

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209505

# 一种基于改进人工势场法的局部路径规划算法\*

许万程 兆朱力 张宇豪

(湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068)

**摘要:** 针对在存在复杂障碍物的环境中,利用人工势场法进行移动机器人路径规划时出现的局部最小值和目标不可达问题。本文提出了一种基于凹形障碍物补齐的改进人工势场法进行局部路径规划。首先,通过对凹形障碍物补齐,防止机器人进入局部最小值区域。然后,通过新增距离影响因子,改进了斥力场函数,使目标点成为全局势场中的最小点,防止机器人陷入目标不可达区域。最后仿真结果表明,本文所提出的改进人工势场法可以解决存在复杂障碍物的环境中的局部最小值问题和目标不可达问题,并且相对于其他算法,可以有效减少路径补偿,提高规划效率。

**关键词:** 移动机器人;复杂障碍物;路径规划;人工势场法;障碍物补齐

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5030

## A local path planning algorithm based on improved artificial potential field method

Xu Wan Cheng Zhao Zhu Li Zhang Yuhao

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of local minimum and unreachable target when using artificial potential field method for mobile robot path planning in the presence of complex obstacles. In this paper, an improved artificial potential field method based on concave obstacle patching is proposed for local path planning. Firstly, the concave obstacles are filled to prevent the robot from entering the local minimum area. Then, by adding the distance influence factor, the repulsion field function is improved to make the target point the smallest point in the global situation field, and prevent the robot from falling into the target unreachable area. Finally, the simulation results show that the improved artificial potential field method proposed in this paper can solve the local minimum problem and the target unreachable problem in the environment with complex obstacles. Compared with other algorithms, it can effectively reduce the path compensation and improve the planning efficiency.

**Keywords:** mobile robot; complex obstacle; path planning; artificial potential field method; obstacle filling

## 0 引言

随着移动机器人的发展,移动机器人的路径规划成为了学者们的研究热点。在有障碍物的环境下,移动机器人能否通过一定的评价指标,在工作环境中搜索出一条从起点到目标点的安全且无碰撞的行驶路径,是评判路径规划优劣的重要标准<sup>[1]</sup>。

目前,针对不同应用环境下移动机器人路径规划算法的研究中,涌现出了多种不同的算法思想,如遗传算法<sup>[2]</sup>、蚁群算法<sup>[3-4]</sup>、人工势场法<sup>[5]</sup>等等。其中遗传算法是通过模拟达尔文的生物进化论,利用遗传学机理和生物进化过程来不断寻求最优结果<sup>[6]</sup>。蚁群算法是通过模拟蚁群的觅食

过程,蚂蚁在觅食过程中会释放信息素传递信息,信息素的浓度可以反映概率,通过反馈可以寻求一条最短路径<sup>[7]</sup>。人工势场法是通过将机器人在环境中的运动模拟成为在一种综合力场中运动,障碍物与机器人之间会产生斥力,目标点与机器人之间会产生引力,通过合力来控制移动机器人的运动<sup>[8]</sup>。相对于其他路径规划算法,利用人工势场法规划出来的路径是最平滑的也是最安全的,但是人工势场法存在局部最小值问题和目标不可达问题<sup>[9]</sup>。

为了解决上述两个问题,国内外学者进行了广泛的研究。高晓阳<sup>[10]</sup>改进了斥力场的函数,解决了目标不可达问题,并通过引入外加力,使机器人可以逃离局部最小值区域,但仍会进入局部最小区域。Wang等<sup>[11]</sup>引入虚拟目标

