

# 基于多点触摸的协作机器人近似 最优人机交互控制算法

刘冰, 张岩

(沈阳师范大学 计算机与数学基础教学部, 沈阳 110034)

**摘要:** 针对人机交互系统中现有方法无法准确捕捉用户的操作意图, 动态环境适应性较差, 导致人机交互精准性不佳的问题, 为提高协作机器人在作业过程中的人机交互精准性, 提出一种基于多点触摸的近似最优人机交互控制方法. 首先, 基于人机交互的多点触摸动作匹配, 建立交互手势动作序列图像传导函数, 提取交互手势特征, 分析图像相似度特征分量, 根据像素值得出动作判断的模糊度集合, 以实现多点触摸动作的匹配, 从而准确捕捉用户的操作意图; 其次, 考虑机器人运动条件和摩擦力因素, 建立摩擦力近似最优约束方程, 以保证机器人移动交互的平衡性和稳定性; 最后, 获取交互手臂的期望响应, 利用 Lagrange 方程描述多点触摸条件下的人机交互状态, 建立交互动作动力学方程, 引入交互控制变量, 利用自适应模糊控制体系输出近似最优控制结果, 以提高动态环境适应性, 并根据实际情况调整控制策略, 更好地满足人机交互的需求. 实验结果表明, 该方法能有效完成人机交互控制, 识别率高达 94% 以上, 控制时延误差较小, 为  $0.03 \times 10^{-3}$  s, 且迭代收敛速度快, 具有更好的控制效果.

**关键词:** 多点触摸; 协作机器人; 近似最优求解; 人机交互; 控制算法

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2024)05-1211-08

## Approximate Optimal Human-Computer Interaction Control Algorithm for Collaborative Robots Based on Multi-point Touch

LIU Bing, ZHANG Yan

(Teaching Department of Computer and Mathematics, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that existing methods in human-computer interaction systems could not accurately capture the user's operational intentions and had poor adaptability to dynamic environments, resulting in poor accuracy of human-computer interaction. In order to improve the accuracy of human-computer interaction in the operation process of collaborative robots, we proposed a multi-point touch based approximate optimal human-computer interaction control method. Firstly, based on human-computer interaction for multi-point touch action matching, we established an image conduction function for interactive gesture action sequences, extracted interactive gesture features, analyzed image similarity feature components, and obtained the fuzziness set of action judgments based on pixel values to achieve matching of multi-point touch actions and accurately capture user

收稿日期: 2024-01-05.

第一作者简介: 刘冰(1977—), 男, 汉族, 硕士, 讲师, 从事计算机基础教学和与信息可视化的研究, E-mail: liubing20240@163.com.

基金项目: 国家社会科学基金(批准号: BLA210217).

operation intentions. Secondly, considering the motion conditions and friction factors of the robot, we established an approximate optimal constraint equation for friction to ensure the balance and stability of the robot's interaction and movement. Finally, we obtained the expected response of the interactive arm, described the human-computer interaction state under multi-point touch conditions through Lagrange equation, established the interaction action dynamics equation, introduced interaction control variables, and used adaptive fuzzy control system to output approximate optimal control results to improve dynamic environment adaptability. We also adjusted control strategies according to actual situations to better meet the needs of human-computer interaction. Experimental results show that the proposed method can effectively achieve human-computer interaction control, with recognition rates of over 94%, and a small delay difference of  $0.03 \times 10^{-3}$  s during control, with fast iteration convergence speed and better control effect.

**Keywords:** multi-point touch; collaborative robot; approximately optimal solution; human-computer interaction; control algorithm

目前,机器人应用领域越来越广泛,应用功能也更全面,机器人已逐渐辅助人类完成各项工作.人机交互需要协作机器人识别人类行为,并做出相应的交互动作,完成人机交互的作业内容.为实现更智能、自然的人机交互,人机交互控制算法的研究备受关注.这些算法能处理人机交互中的各种复杂问题,提高人机交互的准确性和效率,以进一步增强人工智能系统的智能水平和自适应性.

