

安全平滑的改进时间弹性带轨迹规划算法

文郁, 黄江帅, 江涛[†], 苏晓杰

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 传统TEB(Time Elastic Band)算法在杂乱场景下规划易出现倒退、大转向等异常行为,造成加速度跳变,控制指令不平滑,机器人受到大冲击,不利于移动机器人轨迹跟踪. 本文提出了一种改进TEB算法,通过增加危险惩罚因子约束能规划更安全的运动轨迹、增加加速度跳变抑制约束减小运动中最大冲击、增加末端平滑约束减小末端冲击,实现目标点平滑、准确到达. 然后构建图优化问题,以机器人的位姿和时间间隔为节点,目标函数和约束函数为边,利用问题的稀疏性快速获得相应时刻点的控制量. 最后,通过基于机器人操作系统的大量对比仿真测试,以及真实差速机器人上的物理实验对提出的改进TEB算法进行性能验证. 结果表明改进TEB算法在复杂环境中能规划出更安全、平滑的轨迹,减小机器人所受冲击,实现移动机器人更合理的运动.

关键词: 时间弹性带算法; 加速度跳变抑制; 危险惩罚因子; 末端平滑; 移动机器人

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0068

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Safe and Smooth Improved Time Elastic Band Trajectory Planning Algorithm

WEN Yu, HUANG Jiang-shuai, JIANG Tao[†], SU Xiao-jie

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The traditional TEB algorithm is prone to abnormal behaviors such as backsliding and large steering in the messy scene planning, which causes acceleration jumps, unsmooth control commands, and large impacts on the robot, which is not conducive to the trajectory tracking of the mobile robot. This paper proposes an improved TEB algorithm, which can plan a safer motion trajectory by adding the hazard penalty factor constraint, reduce the maximum impact in motion by adding the acceleration jump suppression constraint, and reduce the end impact by adding the smooth ends constraint, so as to achieve the smooth and accurate arrival of the target point. Then construct a graph optimization problem, take the pose and time interval of the robot as the nodes, the objective function and the constraint function as the edges, and use the sparsity of the problem to quickly obtain the control amount at the corresponding time point. Finally, the performance of the proposed improved TEB algorithm is verified by a large number of comparison tests of robot operating system simulation and physical experiments of real differential robot planning algorithm. The results show that the improved TEB algorithm can plan safer and smoother trajectory in complex environment, reduce the impact of the robot, and realize more reasonable movement of the robot.

Keywords: Time Elastic Band algorithm; acceleration jump suppression; hazard penalty factor; smooth ends; mobile robots

0 引言

近年来,移动机器人已经成为自动化、计算机和人工智能等领域的研究热点,和传统的工业机器人相比,具有自主感知、决策和执行功能,在国防、工农业生产、抢险、服务等领域中都具备着人类所无法比拟的巨大优势^[1]. 在移动机器人自主导航的背景下,要求移动机器人在完成复杂任务的同时,还能实现在高度动态的环境中自主导航. 因此,目前移

动机器人面临的亟需解决的问题是开发普遍适用且高效安全的自主运动规划系统^[2]. 移动机器人既要具有全局规划能力,又要拥有处理局部动态障碍的能力,后者通常被近似等同于局部轨迹规划^[3]. 在实际环境中,尤其是人和机器人共存的复杂环境,移动机器人可以获取所处环境的大致地图信息,但是由于存在动态移动障碍物体,移动机器人难以获得所处环境的实时完整信息^[4]. Borenstein^[5]提出了基

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-04-26.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1312002).

[†]通讯作者. E-mail: jiangtao_1992@outlook.com.

于矢量场直方图的VFH算法,在障碍物密集环境或者狭窄通道中能找到局部较优的运动方向,但此方法没有考虑机器人的运动学模型、动力学和运动学等因素.在此基础上,Ulrich等^[6]充分考虑了上述因素,提出了改进的VFH+方法,使得移动机器人能够得到更平滑可靠的轨迹.此后,Ulrich等^[7]再次加入了前瞻性验证,提出了VFH*算法,使得移动机器人能够选择一个局部较优的运动方向.人工势场法^[8]利用能量场思想将目标点抽象为引力源,障碍物抽象为斥力源,考虑两者的共同作用得到机器人运动指令.尽管上述算法简单且易于实现,但是面对障碍物和嘈杂环境时,极易陷入局部解^[9].同时,上述算法均不能直接产生移动机器人运动避障时的最优速度,且没有考虑自身物理限制^[10].Simmons^[11]提出了曲率速度法(CVM),它将避障问题描述为速度空间带约束的优化问题,建立了包含速度、安全性和路径3个因素的优化目标函数.在CVM的基础上,Fox等^[12]提出了动态窗口法(DWA),根据当前速度和加速度以及机器人所受约束(物理约束、环境约束)建立一个速度预选窗口,再通过优化目标函数(航向角、障碍物距离和速率等)得到下一时刻的最优速度 (v, ω) ,得到的轨迹比较平滑,适合真实移动机器人的运行,但该方法并不适用于阿克曼转向几何约束的移动机器人^[13].