收稿日期:2022-04-05

\* 基金项目:船舶振动噪声重点实验室基金(6142204200709)项目资助

点,并改变了斥力场函数,使移动机器人可以跳出局部最小区域并可以解决目标不可达问题,但同样会先陷入局部最小区域。徐小强等<sup>[12]</sup>对斥力的生成机制进行了调整,在一定条件下对前进方向做出了改进,通脱设立虚拟目标点引导机器人运动,但在复杂环境下,移动机器人可能会陷入其中,无法跳出。Yuan 等<sup>[13]</sup>通过采用矢量叠加法,在斥力势场模型上实时添加目标点和移动机器人相对位置的权重因素,解决了目标点不可达和局部极小点问题。程志等<sup>[14]</sup>引入了机器人前进的方向向量,并修改了斥力的产生条件和计算方法,来解决局部极小值的问题。以上研究能够解决某种程度上的局部最小值和目标不可达问题,但大多只适用于简单环境下的路径规划问题,难以在相对复杂的障碍物环境中应用。

针对以上问题,本文对传统人工势场法进行了改进。首先建立了机器人环境采样模型,通过凹型障碍物补齐法将采样区域中的凹型障碍物“陷阱”补齐,防止机器人进入凹型障碍物内部而陷入局部最小值区域;然后对斥力场函数进行了改进,在原斥力场函数的基础上,新增距离控制量,修改了斥力的产生机制,确保目标点为全局势场最小点,避免在目标点附近存在障碍物的情况下,因斥力过强而导致目标不可达的问题。并进行了仿真实验验证,结果表明此算法不仅可以解决上述问题,而且所规划的路径更短,效率更高。

### 1 传统人工势场法

#### 1.1 基本原理

人工势场法是由 Khatib 于 1986 年首次引入到移动机器人路径规划算法中的,其本质上是移动机器人的工作环境视为一个抽象的虚拟力场。在这个虚拟力场中,机器人在引力和斥力的合作用下,朝着目标点不断移动<sup>[15]</sup>。

在机器人所处的二维空间中,将机器人、目标点和障碍物都视为一个质点,机器人在人工势场中的受力模型如图 1 所示。其中,  $F_{gra}$  为目标点对机器人产生的引力;  $F_{rep}$  为障碍物对机器人产生的斥力;  $F_{res}$  为机器人受到的合力。

传统人工势场的定义如下:

设移动机器人的当前位置为  $x = (x, y)$ , 那么引力场是由目标点产生的,定义引力场函数为:

$$U_{gra}(x) = \frac{1}{2} k_{gra} |x - x_g|^2 \quad (1)$$

式中:  $k_{gra}$  为引力场的增益系数,根据实际场景选择合适的系数;  $x_g$  为目标点位置,  $|x - x_g|$  为机器人与目标点之间的欧式距离。

根据势能场的概念,引力为引力场的负梯度,由拉格朗日方程有:

$$F_{gra}(x) = -grad(U_{gra}(x)) = -k_{gra} |x - x_g| \quad (2)$$

斥力场是由障碍物产生,斥力场的定义为:

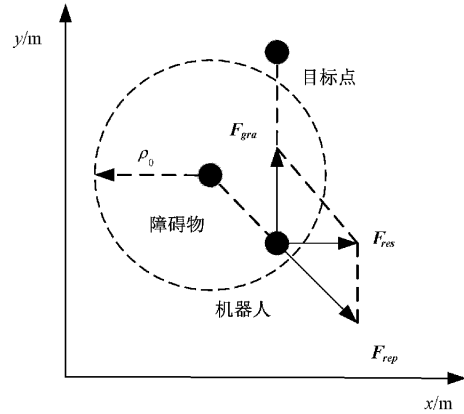


图 1 移动机器人受力模型

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

式中:  $k_{rep}$  为斥力场增益系数,  $x_o$  为障碍物的位置,  $\rho(x, x_o)$  为机器人与障碍物之间的欧式距离,  $\rho_0$  为斥力作用范围。

则斥力定义为斥力场的负梯度,斥力函数为:

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

全局势场函数为引力场函数和斥力场函数的矢量叠加:

$$U_{res}(x) = U_{gra}(x) + U_{rep}(x) \quad (5)$$

故在人工势场中,机器人所受到的合力为:

$$F_{res}(x) = F_{gra}(x) + F_{rep}(x) \quad (6)$$

#### 1.2 人工势场法的缺陷

在移动机器人路径规划中,相较于其他算法,人工势场法运算速度快,规划路径平滑。但是人工势场法也存在缺陷,总结如下:

1)局部最小值问题。在复杂障碍物环境中,常常存在凹型障碍物“陷阱”,当机器人移动到凹型障碍物陷阱内部某一区域时,机器人受力到的合斥力和引力平衡,此时移动机器人将无法确定下一步的行驶路线,就会出现停滞或者徘徊的现象。

2)目标不可达问题。在传统人工势场法的研究中,通常假设目标点附近区域不存在障碍物,因此当机器人将要抵达目标点时,斥力可忽略不计,机器人只受到引力作用而到达目标点;然而,在实际环境中,目标点附近往往会存在障碍物,在机器人向目标点逼近时,斥力会逐渐大于引力,此时机器人所受合力方向偏离目标点,而出现目标不可达的现象。

## 2 改进人工势场法

### 2.1 凹型障碍物补齐法

在复杂障碍物环境中,当机器人移动到凹型障碍物“陷阱”内部时,将陷入局部最小值区域,而无法完成路径规划任务,如图 2 所示。当机器人移动到局部最小值附近时,斥力和引力接近平衡,机器人将在 S 点处停滞或者徘徊不前,无法确定下一步的行驶路线。

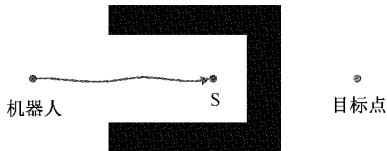


图 2 凹型障碍物“陷阱”

为防止机器人陷入“陷阱”型障碍物内部,在传统人工势场的基础上补齐凹型障碍物,使机器人不进入凹型障碍物陷阱中,直接避免机器人陷入局部最小值区域。

凹型障碍物补齐法的思想是:先找到凹型障碍物上的一个点,然后以该点为起点,按逆时针方向逐个查找凹型障碍物上的其他点,并进行极角排序,然后对其查询使用。具体步骤如下:

步骤 1):把找到的所有点都放在一个二维坐标系中,那么纵坐标值最小的点必定是凹型障碍物上的点,如图 3(a)中的  $P_1$  点。然后以点  $P_1$  为坐标原点构建直角坐标系。

步骤 2):计算坐标系中所有点相对于点  $P_1$  的幅角  $\alpha$ ,按照从小到大的顺序对所有点进行排序,当  $\alpha$  相同时,最接近点  $P_1$  的点排在前面,如图 3(a)中得到的结果为点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 。由几何学知识可知,坐标系中第一个点  $P_1$  和最后一个点  $P_7$  一定是凹型障碍物上的点。

步骤 3):算法开始前,首先将第一个点  $P_1$  和第二个点  $P_2$  放入栈中,其中点  $P_1$  一定是凹型障碍物上的点。然后将栈顶元素的下一个点  $P_3$  当作当前点  $Pr$ ,如图 3(b)所示,开始查找下一个点。

步骤 4):连接栈顶的两个点,得到直线  $L$ ,如图 3(b)所示。判断当前点  $Pr$  与直线  $L$  的位置关系。如果在直线的右边,转步骤 5);如果在直线上或者在直线的左边,转步骤 6)。

步骤 5):栈顶的元素不是凹型障碍物上的点,把栈顶元素出栈,当前点  $Pr$  入栈,转步骤 7)。

步骤 6):当前的点是凹型障碍物上的点,如图 3(c)所示,将其放入栈中,转步骤 7)。

步骤 7):检查栈顶的点是否为步骤 3)中最后的一个点。如果是最后的一个点,则结束算法。如果不是,则把当前点  $Pr$  换成其后的一个点,转步骤 4)。

凹型障碍物补齐法经过  $P_1$ - $P_2$ - $P_3$ - $P_4$ - $P_5$ - $P_6$ - $P_7$ - $P_1$  一轮筛选后,原障碍物边界点构成的多边形成为新的障碍物边界,结果如图 4 所示。

