

基于含避障角人工势场法的机器人路径规划

万俊^{1,2} 孙薇² 葛敏² 王克鸿¹ 章晓勇¹

(1. 南京理工大学材料科学与工程学院, 南京 210094; 2. 江苏理工学院汽车与交通工程学院, 常州 213001)

摘要: 针对基于距离的人工势场法 (Artificial potential field, APF) 存在的局部极小值问题, 提出了一种含避障角的人工势场法的避障路径规划方法。在平面环境中, 采用斜率判定路径规划过程中的位置关系, 通过机器人当前点到障碍物的距离与障碍物的影响半径二者之差得出人工势场法中的排斥力, 并对排斥力的偏转角进行调整; 另外, 在空间环境中利用圆弧插补理论将机器人平面避障问题转换为空间避障问题; 基于机器人构型配置对改进人工势场法进一步完善以满足实际避障要求。仿真和实验研究结果表明, 含避障角的人工势场法, 在单个或多个障碍物环境中进行避障路径规划时解决了局部极小值的问题, 同时实现了6自由度机器人末端在避障时的轨迹曲线平滑无振荡, 验证了所提出避障路径规划方法的可行性。

关键词: 6自由度机器人; 人工势场法; 避障角; 避障偏转角度; 圆弧插补

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)01-0409-10

OSID:



Robot Path Planning Based on Artificial Potential Field Method with Obstacle Avoidance Angles

WAN Jun^{1,2} SUN Wei² GE Min² WANG Kehong¹ ZHANG Xiaoyong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Aiming at the local minima problem of the distance-based artificial potential field (APF) method, an obstacle avoidance path planning method with the artificial potential field method containing obstacle avoidance angle was proposed. In a planar environment, the slope was used to determine the positional relationship during the path planning process, and the magnitude of the repulsive force in the artificial potential field method was derived from the difference between the distance from the robot's current point to the obstacle and the radius of influence of the obstacle, and the deflection angle of the repulsive force was adjusted, thus overcoming the shortcomings of local minima that existed in the traditional artificial potential field method. In addition, the circular arc interpolation theory was utilized to convert the robot planar obstacle avoidance problem into a spatial obstacle avoidance problem in a spatial environment. The improved artificial potential field method was further refined based on the robot configuration to meet the practical obstacle avoidance requirements. The effectiveness of the improved artificial potential field method was verified by simulation and experiment. The results of simulation and experimental studies showed that the artificial potential field method containing obstacle avoidance angles not only solved the problem of local minima when performing obstacle avoidance path planning in single or multiple obstacle environments, but also realized the smooth trajectory profile of the end of the 6-DOF robot with no oscillations during obstacle avoidance, thus verifying the feasibility of the proposed obstacle avoidance path planning method.

Key words: 6-DOF robot; artificial potential field method; obstacle avoidance angle; deflection angle for obstacle avoidance; circular interpolation

收稿日期: 2023-06-02 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 常州市应用基础研究计划项目 (CJ20235061)、中国博士后科学基金项目 (2021M691588) 和江苏省自然科学基金项目 (BK20210351)

作者简介: 万俊 (1989—), 男, 博士生, 江苏理工学院讲师, 主要从事协作机器人与机器人柔顺控制技术研究, E-mail: junwanrob@gmail.com

0 引言

为了使机器人在复杂环境中自动控制且不与障碍物发生碰撞,有必要对机器人的避障轨迹规划进行研究^[1]。目前,机器人避障算法可以根据避障算法作用范围分为全局避障算法^[2-3]和局部避障算法,其中人工势场法是最典型的局部避障算法,而全局避障算法中最常用有遗传算法、A* 算法^[4-5]、蚁群算法^[6-7]和快速随机搜索树(RRT)算法等^[8]。每种避障算法都各具优势^[9-10]。

人工势场法由 KHATIB^[11] 在 1986 年首次提出,因结构简单、运用过程方便而被广泛应用,但机器人在运行过程中采用人工势场会存在局部极小值和目标不可达的问题。为解决高维空间中机器人的避障路径规划问题,不少学者对人工势场法进行改进,取得了一定的研究成果^[12-15]。汪波等^[16]将几何方法和人工势场进行结合,首先利用几何方法使智能机器人逃离局部极小值区域,再利用人工势场完成路径规划,该方法存在计算量较大、复杂等问题;修彩靖等^[17]将高斯组合函数作为引力势场函数,建立改进的人工势场模型,可以有效改善传统势场存在局部极小值的缺陷问题,但运用到机器人的避障中则需要考虑更多环境因素;何兆楚等^[18]将人工势场与改进的快速扩展随机树(RRT)算法相结合,在关节空间采用人工势场法搜索路径,利用 RRT 算法逃离局部最小点;该算法解决了局部最小问题,但算法规划速度较慢,效率较低;王俊龙等^[19]在关节空间计算机器人的引力势能,在笛卡尔空间计算机械臂的斥力势能,采用虚拟障碍物的方式帮助机器人逃离局部最小值,但该方法只适用于在简单障碍环境对机器人进行路径规划;付泽民等^[20]提出在传统人工势场法陷入局部极小值时,转换成 RRT 算法来跳出局部极小值点,然后再转换成人工势场法完成之后的路径规划任务。虽然这样可以解决人工势场法存在的局部极小值,但 RRT 算法作为全局避障算法,将其引入至路径避障规划中势必会降低整条避障路径的整体规划效率;李龙等^[21]采用适用机器人的基于势函数与关节空间的人工势场法,并结合基于接近觉的机器人避障路径规划方法,提出基于人工势场法的改进的绕行法,使得机器人在避障过程中得以逃离局部最优陷阱,但这种改进需要获取相对完整、精确的障碍物空间信息和合理的路径规划方法以最终实现避障。LIU 等^[22]为了克服传统人工势场法存在的局部极小值,在传统人工势场法中添加一个指向目标点的排斥力进而形成新的排斥力,但这种改进不能解决所有的局部极小值情况。在人工

势场中加入改进的斥力势场和相应的虚拟力,可以有效解决动态目标和静态障碍物的问题,从而保证机器人能够达到确定的目标点,该方法没有考虑到动态障碍物的相关情况。

由于人工势场法是一种局部搜索方法,很容易陷入局部极小点或者在某点附近振荡。本文在基于距离的人工势场法基础上,提出一种含避障角的人工势场法。采用斜率判定路径规划过程中的位置关系,通过机器人当前点到障碍物的距离与障碍物的影响半径二者之差得出人工势场法中的排斥力,并对排斥力的偏转角进行调整,实现动态调整排斥力的偏转角;利用圆弧插补理论将本文提出的平面环境中含避障角的人工势场法转换为空间环境中含避障角的人工势场法,并基于机器人构型配置对算法作进一步改进,使机器人在三维空间避障运动中具有良好的稳定性和有效性。

1 基于距离的人工势场法

1.1 引力和斥力场函数

在人工势场法中^[23],引力、斥力势场函数表达式为

$$U_{att}(\boldsymbol{x}_d) = \frac{1}{2}k_{att}\rho^2(\boldsymbol{x}_d, \boldsymbol{x}_g)$$

