

基于 PSO 算法优化模糊 PID 控制器的 灵巧手抓取控制研究

李锦洋¹, 关翔予¹, 孔晓光¹, 许 舜²

(1. 沈阳化工大学, 辽宁 沈阳 110000; 2. 小米科技(南京)有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:随着仿生学的进展, 机器人领域中五指灵巧手作为主要执行机构的重要性不断增强。然而, 在抓取过程中, 五指灵巧手常常面临内部作用复杂、速度缓慢和效率低等问题。为了应对这些挑战, 该文提出了一种基于角度闭环模糊自适应控制算法。该算法采用模糊策略来推断灵巧手关节角度偏差与控制器参数之间的关系, 并制定相应的模糊规则。通过实时调整控制器参数, 该算法能够提高系统的稳定性和抓取效率。此外, 通过建立 ADAMS 模型和相应的闭环控制系统, 以提高实验过程的可视化程度。实验结果表明, 通过采用粒子群算法 (Particle Swarm Optimization Algorithm) 优化模糊自适应 PID 算法并改进系统参数, 相较于传统的 PID 算法, 可以显著减少灵巧手在抓取过程中的关节抖动, 并展现出更好的手指指尖接触力控制性能。

关键词:灵巧手; 模糊控制; PID 算法; 粒子群算法

中图分类号: TP241.3

文章编号: 1000-0682(2024)02-0075-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.013

Research on grasp control of smart hand optimization using fuzzy PID controller based on PSO algorithm

LI Jinyang¹, GUAN Xiangyu¹, KONG Xiaoguang¹, XU Shun²

(1. Shenyang University of Chemical Technology, Liaoning Shenyang 110000, China;

2. Xiaomi Technology Co., Ltd. Nanjing Branch, Jiangsu Nanjing 210000, China)

Abstract: With the increasing importance of bionics, the five-finger dexterous hand has become a crucial executive mechanism in the field of robotics. However, during the grasping process, the five-finger dexterous hand often encounters challenges such as complex internal actions, slow speed, and low efficiency. In order to overcome these issues, this paper proposes a fuzzy adaptive control algorithm based on angle closed-loop. The algorithm utilizes fuzzy logic to infer the relationship between the angle deviation of the dexterous hand joint and the controller parameters, and formulates corresponding fuzzy rules. By adjusting the controller parameters in real time, the algorithm improves the stability and capture efficiency of the system. Additionally, the visualization of the experimental process is enhanced by establishing an ADAMS model and a corresponding closed-loop control system. Experimental results demonstrate that optimizing the fuzzy adaptive PID algorithm and improving the system parameters of the Particle Swarm Optimization algorithm can significantly reduce joint jitter during the grasping process of dexterous hands, while also exhibiting superior fingertip contact force control performance.

Keywords: dexterous hands; fuzzy control; PID algorithm; particle swarm algorithm

收稿日期: 2023-11-13

第一作者: 李锦洋 (1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为基于人手位姿的空间机器人遥操作方法研究。

通信作者: 孔晓光 (1974—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

0 引言

人类的手是身体极为重要的工具之一, 其具有出色的灵活性和协调性, 这使得人们能够从事各种日常活动, 无论是简单的日常工作还是高度复杂的

创造性任务。因此,越来越多的研究人员制作出了灵巧手的机械结构^[1]。

其中五指灵巧手抓取控制的研究旨在深入了解人手运动和感知机制,以实现各种抓取动作、手指协调和物体精确操控。这项研究具有广泛的应用领域,包括机器人技术、康复医学、神经科学、人机交互和设计工程等^[2-3]。它不仅揭示了大脑和神经系统的奥秘,还为创造出更灵活、适应性更强的机器人系统和提高康复治疗方法提供了宝贵的信息。由于灵巧手抓取能力和抓取角度的影响,其末端抓取效率有待提高。在机器人末端抓取过程中,张林等人通过应用 PID 控制算法来补偿抓取角度误差,这种方法能够有效降低控制误差,并提高抓取效率^[4],然而,在实际应用中,当指尖施加力量与被控物体接触时,可能会对其完整性造成破坏。姜力等人利用滑模控制,通过调整趋近律和系统控制误差的关系,来确保控制效果,然而使用滑模控制仍存在超调和抖动等问题^[5]。王邢波等人采用阻抗控制来模拟人手对接触力的影响,但阻抗控制在精确建模方面要求较高,并且不适应环境变化^[6]。

