

机械臂目标区域跟踪防撞控制

杨沁林¹, 张 劲²

(1. 四川大学电气工程学院, 成都 610065;
2. 四川大学生物医学工程学院, 成都 610065)

摘要: 针对医疗护理机械臂在轨迹跟踪过程中的人机交互与防碰撞问题, 本文提出了一种基于目标区域跟踪以及碰撞预测的机械臂控制方法. 本文根据 Lyapunov 函数, 结合人工势能场, 设计保证系统稳定性的控制器, 实现在目标区域内人机交互的柔顺性; 采用会遇距离与会遇时间构造防撞预测模型, 建立障碍物作用半径与防撞安全指数的关联模型, 实现障碍物作用半径实时可变. 实验结果验证了本文所提方法对目标区域跟踪的有效性, 人机交互的柔顺性, 以及障碍物规避过程的高效, 平滑.

关键词: 人工势能场; 目标区域跟踪; 机械臂; 防撞预测; 障碍物规避

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.033001

Region tracking and collision avoidance control for the manipulator

YANG Qin-Lin¹, ZHANG Jin²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. College of Biomedical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the problem of human-robot interaction and anti-collision of the medical nursing manipulator in the process of trajectory tracking, a control method of the manipulator is proposed based on target region tracking and collision prediction. In this paper, according to Lyapunov function and combined with the artificial potential field, the controller to ensure the system stability is designed to achieve human-robot interaction in the target area of compliance. The collision avoidance prediction model is constructed by the distance of collision and the time of collision, and the correlation model between the radius of obstacle and the safety index of collision avoidance is established to realize the real-time change of the radius of obstacle. Experimental results show the experimental results show that the proposed method can perform target area tracking effectively and makes the human-computer interaction compliance, the obstacle avoidance process is efficient and smooth.

Keywords: Artificial potential field; Target region tracking; Manipulator; Collision prediction; Obstacle avoidance

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61571314); 四川省科技厅科技支撑计划项目(2020YFG0081); 四川大学华西医院学科卓越发展“1·3·5”工程项目(ZYJC21081)

作者简介: 杨沁林(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机器人运动规划及智能控制. E-mail: yql1995170@163.com

通讯作者: 张劲. E-mail: jing_zhang@scu.edu.cn

1 引言

医护人员短缺已成为全球医疗行业共同面临的严峻问题^[1],在此情况下,因为机械臂具有工作时间长,工作性能稳定,对疫情免疫等优势,所以使用机械臂代替医护人员完成常见的,重复性高的医护工作,可以在很大程度上减少医护人员的工作强度以及感染传染性疾病的风险.为此研究设计具有医护能力的机器人受到了研究人员的广泛关注. Jayaswal 等^[2]在疫情期间设计了鲁棒柔性机械臂控制方法,并对该方法进行了仿真实验验证. Ahmed 等^[3]设计实现可提醒患者或老年人及时服药,并在患者需要的时候随时提供饮用水的移动机器人.

机械臂在医护过程中涉及与患者的交互,例如当机械臂在进行护理过程中,机械臂末端执行器停留在患者附近时,患者可以根据个人需要,将机械臂末端执行器推离或拉近.在实际设置实验装置之前,需要依据文献[4]才能保证机械臂的控制过程涉及人机交互任务.文献[5-9]将机械臂末端在任务空间中的目标移动路径设置为一系列的点,其中所提出的控制方案均能较好实现目标轨迹的跟踪任务,但是在涉及机械臂操作过程中存在人机交互协作的情况,将机械臂末端的目标设置为一个区域更加合理,并且机械臂末端在目标区域内表现出柔顺性,以确保人机交互过程的安全,顺利.

在护理病房内,因为机械臂执行护理任务的特殊性,需要保证在护理过程中患者的安全,防止机械臂末端执行器误触患者重要部位,以及防止误触医护用品,避免在护理过程中发生医疗事故,所以机械臂末端在跟随目标区域移动过程中,需要规避患者及医护用品等障碍物.文献[10]提出了双向时效 A* 算法,提高了 A* 算法在规避障碍物过程中的执行效率,但每次迭代的路径选取未考虑障碍的位置,易陷入障碍密集区域;文献[11]使用 RRT (Rapidly Exploring Random Tree) 算法,提出了一种基于目标搜索策略,该算法主要是针对二维平面上的路径规划及避障,对于三维空间路径规划该算法搜索缓慢;文献[12]运用向量场直方图方法 VFH (Vector Field Histogram),提出一种波谷宽度计算方法,使得逼近目标位置过程中轨迹更加平滑.因为人工势场法规避障碍物具有结构清晰,运算量小的优点,由此引入人工势场^[13].在人工势场中包括两种势场:引力势能场和斥力势能场.利

用人工势场规避障碍物也被广泛使用在无人机^[14]、车辆^[15]和船舶^[15]等领域.在本文中,引力势能场作用在机械臂末端执行器,起到引导机械臂末端执行器实现目标区域跟踪的作用,斥力势能场同样作用在机械臂末端执行器,起到规避障碍物的作用.

本文提出了一种机械臂目标区域跟踪防撞控制器;实现机械臂末端执行器在跟踪目标区域过程中规避障碍物,并在目标区域内具有柔顺的人机交互性能;借鉴船舶领域的最近会遇距离和最小会遇时间,提出了一种机械臂碰撞预测模型;通过机械臂与障碍物的实时状态,得到防撞安全指数;将障碍物作用半径与防撞安全指数相联系,以此改变障碍物作用半径,实现机械臂在跟踪目标区域的同时,规避障碍物,保护患者,提高了医护机械臂的安全性.

2 问题描述

2.1 机械臂动力学模型

根据拉格朗日定理,机械臂在关节空间的动力学模型可以表示为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

其中 $q \in \mathbb{R}^n$ 表示 n 自由度机械臂的广义关节角坐标向量; $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为对称正定惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为哥氏力与离心力矩阵; $g(q) \in \mathbb{R}^n$ 为重力项; $\tau \in \mathbb{R}^n$ 表示控制输出力矩.

