doi:10.3772/j.issn.1002 - 0470.2026.08.008

基于改进人工力矩法的机械臂末端路径规划①

张雅雯② 燕源坤 刘安东③ 付明磊 张文安

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 针对传统算法在机械臂路径规划中搜索效率低和路径质量不佳等问题,提出用于机械臂末端避障的三维人工力矩法(3 dimension artificial moment method,3D-AMM)。3D-AMM 将现有的二维人工力矩法扩展至三维空间,并对相关概念重新定义和建模。引入矢量三重积法在障碍物上构造吸引线段,提出了一种自适应选择轴机制并使用梯度上升法在三维空间中计算梯度向量,以此寻找吸引矩和排斥矩2类人工力矩函数增长最快的方向。将梯度向量作为控制器输入,得到既快速接近目标点又迅速避开障碍物的运动向量和路径点。通过仿真和在 Franka Emika Panda 机械臂上进行实验,验证了提出的改进人工力矩法在机械臂末端避障方面的有效性。

关键词 机械臂;人工力矩法;避障;路径规划;末端执行器

随着机器人技术的快速发展,将机械臂应用于复杂环境实现人机协作[1-3]甚至多机协作已经成为当前工业发展趋势,这就要求机械臂在完成任务的同时不能与工作空间中障碍物或者操作者发生碰撞。因此,路径规划是机器人领域的一个重要问题[4]。它通过连接环境中的不同位置,为机械臂规划出一条从起始位姿到目标位姿的可行路径,同时能够避开空间中障碍物,满足某些优化准则并保证机械臂操作安全性和灵活性。

在避障规划领域中,许多国内外学者对人工势场法(artificial potential feild,APF)[5-6]、A* 算法[7-8]、Dijkstar 算法[9]、快速搜索随机树法(rapidly-exploring random tree,RRT)[10-11]、人工力矩法(artificial moment method,AMM)[12]等诸多算法展开研究。APF 算法由 Khatib 等人[5]提出,该算法结构简单且规划效率极高,能够适应复杂环境,在动态避障[13-14]、多机协作[15]等场景应用中优势体现较明显。相较于移动机器人在二维平面进行路径规划,机械臂通常拥有较多的关节和自由度,在三维空间中通过控制各个关节的转动实现运动,除了带来高维度导致的计算复杂度提升问题之外,在非凸的搜索空间中更易陷入局部最小值。Zhang 等人[16]采用一种新的势能函数代替传统人工势场函数,并加入虚拟障碍物对局部最小值点进行规避。郑维等人[17]将 APF 法与 informed-RRT* 算法相结合进行机械臂路径规划,在系统陷入局部极小值点时,通过重选目标点避开局部最优值。RRT 法是一种基于采样的路径规划算法,该方法可直接在机械臂关节空间进行可行解搜索,可以解决 APF 法因机械臂自由度过高、路径难以成功规划问题。但当机械臂处于非结构化环境中时,较难搜索到可行解[18]。此外,该算法在环境内进行随机扩展采样,无法保证得到全局最优路径。朱花等人[19]引入基于障碍占空比的扩展角度策略,并加入优化算法对生成的路径进行平滑处理以解决 RRT 算法收敛速度慢、路径质量低等问题。谭建豪等人[20]通过结合均匀采样和启发式采样方法,以及实施叶子节点的加权删除策略,提高了路径规划收敛速度。

① 浙江省自然科学基金(LR23F030002)资助项目。
② 女,2000 年生,硕士生;研究方向:机械臂控制;E-mail:zywy940812@163.com。
③ 通信作者,E-mail:lad@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2024 - 03 - 15)

AMM 法是由徐望宝等人[21]提出适用于移动机器人避障的二维路径规划算法。该方法由吸引点(人为构造或是目标点)和障碍物上的排斥点分别产生影响机器人运动的吸引矩和排斥矩。此外,通过增加运动向量保证机器人在 2 类矩相互抵消的情况下仍然具有非零速度,解决了 APF 算法易陷入局部极小值点问题。由于吸引点实时为机器人提供运动指引方向,可以有效避免 RRT 算法规划路径冗长问题。文献[22]中研究吸引点高效构造方法,保证机器人向该点运动的同时避开障碍物,提高了路径规划质量。文献[12]通过提出一种基于吸引线段的 AMM 法,实现了在减小吸引点计算量的同时优化复杂环境中路径规划的效果。文献[23]通过改进吸引矩、排斥矩和吸引点构造方式,并增加协调矩设计,解决了多机器人在复杂动态环境中的分布式局部路径规划问题。文献[24]通过增加关键伴侣候选,并改进运动向量求解器,解决了多机器人在狭窄通道内且靠近目标场景下出现路径规划失败或冲突问题。虽然以上方法都体现了 AMM 算法能为机器人在复杂环境下规划出无碰撞路径,但该方法一直在二维平面上进行移动机器人的无碰撞研究。根据传感器检测到的信息进行实时处理,这一过程比较复杂,需要计算机具备一定的计算能力以及需要相应的计算时间,并且也无法解决工业生产中三维空间避障处理需求。因此,本文将在 7 自由度机械臂上进行算法改进,实现工业机械臂在完成目标任务的同时,有效避开空间中存在的障碍物。

1　3D-AMM 模型建立

本文将机械臂末端执行器 R 建模为以点 ξ_R 为中心、半径为 D_R 的球体模型,并暂不予以考虑其向目标 T(位于点 ξ_T)运动过程中的姿态。球表面任意一点表示为 ξ_r,该点满足 $S(\xi_R,D_R)=\{\xi_r\in\mathbb{R}^3\mid\|\xi_r-\xi_R\|=D_R\}$,$S$ 表示表面点集。此外,障碍物均设置为立方体,以所有顶点坐标的最小值和最大值来描述其坐标范围,具体表示为 $L^-=(x_{\min},y_{\min},z_{\min})$ 和 $L^+=(x_{\max},y_{\max},z_{\max})$。该系统要求 R 在避开障碍物的同时,并沿固定步长 S_l 向 T 移动。

