

改进 B 样条曲线应用于 6R 机器人轨迹优化

董甲甲 王太勇 董靖川 张永宾 陶浩

天津大学机械工程学院,天津,300354

摘要:利用 D-H 标架法建立了机器人的运动学模型,并在分析轨迹规划流程基础上将改进 B 样条曲线用于机器人关节空间轨迹插值;在论述改进原因并详细阐述改进 B 样条曲线的生成方法后,给出改进 B 样条曲线应用时的速度与加速度性质及算法实现细节;在 MATLAB 2014a 平台上进行仿真实验,利用改进方法实现圆弧轨迹运动。结果表明,该方法能够有效提高机器人在关节运动及空间轨迹的平滑性,进而可优化机器人的轨迹运动。

关键词:工业机器人;轨迹优化;关节空间;改进 B 样条

中图分类号:TP242.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.02.010

Applications of Improved B-Spline Curves to 6R Robot Trajectory Optimization

DONG Jiajia WANG Taiyong DONG Jingchuan ZHANG Yongbin TAO Hao
School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300354

Abstract: A kinematics model of robots was established firstly by D-H frame method. Based on the analyses of trajectory planning processes, an improved B-spline curve was applied to the robot joint space trajectory interpolations. Secondly, after discussing the improvement reasons and elaborating the methods of improving the B-spline curves, the speed and acceleration properties, and the implementation details of the improved B-spline curves were given. Finally, simulation experiments were carried out on MATLAB 2014a platform, and the improved method was used to realize the circular trajectory. Results show that the method may improve the smoothness of robots in joint motions and spatial trajectories, and then optimize the trajectory motions of the robots.

Key words: industrial robot; trajectory optimization; joint space; improved B-spline

0 引言

20 世纪 60 年代,机器人轨迹规划被很多学者所关注,基本形成了两种形式的轨迹规划方法:笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划。随着研究的不断深入与应用的不断扩展,轨迹规划的性能需要进一步提高,很多学者对此做出了贡献。张红强等^[1]依据混沌优化理论,采用改进的基于混沌变量的优化算法,以时间最短为性能指标对轨迹进行优化求解,算法简单,且逼近约束条件的误差几乎为零,进一步缩短了运行时间;胡绳荪等^[2]针对 J 形坡口焊接机器人轨迹示教中理论轨迹与实际轨迹偏差较大的问题,利用实际轨迹的空间等距线逼近下一道焊接轨迹,并设计了相贯线轨迹等距线的 B 样条逼近算法;解则晓等^[3]提出了一种基于 Lamé 曲线的高速 Delta 并联机器人拾放操作轨迹的实现及优化方法,优化后的轨迹具有良好的实际性能;马睿等^[4]提出了一种基于遗传算法的三次多项式插值最短时间轨迹优化

算法,该算法在保证机器人运行曲线连续平滑的同时,保证了机器人轨迹运行时间最短,提高轨迹规划的科学性、实用性与可行性。不同学者提出的优化方法都是应用在特定的场景下的,本文将对 6R 机器人轨迹规划作进一步研究。

在笛卡尔空间轨迹规划中,分配到关节空间的位置-时间序列依然需要每个关节去协调控制,这里须保证每个关节的运动平滑性,在常见的数控设备控制中一般采用直线插补的方式对插补周期内的轨迹进行精插补^[5],即取插补周期等于运动控制周期或运动控制周期的整数倍,并将插补周期内的位移按时间进行等分^[6]。为了保证运动轨迹的平滑性,一些学者也尝试用多项式样条曲线、B 样条曲线在笛卡尔空间对复杂轮廓进行拟合^[7-8],通过对拟合得到的曲线参数方程进行离散,然后逆解到关节空间进行运动控制,但是此方法须频繁逆解,当逆解计算量较大时,就难以更好地满足实时性。为了既能提高实时性,又能获得相对平滑的运动轨迹,本文将一种改进的 B 样条曲线应用于 6R 机器人轨迹优化中,该方法在机器人关节空间对逆解得到的位置-时间序列进行

收稿日期:2016-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475324);天津市应用基础与前沿技术研究计划资助重点项目(14JCZDJC39600)

拟合,从而获得相对平滑的机器人运动轨迹。

1 6R 机器人数学模型及其轨迹规划

1.1 6R 机器人数学模型

本文所研究的机器人是由天大精益科技有限公司自主研发的六自由度关节型机器人,机构特点满足 PIEPER 原则,参考 Craig J J 提出的机器人坐标系建立规则^[9],建立该机器人的坐标系,如图 1 所示。表 1 所示为该机器人的 D-H 参数。