因此,要实现近似最优人机交互就需要构建对应的交互动作特征识别以及控制方法.目前,该项研究已有许多成果,例如:张学志等<sup>[1]</sup>提出了一种多模态人机交互控制方案,通过上肢可穿戴外骨骼和 Myo 手环检测操作者手臂和手部的运动状态,实现对机器人的运动控制,利用机器学习算法和检测手臂关节运动角度的方式,完成对肌电信号和肢体动作的控制意图识别,通过网络将肢体动作和肌电信号的控制指令发送到虚拟环境中,实现多模态融合的控制效果,并完成了 18 种控制指令的映射,但该方法在实际应用中可能无法满足个体之间的差异,导致控制效果不佳,存在较高的延时误差;张玉兰等<sup>[2]</sup>提出了一种多自由度交互控制法,考虑交互环境和复杂度,利用传感器获取机器人交互信息,计算信息熵以区分并调整机器人交互动作的复杂度,在此基础上建立交互动作的控制体系,但该方法在实际应用中动态环境适应性较差,人机交互控制的可靠性和精度不理想;徐巍峰等<sup>[3]</sup>提出了一种基于语义本体的人机交互控制方法,基于本体的方法构建人机交互的概念体系,用 OWL 语言描述并定义地图信息数据,形成概念本体事实库,以概念本体事实库为基础,构建多元语义关系,生成关于位置节点的拓扑关系结构和语义解释接口,提出基于标签稀疏图的语义位置推理方法和轨迹控制算法,从而实现人机在统一的概念内涵和位置推理基础上的交互控制,但该方法在实际应用中计算复杂度过高,不适用于一些实时性较强且计算资源有限的应用场景,存在一定局限;吴青聪等<sup>[4]</sup>基于神经网络自适应控制法,考虑机器人的机械结构,通过对运动轨迹的跟踪和训练调整参数,实现了对人机交互的实时控制,但该方法在研究中忽略了机器人移动过程中的摩擦阻力等影响因素,因此动能损耗相对较大.

基于此,本文通过基于多点触摸的交互条件,明确人机交互手势识别条件,提取手势动作特征信息和轮廓信息,实现对多点触摸动作的匹配,从而准确捕捉用户的操作意图.为保证机器人在交互过程中的稳定性,建立运动状态下的平衡约束,并利用 Lagrange 方程描述多点触摸条件下的人机交互状态,建立交互动作动力学方程,引入交互控制变量,利用自适应模糊控制体系输出近似最优控制结果,从而提高动态环境适应性,更好地满足人机交互的需求,实现最终人机交互的有效控制.

## 1 基于多点触摸的人机交互手势识别

考虑到协作机器人在作业时可能需要完成多个任务,因此可通过多点触摸使用多个手指完成协作交互.人机交互在可多点触摸设备上进行,当发生触摸行为时,通过识别软件给机器人传送动作要领,

并将交互结果传输到显示器中。

基于多点触摸的人机交互, 需要保证在交互时对手势特征精准提取和识别, 因此通过多点触摸平面采集感知到的手势动作序列. 假设动作序列之间的帧差<sup>[5]</sup>为  $g$ , 对应的离散采样率<sup>[6]</sup>为  $\nabla$ , 对应的取值范围为  $[1, -1]$ . 假设手指骨骼有  $N$  个点位数, 建立协作机器人在交互中的动作分布坐标为  $A$  和  $B$ , 为使人机交互的多点触摸动作近似最优匹配<sup>[7-8]</sup>, 提取手势特征高频部分为  $y = [\nabla_x g]$ , 提取时设立对应的约束条件  $k > 0$ ,  $\sum_i k_i = 1$ , 其中  $x$  表示手势动作在空间坐标下的高频信息,  $k_i$  表示轮廓细节  $i$  的约束条件. 根据人机交互的运动学理论, 分解交互特征高频部分  $y$ , 获得边缘轮廓信息  $R_a$ .

在人机交互过程中进行交点检测, 实现协作机器人的交互动作特征分析, 建立一个交互动作要素窗口  $W$ , 中心要素为  $m \times n$ , 以  $3 \times 3$  的交互动作要素窗口为基础建立人机交互手势动作特征提取传导函数<sup>[9]</sup>:

$$c(x, y) = W \sum_{i=1}^N [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2, \quad (1)$$

其中  $I$  表示滑动窗口特征,  $(\Delta x, \Delta y)$  表示手势位置分布函数,  $(x_i, y_i)$  表示手势特征对应的坐标点.

