

基于改进三次 B 样条的灌木修剪运动轨迹光顺算法研究

古 劲¹ 吴泰羽¹ 李传军² 张 宾¹ 张亚伟¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 天津中德应用技术大学机械工程学院, 天津 300350)

摘要: 针对复杂造型灌木修剪过程中机器人末端运动平稳性差的问题,提出了一种基于双切矢连续的改进三次 B 样条轨迹光顺算法。首先建立了线性轨迹拐角过渡模型,利用 B 样条曲线局部性质构造衔接点切矢约束,使初始不平滑的修剪轨迹经光顺处理后可达到 G²连续;其次构建平面多段轨迹在不同光顺算法下的过渡曲线,经对比分析,本算法所构造的过渡曲线在相同逼近误差下,相比传统圆弧过渡算法曲率极值降低 40.5%,相比传统三次 B 样条过渡算法在衔接点处曲率更加连续,整体光顺效果更优;最后为验证算法对空间修剪轨迹的光顺效果,建立了 5 轴关节机器人模型进行鸭形轨迹修剪仿真,结果表明本算法可使机器人末端速度极值提升 13.5%,加速度极值降低 86.9%,机器人各关节运动更平稳,验证了本算法在复杂修剪轨迹光顺方面的可行性与有效性。

关键词: 灌木修剪; 运动轨迹; 三次 B 样条; 双切矢连续; 曲线插补; 轨迹光顺

中图分类号: TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0089-09

Trajectory Fairing Algorithm for Shrub Pruning Based on Improved Cubic B-spline

GU Jin¹ WU Taiyu¹ LI Chuanjun² ZHANG Bin¹ ZHANG Yawei¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical Engineering, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor stationarity of robot end motion in the process of complex shape shrub pruning, an improved cubic B-spline trajectory fairing algorithm based on double tangent vector continuity was proposed. Firstly, the transition model of linear trajectory corner was established. The tangent vector constraint of connecting point was constructed by using the local properties of B-spline curve, so that the initial unsmooth pruning trajectory can be G² continuous after fairing. Secondly, the transition curves of planar multi-segment trajectories under different fairing algorithms were constructed. Through comparison and analysis, under the same approximation error, the curvature extreme value of the transition curve constructed by this algorithm was 40.5% lower than that of the traditional arc transition algorithm. Compared with the traditional cubic B-spline transition algorithm, the curvature of the transition curve constructed by this algorithm was more continuous and the overall fairing effect was better than that of the traditional cubic B-spline transition algorithm under the same approximation error. Finally, in order to verify the fairing effect of the algorithm on spatial pruning trajectory, a 5-axis joint robot model was established for duck-shaped trajectory pruning simulation experiment. The results showed that the algorithm can increase the extreme velocity at the end of the robot by 13.5%, reduce the extreme acceleration by 86.9%, and make the joints of the robot move more smoothly. The results verified the feasibility and effectiveness of the algorithm in the fairing of complex pruning trajectories.

Key words: shrub pruning; trajectory; cubic B-spline; bilateral tangent vector continuity; curve interpolation; trajectory fairing

收稿日期: 2021-07-02 修回日期: 2021-08-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701501)

作者简介: 古劲(1994—),男,博士生,主要从事农业机器人控制研究,E-mail: gujincan@163.com

通信作者: 张宾(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人技术及数控技术研究,E-mail: zhangbin64@cau.edu.cn

0 引言

目前适用于圆球形、方形、柱面等简单造型的灌木修剪设备,如车载式修剪机^[1]、圆盘式修剪机器人^[2-3]、往复式修剪机械臂^[4]等已能实现基本的修剪任务,极大地提高了修剪效率和修剪质量,节约了劳动成本^[5]。然而随着人们对园林灌木的功能不断提高,复杂形状灌木的修剪工作对机器人手臂的灵活性与运动平滑性提出了更高要求,一旦修剪过程出现不平稳的抖动,将会对灌木形状造成不可逆的损伤。

修剪轨迹的光顺性是影响机器人运动平稳性的一项重要指标,也是评价修剪机器人系统性能的重要指标之一。在笛卡尔空间轨迹规划中,若相邻轨迹线段的连接处切矢不连续,曲率发生突变,则会导致末端执行器通过此位置时产生加速度突变,容易引起系统振动,造成刚体冲击^[6-7]。随着轨迹规划算法的发展,线性路径的光顺问题得到了很好的解决,目前主要研究的轨迹光顺算法有3种:圆弧过渡法,如LI等^[8]、肖建新等^[9]通过在轨迹连接处添加圆弧过渡,使线性路径转换为高阶连续的平滑路径,提升了机器人末端的运动速度和平稳性;多项式曲线法,采用高次多项式来进行拐角曲线过渡^[10-12],这种方法能满足微小线段加工的光顺要求,实现多路径间轨迹平滑过渡;样条曲线法,何均等^[13]采用Ferguson样条曲线过渡方法使轨迹范围内的切线方向连续,实现相邻线段之间的 G^1 连续。雷利强^[14]、LIU等^[15]、ZHAO等^[16]采用三次B样条曲线进行轨迹光顺,消除轨迹切矢突变,使末端执行器在速度上有界且轨迹跟踪连续平滑。由于三次B样条曲线相比圆弧曲线及多项式曲线的通用性强,计算复杂度适中^[17-18],因此本文采用三次B样条曲线进行轨迹光顺,并对算法进行优化改进,以进一步提升光顺效果。

本文提出一种双切矢连续的改进三次B样条曲线光顺算法,通过建立轨迹拐角过渡模型,确定首末端切矢约束条件并进行三次B样条曲线插补,使过渡曲线的切矢与曲率连续,解决机器人沿初始轨迹运动平稳性差的问题,从而为提升灌木修剪机器人自动化修剪质量提供一种运动轨迹光顺方法。

1 修剪机器人模型

修剪机器人由五自由度UR3型关节机器人与末端修剪刀具构成,整体结构如图1所示。末端修剪刀具安装在机器人最后一个关节,选择圆盘式切割刀作为修剪刀具,使切割任务不受限于切割方向。

