

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201404041
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20150603.1623.002.html>

投球机器人模糊 PID 控制

赵新华¹, 王璞¹, 陈晓红²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要:针对智能投球机器人在轨迹跟踪过程中存在响应慢、跟踪精度低的问题,采用 PID 控制和模糊 PID 控制 2 种控制方法提高系统的响应速度及控制精度。对二连杆投球机器人进行了详细的运动学建模,建立了机械臂的动力学模型,联立得约束矩阵方程;然后分别选用 PID 控制和模糊 PID 控制对二连杆投球机器人运动轨迹进行控制。在 MATLAB 环境下利用 SimMechanics 对系统数学模型和 2 种控制方案进行仿真,数值实验结果表明,模糊 PID 控制具有更好的控制效果。

关键词:机器人;投球机器人;PID;模糊 PID;动力学模型;约束矩阵;轨迹跟踪

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2015)03-0399-08

中文引用格式:赵新华,王璞,陈晓红. 投球机器人模糊 PID 控制[J]. 智能系统学报, 2015, 10(3): 399-406.
英文引用格式:ZHAO Xinhua, WANG Pu, CHEN Xiaohong. Fuzzy PID control of pitching robots[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(3): 399-406

Fuzzy PID control of pitching robots

ZHAO Xinhua¹, WANG Pu¹, CHEN Xiaohong²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute, Harbin 150036, China)

Abstract:The PID and fuzzy PID controls were exploited to improve the control performance of the system for solving the problems of the slow response and low accuracy in the trajectory tracking of the pitching robot. Kinematics modeling of a dual-arm pitching robot was built. The dynamic model of the robotic arm was established and the constraint matrix equation was obtained by simultaneous equations. The PID and fuzzy PID controls were selected to control the trajectory of the dual-arm pitching robot. The mathematical model of the system was simulated using SimMechanics and the comparison of the two kinds of control schemes was completed using MATLAB. The numerical simulation results showed that the fuzzy PID control has a better effect.

Keywords:robot; pitching robot; PID; fuzzy PID; dynamics model; constraint matrix; trajectory tracking

智能投球机器人是一个由微处理器控制,集环境感知、避障、行走、投球等功能于一体的智能机器人。对于投球机器人来说,运动控制的目的是使之能精确并且快速地实现机械臂转角运动。传统的机器人运动控制常采用 PID 控制器^[1]。由于各种

干扰因素,机器人的运动具有时变、非线性、干扰大和不确定等特性,传统的 PID 控制器已不能达到较好的控制效果^[2]。近几年,机器人智能控制在理论和应用方面都取得较大的进展^[3]。在模糊控制方面,由 J. J. Buckley 等论证了模糊系统的逼近特性^[4],E. H. Mamdan 首次将模糊理论运用于一台实际机器人,使模糊控制技术在机器人中的应用得以

展现^[5]。文献[6]针对移动机器人在传统控制器控制下自主运动时出现的不稳定状况,将模糊控制策略引入移动机器人运动控制系统中。通过分析比较不同的控制方法,设计了由速度误差率和速度误差变化率为输入、电机输出功率为输出的双输入单输出模糊逻辑控制器。文献[7]模仿人工预瞄驾驶行为,提出了移动机器人运动控制的模糊控制方法,实验表明,该模糊控制方法可保证移动机器人快速、准确地沿着各种参考轨迹行走,且具有良好的鲁棒性。文献[8]在智能轮椅机器人中使用超声波的探测距离作为输入信号,经模糊控制技术处理后,输出机器人左右轮的转动速度来实现超声波避障。

本文首先对二连杆投球机器人进行运动学建模,然后在此基础上对机器人的控制方法进行了研究,通过 PID 和模糊 PID2 种控制方法,实现二连杆投球机器人运动轨迹的有效控制,用 MATLAB 软件进行仿真,并对仿真结果进行对比分析。

1 二连杆投球机器人的运动学建模

1.1 二连杆机械臂

机械手臂是机器人重要构成部件。图 1 为二杆机械臂结构图,其中 θ_1 和 θ_2 分别为关节 1、2 转角, l_1 和 l_2 分别为第 1、2 根杆的长度, r_1 为关节 1 到第 1 根杆质心的距离, r_2 为关节 2 到第 2 根杆质心的距离, M_{pl} 为负载质量。

