模糊量化;变论域运算在于根据计算得到伸缩因子不断修改论域范围;模糊推理运算过程主要基于模糊控制器里的数据库和规则库进行逻辑推理;去模糊化运算包括模糊控制量的清晰化变换和输出控制量的实际量化。仿真设计中机械臂的跟踪误差 e 与误差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入。

主模糊控制器采用 Mamdani 型模糊系统,如图 2 所示,跟踪误差 e 与误差变化率 e_c 经过模糊化处理后,使得模糊变量处于论域之中,其模糊输入量 E 、 E_c 以及输出变量 U 的基本论域范围均设定为 $[-3, 3]$,

收到伸缩因子模糊控制器输出量 λ 对基本论域的影响,控制过程中输入量 E 、 E_c 以及输出变量 U 基本论域变化分别为 $[-3\lambda_1, 3\lambda_1]$ 、 $[-3\lambda_2, 3\lambda_2]$ 和 $[-3\lambda_3, 3\lambda_3]$, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 称为对 E 、 E_c 和 U 的论域伸缩因子,本文取 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda$, 确定模糊集合为 $T(E)=T(E_c)=\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, $T(U)=\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 对应模糊集合的隶属度函数分别如图 3(a)~图 3(c)所示, NB 和 PB 采取非线性 Z 型和 S 型函数表示,其他均呈三角形分布, Z 型和 S 型表达式如下:

$$\begin{cases} F_{\text{NB}}(x) = \frac{1}{1 + \exp(5(x+2))} \\ F_{\text{PB}}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-5(x-2))} \end{cases} \quad (2)$$

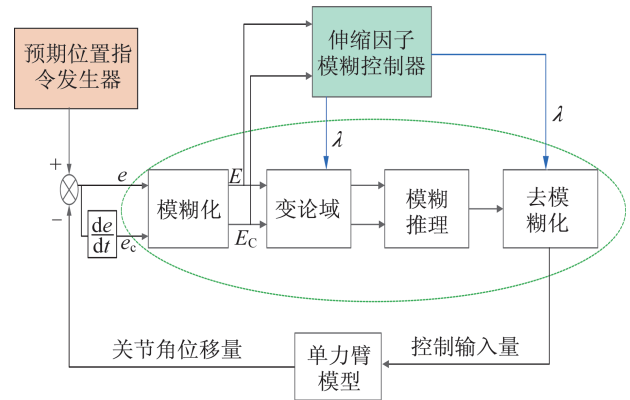


图 2 单力臂闭环控制结构

Fig.2 Single-arm closed-loop schematic diagram

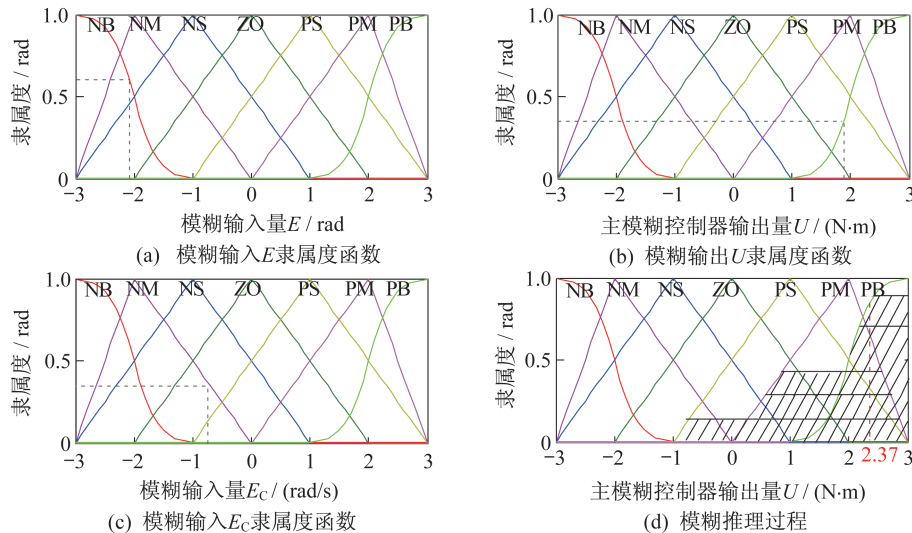


图 3 主模糊控制器输入输出变量的隶属函数曲线

Fig.3 Membership function curve of input and output variables of main fuzzy controller

