

融合区间二型模糊与卡普托分数阶的人工势场法

程俞富¹ 杨盛毅² 沈先倩¹ 何小飞¹

CHENG Yufu YANG Shengyi SHEN Xianqian HE Xiaofei

摘要

传统的人工势场法存在诸多弊端,常常会陷入局部最优解,导致目标不可达,同时还会引发路径震荡等问题。基于此,文章提出了一种融合区间二型模糊与卡普托分数阶的人工势场法,且该方法适用于随机动态障碍物环境。首先,引入卡普托分数阶的梯度下降法,提出分数阶阶次的设计,优化 APF 的位置信息迭代,提高算法效率的同时也减少了路径抖振,能更好地适应未知动态环境;其次,设计区间二型模糊逻辑改进 APF 生成偏转角的方式,使移动机器人的运动方向由区间二型模糊逻辑精确控制,解决局部最优和目标不可达问题。实验表明,该算法能在多动态随机障碍物环境中规划出一条避碰路径,与同类算法相比,在迭代速度、运行时间和精度上都有明显提升,验证了所提出算法的有效性与优越性。

关键词

人工势场法; 区间二型模糊逻辑; Caputo 分数阶; 路径规划; 移动机器人

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.045

0 引言

随着科学技术的飞速发展,移动机器人技术以其效率高、不受环境限制、抗干扰能力强等优点在众多领域得到广泛应用^[1-2]。

人工势场法 (artificial potential field, APF) 是一种常见的障碍物规避算法,易于建模,在计算方面存在优势,搜索时间也较短^[3]。但也存在局部极小值、目标不可达和路径震荡等问题,因此,许多学者为解决诸问题对 APF 的路径规划进行了全面的研究。例如,文献 [4-5] 通过构造虚拟目标点,选取模糊控制器输出辅助力,提前规避障碍物。王娜等人^[6]引入模糊控制方法,形成斥力势场等级来实现机器人的路径规划,但对于陷阱型障碍物规划效果并不理想。Shang 等人^[7]针对传统人工势场法在障碍物避让中的不足,提出了一种具有模糊控制的改进方案,解决了局部极小值和轨迹振荡问题,但规则设计复杂,限制了实时性。宋云云等人^[8]在 RRT 算法中引入引力分量,根据障碍物信息实现扩展步长自适应变化,但该算法不适应障碍物动态程度较高的环境。易先军等人^[9]引入逃逸力,采用模糊算法确定逃逸力的大小,可以为移动机器人摆脱局部最大陷阱,但在复杂环境中也存在明显轨迹振荡。Ye 等人^[10]将机器人移动环境分为全局安全和局部危险,融合模糊控制与人工势场法解决目标不可达和局部极小问题,但在动态环境下,实际上并未解决人工势场法动态场

景中的缺陷。

为解决 APF 算法容易陷入局部极小值、目标不可达、精度差的问题,本文提出了一种融合区间二型模糊与卡普托分数阶的人工势场法 (hybrid interval type-2 fuzzy and caputo fractional, HIT2FCF-APF)。该算法通过引入 Caputo 分数阶到 APF 算法的梯度方法中,使用 Caputo 分数阶梯度下降法,提高算法计算效率和精度;通过设计区间二型模糊逻辑,使移动机器人在遇到障碍物时的运动方向由 APF 和区间二型模糊控制共同作用,解决局部极小值和目标不可及的问题,此方法在随机运动障碍物环境中有较好表现。

1 HIT2FCF-APF 整体思路

如图 1 所示,本文总体思想从两方面考虑:获取此刻移动机器人的位置信息,引入 Caputo 分数阶的梯度下降法,根据与障碍物的距离选择采取低阶次或高阶次,得到分数阶梯度;搜索范围内当障碍物不存在时,应立即朝目标方向进行移动。

