

基于人工磁场的防疫机器人路径规划^{*}

伍锡如 龚璞

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004)

摘要: 针对传统人工势场法在防疫机器人路径规划过程中容易陷入局部极小值和目标不可达的问题,提出一种基于人工磁场的路径规划算法。首先,对障碍物周围建立人工磁场,引入洛伦兹力,洛伦兹力与引力保持垂直,避免机器人陷入局部极小值点;其次,在洛伦兹力函数中引入机器人与目标点的距离影响因子,解决目标不可达问题;再次,通过建立目标点与障碍物之间的虚拟直线优化洛伦兹力的方向,避免迂回路径,减少路径规划的步数。最后,在 MATLAB 环境下对传统人工势场法和人工磁场法进行了仿真实验,实验结果表明,人工磁场法可以克服局部极小值和目标不可达问题,规划的路径对障碍物进行了避障,避免了徘徊振荡的情况出现,提高了路径规划的质量。

关键词: 人工磁场;路径规划;局部极小值;虚拟直线

中图分类号: TP242; TP18 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8050

Epidemic prevention robot path planning based on artificial magnetic fields

Wu Xiru Gong Pu

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problems of local minimum and unreachable target in traditional artificial potential field method, an artificial magnetic field method is proposed. Firstly, an artificial magnetic field is established around the obstacle, and the Lorentz force is introduced. The Lorentz force is perpendicular to gravity, so as to avoid the robot falling into the local minimum point; Secondly, the distance factor between the robot and the target point is introduced into the Lorentz force function to solve the problem of target inaccessibility; Thirdly, the direction of Lorentz force is optimized by establishing a virtual line between the target point and the obstacle, avoiding detours and reducing the number of steps of path planning. Finally, the traditional artificial potential field method and artificial magnetic field method are simulated in the MATLAB environment. The experimental results show that the artificial magnetic field method can overcome the local minimum problem and the target unreachable problem, and the planned path effectively avoids obstacles, preventing situations of oscillation and hesitation, thus improving the quality of path planning.

Keywords: artificial magnetic field; path planning; local minimum; virtual line

0 引言

随着工业自动化技术的不断发展,移动机器人在工业、服务业、安防、医疗等领域得到了广泛应用^[1]。对于医疗行业而言,防疫机器人主要用于承担医院各个部门间的药物配送、医疗废物的回收,以及传染病隔离区域的消杀工作等任务。防疫机器人的应用使得在突发公共卫生事件的防控中能极大程度上减少人员之间的直接接触,降低病毒传播

的风险。在机器人执行自主导航功能时,路径规划是其核心功能之一^[2],在防疫机器人研究中具有重要的地位。在路径规划领域,学者们已经提出了众多算法,如 A 星算法 (A-star algorithm, A^{*}) 和迪杰斯特拉算法^[3]等,这些算法旨在寻找最优路径,但它们在计算量和实时性方面存在不足^[4]。概率路线图^[5]和快速探索随机树^[6]等算法被归为基于采样的方法,这类方法简化了地图表示并提高了计算效率,但规划出的路径可能存在较大转折。相比之下,人工势

收稿日期:2023-11-14

* 基金项目:国家自然科学基金地区科学基金(62263005)、广西自然科学基金重点项目(2020GXNSFDA238029)、广西高校人工智能与信息处理重点实验室开放基金重点项目(2022GXZDSY004)、广西研究生教育创新计划项目(YCSW2023298)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2023YCXSL24)资助

场法通过为障碍物和目标生成势场，并利用梯度下降方法进行导航^[7]，仅需要根据周围环境和当前状态确定下一步的运动方向，具有计算速度快、避障响应快、便于硬件实现等优点^[8]。但传统人工势场法容易在局部极小值处陷入停滞，且当目标点附近存在障碍物时，路径点会在障碍物附近振荡甚至无法到达目标点等问题^[9]。

对于人工势场法存在的问题，国内外学者提出了大致 3 类解决方法：1) 在传统人工势场模型的基础上进行改进，如许万等^[10]通过补齐凹形陷障碍物势场来避免机器人陷入局部极小值点；刘瀚培等^[11]通过在原有模型基础上引入模糊控制思想，对移动机器人的偏转角进行精确控制。2) 改进或使用新的势场函数，如仇恒坦等^[12]将斥力旋转一定角度，解决合力为零问题，使机器人成功逃离极小点。3) 用其他算法与人工势场法结合，如陈继清等^[13]结合势场和 A* 算法，利用人工势场值重构启发函数，改进 A* 算法的搜索能力；王贵程等^[14]将人工势场与蚁群算法结合，改进启发函数，避免出现局部最优解。

