

基于模糊控制的移动机械臂系统设计

李伟中¹, 张 朋², 钟尚鹏¹, 卢自宝¹

(1. 安徽师范大学安徽省智能机器人信息融合与控制实验室, 安徽 芜湖 241000; 2. 山东山矿机械有限公司, 山东 济宁 272041)

摘要: 在移动机械臂系统的设计领域中, 设计出具有良好动态性能且稳定的控制系统是一个难点。提出了一种基于模糊控制的移动机械臂控制方法, 运用Matlab语言对趋近和抓取过程分别设计了二维模糊逻辑推理系统, 选取相对合理的隶属度函数类型并设计合适的控制规则, 最后通过Simulink建立移动机械臂路径趋近及抓取的数学模型并进行仿真实验。仿真结果表明该系统能够满足具体的趋近要求, 能够抑制抓取过程中的扰动, 拥有较好的动态性能和稳定性, 可降低传统算法中的控制损耗及对环境条件的依赖。

关键词: 移动机械臂; 模糊逻辑推理; 二维模糊控制器

Design of mobile manipulator system based on fuzzy control

LI Weizhong¹, ZHANG Peng², ZHONG Shangpeng¹, LU Zibao¹

(1. Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Shandong Shankuang Machinery Co., Ltd., Jinning 241000, China)

Abstract: In the field of the design of the mobile mechanical arm system, it is a difficult to design a control system with good dynamic performance and stability. A control method of a moving robot arm based on fuzzy control is proposed. The two-dimensional fuzzy logic reasoning system is designed by using the Matlab language to approach and grasp, and the relative reasonable membership function type is selected, and the appropriate control rule is designed. Finally, the mathematical model of the path approach and the grabbing of the moving robot arm is established by Simulink, and the simulation experiment is carried out. The simulation results show that the system can meet the specific approaching requirement and can restrain the disturbance and hold in the process of grasping. Better dynamic performance and stability can reduce the control loss in the traditional algorithm and the dependence on the environment condition.

Key words: mobile manipulator; fuzzy logic reasoning; two-dimensional fuzzy controller

0 引言

移动机械臂的性能优于传统的机械臂, 在集成环境交互、动态控制决策之后, 可代替人在各种危险的情况下工作, 如爆炸物清除、野

外勘探和太空作业等, 也可以完成复杂的工业制造^[1]。但是移动机械臂系统的子系统之间存在着很强的动态耦合和独特的动态特性, 控制品质很难保持, 且整体的决策变得较困难^[2]。当系统的动态模型中包含结构不稳定因素或外部受到非线性干扰时, 传统方法的控制准确度

国家自然科学基金资助项目 (61503003)

会变得不稳定^[3]。在移动机械臂系统的设计领域中，设计出具有良好动态性能且稳定的控制系统一直是研究的热点^[4]。

针对上述问题，本文提出了一种基于模糊控制的移动机械臂控制方法。在移动机械臂的运动规划中，模糊控制能更有效地执行动作，同时可以满足具体趋近和抓取要求，抑制过程中的扰动，拥有较好的动态性能和鲁棒性。

1 移动机械臂模糊系统设计

1.1 系统的总体构成

本系统主要由模糊推理决策、图像伺服、目标趋近和目标抓取4个主过程组成。该系统选择模糊控制器作为主控制器，选取直流电动机和舵机作为移动平台和机械臂关节的执行装置，选择图像传感器作为系统的图像采集装置，以实现快速稳定追踪物体和夹取物体的模拟。系统框图如图1所示。

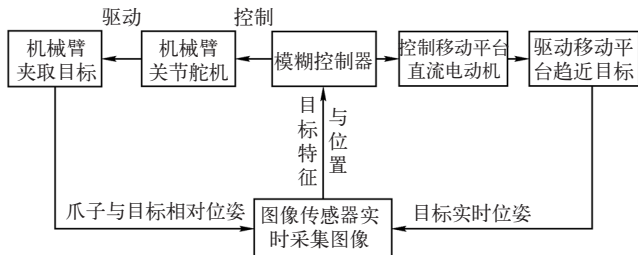


图1 系统框图
Fig. 1 System chart

1.2 系统设计原理

模糊控制器将实际位姿信息与期望位姿进行对比，对数据进行逻辑推理，同时进行一系列模糊化运算、模糊决策逻辑运算及精确化运算，输出移动机械臂期望的位姿状态^[5]。

当模糊控制器确认目标的实时位姿和完成逻辑推理后，输出控制信号控制移动平台电动机运转，使系统接近目标，并不断校正输出，完成整个目标趋近过程；然后驱动机械爪关节舵机运转，实现机械臂的抓取动作，同时通过图像伺服提升控制准确度，完成整个目标抓取过程。