依据专家经验和控制工程知识,建立主模糊系统的规则库(见表2)。规则库是由49条“IF_THEN”型的模糊条件句构成,如规则库第二条可具体表达为:IF E is NB and E_c is NM, THEN U is PB。

表 2 主模糊控制器规则库
Tab.2 Main fuzzy controller rule base

集合	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	NS	NS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	NS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	ZB	ZB

基于这些模糊控制器规则库,进行模糊推理运算。如图3(d)所示,模糊逻辑运算包括激活过程和综合过程,激活过程采用取小法,如图3(b)虚线所示。综合过程采用取大法。例如输出变量 U 的PB隶属度函数的规则,按照“取小-取大法”解读为

$$\begin{cases} F_{NB}(E) \text{ and } F_{NB}(E_c) \Rightarrow F_{PB}(U) \\ F_{NB}(E) \text{ and } F_{NM}(E_c) \Rightarrow F_{PB}(U) \\ F_{NB}(E) \text{ and } F_{NM}(E_c) \Rightarrow F_{PB}(U) \\ F_{NM}(E) \text{ and } F_{NB}(E_c) \Rightarrow F_{PB}(U) \end{cases}$$
$$\Rightarrow F_{PB,MAX}(U) \tag{3}$$

以此类推,通过模糊逻辑运算得到所有对应输出隶属度函数下的最大值。按照面积重心法,求取主模糊控制器的输出清晰值,如图3(d)阴影部分所示。

伸缩因子模糊控制器与主模糊控制器针对输入量 E 、 E_c 和输出量 λ 采用相同的隶属度函数,其中输入量 E 、 E_c 的基本论域和模糊集合与主模糊控制器的设定保持一致,输出量 λ 的基本论域设定为 $[0, 2]$,模糊语言值集合定义为: $T(\lambda)=\{I, II, III, IV, V, VI, VII\}$ 。

伸缩因子模糊控制器输入量 U 的隶属度函数如图4所示,形状与主模糊控制器隶属度函数曲线相似,其中各个值的范围分别为:I, $0 \sim 2/3$;II, $0 \sim 1$;III, $0 \sim 4/3$;IV, $1/3 \sim 5/3$;V, $2/3 \sim 2$;VI, $1 \sim 2$;VII, $4/3 \sim 2$;在各个值的给定范围外,其隶属度均置为零。

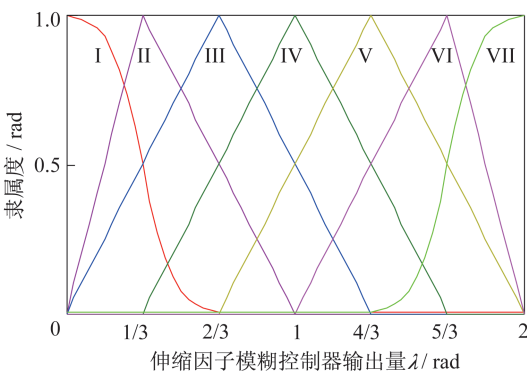


图 4 伸缩因子模糊控制器输出变量的隶属函数曲线
Fig.4 Membership function curve of output variables of auxiliary fuzzy controller

伸缩因子模糊控制系统的规则库见表3,当输入信号误差 E 是“NB”且误差变化率 E_c 是“NB”时,表明控制系统的负向跟踪误差很大,且误差变化处于继续负向急速增长的趋势,因此,对应“VII”隶属度函数,通过适当拉伸主模糊控制器的论域,加快主控制器的控制作用。当输入信号误差 E 是“NB”且误差变化率 E_c 是“PB”时,表明控制系统负向跟踪误差很大,但快速的误差增长率能够有效弥补过大的负误差量,因此,对应“IV”隶属度函数,无需改变主模糊控制器的论域,保持其控制作用即可。当输入信号误差 E 是“NB”且误差变化率是“PS”时,表明控制系统跟踪负向跟踪误差很大,但误差变化率处于缓慢增长的趋势,表明负向跟踪误差正在缓慢减小,但是控制精度不足,因此,对应“I”隶属度函数,通过压缩主模糊控制器的论域,加快跟踪误差的收敛速度。当输入信号误差是“PB”,误差变化率是“NB”时,表明控制系统虽然正向误差很大,但快速的误差下降率可以有效弥补过大的正向跟踪误差,因此,对应“IV”隶属度函数,无需改变主模糊控制器的论域,保持其控制作用即可。