针对传统人工势场法路径规划的局部极小值和目标不可达问题，本文引入人工磁场的概念，首先，对障碍物周围建立人工磁场，引入洛伦兹力，从而避免机器人陷入局部极小值点；其次，在洛伦兹力函数中引入机器人与目标点的距离因子，解决目标不可达问题；再次，通过建立目标点与障碍物之间的虚拟直线优化洛伦兹力的方向，避免迂回路径，减少路径规划的步数。最后，在 MATLAB 环境下对传统人工势场法和人工磁场法进行仿真实验，以验证人工磁场算法的有效性。

1 传统人工势场法原理及缺陷

1.1 传统人工势场法原理

人工势场法是将防疫机器人运动环境模拟为一种抽象的人造力场，目标点对机器人产生引力作用，障碍物对机器人产生斥力作用^[15]。在引力和斥力合力作用下机器人朝着目标点移动。定义引力势场函数、斥力势场函数如式(1)、(2)所示。

引力势场函数：

$$U_{att} = \frac{1}{2} k d^2(x, x_{goal}) \quad (1)$$

斥力势场函数：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left[\frac{1}{d(x, x_{obs})} - \frac{1}{d_0} \right]^2, & d(x, x_{obs}) \leq d_0 \\ 0, & d(x, x_{obs}) > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： k 为引力增益常量， η 为斥力增益常量， x 为当前机器人位置坐标， x_{goal} 为目标点位置坐标， x_{obs} 为障碍物中心坐标， d_0 为障碍物影响范围， $d(x, x_{goal})$ 为机器人当前位置与目标点的距离， $d(x, x_{obs})$ 为机器人当前位置与障碍物的距离。

机器人在势场中受到的引力和斥力为该点势场函数的负梯度，所以引力和斥力公式为：

$$\mathbf{F}_{att} = -\nabla U_{att} = -kd(x, x_{goal}) \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_{rep} = -\nabla U_{rep} =$$

$$\begin{cases} \frac{\eta}{d^2(x, x_{obs})} \left[\frac{1}{d(x, x_{obs})} - \frac{1}{d_0} \right], & d(x, x_{obs}) \leq d_0 \\ 0, & d(x, x_{obs}) > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

机器人所受合力为：

$$\mathbf{F}_{tot} = \mathbf{F}_{att} + \mathbf{F}_{rep} \quad (5)$$

防疫机器人根据受到的合力进行移动，在行驶途中人工引力势场源来自目标点，所受引力大小与当前点到目标点的距离成正比；只有在障碍物势场范围内才会受到斥力势场的影响，在障碍物势场范围内，防疫机器人受到的势场斥力与当前点到障碍物之间的距离成反比。

1.2 传统人工势场法缺陷

利用人工势场法进行防疫机器人路径规划时通常存在目标不可达和局部极小值问题：

1) 目标不可达问题：目标点和障碍物间的距离较近，且目标点处在障碍物的影响范围内，当机器人移动到目标点附近时，其所受的斥力大于引力，此时防疫机器人会不断在目标点周围徘徊，无法抵达目标点^[16]，如图 1 所示。

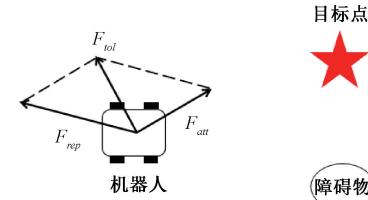


图 1 目标不可达问题示意图

2) 局部极小值问题：如果目标点对机器人的引力和障碍物对机器人的斥力大小相等，方向相反时，机器人的合力会变为零即受力平衡^[17]，在没有到达目标点之前就会停止移动。如图 2(a)所示，为单个障碍物时局部极小值问题；如图 2(b)所示，为多个障碍物时局部极小值问题。

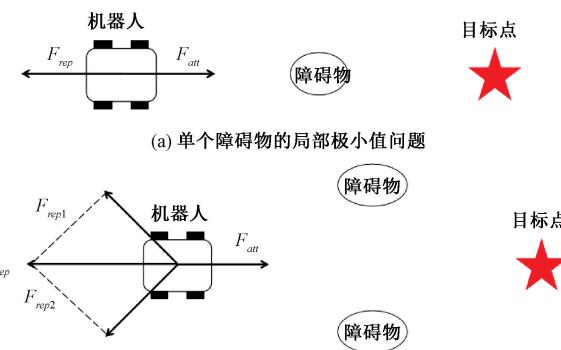


图 2 局部极小值问题示意图

2 基于人工磁场的路径规划算法

传统人工势场中目标点对防疫机器人产生引力,障碍物对防疫机器人产生斥力,从物理学的角度来分析,斥力和引力的方向都是由目标点和障碍物沿直线指向机器人,所以当机器人、目标点和障碍物处于同一条直线上时斥力和引力无可避免的共线。

