

引用格式: 贾正荣, 王航宇, 卢发兴. 基于障碍凸化的改进环流 APF 路径规划[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 323189. JIA Z R, WANG H Y, LU F X. Improved circulating APF route planning based on obstacle convexification[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(10): 323189 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23189

基于障碍凸化的改进环流 APF 路径规划

贾正荣, 王航宇, 卢发兴*

海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430033

摘要: 为改善人工势场法(APF)在复杂障碍环境下的路径规划能力,提出基于障碍凸化的改进环流 APF 路径规划方法。通过改变 APF 方法斥力势场的方向,使其形成绕行障碍边缘的环流,改善了 APF 方法在平台-目标位置连线与障碍边界垂直时可能陷入局部极小值的问题。针对多边形障碍(凹、凸)与圆形障碍,给出包括障碍初始化与相交障碍集合迭代凸化步骤的障碍凸化方法,将复杂障碍空间转换成为凸障碍的空间,避免平台进入凹多边形或相交障碍产生的凹区域而无解的问题。在仿真环境中,对比了传统 APF 方法、未使用障碍凸化的环流 APF 方法、使用障碍凸化的环流 APF 方法的路径规划结果,并分析了不同障碍数量、相交障碍数量条件下的方法计算耗时。根据结果,使用障碍凸化的环流 APF 方法能够明显改善 APF 方法在复杂障碍环境下的路径规划能力,方法实时性好,每个障碍所需的单步计算耗时约为 0.02~0.03 ms,能够支持平台在复杂障碍环境下的在线路径规划。

关键词: 路径规划; 人工势场法; 局部极小值; 障碍凸化; 航路规划

中图分类号: V219 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2019)10-323189-15

人工势场法(Artificial Potential Field, APF)是一种用于路径规划的方法,具有形式简单、实时性好的特点,能够用于静态路径规划与动态路径规划问题中^[1-2],并且可以并行求解以提高效率^[3]。其基本原理是将终点作为引力源,障碍作为斥力源,生成一个空间内的势场,移动平台沿着势场方向运动以规避障碍并到达终点^[4-8]。

人工势场法的一个主要问题是局部极小值问题:由于障碍形状多样,可能在空间中产生引力与斥力的平衡点,平台到达这一平衡点后将无法逃逸而导致路径规划无解。

现有文献为解决 APF 方法的势场局部极小值问题,提出了各种改进方法。文献[9]通过引入目标与机器人的相对距离,将原有斥力势场函数乘以一个距离因子,使机器人在目标位置处合力为零。针对多边形障碍,引入一种边缘探测方法,

作多边形的外接圆,从而将多边形障碍转换为点障碍。文献[10]将作为势场模型的 Gaussian 函数进行了适当变形,使其能更准确地反映势场环境。通过分析震荡现象产生的原因,以及局部极小值点的特点,将粒子群算法引入到势场的探测过程中,在此基础上提出了等位线法用于逃逸局部极小值。文献[11]提出了通过增加虚拟目标点和原目标点共同对机器人产生引力的方法来解决传统人工势场法中出现的局部极小点问题,然而得到的路径结果具有一定的振荡现象。文献[12-14]利用模拟退火算法解决人工势场法的局部极小点问题。文献[15]针对传统人工势场法应用于移动机器人路径规划存在的缺陷,建立了改进的人工势场模型;使用势场强度代替力矢量进行路径规划;在障碍物的斥力势场中添加系数项,解决障碍物与目标点过近导致的目标不可达问题;考

收稿日期: 2019-05-28; 退修日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-06-27; 网络出版时间: 2019-07-03 16:51

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20191022.html>

* 通信作者. E-mail: 13607124410@163.com

考虑移动障碍物速度与机器人速度的影响,将速度信息引入到势场函数中;引入“填平势场”引导机器人走出局部极小点。文献[16]提出添加附加控制力的方法,当机器人所受的斥力与吸引力在一条直线上时,对机器人施加一个依赖于障碍物的控制力,使机器人尽快跳出局部极小点。文献[17]通过在势场局部极小值点附近增加虚拟障碍以改变附近的势场分布。文献[18]通过粒子群优化算法解决势场局部极小值问题。文献[19]增加控制力的作用规避无解的情况。文献[20]则通过改变障碍的形状以提高路径可解的概率。文献[21]通过引入一种引力势场选择策略以规避势场的局部极小值。文献[22]通过引入优先策略以更改 APF 算法解决路径规划无解的问题。文献[23]通过引入引力源与斥力源之外的控制外力以优化路径规划求解。文献[24]通过引入虚拟路径点产生外力以避免平台进入局部极小值。文献[25]提出了基于改进人工势场的防碰撞控制方法,引入辅助斥力势来提高碰撞规避的效果。文献[26]为解决传统人工势场法无法避免的局部极小问题,将局部极小分为两类,分别给出两类极小值的判定定理及方法,仍然使用了一种增加的“填平势场”用于改善局部极小值问题。文献[27]研究全局静态环境下移动机器人路径规划,提出一种改进势场蚁群算法,该方法针对离散(网格)地图内的路径规划。文献[28]提出了一种基于滚动时域控制和快速粒子群优化方法,将路径规划问题转化为优化问题,并将斥力场引入到代价函数中,提升路径安全性。与之类似,文献[29]也采用了一种预测控制的方法优化路径。

可见,一般通过 3 种方法解决 APF 方法的势场局部极小值问题,一是在势场局部极小值附近引入选择策略,这种方法在障碍数量较小时易于实现,但是当障碍数量增多后,策略将变得较为复杂,同时,当平台位于多个障碍之间且并未陷入局部极小值时,路径可能产生较为明显的振荡;二是采用智能算法寻找逃出势场局部极小值的路径,这种方法需要大量的运算,掩盖了 APF 实时性好的特点;三是增加引力或斥力源以改变势场分布情况,但是如何增加引力或斥力源对于是否可解有很大的影响,若引力或斥力源增加失当,则可能造成无解或路径振荡。

另外,现有方法还采用了预测控制的思路^[28-29],在路径规划的每个时间步长上展开一个预测窗口,并设立若干优化指标,滚动地优化路径以取得更好的效果。但是如果能够避免传统 APF 方法局部极小值导致无解的问题,在理论上将会进一步提升预测控制路径规划的效率。

除此之外,现有方法在路径规划过程中,为了避免凹障碍的不利影响,一般都对障碍采用了凸化处理^[9],但是当障碍数量较多、彼此相交情况复杂时,需要一种更为详尽、全面的方法进行障碍的凸化处理。

综上,为了提高 APF 方法的实用性,需要解决的问题主要有两点,一是在复杂障碍环境内应用 APF 方法的问题,二是因势场局部极小值导致无解的问题。

1 问题描述

移动平台需要在障碍空间内运动至指定的目标位置,移动平台的运动受到转弯半径的约束,其转弯半径不能小于最小转弯半径 r_{\min} 。

实际环境中出现的大部分障碍都能够通过多边形障碍、圆形障碍以及它们的组合表示。多边形障碍包括凸多边形与凹多边形,可以描述环境空间中的禁飞区、一般实体障碍等。圆形障碍不仅可以表示禁飞区、实体障碍,而且可以描述威胁区域或敌方火力作用区域。

在使用 APF 进行路径规划过程中,由于障碍存在凹陷,当平台进入这些凹陷区域后,斥力与引力的平衡会导致平台进入局部最小值点,从而无解。

凹障碍的出现主要有 2 种情况,分别为凹多边形障碍与相交的凸障碍产生的凹区域,如图 1 和图 2 所示。因此,可以将凹障碍凸化以避免 APF 方法无解的问题。另外,在凸多边形障碍环境中,传统 APF 方法仍然存在局部极小值的问题,比如当凸多边形的边界与平台-目标位置连线垂直时,合势场也有可能为 0,如图 3 所示。因而还需要对 APF 斥力势场进行一定的改进,使斥力势场沿着多边形障碍绕行,如图 4 所示,从而避免图 3 中的情况。