表 3 伸缩因子模糊控制器规则库
Tab.3 Rule base of fuzzy controller with expansion factor

集合	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	VII	VII	VII	II	I	I	IV
NM	VII	VII	V	III	II	II	II
NS	VII	VI	VI	V	I	V	III
ZO	VI	VI	VII	IV	VII	VI	VI
PS	III	V	I	V	VI	VI	VII
PM	II	II	II	III	V	VII	VII
PB	IV	I	I	II	VII	VII	VII

设定预期位置指令为 $y = 10 \sin(32\pi t)$, 对于基于单力臂模型跟踪预期位置的闭环控制系统, 仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 显示了控制系统的实时误差变化, 褐色曲线放大状态可知误差变化范围在区间 $[-0.2, 0.2]$ 内波动, 误差精度在 0.02 以下, 针对单力臂控制系统, 控制效果显著。图 5(b) 表示随着时间变化的控制输入量, 从图中可以看出在刚开始跟随时需要能量较大, 控制输入曲线起伏很大, 系统跟随稳定后控制输入也趋于稳定, 控制输入曲线处于平滑。图 5(c) 蓝色实线代表预期的跟踪指令曲线, 红色实线代表真实单力臂模型的运动轨迹, 可以看出单力臂的运动轨迹在逐渐逼近并跟随上预期的控制指令。图 5(d) 表示预期指令曲线和跟

踪曲线的相位图, 近似呈现一条直线分布, 表明跟踪效果较好。

为进一步定量衡量该模糊系统的控制性能, 引入如下表征误差输入信号的波动特性的公式:

$$\text{wav} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (y_e - y)^2} \quad (4)$$

式中: $y_e - y$ 为跟踪误差量。

控制信号的能量损耗为

$$\text{Eng} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum C_e^2} \quad (5)$$