针对这个问题,本文把防疫机器人看作一个具有质量的带电粒子,目标点对防疫机器人依然产生引力,对障碍物周围构建磁场,当防疫机器人进入到磁场范围后受到洛伦兹力,洛伦兹力与引力方向始终垂直,即使机器人、目标点和障碍物在同一直线上,机器人所受到的合力也不会为零,避免陷入局部最优。

2.1 人工磁场的构建

1)解决局部极小问题

为解决引力与斥力共线问题,本研究提出在障碍物周围构建人工磁场,将防疫机器人视为带有电荷且具有质量的粒子,防疫机器人进入障碍物的影响区域时,将障碍物对机器人的斥力替换为磁场产生的洛伦兹力。在此区域内,机器人受到目标点的引力以及磁场的洛伦兹力作用。洛伦兹力的方向始终与引力方向保持垂直,机器人在引力与洛伦兹力的共同作用下实现对障碍物的规避。当机器人离开障碍物影响区域后,仅受到引力作用,继续朝向目标点移动。如图3所示,展示了机器人移动过程中的受力关系及移动轨迹。

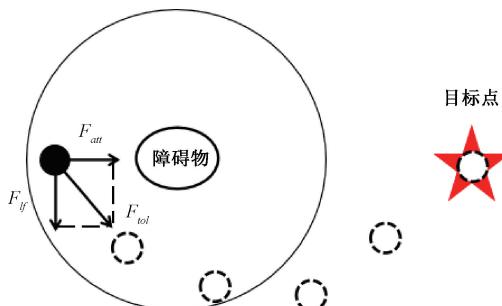


图3 机器人在磁场中的受力及移动轨迹

为了使机器人进入障碍物的影响区域后快速地躲避障碍物,应把远离障碍物的位置区域的磁场强度设置为最大,机器人刚进入磁场时会受到最大的洛伦兹力快速避障;为了防止机器人逐渐靠近障碍物时磁场强度随着距离减小而过小,需要对磁场强度设置一定的初始值,避免机器人因离障碍物太近而造成洛伦兹力较小的问题。人工磁场的磁感应强度函数和洛伦兹力函数分别如式(6)、(7)所示,目标点对机器人的引力函数如式(8)所示。

$$B = \begin{cases} B_0 + d(x, x_{obs}), & d(x, x_{obs}) \leq d_0 \\ 0, & d(x, x_{obs}) > d_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{tf} = qB \quad (7)$$

$$F_{att} = kd(x, x_{goal}) \quad (8)$$

式中: B 为磁感应强度, B_0 为磁感应强度初值, q 为洛伦兹力增益常量, 洛伦兹力 F_{tf} 始终与引力 F_{att} 保持垂直, x 为当前机器人位置坐标, x_{obs} 为障碍物中心坐标, d_0 为障碍物影响范围, $d(x, x_{obs})$ 为机器人当前位置与障碍物的距离。

取 $B_0 = 5$, $d_0 = 1$ 根据式 6 建立的障碍物人工磁场图,如图 4 所示。

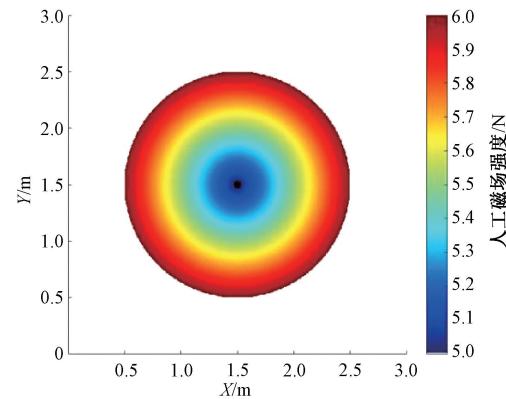


图4 障碍物磁场示意图

2)解决目标不可达问题

由式(8)可知,目标点对机器人的引力随着距离的减少而降低,当目标点在障碍物的磁场影响范围内时,障碍物对机器人产生的洛伦兹力大于目标点产生的引力,机器人就会在目标点附近徘徊振荡。为了解决目标不可达问题,在洛伦兹力函数中引入机器人与目标点的距离影响因子 $d(x, x_{goal})$ 。改进后的洛伦兹力函数如式(9)所示。