分析交互捕捉动作要素的轮廓信息  $R_a$ , 需要根据轮廓信息, 通过特征提取传导函数提取手势动作的特征, 以完成对应的手势动作重构. 用  $\{S_j^{(0)} = 1, j = 0, 1, \dots, N-1\}$  表示手势动作的动态特征重构参数, 再根据输出信噪比完成人机交互动作的特征提取和识别重构<sup>[10]</sup>.

利用动态帧差融合方法实现交互动作的特征识别, 根据采集动作序列的连通区域显示条件, 获取交互动作特征的要素值<sup>[11]</sup>:

$$\hat{f}(x, y) = \begin{cases} g(x, y) - 1, & g(x, y) - \hat{f}_{Lee}(x, y) \geq 1, \\ g(x, y) + 1, & g(x, y) - \hat{f}_{Lee}(x, y) < 1, \\ g(x, y), & \text{其他,} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $g(x, y)$  表示交互动作特征值,  $\hat{f}_{Lee}$  表示交互动作序列提取条件. 根据交互动作序列的中心要素点, 建立直接性的特征匹配仿真映射不变区域, 获取相似度特征分量:

$$p(\eta_m(x, y)) = \begin{cases} c(x, y) S_j^{(0)} \frac{r R_a}{4}, & \eta_m(x, y) = -1, \\ 1 - c(x, y) S_j^{(0)} \frac{r R_a}{2}, & \eta_m(x, y) = 0, \\ c(x, y) S_j^{(0)} \frac{r R_a}{4}, & \eta_m(x, y) = 1, \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\eta_m$  表示特征匹配映射参数;  $r$  表示交互动作序列在映射区域的纹理特征匹配参数,  $0 \leq r \leq 1$ . 根据自相关匹配滤波条件获取动作序列特征, 用于协作机器人的人机交互手势动作特征的识别重构. 则获取的动作序列特征<sup>[12]</sup>表示为

$$g'(x, y) = \hat{f}(x, y) + p(\eta_m(x, y)) + \eta(x, y), \quad (4)$$

其中  $\eta(x, y)$  表示交互动作序列特征中包含的加性噪声项. 根据获取的动作序列特征可得到特征向量的量化值:

$$f'(x, y) = \frac{\beta g'(x, y)}{F(x, y)} + (1 - \beta) m_l, \quad (5)$$

其中  $F(x, y)$  表示特征置信度相对较高的要素序列在  $(x, y)$  点的特征统计量,  $m_l$  表示第  $l$  个序列特征对应的嵌入维数<sup>[13]</sup>,  $\beta$  表示人机交互手势动作序列的量化特征残差分量.

在该条件下设定交互动作的局部方差为  $\delta_i^2$ , 此时可根据上述已知条件计算出  $\beta$  为

$$\beta = \max \left\{ \frac{\delta_i^2 - \delta_n^2}{\delta_i^2}, 0 \right\}, \quad (6)$$

其中  $\delta_n^2$  表示噪声方差. 通过动态帧差融合的方式, 有效提取出触摸滑动角度特征. 由于仿真映射不变区域有可能发生一定程度的变化, 因此需要考虑到对应的几何结构, 确定动作要素值, 得出动作判断

的模糊度集合<sup>[14]</sup>  $u = \{u_{ik}\}$ , 此时可根据噪声方差  $\delta_\eta^2$  计算出动态融合后的输出结果, 即人机交互手势动作的识别重构结果:

$$u_{ik} = \frac{1}{\sqrt{a}} \left( \frac{a+1}{2} - \frac{(a-1)f_0}{f'(x,y)B} \right), \quad (7)$$

其中  $B$  表示动态融合参数,  $f_0$  表示模糊度影响参数.

## 2 协作机器人的平衡约束

本文方法重点考虑人机交互控制, 因此在控制过程中必须考虑协作机器人的平衡约束问题, 综合考虑协作机器人多运动条件和摩擦力等因素, 以保证人机交互的运动稳定性. 所以, 在完成上述人机交互手势识别后, 进行协作机器人的平衡约束, 可为后续控制实现奠定基础.