为了应对五指灵巧手在处理内力和外界干扰时可能出现的抓取误差和稳定性不足等问题。该文采用粒子群算法优化模糊 PID 控制和 ADAMS 模型相结合的方法。

1 五指灵巧手模型

1.1 五指灵巧手运动学模型

由于实验对象为欠驱动灵巧手,且控制关节为单个手指的第二关节。每个手指只有一个自由度,实现手指关节的屈曲运动,灵巧手指简化结构如图 1 所示。

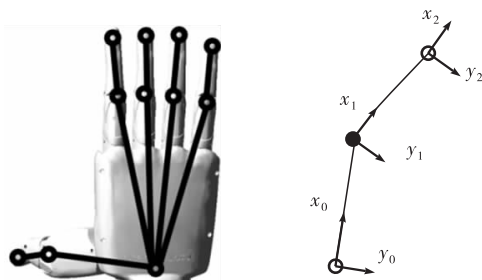


图 1 灵巧手指简化结构

从灵巧手基座出发到关节处,再通过变换到达指尖,最后通过计算出灵巧手的变换矩阵。

对应的 D—H 参数见表 1:

表 1 单关节手指机构 D—H 表

杆号	θ_i	$\alpha_i/^\circ\text{C}$	a_i/mm	d_i/mm
1	0	0	0	l_1
2	θ_2	0	0	l_2

根据 D—H 理论,连杆间的变换矩阵^[7]为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & -d_i\sin\alpha_i \\ \sin\theta_i\sin\alpha_i & \cos\theta_i\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & -d_i\cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将上表的数据带入(1)中,得到连杆间的变换矩阵,同时指尖点 A 在指根坐标系中的位姿可以通过变换矩阵推算得到^[8]:

$${}^0A_2 = {}^0T_1 {}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_1 + l_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

因此只要给手指第二关节的转动角度 θ_2 , 就可根据上式算出指端在指根坐标系中的位置。

1.2 五指灵巧手 ADAMS 模型

借助 SOLIDWORKS 软件,该文成功地构建了灵巧手的力学模型。通过该模型的深入分析,能够更好地理解灵巧手的运动和力学特性,并为进一步的研究和优化工作提供坚实的基础。这种建模方法为深入研究复杂机械系统的性能和行为提供了重要的工具和资源。图 2 展示了灵巧手模型。



图 2 灵巧手模型

在机械手的内部,五个连杆连接着指尖。四个手指的基部固定在手掌的基础结构上,而拇指的基部通过旋转球关节连接到手掌,使其能够进行旋转。为了提高灵巧手控制的适应性,采用了机器人的直接转矩控制方法。

1.3 联合仿真模型

ADAMS 软件的应用在系统模型的开发中起到了关键作用,它能帮助捕捉系统的运动特性^[9]。通

过 ADAMS 软件可以方便地提取重要参数,如力、角偏差和角速度,这些参数的提取有助于顺利整合到 SIMULINK 控制器的设计过程中。通过将 ADAMS 生成的模型整合至 SIMULINK 中,改进了控制器的执行效果。通过采用这种联合仿真方法为传统复杂数学模型提供了一种有力的替代方案。ADAMS - SIMULINK 联合仿真模型如图 3 所示。控制器的运行流程如下:首先,设定灵巧手的期望转动角度。然后,ADAMS 模块负责收集灵巧手的关节角度和指尖接触力数据。PSO 粒子群算法接收到关节角度偏差值后,将优化后的参数传输至控制器,控制器在接收到关节角度和控制器参数后,计算所需的力矩,并将其传输至 ADAMS 模型。

