

文章编号:1671-6833(2021)05-0032-05

# 基于主动安全的改进人工势场局部路径规划研究

张三川,明珠

(郑州大学机械与动力工程学院,河南郑州450001)

**摘要:**局部路径规划是智能驾驶车辆主动安全保障的关键。为解决传统人工势场方法存在的局部极小值与目标不可达的理论问题,基于毫米波雷达对障碍物方位角 $\theta_0$ 的测定功能,引入实验车与障碍物距离作为斥力调节因子,确保目标点附近的斥力不至于过大,同时引入方向角为 $\theta(>\theta_0)$ 并受控于目标距离 $k \cdot S(M, M_g)$ 的目标引力的附加力,使实验车确定能脱离极小值点,从而改进了传统人工势场的局部路径规划方法。运用MATLAB软件数值仿真,实验结果表明:当附加力增益系数 $k$ 为5~7时,即可获得稳定安全的局部规划路径,未出现极小值点;改进人工势场斥力峰值的变化随障碍物与路径规划起始点之间的距离增加而呈现出指数级减小的规律,即实验车在目标点附近所受斥力衰减为0,实现了目标可达;单步计算时长较传统人工势场的略有增加,但其规划路径不再出现震荡区间,仿真时长均为0.26 s,时效性基本相同,而且安全性指标还由传统人工势场法的0.018 8提升到0.305 0,验证了改进人工势场局部路径规划方法的可行性。

**关键词:**智能网联车辆;局部路径规划;改进人工势场;局部极小值;附加力

**中图分类号:**U461.91

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.008

## 0 引言

局部路径规划是解决车辆主动安全问题的重要途径之一<sup>[1]</sup>,具有实时性强、计算效率高的显著特点<sup>[2]</sup>。目前局部路径规划算法主要有A\*算法<sup>[3]</sup>、遗传算法<sup>[4]</sup>、蚁群算法<sup>[5]</sup>、粒子群算法<sup>[6]</sup>和人工势场法<sup>[7]</sup>等,其中人工势场算法具有结构简单、信息处理速度快、实时性好、路径光滑等优点。但传统人工势场法容易出现局部极小值和目标不可达等问题<sup>[8]</sup>,国内外学者对此提出了不同的方法加以改进。Fedele等<sup>[9]</sup>引入了螺旋势场,利用目标引力场和螺旋势场之间的切换策略,使实验小车能够绕过障碍物。Rostami等<sup>[10]</sup>通过寻找成本函数,引入调节器对斥力函数加以修正,成功解决了局部极小值问题。Raheem等<sup>[11]</sup>应用粒子群优化算法寻找人工势场因子的最佳值,提出了基于迭代优化的改进混合路径规划方法。郭泉鹏<sup>[12]</sup>引入广义虚拟势场概念,构造了一种使实验车辆沿势场函数下降方向运动的势场模型。徐小强等<sup>[13]</sup>针对自行式机器人,基于安全距离概念,

引入预测距离算法使机器人陷入局部极小值之前能做出反应,并用设置虚拟的目标点的方法来引导机器人脱离极小值。宣仁虎<sup>[14]</sup>提出了修正势场,对人工势场法存在的目标不可达和局部极小值问题引入逃逸力进行改进。刘志强等<sup>[15]</sup>建立了道路边界危险斥力模型,并在障碍物斥力场中引入速度因素,通过求解平衡方程来获取安全路径。

鉴于相关文献对传统人工势场理论改进方式较为单一,本文拟引入调节因子与附加力,从两个方面对传统人工势场加以改进;同时,综合各改进算法的特点,建立以时效性与安全性为主要评价指标的价值函数模型,以期自动为自动驾驶技术开发提供基础理论支持。

## 1 改进人工势场

### 1.1 传统人工势场

当实验车位于路径规划区间时,会受到如图1所示的障碍物斥力和目标点引力,并始终在引力和斥力的耦合作用下实现避障前行。目标点

收稿日期:2020-08-06;修订日期:2021-02-25

基金项目:河南省重大科技专项(181200212300)