1.3 模糊控制的基本原理

模糊控制理论是将模糊知识应用于系统控制的一种方法，它可以根据人的经验来建立相应的模糊控制策略，可以更有效地执行预定动作，拥有较好的动态性能和鲁棒性^[6]。模糊控制器一般由模糊化、知识库、模糊逻辑决策和精确化构成^[7]。模糊化输入会将原精确值输入进行输入标定，然后依据知识库进行模糊量转换，其过程主要实现将数字输入量转化为用通用语言值标定的模糊量；逻辑决策进行运算输出；精确化会将控制输出量进行量化，并输出标定进行原精确值输出，后将其经量化变换变成实际控制量^[8]。其原理框图如图2所示。

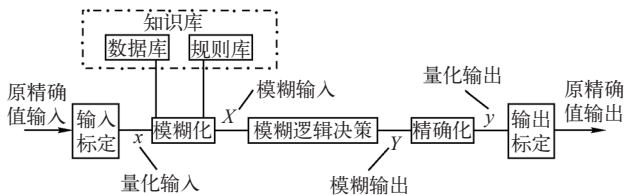


图2 模糊控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of fuzzy control principle

2 趋近模糊系统设计及仿真

2.1 移动平台位移姿态分析及数学模型

系统所用移动平台为左右轮同时驱动的小车，可将其简化为两只轮子的移动模型，而且设定其参数如下：左右轮的半径为 r ，它们之间的距离为 L 。移动模型的位移姿态如图3所示。

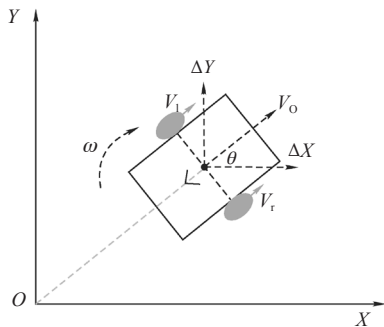


图3 移动平台位移姿态

Fig. 3 Mobile platform displacement attitude

移动平台在运动时，远离车辆转弯内侧的车轮转速较快。推理可得出移动平台的数学模型如图4所示。

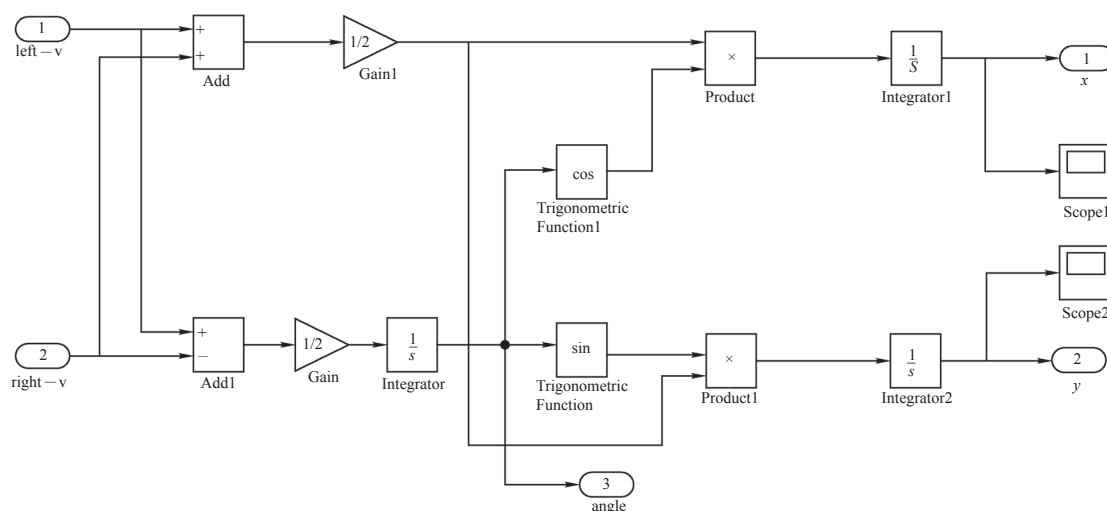


图4 移动平台数学模型

Fig. 4 Mathematical model of mobile platform

2.2 趋近模糊控制器设计

针对移动机械臂系统的趋近过程及移动平台的数学模型，设计了一个双输入双输出的模糊控制器，如图5所示。选取系统与目标的距离 E_d 和与目标的角度偏差 θ 作为模糊控制器的输入变量，选取移动平台的左右轮速度 $left - v$ 、 $right - v$ 作为输出变量。