式中: C_e 为控制信号输入量; N 为计算选取的采集点个数。

经计算得, wav 为 0.002 4, Eng 为 244.04, 误差输入信号波动性小, 能量损耗低, 证实控制效果较优。

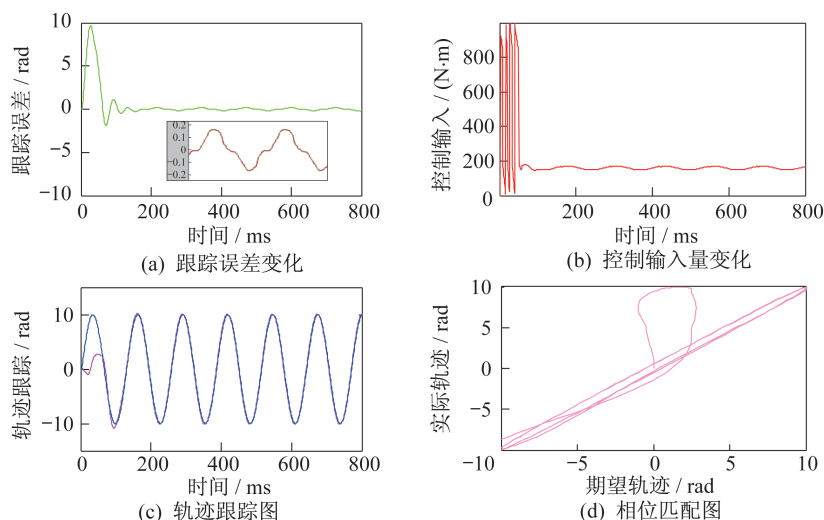


图 5 单力臂轨迹跟踪的仿真结果

Fig.5 Simulation results of single-arm trajectory tracking

2 变论域模糊控制算法的 FPGA 优化实现

变论域模糊控制器的实质是由主模糊控制器和伸缩因子模糊控制器构成, 两个模糊控制器综合协调使得控制性能更优。但是, 由于两者的模糊系统知识库(隶属度函数和规则库)的选择和设计上大同小异, 因此, 在硬件实现过程中, 设计主模糊控制器后创建软核 IP, 调用并修改部分参数值, 从而高效建立伸缩因子模糊控制器。在模糊控制器的设计中, 模糊化、变论域、模糊推理以及去模糊化这 4 个运算过程是整个模糊控制器设计的核心。基于此, 模糊控制器的硬件实现基本框图如图 6 所示。

按照功能实现划分为隶属度函数实现模块、规则库建立模块、模糊推理模块以及去模糊化模块。 E 和 E_c 作为控制器的输入变量, 经过各自的隶属度函数库, 得到函数输出值。在模糊推理激活过程中, 依据 49 条规则库, E 和 E_c 的函数输出值按照“取小法”设计, 通过比较器和复用器功能实现, 得到对应输出隶属度函数 U 的 49 个值。在模糊推理综合过程中, 将这 49 个值按照输出变量 U 的模糊集合进行分类, 通过比较器、复用器以及寄存器功能实现, 取对应模糊集合下的最大值 $NB_{\max}$ 、 $NM_{\max}$ 、 $NS_{\max}$ 、 $ZO_{\max}$ 、 $PM_{\max}$ 、 $PS_{\max}$ 、 $PB_{\max}$ 。

在去模糊化设计过程中, 依据面积重心法公式求取模糊控制的输出量:

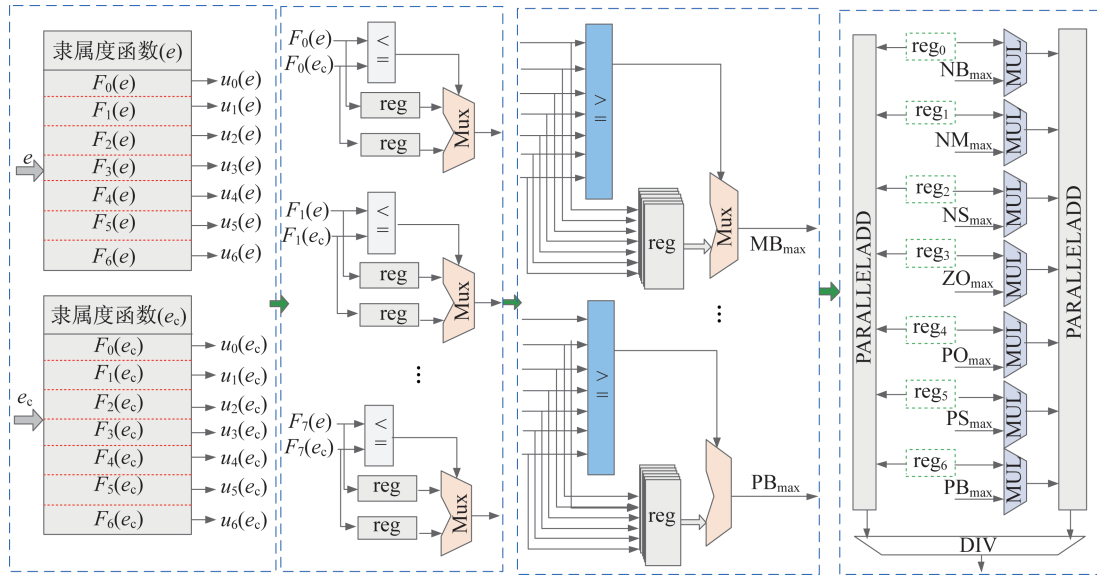


图 6 模糊控制器的硬件实现框图

Fig.6 Hardware implementation diagram of fuzzy controller

$$U = (NB_{\max} \cdot \text{reg}_0 + NM_{\max} \cdot \text{reg}_1 + \dots + PB_{\max} \cdot \text{reg}_6) \cdot (NB_{\max} + NM_{\max} + NS_{\max} + ZO_{\max} + PM_{\max} + PS_{\max} + PB_{\max})^{-1} \quad (6)$$

