

面向未知环境及动态障碍的人工势场路径规划算法



杜婉茹 王潇茵 田涛 张越

中国航天系统科学与工程研究院 北京 100048

摘要 实际战场环境错综复杂,很多隐蔽、动态的障碍无法通过高空手段预先探测得知,因而对智能体执行任务的安全性产生威胁。针对未知且障碍形态多样的战场环境,以躲避静、动障碍,追踪目标为研究对象,提出一种面向未知环境及动态障碍的改进人工势场(Artificial Potential Field, APF)路径规划算法。在该算法中,智能体构建了以目标点为中心的引力势场,以及以障碍物为中心的斥力势场,在智能体行进路途中感知局部障碍及目标点的运动信息,并且将信息加入势场函数的计算中达到动态避障与追踪的效果;另一方面,引入距离因子及动态临时目标点来消除 APF 算法常见的无解问题——极小解情况及路径抖动现象。通过建立不同数量的随机障碍场景,进行多次仿真对比实验,结果表明:所提算法能够在未知环境中灵活躲避动态障碍并进行目标点的追踪,可以有效消除死解及路径抖动问题。将所提算法与传统 APF 算法及添加了动态避障机制的文献[19]所述算法进行对比实验,结果表明所提算法能成功化解两种对比算法路径规划失败的情况,顺利完成路径规划任务,且成功率在 95% 以上。

关键词: 未知环境; 动态障碍; 动态 APF 算法; 路径规划; 动态避障; 目标追踪

中图分类号 TP391

Artificial Potential Field Path Planning Algorithm for Unknown Environment and Dynamic Obstacles

DU Wan-ru, WANG Xiao-yin, TIAN Tao and ZHANG Yue

China Academy of Aerospace Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China

Abstract The actual battlefield environment is complex. Many hidden and dynamic obstacles cannot be detected in advance by means of high altitude. It is a threat to the security of the agent. Aiming at the unknown battlefield environment with various obstacles, taking avoiding static and dynamic obstacles and tracking targets as the research object, an APF (Artificial Potential Field) path planning algorithm for unknown environment and dynamic obstacles is proposed. In this algorithm, the agent constructs the gravitational potential field centered on the target point and the repulsive potential field centered on the obstacle, perceives the motion information of the local obstacle and the target point on the route of the agent, and adds the information into the calculation of the potential field function to achieve the effect of dynamic obstacle avoidance and tracking. On the other hand, it introduces the distance factor and dynamic temporary target point to eliminate the minimum solution and path jitter of APF algorithm. The results show that the proposed algorithm can avoid dynamic obstacles and track the target points flexibly in unknown environment, and can effectively eliminate the dead solution and path jitter problems. The proposed algorithm is compared with the traditional APF algorithm and the algorithm described in literature [19] with a dynamic obstacle avoidance mechanism added. Experimental results show that the APF algorithm can successfully resolve the problem of path planning failure of the two comparative algorithms and successfully complete the task of path planning, and the success rate is more than 95%.

Keywords Unknown environment, Dynamic obstacles, Dynamic APF algorithm, Path planning, Dynamic obstacle avoidance, Target tracking

1 引言

路径规划算法是实现无人智能体(无人机或作战机器人)

自主作战的关键技术,在人工智能领域获得了广泛关注^[1-4]。因路径规划的应用领域及场景不同,其所涉及的路径规划算法也不同。在实际战场环境中实施对敌打击任务时,因环境

收稿日期:2019-11-22 返修日期:2020-03-27 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:广东省科技厅应用型研发基金专项(2016B010127005)

This work was supported by the Applied R&D Fund of Science and Technology Department of Guangdong Province (2016B010127005).

通信作者:杜婉茹(wanru_du@163.com)

错综复杂,很多隐蔽、动态的障碍无法通过高空手段预先探测得知^[5],从而对智能体执行任务的安全性产生动态不确定的威胁,智能体若不及时采取响应措施对突发情况进行处理,将会严重影响智能体的作战质量与作战效率。

APF^[6]算法属于局部实时路径规划算法^[7-8]。其思想是在智能体所处的环境中构建一个虚拟势场,包括目标点的引力势场及障碍物的斥力势场。智能体在引力与斥力的共同作用下进行避障运动,不断逼近目标点,达到实时路径规划的目的。