$\xi\in\mathbb{R}^3$ 表示 3D 空间中任意一点,凸障碍物具体定义如文献[25]所述。在图 1 示例模型中,存在一个障碍物 $O=\{\xi\in\mathbb{R}^d:\Gamma(\xi)=1\}$ 阻碍了 R 向 T 的直线运动,该路径可表示为线段 $S(\xi_R,\xi_T)$。定义该线段与障碍物 O 的交点 $\{\xi_i^k\}_{i=1}^{N^k}$(按距 R 由近及远排序,N^k 为交点总个数)中被选取的关键交点为 ξ_k,并将该点所在面记为关键障碍面 O_f,包围该面的边作为关键障碍线段 $O_s\circ\xi_g$ 是 $S(\xi_R,D_R)$ 中距离 O 最近的点,ξ_o 是该障碍物内部几何中心点。有向线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 表示所要构造的吸引线段,其中起点 ξ_s 位于障碍物上,终点 ξ_e 位于无障碍物空间内,具体构造方式详见第 1.2 节。

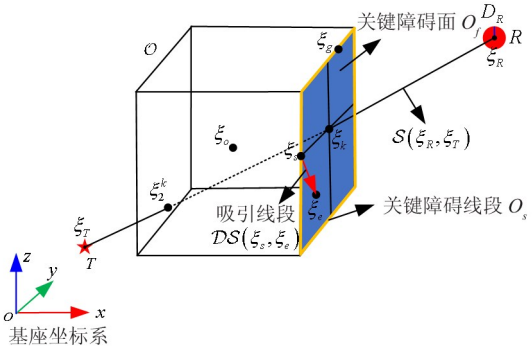


图 1　避障系统模型

1.1　方向角定义

在 AMM 方法应用于二维平面避障的场景中,方向角被定义为一个有向线相对于其端点旋转至全局坐标系的横坐标轴时所经过的、且绝对值不大于 π 的有向角[12]。并设定如下函数将其绝对值控制在[0,π]范围内:

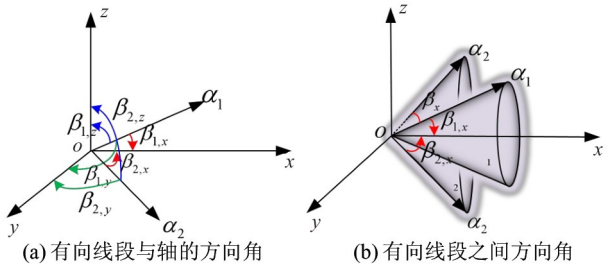
$$agl(x)=\begin{cases}x & |x|\leqslant\pi\\ x-2\pi\mathrm{sgn}(x) & |x|>\pi\end{cases}\tag{1}$$

式中:sgn(·)表示符号函数。

将其扩展至三维空间实现避障,会涉及更多空间维度和动态变化的运动环境,此时需确定向量与各坐标轴之间的角度。如图 2(a)所示,三维空间中有向线 $DS(o,\alpha_1)$ 和 $DS(o,\alpha_2)$ 的方向角 β_1、β_2 分别由 $(\beta_{1,x},\beta_{1,y},\beta_{1,z})$ 和 $(\beta_{2,x},\beta_{2,y},\beta_{2,z})$ 组成。图 2(b)以 x 轴为例,2 条有向线按照对应方向角绕该轴运动,得到对应旋转体 T_1、T_2。式(2)中 β_x 表示从 $DS(o,\alpha_1)$ 旋转至 $DS(o,\alpha_2)$ 在 x 轴上的有向角,对

应的旋转体 T_1 也会向 T_2 变化。在每个控制周期内根据对应选取的坐标轴，即可计算出对应轴上的有向角，如式(2)所示。

$$\beta_x = agl(\beta_{1,x} - \beta_{2,x}) \tag{2}$$



(a) 有向线段与轴的方向角　(b) 有向线段之间方向角

图 2　方向角

1.2　吸引线段构造

如上所述，本文吸引线段表示为 $DS(\xi_s,\xi_e)$，起点 ξ_s 设置在 O_s 上，终点 ξ_e 位于自由空间内。ξ_e 将作为 R 的临时目标点或吸引点 ξ_a，对末端产生吸引矩，引导其向该点移动。这一策略不仅为末端提供了一条规避障碍物的运动方向，且在一定程度上也能缩短路径规划的长度。图 3 为吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 整体构造流程示意图。

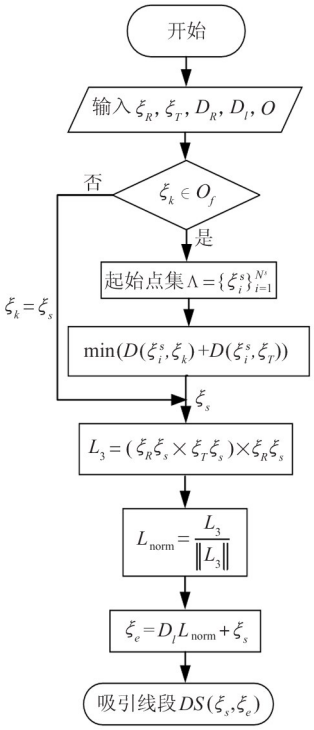


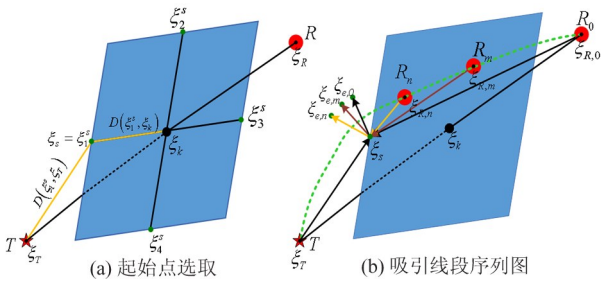
图 3　吸引线段构造流程图

1.2.1　吸引线段起点确定

当关键交点 ξ_k 位于线段 O_s 上，即 $\xi_k \in O_s$，则直接将该点定为吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 的起点 ξ_s。当 $\xi_k \in O_f$ 时，将点 ξ_k 垂直投影到对应的关键障碍线段 O_s 上，进而得到一组潜在的起始点集 $\Lambda = \{\xi_i^s\}_{i=1}^{N^s}(N^s = 4)$，接着通过如下方式确定吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 的唯一起始点 $\xi_s \in \Lambda$。如图 4(a)所示，选取 ξ_k 到某点的距离 $D(\xi_i^s,\xi_k)$ 与该点到目标点 T 的距离 $D(\xi_i^s,\xi_T)$ 之和最小的点作为 ξ_s，即 $\min(D(\xi_i^s,\xi_k) + D(\xi_i^s,\xi_T))$。通过实时参考点 ξ_T 与障碍物 O 的相对位置，在所有可行路径中选取长度较短的一条。即使目标 T 在实时运动，也可根据随之变换的点 ξ_k 确定 ξ_s。这样不仅可以使构造的吸引线段避免机械臂与障碍物碰撞，同时还能优化局部路径。