(1)

$$U_{rep}(\boldsymbol{x}_d) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep}\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_f}\right)^2 & (\rho_1 \leq \rho_f) \\ 0 & (\rho_1 > \rho_f) \end{cases}$$

(2)

式中 k_{att} 、 k_{rep} ——引力、斥力增益系数
 $\rho(\boldsymbol{x}_d, \boldsymbol{x}_g)$ ——机器人当前点 $\boldsymbol{x}_d$ 与目标点 $\boldsymbol{x}_g$ 之间的距离
 ρ_f ——障碍物影响半径
 ρ_1 ——机器人当前点 $\boldsymbol{x}_d$ 与障碍物点 $\boldsymbol{x}_z$ 之间的距离

引力 $\boldsymbol{F}_{att}(\boldsymbol{x}_d)$ 和斥力 $\boldsymbol{F}_{rep}(\boldsymbol{x}_d)$ 分别为引力势场函数和斥力势场函数的负梯度,表达式为

$$\boldsymbol{F}_{att}(\boldsymbol{x}_d) = -\nabla U_{att}(\boldsymbol{x}_d) = -k_{att}\rho(\boldsymbol{x}_d, \boldsymbol{x}_g)$$

(3)

$$\boldsymbol{F}_{rep}(\boldsymbol{x}_d) = -\nabla U_{rep}(\boldsymbol{x}_d) = \begin{cases} k_{rep}\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_f}\right)\frac{1}{\rho_1^2}\frac{\partial \rho_1}{\partial \boldsymbol{x}_d} & (\rho_1 \leq \rho_f) \\ 0 & (\rho_1 > \rho_f) \end{cases}$$

(4)

1.2 人工势场法合力求解

在基于距离的人工势场法中,假设机器人当前点坐标 $\boldsymbol{x}_d = (X_d, Y_d)$ 、目标点坐标 $\boldsymbol{x}_g = (X_g, Y_g)$ 以及障碍物坐标 $\boldsymbol{x}_z = (X_z, Y_z)$, $\boldsymbol{F}_{att}(\boldsymbol{x}_d)$ 和 $\boldsymbol{F}_{rep}(\boldsymbol{x}_d)$ 偏转角表达式为

$$\alpha_{att} = \arctan(Y_g - Y_d, X_g - X_d)$$

(5)

$$\alpha_{rep} = \arctan(Y_z - Y_d, X_z - X_d)$$

(6)

式中 α_{att} —— $F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d)$ 偏转角

α_{rep} —— $F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d)$ 偏转角

相应的 $F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d)$ 与 $F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d)$ 在 x 、 y 轴方向力表达式为

$$F_{\text{att}x} = F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d) \cos \alpha_{\text{att}} \quad (7)$$

$$F_{\text{att}y} = F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d) \sin \alpha_{\text{att}} \quad (8)$$

$$F_{\text{rep}x} = F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d) \cos \alpha_{\text{rep}} \quad (9)$$

$$F_{\text{rep}y} = F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d) \sin \alpha_{\text{rep}} \quad (10)$$

式中 $F_{\text{att}x}$ —— $F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d)$ 在 x 轴方向分力

$F_{\text{att}y}$ —— $F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d)$ 在 y 轴方向分力

$F_{\text{rep}x}$ —— $F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d)$ 在 x 轴方向分力

$F_{\text{rep}y}$ —— $F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d)$ 在 y 轴方向分力

作用于机器人的合力以及合力偏转角表达式为

$$F_{\text{sum}x} = F_{\text{att}x} + F_{\text{rep}x} \quad (11)$$

$$F_{\text{sum}y} = F_{\text{att}y} + F_{\text{rep}y} \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{sum}} = \arctan(F_{\text{sum}y}, F_{\text{sum}x}) \quad (13)$$

式中 $F_{\text{sum}x}$ ——合力在 x 轴方向力

$F_{\text{sum}y}$ ——合力在 y 轴方向力

α_{sum} ——合力偏转角

由式 (11) ~ (13) 得机器人下一个位移点为

$$X_{\text{next}} = X_d + L_{\text{step}} \cos \alpha_{\text{sum}} \quad (14)$$

$$Y_{\text{next}} = Y_d + L_{\text{step}} \sin \alpha_{\text{sum}} \quad (15)$$

式中 $X_{\text{next}}、Y_{\text{next}}$ ——机器人下一个位移点坐标

L_{step} ——机器人位移步长

机器人使用斥力势场函数需要考虑单个或多个障碍物情况,如图 1 所示。机器人所受合力为

$$F_{\text{sum}} = F_{\text{att}} + \sum_{i=1}^n F_{\text{rep}_i} \quad (16)$$

式中 F_{sum} ——机器人所受合力

n ——影响机器人的障碍物总数

F_{rep_i} ——第 i 个障碍物对机器人产生的斥力

图 1 在运动过程中机器人可能因为目标点对机器人产生的引力和多个障碍物对机器人产生的斥力的合力为零,使机器人停止运动或者无限循环在各个障碍物之间,从而无法到达目标点位置,此时人工势场算法陷入局部极小值问题。

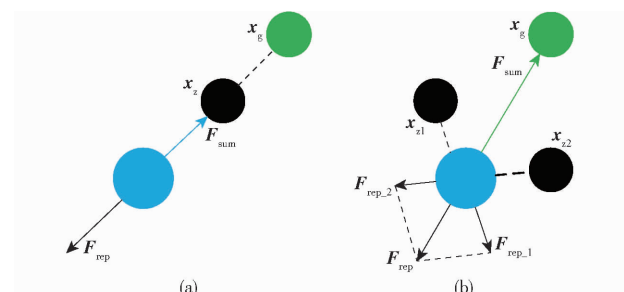


图 1 局部极小值的两类情况

Fig. 1 Two types of local minima

2 含避障角的人工势场法

基于距离的人工势场法是利用机器人当前点与障碍物点之间的距离,求出目标点对机器人产生的引力和多个障碍物对机器人产生的斥力的合力,从而得到合力的偏转角;含避障角的人工势场法在基于距离的人工势场法上,通过引入当前点与障碍物之间的距离以及障碍物的影响半径对斥力的偏转角进行调整,从而能够实现动态调整斥力的偏转角,克服局部极小值问题。首先对平面环境中基于距离的人工势场法进行改进,运用圆弧插补理论使含避障角的人工势场法能在空间环境中进行应用,基于机器人构型配置对算法进一步完善以满足实际避障要求。

