



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111897216 B

(45) 授权公告日 2021.07.02

(21) 申请号 202010686665.8

(22) 申请日 2020.07.16

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111897216 A

(43) 申请公布日 2020.11.06

(73) 专利权人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市珞瑜路1037号

(72) 发明人 宋宝 唐小琦 周向东 钟靖龙

刘永兴 肖千红 王国栋

(74) 专利代理机构 北京金智普华知识产权代理

有限公司 11401

代理人 杨采良

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

(续)

(56) 对比文件

CN 110497411 A, 2019.11.26

CN 106313047 A, 2017.01.11

CN 111267098 A, 2020.06.12

CN 105573315 A, 2016.05.11

CN 106346478 A, 2017.01.25

CN 104062902 A, 2014.09.24

CN 110900612 A, 2020.03.24

KR 20120098152 A, 2012.09.05

US 2019202049 A1, 2019.07.04

WO 2017223061 A1, 2017.12.28

郭彤颖,等.粒子群算法在机械手臂B样条曲线轨迹规划中的应用.《组合机床与自动化加工

技术》.2019,第29卷(第6期),71-77.

余伶俐,等.基于贝塞尔曲线的机器人非时间轨迹跟踪方法.《仪器仪表学报》.2016,第37卷(第7期),1564-1572.

董甲甲,等.改进B样条曲线应用于6R机器人轨迹优化.《中国机械工程》.2018,第29卷(第2期),193-200.

李黎,等.关节型工业机器人轨迹规划研究综述.《计算机工程与应用》.2018,第54卷(第5期),36-50.

Zhang Yi,等.Stacking robot interpolation algorithm research and application for irregular cigarette packs.《2017 IEEE 2nd advanced information technology,electronic and automation control conference (IAEAC)》.2017,1134-1138. (续)

审查员 张艺

权利要求书3页 说明书10页 附图9页

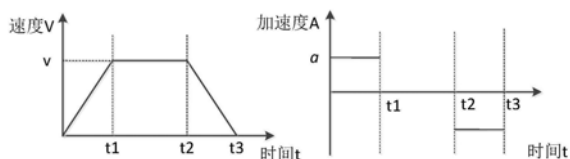
(54) 发明名称

一种多运动段速度规划和插补方法

(57) 摘要

本发明公开了一种多运动段速度规划和插补方法,本发明添加过渡段后,连续运动过程中的速度规划问题。为提高运行效率,以单段位置和姿态速度规划为基础,研究连续运动段的轨迹速度传递问题及过渡段的速度优化问题,同时为提高末端轨迹的平稳性,采用S型加减速优化起

始段速度规划;最后提出通过基于截距法的插补方法对样条曲线进行实时插补的方法。



CN 111897216 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

*G05B 17/02* (2006.01)

*B25J 9/16* (2006.01)

(56) 对比文件

Xiaojing Yu,等.Time-optimal path tracking for articulated robot along spline curves based on master-slave strategy.《2016 International conference

on control,automation and information sciences(ICCAIS)》.2016,149-154.

Mei Chen,等.design and implementation of programming-free robot system based on plcopen.《2019IEEE 3rd advanced information management,communicates, electronic and automation control conference》.2019,1539-1544.

1. 一种多运动段速度规划和插补方法,其特征在于:多运动段速度规划方法包括多运动段轨迹起始点速度设计、曲率约束的最大速度控制方法优化、S型加减速的运动段起始速度优化;

所述多运动段轨迹起始点速度设计:需要先预读所有的运动段,然后从后往前推导每个运动段的终速度,并且本段的终点速度等于下一段的起点速度;所述多运动段轨迹起始点速度限制条件包含了在加速度 $a$ 、本段的位移 $s$ 和末速度 $v_e$ 的限制下,起点速度 $v_b$ 需要满足:

$$v_b \leq \sqrt{v_e^2 + 2as} \quad (4)$$

在相同运动段类型中位移的值可以直接转换,但是在关节运动段和笛卡尔空间运动段之间需要考虑关节空间和笛卡尔空间的互换;

关节坐标转换为笛卡尔坐标采用截距法,在运动关节范围内选取多个点,转换为正解坐标后,求和每相邻点之间的距离得到预估距离 $\hat{s}$ ,易知预估距离 $\hat{s}$ 小于实际距离 $s$ ,所以求初始速度的限制如下:、

$$v_b \leq \sqrt{v_e^2 + 2a\hat{s}} \leq \sqrt{v_e^2 + 2as} \quad (5)$$

笛卡尔坐标转关节坐标通过运动反解,通过将运动段的起点和终点反解为在挂接坐标下表示的起点和终点,可以计算每个关节的位移,按公式(4)表示的方法计算角速度限制;

所述曲率约束的最大速度控制方法优化:空间平滑曲线方程由参数方程 $x=x(t)$ ,  $y=y(t)$ ,  $z=z(t)$ 组成,向量和加速度向量为:

$$\begin{cases} v = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\} = \{x1, y1, z1\} \\ a = \{\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}\} = \{x2, y2, z2\} \end{cases} \quad (6)$$

根据空间曲率计算方法计算出曲率半径:

$$r = |v|^3 / \sqrt{|a|^2 |v|^2 - (v \times a)^2} \quad (7)$$

化简计算曲率半径为:

$$r = \frac{\sqrt{(y1z2 - z1y2)^2 + (x1z2 - z1x2)^2 + (y1x2 - x1y2)^2}}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \quad (8)$$

针对由四个控制点 $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $P_3$ 构成的三阶贝塞尔曲线 $P$ ,一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数为:

$$\begin{cases} \dot{P} = 3(1-t)^2(P_1 - P_0) + (1-t)t(P_2 - P_1) + 3t^2(P_3 - P_2) \\ \ddot{P} = 6(1-t)(P_2 - 2P_1 + P_0) + 6t(P_3 - 2P_2 + P_1) \end{cases} \quad (9)$$

对于任意一点 $t$ ,代入上式中得到 $(x1, y1, z1) = \dot{P}$ 和 $(x2, y2, z2) = \ddot{P}$ ;将 $x1, x2, y1, y2, z1$ 和 $z2$ 代入曲率半径计算公式中即可得到曲率半径;

在确认曲率半径的计算方法后,需要计算曲线段上最小曲率半径所在位置;通过遗传寻优算法中的一种粒子群算法来解决寻找最优曲率点的问题;

粒子群算法从随机值出发,不断迭代寻找最优值,主要在于构造适应度函数;适应度函

数与优化问题有关,根据优化模型来构造,对于最小曲率半径寻优问题选择式(8)作为适应度函数,评价每个点补偿值的好坏,选择四个控制点,构造贝塞尔曲线通过仿真得到适应度值的变化示意图;

超过6次迭代计算后,适应度值不变,所以当参数因子等于0.607315时,最小曲率半径等于17.0705mm;在保证其他条件不变的前提下,改变最大迭代次数,对比不同数据,通过多次实验,针对最小曲率半径寻优问题设置粒子数量50,精度为0.01,以及最大迭代次数为10时,计算速度较快,能够避免PSO算法的复杂迭代,能够高效的得到最优解决;

在最小曲率半径点需要满足 $v \leq \sqrt{ar}$ ,如果按照规划完整运动所采用的方法,样条各点的速度都会不大于最小曲率半径点规定的速度,这会限制机器人末端速度,同时不满足时间最短规划,所以针对已经求出最小曲率半径的样条速度规划,需要针对最小曲率半径点做出优化;

优化方法具体过程为:以最小曲率半径点作为参考将运动段分为前后两段,在考虑最小曲率半径点速度限制的前提下,采用单段最短时间运动规划方法规划前后两段位置速度和姿态速度;选择位置规划速度和姿态规划速度中的最长时间,并且通过等比例放大时间和给定时间规划同步位置和姿态;通过分段规划然后同步的方法能够有效避免因为曲率半径限制导致整个运动段运行时间过长的的问题;

所述S型加减速的运动段起始速度优化:

建立S型曲线位移方程 $P(t)$ 需要已知梯形加减速加速段的初速度为 $v_b$ ,终速度为 $v_e$ ,加速时间为 $T$ ;在建立参数方程时,还需要考虑如下限制条件:在 $t=0$ 时刻,曲线的位移为0;曲线终止时,S型曲线的位移等于梯形曲线的位移 $(v_b+v_e)T/2$ ;在曲线开始和终止时刻,曲线对应的速度即一阶导数需要等于梯形加减速的初速度和终止速度 $v_b$ 和 $v_e$ ;并且在开始和终止时刻,为了避免冲击,曲线 $P(t)$ 的加速度和加加速度必须保证为0;所以曲线 $P(t)$ 在满足以上8个条件的情况下,需要建立7次曲线方程如下:

$$P(t) = At^7 + Bt^6 + Ct^5 + Dt^4 + Et^3 + Ft^2 + Gt + H \quad (10)$$

将限制条件以公式表示为:

$$\begin{cases} P(0) = 0 \\ P(1) = 2(v_b + v_e)T / 2 \\ \dot{P}(0) = v_b \\ \dot{P}(1) = v_e \\ \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

