

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220614002

文章编号: 1672-9331(2023)05-0146-08

引用格式: 许艺严, 陈桂, 于昊, 等. 六轴串联机器人位姿同步的实时轨迹规划[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 146-153.

Citation: XU Yiyan, CHEN Gui, YU Hao, et al. Real time trajectory planning for configuration synchronization of 6-DOF robot[J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 146-153.

六轴串联机器人位姿同步的实时轨迹规划

许艺严¹, 陈桂², 于昊¹, 刁慧¹, 林心怡²

(1. 南京工程学院 机械工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)

摘要:【目的】为实现工业机器人末端的位型控制, 生成光滑末端位姿轨迹, 提出一种位姿同步的实时规划策略。【方法】首先, 基于非均匀B样条的路径规划方法, 并结合基于单位四元数的姿态规划方法, 拟合位姿示教点获取机器人末端位姿轨迹参数; 然后, 基于S形加减速曲线规划机器人末端切向速度; 最后, 根据曲线长度和曲线参数的对应关系, 实时计算末端位姿。【结果】规划所得机器人末端路径通过所有示教点, 曲线长度和参数的拟合误差小于0.01 mm, 末端速度连续, 在其他条件相同时, 球面样条插值下的姿态过渡更平滑。【结论】当机器人末端沿算法指定的位姿路径移动时, 末端速度可控, 关节过渡平稳, 这也验证了上述算法的有效性。

关键词: 单位四元数; 非均匀B样条; 工业机器人; 轨迹规划; 运动学分析; 姿态插值

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

0 引言

目前, 我国已是全球最大的工业机器人消费国, 但我国在工业机器人研发和应用等方面仍相对落后^[1]。随着技术的不断发展, 工业机器人逐渐能胜任更复杂的任务, 而传统的示教控制策略难以发挥机器人的性能优势^[2-3]。根据机器人的结构特点设计合适的控制方法, 是充分发挥工业机器人优势的基础。

笛卡尔空间下的轨迹规划方法可实现末端轨迹可控^[4-6], 常用的有直线、圆弧^[7-8]规划。该规划方法难以保证在拼接点附近轨迹的连续性, 因而仅适用于精度要求不高的场景。为改善这一状况, 在拼接点附近可采用短线拟合^[9-10], 即在两段曲线之间插入一段平滑曲线来实现曲线段之间的平滑过渡, 但这样做会改变轨迹形状。基于贝塞尔样条拟合路径拐点生成平滑路径的规划策略^[11], 可直接得到通过设定点的平滑末端轨迹。

但贝塞尔样条本身存在的缺乏局部修改、曲线阶次和需要通过的点的个数正相关等缺陷^[12]限制了其应用范围。非均匀有理B样条曲线(non-uniform rational B-spline, NURBS)可实现空间曲线、曲面的造型^[13], 但其形式复杂, 导致在速度规划时求取曲线长度的计算量较大^[14]。此外, 轨迹规划常需要经过指定点, 而权因子的引入加大了曲线控制点的计算难度^[15]。

针对现有笛卡尔空间下轨迹参数确定和实时计算困难的问题, 本研究提出一种基于非均匀B样条和单位四元数的实时轨迹规划策略。首先, 利用非均匀B样条生成平滑末端路径, 并基于辛普森公式路径分界点分段计算曲线长度; 然后, 采用三次Hermite插值, 获取曲线参数和曲线长度, 并基于S形加减速曲线实现机器人末端的加减速规划; 最后, 将基于单位四元数的姿态插值与路径规划的时间信息统一起来, 实现位姿同步规划。试验结果表明, 该方法能保证末端位姿平滑过渡, 并实现实时计算。

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-07-24; 接受日期: 2022-08-08

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_0935); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(20KJA460010)

通信作者: 陈桂(1973—)(ORCID: 0000-0003-0835-9977), 女, 教授, 主要从事运动控制技术、机器人技术、智能控制与仿真方面的研究。E-mail: chengui@njit.edu.cn