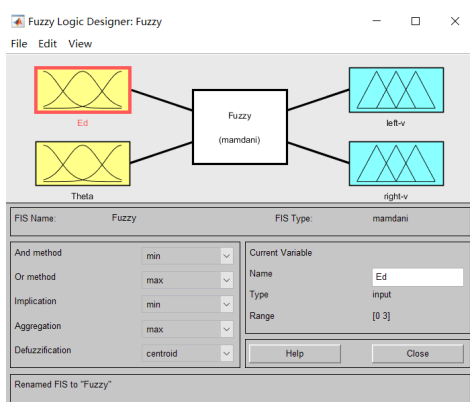


图5 趋近过程的模糊控制器

Fig. 5 Fuzzy controller for approaching process

针对输入变量 E_d ，定义其论域为 $[0,3]$ ，同时确定论域内的模糊子集：Close - B（大近）、Close - S（小近）、Med（适中）、Far - S（小远）和Far - B（大远）；针对输入变量 θ ，定义其论域为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ，同时包含有PB、PS、O、NS和NB 5个模糊子集；针对输出变量 $left - v$ 、 $right - v$ ，定义其控制范围为 $[0,20]$ ，同时包

含模糊子集：Slow - B（大慢）、Slow - S（小慢）、Med（适中）、Fast - S（小快）和Fast - B（大快）。趋近过程的模糊规则如表1所示。

表1 趋近过程的模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table of approaching process

left - v/ right - v	Theta				
	NB	NS	O	PS	PB
Far - B	FB/M	FB/FS	FB/FB	FS/FB	M/FB
Far - S	FB/LS	FS/M	FS/FS	M/FS	LS/FB
Med	FS/LS	FS/LS	M/M	LS/FS	LS/FS
Close - S	M/LS	M/LS	LS/LS	LS/M	LB/FS
Close - B	LS/LB	LS/LB	LB/LB	LB/LS	LB/M

最后设计趋近过程的模糊控制规则，实现系统在初始条件下快速接近目标点，并根据与目标的相对距离实时调整自身速度，在产生角度偏差时调整左右轮的速度，产生速度差来实现转角。

2.3 趋近模糊系统的仿真模型

根据对移动平台的数学模型解析，在设计好模糊控制器后，可在Simulink中设计趋近过程的完整仿真，同时加入不同的输入目的信号，完成对设计的模糊逻辑系统的测试仿真。趋近过程的仿真如图6所示。