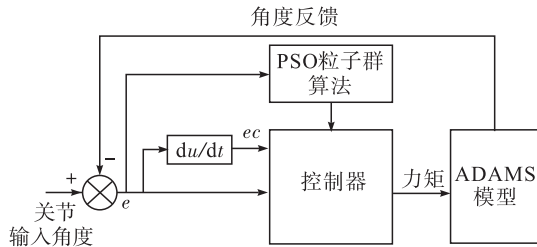


图 3 ADAMS - SIMULINK 联合仿真模型框图

2 模糊自适应 PID 控制算法

2.1 模糊控制器隶属度参数设定

模糊控制器的隶属度是针对控制器输入输出量的集合而言的。通过设定模糊规则,可以提高控制器的工作效果。在机器人的位置控制中,为了实现快速响应和增强系统的稳定性,通常选择 PD(比例-微分)控制算法^[10]。将五指灵巧手的输入力矩作为模糊控制器的输入;辨识控制系统得到力矩与 PID 控制参数 k_p, k_d 的模糊关系集合,通过改进隶属度函数的参数,以获得更好的控制性能。PID 力矩输出公式为:

$$r(t) = k_p(\dot{e}) + k_d(e) \quad (3)$$

其中: $r(t)$ 为五指灵巧手输入力矩; $e(t)$ 为角度偏差输入量; t 为时间。

将角度偏差输入值定为 e ,同时将输入值变化率定为 ec ,这两者作为模糊控制器的输入参数,控制器输入变化的模糊集论域为 $[-6, 6]$,控制器输出参数的 k_p 模糊集论域为 $[-1, 1]$, k_d 模糊集论域为 $[0, 0.2]$ 。定义控制器的模糊子集,包括 NB(极负大)、NM(负大)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正大)和 PB(极正大)。在实验中,为了提高控制器的灵敏度,采用三角形隶属度函数来输出模糊

控制的结果。

2.2 模糊控制规则

为了提高系统跟踪速度,在关节角度偏差较大时,该文设计了模糊控制规则参数,并通过调大 k_p 来实现。这样可以使系统更加灵巧地进行抓取控制,并提高精度。与此同时,为了防止系统在达到稳定后出现抖动,应取适当的 k_d ,以维持系统的稳定性。 k_p, k_d 模糊控制规则表如表 2 ~ 3 所示。

表 2 k_p 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NS	NM	NB	NB	NB

表 3 k_d 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	PS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NS	NM	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PM	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

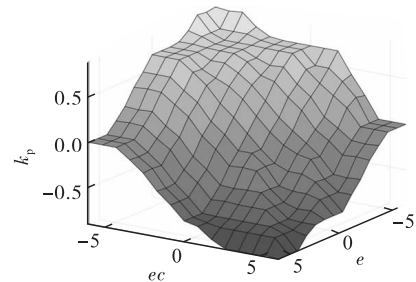


图 4 k_p 的输出空间曲面

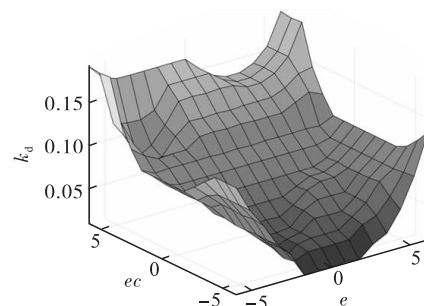


图 5 k_d 的输出空间曲面

在所述条件下,根据以上描述,该文得到控制器输入量 e 和变化率 ec 与 k_p 、 k_d 的关系空间曲面,如图 4 和图 5 所示。一旦获得模糊控制规则并确定了模糊控制集,通过解模糊化过程得到具体和清晰的输出值,这些输出值将成为实际的控制力矩,并传输至 ADAMS 模块。

2.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种模仿鸟类觅食行为的算法,它通过实时记录并更新与食物位置最近的距离来帮助个体向目标位置移动。在该算法中,种群中的所有个体通过信息共享来协同移动^[11]。

粒子群算法核心算法是:

$$\mathbf{v}_i^k = \omega \mathbf{v}_i^{k-1} + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}_i^k - \mathbf{x}_i^k) \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_i^k = \mathbf{x}_i^{k-1} + \mathbf{v}_i^k \quad (5)$$