设 $x \in \mathbb{R}^n$ 表示机械臂末端执行器在任务空间中的位置向量

$$x = h(q) \quad (2)$$

其中 $h(\cdot)$ 表示从关节空间的关节角度 q 映射到任务空间末端执行器位置 x 的正向运动学变化矩阵.对式(2)两边同时求导,可得

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (3)$$

式(3)表示了末端执行器的速度向量 \dot{x} 与关节角速度向量 \dot{q} 之间的运动学关系,其中 $J(q)$ 为雅克比矩阵.

通过正向运动学式(2)和式(3), \dot{q} 和 \ddot{q} 被分别表示为

$$\begin{aligned} \dot{q} &= J^{-1}(q)\dot{x} \\ \ddot{q} &= \dot{J}^{-1}(q)\dot{x} + J^{-1}(q)\ddot{x} \end{aligned} \quad (4)$$

结合关节空间动力学模型式(1)和文献[16],可以推导出任务空间动力学模型为

$$M_x(x)\ddot{x} + C_x(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = F \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned}
M_x(x) &= J^{-T}(q)M(q)J^{-1}(q) \\
C_x(x, \dot{x}) &= J^{-T}(q)(C(q, \dot{q}) - \\
&\quad J^{-T}(q)M(q)J^{-1}(q))J^{-1}(q) \\
g(x) &= J^{-T}(q)g(q) \\
F &= J^{-T}(q)\tau
\end{aligned} \quad (6)$$

在本文中,因为实现控制任务都指定在任务空间中进行,所以将关节空间转换为任务空间,在任务空间中设计控制器更加方便,合理。

2.2 控制目标

本文的控制目标为:设计一种基于机械臂目标区域跟踪防撞控制器,将机械臂末端执行器的位置收敛到目标区域并对移动的目标区域进行跟踪,在目标区域跟踪过程中防止碰撞障碍物。障碍物中心定义为点 $x_{ob} \in \mathbb{R}^3$,障碍物作用半径为 λ_0 ,选择运动目标区域 T 为球形,其中心定义为点 $x_0 \in \mathbb{R}^3$,半径定义为 r_0 。并且假设目标区域中心点 x_0 的轨迹为二阶可导。

3 控制器设计

3.1 人工势能场

人工势能场是由引力势能场和斥力势能场共同组成。机械臂末端会受到目标区域的引力作用,同时也会受到障碍物的斥力作用。机械臂会在引力和斥力的共同作用下,规避障碍物向目标区域移动。

在三维空间中,目标区域将使用一个集合表示

$$T = \{\Delta x \mid f(\Delta x) = \|\Delta x\|^2 - r_0^2 \leq 0\} \quad (7)$$

其中 $\Delta x = x - x_0$, x_0 是目标区域的中心; $f(\Delta x): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ 为目标函数。目标函数关于 Δx 连续,且可微。 $f(\Delta x)$ 的一阶偏导数 $\partial f(\Delta x)/\partial \Delta x$ 和二阶偏导数 $\partial^2 f(\Delta x)/\partial^2 \Delta x$ 有界。定义引力势能函数,斥力势能函数分别表示为^[17]

$$U_{at}(\Delta x) = \frac{c}{2} f(\Delta x)^2 \quad (8)$$

$$U_{re}(\Delta x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right]^2 \|\Delta x\|^m, & \lambda \leq \lambda_0 \\ 0, & \lambda > \lambda_0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 c 为引力增益常量; η 为斥力增益常量; λ_0 为障碍物作用半径; λ 为机械臂末端执行器位置 x 到障碍物中心 x_0 的距离 $\lambda = |x_{ob}x|$; m 为大于 0 的常数。机械臂势能函数为

$$P(\Delta x) = \begin{cases} 0, & f(\Delta x) \leq 0 \text{ and } \lambda > \lambda_0 \\ U_{re}(\Delta x), & f(\Delta x) \leq 0 \text{ and } \lambda \leq \lambda_0 \\ U_{at}(\Delta x), & f(\Delta x) > 0 \text{ and } \lambda > \lambda_0 \\ U_{at}(\Delta x) + U_{re}(\Delta x), & f(\Delta x) > 0 \text{ and } \lambda \leq \lambda_0 \end{cases} \quad (10)$$

势能函数 $P(\Delta x)$ 关于 Δx 求偏导数表示为

$$\frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} = \begin{cases} 0, & f(\Delta x) \leq 0 \text{ and } \lambda > \lambda_0 \\ \varphi_2, & f(\Delta x) \leq 0 \text{ and } \lambda \leq \lambda_0 \\ \varphi_1, & f(\Delta x) > 0 \text{ and } \lambda > \lambda_0 \\ \varphi_1 + \varphi_2, & f(\Delta x) > 0 \text{ and } \lambda \leq \lambda_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \frac{\partial U_{at}(\Delta x)}{\partial \Delta x} = 2cf(\Delta x)\Delta x \\
\varphi_2 &= \frac{\partial U_{re}(\Delta x)}{\partial \Delta x} = \frac{\partial U_{re1}(\Delta x)}{\partial \Delta x} + \frac{\partial U_{re2}(\Delta x)}{\partial \Delta x}
\end{aligned}$$

其中 $\partial U_{at}(\Delta x)/\partial \Delta x$ 为引力势能对 Δx 求偏导,方向为从机械臂末端指向目标区域中心,将机械臂末端引导到目标区域。斥力势能对 Δx 求偏导由两部分组成,其中 $\partial U_{re1}(\Delta x)/\partial \Delta x$ 的方向为障碍物指向机械臂末端,作用为将机械臂末端引导到障碍物作用范围以外, $\partial U_{re2}(\Delta x)/\partial \Delta x$ 的方向为从机械臂末端指向目标点,引导机械臂末端收敛到目标区域,其表达式分别为

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U_{re1}(\Delta x)}{\partial \Delta x} &= \begin{bmatrix} -\eta \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \frac{1}{\lambda^3} \|\Delta x\|^m (x - x_{ob}) \\ -\eta \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \frac{1}{\lambda^3} \|\Delta x\|^m (y - y_{ob}) \\ -\eta \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \frac{1}{\lambda^3} \|\Delta x\|^m (z - z_{ob}) \end{bmatrix}, \\
\frac{\partial U_{re2}(\Delta x)}{\partial \Delta x} &= \frac{m}{2} \eta \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right]^2 \|\Delta x\|^{m-2} \Delta x \quad (12)
\end{aligned}$$