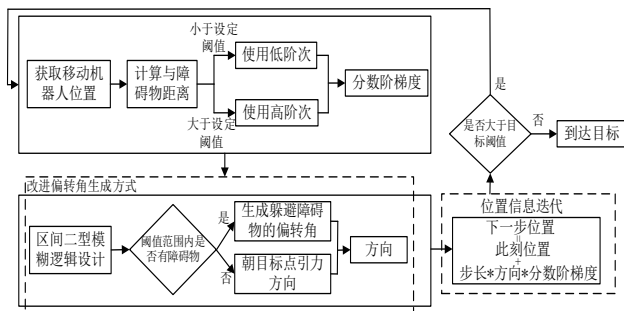


图 1 HIT2FCF-APF 算法整体思路

1. 贵州民族大学数据科学与信息工程学院 贵州贵阳 550000

2. 贵州民族大学物理与机电工程学院 贵州贵阳 550000

有障碍物的情况下，通过设计区间二型模糊逻辑得到偏转角。由此得到位置信息迭代所需参数，根据 Caputo 分数阶梯度下降法得到移动机器人下一步位置信息，循环往复，直至完成整个路径规划。

2 改进传统 APF 的位置信息迭代

2.1 引入 Caputo 分数阶的梯度下降法

由于 Caputo 分数阶微分的物理直观性和数值稳定性，本文从 Caputo 分数阶微分入手，重新推导梯度下降算法，改进传统 APF 的位置信息迭代。

为便于数值计算和理论分析，对 Caputo 分数阶微分^[11]进行泰勒展开转化为多项式形式：

$${}_c^{\alpha}D_x^{\alpha}f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{f^{(i+1)}(c)}{\Gamma(i+2-\alpha)}(x-c)^{i+1-\alpha} \quad (1)$$

式中： c 和 x 代表微分的上下，且 c 通常取 0 或 $-\infty$ ； α 代表微分的阶次， $n-1 < \alpha < n$ 。为克服分数阶微分的长记忆特性带来的影响，将式 (1) 的微分下限替换为 $x(k)$ ，从而让微分下限随着迭代过程变化^[12]，得到：

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k - \mu \cdot {}_x^{\alpha}D_{x_k}^{\alpha}f(x_k) = \\ &= x_k - \mu \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{f^{(i+1)}(x_k)}{\Gamma(i+2-\alpha)}(x_k - x_{k-1})^{i+1-\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

为保证无穷级数能在线计算微分，考虑到式 (2) 收敛时，迭代过程将很快满足 $|x_k - x_{k-1}| < 1$ ，此时分数阶级数的第一项成主导项，保留第一项^[13]，从而得到 Caputo 分数阶的梯度下降法：

$$x_{k+1} = x_k - \mu \cdot \frac{f^{(1)}(x_{k-1})}{\Gamma(2-\alpha)}(x_k - x_{k-1})^{1-\alpha} \quad (3)$$

对式 (3) 进一步简化，得：

$$x_{k+1} = x_k - \mu \cdot f^{(1)}(x_k) \cdot F \quad (4)$$

式中： $F = |x_k - x_{k-1}|^{1-\alpha}$ 为分数阶梯度。

2.2 Caputo 分数阶阶次的设计

为解决算法在收敛速度与收敛精度上的矛盾，使移动机器人在工作中既可以保证工作质量又可以保证工作效率，根据移动机器人与障碍物的距离 L 采取不同阶次。在分数阶梯度下降法的迭代过程中，当距离超过 L 而采取高阶次，高阶次 $\alpha_h (1 < \alpha < 2)$ 能够比常规梯度下降法的收敛速度快，但它的收敛精度相对于常规梯度下降法相对较低；相反，当距离小于 L 时，可以采取低阶次，低阶次 $\alpha_l (0 < \alpha < 1)$ 能够达到比常规梯度下降法更高的收敛精度，但是收敛速度却比常规下降法有所减慢。