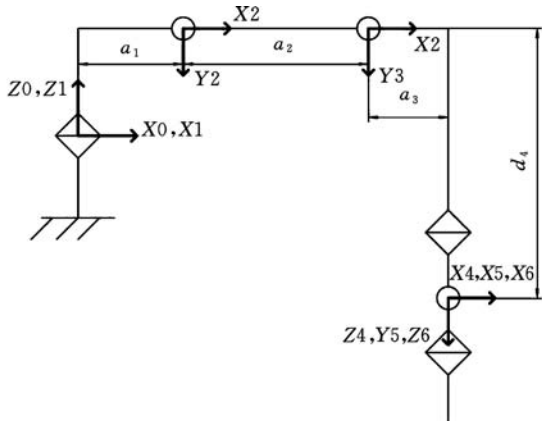


图 1 6R 机器人坐标系

Fig.1 6R robot coordinate system

表 1 6R 机器人 D-H 参数

Tab.1 6R robot D-H parameters

关节序号 i	扭角 $\alpha_{i-1} (^{\circ})$	杆长 $a_{i-1} (mm)$	偏距 $d_i (mm)$	关节角
1	0	0	0	θ_1
2	-90	210	0	θ_2
3	0	600	0	θ_3
4	-90	165	718	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	-90	0	0	θ_6

1.2 6R 机器人正逆解运算

机器人运动方程为^[9]

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$$

其中, jT_i 代表机器人 i 连杆坐标系相对于 j 连杆坐标系的齐次变换矩阵,详细内容参见文献[9]。根据 1.1 节建立的机器人坐标系依次写出等号右端各个齐次变换矩阵 jT_i ,然后顺序相乘这些矩阵,相乘结果即为正解计算结果,该正解运算是已知关节变量、求解机器人末端执行器的过程,与机器人逆解相比,较为简单。

对于机器人的逆解运算,参考文献[6]中的机器人逆解算法,采用反变换法求解各个关节的角度,这一过程是已知机器人末端执行器的位姿矩阵,反向求解各个关节变量的过程,一般会存在以下两个问题:

(1) 多解问题。文中的 6R 机器人满足 Pieper

准则,故存在解析逆解。一般情况下,6R 机器人有 8 组逆解,当机器人处于特殊位姿时,逆解结果是少于 8 组的,最终仅选择一组作为结果,通常是选择与当前位形较为接近的解。

(2) 奇异位形。当机器人处于奇异位形并产生运动时,机器人的某个关节的速度会趋向无穷大,故奇异点附近的机器人是很不稳定的。

1.3 6R 机器人轨迹规划

对于前文提到的两种轨迹规划方法(即关节空间轨迹规划与笛卡尔空间轨迹规划),这里仅介绍第一种方法,并在后文中对此方法进行改进。笛卡尔空间轨迹规划方法在引言中已简要介绍了其规划流程,现给出其详细流程,如图 2 所示。

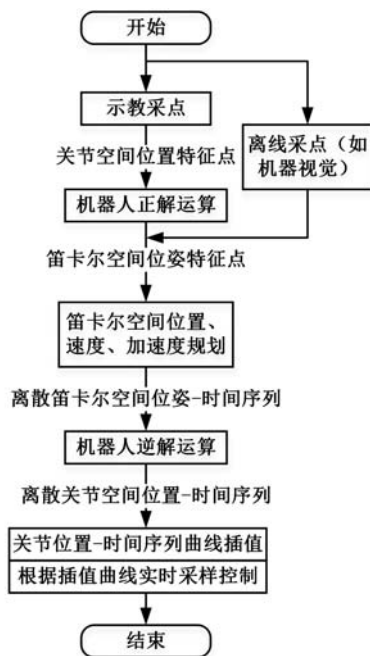


图 2 机器人笛卡尔空间轨迹规划流程

Fig.2 Robot Cartesian space trajectory planning process

在笛卡尔空间进行位置、速度、加速度规划的环节中,常用方法^[10-11]主要有梯形速度曲线方法及 S 曲线加减速方法,在笛卡尔空间可实现直线、圆弧、曲线路径的规划,具体实现方式已经很成熟。

2 改进 B 样条曲线

2.1 曲线拟合方法比较

三次样条曲线插值方法求解的过程须给出边界条件,求解多元线性方程组后才能确定曲线参数。然而根据上文叙述,机器人给出的只是位置-时间序列,那么就需要额外添加条件才能求解曲线方程,所以是不方便的。贝塞尔曲线拟合方法有很多优点,它是一种具有特殊表示形式的参数

多项式曲线,具有凸包性,其多项式次数与控制顶点相关。贝塞尔曲线不具有局部性,且多段贝塞尔曲线也不易进行曲线拼接。B 样条曲线用 B 样条基函数代替 Bernstein 多项式,改变了曲线的一些特征,从而使曲线具有了局部性,曲线次数也不再与控制点相关,从而在算法设计时能够方便地获得拟合曲线,且计算过程更加简单。常用的 B 样条曲线有三次均匀 B 样条曲线、三次准均匀 B 样条曲线,这两种曲线都能用于轨迹规划中,为了得到更好的效果,也有学者将五次均匀 B 样条曲线应用到机器人轨迹规划中^[12]。综合考虑各种曲线拟合方法,将位置-时间序列点作为控制点。如果采用三次准均匀 B 样条进行曲线拟合,则除首尾点通过控制点外,中间点并不通过控制点。而采用三次均匀 B 样条拟合曲线与五次均匀 B 样条拟合曲线则不通过任一控制点,若要使其通过给出的位置-时间序列点,就须将位置-时间序列点作为型值点去反算控制点,反算过程需要求解多元线性方程组,其计算过程较为麻烦,且五次 B 样条曲线反算过程计算更为繁琐,故接下来将对三次均匀 B 样条曲线拟合进行改进,并将其应用于机器人轨迹规划。

