

DOI: 10.3901/JME.2020.17.059

基于伪距离的冗余机器人避障算法*

万俊¹ 姚佳烽² 余亮³ 张良安⁴ 吴洪涛²

- (1. 江苏理工学院汽车与交通工程学院 常州 213001;
2. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016;
3. 淮南师范学院机械与电气工程学院 淮南 232038;
4. 安徽工业大学机械工程学院 马鞍山 243032)

摘要: 针对冗余机器人避障问题, 提出一种基于伪距离且无需主从任务转换的冗余机器人避障算法。采用具有解析式的伪距离算法计算机器人与障碍物之间的接近程度, 通过分析伪距离与欧式距离换算关系求取机器人与障碍物之间最小欧式距离, 从而提高冗余机器人与障碍物之间的最小欧式距离求解效率。基于最小伪距离判别指标, 在机器人末端轨迹上赋予末端沿最小距离方向避障速度实现末端避障。在零空间避障问题求解中提出一种自适应阻尼控制方法, 产生虚拟排斥力使机器人连杆远离障碍物, 并自适应调整阻尼增益参数响应避障速度。通过七自由度冗余机器人的仿真和试验验证了该算法的高效性和有效性。仿真结果表明, 该算法提出的末端避障方法避免了传统的主从任务转换避障算法在任务切换时所引起的末端振荡且缩短了避障时间, 同时该算法提出的零空间避障方法能够在低误差跟踪末端期望轨迹下避免机器人连杆与障碍物相碰撞。试验结果表明, 该算法能够完成多障碍物避障, 验证了该算法的末端避障方法和零空间避障方法的正确性。

关键词: 冗余机器人; 伪距离; 末端避障; 零空间避障

中图分类号: TG242

Obstacle Avoidance Algorithm for Redundant Manipulators Based on Pseudo-distance Method

WAN Jun¹ YAO Jiafeng² YU Liang³ ZHANG Liangan⁴ WU Hongtao²

- (1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Huainan Normal University, Huainan 232038;
4. Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032)

Abstract: Focusing on the obstacle avoidance problem of redundant manipulators, an algorithm based on pseudo-distance technique for avoiding obstacles in redundant robot control is presented without master-slaver task conversion. The proximity between the redundant manipulator and the obstacle is calculated by using the pseudo-distance algorithm with analytic form. Then the minimum Euclidean distance is obtained by analyzing the conversion relation of the pseudo-distance and Euclidean distance, leading to resolving the minimum Euclidean distance efficiently between the manipulator and the obstacle. On the one part, based on the identification index of minimum pseudo-distance, obstacle avoidance at end-effector of manipulator is accomplished by endowing a repelling velocity of end-effector along the direction of minimum Euclidean distance. On the other hand, an adaptive damping control method based on the identification index is proposed for obstacle avoidance in null space of a redundant robot, generating repelling virtual force to push robot links away from obstacles and adjusting damping factors adaptively responding to repelling force. Finally, the efficiency and effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulations and experiments of a 7 Degree-of-Freedom (DOF) redundant manipulator. The simulation results show the oscillation of end-effector caused by the master-slave task transformation of the traditional obstacle-avoiding method is avoided and obstacle avoidance running time is reduced dramatically in the end-effector obstacle avoidance, and in the null space obstacle avoidance, the avoidance of collisions between the manipulator and the obstacle is realized successfully under the low error tracking the desired trajectory. The final experiment results show that the multiple obstacles

* 国家自然科学基金资助项目(51706098)。20191016 收到初稿, 20200609 收到修改稿

avoidance is also implement splendidly based on the proposed obstacle avoidance strategy and the correctness of the designed end-effector obstacle avoidance method and the null space obstacle avoidance method is further demonstrated.

Key words: redundant manipulator; pseudo-distance; end-effector obstacle avoidance; null space obstacle avoidance

0 前言

冗余自由度因可以改善和提高机器人各种任务运动性能而受到青睐。结合优化性能指标函数,冗余机器人利用冗余度在不影响机器人末端运动的前提下实现其他运动。其中,国内外学者对冗余机器人避障问题进行了大量研究。

冗余机器人避障方法主要包括基于最大距离性能准则函数的梯度投影法(Gradient projection method, GPM)和作用于机器人雅可比矩阵零空间的人工势场方法^[1-2]。此外,避障算法按应用场景主要分为两类,离线避障和在线避障^[3]。离线避障需要提前对机器人周围环境进行建模,而环境的改变可能会导致避障失败。相反,在线避障可以根据传感器反馈信息,能实时调整机器人构型配置以此实现在线避障,最为常用的方法就是 GPM 主从任务转换避障方法^[4],然而主从任务的切换会引起机器人关节速度突变,且末端精度变差。另外,随着机器人自由度和障碍物的数目增加,获取机器人与障碍物之间的最小欧式距离也愈发困难,因此,众多学者在检测障碍物与机器人之间距离也进行了研究。HAN 等^[5]基于 Kinect-V2 和 Gillber-Johnson-Keerthi 算法实时检测机器人连杆与障碍物包络壳最小距离实现避障。CHEN 等^[6]对障碍物和冗余机器人连杆用最接近其体积的椭球建模,基于两者之间的最小距离提出虚拟力进行避障。WANG 等^[7]基于人工势场方法,将机器人避障简化成线段与球之间的避障。另外,部分学者将冗余机器人避障问题转化为约束变分问题^[8-9]或约束最优控制问题^[10-11]。然而,在这些方法中,对于几何模型复杂的障碍物与机器人最小距离的解析式很难精确获得,降低了碰撞检测的有效性。基于此,PERDEREAU 等^[12]提出了伪距离概念,用于定性的判断机器人与障碍物之间的接近程度。相对欧式距离,伪距离计算能够以解析式的形式快速计算判断,有效提高实时计算效率。MU 等^[3, 13]和 BRICE 等^[14]基于伪距离成功快速地控制冗余机器人避障任务。

本文避障方法结构如图 1 所示。当障碍物位于机器人末端轨迹时,基于伪距离接近程度,直接赋予机器人末端避障速度。当障碍物位于冗余机器人零空间配置构型中时,将采用文献[15]方法,求出

障碍物与离散化杆件之间的最小伪距离,对机器人杆件赋予虚拟排斥力,为了响应虚拟排斥力和尽可能维持机器人原有最优构型配置,自适应阻尼控制系统输出零空间调整速度,以此实现冗余机器人零空间避障。相对传统的主从任务转换的避障方法^[16-17],本文提出的算法避免了繁琐的主从任务切换以及其带来的机器人末端振荡现象,并通过仿真与试验方法证明了本文算法的有效性和实用性。

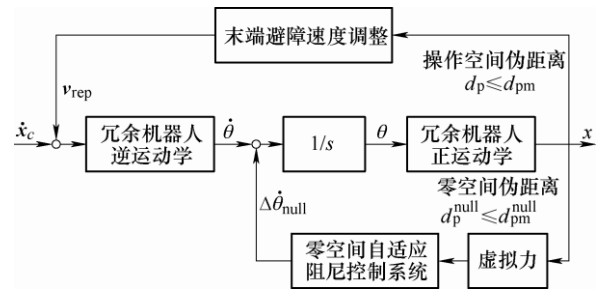


图1 本文提出的基于伪距离的冗余机器人避障方法结构图

1 避障策略

1.1 传统 GPM 避障方法

障碍物在机器人第 l 连杆上的投影称为关键点。为了实现避障,通常赋予机器人末端任务 $\dot{x}_e \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 关节速度 $\dot{\theta} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 关键点处雅可比矩阵 $J_d \in \mathbf{R}^{m \times l}$, 关键点最大避障速度 $\dot{x}_0 \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 其中, m 为机器人操作空间自由度, n 为机器人关节自由度, $\mu(\|d\|)$ 为避障增益

$$\mu(\|d\|) = \begin{cases} \left(\frac{d_m}{\|d\|} \right)^2 & \|d\| \geq d_m \\ 1 & \|d\| < d_m \end{cases} \quad (1)$$