联立以上两式解得 :

$$\begin{cases} A = 0 \\ B = v_e - v_b \\ C = -3(v_e - v_b) \\ D = 2.5(v_e - v_b) \\ E = F = G = H = 0 \end{cases} \quad (12)$$

通过以上求解的参数,能够建立S型曲线位移,优化梯形加减速;

过渡段插补方法包括弧长节点集合构造方法、过渡段样条插补方法,所述弧长节点集

合构造方法:对样条曲线进行插补前需要计算样条曲线的总位移,通过截距法均匀等分插补参数,在样条曲线上取点,累加曲线上的直线位移,以直代曲作为曲线的总位移,构造弧长节点 $S_i$ 集合的步骤为:首先在 $[0,1]$ 区间内均匀选择 $n$ 个点,第 $i$ 个点满足 $u_i=i/n$ ,再根据样条方程 $P_i=F(u_i)$ 计算对应的 $P_1, P_2, \dots, P_n$ ;然后构造弧长节点 $S_i$ 集合, $S_i$ 表示起点 $P_1$ 到 $P_i$ 的预估长度, $S_i$ 通过累加 $S_i=S_{i-1}+|P_i P_{i-1}|$ 计算;

所述过渡段样条插补方法:样条插补根据插补时间计算插补点,然后反算成关节值;在弧长节点集合与速度信息图的基础上,将插补时间映射成插补点的位姿;设当前的插补时间为 $t$ ,已完成位移为 $s$ ,首先根据插补时间确定对应的速度 $v$ ,从而计算已完成位移 $s=s+vT$ ;然后将位移映射成样条曲线参数方程输入值,在弧长节点集合中寻找当前位移所在区间 $i$ ,第 $i$ 个节点段满足 $S_i < s < S_{i+1}$ ,根据线性比例得到样条曲线参数方程输入值 $u$ ;最后根据 $u$ 和参数方程 $P=F(u)$ 计算插补点,再反算成对应多轴的关节值;循环以上过程,直至到达插补周期,在插补开始时初始时间和位移为0;在样条曲线插补得过程中,需要得到插补点在弧长节点集合中的位置,并且弧长节点集记录的分段样条节点的位移呈升序排列,因此适应于二分法对其进行快速定位;将分段样条集合中间两点的位移与查找位移进行比较,如果查找的位移位于两点之间,则查找成功;否则利用两点将原集合分成前、后两个集合,如果两点大于查找的位移,则进一步查找前一集合,否则进一步查找后一集合,直至成功。

## 一种多运动段速度规划和插补方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机器人技术领域,尤其涉及一种多运动段速度规划和插补方法。

### 背景技术

[0002] 在机器人轨迹规划过渡研究中,一般关注笛卡尔空间规划、关节空间轨迹规划方法以及多运动段速度规划三个方面的内容。轨迹规划过渡技术适应于复杂的作业工况,通过在不同类型的运动段之间插入过渡段保证机器人末端轨迹的连续性,能够避免运动过程中出现的冲击;速度规划为保证运行效率需要满足时间最优原则,并且考虑位置和姿态的同步问题,本发明针对机器人速度规划和插补问题,首先实现了单运动段的速度规划和同步方法,然后提出了多运动段速度规划方法来解决速度平滑性的问题,最后通过截距法对样条曲线进行实时插补。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的就在于为了解决上述问题而提供一种多运动段速度规划和插补方法。

[0004] 本发明通过以下技术方案来实现上述目的:

[0005] 本发明多运动段速度规划方法包括多运动段轨迹起始点速度设计、曲率约束的最大速度控制方法优化、S型加减速的运动段起始速度优化;

[0006] 所述多运动段轨迹起始点速度设计:需要先预读所有的运动段,然后从后往前推导每个运动段的终速度,并且本段的终点速度等于下一段的起点速度;所述多运动段轨迹起始点速度限制条件包含了在加速度 $a$ 、本段的位移 $s$ 和末速度 $v_e$ 的限制下,起点速度 $v_b$ 需要满足:

$$[0007] \quad v_b \leq \sqrt{v_e^2 + 2as} \quad (4)$$

[0008] 在相同运动段类型中位移的值可以直接转换,但是在关节运动段和笛卡尔空间运动段之间需要考虑关节空间和笛卡尔空间的互换;

[0009] 关节坐标转换为笛卡尔坐标采用截距法,在运动关节范围内选取多个点,转换为正解坐标后,求和每相邻点之间的距离得到预估距离 $\hat{s}$ ,易知预估距离 $\hat{s}$ 小于实际距离 $s$ ,所以求初始速度的限制如下:

$$[0010] \quad v_b \leq \sqrt{v_e^2 + 2a\hat{s}} \leq \sqrt{v_e^2 + 2as} \quad (5)$$

[0011] 笛卡尔坐标转关节坐标通过运动反解,通过将运动段的起点和终点反解为在挂接坐标下表示的起点和终点,可以计算每个关节的位移,按公式(4)表示的方法计算角速度限制;

[0012] 所述曲率约束的最大速度控制方法优化:空间平滑曲线方程由参数方程 $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ ,  $z = z(t)$ 组成,向量和加速度向量为:

$$[0013] \quad \begin{cases} v = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\} = \{x1, y1, z1\} \\ a = \{\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}\} = \{x2, y2, z2\} \end{cases} \quad (6)$$

[0014] 根据空间曲率计算方法计算出曲率半径:

$$[0015] \quad r = |v|^3 / \sqrt{|a|^2 |v|^2 - (v \times a)^2} \quad (7)$$

[0016] 化简计算曲率半径为:

$$[0017] \quad r = \frac{\sqrt{(y1z2 - z1y2)^2 + (x1z2 - z1x2)^2 + (y1x2 - x1y2)^2}}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \quad (8)$$

[0018] 针对由四个控制点P0、P1、P2和P3构成的三阶贝塞尔曲线P,一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数为:

$$[0019] \quad \begin{cases} \dot{P} = 3(1-t)^2(P1 - P0) + (1-t)t(P2 - P1) + 3t^2(P3 - P2) \\ \ddot{P} = 6(1-t)(P2 - 2P1 + P0) + 6t(P3 - 2P2 + P1) \end{cases} \quad (9)$$

[0020] 对于任意一点t,代入上式中得到(x1, y1,z1)=  $\dot{P}$ 和(x2, y2, z2) =  $\ddot{P}$ ;将x1, x2,y1,y2,z1和z2代入曲率半径计算公式中即可得到曲率半径;

[0021] 在确认曲率半径的计算方法后,需要计算曲线段上最小曲率半径所在位置;常用方法为在曲线段上均匀采样多个点,然后通过比较选择最小值对应点,然而此种方法精度不高,会对最优位置的计算存在偏差;本小节通过遗传寻优算法中的一种粒子群算法来解决寻找最优曲率点的问题;

[0022] 粒子群算法从随机值出发,不断迭代寻找最优值,主要在于构造适应度函数;适应度函数与优化问题有关,根据优化模型来构造,对于最小曲率半径寻优问题选择式(8)作为适应度函数,评价每个点补偿值的好坏,选择四个控制点,构造贝塞尔曲线通过仿真得到适应度值的变化示意图;

[0023] 超过6次迭代计算后,适应度值不变,所以当参数因子等于0.607315时,最小曲率半径等于17.0705mm;在保证其他条件不变的前提下,改变最大迭代次数,对比不同数据,通过多次实验,针对最小曲率半径寻优问题设置粒子数量50,精度为0.01,以及最大迭代次数为10时,计算速度较快,能够避免PSO 算法的复杂迭代,能够高效的得到最优解决;

[0024] 在最小曲率半径点需要满足 $v \leq \sqrt{ar}$ ,如果按照规划完整运动所采用的方法,样条各点的速度都会不大于最小曲率半径点规定的速度,这会限制机器人末端速度,同时不满足时间最短规划,所以针对已经求出最小曲率半径的样条速度规划,需要针对最小曲率半径点做出优化;

[0025] 优化方法具体过程为:以最小曲率半径点作为参考将运动段分为前后两段,在考虑最小曲率半径点速度限制的前提下,采用单段最短时间运动规划方法规划前后两段位置速度和姿态速度;选择位置规划速度和姿态规划速度中的最长时间,并且通过等比例放大时间通过给定时间规划同步位置和姿态;通过分段规划然后同步的方法能够有效避免因为曲率半径限制导致整个运动段运行时间过长的的问题;

[0026] 所述S型加减速的运动段起始速度优化:

[0027] 建立S型曲线位移方程P(t)需要已知梯形加减速加速段的初速度为vb,终速度为

ve, 加速时间为T; 在建立参数方程时, 还需要考虑如下限制条件: 在  $t=0$  时刻, 曲线的位移为0; 曲线终止时, S型曲线的位移等于梯形曲线的位移  $(vb+ve)T/2$ ; 在曲线开始和终止时刻, 曲线对应的速度即一阶导数需要等于梯形加减速的初速度和终止速度vb和ve; 并且在开始和终止时刻, 为了避免冲击, 曲线P(t)的加速度和加加速度必须保证为0; 所以曲线P(t)在满足以上8个条件的情况下, 需要建立7次曲线方程如下:

$$[0028] \quad P(t) = At^7 + Bt^6 + Ct^5 + Dt^4 + Et^3 + Ft^2 + Gt + H \quad (10)$$

[0029] 将限制条件以公式表示为:

$$[0030] \quad \begin{cases} P(0) = 0 \\ P(1) = 2(vb + ve)T / 2 \\ \dot{P}(0) = vb \\ \dot{P}(1) = ve \\ \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

[0031] 联立以上两式解得:

$$[0032] \quad \begin{cases} A = 0 \\ B = ve - vb \\ C = -3(ve - vb) \\ D = 2.5(ve - vb) \\ E = F = G = H = 0 \end{cases} \quad (12)$$

[0033] 通过以上求解的参数, 能够建立S型曲线位移, 优化梯形加减速;

[0034] 过渡段插补方法包括弧长节点集合构造方法、过渡段样条插补方法, 所述弧长节点集合构造方法: 对样条曲线进行插补前需要计算样条曲线的总位移, 通过截距法均匀等分插补参数, 在样条曲线上取点, 累加曲线上的直线位移, 以直代曲作为曲线的总位移, 构造弧长节点 $S_i$ 集合的步骤为: 首先在 $[0, 1]$ 区间内均匀选择 $n$ 个点, 第 $i$ 个点满足 $u_i = i/n$ , 再根据样条方程 $P_i = F(u_i)$ 计算对应的  $P_1, P_2, \dots, P_n$ ; 然后构造弧长节点 $S_i$ 集合,  $S_i$ 表示起点 $P_1$ 到 $P_i$ 的预估长度,  $S_i$ 通过累加 $S_i = S_{i-1} + |P_i P_{i-1}|$ 计算;

[0035] 所述过渡段样条插补方法: 样条插补根据插补时间计算插补点, 然后反算成关节值; 在弧长节点集合与速度信息图的基础上, 将插补时间映射成插补点的位姿; 设当前的插补时间为 $t$ , 已完成位移为 $s$ , 首先根据插补时间确定对应的速度 $v$ , 从而计算已完成位移 $s = s + vT$ ; 然后将位移映射成样条曲线参数方程输入值, 在弧长节点集合中寻找当前位移所在区间 $i$ , 第 $i$ 个节点段满足 $S_i < s < S_{i+1}$ , 根据线性比例得到样条曲线参数方程输入值 $u$ ; 最后根据 $u$ 和参数方程 $P = F(u)$ 计算插补点, 再反算成对应多轴的关节值; 循环以上过程, 直至到达插补周期, 在插补开始时初始时间和位移为0; 在样条曲线插补得过程中, 需要得到插补点在弧长节点集合中的位置, 并且弧长节点集记录的分段样条节点的位移呈升序排列, 因此适应于二分法对其进行快速定位; 将分段样条集合中间两点的位移与查找位移进行比较, 如果查找的位移位于两点之间, 则查找成功; 否则利用两点将原集合分成前、后两个集合, 如果两点大于查找的位移, 则进一步查找前一集合, 否则进一步查找后一集合, 直至成功。

[0036] 本发明的有益效果在于:



[0037] 本发明是一种多运动段速度规划和插补方法,本发明添加过渡段后,连续运动过程中的速度规划问题。为提高运行效率,以单段位置和姿态速度规划为基础,研究连续运动段的轨迹速度传递问题及过渡段的速度优化问题,同时为提高末端轨迹的平稳性,采用S型加减速优化起始段速度规划;最后提出通过基于截距法的插补方法对样条曲线进行实时插补的方法。

### 附图说明

- [0038] 图1是梯形规划速度和加速度与时间关系图;
- [0039] 图2是时间最优的梯形速度规划;
- [0040] 图3是时间同步速度规划流程图;
- [0041] 图4是给定三段运行时间的梯形速度规划;
- [0042] 图5是给定总运行时间同步速度规划图;
- [0043] 图6是速度预估流程图;
- [0044] 图7是PSO算法流程图;
- [0045] 图8是最小曲率变化寻优示意图;
- [0046] 图9是样条位姿同步规划示意图;
- [0047] 图10是S型和梯形速度对比图;
- [0048] 图11是截距法取点示意图;
- [0049] 图12是样条插补示意图;
- [0050] 图13是样条插补流程图;
- [0051] 图14是基于二分查找的位移搜寻方法;
- [0052] 图15是位姿速度时间变化图;
- [0053] 图16是过渡段速度优化示意图;
- [0054] 图17是S型和梯形速度对比图。

### 具体实施方式

- [0055] 下面结合附图对本发明作进一步说明:
- [0056] 单段位姿速度规划方法:
- [0057] 在位置、速度和加速度等条件的限制下,过渡段速度包含两种方法。时间最优规划在机器人速度和加速度等限制条件下,达到时间最优;时间同步速度规划使得多轴关节或位姿的时间同步。
- [0058] 时间最优速度规划:
- [0059] 时间最优速度规划采用梯形加减速规划,包含前后两加速段以及中间匀速段,如图1所示。
- [0060] 通过图1可以计算已完成位移 $S$ 和速度 $V$ 与时间 $t$ 的关系。
- [0061] 机器人时间最优速度规划在最大速度 $v_0$ 、最大加速度 $a$ 、初速度 $v_b$ 和终点速度 $v_e$ 等约束条件下,以最短时间完成总的位移 $S_p$ 。
- [0062] 首先计算位移临界值 $S_1$ 和 $S_2$ , $S_1$ 表示以最大加速度 $a$ 先匀加速再匀减速的等效位移, $S_2$ 表示以最大加速度 $a$ 保持匀加速的等效位移:

$$[0063] \quad \begin{cases} S_1 = \frac{|v_0^2 - v_b^2| + |v_0^2 - v_e^2|}{2a} \\ S_2 = \frac{|v_b^2 - v_e^2|}{2a} \end{cases} \quad (1)$$

[0064] 然后根据 $S_p$ 与 $S_1$ 和 $S_2$ 之间的大小关系,进行梯形速度规划。

[0065] 如果 $S_p > S_2$ ,如图2(a),以最大加速度 $a$ 和最大速度 $v_0$ 做匀加速-匀速-匀减速规划;如果 $S_1 < S_p \leq S_2$ ,如图2(b),重新计算最大速度 $v_m$ ,以最大加速度 $a$ 和最大速度 $v_m$ 做匀加速-匀减速规划;如果 $S_p \leq S_1$ ,如图2(c)则需要增加加速度,匀速规划;如果 $S_p < 10^{-4}$ ,如图2(d),表示位移为0,不需规划。

[0066] 通过时间最优的梯形速度规划可以看出每个运动段的运动时间,以及等效位移、速度、加速度和时间之间的关系。

[0067] 时间同步速度规划:

[0068] 针对以时间最优速度规划对机器人同一运动段的位置和姿态规划过程中,存在的运行时间不一致问题,本发明提出时间同步速度规划方法。时间同步速度规划选择位置和姿态速度规划中两者最大的运行时间作为总运行时间,重新对位置或者姿态进行规划,保证位置和姿态规划时间都等于总运行时间。

[0069] 设梯形速度规划三段的时间分别为 $t_1$ 、 $t_2$ 和 $t_3$ ,总运行时间为 $T_m$ ,时间同步速度规划对运行时间的规定可以分为两种:第一种规定 $t_1$ 、 $t_2$ 和 $t_3$ 的值;第二种规定 $T_m$ 的值。给定三段运行时间的方法条件显然比给定总时间规划严格,所以在同步时可以先采用给定三段运行时间,规划失败后选用给定总时间规划。基于这两种规划时间同步速度规划的流程如图3所示。

[0070] 图3中规划成功条件在给定三段时间速度同步规划中详细说明。给定时间规划指机器人以最大速度 $v_0$ 、最大加速度 $a$ 、初速度 $v_b$ 和终点速度 $v_e$ 的约束下,能在规定时间内情况下完成总的位移 $S_p$ 。

[0071] 给定三段时间速度同步规划

[0072] 先计算临界位移 $S_1$

$$[0073] \quad S_1 = \frac{t_1 v_b + t_3 v_e}{2} \quad (2)$$

[0074] 如果 $S_p < S_1$ ,速度规划的加速度会超出规定的最大加速度,如图4(b),不能满足要求,返回规划失败;否则按图4(a)进行规划。

[0075] 给定总时间速度同步规划:

[0076] 给定总时间速度同步规划在给定的时间内,以最大加速度 $a$ ,在时间 $T_m$ 内完成位移 $S_p$ 。首先计算两个位移临界值 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ , $S_1$ 表示匀减速位移, $S_2$ 表示第三段匀减速, $S_3$ 表示加速段临界位移,计算公式如下:

$$[0077] \quad \begin{cases} S1 = \frac{vb^2}{2a} \\ S2 = tm \times vb - \frac{vb^2}{2a} \\ S3 = \frac{aT^2 + 2tm \times vb - vb^2}{4a} \end{cases} \quad (3)$$

[0078] 如果 $S_p < 10^{-4}$ ,表示位移为0,不需规划。如果 $S_p < S_1$ ,加大加速度,若加速度大于系统限定最大值,规划失败,如图5(a);如果 $S_p < S_2$ ,第一段做匀减速,第二段匀速,第三段匀减速,如图5(b);经过时间最优规划保证了S3的位移必定大于 $S_p$ ,所以在其余情况做匀加速-匀速-匀减速规划,如图5(c)。

[0079] 通过以上规划,能够实现机器人单运动位姿时间相同的同步速度规划。对于多关节的速度规划,将多个关节的关节转角作为等效位移,与上述步骤相似,对每个关节做时间最优规划,再对多个关节进行同步规划。

[0080] 多运动段轨迹速度设计与优化:

[0081] 添加过渡段后,连续轨迹保证了G1连续性,避免了起始速度需要降为0的问题,因此多运动段速度规划过程只需在单段速度规划的基础上考虑每个运动段起始点的速度大小。对于当前运动段可以通过计算后续运动段的位移预估本段终点的最大允许速度,并将终点速度传递给下一运动段的起点速度。

[0082] 针对过渡段,构造曲线为贝塞尔样条曲线或者非均匀样条曲线,在速度规划时,需要考虑曲率限制对速度的影响,常用做法为通过最小曲率半径点计算限制速度 $v_r$ ,将其作为过渡段的最大速度限制之一,但在过渡段的其他位置不能充分利用机器人的电机性能。针对上述问题,本发明采用遗传算法准确寻找到最小曲率半径点,并以此点将过渡段分成前后两段分开规划,从而充分利用机器人的电机性能。

[0083] 多运动段轨迹起始点速度设计:

[0084] 多运动段为了提高运行时的速度连续性,并防止因后续运动段位移不足而导致产生过大的加速度,需要提前预估每个运动段的终点速度,并将前一运动段的末速度转化为后一运动段的初始速度,并且对于不同的运动类型的过渡段,需要进行关节速度和线速度的转换。速度预估流程如图6所示;

[0085] 根据图6所示的速度预估方法,需要先预读所有的运动段,然后从后往前推导每个运动段的终速度,并且本段的终点速度等于下一段的起点速度。

[0086] 速度预估方法中限制条件包含了在加速度 $a$ 、本段的位移 $s$ 和末速度 $v_e$ 的限制下,起点速度 $v_b$ 需要满足:

$$[0087] \quad vb \leq \sqrt{ve^2 + 2as} \quad (4)$$

[0088] 在相同运动段类型中位移的值可以直接转换,但是在关节运动段和笛卡尔空间运动段之间需要考虑关节空间和笛卡尔空间的互换。

[0089] 关节坐标转换为笛卡尔坐标采用截距法,在运动关节范围内选取多个点,转换为正解坐标后,求和每相邻点之间的距离得到预估距离 $\$$ ,易知预估距离 $\$$ 小于实际距离 $s$ ,所以求初始速度的限制如下:

$$[0090] \quad vb \leq \sqrt{ve^2 + 2as} \leq \sqrt{ve^2 + 2as} \quad (5)$$

[0091] 笛卡尔坐标转关节坐标通过运动反解,通过将运动段的起点和终点反解为在挂接坐标下表示的起点和终点,可以计算每个关节的位移,按(4)表示的方法计算角速度限制。

[0092] 基于曲率约束的最大速度控制方法优化

[0093] 在速度规划中,为保证不超出加速度的限制,需要计算样条的速度限制点即曲率最大点,优化速度规划。空间平滑曲线方程由参数方程 $x=x(t)$ ,  $y=y(t)$ ,  $z=z(t)$ 组成,向量和加速度向量为:

$$[0094] \quad \begin{cases} v = \{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\} = \{x1, y1, z1\} \\ a = \{\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}\} = \{x2, y2, z2\} \end{cases} \quad (6)$$

[0095] 根据空间曲率计算方法计算出曲率半径:

$$[0096] \quad r = |v|^3 / \sqrt{|a|^2 |v|^2 - (v \times a)^2} \quad (7)$$

[0097] 化简计算曲率半径为:

$$[0098] \quad r = \frac{\sqrt{(y1z2 - z1y2)^2 + (x1z2 - z1x2)^2 + (y1x2 - x1y2)^2}}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \quad (8)$$

[0099] 针对由四个控制点 $P0$ 、 $P1$ 、 $P2$ 和 $P3$ 构成的三阶贝塞尔曲线 $P$ ,一阶贝塞尔函数和二阶贝塞尔函数为:

$$[0100] \quad \begin{cases} \dot{P} = 3(1-t)^2(P1 - P0) + (1-t)t(P2 - P1) + 3t^2(P3 - P2) \\ \ddot{P} = 6(1-t)(P2 - 2P1 + P0) + 6t(P3 - 2P2 + P1) \end{cases} \quad (9)$$

[0101] 对于任意一点 $t$ ,代入上式中得到 $(x1, y1, z1) = \dot{P}$ 和 $(x2, y2, z2) = \ddot{P}$ 。将 $x1, x2, y1, y2, z1$ 和 $z2$ 代入曲率半径计算公式中即可得到曲率半径。

[0102] 在确认曲率半径的计算方法后,需要计算曲线段上最小曲率半径所在位置。常用方法为在曲线段上均匀采样多个点,然后通过比较选择最小值对应点,然而此种方法精度不高,会对最优位置的计算存在偏差。本小节通过遗传寻优算法中的一种PSO算法(粒子群算法)来解决寻找最优曲率点的问题。

[0103] PSO算法从随机值出发,不断迭代寻找最优值,主要在于构造适应度函数。适应度函数与优化问题有关,根据优化模型来构造,对于最小曲率半径寻优问题选择式(8)作为适应度函数,评价每个点补偿值的好坏,具体流程如图7所示。

[0104] 选择四个控制点,构造贝塞尔曲线通过仿真得到适应度值的变化示意图8。

[0105] 超过6次迭代计算后,适应度值不变,所以当参数因子等于0.607315时,最小曲率半径等于17.0705mm。在保证其他条件不变的前提下,改变最大迭代次数,对比不同数据,通过多次实验,针对最小曲率半径寻优问题设置粒子数量 50,精度为0.01,以及最大迭代次数为10时,计算速度较快,能够避免PSO算法的复杂迭代,能够高效的得到最优解决。

[0106] 在最小曲率半径点需要满足 $v \leq \sqrt{ar}$ ,如果按照规划完整运动所采用的方法,样条各点的速度都会不大于最小曲率半径点规定的速度,这会限制机器人末端速度,同时不满足时间最短规划,所以针对已经求出最小曲率半径的样条速度规划,需要针对最小曲率半径点做出优化。

[0107] 优化方法具体过程为:以最小曲率半径点作为参考将运动段分为前后两段,在考虑最小曲率半径点速度限制的前提下,采用单段最短时间运动规划方法规划前后两段位置速度和姿态速度;选择位置规划速度和姿态规划速度中的最长时间,并且通过等比例放大时间通过给定时间规划同步位置和姿态。

[0108] 通过分段规划然后同步的方法能够有效避免因为曲率半径限制导致整个运动段运行时间过长的问题。

[0109] 基于S型加减速的运动段起始速度优化

[0110] 梯形加减速速度曲线的一阶导数不连续,也就是加速度存在突变,在机器人末端进行高速运动时,由于加速度的突变,会对机器人产生冲击。本小节通过对梯形加减速前后段进行S型曲线优化,使用满足加速度和加加速度均连续的高次速度曲线 $P(t)$ ,避免梯形加减速产生冲击。

[0111] 建立S型曲线位移方程 $P(t)$ 需要已知梯形加减速加速段的初速度为 $v_b$ ,终速度为 $v_e$ ,加速时间为 $T$ 。在建立参数方程时,还需要考虑如下限制条件:在 $t=0$ 时刻,曲线的位移为0;曲线终止时,S型曲线的位移等于梯形曲线的位移 $(v_b+v_e)T/2$ ;在曲线开始和终止时刻,曲线对应的速度即一阶导数需要等于梯形加减速的初速度和终止速度 $v_b$ 和 $v_e$ ;并且在开始和终止时刻,为了避免冲击,曲线 $P(t)$ 的加速度和加加速度必须保证为0。所以曲线 $P(t)$ 在满足以上8个条件的情况下,需要建立7次曲线方程如下:

$$[0112] \quad P(t) = At^7 + Bt^6 + Ct^5 + Dt^4 + Et^3 + Ft^2 + Gt + H \quad (10)$$