2.2 改进 B 样条曲线拟合方法

如图 3 所示,三次均匀 B 样条通过 4 个控制点确定一段曲线,4 点确定的曲线方程为^[11]

$$C(t) = \sum_{i=0}^3 B_i(t)P_i \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} B_0(t) &= (1-t)^3/6 \\ B_1(t) &= (3t^3 - 6t^2 + 4)/6 \\ B_2(t) &= (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6 \\ B_3(t) &= t^3/6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, t 为局部变量, $0 \leq t \leq 1$; P_i 为三维空间中的坐标向量,下文所有此形式的点皆为坐标向量。

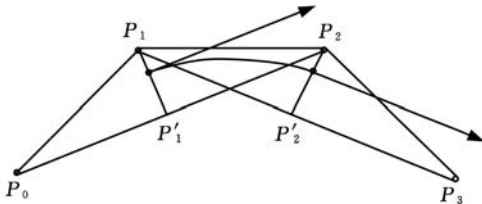


图 3 B 样条曲线
Fig.3 B-spline curve

由图 3 可以看出,B 样条曲线起始于 P_0 、 P_1 、 P_2 构成的三角形的中线 $P_1P'_1$ 上的一点,此点与 P_1 点的距离为中线长的 $1/3$,终止于 P_1 、 P_2 、 P_3 构成的三角形的中线 $P_2P'_2$ 上的一点,此点与 P_2 点的距离为 $1/3$ 中线长,起始点的切向量平行于

$\triangle P_0P_1P_2$ 底边 P_0P_2 且模长为其 $1/2$,终止点的切向量平行于 $\triangle P_1P_2P_3$ 底边 P_1P_3 且模长为其 $1/2$ ^[13-14]。改变一个控制顶点,仅会影响局部拟合曲线,并且各分段拟合曲线在端点处连续,这些生成的分段曲线构成一段完整的 B 样条曲线。

从上述三次 B 样条曲线的特征可以看出,由控制点确定的曲线段并不通过控制点,而是存在一定的距离,且距离随控制点的变化而变化。将 6R 机器人关节位置-时间序列作为控制点,会产生误差,同时曲线不像准均匀 B 样条曲线一样通过首尾控制点。如果需要曲线通过控制点,则需要将给出的点看作型值点,通过型值点去反算控制顶点^[15]。此方法有一定的可行性,但是反算过程需要解多元方程组,其计算过程还是稍显繁杂,所以接下来在三次均匀 B 样条曲线基础上进行改进,获得一种新的通过型值点、首尾点的 B 样条曲线。

由三次均匀 B 样条曲线的几何特性可知,为了使曲线通过控制顶点,只需使控制顶点位于三角形的中线上,且距控制顶点为中线长的 $1/3$ 处,也就是三角形顶点要与此中线上的点重合,只有当三角形中线长度为零时才能满足要求,也就是三角形三顶点共线,所以可通过增加控制顶点来实现,如图 4 所示。

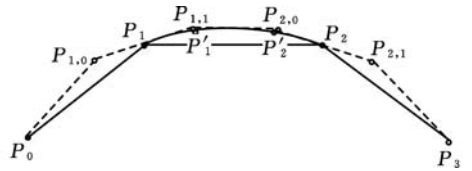


图 4 改进的 B 样条曲线
Fig.4 Improved the B-spline curve

改进 B 样条曲线的具体实现过程如下:

(1) 如图 4,在 P_1 两侧增加型值点 $P_{1,0}$ 、 $P_{1,1}$,使 $P_{1,0}$ 、 P_1 、 $P_{1,1}$ 在同一直线上且平行于 P_0P_2 ,同时长度满足 $P_{1,0}P_1 = P_1P_{1,1} = hP_0P_2$,其中, h 为三角形底边 P_0P_2 长度的比例系数, $h = 1/6$;同理在 P_2 两侧增加点 $P_{2,0}$ 、 $P_{2,1}$ 。

(2) 以 $P_{1,0}$ 、 P_1 、 $P_{1,1}$ 、 $P_{2,0}$ 、 P_2 、 $P_{2,1}$ 为型值点,可以得到 3 段三次均匀 B 样条曲线,且容易证明得到的曲线通过 P_1 、 P_2 点。

(3) 要使得曲线通过首尾两个型值点 P_0 、 P_3 ,只须令 $P_{0,0}$ 、 $P_{0,1}$ 与 P_0 重合,令 $P_{3,0}$ 、 $P_{3,1}$ 与 P_0 重合即可。