式中, $d \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为障碍物与关键点之间的最小欧式距离矢量; $d_m \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为避障最小距离阈值。

基于文献[17]中 GPM 公式,构造冗余机器人主从任务转换的避障逆运动学公式

$$\dot{\theta} = J_d^+ \dot{x}_d + N_d' J^+ \dot{x}_e \quad (2)$$

式中, $\dot{x}_d = \mu(\|d\|)\dot{x}_0$; 零空间矩阵 $N_d' = I_n - \mu(\|d\|)J_d^+ J_d$ 。

当任务空间没有障碍物或者 $\|d\| \gg d_m$, $\mu(\|d\|) = 0$, 式(2)转换为

$$\dot{\theta} = J_d^+ \mu(\|d\|)\dot{x}_0 + (I_n - \mu(\|d\|)J_d^+ J_d)J^+ \dot{x}_e = J^+ \dot{x}_e \quad (3)$$

当机器人末端或者连杆接近障碍物时, $\mu(\|d\|)=1$, 式(2)转换为

$$\dot{\theta} = J_d^+ \dot{x}_{d_0} + (I_n - J_d^+ J_d) J^+ \dot{x}_c \quad (4)$$

$\|d\|$ 在机器人实时避障控制中, 需要借助传感器不断检测障碍物与机器人之间的欧式距离, 或者通过最小欧式距离方法, 在每一个周期内计算出障碍物与机器人每个连杆之间的最小欧式距离。但在实际中, 前者方法容易受到环境干扰, 稳定性不高, 后者方法会随着机器人连杆数目和障碍物数目的增多, 欧式距离计算量也会增加, 不宜实时控制。

1.2 伪距离的计算方法

最小欧式距离目前很难以一个具体的通用的解析式表达最小距离, 一般都是基于矢量投影方法或求偏微分方法对各种求最小距离的情况进行分析求解^[18-19]。欧式距离表达式因物体形状复杂而复杂。而在实际避障控制中, 不需要精确计算, 只需要保证任务空间的点不在障碍物内部或者其包络层上。因此本文引入伪距离概念, 以一个通用的解析的超曲面函数来表达任何形状的障碍物, 计算任务空间中的点 (x, y, z) 在障碍物坐标系 $o_{\text{obs}} - x_{\text{obs}} y_{\text{obs}} z_{\text{obs}}$ 下的位置, 检测与障碍物碰撞的情况。

任务空间中一点与超曲面描述的障碍物之间的关系如图2所示。 $o_b - x_b y_b z_b$ 是机器人基座标系。伪距离可以表示为

$$d_p(s_a, p_c) = f_{d_p}(s_a, p_c)^{\frac{\xi_1}{2}} - 1 = \left(\left(\left(\frac{x}{h_1} \right)^{\frac{2}{\xi_2}} + \left(\frac{y}{h_2} \right)^{\frac{2}{\xi_2}} \right)^{\frac{\xi_2}{\xi_1}} + \left(\frac{z}{h_3} \right)^{\frac{2}{\xi_1}} \right)^{\frac{\xi_1}{2}} - 1 \quad (5)$$

式中, $d_p(\bullet)$ 为伪距离; $s_a = (h_1, h_2, h_3, \xi_1, \xi_2)$ 为表示拟合障碍物形状的超曲面的形状与体积参数; $p_c = (x, y, z)$ 为障碍物坐标系下的空间点位置; $f_{d_p}(\bullet)$ 为描述几何体表面的函数。

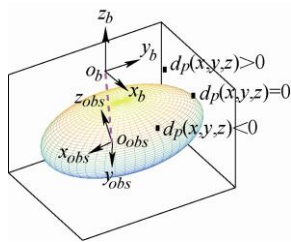


图2 伪距离定义

对于任务空间点 p_c , 根据式(5)计算出的伪距离 d_p , 可以得出点 p_c 是否与障碍物发生碰撞。若 $d_p(s_a, p_c) > 0$, p_c 远离障碍物; 若 $d_p(s_a, p_c) = 0$, p_c

刚接触障碍物; 若 $d_p(s_a, p_c) < 0$, p_c 与障碍物碰撞。由于伪距离是一个无量纲量, 不能直观表达欧式距离, 因此需要探索伪距离与欧式距离之间的关系。

1.3 伪距离与欧式距离关系

任务空间中一点为 p_c , 其与障碍物坐标系原点 o_{obs} 相连, 与障碍物表面相交于点 p_{co} , 如图3所示, 则 p_c 与障碍物表面的欧式距离为

$$d(p_c) = d_{\text{gap}} = g_1 \|o_{\text{obs}} p_c\| \quad (6)$$

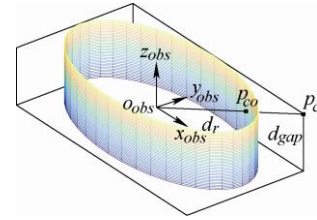


图3 欧式距离

障碍物表面点 p_{co} 与障碍物坐标系原点 o_{obs} 之间欧式距离

$$d(p_{co}) = d_r = g_2 \|o_{\text{obs}} p_c\| = (1 - g_1) \|o_{\text{obs}} p_c\| \quad (7)$$

式中, $g_1, g_2 \in (0, 1)$ 为长度比例系数。

由式(6)、(7)可知, 在障碍物坐标系下, 满足

$$p_{co} = g_2 p_c \quad (8)$$

另外, p_{co} 位于超曲面上, 因此 $d_p(s_a, p_{co}) = 0$, 结合式(8), 可得

$$g_2 = \frac{1}{f_{d_p}(s_a, p_c)^{\frac{\xi_1}{2}}} = f_{d_p}(s_a, p_c)^{-\frac{\xi_1}{2}} \quad (9)$$

因此, 由式(6)、(7)、(9), 可得 p_c 与超曲面之间的距离为

$$d(p_c) = d_{\text{gap}} = \frac{f_{d_p}(s_a, p_c)^{\frac{\xi_1}{2}} - 1}{f_{d_p}(s_a, p_c)^{\frac{\xi_1}{2}}} \|o_{\text{obs}} p_c\| \quad (10)$$

或表示为

$$d(p_c) = \frac{1 - g_2}{g_2} \|o_{\text{obs}} p_{co}\| = d_p(s_a, p_c) \|r_{\text{obs}}\| \quad (11)$$

式中, $r_{\text{obs}} = o_{\text{obs}} p_{co}$ 。

若设 $d_r = \|r_{\text{obs}}\| \geq 1 \text{ mm}$, p_c 位于障碍物表面外部, 相对障碍物表面欧式距离为 $d_{\text{gap}} \in \mathbf{R}^+$, 则由式(11)可知, p_c 与障碍物表面之间的欧氏距离 d_{gap} 和伪距离 $d_p(s_a, p_c)$ 关系如图4所示。从图中可以看出, 在相同 $\|r_{\text{obs}}\|$ 下, 伪距离 $d_p(s_a, p_c)$ 在任意 d_{gap} 值下均有 $d_p(s_a, p_c) < d_{\text{gap}}$ 成立。同时, 在相同的 d_{gap} 值下, $\|r_{\text{obs}}\|$ 值越大, $d_p(s_a, p_c)$ 值越小, 且 $d_p(s_a, p_c) < d_{\text{gap}}$ 成立。因此, 利用伪距离方法相比最