式中: $\text{reg}_i (0 \leq i \leq 6)$ 为输出变量 U 在不同模糊集合下对应隶属度函数的质心值。

硬件实现过程中,对模糊控制器进行模块化设计,模块划分为隶属度函数库的建立、模糊推理激活过程、模糊推理综合过程和重心法解模糊过程。传统的硬件设计中,乘法器和查找表的使用是建立隶属度函数库以及去模糊化运算的主要设计手段。从节省硬件资源的角度考虑,本文介绍模糊控制器的无乘法实现方法,在设计过程中,所有的查找表和乘法器的使用均被替代为复用器、移位器以及加法器运算,显著降低复杂算法模型给硬件带来的资源消耗。

模糊系统设计中, PB 和 ZB 模糊集合下的隶属度函数是指数型非线性函数,针对隶属度函数非线性函数进行分段线性化方法处理,由函数 $F_{\text{PBlin}}(x)$ 和 $F_{\text{ZBlin}}(x)$ 代替:

$$F_{\text{PBlin}}(x) = \begin{cases} k_0 x + b_0, & x_0 \leq x < x_1 \\ k_1 x + b_1, & x_1 \leq x < x_2 \\ k_2 x + b_2, & x_2 \leq x < x_3 \\ k_3 x + b_3, & x_3 \leq x < x_4 \\ k_4 x + b_4, & x_4 \leq x < x_5 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{\text{ZBlin}}(x) = \begin{cases} k_0 x + b_0, & x_0 \leq x < x_1 \\ k_1 x + b_1, & x_1 \leq x < x_2 \\ k_2 x + b_2, & x_2 \leq x < x_3 \\ k_3 x + b_3, & x_3 \leq x < x_4 \\ k_4 x + b_4, & x_4 \leq x < x_5 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

而其他模糊集合下的隶属度函数本身便是分段线性函数,便于硬件上的资源优化实现。

利用 Matlab 的拟合工具箱,基于最小二乘法思想进行非线性函数的分段取点。修正后的隶属度函数 $F_{\text{PBlin}}(x)$ 和 $F_{\text{ZBlin}}(x)$ 可以近似为六段分段线性直线表示,参数 $k, 0 \leq i \leq 5$ 表示分段线性化之后各段线性直线的斜率,参数 $b, 0 \leq i \leq 5$ 表示分段线性化之后各段线性直线的截距。

修正后的隶属度函数与原隶属度函数的匹配精度如图 7 所示。其中,图 7(a)代表 $F_{\text{PBlin}}(x)$ 线性化过程,图 7(b)图中代表 $F_{\text{ZBlin}}(x)$ 线性化过程,蓝色实线代表原函数,红色代表修正后的分段函数,绿色表示两者间的误差情况。表 4 和表 5 给出了算法模型修正后所有的隶属度函数系数值。

此外为了定量衡量修正后的误差变化情况,本文提出了一系列误差标准,定义为

$$\begin{cases} E_{\text{MA}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |e_i| \\ E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (f_{\text{or}}(i) - f_{\text{lin}}(i))^2}{M}} \end{cases} \quad (9)$$

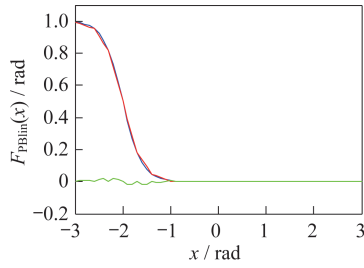
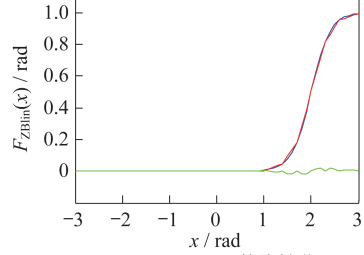
(a) $F_{PBin}(x)$ 函数线性化(b) $F_{ZBin}(x)$ 函数线性化