当多点触摸协作机器人的零力矩点位于多边形  $C$  内部时, 协作机器人与地面接触部分的零力矩点<sup>[15]</sup> 可表示为

$$p_{zmp} \in \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i p_i \mid p_i \in C \right\}, \quad (8)$$

其中:  $C$  表示协作机器人与地面接触部分支撑域内的点总数;  $p_i$  表示协作机器人与地面接触部分支撑域<sup>[16]</sup> 内的点;  $\alpha_i$  表示协作机器人所在地面的作用力分量比, 可表示为

$$\alpha_i = \frac{f_{iz}}{\sum_{i=1}^N f_{iz}}, \quad (9)$$

$f_{iz}$  表示机器人作用分力, 在作用力分量比正常的情况下, 将协作机器人的理想零力矩点轨迹  $p_{zmp}^d$  作为输入条件, 此时为保证后续交互控制的近似最优解, 零力矩点的理想值  $p_{zmp}^d$  和实际值  $p_{zmp}$  之间的误差  $\epsilon_{zmp}$  应满足如下条件:

$$\| p_{zmp} - p_{zmp}^d \| \leq \epsilon_{zmp}. \quad (10)$$

为保证协作交互的平衡性和稳定性, 还需考虑机器人与地面接触部分的摩擦情况, 建立对应的摩擦力近似最优约束方程<sup>[17]</sup>:

$$\| \mathbf{P}_{xy} F_0 \| \leq \mu F_1, \quad (11)$$

$$\| \mathbf{P}_{mz} F_0 - p_{zmp} \mathbf{P}_{xy} F_0 \| \leq \mu_r F_2, \quad (12)$$

$$F_1 + F_2 \leq \mathbf{P}_z F_0, \quad (13)$$

其中  $\mathbf{P}_{xy}$  表示平面坐标的力向量投影矩阵,  $\mathbf{P}_{mz}$  表示垂直接触相切力投影矩阵,  $\mathbf{P}_z$  表示垂直的力向量投影矩阵,  $\mu$  为机器人与地面之间的摩擦系数,  $\mu_r$  为协作机器人在交互时的扭动摩擦系数,  $F_0, F_1, F_2$  分别对应协作机器人在进行前向、切向和正常运动时受到的摩擦阻力. 式(13)描述了协作机器人执行命令时的受力约束情况.

协作机器人在进行人机交互时, 设  $\mathbf{q} = (\dot{q}(1), \dot{q}(2), \dots, \dot{q}(L))^T$  表示手臂旋转角度向量, 此时可解析出协作机器人在某一时刻的动能表达式<sup>[18]</sup>:

$$T(t) = \sum_{l=1}^L \frac{\omega(l) p(l)}{\mathbf{q} \mathbf{J}}, \quad (14)$$

其中  $L$  表示手臂长度,  $\omega(l)$  表示交互旋转力矩,  $p(l)$  表示交互动作下的动能损耗,  $\mathbf{J}$  表示协作机器人手臂的惯性向量矩阵.

在时间连续条件下完成对机器人人机交互时的动作采样, 设连续采样点为  $k=1, 2, \dots, K$ , 可将求解人机交互动态平衡问题转化为对交互误差的最小加权范数求解<sup>[19]</sup>, 求得近似最优解, 则需满足如下约束条件:

$$\left\{ \sum_{k=1}^K \lambda_k \mid T_d(t_k) - T(t) \right\}^{1/p_a} = 1, \quad (15)$$

其中:  $\lambda_k$  表示平衡控制采纳数;  $p_a$  表示交互动能分量;  $T_d(t_k)$  表示正向的平衡加权系数, 描述  $t_k$  时刻

下对机器人交互手臂的期望响应。

### 3 人机交互动力学方程及控制实现

在完成上述协作机器人的平衡约束后, 为完成对人机交互的有效控制, 首先基于 Lagrange 方程建立人机交互的动力学方程, 然后利用时刻差重点描述人机交互的行为意图, 最后在考虑上述平衡约束下, 利用自适应模糊控制体系输出最终的人机交互近似最优控制结果, 完成人机交互控制。建立如下 Lagrange 方程<sup>[20]</sup>:

$$F_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \tag{16}$$

其中  $F_i$  表示协作机器人的人机交互广义力矩,  $\dot{q}_i$  表示协作机器人交互动作广义速度,  $q_i$  表示交互动作机器人手臂动能的广义坐标<sup>[21]</sup>。此时可将协作机器人交互体系的动力学方程表述为

$$\tau = F_i \frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial E_k}{\partial x} + \frac{\partial E_p}{\partial x}, \tag{17}$$