3 改进传统 APF 的偏转角生成方式

根据障碍物的位置及影响范围，本文将机器人所在环境

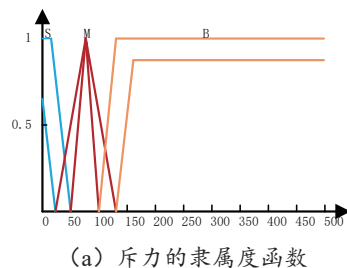
划分为安全区域和局部危险区域。障碍物为圆心，半径 R 范围内的区域为危险区域。因障碍物随机变动，安全区域和危险区域也随之动态变化。在安全区域内，机器人受到目标点引力的作用，朝目标点前进；而在危险区域内，结合人工势场法和模糊逻辑，指导机器人避开障碍物并继续向目标移动。

区间二型模糊逻辑设计如下：

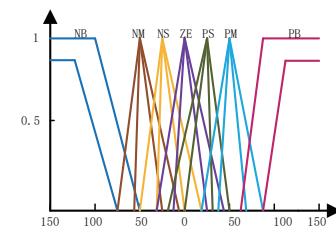
本文将人工势场法得到的斥力 F_{rep} ，以及由目标、障碍物与机器人的夹角 θ 作为模糊系统的 2 个输入变量，将机器人的偏转角作为模糊逻辑的输出。

本文将机器人在危险区域的斥力大小 F_{rep} 的论域定义为 $[0 \sim 500]$ ，模糊语言变量为 $\{B, M, S\}$ ；夹角 θ 的论域为 $\{-180^\circ, 180^\circ\}$ ，模糊语言变量为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。输出偏转角 α ，论域为 $\{-60^\circ, 60^\circ\}$ ，模糊语言变量为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。

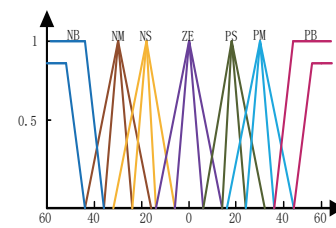
在图 2 中，三角形和梯形隶属度函数被选取为输入输出变量。模糊规则表形式采用文献^[14]。



(a) 斥力的隶属度函数



(b) 夹角的隶属度函数



(c) 输出偏转角的隶属度函数

图 2 隶属度函数

4 仿真实验与讨论

当机器人与目标体的距离小于等于 0.4，可表明机器人已经到达目标体。当机器人运动超出实验范围或检测与障碍物碰撞，则停止实验。引力增益系数设置为 15；斥力增益系数为 30；障碍物影响距离为 2 m；基本步长为 0.1；迭代步

数为 300。

4.1 阶次切换对比分析

由图 3 分析可知, 当分数阶阶次 $1 < \alpha < 2$ 时, 收敛速度明显增加, 可以快速收敛到极值点附近, 但收敛精度较差, 在极值点附近往复迭代; 当分数阶阶次 $0 < \alpha < 1$ 时, 收敛速度较慢, 会消耗大量时间。虚线为阶次切换的迭代效果, 在保证收敛精度的同时也保留了高阶次的收敛速度。

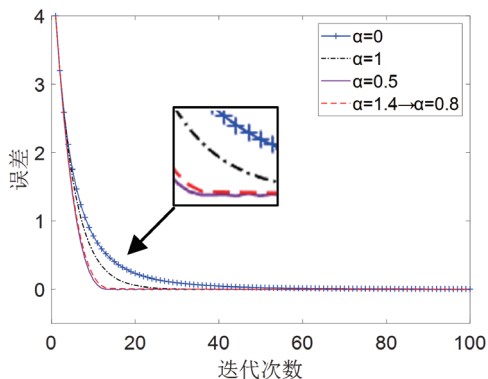


图 3 阶次切换效果对比

4.2 静态障碍物环境仿真

设置临界值 L 为 0.8, α_h 的值为 1.4, α_l 的值为 0.9, 其他参数均与先前保持一致。图 4 为静态环境下, 分别采用 APF 算法、APF-FCL^[15] 以及本文算法, 进行路径规划实验。