近年来,APF算法的实时路径规划问题得到了广泛的关注^[9-11]。在目前的研究中,文献[12]利用分布式思想,在集群的基础上定义了智能体自身的斥力势场与引力势场,用于解决智能体间的防碰撞问题。文献[13]结合感知与规避实际背景,针对传统人工势场法易产生局部震荡问题,对无人机自身的性能约束进行了建模,并对威胁区模型进行优化。针对人工势场法容易产生局部最小值以及目标点不可达的缺陷,文献[14]在行驶环境特征与车辆动力学特征的基础上对传统APF算法进行了改进,设计了基于虚拟力的局部路径规划算法,用于解决路径规划决策环节的时滞影响。文献[15]将人工势场与蚁群算法相结合,构建启发因子作为初始信息素,使得路径规划快速收敛。文献[16]提出了一种遗传算法与人工势场算法的融合算法,将APF与交叉变异算子相结合,并考虑了路径长度、安全程度等因素。文献[17]针对复杂环境提出了混合双层规划方案。该方案首先在环境中使用改进的A*算法对已知的环境节点进行预规划处理,得到全局上比较优化的路径,然后提取该路径的转折点作为局部路径规划子目标点,作为二层路径规划的基准点,得到子路径。文献[18]在人工势场算法的基础上设计新的势能函数,以减少运动过程中计算势场对智能体作用力合力的繁琐步骤,提高了算法效率。文献[19]引入了A*算法来弥补传统人工势场算法易形成局部无解的不足,采用改进后的人工势场法对路径进行实时规划,提高了运算效率,减少了路径长度。综上,大部分研究者对传统人工势场法计算势场力的效率问题进行了研究,改进了其在较复杂环境中的规划时效。同时,针对智能体仅在虚拟势场两类力的作用下运动,容易因各分力相互抵消而发生路径抖动等无解情况,也有部分研究者对此开展了相关研究。

以上有关人工势场算法实时路径规划问题的改进算法能够在一定程度上完成不同场景下的任务执行。然而,智能体装载避障算法后,在实际使用过程中受战场环境制约较大,面对动态障碍时避障精度不高,且难以对动态目标进行追踪;另一方面,面对包含连续且具有不规则形状障碍的实际场景,使用该路径规划算法的智能体极易产生路径抖动现象,造成目标不可达的情况,进而影响任务的执行。

基于上述问题,本文提出了一种面向未知复杂环境的动态APF路径规划算法:1)针对动态障碍物的避障以及对动态目标的追踪问题,在两大势场函数的计算中引入了速度和加速度因子,以提高算法处理动态问题的能力,实现动态避障及

目标追踪;2)针对战场环境障碍的复杂性和多样性,在势场函数中添加距离因子,改进斥力分力的方向,以解决极小值问题;3)针对连续且具有不规则形状的障碍,计算其8个方向的形状临点,依据智能体与目标点的角度关系确定临时目标点,打破路径抖动现象造成的目标不可达问题,进一步提高算法的避障精度及规划成功率。对比实验表明,在面对较复杂的未知环境时,动态APF路径规划算法具有一定的健壮性,能够在包含动、静障碍的不同场景下以高成功率完成实时路径规划任务。

2 动态APF算法框架

2.1 APF算法分析及问题描述

传统的人工势场算法在智能体所处的环境中构建虚拟势场,智能体受到目标点产生的引力势场、障碍物的斥力势场的影响,并在两者的共同作用下运动。

定义引力场函数为:

$$U_{att} = \frac{1}{2}k(X - X_g)^2 \quad (1)$$

其中, U_{att} 代表目标点对智能体的引力势场, k 为对应的引力相关常数, X 为智能体实时坐标, X_g 为所设置的目标点坐标。通过对式(1)进行数学处理,可以得到引力的数学表达式如下:

$$F_{att} = -grad(U_{att}) = -k(X - X_g) = k(X_g - X) \quad (2)$$

同理,由障碍物产生的斥力场函数定义如下:

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{rep} 为障碍物对智能体的斥力势场, η 为对应的斥力相关常数, ρ 是智能体目前的位置坐标相距斥力势场中心位置坐标的距离, ρ_0 为地图中斥力的最大影响范围。通过对式(3)进行数学处理,可以得到斥力的数学表达式为:

$$F_{rep} = -grad(U_{rep}) = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2}\frac{\partial \rho}{\partial X}, & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