1 工业机器人轨迹规划

1.1 机器人运动学建模

本文以 IRS_300 机器人本体为试验载体,机器人结构模型和关节坐标系如图1所示。

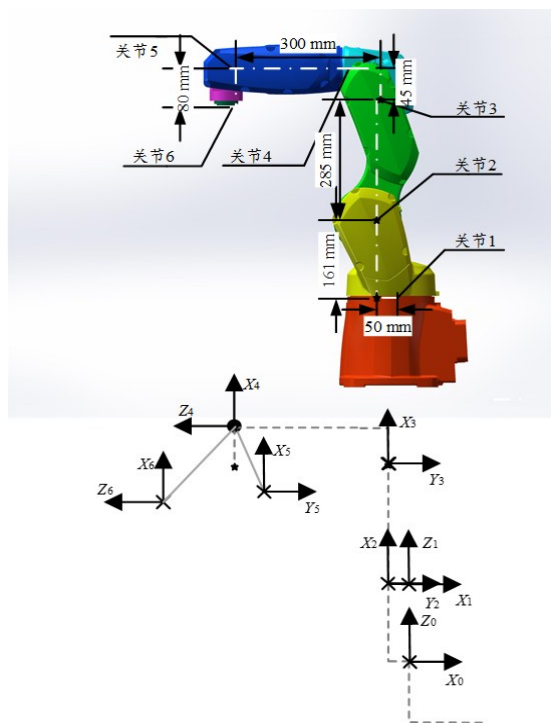


图1 机器人结构和关节坐标系

Fig. 1 Robot structure and joint coordinate system

在机器人关节处或关节附近建立标准 $D-H$ 坐标系,以确定机器人末端和基座的位姿关系。 $D-H$ 参数见表1,其中, θ 、 α 分别为绕 Z 轴、 X 轴的旋转角度, d 、 a 分别为沿着 Z 轴、 X 轴平移的距离。

表1 $D-H$ 参数

Table 1 $D-H$ parameters

关节序号	θ/rad	d/mm	a/mm	α/rad
1	0	161	0	0
2	$-\pi/2$	0	-50	$-\pi/2$
3	0	0	285	0
4	0	300	45	$\pi/2$
5	0	0	0	$-\pi/2$
6	0	0	0	$\pi/2$

1.2 机器人末端路径参数计算

采用非均匀 B 样条曲线拟合示教点生成末端路径。 p 次 B 样条曲线 $C(u)$ 的计算式为:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

式中: P_i 为曲线控制顶点; u 为参数, 其集合 $U = [u_0 \ u_1 \ \cdots \ u_{n+p+1}]$ 为节点矢量; n 为控制点的个数减1; $N_{i,p}(u)$ 为由参数 u 决定的 p 次 B 样条基函数。

B 样条曲线一般不经过控制顶点 P_i 。为确保规划所得路径通过型值点(示教点), 本研究使用全局插值策略反算控制顶点。

设示教点集 $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$, $n \geq 3$ 。根据示教点间的距离确定归一化参数 \bar{u}_k , 即:

$$\begin{cases} \bar{u}_0 = 0 \\ \bar{u}_n = 1 \\ \bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, k = 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $|Q_k - Q_{k-1}|$ 为相邻示教点 Q_k 、 Q_{k-1} 之间的距离; d 为所有相邻示教点之间距离的和。

为避免在求解过程中出现奇异方程组, 以及确保节点矢量能反映弦长特征, 本研究采用平均化策略生成节点矢量 U , 计算式见式(3), 试验中的节点矢量见式(4)。

$$\begin{cases} u_0 = \dots = u_p = 0 \\ u_{k-p} = \dots = u_k = 1 \\ u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} \bar{u}_i, j = 1, 2, \dots, n-p \end{cases} \quad (3)$$

$$U = [0.00 \ 0.00 \ 0.00 \ 0.00 \ 0.32 \ 0.53 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00 \ 1.00]$$

(4)

以示教点作为曲线分界点, 将 \bar{u}_k 和节点矢量 U 中的元素进行比较以确定非零基函数值。假设将控制点代入式(1)中计算所得结果为对应的型值点, 则可建立线性方程组并进行 LU 分解。

将控制点集 P 、节点矢量 U 和基函数 $N_{i,p}(u)$ 代入式(1), 得到空间路径的表达式。试验中实际采用的型值点和控制点的值见表2。

表2 试验中选取的型值点与控制点

Table 2 Data points and control points actually selected

关节序号	型值点	控制点
1	(208, 0, 373)	(208, 0, 373)
2	(135, 124, 537)	(-43.7, 52.4, 898)
3	(251, 185, 175)	(528, 436, -206)
4	(108, 34.6, 348)	(-291, -338, 840)
5	(139, -40.1, 525)	(413, 163, 429)
6	(298, -126, 136)	(298, -126, 136)