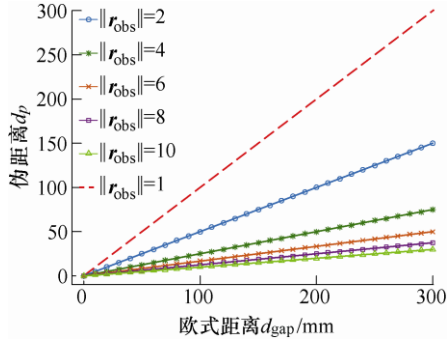


图4 伪距离与欧式距离关系

小欧氏距离方法能够提前预知与障碍物碰撞的危险,提前预判障碍物的存在。

同理,基于式(9),任务空间中的点 p_c 离障碍物表面的欧式距离可以用两者的伪距离表示,即

$$d(p_c) = \|r_{opc}\| \left(1 - f_{d_p}(s_a, p_c)^{\frac{\zeta_1}{2}} \right) = \frac{d_p(s_a, p_c)}{d_p(s_a, p_c) + 1} \|r_{opc}\| \quad (12)$$

式中, $r_{opc} = o_{obs}p_c$ 为障碍物中心到关键点的矢量。

将伪距离方法引入机器人避障控制中,基于式(12),可以得出拟合障碍物的超曲面和拟合机器人连杆的超曲面之间的欧式距离为

$$d_{om} = \frac{d_p(s_a, p_c)}{d_p(s_a, p_c) + 1} \|r_{opc}\| - \|r_{rob,i}\| \quad (13)$$

式中, $\|r_{rob,i}\|$ 为机器人连杆 i 超曲面半径。

2 避障实施方案

图5为两种机器人与障碍物碰撞的情形。

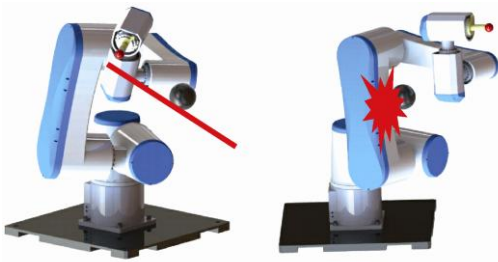


图5 障碍物与机器人的两种碰撞情形

2.1 末端避障

本文采用伪距离方法判别机器人末端与障碍物的接近程度。由于球面能够包络各种形状障碍物,因此本文采样球面超曲面方程包络障碍物,即

$$d_p(p_c) = \left(\frac{x}{r_{sph}} \right)^2 + \left(\frac{y}{r_{sph}} \right)^2 + \left(\frac{z}{r_{sph}} \right)^2 - 1 \quad (14)$$

式中, $r_{sph} \in \mathbf{R}$ 为等效球体半径。

为了能够使机器人平滑连续地进行避障操作,本文在障碍物超曲面外部设立了危险区域与危险边界,如图6所示,其中,危险边界是障碍物球面的同心球面,相对应的伪距离表示为 d_{pm} ,危险边界与障碍物球面之间的区域称之为危险区域。

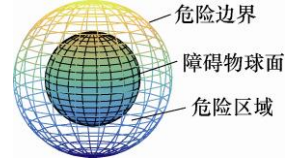


图6 障碍物建模

当机器人末端与障碍物拟合球面之间的伪距离 $d_p(p_c)$ 大于阈值 d_{pm} , 避障排斥速度 $v_c(p_c) = \mathbf{0}$ 。当 $d_p(p_c)$ 小于等于阈值 d_{pm} , 沿着障碍物中心至机器人末端方向, 避障排斥速度定义为

$$v_c(p_c) = v(p_c) \frac{p_c}{\|p_c\|} \quad (15)$$

$$v(p_c) = 0.5v_0 \left(\cos \left(\pi \frac{d_p(p_c)}{d_{pm}} \right) + 1 \right) \quad (16)$$

式中, $v_0 > 0$ 是最大避障速度。

当 $d_p(p_c) = d_{pm}$, $v_c(p_c) = \mathbf{0}$, 当 $d_p(p_c)$ 逐渐由 d_{pm} 趋向 0 时, $v_c(p_c)$ 则由 $\mathbf{0}$ 逐渐增大到最大避障速度 $v_0 \frac{p_c}{\|p_c\|}$ 。机器人避障排斥速度势场如图7所示,

发现避障排斥速度沿着任务空间任意方向,随着伪距离的减小平滑增加至最大值 $v_0 = 500 \text{ mm/s}$, 未出现速度突变现象,能够避免机器人末端抖动现象。

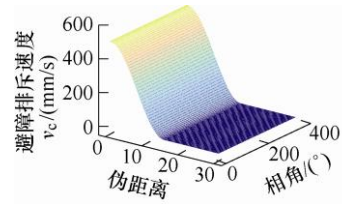


图7 机器人末端避障速度势场

当机器人末端轨迹中存在多个障碍物时,且相应的伪距离都小于阈值 d_{pm} , 式(15)变换为

$$v_{cor} = \sum_{i=1}^{N_{obs}} v_c(p_{c,i}) \quad (17)$$

$$v_{call} = v(p_{cmin}) \frac{v_{cor}}{\|v_{cor}\|} \quad (18)$$

$$p_{cmin} = \arg \min_{i \in N_{obs}} \|p_{c,i}\| \quad (19)$$

式中, N_{obs} 为障碍物总数; $p_{c,i}$ 为机器人末端与第 i 个障碍物相对位置矢量; p_{cmin} 为机器人末端与障碍

物之间的最小位置矢量; \mathbf{v}_{cor} 为总避障排斥速度方向; \mathbf{v}_{call} 为多障碍物避障排斥速度。

从式(17)~(19)可知, 机器人末端避障速度的方向由所有障碍物到机器人末端的方向决定, 而相应的避障速度幅值由障碍物到机器人末端最小的伪距离决定。为此, 离机器人末端最近的障碍物施加最大的避障排斥速度, 在机器人末端与其他障碍物不发生干涉的前提下远离障碍物。

通过转换矩阵 \mathbf{T}_{otb} , 将在障碍物坐标系下产生的避障排斥速度转换到机器人基坐标系中, 得到 $\mathbf{v}_{\text{rep}} = \mathbf{T}_{\text{otb}} \mathbf{v}_{\text{c}}(\mathbf{p}_{\text{c}})$ 。因此在避障过程中, 机器人末端期望速度修改为

$$\dot{\mathbf{x}}_{\text{c}}^{\text{obs}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{c}} + \mathbf{v}_{\text{rep}} \quad (20)$$

将式(20)代入文献[20]中的冗余机器人逆运动学方法中, 可以得到基于伪距离的机器人末端避障关节速度, 即

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{W}_{\text{b}} \mathbf{J}_{\text{W}_{\text{b}}}^{\oplus, \rho_{\text{W}_{\text{b}}}} \dot{\mathbf{x}}_{\text{c}}^{\text{obs}} - \mathbf{P}_{\text{W}_{\text{b}}}^{\oplus, \rho_{\text{W}_{\text{b}}}} \mathbf{J}_{\text{bk}} \mathbf{T}_{\text{r}} \quad (21)$$

式中, \mathbf{W}_{b} 为加权矩阵; $\mathbf{J}_{\text{W}_{\text{b}}}$ 为加权雅可比矩阵; $\mathbf{J}_{\text{W}_{\text{b}}}^{\oplus, \rho_{\text{W}_{\text{b}}}}$ 为基于阻尼最小二乘法的加权雅可比伪逆矩阵, $\rho_{\text{W}_{\text{b}}}$ 为阻尼因子; $\mathbf{P}_{\text{W}_{\text{b}}}^{\oplus, \rho_{\text{W}_{\text{b}}}}$ 为加权零空间矩阵; \mathbf{J}_{bk} 为避关节角度极限的加权雅可比矩阵; \mathbf{T}_{r} 为用于避关节角度极限的排斥速度。