[0113] 将限制条件以公式表示为:

$$[0114] \quad \begin{cases} P(0) = 0 \\ P(1) = 2(v_b + v_e)T / 2 \\ \dot{P}(0) = v_b \\ \dot{P}(1) = v_e \\ \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = \ddot{P}(0) = \ddot{P}(1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

[0115] 联立以上两式解得 :

$$[0116] \quad \begin{cases} A = 0 \\ B = v_e - v_b \\ C = -3(v_e - v_b) \\ D = 2.5(v_e - v_b) \\ E = F = G = H = 0 \end{cases} \quad (12)$$

[0117] 通过以上求解的参数,能够建立S型曲线位移,优化梯形加减速。对比图如图10。

[0118] 通过对比两种速度图,可以直观的看出S型速度段在开始和结束段与匀速段的衔接加速度为0,减少了角速度突变而产生的运动冲击。

[0119] 基于截距法的过渡段插补方法:

[0120] 过渡段由样条曲线构造,在样条曲线的插补过程中,首先依据插补时间和速度规划信息计算已完成位移,然后将已完成位移转换为参数方程的输入值,最后计算得到样条上的插补点。其中完成位移与参数方程的输入难以转换,本发明基于截距法对样条曲线进行插补,构造弧长节点集,建立插补距离和插补位置之间的关系,简化转换过程,再通过二

分法快速对位置进行插补。

[0121] 弧长节点集合构造方法:

[0122] 对样条曲线进行插补前需要计算样条曲线的总位移,通过截距法均匀等分插补参数,在样条曲线上取点,累加曲线上的直线位移,以直代曲作为曲线的总位移,构造方法如图11所示。

[0123] 构造弧长节点 $S_i$ 集合的步骤为:首先在 $[0,1]$ 区间内均匀选择 $n$ 个点,第 $i$ 个点满足 $u_i = i/n$ ,再根据样条方程 $P_i = F(u_i)$ 计算对应的 $P_1, P_2, \dots, P_n$ ;然后构造弧长节点 $S_i$ 集合, $S_i$ 表示起点 $P_1$ 到 $P_i$ 的预估长度, $S_i$ 通过累加 $S_i = S_{i-1} + |P_i P_{i-1}|$ 计算。

[0124] 过渡段样条插补方法:

[0125] 样条插补根据插补时间计算插补点,然后反算成关节值。本发明在弧长节点集合与速度信息图的基础上,将插补时间映射成插补点的位姿。

[0126] 如图12所示:设当前的插补时间为 $t$ ,已完成位移为 $s$ ,首先根据插补时间确定对应的速度 $v$ ,从而计算已完成位移 $s = s + vT$ ;然后将位移映射成样条曲线参数方程输入值,在弧长节点集合中寻找当前位移所在区间 $i$ ,第 $i$ 个节点段满足 $S_i < s < S_{i+1}$ ,根据线性比例得到样条曲线参数方程输入值 $u$ ;最后根据 $u$ 和参数方程 $P = F(u)$ 计算插补点,再反算成对应多轴的关节值。循环以上过程,直至到达插补周期,在插补开始时初始时间和位移为0。插补流程图如图13所示。

[0127] 在样条曲线插补得过程中,需要得到插补点在弧长节点集合中的位置,并且弧长节点集记录的各分段样条节点的位移呈升序排列,因此适应于二分法对其进行快速定位。将分段样条集合中间两点的位移与查找位移进行比较,如果查找的位移位于两点之间,则查找成功;否则利用两点将原集合分成前、后两个集合,如果两点大于查找的位移,则进一步查找前一集合,否则进一步查找后一集合,直至成功。

[0128] 为提高查找效率,避免每次查找遍历所有弧长节点集合,查找过程中需要记录上一次查找的集合号,在下次查询开始之前,往后依次查询,如果本段和下一段不能满足条件,则开始二分查找,其具体的流程如图14所示。

[0129] 多运动段速度设计与优化方法仿真与分析:

[0130] 本实验对本文位姿速度设计方法、轨迹过渡速度优化方法以及S型曲线优化速度规划方法进行验证。设计参数采用HRT默认手动模式;当前关节最大速度: $20^\circ/\text{s}$ ;当前关节加速度: $500^\circ/\text{s}^2$ ;当前平动最大速度: $100\text{mm}/\text{s}$ (指令);平动最大加速度: $50\text{mm}/\text{s}^2$ 。

[0131] 位姿速度设计方法和同步方法仿真:

[0132] 通过采集插补器输出位姿数据,计算每个时刻机器人的位置,得到机器人位置和姿态速度和角速度图如图15所示。

[0133] 通过图形可知机器人运动由5段运动段组成,5-15(a)表示位置速度曲线,5-15(b)姿态轴角速度曲线,在每个运动段,速度图为梯形,表明本发明的速度规划有效。

[0134] 在最优时间规划下,位置的最大规划速度为 $100\text{mm}/\text{s}$ ,姿态的最大规划角速度为 $20^\circ/\text{s}$ ,图15(b)速度图上的最大速度相同,第2、3和4段都到达了最大速度,同时相对应的15(a)速度图的第2、3和4段运动段的最大速度不同且小于 $100\text{mm}/\text{s}$ ,但每个运动段的运行时间与图15(b)的时间相同,这是由于采用了同步规划,插补器选用了位置和姿态每个运动段的最大时间,同时对时间较短的段使用了给定时间规划,进而验证了同步规划,同理第1和5段

情况类似。

[0135] 多运动段轨迹过渡速度优化仿真：

[0136] 如图16所示构建过渡段，采集过渡段的速度信息，绘制优化后速度对比图形。在最小曲率点计算最小速度为27.3mm/s，通过基于曲率限制的过渡段优化方法，避免了全程速度小于27.3mm/s导致运行时间过长的问题，能够满足最短时间规划，提高了运动效率。

[0137] 对于同一运动段分别采用梯形和S型加减速，进行规划，得到速度对比图如图17。

[0138] 通过对比两种速度图，可以直观的看出S型速度段在开始和结束段与匀速段的衔接加加速度为0，减少了加速度突变而产生的运动冲击。

[0139] 本发明对多运动段速度规划方法进行了研究和仿真实验，首先基于梯形速度规划，对单运动段时间最优规划和给定时间两类规划进行了研究；其次针对过渡段的特点进行了基于曲率限制的速度优化，以及针对起始段进行了优化；最后通过仿真验证了多运动段速度规划的可行性以及两种优化方法对时间效率的提升。

[0140] 以上显示和描述了本发明的基本原理和主要特征及本发明的优点。本行业的技术人员应该了解，本发明不受上述实施例的限制，上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理，在不脱离本发明精神和范围的前提下，本发明还会有各种变化和改进，这些变化和进步都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