综上所述,对于给出的 n 个型值点,通过增加 $3n$ 个附加点,生成 $3n - 3$ 段 B 样条曲线,则生成的曲线通过所有原始型值点。

除首尾型值点以外的新增附加点计算公式

如下：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_{i,0} &= \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{P}_{i,0} = \mathbf{P}_i - h(\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_{i-1}) \\ \mathbf{P}_{i,1} &= \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{P}_{i,1} = \mathbf{P}_i + h(\mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{P}_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合式(1)、式(2) 可将改进后的 B 样条曲线方程表示为矩阵形式：

$$\mathbf{r}_{3i+1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{i,0} \\ \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_{i,1} \\ \mathbf{P}_{i+1,0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{3i+2} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_{i,1} \\ \mathbf{P}_{i+1,0} \\ \mathbf{P}_{i+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_{3i+3} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{i,1} \\ \mathbf{P}_{i+1,0} \\ \mathbf{P}_{i+1} \\ \mathbf{P}_{i+1,1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i = 0, 1, \dots, n-1$$

由于传统三次均匀 B 样条曲线公共系数为 1/6, 所以取改进 B 样条曲线表达式中的 $h=1/6$, 由式(3) 可以将所有型值点用 $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$ 来表示, 从而改进 B 样条曲线矩阵形式为

$$\mathbf{r}_{3i+1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1/3 & -5/6 & 2/3 & -1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_{i+1} \\ \mathbf{P}_{i+2} \\ \mathbf{P}_{i+3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{3i+2} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1/2 & 3/2 & -3/2 & 1/2 \\ 1 & -5/2 & 2 & -1/2 \\ 0 & -5/2 & 3 & -1/2 \\ -2/3 & 31/6 & 5/3 & -1/6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_{i+1} \\ \mathbf{P}_{i+2} \\ \mathbf{P}_{i+3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_{3i+3} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} t^3 \\ t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1/6 & -2/3 & 5/6 & -1/3 \\ -1/2 & 2 & -5/2 & 1 \\ 1/2 & -3 & 5/2 & 0 \\ -1/6 & 1/6 & 31/6 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i \\ \mathbf{P}_{i+1} \\ \mathbf{P}_{i+2} \\ \mathbf{P}_{i+3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

注意式(7)~式(9) 中的 i 不取 0 和 $n-1$, 因首段曲线与末段曲线的新增附加点不满足式(3), 所以首末两段曲线可根据式(4)~式(6) 推导出来。

根据式(7)~式(9) 可以获得连续平滑的 B 样条曲线。改进 B 样条曲线拟合算法的基函数以 B 样条曲线拟合算法的基函数为基础, 故所获得的曲线不仅具有局部性、连续性、凸包性等优点, 而且通过所有型值点, 具有相对较高的拟合

精度。

2.3 改进 B 样条曲线分析

2.3.1 改进 B 样条曲线速度、加速度分析

改进 B 的样条曲线应用在关节空间位置-时间序列插值时, 给出的型值点在位置-时间坐标系下的坐标为 (θ, T) , 为了与 B 样条曲线中的局部变量 t 区分开, 这里时间变量命名为 T , 下面给出 B 样条曲线上关节变量的速度、加速度表达式。

除首末段 B 样条以外, 对于给出的 4 个型值点 $\mathbf{P}_i(\theta_i, T_i), \mathbf{P}_{i+1}(\theta_{i+1}, T_{i+1}), \mathbf{P}_{i+2}(\theta_{i+2}, T_{i+2}), \mathbf{P}_{i+3}(\theta_{i+3}, T_{i+3})$ 所产生的中间曲线段, 由式(7)~式(9) 求出其 2 个分量 θ, T 对 t 的一阶导数：

$$\dot{\theta}_{3i+1} = \theta_{i+2}(2t^2 + 1)/6 + \theta_i(t^2 - 1)/6 - 5t^2\theta_{i+1}/12 - t^2\theta_{i+3}/12 \quad (10)$$

$$\dot{T}_{3i+1} = T_{i+2}(2t^2 + 1)/6 + T_i(t^2 - 1)/6 - 5t^2T_{i+1}/12 - t^2T_{i+3}/12 \quad (11)$$

由以上结果可求出关节的角速度：

$$\omega = \frac{d\theta}{dT} =$$

$$\frac{2\theta_{i+2}(2t^2 + 1) + 2\theta_i(t^2 - 1) - 5t^2\theta_{i+1} - t^2\theta_{i+3}}{2T_{i+2}(2t^2 + 1) + 2T_i(t^2 - 1) - 5t^2T_{i+1} - t^2T_{i+3}} \quad (12)$$

为求关节的角加速度, 由式(12) 对 t 求导得到的结果过于复杂, 所以用数值方法求出关节角加速度：

$$\alpha = \Delta\omega/\Delta T$$

式中, α 为角加速度; $\Delta\omega$ 为前后两个时刻关节的角速度增量; ΔT 为时间增量。

同理可求 $r_{3i+2}(t), r_{3i+3}(t)$ 曲线的角速度、角加速度表达式。通过各关节的速度、加速度曲线, 就能够直观观察各个关节的运动平滑性。

