

## 基于改进人工势场法的双机械臂避障路径规划

薛阳 俞志程 吴海东 张宁 孙越

(上海电力学院 自动化工程学院, 上海 200090)

**摘要** 针对双6自由度机械臂提出了一种基于改进人工势场法的避障路径规划算法。分析了双机械臂的协作工作空间, 确认了双臂自碰撞的可能。针对静态障碍物对主机械臂进行避障运动规划, 完成主机械臂路径规划后, 再将主机械臂作为从机械臂运动时的动态障碍物, 为从机械臂规划避障运动路径。利用新的势能函数代替传统人工势场法的势能函数, 对双机械臂进行避障路径规划; 由于传统人工势场法在机械臂避障路径规划中容易陷入局部极小值的缺陷, 因此, 增加了虚拟吸引点, 避免机械臂陷入局部极小值。仿真实验表明, 该方法实现简单, 满足双机械臂避障的要求, 能够有效地为双机械臂规划出无碰撞路径。

**关键词** 路径规划 机械臂 人工势场法

### Obstacle Avoidance Path Planning for Double Manipulator based on Improved Artificial Potential Field Method

Xue Yang Yu Zhicheng Wu Haidong Zhang Ning Sun Yue

(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract** An obstacle avoidance path planning algorithm based on improved artificial potential field method is proposed for dual 6-DOF manipulator. Firstly, the cooperative working space of double manipulator is analyzed, and the possibility of self-collision is confirmed. Secondly, obstacle avoidance motion planning is carried out for the main arm against static obstacles, and path planning for the main arm is completed. Then, the main arm is taken as the dynamic obstacle when the slave arm moves, and obstacle avoidance motion path is planned for the slave arm. The new potential energy function is used to replace the potential energy function of the traditional artificial potential field method to carry out obstacle avoidance path planning for the double manipulator. Since the traditional artificial potential field method is easy to fall into the defect of local minimum value in the obstacle avoidance path planning of the manipulator, the virtual attraction point is added to avoid this situation. Simulation results show that this method is easily realized and can meet the requirements of double manipulator obstacle avoidance. It can effectively plan a collision-free path for the dual 6-DOF manipulator.

**Key words** Path planning Mechanical arm Artificial potential field method

## 0 引言

机器人技术的发展和广泛应用, 促进了国家生产力的提高和整个社会的进步, 也促进了人们生活的改善, 机器人和机器人产品越来越多地渗透到人们的工作和生活中。机械臂是现实生活以及社会生产中最早使用的机器人之一, 有许多任务需要两个或更多机械臂的协同操纵, 诸如提升重物或组装配合部件的任务中, 两个机械臂必须互相配合工作。协作的多机械臂系统被定义为处理共同物体的多个

机器人的系统, 以此形成闭合的运动链<sup>[1]</sup>。在实际工作过程中, 机械臂的工作环境非常复杂, 外部可能存在很多障碍物, 并且多个机械臂会在同一时间工作, 研究机械臂相互之间的避障问题是不可或缺的<sup>[2]</sup>。因此, 如何规划机械臂的运动路径, 有效避开障碍物, 对机械臂的工作成效具有重要意义。

对于机械臂的避障方法, 人工势场法是一种比较成熟、高效的方法, 它不需要在预先规划空间中使用大量数据, 而是实时检测环境信息。该方法认

为目标位置是一个有吸引力的来源，而障碍物是排斥源，通过计算机机械臂末端当前位置排斥和重力的方向来使其最终到达目标。人工势场法通常会有良好的效果，可以实现对动态环境的快速响应。但是，这种方法也被广泛证明具有不可避免的缺点，即算法会陷入局部最小以及会面临振荡问题。文献[3]利用改进的快速扩展随机树算法与人工势场法结合，对双机械臂进行避障路径的规划，该方法通过建立虚拟目标点来解决算法陷入局部最小值问题，但算法的结合使得算法复杂程度上升，路径规划效率变低；文献[4]<sup>266-270</sup>通过在局部极小附近添加虚拟障碍物产生虚拟斥力势能来解决局部极小问题，但该方法对关节角度求解要求高，小角度偏差都会对算法结果产生影响；文献[5]通过改进势函数，构建吸引速度与排斥速度，使得机械臂具备避开动态障碍的能力，同时加入添加虚拟障碍的策略，使机械臂逃出局部极值。