作者简介:张三川(1962—),男,四川资阳人,郑州大学教授,博士,主要从事汽车轻量化、智能网联车辆研究,

万方数据 | sc.zhang@zzu.edu.cn

产生的引力势场  $U_{att}(M, M_g)$  用实验车与目标点之间距离  $S(M, M_g)$  和引力增益系数  $\alpha$  来表达:

$$U_{att}(M, M_g) = \frac{1}{2} \alpha S^2(M, M_g). \quad (1)$$

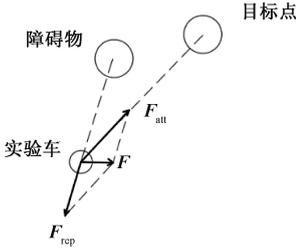


图 1 传统人工势场

Figure 1 Traditional artificial potential field

本文为纯数学模型,除仿真时长外所有参数均无量纲。

目标点对实验车所产生的引力方向始终指向目标点,其大小为引力势场(式(1))的负梯度:

$$F_{att}(M) = -\text{grad}U_{att}(M, M_g) = -\alpha S(M, M_g). \quad (2)$$

当实验车辆进入障碍物作用范围内时,障碍物会对其产生斥力,斥力场函数  $U_{rep}$  为

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta A^2, & A \geq 0; \\ 0, & A < 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为斥力增益系数; $A$ 为斥力作用的判断参数,计算式为

$$A = \frac{1}{S(M, M_{obs})} - \frac{1}{S_0}. \quad (4)$$

式中: $S(M, M_{obs})$ 为实验车与障碍物之间的距离; $S_0$ 为斥力场作用半径。

实验车所受斥力  $F_{rep}(M)$  为斥力场的负梯度,大小为

$$F_{rep}(M) = \begin{cases} \beta A \frac{1}{S^2(M, M_{obs})}, & A \geq 0; \\ 0, & A < 0. \end{cases} \quad (5)$$

若实验车受到多个障碍物的同时作用,其所受总斥力为各障碍斥力的矢量和:

$$F_{rep} = \sum_{i=1}^n F_{repi} \quad (6)$$

显然,传统人工势场下的实验车所受到的引力与斥力的合力为

$$F = F_{att} + \sum_{i=1}^n F_{repi} \quad (7)$$

如图 2(a) 所示,当障碍物与目标点间的距离过于接近时,目标点产生的引力可能会小于斥力,此时,合力方向与前进目标点方向相反,即出现实验车反而远离目标点的不可达问题。如图 2(b)

所示,当实验车、障碍物和目标点 3 者共线时,引力与斥力还可能相互抵消而出现合力为 0 的情况,出现局部极小值问题。

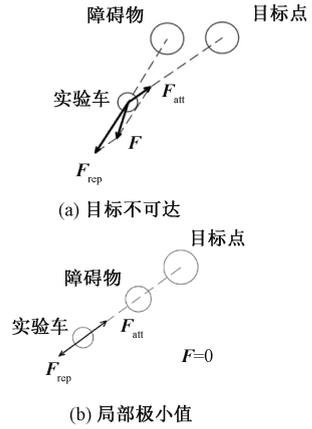


图 2 传统人工势场的 2 种特殊情形

Figure 2 Two special cases of traditional artificial potential field

### 1.2 改进人工势场

为了解决上述问题,定义目标点—实验车的连线与障碍物—实验车的连线之间夹角为  $\theta_0$  (可由车载毫米波雷达测得),在障碍物的异侧增设一个附加力  $F_{add}$ , 其与目标点—实验车的连线间的夹角为  $\theta$ , 实验车在任一点位的受力如图 3 所示。