2.3.2 机器人关节空间多约束分析

实际的机器人运动控制中, 当机器人进行快速运动且运动时间确定时, 受到驱动机构性能等因素的制约, 机器人进行运动轨迹规划时须考虑角加速度约束、角速度约束和角度约束^[16]：

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\min} &\leq \theta(T) \leq \theta_{\max} \\ |\dot{\theta}(T)| &\leq \omega_{\max} \\ |\ddot{\theta}(T)| &\leq \alpha_{\max} \end{aligned} \right\}$$

对于改进 B 样条曲线插值的关节轨迹, 须考虑这些约束条件, 以免机器人过限而偏离设定路径。工业机器人在不同约束下进行轨迹运动, 其轨迹运动的可行性方法有很多学者做了研究, 在此不进行展开^[16-17]。

2.3.3 改进 B 样条算法实现分析

对于求出的位置-时间 B 样条曲线, 控制系统底层在运动控制周期内对曲线进行周期采样来进

行位置控制。运动控制周期是一固定常数 ΔT ，那么就需要由 ΔT 去求相应的局部变量 Δt ，再由 Δt 去求解 $\Delta\theta$ ，由 2.3.1 中结果可得：

$$\Delta t = \Delta T / \dot{T}_{3i+1}(t)$$

$$\Delta\theta = \dot{\theta}_{3i+1}(t)\Delta t$$

在对 t 进行离散的最后阶段，当 ΔT 大于剩余时长时，可直接取 $t = 1$ 对应的 $\Delta\theta$ ，算法流程如图 5 所示。

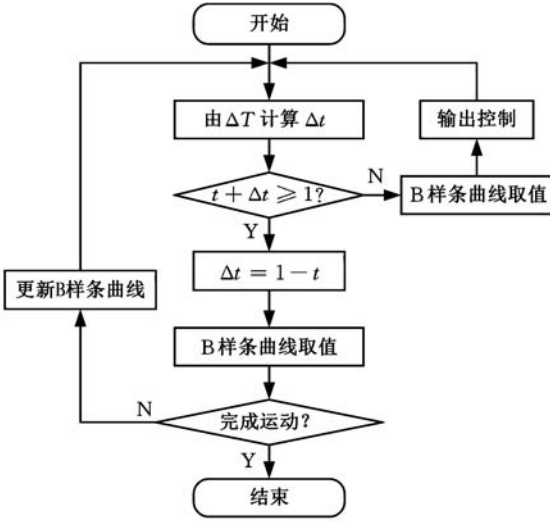


图 5 关节控制算法流程

Fig.5 Joint control algorithm flow

3 仿真实验与分析

为验证改进 B 样条曲线的轨迹优化的可行性，先在笛卡尔空间中规划一段圆弧，然后逆解到关节空间，利用改进 B 样条算法进行插值控制，仿真实验在 MATLAB 2014a 平台下进行。

要实现的圆弧方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + R\sin\theta = 975 + 100\sin\theta \\ y &= y_0 + R\cos\theta = 100\cos\theta \\ z &= 0 \end{aligned} \right\}$$

采用梯形速度曲线进行规划，如图 6 所示。为计算方便，取匀速阶段速度为 100π mm/s，加速度为 200π mm/s²，如图 7 所示，运动总时长为 1.5 s，距离为 100π mm。

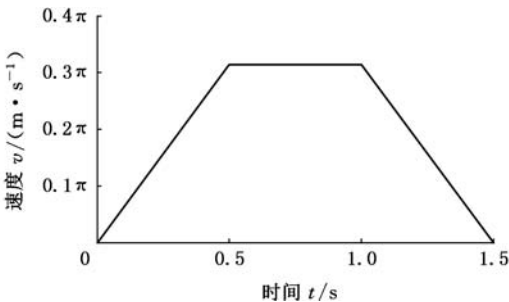
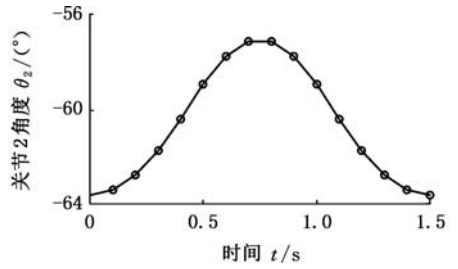
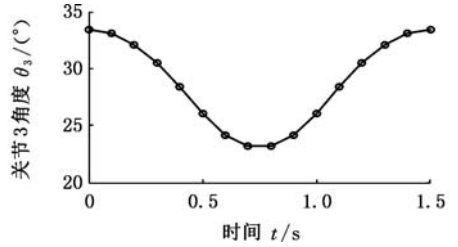