其中  $\tau$  表示协作机器人交互动作的广义驱动力矩,  $E_k$  表示协作机器人的人机交互总动能,  $\dot{x}$  表示协作机器人的广义信息,  $x$  表示对应的深度信息,  $E_p$  表示协作机器人的总位能。

进行交互控制时引入控制变量  $\theta$ , 用微分处理式(17)后得到深度动力学方程为

$$\tau' = \mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{H}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta), \tag{18}$$

其中  $\mathbf{D}(\theta)$  表示机器人交互时的转动惯量矩阵,  $\dot{\theta}$  表示实际的运动角度,  $\mathbf{H}(\theta, \dot{\theta})$  表示运动过程中的相关矩阵,  $\mathbf{G}(\theta)$  表示运动过程中的广义重力矩阵。利用自适应模糊控制器进行相关的交互控制, 先综合考虑人机交互的运动状态和实际环境, 再利用时刻差重点描述人机交互的行为意图<sup>[22]</sup>, 用公式表示为

$$\begin{cases} P\left(\frac{F_R^T - F_R}{u_{ik}}\right) > \epsilon, & \Delta x = 1, \\ \left| P\left(\frac{F_R^T - F_R}{u_{ik}}\right) \right| \leq \epsilon, & \Delta x = 0, \\ P\left(\frac{F_R^T - F_R}{u_{ik}}\right) < -\epsilon, & \Delta x = -1, \end{cases} \tag{19}$$

其中  $\epsilon$  表示交互控制影响参数,  $F_R$  表示当前时刻下人机交互行为,  $F_R^T$  表示上一时刻的人机交互行为,  $\Delta x$  表示人机交互的加减运动标准量。

经过动力学公式变换, 在考虑上述平衡约束下, 利用自适应模糊控制体系输出最终的人机交互近似最优控制结果为

$$\hat{f}(x|\dot{\theta}) = \frac{P \sum_{i=1}^{p_1} \bar{y}(\mu A_i)}{\tau' \sum_{i=1}^{p_1} (\mu A_i)}, \tag{20}$$

其中  $A_i$  表示近似最优控制条件,  $p_1$  表示最优控制权重,  $\bar{y}$  表示人机交互的近似最优自由参数,  $P$  表示人机交互的行为意图。

基于上述理论方法可最终实现协作机器人的人机交互近似最优控制, 并有效保证人机交互的稳定性和平衡性。

## 4 实 验

### 4.1 实验设置

为验证本文协作机器人近似最优人机交互控制方法是否有效, 下面基于嵌入式处理器建立实验平台, 对协作机器人的人机交互控制稳定性进行实验。

以如图 1 所示的 KUKA LBR iiwa 型号协作机器人为研究对象, 相关参数配置如下: 重复定位精度为  $\pm 0.02$  mm, 最大工作范围为 1 410 mm, 最大负载为 7 kg, 最大速度为  $240^\circ/\text{s}$ , 电源要求为

220~240 V AC, 50~60 Hz.

实验中设置协作机器人在进行运动交互时与地面间的摩擦系数值为 0.4, 协作机器人交互的扭转摩擦系数为 0.45. 调整完最佳参数后, 考虑到协作机器人的人机交互通常为瞬时运动, 因此在实验中为验证控制稳定性, 将实验测试时间设为 1 s, 机器人的移动速度设为 0.3 m/s, 质量为 1 kg.

### 4.2 结果分析

基于上述参数设置, 首先测试本文方法的有效性, 用多点触摸手势识别效果进行衡量, 该识别效果越好, 说明后续控制效果越好. 本文方法的多点触摸手势识别效果列于表 1. 由表 1 可见, 在多种触摸动作中, 本文方法的识别率都在 94% 以上, 可证明该方法的触摸手势能准确被机器人识别, 使机器人准确执行下达的任务, 为后续人机交互控制提供支撑.