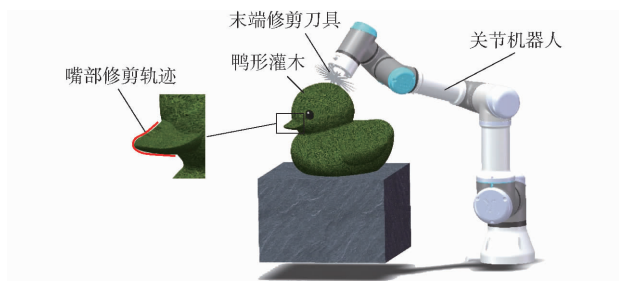


图1 修剪机器人模型

Fig.1 Pruning robot model

鸭形灌木的外形由多段不规则曲线构成,整体曲线存在多处拐角,以传统方式规划机器人末端修剪轨迹容易形成尖角使机器人末端运动不平稳,故需对这部分轨迹进行光顺处理,以取得更好的修剪效果。

2 改进三次B样条曲线光顺算法

2.1 轨迹拐角过渡模型

在线性连续轨迹拐角弧度较大的位置,建立如图2所示的三次B样条曲线过渡模型,初始轨迹由线段 $P_{k-1}P_k$ 和 P_kP_{k+1} 构成。根据几何连续性度量条件^[19],两条路径在连接点处仅满足 G^0 ,构造三次B样条曲线 $B_0B_1B_2B_3B_4$ 进行光顺过渡,首末端过渡段长度分别为 $l_{B_0B_1}$ 、 $l_{B_3B_4}$ 。

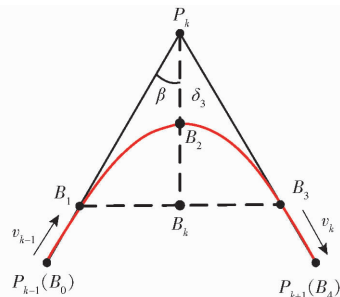


图2 三次B样条轨迹过渡模型

Fig.2 Cubic B-spline trajectory transition model

根据逼近误差条件求解过渡段长度,过渡曲线的逼近误差为: $\delta_3 = l_{P_kB_k} - l_{B_2B_k} = l_{P_kB_2}$, $\delta_3 < \delta_{\max}$, $\delta_{\max}$ 为最大逼近误差,根据已知条件可得

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos \frac{l_{P_{k-1}P_k} \cdot l_{P_kP_{k+1}}}{l_{P_{k-1}P_k} l_{P_kP_{k+1}}} \quad (1)$$

式中 β ——过渡转角,取为 $0 \sim \frac{\pi}{2}$

将逼近误差约束解析为表达式^[20] $\delta_{\max} \geq \frac{l_{B_0B_1}}{4} \sin \beta$, 则 $l_{B_0B_1} \leq 4\delta_{\max} \csc \beta$, 同理可求得 $l_{B_3B_4} \leq 4\delta_{\max} \csc \beta$ 。由此可知,过渡段长度 $l_{B_0B_1}$ 、 $l_{B_3B_4}$ 的取值范围为 $[0, 4\delta_{\max} \csc \beta]$, 在这个范围内,过渡段长度取值越大,过渡越平滑。

过渡曲线首末端切矢分别为 $\mathbf{v}_{k-1}$ 和 $\mathbf{v}_k$, 可分别计算得出

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{k-1} = \frac{\mathbf{l}_{p_{k-1}p_k}}{l_{p_{k-1}p_k}} \\ \mathbf{v}_k = \frac{\mathbf{l}_{p_k p_{k+1}}}{l_{p_k p_{k+1}}} \end{cases} \quad (2)$$

由此获得过渡曲线的两端切矢连续性约束条件:为构成 G^2 连续的平滑曲线,过渡曲线首端 B_0 应与 P_{k-1} 重合,末端 B_4 应与 P_{k+1} 重合,以保证位置连续;其次,首末端切矢应分别与轨迹两端的方向向量 $\mathbf{v}_{k-1}$ 、 $\mathbf{v}_k$ 保持一致。可通过调整控制顶点使其满足上述条件,根据 B 样条曲线的局部性质,移动第 i 个控制点最多影响 (u_i, u_{i+k+1}) 区间内的部分曲线,对其余曲线部分不产生影响。

2.2 基于切矢连续约束的三次 B 样条曲线插补

以构造 G^2 连续的光顺过渡轨迹为目标,给定一组数据点,共有 n 个型值点,根据线性路径拐角处的切矢边界约束,确定三次 B 样条曲线首末端切矢条件,并对反求得到的曲线上的点进行插补计算,最后得到在轨迹衔接处满足 G^2 连续性的过渡曲线。

本文设计的三次 B 样条曲线插补算法流程如图 3 所示。

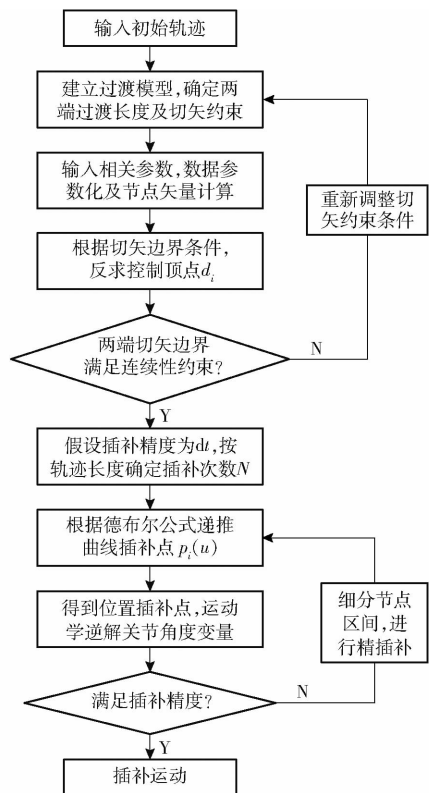


图 3 过渡曲线插补算法流程图

Fig. 3 Flow chart of transition curve interpolation algorithm

具体步骤如下:

(1)数据参数化与节点矢量计算。本文采用规

范积累弦长法进行型值点参数化,可避免数据点不均匀而导致的打圈、自交等问题^[21],给定 n 个型值点数据 $p_i(i=0,1,\cdots,n)$,将有 $n+2$ 个控制顶点,首末节点重复度 $r=k+1$,共有 $n+k+3$ 个节点, k 为曲线次数。三次 B 样条曲线首末节点重复度为 $k+1=4$,其余节点规范分布,则