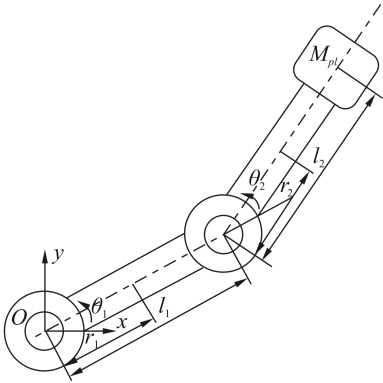


图 1 二连杆机械臂结构

Fig. 1 Dual-arm mechanical structure

式(1)是二连杆机械臂的矢量方程,其中 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 是沿 r_1 和 r_2 方向上的矢量, \mathbf{R}_{pl} 为合成矢量。由于在二连杆机械臂中,各连杆的长度保持不变,但它们各自的方位却随机构的运动而改变,所以矢量方程对时间求导将闭环矢量方程分解成 2 个标量表达式,分别沿 x 、 y 方向分解。

$$\mathbf{R}_{pl} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 \quad (1)$$

\mathbf{R}_{pl} 相应于 x 和 y 的坐标方程为

$$x_{pl} = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$y_{pl} = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

对末端坐标进行积分得到末端速度方程:

$$\dot{x}'_{pl} = -l_1 \omega_1 \sin \theta_1 - l_2 (\omega_1 + \omega_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

$$\dot{y}'_{pl} = l_1 \omega_1 \cos \theta_1 + l_2 (\omega_1 + \omega_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

式中: $\omega_1 = \theta'_1$, $\omega_2 = \theta'_2$, 将式(4)和(5)整理并写成如下矩阵形式(即雅克比矩阵^[9]):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_{pl} \\ \dot{y}'_{pl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $S_1 = \sin \theta_1$, $C_1 = \cos \theta_1$, $S_2 = \sin \theta_2$, $C_2 = \cos \theta_2$, $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 。

对二连杆机械臂末端速度方程(3)~(4)进行求导得到末端加速度方程:

$$\begin{aligned} \ddot{x}''_{pl} + (l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \alpha_1 + l_2 S_{12} \alpha_2 = \\ - [(l_1 C_1 + l_2 C_{12}) \omega_{21} + l_2 C_{12} \omega_{22} + 2l_2 \omega_1 \omega_2 C_{12}] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}''_{pl} + (l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \alpha_1 + l_2 S_{12} \alpha_2 = \\ - [(l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \omega_{21} + l_2 S_{12} \omega_{22} + 2l_2 \omega_1 \omega_2 S_{12}] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\alpha_1 = \theta''_1$, $\alpha_2 = \theta''_2$, 二连杆机械臂质心位置的加速度与关节处的变量之间关系如下:

$$\begin{cases} A_{c1x} + r_1 S_1 \alpha_1 = -r_1 C_1 \omega_1^2 \\ A_{c1y} - r_1 C_1 \alpha_1 = -r_1 S_1 \omega_1^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_{c2x} + (l_1 S_1 + r_2 S_{12}) \alpha_1 + r_2 S_{12} \alpha_2 = \\ (l_1 C_1 + l_2 C_{12}) \omega_{21} + l_2 C_{12} \omega_{22} + 2l_2 \omega_1 \omega_2 C_{12} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_{c2y} + (l_1 C_1 + r_2 C_{12}) \alpha_1 + r_2 C_{12} \alpha_2 = \\ (l_1 S_1 + l_2 S_{12}) \omega_{21} + l_2 S_{12} \omega_{22} + 2l_2 \omega_1 \omega_2 S_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

分别对机械臂两连杆的隔离体^[10]进行力及力矩的分析,求得机械臂的动力学方程。

1.2 机械臂动力学方程

首先,对二连杆平面投球机器人的第 1 根连杆应用牛顿定律^[11],受力分析如图 2 所示。

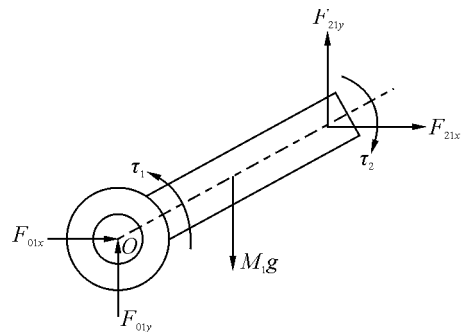


图 2 第 1 根连杆受力分析

Fig. 2 The first arm force analysis

图 2 中, F_{01x} 、 F_{21x} 分别代表第 1 根杆 2 端所受 x 方向的力, F_{01y} 、 F_{21y} 分别代表第 1 根杆 2 端所受 y 方