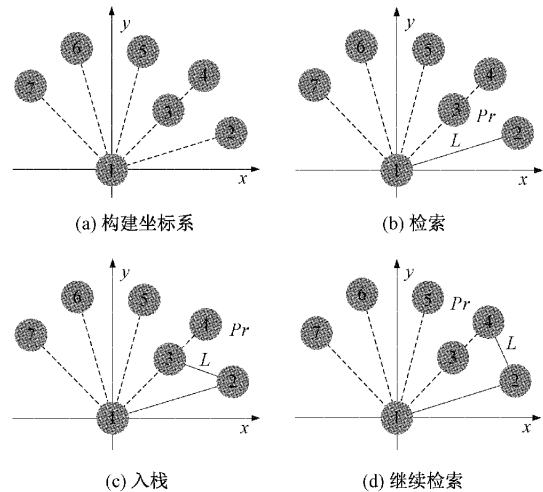


图 3 障碍物补齐法示意图

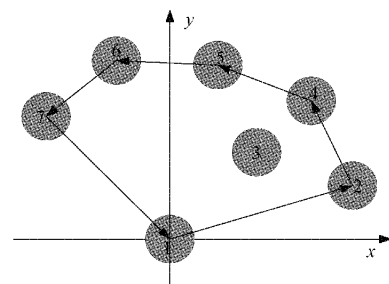


图 4 障碍物补齐法结果

凹型障碍物补齐示例如图 5 所示。

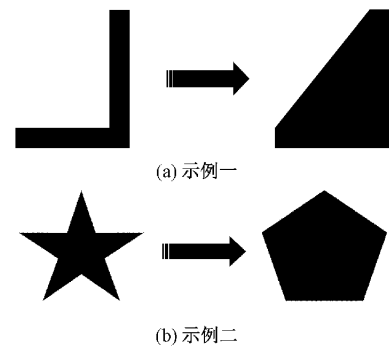


图 5 凹型障碍物补齐处理示例

### 2.2 环境采样模型建立

在存在凹型障碍物的复杂环境下进行路径规划的过程中,机器人可能因进入凹型障碍物的内部而陷入局部最小值区域,导致机器人在局部最小值处出现停滞或者徘徊的现象。

因此,在机器人移动的过程中,需要确定环境采样区域,对环境采样区域内的障碍物进行实时探测,从而将环境采样区域内的凹型障碍物进行补齐,避免机器人陷入局部最小值区域。

设机器人的环境采样区域为  $M$ ,如图 6 所示。则  $M$

可表示为以机器人为圆心,  $r$  为半径的圆形采样区域, 即:

$$M = \pi r^2 \quad (7)$$

环境采样区域增益系数  $r$  根据环境中障碍物复杂度确定, 为了保证斥力作用范围在环境采样区域内, 因此理论上  $r$  的取值范围为  $r \in [\rho_0, +\infty)$ 。

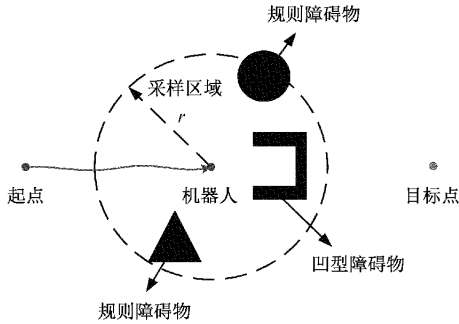


图 6 环境采样区域示意图

### 2.3 改进斥力场函数

由于移动机器人实际运行环境中, 目标点附近往往存在障碍物, 而导致人工势场法在进行路径规划时, 出现无法达到目标点的现象。因此, 为避免出现这一问题, 本文对斥力场函数进行了改进, 改进后的斥力场函数为:

$$U'_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(x, x_o)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \ln(|x - x_g| + 1), & 0 \leq \rho(x, x_o) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(x, x_o) > \rho_0 \end{cases} \quad (8)$$