1.2.2　吸引线段终点确定

如图 4(b)所示，在确定 ξ_s 之后，结合预设的吸引线段长度 D_l，求解终点 ξ_e。路径序列中任意 3 时刻 R 的位置 $\xi_{R,0}$、$\xi_{R,m}$、$\xi_{R,n}$，对应的吸引线段分别为 $DS(\xi_s,\xi_{e,0})$、$DS(\xi_s,\xi_{e,m})$、$DS(\xi_s,\xi_{e,n})$。为保证规划路径的平滑性和连贯性，应尽量避免吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 的方向变化幅度过大。因此，若在连续 2 个控制周期内关键交点 ξ_k 的坐标变化不大，仍然使用前一时刻的点 $\xi_s(k-1)$ 作为新周期的吸引线段起点。



(a) 起始点选取　(b) 吸引线段序列图

图 4　吸引线段构造模型图

吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 的终点 ξ_e 确定方式如下：以 ξ_R 和 ξ_T 为起点，ξ_s 为共同终点，构造矢量 $\boldsymbol{\xi_R\xi_s}$ 和 $\boldsymbol{\xi_T\xi_s}$。为保证吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 能有效促进 R 向 T 运动，期望通过 $\boldsymbol{\xi_R\xi_s}$ 和 $\boldsymbol{\xi_T\xi_s}$ 的线性组合构建吸引线段所在直线的方向向量 $\boldsymbol{L}_3$。传统的线性组合形式，如 $\boldsymbol{L}_3 = \gamma\boldsymbol{\xi_T\xi_s} + \mu\boldsymbol{\xi_R\xi_s}$ 受限于固定系数的经验取值，无法根据机械臂的运动状况实时变换而缺乏灵活性。因此本文提出矢量三重积法来处理这一问

题,通过将上述2个矢量叉乘得到的结果与 $\boldsymbol{\xi_R\xi_s}$ 进行二次叉乘以获得 $\boldsymbol{L}_3$。最后将 $\boldsymbol{L}_3$ 对应的单位方向向量 $\boldsymbol{L}_{\text{norm}}$ 与固定长度 D_l 的乘积与起点 ξ_s 结合确定吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 的终点 ξ_e。

在某些情况下,特别是在没有上一时刻的 $\xi_s(k-1)$ 和 $\xi_e(k-1)$ 的情况下,直接将上一时刻吸引点 $\xi_a(k-1)$ 设为目标点 T。若在当前时刻,$S(\xi_R,\xi_T)$ 与 O 无交点,则不需要构造吸引线段,吸引点 $\xi_a(k)$ 仍为目标点 T。在其他情况下,一旦根据已定义规则构造了吸引线段,便选取吸引线段的终点 $\xi_e(k)$ 作为吸引点 $\xi_a(k)$,以便为末端执行器 R 提供一个移动方向,并吸引其沿该方向移动,达到绕过障碍物的目的。

2 3D-AMM 算法设计

根据图2可知,向量与坐标轴之间的夹角决定了其在各轴分量的大小,会影响 R 在下一个控制周期的坐标变化幅度。由于 R 是按照设定的步长运动,因此不同情况下对坐标轴的合理选择对后续运动至关重要。

为了实现快速向 T 运动并能最大程度避开障碍物的需求,本文将对以下3种情形展开讨论:(1)若存在关键交点 ξ_k 在关键障碍物面 O_f 上,即 $\exists\xi_k\in O_f$,则以最快速度减小点 ξ_k 与 ξ_s 之间的距离 $D(\xi_k,\xi_s)$ 为目标,此时选取两点坐标分量差值最大的对应轴。(2)如果 $\exists\xi_k\in O_s$,此时不仅要确保 R 到吸引点 ξ_a 的距离大于安全距离 D_s,即 $D(\xi_R,\xi_a)>D_s$,还需至少满足以下条件之一:1)$[L^{-1},L_1^+]\subseteq[\min(\xi_{R,x},\xi_{T,x}),\ \max(\xi_{R,x},\xi_{T,x})]$;2)$[L_2^-,L_2^+]\subseteq[\min(\xi_{R,y},\xi_{T,y}),\max(\xi_{R,y},\xi_{T,y})]$;3)$R$ 到障碍物最短距离不大于其到 T 的距离,即 $D(\xi_r,\xi_g)\leqslant D(\xi_R,\xi_T)$。此时保持上一时刻选取的坐标轴,否则直接选取 z 轴。(3)若 ξ_k 不存在且 $\xi_a=\xi_T$,如果 $D(\xi_R,\xi_a)>D_s$ 且 $D(\xi_r,\xi_g)\leqslant D_s$,并且满足条件1)或2)中的任意一个,处理方式同(2)。

2.1 吸引矩求解

吸引矩由吸引点 ξ_a 产生,根据1.2.2节讨论可知,点 ξ_a 可能为吸引线段 $DS(\xi_s,\xi_e)$ 终点 ξ_e 或是 ξ_T,因此吸引矩的计算会有2种不同的形式。

首先,定义函数 $amt(x)$(详见文献[12]中的式(5)),其中 δ_θ 为远小于 $\pi/2$ 的正常数。该函数能根据末端执行器 R 与目标点 T 之间的夹角,在一定条件下直接引导末端执行器 R 向目标点 T 运动,对应的导数定义为 $damt(x)$(详见文献[12]中的式(6))。