当机械臂末端位于目标区域外,或在障碍物附近时, $\partial P(\Delta x)/\partial \Delta x$ 将会驱使机械臂末端离开障碍物作用范围,向目标区域 $f(\Delta x) \leq 0$ 的区域移动,当机械臂末端位置在目标区域内,且不在障碍物附近时, $f(\Delta x) \leq 0$, $\partial P(\Delta x)/\partial \Delta x = 0$ 。

3.2 碰撞预测模型

在使用斥力场规避障碍物的过程中,障碍物的作用范围 λ_0 为主要参数。通常 λ_0 为固定值, λ_0 设置过大造成机械臂避障效率降低, λ_0 设置过小造成规避不及时,存在碰撞危险。由此,本文提出一种机械臂的碰撞预测模型。碰撞预测模型已在船舶导航^[18],自动驾驶汽车^[19,20]等领域得到广泛的应用,本文借鉴船舶领域中最近会遇距离 DCPA (Distance of Closest Point of Approach) 与最小会遇时间 TCPA (Time of Closest Point of Approach) 概念^[21],通过对发生碰撞在空间和时间上的危险度分别进行分析,得到空间防撞安全度与时间防撞安全度,通过对两个安全度的联立计算得到防撞安全

指数,并由防撞安全指数确定障碍物作用范围.

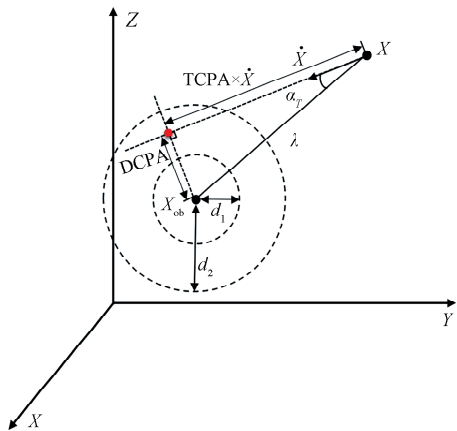


图 1 机械臂与障碍物会遇示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the encounter between the manipulator and the obstacle

在医疗护理机械臂碰撞预测模型中,设置空间防撞安全度和时间防撞安全度,空间防撞安全度反映了机械臂末端执行器与障碍物发生碰撞的可能性大小,时间防撞安全度反映存在发生碰撞可能的情况下碰撞的紧迫程度.空间防撞安全度主要由 DCPA 决定,时间防撞安全度主要由 TCPA 决定.机械臂末端在任务空间中的位置为 x ,速度为 \dot{x} ,障碍物在任务空间中的坐标为 x_{ob} .在图 1 中 DCPA 与 \dot{x} 方向直线交点为最近会遇点,是机械臂末端在当前速度方向上与障碍物距离最近的空间位置,最近会遇点与障碍物的距离为 DCPA.在机械臂末端执行器与障碍物有碰撞可能的情况下,当前速度条件下到最近会遇点的时间为 TCPA. DCPA 对碰撞危险度的影响较大,且 DCPA 的值越小,碰撞危险程度越高. TCPA 是针对碰撞危险程度的评价指标, TCPA 值越小,碰撞危险程度越高^[19].

$$DCPA = \lambda \sin(\alpha_T) \quad (13)$$

$$TCPA = \frac{\lambda \cos(\alpha_T)}{|\dot{x}|} \quad (14)$$

其中 $\lambda = |x_{ob} - x|$ 为机械臂末端点到障碍物中心的距离, $\alpha_T \in (0, \pi)$ 为机械臂末端点速度方向与机械臂末端点到障碍物中心连线夹角.

首先设空间防撞安全度 u_{dT} 定义为

$$u_{dT} = \begin{cases} 1, & DCPA < d_1 \text{ and } \alpha_T < 90^\circ \\ \gamma_{dT}, & d_1 < DCPA < d_2 \text{ and } \alpha_T < 90^\circ \\ 0, & d_2 < DCPA \text{ or } \alpha_T > 90^\circ \end{cases}$$

$$\gamma_{dT} = \frac{1}{1 + e^{k(DCPA - \frac{d_1 + d_2}{2})}} \quad (15)$$

其中 k 为正常数. 设 d_1 为最小避让距离, d_2 为机

械臂安全避让距离取 $d_2 = 2d_1$. 最小避让距离 d_1 的确定,当机械臂末端安装执行器,末端执行器侧边面对障碍物中心时,存在碰撞危险,设机械臂末端执行器长度为 $L_{end} = 0.1 \text{ m}$,将 d_1 设置为 $d_1 = 1.5 L_{end}$,以此保证末端执行器在规避障碍物过程中不会触碰障碍物.

在机械臂末端与障碍物有碰撞可能的情况下,时间防撞安全度 u_{tT} 定义为

$$u_{tT} = \begin{cases} 1, & t_1 = 0 \\ \gamma_{tT}, & t_1 < TCPA < t_2 \\ 0, & TCPA \geq t_2 \text{ or } TCPA < 0 \end{cases}$$

$$\gamma_{tT} = \frac{1}{1 + e^{k(TCPA - \frac{t_2 + t_1}{2})}} \quad (16)$$

其中 t_1 和 t_2 分别表示为

$$t_1 = \begin{cases} \frac{\sqrt{d_1^2 - DCPA^2}}{|\dot{x}|}, & DCPA < d_1, \\ 0, & DCPA \geq d_1 \end{cases}$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{d_2^2 - DCPA^2}}{|\dot{x}|}$$

式中, t_1 表示机械臂末端速度方向上距离障碍物为 d_1 的位置,达到最近会与点的时间; t_2 表示机械臂末端速度方向上距离障碍物为 d_2 的位置,达到最近会与点的时间.

由式(15)和式(16)分别得到空间防撞安全度 u_{dT} 与时间防撞安全度 u_{tT} 后,防撞安全指数 u_T ,由 u_{tT} 和 u_{dT} 量化为

$$u_T = \begin{cases} 0, & TCPA < 0 \\ 0, & TCPA > 0 \text{ and } u_{dT} = 0 \\ 0, & TCPA > 0 \text{ and } u_{tT} = 0 \\ \min(u_{dT}, u_{tT}), & \\ & TCPA > 0 \text{ and } u_{tT} \neq 0 \text{ and } u_{dT} \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

将机械臂末端与障碍物的状态信息代入碰撞预测模型中,得到防撞安全指数,根据以下公式确定障碍物作用范围 λ_0 .

$$\lambda_0 = \begin{cases} \mu^{u_T} \times \lambda, & u_T \in (0, 1] \\ d_1, & u_T = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\mu > 1$,由此可得到随着空间防撞安全度与时间防撞安全度变化的障碍物作用范围.