根据引力与斥力的数学表达式,可以得出无人车所受引力、斥力的合力为:

$$F = F_{att} + \sum_i^n F_{rep_i} \quad (5)$$

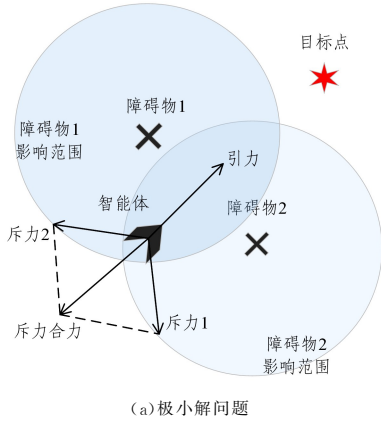
其中, n 为对当前智能体产生斥力影响的障碍物数量。在合力的作用下,智能体沿合力方向实时行进。

由上述分析可知,传统人工势场仅考虑了智能体在目标点的引力势场与障碍物的斥力势场作用下的运动,因此存在以下3个问题。

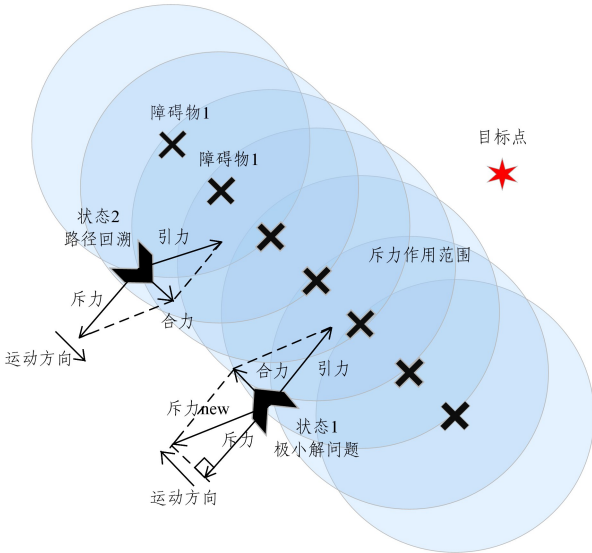
(1)智能体还未到达终点时,会出现各个分力相互抵消、智能体停滞不前的现象(又称极小值情况),如图1(a)所示。

(2)实际场景中的障碍多连续且具有不规则形状,即使解决了某点处的极小值问题,智能体依然会受到目标点引力的作用而发生路径回溯,如此反复,造成路径抖动现象,如图1(b)所示。

(3) 面对变速运动的障碍及目标点, 加载该算法的智能体缺乏处理(避障或追踪)能力。



(a) 极小解问题



(b) 路径抖动问题

图1 APF算法存在的部分问题

Fig. 1 Schematic diagram of some problems in APF algorithm

基于上述问题, 本文提出了一种面向未知环境的动态 APF 路径规划算法。

2.2 动态 APF 路径规划算法研究框架

面向未知环境的动态 APF 路径规划算法主要对以下 3 方面进行改进。

(1) 添加 V-a 信息的势场函数: 为了满足动态避障或追踪的目的, 将智能体与目标点及障碍的相对速度-加速度信息引入势场函数的计算中。

(2) 修正局部障碍的极小值问题: 针对局部障碍产生死锁的情况, 将斥力合力的方向分解为两个方向, 即斥力影响范围的切线方向与驱使走向目标点的方向, 并忽略其余方向, 从而打破斥力合力极小值的状态。

(3) 解决连续障碍的路径抖动问题: 在智能体避开实际场景中的连续且形状不规则的障碍发生路径抖动而无法顺利到达目标点时, 计算智能体当前位置 8 个邻接方向上障碍物形状临界点, 依据智能体与目标点的角度关系确定临时目标点, 打破路径抖动现象。