$$\begin{aligned} B_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & l_1 S_1 & -l_1 C_1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 S_{12} & -r_2 C_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{pl} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{22} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ (l_2 - r_2) S_{12} & -(l_2 - r_2) C_{12} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ C &= [C_1 \quad C_2 \quad C_3]^T \\ C_1 &= [\alpha_1 \quad \alpha_2]^T \\ C_2 &= [A_{c1x} \quad A_{c1y} \quad A_{c2x} \quad A_{c2y} \quad A_{plx} \quad A_{ply}]^T \\ C_3 &= [F_{01x} \quad F_{01y} \quad F_{21x} \quad F_{21y} \quad F_{32x} \quad F_{32y}]^T \\ D &= \begin{bmatrix} -[(l_1 C_1 + l_2 C_{12})\omega_1^2 + l_2 C_{12}\omega_2^2 + 2l_2\omega_1\omega_2 C_{12}] \\ -[(l_1 S_1 + l_2 S_{12})\omega_1^2 + l_2 S_{12}\omega_2^2 + 2l_2\omega_1\omega_2 S_{12}] \\ -r_1 C_1 \omega_1^2 \\ -r_1 S_1 \omega_1^2 \\ -[(l_1 C_1 + r_2 C_{12})\omega_1^2 + r_2 C_{12}\omega_2^2 + 2r_2\omega_1\omega_2 C_{12}] \\ -[(l_1 S_1 + r_2 S_{12})\omega_1^2 + r_2 S_{12}\omega_2^2 + 2r_2\omega_1\omega_2 S_{12}] \\ 0 \\ M_1 g \\ \tau_1 - \tau_2 - M_1 g r_1 C_1 \\ 0 \\ M_2 g \\ \tau_2 \\ 0 \\ -M_{pl} g \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2 二连杆投球机器人的控制方法

分别采用 PID 控制和模糊 PID 控制对二连杆投球机器人进行运动轨迹控制。

2.1 PID 控制

PID 控制策略其结构简单、稳定性好、可靠性高^[12]。式(20)为 PID 控制标准公式,其中 $U(t)$ 为 PID 控制器输出, K_p 为比例放大系数, T_i 为积分常数, T_d 为微分放大系数, e 为偏差信号。

$$U(t) = K_p \times \left[e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \quad (20)$$

PID 参数设置:首先确定比例增益 K_p ,而后确

定积分时间常数 T_i ,最后确定微分时间常数 T_d ,通常为 0 即可。

2.2 模糊 PID 控制

2.2.1 模糊控制基本原理

模糊控制的核心是模糊控制器,而模糊控制器的关键是模糊控制规则的确定,即模糊控制规则表^[13]。模糊控制系统框图如图 5 所示,把误差 e 及其变化率 e_c 作为模糊控制器的输入,把控制量 u 作为模糊控制器的输出,得

$$u = F(e, e_c) \quad (21)$$

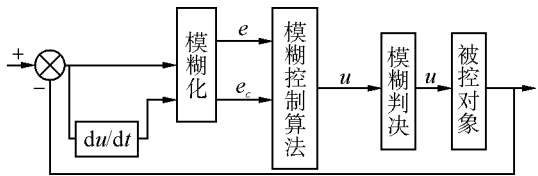


图 5 模糊控制器基本结构

Fig. 5 The basic structure of the fuzzy controller

二连杆平面机器人 2 个关节预定角度 θ_1^d 和 θ_2^d 与实际角度 θ_1 和 θ_2 的误差 e 及其变化率 e_c 作为控制器输入,输出为驱动关节转矩 τ 。

2.2.2 输入量的模糊化

精确输入量 e 和 e_c 分别乘以量化因子 k_e 和 k_{e_c} 以转换到各自的论域范围。设模糊控制器的输入量标准域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。输入量论域划分成 7 个模糊子集,即 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。模糊子集的隶属函数采用高斯函数,函数曲线如图 6 所示。