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{n+2} = u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = 1 \\ u_i = u_{i-1} + |\Delta p_{i-1}| / \sum_{i=1}^n |\Delta p_{i-1}| \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \Delta p_i = p_{i+1} - p_i \quad (4)$$

式中 u_i ——第 i 个节点值

Δp_i ——弦线矢量

将型值点数据 p_i 代入式(3),可求得参数域 $u \in [u_0, u_{n+5}]$ 内的节点矢量 $\mathbf{U} = [u_0, u_1, \cdots, u_{n+5}]$ 。

(2)根据切矢边界条件确定首末端切矢条件,反算控制顶点。将节点值代入方程

$$\begin{cases} p(u_i) = \sum_{j=i-3}^{i-1} d_j N_{j,3}(u_i) = p_{i-3} \quad (i = 3, 4, \cdots, n) \\ p(u_{n+1}) = \sum_{j=n-2}^n d_j N_{j,3}(u_{n+1}) = p_{n-2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $p(u_i)$ ——型值点数据

d_j ——未知控制顶点

$N_{j,3}(u)$ ——B 样条基函数

方程(5)为三次 B 样条曲线参数表达式^[22],共含有 $n-1$ 个方程和 $n+1$ 个未知控制顶点,过渡曲线为开曲线,同时首末控制顶点与给定首末数据点相重合,可解出两个方程,未知控制顶点数下降为 $n-1$ 个,方程数下降为 $n-3$ 个。需再增加两个边界条件,为计算方便,将余下方程改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & a_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ & & c_{n-1} & a_{n-1} & b_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{n-2} \\ e_{n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} a_i = \frac{\Delta_{i+2}^2}{\Delta_i + \Delta_{i+1} + \Delta_{i+2}} \\ b_i = \frac{\Delta_{i+2}(\Delta_i + \Delta_{i+1})}{\Delta_i + \Delta_{i+1} + \Delta_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+1}(\Delta_{i+2} + \Delta_{i+3})}{\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2} + \Delta_{i+3}} \\ c_i = \frac{\Delta_{i+1}^2}{\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2} + \Delta_{i+3}} \\ e_i = (\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2})p_{i-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中 Δ_i ——节点增量 $a_i、b_i、c_i$ ——切矢系数

对于过渡曲线为开曲线的情况,边界条件通常由两端点处的约束条件来提供^[23-24],在本研究中将切矢条件作为边界约束。矩阵(6)中首行元素与末行元素分别确定了首、末端切矢条件,根据2.1节中得到的线性轨迹两端方向向量求得

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_1 = \boldsymbol{p}_0 + \frac{\Delta_3}{3} \boldsymbol{v}_{k-1} = \boldsymbol{p}_0 + \frac{|\boldsymbol{u}_4 - \boldsymbol{u}_3|}{3} \frac{\boldsymbol{l}_{p_0 p_1}}{l_{p_0 p_1}} \\ \boldsymbol{e}_{n-1} = \boldsymbol{p}_{n-2} - \frac{|\boldsymbol{u}_{n+1} - \boldsymbol{u}_n|}{3} \frac{\boldsymbol{l}_{p_{n-3} p_{n-2}}}{l_{p_{n-3} p_{n-2}}} \end{cases} \quad (8)$$

矩阵(6)中的未知控制顶点数与方程数达成一致,可求出全部控制顶点。

(3)三次 B 样条曲线插补运算。以上计算确定了过渡曲线的节点矢量范围与控制顶点,可定义一条三次 B 样条曲线,根据德布尔算法^[25-26],对 B 样条曲线方程进行递推,公式为

$$p(u) = \sum_{j=0}^n d_j^{(l)} N_{j,3}(u) = d_{i-3}^{(3)} \quad (9)$$

其中

$$d_j^{(l)} = \begin{cases} d_j & (l=0) \\ (1-\alpha_j^{(l)})d_j^{(l-1)} + \alpha_j^{(l)}d_{j+1}^{(l-1)} & (l=1,2,3) \end{cases} \quad (10)$$

$$\alpha_j^{(l)} = \frac{u-u_{j+l}}{u_{j+4}-u_{j+1}} \quad (11)$$

式中 u ——参数值 l ——控制顶点数

假设插补精度为 dt ,由于首末节点具有重复度 $r=4$,故插补区间应选在 $u \in [u_3, u_{n+2}]$,此参数域内所有节点严格递增且不重复, $dt \geq \max(|u_{i+1}-u_i|)$ 时,参数域内的节点值分布满足插补精度要求,可直接将步骤(1)计算得出的节点矢量作为参数值进行下一步计算。

当 $\min(|u_{i+1}-u_i|) \leq dt < \max(|u_{i+1}-u_i|)$ 时,以二倍插补精度为插补阈值,判断参数域内节点分布是否符合插补要求,对于节点值增量大于插补阈值的部分,即 $|u_{i+1}-u_i| \geq 2dt$ 时,需进一步精插补,插补次数为 $m = \text{floor} \left[\frac{|u_{i+1}-u_i|}{dt} \right]$,精插补的节点值为 $u_j = u_i + jdt, j \in [0, m]$ 。代入式(9)求出插补位置点。

当 $dt < \min(|u_{i+1}-u_i|)$ 时,表明参数域内的节点分布过于稀疏,对符合 $|u_{i+1}-u_i| \geq 2dt$ 条件的节点区间,同样需要进一步细分后进行精插补。将插补后的参数值依次代入式(9),经递推计算得到最后的控制顶点 $d_{i-3}^{(3)}$ 即为三次 B 样条曲线上点 $p(u_i)$,随着参数值在定义域内连续变化,最终求得

所有 $p(u)$ 值扫描得到整条 B 样条曲线,即为在切矢边界约束下满足 G^2 连续性要求的三次 B 样条过渡曲线。

3 平面多段轨迹间光顺过渡

曲率分布是评价曲线光顺性的关键指标,构建平面轨迹在不同光顺算法下的过渡曲线,根据参数曲线的曲率公式为

$$\kappa(t) = \frac{\|\boldsymbol{C}'(t) \times \boldsymbol{C}''(t)\|}{\|\boldsymbol{C}'(t)\|^3} \quad (12)$$

