

基于路径预测人工势场法的自动跟随小车路径规划

张化锴¹, 张曦文², 王清礼²

(1. 中汽动力(沈阳)有限公司, 沈阳 110153; 2. 辽宁省实验中学, 沈阳 110841)

摘要: 针对自动跟随小车实际工作环境下目标点和障碍物具有可移动特征, 在传统人工势场法的基础上提出一种具有动态路径预测功能的路径规划方法; 通过实时采集和计算小车、目标点和障碍物的距离、运动速度和方向, 预测未来三者之间可能的位置关系; 根据目标点预测结果采用人工势场法确定接近目标点路径, 根据预测的障碍点运行轨迹确定绕过障碍点的路径; 将基于路径预测人工势场法与传统人工势场法进行仿真对比, 结果表明该方法在跟随效率和避障能力上具有显著的提高。

关键词: 自动跟随; 人工势场法; 路径规划; 路径预测

Path Planning Based on Path Prediction Artificial Potential Field Method for Automatic Following Trolley

Zhang Huakai¹, Zhang Xiwen², Wang Qingli²

(1. Center of Gas Engine (Shenyang) Co., Ltd., Shenyang 110153, China;

2. Liaoning Province Shiyan High School, Shenyang 110841, China)

Abstract: Aiming at the movable characteristics of the target and obstacles in the working environment of the automatic following trolley, a path planning method with dynamic prediction is proposed based on the traditional artificial potential field method. The position relationship between the trolley, target and obstacles is predicted through the real-time acquisition and calculate of distance, velocity and direction. According to the prediction target position, the path to the target is determined by using the artificial potential field method and according to the prediction of the obstacle path, the bypass path is determined. The path prediction artificial potential field method is compared with the traditional artificial potential field method. The results show that this method has significant improvement in following efficiency and avoid obstacle ability.

Keywords: automatic following; artificial potential field method; path planning; path prediction

0 引言

近年来, 随着人工智能技术的快速发展, 自动跟随车逐步进入人们的视野, 具有自动跟随功能的行李箱、高尔夫球包车等已进入商业化使用中。路径规划和避障是目前研究的重点, 自动跟随小车在未知环境中找到一条最优的无碰路径, 相对其它路径可以减少能量损耗、提高跟随速度。

路径规划是指基于传感器等设备感知行驶遇到的障碍物和动态目标, 在满足动力学、运动学约束和稳定性等条件下实时地为规划出从出发点 to 目标终点的最优路径。目前常用的路径规划方法包括神经网络、模糊控制、遗传算法和人工势场法等^[1]。其中, 人工势场法属于局部规划方法, 无需对全局进行搜索, 计算量小, 执行效率高, 适合实时性要求较高的路径规划, 且用该算法规划的路径具有较平滑的特点。

传统的人工势场法具有目标不可达和局部最小点的问题^[2], 文献 [3] 通过在斥力势场函数中加入目标点与被控对象之间的距离作为引入调节因子来解决目标不可达问题; 文献 [4] 通过对人工势场法的引力公式和斥力分力方向进

行重新定义, 在引力公式中加入速度差与加速度差因子, 将斥力分力方向重新定义为与引力方向夹角不大于 90° 的方向解决局部最小点问题。

以上研究均针对静态目标和障碍进行, 文献 [5] 和文献 [6] 虽然对动态目标和障碍点进行了路径规划的研究, 但研究内容主要集中在提高避障效率和运动的平稳性方面。本文提出的基于路径预测的人工势场法根据小车、障碍物和目标点的运动轨迹预测未来三者之间可能的位置关系, 并根据预测结果确定行走路径的方法可提供优化的跟随路径并提高了避障能力。本文组织如下: 第一节介绍传统人工势场法的基本原理, 提出了路径预测人工势场法的模型。第二节给出了小车与控制系统相关的部件参数, 并运用 MATLAB 将本文提出的控制模型与传统的人工势场法进行仿真对比。第三节是结论部分。

1 基于路径预测的人工势场法模型

1.1 人工势场法

人工势场法路径规划最初是由 khatib 于 1986 年提出的一种虚拟力法并将其引入到路径规划领域, 基本思想是将机器人运动空间环境视为一个虚拟的势场模型, 目标点对机器人产生引力势场, 障碍物对机器人产生斥力势场, 机器人在引力势场和斥力势场的合力作用下向目标点运动。机器人每行走到一个位置就去计算当前位置机器人所受的

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-07。

作者简介: 张化锴(1972-), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事混合动力汽车动力系统及汽车电子方向的研究。