利用位置信息、节点矢量和型值点绘制末端路径, 如图2所示。由图2可知, 所绘制的路径平滑, 且通过所有的型值点, 满足任务要求。

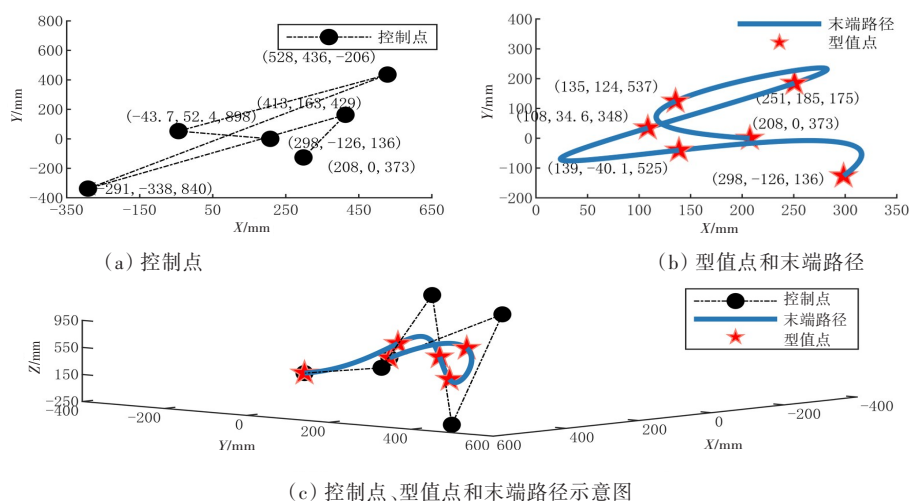


图2 控制点、型值点和末端路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of control points, data points and the end path

1.3 机器人末端加减速规划

机器人末端速度受惯性制约,为使机器人末端的轨迹符合预期,规划末端加减速是有必要的。当控制点已知时,曲线由参数 u 决定。为实现速度的实时控制,需确定参数 u 与曲线起点到参数 u 对应的曲线点之间路程 L 的关系。

1.3.1 基于自适应辛普森公式计算曲线长度

辛普森公式是一种近似求积分的方法,其表达式为:

$$I = \frac{(b-a)}{6} (f(a) + 4f(\frac{a+b}{2}) + f(b)) \quad (5)$$

式中: I 为曲线在区间 $[a, b]$ 中的长度; f 为曲线的导数。

对曲线的导数进行积分,可计算路径长度。不断细分求积区间,直至误差满足精度要求。

1.3.2 基于三次 Hermite 多项式计算参数 u

为确定周期内已走路程 g 所对应的参数 u 的变化情况,本研究采用三次 Hermite 多项式分段拟合曲线长度与参数 u 的计算式,即 $u = g(L)$ 。设第 j 段 $g(L)$ 的函数形式为:

$$g_j(L) = A + B(L - L_j) + C(L - L_j)^2 + D(L - L_j)^3(L - L_{j+1}) \quad (6)$$

式中: L_j 为 $u \in [0, u_j]$ 区间内曲线段的长度; A 、 B 、 C 、 D 为系数。

为求解方程系数 A 、 B 、 C 、 D ,需建立4个等式。易知区间端点 L_j 和 L_{j+1} 满足式(6),参数 u 的计算公式 $u = g(L)$ 与曲线长度的计算公式 $L = I(u)$ 互为反函数,两者对应点(为方便计算取端点)的导数互为倒数,由此可建立4个线性方程,以求解参

数 A 、 B 、 C 、 D 。

采用自适应辛普森法和三次 Hermite 多项式建立参数 u 和曲线段长度之间的关系。为验证拟合效果,对参数 u 在 $[0, 1]$ 区间内等距采样,利用自适应辛普森公式求解曲线段长度,再利用三次 Hermite 多项式二次求解参数 u ,最后将计算结果重采样,并绘制 $L = I(u)$ 和重采样后 $u = g(L)$ 曲线,比较两者的拟合误差。拟合结果如图3所示。