改进斥力场函数相对于传统人工势场斥力场函数, 增加了控制量  $\ln(|x - x_g| + 1)$ , 即机器人与目标点的距离对斥力场的影响。当机器人到达目标点时,  $\ln(|x - x_g| + 1)$  为 0,  $U'_{rep}$  也为 0, 具备完备性, 同时解决了目标点全局势场不是最小的问题。

此时, 斥力为改进斥力场的负梯度:

$$F'_{rep}(x) = -grad(U'_{rep}(x)) = \begin{cases} F'_{rep1} + F'_{rep2}, & 0 \leq \rho(x, x_o) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(x, x_o) > \rho_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $F'_{rep1}$  和  $F'_{rep2}$  分别为斥力在斥力方向和引力方向上的两个分量。

其中,  $F'_{rep1}$  为斥力分量, 方向由障碍物指向移动机器人:

$$F'_{rep1}(x) = k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(x, x_o)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(x, x_o)} \frac{\partial \rho(x, x_o)}{\partial x} \ln(|x - x_g| + 1) \quad (10)$$

$F'_{rep2}$  为引力分量, 方向由移动机器人指向目标点:

$$F'_{rep2}(x) = -\frac{1}{2} k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(x, x_o)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \frac{1}{|x - x_g| + 1} \quad (11)$$

由上述公式可知, 改进斥力函数由两个分量构成。当

机器人向目标点逼近的过程中, 斥力分量逐渐减小至零, 机器人在引力分量的作用下到达目标点。

### 2.4 改进算法设计

根据上述改进方法, 本文设计了一种新的算法流程, 如图 7 所示。

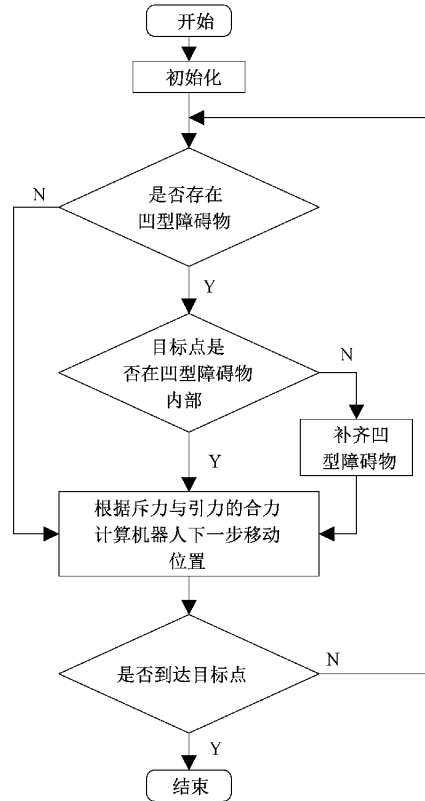


图 7 改进算法设计流程

首先初始化参数, 在环境采样区域内, 根据凹型障碍物补齐法检测是否存在凹型障碍物, 并且判断目标点是否存在凹型障碍物内部。如果存在凹型障碍物, 且目标点在凹型障碍物内部, 则不进行凹型障碍物补齐; 反之, 将凹型障碍物补齐。然后根据斥力与引力的合力计算机器人下一步的移动位置, 直到移动机器人到达目标点为止。

### 3 仿真分析

为验证本文改进算法在解决局部最小值和目标不可达问题上的有效性, 分别进行了两组对比仿真实验。实验平台为 PC Intel i5-10300H、软件环境为 Matlab 2020a。

设置机器人起点坐标为 (30, 270), 终点坐标为 (260, 20)。设定实验参数分别为:  $k_{gra} = 10, k_{rep} = 5, \rho_0 = 25, r = 70$ , 步长为 1。