2.2 零空间避障

不同于末端避障算法, 零空间避障采用虚拟力场, 通过零空间自适应阻尼控制, 将虚拟力转换为零空间关节速度, 推离机器人连杆远离障碍物, 避免连杆与障碍物接触, 即如图 5b 所示。

用等效球体对如图 8 所示机器人第五连杆进行分解, 其他连杆类似。等效球体在接近障碍物过程中, 障碍物向距离最近的等效球体施加其运动方向相反的虚拟排斥力以此减小等效球体速度。图 9 为等效的机器人连杆与障碍物示意图。在基座标系 $\mathbf{o}_{\text{b}} - \mathbf{x}_{\text{b}} \mathbf{y}_{\text{b}} \mathbf{z}_{\text{b}}$ 中, $\mathbf{p}_{\text{a},i}$, $\mathbf{p}_{\text{b},i}$ 为连杆 i 的始末两端位置, $\mathbf{p}_{\text{c},ij}$ 为连杆 i 分解后的第 j 个球体位置, r_i 为连杆 i 等效球体半径, \mathbf{o}_{obs} , r_{obs} 为障碍物位置和球体半径, $d_{\text{p}}(\mathbf{p}_{\text{c},ij})$ 为 $\mathbf{p}_{\text{c},ij}$ 在障碍物坐标系 $\mathbf{o}_{\text{obs}} - \mathbf{x}_{\text{obs}} \mathbf{y}_{\text{obs}} \mathbf{z}_{\text{obs}}$ 下



图 8 连杆分解图

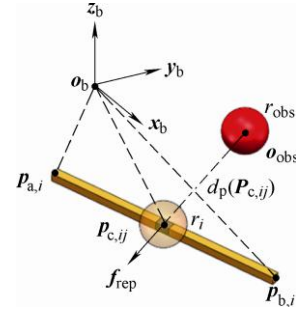


图 9 等效的机器人连杆和障碍物

的伪距离, f_{rep} 为沿 $\mathbf{o}_{\text{obs}} \mathbf{p}_{\text{c},ij}$ 方向障碍物对连杆 i 上的第 j 个等效球体施加的虚拟排斥力。

机器人连杆 i 与障碍物的接近程度可表示为

$$d_{\text{p},i}(\mathbf{p}_{\text{a},i} \mathbf{p}_{\text{b},i}) = \arg \min_{\mathbf{p}_{\text{c},ij}} \{d_{\text{p}}(\mathbf{p}_{\text{a},i}), \dots, d_{\text{p}}(\mathbf{p}_{\text{c},ij}), \dots, d_{\text{p}}(\mathbf{p}_{\text{b},i})\} \quad (22)$$

整个机器人与任务空间中障碍物的接近程度为

$$d_{\text{p,arm}} = \arg \min_{i \in n} \{d_{\text{p},3}, \dots, d_{\text{p},n}\} \quad (23)$$

为了避免 \mathbf{J}_{d} 奇异, 本文从机器人第 3 连杆开始进行最小伪距离计算。

机器人本体与障碍物的虚拟接触如图 10 所示。

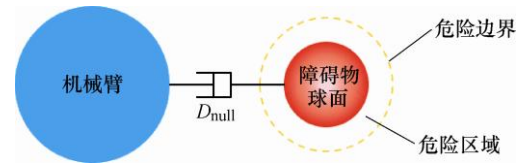


图 10 机器人本体与障碍物的虚拟接触

若基于式(23)得到的机器人本体与障碍物之间的最小伪距离小于零空间伪距离安全阈值 $d_{\text{pm}}^{\text{null}}$ 时, 产生与连杆运动方向相反的虚拟排斥力, 方向沿着障碍物中心 \mathbf{o}_{obs} 指向连杆关键点 $\mathbf{p}_{\text{c},ij}$, 即

$$\mathbf{F}_{\text{rep}} = f_{\text{rep}} \left(\left\| \mathbf{o}_{\text{obs}} \mathbf{p}_{\text{c},ij} \right\| \right) \frac{\mathbf{o}_{\text{obs}} \mathbf{p}_{\text{c},ij}}{\left\| \mathbf{o}_{\text{obs}} \mathbf{p}_{\text{c},ij} \right\|} \quad (24)$$

$$f_{\text{rep}}(d_{\text{p,arm}}) = \frac{f_{\text{max}}}{1 + \exp \left(\left(\frac{2d_{\text{p,arm}}}{d_{\text{mp}}^{\text{null}}} - 1 \right) xi \right)} \quad (25)$$

式中, f_{max} 为最大虚拟力; xi 为虚拟力曲线形状调整因子。当 $d_{\text{p,arm}} > d_{\text{mp}}^{\text{null}}$, $f_{\text{rep}} = 0$, 当 $d_{\text{p,arm}}$ 逐渐由 $d_{\text{mp}}^{\text{null}}$ 减小至 0 时, f_{rep} 由 0 单调增大至 f_{max} 。

基于式(24)的虚拟力, 通过零空间阻尼控制策略, 修改机器人期望轨迹, 即

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{c}} = \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{c}} + \Delta \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{adj}} \quad (26)$$

式中, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{c}}$ 为机器人期望关节速度轨迹; $\Delta \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\text{adj}}$ 为阻尼控制输出的关节速度调整量。

由于虚拟排斥力作用在关节空间内, 因此通过 J_d 将虚拟排斥力映射到关节空间中, 即

$$\tau_{\text{rep}} = J_d^T F_{\text{rep}} \quad (27)$$

通过阻尼控制, 输出机器人关节速度调整量

$$\Delta \dot{\theta}_{\text{adj}} = -D_{\text{null}}^{-1} \tau_{\text{rep}} \quad (28)$$

式中, D_{null} 零空间阻尼增益参数对角矩阵。

D_{null} 增益参数的选择对冗余机器人零空间避障性能的影响至关重要。若增益参数过大, 则避障作用被减弱, 避障失效, 若增益参数过小, 则会引起关节速度突变, 机器人系统不稳定。因此须对冗余机器人零空间阻尼参数 D_{null} 进行自适应调整。

本文根据机器人连杆受到的虚拟排斥力进行自适应调整阻尼增益参数 $D_{\text{null}}^i (\|F_{\text{rep}}\|)$ 。当虚拟力增大时, 说明机器人在接近障碍物, 因此阻尼参数应减小, 以快速推离机器人远离障碍物。当虚拟力减小时, 说明机器人正远离障碍物, 因此阻尼参数应增大, 以尽量保持机器人最优构型配置, 即

$$D_{\text{null}}^i (\|F_{\text{rep}}\|) = A_0 + A_1 \|F_{\text{rep}}\|^3 + A_2 \|F_{\text{rep}}\|^4 + A_3 \|F_{\text{rep}}\|^5 \quad (29)$$

$$i \in n$$

$$A_0 = D_{\text{null}}^{i \max}$$

$$A_1 = 10(D_{\text{null}}^{i \min} - D_{\text{null}}^{i \max}) / f_{\max}^3$$

$$A_2 = 15(D_{\text{null}}^{i \max} - D_{\text{null}}^{i \min}) / f_{\max}^4$$

$$A_3 = 15(D_{\text{null}}^{i \min} - D_{\text{null}}^{i \max}) / f_{\max}^5$$

式中, $D_{\text{null}}^{i \min}$, $D_{\text{null}}^{i \max}$ 分别为第 i 个阻尼参数元素的最小值和最大值。

根据文献[20], 为了保证机器人末端任务不受零空间避障影响, 式(28)产生的关节速度调整量作用在机器人加权零空间内, 即

$$\Delta \dot{\theta}_{\text{null}} = P_{W_b}^{\oplus, \rho_{W_b}} \Delta \dot{\theta}_{\text{adj}} = -P_{W_b}^{\oplus, \rho_{W_b}} D^{-1} (\|F_{\text{rep}}\|) \tau_{\text{rep}} \quad (30)$$