2.4 针对定点目标的仿真及结果

针对定点目标仿真的基本思想为：给予趋近系统一个固定点，使系统趋近此定点，并在

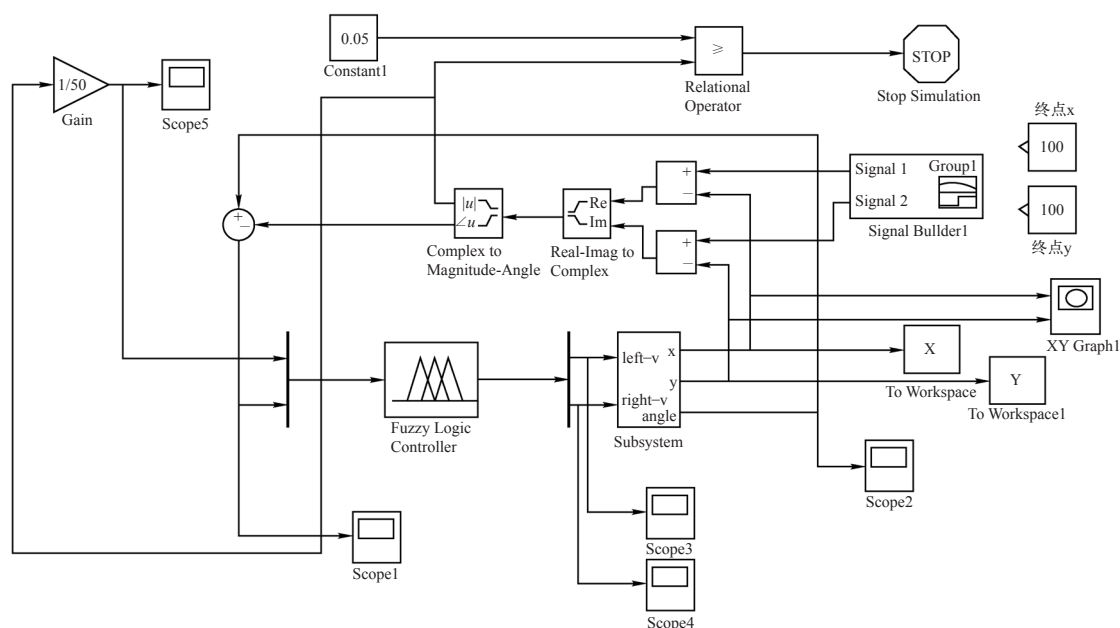


图6 趋近过程的仿真

Fig. 6 Simulation of approaching process

如图7所示的仿真图像结果中查看趋近效果，同时通过查看如图8所示的目标距离Ed和角度偏差Theta的图像来判断系统的控制效果。实际仿真中，选择了(100, 100)作为定点目标，同时设定系统初始位置为0和初始角度为 0° 。

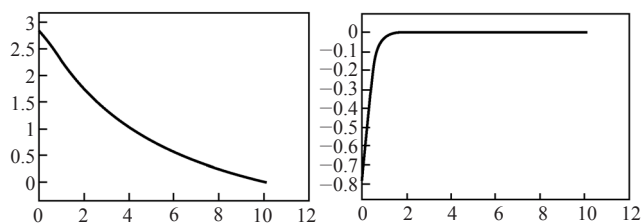


图8 目标距离Ed和角度偏差Theta的仿真图像

Fig. 8 Simulation image of target distance E_d and angle deviation Θ

糊控制的响应较平滑, 其中Theta的响应较灵敏, 可以很快地削弱角度偏差。从总体来看, 设计好的趋近系统可以很好地完成定点趋近任务, 且在趋近的过程中有良好的稳定性和快速性, 同时也有较好的响应灵敏度。

2.5 针对动态目标的仿真及结果

针对动态目标仿真的基本思想为：使系统趋近一个动态点，与定点不同的区别在于系统将要接近初始点时，瞬间改变为第二、三个目标点，由此进行系统的动态趋近仿真，其结果如图9所示。在实际仿真中，首先选择 $(20, 0)$ 作为初始点，同时设定系统初始位置为0和初始角度为 0° 。在系统将要接近该点时，瞬间改变目标点为 $(100, 100)$ ，同理当系统将要接近该点

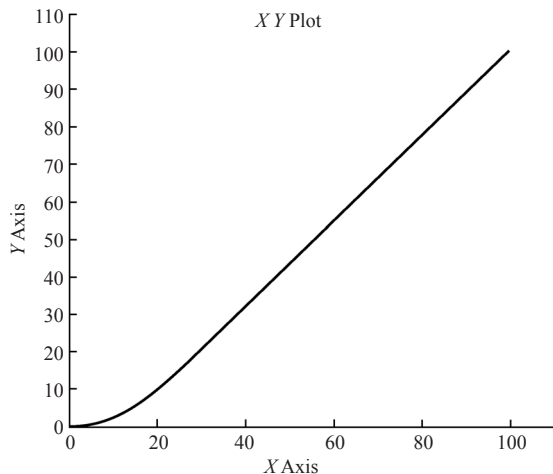


图7 定点趋近的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of fixed point approach

从图7中可看出,当设定定点为(100, 100)系统初始位置为0和初始角度为 0° 时,系统平滑并快速地调整自身角度以正对目标,可以很好地完成定点趋近任务;同时从图8目标距离Ed和角度偏差Theta的图像中看出,模