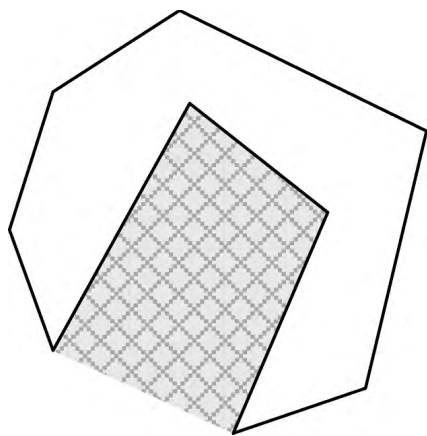


图 1 凹多边形障碍

Fig. 1 Concave polygon obstacle

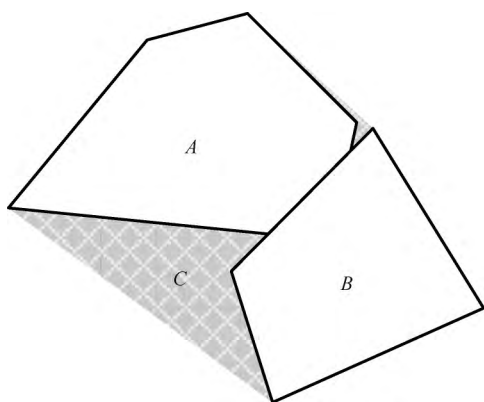


图 2 相交凸障碍产生的凹区域

Fig. 2 Concave zone caused by intersecting concave obstacles

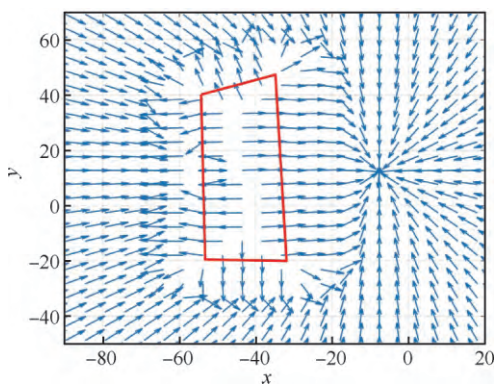


图 3 合势场为 0 的情况

Fig. 3 Situation when resultant potential filed is 0

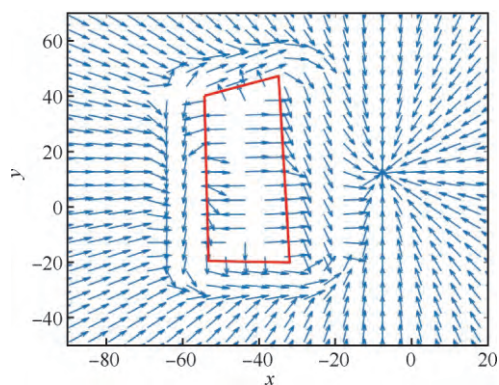


图 4 环绕多边形障碍的势场方向

Fig. 4 Repulsive potential filed circulates around polygon obstacle

2 环流 APF 方法

2.1 平台运动模型

设平台状态向量为 $\mathbf{X}_p = [x_p, y_p, v_p, \beta_p, \omega_p]^T$, x_p, y_p 为平面内的位置坐标, v_p 为速率, β_p 为航向, ω_p 为角速度, 在离散形式下, 平台的运动可以描述为

$$\begin{cases} x_p(k+1) = x_p(k) + \Delta t \cdot v_p(k) \cos \beta_p(k) \\ y_p(k+1) = y_p(k) + \Delta t \cdot v_p(k) \sin \beta_p(k) \\ v_p(k+1) = v_p(k) + \Delta t \cdot a_p(k) \\ \beta_p(k+1) = \beta_p(k) + \Delta t \cdot \omega_p(k) \\ \omega_p(k+1) = \omega_p(k) + \Delta t \cdot \varphi_p(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δt 为时间步长; a_p 为加速度; φ_p 为角加速度, 通过调整平台航向来控制平台的路径。

由于本文仅涉及单一平台在静态障碍环境中的运动, 不涉及坐标的变换, 因此可以以平面内任意一点作为坐标原点建立惯性坐标系, 全文中的坐标均在同一个坐标系下描述, 后文中将不再强调坐标系。

2.2 APF 方法路径规划

APF 方法可以实时生成规避障碍的路径。在 APF 方法中, 终点产生引力, 障碍产生斥力, 合力的梯度即势场决定了平台的运动方向。

设终点位置为 $\mathbf{X}_g = [x_g, y_g]^T$, 平台当前位置为 $\mathbf{X}_s = [x_p, y_p]^T$, 障碍为 Ω_i , 障碍的数量为 n_{ob} , 则 APF 方法构建斥力 U_r 为

$$U_r = \sum_{i=1}^{n_{ob}} f_r(\mathbf{X}_s, \Omega_i) \quad (2)$$

引力 U_a 为

$$U_a = f_a(\mathbf{X}_s, \mathbf{X}_g) \quad (3)$$

则合力为

$$U = U_r + U_a \quad (4)$$

梯度场为

$$\nabla U = \frac{\partial U}{\partial \mathbf{X}_s} \quad (5)$$

梯度场 ∇U 决定了平台处于 \mathbf{X}_s 时应当朝向的航向,平台通过控制角速度使航向与 ∇U 保持一致。记梯度场方向角为 $\phi = \angle \nabla U$,此时角速度 ω_p 应当为

$$\omega_p^* = (\phi - \beta_p) / \Delta t \quad (6)$$

式中: ω_p^* 为不考虑角速度最大值条件下的理想角速度,实际的平台角速度有界,其最大值记为 ω_{\max} ,即

$$|\omega_p| \leq \omega_{\max} \quad (7)$$

从而实际的角速度应当为

$$\omega_p = \text{sign}(\omega_p^*) \min\{|\omega_p^*|, \omega_{\max}\} \quad (8)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数,即

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.3 引力与斥力构建

在本文的分析中,传统 APF 方法与基于环流斥力势场的改进 APF 方法仅梯度构建形式不同,引力与斥力的函数相同。

对于平台位置 \mathbf{X}_s ,终点位置 \mathbf{X}_g ,凸障碍 Ω_i 以及其与 \mathbf{X}_s 的最近点 $\mathbf{X}_{d,i}$,引力 U_a 为

$$U_a = \frac{|\mathbf{X}_g - \mathbf{X}_s|}{U_{a,\max}} \quad (10)$$

式中: $U_{a,\max}$ 为一常量,为使 U_a 在 \mathbf{X}_s 的主要活动范围内取值为 $[0, 1]$ 之间,可以取

$$U_{a,\max} = k_{\max} |\mathbf{X}_g - \mathbf{X}_{s,0}| \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X}_{s,0}$ 为平台 \mathbf{X}_s 的初始位置; k_{\max} 为大于 1 的常量。

斥力 U_r 为平台 \mathbf{X}_s 与每个障碍 Ω_i 的斥力和:

$$U_r = \sum_{i=1}^{n_{ob}} U_{r,i} \quad (12)$$

式中: $U_{r,i}$ 为平台 \mathbf{X}_s 与障碍 Ω_i 的斥力,表达式为

$$U_{r,i} = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{d_{ob,i}}{\rho/3}\right)^2\right] & d_{ob,i} \leq \rho \\ 0 & d_{ob,i} > \rho \end{cases} \quad (13)$$

式中: $d_{ob,i}$ 为平台 \mathbf{X}_s 与障碍 Ω_i 的距离; ρ 为斥力作用距离;当 \mathbf{X}_s 与 Ω_i 的距离小于 ρ 时开始产生斥力,斥力作用距离应当取值为一定倍数的平台最小转弯半径以使平台能够规避障碍。通过以上方式构建的势场能够在 \mathbf{X}_g 不在斥力作用范围内时,使 \mathbf{X}_g 成为全局合力的最小值点。

对于引力 U_a ,显然有

$$U_a(\mathbf{X}_g) = 0 < U_a(\mathbf{X} | \mathbf{X} \neq \mathbf{X}_g) \quad (14)$$

对于斥力,显然有

$$U_r = \sum_{i=1}^{n_{ob}} U_{r,i} \geq 0 \quad (15)$$

从而,当 $U_r(\mathbf{X}_g) = 0$,即 \mathbf{X}_g 不在斥力作用范围内时,有

$$U(\mathbf{X}_g) = U_a(\mathbf{X}_g) < U(\mathbf{X} | \mathbf{X} \neq \mathbf{X}_g) \quad (16)$$