本文中提出一种改进的人工势场方法，以解决双6自由度机械臂的避障问题。构造了新的引力势能函数以及斥力势能函数，保留了传统人工势场法的优点，同时也改善了传统人工势场法的缺点。针对人工势场方法容易陷入局部最优解的问题，增加虚拟吸引点，使得机械臂能够摆脱局部极小。实验结果表明，该方法可以有效地解决双6自由度机械臂的避障问题，可以有效避免局部最优解。

### 1 双机械臂运动学建模与分析

#### 1.1 双机械臂正运动学方程的DH表示

以安川公司生产的 Motoman ES165D 机械臂作为参考研究对象，其最后3个关节轴线相交于一点，为6自由度机械臂经典的设计，其具体尺寸参数如图1所示。

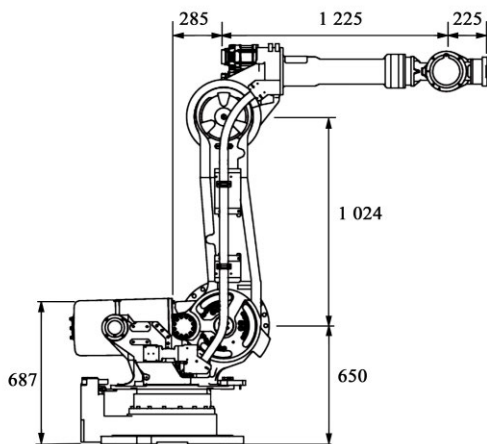


图1 参考机械臂尺寸参数图(单位: mm)

Fig. 1 Dimension parameters of reference manipulator

在关节式机械臂的运动学分析中，为了描述末端执行器在空间中的位置和姿态，会建立每个连杆上的笛卡尔坐标系。建立坐标系的方法有很多种，本文中采用DH(Denavit Hartenberg, DH)参数的方法建立主从机械臂的坐标系<sup>[6]</sup>。

对于6自由度串联机械臂而言，其每个关节的旋转运动都有可能导致机械臂的连杆与障碍物间发生碰撞。为了尽可能简化计算过程，需要对研究对象 Motoman ES165 D型机械臂本体结构进行抽象，将机械手臂的各个部分抽象为一系列刚性连杆，主、从机械臂都可以看作是一种开链式多连杆机构。根据其运动参数，利用DH方法建立主机机械臂的坐标系如图2所示，并列出了主机机械臂的DH参数(表1)。另外，从机械臂与主机机械臂以机器人本体为镜像对称，故此主机机械臂的DH参数 $\alpha$ 、 $\theta$ 与从机械臂DH参数互为相反数<sup>[7]</sup>。

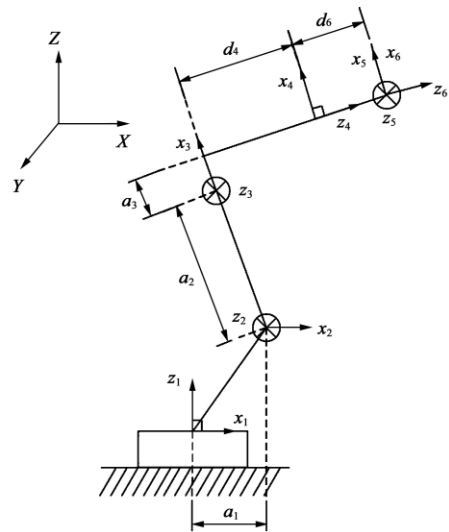


图2 主机机械臂坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system of main manipulator

表1 主机机械臂的DH参数

Tab. 1 DH parameters of main manipulator

$i$	$\theta_i$	$d_i/\text{mm}$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$\alpha_{i-1}$
1	$\theta_1$	0	0.285	0
2	$\theta_2$	0	1.024	$-\pi/2$
3	$\theta_3$	0	0.250	0
4	$\theta_4$	1.225	0	$-\pi/2$
5	$\theta_5$	0	0	$\pi/2$
6	$\theta_6$	0.225	0	$-\pi/2$