时,将点(200,100)作为最终目标点。

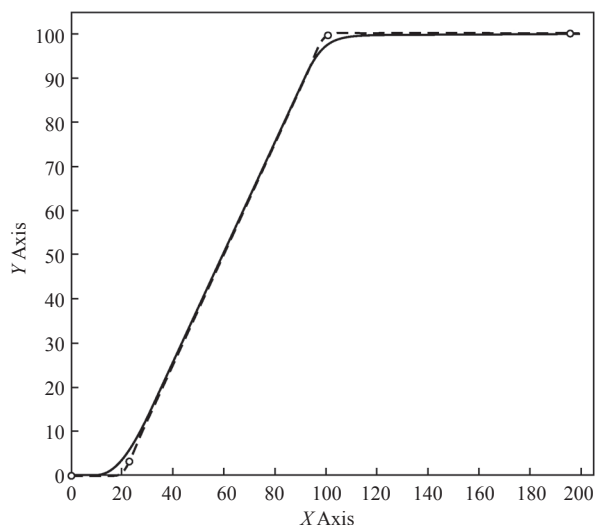


图9 动态趋近的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of dynamic approach

从图9中可看出,设定系统初始位置后,当设定初始目标点为(20,0)时,系统快速靠近该点;当移动目标点转变时,针对新的目标点变化,整个模糊逻辑推理系统可以很好地适应目标点的变化,并可以很好地完成动态目标点趋近的任务。

目标距离Ed和角度偏差Theta的仿真图像如图10所示。从图10中可以看出,系统可以迅速地反应,而且响应的输出结果较平滑,最终完全消除目标距离和角度偏差的误差。其中对Theta的响应更灵敏,在稍微的噪声允许范围内可以很快消除目标点位置突变的角度偏差。

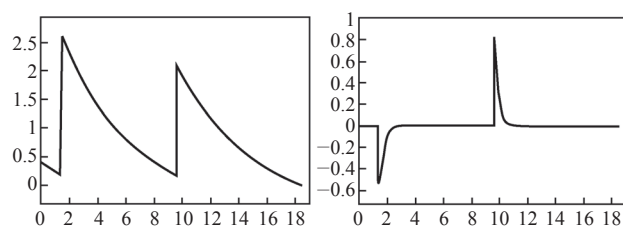


图10 目标距离Ed和角度偏差Theta的仿真图像

Fig. 10 Simulation image of target distance Ed and angle deviation Theta

3 抓取模糊系统设计及仿真

3.1 抓取系统数学模型分析

针对抓取过程,首先对抓取结构进行分

析,本系统采用的是用舵机驱动的机械爪进行抓取,当舵机转动一角度时,机械爪就运作一角度。对舵机而言,舵机内部由放大器、直流电动机、减速器和电位反馈装置组成^[9]。其结构如图11所示。