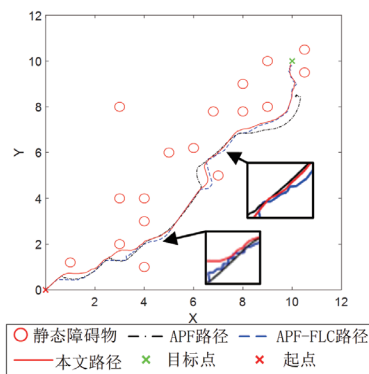


图 4 静态环境下算法比较

如图 4 在静态障碍物环境下进行仿真, APF 由于斥力势场过大仍无法到达目标点; APF-FCL 算法在 (4, 2) 和 (7, 6) 能明显看出路径拐点, 由于障碍物更多, 更容易出现局部极小值情况, 路径震荡问题更为突出; 本文算法偏角控制更精准, 转向更平滑, 得到的路径拐点较少。对比结果如表 1 所示。

表 1 静态障碍物环境下算法性能对比

算法	路径长度	规划步数	耗时
APF	—	—	—
APF-FCL	16.91	189	18.46
本文算法	15.75	157	17.80

4.3 随机动态障碍物环境仿真

为证明在随机障碍物动态环境下, 所提算法的有效性和优越性, 分别在不同复杂度的随机动态障碍环境中对比 APF, APF-FCL 以及本文算法。

由图 5 可知, 静态障碍物的坐标为 (26, 24), 起点为 (0, 0), 目标点为 (25, 25), APF 在此条件下无法绕过障碍物到达目标点; APF-FCL 和本文算法均可以绕过障碍物到达目标点, 但 APF-FCL 迭代速度慢导致绕行距离远, 规划路径长度略长。

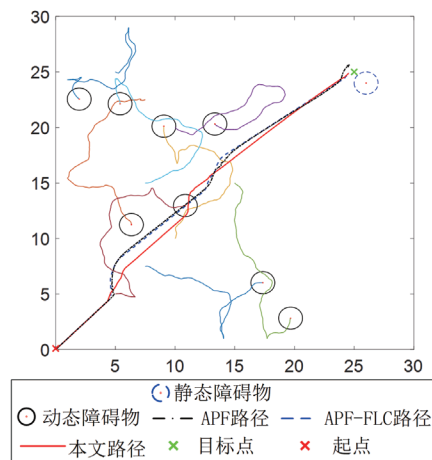


图 5 简单随机动态障碍物环境下算法对比

仿真实验数据结果如表 2 所示。传统人工势场法无法到达目标点, 本文算法和 APF-FCL 路径长度相差不大, 但规划步数比 APF-FCL 减少 25%, 算法运行速度提高 33%。

表 2 简单随机动态障碍物环境下算法性能对比

算法	路径长度	规划步数	耗时
APF	—	—	—
APF-FCL	30.54	182	15.62
本文算法	29.32	136	10.42

如图 6 所示, 第二种算法在复杂度高的动态环境中, 起点 (0, 0), 目标点 (30, 30)。

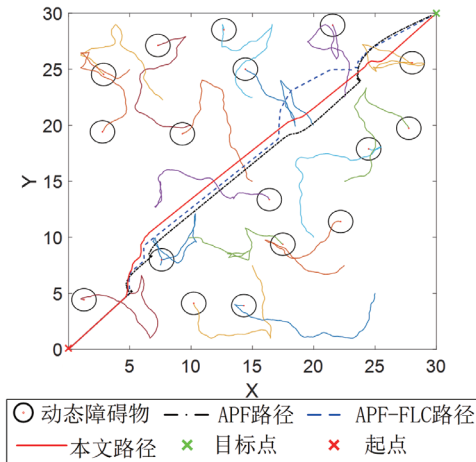


图 6 复杂随机动态障碍物环境下算法对比

APF 在 (6.5, 8) 以及 (24, 24) 发生明显震荡; APF-FCL 通过一型模糊控制帮助移动机器人逃脱局部极小点, 但在 (16, 18) 绕行距离远; 本文算法通过区间二型模糊控制和阶次切换的分数阶梯度下降法使移动机器人精准避障并快速接近目标点。