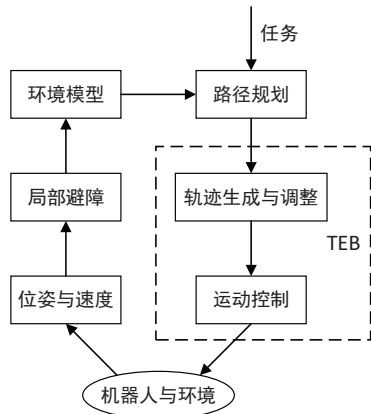


图1 应用TEB算法的机器人控制系统框图

基于以上研究,“弹性带”(Elastic bands,EB)^[14]方法可以根据障碍物的位置和形状使路径局部地变形,重规划全局路径。“弹性带”方法的主要思想是通过将一条最初给定的路径视为受到内力和外力而变形的弹性带,预定义的内力收缩路径,而外力使路径远离障碍物,内力和外力相互平衡,试图在与障碍物保持一定距离的同时收缩路径.之后EB方法被扩展到包含非完整运动学^[15-16]和具有多个自由度的机器人系统^[17].但是这些方法中均没有明确的将时间约束和动态约束结合起来.文献^[18]中提出了一种

利用优化技术使初始路径变形的方法,时间参数用于控制优化过程中路径的变形,但是轨迹(即沿路径的速度)未被优化.Rosmann等^[19]提出了“时间弹性带”(TEB)算法,该方法明确地增强“弹性带”与时间信息,从而允许考虑机器人的动态约束和直接修改轨迹,将传统的路径规划问题转化为一个图优化问题^[20],可以适用于完整约束和非完整约束的移动机器人,后来又扩充到了阿克曼机器人^[21].图1给出了应用TEB算法的移动机器人系统框图.

TEB算法通过产生一条起点到局部目标点的弹性带,可以在移动机器人运动受阻时通过倒退、转向等操作重新跟踪新的全局路径.但是在移动机器人倒退时,加速度会出现跳变,这会对移动机器人产生冲击,也导致了更长的运动时间和路径成本.同时移动机器人在到达目标点时会瞬间减速骤停,这可能会造成移动机器人冲过目标点而不能准确到达.针对以上问题,本文提出了改进时间弹性带的轨迹规划算法,增加了危险惩罚因子约束、加速度跳变抑制约束和末端平滑约束,使移动机器人在障碍物密集或者转弯等区域,提前调整自身位姿,获得更加安全、合理的轨迹;同时在进入目标点区域后,根据与目标点距离调整速度,使移动机器人平滑到达目标点.

1 移动机器人模型

本文以最常见的两轮差速机器人模型和阿克曼机器人模型为例.为了简化控制算法的设计,不考虑质量转移,对模型采用以下几点假设:

- 1) 将移动机器人整体视作刚体,车轮视作刚性轮;
- 2) 假设移动机器人在二维平面上运动,不考虑俯仰和倾斜带来的影响;
- 3) 仅考虑移动机器人前进后退和转向的运动行为.

1.1 两轮差速机器人运动模型

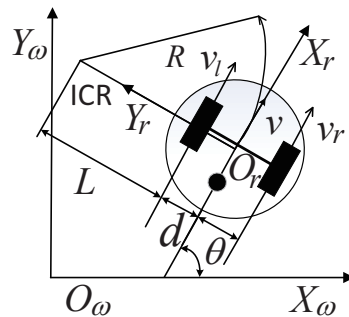


图2 两轮差速机器人运动模型

世界坐标系为 (X_w, O_w, Y_w) ,机器人的基坐标系为 (X_r, O_r, Y_r) ,机器人的基坐标系设置在两个驱动轮连轴的中点上,ICR为机器人瞬时旋转中心.机器人线速度为 v ,左轮速度为 v_l ,右轮速度为 v_r ,角速度

为 ω ,航向角为 θ ,转弯半径为 R ,两轮之间距离为 $2d$,左轮到圆心距离为 L .

根据两轮差速机器人角速度、速度和运动半径之间的物理关系:

$$\nu = \omega \times R \quad (1)$$

可以得到左轮、右轮的速度分解:

$$\begin{cases} \nu_l = \omega \times L = \omega \times (R - d) = \nu - \omega d; \\ \nu_r = \omega \times (L + 2d) = \omega \times (R + d) = \nu + \omega d. \end{cases} \quad (2)$$

由此可以得到机器人整体线速度、角速度和左右轮速度之间的关系:

$$\begin{cases} \nu = (\nu_l + \nu_r)/2; \\ \omega = (\nu_r - \nu_l)/2d. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 阿克曼机器人运动模型

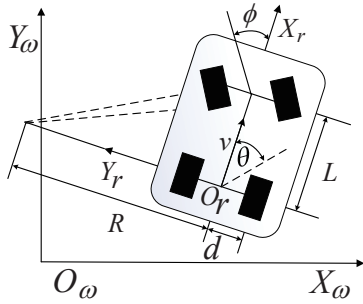


图3 阿克曼机器人运动模型

世界坐标系为 $(X_\omega, O_\omega, Y_\omega)$,机器人的基坐标系为 (X_r, O_r, Y_r) ,机器人的基坐标系设置在机器人后轴的中心 O_r 上,ICR为机器人瞬时旋转中心. 机器人线速度为 ν ,后轴角速度为 ω ,方向角为 θ ,前轮轴中点的虚拟转向角为 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$,转弯半径为 R ,后轮两轮到机器人中心的距离为 d ,机器人前后轴的轴距为 L . 其中前轮虚拟转向角 φ 与转弯半径 R 、轴距 L 有关,需满足以下关系:

$$\begin{cases} R = L / \tan \varphi \\ \omega = \nu / R \end{cases} \quad (4)$$

由于角速度不能直观地体现阿克曼机器人的转向运动特性,需要设置虚拟转向角 φ 来实现控制,通过如下(5)可以得到虚拟转向角 φ 的表示:

$$\varphi = \arctan(\omega L / \nu) \quad (5)$$

故阿克曼机器人的运动控制变量表示为 (ν, φ) . 最终,建立如下阿克曼机器人运动学姿态方程:

$$\dot{s}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu(t) \cos[\theta(t)] \\ \nu(t) \sin[\theta(t)] \\ \nu(t) / L \tan[\varphi(t)] \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 改进TEB算法