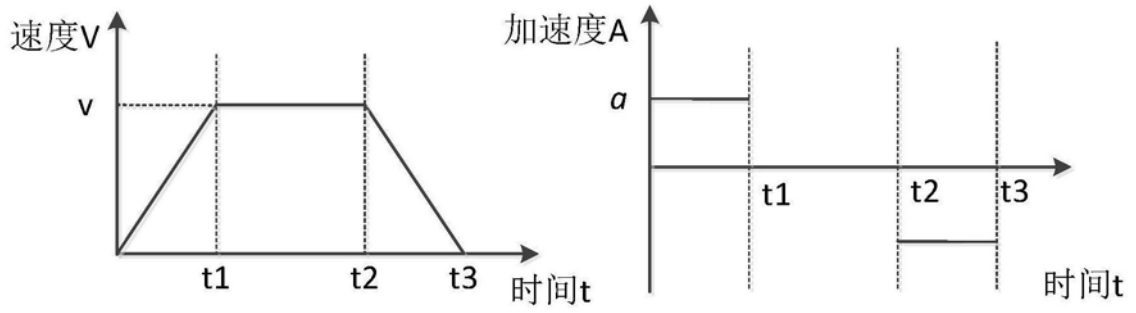


图1

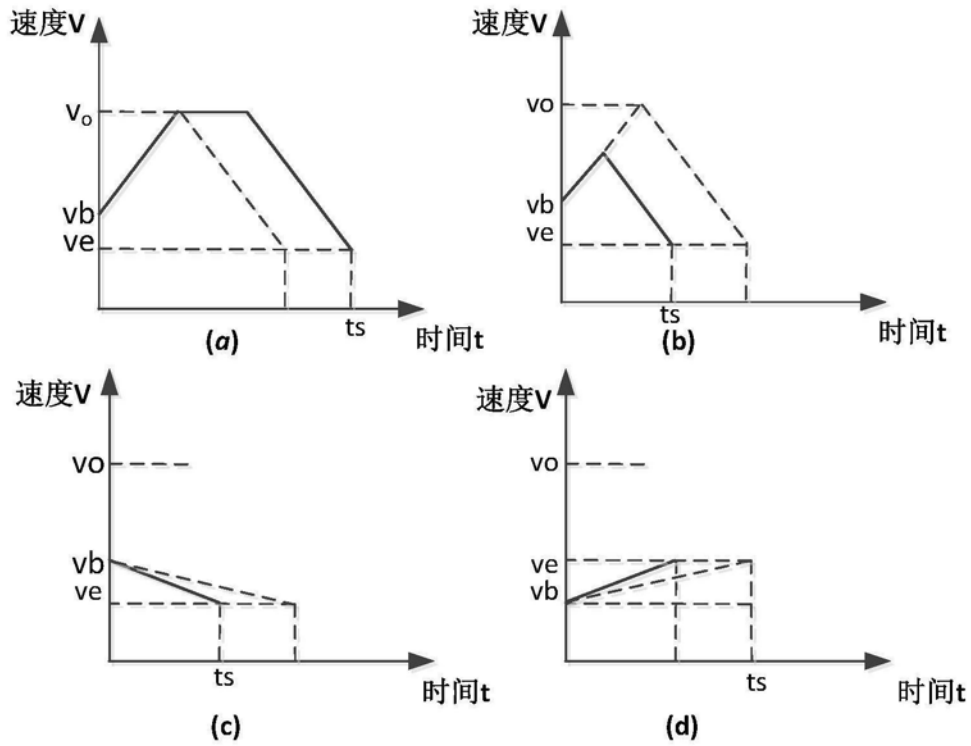


图2



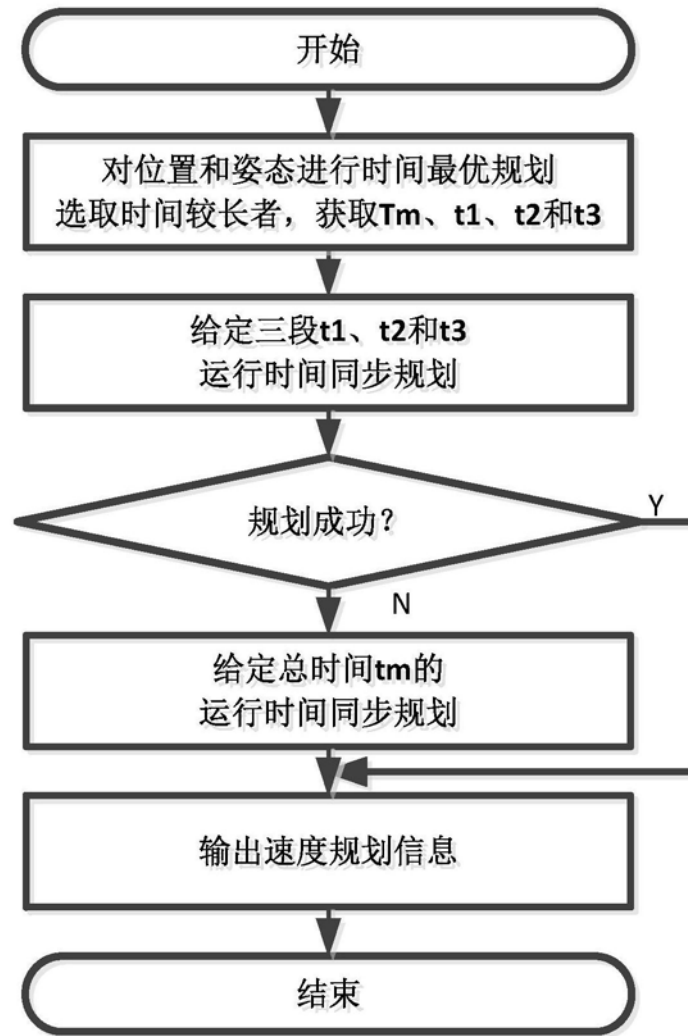


图3

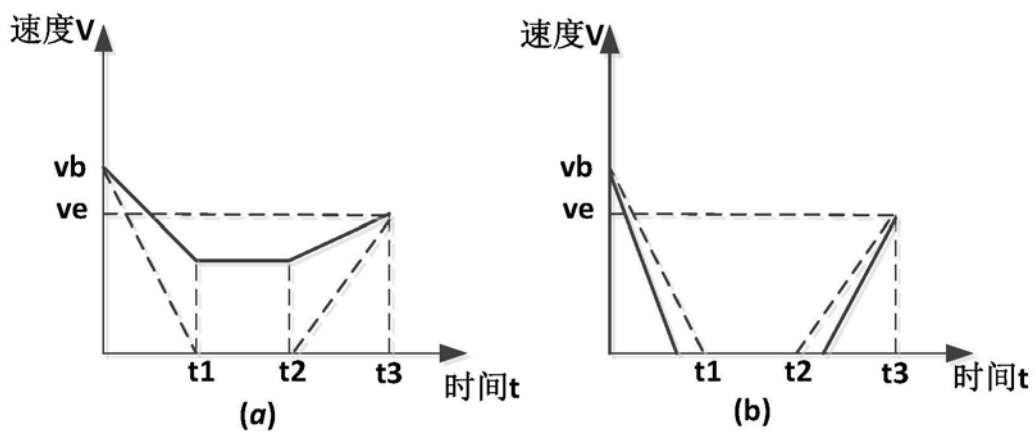


图4

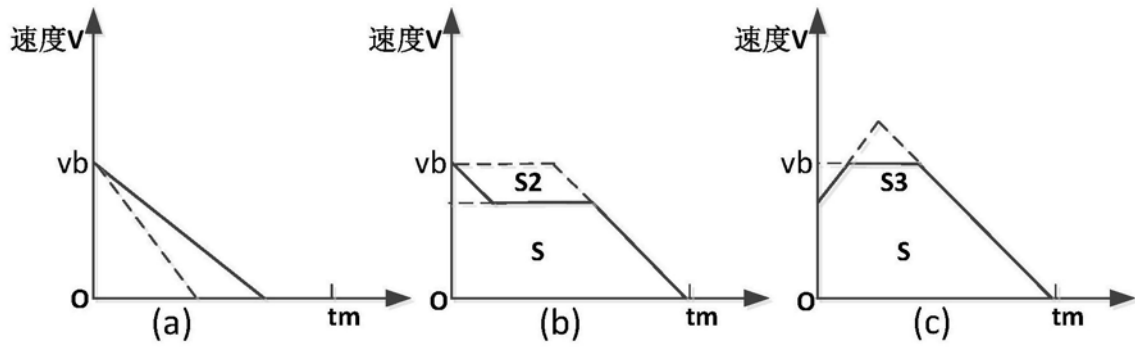


图5

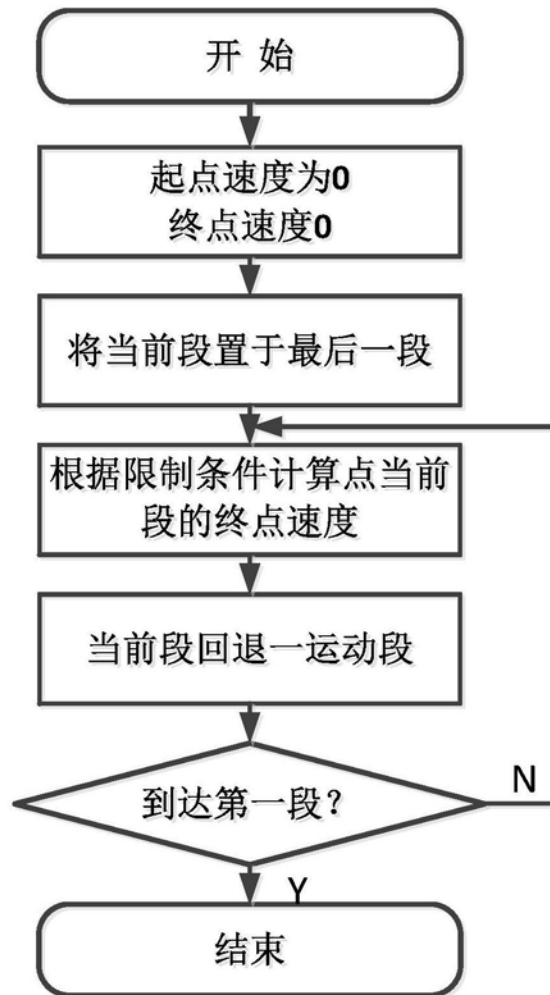