2.1 平面环境中含避障角的人工势场法

针对平面环境中基于距离的人工势场法存在的局部极小值,利用斜率方程判定机器人与障碍物之间的位置关系,根据障碍物的影响半径以及机器人与障碍物的距离关系,实现动态调整排斥力的偏转角。假设机器人当前点坐标 $\mathbf{x}_d$ 、目标点坐标 $\mathbf{x}_g$ 和障碍物坐标 $\mathbf{x}_z$ 均已知, $\mathbf{x}_d$ 与 $\mathbf{x}_g$ 的斜率及 $\mathbf{x}_z$ 与 $\mathbf{x}_g$ 的斜率表达式分别为

$$k_{gz} = (Y_g - Y_z) / (X_g - X_z) \quad (17)$$

$$k_{gd} = (Y_g - Y_d) / (X_g - X_d) \quad (18)$$

式中 k_{gz} ——目标点与障碍物连线所得的斜率

k_{gd} ——目标点与机器人连线所得的斜率

当 $k_{gd} > k_{gz}$, 机器人从障碍物右侧绕行,

$F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d)$ 在 x 、 y 轴上分力为

$$F_{\text{rep}x} = F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d) \cos(\alpha_{\text{rep}} + k_z l) \quad (19)$$

$$F_{\text{rep}y} = F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d) \sin(\alpha_{\text{rep}} + k_z l) \quad (20)$$

$$l = \rho_i - \rho_1 \quad (21)$$

式中 k_z ——右侧正比例角度系数

l ——当前点机器人不受障碍物影响最大距离

当 $k_{gd} \leq k_{gz}$, 机器人从障碍物左侧绕行,

$F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d)$ 在 x 、 y 轴上分力为

$$F_{\text{rep}x} = F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d) \cos(\alpha_{\text{rep}} - k_l l) \quad (22)$$

$$F_{\text{rep}y} = F_{\text{rep}_i}(\mathbf{x}_d) \sin(\alpha_{\text{rep}} - k_l l) \quad (23)$$

式中 k_l ——左侧正比例角度系数

在图 1b 的情况下,当 $k_l = k_z$,斥力 F_{rep_1} 和斥力 F_{rep_2} 会分别顺时针和逆时针转动相同角度,此时目标点对机器人产生的斥力 $F_{\text{rep}}(\mathbf{x}_d)$ 与障碍物对机器人产生的引力 $F_{\text{att}}(\mathbf{x}_d)$ 大小相同方向相反,从而使机器人无法绕开障碍物到达目标点,陷入局部极小值,故 k_l 和 k_z 数值设定不能相等。

2.2 空间环境中含避障角的人工势场法

在空间环境中,机器人末端、障碍物和目标点的位置关系可以分为两类:三者共线(图 2a)和三者不共线(图 2b)。

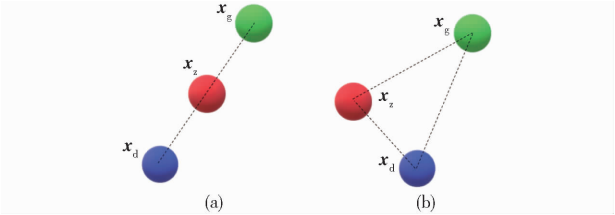


图 2 机器人末端、障碍物和目标点的位置关系

Fig.2 Positional relationship between robot end, obstacle and target points

基于空间环境中的直线方程^[24]对机器人末端与障碍物的位置关系判定

$$\frac{X_z - X_d}{X_g - X_d} = \frac{Y_z - Y_d}{Y_g - Y_d} = \frac{Z_z - Z_d}{Z_g - Z_d}$$

(24)

式中 (X_d, Y_d, Z_d) ——机器人末端当前点坐标
 (X_g, Y_g, Z_g) ——目标点坐标
 (X_z, Y_z, Z_z) ——障碍物坐标

针对图 2a,调整 $\boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d)$ 在任意轴上的分力角度,通过调整 z 轴上的分力,使 $\boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d)$ 与 $\boldsymbol{F}_{\text{att}}(\boldsymbol{x}_d)$ 的方向不共线,调整式为

$$\boldsymbol{F}_{\text{rep}x} = \boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d) \cos\left(\arccos \frac{X_d - X_z}{l_{dz}}\right)$$

(25)

$$\boldsymbol{F}_{\text{rep}y} = \boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d) \cos\left(\arccos \frac{Y_d - Y_z}{l_{dz}}\right)$$

(26)

$$\boldsymbol{F}_{\text{rep}z} = \boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d) \cos\left(\arccos \frac{Z_d - Z_z}{l_{dz}} - k_f l\right)$$

(27)

针对图 2b,通过在空间环境中建立面坐标系进行机器人末端受力分析,利用圆弧轨迹规划^[25-26]的原理完成机器人平面避障至空间避障的转换。假设机器人当前点坐标 $\boldsymbol{x}_d$ 、障碍物坐标 $\boldsymbol{x}_z$ 和目标点坐标 $\boldsymbol{x}_g$ 已知,这 3 个点可确定一个平面 M ,如图 3 所示。

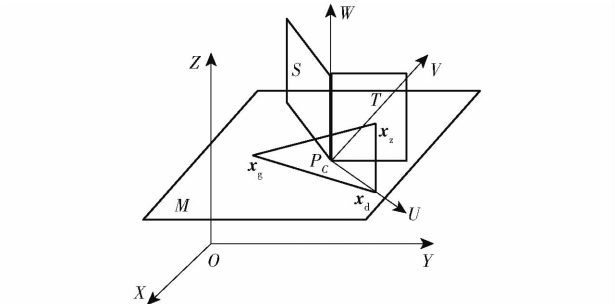


图 3 $P_c UVW$ 新坐标系建立示意图

Fig.3 Creation of new coordinate system for $P_c UVW$

基于圆弧轨迹规划原理,平面 M 坐标系 $P_c UVW$ 与空间坐标系 $OXYZ$ 的转换矩阵 $\boldsymbol{T}_R$ 为

$$\boldsymbol{T}_R = \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_R & \boldsymbol{o}_R & \boldsymbol{a}_R & \boldsymbol{p}_R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(28)

其中, $\boldsymbol{n}_R \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 、 $\boldsymbol{o}_R \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 、 $\boldsymbol{a}_R \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 、 $\boldsymbol{p}_R \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 。

由矩阵 $\boldsymbol{T}_R$,即可得当前点、障碍物和目标点在平面 M 中所对应的坐标

$$\begin{bmatrix} U_d \\ V_d \\ W_d \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} U_z \\ V_z \\ W_z \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} U_g \\ V_g \\ W_g \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R^{-1} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ 1 \end{bmatrix}$$

(29)

根据机器人末端、障碍物和目标点在平面 M 的坐标,利用转换矩阵 $\boldsymbol{T}_R$ 将平面的受力转换为机器人末端在空间环境的受力为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\text{rep}x} \\ \boldsymbol{F}_{\text{rep}y} \\ \boldsymbol{F}_{\text{rep}z} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_R \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\text{rep}x_c} \\ \boldsymbol{F}_{\text{rep}y_c} \\ \boldsymbol{F}_{\text{rep}z_c} \\ 1 \end{bmatrix}$$

(30)

其中, $\boldsymbol{F}_{\text{rep}x_c}$ 、 $\boldsymbol{F}_{\text{rep}y_c}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\text{rep}z_c}$ 为机器人在 $P_c UVW$ 坐标系 x 、 y 和 z 轴上所受分力。由式(3)与式(19)~(21)可得机器人末端在平面环境中的引力 $\boldsymbol{F}_{\text{att}}(\boldsymbol{x}_d)$ 和斥力 $\boldsymbol{F}_{\text{rep}}(\boldsymbol{x}_d)$,同时结合式(14)、(15)得到机器人下一步位移,从而实现机器人末端在空间环境中的避障路径规划。

