基于优化的路径规划算法综述

1. 研究背景

⽆⼈驾驶汽⻋的路径规划算法已发展多年，为应对各种场景和问题，诞⽣了多种规划算法。路径规划的核心就是算法的设计，不同算法特点不同，适用范围和领域也就不同。

1. 研究现状

1 TEB

经典的elastic band算法,主要思想是通过将最初给定的路径视为受到内部力和外部力的弹性橡胶带而使其变形，所述内部力和外部力在试图收缩路径同时保持与障碍物的距离时彼此平衡,从而使由全局规划器生成的路径相对于最短路径长度变形，同时避免与障碍物接触，但是它不直接考虑任何动态约束。于是Christoph Rösmann[1]等人提出了新的方法“time elastic band”,由一系列路径点组成的初始路径转换成具有对时间的显式依赖性的轨迹，该方法明确考虑到了时间方面的动态约束。之后提出了一种新的更通用的TEB[2]方法应用于Car-Like Robots,其中包括支持运动反转和通用障碍表示，将时间信息直接纳入到优化问题中，从而考虑到运动力学约束下的过渡时间最小化，在有障碍物的环境中不能保证轨迹的全局最优性但在任何情况下都是局部最优。

Pablo Marin-Plaza[3]等人在Ackermann模型上对基于time elastic band 的路径规划方法进行集成和性能分析，并证明与导航相关的各个模块能够共存，协同工作，无碰撞地到达目标点。

Justin S. Smith[4]等人提出了一种egoTEB算法，该算法主要是将局部规划表示从以世界为中心修改为以自我为中心的感知空间表示，通过利用传感器测量的信息来提高效率和导航性能，在一定程度上缓解了局部环境数据结构与优化数据结构的不匹配问题，减少了规划时间，但仅仅是在模拟环境中验证了可行性。

Jiayi Wang[5]等人提出了一种改进的两步TEB算法，该方法将路径决策和速度决策分为两个阶段，可以优化滚动时域窗口中的局部路径，在保证路径平滑性的同时减少了运行时间。

Lingli Yu [6]等人提出了一种Narrow-Road-Timed-Elastic-Band(NRTEB)算法，针对速度规划结果不平滑、窄路倒车规划有缺陷、当障碍物落在局部目标上时，规划失败这些问题重新构建了TEB算法的内部和外部工作流程，该方法实现了狭窄道路上的安全倒车规划，同时与原方法相比，轨迹的冲击度降低了72.11%，在向前和向后导航时，能够安全、平滑地实时避开动态障碍物。

2 QP

二次规划(QP, Quadratic Programming)定义为目标函数为二次函数，约束条件为线性约束，属于最简单的一种非线性规划。

在[7]中处理紧急避障问题时，提出了基于势场的曲线拟合方法，将回旋曲线转换成二次规划形式，解决了在clothoidal约束下障碍物存在时的振荡问题。

在[8]中将轨迹生成作为一个二次规划优化问题，目标函数为轨迹的四阶多项式，约束为无障碍通道，使收敛更快，规划效率提高。

在[9]中采用二次规划方法根据不同驾驶条件找到最优候选点，然后用五次样条曲线连接车辆初始位置和候选点并生成最优路径，能够适应各种类型的道路场景。

在[10]中将整体的路径规划变成一个二次规划问题，同时采用两步路径优化的方法来生成一个实时平滑路径同时确保路径曲率的可行性。[12]中利用二次规划的方法连接两个相邻路径片段,而不是简单的连接，使路径更加平滑。

3 SQP

SQP利用目标函数和约束条件构造增广目标函数，借此将约束最优化问题转化为无约束最优化问题，是一种的求解最优化问题的间接方法，通常用于求解大规模非线性规划问题。

[11]中将遗传算法GA和序列二次规划SQP结合在一起，SQP弥补了GA运行速度慢，全局搜索效率低的缺点，使算法有较快的收敛速度，大大提高了计算效率。

[13]中首先使用二次规划(QP)计算参考线,然后使用参考线作为初始预测，使用序列二次规划(SQP)通过迭代优化来生成一个光滑可行的路径，在速度和加速度的流畅性上体现了优越性。