3.3 区域跟踪防撞控制器设计

本文中在任务空间的区域跟踪防撞控制器设计为

$$F = M_x(x)\ddot{x}_0 + C_x(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) + M_x(x)(-k_a \frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} + k_v z_2 - \dot{\alpha}_1) \quad (19)$$

其中 k_a, k_v 为正数, 位置误差表示为 $e = x_0 - x$, 位置误差对时间微分得 $\dot{e} = \dot{x}_0 - \dot{x}$. 设 $z_1 = e, z_2 = \dot{e} - \alpha_1, \alpha_1$ 为虚拟控制量, $\alpha_1 = \partial P(\Delta x) / \partial \Delta x$, 且将控制律代入机械臂动力学(5)中, 得到闭环等式为

$$0 = M_x(x)(\ddot{x}_0 - \ddot{x}) + M_x(x)(-k_a \frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} + k_v z_2 - \dot{\alpha}_1)$$

(20)

假设 Lyapunov-like 泛函数被设置为

$$V = \frac{1}{2} z_2^T z_2 + k_a P(\Delta x)$$

(21)

其中 $P(\Delta x)$ 在式(10)中被定义, V 为正定, 对式(21)两边求导得

$$\dot{V} = z_2^T \dot{z}_2 - k_a \left(\frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} \right)^T \dot{e}$$

(22)

将(20)代入(22)中, 得到

$$\dot{V} = -z_2^T k_v z_2 - k_a \left(\frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} \right)^T \left(\frac{\partial P(\Delta x)}{\partial \Delta x} \right)$$

(23)

上式表明由于存在 $\partial P(\Delta x) / \partial \Delta x \neq 0$ 或 $\dot{e} \neq 0$ 导致标量函数 V 不断减少, 直至 V 为 0.

定理 1 将区域跟踪防撞控制器描述为式(19), 当 $t \rightarrow \infty$ 时, x 将收敛到目标区域 $f(\Delta x) \leq 0$ 即 $\Delta x \leq r_0$, 并且 \dot{e} 收敛为 0.

证明 为了证明以上定理, 先证明

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = 0$$

(24)

由于 dV/dt 为负, V 对 t 是递减的, 可设

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = \epsilon$$

(25)

如果 $\epsilon \neq 0$, 则对于任意 $t \geq t_0$ 有, 又由 V 连续, 正定, 并且在平衡点处 $t = t_0$ 时, $V = 0, z_2 = 0, P(\Delta x) = 0$, 故存在 $\lambda_1 > 0$ 或 $\lambda_2 > 0$, 使得 $\|z_2\| > \lambda_1$ 或 $P(\Delta x) > \lambda_2$, 所以如果取:

$$m = \sup_{\substack{\lambda_1 < \|z_2\| \\ \lambda_2 < P(\Delta x)}} \frac{dV}{dt}$$

(26)

由 dV/dt 为负定, 故 $m < 0$, 于是

$$V|_t - V|_{t_0} = \int_{t_0}^t \frac{dV}{dt} dt \leq m(t - t_0)$$

(27)

当 t 增大时, V 变为负的, 矛盾, 所以 $c = 0$, 进而有 $\lim_{t \rightarrow \infty} P(\Delta x) = 0$ 并且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e} = 0$, 否则存在 $\lim_{t \rightarrow \infty} V \neq 0$, 从而证明了以上定理.

4 实验结果及分析

本文通过数值仿真以及实验, 验证了所设计的目标区域跟踪防撞控制器的有效性. 本文实验过程使用 UR10 机械臂. UR10 有 6 个转动关节, 负载

能力为 10 kg, 操作范围 1300 mm. 因为在医疗护理机械臂工作过程中, 完成任务空间中的目标区域跟踪, 使用前 3 个关节即可实现, 后 3 个关节被视作一个整体, 医护人员在机械臂末端进入目标区域后单独控制, 完成更加具体的医护工作. 在本文中, 仿真及实验通过控制前 3 个关节角, 实现机械臂末端的在任务空间的位置控制, 后 3 个关节作为末端执行器看作一个整体, 并将关节角均设置为固定值. 基于 UR10 机械臂建立动力学模型, UR10 各关节坐标系如图 2 所示, 机械臂 DH 参数如表 1 所示, 前 3 个连杆的质量如表 2 所示.

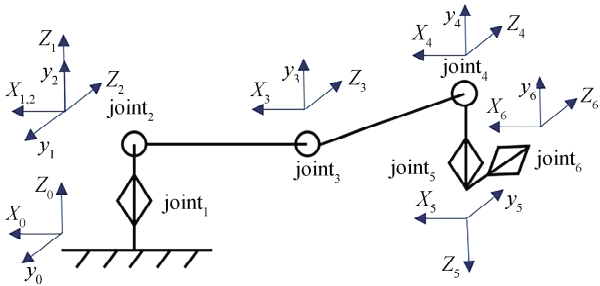


图 2 UR10 各关节坐标
Fig. 2 Coordinates for each joint of the UR10

表 1 UR10DH 参数

Tab. 1 The DH parameters of the UR10 joints

Parameters	a/m	d/m	α/rad
joint ₁	0	0.118	$\pi/2$
joint ₂	-0.613	0	0
joint ₃	-0.572	0	0

表 2 UR10 物理参数

Tab. 2 UR10 physical parameters

m_1/kg	m_2/kg	m_3/kg
7.10	12.70	4.27

4.1 仿真跟踪移动目标区域

首先使用 Matlab2020a 数值仿真对目标区域跟踪防撞控制器的有效性进行验证. 采用时间步长 0.005 s 的固定步长 ODE4 (RungeKutta) 求解器. 仿真过程中, 各参数设置为 $\mu = 1.1, k = 1, k_a = 1, k_v = 3, c = 5, m = 1.05, \eta = 0.1$. 机械臂前 3 个关节初始角度分别设置为: $[2.37, -\pi/3, \pi/3]^T \text{rad}$, 后 3 个关节的角度保持为固定值 $[0, -\pi/3, 0]^T \text{rad}$. 控制目标为 UR10 机器臂的末端执行器跟踪运动的目标区域, 该区域定义为一个半径为 $r_0 = 0.1 \text{ m}$ 的球体. 目标区域中心 x_0 沿着期望轨迹运动.

