

面向三自由度平面关节机器人的“S”形轨迹规划算法研究

陈登钱¹, 孔维宾^{1,2}, 王德智³, 孔祥晔¹, 平 欣¹

(1.盐城工学院, 江苏 盐城 224051;

2.盐城工学院光电信息技术研究所, 江苏 盐城 224051;

3.光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444)

✉632551204@qq.com; kongweibin2007@sina.com; Wangdz@optorun.cn;
bertkong0304@163.com; 820796240@qq.com



摘 要: 针对传统“S”形轨迹规划工业机器人稳定性差的缺点, 提出了一种基于双变量反正切函数的改进“S”形轨迹规划算法。引入双变量反正切函数结合运动学逆解的方法求出关节转角的解。依据机器人运动准则得到关节转角的最优解。结合关节转角最优解和改进“S”形轨迹约束机器人运动过程中最大速度、加速度、加加速度的限制值, 实现从位移到加加速度均为时间的连续有界轨迹。实验结果表明, 改进“S”形轨迹规划算法相较于传统轨迹算法, 有效提升了机器人的稳定性。

关键词: 平面关节机器人; 运动学; 轨迹规划; 关节空间

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

Research on S-shaped Trajectory Planning Algorithm for 3-DOF Planar Joint Robot

CHEN Dengqian¹, KONG Weibin^{1,2}, WANG Dezhi³, KONG Xiangye¹, PING Xin¹

(1.Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2.Institute of Optoelectronic Information Technology, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

3.Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

✉632551204@qq.com; kongweibin2007@sina.com; Wangdz@optorun.cn;
bertkong0304@163.com; 820796240@qq.com

Abstract: Aiming at the poor stability of traditional S-shaped trajectory planning industrial robots, this paper proposes an improved S-shaped trajectory planning algorithm based on bivariate arctangent function. Bivariate arctangent function, combined with inverse kinematics solution, is introduced to solve the joint angle. The optimal joint angle is obtained according to the motion criterion of the robot. The optimal solution of joint rotation angle and improving the limit values of maximum velocity, acceleration and jerk in the process of robot motion constrained by S-shaped trajectory, a continuous bounded trajectory with time from displacement to jerk is realized. The experimental results show that the improved S-shaped trajectory planning algorithm effectively improves the stability of the robot compared with the traditional trajectory planning algorithm.

Keywords: planar joint robot; kinematics; trajectory planning; joint space

1 引言(Introduction)

随着机器人技术的迅速发展, 智能机器辅助等成为现代机器人技术的研究热点^[1-2]。机器人的使用场合不同, 对末端

执行器位移、速度等的要求也不尽相同, 因此需要对机器人的运行轨迹进行规划以满足其稳定性要求。平面关节机器人广泛应用于汽车等重要行业。关节空间轨迹是针对各关节实

时位移角度及连续的运动轨迹，机器人以各关节同时启停为目标，保证关节同时到达指定位置；而多轴运动插补的总时长取决于运动距离最远轴，并以关节运动时间为基础，其余多轴通过改变规划的最大运动速度与加速度实现时间同步^[3-4]。关节空间规划路径中无突变点存在，避免规划中出现瞬时速度过大导致关节运动失控^[5-6]。

现有轨迹规划常用的方式包括五次多项式和“S”形轨迹规划^[7]等。王川等^[8]对五次多项式函数插值方法中轨迹中间点角速度的设置方法提出改进。钱文学等^[9]提出一种多节点、多样条曲线运动的轨迹规划方法。由于关节转角范围未确定最优解，同时加加速度轨迹均为不连续曲线，因此在加减速的启动停止瞬间存在突变现象将会导致系统振荡，对机械会产生柔性冲击^[10-13]。本文采用双变量反正切函数规划机器人的最优关节转角范围，利用三角函数结合传统“S”形轨迹规划算法，约束运动过程中的最大速度、加速度、加加速度，改善机器人运动过程中由于加加速度非连续轨迹导致的关节驱动力矩的突变，从而保证机器人运动过程的稳定性。

2 运动学模型(Kinematic model)

如图1所示，平面关节机器人具有3个自由度，其中2个旋转关节，1个移动关节。为了描述相邻两个坐标之间的位置和姿态，采用D-H模型方法建立坐标系，如图2所示。表1给出了机器人各关节D-H参数。