2.1 TEB算法的基本原理

经典的弹性带(EB)由一系列相对于世界坐标系的机器人位姿 $s_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$ 来表示,其中 x_i, y_i, θ_i 分别表示机器人在世界坐标系中的坐标 (x_i, y_i) 和方向角 θ_i . EB可表示为:

$$Q = \{s_i\}_{i=0,1,\dots,n} \quad n \in \mathbb{N} \quad (7)$$

时间弹性带(TEB)在弹性带(EB)的基础上,增加了相邻两个位姿之间的时间间隔 ΔT_i ,时间间隔 ΔT_i 表示从位姿 s_i 运动到位姿 s_{i+1} 所需的时间, n 个位姿序列生成 $n-1$ 个时间间隔序列,可表示为:

$$\tau = \{\Delta T_i\}_{i=0,1,\dots,n-1} \quad (8)$$

每个时间间隔表示机器人必须按顺序由上一个位姿运动到下一个位姿,如图4所示. 故TEB轨迹由位姿序列和时间间隔序列两个集合组成,可表示为:

$$B := (Q, \tau) = \{s_1, \Delta T_1, s_2, \Delta T_2, s_3, \Delta T_3, \dots, \Delta T_{n-1}, s_n\} \quad (9)$$

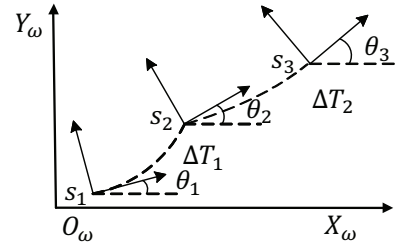


图4 TEB轨迹位姿和时间间隔关系图

TEB算法的关键思想是从位姿和时间间隔两个方面对TEB轨迹进行实时调整和多目标优化. 最优轨迹 B^* 是通过最小化一个加权非线性最小二乘代价函数来获得的. 该代价函数由目标 T 和惩罚 p 组成,可表示为:

$$B^* = \arg \min_{B/\{s_1, s_n\}} \sum_k \sigma_k f_k^2(B) \quad k \in \{T, P\} \quad (10)$$

其中: f_T 指目标函数,综合了能耗、路径长度、总过渡时间等因素; f_P 指惩罚函数,综合了障碍物约束、非完整运动学约束、速度与加速度约束以及本文提出的加速度跳变抑制约束等;各个项之间的权衡由权重 σ_k 确定; $B/\{s_1, s_n\}$ 表示起始位姿 s_1 和目标位姿 s_n 是固定的,不受优化.

2.2 传统TEB算法的约束条件

传统TEB轨迹规划约束主要由两大部分组成. 第一部分为机器人靠近障碍物和偏离初始路径(A*算法规划的全局路径)的约束;第二部分则考虑机器人受速度、加速度以及自身运动学限制的约束. 在描述单个代价项 f_k 之前,引入了惩罚函数 p_k 来

近似约束. 设 B 表示包含所有位姿和时间间隔的整个TEB轨迹集合. 满足函数 $g_k: B \rightarrow \mathbb{R}$ 的不等式约束 $g_k(b) \geq 0$ 可以用评估违反约束程度的半正定惩罚函数 $p_k: B \rightarrow \mathbb{R} \geq 0$ 来近似:

$$p_k(b) = \max\{0, -g_k(b) + \epsilon\}, b \in B \quad (11)$$

其中:参数 ϵ 为不等式约束增加了裕度,使得仅当 $g_k(b) \leq 0$ 时,惩罚函数才起作用. 将不等式约束 g_k 分别结合惩罚函数 p_k 到 f_p 中,再通过赋值 $f_k(b) = p_k(b), \forall k \in p$ 得到总的代价函数,即上述式(10).

2.2.1 障碍物约束

机器人的运动轨迹必须是绝对安全,即完全避开障碍物. 设机器人与障碍物的最小允许距离为 o_{min} ,当前机器人与障碍物的距离为 d . 障碍物的数量与位置根据环境动态变化,通过激光雷达等传感器可以获取一定范围内障碍物相对位置. 通过代价地图处理,可以得到障碍物信息表达. TEB轨迹上的每个位姿都可能会受 n 个障碍物的影响,所以对每个位姿需要考虑这 n 个障碍物的影响. 当障碍物与机器人的距离 d 小于最小允许距离 o_{min} 时,障碍物惩罚函数才起作用,此时障碍物惩罚函数可表示为:

$$f_{obs} = \sum_{i=0}^n \begin{cases} 0, & o_{min} > d_{iomin} \\ o_{min} - d_{iomin}, & o_{min} \leq d_{iomin} \end{cases} \quad (12)$$

其中: d_{iomin} 为传感器探测范围内离位姿 s_i 的最近障碍物的距离.

2.2.2 路径点目标

路径点集合是规划视界内全局路径点集合按均匀步长所得到的子集合. 在TEB算法优化过程中,遍历路径点集合,寻找与每个路径点最近的TEB轨迹位姿点,两者间的欧几里德距离为 d_{vimin} ,此时路径点目标函数可表示为:

$$f_{obs} = \sum_{i=0}^n d_{vimin} \quad (13)$$

2.2.3 非完整运动学约束

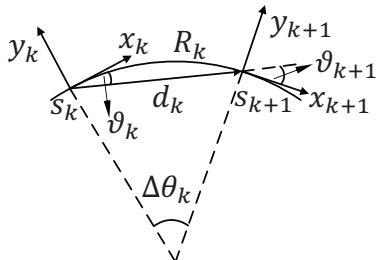


图5 相邻位姿间的非完整运动学约束关系图

本文重点研究的差分驱动机器人和阿克曼机器人只能在当前航向上执行由直线段和圆弧段组

成的平滑路径. 这种运动学约束导致机器人的转向运动位移是由弧线段组成的平滑路径. 因此,两个相邻的位姿位于恒定曲率的共同弧上^[2],如图6所示. 图中 ϑ_i 是位姿 s_i 和运动方向向量 d_i 的夹角,也等于下一个相邻位姿 s_{i+1} 对应的夹角 ϑ_{i+1} . 如果 θ_i 表示移动机器人在位姿 s_i 的绝对方位,则圆弧条件要求:

$$\vartheta_i = \vartheta_{i+1} \quad (14)$$

$$d_{i,i+1} = \begin{pmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{pmatrix} \times d_{i,i+1} = d_{i,i+1} \times \begin{pmatrix} \cos \theta_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