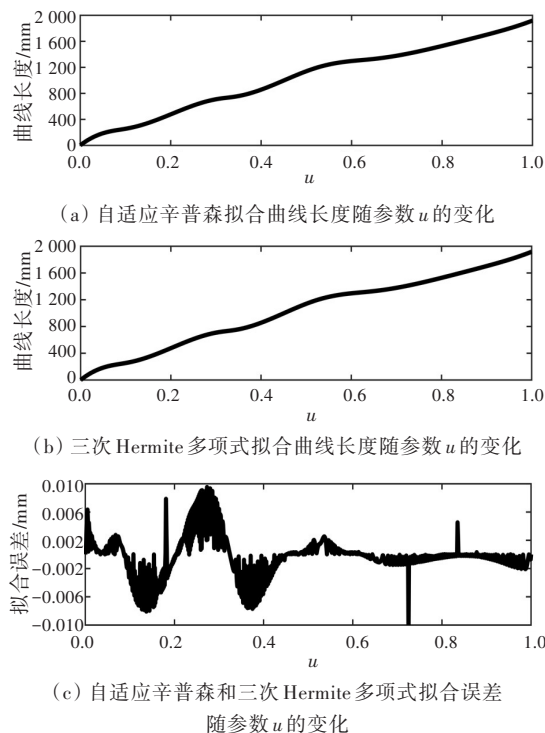


图3 自适应辛普森和三次 Hermite 多项式拟合结果及误差比较

Fig. 3 Adaptive Simpson and cubic Hermite fitting effect and error comparison

在图3中,路径总长度为1 918.1 mm,两种方式的**最大拟合误差为0.01 mm,拟合精度足以满足速度规划需求。

1.3.3 S形加减速曲线规划

机器人由静止状态到运动状态再回到静止状态,才算完成了一次完整的任务。为减少机器人关节振动,延长使用寿命,利用加速度连续的S形加减速曲线规划机器人的末端速度。S形曲线可分为加速段、匀速段和减速段3部分。以加速段为例,其由加加速段、匀加速段和减加速段组成,该段加速度 $a(t)$ 为:

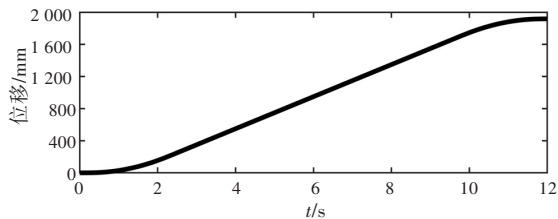
$$a(t) = \begin{cases} J_{\max} t, & t \in [0, T_1) \\ a_{\max}, & t \in [T_1, T_2 + T_1) \\ a_{\max} + J_{\min} [t - (T_a - T_1)], & t \in [T_a - T_2 - T_1, T_a) \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_{\max} 、 J_{\min} 分别为机械臂最大、最小加加速度; T_1 、 T_2 分别为加加速段时间和匀加速段时间; T_a 为加速运动的总时间; t 为归一化时间参数; a_{\max} 为机械臂允许最大加速度,一般由关节驱动能力、负载情况以及机械臂位姿决定。

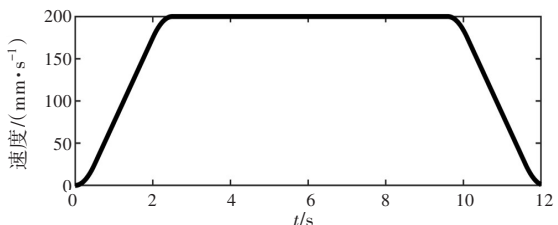
对加速度积分即得到速度,进一步求积分可得机器人末端位移,并最终建立位移量 q 和时间 t 的关系。

匀速段和减速段的计算方法和加速段的类似,这里不再赘述。试验时指定插补周期为0.01 s,最大加加速度为0.2 m/s³,最大加速度为0.1 m/s²,最大速度为0.2 m/s。位移、速度、加速度、加加速度随时间的变化曲线如图4所示。

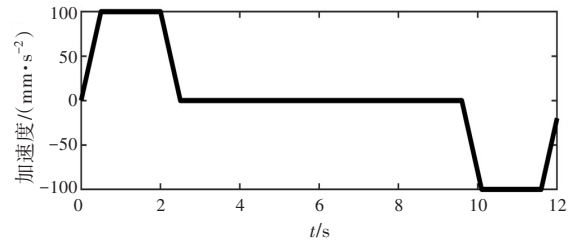
对总路程进行归一化处理,以便于在后续的实时计算过程中求取插补周期内的关节角位移。



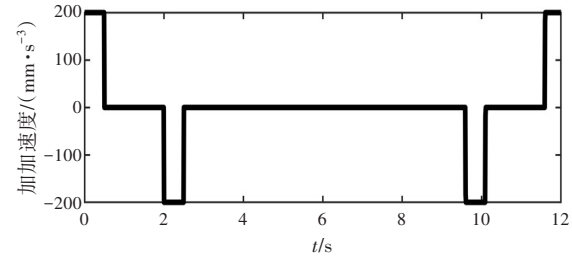
(a) 机械臂末端位移变化



(b) 机械臂末端速度变化



(c) 机械臂末端加速度变化



(d) 机械臂末端加加速度变化

图4 七段式S形加减速曲线

Fig. 4 Seven section S-type speed curve

1.3.4 机器人末端姿态规划

要描述刚体在空间中的运动,除位置信息外还需要姿态信息,可用空间单位方向向量 \mathbf{n} 的旋转角度 θ 来描述物体的姿态。单位四元数 \mathbf{r} 的形式为:

$$\mathbf{r} = \cos(\theta/2) + \mathbf{n} \sin(\theta/2) \quad (8)$$

球面样条插值是三次贝塞尔插值的简化算法,其用牺牲固定角速度的做法来换取更加平滑的姿态插值路径。其形式为:

$$f_{\text{SQUAD}}(V_i, S_i, S_{i+1}, V_{i+1}) = f_{\text{SLERP}}(a, b, T_i) \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} a = f_{\text{SLERP}}(V_i, V_{i+1}, t) \\ b = f_{\text{SLERP}}(S_i, S_{i+1}, t) \\ T_i = 2t(1-t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_{SQUAD} 、 f_{SLERP} 分别为球面样条(SQUAD)插值函数和球面线性(SLERP)插值函数; V_i 、 V_{i+1} 为用单位四元数描述的两个相邻姿态; S_i 、 S_{i+1} 为控制点。