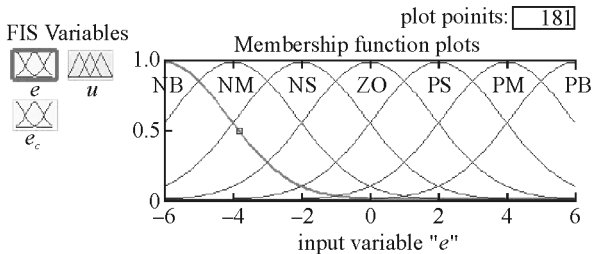


图 6 隶属函数曲线

Fig. 6 Membership functions curve

2.2.2 输入量的模糊化

规则选取的总体原则是:当误差较大时,选择控制量以消除误差为主;当误差较小时,选择控制量要防止超调,以系统的稳定性为主。

输出变量与输入变量取一样的模糊子集,即 $u = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,同样采用高斯隶属函数。 e 和 e_c 分别定义为 7 个模糊子集、49 条规则,如表 1 所示。

表 1 u 的模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rule of u

e	u						
	$e_c =$	$e_c =$	$e_c =$	$e_c =$	$e_c =$	$e_c =$	$e_c =$
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	0	0
NM	PB	PB	PB	PB	PM	0	0
NS	PM	PM	PM	PM	0	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	0	NS	NM	NM
PS	PS	PS	0	NM	NM	NM	NM
PM	0	0	NM	NB	NB	NB	NB
PB	0	0	NM	NB	NB	NB	NB

3 系统仿真

3.1 动力学仿真

根据二连杆机械臂在重力作用下的受力情况,如果让机器人从任何初始位置开始运动,将输入的值设置为零,那么二连杆机械臂将在自身重力作用下下落,最后到达2个连杆都在一条铅垂线上的位置。参考图1中节点角的定义,此时相应的节点角度 $\theta_1 = -\pi/2$ 和 $\theta_2 = 0$ 。表2给出二连杆平面机器

人的惯性参数和几何参数。

表 2 二连杆机器人的惯性参数和几何参数
Table 2 Inertia and geometrical parameters of dual-arm robot

参数	取值
M_1 / kg	2.5
M_2 / kg	2.8
M_{pl} / kg	0.05
l_1 / m	1.0
l_2 / m	0.5
r_1 / m	0.8
r_2 / m	0.1
$J_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.15
$J_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.05

图7是一个 Simuarm 模型^[14]的原理框图。仿真调用 robot.m 来求解联立约束矩阵,采用一种线性摩擦力模型,在该模型中,抵抗输入扭矩的摩擦力矩与转速成正比。2个标“Damping”的增益模块表示由于轴承和电动机的粘滞阻尼而产生的速度损失。