在DH模型中，机械臂相邻连杆之间的位置关系可由4个参数 $\alpha_{i-1}$ 、 $a_{i-1}$ 、 $d_i$ 及 $\theta_i$ 来确定。其中， $\alpha_{i-1}$ 代表扭角，为常量，由连杆的属性决定； $a_{i-1}$ 代表连杆长度，为常量； $d_i$ 代表连杆偏置距离； $\theta_i$ 代表关节角。

### 1.2 机械臂的正运动学求解

完成机械臂的DH表示后，对机械臂进行正运动学求解，即通过已知连杆关节变量值得到末端的姿

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

由DH法，已经得到两个机械臂的关节以及连杆之间的参数，下面对主机机械臂进行正运动学求解，将主机机械臂DH参数代入式(1)得

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0.285 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 1.024 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0.250 \\ 0 & 0 & 1 & 1.225 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.225 \\ -\sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将上述矩阵相乘即可得到主机机械臂末端执行器坐标系相对于基坐标系的位姿变换矩阵，即

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$ 为姿态向量，表示了该坐标系相

对于参考坐标系的姿态； $[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 表示了该坐标系的X轴方向； $[o_x \ o_y \ o_z]^T$ 表示了该坐标系的Y轴方向； $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 表示了该坐标系的Z轴方向； $[p_x \ p_y \ p_z]$ 为末端执行器当前位置的坐标值。

态和坐标位置。机械臂相邻连杆之间的齐次变换坐标矩阵为<sup>[8]</sup>

## 2 人工势场法的改进

1986年，Khatib首次提出了人工势场算法用于机器人避障。该算法建立了一种包括引力场和排斥力场的人工势场<sup>[9]</sup>。引力场中，随着机械臂和目标位置之间的距离减小，引力也会随之减小，当机械臂位于初始位置时，其末端的引力是所有运动过程中的最大值，引力方向是从机械臂到目标位置。排斥力场中，排斥力随着机械臂和障碍物之间的距离增大而减小，排斥力的方向是从障碍物到机械臂。整个人工势场是引力和排斥力的叠加。

若机械臂末端当前位置坐标为X，目标点位置坐标为X<sub>g</sub>，机械臂与障碍物距离为d，斥力场半径范围为d<sub>0</sub>，则重力势函数和排斥势函数定义为

$$U_{\text{att}} = \frac{k_a}{2} |X - X_g|^2 \quad (9)$$

$$U_{\text{rep}} = \begin{cases} \frac{k_r}{2} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中，k<sub>a</sub>为引力常数；k<sub>r</sub>为斥力常数。

由引力场与排斥力场所生成的引力与斥力为对应势能的负梯度，即

$$F_{\text{att}} = -\nabla U_{\text{att}} = -k_a |X - X_g| \quad (11)$$

$$F_{\text{rep}} = -\nabla U_{\text{rep}} = \begin{cases} k_r \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d^2} \frac{\partial d}{\partial X}, & d \leq d_0 \\ 0, & d > d_0 \end{cases} \quad (12)$$

人工势场法存在一些不足，如在避障路径规划过程中，人工势场法容易陷入局部极小值。当机械臂达到一定位置时，障碍物对机械臂产生的斥力与目标点对机械臂的引力之和为0。当处于这种状态时，机械臂将停在当前位置，无法继续向目标移动<sup>[10]</sup>。

如果在笛卡尔空间中对机械臂进行避障路径规划，则在每次规划一个空间点，然后检查每个关节是否存在碰撞时，需要进行逆运动学求解。机械臂的运动学求逆解是一个高度复杂的非线性操作，这将大大增加人工势场避障路径规划算法的复杂度，因此，传统的人工势场方法很难直接用于求解机械臂的避障路径规划问题，也就是很难找出一条安

全、没有碰撞的路径，而双机械臂的复杂程度更会大大增加<sup>[11]</sup>。

基于以上问题，在考虑机械臂避障路径规划过程中所涉及要素的基础上，将传统人工势场法根据目标点位置和机械臂各个关节角度，重新建立新的引力势能函数和斥力势能函数，使机械臂完成避障行为，机械臂的移动方向由各个关节产生的合势能决定，当机械臂的合势能为0时，机械臂停止运动。