其中: $\mathbf{v}_i^k, \mathbf{x}_i^k$ 表示粒子 i 在第 k 次迭代的速度和位置; ω 表示惯性权重,调节对目标空间的搜索范围; \mathbf{p}_i^k 表示粒子 i 的个体的最优值; \mathbf{g}_i^k 表示为粒子群的全局最优解; c_1, c_2 表示为加速常数; r_1, r_2 表示为随机函数。

在手指与目标物体接触的过程中,该文使用粒子群算法来在目标空间中寻找满足条件的优化函数,以弥补指尖接触力不稳定的缺点。这个优化函数的输入是关节角度的偏差值,而模糊控制器的参数 k_p 和 k_d 则作为 PSO 算法的优化目标。当关节输入偏差值过大或过小时,优化函数会持续更新,直到输出满足条件的优化函数。

3 实验验证及结果分析

为了验证所设计的算法在控制效果方面的表现,该文选择了一个块状物体作为目标,并使用五指灵巧手进行抓取。通过应用该文中设计的控制器来调整抓取角度,得到了相应的控制结果,以证明该文方法的有效性。实验中的抓取过程如图 6 所示,而实验环境的详细参数则列在表 4 中。

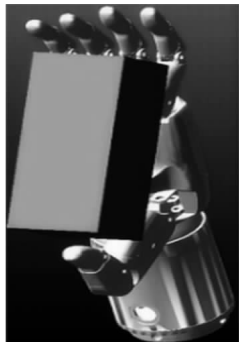


图 6 灵巧手抓取示意图

表 4 ADAMS 环境参数

序号	参数名称	数值
1	刚度	1.0E+06 N/m
2	最大阻尼系数	1.0E+04 N·s/m
3	力指数	1.8
4	穿透深度	1.0E-05 m
5	静摩擦系数	0.3
6	动摩擦系数	0.3
7	静摩擦转换速度	0.3 m/s
8	动摩擦转换速度	1 m/s

3.1 关节角度曲线分析

图 7 是采用 PID 算法的灵巧手关节角度曲线图。图 8 是采用基于 PSO 优化模糊算法的灵巧手关节角度曲线图。

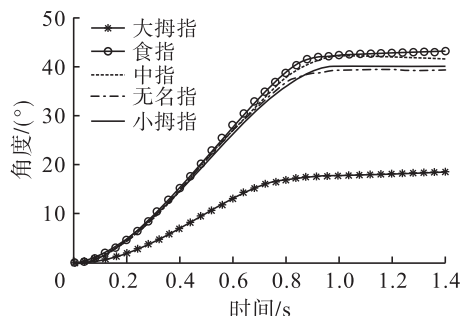


图 7 PID 算法的灵巧手关节角度曲线图

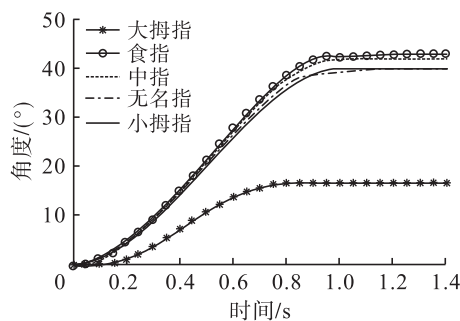


图 8 基于 PSO 优化模糊算法的灵巧手关节角度曲线图

根据实验结果显示,PID 算法需要 0.95 s 才能达到稳定状态,而基于 PSO 优化模糊算法则在 0.9 s 后实现了稳定。尽管两种算法的控制精度相当,但基于 PSO 优化模糊算法表现出更快的调节速度和更强的稳定性,减少了灵巧手和目标物体之间刚体相互作用的扰动,确保了更稳定的物体姿态。