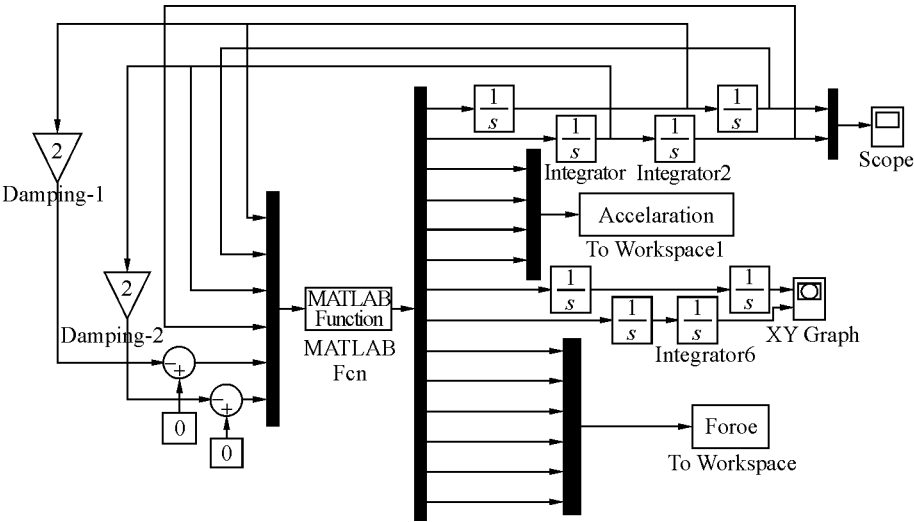


图 7 两连杆机器人的 Simuarm 仿真模型
Fig. 7 Simuarm simulation model of dual-arm robot

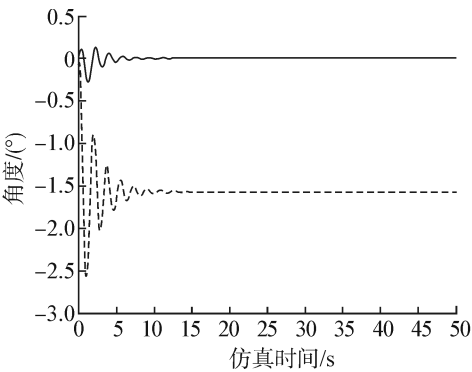


图 8 关节转角 θ_1 和 θ_2 的变化曲线
Fig. 8 Curve of joint angle θ_1 and θ_2

仿真初始条件: $\theta_1 = 0$ 和 $\theta_2 = -\pi/2$,末端位置: $x_{pl} = 1.0, y_{pl} = 0.8$,与此同时,积分求解器的初始条件也是相容的。仿真结果如图8所示。图8给出了关节转角 θ_1 和 θ_2 的转角曲线,在经过一定的仿真时间后,二连杆机械臂运动趋于稳定, θ_1 为 $-\pi/2, \theta_2$ 为 0 ,与机械臂在自重下试验姿态相吻合。

3.2 PID 控制仿真

在对二连杆机械臂进行建模与仿真基础上加入PID控制模块来控制各个节点电动机的位置,控制二连杆机械臂无震荡的从一个节点快速移动到另一个节点。选择 Simarm 中的 SimMechanics 工具箱进行

PID 控制及模糊 PID 控制的仿真。

3.2.1 控制模型

图 9 为二连杆投球机器人的 SimMechanics 仿真

图^[15]。Ground 为机架模块,barAB、barBC 代表第 1、2 根杆,A、B 分别代表转动副模块,Joint Sensor1 代表运动副传感器模块,Joint Actuator 为运动驱动模块。

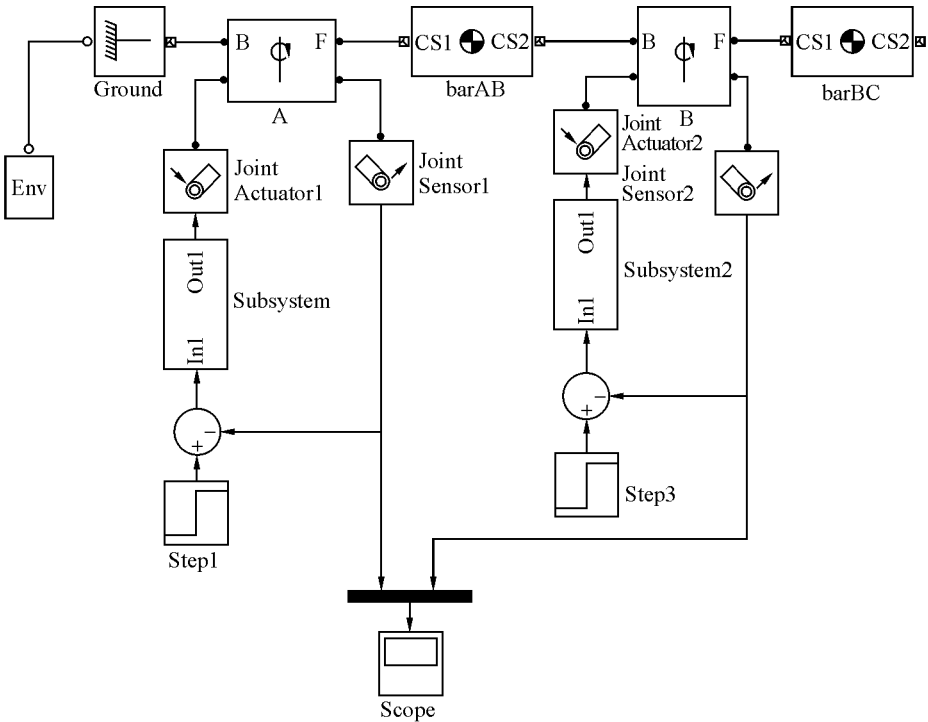


图 9 二连杆机器人仿真框图

Fig. 9 Simulation block of dual-arm robot

3.2.2 PID 控制仿真

在系统中首先加入 PID 控制器^[16],控制器输入二连杆平面机器人两关节预定角度 θ_1^d 和 θ_2^d 与实际角度 θ_1 和 θ_2 的误差 e ,输出为驱动关节转矩 τ 。