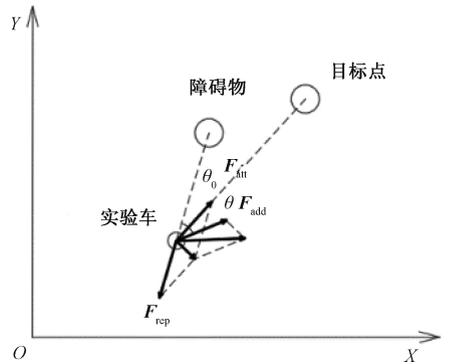


图 3 改进人工势场

Figure 3 Improved artificial potential field

(1) 目标不可达问题。障碍物斥力随  $S(M, M_{obs})$  的减小而增大是实验车目标不可达的根本原因,由式(5)可知,实验车与障碍物的距离  $S(M, M_{obs})$  越近,斥力越大,因此可以选用实验车到目标点之间距离  $S(M, M_g)$  作为距离调节因子对斥力计算式加以数值大小上的修正,改进后的斥力大小为

$$F_{rep}(M) = \frac{\partial U_{rep}}{\partial S(M, M_{obs})} = \begin{cases} \beta S(M, M_g) A \frac{1}{S^2(M, M_{obs})}, & A \geq 0; \\ 0, & A < 0. \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,随实验车与障碍物间的距离的减小而斥力增大的趋势,因引入呈恒定减小的距离调节因子而得到抑制,可保证实验车所受的合力方向始终与前进目标方向大体一致,从而避免了局部路径规划中的目标不可达问题的出现。

(2)局部极小值问题。目标点引力与障碍物斥力的合力为0是局部极小值问题出现的关键。因此,为保证车辆不陷入局部路径规划中的极小值点,引入一个由 $\theta$ 角(限定 $\theta > \theta_0$ )与 $S(M, M_g)$ 共同控制的附加力 $F_{add}(M)$ :

$$F_{add}(M) = k \cdot S(M, M_g) \cos \theta. \quad (9)$$

式中: $k$ 为大于0的附加力增益系数,其取值大小对规划的局部路径长短有影响。

显然,由式(9)可见,即使实验车无限小距离接近目标点,以及雷达探测角 $\theta_0$ 为0时,附加力也将始终不为0,故既可保证有效避开障碍物,又可在到达目标点处时衰减为0。

由此,实验车在改进人工势场中所受的合力可由式(7)改写为

$$F = F_{att} + \sum_{i=1}^n F_{repi} + F_{add}. \quad (10)$$

## 2 算法设计与评价

### 2.1 算法设计

改进人工势场法算法流程如图4所示。当实验车接收到来自前方障碍物信息后,开始计算每个障碍物与车辆初始位置连线和 $X$ 轴夹角;然后计算出各个分力并正交分解于 $X$ 轴、 $Y$ 轴;最后矢量相加求得合力。通过合力来确定实验车辆的下一位置,并时刻监控在规定时间内能否到达目标

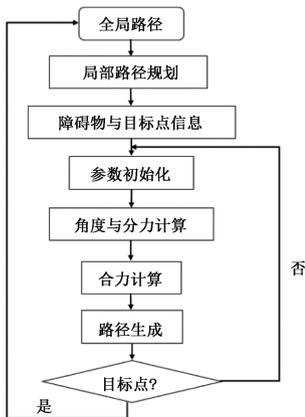


图4 改进人工势场算法流程

Figure 4 Algorithm flow chart of improved artificial potential field

点并回到全局路径中;若到达,则局部路径规划成功;若不能到达目标点,则更新障碍物位置进一步规划。

### 2.2 价值评价

为验证改进人工势场的优劣性,可从时效性 $T_s$ 与安全性 $Q_s$ 两方面进行评价。

(1)时效性。设单位步长为 $\Delta d$ ,实验车到目标点的局部路径规划长度为 $L$ ,可算出总步数 $n$ (圆整),则时效性为

$$T_s = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (11)$$

式中: $T_i$ 为单步计算时长。

时效性由单步计算时长与局部规划路径长度所决定,规划路径越短,单步时长越短,即时效性越好。

(2)安全性。设局部规划路径至障碍物最小碰撞安全距离为 $S$ ,规划路径中出现极小值点的次数为 $K$ ,安全性指标为

$$Q_s = h \frac{S}{K + 1}. \quad (12)$$

式中: $h$ 为安全系数,为大于或等于1的任意数。

对于某一局部规划路径,其安全性由极小值点出现的次数与最小碰撞安全距离决定,极小值点次数出现越少,则安全性越好。

## 3 仿真分析

### 3.1 附加力引入的影响

图5为用附加力增益系数表达的不同大小的附加力作用下的规划路径结果,表1为时效性和安全性评价结果。从图5可见,所有规划路径均能越过局部极小值点,但附加力的大小对最小碰撞安全距离大小的影响不同,从表1也可见引入附加力后的所有路径规划均未出现极小值问题。