图 6 速度规划曲线

Fig.6 Speed planning curve



(a) 关节 2



(b) 关节 3

图 7 关节 2、3 曲线插值位置-时间曲线

Fig.7 Joints 2,3 curve interpolation position-time curve

根据广州研为电子科技有限公司 IMC3084C 运动控制卡的技术参数可知，其轮廓运动时的插补周期在 60 ms 左右，为计算方便，这里取插补周期为 0.1 s。设机器人运动过程中末端姿态不变，那么改变的只是在基坐标系下 X 方向和 Y 方向的位移，让机器人以这种位姿状态进行圆弧轨迹运动，并取轨迹上的 16 个点作为插值点，将 16 个插值点逆解到关节空间，然后在关节空间进行精插补。由于这是一个多关节串联的系统，即两个相邻的臂有公共约束，由此当一个臂的轨迹比较好的时候，可能会导致其相邻臂的规划不一定是比较好的，故以关节 2、3 两相邻关节为例进行改进 B 样条曲线插值。图 7 所示为关节 2、3 曲线插值生成的轨迹曲线。

根据改进 B 样条曲线理论编写插值曲线程序，将图 7 中的节点作为型值点，得到改进 B 样条插值曲线，如图 8 所示。图 9 所示为传统 B 样条拟合曲线，观察可知该曲线不过控制点且首尾两段没有曲线。

根据 2.3.1 中所述绘制关节 2、3 的角速度、角加速度曲线，如图 10、图 11 所示。与文献[18]中的传统 B 样条角速度、角加速度曲线对比可发现，改进后的速度曲线光滑连续且加速度曲线连续。

同理，可获得其他 4 个关节的插值曲线，以及速度与加速度曲线。通过机器人正解可获得不同关节插值曲线对应的空间路径，在关节空间用曲线插值时形成的空间路径如图 12 所示，它近似于用直线在笛卡尔空间对插值点进行连接形成的路径；图 13 中的是传统 B 样条与改进 B 样条对应