仿真模型建立后,要对每个模块都进行参数的设置。以 AB 杆为例,见图 10。双击 barAB,填入参数:杆的质量、刚体坐标和质心位置。所有参数设置完成后,再设置允许每个连杆的旋转角度。在此,设置第 1 根杆旋转 90°,第 2 根杆旋转 135°。

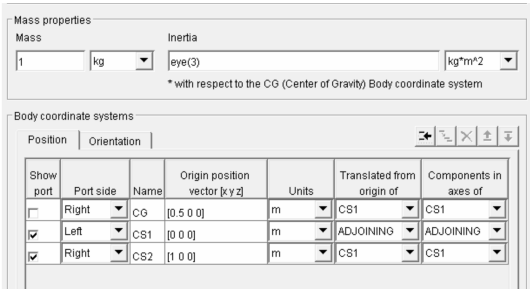


图 10 AB 杆模型参数

Fig. 10 Model parameters of AB arm

得到二连杆机械臂的旋转角度曲线,根据上节所述方法调节 PID 参数,得到理想的响应曲线。图 11 为

经过 PID 调节后二连杆平面投球机器人的旋转角度情况。可以看到,经过 PID 调节后,系统可以实现快速启动,并且缩短了时间,快速地进入新的稳定状态。

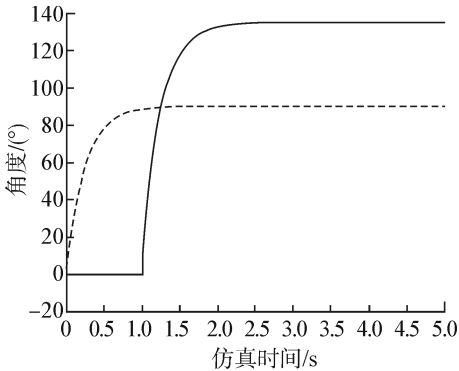


图 11 两连杆机械臂旋转角度

Fig. 11 Rotation angle of dual-arm

3.3 模糊 PID 控制仿真

通过 SimMechanics 建立仿真模型,并利用模糊 PID 进行控制^[17]。如图 12 所示。启动仿真,调节模糊 PID 参数。从仿真曲线可以看到 PID 控制与模糊 PID 控制两者之间的差别。图 13 为启动仿真后得到的第 1 根杆旋转角度的完整图,图 14 为图 13 的局部

放大图。图 15 为第 2 根杆旋转角度的完整图,图 16 角度的局部放大图可以看到,模糊 PID 控制要比 PID 为图 15 的局部放大图。从图 14 和图 16 两根杆旋转