2.3 结合机器人大小臂含避障角的人工势场法

为了实现 6 自由度机器人末端避障在实际环境中的应用,既考虑机器人大小臂构型配置^[27],避免机器人大小臂发生碰撞,又考虑因大小臂共线出现奇异,这两种情况的发生,需要计算将机器人小臂作为障碍物对机器人末端产生的斥力。

如图 4 所示,设机器人关节逆时针转动为正,夹角 α 为

$$\alpha = \pi/2 - \alpha_2 + \alpha_3$$

(31)

式中 α_2 ——机器人小臂转动角
 α_3 ——机器人小臂转动角

已知机器人大小臂结构尺寸以及夹角 α ,如图 5 所示,根据直角三角形定律,可得出机器人末端与小臂之间垂直距离为

$$\begin{cases} l_{BC} = l_{AB} \sin \alpha \\ l_{AC} = l_{AB} \cos \alpha \end{cases}$$

(32)

式中 l_{AB} ——机器人小臂长度
 l_{AC} ——机器人小臂在大臂上的投影
 l_{BC} ——机器人小臂末端与大臂之间垂直距离

机器人上点 $A = (X_A, Y_A, Z_A)$ 、点 $B = (X_B, Y_B, Z_B)$ 、点 $D = (X_D, Y_D, Z_D)$ 、点 $C = (X_C, Y_C, Z_C)$ 4 点联立方程组可得

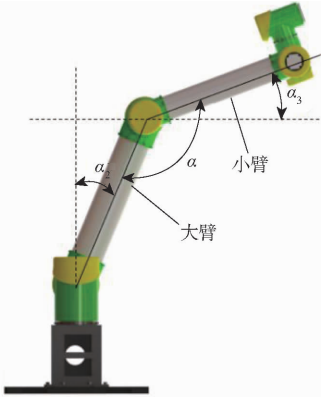


图 4 6 自由度机器人大小臂之间的夹角

Fig. 4 Angle between large and small arms of 6-DOF robot

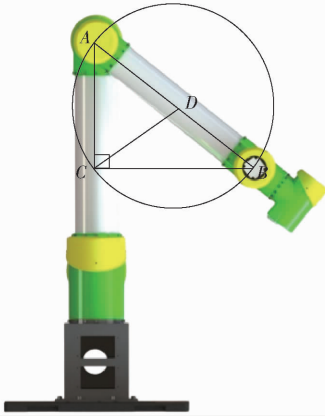


图 5 直角三角形的外接圆

Fig. 5 Outer circle of a right triangle

$$\begin{cases} (X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2 + (Z_A - Z_C)^2 = l_{AC}^2 \\ (X_B - X_C)^2 + (Y_B - Y_C)^2 + (Z_B - Z_C)^2 = l_{BC}^2 \\ (X_D - X_C)^2 + (Y_D - Y_C)^2 + (Z_D - Z_C)^2 = l_{DC}^2 \end{cases} \quad (33)$$

由于机器人大小臂结构配型已知,根据机器人正运动学可以求出点 A 、 B 坐标,再基于三角形外接圆原理,求解式 (33) 可以得出点 C 坐标,确定机器人 大臂对机器人末端产生的斥力 $F_{\text{rep}_{\text{BC}}}$ 为

$$F_{\text{rep}_{\text{BC}}} = \begin{cases} \frac{1}{\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d\|} & (\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d\| \leq m_0) \\ 0 & (\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d\| > m_0) \end{cases} \quad (34)$$

式中 m_0 ——大臂对小臂排斥距离阈值

当 BC 长度超过大臂对小臂排斥距离阈值时,机器人 大臂对机器人末端产生的斥力为 0,反之则不为 0,此时斥力方向由点 B 指向点 C 。由式 (34) 对式 (16) 进行调整,机器人新的合力求解公式是目标点对机器人产生的引力和多个障碍物对机器人产生的斥力的合力加上机器人 大臂对机器人末端产生的斥力,即

$$F_{\text{sum}} = F_{\text{att}} + \sum_i^n F_{\text{rep}_i} + F_{\text{rep}_{\text{BC}}} \quad (35)$$

由式 (25) ~ (27),最终完成 6 自由度机器人末端在实际环境中的避障路径规划。

3 仿真

为了验证本文避障路径规划方法的有效性,在 Matlab 环境中进行了仿真。

3.1 平面环境中仿真

为了验证含避障角的人工势场法在平面环境中的可行性。在直角坐标系下,设起始点坐标为 $(0, 0)$,目标点坐标为 $(10 \text{ mm}, 10 \text{ mm})$,障碍物采用球体包络^[28],其中心坐标分别为 $(2.2 \text{ mm}, 2.2 \text{ mm})$ 、 $(2.9 \text{ mm}, 3.1 \text{ mm})$ 、 $(3.1 \text{ mm}, 2.9 \text{ mm})$ 、 $(4 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 、 $(6 \text{ mm}, 6.2 \text{ mm})$ 、 $(5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 、 $(8 \text{ mm}, 8.5 \text{ mm})$ 和 $(6.8 \text{ mm}, 7.5 \text{ mm})$,取 k_{att} 为 7, k_{rep} 为 10, L_{step} 为 0.1 mm, ρ_f 为 1 mm, k_z 和 k_f 均相等。图 6 为利用基于距离的人工势场法进行避障。由图 6 可以看出陷入局部极小值情况。

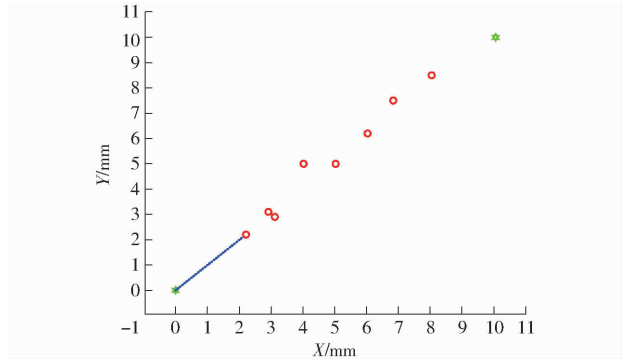


图 6 基于距离的人工势场法第一类局部极小值现象

Fig. 6 Distance-based artificial potential field method for class I local minima phenomena

图 7 为通过改变第 1 个障碍物中心坐标为 $(2.2 \text{ mm}, 8 \text{ mm})$,可以构建出图 1b 中障碍物避障情形,利用基于距离的人工势场法避障,此时目标点对机器人产生的引力与障碍物对机器人产生的斥力大小相同方向相反,从而使机器人无法绕开障碍物到达目标点,陷入局部极小值。