$$F_{tf} = qBd(x, x_{goal}) \quad (9)$$

引入距离影响因子后,当目标点在障碍物的磁力范围内时,洛伦兹力随着机器人靠近目标点而迅速减小,保证引力作用占主导地位从而解决目标不可达问题。

2.2 洛伦兹力方向的优化

根据构建的人工磁场,如果不考虑目标点、障碍物与机器人的相对位置关系,可能会导致防疫机器人进入磁场区域后受到的洛伦兹力指向磁场内部,从而在磁场中产生迂回路径无法以最优的路径进行避障,如图 5 所示。

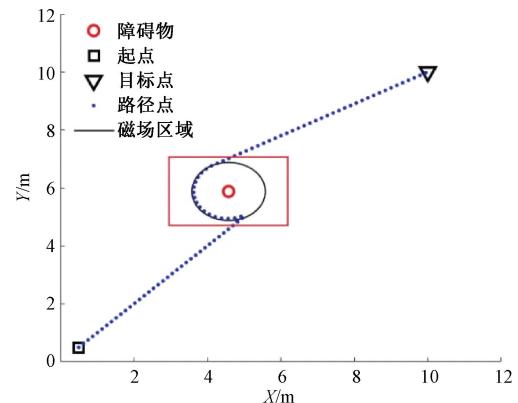


图5 迂回路径轨迹

针对这个问题需要根据机器人与目标点和障碍物的相对位置关系,对洛伦兹力的方向进行设置。首先根据障碍物与目标点的位置关系,以障碍物中心坐标和目标点坐标做一条虚拟直线;其表达式为:

$$L_{og}: y = k_{og}x + b_{og}, x \in (x_{obs}, x_{goal}) \quad (10)$$

$$k_{og} = \frac{y_{goal} - y_{obs}}{x_{goal} - x_{obs}} \quad (11)$$

$$b_{og} = \frac{x_{goal}y_{obs} - x_{obs}y_{goal}}{x_{goal} - x_{obs}} \quad (12)$$

式中: k_{og} 为直线 L_{og} 的斜率; b_{og} 为直线 L_{og} 的截距; (x_{obs}, y_{obs}) 、 (x_{goal}, y_{goal}) 分别为障碍物和目标点的位置坐标。

设防疫机器人进入磁场区域后的坐标点为 (x_i, y_i) , 根据当前点坐标 (x_i, y_i) 计算与虚拟直线 L_{og} 的位置关系来确定洛伦兹力的方向, 若当前位置在虚拟直线上方, 将洛伦兹力的方向设置为垂直引力向上; 当前位置在虚拟直线下方, 将洛伦兹力的方向设置为垂直引力向下, 因此洛伦兹力函数 F_{lf} 可以进一步表示为:

$$F_{lf} = \begin{cases} qBd(x, x_{goal}), & y_i \geq k_{og}x_i + b_{og} \\ -qBd(x, x_{goal}), & y_i < k_{og}x_i + b_{og} \end{cases} \quad (13)$$

式中: 洛伦兹力函数 $F_{lf} > 0$ 表示其方向垂直于引力向上, 洛伦兹力函数 $F_{lf} < 0$ 表示其方向垂直于引力向下。

根据上式关系, 防疫机器人以不同角度进入障碍物影响范围的受力关系如图 6 所示。

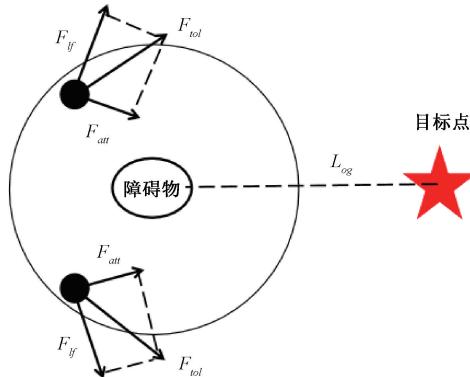


图 6 不同角度进入障碍物影响范围的受力关系

这样机器人以任意方向进入磁场后, 受到的洛伦兹力都指向磁场外部, 避免了迂回路径, 通过虚拟直线确定防疫机器人与障碍物和目标点的相对位置后的优化路径如图 7 所示。

2.3 算法流程

人工磁场法的算法流程如下:

步骤 1) 算法初始化, 设置机器人初始位置 x_0 和目标点位置 x_{goal} , 给定相关参数: 障碍物影响范围 d_0 、引力增益常量 k 、洛伦兹力增益常量 q 、步长 l 。