1. 比较与分析

优缺点分析：

①TEB:

优点：适用于各种常见车模，如差分、全向、阿克曼模型；有很强得前瞻性，对前方一段轨迹进行优化；对动态障碍有较好的避障效果。

缺点：计算复杂度较大；通过两状态之间得距离和角度差及时间差来计算该控制周期内得速度和角速度，使得在控制过程中速度和角度波动较大；非全局最优。

②QP：

优点：能够求解到最优解；用作路径的平滑处理。

缺点：只在代价函数为凸函数时能够收敛到最优解；

③SQP：

优点：收敛性好；计算效率高；边界搜索能力强。

缺点：由于二次规划子问题求解难以利用原问题的稀疏性、对称性等良好特性，规模扩大，计算量和存储量非常大，目前只适合中小规模问题。

1. 文献参考
2. Rösmann, C.; Feiten, W.; Wösch, T.; Hoffmann, F.; Bertram, T. Trajectory modiﬁcation considering dynamic constraints of autonomous robots. In Proceedings of the ROBOTIK 2012, 7th German Conference on Robotics, Munich, Germany, 21–22 May 2012; pp. 74–79.
3. Rösmann C, Hoffmann F, Bertram T. Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 5681-5686.
4. Marin-Plaza P, Hussein A, Martin D, et al. Global and local path planning study in a ROS-based research platform for autonomous vehicles[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018: 1-10.
5. Smith J S, Xu R, Vela P. egoteb: Egocentric, perception space navigation using timed-elastic-bands[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 2703-2709.
6. Wang J, Luo Y, Tan X. Path planning for automatic guided vehicles (AGVs) fusing MH-RRT with improved TEB[C]//Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, 10(12): 314.
7. Yu L, Wu H, Liu C, et al. An Optimization-Based Motion Planner for Car-like Logistics Robots on Narrow Roads[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8948.
8. Pengfei Lin;Jin Ho Yang;Ying Shuai Quan;Chung Choo Chung.Potential field-based path planning for emergency collision avoidance with a clothoid curve in waypoint tracking[J].Asian Journal of Control,2022,Vol.24(3): 1074-1087
9. Muhammad Awais Arshad;Jamal Ahmed;Hyochoong Bang.Quadrotor Path Planning and Polynomial Trajectory Generation Using Quadratic Programming for Indoor Environments[J].Drones,2023,Vol.7(122): 122
10. Haobin Jiang;Jian Pi;Aoxue Li;Chenhui Yin.Dynamic Local Path Planning for Intelligent Vehicles Based on Sampling Area Point Discrete and Quadratic Programming[J].IEEE Access,2022,Vol.10: 70279-70294
11. Yongkang Lu;Yuanqing Wu;Wenjian Zhong;Yanzhou Li;Meng Chen.Spatial Path Smoothing for Car-like Robots Using Corridor-Based Quadratic Optimization[J].Electronics,2023,Vol.12(819): 819
12. Y. Zhuang, C. Wang and H. Huang, "Path Planning for Unmanned Surface Vehicle based on genetic algorithm and sequential quadratic programming," 2020 Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 2020, pp. 3513-3518, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327234.
13. F. Ling, C. Du, J. Chen and Z. Yuan, "An Improved Geometrical Path Planning Algorithm for UAV in Irregular-obstacle Environment," 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2019, pp. 972-976, doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785442.
14. Y. Jiang, Z. Liu, D. Qian, H. Zuo, W. He and J. Wang, "Robust Online Path Planning for Autonomous Vehicle Using Sequential Quadratic Programming," 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Aachen, Germany, 2022, pp. 175-182, doi: 10.1109/IV51971.2022.9827017.