控制的定位更加精确。

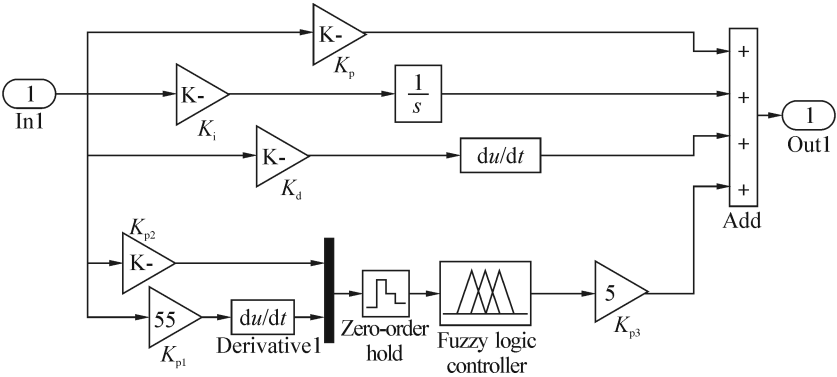


图 12 第 1、2 根杆模糊 PID 模块
Fig. 12 Fuzzy PID block of the first and second arm

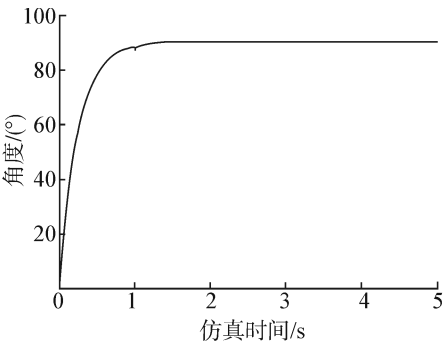


图 13 第 1 根杆旋转角度完整图

Fig. 13 The complete graph of the first arm rotation angle

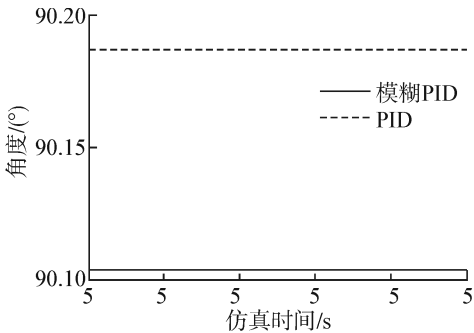


图 14 第 1 根杆旋转角度局部放大图

Fig. 14 Partial enlarged drawing of the first arm rotation angle

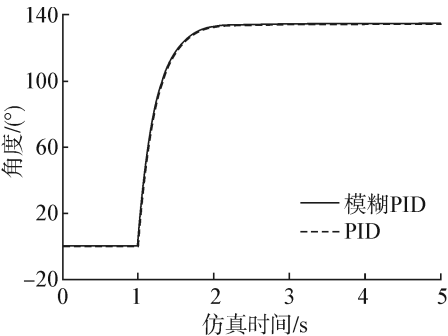


图 15 第 2 根杆旋转角度完整图

Fig. 15 The complete graph of the second arm rotation angle

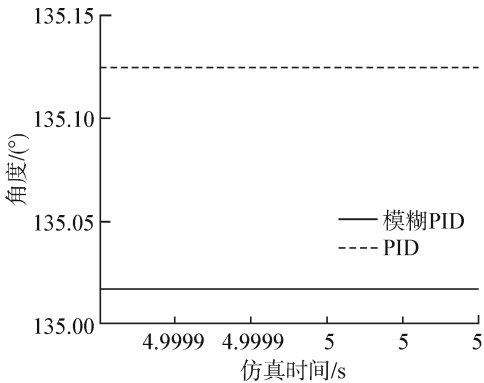


图 16 第 2 根杆旋转角度局部放大图

Fig. 16 Partial enlarged drawing of the second arm rotation angle

4 结束语

通过对二连杆投球机器人运动学方程和动力学方程的推导,得到了二连杆投球机器人的动态数学模型,此建模过程简单、方便、有效,便于进行动力学分析和控制问题的研究。把得到的二连杆投球机器人的数学模型嵌入到 MATLAB 仿真中,得到二连杆机器人的运动情况,并在仿真过程中加入了 PID 模块和模糊 PID 模块,仿真结果得出模糊 PID 控制精确性更高。本设计仅对二连杆投球机器人进行了建模与仿真,下一步将对整体系统进行进一步的研究。

参考文献:

[1] 范永, 谭民. 机器人控制器的现状及展望[J]. 机器人, 1999(1): 75-80.
FAN Yong, TAN Min. Current state and tendencies in the development of robot controller[J]. Robot, 1999(1): 75-80.
[2] 张锐, 吴成东. 机器人智能控制研究进展[J]. 沈阳建筑工程学院学报:自然科学版, 2003, 11(1): 61-65.
ZHANG Rui, WU Chengdong. Some recent progress in robot-