$x_0 = [0.3\cos(0.05t), -0.8 + 0.3\sin(0.05)t, 0.2]^T$

机械臂末端执行器轨迹三维及二维视图如图 3 和图 4 所示,机械臂末端执行器收敛到目标区域后,跟随目标区域移动.

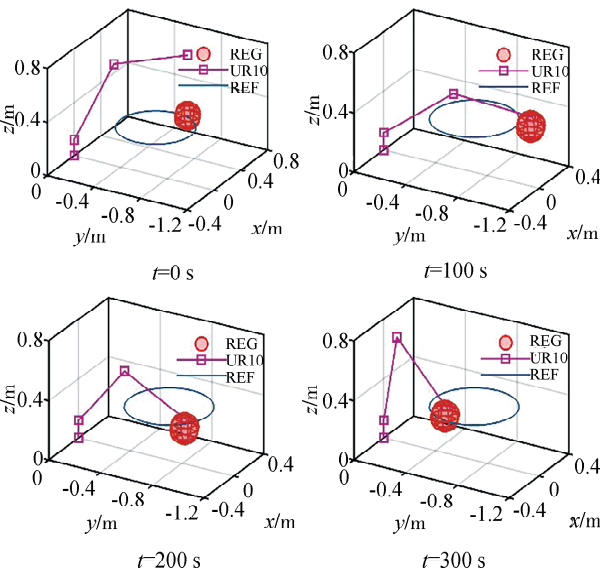


图 3 移动区域轨迹跟踪:REG: 目标区域;UR10: 简化 UR10;REF: 期望轨迹

Fig. 3 Moving region trajectory tracking: REG; target region; UR10: Simplification of the UR10; REF: reference trajectory

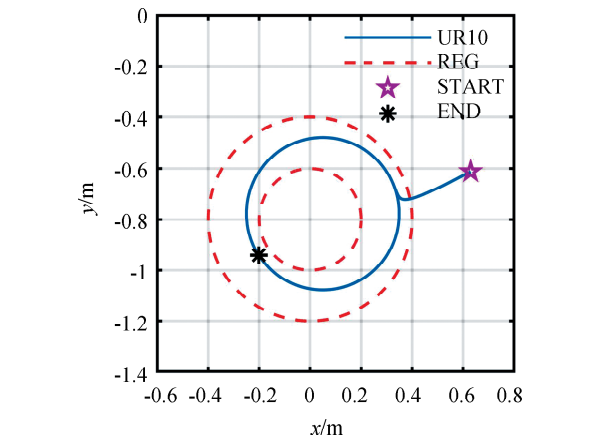


图 4 移动区域轨迹跟踪: UR10: 末端执行器二维轨迹; REG: 目标区域; START: 开始点; END: 停止点

Fig. 4 Moving region trajectory tracking: UR10: 2D view of the end effector trajectory; REG: target region; START: starting point; END: ending point

势能函数如图 5 所示,机器人末端执行器能够快速收敛到目标区域. 关节角度和控制输入力矩随时间变化如图 6 所示. 仿真结果证明了目标区域跟踪防撞控制器对完成运动轨迹跟踪任务的有效性.

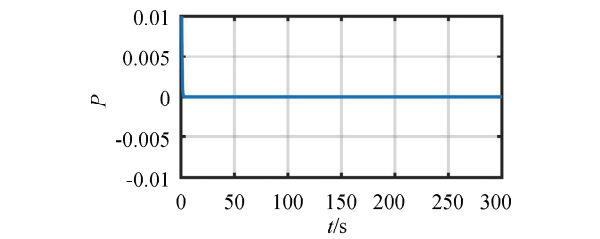


图 5 移动区域轨迹跟踪: 势能函数

Fig. 5 Moving region trajectory tracking: potential energy function

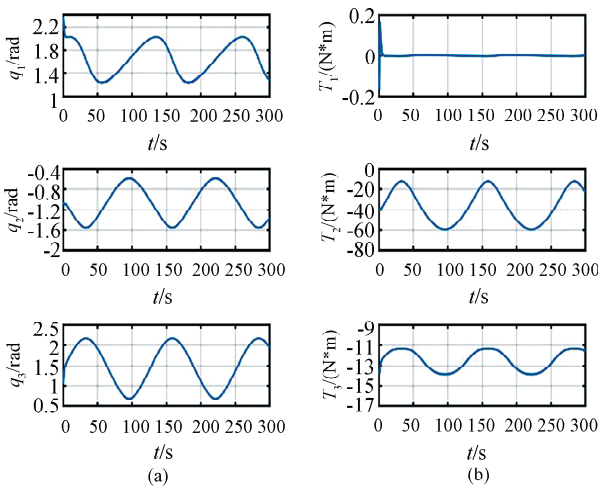


图 6 移动区域轨迹跟踪: 关节角和控制输入

(a) 关节角; (b) 控制输入

Fig. 6 Moving region trajectory tracking: joint angles and control inputs

(a) Joint angles ; (b) control inputs

4.2 仿真安全防护

医疗护理机械臂在完成不同医护任务移动过程中,存在机械臂末端执行器碰撞患者或者医护用品的风险,为此在已知患者与医护用品位置的前提下,对控制器的防撞安全性进行验证. 各参数不变,所考虑的轨迹与上一个仿真实验相同目标区域球体半径 $r_0 = 0.2$ m, 分别在 $x_{ob1} = [0.25, -0.55, 0.43]^T$, $x_{ob2} = [-0.12, -0.64, 0.52]^T$, $x_{ob3} = [0.25, -0.90, 0.33]^T$ 3 个位置放置障碍物代表护理病房空间中的三个医护用品,障碍物最小作用距离 $\lambda_0 = 0.1$ m. 机械臂末端执行器轨迹的三维视图如图 7 所示,机械臂在规避障碍物后,继续保持稳定,并跟踪运动的目标区域. 势能函数如图 8 所示, 关节角度和控制力矩输入如图 9 所示. 仿真结果验证了目标区域跟踪防撞控制器在机械臂运行过程中出现障碍物时,防止机械臂末端执行器碰撞障碍物的有效性.