基于目标点的空间坐标和各关节到目标点角度，新的引力势能函数构建如下

$$U_{\text{aat}}^* = \frac{k_a}{2} \left( |X - X_g|^2 + \sum_{i=1}^6 |\theta_i - \theta_{gi}|^2 \right) \quad (13)$$

式中， $k_a$ 为引力常数； $X$ 为机械臂末端当前位置坐标； $X_g$ 为目标点位置坐标； $\theta_i$ 为相应的第 $i$ 个关节的角度； $\theta_{gi}$ 为第 $i$ 个关节角对应到目标点的角度。

考虑机械臂各关节与障碍物之间的最短距离，计算斥力场中各连杆的斥力势能大小 $U_{\text{rep}}(i)^*$ ，得到机械臂所受新的斥力势能函数为

$$U_{\text{rep}}(i)^* = \begin{cases} \frac{k_r}{2} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0, & d_i > d_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$U_{\text{rep}}^* = \sum_{i=1}^5 U_{\text{rep}}(i) \quad (15)$$

式中， $k_r$ 为斥力常数； $d_i$ 为机械臂各关节与障碍物距离； $d_0$ 为斥力场半径。

由所有障碍物产生的斥力以及目标(最终位置)的引力获得的总势能为

$$U_{\text{total}} = U_{\text{aat}}^* + U_{\text{rep}}^* \quad (16)$$

### 3 基于改进人工势场法的双6自由度机械臂避障仿真

#### 3.1 双6自由度机械臂及工作环境建模

通过Matlab完成对双6自由度机械臂的建模，也是对正运动学求解的验证。

完成图3所示的双6自由度的机械臂建模后，需要对机械臂面临的工作环境建模，即建立障碍物模型。然而由于机械臂的工作环境不同，有的机械臂面对的是提前规划好的规则障碍物(例如工业机械臂)，有的是不规则的障碍物，面对这种障碍物想要精确对其建模是非常困难的<sup>[12]</sup>。因此，为了进行简化，本文中选取如图4所示的窗型障碍物作为双机械臂的工作环境，“Start”与“End”标记点分别表示从机械臂的末端初始坐标位置与目标坐标位置，并

且在窗型障碍物中心设置了虚拟吸引点，虚拟吸引点的作用是为了帮助机械臂跳出局部极小值，其引力势能与目标点引力势能公式一致，其引力常数为 $k_{av}$ 。

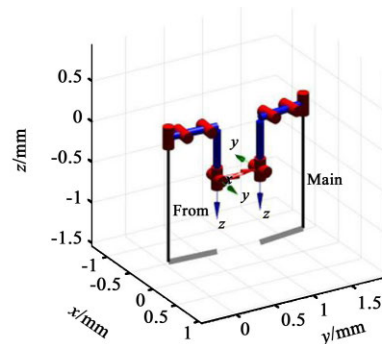


图3 双6自由度机械臂建模

Fig. 3 Modeling of double 6-DOF manipulator

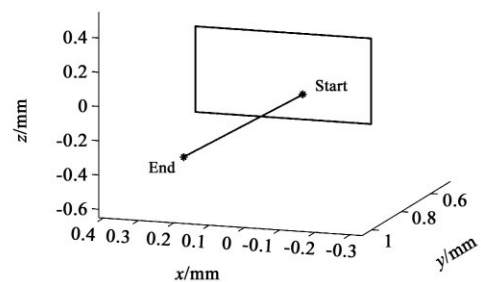


图4 窗型障碍物建模

Fig. 4 Modeling of window type obstacles

#### 3.2 双机械臂协作工作空间分析

机械臂的活动范围是由其工作空间的大小所决定的，其工作空间分析在研究机械臂的控制方面具有重要意义。蒙特卡罗法基于随机理论，是常用的求解机械臂工作空间的数值方法，其基本思想是：机械臂的各关节是在其相应取值范围内工作的，当所有关节在相应取值范围内随机遍历取值后，末端点的所有随机值的集合就构成了该机械臂的工作空间<sup>[13]</sup>。