其中: θ_i 和 θ_{i+1} 分别表示位姿 s_i 和 s_{i+1} 在世界坐标系中的方向角,相应的非完整运动学约束的惩罚函数可表示为:

$$f_{nh}(s_i, s_{i+1}) = \left\| \left[\begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} \\ 0 \end{pmatrix} \right] \times d_{i,i+1} \right\| \quad (17)$$

另外, $\Delta\theta_i$ 等于机器人从位姿 s_i 运动到下一个相邻位姿 s_{i+1} 的方位角变化,因此 $\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$,方位角的变化映射到 $(-\pi, \pi)$. 对于阿克曼机器人,其运动进一步受到连续位姿之间最小转弯半径 r_{min} 的限制. 绝对转弯半径可以表示为:

$$r_i = \left| \frac{\nu_i}{\omega_i} \right| = \frac{\|d_{i,i+1}\|_2}{|2 \sin(\frac{\Delta\theta_i}{2})|} \geq \frac{\|d_{i,i+1}\|_2}{|\Delta\theta_i|} \quad (18)$$

阿克曼机器人不仅需要满足非完整运动学约束,还需满足转弯半径约束 $r_i \geq r_{min}$,即阿克曼机器人的转弯半径必须大于等于最小转弯半径. 对于差速机器人可认为其最小转弯半径 $r_{min} = 0$.

2.2.4 速度与加速度约束

对机器人速度和加速度的动态约束用类似于几何约束的惩罚函数来描述. 速度和加速度约束的作用是使优化出的轨迹能够满足机器人的运动学约束. 机器人的线速度和角速度是根据相邻两个位姿间的欧几里德距离、方位角变化量和两个位姿的时间间隔用有限差分近似的,可表示为:

$$\begin{cases} \nu_i \approx \frac{1}{\Delta T_i} \left\| \begin{pmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \end{pmatrix} \right\| \\ \omega_i \approx \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\Delta T_i} \end{cases} \quad (19)$$

加速度与两个连续的平均速度有关,因此考虑具

有两个对应平均速度的三个连续位姿,为了清晰起见,三个连续位姿被两个相关速度所取代,可表示为:

$$\begin{cases} a_i = \frac{2(\nu_{i+1} - \nu_i)}{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}} \\ \alpha_i = \frac{2(\omega_{i+1} - \omega_i)}{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}} \end{cases} \quad (20)$$

2.2.5 时间最优的目标函数约束

相比于其他的传统规划算法将最短路径作为目标,TEB算法考虑时间信息是最快路径的目标,整个轨迹的时间最优为目标函数替代传统的最短路径目标函数. 最快路径的目标函数很容易通过最小化轨迹上所有时间间隔平方的和来实现,可表示为:

$$f_{time} = \min_B \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_k^2 \quad (21)$$

2.3 改进TEB算法的约束条件

2.3.1 危险惩罚因子约束

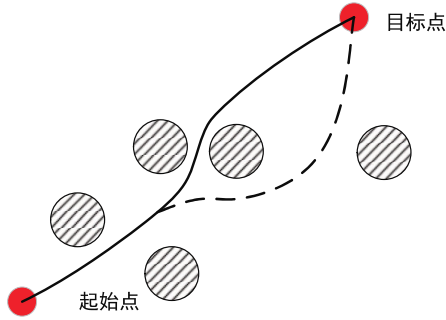


图6 复杂环境下的轨迹对比

图6中实线和虚线两条轨迹均连接起始点和目标点. 实线轨迹是在狭窄且障碍物密集区域运动,虚线轨迹是在宽敞且障碍物稀疏区域运动. 考虑到移动机器人实际运动控制不确定而言,虚线的轨迹更加安全,在某些使用场景下是更优选择.

基于以上分析,本文提出的改进TEB算法在传统TEB算法基础上增加危险惩罚因子约束,利用移动机器人自身配置的传感器,能够快速计算分析附近障碍物密集程度,根据环境变化自适应的调整危险惩罚因子,通过加大对障碍物密集的危险惩罚,得到移动机器人更合理运动速度,进而获得更加安全的轨迹.

2.3.2 加速度跳变抑制约束

在机器人运动过程中,加速度的约束能保证速度变化率不会太大,与此同时,加加速度描述了加速度变化的快慢,加速度的变化率过大会对机器人造成冲击. 本文提出的改进TEB算法中不仅考虑了运动中的速度和加速度约束,还考虑了加速度的变化即加加速度的约束,将加加速度控制在较小的范围内,从而得到更为精确的速度规划. 加加速度约束与四个连续的位姿有关,为了清晰起见,四个连续位姿被两个

相关加速度所取代,可表示为:

$$\begin{cases} j_{lin-i} = \frac{a_{i+1} - a_i}{0.25\Delta T_i + 0.5\Delta T_{i+1} + 0.25\Delta T_{i+2}} \\ j_{rot-i} = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{0.25\Delta T_i + 0.5\Delta T_{i+1} + 0.25\Delta T_{i+2}} \end{cases} \quad (22)$$

2.3.3 末端平滑约束

为了实现最快路径目标,机器人的速度在整个运动过程中都尽可能的保持在最大值,这样就会出现一个问题,机器人在到达目标时会出现突然从最大速度跳变到静止,对机器人会造成较大的冲击,同时也会出现到达目标点后滑行的情况.