即终点 \mathbf{X}_g 是全局最小值点。

2.4 凸多边形与圆形障碍的斥力描述

一般的 APF 方法假设障碍为点障碍,从而斥力 U_r 可以直接表示为障碍点 $\mathbf{X}_{ob,i}$ 与平台当前位置 \mathbf{X}_s 的函数,当障碍为凸多边形与圆形时,与点障碍类似,可以求解 \mathbf{X}_s 到凸多边形或圆形的最近点作为障碍点计算斥力。

1) 凸多边形障碍最近距离点

设凸多边形障碍 $\Omega_{op,i}$ 由有序顶点集合构成,记为 $\{\mathbf{X}_{op,ij} = [x_{op,ij}, y_{op,ij}]^T\}$, i 为障碍序号。求解平台 \mathbf{X}_s 与凸多边形障碍 $\Omega_{op,i}$ 的距离,即求解 \mathbf{X}_s 与 $\Omega_{op,i}$ 中每条边距离的最小值。

以边 $\mathbf{X}_{op,ij}$ 到 $\mathbf{X}_{op,ij+1}$ 为例,设该边上的点 $\mathbf{X}_{\tau,ij}$ 通过参数 τ 描述,即

$$\mathbf{X}_{\tau,ij} = \mathbf{X}_{op,ij} + \tau(\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij}) \quad (17)$$

式中:参数 $\tau \in [0, 1]$,从而 \mathbf{X}_s 与 $\mathbf{X}_{\tau,ij}$ 的距离为 $|\mathbf{X}_s - \mathbf{X}_{\tau,ij}|$,距离极值对应参数 τ^* 为

$$\tau^* = \frac{\mathbf{X}_s^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij}) - \mathbf{X}_{op,ij}^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})}{(\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})^T (\mathbf{X}_{op,ij+1} - \mathbf{X}_{op,ij})} \quad (18)$$

若 $\tau^* \in [0, 1]$,则极值点 $\mathbf{X}_{\tau^*,ij}^*$ 位于线段上,若不然,则极值点 $\mathbf{X}_{\tau^*,ij}^*$ 位于线段延长线上,从而 \mathbf{X}_s 与边 $\mathbf{X}_{op,ij}$ 到 $\mathbf{X}_{op,ij+1}$ 的最短距离 $d_{op,ij}$ 为

$$d_{op,ij} = \begin{cases} |X_s - X_{r,ij}^*| & \tau^* \in [0,1] \\ |X_s - X_{op,ij}| & \tau^* \notin [0,1]; \\ & |X_s - X_{op,ij}| \leq |X_s - X_{op,ij+1}| \\ |X_s - X_{op,ij+1}| & \tau^* \notin [0,1]; \\ & |X_s - X_{op,ij+1}| < |X_s - X_{op,ij}| \end{cases} \quad (19)$$

对应边 $X_{op,ij}$ 到 $X_{op,ij+1}$ 上的点 $X_{dp,ij}$ 为

$$X_{dp,ij} = \begin{cases} X_{r,ij}^* & \tau^* \in [0,1] \\ X_{op,ij} & \tau^* \notin [0,1]; \\ & |X_s - X_{op,ij}| \leq |X_s - X_{op,ij+1}| \\ X_{op,ij+1} & \tau^* \notin [0,1]; \\ & |X_s - X_{op,ij+1}| < |X_s - X_{op,ij}| \end{cases} \quad (20)$$

对于凸多边形障碍 $\Omega_{op,i}$ 的所有边,依次求解 $d_{op,ij}$ 与 $X_{dp,ij}$,取 $d_{op,ij}$ 的最小值作为 X_s 与 $\Omega_{op,i}$ 的距离,记为 $d_{op,ij}$,对应 $\Omega_{op,i}$ 边上的点记为 $X_{dp,ij}$,之后即可直接采用点障碍的斥力模型进行斥力求解。

2) 圆形障碍最近距离点

圆形障碍记为 $\Omega_{oc,i}$,圆心为 $X_{oc,i}$,半径为 $r_{oc,i}$,从而平台 X_s 与圆形障碍的最近距离 $d_{oc,i}$ 为

$$d_{oc,i} = |X_s - X_{oc,i}| - r_{oc,i} \quad (21)$$

对应 $\Omega_{oc,i}$ 上的位置为 $X_{dc,i}$

$$X_{dc,i} = d_{oc,i} \frac{X_s - X_{oc,i}}{|X_s - X_{oc,i}|} + X_{oc,i} \quad (22)$$

在后文中,当不严格区分凸多边形障碍与圆形障碍时, X_s 与障碍的最近距离与障碍上的对应点统一记为 $d_{ob,i}$ 与 $X_{d,i}$ 。

2.5 环流 APF 势场

环流 APF 方法的引力势场记为 $F_{c,a}$,斥力势场记为 $F_{c,r}$,合势场记为 F_c 。环流 APF 方法的引力势场与传统方法相同,区别在于斥力势场。

对于平台位置 X_s 与障碍 Ω_i 斥力负梯度为 $-\nabla U_{r,i}$,环流斥力势场 $F_{c,r,i}$ 与斥力梯度 $\nabla U_{r,i}$ 垂直,且大小相等,即

$$\begin{cases} F_{c,r,i}^T \nabla U_{r,i} = 0 \\ |F_{c,r,i}| = |\nabla U_{r,i}| \end{cases} \quad (23)$$

记 $\nabla U_{r,i} = [x_{r,i}, y_{r,i}]^T$,此时有 2 个方向均

满足要求,即

$$\begin{cases} \nabla U_{r,i,+} = [-y_{r,i}, x_{r,i}]^T \\ \nabla U_{r,i,-} = [y_{r,i}, -x_{r,i}]^T \end{cases}$$

环流斥力势场应当与平台原有的运动方向尽量一致,记平台航向方向单位向量为 $V_p = [\cos \beta_p, \sin \beta_p]^T$,则 $F_{c,r,i}$ 为

$$F_{c,r,i} = \begin{cases} \nabla U_{r,i,+} & V_p^T \nabla U_{r,i,+} > 0 \quad \text{or} \\ & V_p^T \nabla U_{r,i,+} = 0 \wedge -V_p^T \nabla U_{r,i} < 0 \\ \nabla U_{r,i,-} & V_p^T \nabla U_{r,i,-} > 0 \quad \text{or} \\ & V_p^T \nabla U_{r,i,-} = 0 \wedge -V_p^T \nabla U_{r,i} > 0 \end{cases} \quad (24)$$

环流斥力势场的方向如图 5 所示,其中平台航向沿着 V_p , $-\nabla U_{r,i}$ 为传统斥力势场的方向, $-\nabla U_{r,i}$ 与多边形障碍的边界垂直,方向向外,而 $\nabla U_{r,i,+}$ 、 $\nabla U_{r,i,-}$ 为与 $-\nabla U_{r,i}$ 垂直的两个向量,作

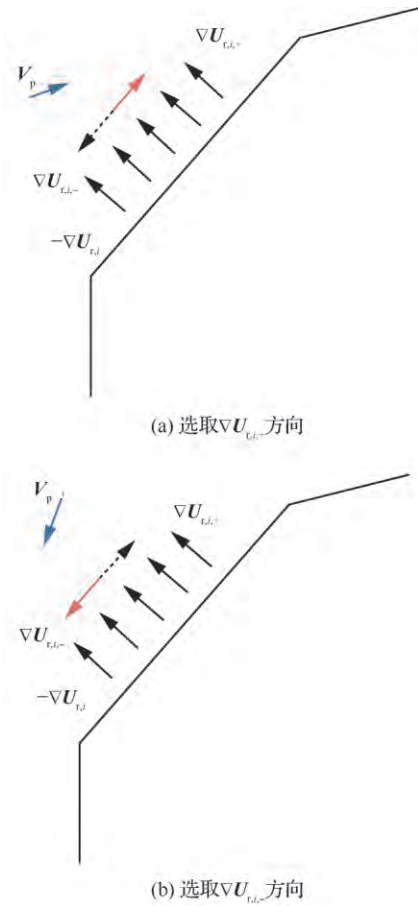


图 5 环流斥力势场方向的选取

Fig. 5 Selection of direction of circulating repulsive potential field

为环流斥力势场的备选向量。平台航向与最终选取的环流斥力势场方向 $F_{c,r,i}$ 应当尽量一致, 夹角不超过 90° 。

另外, 规定当 V_p 与 $-\nabla U_{r,i}$ 方向相同时(朝向障碍边界且与障碍边界垂直), 选取 $\nabla U_{r,i,+}$ 作为环流斥力势场的方向; 当 V_p 与 $-\nabla U_{r,i}$ 方向相反时(远离障碍边界且与障碍边界垂直), 选取 $\nabla U_{r,i,-}$ 作为环流斥力势场的方向, 如图 6 所示。