综上, 本文算法的框架如图 2 所示。

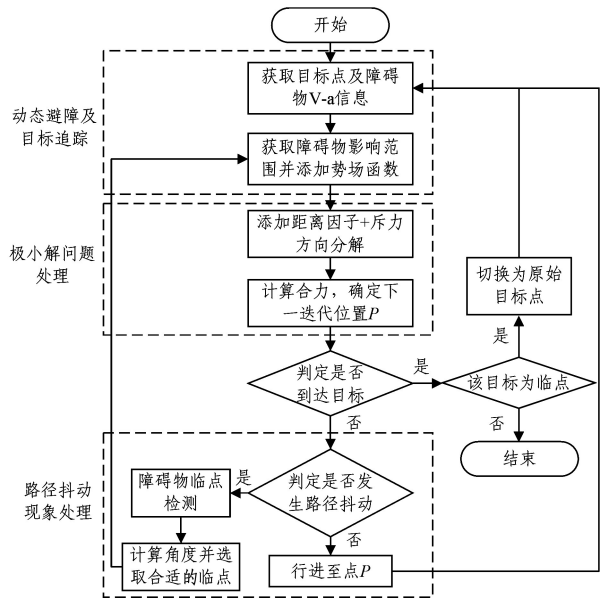


图2 动态 APF 算法框架

Fig. 2 Framework of dynamic APF algorithm

该算法通过获取目标点及动态障碍物的速度信息, 改进势场函数, 达到动态避障及追踪目标的目的; 在解决极小解的问题上, 添加距离因子并将斥力进行规则分解, 避免合力为零的情况; 通过监测判断智能体是否发生路径抖动现象, 以目标点为基准点, 计算智能体行进角度并选取合适的临界点作为暂时目标点, 打破目标不可达的僵局。

3 面向未知环境的动态 APF 算法的实现

3.1 动态避障及目标跟踪

实际战场的环境随时发生变化, 迅速响应动态变化的战场环境, 在避障的同时规划出到达目标点的可行路径, 是保障有效完成作战任务的重要环节。

为解决环境中目标点的动态追踪问题, 在静态环境下的引力势场函数中加入智能体与目标点的相对速度, 公式如下:

$$U_{at}(p, v) = \alpha_p \| p_{tar}(t) - p(t) \|^m + \alpha_v \| v_{tar}(t) - v(t) \|^n \quad (6)$$

其中, α_p 为引力距离系数, α_v 为引力速度系数; m 和 n 是对应的比例系数, 一般取值为 2; $p_{tar}(t)$ 为目标点的位置, $p(t)$ 是实时位置; $v_{tar}(t)$ 是目标点的速度, $v(t)$ 是智能体的实时速度。

经过推导, 引力计算公式为:

$$F_{at}(p, v) = -\nabla U_{at}(p, v) = -\nabla_p U_{at}(p, v) - \nabla_v U_{at}(p, v) \quad (7)$$

其中:

$$\nabla_p U_{at}(p, v) = \frac{\partial U_{at}(p, v)}{\partial p} \quad (8)$$

$$\nabla_v U_{at}(p, v) = \frac{\partial U_{at}(p, v)}{\partial v} \quad (9)$$

APF 算法中传统的斥力势场函数表达式只包含智能体与障碍物的静态相关信息, 无法满足动态的路径规划。为了解决该问题, 在改进的势场函数中加入智能体与动态障碍的相对速度, 补充表示斥力势场。定义改进后的斥力势场函数的数学表达式如下:

$$U_{rep}(p, v) = \begin{cases} \eta_q \left(\frac{1}{\rho(t)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 + \eta_v abs(\|V - V_{abs}\| \sin\theta), & \rho(t) \leq \rho_0, V_{R_0} \geq 0 \\ 0, & \rho(t) \geq \rho_0, V_{R_0} \leq 0 \\ \text{not define} & \end{cases} \quad (10)$$

其中, η_q 和 η_v 分别是位置系数与速度系数, V_{abs} 为动态障碍物的速度, θ 为智能体与障碍物之间的相对速度与坐标连线的夹角。

对改进后的斥力函数求偏导, 得到斥力表达式如下:

$$F_{rep}(p, v) = -\nabla U_{rep}(p, v) = -\nabla_p U_{rep}(p, v) - \nabla_v U_{rep}(p, v) \quad (11)$$

其中:

$$F_{rep}(p, v) = F_{rep}(p) + F_{rep}(v) \quad (12)$$

3.2 局部极小值问题的解决算法

依据传统的人工势场算法的数学模型可知, 传统的人工势场算法在实现路径规划过程中易出现引力与斥力相抵消的情况, 造成智能体受力平衡, 从而无法到达目标点的问题, 即产生了合力极小点。为避免此现象的发生, 本文算法对斥力势场函数做以下两方面的改进:

(1) 加入无人车与目标点的位置关系

在两类势场函数中添加距离因子 $(X - X_g)^2 = |(x - x_g)^2| + |(y - y_g)^2|$, 通过引入位置关系, 使得智能体在向终点行进时, 两分力同时有不同程度的减小, 从而避免斥力较大或二力相等的情况。斥力势场函数如下:

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (X - X_g)^2, & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (13)$$