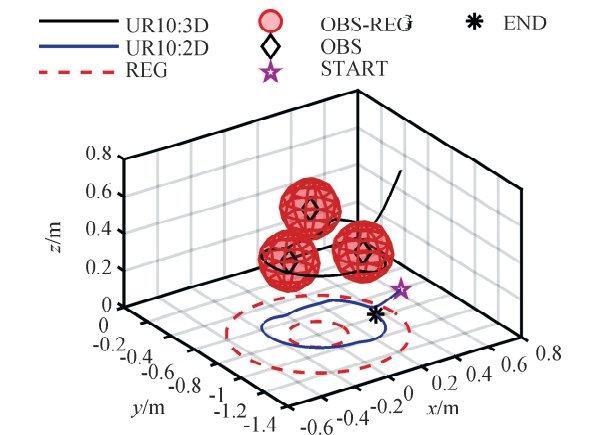


图 7 规避碰撞:UR10:3D:末端执行器三维轨迹;UR10:2D:末端执行器二维轨迹;REG:目标区域二维视图;OBS-REG:障碍物最小影响范围;OSB:障碍物;START:开始点;END:停止点

Fig. 7 Collision avoidance UR10:3D: 3D view of the end effector trajectory; UR10:2D: 2D view of the end effector trajectory; REG: 2D view of target region; OBS-REG: minimum impact range of obstacles; OBS: obstacles; START: starting point; END: ending point

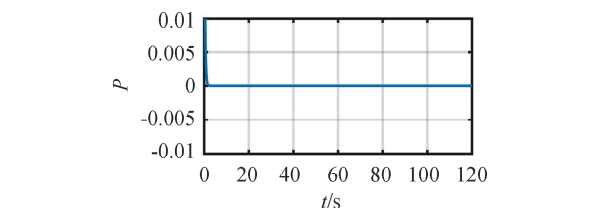


图 8 规避碰撞:势能函数

Fig. 8 Collision avoidance: potential energy function

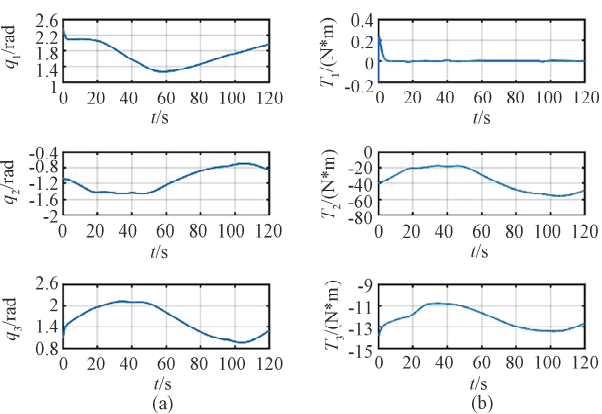


图 9 规避碰撞:关节角和控制输入

(a) 关节角; (b) 控制输入

Fig. 9 Collision avoidance: joint angles and control inputs

(a) Joint angles; (b) control inputs

4.3 人机交互实验

人机交互实验,在 UR10 机械臂平台上完成,该平台由 UR10 机械臂本体、控制柜 CB3、上位机控制系统三部分组成.上位机控制系统使用 UR-Script 编写控制算法,负责在线运行控制算法,向控制柜发送各关节角速度控制指令,控制柜负责接

收控制指令,控制移动机械臂,并获取机械臂信息,将机械臂状态反馈到上位机控制系统,实现对机械臂的控制,实验平台如图 10 所示.

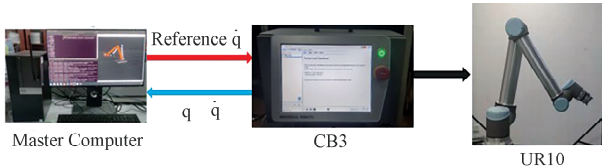


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental setup

人机交互实验如图 11,机械臂末端执行器收敛到目标区域后,可在目标区域内通过手持移动机械臂末端执行器位置,在目标区域内实现柔顺人机交互.在实验过程中,各参数设置为 $\mu=1.1, k=1, k_a=1, k_v=1, c=2, m=1.05, \eta=0.1$.目标区域中心点坐标设置为 $x_0=[0, -0.3918, 0.274]^T$,目标区域球体半径 $r_0=0.2$ m,以及机械臂前三个关节初始角度分别设置为: $[1.5, -1.5, 2.41]^T$ rad,后三个关节的角度保持固定值 $[0, -\pi/3, 0]^T$ rad.在完成人机交互实验过程中,机械臂关节角度和势能变化如图 12 所示,机械臂位置变化如图 13 所示,实验结果显示机械臂末端执行器在目标区域内,势能为 0,关节角度不改变, $t=2$ s 通过移动机械臂末端执行器位置到目标区域外,势能大于 0,控制器控制机械臂改变关节角度,将机械臂末端执行器收敛至目标区域,保持稳定. $t=7.9$ s,在目标区域内移动末端执行器位置,势能为 0,机械臂保持稳定,不改变各关节角度.根据实验结果,验证了目标区域跟踪防撞控制器在机械臂操作过程中人机交互有效性.