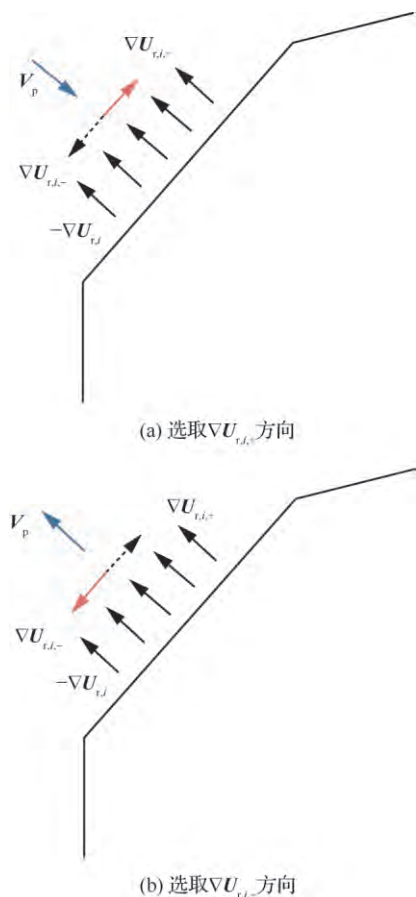


图 6 环流斥力势场方向的选取(特殊情况)
Fig. 6 Selection of direction of circulating repulsive potential field (special cases)

注意到, 若单纯选取与 $-\nabla U_{r,i}$ 垂直的环流势场, 则斥力势场将不能将平台推离障碍, 因此, 实际中可以通过合成环流斥力势场与传统 APF 斥力势场 $F_{t,r,i}$ 构建形式如下的变体环流斥力势场 $F_{c,r,i}^*$:

$$F_{c,r,i}^* = aF_{c,r,i} + bF_{t,r,i} \quad (25)$$

式中: $a, b > 0$ 且 $a + b = 1$, $F_{c,r,i}^*$ 为环绕障碍边界的势场与垂直障碍边界向外的势场之和。

从而环流斥力势场和为 $F_{c,r}$:

$$F_{c,r} = \sum_{i=1}^{n_{ob}} F_{c,r,i} \quad (26)$$

合成后的变体环流斥力势场记为 $F_{c,r}^*$ 。

合势场为

$$F_c = F_{c,a} + F_{c,r} \quad (27)$$

由于环流斥力势场的方向与移动平台航向相关, 因此在理论上能够克服传统 APF 方法的局部极小值问题, 具体证明见附录 A。

3 障碍凸化

障碍凸化针对环境中出现的所有凹障碍以及障碍相交产生的凸区域。凸化过程分为 2 步: 首先, 进行障碍初始凸化, 将环境中的所有凹多边形障碍凸化成为凸多边形障碍, 从而使环境中只存在凸多边形障碍与圆形障碍; 然后, 进行相交障碍集合迭代凸化, 判断环境中的障碍是否相交, 将相交的障碍进行组合、凸化, 消除相交障碍产生的凸区域。由于组合、凸化后的障碍会产生新的相交情况, 因此还需要对于新得到的障碍再次进行相交判断与组合、凸化, 即障碍集合迭代凸化。

3.1 障碍初始凸化

对于凹多边形障碍 $\Omega_{opc,i}$, 顶点为 $\{X_{opc,ij} = [x_{opc,ij}, y_{opc,ij}]^T\}$, 通过如下步骤可以得到一个由 $\Omega_{opc,i}$ 的顶点构成的凸多边形。

算法 1 多边形凸化

1) 对于所有顶点, 求解 $x_{opc,ij}$ 坐标最小值对应的顶点作为凸多边形的初始顶点 $X_{opc,ij,0}^*$, 并设向量 $V_{opc,0} = [0, 1]^T$, 设 $k = 0$ 。

2) 对于除了 $X_{opc,ij,k}^*$ 之外的所有顶点, 分别计算 $H_{ij,k}$:

$$H_{ij,k} = \left(\frac{X_{opc,ij} - X_{opc,ij,k}^*}{\|X_{opc,ij} - X_{opc,ij,k}^*\|} \right)^T V_{opc,k} \quad (28)$$

即判断向量 $X_{opc,ij} - X_{opc,ij,k}^*$ 与 $V_{opc,k}$ 的相对方向。

3) 求解 $H_{ij,k}$ 最大值对应的顶点作为凸多边形的第 $k + 1$ 个顶点, 记为 $X_{opc,ij,k+1}^*$, 同时更新向量:

$$V_{opc,k+1} = \frac{X_{opc,ij,k+1}^* - X_{opc,ij,k}^*}{\|X_{opc,ij,k+1}^* - X_{opc,ij,k}^*\|} \quad (29)$$

4) 如果

$$\mathbf{X}_{\text{opc},ij,k+1}^* = \mathbf{X}_{\text{opc},ij,0}^* \quad (30)$$

则完成求解,得到的所有顶点(不包括第 $k+1$ 个顶点)构成一个凸多边形,若不然,则跳转至步骤 2)。

3.2 障碍相交判断

1) 多边形相交判断

多边形相交即判断两个多边形的边是否相交,以多边形 i_a 与多边形 i_b 的两条边 $\mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a}$ 到 $\mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a+1}$ 与 $\mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b}$ 到 $\mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b+1}$ 为例,若线性方程

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{i_a}^T \Delta \mathbf{X}_{i_a} & -\Delta \mathbf{X}_{i_a}^T \Delta \mathbf{X}_{i_b} \\ -\Delta \mathbf{X}_{i_a}^T \Delta \mathbf{X}_{i_b} & \Delta \mathbf{X}_{i_b}^T \Delta \mathbf{X}_{i_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{i_a} \\ \tau_{i_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{i_a}^T (\mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b} - \mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a}) \\ \Delta \mathbf{X}_{i_b}^T (\mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a+1} - \mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b}) \end{bmatrix} \quad (31)$$

的解 τ_{i_a} 与 τ_{i_b} 满足:

$$\begin{cases} 0 \leq \tau_{i_a} \leq 1 \\ 0 \leq \tau_{i_b} \leq 1 \end{cases} \quad (32)$$

式中:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{X}_{i_a} = \mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a+1} - \mathbf{X}_{\text{op},i_a,j_a} \\ \Delta \mathbf{X}_{i_b} = \mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b+1} - \mathbf{X}_{\text{op},i_b,j_b} \end{cases} \quad (33)$$

则说明交点位于两条边上,从而两多边形相交。分别对两个多边形的边进行相互判断,若均不相交,还需要判断两多边形是否为包含关系,即相互判断多边形 i_a 中的一点(任取一顶点即可)是否为多边形 i_b 的内点,内点判断可以直接采用内角和判断方法,若 i_b 相邻顶点与 i_a 中一点的夹角和为 2π ,则该点是内点,两多边形为包含关系,相交。

2) 多边形与圆形相交判断

多边形与圆形相交判断即判断多边形的每条边与圆心的距离是否小于等于圆的半径,圆心与多边形边的距离计算模型可以使用式。

3) 圆形相交判断

圆形相交判断即判断两圆心的距离是否小于等于两圆的半径和。

3.3 相交障碍凸化

彼此相交的障碍构成一个相交障碍的集合,在这个集合中,对于任意一个障碍,均存在另一个障碍与该障碍相交,而并非要求集合内的任意两个障碍均相交。如图 7 所示,图 7 中 $C-A$ 与 $C-B$

相交, $C-B$ 与 $C-C$ 相交, $C-A$ 与 $C-C$ 不相交,但是 $C-A$, $C-B$, $C-C$ 构成一个相交障碍的集合,这是因为若至针对 $C-A$ 与 $C-B$ 进行相交障碍凸化,则凸化后的图形仍然会与 $C-C$ 产生一个凹区域。