本文提出的改进TEB算法,当机器人进入目标区域,调整机器人速度,使其减速、平缓的到达目标点,在减小机器人冲击的同时实现了更为精确的速度规划,可表示为:

$$v_{dmax} = \begin{cases} v_{max}, & d > d_{threshold} \\ \frac{d}{d_{threshold}} \times v_{max}, & d \leq d_{threshold}. \end{cases} \quad (23)$$

其中: v_{max} 为预先设定的机器人最大线速度, $d_{threshold}$ 为预先设定的机器人与目标点欧几里得距离的阈值, d 为机器人当前位置与目标点的欧几里得距离, v_{dmax} 为机器人在移动过程中最大线速度.

2.4 TEB算法求解模型

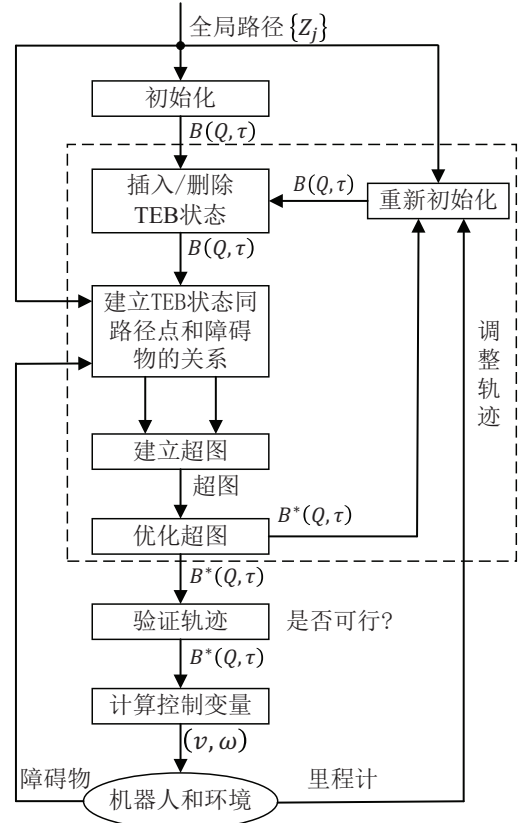


图7 TEB算法优化控制流程图

总的代价函数的大多数约束分量对于整个TEB轨迹 B 是局部的,因为它们只依赖于几个连续

的位姿,而不是整个轨迹. TEB的这种局部特性导致了一个稀疏的系统矩阵.

图7显示了TEB算法的控制流程. 将初始路径 Z_j 执行离散化的初始处理,使其成为由位姿序列和时间序列所构成的轨迹序列集合 $B(Q, \tau)$. 在每一次迭代中,该算法动态地添加新的位姿或删除之前已处理过的位姿,不需要将所有位姿全部加载进来,以便将空间和时间分辨率调整到剩余的轨迹长度或规划视界,同时实现了迟滞以避免振荡,这种处理方法保证了优化问题的求解速度,使得移动机器人能够实时避障. 将优化问题转化为超图,用“g2o”^[22]框架中的稀疏系统大规模优化算法求解.

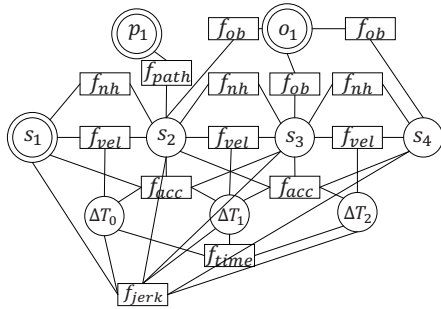


图8 TEB算法约束转化为超图示意图

超图是一种特殊的图,其中边连接的节点数量不受限制. TEB问题可以转换成由位姿和时间间隔作为节点、目标函数和约束函数作为边所构成的超图. 根据位姿、时间间隔、速度、加速度、加加速度、路径点以及障碍物构建出的超图如图8所示,表示初始位姿、目标位姿、障碍物、路径点的节点是固定的(双圆),其参数不能通过优化算法来改变.

验证优化后的 B^* ,可以计算控制变量 (ν, ω) ,直接下发给机器人驱动系统. 在每一次新的迭代之前,重新初始化阶段都会检查新的和改变的路径点.

3 实验分析

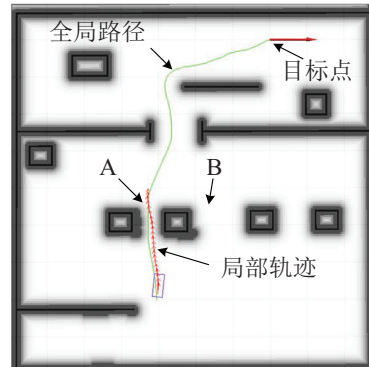
3.1 仿真实验

为了验证本文改进的TEB规划算法的有效性,将算法集成到机器人操作系统中进行了仿真实验,然后在两轮差速机器人上进行了实际实验测试. 实验的主要目的是验证改进TEB算法三方面的性能,一是在障碍物密集处规划安全运动轨迹的有效性;二是在减小机器人所受最大冲击的有效性;三是在平缓、准确到达目标点、减小末端冲击的有效性.