合力大小以及合力的方向, 通过边行走边去探测周围的环境信息, 避开全部障碍物并最终达到目标点^[7]。

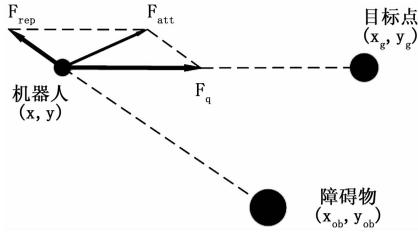


图 1 人工势场法受力模型

如图 1 所示, 将目标点、障碍物和机器人简化为质点, 机器人同时受到来自目标点的引力 F_{att} 和来自一个或多个障碍物的斥力 F_{rep} , 其中引力场和斥力场分别为:

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_{att} \rho_g^2 \quad (1)$$

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

式中, k_{att} 为引力增益系数; ρ_g 为机器人与目标点距离; k_{rep} 为斥力增益系数; ρ_{ob} 为机器人与障碍物的距离; ρ_0 为障碍物的斥力影响范围。根据人工势场法的定义, 引力场随着机器人与目标点距离的增大而增大, 斥力场随机器人与障碍物距离的增大而减小, 且当障碍物与机器人距离大于 ρ_0 后, 斥力场消失。其主要目的是为了当空间中存在多个障碍物时, 去除远距离障碍物的影响, 从而简化计算。机器人所受引力和斥力函数分别为:

$$F_{att} = -\nabla U_{att} = -k_{att} \rho_g \nabla \rho_g \quad (3)$$

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho_{ob}} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho_{ob}^2} \nabla \rho_{ob}, & \rho_{ob} > \rho_0 \\ 0, & \rho_{ob} \leq \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, ∇U_{att} 为引力场负梯度; ∇U_{rep} 为斥力场负梯度; $\nabla \rho_g$ 为机器人指向目标点方向的单位向量, ρ_{ob} 为机器人指向障碍物方向的单位向量。

人工势场法将机器人路径规划等效成目标点和障碍物对机器人的引力和斥力, 使路径平滑, 避免了机器人行进过程中速度和角度的剧烈变化, 人工势场法成为机器人路径规划的主要方法之一。

但传统的人工势场法存在陷阱区域、在密集多障碍物点中无法有效确定路径、机器人在障碍点前振荡等问题, 甚至会出现在障碍物附近目标不可达问题。经过改进的人工势场法解决了静态环境下目标不可达和局部极小值的问题^[5], 但 these 方法对动态目标点和障碍物的路径规划还不完善。

1.2 移动目标点和移动障碍物的影响

人工势场法对静态目标点和障碍物的环境具有良好的路径规划效果, 而自动跟随小车具有目标点和障碍物移动的特点, 如图 2 所示目标点进行匀速直线运动时, 采用传统人工势场法虽然可实现到达目标点附近的功能, 但其规划的路径为一段弧线, 而最优路径应为自动跟随小车初始

坐标与相遇点坐标的直线连接线, 传统人工势场法规划的路径显然长于最优的路径; 而图 3 所示障碍物进行运动时, 自动跟随小车由于受到障碍物斥力的作用, 运动路径发生了明显的变化, 在这种情况下采用传统人工势场法规划的路径并非最优路径, 且存在目标不可达的可能。

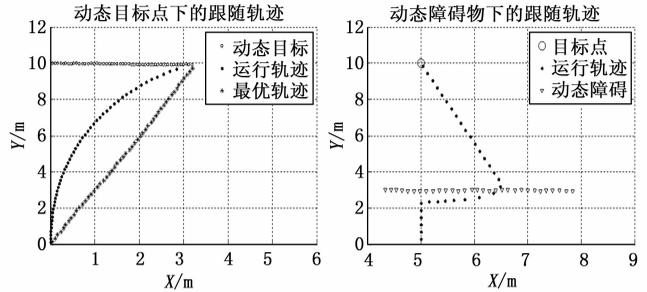


图 2 移动目标下运动轨迹

图 3 移动障碍物下运动轨迹

图 2 和图 3 分别为目标点水平移动和障碍物水平移动情况下采用传统人工势场法自动跟随小车的运动轨迹, 目标点和障碍物运动速度取值为自动跟随小车运动速度的 1/2, $k_{att}=15$, $k_{rep}=5$, $\rho_0=3.5$ 。

1.3 基于路径预测的人工势场法

自动跟随小车中目标点为自动跟随小车主人的, 移动障碍物一般为行人, 很多关于行人路径预测的研究表明当行人在行走时, 都有一个初步的目的地。他们在行走过程中, 根据当时的环境选择不同路线到达目的区域^[8]。虽然行走路线并非是一成不变, 但一般情况下, 一段时间内行人速度和方向不会出现大的变化。