当附加力增益系数较小时(如 $k=1$ ),规划路径几乎紧贴障碍物边缘而越过,其安全性指标过低,即碰撞安全距离过小,实际行车过程中仍存在避障失败的可能;当附加力增益系数过大时(如 $k=10$ ),规划路径能可靠越过障碍物,但碰撞安全距离明显过大(安全性指标值最大),且规划路径步数较附加力增益系数为5时增加4.3%,时效性也增加了8.3%。

从图5(b)可见,当附加力增益系数取值分别为5、6和7时的3条规划路径基本上处于相互重

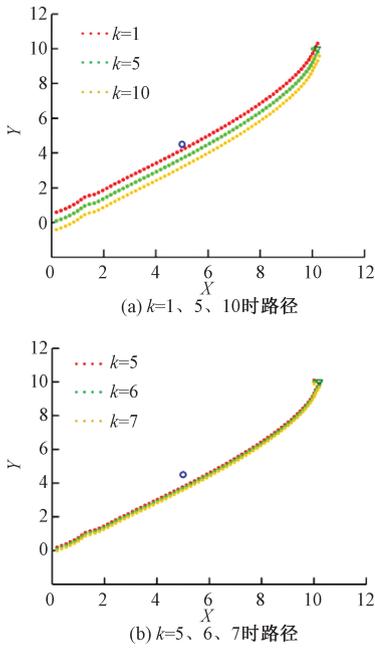


图 5 不同附加力增益系数下的路径

Figure 5 Paths with different additional force gain coefficients

表 1 不同附加力系数下的时效性与安全性价值评价表

Table 1 Valuation table of timeliness and security for different additional force coefficients

附加力增益系数 $k$	步数	时效性/s	极小值点数量	最小碰撞安全距离	安全性指标
1	68	0.24	0	0.05	0.075
5	69	0.24	0	0.20	0.300
6	69	0.24	0	0.21	0.305
7	70	0.24	0	0.22	0.330
10	72	0.26	0	0.25	0.375

合的状态,它们的碰撞安全距离和安全性指标也都十分接近,表明在该区间内规划路径具有较好的一致性,也说明采用附加力改进的人工势场规划算法具有较好的结果稳定性和可靠性。

### 3.2 距离调节因子引入的影响

图 6(a)为改进人工势场下障碍物对实验车产生的斥力变化仿真曲线, $Z$ 轴表示无量纲斥力。图 6(b)为将斥力峰值坐标投影在  $XOZ$  平面内的斥力峰值曲线图。

定义实验车初始位置与目标点连线为中轴线,从图 6 可见,中轴线上不同位置障碍物产生的斥力峰值随其与实验车初始位置间的距离变化而变化:当障碍物距实验车较近时(如在实验车起始位置附近),斥力峰值很大;而当障碍物逐渐远离实验车时,斥力峰值则呈迅速下降的趋势,并在目标点附近所受斥力衰减为 0,确保了实验车目标可达。万方数据

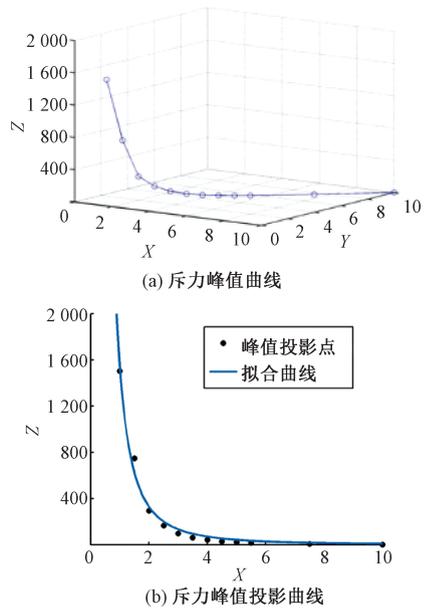


图 6 改进人工势场斥力仿真曲线

Figure 6 Repulsion change simulation curve of improved artificial potential field