(2) 斥力分解

在添加距离因子的基础上, 对无人车所受斥力方向进行修改, 由原先的从障碍物指向无人车, 改为斥力影响范围的切线方向。下面以图 3 为例说明斥力的改进方法。

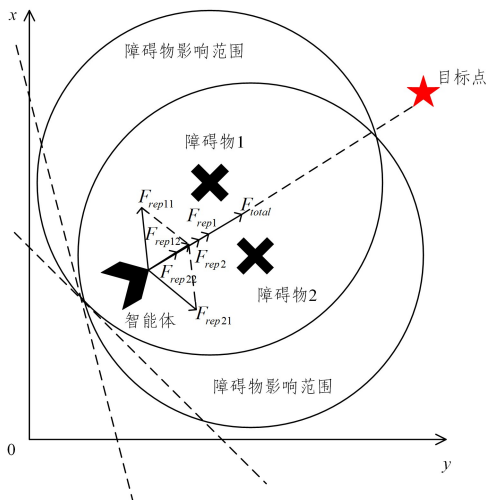


图 3 斥力分解改进方法

Fig. 3 Improved method of repulsion decomposition

对式(7)所示的斥力势场函数求偏导, 可以得到对应分力为:

$$F_{rep1} = \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} (X - X_g)^n \frac{\partial \rho}{\partial X} \quad (14)$$

$$F_{rep2} = -\frac{n}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (X - X_g)^{n-1} \frac{\partial (X - X_g)}{\partial \rho} \quad (15)$$

综上, 改进算法通过在势场函数中加入无人车与目标点的位置关系, 使智能体在行进过程中所受的引、斥力不同程度地减小, 消除斥力较大或二力相等的情况; 同时, 将斥力方向按图 2 所示方向分解后, 能够保障智能体在局部障碍处所受合力不为零, 驱使智能体向终点移动。

3.3 路径抖动问题的解决算法

作战环境复杂且动态变化, 障碍物形态各异。上述解决了极小值问题的改进 APF 算法在一定程度上解决了目标不可达的问题。然而, 智能体在面对连续且形状不规则的障碍时, 当使用上文中的算法远离发生极小值问题的障碍后, 会因为目标点的引力作用再次被驱使回原处, 进而出现因路径抖动而造成的目标不可达现象, 因此本文提出了角度临点判定方法, 对该死锁情况进行修正。具体步骤描述如算法 1 所示。

算法 1 角度临点判定算法

- Step1 参数设置, 初始化并输入以下信息: 目标点坐标 goal_pos, 路径抖动判定阈值 th=3, 抵达临点判定 dis=0.5;
- Step2 监测智能体行进位置, 若在某路段行进重复次数 $n \geq th$, 即判定为发生路径抖动, 进入 Step3;
- Step3 记录智能体当前位置 curPos 及造成路径抖动的最近障碍坐标 nearestObPos;
- Step4 将 nearestObPos 确定为基准点, 按八方位分别确定该障碍物边缘临点集合: $P = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_7\}$;
- Step5 计算目标与 curPos 的夹角 θ , 按照表 1, 在集合 $P = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_7\}$ 中选取合适的边缘临点, 作为临时目标点 tmpGoal;
- Step6 依照上述改进 APF 算法进行路径规划, 当 curPos 与 tmpGoal 的距离小于 dis 时, 修改目标点为初始目标;
- Step7 继续进行路径规划, 当出现路径抖动时, 重复 Step3, 否则, 执行 Step8 继续寻路;
- Step8 判断 curPos 与 goal_pos 的距离小于 dis 时, 算法结束, 路径规划完成, 返回智能体行进过程的完整路径信息, 否则继续执行 step2。

表 1 边缘临点选取规则

Table 1 Selection rules of edge points

θ	$-15^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 75^\circ$	$75^\circ \sim 105^\circ$	$105^\circ \sim 165^\circ$
P	右	右上	上	左上
θ	$165^\circ \sim 195^\circ$	$195^\circ \sim 255^\circ$	$255^\circ \sim 285^\circ$	$255^\circ \sim 345^\circ$
P	左	左下	下	右下

4 实验结果

4.1 实验设置

为验证本文提出的面向未知环境的动态 APF 路径规划算法的可行性与有效性, 搭建本文实验环境。

仿真环境需要模拟实际场景中大小、形状均不规则的障碍。设置实验场景如图 4 所示, 为了标示障碍物的斥力影响范围, 以一些相邻或离散的 X 标示障碍物, 用蓝色半透明 circle 标示障碍物的影响范围。