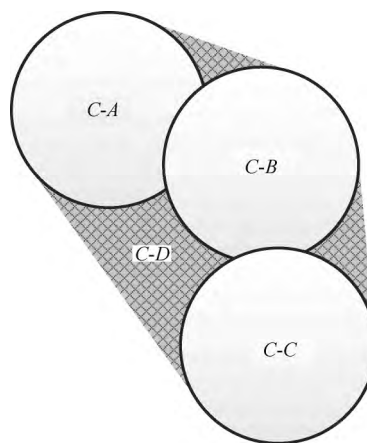


图 7 相交障碍集合

Fig. 7 Intersecting obstacles set

与图 7 中的情况类似,首先将所有障碍分成若干个相交障碍集合 $\Psi_\gamma = \{\Omega_i\}$,其中 γ 为序号,对于集合 Ψ_γ 中的任意一个障碍 Ω_i ,均存在另一个障碍 $\Omega_{i^*} \in \Psi_\gamma$ 与 Ω_i 相交。若某一个障碍不与任何其他障碍相交,则无需凸化,因而不属于 Ψ_γ 。

对于 Ψ_γ ,需要求解其中任意两个障碍的特征点(这两个障碍可能不相交),以构成一个能够包含 Ψ_γ 中所有障碍的凸多边形。

不同障碍间的特征点与凸化结果如图 8~图 10 所示,特征点为蓝色“×”,凸多边形由这些特征点通过算法 1 得到。

1) 多边形的特征点

多边形相交的特征点为两个多边形所有顶点的并集,如图 8 所示。

2) 多边形与圆形的特征点

多边形与圆形的特征点为多边形所有顶点,以及所有多边形顶点(不包括圆形内部的顶点)与圆形的切点构成的并集,如图 9 所示,圆形外点与圆的切点求解不再赘述。

3) 圆形的特征点

圆形的特征点为两个圆的公切点(公切线不相交),如图 10 所示,公切线求解方法在此不再赘述。

得到集合 Ψ_γ 内任意两障碍的特征点后,构

成一个所有特征点的集合,采用算法 1 凸化成为一个凸多边形,该凸多边形与集合 Ψ_y 内所有圆构成覆盖集合 Ψ_y 内所有障碍的凸图形,并作为相交障碍凸化结果。

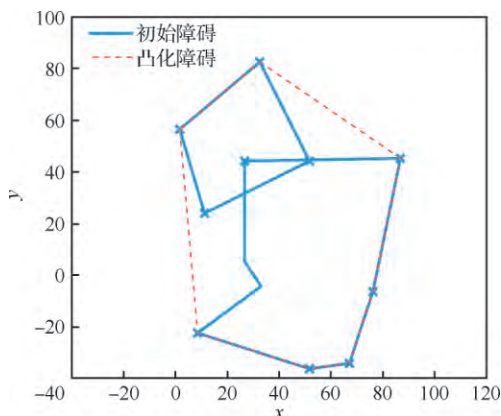


图 8 多边形的特征点

Fig. 8 Feature points of polygons

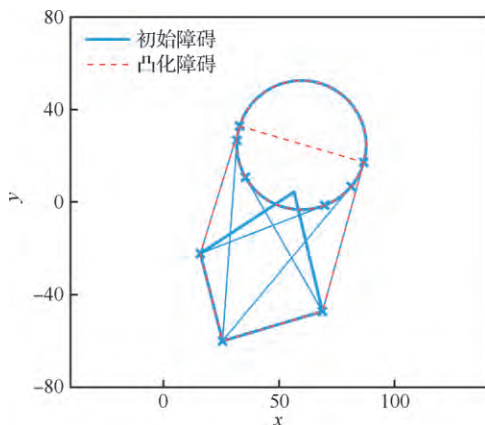


图 9 多边形与圆形的特征点

Fig. 9 Feature points of polygons and circles

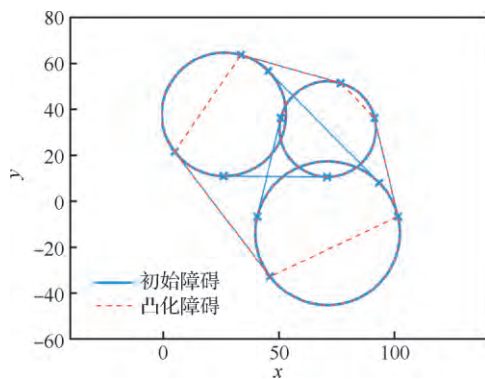


图 10 圆形的特征点

Fig. 10 Feature points of circles

3.4 相交障碍集合迭代凸化

经过相交障碍凸化,得到的结果可以分为 3 部分:① 所有不与其他障碍相交的障碍;② 相交障碍集合构成的凸多边形;③ 相交障碍集合内的圆。

由于产生的新凸多边形可能与已有障碍相交而产生凹区域,因此还需要对结果进行障碍相交判断与相交障碍凸化,即障碍集合的迭代凸化,当前后两次的结果一致时,迭代结束,得到的所有障碍作为凸化的障碍用于路径规划。

4 仿真分析

为验证方法有效性,首先在复杂障碍场景下与现有方法进行路径规划求解对比;之后在不同数量障碍的场景下分析方法的运算耗时。

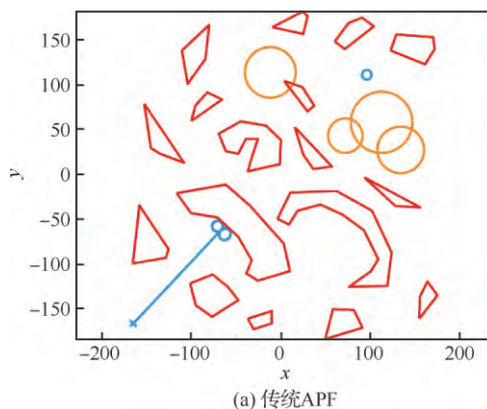
4.1 复杂障碍场景下的求解对比

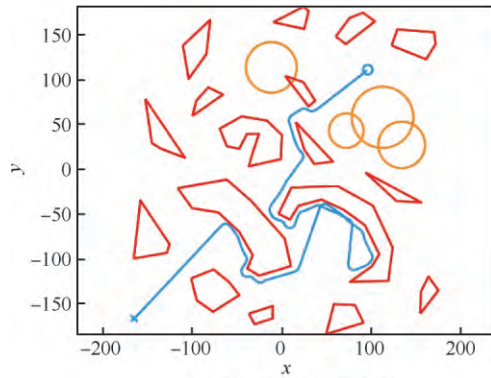
分别采用不同的 APF 方法求解不同场景下的路径规划。方法包括传统 APF 方法,环流 APF 方法(不使用障碍凸化),环流 APF 方法(使用障碍凸化)。在仿真分析过程中,将所有长度去量纲化处理,设定平台的最小转弯半径为 3,平台速度为 3/s,计算时间步长为 0.3 s,斥力作用距离为 9。两种场景设定为

场景 A 21 个障碍,其中,4 个圆形障碍,3 个凹多边形障碍,14 个凸多边形障碍。

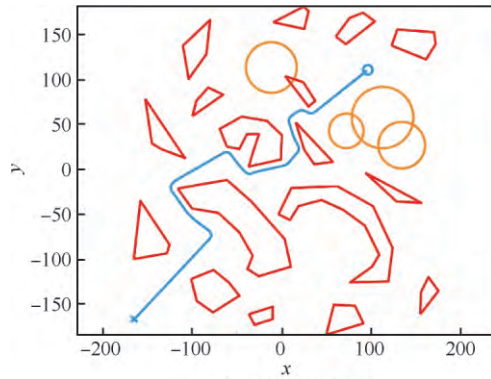
场景 B 53 个障碍,其中,15 个圆形障碍,4 个凹多边形障碍,34 个凸多边形障碍。