考虑到实时变化的运动环境以及路径规划的质量,本文为 R 设计2种可运动模式。(1)当吸引点 $\xi_a=\xi_e$,或 $\xi_a=\xi_T$,但 R 与 T 之间距离满足 $D(\xi_R,\xi_T)>D_s$ 时,设 R 运动模式 $S_m=1$。(2)当 $\xi_a=\xi_T$ 且 $D(\xi_R,\xi_T)\leqslant D_s$ 时,设 $S_m=2$;否则,$S_m=0$,R 不运动。

通常情况下,k 时刻运动模式 $S_m=1$。由点 ξ_a 产生的吸引矩 $AM(k)$ 的计算公式如式(3)所示。

$$AM(k)=-\frac{\lambda_a}{2}[agl(\beta_{R,\sigma}-\beta_{a,\sigma})]^2 \tag{3}$$

式中:σ 表示不同时刻从 x、y、z 坐标轴中选取的唯一轴,$\beta_{R,\sigma}$ 为有向线 $DS(o,\xi_R)$ 的方向角 β_R 在 σ 轴上的分量。$\beta_{a,\sigma}$ 表示矢量 $\boldsymbol{\xi_R\xi_e}$ 或 $\boldsymbol{\xi_R\xi_T}$ 在 σ 轴的方向角分量,吸引矩权重系数 λ_a 根据经验给出。

然后,根据式(4)求出其对应梯度,该梯度向量所对应的方向是能使 $AM(k)$ 增加最快的方向。

$$\begin{aligned}(\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k),\Delta_1\xi_{R,x}(k),\Delta_1\xi_{R,y}(k),\Delta_1\xi_{R,z}(k))^{\mathrm{T}}=\\(-\lambda_a[agl(\beta_{R,\sigma}-\theta_a)],0,0,0)^{\mathrm{T}}\end{aligned} \tag{4}$$

当运动模式 $S_m=2$ 时,吸引矩 $AM(k)$ 的计算如式(5)所示。

$$\begin{aligned}AM(k)=amt[agl(\beta_{R,\sigma}-\beta_{a,\sigma})]+\\\left(\frac{D_s}{\pi}\right)^2\left[\sum_{\sigma}^{\sigma=x,y,z}amt\left(\frac{\pi}{D_s}(\xi_{R,\sigma}-\xi_{T,\sigma})\right)\right]\end{aligned} \tag{5}$$

式中:$\beta_{a,\sigma}$ 表示矢量 $\boldsymbol{\xi_R\xi_T}$ 在 σ 轴的方向角分量。对应的梯度求解如下:

$$\begin{bmatrix}\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k)\\\Delta_1\xi_{R,x}(k)\\\Delta_1\xi_{R,y}(k)\\\Delta_1\xi_{R,z}(k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-damt[\beta_{R,\sigma}-\beta_{a,\sigma}]\\\frac{D_s}{\pi}damt\left[\frac{\pi}{D_s}(\xi_{R,x}-\xi_{T,x})\right]\\\frac{D_s}{\pi}damt\left[\frac{\pi}{D_s}(\xi_{R,y}-\xi_{T,y})\right]\\\frac{D_s}{\pi}damt\left[\frac{\pi}{D_s}(\xi_{R,z}-\xi_{T,z})\right]\end{bmatrix} \tag{6}$$

比较 2 种运动模式可以发现，在 $S_m = 1$ 情况下，吸引矩仅对下一时刻 R 运动方向有影响，对应构造的吸引点 ξ_a（ξ_e 或 ξ_T）可以为 R 提供一个吸引方向。当 $S_m = 2$ 时，吸引点 ξ_a 一定是目标点 T，其梯度不仅与选定轴夹角有关，还包括目标点对末端执行器位置的直接补偿分量。

2.2　障碍物排斥矩求解

如图 5 求解模型图所示，线段 $S(\xi_R,\xi_T)$ 与障碍物 O 相交，则排斥矩由最近点 ξ_g 以及交点 ξ_k（需要满足 $\xi_k = \xi_1^k$）共同决定。如果 R 包围球表面的点 ξ_r 与 ξ_k 距离 $D(\xi_r,\xi_k)$ 或与 ξ_g 距离 $D(\xi_r,\xi_g)$ 不大于 D_s，则分别求解矢量 $\boldsymbol{\xi_k\xi_r}$ 和 $\boldsymbol{\xi_g\xi_r}$ 与当前时刻坐标轴 σ 所形成的方向角分量 $\beta_{k,\sigma}$、$\beta_{g,\sigma}$，进一步计算角度权值 λ_k 和 λ_g，最后加权求和得到角度 $\beta_{p,\sigma}$。通过这两点生成的排斥矩在一定程度上也能够保证路径的平滑性，避免因点 ξ_g 与 R 过近而导致排斥作用突然增大，从而造成路径振荡。

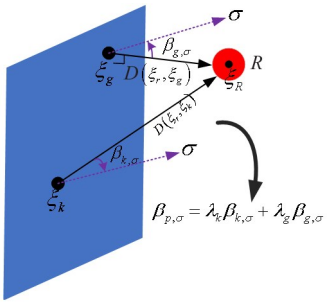


图 5　角度 $\beta_{p,\sigma}$ 求解模型

将排斥矩的权重系数记为 λ_p：

$$\lambda_p = \lambda_g = \frac{D_s - D(\xi_r,\xi_g)}{D_s} \tag{7}$$

由上式可知，$\lambda_p \in (0,1)$ 且 λ_p 随着 $D(\xi_r,\xi_g)$ 的减小而增大。通过如此设计，在 $D(\xi_r,\xi_g)$ 逐渐减小时，R 与 O 发生碰撞的概率增大。此时通过增大 λ_p，即增大排斥矩，使 R 能快速远离障碍物 O。同理可求解出 λ_k。

确定 λ_p 和 $\beta_{p,\sigma}$ 之后，结合吸引角度 $\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k)$，得到排斥矩 $\mathrm{PM}(k)$ 表达如下：

$$\mathrm{PM}(k) = -\frac{\lambda_p}{2}(agl(agl(\beta_{R,\sigma} + \Delta_1\beta_{R,\sigma}(k)) - \beta_{p,\sigma}))^2 \tag{8}$$