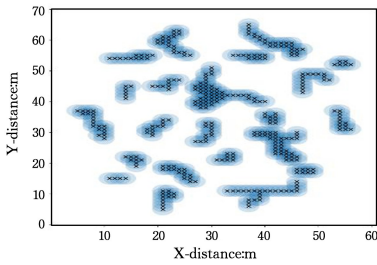


图4 实验场景示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental scene

实验场景中的多种障碍物形成了宽窄不一、形状各异的可行区域,可以很好地验证智能体在复杂障碍环境下处理极小值问题、路径抖动问题的有效性和可行性。另一方面,可以在场景中加入动态障碍及目标点,以验证智能体的避障和追踪能力。设置实验初始参数如下:

场景大小为 60×70 ,生成障碍物数量为 338,障碍物对智能体的影响范围是以障碍物坐标为圆心点、3 个单位长度为半径的圆,引力系数为 20,斥力系数为 5,智能体行进步长为 0.1 个单位长度。

4.2 实验结果及分析

将本文提出的面向未知环境的动态 APF 算法分别在发生极小值及路径抖动现象的场景,动、静态障碍及目标追踪场景和综合场景中进行路径规划,以验证其性能。

实验 1 极小值及路径抖动实验

本实验验证了算法对于极小值问题及路径抖动现象的修正效果,设置实验参数如表 2 所列,实验结果如图 5 所示。

表 2 极小值及路径抖动实验参数

Table 2 Experimental parameters of minimum and path jitter

目标点	起始点	智能体寻路步长
(16,57)	(50,5)	0.8

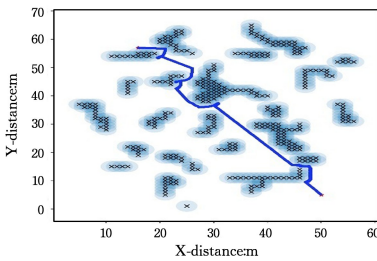


图 5 极小值及路径抖动修正实验结果

Fig. 5 Experimental results of minimum and path jitter correction

由实验结果可以看出,由于障碍物的连续性及可行区域大小的不确定性,该实验场景中出现了极小解及路径抖动现象。统计后台实验数据可得,智能体共产生 2 次极小解问题,3 次路径抖动现象,均得以检测、修正。因而,本文算法能够在存在不规则障碍的环境中有效地进行路径规划。问题出现的位置坐标如表 3 所列。

表 3 死解问题发生的位置坐标

Table 3 Coordinates of no solution phenomenon

极小解问题	(47.48,15.12)	(24.93,43.57)	—
路径抖动现象	(29.87,36.42)	(25.86,45.39)	(20.46,42.87)

实验 2 动、静态避障及目标追踪实验

为了更好地贴合实际应用场景,在 APF 算法的势场函数中添加了障碍物及目标点的速度信息,以便智能体完成动态避障及目标追踪。

该实验在智能体的行进路径中沿途设置动态障碍共 4 处,由下至上分别编号 1-4,障碍物分别朝不同的方向以不同的速度行进。设置实验参数如表 4 所列,其中智能体的相关参数与实验 1 相同。实验结果如图 6 所示。

表 4 动、静态避障及目标追踪实验的相关参数设置

Table 4 Experimental parameters of dynamic and static obstacle avoidance and target tracking

	坐标	方向	运动步长
障碍 1	(33,15)	(1,0.5)	0.07
障碍 2	(36,38)	(-0.08,1)	0.04
障碍 3	(20,40)	(1,0.7)	0.013
障碍 4	(10,50)	(1,0.03)	0.018
目标	(16,57)	(-1,0.51)	0.09

为了表示障碍及目标点的运动,将其运动轨迹在图 6 中展示,红色×代表动态障碍物,黄色线条代表其运动轨迹。

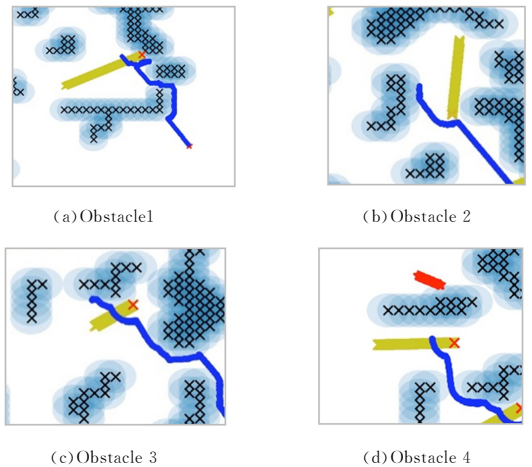


图 6 动态障碍避障响应的实验结果(电子版为彩色)