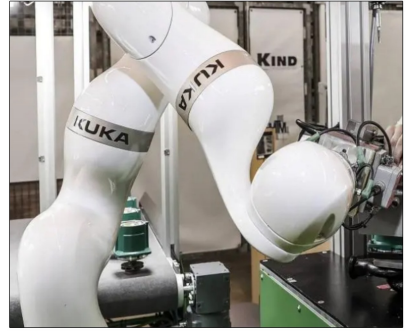


图 1 协作机器人

Fig. 1 Collaborative robot

表 1 动态交互手势识别结果

Table 1 Results of dynamic interactive gesture recognition

动作及总数	测试次数	正确次数	错误次数	识别率/%
开始	51	48	3	94.11
停止	55	52	3	94.54
向上	52	50	2	96.15
向下	53	50	3	94.33
向左	48	46	2	95.86
向右	47	44	3	96.61
向前	54	52	2	96.30
向后	48	46	2	95.83
总数	408	388	20	95.09

基于上述测试, 为验证本文方法的控制效果, 对各项参数的研究方法进行计算, 得到协作机器人的动能期望值为 0.046 J. 下面对动能变化情况进行实验, 将本文方法的实验结果与多自由度交互控制法和神经网络自适应控制法进行对比, 结果如图 2 所示. 由图 2 可见: 由于期望值不考虑运动中受到的摩擦力、阻力等相关损耗, 所以一直保持直线不变, 但实际应用中则无法忽略这些因素; 多自由度交互控制法和神经网络自适应控制法的动能曲线急速下降, 动能损耗相对较大; 本文方法在人机交互进行到第 0.65 s 前的动能损耗基本接近期望值, 在测试结束时的动能损耗也更小, 说明近似最优控制的性能良好.

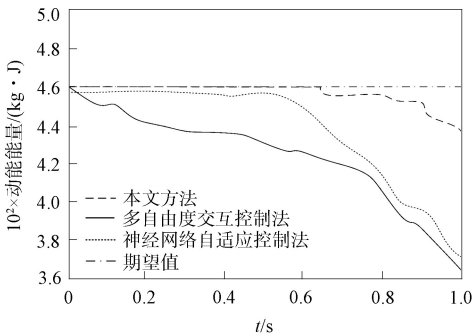


图 2 不同方法的动能变化比较

Fig. 2 Comparison of kinetic energy changes of different methods

下面对得到的人机交互时延迟差结果进行分析, 实验结果如图 3 所示. 由图 3 可见: 多自由度交互控制法和神经网络自适应控制法在控制测试时间内的时延误差波动变化较大, 在 1.0 s 时, 其时延误差分别为  $0.2 \times 10^{-3}$  s 和  $0.24 \times 10^{-3}$  s; 本文方法的时延误差虽存在波动, 但波动变化相对较小, 说明时延误差更小、更稳定, 能更好地达到人机交互的实时控制, 在 1.0 s 时, 其延误差为  $0.03 \times 10^{-3}$  s. 相比于其他方法, 本文方法时延误差较低, 这与本文方法在研究中追求求解近似最优值有关.

下面对控制计算的迭代速度进行分析, 设协作机器人在交互运动中的惯性权重为 0.7, 为保证实验数据的准确性, 将 3 种方法的迭代步数均设为 1 000, 不同方法的实验对比结果如图 4 所示. 由图 4 可见: 多自由度交互控制法的迭代误差结果始终变化较大, 导致其得到稳定结果的次数更多; 神经网络

络自适应控制法在控制迭代计算时,存在某一节点忽然出现大幅度误差变化的情况,算法的稳定性略差;本文方法则更稳定,当迭代次数为240次时,达到平稳.实验结果表明,本文方法能快速得到趋于稳定的结果,迭代收敛速度快,控制效果更优.