同理求得对应梯度如下：

$$\Delta_2\beta_{R,\sigma}(k) = -\lambda_p agl(agl(\beta_{R,\sigma} + \Delta_1\beta_{R,\sigma}(k)) - \beta_{p,\sigma}) \tag{9}$$

$\mathrm{PM}(k)$ 中考虑到角度 $\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k)$，在一定程度上可以防止吸引矩产生的作用被排斥矩抵消，保证末端 R 既能根据吸引矩向点 ξ_a 运动，又可以按照排斥矩远离障碍物。否则，排斥矩作用一旦减少，无法保证末端运动的安全性。由式(9)可以发现排斥矩也只对末端执行器 R 下一时刻运动方向有影响，与式(3)和(5)作用相反，该方向使 R 背向障碍物运动，达到避开障碍物的目的。

3　运动优化设计

$(S_{v,x}(k+1),S_{v,y}(k+1),S_{v,z}(k+1))^{\mathrm{T}}$ 表示 R 在 $(t_k,\ t_{k+1}]$ 控制周期内的运动矢量，根据 S_m 分别取值为 1 或 2 时，矢量长度 S_l 对应在 S_R 和 S_T 之间进行取值。该运动分量增加了末端 R 的运动速度，即使其所受人工力矩梯度方向和 $\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k) + \Delta_2\beta_{R,\sigma}(k)$ 为 0，R 也不会停止运动。因此在人工力矩运动控制器中，R 不存在陷入局部极小值点问题。因当前控制周期内选取的坐标轴 σ 不同，运动向量求解主要分为 3 类。在每一类计算过程中，首先根据步长 S_l 和二类矩梯度向量方向之和 $\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k) + \Delta_2\beta_{R,\sigma}(k)$ 得到轴 σ 上坐标分量 $S_{v,\sigma}(k+1)$，再将点 ξ_a 和 ξ_R 投影至与坐标轴 σ 垂直的同一个平面降维处理后进行另外 2 个坐标值求解。

首先，将当前时刻与轴 σ 对应的 R 方向角分量 $\beta_{R,\sigma}(k)$ 与两类矩梯度方向之和 $\Delta_1\beta_{R,\sigma}(k) + \Delta_2\beta_{R,\sigma}(k)$ 求和可以得到下一时刻方向角 $\beta_{R,\sigma}(k+1)$，如式(10)所示。

$$\beta_{R,\sigma}(k+1) = agl(\beta_{R,\sigma}(k) + \Delta_1\beta_{R,\sigma}(k) + \Delta_2\beta_{R,\sigma}(k)) \tag{10}$$

则运动向量求解通式如式(11)所示。

$$S_v(k+1) = (S_l\boldsymbol{\Psi} + \frac{\phi}{L}\boldsymbol{\Gamma})(\cos(\beta_{R,\sigma}(k+1))\boldsymbol{\varphi} + (\xi_a - \xi_R)\boldsymbol{\tau}) \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{\varphi} \in \mathbb{R}^3$ 和 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ 均是由元素 0 和 1 构成的三维向量，$\boldsymbol{\Psi} = \mathrm{diag}\{\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3\}$ 和 $\boldsymbol{\Gamma} = \mathrm{diag}\{\tau_1,\tau_2,\tau_3\}$ 分别是由以上两向量构成的对角矩阵，且

$\boldsymbol{\Psi}+\boldsymbol{\Gamma}=\boldsymbol{I}$。根据当前时刻选取的轴 σ 将矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$ 对应对角元素设为 1,其余元素设为 0。$\phi=S_l\sin(\beta_{R,\sigma}(k+1))$ 表示另外 2 个坐标轴上运动分量平方和。L 为将 ξ_R 和 ξ_a 投影至同一个平面获得的点 ξ_R' 和 ξ_a' 之间的距离,即 $L=D(\xi_R',\xi_a')$。其中,$\xi_R'=\xi_R+S_{v,\sigma}(k+1)\boldsymbol{\varphi},\xi_a'=\xi_R'\boldsymbol{\varphi}+\xi_a\boldsymbol{\tau}$。

因为 R 在向点 ξ_a 运动过程中,连续 2 个控制周期的位置变化量不能过大,否则易出现运动越过点 ξ_a,造成持续振荡现象。所以在更新 R 下一时刻位置时,需要对位置变化量进行处理。记位置变化量为 S_v,其求解如式(12)所示。

$$S_v=\sqrt{\sum_{\sigma}^{\sigma=x,y,z}(S_{v,\sigma}(k+1)+\Delta_1\xi_{R,\sigma}(k))^2} \tag{12}$$

则下一时刻位置信息求解如式(13)所示。

$$\xi_R(k+1)=\xi_R(k)+\frac{S_R}{S_v}(S_v(k+1)+\Delta_1\xi_R(k)) \tag{13}$$

4 算法验证与分析

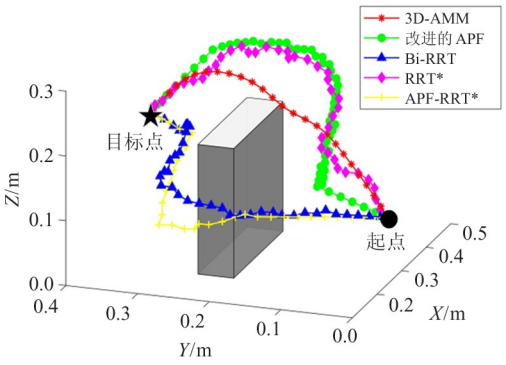
4.1 仿真验证

为了验证 3D-AMM 算法的有效性,设计以下 2 种场景测试 3D-AMM 算法性能。场景 1 模拟桌面上常见的障碍物布局,起点为(0.30,0.02,0.08),目标点为(0.35,0.12,0.18),障碍物范围为 $L^-=(0.20,0.20,0.00)$,$L^+=(0.40,0.25,0.20)$。场景 2 模拟工作空间内任意位置可能出现的障碍物,起点为(0.02,0.20,0.13),目标点为(0.30,0.12,0.18),障碍物范围为 $L^-=(0.10,0.10,0.10)$,$L^+=(0.20,0.20,0.20)$,单位为 m。避障系统控制参数设置如表 1 所示。在相同环境参数下,与文献[6]提出的改进 APF 法、文献[26]提出的 APF-RRT * 法和传统的 Bi-RRT 和 RRT * 算法进行比较,其中运动步长采用 S_R。