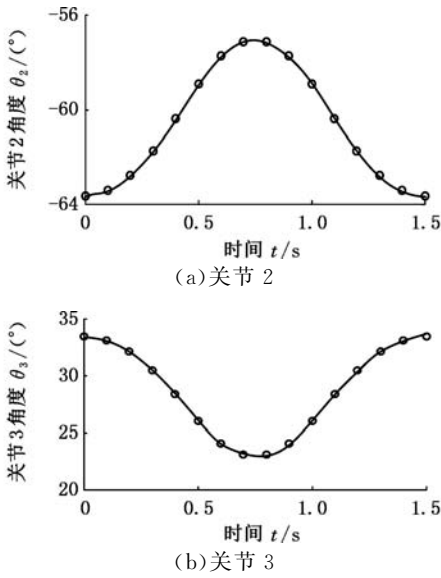


图 8 改进 B 样条插值曲线

Fig.8 improved B-spline interpolation curve

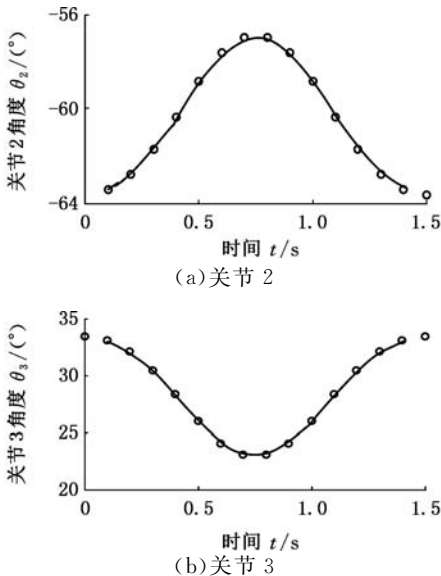


图 9 传统 B 样条插值曲线

Fig.9 Traditional B-spline interpolation curve

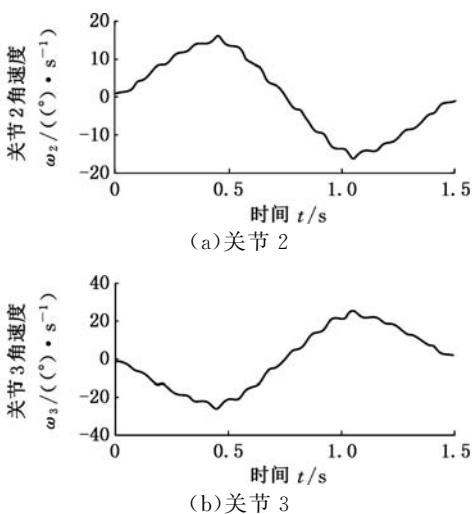


图 10 改进后关节角速度曲线

Fig.10 Improved joint angular velocity curve

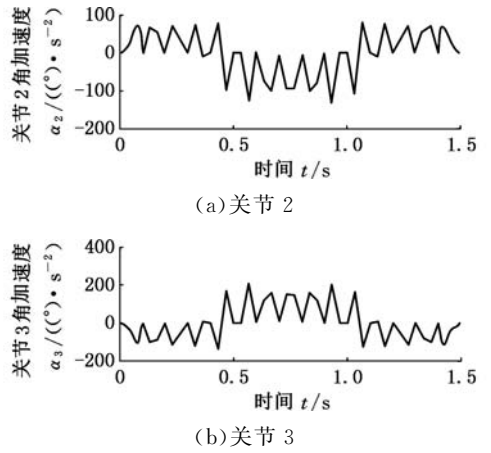


图 11 改进后关节角加速度曲线

Fig.11 Improved joint angular acceleration curve

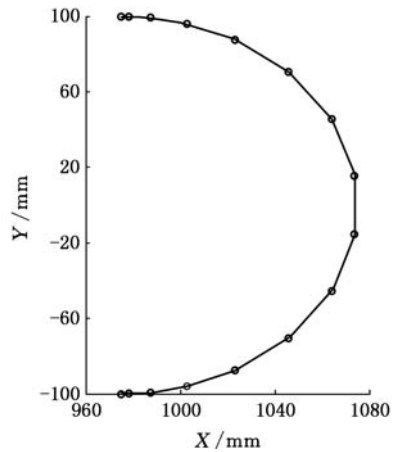


图 12 关节曲线插值形成的空间路径

Fig.12 Spatial path formed by interpolation of joint curves

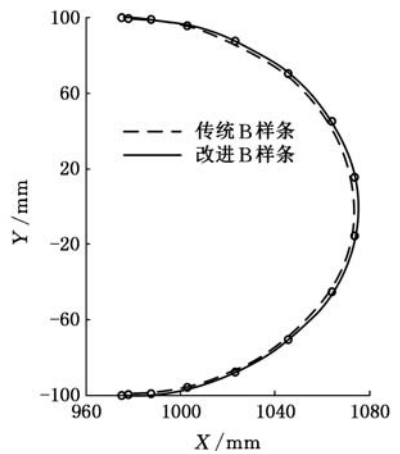


图 13 传统 B 样条及改进 B 样条空间路径

Fig.13 Traditional B-spline and improved B-spline space path

的空间路径,这两种插值曲线比图 12 中的路径光滑,但传统 B 样条不通过首尾路径点,不严格经过中间路径点,故改进后的路径具有更高的精度。编写 MATLAB 误差测量程序,得到不同曲线拟合方法产生的误差,如表 2 所示。

表 2 不同方法拟合误差比较

Tab.2 Comparison of fitting methods for different methods

	路径误差(mm)
曲线插值	0.923
传统 B 样条拟合	1.545
改进 B 样条插值	0.457

4 结语

(1)与传统反算控制点获取插值曲线的方法相比,改进 B 样条曲线算法计算更加方便,且保留了局部性的优点。

(2)改进 B 样条曲线不同于传统 B 样条曲线,它能保证插值曲线通过型值点,具有更高精度,且保留了传统 B 样条曲线局部性、凸包性。

(3)采用改进方法后,机器人进行轨迹运动时的角速度及角加速度光滑连续,在保证关节运动平滑性的同时改善了机器人末端在笛卡尔空间的路径。

参考文献:

- [1] 张红强,章兢,王耀南,等. 机器人关节空间 B 样条轨迹设计的混沌优化[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(2): 174-177.
ZHANG Hongqiang, ZHANG Jin, WANG Yaonan, et al. Chaos Optimization of B-splines Path Planning for Robot in Joint Space [J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(2):174-177.
- [2] 胡绳荪,庾宇鲲,申俊琦,等.基于 B 样条空间等距线的机器人轨迹优化算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(8):723-727.
HU Shengsun, TOU Yukun, SHEN Junqi, et al. Robot Trajectory Optimization Algorithm Based on Spatial Offset B-Spline [J]. Journal of Tianjin University(Science and Technolgy), 2015, 48(8): 723-727.
- [3] 解则晓,商大伟,任凭. 基于 Lamé 曲线的 Delta 并联机器人拾放操作轨迹的优化与试验验证[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1):52-59.
XIE Zexiao, SHANG Dawei, REN Ping. Optimization and Experimental Verification of Pick-and-place Trajectory for a Delta Parallel Robot Based on Lamé Curves [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1):52-59.
- [4] 马睿,胡晓兵,殷国富,等. 六关节工业机器人最短时间轨迹优化[J]. 机械设计与制造, 2014(4):30-32.
MA Rui, HU Xiaobing, YIN Guofu, et al. The Shortest Time Optimal Planning of 6-DOF Industrial Robot's Trajectory [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 30-32.
- [5] 李恩林. 数控系统插补原理通论[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
LI Enlin. CNC System Interpolation Principle Theory