Fig. 6 Experimental results of avoiding dynamic obstacles

由实验中智能体的行进轨迹(蓝色线条所示)可以看出,智能体在行进途中遇到动态障碍时产生了明显的避障响应。

在当智能体进入目标点警戒范围时(在该实验中定义为 10m),目标点开始逃离,从而验证了智能体的动态追踪效果,如图 7 所示。

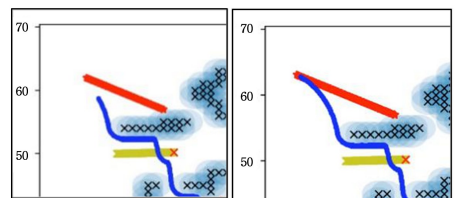


图 7 目标追踪的实验结果

Fig. 7 Experimental results of target tracking

由图 7 的实验结果可以看出,智能体改变了原有路径,成功追踪到逃离的目标点,完成了该实验动、静态障碍避障,目标追踪等任务。整体的实验结果如图 8 所示。

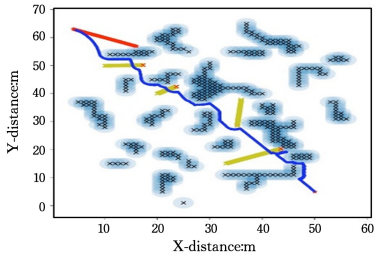


图8 动、静态避障及目标追踪的实验结果

Fig. 8 Experimental results of dynamic and static obstacle avoidance and target tracking

实验3 对比实验及结果分析

为检测算法在应用场景中的适应性及健壮性,在 60×70 的规模中生成 10 个含有若干随机障碍的场景,每个场景选取不同的目标点进行 20 次实验。

考虑到本文算法的改进效率和使用场景,在对比算法的选取方面,除了选择传统的 APF 实时路径规划算法,还选择并且复现了文献[19]所述算法,该算法同样进行了动态避障。实验旨在从动、静态障碍躲避,路径规划成功率两方面对本文算法效果进行评估及测试。下面对不同算法进行对比分析。

智能体行进过程中因斥力与引力的合力抵消而发生极小值问题,从而产生目标不可达现象(图 9(a)所示)。本文算法通过距离因子及斥力的分解,规划出按逆时针方向绕行障碍的路径,如图 9(b)所示。

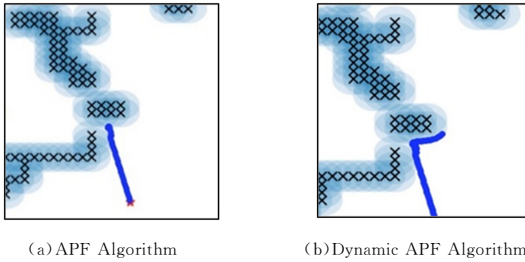


图9 算法针对极小值问题的实验结果

Fig. 9 Experimental results of algorithms for minimum problem

如图 10(a)所示,智能体在行进过程中虽然解决了极小值的问题,但因目标点的引力作用,规划路径出现了回溯徘徊的情况,产生路径抖动,无法完成路径规划任务。本文算法通过选取合适的障碍质点(红色箭头)为临时目标点,能够很好地解决路径抖动问题,完成路径规划。

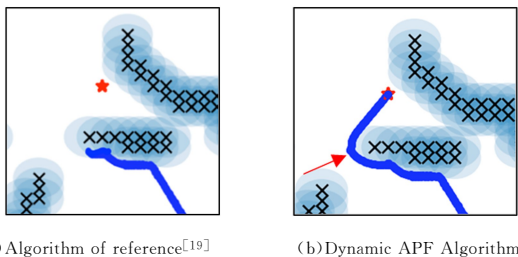


图10 算法针对路径抖动问题的实验结果

Fig. 10 Experimental results of algorithms for path jitter

经 20 次随机生成不同数量的障碍并进行重复实验,统计成功完成路径规划的次数,结果如图 11 所示。

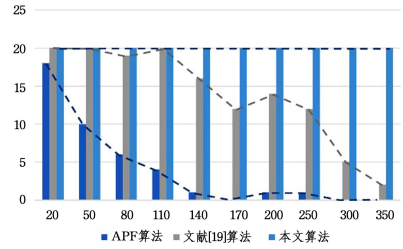


图11 不同算法的寻路成功率

Fig. 11 Comparison of success rates of different algorithms

由对比实验结果可知:在简单的场景中,APF 算法、文献[19]所提改进 APF 算法以及本文动态 APF 算法均可得到较高的成功率。然而,随着障碍点数量的不断增加,寻路环境越来越复杂,传统 APF 算法极容易发生目标不可达现象。文献[19]的算法虽然能够解决部分极小解的问题,但在出现路径抖动现象时依然会发生死锁。而本文算法能够实时检测目标不可达的情况,并采取相应策略解决该问题,在实验中完成率达 100%。