本文提出的基于路径预测的路径规划方法基本思想是: 根据目标点、障碍点及自动跟随小车之间的位置坐标和相对运行速度, 提前计算出抵达目标点或进入障碍点斥力场范围内时三者之间的位置关系, 并根据这一关系实时修正自动跟随小车的路径, 达到以近似最优路径躲避障碍、快速抵达目标点的控制目标。

对于目标点移动的情况, 自动跟随小车的路径规划较为简单, 只需根据目标点和自动跟随小车之间的距离、运动速度和方向预测出二者相遇时相遇点的坐标, 并以该坐标为自动跟随小车行进的目标点, 应用传统人工势场法进行路径规划, 如图 2 (a) 所示。

对于移动障碍物的路径规划较为复杂, 文献 [6] 提出增加以障碍点、机器人的移动速度变量, 将机器人到目标点的相对距离建模于排斥势场中对斥力场进行修正的方法。这个方法在避免了局部极小值, 解决了目标点不可达的问题。但该方法计算较为复杂, 难以实现实时的路径规划, 且规划路径与最优路径相比差距较大。基于路径预测的路径规划方法躲避障碍点的实现过程如下:

在直角坐标系第一象限中设定目标点坐标 (x_d, y_d) 和自动跟随小车初始坐标 (x_r, y_r) , 且 $y_r < y_d$, 障碍点 (x_a, y_a) 斥力场随障碍点的移动而移动, x_a 随时间增大。当小车到达斥力场范围内后, 若小车所受斥力与引力的合力方向与 x 轴夹角始终大于障碍点运动方向与 x 轴夹角,

则沿用传统人工势场法, 若不满足这一条件, 采用下述方法规划路径:

若满足公式 (5), 则自动跟随小车自点 $R(t_0)$ 开始沿障碍点斥力场边界右侧切线方向运动; 否则, 小车沿障碍点斥力场边界左侧切线方向运动, 直至小车所受全部斥力 (其他障碍点) 与引力的合力方向与 x 轴夹角大于障碍点运动方向与 x 轴夹角后, 再沿用传统人工势场法。

$$\frac{\theta(V_r + \bar{V}_a)}{(\pi - \theta)(V_r + \bar{V}_a)} \leq 1 \quad (5)$$

式中, θ 为自动跟随小车运行至斥力场边界时, 障碍点运行轨迹与自动跟随小车和障碍点连线之间的夹角, V_r 为小车运行速度, \bar{V}_a 为障碍点运行的平均速度。

由于实时求取全部障碍点斥力场边界切线方程的计算量较大, 公式 (5) 通过障碍点运行速度、自动跟随小车运行速度及二者运行方向的夹角近似计算左侧路径和右侧路径的长度, 从而进行路径的选择, 如图 4 (a) 所示, 当自动跟随小车运行至 $R(t_0)$ 时所选择的路径示意, $R(t_0) - L$ 为左侧路径, $R(t_0) - R$ 为右侧路径。图 4 (b) 所示为左侧绕过路径, 其中圆 C_0, C_1, C_2, C_3 的圆心为相邻的 4 个时刻障碍点位置, 圆周代表斥力场的边界, $C_0 - C_n$ 为障碍点运行的方向。 t_0 时刻, 自动跟随小车首先以 $R(t_0)$ 为起点, 沿 C_0 左侧切线方向行进至 $R(t_1)$; t_1 时刻, 自动跟随小车以 $R(t_1)$ 为起点, 沿 C_1 左侧切线方向行进至 $R(t_2)$; t_2 时刻, 自动跟随小车以 $R(t_2)$ 为起点, 沿 C_2 左侧切线方向行进至 $R(t_3)$; t_3 时刻, 自动跟随小车以 $R(t_3)$ 为起点, 沿 C_3 左侧切线方向行进至 $R(t_4)$, 此时点 $R(t_4)$ 满足切换为传统人工势场法的条件, 采用传统人工势场法继续向目标点 D 行进。图 4 (c) 所示为自动跟随小车右侧绕行的路径示意, 运行轨迹的规划方法参照自动跟随小车左侧绕行的路径规划。