图 7 分段线性化函数与原函数对比

Fig.7 The comparison of piecewise linear function and original function

式中: E_{MA} 为绝对误差; E 为标准误差; e_i 为采集点误差; M 为采集次数; $f_{gr}(i)$ 、 $f_{lin}(i)$ 为采集点处的原函数值和修正函数值。

根据式(8), 计算近似隶属度函数 $F_{PBin}(x)$ 和 $F_{ZBin}(x)$ 的误差, 由于两隶属度函数镜像对称, 所以计算后的误差系数一致, 分别是标准误差 $E=0.0068$,

表 4 分段线性化函数 k 系数Tab.4 k coefficients in piecewise linear function

函数	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
F_{PBin}	-0.101	-0.45	-1.058	-0.449	-0.119	0
F_{NM}	1.0	-0.5	0	—	—	—
$F_{NS/ZO/PS}$	0.5	-0.5	0	—	—	—
F_{PM}	-1.0	0.5	0	—	—	—
F_{ZBin}	0.1017	0.45	1.0587	0.4499	0.1186	0

表 5 分段线性化函数 b 系数Tab.5 b coefficients in piecewise linear function

函数	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
F_{PBin}	0.6882	-0.217	-1.617	-0.582	-0.119	0
F_{NM}	3.0	0	0	—	—	—
$F_{NS/ZO/PS}$	1.5	0.5	0	—	—	—
F_{PM}	0	3.0	0	—	—	—
F_{ZBin}	0.6882	-0.217	-1.617	-0.582	-0.119	0

绝对误差 $E_{MA}=0.0032$, 显而易见修正后的误差波动保证在可接受精度范围内。

近似隶属度函数 $F_{PBin}(x)$ 和 $F_{ZBin}(x)$ 的硬件实现框图如图 8(a)~图 8(b) 所示, 所有非线性项和乘法器均被替代为加法器、比较器、移位器和复用器进行功能实现。同时, 在去模糊运算模块中所涉及的乘法器和除法器也采取同样的方法, 将其替代为硬件资源更为丰富的移位器和加法器运算。

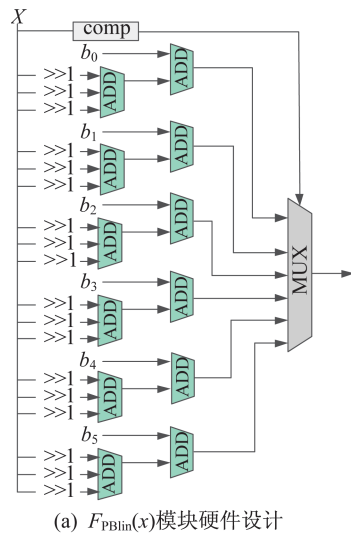
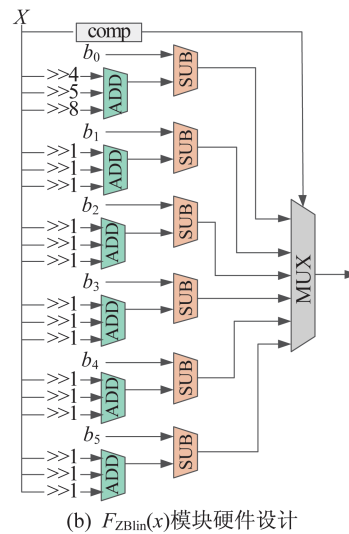
(a) $F_{PBin}(x)$ 模块硬件设计(b) $F_{ZBin}(x)$ 模块硬件设计

图 8 分段线性化函数流水线结构

Fig.8 Pipeline structure of piecewise linear function

3 实现结果

硬件设计基于 Altera DE2-115 的开发平台, 本

节给出了变论域模糊控制器的实现结果。基于 FP-GA 下的控制系统的关节角输出变化和误差波动的

Modelsim 软件仿真图和示波器图如图 9 所示。图 9(a)中黄色和蓝色线条分别表示预期控制指令和模型关节角位移的跟踪变化,紫色代表关节角速度的

变化,绿色代表误差变化量。图 9(b)~图 9(c)分别表示示波器下的关节角位移量变化和误差变化量,横坐标时间尺度为 $20\ \mu\text{s}$,纵坐标电压尺度为 $1\ \text{V}$ 。