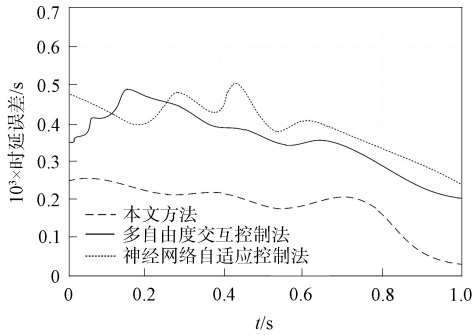


图3 不同方法的控制时延误差比较

Fig. 3 Comparison of control delay errors of different methods

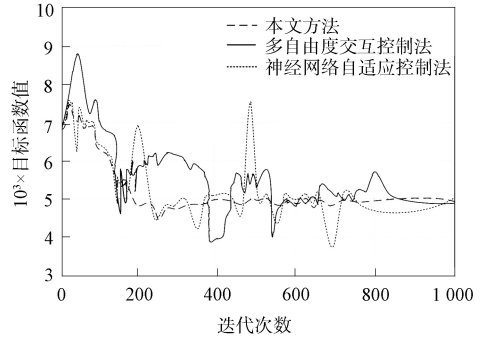


图4 不同方法的迭代速度比较

Fig. 4 Comparison of iteration speed of different methods

综上所述,本文在研究基于多点触摸的协作机器人交互控制时,为保证良好的控制效果,先识别多点触摸状态下的人机交互手势,为维持人机交互的稳定性,设立协作机器人运动作业的平衡约束条件,并建立人机交互动力学方程,在考虑约束的条件下,利用自适应模糊控制体系实现最终的人机交互有效控制.实验结果表明,本文方法能很好地完成人机交互控制.

## 参 考 文 献

- [1] 张学志, 谷亚伦, 林高, 等. 面向水下机器人的多模态人机交互控制 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38(10): 48-51. (ZHANG X Z, GU Y L, LIN G, et al. Multi-mode Human-Computer Interactive Control for Underwater Vehicle [J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(10): 48-51.)
- [2] 张玉兰, 杜羽. 多自由度包装机器人人机交互控制方法 [J]. 包装工程, 2021, 42(15): 239-244. (ZHANG Y L, DU Y. Human-Computer Interaction Control Method for Multi-degree of Freedom Packaging Robot [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 239-244.)
- [3] 徐巍峰, 徐非非, 王文军, 等. 基于语义本体的无人机人机交互控制方法研究 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(12): 103-109. (XU W F, XU F F, WANG W J, et al. Human-UAV Interaction Control Based on Semantic Ontology [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(12): 103-109.)
- [4] 吴青聪, 张祖国. 基于屏障 Lyapunov 函数的上肢康复机器人自适应主动交互训练控制 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 216-224. (WU Q C, ZHANG Z G. Adaptive Active Interaction Exercise Control of Upper Limb Rehabilitation Robot Based on the Barrier Lyapunov Function [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 43(2): 216-224.)
- [5] 曾敏, 袁松, 石永华, 等. 基于异构多核的焊接集控机器人交互设计 [J]. 焊接, 2021(11): 38-41. (ZENG M, YUAN S, SHI Y H, et al. Design of Human-Machine Interaction for Welding Central Controllers Based on Heterogeneous Multi-core [J]. Welding, 2021(11): 38-41.)
- [6] 王鑫强, 王博, 贾巍, 等. 基于 Wayland 图形协议和光纤通道网络的车辆人机交互显示控制技术 [J]. 兵工学报, 2022, 43(增刊1): 46-53. (WANG X Q, WANG B, JIA W, et al. Vehicle Human-Computer Interaction Display and Control Technology Based on Wayland Graphics Protocol and Fibre Channel Network [J]. Journal of Ordnance Industry, 2022, 43(Suppl 1): 46-53.)
- [7] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 374-389. (LI H, LIU G, WEN X Y, et al. Industrial Safety Control System and Key Technologies of Digital Twin System Oriented to Human-Machine Interaction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 374-389.)
- [8] 张燕, 卢宁. 面向人机交互的下肢外骨骼导纳控制策略 [J]. 控制工程, 2022, 29(12): 2309-2315. (ZHANG Y, LU N. Admittance Control Strategy of Lower Limb Exoskeleton Oriented to Human-Machine Interaction [J].

Control Engineering, 2022, 29(12): 2309-2315.)