### 3.3 路径规划的价值评价

图 7 为引力增益系数为 12,斥力增益系数为 3,附加力增益系数为 6,单位步长为 0.2,障碍物数目为 7,安全系数为 1.5 的仿真参数条件下,传统人工势场法与改进人工势场法的仿真规划路径算例。为保证传统人工势场可以获得完整路径,在出现局部极小值点时采用自动延续步长处理。

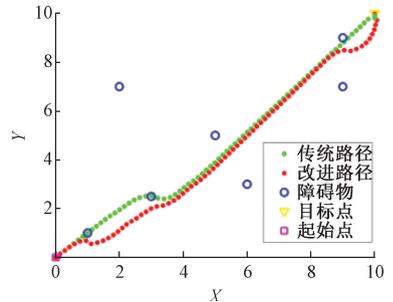


图 7 局部路径规划

Figure 7 Local path planning

从图 7 可见,传统人工势场规划算法在出现局部极小值点或障碍物距离目标点过近时,不能避障,并可能会出现局部震荡,而改进人工势场规划的路径,能成功越过障碍物,并可完全规避路径规划中极小值点的出现。

表 2 为传统及改进人工势场两种规划算法的价值评价结果。由表 2 可见,改进算法的单步计算时长略有增加,但由于所规划的路径不存在震荡区间,其计算时效性与传统人工算法的基本一致。同时,改进人工势场规划路径的最小碰撞安全距离远大于传统人工势场规划,因此其安全性

得以大大提高。

表2 时效性与安全性价值评价表

Table 2 Valuation table of timeliness and security

算法	步数	时效性/s	最小极值点数量	最小碰撞安全距离	安全性指标
传统势场	76	0.26	3	0.05	0.018 8
改进势场	72	0.26	0	0.21	0.305 0

## 4 结论

引入斥力调节因子和附加力对传统人工势场加以改进的局部路径规划算法,解决了存在的局部极小值和目标不可达两个问题。

(1)引入  $S(M, M_g)$  调节因子的改进人工势场规划算法可以显著降低斥力在目标点附近的影响,改进后的斥力峰值具有随障碍物与局部路径规划起始点的增加而呈现出指数级减小的规律,斥力在目标点附近衰减为0,确保实验车实现目标可达。

(2)引入  $k \cdot S(M, M_g)$  增益量的附加力可改变局部极小值点处的合力大小与方向,能完全避免出现局部极小值点,使实验车按规划路径行驶越障过程中能与障碍物间保持合适的碰撞安全距离。

(3)采用距离调节因子与附加力耦合改进的人工势场算法的局部路径与传统路径时效性均为0.26 s,安全指标由传统人工势场法的0.018 8增大至0.305 0,可显著提高局部路径规划的安全性。

## 参考文献:

[1] 陈禹.智能汽车局部路径规划方法现状与发展分析[J].科技与创新,2020(14):60-61,66.  
 [2] 袁师召,李军.无人驾驶汽车路径规划研究综述[J].汽车工程师,2019(5):11-13,25.  
 [3] LAZAROWSKA A. Multi-criteria trajectory base path planning algorithm for a moving object in a dynamic environment[C]//2017 IEEE International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA).Piscataway:IEEE,2017:79-83.