在放置凹型障碍物的环境下, 分别采用标准人工势场法、文献[16]中的混合人工势场法和本文基于凹形障碍物补齐的改进人工势场法进行对比仿真实验, 仿真结果如图 8 所示。

由图 8(a) 可知, 采用标准人工势场法进行路径规划

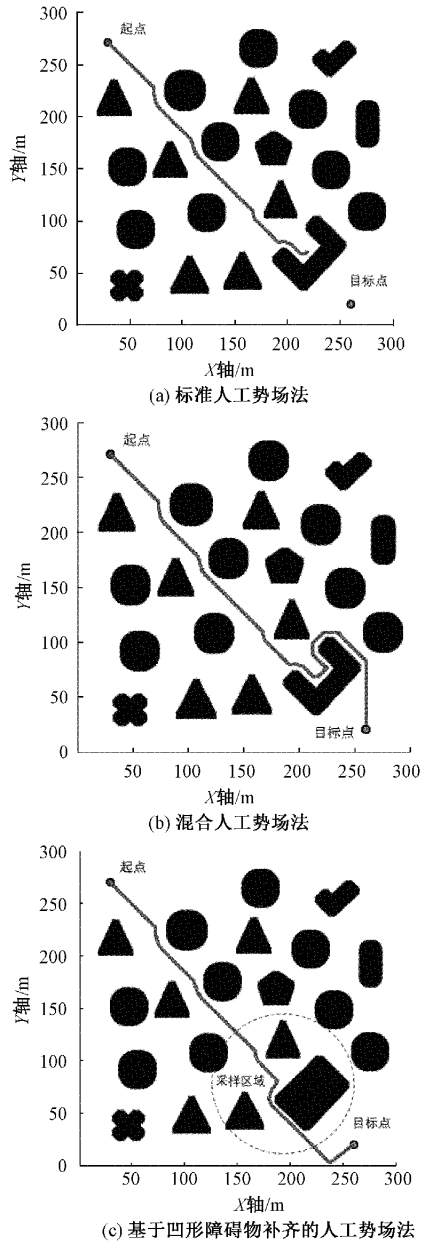


图 8 局部最小值对比实验

时,移动机器人在凹型障碍物内部的某一点停止,而无法完成路径规划任务。由图 8(b)可知,当采用混合人工势场法时进行路径规划时,移动机器人可以通过局部避障的方式逃离局部极小点,其总步数为 345 步。由图 8(c)可知,当采用凹型障碍物补齐法的改进算法进行仿真时,在环境采样区域内,凹型障碍物被补齐,移动机器人避免陷入局部最小值区域,成功到达目标点,其总步数为 287 步。这说明本文基于凹型障碍物补齐法的改进人工势场法在复杂障碍物环境下,由于没有进入障碍物的凹型区域,在不会陷入凹型障碍物的局部极小点的同时,还可大幅缩短规划路径长度,具有更加优秀的轨迹规划性能。