其中 $\|\boldsymbol{C}'(t)\| = \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t) + z'^2(t)}$ (13)

式中 t ——参数值
 $\boldsymbol{C}'(t)$ ——曲线一阶导矢
 $\boldsymbol{C}''(t)$ ——曲线二阶导矢

通过绘制斜率图与曲率图分析不同过渡曲线的光顺效果,验证本文所提出的改进三次 B 样条轨迹光顺算法的可行性。构建一条由 3 段线性线段连接形成的平面轨迹,如图 4 所示,初始轨迹中含有两处拐角,从斜率变化曲线可以看出,拐角处的斜率产生了突变,在曲率变化图中出现两处曲率峰,曲率极值在圆圈标注位置达到了 35.78,表明原始轨迹的光顺性较差。这是由于未经光顺处理的线性线段在拐角处仅满足 G^0 连续,其切矢与曲率均不连续,故造成了切矢突变与曲率突变。

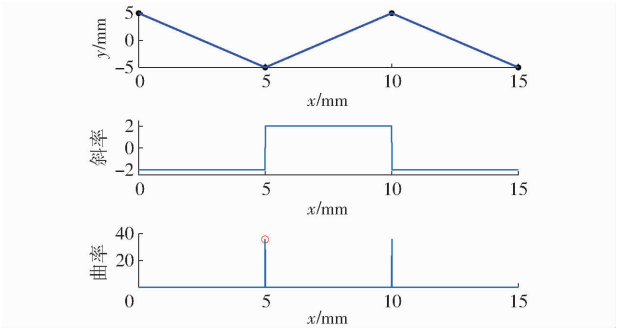


图 4 线性连接的平面轨迹

Fig.4 Linearly connected plane trajectory

在轨迹拐角处构建圆弧过渡曲线,分别研究逼近误差极小时的圆弧过渡情况(图 5)和切矢连续时的圆弧过渡情况(图 6)。图 5 中虚线部分为构造的圆弧过渡曲线 I,该曲线优先满足逼近误差条件,逼近误差为 0.5 mm。由于圆弧构造方式的局限性,优先确定圆弧顶点位置后,与初始轨迹衔接的两端点仅能保证位置连续。可以看出,过渡曲线 I 在衔接处的斜率和曲率均有突变,在衔接点位置依然出现两条曲率峰,曲率极大值为 8.81,相对初始轨迹的曲率极值下降 75.4%。这表明圆弧过渡曲线 I 相对初始线性轨迹平滑性有了一定提高,但从曲率变化曲线来看整体仍不光顺。

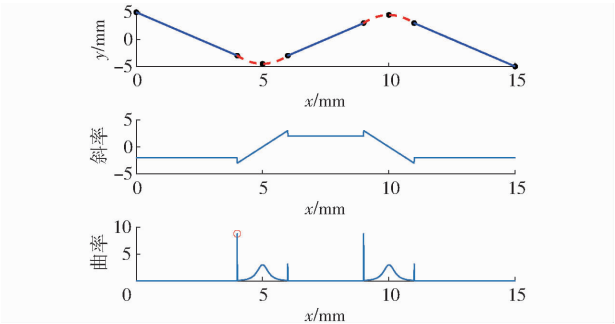


图 5 圆弧过渡曲线 I
Fig. 5 Arc transition curve I

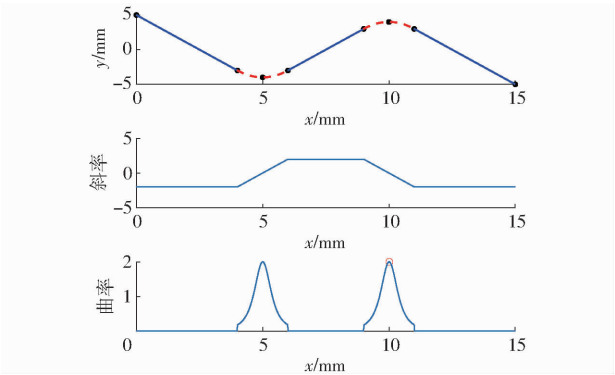


图 6 圆弧过渡曲线 II
Fig. 6 Arc transition curve II

图 6 中圆弧过渡曲线 II 优先满足了轨迹衔接点两端的切矢连续,可以看出其斜率变化与曲率变化均较为平缓,曲率极大值为 2.00,相对初始轨迹曲率极值下降 94.4%,表明该圆弧过渡方式消除了切矢突变与曲率峰值,整体满足 G^1 连续。但由于圆弧过渡曲线 II 两端切矢约束,其圆弧顶点与初始轨迹的逼近误差增大到 1 mm,在轨迹衔接点处,曲率依然存在突变,说明圆弧过渡曲线 II 的整体已较为光顺,但依然不满足 G^2 连续。

利用传统三次 B 样条方法构造过渡曲线,如图 7 所示,曲线与初始轨迹的逼近误差为 0.5 mm。从图中可知,传统三次 B 样条过渡曲线的曲率极大值为 4.39,相对初始轨迹的曲率极值下降 87.7%,

左右两个衔接点处的曲率峰值均低于相同逼近误差下的圆弧过渡曲线 I,从斜率变化曲线也可看出传统三次 B 样条过渡曲线与原始轨迹衔接更连续,表明传统三次 B 样条曲线在光顺效果上优于相同逼近误差下的圆弧过渡曲线,但依然未能消除衔接点处的曲率峰值突变。

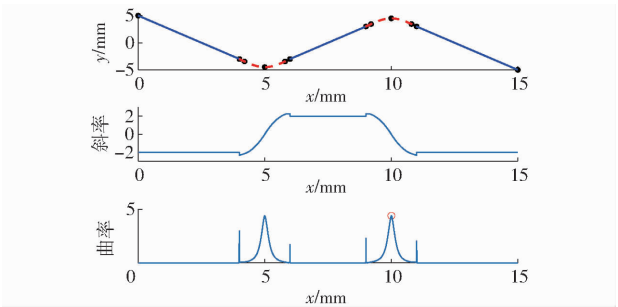


图 7 传统三次 B 样条过渡曲线
Fig. 7 Traditional cubic B-spline transition curves

采用本文提出的双切矢连续三次 B 样条曲线光顺算法,在图 4 中轨迹拐角处构造过渡曲线,如图 8 所示。从图中可看出,斜率与曲率变化曲线均连续无断点,不存在峰值突变,表明该算法可消除初始轨迹中的切矢突变与曲率突变,所构造的过渡曲线满足 G^2 连续。