步骤 2) 判断机器人是否在障碍物的影响范围内, 若不在, 机器人受到引力朝着目标点运动, 若在执行步骤 3)。

步骤 3) 计算障碍物到目标点的虚拟直线, 直线将障碍

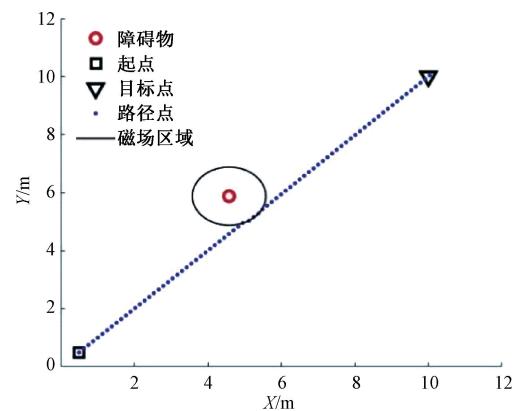


图 7 优化后的路径轨迹

物影响范围划分为上下两部分。

步骤 4) 判断机器人当前位置是否在虚拟直线的上半部分, 如果是上半部分, 将洛伦兹力方向设置为垂直引力向上; 否则, 将洛伦兹力方向设置为垂直引力向下。机器人在磁场范围内受到引力和洛伦兹力的共同作用运动。

步骤 5) 判断是否到达目标点, 如果到达目标点, 则停止运动; 否则, 执行步骤 2)。

3 仿真实验及结果分析

为了验证人工磁场法在防疫机器人路径规划中的可行性, 通过 MATLAB R2021a 分别对传统人工势场法和人工磁场法在目标不可达、局部极小值情况下进行路径规划仿真对比。仿真系统基本参数配置如表 1。

表 1 仿真系统基本参数配置

仿真参数名称及符号	值
引力增益常量 k	0.2
斥力增益常量 η	0.3
洛伦兹力增益常量 q	0.1
磁感应强度初值 B_0	1
障碍物影响范围 d_0/m	1
步长 S/m	0.2
最大循环迭代次数 J	200
起点坐标	(0.5, 0.5)
目标点坐标	(10, 10)

3.1 局部极小值问题仿真与分析

传统人工势场法在机器人、单个障碍物和目标点共线时路径规划轨迹如图 8(a)所示, 机器人在障碍物附近徘徊, 无法继续向前规划, 由图 8(b)、(c)可知合力大小和方向一直振荡无法收敛, 达到最大循环迭代次数后停止, 导致机器人陷入局部极小值点。

图 8(d)呈现机器人在多个障碍物共同作用下的路径规

划轨迹,引力与合斥力共线,存在受力平衡,由图8(e)、(f)可知,合力大小和方向一直振荡无法收敛,机器人在障碍物附近徘徊陷入困境无法逃脱,使得机器人陷入局部极小值点。