图6

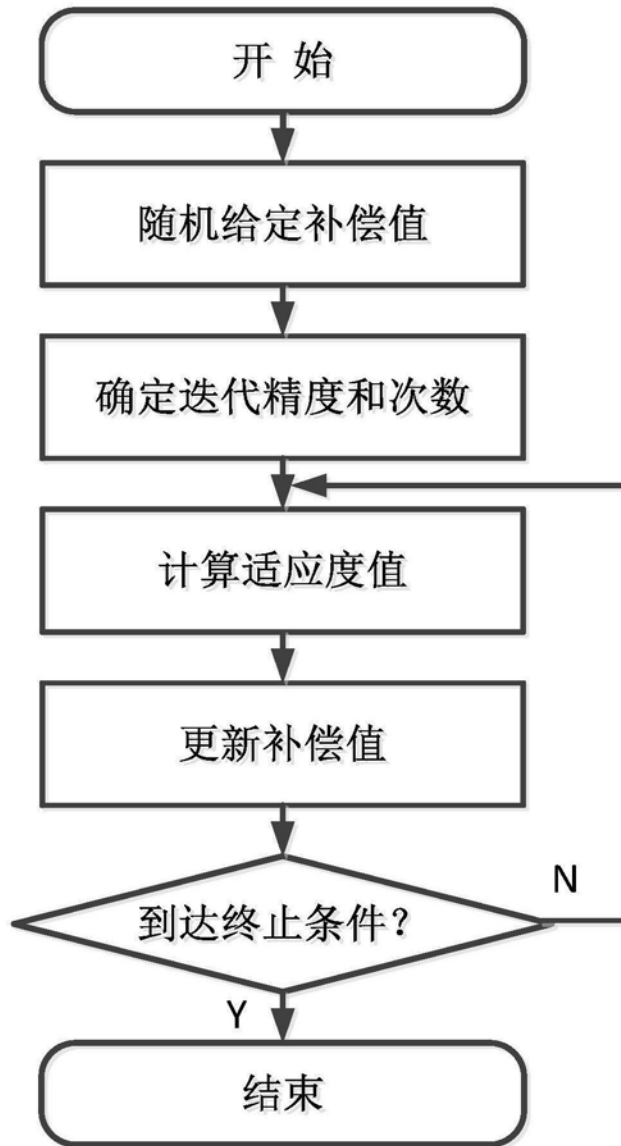


图7

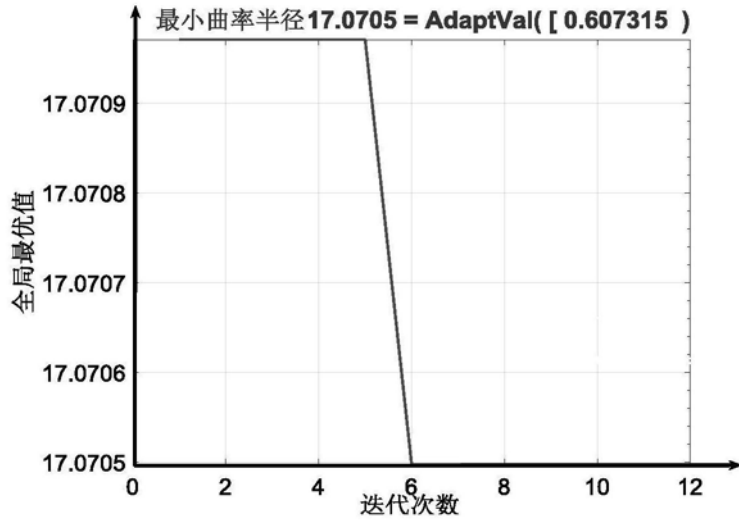


图8

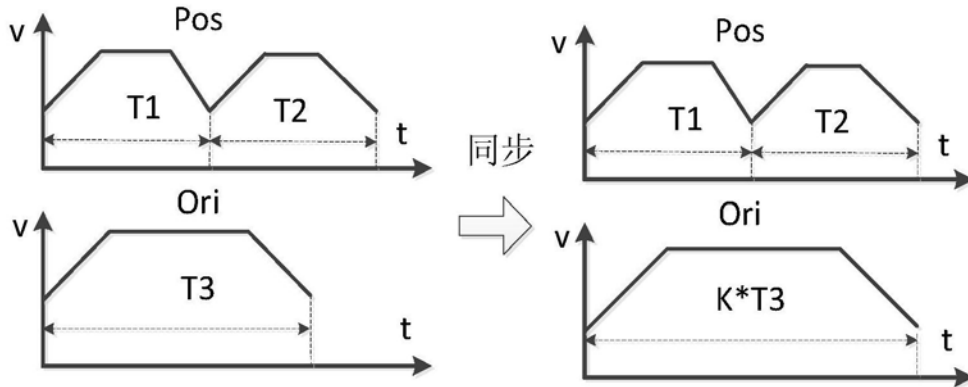


图9

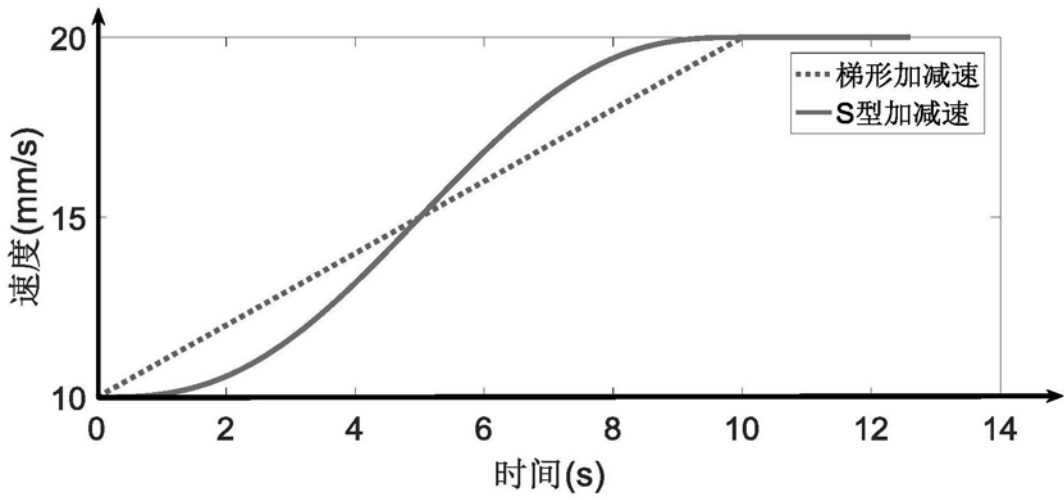


图10

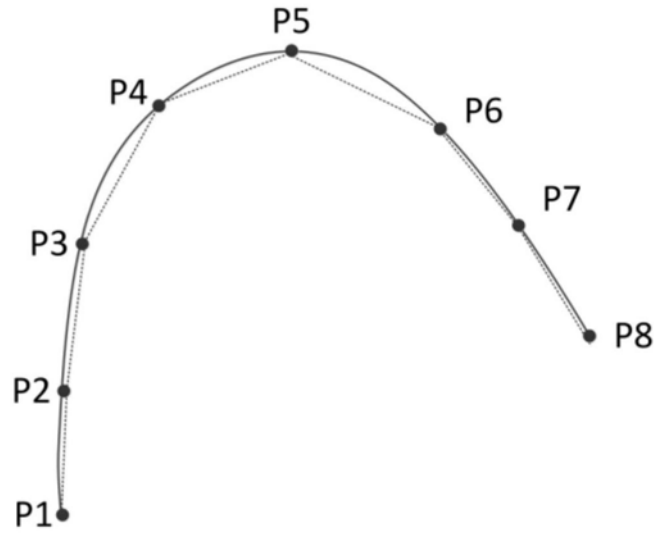


图11