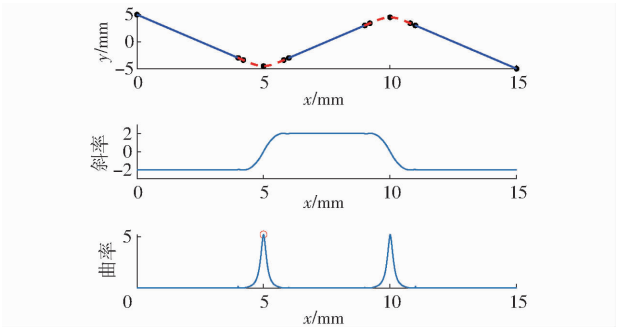


图 8 双切矢连续的三次 B 样条过渡曲线
Fig. 8 Cubic B-spline transition curves with continuous bilateral tangent vectors

为客观分析几种光顺算法的性能,分别计算各过渡曲线的曲率特征值,对比结果如表 1 所示。

表 1 各算法曲率特征值					
Tab. 1 Curvature eigenvalues of each algorithm					
曲线类型	点 A 曲率	点 B 曲率	点 C 曲率	曲率极大值	逼近误差/mm
初始线性轨迹	0	35.78	0	35.78	0
圆弧过渡曲线 I	8.81	2.99	3.16	8.81	0.50
圆弧过渡曲线 II	0.18	1.99	0.19	2.00	1.00
传统三次 B 样条过渡曲线	2.97	4.38	1.70	4.39	0.50
双切矢连续的三次 B 样条过渡曲线	0.01	5.24	0.06	5.24	0.50

注:点 A 和点 C 分别为过渡曲线左右衔接点,点 B 为过渡顶点。

从表 1 可以看出,本文提出的双切矢连续三次 B 样条过渡曲线的曲率极大值为 5.24,相对未经光

顺处理的初始轨迹曲率极值下降 85.4%,虽然圆弧过渡曲线在顶点处的曲率略低,但本算法构造的过

渡曲线在 A 、 B 两个衔接点处的曲率明显更接近于初始轨迹,最大逼近误差仅为 0.5 mm 。在相同逼近误差下,本算法所构造过渡曲线的最大曲率相比圆弧过渡曲线降低 40.5% ,相比传统三次 B 样条过渡曲线,在衔接点处的切矢与曲率更加连续。由此可见,本算法所构造的过渡曲线在保证逼近误差的前提下,相比传统算法取得了更好的过渡效果。

4 仿真

本文在 Matlab 环境下搭建机器人运动学模型,计算机配置为: Intel Core i5 CPU, 8 GB RAM, 通过编程分析在鸭形修剪实例中,机器人末端在笛卡尔空间运动轨迹下的速度及加速度变化,验证本算法对空间修剪轨迹的光顺效果。

4.1 机器人运动学模型

以鸭形景观绿植的修剪过程为例,在 Matlab 中利用 Robotics Toolbox 模块搭建机器人运动学模型,研究轨迹光顺性对机器人运动参数的影响。首先建立机器人连杆坐标系,如图 9 所示,根据连杆坐标变换确定其 $D-H$ 参数如表 2 所示,表中 α 、 a 、 d 、 θ 分别表示连杆扭角、连杆长度、连杆偏距和关节转角。编程获得如图 10 所示的机器人模型,本模型共有 5 个关节变量,连杆 6 作为延伸出的末端刀具,故 θ_6 取 0° 。

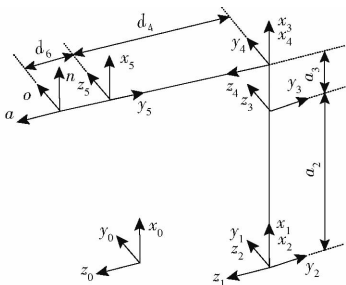


图 9 机器人连杆坐标系

Fig. 9 Robot connecting rod coordinate system

表 2 D-H 参数						
Tab. 2 D-H parameters						
连杆 编号 i	扭角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	长度 a_{i-1}	偏距 d_i	关节 转角 θ_i	关节 变量	常量
1	0	0	0	θ_1	Θ_1	$a_2 = 1\ 374\text{ mm}$
2	-90	0	0	θ_2	Θ_2	$a_3 = 70\text{ mm}$
3	0	a_2	0	θ_3	Θ_3	$d_4 = 1\ 223\text{ mm}$
4	90	a_3	d_4	θ_4	Θ_4	$d_6 = 110\text{ mm}$
5	-90	0	0	θ_5	Θ_5	
6	90	0	d_6	θ_6	0	

4.2 机器人末端运动分析

根据鸭形绿植的形状提取其主要特征点,规划一条由线性线段构成的初始轨迹,作为机器人末端

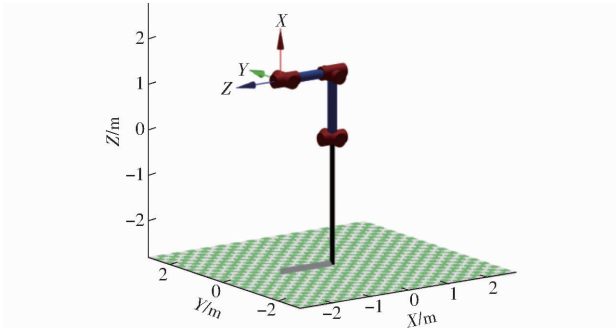


图 10 机器人运动学模型

Fig. 10 Robot kinematics model

运动路径,轨迹信息如图 11a 所示,插补精度 dt 为 0.02 mm ,步进增量为 0.001 mm 。将空间域的运动轨迹转换到时域,得到机器人末端在各方向随时间变化的位移、速度及加速度曲线。

从图 11 可以看出,当末端沿线性路径运动时,在鸭嘴及其他转角较大的位置速度曲线波动较大,加减速不连续且存在较多阶跃,速度极值为 206.2 mm/s 。加速度曲线的突变明显,在多处出现了骤升和骤降,加速度极值达到 $1.21 \times 10^4\text{ mm/s}^2$ 。这会对机器人造成较大的冲击和振动,是影响机器人末端仿形精度、造成零件磨损、使系统稳定性下降的主要原因。