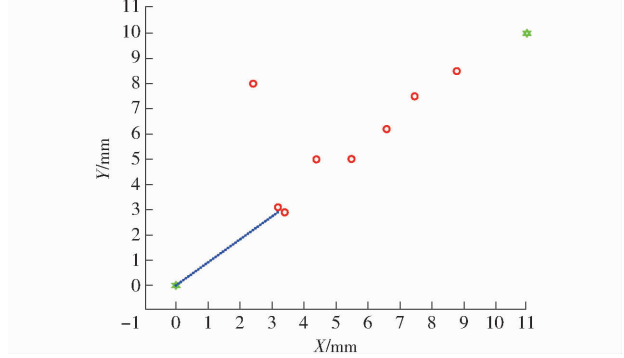


图 7 基于距离的人工势场法第二类局部极小值现象

Fig. 7 Distance-based artificial potential field method for class II local minima phenomena

保持其他条件不变,通过设定 k_x 为 1, k_f 为 1.5,同时采用含避障角的人工势场法实现动态调整排斥力的偏转角,使机器人能够绕开障碍物到达目标点,成功克服路径规划中因为目标点对机器人产生的引力和多个障碍物对机器人产生的斥力的合力为零而陷入局部极小值的问题,如图 8、9 所示,路径平滑安全无振荡。

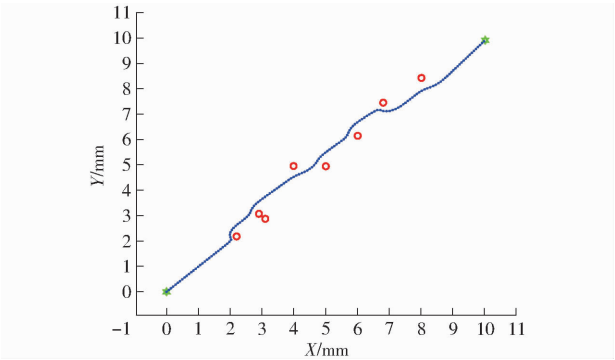


图 8 含避障角的人工势场法克服第一类局部极小值
Fig. 8 Artificial potential field method with obstacle avoidance angles to overcome type I local minima

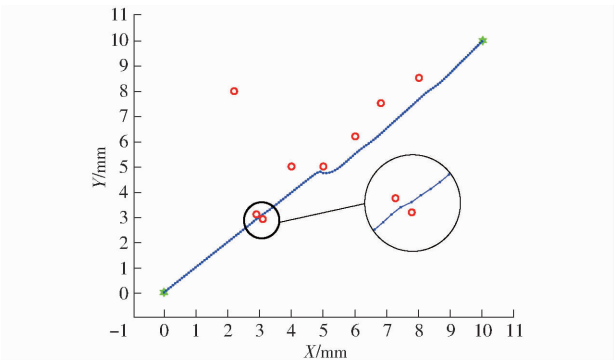


图 9 含避障角的人工势场法克服第二类局部极小值
Fig. 9 Artificial potential field method with obstacle avoidance angles to overcome type II local minima

3.2 空间环境中仿真

设起始点坐标为 (0, 0, 0)、终止点坐标为 (6 mm, 6 mm, 6 mm) 和障碍物采用球体包络中心坐标为 (3 mm, 3 mm, 3 mm)。取 k_{att} 和 k_{rep} 均为 7, ρ_f 为 2 mm, k_z 为 1, k_f 为 1.5。通过在空间环境中建立坐标系来进行机器人末端受力分析,利用圆弧插补理论完成机器人平面避障至空间避障的转换,进而得出机器人下一步位移,从而得出利用含避障角的人工势场法的避障路径规划曲线,如图 10 所示。

设起始点坐标和目标点坐标不变,两个障碍物采用球体包络中心坐标分别为 (2 mm, 2.2 mm, 2.2 mm) 和 (4 mm, 4 mm, 3.8 mm),利用含避障角的人工势场法得出轨迹曲线。如图 11 所示,含避障角的人工势场法在复杂的空间环境中也能够规划出平

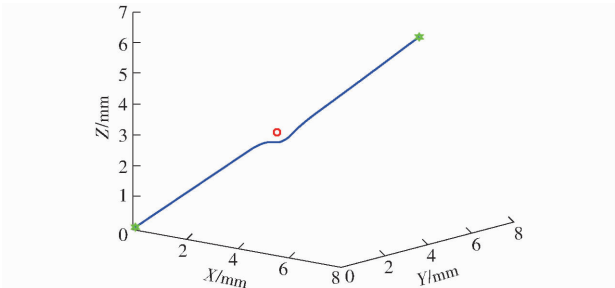


图 10 含避障角的人工势场法在空间环境中图 2a 的应用
Fig. 10 Artificial potential field method with obstacle avoidance angle in spatial environments Fig. 2a

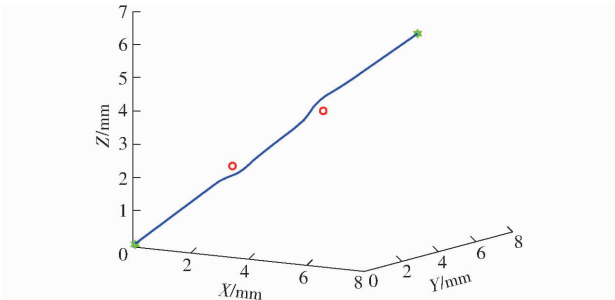


图 11 含避障角的人工势场法在空间环境中图 2b 的应用
Fig. 11 Artificial potential field method with obstacle avoidance angle in spatial environments Fig. 2b

滑安全无碰撞的路径曲线,进一步证实了算法的可靠性与有效性。

3.3 结合机器人大小臂仿真

6 自由度机器人在初始状态时,机器人末端坐标为 (827 mm, -250 mm, 1 031 mm)。目标点坐标为 (1 167 mm, 290 mm, 1 101 mm),两个障碍物采用圆形包络中心坐标分别为 (929 mm, -88 mm, 1 052 mm) 和 (1 080 mm, 74 mm, 1 073 mm),取障碍物球体包络半径为 55 mm。取 k_{att} 为 20, k_{rep} 为 55, ρ_f 为 95 mm, k_z 为 12, k_f 为 15, L_{step} 为 5 mm, m_0 为 470 mm,如图 12 为 6 自由度机器人从初始状态开始,成功避开 2 个障碍物到达目标点位置的过程,可以看出含避障角的人工势场算法在执行避障路径规划时,不仅没有出现局部极小值情况,而且整个避障曲线连续平滑且无振荡,进一步证实了含避障角算法的有效性与可靠性。

机器人末端在避障过程中,各轴方向的速度变化曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出,在无障碍物时,机器人末端在各轴方向上的速度平稳连续,在每次接近遇到障碍物时,各轴方向上的速度有所下降,完成避障后,速度会迅速提高至平稳连续,使机器人运动速度平稳,确保了避障的有效性。