本研究通过引入控制点 S_i 、 S_{i+1} ,实现相邻姿态间的平滑过渡。控制点的计算式为:

$$S_i = V_i \exp\left(-(\lg(V_i V_{i-1}) + \lg(V_i V_{i+1}))/4\right) \quad (11)$$

用SLERP插值对式(8)中的角度 θ 进行插值,即:

$$V_t = f_{\text{SLERP}}(V_0, V_1, t) = \frac{\sin((1-t)\theta)}{\sin(\theta)} V_0 + \frac{\sin(t\theta)}{\sin(\theta)} V_1 \quad (12)$$

式中: V_0 、 V_1 、 V_t 分别为初始、结束及中间时刻的

姿态。

试验所选取的中间姿态及姿态控制点见表3。

表3 中间姿态及姿态控制点

关节序号	姿态控制点 S_i	中间姿态 V_i
1	(0.97, 0.00, 0.00, 0.26)	(0.97, 0.00, 0.00, 0.26)
2	(0.80, 0.31, -0.22, 0.42)	(0.88, 0.31, -0.18, 0.31)
3	(0.35, -0.02, 0.70, 0.07)	(0.68, 0.06, 0.72, 0.11)
4	(0.77, 0.29, 0.17, 0.50)	(0.88, 0.31, 0.18, 0.31)
5	(0.90, 0.16, -0.05, -0.10)	(0.97, 0.22, -0.06, -0.13)
6	(0.77, 0.34, 0.40, -0.34)	(0.77, 0.34, 0.41, -0.34)

2 试验验证

在机器人末端路径相同的情况下,分别采用SLERP、SQUAD插值生成机器人末端姿态路径。在机械臂运动过程中由这两种方法得到的角位移、角速度、角加速度如图5所示。分析图5可知,SLERP插值和SQUAD插值均可保证多姿态顺利过渡。在图5(b)中圈出了SLERP插值角速度突变最明显的点,而在SQUAD插值下角速度、角加速度突变较少。将这两种插值方法的指标进行汇总,见表4。

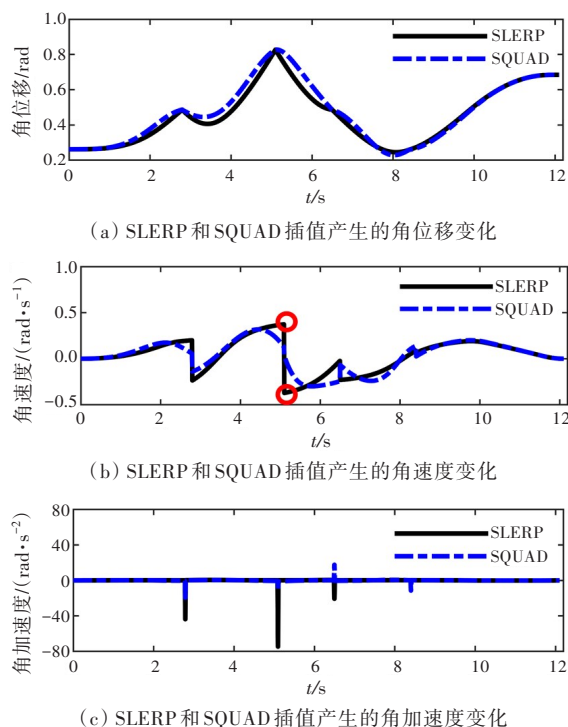


图5 SLERP和SQUAD插值对角度过渡平滑性的影响

Fig. 5 Influence of SLERP and SQUAD on smoothness of angle transition

表4 SLERP和SQUAD插值中与角度相关的参数

Table 4 Summary of angle related parameters of SLERP and SQUAD

项目	$V_{SLERP}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{SQUAD}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_{SLERP}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	$A_{SQUAD}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$
最小值	-3.70×10^{-3}	-3.00×10^{-3}	-7.50×10^{-3}	-1.90×10^{-3}
最大值	3.70×10^{-3}	3.20×10^{-3}	4.60×10^{-5}	1.80×10^{-3}
标准差	1.70×10^{-3}	1.60×10^{-3}	2.50×10^{-4}	9.05×10^{-5}