本文中用蒙特卡罗法对机械臂的工作空间进行仿真，取随机坐标点数目为100 000个，可得主机机械臂的工作空间点云图如图5所示。随后增加坐标点数目，对双机械臂的协作工作空间进行分析，而双机械臂随机点的生成过程和单臂相同，只是生成两组，两组彼此互不干涉，各自应用到机械臂上，可得双机械臂的工作空间点云图如图6所示。从双机械臂的工作空间图可以发现，建模得到的基于该坐标系的双臂在协作过程中会有部分的重叠，即会发生碰撞，因此，在避障的研究中需要将双臂之间的碰撞考虑在内。

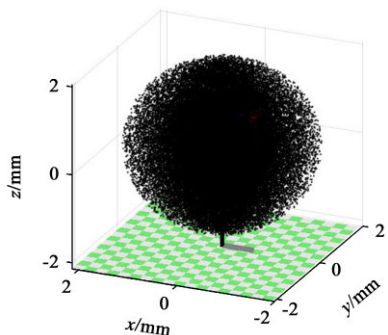


图 5 主机械臂三维工作空间点云图

Fig. 5 Point cloud of three-dimensional working space of main manipulator

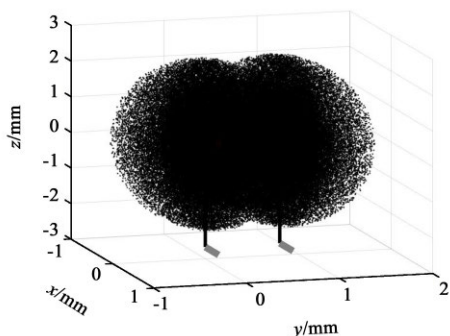


图 6 主从机械臂三维工作空间点云图

Fig. 6 Three-dimensional working space point cloud of master-slave manipulator

### 3.3 基于改进人工势场法的双 6 自由度机械臂避障仿真

双机械臂的避障路径规划任务中，先完成主机机械臂的路径规划，主机机械臂的路径已知，则主机机械臂在任意时刻的位姿是确定的，由于在完成的任务时不能发生碰撞，从机械臂不仅要避开障碍物，还得确保避开主机机械臂，故需要将主机机械臂作为动态障碍物进行规避<sup>[4]</sup>。具体的算法流程如图 7 所示。

利用改进人工势场法对主机机械臂进行避障路径规划，每个关节都忽略其大小尺寸，将其作为点进行仿真。实验从当前的角度运动到目标的角度，在运动过程中，避开障碍物，当机械臂成功到达目标角度后，说明机械臂成功避开障碍物，末端到达目标点<sup>[4]267-268</sup>。

设定机械臂运动控制参数如下：

主机机械臂初始角度 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ；主机机械臂目标角度 $[-\pi/2 \ -\pi/8 \ -\pi/2 \ \pi/2 \ \pi/4 \ 0]$ ；目标点引力常数 $k_a=3$ ；虚拟吸引点引力常数 $k_w=2$ ；斥力常数 $k_r=1$ ；斥力场范围 $d_0=0.3$ 。

主机机械臂末端轨迹仿真结果如图 8 所示，可见主机机械臂在该避障路径上成功避开窗型障碍物。

相对而言，主机机械臂的轨迹容易解决，从机械臂的轨迹规划才是双机械臂避障路径规划所要处理

的重点。在两机械臂同时运行期间，主机机械臂相当于从机械臂的动态障碍物，这个障碍物的虽然是动态的，但是其运动路径是已知的，相当于实验的过程中主机机械臂的位置状态与每时每刻的位置姿态已经得到，从机械臂的运行状态是在主机机械臂已知的前提下运行的，因此，可以使用人工势场法规划从机械臂的路径<sup>[15]</sup>。根据两机械臂的工作空间，考虑两机械臂相距的安全距离与主机机械臂的运动状态，此时两臂的碰撞检测即对机械臂末端操纵器轨迹进行分析，其余连杆不会发生碰撞。