采用同样的关节机器人模型,通过本文提出的轨迹光顺算法对鸭形修剪轨迹进行光顺处理,获得在各节点处平滑过渡的轨迹,仿真得到机器人末端沿光顺轨迹进行修剪时的位移、速度及加速度变化曲线如图 12 所示。

从图 12 可以看出,当沿光顺后的轨迹进行修剪运动时,原来在轨迹拐角处的速度阶跃被有效消除,速度上升与下降表现得连续且平滑,速度最大值为 234 mm/s ,相比光顺前提升 13.5% 。在加速度曲线上原来的多个突变消失,加速度变化连续,最大加速度为 $1.59 \times 10^3\text{ mm/s}^2$,与未光顺前相比降低了 86.9% ,下降了一个数量级。这表明经过光顺处理后的修剪轨迹对机器人运动的平稳性有了很大提升,沿各方向的速度与加速度平滑且无突变,末端在运动过程中不易发生抖动,保证了机器人进行修剪作业时的稳定性。

4.3 各关节运动分析

实际情况中除了考虑机器人末端稳定性外,还应考虑各关节电机加减速造成的冲击。分析光顺前后机器人各关节的角速度与角加速度变化情况,图 13 为沿光顺前后的鸭形修剪轨迹运动时机器人各关节的平均角速度对比,图 14 为各关节最大角速度对比。