因此, 基于自适应阻尼控制的零空间避障运动, 冗余机器人闭环控制逆运动学为

$$\dot{\theta} = W_b J_{W_b}^{\oplus, \rho_{W_b}} \dot{x}_c - P_{W_b}^{\oplus, \rho_{W_b}} (J_{bk} T_r + D^{-1} (\|F_{\text{rep}}\|) \tau_{\text{rep}}) \quad (31)$$

需要注意的是, 式(31)忽略了避障过程中姿态误差对控制性能的影响, 因此, 机器人避障过程中冗余度为 4, 满足式(31)两个约束要求, 有足够的冗余度避免关节角度极限约束和避障约束的冲突。

3 避障仿真与试验

3.1 避障仿真

为了验证本文提出的避障方法相对传统的主从

任务转换避障方法的优越性进行了机器人避障仿真, 其中, 末端避障仿真环境为 Matlab R2016a, 零空间避障仿真环境为 LabVIEW 2017。所有仿真中忽略姿态控制对机器人避障性能的影响。

3.1.1 机器人末端避障

机器人初始构型配置

$$\theta = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$$

机器人初始位置

$$P_{\text{initial}} = [332.28 \text{ mm}, -206.5 \text{ mm}, 970.9 \text{ mm}]^T$$

机器人终点位置

$$P_{\text{end}} = [-80 \text{ mm}, -180 \text{ mm}, 800 \text{ mm}]^T$$

末端避障参数

$$o_{\text{obs}} = [100 \text{ mm}, -235 \text{ mm}, 900 \text{ mm}]^T \quad r_{\text{obs}} = 32 \text{ mm}$$

$$v_0 = 1000 \text{ mm/s} \quad d_m = 80 \text{ mm} \quad d_{\text{pm}} = 2.5$$

如图 11 所示为传统主从任务转换方法避障。从图中可以看出, 机器人期望直线路径与障碍物发生干涉, 基于主从任务转换的避障方法, 机器人能够顺利避开障碍物。然而, 传统的主从任务转换避障方法仍然有明显的缺陷, 如图 12a 所示, 虽然关节角度连续变换, 但是如图 12b 所示, 在 $t = 0.92 \text{ s}$ 和 $t = 1.78 \text{ s}$ 关节速度出现了突变, 容易引起机器人末端抖动, 这是在实际中所不允许的。然而, 这一现象可以从图 12d 得到解释。 $t = 0.92 \text{ s}$ 和 $t = 1.78 \text{ s}$ 时刻分别对应机器人末端进入和离开障碍物的危险区域, 机器人主从任务的突然切换引起了关节速度的突变。在两时刻之间, 机器人末端与障碍物的最小距离低于阈值 80 mm 。为了保证机器人末端远离障碍物, 牺牲了机器人末端跟踪精度, 末端位置误差

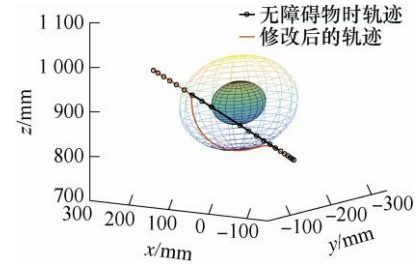
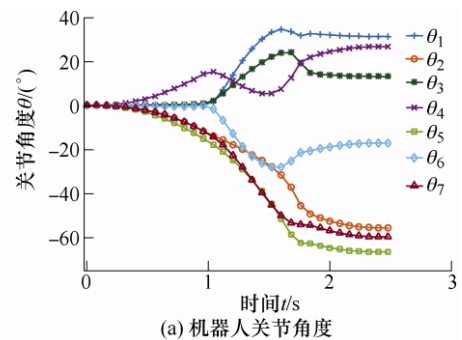


图 11 传统主从任务转换方法避障



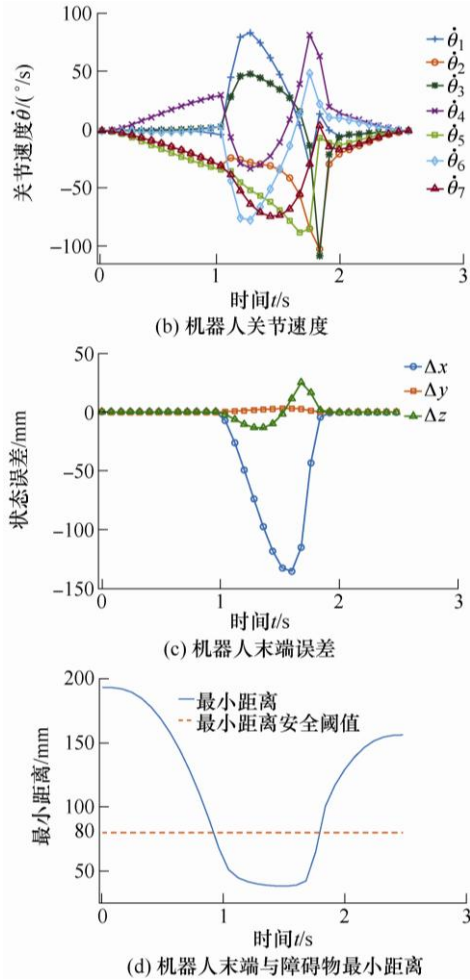


图 12 传统主从任务转换避障方法仿真结果

变大,如图 12c 所示,其中,在 $t=1.58$ s, 机器人末端误差达到最大, $\Delta x=-136.197$ mm, $\Delta y=3.059$ mm, $\Delta z=26.848$ mm。

图 13 与图 14 为本文提出的机器人末端避障仿真结果,同传统的主从任务转换避障方法一样,机器人末端成功地实现了避障任务。

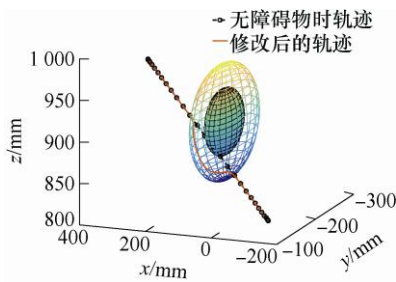


图 13 本文提出的冗余机器人末端避障

从图 14a 中看出,本文提出的方法也能保证机器人关节角度连续变换,而且如图 14b 所示,能够平滑各个关节速度,避免了因避障速度引起的关节速度突变。此外,机器人关节速度变化幅度小于传统主从任务转换避障方法产生的关节速度,即本文提出的方法能够在一定程度上避免关节速度饱和问题。从图 14d 和表 1 中可以看出,相同的环境和仿