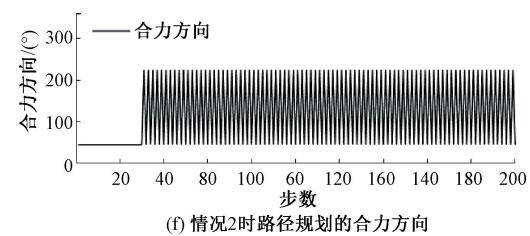
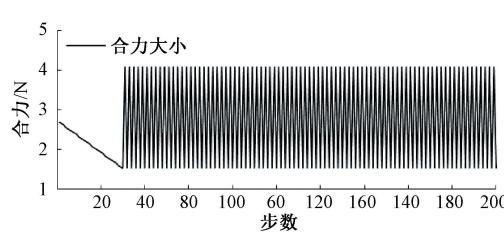
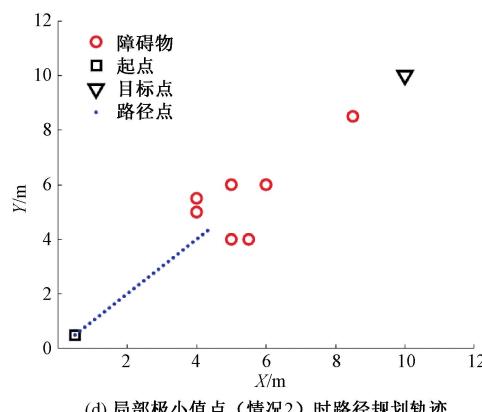
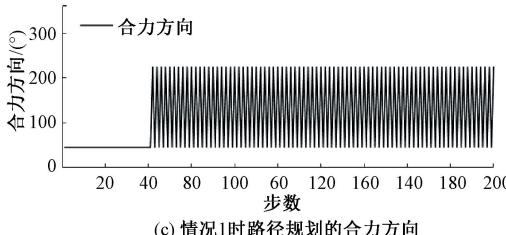
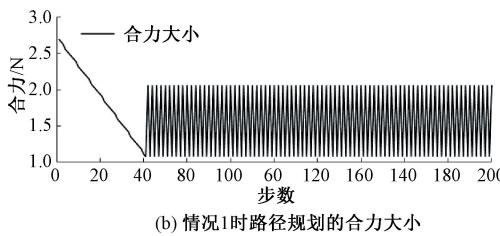
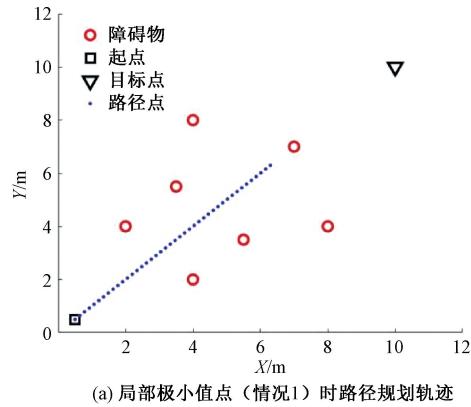
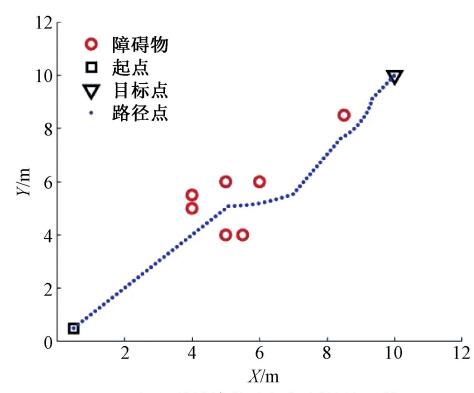
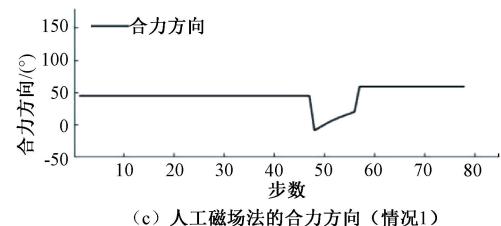
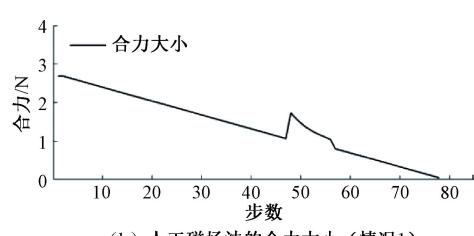
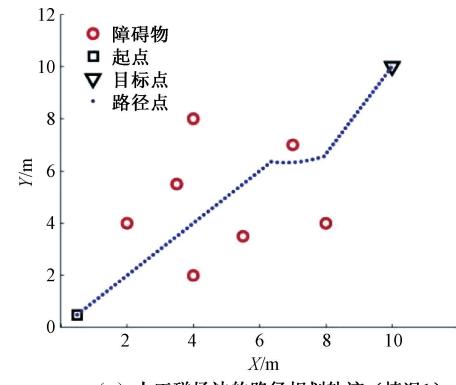
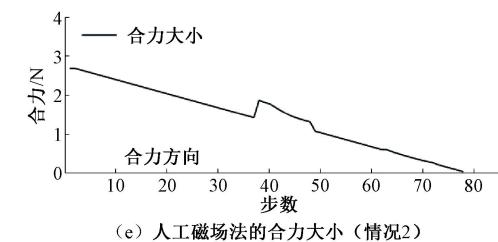


图8 传统人工势场法路径规划一

在相同的仿真环境下,采用本文提出的人工磁场法进行路径规划,人工磁场法面对以上问题都能成功规划出一条合理的路径轨迹,如图9所示。





(e) 人工磁场法的合力大小 (情况2)