根据表 3 数据可以看出仿真实验结果与预期一致。在高复杂度环境中, 移动机器人更容易遇到局部极小情况, APF 难以处理此情况, 容易产生抖动甚至停滞; 与 APF-FCL 相比, 本文算法路径长度最短, 规划步数减少 32%, 算法运行速度提高 33%。

表 3 复杂随机动态障碍物环境下算法性能对比

算法	路径长度	规划步数	耗时
APF	46.20	231	16.23
APF-FCL	45.00	225	15.62
本文算法	43.46	153	10.42

5 结论

对于传统人工势场法存在的固有缺陷。本文通过引入 Caputo 分数阶微分, 改进梯度下降法, 使移动机器人在危险与安全两个范围内切换分数阶阶次, 提高算法效率, 并适应动态环境; 通过设计区间二型模糊逻辑, 使移动机器人的运动方向重构为输出偏角与引力的共同作用, 解决局部极小值和目标不可达缺陷。仿真实验结果验证了本文提出算法的可行性和优越性。下一步将研究复杂动态环境下多移动机器人协同路径规划算法。

参考文献:

[1] BRANCALIAO L, GONCALVES J, CONDE M A, et al. Systematic mapping literature review of mobile robotics competitions[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2160.

[2] 于军琪, 陈易圣, 冯春勇, 等. 智能建造机器人局部路径规划研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2024,60(10):16-29.

[3] 汪四新, 谭功全, 罗玉丰, 等. 基于改进人工势场-模糊算法的路径规划算法研究 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版), 2019, 32(5): 42-48.

[4] CHAKRABORTY S, ELANGO VAN D, GOVINDARAJAN P L, et al. A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots[J]. Sustainability, 2022,14(15): 9156.

[5] 张国胜, 李彩虹, 张耀玉, 等. 基于改进人工势场法的机器人局部路径规划 [J/OL]. 计算机工程,1-9[2024-5-11]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0068738>.

[6] 王娜, 石晨. 智能草坪修剪机器人路径规划研究: 基于模

糊改进人工势场算法 [J]. 农机化研究, 2023,45(12):40-44.

[7] SHANG M M, ZHU M, GRETHLER M. Path planning based on artificial potential field and fuzzy control[C/OL]// 2020 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS).Piscataway:IEEE,2020[2024-06-19].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9402876>.

[8] 宋云云, 杨盛毅, 朱力. 非完整约束移动机器人 CRAB-RRT 轨迹规划 [J]. 机械与电子, 2023,41(4):3-8.

[9] 易先军, 耿翰夫, 付龙, 等. 模糊改进人工势场法移动机器人路径规划 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(5): 65-68.

[10] YE B Q, ZHAO M F, WANG Y. Research of path planning method for mobile robots based on artificial potential field [C/OL]// 2011 International Conference on Multimedia Technology.Piscataway:IEEE,2011[2024-05-15].<https://ieeexplore.ieee.org/document/6003004>.

[11] 徐紫钰, 吴克晴. Caputo 型分数阶微分系统正解的唯一性 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2023, 41(6): 92-104.

[12] 曹美丽, 周文学, 唐兰英. Caputo 型分数阶微分方程边值问题解的存在唯一性 [J/OL]. 山西大学学报 (自然科学版), 1-12 [2024-04-27]. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2024048>.

[13] 李佳维, 申永军, 杨绍普. 变阶次分数阶梯度下降法的研究 [J]. 振动与冲击, 2021,40(9):43-47.

[14] ZHOU P, WU D, HE Y, et al. Improved path planning algorithm based on fuzzy control combining a* artificial potential field method[C/OL]//2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC).Piscataway: IEEE, 2022[2024-03-29].<https://ieeexplore.ieee.org/document/10033626>.

[15] 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.

【作者简介】

程俞富 (1999—), 男, 四川达州人, 硕士, 研究方向: 统计建模与模式识别。

(收稿日期: 2024-10-22)