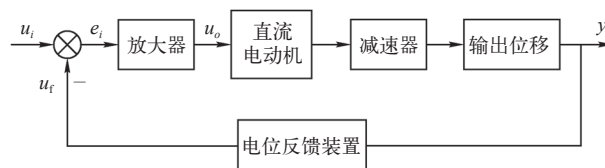


图11 舵机内部结构

Fig. 11 Internal structure of steering gear

针对舵机内部结构的数学模型,本系统给定了一种舵机数学模型来进行抓取过程的仿真,舵机结构的数学模型如图12所示。

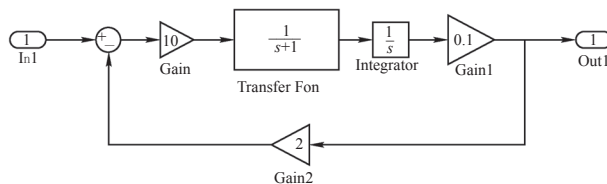


图12 舵机结构的数学模型

Fig. 12 Mathematical model of steering gear structure

3.3 抓取模糊控制器设计

系统选择期望位置与实际位置的位移偏差Ey与对Ey求导得出的误差变化量Ec作为输入变量,选择输送给舵机的信号U作为输出变量。抓取过程的模糊控制器如图13所示。

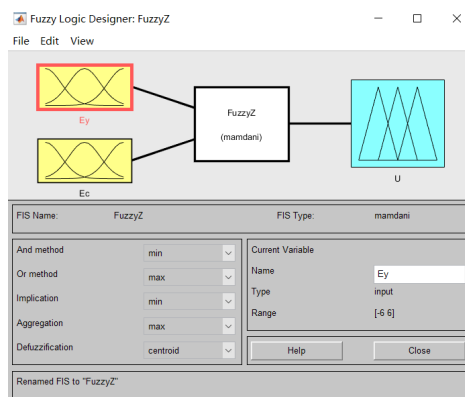


图13 抓取过程的模糊控制器

Fig. 13 Fuzzy controller of grabbing process

针对Ey和Ec,定义其控制范围为[-6,6],而对U,定义其控制范围为[-2,2],同时包含

有PB、PS、O、NS和NB 5个模糊子集。

最后设计抓取过程的模糊控制规则, 实现移动机械臂快速抓取目标, 并在出现位移变化和外界扰动时能快速抵抗干扰, 消除偏差。抓取过程的模糊规则如表2所示。

表2 抓取过程的模糊规则表

Tab. 2 Table of fuzzy rules for grabbing process

U		Ey				
		NB	NS	O	PS	PB
Ec	NB	NB	NB	NS	NS	O
	NS	NB	NS	NS	O	PS
	O	NS	NS	O	PS	PS
	PS	NS	O	PS	PS	PB
	PB	O	PS	PS	PB	PB

3.3 抓取模糊系统的仿真模型

根据前文描述的机械爪数学模型分析，在设计好抓取过程的模糊控制器后，可在Simulink中设计抓取过程的完整仿真，同时加入阶跃信号的干扰信号，完成对系统的稳定性测试仿真，如图14所示。

3.4 针对阶跃干扰输入的仿真结果与分析

针对阶跃干扰输入仿真的基本思想为：给予抓取系统一个阶跃干扰后，使系统克服该干扰，完成仿真后，在仿真的图像结果中查看抑制扰动的效果和系统的控制准确度。

阶跃输入的抓取仿真结果如图15所示。从图15中可看出, 当给予抓取系统一个阶跃干

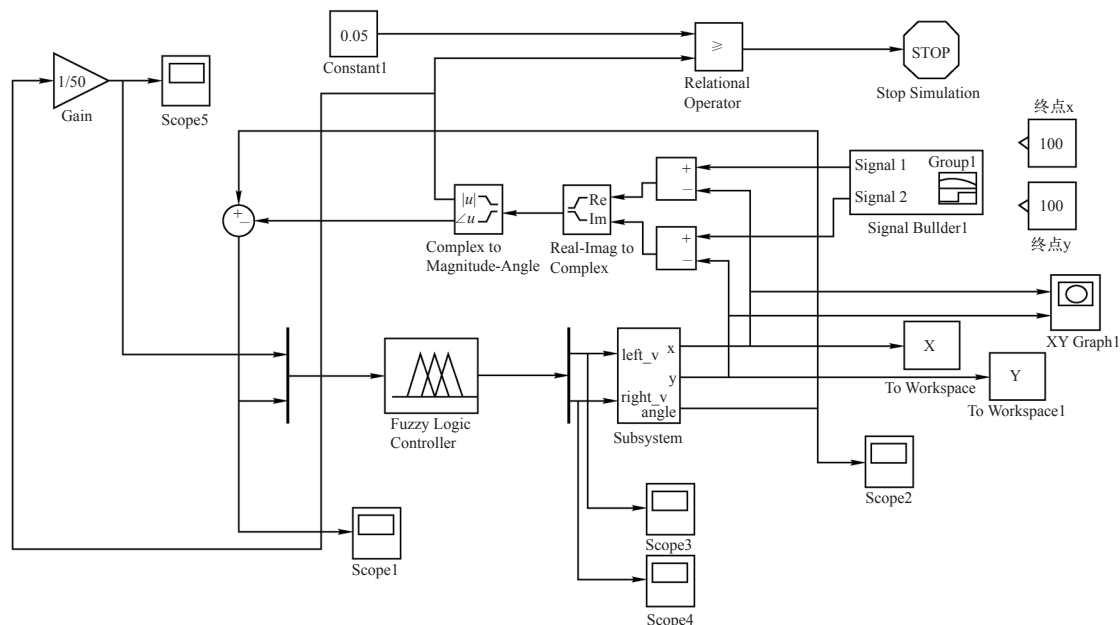


图14 抓取过程的仿真

Fig. 14 Simulation of grabbing process

扰后,设计好的模糊系统可以迅速响应,并能很好地克服该干扰,最终完全消除该干扰。从数据上来看,对系统设定的舵机数学模型,在原始阶跃输入的条件下,输出信号存在衰减振荡,调节时间较长,且拥有16.3%的超调;而加入抓取模糊控制系统之后,可以看出系统的输出明显消除了振荡,没有超调,且拥有较短的调节时间,动态性能明显提高。