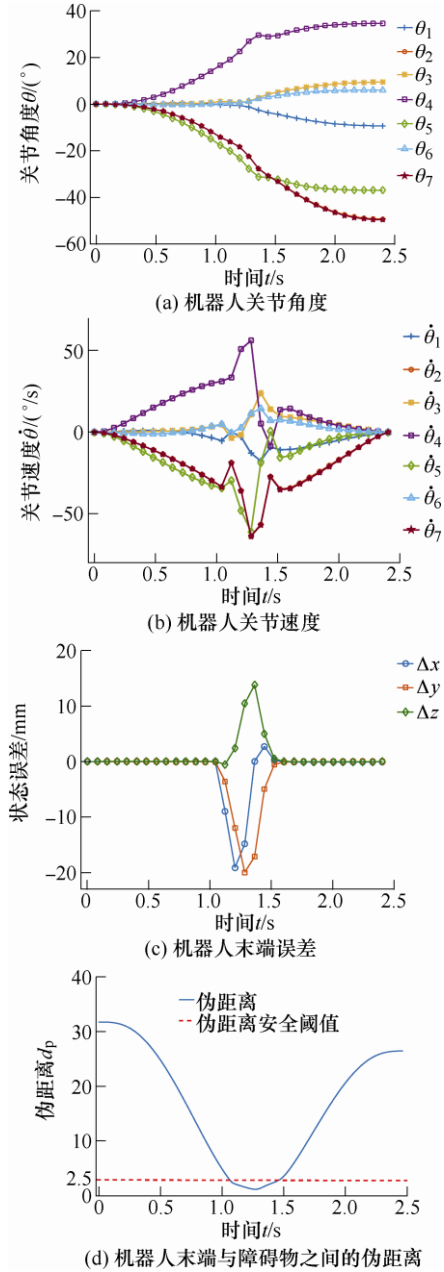


图 14 本文提出的冗余机器人末端避障仿真结果

真参数,本文提出的末端避障方法的避障时间 0.39 s, 远远小于传统避障方法所用时间 0.86 s, 主要由于本文提出的方法能够提前预知障碍物的存在而实现提前避障,从而缩短避障时间。同时,基于本文提出方法的仿真中,每个时刻末端伪距离值都大于 0,根据式(13)可以得到机器人末端离障碍物表面的最小距离 20.845 mm。因此,本文提出的末端避障方法实现了机器人末端快速避障任务。

表 1 避障性能比较

方法	Δx /mm	Δy /mm	Δz /mm	避障 时间/s	扫描 时间/s
主从任务转换方法	-136.197	3.059	26.848	0.86	0.448
本文提出的末端避障方法	-19.636	-21.172	14.613	0.39	0.437

从表1中可以看出,虽然本文提出的末端避障方法与传统避障方法扫描耗时几乎相等,但是相对传统避障方法,本文提出的末端避障方法不仅能够提高机器人末端跟踪精度,而且缩短了机器人末端避障所用时间,提高了避障效率。

3.1.2 机器人零空间避障

为了能够直观地验证本文提出冗余机器人零空间避障方法的有效性,将基于冗余机器人仿真软件进行可视化的机器人零空间避障仿真。仿真任务是当障碍物位于机器人本体周围,机器人在跟踪往返直线的路径过程中,保证末端位置精度的前提下,实现机器人本体避开障碍物的能力。

机器人初始构型配置

$$\theta = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T$$

机器人连杆等效球体半径

$$\mathbf{r} = [200 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, 200 \text{ mm}, 60 \text{ mm}, 60 \text{ mm}]^T$$

机器人末端初始位置

$$\mathbf{P}_{\text{initial}} = [332.28 \text{ mm}, -206.5 \text{ mm}, 970.9 \text{ mm}]^T$$

机器人终点位置

$$\mathbf{P}_{\text{end}} = [-80 \text{ mm}, -180 \text{ mm}, 800 \text{ mm}]^T$$

零空间避障参数

$$\mathbf{o}_{\text{obs}} = [70 \text{ mm}, -20 \text{ mm}, 540 \text{ mm}]^T \quad r_{\text{obs}} = 32 \text{ mm}$$

$$d_m = 80 \text{ mm} \quad d_{\text{pm}}^{\text{null}} = 2.5 \quad f_{\text{max}} = 8 \text{ N}$$

$$D_{\text{null}}^{\text{min}} = 0.02 \text{ Nmms/rad} \quad D_{\text{null}}^{\text{max}} = 0.5 \text{ Nmms/rad}$$

机器人未采用零空间避障方法的仿真结果如图15所示,可以发现障碍物与机器人第5连杆发生2次近距离接触和干涉。基于本文提出的零空间避

障方法仿真结果如图16所示,可以发现机器人在虚拟力作用下重新配置机器人构型,成功实现了在不改变机器人末端位姿的条件下进行零空间避障功能。

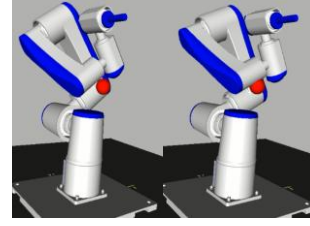


图15 未采用零空间避障方法仿真结果

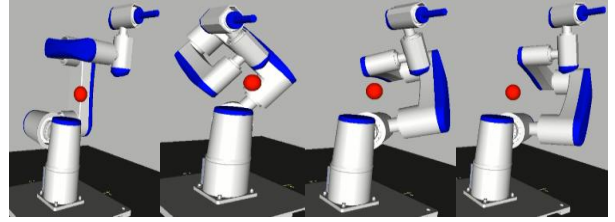
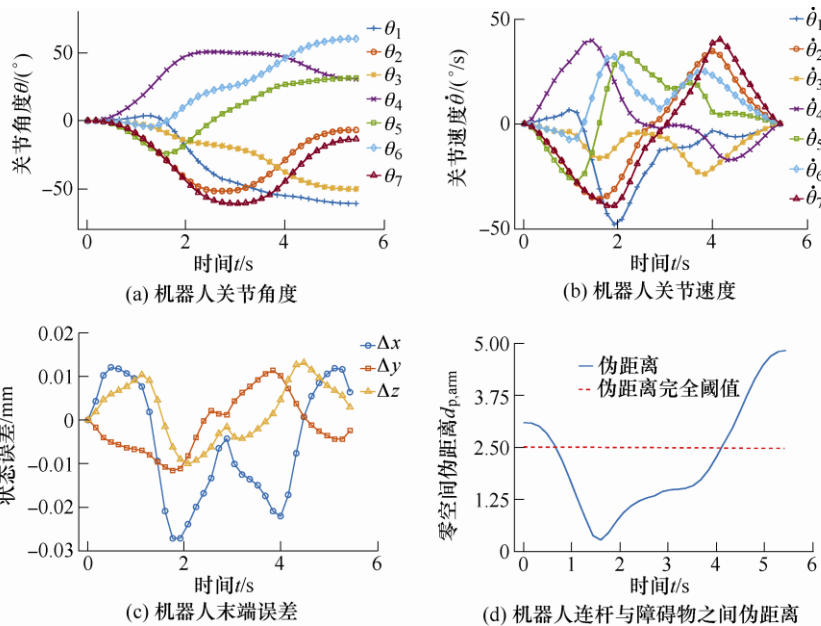


图16 本文提出的零空间避障方法仿真过程

图17是基于本文提出零空间避障方法的仿真结果。如图17a、17b所示,机器人关节角度与速度平滑连续,没有出现突变现象。由于障碍物不与机器人末端轨迹干涉,因此,如图17c所示,机器人末端保持了良好的跟踪性能,末端最大误差控制在0.03 mm以内。机器人第5连杆不断地接近障碍物,伪距离小于阈值 d_{pm} 时,产生如图17e所示的虚拟力作用在零空间自适应阻尼控制中。为了输出平滑的排斥速度,如图17f所示,在虚拟力较小的时候, D_{null}^i 较大,阻止机器人最优构型破坏,当虚拟力变大的时候, D_{null}^i 逐渐减小,以维持快速地响应虚拟力,输出排斥速度,推离机器人杆件远离障碍物。



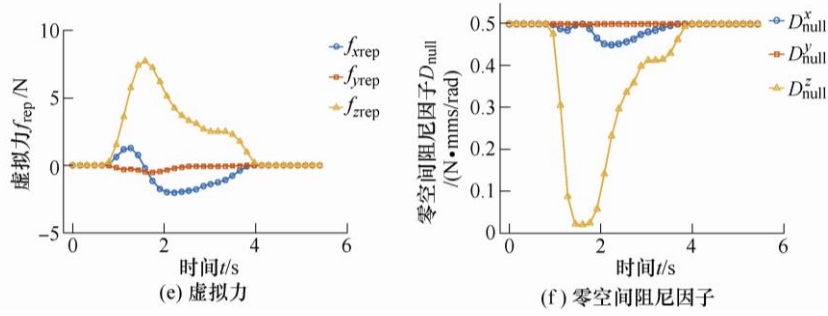


图 17 本文提出的零空间避障方法仿真结果

为了更直观地表示障碍物与机器人连杆之间的距离，基于式(13)，图 17d 最小伪距离转换成图 18 所示的最小欧式距离。可以发现，在 $t=0.9 \sim 3.9$ s，机器人第 5 连杆进入障碍物危险区域内，产生虚拟排斥力，且在 $t=1.57$ s 时，机器人连杆与障碍物的最小欧式距离达到最小值，14.049 mm，未与障碍物发生干涉。因此，仿真验证了本文提出的零空间避障方法能够有效地用于冗余机器人零空间避障。