不同 APF 方法得到的路径规划结果如图 11 和图 12 所示,两种场景下的障碍凸化结果如图 13 和图 14 所示。





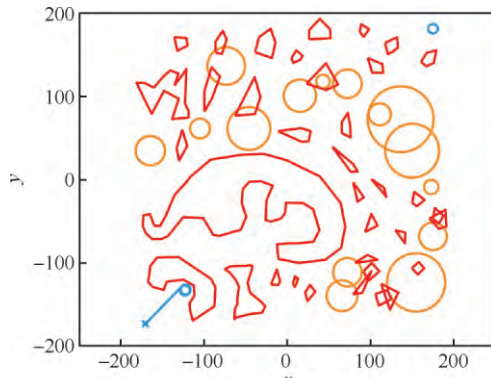
(b) 环流APF-无障碍物凸化



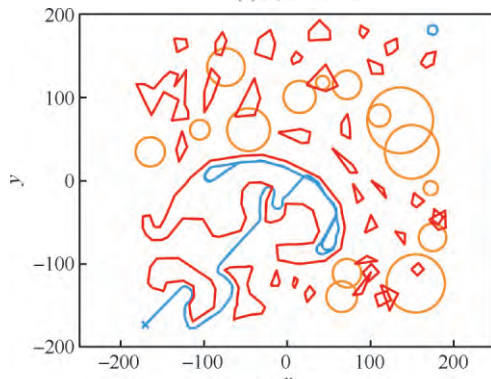
(c) 环流APF-障碍凸化

图 11 场景 A 路径规划结果

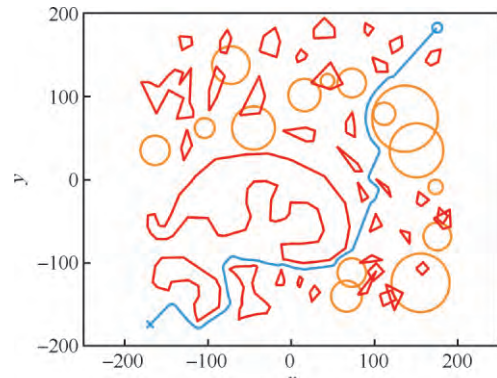
Fig. 11 Path planning results of Scenario A



(a) 传统APF



(b) 环流APF-无障碍物凸化



(c) 环流APF-障碍凸化

图 12 场景 B 路径规划结果

Fig. 12 Path planning results of Scenario B

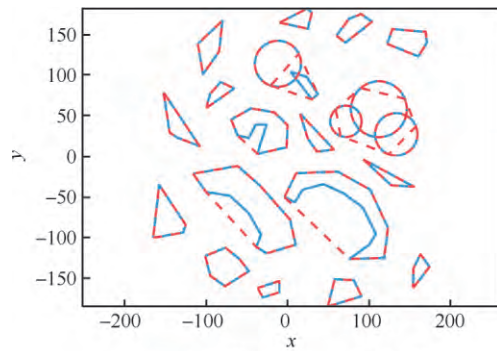


图 13 障碍凸化-场景 A

Fig. 13 Obstacle convexification of Scenario A

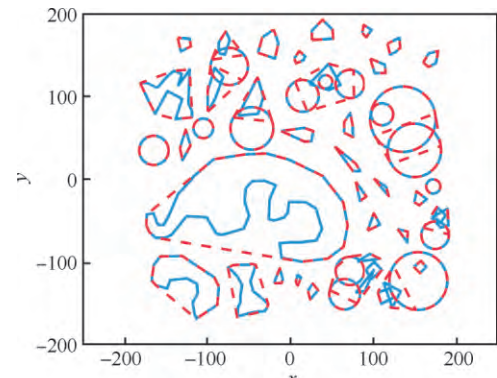


图 14 障碍凸化-场景 B

Fig. 14 Obstacle convexification of Scenario B

根据结果可得：

在两种场景下，由于在路径初始阶段设置了一个凹多边形的障碍，且凹陷部分正对平台航向，传统 APF 陷入了势场的局部最小值而无解，虽然

已经对合势场为 0 时的情况进行预先设置了规则,即当合势场为 0 时进行 90° 的转向,但是这种简单的策略并没有改善传统 APF 的效果。

相比之下,环流 APF 方法在场景 A 中虽然有解,但是路径的一部分在凹多边形障碍中出现了绕行,而在场景 B 中环流 APF 方法无解。虽然环流 APF 方法通过改变传统斥力势场的方向使平台能够贴着障碍边界运动,但是当平台进入凹多边形凹陷部分时,可能一直在凹多边形凹陷部分内绕行甚至进入障碍(见图 15)而依然无解。可见,如果不对障碍进行凸化,环流 APF 能否有解将取决于障碍凹陷的程度,环流 APF 能够逃离较浅的凹多边形,但是却有极大的可能陷入较深的凹多边形内。另外,注意到图 15 中平台进入了障碍,这是由于凹区域与平台的距离极值点不唯一,距离计算错误地选择了不应该产生斥力的边。

相应地,在对障碍进行凸化后,环流 APF 能够给出较为合理的路径规划结果。

4.2 方法计算耗时分析

基于障碍凸化的改进 APF 方法主要分为两个过程,一是障碍凸化,二是路径规划。障碍凸化需要一次计算完成,而路径规划可以在每个时间步长内单独计算。

在不同障碍数量条件下分析方法的计算耗时,目标位置与平台初始状态保持一致,改变障碍数量,不同场景的障碍数量如表 1 所示。

表 1 不同场景的障碍数量

Table 1 Obstacle number of different scenarios					
场景	障碍总数	圆形障碍	凹多边形障碍	凸多边形障碍	相交障碍数量
C-1	10	0	3	7	0
C-2	12	4	3	5	0
C-3	33	9	15	9	4
C-4	82	26	30	26	42

在不同障碍数量的场景下进行路径规划,得到的路径规划结果如图 15 所示。

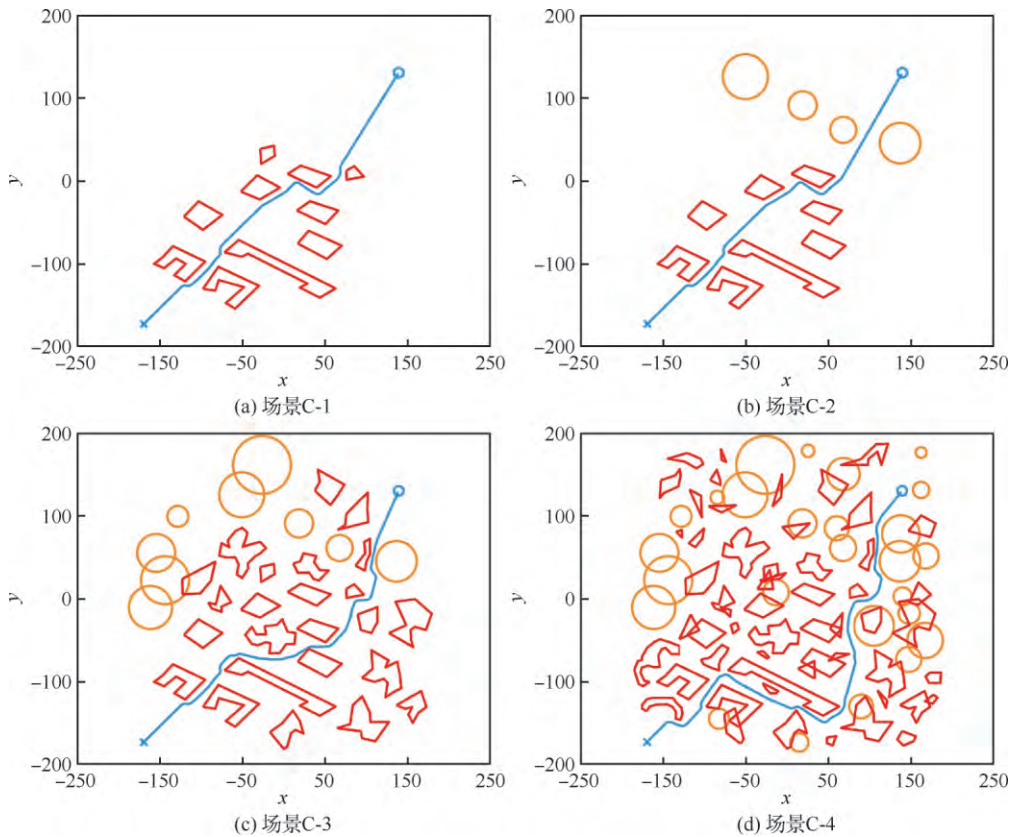


图 15 不同障碍数量场景下的路径规划结果

Fig. 15 Path planning results of scenarios with different obstacle numbers

不同障碍数量场景下的路径规划单步计算耗时如图 16 所示,平均单步计算耗时、平均单步耗时/障碍数量、障碍凸化耗时如表 2 所示。

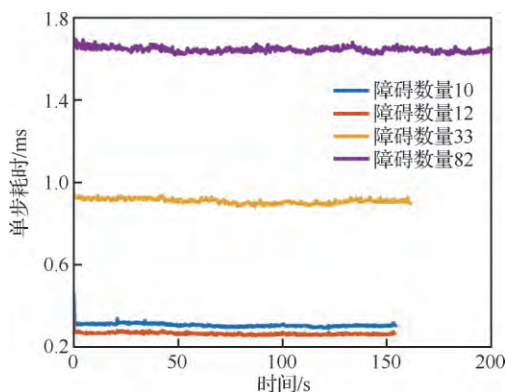


图 16 单步计算耗时

Fig. 16 Time consumption of single step

表 2 计算耗时

Table 2 Time consumptions

类别	障碍数量			
	10	12	33	82
平均单步耗时/ms	0.305	0.258	0.908	1.646
平均单步耗时/障碍数量	0.030	0.021	0.028	0.020
障碍凸化耗时/ms	22.009	15.918	337.745	1786.111