- [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.
- [6] 姬帅,胡天亮,张承瑞. 基于实时以太网的高速精插补算法及其实现[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(10): 2211-2216.
JI Shuai, HU Tianliang, ZHANG Chengrui. High Speed Fine Interpolation Algorithm and Its Implementation Based on Real-time Ethernet [J]. CIMS, 2012, 18(10):2211-2216.
- [7] RECLI D, KOST G G. A Rational B-Spline Curves in Robot Collision-free Movement Planning [J]. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 2008, 2(3):38-42.
- [8] WANG C, WANG X, ZHENG H. Trajectory Planning for a Welding Robot Based on the Bezier Curve [J]. International Journal of Control & Automation, 2015, 8(2): 351-362.
- [9] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.
CAI Zixing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [10] 刘蕾,曾辉,柳贺,等. 六自由度机器人 S 型曲线速度规划[J]. 计算技术与自动化, 2015, 21(2): 42-45.
LIU Lei, ZENG Hui, LIU He, et al. S-curve Velocity Planning for 6-DOF Robot [J]. Computing Technology and Automation, 2015, 21(2):42-45.
- [11] 史步海,孙会会. 基于新 S 型速度规划的 B 样条曲线算法研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(15):72-79.
SHI Buhai, SUN Huihui. B-spline Curve Algorithm Research Based on New S Velocity Planning [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(15):72-79.
- [12] 李小霞,汪木兰,刘坤,等. 基于五次 B 样条的机械手关节空间平滑轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(8):39-42.
LI Xiaoxia, WANG Mulan, LIU Kun, et al. Smooth Trajectory Planning Based on Five Degrees B-spline for Manipulators in Joint Space[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(8):39-42.
- [13] 毛征宇,刘中坚. 一种三次均匀 B 样条曲线的轨迹规划方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(21):2569-2572.
MAO Zhengyu, LIU Zhongjian. A Trajectory Planning Method for Cubic Uniform B-spline Curve [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(21):2569-2572.
- [14] 王栋,高成英,梁云,等. 基于等式约束最小二乘的 B 样条曲线拟合[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 15-18.
WANG Dong, GAO Chengying, LIANG Yun, et al. B-spline Curve Fitting Using Equality-constrained Least Squares [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(4):15-18.

基于肌肉生理信号的操纵舒适性评价

扈 静 钱佩伦 刘明周 张 淼 郑 达

合肥工业大学机械工程学院,合肥,230009

摘要:从操纵者人机交互过程中肌肉生理信号角度出发,针对目前操纵舒适性评价方法的不足,提出一种基于肌肉生理信号特征参数,运用正则化 RBF 网络,对人机交互操纵舒适性进行评价的方法。以典型人机交互过程驾驶操作系统为例,进行实验与数据统计,通过正则化 RBF 网络对实验测得的操纵者肌肉生理信号特征参数和主观舒适度评分构成的样本进行学习和训练,建立操纵舒适性评价模型。实验结果验证了该方法的可行性和合理性。

关键词:人机交互过程;操纵舒适性;正则化 RBF 网络;肌肉生理信号;

中图分类号:TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.02.011

Human-machine Interaction Manipulation Comfort Evaluations Based on Muscle Physiological Signals

HU Jing QIAN Peilun LIU Mingzhou ZHANG Miao ZHENG Da

School of Mechanical Engineering, Heifei University of Technology, Heifei, 230009

Abstract: Aiming at drawbacks of handling comfort evaluation methods, a method of man-machine interaction to evaluate handling comfort was put forward herein, which was based on characteristic parameters of muscle physiological signals. Using driving system as a typical example of man-machine interactions, experimental and data statistics were carried out. Through the regularization RBF network, the experimental samples of subjective comfort ratings and characteristic parameters of manipulator muscle physiological signals measured were studied and trained. Finally evaluation model of the handling comfort was established. Computational and experimental results demonstrate feasibility and applicability of the method.

Key words: process of man-machine interaction; handling comfort; regularization RBF network; muscle physiological signal

0 引言

操纵舒适性是机电工程与人因工程交叉的前

沿课题^[1-2]。人机交互过程操纵舒适性是指操纵者在一定时间内传递操纵指令给操纵对象并改变其运行状态的过程中,系统反映出的适应操纵者生理与心理特征的程度进而使操纵者能够安全、健康、高效工作的能力^[3-6]。在日常驾驶操纵过程

收稿日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375134);安徽省自然科学基金资助项目(1508085ME83)

[15] 周红梅,王燕铭,刘志刚,等.基于最少控制点的非均匀有理 B 样条曲线拟合[J].西安交通大学学报,2008,42(1):73-77.

ZHOU Hongmei, WANG Yanming, LIU Zhigang, et al. Non-uniform Rational B-Splines Curve Fitting Based on the Least Control Points [J]. Journal of Xi'an Jiatong University, 2008, 42(1):73-77.

[16] 张斌.基于多约束的机器人关节空间轨迹规划[J].机械工程学报,2011,47(21):1-6.

ZHANG Bin. Joint-space Trajectory Planning for Robots under Multiple Constraints [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21):1-6.

[17] 徐海黎,解祥荣,庄健,等.工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J].机械工程学报,2010,46(9):19-25.

XU Haili, XIE Xiangrong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9):19-25.

[18] 勾治践,牛永康,王成.基于 B 样条的 6R 机器人轨迹规划及仿真[J].煤矿机械,2013,34(2):48-50.

GOU Zhijian, NIU Yongkang, WANG Cheng. Trajectory Planning and Simulation of 6R Robot Based on B-splines [J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(2):48-50.

(编辑 张 洋)

作者简介:董甲甲,男,1992 年生,硕士研究生。研究方向为机器人运动学算法。E-mail:864200435@qq.com。