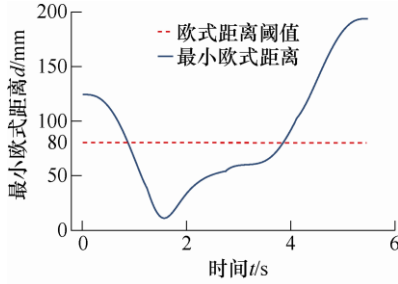


图 18 障碍物与连杆之间最小欧式距离

3.2 避障试验

机器人避障试验目的是验证冗余机器人末端避障和零空间避障的有效性。试验装置如图 19 所示，主要包括冗余七自由度机器人、半径 40 mm 球障碍物、半径 50 mm 球障碍物和 Kinect 视觉系统。试验任务主要是机器人在跟踪预定轨迹时，利用本文提出的避障算法，调整机器人末端速度和构型配置，能够同时有效地避开末端轨迹和零空间中障碍物。



图 19 冗余机器人避障试验装置

经视觉系统检测，半径 40 mm 球障碍物和半径 50 mm 球障碍物分别处于机器人末端轨迹上和机器人零空间内，在机器人基坐标系下位置分别为

$$\mathbf{o}_{\text{obs},1} = [141.26 \text{ mm}, -425.94 \text{ mm}, 952.73 \text{ mm}]^T$$

$$\mathbf{o}_{\text{obs},2} = [32.95 \text{ mm}, -8.58 \text{ mm}, 49.77 \text{ mm}]^T$$

相对应的障碍物伪距离安全阈值分别设置为 $d_{\text{pm}} = 1.5$ ， $d_{\text{pm}}^{\text{null}} = 1.2$ ，其最小欧式距离安全阈值 $d_m = 60 \text{ mm}$ 。其余参数分别设置为

$$v_0 = 80 \text{ mm/s} \quad f_{\text{m a x}} = 2.0 \text{ N}$$

$$D_{\text{null}}^{\text{min}} = 0.005 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

$$D_{\text{null}}^{\text{max}} = 0.03 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

由于采用了本文末端避障方法和零空间避障方法，机器人分别实现了末端避障和零空间避障，如图 20 所示。由于零空间避障修改了机器人构型配置，因此机器人终点构型不同于初始构型，如图 20a 和 20c 所示。试验证明了本文避障方法的有效性。

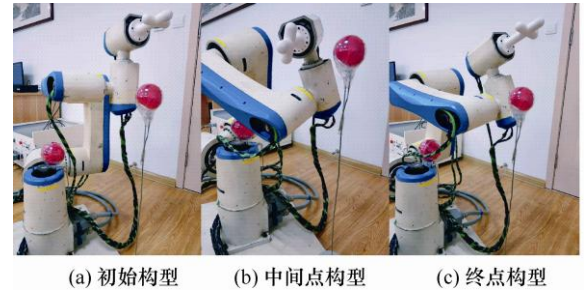


图 20 机器人避障试验

图 21 为机器人多障碍避障试验结果。从图 21e 机器人末端与障碍物之间的伪距离和欧式距离曲线中可以看出，在采集点数 185~264 和 551~633 中，机器人末端与球障碍物之间的伪距离激活了末端避障算法，在采集点数 220 和 599 处伪距离达到最小，分别为 1.215 和 0.863，小于阈值 $d_{\text{pm}} = 1.5$ ，同时欧式距离也达到最小，小于阈值 $d_m = 60 \text{ mm}$ 。由于第二次末端避障的最小伪距离小于第一次最小伪距离，因此第二次机器人末端避障排斥速度大于第一次末端避障排斥速度，如图 21d 所示。同样，在采集点数 194~243 中，机器人连杆与球障碍物的伪距离和欧式距离分别小于 $d_{\text{pm}}^{\text{null}}$ 和 d_m ，如图 21g 所示。

产生的零空间虚拟排斥力如图 21f 所示, 在采集点数 194~243 中, 推离机器人连杆远离球障碍物, 避免发生碰撞, 在采集点数 212 处, 虚拟力最大, $f_{\text{rep}}^x = -2.091 \text{ N}$, $f_{\text{rep}}^y = -3.684 \text{ N}$, $f_{\text{rep}}^z = 6.255 \text{ N}$ 。由于在采集点数 185~264 中, 同时激活了机器人末

端避障和零空间避障, 而在采集点数 551~633 中, 只激活了机器人末端避障, 因此, 机器人关节速度值在前一段采集点数中相对第二段采集点数中有着较大的速度变化, 但保持了速度连续性, 如图 21c 所示。