注: V_{SLERP} 、 A_{SLERP} 分别为由SLERP插值得到的角速度、角加速度; V_{SQUAD} 、 A_{SQUAD} 分别为由SQUAD插值得到的角速度、角加速度。

从表4可以看出,由这两种插值方法得到的角速度、角加速度的最大值、最小值比较接近。而由SQUAD插值得到的角速度、角加速度的标准差比由SLERP插值得到的,表明在SQUAD插值下过渡曲线和均值更接近,进而说明SQUAD插值在多姿态间的过渡效果比SLERP插值的好。

由机械臂结构(见图1)可知,关节4、5、6中心线交点为腕部中心,故腕部姿态由关节4、5、6决定。为确定不同姿态规划方法对末端姿态的影响,本研究在末端路径相同的情况下分别采用SLERP和SQUAD插值对末端姿态进行插值。以关节6为例,绘制这两种插值方法下的关节速度、加速度曲线,如图6所示。

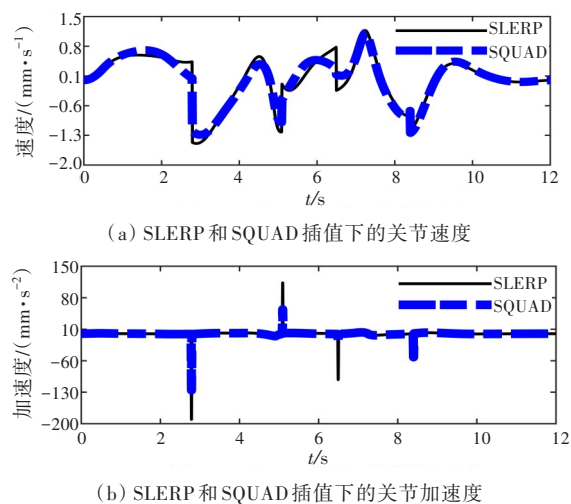


图6 关节6速度、加速度曲线

Fig. 6 Velocity and acceleration of joint 6

从图6可知,SQUAD插值下的最大关节速度、最大关节加速度均比SLERP插值下的小,表明SQUAD插值在改善关节运动方面效果更好。

在对示教点进行插补获得机器人末端路径的同时,将参数 u 与时间的对应关系按照型值点进行分割,再将各段时间归一化后求和,作为姿态规划总时间,然后用SQUAD插值生成姿态过渡轨迹。

此外,将机器人末端姿态和末端路径相结合,绘制机械臂末端位姿轨迹,如图7所示。

由图7可知,在七段式S形加减速曲线速度规划下,基于SQUAD插值生成的末端姿态过渡平滑,基于非均匀B样条的末端路径通过示教点且平滑连续。两者均做到了位姿时间信息的统一,实现了机器人末端位姿轨迹的平滑过渡。

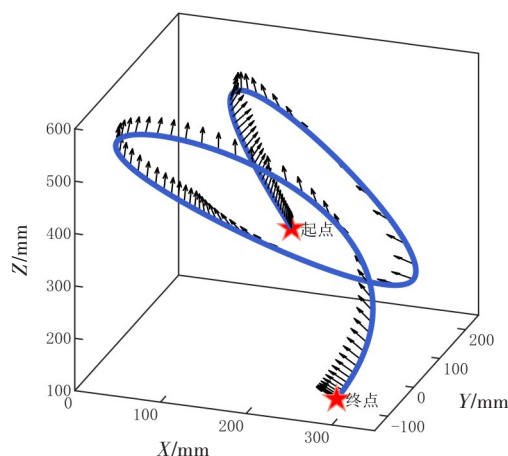


图7 试验所得空间位姿轨迹

Fig. 7 Space configuration curve obtained from experiment

3 结论

1) 采用全局插值的方式计算控制点,实现非均匀B样条曲线对关键点的拟合。和同样在轨迹拟合方面应用广泛的贝塞尔样条相比^[16],B样条具有可进行局部修改^[17]的优点,可对轨迹形状进行局部调整,在不影响已有轨迹的前提下实现曲线方向和长度的任意拓展,体现了示教轨迹的通用性。

2) 采用自适应辛普森公式计算曲线长度,并结合三次Hermite多项式拟合曲线长度,得到曲线参数。和泰勒展开^[18-19]相比,该方法求解形式固定,适合编程实现,其计算精度仅和归一化时间参数相关,可根据实际计算能力确定其计算精度。