从图 13 和图 14 中可知,沿光顺后轨迹运动时

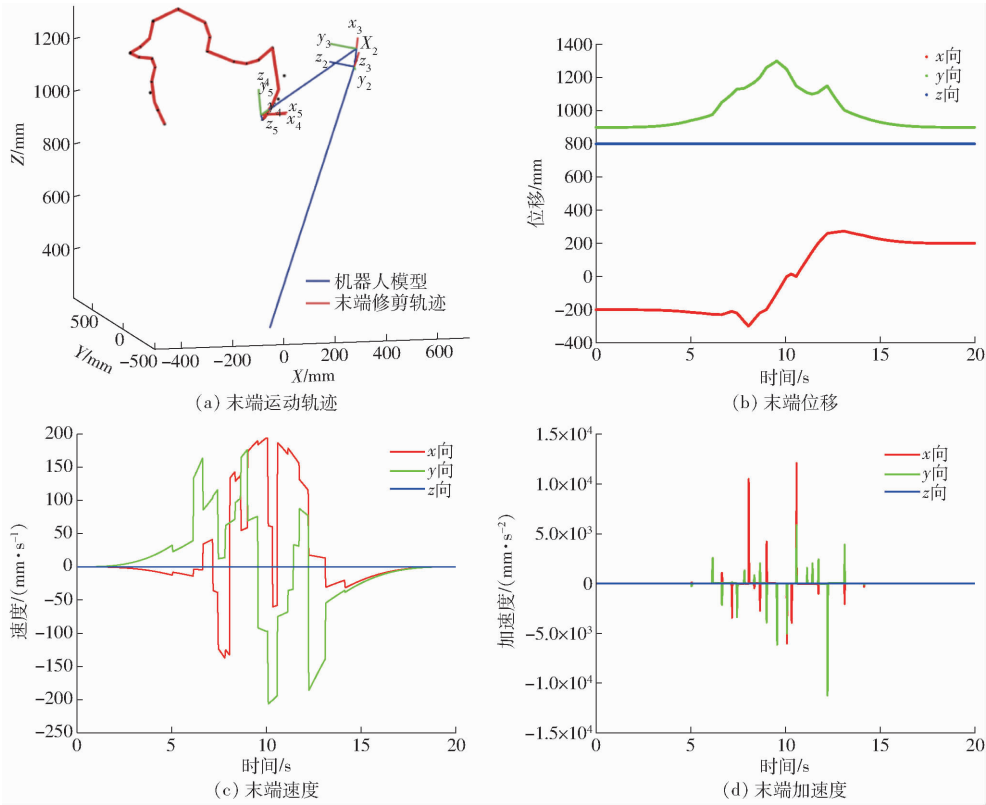


图 11 初始线性轨迹运动参数曲线

Fig. 11 Initial linear trajectory motion parameter curves

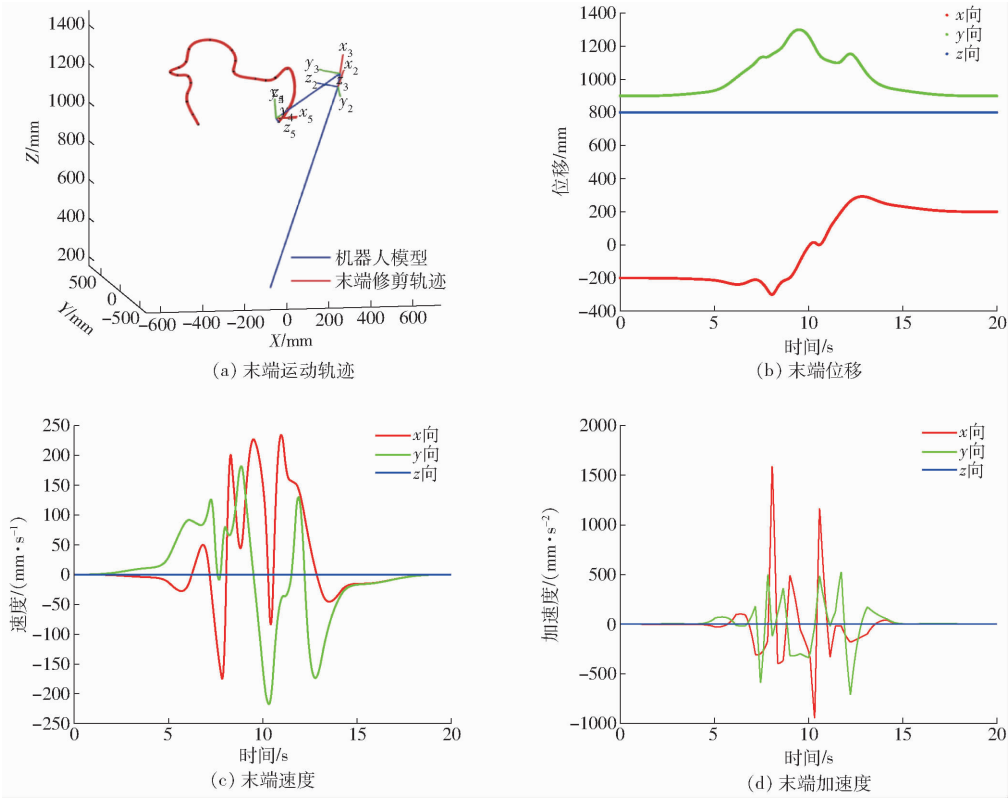


图 12 光顺后轨迹参数曲线

Fig. 12 Trajectory parameter curves after fairing

的关节平均角速度略高于光顺前,除关节 2 外,其余关节的最大角速度分别提升 29.4%、3.6%、29.4%、7.6%。原因可能为由于光顺后的轨迹加速

度更加平缓,使各关节电机加减速过程更为流畅,所以可以达到更高的速度,这点在机器人末端运动速度的对比分析中也有所体现。

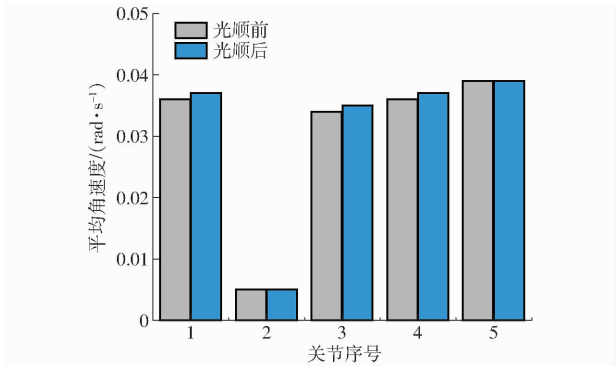


图 13 各关节平均角速度

Fig. 13 Average angular velocity of joint

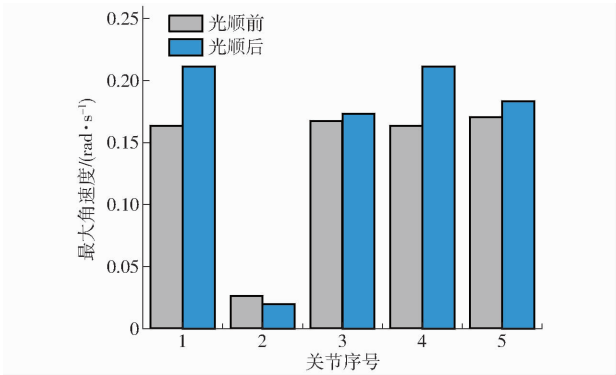


图 14 各关节最大角速度

Fig. 14 Maximum angular velocity of joint

图 15 为沿光顺前后鸭形轨迹运动时机器人各关节的平均角加速度对比,图 16 为轨迹光顺前后各关节最大角加速度对比。

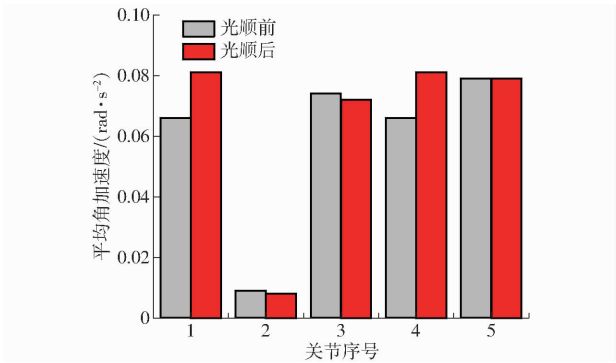


图 15 各关节平均角加速度

Fig. 15 Joint mean angular acceleration

轨迹光顺前后各关节的平均角加速度变化并不明显,说明轨迹光顺算法对机器人运动过程中的整体加减速性能未造成影响。从图 16 中可知,光顺后

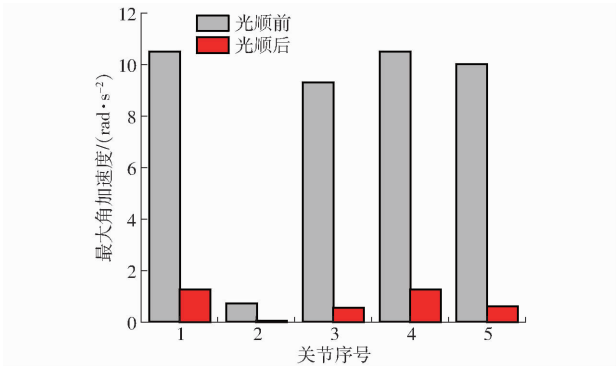


图 16 各关节最大角加速度

Fig. 16 Joint maximum angular acceleration

的各关节最大角加速度相比光顺前分别下降 87.9%、93.5%、93.9%、87.9% 和 93.9%,这印证了前面对各关节角速度分析的结果,最大角加速度的下降不仅使得各关节加减速更加平顺,最大角速度的提升有利于提高工作效率,且较小的关节角加速度可使电机运行更平稳。

5 结论

(1)为提升修剪机器人对复杂造型灌木修剪时的运动平稳性,提出一种基于双切矢连续的改进三次 B 样条轨迹光顺算法,在传统曲线光顺算法的基础上,增加过渡曲线两端切矢约束条件,同时对参数域内节点分布稀疏的部分进行二次精插补,使线性连接的空间多段路径在光顺处理后拐角处过渡更加平滑,可实现灌木修剪机器人对复杂造型的光顺轨迹规划。

(2)通过 Matlab 编程进行轨迹曲率分析与机器人运动仿真,结果表明,本文提出的轨迹光顺算法有效消除了轨迹衔接处的切矢突变与曲率突变,这是传统三次 B 样条过渡曲线无法达到的效果。在相同误差条件下,其曲率极值相比传统圆弧过渡算法降低了 40.5%。实例仿真结果表明,经本算法光顺处理后的空间轨迹可实现机器人末端及各关节的速度与加速度平滑,相比光顺前末端速度极值提升 13.5%,加速度极值下降 86.9%,角速度极值提升 29.4%,角加速度极值降低 87.9%,以上结果证明本算法可对复杂造型修剪轨迹取得较好的光顺效果。

参 考 文 献

[1] 李扬,杜帅,陈宝林,等. 高枝修剪机姿态协调控制与精准锯切定位[J]. 农业工程学报,2017,33(10):40-48.
LI Yang, DU Shuai, CHEN Baolin, et al. Attitude coordination control and accurately sawing-positioning of high-branch pruning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 40-48. (in Chinese)
[2] KALJACA D, VROEGINDEWEIJ B, HENTEN E. Coverage trajectory planning for a bush trimming robot arm[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 283-308.
[3] KALJACA D, MAYER N, VROEGINDEWEIJ B, et al. Automated boxwood topiary trimming with a robotic arm and integrated stereo vision[C]//RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019.