- [9] 朱弟发, 张恩阳, 韩康, 等. 基于协作机器人关节集成扭矩传感器的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(10): 6-9. (ZHU D F, ZHANG E Y, HAN K, et al. Research on Integrated Torque Sensor Based on Collaborative Robot Joint [J]. Instrument Technology and Sensors, 2021(10): 6-9.)
- [10] 梁惠萍, 赵天雨. 绳锯机控制机器人人机界面可用性评估研究 [J]. 机械设计, 2021, 38(6): 133-138. (LIANG H P, ZHAO T Y. Evaluation Research on Human-Machine Interface Usability of Rope Saw Controller [J]. Mechanical Design, 2021, 38(6): 133-138.)
- [11] 梁旭, 王卫群, 苏婷婷, 等. 下肢康复机器人的主动柔顺自适应交互控制 [J]. 机器人, 2021, 43(5): 547-556. (LIANG X, WANG W Q, SU T T, et al. Active Compliant and Adaptive Interaction Control for a Lower Limb Rehabilitation Robot [J]. Robotics, 2021, 43(5): 547-556.)
- [12] 方卫宁, 王健新, 陈悦源. 复杂系统人机交互中的多任务调度策略综述 [J]. 包装工程, 2021, 42(18): 73-83. (FANG W N, WANG J X, CHEN Y Y. Multi-task Scheduling Strategy in Human-Computer Interaction of Complex Systems [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(18): 73-83.)
- [13] 龚轲杰, 王勇, 段玉瑞, 等. 多空间机器人协同工作空间的数值求解方法 [J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(3): 49-57. (GONG K J, WANG Y, DUAN Y R, et al. Numerical Methods for Collaborative Workspace of Multi-space-robot System [J]. China Space Science and Technology, 2022, 42(3): 49-57.)
- [14] 刘莹, 邵彧. 利用姿态传感器多点位控制机器人交互方法 [J]. 机械设计与制造, 2023(2): 266-269. (LIU Y, SHAO Y. Multi-point Control Robot Interaction Method Using Attitude Sensor [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(2): 266-269.)
- [15] 王丽萍, 林豪, 潘笑天, 等. 基于决策变量交互识别的多目标优化算法 [J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(4): 355-367. (WANG L P, LIN H, PAN X T, et al. Multi-objective Optimization Algorithm Based on Interactive Identification of Decision Variables [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(4): 355-367.)
- [16] 车延明, 宋明安, 陆焱, 等. 简析人机协作铸件打磨系统的控制要求及 HMI 功能 [J]. 制造技术与机床, 2021(9): 28-32. (CHE Y M, SONG M A, LU H, et al. Analysis of Human-Machine Cooperation Casting Grinding System Control Requirements and HMI Functions [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2021(9): 28-32.)
- [17] 刘蝉, 巴腾跃, 刘德龙, 等. 四足机器人智能交互控制研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(增刊 1): 62-66. (LIU C, BA T Y, LIU D L, et al. Intelligent Interaction Control of Quadruped Robot [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 53(Suppl 1): 62-66.)
- [18] 解迎刚, 兰江雨. 协作机器人及其运动规划方法研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(13): 18-33. (XIE Y G, LAN J Y. Review of Collaborative Robot and Its Motion Planning Methods [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(13): 18-33.)
- [19] 韩江, 王凡志, 董方方, 等. 基于 Udawadia-Kalaba 理论的协作机器人轨迹跟踪控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 78-83. (HAN J, WANG F Z, DONG F F, et al. A Novel Trajectory Tracking Control of Collaborative Robot Based on Udawadia-Kalaba Theory [J]. Combination Machine Tool and Automation Processing Technology, 2021(1): 78-83.)
- [20] 肖凡, 杨庆凯, 周勃, 等. 面向平均区域覆盖的多机器人分布式控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40(3): 441-449. (XIAO F, YANG Q K, ZHOU B, et al. Distributed Even Coverage Control of Multi-robot Systems [J]. Control Theory and Applications, 2023, 40(3): 441-449.)
- [21] 张腾, 张小栋, 张英杰, 等. 引入深度强化学习思想的脑-机协作精密操控方法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 1-9. (ZHANG T, ZHANG X D, ZHANG Y J, et al. A Precise Control Method for Brain-Computer Cooperation with Deep Reinforcement Learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 1-9.)
- [22] 王畅, 王国辉, 施智平, 等. 协作机器人逆运动学形式化建模与验证 [J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(7): 1353-1359. (WANG C, WANG G H, SHI Z P, et al. Formal Modeling and Verification of the Inverse Kinematics of Collaborative Robot [J]. Small Scale Microcomputer Systems, 2021, 42(7): 1353-1359.)