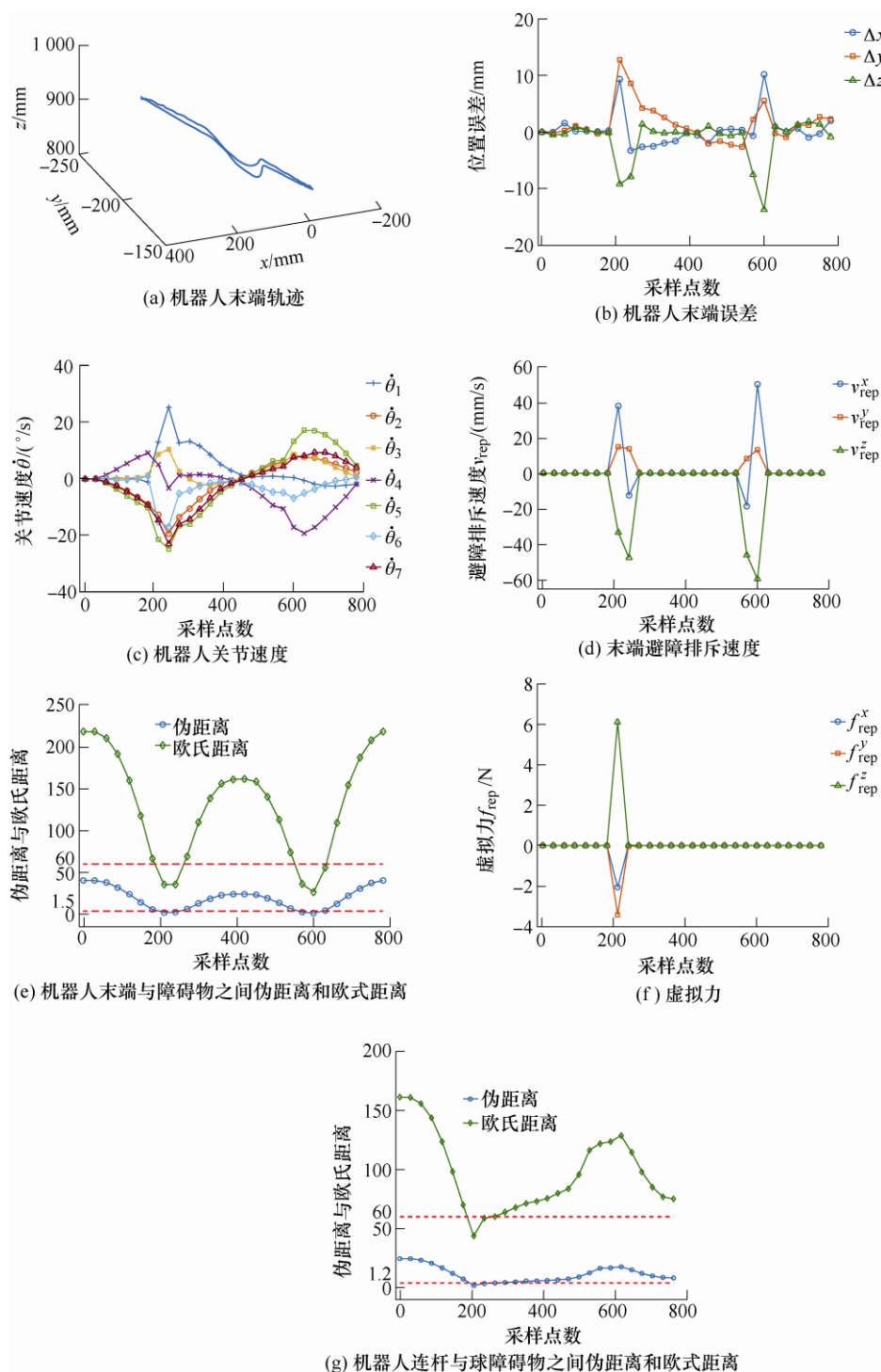


图 21 冗余机器人多障碍避障试验结果

从图 21b 可以看出, 机器人两次末端避障排斥速度引起了机器人末端误差的增大, 如表 2 所示, 机器人末端三维轨迹如图 21a 所示。需要注意的是, 在终点采集点 802 处, 位置误差相对较大, 可能由

于模型参数不确定性的存在, 使得实际误差不符合理论误差。这需要在后续研究中进一步消除模型参数不确定性对误差的影响。综上, 虽然末端位置在终点处未达到最优, 但从避障试验结果可以得知,

本文提出的冗余机器人末端避障方法和零空间避障方法能够有效地避免机器人与障碍物相碰撞, 提高了机器人与环境的安全性。

表 2 多障碍物避障试验末端最大位置误差与终点位置误差

采集 点数	x 轴		y 轴		z 轴	
	采集点 位置	误差 /mm	采集点 位置	误差 /mm	采集点 位置	误差 /mm
185~264	211	9.355	223	13.781	227	-9.122
551~633	608	10.265	590	6.098	591	-14.32
终点	802	2.268	802	2.68	802	1.219

4 结论

本文对冗余机器人避障方法进行了研究, 提出一种基于伪距离算法的无需主从任务转换的避障方法, 分别在机器人末端与零空间内实现冗余机器人避障功能。

(1) 由于伪距离算法相对欧式距离计算具有明确的解析式形式, 且能够提前预判障碍物的存在, 计算效率高, 因此本文基于伪距离计算机器人与障碍物之间的接近程度。

(2) 在末端避障上, 基于伪距离调整机器人末端避障速度, 以此实现末端避障。在零空间避障上, 基于伪距离, 提出一种零空间自适应阻尼避障方法, 利用冗余度, 在不干扰机器人末端任务前提下实现零空间避障。

(3) 通过仿真和试验证明了本文方法的有效性和优越性。因此本文提出的冗余机器人避障方法对不同冗余自由度的机器人避障问题求解具有一定的通用性。

(4) 本文主要解决冗余机器人静态避障问题, 为冗余机器人动态避障问题解决奠定理论基础, 因此后续将基于本文提出避障算法, 研究冗余机器人动态避障问题。

参 考 文 献

[1] 吴伟国, 吴鹏. 基于避障准则的双臂手移动机器人桁架内运动规划[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 1-7.
WU Weiguo, WU Peng. Obstacle avoidance criteria based motion planning for dual-arm mobile robot moving within truss[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 1-7.

[2] 方承, 赵京. 新颖的基于梯度投影法的混合指标动态避障算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 30-37.
FANG Cheng, ZHAO Jing. New dynamic obstacle avoidance algorithm with hybrid index based on gradient

projection method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 30-37.

[3] MU Z, XU W F, LIANG B. Avoidance of multiple moving obstacles during active debris removal using a redundant space manipulator[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(2): 815-826.

[4] TADEJ P, LEON Z. Smooth continuous transition between tasks on a kinematic control level: Obstacle avoidance as a control problem[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(9): 948-959.

[5] HAN D, NIE H, CHEN J, et al. Dynamic obstacle avoidance for manipulators using distance calculation and discrete detection[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2018, 49: 98-104.

[6] CHEN Y J, JU M Y, HWANG K S. A virtual torque-based approach to kinematic control of redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1728-1736.

[7] WANG W, GU J, ZHU M, et al. An obstacle avoidance method for redundant manipulators based on artificial potential field[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2018: 2151-2156.

[8] FARIA C, FERREIRA F, ERLHAGEN W, et al. Position-based kinematics for 7-DoF serial manipulators with global configuration control, joint limit and singularity avoidance[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 317-334.

[9] SHEN Y, HUPER K. Optimal trajectory planning of manipulators subject to motion constraints[C]// 12th International Conference on Advanced Robotics, Seattle, WA, 2005: 9-16.

[10] ZHANG Yunong, WANG Jun, XIA Youshen. A dual neural network for redundancy resolution of kinematically redundant manipulators subject to joint limits and joint velocity limits[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(3): 658-667.

[11] MENASRI R, NAKIB A, DAACHI B, et al. A trajectory planning of redundant manipulators based on bilevel optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 250: 934-947.

[12] PERDEREAU V, PASSI C, DROUIN M. Real-time control of redundant robotic manipulators for mobile obstacle avoidance[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 41(1): 41-59.

[13] 牟宗高. 面向狭小空间作业的超冗余机器人轨迹规划

- 及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- MOU Zonggao. Research on trajectory planning and control of hyper-redundant robots for confined-space operation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] BRICE L B, MAAROUF S, VAHE N. Modeling and adaptive control of redundant robots[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2006, 71(4-6): 395-403.
- [15] TSOUKALAS A, TZES A. Modelling and control of hyper-redundant micromanipulators for obstacle avoidance in an unstructured environment[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 78(3-4): 517-528.
- [16] CAO Hairui, GU Xiaoqin, YU Chuhong. Obstacle avoidance algorithm for redundant manipulators based on weighted generalized inverse[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2017, 872: 303-309.
- [17] 申浩宇, 吴洪涛, 陈柏, 等. 基于主从任务转换的冗余度机器人避障算法[J]. *机器人*, 2014, 36(4): 425-429.
- SHEN Haoyu, WU Hongtao, CHEN Bai, et al. Obstacle avoidance algorithm for redundant robots based on transition between the primary and secondary tasks[J]. *Robot*, 2014, 36(4): 425-429.
- [18] 张建华, 胡平, 张小俊, 等. 基于主从任务转化的闭环控制避障算法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 21-27.
- ZHANG Jianhua, HU Ping, ZHANG Xiaojun, et al. Closed loop control algorithm for obstacle avoidance based on the transformation of master and slave tasks[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 21-27.
- [19] TOSHANI H, FARROKHI M. Kinematic control of a seven DOF robot manipulator with joint limits and obstacle avoidance using neural networks[C]// *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, Shiraz, Iran, 2011: 976-981.
- [20] WAN Jun, YAO Jiafeng, ZHANG Liang'an, et al. A weighted gradient projection method for inverse kinematics of redundant manipulators considering multiple performance criteria[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 64 (7/8): 475-487.
-
- 作者简介: 万俊(通信作者), 男, 1989 年出生, 讲师, 博士。主要研究方向为协作机器人, 机器人柔顺控制技术。
E-mail: junwanrob@gmail.com