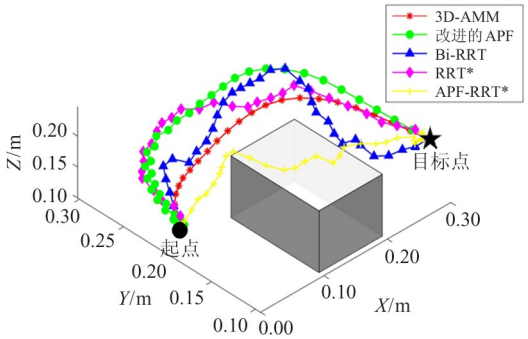
表 1 参数值表

参数	D_R	D_l	D_s	λ_a	S_R	S_T
数值	0.004	0.08	0.08	0.6	0.006	0.005 5

场景 1 中,各算法规划路径如图 6(a)所示。3D-AMM 法、改进 APF 法和 RRT * 法均从障碍物上方越过。在安全距离设置相同情况下,尽管 RRT * 和改进 APF 法规划的路径与障碍物相距更远,但 3D-AMM 算法规划的路径最为平滑,无间断抖动现象。相比之下,Bi-RRT 和 APF-RRT * 均规划出从侧边绕开障碍物的路径。但考虑到机械臂连杆操作安全性,这 2 种方法的路径难以实现。在场景 2 中,如图 6(b)所示,除 APF-RRT * 以外,另外 4 种算法规划方向均相同。改进 APF 法与 3D-AMM 规划路径较其他更为平滑,但改进 APF 法在路径开始阶段有震荡现象。而 RRT 系列算法规划的路径方向和形状均不同,这会对机械臂实际运行造成较大影响。



(a) 场景 1 路径规划对比图



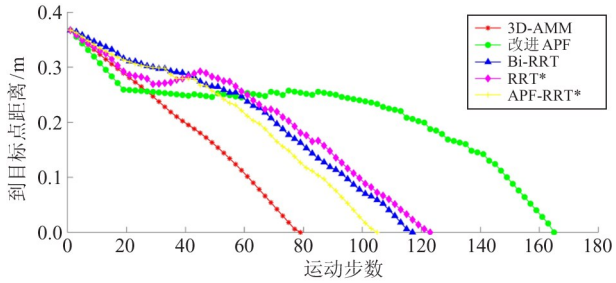
(b) 场景 2 路径规划对比图

图 6 5 种算法在相同场景中规划结果

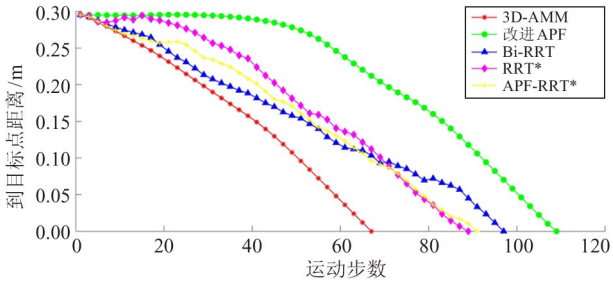
图 7 对比了 2 种场景下各算法向目标点的收敛变化曲线。收敛曲线的形态反映了对应算法规划路径的质量,从而间接体现了各算法的优劣。因此,分析图 7 可知,在相同工作环境中,3D-AMM 算法可以以最少运动步数平滑到达目标点。同时,结合表 2 给出的规划路径长度和时间数据,在 2 种场景中,

3D-AMM 规划路径最短，且规划时间相对于需要在空间内随机搜索 RRT 系列算法大幅提升。

图 8 展示了 2 种场景下 3D-AMM 算法在构造吸引线段提供吸引点规划运动时的相关距离变化函数。分析图 8 可知，在每种场景下均进行了 2 个阶段的吸引线段构造，且在任意阶段随着 $D(\xi_R,\xi_s)$ 减小，$D(\xi_T,\xi_e)$ 均会随之减小。通过图 8 可以看出，3D-AMM 算法能够在三维空间中构造吸引点，为末端提供有效的运动方向，并确保在避开障碍物的同时逐步向目标点收敛。



(a) 场景 1 中与目标点位置误差收敛曲线



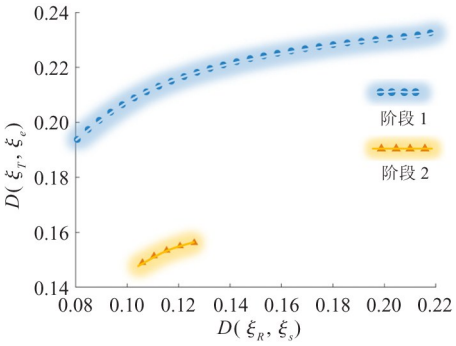
(b) 场景 2 中与目标点位置误差收敛曲线

图 7　2 种场景下 5 种算法规划效率

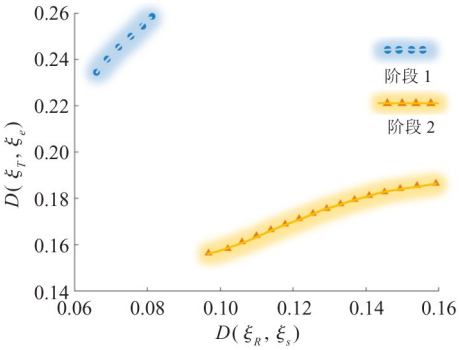
表 2　2 种场景中不同算法规划路径长度和时间对比

	方法	路径长度/m	路径缩短比率/%	规划时间/s	时间提升比率/%
场景 1	3D-AMM	0.463	0.00	0.006	0.00
	改进的 APF	0.988	53.17	0.019	67.33
	Bi-RRT	0.685	32.42	0.196	96.79
	RRT *	0.726	36.26	0.072	91.18
	APF-RRT *	0.695	33.37	0.238	97.36
场景 2	3D-AMM	0.398	0.00	0.007	0.00
	改进的 APF	0.646	38.48	0.033	79.42
	Bi-RRT	0.570	30.28	0.989	99.30
	RRT *	0.523	23.95	0.061	88.77
	APF-RRT *	0.535	25.65	0.682	98.99