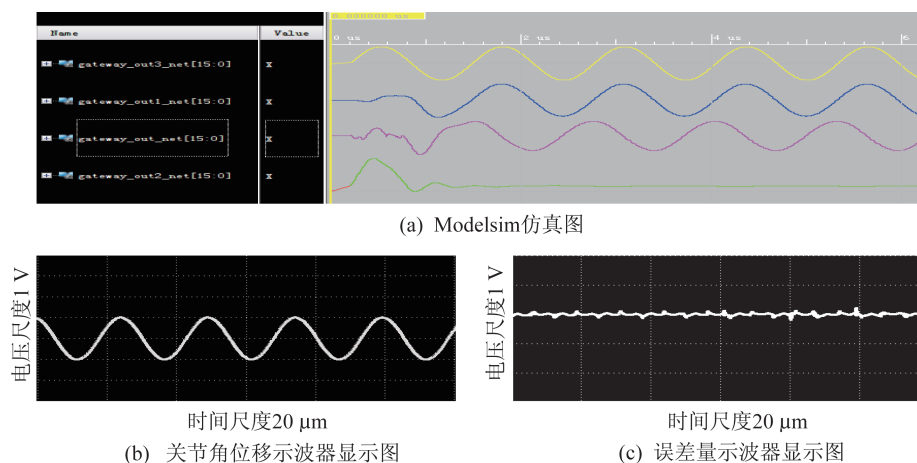


图 9 FPGA 硬件实现结果图

Fig.9 Results diagram of FPGA hardware implementation

对 FPGA 而言,底层基础的移位器、加法器、比较器以及复用器等都是相对充足的,属于总逻辑组成元素中的一部分。而数字处理模块如乘法器模块和累加器模块、片上存储资源对于设计而言是有限的。DE2-115 开发平台最多支持 532 个 9 位乘法器模块,3.9 Mbit 的 SRAM 存储空间,见表 6。大量高精度的乘法运算和隶属度函数缓存将对控制器的设计提出挑战。因此,本文通过分段线性化以及移位操作等方法,将算法模型中所有的隶属度函数非线性项、乘法器运算所涉及的乘法器模块和片上存储等有限资源,均转化为加法器、移位器等底层硬件资源的设计,系统的最高工作频率达到 89.71 MHz,满足设计的实时性要求。硬件资源的有效节省在工程实际应用中具有重要意义,本文在主模糊控制器和伸缩因子模糊控制器的硬件设计上均采用了 49 条模糊控制规则,由仿真结果得知,跟踪误差在 ± 0.2 之间波动,误差精度控制在 0.02 范围内。一方面,零乘法器的使用可以为算法升级提供支持。硬件资源的消耗主要体现在模糊规则的逻辑实现,变论域模糊控制器的精度可以通过添加更多细化的模糊控制规则和更加复杂的隶属度函数,从而进一步提高控制精度。本文在设计 $7 \times 7 = 49$ 条模糊规则库上使用了约 $1/3$ 的总逻辑组成元素,见表 6。因此,可以估计出该芯片可支持 $12 \times 12 = 144$ 条模糊规则库的控制器实现。另一方面,资源优化降低对硬件芯片的要求,比如片上内存资源以及专

用的 DSP 数字处理模块的节约,便于工程上对硬件芯片的选型,在大规模批产等应用上可以合理控制硬件成本。

表 6 资源利用率

Tab.6 Hardware resource utilization

硬件资源	片上可支持	工程应用
总逻辑组成元素	114 480	34 152 (29.8%)
总存储位/bits	3 981 312	0
专用逻辑寄存器	114 480	6 516 (5.7%)
内嵌乘法器/(9 bits)	532	0
最高运行频率/MHz	143	89.71