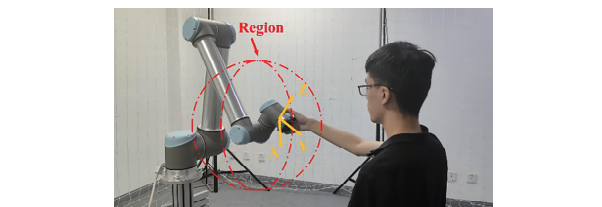


图 11 人机交互实验

Fig. 11 Human-robot interaction experiment

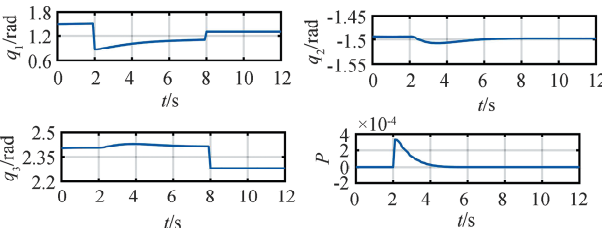


图 12 人机交互:关节角和势能函数

Fig. 12 Human-robot interaction: joint angles and potential energy function

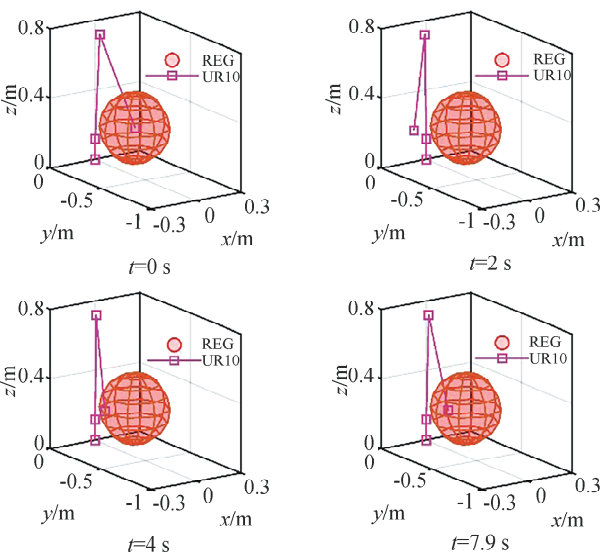


图 13 人机交互;REG:目标区域;UR10:简化 UR10
Fig. 13 Human-robot interaction; REG: target region; UR10: Simplification of the UR10

4.4 安全防撞实验

安全防撞实验,机械臂末端执行器在跟踪移动区域过程中,规避障碍物,实现机械臂末端执行器对障碍物的安全防撞.实验在 UR10 机械臂平台上完成,各参数不变,各关节初始角度不变,与前一个实验相同,目标区域中心 x_0 期望轨迹由以下公式表示,目标区域球体半径 $r_0 = 0.2\text{ m}$, $x_0 = [0, -0.3918-0.02 t, 0.274]^T$ 分别在 $x_{obl} = [-0.08, -0.55, 0.24]^T$, $x_{ob2} = [0.15, -0.83, 0.24]^T$ 两个位置放置障碍物代表护理病房空间中的两个个医护用品,设置实验如图 14 所示.

本文使用防撞预测模型,通过计算防撞安全指数实时改变障碍物作用半径,与不改变障碍物作用半径的无差别避障进行试验对比,因在护理病房内如水杯,体温枪,药瓶,最大边长约 0.1 m,为保证机械臂末端安全避障,预留安全距离,所以将无差别避障中障碍物作用半径设置为 $\lambda_0 = 0.17\text{ m}$,通过实验数据绘制机械臂末端执行器运动轨迹三维视图及俯视图对比如图 15 所示.

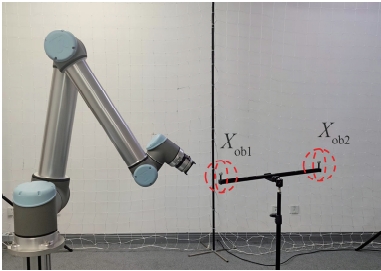


图 14 规避碰撞实验
Fig. 14 Collision avoidance experiment

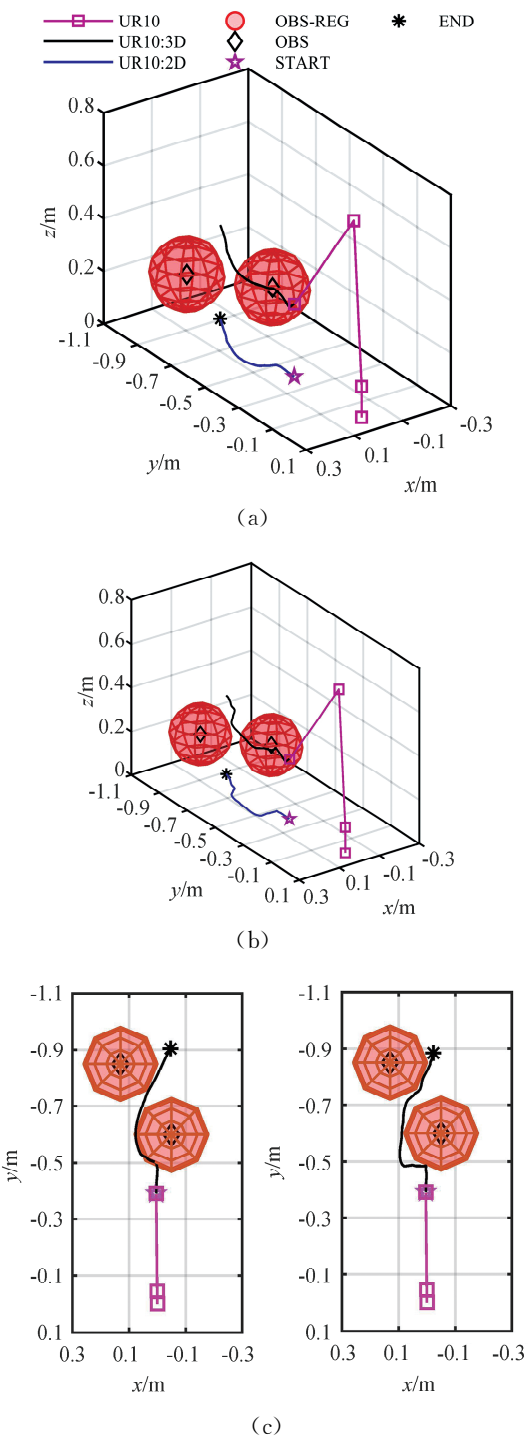


图 15 规避碰撞: UR10:简化 UR10;UR10;3D:末端执行器三维轨迹;UR10: 2D:末端执行器二维轨迹;OBS-REG:障碍物最小影响范围;OBS:障碍物;START:开始点;END:停止点
(a) 应用防撞预测模型; (b) 无差别避障; (c) 俯视图
Fig. 15 Collision avoidance: UR10: Simplification of the UR10; UR10: 3D: 3D view of the end effector trajectory; UR10: 2D: 2D view of the end effector trajectory; OBS-REG: minimum impact range of obstacles; OBS: obstacles; START: starting point; END: ending point
(a) Apply Collision avoidance prediction; (b) indifference obstacle avoidance; (c) top view