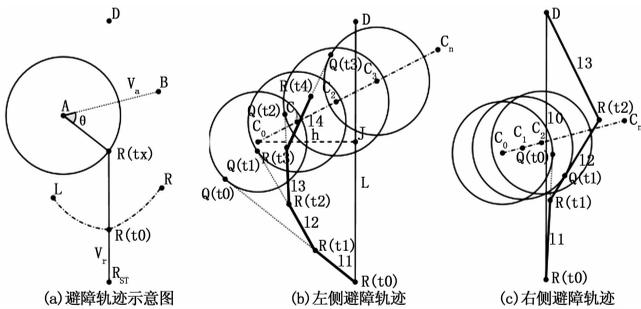


图 4 避障轨迹

自动跟随小车对于动态障碍点的避让, 小车始终处于斥力场边界外侧, 保证较短路径的前提下不发生碰撞。

在大障碍物的情况下, 只需以障碍物边界点为障碍点, 以全部障碍点斥力场边界的包络线为障碍点斥力场边界进行计算即可。在多障碍点的情况下, 可认为稀疏多障碍点对自动跟随小车路径规划的影响为单个障碍点对自动跟随小车路径规划的简单叠加; 密集多障碍点会对路径预测产生较大的影响, 实时预测每一个障碍点在每一时刻的坐标

的计算量非常大, 对于一般的嵌入式系统难以满足计算的要求, 因此, 在密集多障碍点的情况下, 必须对多障碍点的计算进行简化, 简化方法为: 各有效障碍点对自动跟随小车与目标点连线做垂线, 选取垂足距离自动跟随小车最近且垂线长度满足可能发生碰撞的条件时, 以该障碍点为唯一障碍点, 沿用上文所述的单个障碍点避障方法, 如不满足碰撞条件, 则定义该障碍点为无效障碍点, 并沿自动跟随小车与目标点连线选取下一个障碍点进行计算, 直至找到满足条件的障碍点为止。

2 仿真实验

2.1 自动跟随小车主要参数及性能指标

表 1 小车主要参数

	参数名称	数值
书包车参数	整车质量(kg)	15
	满载质量(kg)	35
	摩擦阻力系数	0.015
	车轮半径(m)	0.3
	轮距	0.35
	主减速比	1
减速电机	额定功率(kw)	1
	峰值功率(kw)	1.8
	额定转速(rpm)	150
	额定转矩(Nm)	63
动力电池	峰值转矩(Nm)	113
	额定容量(Wh)	240
	额定电压(V)	24
	最大充电倍率(C)	3
	最大放电倍率(C)	4

以上参数的选取可满足的性能指标指标如表 2。

表 2 整车性能指标

性能参数	指标
最高车速(km/h)	17
0-10km/h 加速时间(S)	5.2
5km/h 时速最大爬坡度	14%
综合工况续航里程(km)	170

2.2 仿真对比

根据自动跟随小车参数及目标点、障碍点的特征, 仿真参数设定如表 3 所示。

表 3 仿真设定参数

仿真参数	数值
小车最大速度 V_{Rmax} (m/s)	4
目标点最大速度 V_{Dmax} (m/s)	2
障碍点最大速度 V_{Omax} (m/s)	2
引力场作用半径 R_a (m)	1
斥力场作用半径 R_r (m)	0.7
引力场增益系数 K	15
斥力场增益系数 M	5

在实际应用中,受到自动跟随小车、驱动电机、动力电池等特性的限制,自动跟随小车速存在上限,因此表 3 中增加定义了引力场作用半径,具体含义为:当目标点与自动跟随小车距离大于引力场作用半径时,自动跟随小车所受引力为一定值,运行速度为自动跟随小车最大速度 V_{Rmax} ,当目标点与自动跟随小车距离小于引力场作用半径时,自动跟随小车运行速度符合传统人工势场法定义。

动态目标点情况下自动跟随小车运行参照图 2 所示,自动跟随小车每运动一步后,根据自动跟随小车与目标点之间的距离和速度对相遇点坐标进行一次计算,并根据相遇点坐标和自动跟随小车运行速度确定下一步的运行方向。

动态障碍点下,自动跟随小车的运行轨迹规划较为复杂,本文的仿真工作主要围绕动态障碍点进行。

图 5 表示障碍点移动过程中采取路径预测的人工势场法与传统人工势场法自动跟随小车路径的比较,仿真中设定障碍点运行速度为 1~2 m/s 间的随机数据,障碍点运行方向与 X 轴夹角为 $0\sim\pi/3$ 间的随机数据。图 5 (a) 为障碍点初始坐标 (4.2, 3) 时自动跟随小车运行轨迹,图 5 (b) 所示为障碍点初始坐标为 (4.1, 3) 时自动跟随小车运行轨迹。采用本文提出的路径预测人工势场法时,由于提前预测障碍点运行轨迹及自动跟随小车与障碍点发生碰撞的坐标,自动跟随小车采取提前避让的方式,并根据公式 (5) 和本文提到的避让方法确定避让路径。图 5 中可以看到,采取路径预测人工势场法的自动跟随小车明显提前于传统人工势场法的自动跟随小车到达目标点。