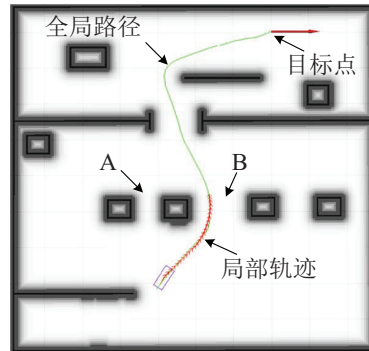
3.1.1 轨迹安全性分析

在图9所示的仿真环境中,存在狭窄的障碍物通道A和宽敞的障碍物通道B. 传统的TEB算法会选择图9中的A通道,通过时离障碍物距离太小,机器人擦碰障碍物的风险较大. 改进TEB算法添加了危险惩

罚因子约束,会选择图9中较宽敞的B通道,通过时与障碍物保持一定的距离,机器人能更安全的运动通行. 实验结果验证了改进TEB算法在障碍物密集处选择安全运动轨迹的有效性.



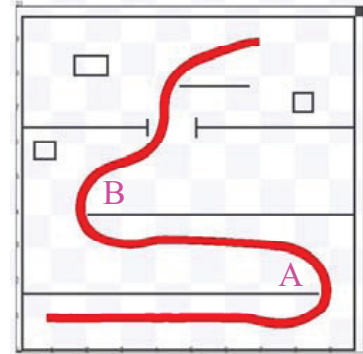
(a) 改进前机器人选择障碍物通道



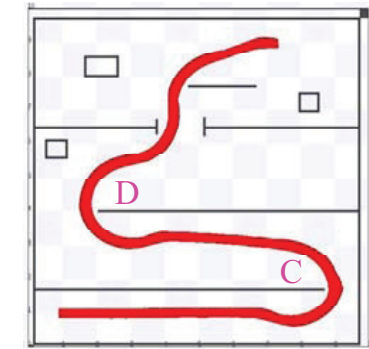
(b) 改进后机器人选择障碍物通道

图9 传统TEB算法和改进TEB算法对障碍物通道的选择

3.1.2 运动中最大冲击分析

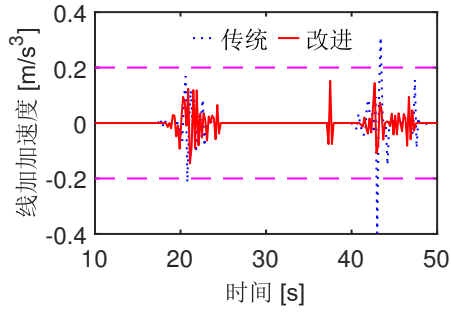


(a) 两轮差速机器人运动轨迹

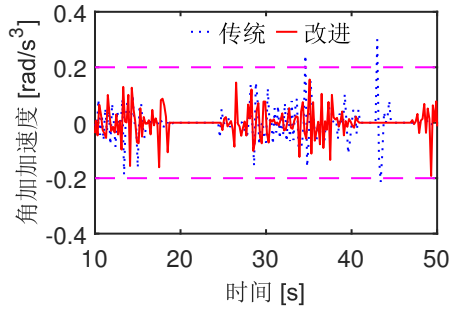


(b) 阿克曼机器人运动轨迹

图10 机器人在仿真环境中的运动轨迹

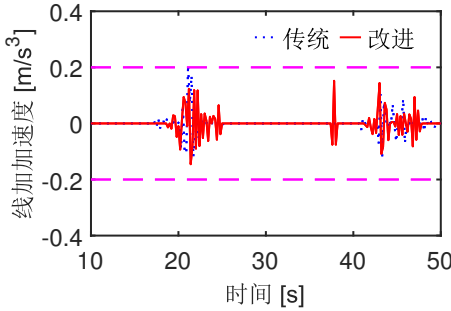


(a) 机器人线加加速度对比

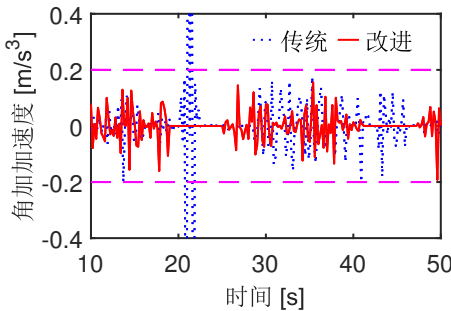


(b) 机器人角加加速度对比

图 11 应用传统TEB算法和改进TEB算法的两轮差速机器人加加速度数值对比



(a) 机器人线加加速度对比



(b) 机器人角加加速度对比

图 12 应用传统TEB算法和改进TEB算法的阿克曼机器人加加速度数值对比

图10给出了应用改进TEB算法实现两轮差速和阿克曼机器人运动轨迹结果,可以看出改进TEB算法轨迹平滑,能实现安全到达. 图11给出了两轮差速机器人上改进TEB算法和传统TEB算法的加加速度数值区间对比实验结果. 在运动通过B处时,传统TEB算法需要在此处倒退调整位姿,加速度存在明显的跳变,在第43秒左右,线加加速度的最大绝对值的超过了 $0.2m/s^3$ 、角加加速度的最大绝对

值 $0.2rad/s^3$,加速度瞬时变化率过大会对机器人造成冲击. 改进TEB算法运动通过B处时,会提前调整位姿,线加加速度的绝对值限制在 $0.2m/s^3$ 以内、角加加速度的绝对值限制在 $0.2rad/s^3$ 以内,加速度的瞬时变化率明显降低.

图12是在阿克曼机器人模型上的对比实验结果. 在运动通过C处时,传统TEB算法会在此处倒退调整位姿,加速度存在明显的跳变,图12中第21秒左右,角加加速度的最大绝对值的超过了 $0.5rad/s^3$,加速度瞬时变化率过大会对机器人造成冲击. 改进TEB算法运动通过图上C处时,会提前调整位姿,角加加速度的绝对值限制在 $0.2rad/s^3$ 以内,加速度的瞬时变化率明显降低. 实验结果验证了改进TEB算法在减小机器人所受最大冲击方面的有效性.