结束语 本文针对未知且障碍形态多样的战场环境,以躲避动静障碍、追踪目标为研究对象,提出一种面向未知环境的动态 APF 路径规划算法。该算法构建了目标点的引力势场以及障碍的斥力势场,针对动态障碍物的避障以及对动态目标的追踪问题,在两大势场函数的计算中引入了速度和加速度因子,提升了算法处理动态问题的能力;针对战场环境障碍的复杂性和多样性,在其势场函数中添加距离因子,改进斥力分力的方向,解决了极小值问题;针对连续且形状不规则的障碍,计算其 8 个方向的形状临界点,依据智能体与目标点的角度关系确定临时目标点,解决了因路径抖动而造成的目标不可达问题。

实验结果表明,在障碍的大小、形状均不规则的模拟实际场景中,本文提出的动态 APF 算法不仅可以有效避障,完成对目标的追踪,而且在发生极小值及出现路径抖动现象时,能够及时检测并进行有效的修正,驱使智能体顺利完成路径规划。通过与 APF 及文献[19]所提算法的对比实验可知,在面对较复杂的未知环境时,动态 APF 路径规划算法具有一定的健壮性,能够以高成功率完成实时路径规划任务。

未来的工作将考虑结合全局路径规划算法,进一步减少智能体在路径规划中产生的冗余路径,提高算法的时效性;同时还可以考虑加入多智能体,通过多智能体协同来进一步提高算法在更为复杂的环境中的工作效率。

参考文献

- [1] SONG R, LIU Y C, BUCKNALL R. Smoothed A* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning[J]. Applied Ocean Research, 2019(83):9-20.
- [2] LIU J H, YANG J G, LIU H P, et al. An improved ant colony algorithm for robot path planning[J]. Soft Computing, 2016, 21(19):1-11.
- [3] HIDALGO-PANIAGUA A, PEDRO B J, RUIZ-DE-QUINTANILLA M, et al. Quad RRT: A real time GPU based global

- path planner in large scale real environments[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018(99):141-154.
- [4] LU L, ZHAO H. Adaptive volterra filter with continuous lp-normusing a logarithmic cost for nonlinear active noise control [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 364: 14-29.
- [5] SHEN J. Robot Anti-Collision Path Planning Under Complex Dynamic Environment[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017, 11: 255-258.
- [6] ZHOU L, LI W. Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance path planning[C]// 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou; IEEE, 2014: 429-432.
- [7] LI Y, HONG S, HUANG J, et al. The new environment model-building method of penetration mission based on the artificial potential field approach[C]// 2012 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support. New Orleans; IEEE, 2012: 121-125.
- [8] 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.
- [9] MACKTOOBIAN M, SHOOREHDELIM A. Time variant artificial potential field (TAPF): A break through in power-optimized motion planning of autonomous space mobile robots[J]. *Robotics*, 2016, 34(5): 1128-1150.
- [10] MONTIEL O, SEPULVED 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.
- [11] NAIR 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.
- [12] ZHOU X J, WANG W. Avoidance control of UAV cluster system based on distributed artificial potential field algorithm[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2018, 24: 19-21.
- [13] YANG M, WANG Y. UAV Avoidance Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. *Navigation and Control*, 2019, 18(1): 76-83.
- [14] YUAN C C, WENG S F. Integration Algorithm of Path Planning and Decision-making Based on Improved Artificial Potential Field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 394-403.
- [15] ZHAO J, BIN Y, RUN Y. The flight navigation planning based on potential field ant colony algorithm[C]// International Conference on Advanced Control, Automation and Artificial Intelligence. 2018: 200-204.
- [16] MILAD N, ESMAEEL K, SAMIRA D. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm [J]. *Expert Systems with Applications*, 2019(115): 106-120.
- [17] PAN H. Research on Autonomous Mobile Robot Path Planning Algorithm in Complex Environment [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [18] ZHANG N, ZHANG Y, MA C, et al. Path planning of six-DOF serial robots based on improved artificial potential field method [C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic. 2017: 617-621.
- [19] ZHANG X W, XIAO B X. The Planning for Dynamic Path of a Mobile Robot Based on Artificial Potential Field Method [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 49(6): 937-940.



DU Wan-ru, born in 1992, postgraduate. Her main research interests include artificial intelligence and path planning.