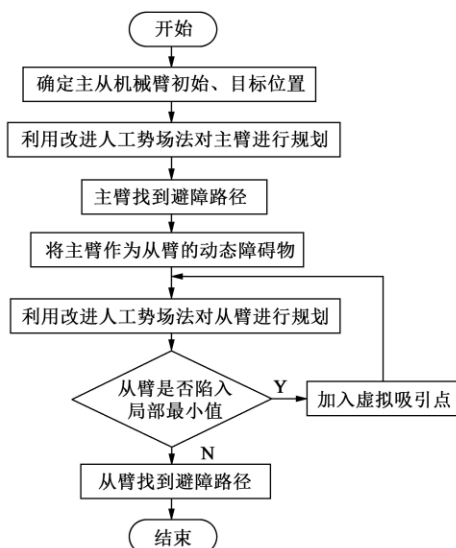


图 7 算法总体流程图

Fig. 7 Flow chart of algorithm

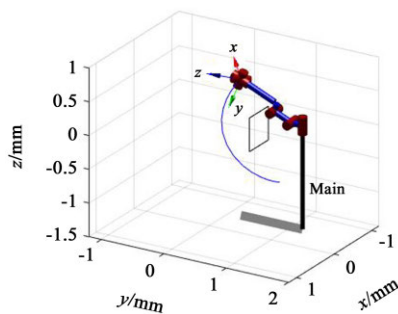


图 8 主机械臂末端轨迹示意图

Fig. 8 Schematic diagram of end track of main manipulator

图 9 所示为从机械臂碰撞轨迹示意图，图中虚线为已知的主机械臂末端运动轨迹，实线为从机械臂不使用改进人工势场法时所规划出的轨迹。当从机械臂不使用改进人工势场法时不具备避开障碍物功能，根据设定的起始点以及目标点，所规划出的轨迹会与主机机械臂以及窗型障碍物相撞，圆形标识即为碰撞点，其中，主机机械臂与从机械臂运动速度相同。

图 10 与图 11 所示为基于改进的人工势场法的主、从机械臂避障轨迹图。从机械臂初始坐标 Start

为 [0.75 0.35 0.5], 目标位置 End 为 [-0.45 0.8 0.15], 可以看到, 从机械臂成功完成了避障任务, 规划出一条无碰撞轨迹。

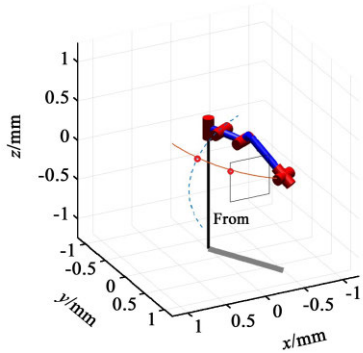


图9 从机械臂碰撞轨迹示意图

Fig. 9 Schematic diagram of collision track of slave manipulator

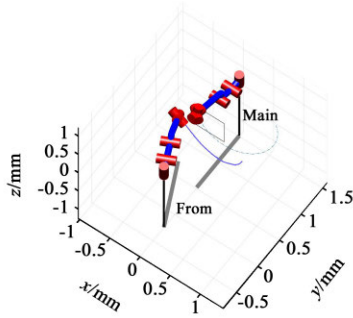


图10 主、从机械臂避障轨迹俯视图

Fig. 10 Top view of obstacle avoidance track of master-slave manipulator

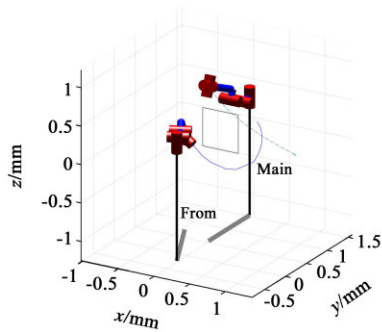


图11 主、从机械臂避障轨迹示意图

Fig. 11 Schematic diagram of obstacle avoidance track of master-slave manipulator

从表2所示中可以看出, 利用改进的人工势场法对从机械臂进行规划10次, 任务成功完成, 然而用传统的人工势场法对其进行规划, 8次都会陷入局部最小值点, 改进算法能够成功应用在双机械臂的规划中, 并通过虚拟吸引点改进了局部最小值问题。