3.1.3 末端冲击分析

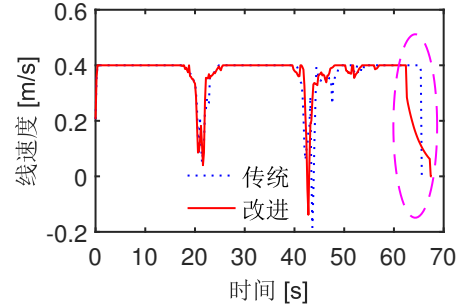


图 13 应用传统TEB算法和改进TEB算法的两轮差速机器人末端速度对比

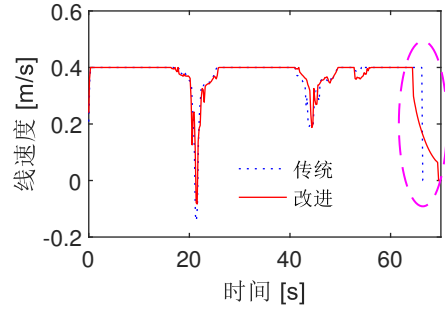


图 14 应用传统TEB算法和改进TEB算法的阿克曼机器人末端速度对比

图13和图14分别显示了分别使用差速驱动机器人和阿克曼机器人对传统TEB算法、改进TEB算法的实验结果. 对比图13、图14的紫色圆框部分,使用传统TEB算法,机器人在到达目标点处会发生骤停,会受到较大的冲击,甚至会滑动冲过目标点. 使用改进TEB算法,添加了末端平滑约束,在机器人进入目标区域时,会进行减速,平缓的到达目标点,机器人几乎不会产生振荡. 实验结果验证了改进TEB算法在准确到达、减小振荡方面的有效性. 在传统TEB算法上添加末端平滑约束是在实际工程应用中受到的启发,仿真实验中得到的数据较理想,在实际物理实验上得到的数据能更有力地验证添加末端平滑约束

的必要性和有效性.

3.2 实际物理实验

3.2.1 实验平台搭建

实际测试的移动机器人如图15所示. 该移动机器人半径约为0.37m,高度约为0.35m,质量约为7.5kg. 机器人运动由两个带有编码器和减速器的直流电机驱动实现,同时安装二维激光雷达实现建图和避障. 车载计算机采用英特尔core i7 处理器,双核心/四线程,频率为3.5GHz.

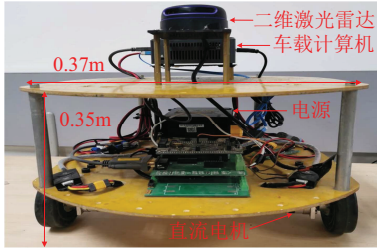
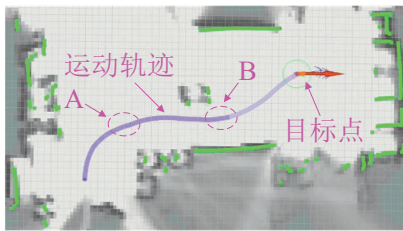
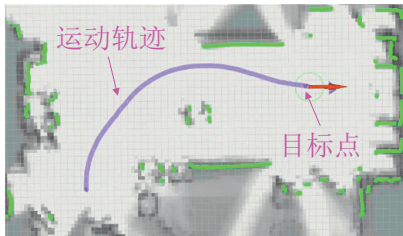


图 15 物理实验的两轮差速机器人

3.2.2 实验结果分析



(a) 传统TEB算法运动轨迹



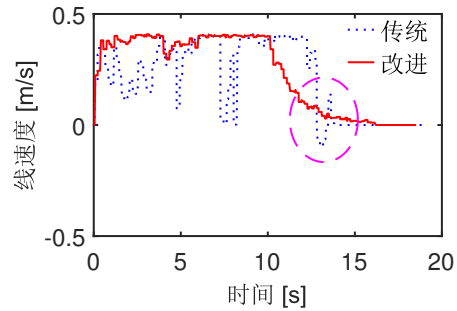
(b) 改进TEB算法运动轨迹

图 16 物理实验中机器人运行轨迹

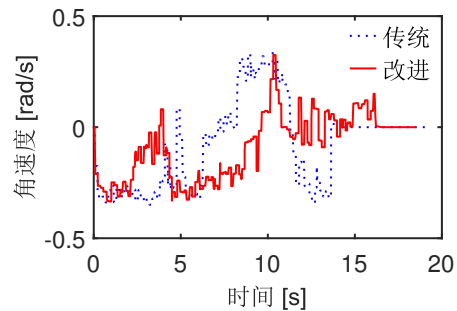
在物理实验中,传统TEB算法会在图16(a)中A处停顿,对应于图17中第五秒左右的速度跳变曲线,最终选择了离障碍物较近的危险轨迹;在图16(a)中B处也会发生速度跳变,对应于图17中第7秒左右的曲线;到达目标点时,机器人发生骤停,受到较大冲击,滑过目标位姿,之后机器人需倒退调整位姿才能准确到达目标位姿,对应于图17中第13秒左右的曲线. 改进TEB算法与传统TEB算法形成鲜明对比,机器人选择离障碍物较远的安全轨迹,运动过程流畅;到达目标区域后减速,准确、平缓的到达目标位姿.

在多次反复实验中,应用改进TEB算法的两轮差速机器人运动过程平滑,没有过大的指令变化,减小

了运动冲击. 综上,实验结果验证了改进TEB算法的有效性,能规划出更加安全、平滑的运动轨迹.