- [4] 韦锦,蒙艳玫,董振,等.绿篱苗木修剪机械手运动学分析及仿真[J].广西大学学报(自然科学版),2015,40(3):622-628.
WEI Jin,MENG Yanmei,DONG Zhen,et al. Kinematic simulation and analysis of hedge trimmer manipulator[J]. Journal of Guangxi University (Nat. Sci. Ed.), 2015,40(3):622-628. (in Chinese)
- [5] 郑永军,江世界,陈炳太,等.丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2020,51(11):1-20.
ZHENG Yongjun,JIANG Shijie,CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):1-20. (in Chinese)
- [6] 王斌锐,王涛,李正刚,等.多路径段平滑过渡的自适应前瞻位姿插补算法[J].控制与决策,2019,34(6):93-100.
WANG Binrui,WANG Tao,LI Zhenggang, et al. An adaptive look-ahead position and orientation interpolation algorithm for multi-path segments smooth transition[J]. Control and Decision, 2019, 34(6):93-100. (in Chinese)
- [7] GIBERTI H, SBAGLIA L, URGIO M. A path planning algorithm for industrial processes under velocity constraints with an application to additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43:160-167.
- [8] LI B Z, YOU P Y, HE J, et al. The transition algorithm based on parametric spline curve for high-speed machining of continuous short line segments[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1-4):245-254.
- [9] 肖建新,张辉,李炳燃,等.基于改进圆弧转接的直线段连续过渡算法[J].计算机集成制造系统,2019,25(9):2248-2255.
XIAO Jianxin, ZHANG Hui, LI Bingran, et al. Continuous transition algorithm of line segments based on improved circle transition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(9):2248-2255. (in Chinese)
- [10] 王旭浩,张华.多轨迹段平滑过渡的前瞻插补算法[J].计算机系统应用,2020,29(4):118-125.
WANG Xuhao, ZHANG Hua. Prospective interpolation algorithm for smooth transition of multi-trajectory segments [J]. Computer Systems & Applications, 2020,29(4):118-125. (in Chinese)
- [11] ERKORKMAZ K, YEUNG C H, ALTINTAS Y. Virtual CNC system. Part II. High speed contouring application [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(10):1124-1138.
- [12] ZHANG X, YU D, SONG T. Correcting and compressing interpolation algorithm for free-form surface machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9-12):1179-1189.
- [13] 何均,游有鹏,王化明.面向微线段高速加工的 Ferguson 样条过渡算法[J].中国机械工程,2008,19(17):2085-2089.
HE Jun, YOU Youpeng, WANG Huaming. A micro-line transition algorithm based on Ferguson spline for high speed machining (HSM) [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(17): 2085-2089. (in Chinese)
- [14] 雷利强.基于三次样条的自适应可控制轨迹规划技术[D].重庆:西南科技大学,2015.
LEI Liqiang. The adaptive and controllable trajectory planning technology based on cubic spline [D]. Chongqing: Southwest University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] LIU H, LAI X, WU W. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning for robot manipulators with kinematic constraints [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(2):309-317.
- [16] ZHAO H, ZHU L M, DING H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 65:88-98.
- [17] 李国洪,王远亮.基于 B 样条和改进遗传算法的机器人时间最优轨迹规划[J].计算机应用与软件,2020,37(11):215-223,279.
LI Guohong, WANG Yuanliang. Time-optimal trajectory planning of robots based on B-spline and improved genetic algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2020,37(11):215-223,279. (in Chinese)
- [18] 张礼林,王国瑾.带 B 样条曲率线的 NURBS 曲面设计[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(9):1692-1698.
ZHANG Lilin, WANG Guojin. Design of NURBS surface with a B-spline line of curvature [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018,30(9):1692-1698. (in Chinese)
- [19] 章虎冬.几何造型中自由曲线曲面光顺性研究[D].西安:西北工业大学,2005.
- [20] JIN Yongqiao, ZHAO Sheng, WANG Yuhan. An optimal feed interpolator based on G2 continuous Bézier curves for high-speed machining of linear tool path [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(3):121-130.
- [21] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [22] LI Chuanjun, ZHANG Bin, WANG Xuelei, et al. Triple parametric tool path interpolation for five-axis machining with three-dimensional cutter compensation [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9):1-8.
- [23] 赵晓运,宋绪丁.一种四次 NURBS 曲线反求控制顶点方法及应用[J].仪器仪表学报,2020,41(11):270-277.
ZHAO Xiaoyun, SONG Xuding. An inverse computation control vertex method for the quartic NURBS curve and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(11):270-277. (in Chinese)
- [24] 王爱增,何川,赵罡.基于曲率单调变化的空间非均匀三次 B 样条曲线的构造方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(1):140-146.
WANG Aizeng, HE Chuan, ZHAO Gang. A method of designing non-uniform cubic B-spline curve based on monotone curvature [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(1):140-146. (in Chinese)
- [25] 金永乔.微小线段高速加工的轨迹优化建模及前瞻插补技术研究[D].上海:上海交通大学,2015.
JIN Yongqiao. Research of trajectory optimization modeling and interpolation techniques with look-ahead for high speed machining of micro line segments [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [26] 赵晟,毕庆贞,王宇晗,等.基于 G2 连续 Bézier 曲线的刀具轨迹压缩算法[J].上海交通大学学报,2014,48(5):629-635.
ZHAO Sheng, BI Qingzhen, WANG Yuhan, et al. A data compression algorithm based on G2 continuous Bézier curves for tool paths [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(5):629-635. (in Chinese)