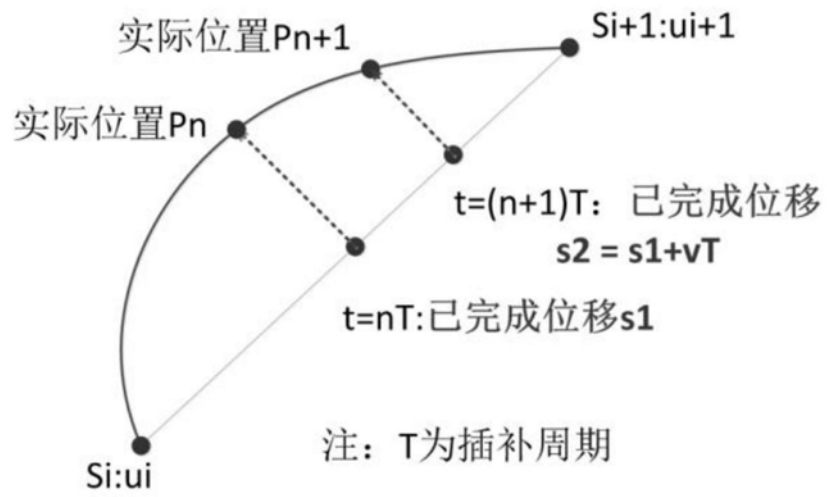


图12

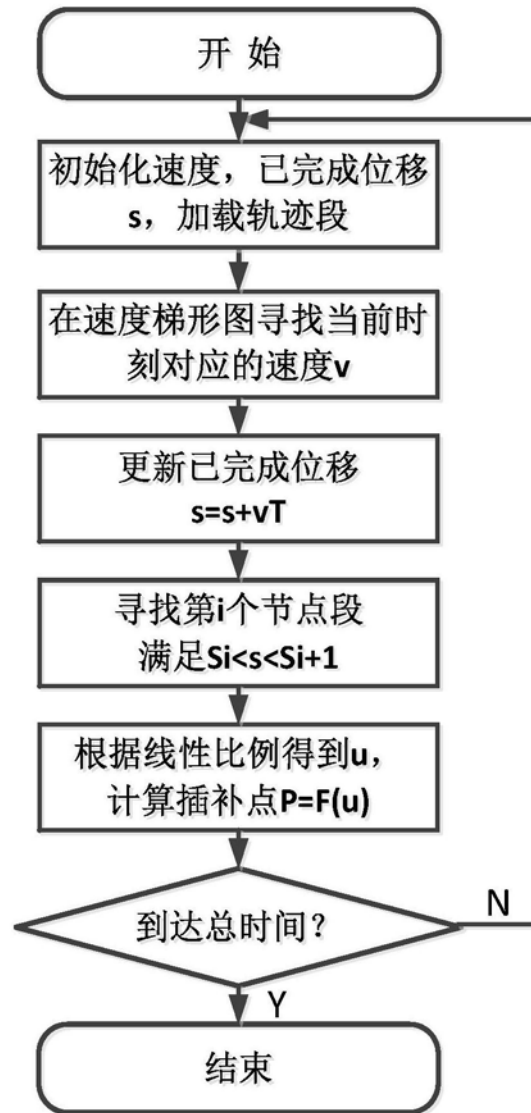


图13

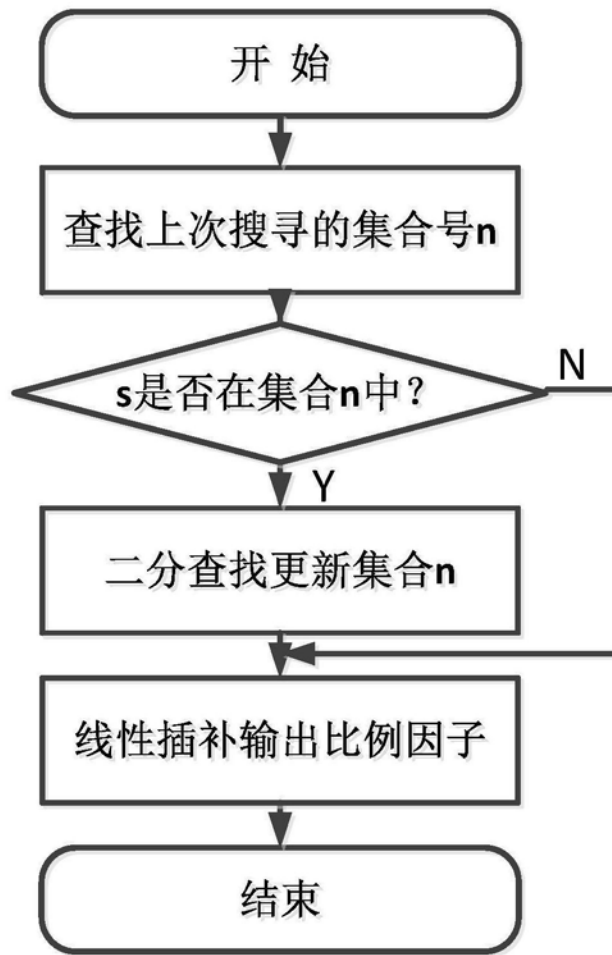


图14

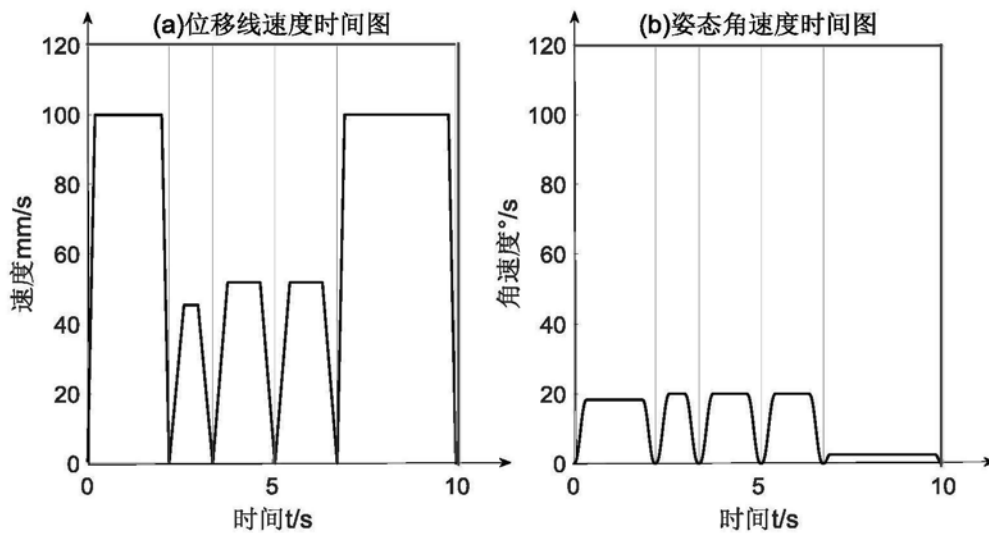


图15

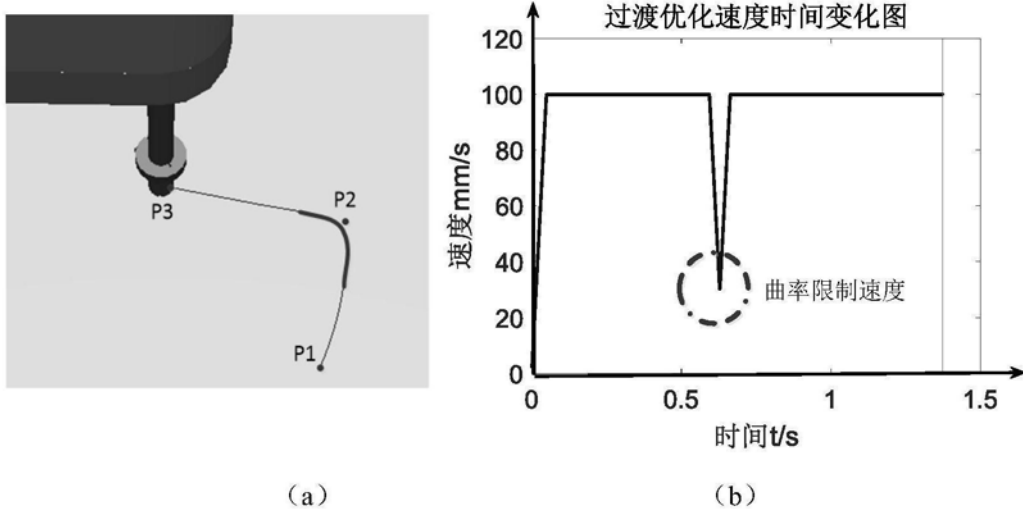


图16

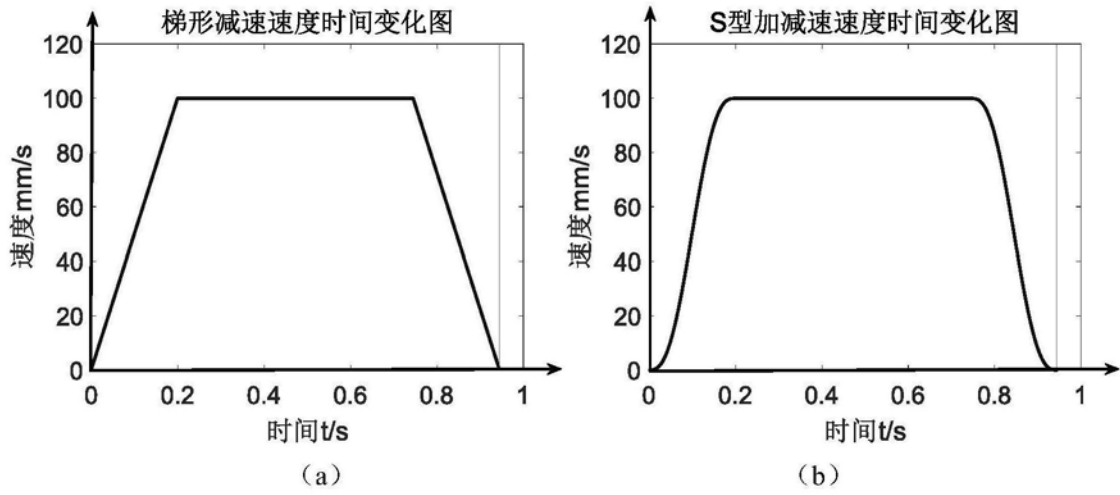


图17