4 结束语

本文以单力臂模型为被控对象,采用变论域模糊控制算法,进行了关节角位置跟踪的仿真分析。仿真结果表明,变论域模糊控制算法在对非线性被控系统上具有良好的控制性能和自适应性。同时,针对变论域模糊控制算法的 FPGA 硬件实现存在的问题提出了优化设计,对算法模型进行线性化修正,有效节省了算法硬件实现过程中的硬件资源,从而可以推广到模糊规则更多、控制更精确的变论域模糊控制器的硬件逻辑设计。本文的理论仿真运用了 Matlab/Simulink 建立了被控对象和控制算法模型,通过了仿真验证,验证了控制算法的有效性。在理论分析基础上,基于 FPGA 高速平台完成了变论域模糊控制算法的硬件设计并进行优化实

现,通过物理实现结果验证其可实施性,满足实时性要求,具有实际的工程应用价值。

参考文献

- [1] SHAIKH A, KHALADKAR G, JAGE R, et al. Robotic arm movements wirelessly synchronized with human arm movements using real time image processing [C]// 2013 Texas Instruments India Educators' Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 277-284.
- [2] PUGA-GUZMÁN S, MORENO-VALENZUELA J, SANTIBÁÑEZ V. Adaptive neural network motion control of manipulators with experimental evaluations [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(2): 694706.
- [3] 盛晨函,曾忠.一种单力臂机械系统的鲁棒自适应控制[J].机械工程与自动化,2013(3):148-150.
- [4] BEN A I, BOUTERAA Y, REKIK C. Kinect-based sliding mode control for lynxmotion robotic arm [J]. Advances in Human-Computer Interaction, 2016, 2016:1.
- [5] 伍玩秋.自动化控制下机械手臂运动轨迹研究[J].计算机测量与控制,2017,25(6):78-81.
- [6] AMATO F, COLACINO D, COSENTINO C, et al. Trajectory tracking control of a biomimetic exoskeleton for robotic rehabilitation [C]// 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 228-232.
- [7] YANG C, HUANG K, CHENG H, et al. Haptic identification by ELM-controlled uncertain manipulator [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(8): 2398-2409.
- [8] LUNARDINI F, CASELLATO C, D'AVELLA A, et al. Robustness and reliability of synergy-based myocontrol of a multiple degree of freedom robotic arm [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 24(9): 940-950.
- [9] 陈翔,黄龙,杨洋.基于计算力矩法的眼内手术机器人的重力补偿[J].北京航空航天大学学报,2017,43(6): 1231-1238.
- [10] RAKIB T, SARKAR M A R. Design and fabrication of an autonomous fire fighting robot with multisensor fire detection using PID controller [C]// 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 909-914.
- [11] KUNG Y S, TSAI M H. FPGA-based speed control IC for PMSM drive with adaptive fuzzy control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2476-2486.
- [12] MONMASSON E, CIRSTEAN M N. FPGA design methodology for industrial control systems: a review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1824-1842.
- [13] YANG S, DENG B, WANG J, et al. Design of hidden-property-based variable universe fuzzy control for movement disorders and its efficient reconfigurable implementation [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 27(2): 304-318.
- [14] LIN Q, WANG J, YANG S, et al. The dynamical analysis of modified two-compartment neuron model and FPGA implementation [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 484: 199-214.
- [15] YANG S, DENG B, WANG J, et al. Design of hidden-property-based variable universe fuzzy control for movement disorders and its efficient reconfigurable implementation [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 27(2): 304-318.
- [16] YANG S, WANG J, LI S, et al. Cost-efficient FPGA implementation of basal ganglia and their Parkinsonian analysis [J]. Neural Networks, 2015, 71: 62-75.
- [17] YANG S, DENG B, WANG J, et al. Efficient implementation of a real-time estimation system for thalamocortical hidden parkinsonian properties [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40152.
- [18] YANG S, WANG J, DENG B, et al. Real-time neuromorphic system for large-scale conductance-based spiking neural networks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49(7): 2490-2503.
- [19] YANG S, WANG J, LI S, et al. Digital implementations of thalamocortical neuron models and its application in thalamocortical control using FPGA for parkinson's disease [J]. Neurocomputing, 2016, 177: 274-289.
- [20] HAYATI M, NOURI M, HAGHIRI S, et al. Digital multiplierless realization of two coupled biological Morris-Lecar neuron model [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(7): 1805-1814.
- [21] 刘金琨.机器人控制系统的设计与Matlab仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.