根据表 2 结果可得:障碍凸化耗时与障碍数量、障碍复杂程度有直接的相关性,并且随着障碍数量与障碍复杂程度的提升,障碍凸化耗时的增加并不是线性的。在场景 C-3 与 C-4 中,由于存在相交障碍,因此障碍凸化耗时相比 C-1 与 C-2 显著增加,这是由于障碍集合迭代凸化过程耗时较长,但是总体耗时仍然在可以接受的程度之内(C-4 场景 82 个障碍,耗时 1786.111 ms)。另外,虽然 C-1 中的障碍数量少于 C-2,但是障碍凸化耗时与平均单步耗时长于 C-2,这是由于 C-1 中的多边形数量多于 C-2,多边形的初始凸化、相交判断、斥力计算相比圆形的耗时更长。

在单步耗时方面,所有场景的单步耗时均在 ms 级,并且平均单步耗时与障碍数量的比值趋同,对于每一个障碍,计算耗时约为 0.02 ~ 0.03 ms。可以以此为根据设定计算的时间步长,使在每个时间步长内均可以保证完成路径规划求解。

计算环境为 i7-7700T @ 2.90 GHz, 8 GB RAM, Windows 7 x64, MATLAB 2018a。

5 结 论

在可行性方面,改进方法相比传统 APF 方法或不采用障碍凸化的环流 APF 方法,能够明显提高复杂障碍环境下的 APF 路径规划求解可行性。

在计算耗时方面,方法的计算耗时主要分为障碍凸化耗时与路径规划单步计算耗时 2 部分。障碍凸化耗时主要与障碍数量、障碍复杂程度相关,仿真环境下,在障碍数量 82,相交障碍数量为 42 时,障碍凸化耗时约为 1786.111 ms;单步计算耗时与障碍数量密切相关,并且呈近似线性关系,每个障碍所需的单步计算耗时约为 0.02 ~ 0.03 ms,可以以此为基准设定时间步长,以保证每个时间步长均能够完成路径规划计算,进而支持在线的 APF 方法路径规划。

参 考 文 献

- [1] NAKAZAWA K, TAKAHASHI K, KANEKO M. Movement control of accompanying robot based on artificial potential field adapted to dynamic environments[J]. Electrical Engineering in Japan, 2015, 192(1): 25-35.
- [2] MACKTOOBIAN M, SHOOREHDELI M A. Time-variant artificial potential field (TAPF): A breakthrough in power-optimized motion planning of autonomous space mobile robots[J]. Robotica, 2016, 34(5): 1128-1150.
- [3] MONTIEL O, SEPÚLVED A, ROBERT O, et al. Optimal path planning generation for mobile robots using parallel evolutionary artificial potential field[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 79(2): 237-257.
- [4] 朱毅, 张涛, 宋靖雁. 非完整移动机器人的人工势场法路径规划[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 152-158.
ZHU Y, ZHANG T, SONG J Y. Path planning for non-holonomic mobile robots using artificial potential field method[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(2): 152-158 (in Chinese).
- [5] 何仁珂, 魏瑞轩, 张启瑞, 等. 基于拟态电势能的飞行器航路规划方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(7): 1543-1549.
HE R K, WEI R X, ZHANG Q R, et al. Mimetic electric potential energy motion planning algorithm for aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(7): 1543-1549 (in Chinese).
- [6] 殷路, 尹怡欣. 基于动态人工势场法的路径规划仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3325-3328.

- YIN L, YIN Y X. Simulation research on path planning based on dynamic artificial potential field[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(11): 3325-3328 (in Chinese).
- [7] KITAMURA Y, TANAKA T, KISHINO F, et al. 3-D path planning in a dynamic environment using an octree and an artificial potential field[C]// International Conference on Intelligent Robots & Systems. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 1995: 474-481.
- [8] NAIR R R, BEHERA L, KUMAR V, et al. Multi-satellite formation control for remote sensing applications using artificial potential field and adaptive fuzzy sliding mode control[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(2): 508-518.
- [9] 卢恩超, 张邓斓, 宁雅男. 改进人工势场法的机器人路径规划[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 735-738.
- LU E C, ZHANG D L, NING Y N. Path planning for robot based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 735-738 (in Chinese).
- [10] 肖本贤, 余雷, 李善寿, 等. 逃逸人工势场法局部极小值策略的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19): 4495-4498.
- XIAO B X, YU L, LI S S, et al. Research of escaping local minima strategy for artificial potential field[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(19): 4495-4498 (in Chinese).
- [11] 罗乾又, 张华, 王姮, 等. 改进人工势场法在机器人路径规划中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1411-1413.
- LUO Q Y, ZHANG H, WANG H, et al. Application of improved artificial potential field approach in local path planning for mobile robot[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(4): 1411-1413 (in Chinese).
- [12] 张培艳, 吕恬生. 基于模拟退火—人工势场法的足球机器人路径规划研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 547-548.
- ZHANG P Y, LYU T S. Soccer robot path planning based on artificial potential field approach with simulated annealing[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(4): 547-548 (in Chinese).
- [13] ZHU Q, YAN Y, XING Z. Robot path planning based on artificial potential field approach with simulated annealing [C]// International Conference on Intelligent Systems Design & Applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 622-627.
- [14] ZHANG P Y, LU T S, SONG L B. Soccer robot path planning based on the artificial potential field approach with simulated annealing[J]. Mechanical Science & Technology, 2003, 22(5): 563-566.
- [15] 于振中, 闫继宏, 赵杰. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 50-55.
- YU Z Z, YAN J H, ZHAO J. Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1): 50-55 (in Chinese).
- [16] 张建英, 赵志萍, 刘瞰. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1306-1309.
- ZHANG J Y, ZHAO Z P, LIU D. A path planning method for mobile robot based on artificial potential field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1306-1309 (in Chinese).
- [17] LEE M C, PARK M G. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003: 735-740.
- [18] HASSAN S, YOON J. Haptic assisted aircraft optimal assembly path planning scheme based on swarming and artificial potential field approach[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 18-25.
- [19] CHEN Y B, LUO G C, MEI Y S, et al. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 14.
- [20] DRUST M, DIETZ T, VERL A. Dynamic and interactive path planning and collision avoidance for an industrial robot using artificial potential field based method[M]. Berlin: Springer, 2011: 413-421.
- [21] FEDELE G, LUIGI D' A, CHIARAVALLOTI F, et al. Obstacles avoidance based on switching potential functions [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017(4): 1-19.
- [22] RUCHTI J, SENKBEIL R, CARROLL J, et al. Unmanned aerial system collision avoidance using artificial potential fields[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2014, 11(3): 140-144.
- [23] GUAN H L, JIAN I Y, YUE O M, et al. UAV path planning in mixed-obstacle environment via artificial potential field method improved by additional control force [J]. Asian Journal of Control, 2014, 17(5): 1-11.
- [24] LIU Y, ZHAO Y. A virtual-waypoint based artificial potential field method for UAV path planning[C]// 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 949-953.
- [25] 朱旭, 闫茂德, 张昌利, 等. 基于改进人工势场的无人机编队防撞控制方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(6): 961-968.