表2 算法规划结果对比

Tab. 2 Comparison of algorithm planning results

算法	实验次数	陷入局部最小值次数	平均规划时间/s
传统人工势场算法	10	0	0.53
改进人工势场算法	10	8	0.41

## 4 结论

针对双6自由度机械臂的避障问题, 提出了一种改进的人工势场算法。将机械臂的目标点的空间坐标和关节空间坐标考虑在内, 对传统算法的重力势函数和排斥势函数进行改进, 将人工势场法应用在双机械臂避障轨迹规划中, 并加入虚拟吸引点, 避免算法陷入局部最优。通过对 Motoman ES165D 实验对象进行仿真, 结果表明, 相较于传统算法, 本文中改进算法的规划能力和鲁棒性能较高, 并提高了避障路径质量以及算法效率。由于未加入多障碍物的情况, 今后可深入研究在复杂工作环境下双机械臂的避障路径规划。

## 参 考 文 献

[1] BOUNINI F, GINGRAS D, POLLART H, et al. Modified artificial potential field method for online path planning applications [J]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2017: 180-185.

[2] MOHAMED E F, EL-METWALLY K, HANAFY A R. An improved tangent bug method integrated with artificial potential field for multi-robot path planning [C]//Proceedings of the 2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, June 15-18, 2011, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2011: 555-559.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 谢龙, 刘山. 基于改进势场法的机械臂动态避障规划[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1239-1249.  
XIE Long, LIU Shan. Dynamic obstacle-avoiding motion planning for manipulator based on improved artificial potential field [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(9): 1239-1249.

[6] 王巍, 魏丁丁, 李林茂. 仿人双机械臂协同建模与避障控制研究 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(11): 299-305.  
WANG Wei, WEI Dingding, LI Linmao. Research on collaborative modeling and obstacle avoidance control for humanoid dual manipulator [J]. Computer Simulation, 2018, 35(11): 299-305.

[7] 陈波芝, 陆亮, 雷新宇, 等. 基于改进快速扩展随机树算法的双机械臂协同避障规划方法 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(10): 1220-1226.  
CHEN Bozhi, LU Liang, LEI Xinyu, et al. Simultaneous obstacle-