在目标点附近放置障碍物的环境中进行对比仿真实

验,为直观表达,取目标点处局部放大图,如图 9 所示。

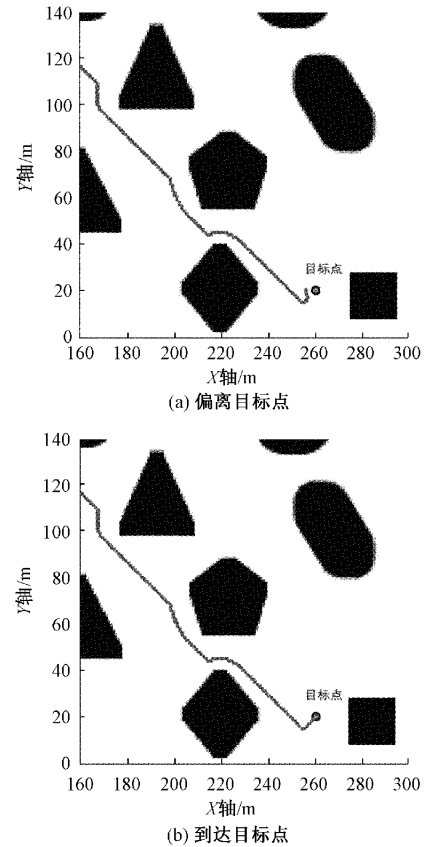


图 9 障碍物干扰对比实验

在图 9(a)中,算法改进前,当机器人即将到达目标点时,机器人所受合力方向并不指向目标点,而导致机器人朝着偏离目标点的方向移动。在图 9(b)中,采用了本文改进的算法后,机器人在逐渐靠近目标点的过程中,引力分量逐渐增大,而斥力分量逐渐减小至零,机器人能够成功抵达目标点。这说明改进的人工势场法在复杂障碍物环境下,能有效地解决传统人工势场法存在的目标不可达问题。

#### 4 结 论

在复杂障碍物环境下,传统人工势场法存在局部最小值和目标不可达的问题。针对以上问题,本文提出如下解决方法:首先建立机器人环境采样模型,通过凹型障碍物补齐法将环境采样区域内的凹型障碍物“陷阱”补齐,避免机器人在凹型障碍物内部陷入局部最小值区域。然后对斥力场函数进行了改进,在原斥力场函数的基础上,新增距离影响因子,修改了斥力的产生机制,确保目标点为全局势场最小点,从而使机器人能够成功到达目标点。最后通过仿真实验表明,本文所提出的改进人工势场法能有效解决局部最小值和目标不可达问题,适用于复杂障碍物环境下的移动机器人路径规划。

#### 参考文献

[1] ZHANG N H, 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 (ROBIO), IEEE, 2017.
- [2] 罗志远,丰硕,刘小峰,等. 一种基于分步遗传算法的多无人清洁车区域覆盖路径规划方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32(8): 8.
- [3] 王刚,张方,严大亮,等. 基于改进蚁群算法的机器人三维路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 1-6.
- [4] 肖金壮,余雪乐,周刚,等. 一种面向室内 AGV 路径规划的改进蚁群算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 9.
- [5] 高申勇,许方镇,郭鸿杰. 基于弹簧模型的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 8.
- [6] LUAN P G, THINH N T. Hybrid genetic algorithm based smooth global-path planning for a mobile robot [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2021(15): 1-17.
- [7] YOU X M, LIU S, ZHANG C. An improved ant colony system algorithm for robot path planning and performance analysis [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2018, 33(5): 527-533.
- [8] 宋建辉,代涛,刘砚菊. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(7): 1328-1332.
- [9] FAN X, GUO Y, LIU H, et al. Improved artificial potential field method applied for AUV path planning[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 1-21.
- [10] 高晓阳. 基于改进人工势场法的自主机器人动态避障研究[D]. 郑州:郑州大学, 2020, DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2020.001972.
- [11] WANG S M, ZHAO T T, LI W J. Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method [C]. 2018 IEEE International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE), IEEE, 2018: 29-33.
- [12] 徐小强,王明勇,冒燕. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2020, 40(12): 3508-3512.
- [13] YUAN J M, SHEN H Y. Research on local path planning of mobile robot based on artificial potential field method [C]. 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), IEEE, 2019: 785-789.
- [14] 程志,张志安,李金芝,等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 29-34.
- [15] KUMAR P B, RAWAT H, PARHI D R. Path planning of humanoids based on artificial potential field method in unknown environments [J]. Expert Systems, 2019, 36(2): 1-12.
- [16] 李庆华,尤越,沐雅琪,等. 一种针对大型凹型障碍物的组合导航算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4): 7.

#### 作者简介

许万(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为移动机器人、多轴运动控制。

E-mail: xuwan@mail.hbut.edu.cn

程兆,硕士研究生,主要研究方向为移动机器人。

E-mail: czl371364528@outlook.com