注： 路径缩短比率 = $((L_{ref}-L_{new})/L_{ref})\times 100\%$，其中 L_{ref}、L_{new} 分别表示对比算法和本文算法规划的路径长度。
时间提升比率 = $((T_{ref}-T_{new})/T_{ref})\times 100\%$，其中 T_{ref}、T_{new} 分别表示对比算法和本文算法规划所需时间。



（a）场景 1 中距离相关性函数



（b）场景 2 中距离相关性函数

图 8　吸引线段有效性仿真验证

4.2　机械臂实验

为验证本文提出的 3D-AMM 末端避障算法的有效性，接下来在七自由度的机械臂 Franka Emika Panda 上进行实验验证。

机器人实验是在可达工作空间中完成物体搬运任务,如图 9 所示。实验中,初始位置、目标点 1 和目标点 2 的坐标分别设置为(0.307 3,0.000 3,0.440 4)、(0.590 0,0.200 0,0.190 0)和(0.660 0,-0.200 0,0.190 0),环境中障碍物坐标范围为 $L^- = (0.45, -0.05, 0.00)$,$L^+ = (0.75, 0.05, 0.25)$。末端执行器为夹爪部分,且包围球半径 D_R 设置为 0.03 m。由于在机械臂末端法兰和夹爪之间添加了力传感器和用于连接机械臂末端法兰与力传感器的自制法兰,因此安全距离适当增大至 0.12 m 以避免意外。其他参数设置与 4.1 节保持一致。

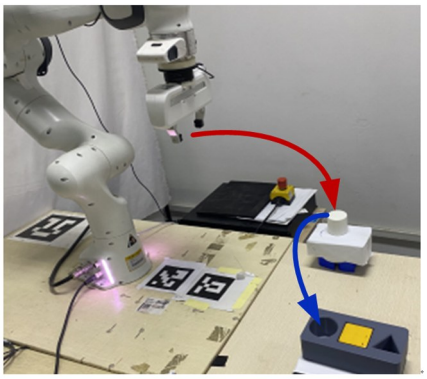


图 9　物体搬运任务实验设置

末端避障规划结果和机械臂运动序列分别展示在图 10 和图 11 中。在向目标点 1 运动阶段,虽然障碍物没有直接阻断末端向目标点 1 运动,但存在末端执行器包围球曲面上的点与障碍物之间的距离小于安全距离阈值的情况,因此仍需障碍物排斥矩为其提供远离障碍物的运动方向。如图 10 上端轨迹和图 11 中的序列图 1 ~5 所示,末端在运动至1/3处最靠近障碍物,此时轨迹向远离障碍物的方向偏转。同时,以目标点 1 为吸引点,末端执行器成功到达该点并完成物体抓取。

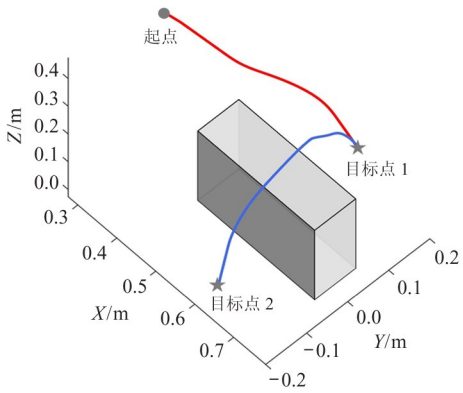


图 10　物体搬运任务下末端避障规划路径

在以目标点 1 为起点、目标点 2 为终点的第 2 阶段,障碍物直接阻断了末端向目标点 2 运动。因此,需要在障碍物上构造吸引线段,产生人工吸引矩以引导末端向吸引点运动。在这个过程中,排斥矩也在持续作用,以保证末端安全。根据图 11 中的 6 ~10序列图可知,在这一阶段,末端执行器在 1 类人工力矩和运动向量的共同作用下,规划出的路径非常平滑,并且末端包围球与障碍物之间保持了一定的安全距离,最终成功到达目标点 2。整个运动过程中各个关节角度 θ 的变化曲线如图 12 所示,可以看出,机械臂各个关节角度均在约束范围内,且变化曲线较为平滑。结合末端运动轨迹,进一步验证了提出的 3D-AMM 避障算法的有效性。

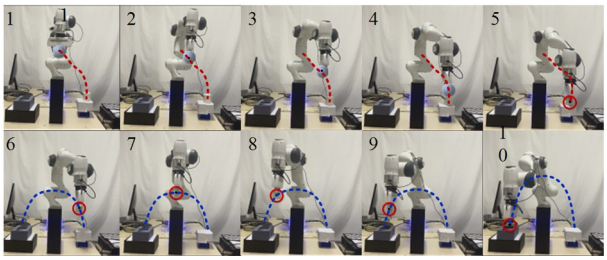


图 11　机械臂避障搬运过程

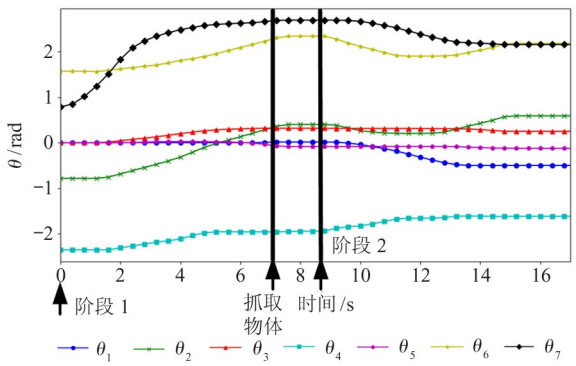


图 12　机械臂运动过程中关节角度变化曲线图

5　结 论

本文提出了 3D-AMM 法用于末端执行器在三维笛卡尔空间中进行路径规划,主要就三维空间中人工力矩计算和运动控制器进行改进。提出自适应选轴机制和设计基于矢量三重积法的三维空间中吸