3) 利用球面样条插值拟合了示教点的姿态,和球面线性插值策略^[20-21]相比,球面样条插值减少了角速度、角加速度的突变点数量,关节4、5、6的过渡更加平滑。

4) 采用S形加减速曲线规划机器人末端切向速度,可以保证机器人在运动过程中的末端切向速度、加速度连续,避免频繁启停,减少末端抖动。同时,将规划所得时间信息用于姿态规划,可以保

证运动过程中位姿同步。

需要指出的是,本文方法仍旧存在一些不足。首先,非均匀B样条无法表达标准的直线和圆弧,无法实现对应用广泛的直线、圆弧规划的兼容;其次,在实际试验时根据经验选取速度值,未根据关节速度映射求出末端切向最大速度^[22],这导致未能充分利用机器人的性能;最后,未将曲率极值点纳入考量,这可能会对轨迹的跟随效果^[23]产生影响。

本文所提方法为串联六轴机器人位姿轨迹规划提供了一种实时解决方案,试验验证该方法是有效的,其也为后续机器人的轨迹优化奠定了基础。

[参考文献]

- [1] 周济. 智能制造:“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284. DOI: 10.3969/j.issn.1004132X.2015.17.001.
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing: main direction of "made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. DOI: 10.3969/j.issn.1004132X.2015.17.001.
- [2] 陈海初, 曹泉, 熊根良, 等. 可编程焊接机器人示教系统的设计与实现[J]. 热加工工艺, 2016, 45(19): 179-182. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814. 2016.19.050.
CHEN Haichu, CAO Quan, XIONG Genliang, et al. Design and implementation of programmable welding robot teaching system [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(19): 179-182. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.19.050.
- [3] 潘海鸿, 杜晓枫, 杨竑宇, 等. 基于姿态传感器和发光点的手持示教器设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(12): 105-108, 112. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.12.025.
PAN Haihong, DU Xiaofeng, YANG Hongyu, et al. Design of hand-held teaching tool with attitude sensor and luminous point [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(12): 105-108, 112. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.12.025.
- [4] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(6): 853-862. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200132.
LONG Zhang, LI Xiantao, SHUAI Tao, et al. Review of research state of trajectory planning for industrial robots [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(6): 853-862. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20200132.
- [5] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C. Trajectory planning [M]// Trajectory Planning for Automatic Machines and

- Robots. Heidelberg: Springer, 2008: 1-12.
- [6] 王川, 金晓怡, 陈志鹏, 等. 6-DOF 抛光工业机器人关节空间轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 271-274. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.11.067.
- WANG Chuan, JIN Xiaoyi, CHEN Zhipeng, et al. Research on joint trajectory planning of 6-DOF polishing robots[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 271-274. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.11.067.
- [7] 刘宇程, 姜振华, 胡俊. 基于ROS平台的六自由度机械臂轨迹规划及仿真研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(1): 38-41, 50. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2022.01.009.
- LIU Yucheng, JIANG Zhenhua, HU Jun. Research on trajectory planning and simulation of 6-DOF manipulator based on ROS [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(1): 38-41, 50. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2022.01.009.
- [8] 朱萌, 孟焯, 张豪, 等. 基于ROS的6自由度机械臂运动轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(4): 1-3, 9. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.04.001.
- ZHU Meng, MENG Zhuo, ZHANG Hao, et al. Trajectory planning of 6-DOF manipulator based on ROS [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(4): 1-3, 9. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.04.001.
- [9] 王涛, 陈立, 郭振武, 等. 基于圆弧转接和跨段前瞻的拾放操作轨迹规划[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2648-2654. DOI: 10.13196/j.cims.2019.10.023.
- WANG Tao, CHEN Li, GUO Zhenwu, et al. Pick-and-place trajectory planning for based on arc transition and cross-section look-ahead [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(10): 2648-2654. DOI: 10.13196/j.cims.2019.10.023.
- [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. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.007350.
- WANG Xuhao, ZHANG Hua. Prospective interpolation algorithm for smooth transition of multi-trajectory segments[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(4): 118-125. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.007350.
- [11] 张志文, 张鹏, 毛虎平, 等. 改进A*算法的机器人路径规划研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(4): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-637X.2021.04.005.
- ZHANG Zhiwen, ZHANG Peng, MAO Huping, et al. Path planning of mobile robot based on improved A* algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(4): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-637X.2021.04.005.
- [12] 乐英, 库巍, 卢艺, 等. 基于优化的六自由度工业机器人NURBS轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(11): 41-43, 47. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2017.11.011.
- YUE Ying, KU Wei, LU Yi, et al. Based on the optimized of six-DOF industrial robot NURBS trajectory planning [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(11): 41-43, 47. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2017.11.011.
- [13] PIEGL L, TILLER W. The NURBS book[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1997.
- [14] 尹国梁. 运动控制系统中NURBS曲线插补与速度前瞻算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- YIN Guoliang. Research on the algorithm of nurbs curve interpolation and speed look-ahead in motion control system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 盖荣丽, 高守传, 李明霞. 粒子群优化算法求解最优控制点的非均匀有理B样条曲线拟合[J]. 计算机应用, 2022; 42(7): 2177-2183.
- GAI Rongli, GAO Shouchuan, LI Mingxia. Non-uniform rational B spline curve fitting of particle swarm optimization algorithm for optimal control points [J]. Journal of Computer Applications, 2022; 42(7): 2177-2183.
- [16] 徐亚之. 冗余机械臂运动避障与路径规划[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- XU Yazhi. Obstacle avoidance and path planning for a redundant manipulator [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [17] PIEGL Les, TILLER Wayne. 非均匀有理B样条[M]. 赵罡, 穆国旺, 王拉柱, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- PIEGL Les, TILLER Wayne. Non-uniform rational B-splines [M]. Translated by ZHAO Gang, MU Guowang, WANG Lazhu. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [18] 盖荣丽, 马淑雅. 多约束条件的NURBS曲线自适应前瞻插补算法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2022, 54(3): 59-65. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2021305.
- GAI Rongli, MA Shuya. Adaptive look-ahead interpolation algorithm for NURBS curves with multiple constraints [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2022, 54(3): 59-65. DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2021305.
- [19] 张娜, 王宗刚, 周亮, 等. NURBS曲线新S形加速反向寻优插补算法研究[J]. 机械与电子, 2019, 37(11): 10-14, 20.
- ZHANG Na, WANG Zonggang, ZHOU Liang, et al. Research on the algorithm of NURBS curve reverse optimization interpolation with new S-type acceleration and deceleration control [J]. Machinery & Electronics, 2019, 37(11): 10-14, 20.
- [20] 李宏胜, 汪允鹤, 张伟, 等. 工业机器人NURBS自由