- ic intelligent control[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2003, 11(1): 61-65.
- [3] 蔡自兴, 陈海燕, 魏世勇. 智能控制工程研究的进展[J]. 控制工程, 2003, 10(1): 15-20.
CAI Zixing, CHEN Haiyan, WEI Shiyong. Recent advances in research of intelligent control engineering[J]. Control Engineering of China, 2003, 10(1): 15-20.
- [4] 贾玉赞. 浅议智能机器人发展及应用[J]. 太原科技, 2003, 5(3): 20-26.
JIA Yuzan. Development of intellectual robot and its application[J]. Taiyuan Science and Technology, 2003, 5(3): 20-26.
- [5] 吴向阳, 戴先中, 孟正大. 分布式机器人控制器体系结构的研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(Supl.): 200-204.
WU Xiangyang, DAI Xianzhong, MENG Zhengda. Research on distributed architecture of robot controller[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(Supl.): 200-204.
- [6] 谭宝成, 程智远, 牟云霞, 等. 移动机器人模糊控制系统的设计[J]. 西安工业大学学报, 2007, 27(4): 366-370.
TAN Baocheng, CHENG Zhiyuan, MOU Yunxia, et al. Design of mobile robot control system based on fuzzy control[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2007, 27(4): 366-370.
- [7] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清, 等. 移动机器人模糊控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 480-484.
LI Qingzhong, GU Weikang, YE Xiuqing, et al. Study on fuzzy control method for mobile robots[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(5): 480-484.
- [8] 李余庆, 刘继忠, 张华. 模糊控制在机器人超生避障系统的应用[J]. 机器人技术, 2009, 25(52): 216-218.
LI Yuqing, LIU Jizhong, ZHANG Hua. Application of fuzzy control in ultrasound obstacle avoidance system for robot[J]. Robot Technology, 2009, 25(52): 216-218.
- [9] 樊晓平, 徐建闽. 柔性机器人的动力学建模及其仿真[J]. 控制理论与应用, 1997, 5(6): 60-69.
FAN Xiaoping, XU Jianmin. Dynamic modeling and simulation of flexible robotic manipulators[J]. Control Theory and Applications, 1997, 5(6): 60-69.
- [10] 田永利, 邹慧君, 郭为忠, 等. 基于 Matlab-Sim Mechanics 的机电产品组成建模与仿真技术研究[J]. 机械设计与研究, 2002, 19(12): 10-12.
TIAN Yongli, ZOU Huijun, GUO Weizhong, et al. Study on modeling and simulation methods for constitution objects of mechatronic products based on Matlab-Sim Mechanics[J]. Machine Design and Research, 2002, 19(12): 10-12.
- [11] 陆佑方, 冯冠民, 齐朝晖. 柔性机械臂动力学与控制建模的若干基本问题[J]. 机器人, 1993, 15(2): 52-59.
LU Youfang, FENG Guanmin, QI Zhaozhui. Application of artificial neural networks in dynamic identification and position control of robot manipulators[J]. Robot, 1993, 15(2): 52-59.
- [12] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003, 37(1): 6-10.
WU Hongxin, SHEN Shaoping. Basis of theory and applications on PID control[J]. Control Engineering of China, 2003, 37(1): 6-10.
- [13] 陆磊. 模糊控制在轮式机器人上的应用[J]. 微型电脑应用, 2010, 26(12): 31-33.
LU Lei. Application of fuzzy-PID controller in mobile robot[J]. Microcomputer Applications, 2010, 26(12): 31-33.
- [14] 阎绍泽, 刘又午, 张铁民. 柔性机械臂动力特性的实验研究[J]. 河北工业大学学报, 1996, 25(11): 12-16.
YAN Shaoze, LIU Youwu, ZHANG Tiemin. Experimental study on dynamic performances of flexible manipulators[J]. Journal of Hebei University of Technology, 1996, 25(11): 12-16.
- [15] 孙奎, 谢宗武, 刘宏. 一种新的机器人动力学仿真分析方法[J]. 机械设计与制造, 2008, 5(9): 163-165.
SUN Kui, XIE Zongwu, LIU Hong. The dynamics simulation analysis of a four DOF manipulator[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, 5(9): 163-165.
- [16] The Mathworks Inc. SimMechanics user's guide[M]. Natick, USA: The Mathworks Inc., 2002: 22-27.
- [17] 苗敬利. 模糊控制和传统 PID 控制的仿真研究[J]. 微软计算机信息, 2003, 4(7): 18-24.
MIAO Jingli. The simulation study between fuzzy control and PID control[J]. Microcomputer Information, 2003, 4(7): 18-24.

作者简介:



赵新华, 女, 1980 年生, 讲师, 主要研究方向为超空泡航行体、AUV 的动力学及智能控制方法。发表学术论文 10 余篇。



王璞, 男, 1994 年生, 主要研究方向为机器人智能控制。