机器人进入障碍物的影响范围时,障碍物会对机器人产生一个斥力 $F_{rep}(x_d)$,此时位移路径会与理想位移路径之间形成位置误差,如图 14 所示。由

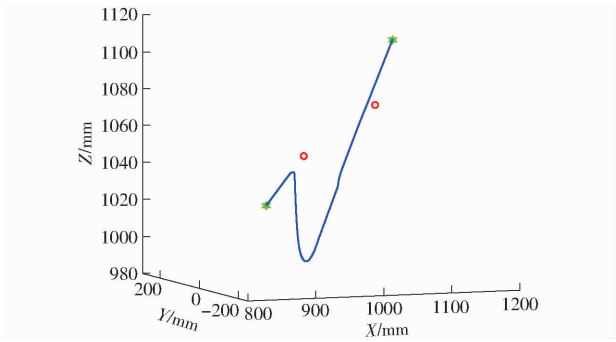


图 12 含避障角的人工势场法在 6 自由度机器人中的应用

Fig. 12 Artificial potential field method with obstacle avoidance angle in 6-DOF robot

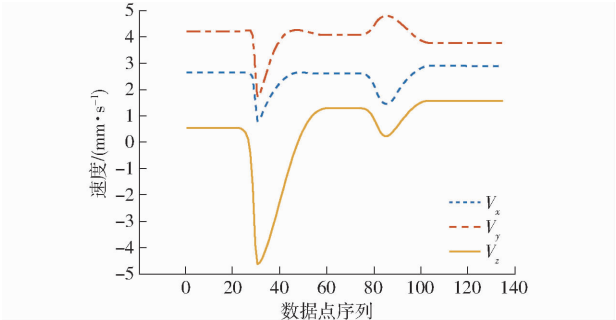


图 13 轨迹对应的各轴速度

Fig. 13 Velocity of each axis corresponding to trajectory

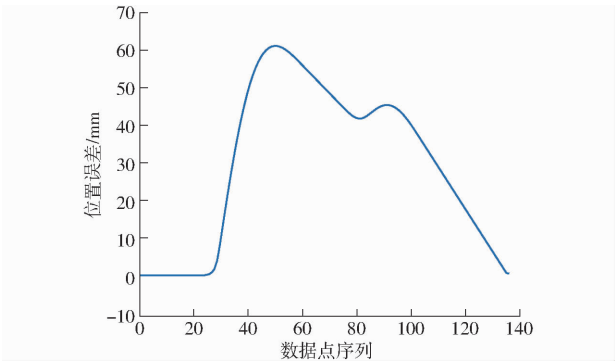


图 14 6 自由度机器人轨迹位置误差

Fig. 14 6-DOF robot trajectory position error

图 14 可知,机器人与障碍物不发生碰撞时,形成的位置误差较小,且一直保持在障碍物的影响范围之内,此时能够进一步提升含避障角人工势场法的有效性。

运用机器人逆运动学方程,在 6 自由度机器人避障运动路径中各个关节转角变化曲线如图 15 所示。由图 15 可知,整个机器人运动过程中各个关节转角变化平稳连续,能满足实际工作生产的需求。

4 实验验证

实验平台如图 16 所示,主要包括 6 自由度机器人、电气控制柜、2 个半径 55 mm 球形障碍物和 Kinect 视觉系统。

基于 Kinect 视觉系统得出机器人末端初始点

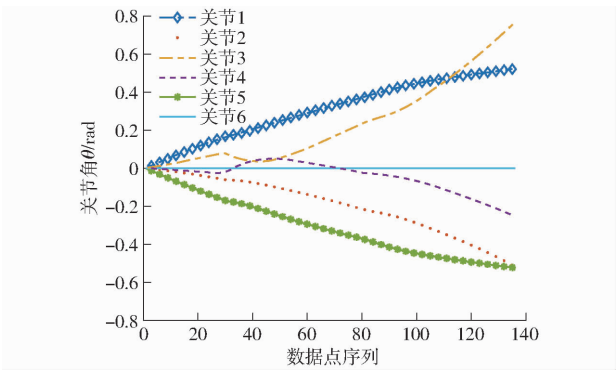


图 15 6 自由度机器人各关节变化曲线

Fig. 15 Variation curves for each joint of 6-DOF robot

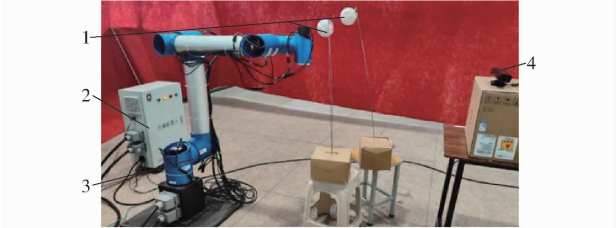


图 16 实验平台

Fig. 16 Test bed

1. 球形障碍物 2. 电气控制柜 3. 6 自由度机器人 4. Kinect 视觉系统

位姿为 $(836\text{ mm}, 250\text{ mm}, 750\text{ mm}, -90^\circ, 0, 0)$ 、目标点位姿为 $(892\text{ mm}, 530\text{ mm}, 896\text{ mm}, -90^\circ, 0, 0)$ 、2 个障碍物采用圆形包络中心坐标分别为 $(866.8\text{ mm}, 404\text{ mm}, 830.3\text{ mm})$ 和 $(883.6\text{ mm}, 488\text{ mm}, 864.1\text{ mm})$ 。取 k_{att} 为 20, k_{rep} 为 15, ρ_f 为 95 mm, k_z 为 12, k_f 为 15, L_{step} 为 5 mm, m_0 为 470 mm, 得出避障运动过程如图 17 所示,可以看出机器人在自由空间里成功绕过障碍物到达目标点。

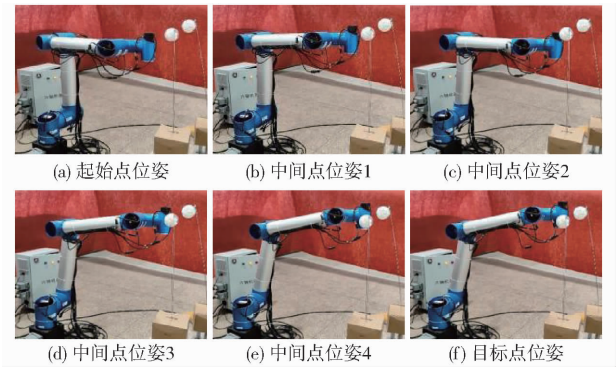


图 17 6 自由度机器人避障运动过程

Fig. 17 Obstacle avoidance motion process of 6-DOF robot

图 18 为机器人末端在避障路径规划中的位移曲线。由图 18 可知,各轴在遇到起始点、障碍物和目标点三者共线或不共线的两种情况时,利用含避障角的人工势场法都能够无碰撞地完成从起始点至目标点的运动,各轴位移在避障路径中碰到障碍物时会有小幅度的变化,但很快至平稳连续。

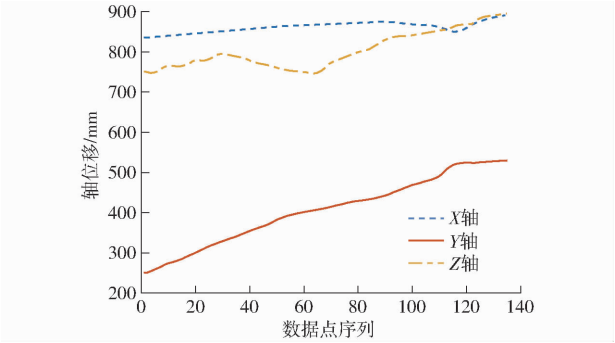


图 18 避障路径曲线在各轴上变化曲线

Fig. 18 Variation curves of obstacle avoidance path curves on each axis

机器人避障过程中,各个关节转角及角速度变化曲线分别如图 19、20 所示。根据曲线可以发现,机器人各个关节转角变化连续,由于各个关节角速度变化曲线波动也很小,因此运动过程中不会出现较大的冲击,能满足机器人实际的运行条件。