- ZHU X, YAN M D, ZHANG C L, et al. UAV formation collision avoidance control method based on improved artificial potential field[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(6): 961-968 (in Chinese).
- [26] 范世鹏, 祁琪, 路坤锋, 等. 基于改进人工势场法的巡航导弹自主避障技术[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 828-834.
- FAN S P, QI Q, LU K F, et al. Autonomous collision avoidance technique of cruise missiles based on modified artificial potential method[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(8): 828-834 (in Chinese).
- [27] 王晓燕, 杨乐, 张宇, 等. 基于改进势场蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1775-1781.
- WANG X Y, YANG L, ZHANG Y, et al. Robot path planning based on improved ant colony algorithm with potential field heuristic[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1775-1781 (in Chinese).
- [28] 王文彬, 秦小林, 张力戈, 等. 基于滚动时域的无人机动态航迹规划[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 524-533.
- WANG W B, QIN X L, ZHANG L G, et al. Dynamic UAV trajectory planning based on receding horizon[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(4): 524-533 (in Chinese).
- [29] 徐杨, 陆丽萍, 褚端峰, 等. 无人车辆轨迹规划与跟踪控制的统一建模方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 799-807.
- XU Y, LU L P, CHU D F, et al. Unified modeling of trajectory planning and tracking for unmanned vehicle[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(4): 799-807 (in Chinese).

附录 A

为便于理论分析,引入理想移动平台的概念,理想移动平台总能沿着势场方向运动,即最大角速度与角加速度趋于 ∞ 。环流 APF 方法能够保证理想移动平台航路规划有解,即理想移动平台采用环流 APF 方法,总能抵达终点。

值得注意的是,限定障碍为凸障碍的目的是使对于每个障碍而言,平台与障碍之间的距离最小值点有且只有一个。而在凹障碍中,当平台处与障碍凹陷部分时,可能会出现多个平台与障碍的距离最小值点。从而无法定义障碍对于平台的斥力。

定理 A1 在凸障碍环境中,环流 APF 方法的势场不存在局部极小值

证明:

采用反证法,设凸障碍环境中,环流 APF 方法的势场存在局部极小值点,即对于 $X_{\min} \neq X_g$, 有

$$F_c(X_{\min}) \equiv 0 = F_{c,r} + F_{c,a} \quad (A1)$$

此时,引力势场 $F_{c,a}$ 与斥力势场 $F_{c,r}$ 的分布如图 A1 所示。

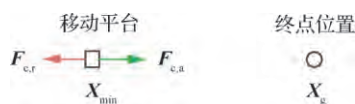


图 A1 合势场为 0 的情况

Fig. A1 Situation that resultant potential field is 0

设 $V_p(X)$ 是指向 X_{\min} 处的单位向量。由于 X_{\min} 是局部极小值,因此存在 X_{\min} 的去心邻域,该去心邻域内的所有位置势场均指向 X_{\min} 。因而也存在位置微元 δX , $V_p(X_{\min} + \delta X)$ 与 $V_p(X_{\min} - \delta X)$ 均指向 X_{\min} , 由于 V_p 是单位向量,因此有

$$V_p(X_{\min} + \delta X) = -V_p(X_{\min} - \delta X) \quad (A2)$$

注意到环流 APF 方法斥力势场的方向定义,当平台分别处于 $X_{\min} + \delta X$ 与 $X_{\min} - \delta X$ 位置并且航向指向 X_{\min} 时,平台航向相反,环流斥力势场的方向也相反,即

$$\frac{F_{c,r}(X_{\min} + \delta X)}{|F_{c,r}(X_{\min} + \delta X)|} = -\frac{F_{c,r}(X_{\min} - \delta X)}{|F_{c,r}(X_{\min} - \delta X)|} \quad (A3)$$

如图 A2 所示。

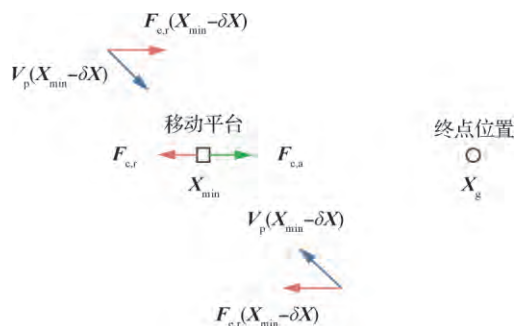


图 A2 斥力势场相反的情况

Fig. A2 Situation that repulsive potential fields are opposite

因此,平台分别以航向 $V_p(X_{\min} + \delta X)$ 与 $V_p(X_{\min} - \delta X)$ 经过 X_{\min} 时,有

$$F_{c,r}[X_{\min} | V_p(X_{\min} + \delta X)] = -F_{c,r}[X_{\min} | V_p(X_{\min} - \delta X)] \quad (A4)$$

从而平台分别以航向 $V_p(X_{\min} + \delta X)$ 与 $V_p(X_{\min} - \delta X)$ 经过 X_{\min} 时,若存在

$$F_c[X_{\min} | V_p(X_{\min} + \delta X)] = 0 \quad (A5)$$

则必有

$$F_c[X_{\min} | V_p(X_{\min} - \delta X)] = 0 = -F_{c,r}[X_{\min} | V_p(X_{\min} + \delta X)] + F_{c,a} = 2F_{c,a} \neq 0 \quad (A6)$$

其中,由于 X_{\min} 不是终点,因而 $F_{c,a} \neq 0$,与假设矛盾。因此 X_{\min} 不是局部极小值点。

另外,当理想移动平台以航向 $V_p(X_{\min} + \delta X)$ 经过 X_{\min} 时,若有合势场

$$F_c[X_{\min} | V_p(X_{\min} + \delta X)] = 0 \quad (A7)$$

且 $F_c(X_{\min} + \delta X)$ 指向 X_{\min} ,移动平台将会被“拉回” X_{\min} 并且航向会被反转,当移动平台以航向 $V_p(X_{\min} - \delta X)$ 再次经过 X_{\min} 时,则有

$$F_c[X_{\min} | V_p(X_{\min} - \delta X)] = 2F_{c,a}(X_{\min}) \quad (A8)$$

从而斥力势场 $F_{c,r}[X_{\min} | V_p(X_{\min} - \delta X)]$ 与引力势场 $F_{c,a}(X_{\min})$ 相同,合力势场将引导移动平台离开 X_{\min} 位置并且不再返回。但是对于终点位置 X_g ,由于 $F_{c,a}(X_g) = 0$,从不同方向进入 X_g 的合势场是可以相等且为 0 的。

根据以上分析,由于环流 APF 方法的斥力势场构建方式与移动平台航向相关,对于同一个位置,若移动平台的航向相反,则斥力方向也相反,因而环流 APF 方法对应合势场为 0 的位置,并不会表现为一个传统的局部极小值点使移动平台陷入该点,当移动平台再次从相反的方向经过该位置时,该位置的势场将不再为 0 而是与引力方向相同使移动平台向终点位置移动。

定理 A1 仅说明对于理想移动平台,环流 APF 方法能够保证有解,对于实际的移动平台,其角速度与角加速度是受限的,因此实际中仍然可能出现无解的情况。

(责任编辑: 苏磊)

Improved circulating APF route planning based on obstacle convexification

JIA Zhengrong, WANG Hangyu, LU Faxing^{*}

College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: To improve the path planning ability of Artificial Potential Field (APF) in complex obstacle environments, an improved circulating APF path planning method based on obstacle convexification is proposed. By changing the direction of the repulsive potential field into a circulation around the edge of the obstacle of the APF method, this design solves the problem that the platform may fall into the local minimum when the platform-target line is perpendicular to the obstacle boundary. For the polygonal obstacles (both concave and convex) and circular obstacles, the obstacle convexification methods including the initial obstacle convexification and the iterative convexification for intersection set are given, which transforms the complex obstacle space into the convex obstacle space, avoiding the problem of no solution when the platform entering the concave polygon or concave zone caused by intersecting obstacles. In the simulation environment, the path planning results are compared when adopting the traditional APF method, the circulating APF method without the obstacle convexification, and the circulating APF method using the obstacle convexification. And the time consumptions of different methods are analyzed under different obstacle numbers and intersecting obstacle numbers. The results suggest that the circulating APF method using obstacle convexification can significantly improve the path planning performance under complex obstacle environments. In addition, this method has good real-time performance that the time consumption of single step calculation for every obstacle ranges from 0.02-0.03 ms, enabling the online path planning in complex obstacle environments.

Keywords: route planning; artificial potential field; local minimum; obstacle convexification; path planning

Received: 2019-05-28; Revised: 2019-06-21; Accepted: 2019-06-27; Published online: 2019-07-03 16:51

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20191022.html>

^{*} Corresponding author. E-mail: 13607124410@163.com