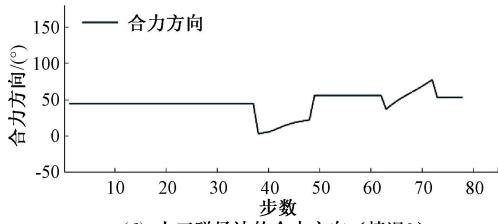


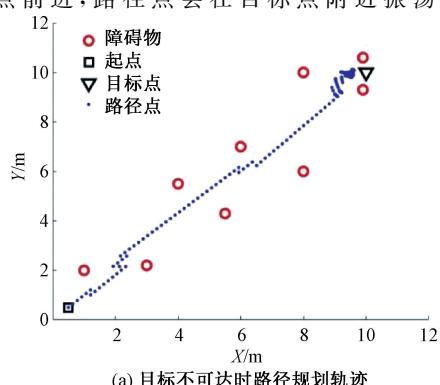
图 9 人工磁场法路径规划一

由图 9(a)所示当机器人、单个障碍物和目标点共线时人工磁场法可以成功规划出可行路径,面对障碍物时避障路径呈弧线,所规划出的路径长度也较短,由图 9(b)、(c)可知,在达到目标点时合力大小收敛为 0,合力方向始终指向目标点。

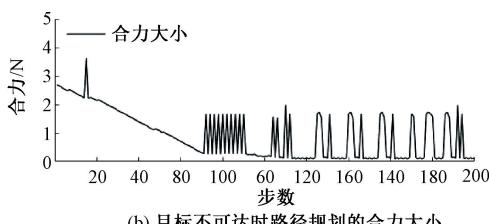
图 9(d)呈现机器人在多个障碍物共同作用情况下利用人工磁场法规划出的路径轨迹,由图 9(e)、(f)可知,在达到目标点时合力大小收敛为 0,合力方向指向目标点。人工磁场法不仅成功解决了局部极小值问题,规划的路径更符合机器人的移动特性,提高了路径规划的质量和效率。

3.2 目标不可达问题仿真与分析

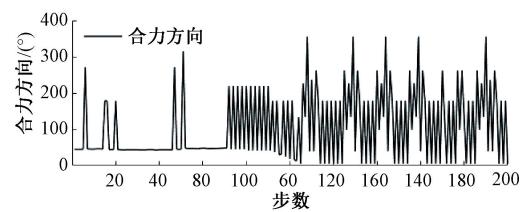
如图 10(a)所示,为当目标点附近两侧都存在障碍物时,传统人工势场法的路径规划轨迹,可以看到路径点即将到达目标点时,由于受到两个障碍物的影响无法继续朝着目标点前进,路径点会在目标点附近振荡徘徊,由



(a) 目标不可达时路径规划轨迹



(b) 目标不可达时路径规划的合力大小

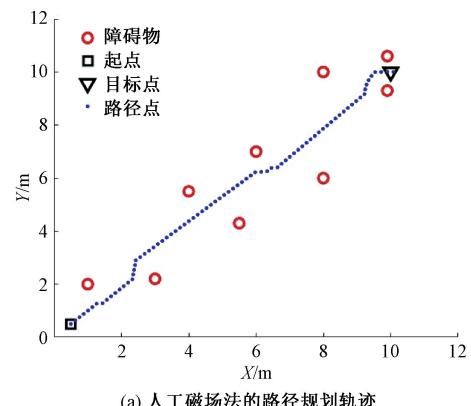


(c) 目标不可达时路径规划的合力方向

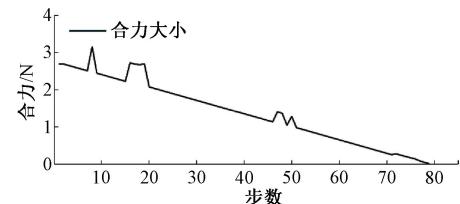
图 10 传统人工势场法路径规划二

图 10(b)、(c)可知,此时合力大小和方向一直振荡无法收敛,直到耗尽设定的最大规划步数为止。

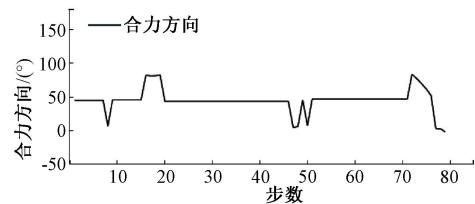
在相同的仿真环境下,采用本文提出的人工磁场法进行路径规划,在洛伦兹力函数中引入了距离影响因子,对于目标不可达问题人工磁场法依然能成功规划出一条合理的路径轨迹,如图 11 所示。



(a) 人工磁场法的路径规划轨迹



(b) 人工磁场法的合力大小



(c) 人工磁场法的合力方向

图 11 人工磁场法路径规划二

由图 11(a)所示当目标点附近两侧存在障碍物时,人工磁场法仍然能够规划出一条可行路径,路径点对目标点附近的障碍物有明显的避障动作,由图 11(b)、(c)可知,在到达目标点后合力大小收敛为 0,合力方向不再变化,成功解决了传统人工势场法中的目标不可达问题。