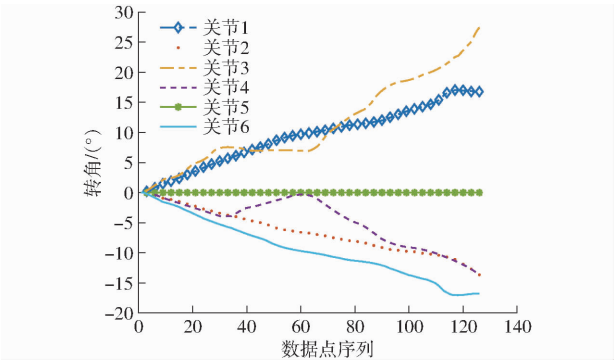


图 19 6 自由度机器人在避障过程中各关节变换曲线

Fig. 19 Angle transformation curves for each joint of 6-DOF robot during obstacle avoidance

当机器人处于障碍物的影响范围之内时,会受到障碍物产生的 $F_{rep}(\mathbf{x}_d)$ 影响,从而机器人运动轨迹会与理想运动轨迹产生偏离量,如图 21 所示。由图 21 可以看出,机器人在保证不发生碰撞的前提下,机器人运动路径与理想运动路径之间不会产生较大的位置偏差,一直保持在障碍物的影响范围之内,能够满足机器人高效运动的条件。