引线段构造方式,将该有向线段终点作为吸引点,得到引导末端向该点运动的吸引矩。将吸引矩与障碍物产生的排斥矩通过梯度上升法求解梯度向量,作为运动控制器输入控制量,计算既能控制末端向吸引点运动又能避开障碍物,且可以一直提供非零速度的运动向量,最后对运动输出进行优化以避免越过吸引点。分别进行 Matlab 仿真对比和 Franka Emika Panda 机械臂抓取物体实验验证算法规划路径的有效性和可行性。未来将研究如何将避障应用于多个静态障碍物共存场景,且障碍物为复杂多面体形式,使该方法可以适用于工业生产场景。

参考文献

[1] 曹其新, 孙明镜, 薛蔚, 等. 人机协作下机械臂动态避障与避奇异研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2020,48(1):55 - 59.

[2] 陶永, 兰江波, 刘海涛, 等. 基于滑模和模糊算法相融合的人机协作机器人轨迹跟踪方法[J]. 机械工程学报, 2022,58(18):181 - 191.

[3] Haddadin S, Croft E. Physical human-robot interaction[J]. Springer Handbook of Robotics, 2016:1835 - 1874.

[4] Ge S S, Lai X, Al Mamun A. Sensor-based path planning for nonholonomic mobile robots subject to dynamic constraints[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(7):513 - 526.

[5] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986,5(1):90 - 98.

[6] Xue Y, Yu Z, Wu H, et al. Obstacle avoidance path planning for double manipulator based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020,44(3):39 - 45.

[7] 王洪斌, 郝策, 张平, 等. 基于 A * 算法和人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20):2489.

[8] 胥芳, 沈旭明, 谭大鹏. 基于 TSA * 算法的双机械臂协同避障规划方法[J]. 高技术通讯, 2021,31(5): 516 - 526.

[9] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[M]. Berlin, Germany:Springer,2022:287 - 290.

[10] Devaurs D, Siméon T, CortéS J. Enhancing the transition-based RRT to deal with complex cost spaces[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013:4120 - 4125.

[11] 刘建宇, 范平清. 基于改进的 RRT * -connect 算法机械臂路径规划[J]. 计算机工程与应用,2021,57(6): 274 - 278.

[12] Xu W B, Chen X B, Zhao J, et al. Function-segment artificial moment method for sensor-based path planning of single robot in complex environments[J]. Information Sciences, 2014,280:64 - 81.

[13] 翟丽, 张雪莹, 张闲, 等. 基于势场法的无人车局部动态避障路径规划算法[J]. 北京理工大学学报自然版, 2022,42(7):696 - 705.

[14] 李二超,王玉华. 改进人工势场法的移动机器人避障轨迹研究[J]. 计算机工程与应用,2022,58(6):296 - 304.

[15] 薛阳, 俞志程, 吴海东, 等. 基于改进人工势场法的双机械臂避障路径规划[J]. 机械传动, 2020,44(3): 39 - 45.

[16] Zhang N, Zhang Y, Ma C, et al. Path planning of six-DOF serial robots based on improved artificial potential field method[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macau, China: IEEE, 2017: 617 - 621.

[17] 郑维,王昊,王洪斌. 动态环境下基于自适应步长 Informed-RRT * 和人工势场法的机器人混合路径规划[J]. 计量学报, 2023,44(1):26 - 34.

[18] Wei K, Ren B. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(2):571.

[19] 朱花,郝赫,阳明,等. 基于扩展角度控制的改进 RRT 机械臂路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(9):11 - 15.

[20] 谭建豪, 潘豹, 王耀南, 等. 基于改进 RRT * FN 算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2021,36(8): 1834 - 1840.

[21] 徐望宝, 陈雪波. 一种基于人工力矩的动态队形控制方法[J]. 控制理论与应用, 2009(11):1232 - 1238.

[22] Xu W B, Zhao J, Chen X B, et al. Artificial moment method using attractive points for the local path planning of a single robot in complicated dynamic environments[J]. Robotica, 2013,31(8):1263 - 1274.

[23] Xu W B, Liu X P, Chen X B, et al. Improved artificial moment method for decentralized local path planning of

multirobots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015,23(6):2383 - 2390.

[24] Xu W, Liu X, Chen X, et al. An artificial moment method for conflict resolutions with robots being close to their targets[J]. Information Sciences, 2021,542:286 - 301.

[25] Huber L, Slotine J J, Billard A. Avoiding dense and dynamic obstacles in enclosed spaces: application to moving in crowds[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(5):3113 - 3132.

[26] Benshan M, Chao W, Qing H, et al. APF-RRT*: an efficient sampling-based path planning method with the guidance of artificial potential field[C]//2023 9th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering. Shenzhen, China: IEEE,2023:207 - 213.

Path planning algorithm for manipulator end-effector based on improved artificial moment method

Zhang Yawen, Yan Yuankun, Liu Andong, Fu Minglei, Zhang Wenan

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Aiming at the problems of low search efficiency and poor path quality of traditional algorithms in manipulator path planning, the 3 dimension artificial moment method (3D-AMM) for obstacle avoidance of end-effector is proposed. 3D-AMM extends the existing 2D artificial moment method to 3D space, and redefines and models the related concepts. The vector triple product method is introduced to construct the attractive function segments on the obstacle, and an adaptive axis selection mechanism is proposed and gradient vectors are computed in 3D space using the gradient ascent method as a means to find the fastest growing directions of the artificial moment functions for both attractive and repulsive moments. The gradient vectors are used as controller inputs to obtain motion vectors and path points that both approach the target point and avoid obstacles quickly. The effectiveness of the proposed improved artificial moment method for obstacle avoidance at the end-effector of the manipulator is verified through simulations and experiments on Franka Emika Panda manipulator.

Key words: manipulator, artificial moment method, obstacle avoidance, path planning, end-effector