- avoidance motion planning approach for dual arm robots based on improved RRT algorithm[J].China Mechanical Engineering, 2018, 29(10):1220-1226.
- [8] 孙绍杰,齐晓慧,苏立军,等.基于人工势场-遗传算法的机械臂避障方法研究[J].计算机测量与控制,2011,19(12):3078-3081. SUN Shaojie, QI Xiaohui, SU Lijun, et al. Obstacle avoiding research on the machine arm of robot based on artificial potential field method and genetic algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(12): 3078-3081.
- [9] THHARINDU W, KAZUO I, AMIR A F N. An artificial potential field based mobile robot navigation method to prevent from deadlock [J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 2015, 5(3): 189-203.
- [10] 宗成星,陆亮,雷新宇,等.一种基于A\*算法的空间多自由度机械臂路径规划方法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017, 40(2):164-168. ZONG Chengxing, LU Liang, LEI Xinyu, et al. A path planning approach for multi-DOF spatial manipulator via A\* algorithm [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(2): 164-168.
- [11] 祝敬,杨马英.基于改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J].计算机测量与控制,2018,26(10):205-210. ZHU Jing, YANG Maying. Path planning of manipulator to avoid obstacle based on improved artificial potential field method [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(10): 205-210.
- [12] WANG Meiling, Luo Minzhou, LI Tao, et al. A unified dynamic control method for a redundant dual arm robot [J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(3): 361-371.
- [13] 周律,周昱明,汪亮,等.基于蒙特卡罗方法的双臂机器人工作空间分析[J].机械传动,2014,38(6):85-87. ZHOU Lü, ZHOU Yuming, WANG Liang, et al. Dual-arm robot workspace analysis based on the monte carlo method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(6): 85-87.
- [14] 陈立彬,尤波.基于改进人工势场法的机器人动态追踪与避障[J].自动化技术与应用,2007,26(4):8-10. CHEN Libin, YOU Bo. Robot's dynamic tracking and obstacle-avoiding based on evolutionary artificial potential field [J]. Control Theory and Applications, 2007, 26(4): 8-10.
- [15] 付青,王直.一种双机械臂的避障运动轨迹规划方法[J].电子设计工程,2017,25(16):68-72. FU Qing, WANG Zhi. An obstacle avoidance trajectory planning for double manipulators [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(16): 68-72.
- 收稿日期:2019-05-21 修回日期:2019-07-01  
基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ17000F)  
国家自然科学基金青年基金(51405286)  
上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800)  
作者简介:薛阳(1976—),男,江苏无锡人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究领域为智能控制、机器人、光伏发电与微电网。
- ~~~~~
- (上接第38页)
- [6] 倪迎雪,伞晓刚,高世杰,等.新型混合柔性铰链柔度研究[J].红外与激光工程,2016,45(10):226-231. NI Yingxue, SAN Xiaogang, GAO Shijie, et al. Research on flexibility of the novel hybrid flexure hinge [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 226-231.
- [7] 张伟,杨立保,李清雅,等.直圆抛物线复合铰链柔度研究[J].红外与激光工程,2018,47(11):258-264. ZHANG Wei, YANG Libao, LI Qingya, et al. Research on compliance of compound circular-parabolic hinges [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 258-264.
- [8] 陈贵敏,贾建援,刘小院,等.直圆椭圆复合型柔性铰链研究[J].机械设计与研究,2005(4):37-39. CHEN Guimin, JIA Jianyuan, LIU Xiaoyuan, et al. Research on right-circular elliptical flexure hinge [J]. Machine Design and Research, 2005(4): 37-39.
- [9] 李耀,吴洪涛,杨小龙,等.圆弧柔性铰链的优化设计[J].光学精密工程,2018,26(6):1370-1379. LI Yao, WU Hongtao, YANG Xiaolong, et al. Optimization design of circular flexure hinges [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1370-1379.
- [10] 徐新行,张贵明,李冠楠,等.具有两个双轴柔性铰链的快速反射镜设计[J].仪器仪表学报,2019,40(2):174-181. XU Xinhang, ZHANG Guiming, LI Guannan, et al. Design of fast steering mirror with two double-axis flexure hinges [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 174-181.
- [11] 焦陈磊,王桂莲,周海波,等.结构参数对抛物线型柔性铰链刚度的影响[J].机械传动,2017,34(11):63-67. JIAO Chenlei, WANG Guilian, ZHOU Haibo, et al. Effect of structural parameters on the stiffness of parabolic flexure hinge [J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 34(11): 63-67.
- [12] 刘庆玲,关立新,于常娟.椭圆形多轴柔性铰链的柔度计算及性能分析[J].机械设计,2019,36(2):102-107. LIU Qingling, GUAN Lixin, YU Changjuan. Compliance calculation and performance analysis of elliptical multiple-axis flexure hinge [J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 36(2): 102-107.
- [13] BOLZMACHER C, BAUER K, SCHMID U, et al. Displacement amplification of piezoelectric microactuators with a micromachined leverage unit [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 157(1): 61-67.
- [14] HWANG E J, KYUNG S M, SONG S H, et al. Optimal design of a flexure-hinge precision stage with a lever [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21(4): 616-623.
- [15] 冒鹏飞,喻曹丰,王传礼,等.基于GMA柔性铰链定位平台的结构设计与优化[J].机械传动,2017,41(3):74-77. MAO Pengfei, YU Caofeng, WANG Chuanli, et al. Structure design and optimization of flexure hinge positioning stage based on giant magnetostrictive actuator [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(3): 74-77.
- 收稿日期:2019-05-30  
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51675003)  
安徽省高校自然科学基金项目(KJ2018A0078)  
江苏省矿山机电装备重点实验室开放基金(JSKF-MMEE-2018-4)  
安徽理工大学青年教师科学研究基金(QN2017207)  
作者简介:李成(1996—),男,安徽蚌埠人,在读硕士研究生,主要研究方向为流体传动与控制。