控制器的输入输出结果如图16所示。从图16中可看出，当位移偏差和偏差变化产生时，模糊控制器能快速感知并依据设计好的控制规则作出响应，拥有较短的调节时间；从控制器的输出可以看出在抑制干扰上，系统能迅速恢复平衡，输出结果较平滑且保持良好的控制准确度。

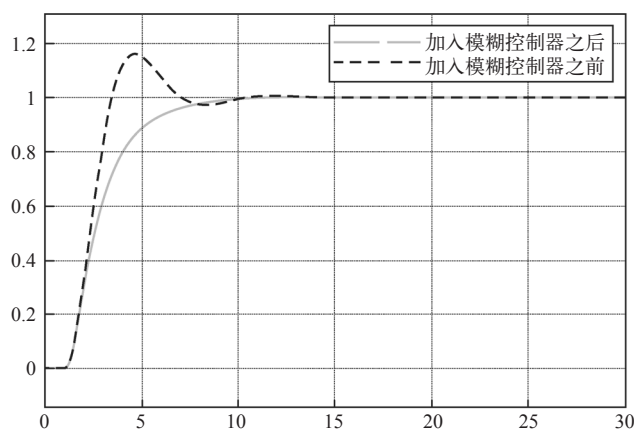


图15 阶跃输入的抓取仿真结果

Fig. 15 Grasping simulation results of step inputs of step input

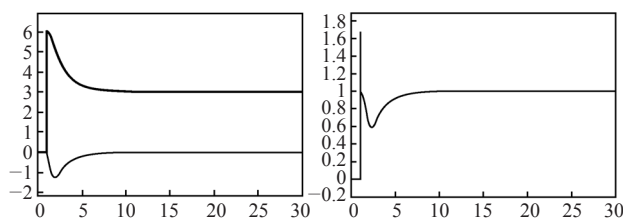


图16 控制器的输入输出的仿真图像

Fig. 16 Simulation image of input and output of controller

4 结束语

综合上述仿真结果及分析,针对不同的输入要求,设计好的模糊控制器能很好地适应于移动机械臂系统,同时得出如下结论。

1) 针对设计好的趋近模糊控制系统,系统可以很好地适用于动态目标点趋近的任务,且在趋近的过程中能够有效地克服目标点发生的位移变化,拥有较短的调节时间和较好的响应灵敏度,同时也具有良好的稳定性和快速性。可以推断出当目标出现位移偏差和系统出现干扰时,该系统能够很好地适应环境的扰动,拥有较好的鲁棒性,提高了移动机械臂的趋近效率。

2) 设计好的抓取模糊控制系统可以很好地适用于阶跃信号输入的干扰,拥有较短的调节时间和较好的响应灵敏度,可以明显提高系统的动态性能和稳定性。可以推断出在目标的位移发生偏差扰动和系统出现外界干扰时,该系

统能够很好地适应环境的干扰,拥有较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 裴以建,杨亮亮,杨超杰.基于一种混合遗传算法的移动机器人路径规划[J].现代电子技术,2019,42(2):183-186.
- [2] 董玉明,俞立,朱俊威.基于自适应滑模的移动机械臂跟踪控制[J].控制工程,2019,26(1):43-49.
- [3] 苏为洲,闻成.鲁棒与最优控制在伺服系统中的应用[J].控制与决策,2018,33(5):888-905.
- [4] 房德君.基于熵聚类RBF神经网络的机械臂轨迹跟踪控制[J].机械设计与制造,2017(10):32-35.
- [5] 胡静波,陈定方,吴俊峰,等.基于改进模糊算法的移动机器人自主避障研究[J].自动化与仪表,2018,33(6):48-52.
- [6] 李强.基于模糊控制理论的PID闭环控制系统的研究与设计[J].现代电子技术,2015,38(22):131-134,138.
- [7] 杨天旭,楼佩煌,钱晓明.融合多模糊控制器的全方位移动AGV路径跟踪控制技术[J].机械设计与制造工程,2016,45(7):57-61.
- [8] 刘金琨.智能控制[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [9] 张明月,杨洪波,章家保,等.改进自抗扰控制谐波式电动舵机伺服系统[J].光学精密工程,2014,22(1):99-108.

作者简介



李伟中

李伟中(1993-),男,工程师,主要研究方向为控制工程研究工作。

(收稿日期:2019-07-11)EA