- 曲线的轨迹规划[J]. 信息与控制, 2017, 46(2): 129-135. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2017.0129.
- LI Hongsheng, WANG Yunhe, ZHANG Wei, et al. Trajectory planning for industrial robots for NURBS free curve[J]. Information and Control, 2017, 46(2): 129-135. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2017.0129.
- [21] 黄忠明, 陈爱文, 黄凤良. 基于正弦加减速控制算法的工业机器人位姿轨迹规划研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 31-34.
- HUANG Zhongming, CHEN Aiwen, HUANG Fengliang. Research on position and posture trajectory planning of industrial robot based on sinusoidal acceleration and deceleration control algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(2): 31-34.
- [22] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 3版. 负超, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- CRAIG J J. Introduction to robotics [M]. 3rd ed. Translated by YUN Chao. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [23] 刘萍. 高速数控机床平滑路径规划分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(20): 152-154, 186. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2019.20.035.
- LIU Ping. Smooth path planning for high speed CNC machines [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(20): 152-154, 186. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2019.20.035.

Real time trajectory planning for configuration synchronization of 6-DOF robot

XU Yiyang¹, CHEN Gui², YU Hao¹, DIAO Hui¹, LIN Xinyi²

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: [Purposes] A real time configuration planning algorithm is proposed in this paper to generate the smooth end trajectory of an industrial robot such that its end feed speed can be controlled. [Methods] Firstly, the path planning method based on non-uniform B-spline and the attitude planning method based on unit quaternion are combined to fit the position and posture teaching points to obtain the position and posture trajectory parameters of the robot end. Then, the tangential velocity at the end of the robot is planned based on the S-type curve. Finally, according to the corresponding relationship between curve length and parameters, the end configuration is calculated in real time. [Findings] The planned robot end path passes through all teaching points, the curve length and parameter fitting error are less than 0.01 mm, the end velocity is continuous, and the attitude transition under spherical spline interpolation is smoother under the same other conditions. [Conclusions] When the robot moves along the pose path specified by the algorithm, the end speed is controllable and the joint transition is smooth, which verifies the effectiveness of the algorithm.

Key words: unitquaternion; non-uniform B-spline; industrial robot; trajectory planning; kinematic analysis; attitude interpolation

Manuscript received: 2022-06-14; **revised:** 2022-07-24; **accepted:** 2022-08-08

Foundation item: Project (SJCX21_0935) supported by Jiangsu Province Postgraduate Research and Practice Innovation Program; Project (20KJA460010) supported by Jiangsu Province Universities Natural Science Research Major Program

Corresponding author: CHEN Gui (1973—) (ORCID: 0000-0003-0835-9977), female, professor, research interest: motion control technology, robotics, intelligent control and simulation. E-mail: chengui@njit.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:彭卓寅)