[4] 闫守柱,薛青,罗佳,等.基于免疫遗传算法的轮式装甲车辆 CGF 路径规划研究[J].四川兵工学报,2014,35(10):25-28.  
 [5] 康冰,王曦辉,刘富.基于改进蚁群算法的搜索机器人路径规划[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(4):1062-1068.  
 [6] 高岳林,武少华.基于自适应粒子群算法的机器人路径规划[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(4):46-51.  
 [7] KHATIB O.Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J].The international journal of robotics research,1986,5(1):90-98.  
 [8] WANG D Y,WANG P,ZHANG X T,et al.An obstacle avoidance strategy for the wave glider based on the improved artificial potential field and collision prediction model [J]. Ocean engineering, 2020, 206:107356.  
 [9] FEDELE G,D'ALFONSO L,CHIARAVALLOTI F,et al.Obstacles avoidance based on switching potential functions[J].Journal of intelligent & robotic systems, 2018,90(3/4):387-405.  
 [10] ROSTAMI S M H,SANGAIAH A K,WANG J,et al.Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm[J].EURASIP journal on wireless communications and networking, 2019, 2019(1):1-19.  
 [11] RAHEEM F A,BADR M M. Development of modified path planning algorithm using artificial potential field (APF) based on PSO for factors optimization [J]. American scientific research journal for engineering, technology, and sciences, 2017, 37(1):316-328.  
 [12] 郭泉鹏.基于改进人工势场法的路径规划算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
 [13] 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.  
 [14] 宣仁虎.基于改进 A\* 算法和人工势场法智能小车路径规划研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.  
 [15] 刘志强,朱伟达,倪婕,等.基于新型人工势场法的车辆避障路径规划研究方法[J].科学技术与工程,2017,17(16):310-315.

(下转第 55 页)

## A VNF-aware Virtualization Layer Constructing Algorithm Based on Adjustable Hop Count

MA Ding<sup>1,2</sup>, FEI Xuan<sup>1</sup>, MU Xiaowu<sup>2</sup>

(1.School of Artificial Intelligence and Big Data, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2.School of Mathematics and Statistics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In network function virtualization environment, topology abstractions are crucial to create unified topology view and conceal underlying details. To map service function chain effectively, a VNF-aware virtualization layer constructing algorithm based on adjustable hop count is proposed considering network topology abstraction. Firstly, virtual nodes mapping is implemented via analyzing the virtual network functions required in service function chain request. Secondly, virtual links mapping is implemented via proposed non-redundant link mapping method with adjustable hop count. To evaluate the performance under different hop count, the layered graph algorithm is used as the service function chain mapping algorithm which is executed over the constructed virtualization layer. The experimental results show that: when the value of hop count equals 3, compared to the situation in which the value of hop count equals 2, the overall performance is improved significantly; when the value of hop count increased to 4 and 5, compared to the situation in which the value of hop count equals 3, the cost of constructing virtualization layer increases by 27% and 52%, respectively. However, the overall performance improves slightly. Finally, simulation experiments show that the proposed algorithm can effectively map service function chain requests and determine the optimal virtualization layer in terms of performance and cost for the specific physical network.

**Key words:** network function virtualization; virtual network function; virtualization layer; service function chain; hop constraint

(上接第 36 页)

## Research on Improved Local Path Planning of Artificial Potential Field Based on Active Safety

ZHANG Sanchuan, MING Zhu

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Local path planning is the key to the active safety of intelligent driving vehicles. In order to solve the theoretical problems of local minimum and unreachable target existing in the traditional artificial potential field method, in this paper the distance between the experimental vehicle and the obstacle is introduced as the repulsive force regulator based on the measurement function of the azimuth ( $\theta_0$ ) of the obstacle by millimeter-wave radar, which makes sure that the repulsive forces near the target point are not too large. At the same time, the additional force of target gravity is introduced with direction angle  $\theta (>\theta_0)$  and controlled by target distance  $k \cdot S(M, M_g)$ , which makes experimental vehicle break away from the minimum point. The numerical simulation results of MATLAB show that: when the gain coefficient of the additional force ( $k$ ) is between 5~7, a stable and safe local planning path can be obtained, and no minimum point appears. The variation of the peak value of repulsive force and resultant force in the improved artificial potential field decreases exponentially with the increase of the distance between the obstacle and the starting point of path planning, the repulsive force of the experimental vehicle near the target point attenuates to 0, and the target is reachable; Compared with the traditional artificial potential field, the single-step calculation time is slightly increased, but there is no oscillation interval for the planned path. The simulation time is 0.26 s, and the timelessness is basically the same. The safety index is increased from 0.018 8 of the traditional artificial potential field method to 0.305 0, which greatly improves the safety of local path planning.

**Key words:** intelligent network vehicle; local path planning; improved artificial potential field; local minimum; additional force