对比以上的仿真实验可以看出人工磁场法不仅成功解决了局部极小值和目标不可达问题,而且规划出的路径点

与障碍物之间的间距更大,路径点对障碍物有明显的避障动作,没有出现反复振荡的情况,路径规划的质量和效率有了很大提高。因此本文提出的人工磁场法在移动防疫机器人路径规划的实际应用中具有更高的安全性。

4 结 论

本文首先针对传统人工势场法所存在的目标不可达和局部极小值问题做了详细分析,而后提出了一种基于人工磁场的路径规划算法,并详细描述了人工磁场的建模过程:对障碍物周围建立人工磁场,引入洛伦兹力,引力始终与洛伦兹力保持垂直,从而解决局部极小值问题;在洛伦兹力函数中引入距离影响因子,解决目标不可达问题;通过目标点与障碍物之间的虚拟直线来优化洛伦兹力方向,避免迂回路径,进而减少了路径规划的步数。最后,在 MATLAB 中进行了 3 组虚拟环境的仿真实验,通过对比传统人工势场法和人工磁场法的路径规划结果,证明了本文提出的人工磁场法具有有效性和优越性。为下一步移动障碍物的避障与路径规划研究和防疫机器人平台的实际应用奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 迟胜凯,谢永芳,陈晓方,等.基于障碍物代价势场的移动机器人避障算法[J].北京航空航天大学学报,2022,48(11):2289-2303.
- [2] YANG W L, WU P, ZHOU X Q, et al. Improved artificial potential field and dynamic window method for amphibious robot fish path planning[J]. Applied Sciences,2021,11(5): 2114-2129.
- [3] WEI K C, GAO Y, ZHANG W, et al. A modified Dijkstra's algorithm for solving the problem of finding the maximum load path [C]. 2019 IEEE 2nd International Conference on Information and Computer Technologies,IEEE,2019:10-13.
- [4] 迟旭,李花,费继友.基于改进 A* 算法与动态窗口法融合的机器人随机避障方法研究[J].仪器仪表学报,2021,42(3): 132-140.
- [5] 徐大也,胡立坤,王小勇,等.基于概率路线图法的窄道采样与轨迹优化[J].国外电子测量技术,2023,42(2): 1-8.
- [6] KWON H, CHA D, SEONG J, et al. Trajectory planner CDT-RRT* for car-like mobile robots toward narrow and cluttered environments[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4828-4845.
- [7] LIU Z X, YUAN X F, HUANG G M, et al. 3D gradient reconstruction-based path planning method for autonomous vehicle with enhanced roll stability[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2022,23(11): 1-9.
- [8] 邓叶,姜香菊.基于改进人工势场法的四旋翼无人机航迹规划算法[J].传感器与微系统,2021,40(7): 130-133.
- [9] 郭银景,刘琦,鲍建康,等.基于人工势场法的 AUV 避障算法研究综述[J].计算机工程与应用,2020,56(4): 16-23.
- [10] 许万,程兆,朱力,等.一种基于改进人工势场法的局部路径规划算法[J].电子测量技术,2022,45(19): 83-88.
- [11] 刘翰培,王东署,汪宇轩,等.移动机器人路径规划的模糊人工势场法研究[J].控制工程,2022,29(1): 33-38.
- [12] 仇恒坦,平雪良,高文研,等.改进人工势场法的移动机器人路径规划分析[J].机械设计与研究,2017,33(4): 36-40.
- [13] 陈继清,谭成志,莫荣现,等.基于人工势场的 A* 算法的移动机器人路径规划[J].计算机科学,2021,48(11): 327-333.
- [14] 王贵程,吴国新,左云波,等.基于改进蚁群算法包装机器人轨迹规划研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(8): 94-100.
- [15] 鲍久圣,张牧野,葛世荣,等.基于改进 A* 和人工势场算法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划[J].煤炭学报,2022,47(3): 1347-1360.
- [16] 胡杰,张华,傅海涛,等.改进人工势场法在移动机器人路径规划中的应用[J].机床与液压,2021,49(3): 6-10.
- [17] 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,2022,42(7): 696-705.

作者简介

伍锡如,博士生导师,教授,主要研究方向为智能机器人、深度学习、复杂网络控制等。

E-mail:57948699@qq.com

龚璞(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机器人路径规划。

E-mail:761459186@qq.com