(a) 机器人线速度对比



(b) 机器人角速度对比

图 17 物理实验中两轮差速机器人速度对比

4 结论

针对移动机器人的运动规划问题,本文提出了一种改进TEB算法. 首先对两轮差速机器人和阿克曼机器人的运动模型进行了建模与分析,建立了机器人的运动学模型. 在传统TEB算法基础上添加了危险惩罚因子约束、加速度跳变抑制约束、末端平滑约束三个新的约束,对机器人在障碍物密集处规划安全运动轨迹、减小机器人所受最大冲击、平缓准确到达目标点与减小末端冲击三方面进行改进. 利用仿真和物理对比实验分析,验证了改进TEB算法的优越性.

未来的研究方向主要包括两个方面:一是根据规划视界内的障碍物分布自适应调整TEB算法的超参数;二是通过预测动态障碍物的轨迹提升动态环境下避障性能.

参考文献(References)

- [1] 高志伟, 代学武, 郑志达. 基于运动控制和频域分析的移动机器人能耗最优轨迹规划[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 934-945.
(Gao Z W, Dai X W, Zheng Z D. Optimal Energy Consumption Trajectory Planning for Mobile Robot Based on Motion Control and Frequency Domain Analysis[J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2020, 46(5): 934-945.)
- [2] Christoph R, Frank H, Torsten B. Integrated online trajectory planning and optimization in distinctive

- topologies[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 88: 142-153.
- [3] 徐保来,管贻生,苏泽荣,等.改进动态窗口法的阿克曼移动机器人局部路径规划器[J]. *机电工程技术*, 2016, 45(9): 21-26.
(Xu B L, Guan Y S, Su Z R, et al. A Modified Dynamic Window Approach to Local Path Planning for the Ackermann Mobile Robot[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2016, 45(9): 21-26.)
- [4] 丛岩峰.基于滚动优化原理的路径规划方法研究[D].吉林:吉林大学通信工程学院, 2007.
(Cong Y F. The path planning method research based on rolling optimization theory [D]. Changchun: College of Communication Engineering, Jilin University, 2007.)
- [5] Borenstein J. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 2002, 7(3): 278-288.
- [6] Ulrich I, Borenstein J. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots[M]. Tamil Nadu: Jayalakshmi Institute of Technology, 1998: 1572-1577.
- [7] Ulrich I, Borenstein J. VFH*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification[C]. *Proc of 2000 ICAR*. San Francisco: IEEE, 2000: 2505-2511.
- [8] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [9] 朱毅,张涛,宋靖雁.未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究[J]. *自动化学报*, 2010, 36(8): 1122-1130.
(Zhu Y, Zhang T, Song J Y. Study on the Local Minima Problem of Path Planning Using Potential Field Method in Unknown Environments[J]. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2010, 36(8): 1122-1130.)
- [10] 王永雄,田永永,李璇,等.穿越稠密障碍物的自适应动态窗口法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 927-936.
(Wang Y X, Tian Y Y, Li X, et al. Self-adaptive dynamic window approach in dense obstacles[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 927-936.)
- [11] Simmons R. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance. *Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis: IEEE, 1996: 3375-3382.
- [12] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. *Robotics & Automation Magazine*, 1997, 4(1): 23-33.
- [13] 郑凯林,韩宝玲,王新达.基于改进TEB算法的阿克曼机器人运动规划系统[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(10): 3997-4003.
(Zheng K L, Han B L, Wang X D. Ackerman Robot Motion Planning System Based on Improved TEB Algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(10): 3997-4003.)
- [14] Quinlan S, Khatib O. Elastic Bands: Connecting Path Planning and Control[C]. *Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atlanta: IEEE, 1993: 802-807.
- [15] Khatib M, Simeon T. Sensor-based motion planning and control for the HILARE mobile robot[C]. *Proc of the 1997 IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems*. Grenoble: IEEE, 1997: 8-9.
- [16] Khatib M, Jaouni H, Chatila R, et al. Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots[C]. *Proc of International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque: IEEE, 1997: 2920-2925.
- [17] Brock O, Khatib O. Executing motion plans for robots with many degrees of freedom in dynamic environments[C]. *Proc of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 1-6.
- [18] Lamiraux F, Bonnafous D, Lefebvre O. Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(6): 967-977.
- [19] Roesmann C, Feiten W, Woesch T, et al. Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots[C]. *Proc of the 7th German Conference on Robotics*. Munich: VDE, 2012: 1-6.
- [20] Roesmann C, Feiten W, Woesch T, et al. Efficient trajectory optimization using a sparse model[C]. *2013 European Conference on Mobile Robots*. Barcelona: IEEE, 2013: 138-143.
- [21] Roesmann Christoph, Hoffmann Frank, Bertram T. Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots[C]. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*. Vancouver: IEEE, 2017: 5681-5686.
- [22] Kümmerle R, Grisetti G, Strasdat H, et al. G2o: A general framework for graph optimization[C]. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai: IEEE, 2011: 3607-3613.

作者简介

文郁(1995—),男,硕士生,从事机器人路径规划算法、多机器人协同等研究, E-mail: wenyu@cqu.edu.cn;

黄江帅(1985—),男,教授,博士生导师,从事机器人系统、自适应控制、多智能体系统等研究, E-mail: jshuang@cqu.edu.cn;

江涛(1992—),男,讲师,从事自适应控制、鲁棒控制等研究, E-mail: jiangtao.1992@outlook.com;

苏晓杰(1985—),男,教授,博士生导师,从事智能控制理论、智慧无人系统应用领域等研究, E-mail: suxiaojie@cqu.edu.cn.