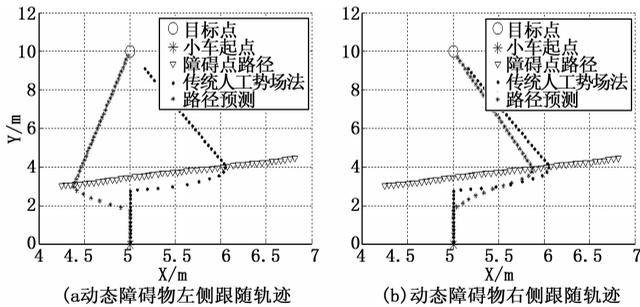


图 5 两种方法路径比较

为了能够更加清晰的表明路径预测人工势场法的工作过程,图 6 将整个避让和接近目标点的过程分为六个关键点,图 6 (1) 为采用路径预测人工势场法的的自动跟随小车预测到发生碰撞后,开始向左前方沿障碍点斥力场边界切线运动;图 6 (2) 为传统人工势场法进入斥力场后,受斥力场和引力场的合力作用,路径开始向右侧偏移;图 6 (3) 为路径预测人工势场法的自动跟随小车从障碍点左侧绕过障碍点后,只受目标点作用力,开始向目标点直线运动,而此时采用传统人工势场法的自动跟随小车仍未绕过障碍点;图 6 (4) 为采用传统人工势场法的自动跟随小车绕过障碍点时障碍点及自动跟随小车的位置;图 6 (5) 为自动跟随小车远离障碍点,向目标点移动;图 6 (6) 为采

用路径预测人工势场法的自动跟随小车抵达目标点附近而采用传统人工势场法的自动跟随小车与目标点仍有一定距离。

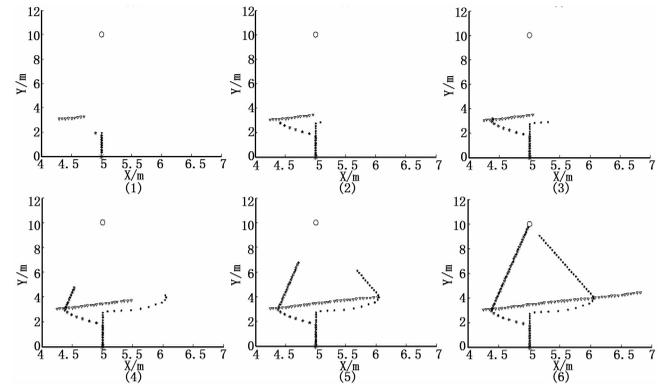


图 6 左侧避障轨迹分时示意图

3 结论

针对传统人工势场法在动态目标点和动态障碍点环境下路径规划不完善的问题,提出了基于路径预测的人工势场法,根据预先预测的目标点和障碍物的运行轨迹确定跟随路径,尤其是在动态障碍点的环境下,提出了采用沿斥力场左右边界运动的方法,并给出了选择左侧或右侧切线运动的公式。

结合某自动跟随小车的实际参数,与传统人工势场法进行仿真对比,结果显示采用基于路径预测的人工势场法的自动跟随小车行走路径在具备传统人工势场法计算简单、路径平滑等特点的基础上,跟随目标点及避障能力显著提高,避让路径长度比传统人工势场法减少 10% 以上。

下一步主要还需完成自动跟随小车跟随试验、密集多障碍点及大障碍物避让策略的仿真验证及试验等。

参考文献:

[1] 张广林, 胡小梅, 等. 路径规划算法及其应用综述 [J]. 现代机械, 2011, 5: 85-89.
 [2] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述 [J]. 控制与决策, 2010; 25 (7): 961-965.
 [3] 杨一波, 王朝立. 基于改进的人工势场法的机器人避障控制及其 MATLAB 实现 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35 (5): 496-500.
 [4] 崔宝侠, 宋佳瑞. 未知环境下机器人避障及动态目标追踪 [J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39 (12): 1-7.
 [5] 魏 唯, 欧阳丹彤, 等. 动态不确定环境下多目标路径规划方法 [J]. 计算机学报, 2011, 34 (5): 836-846.
 [6] 周可璞, 许 烁, 朱小生. 基于改进人工势场法的动态环境运动规划 [J]. 计量与测试技术, 2017, 44 (4): 27-29.
 [7] 张殿富, 刘 福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望 [J]. 计算机工程与科学, 2013, 35 (6): 88-94.
 [8] 任治国, 盖文静, 等. 面向动态场景视频的虚拟行人路径规划 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25 (4): 433-441.