各关节角度变化对比如图 16 所示, 根据实验结果可得到以下结论, 在规避障碍物过程中应用防撞预测模型改变障碍物作用范围, 减少了各关节角的变化幅度, 使得障碍物规避过程中机械臂末端执行器运动轨迹更加平滑, 并与障碍物保持安全距离, 验证了目标区域跟踪防撞控制器在防止机械臂末端执行器碰撞障碍物过程中的有效性。

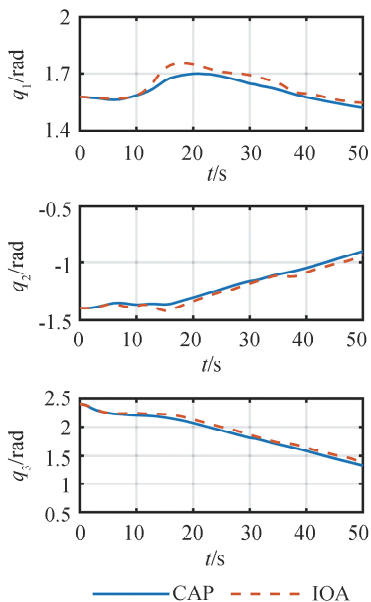


图 16 规避碰撞; CAP: 防撞预测; IOA: 无差别避障
Fig. 16 Collision avoidance; CAP: Collision avoidance prediction; IOA: Indifference obstacle avoidance

5 结 论

本文针对医疗护理机械臂在控制过程中存在的人机交互、轨迹跟踪, 以及在护理过程防止碰撞的实际问题, 提出目标区域跟踪防撞控制器。该方法结合人工势能函数使用了区域到达控制, 实现医疗护理机械臂有效跟踪目标区域, 并在目标区域实现柔顺人机交互。本文提出的防撞预测模型通过改变障碍物斥力场作用半径实现机械臂对障碍物的规避, 既保留了人工势场法简明的数学结构, 又提高了机械臂的护理安全性, 以及避障轨迹的平滑稳定。

参考文献:

[1] Allen L. The nursing shortage continues as faculty shortage grows [J]. *Nurs Econ*, 2008, 26: 35.
[2] Jayaswal K, Palwalia D K, Kumar S. Analysis of robust control method for the flexible manipulator in reliable operation of medical robots during COVID-19 pandemic [J]. *Microsyst Technol*, 2021,

27: 2103.

[3] Ahamed A, Ahmed R, Patwary M I H, *et al.* Design and implementation of a nursing robot for old or paralyzed person [C]//Proceedings of the 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP). Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2020.
[4] Li Z, Moran P, Dong Q, *et al.* Development of a tele-nursing mobile manipulator for remote care-giving in quarantine areas [C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017.
[5] Bensidhoum T, Bouakrif F. Adaptive P-type iterative learning radial basis function control for robot manipulators with unknown varying disturbances and unknown input dead zone [J]. *Int J Robust Nonlin*, 2020, 30: 4075.
[6] Hwang C L, Yu W S. Tracking and cooperative designs of robot manipulators using adaptive fixed-time fault-tolerant constraint control [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 56415.
[7] Cruz-Zavala E, Nuo E, Moreno J A. Robust trajectory-tracking in finite-time for robot manipulators using nonlinear proportional-derivative control plus feed-forward compensation [J]. *Int J Robust Nonlin*, 2021, 31: 3878.
[8] Liang D, Song Y, Qi Y, *et al.* Efficient modeling and integrated control for tracking and vibration of a lightweight parallel manipulator including servo motor dynamics [J]. *Mech Syst Signal Pr*, 2021, 153: 107502.
[9] Bao J, Wang H, Liu X P. Adaptive finite-time tracking control for robotic manipulators with funnel boundary [J]. *Int J Adapt Control*, 2020, 34: 575.
[10] 高民东, 张雅妮, 朱凌云. 应用于机器人路径规划的双向时效 A* 算法 [J]. *计算机应用研究*, 2019, 36: 792.
[11] Altafini C. Consensus problems on networks with antagonistic interactions [J]. *IEEE T Automat Contr*, 2013, 58: 935.
[12] 向亚军, 严华. 基于激光雷达的移动机器人避障策略研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 529.
[13] 汪首坤, 朱磊, 王军政. 基于导航势函数法的六自由度机械臂避障路径规划 [J]. *北京理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 35: 186.
[14] Zhang H. Research on serial communication in unmanned aerial vehicle ground detection system based on improved artificial potential field method [C]//

Proceedings of the 2019 4th International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences (IWMECS 2019). Xi'an: IWMECS, 2019.

[15] Sang H, You Y, Sun X, *et al.* The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations [J]. Ocean Eng, 2021, 223: 108709.

[16] He W, Xue C, Yu X, *et al.* Admittance-based controller design for physical human-robot interaction in the constrained task space[J]. IEEE T Autom Sci Eng, 2020, 99: 1.

[17] 周克帅, 范平清. 改进 A~* 算法与人工势场算法移动机器人路径规划[J]. 电子器件, 2021, 44: 368.

[18] 潘铭铭, 孙宇波, 刘强. 智能汽车对无信号交叉路行人的避撞控制[J]. 交通信息与安全, 2021, 39: 19.

[19] 戴忠, 王小奇, 王薇. 面向自动驾驶的 5G 边缘计算业务连续性技术研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2020, 32: 808.

[20] Zhang Y, Shi G, Liu H, *et al.* Decision supporting for ship collision avoidance in restricted waters [J]. Int J Sim Pro Model, 2020, 15: 40.

[21] 丁志国, 张新宇, 王程博, 等. 基于驾驶实践的无人船智能避碰决策方法[J]. 中国舰船研究, 2021, 96: 104.

引用本文格式:

中文: 杨沁林, 张劲. 机械臂目标区域跟踪防撞控制[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 033001.

英文: Yang Q L, Zhang J. Region tracking and collision avoidance control for the manipulator [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 033001.