3.2 指尖接触力曲线分析

图 9 是采用 PID 算法的灵巧手指尖接触力曲线图。图 10 是采用基于 PSO 优化模糊算法的灵巧手指尖接触力曲线图。

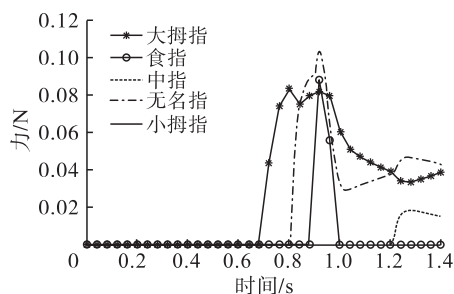


图9 PID 算法的指尖接触力曲线图

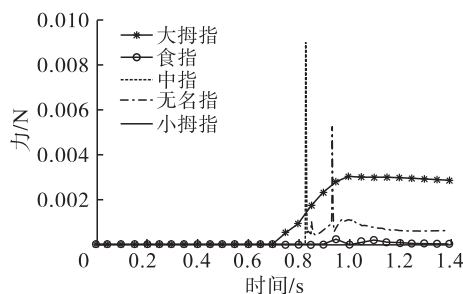


图10 基于 PSO 优化模糊算法的指尖接触力曲线图

根据实验结果显示, PID 算法能够在 0.1 N 的最大指尖力后稳定在 0.04 N, 并且目标物体在 1.2 s 时达到稳定状态。相比之下, 基于 PSO 优化模糊算法则能够在 0.01 N 的最大指尖力后稳定在 0.003 N, 并且目标物体在 1 s 时达到稳定状态。基于 PSO 优化模糊算法具有较小的指尖接触力和更高的控制精度, 这种优势可以有效地避免对目标物体位姿的干扰。在接触过程中, 过大的指尖力可能导致灵巧手指尖与目标物体发生碰撞, 从而损坏物体表面。

4 结论

为了提高机器人领域中广泛应用的五指灵巧手的抓取精度, 并消除手部抖动和误操作, 需要使用控制算法进行精确控制。该文提出了一种基于 PSO 粒子群优化的模糊自适应 PID 控制算法, 并通过

ADAMS – SIMULINK 联合仿真模型进行测试。该算法能够快速调节五指灵巧手的关节角度, 并具有很强的适应性。在灵巧手的抓取过程中, 基于 PSO 优化模糊算法还能有效地控制指尖力, 从而显著提高工作效率。

参考文献:

- [1] 来森, 李宪华, 王殿博, 等. 腱驱动仿人型五指灵巧手的设计[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2022, 32(02): 59–64.
- [2] 雷翔鹏, 刘业峰. 欠驱动多指机械手抓取能力分析与优化研究[J]. 控制工程, 2022, 29(04): 730–737.
- [3] 马凝. 全驱动五指灵巧手结构设计及控制系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [4] 张林, 闻新. 基于气动人工肌肉几何模型的灵巧手自适应跟踪控制[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(09): 21–24.
- [5] 姜力. 具有力感知功能的机器人灵巧手手指及控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [6] 王邢波, 葛胜. 基于 BP 神经网络的腱驱动灵巧手的自适应阻抗控制[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(04): 71–75.
- [7] 周伟. 多足机器人单腿运动学分析[J]. 南方农机, 2022, 53(07): 54–56.
- [8] 徐嘉骏. 6–6 型绳牵引并联机器人刚度性能优化与动力学建模方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [9] 张礼明, 朱海清, 伍开宇. 基于 ADAMS 的视觉循线搬运车转向位姿误差研究及控制[J]. 机械设计, 2023, 40(03): 26–31.
- [10] 郭俊财, 牛军川, 谢冰冰. 基于改进模糊自适应补偿的柔性关节机器人 PD 控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(03): 1–5.
- [11] 刘佳, 宋战锋, 刘丹. 基于粒子群算法的双三相永磁同步电机谐波优化设计[J]. 微电机, 2023, 56(08): 1–7+11.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号: 52–49

国际发行代号: BM529

定价: 18.00 元/期 108.00 元/年

地址: 西安市高新区沣惠南路 8 号

邮编: 710075

电话: 029–81871277

网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com>

电子邮箱: gyybbjb@126.com