5 结论

(1)在基于距离的人工势场法的基础上,针对在机器人路径规划中存在的局部极小值问题,提出了一种基于 6 自由度机器人含避障角的人工势场

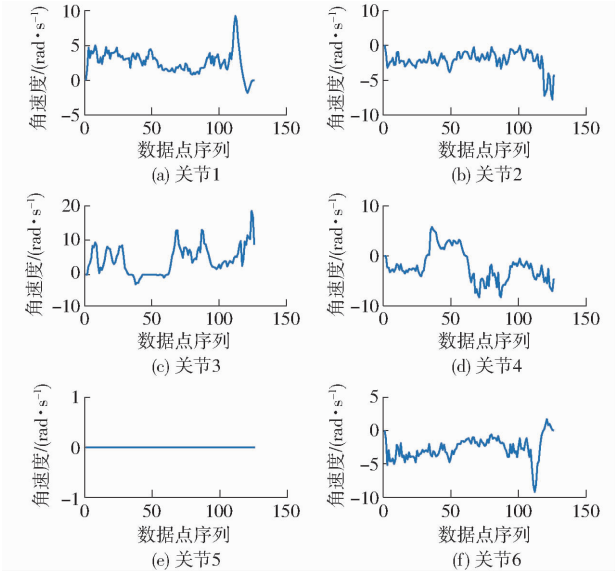


图 20 6 自由度机器人各关节角速度曲线

Fig. 20 Angular velocity profile of each joint of 6-DOF robot

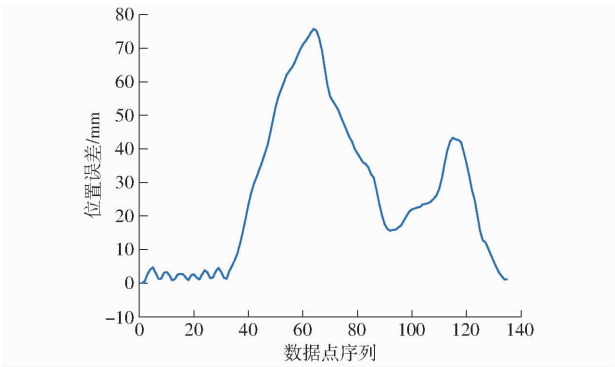


图 21 机器人末端运动曲线与理想运动曲线之间的位置误差

Fig. 21 Position error between robot end motion profile and ideal motion profile

法。在平面环境中采用斜率判定当前点与障碍物之间的位置关系,并利用障碍物的影响半径以及当前点与障碍物的距离,实现动态调整排斥力的偏转角度,摆脱了局部极小值问题。

(2)在空间环境中提出基于圆弧插补理论完成机器人从平面避障至空间避障的转换,同时结合机器人实际工作情况以及机器人构型配置对避障算法进一步完善。

(3)对 6 自由度机器人避障路径规划仿真和实验结果表明,含避障角的人工势场法能够有效地躲避障碍物,在实际实验环境中机器人能够持续平稳地运动。

- duct considering obstacle avoidance[J]. Robot,2019,41(5):690–696. (in Chinese)
- [2] LOZANO-PEREZ T. Spatial planning: a configuration space approach[J]. IEEE Trans. Computers,1983,32(2):108–120.
- [3] LOZANO-PEREZ T. Automatic planning of manipulator transfer movements[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1981,11(10):681–698.
- [4] 曹如月,张振乾,李世超,等. 基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):548–554.
- CAO Ruyue,ZHANG Zhenqian,LI Shichao,et al. Muti-machine cooperation global path planning based on A-star algorithm and Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):548–554. (in Chinese)
- [5] 劳彩莲,李鹏,冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(1):14–22.
- LAO Cailian,LI Peng,FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):14–22. (in Chinese)
- [6] BAGHLI F Z,LAKHA Y. Optimization of arm manipulator trajectory planning in the presence of obstacles by ant colony algorithm[J]. Procedia Engineering,2017,181:560–567.
- [7] 刘建华,杨建国,刘华平,等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法[J]. 农业机械学报,2015,46(9):18–27.
- LIU Jianhua,YANG Jianguo,LIU Huaping,et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):18–27. (in Chinese)
- [8] 韩尧,李少华. 基于改进人工势场法的无人机航迹规划[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(11):3305–3311.
- HAN Yao,LI Shaohua. UAV path planning based on improved artificial potential field[J]. Systems Engineering and Electronics,2021,43(11):3305–3311. (in Chinese)
- [9] 李东方,李科伟,邓宏彬,等. 基于人工势场与 IB-LBM 的机器蛇水中 2D 避障控制算法[J]. 机器人,2018,40(3):346–359.
- LI Dongfang,LI Kewei,DENG Hongbin,et al. A 2D aquatic intelligent obstacle avoidance algorithm based on artificial potential field and IB-IBM[J]. Robot,2018,40(3):346–359. (in Chinese)
- [10] 郝琨,张慧杰,李志圣,等. 基于改进避障策略和双优化蚁群算法的机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2022,53(8):303–312,422.
- HAO Kun,ZHANG Huijie,LI Zhisheng,et al. Path planning of mobile robot based on improved obstacle avoidance strategy and double optimization ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):303–312,422. (in Chinese)
- [11] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986,5:90–98.
- [12] 姬伟,程风仪,赵德安,等. 基于改进人工势场的苹果采摘机器人机械手避障方法[J]. 农业机械学报,2013,44(11):253–259.
- JI Wei,CHENG Fengyi,ZHAO Dean,et al. Obstacle avoidance method of apple harvesting robot manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):253–259. (in Chinese)
- [13] 宋建辉,代涛,刘砚菊. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与科学,2017,39(7):1328–1332.
- SONG Jianhui,DAI Tao,LIU Yanju. Path planning of mobile robots based on improved artificial potentialfield method[J]. Computer Engineering and Science,2017,39(7):1328–1332. (in Chinese)
- [14] 曹博,毕树生,郑晶翔,等. 改进人工势场法的冗余机械臂避障算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(7):184–191.
- CAO Bo,BI Shusheng,ZHENG Jingxiang,et al. Obstacle avoidance algorithm for redundant manipulator of improved artificial potential field method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(7):184–191. (in Chinese)
- [15] 袁朝春,翁烁丰,何友国,等. 基于改进人工势场法的路径规划决策一体化算法研究[J]. 农业机械学报,2019,50(9):394–403.
- YUAN Chaochun,WENG Shuofeng,HE Youguo,et al. Integration algorithm of path planning and decision-making based on improved artificial potential field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):394–403. (in Chinese)
- [16] 汪波,张建勋,侯之旭. 应用人工势场算法的智能车路径规划[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(6):107–111.
- WANG Bo,ZHANG Jianxun,HOU Zhixu. Path planning for intelligent vehicle based on artificial potential field method[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2015,29(6):107–111. (in Chinese)
- [17] 修彩靖,陈慧. 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J]. 汽车工程,2013,35(9):808–811.
- XIU Caijing,CHEN Hui. A research on local path planning for autonomous vehicles based on improved APF method[J]. Automotive Engineering,2013,35(9):808–811. (in Chinese)
- [18] 何兆楚,何元烈,曾碧. RRT 与人工势场法结合的机械臂避障规划[J]. 工业工程,2017,20(2):56–63.
- HE Zhaochu,HE Yuanlie,ZENG Bi. Obstacle avoidance path planning for robot arm based on mixed algorithm of artificial potential field method and RRT[J]. Industrial Engineering Journal,2017,20(2):56–63. (in Chinese)
- [19] 王俊龙,张国良,羊帆,等. 改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J]. 计算机工程与应用,2013,49(21):266–270.
- WANG Junlong,ZHANG Guoliang,YANG Fan,et al. Improved artificial field method on obstacle avoidance path planning for manipulator[J]. Computer Engineering and Applications,2013,49(21):266–270. (in Chinese)

- [20] 付泽民,余奇,熊鹏鹏,等. 基于改进人工势场法的机械臂路径规划仿真[J]. 机床与液压,2021,49(17):20–24.
FU Zemin,YU Qi,XIONG Pengpeng,et al. Silulation of path planning of manipulator based on improved artificial potential field method[J]. Machine Tool and Hydraulics,2021,49(17):20–24. (in Chinese)
- [21] 李龙,陈禾炜,汪田鸿,等. 基于接近觉的机械臂避障路径规划[J]. 机器人,2022,44(5):601–612.
LI Long,CHEN Hewei,WANG Tianhong,et al. Obstacle avoidance path planning of manipulator based on proximity[J]. Robot, 2022,44(5):601–612. (in Chinese)
- [22] LIU Lifen,SHI Ruoxin,LI Shuandao,et al. Path planning for UAVS based on improved artificial potential field method through changing the repulsive potential function[C]//2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference(CGNCC), 2016:2011–2015.
- [23] BOUNINI F, GINGRAS D, POLLART H, et al. Modified artificial potential field method for online path planning applications [C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2017: 180–185.
- [24] 齐有泉,李艳文,陈子明,等. 串联九自由度喷涂机器人及其运动学分析[J]. 机械工程学报,2020,56(23):165–171.
QI Youquan,LI Yanwen,CHEN Ziming,et al. Design and kinematics' anlying of a series nine-degree-of-freedom spraying robot[J]. Journal of Mechanical Engineering,2020,56(23):165–171. (in Chinese)
- [25] 王学雷,张宾,徐松兵,等. 五自由度混联机构圆弧插补算法研究[J]. 农业机械学报,2017,48(12):403–411.
WANG Xuelei,ZHANG Bin,XU Songbing,et al. Spatial arc interpolation analysis of novel 5-DOF hybrid mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):403–411. (in Chinese)
- [26] TIRNOVEAN M S. Researches regarding the circular interpolation algorithms at CNC laser cutting machines[J]. ACTA Universitatis Cibiniensis,2015, 67(1): 127–132.
- [27] 李宪华,盛蕊,张雷刚,等. 六自由度模块化机器人手臂奇异构型分析[J]. 农业机械学报,2017,48(7):376–382.
LI Xianhua,SHENG Rui,ZHANG Leigang,et al. Singular configuration analysis of 6-DOF modular manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):376–382. (in Chinese)
- [28] 贾庆轩,陈钢,孙汉旭,等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报,2010,46(13):109–115.
JIA Qingxuan,CHEN Gang,SUN Hanxu,et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(13):109–115. (in Chinese)

(上接第 408 页)

- [21] DU G D, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Deep reinforcement learning based energy management for a hybrid electric vehicle [J]. Energy, 2020, 201: 1–13.
- [22] DU G D, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Energy management for a hybrid electric vehicle based on prioritized deep reinforcement learning framework[J]. Energy, 2022, 241: 1–18.
- [23] YUAN Z, TENG L, LIU D, et al. Reinforcement learning-based real-time energy management for a hybrid tracked vehicle [J]. Applied Energy, 2016, 171: 372–382.
- [24] WEI S, YUAN Z, SUN F, et al. Energy management optimization for a hybrid tracked vehicle using the radius pseudo spectral method[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 957–963.
- [25] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 109–121.
WAN Xingyu,SHU Caixia,LIAO Qingxi,et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 109–121. (in Chinese)
- [26] 廖宜涛,李运通,万星宇,等. 龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 147–159.
LIAO Yitao,LI Yuntong,WAN Xingyu,et al. Design and experiment of gantry type electric drive rapeseed stalks harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 147–159. (in Chinese)
- [27] 彭继文,廖建国,康滨,等. SCC12000TM 履带式起重机机电液联合仿真结果与分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 156–158, 181.
PENG Jiwen,LIAO Jianguo,KANG Bin,et al. Results and analysis of mechanical-electrical-hydraulic co-simulation of the SCC12000TM crawler crane[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(4): 156–158,181. (in Chinese)
- [28] 朱晨辉. 履带式烟叶采收机液压行驶系统设计及控制方法研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
ZHU Chenhui. Research on design and control method of hydraulic driving system of crawler tobacco harvester [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [29] 司癸卯,赵明,苟颖,等. 基于 AMESim 的轮履复合式底盘液压系统仿真[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(2): 120–124.
SI Guimao,ZHAO Ming,GOU Ying,et al. Simulation on hydraulic system for composite chassis of wheel and crawler based on AMESim[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, 16(2): 120–124. (in Chinese)