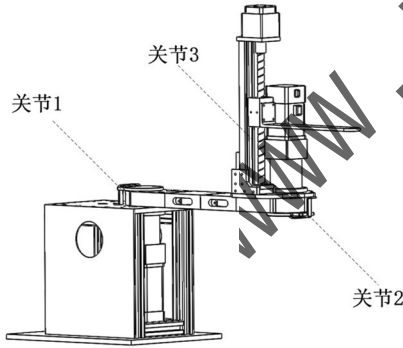


图1 平面关节机器人结构图

Fig.1 Structural diagram of planar joint robot

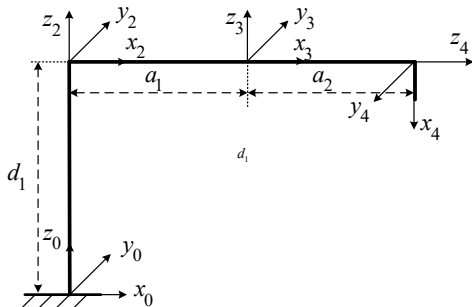


图2 平面关节机器人D-H模型

Fig.2 D-H model of planar joint robot

表1 机器人各关节D-H参数值

Tab.1 D-H parameter values of robot joints

关节 <i>i</i>	连杆长度 a_{i-1} / mm	关节转角 θ_i	关节偏置量 d_i / mm
1	0	$-120^\circ \leq \theta_1 \leq 120^\circ$	$d_1 = 0$
2	$a_1 = 200 / 300 / 400$	$-145^\circ \leq \theta_2 \leq 145^\circ$	0
3	$a_2 = 256$	0	$0 \leq d_3 \leq 150$

以每个关节分别作为坐标原点建立局部坐标系，旋转矩阵 A_i^{i-1} 表示关节 i 相对于关节 $i-1$ 的位姿矩阵变换，其表达式如下：

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， α_{i-1} 表示连杆扭角，由于连杆无自转，所以三关节连杆扭角均为0。 a_{i-1} 表示连杆长度， θ_i 表示关节转角， d_i 表示关节偏置量。

根据上述分析，机器人各关节的位姿矩阵可分别表示为 A_1^0, A_2^1, A_3^2 ，设机器人末端相对于初始坐标系坐标原点的旋转矩阵为 T_3^0 ，如式(2)：

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} n_x & q_x & p_x & b_x \\ n_y & q_y & p_y & b_y \\ n_z & q_z & p_z & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

每个关节相对于初始关节坐标系的旋转变换矩阵可以通过若干个关节的旋转变换矩阵乘积表示，即机器人末端关节相对于初始关节坐标系的旋转变换矩阵可以表示为 $T_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2$ ，等式两边同乘 $(A_1^0)^{-1}$ ，可得 $(A_1^0)^{-1} T_3^0 = A_2^1 A_3^2$ ，从而得到：

$$\begin{cases} b_x \cos \theta_1 + b_y \sin \theta_1 = a_1 + a_2 \cos \theta_2 \\ -b_x \cos \theta_1 + b_y \sin \theta_1 = a_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

为了有效避免运动学逆解的复杂性及减小逆解的误差，引入双变量反正切函数 $\arctan 2(y, x)$ ，反正切函数相比反正弦和反余弦函数主要有以下优点：①确定唯一解，由于双变量规定了 x 和 y 符号，因此能够确定角度所在象限，所以使其在 $[-\pi, \pi]$ 内具有唯一解，避免出现多解情况。②降低逆解的误差，保证逆解的精度，函数 $y = f(x)$ 的计算误差可以表示为 $\Delta y = \Delta x f'(x)$ 。由于 $f_1(x) = \arcsin x$ 和 $f_2(x) = \arccos x$ 的导数值域范围内都存在趋向于无穷的值，致使 Δy 变大，而 $f_3(x) = \arctan x$ 的导数值域保持在 $[0, 1]$ 的范围内，因此可以保证机器人的精度。

依据式(3)可得：

$$\cos \theta_2 = C_2 \quad (4)$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - C_2^2} \quad (5)$$

$$\text{其中, } C_2 = \frac{-a_1^2 - a_2^2 + b_x^2 + b_y^2}{2a_1a_2}.$$

记 $S_2 = \sin \theta_2$, 由式(3)、式(4)和式(5)可得平面关节机器人关节1、2的转角 θ_i 与关节3的偏移量 d_3 :

$$\begin{cases} \theta_2 = \arctan 2(\pm \sqrt{1 - C_2^2}, C_2) \\ \theta_1 = \arctan 2(b_y, b_x) - 2 \arctan 2(a_2 S_2, a_1 + a_2 C_2) \\ d_3 = d_1 - b_z \end{cases} \quad (6)$$

当确定机器人末端位姿矩阵时, 对于 θ_2 与 θ_1 , 关节1与关节2都有两个解, 分别对应每个关节电机的正反旋转, 因此机器人进行路径规划时, 需要对多组解进行最优化选择, 使机器人的运动处于最佳状态。如图3所示, 由机器人运动准则可得最优解过程。

使用Matlab Robotic工具箱对机器人末端进行仿真, 将机器人末端从初始坐标点 $(X_0, Y_0, Z_0) = (0, 656, 0)$ 运动到目标点 $(X_1, Y_1, Z_1) = (400, -256, 150)$ 。如表2所示, 第二组解中, 关节1转角 $\theta_1 = -2.7271$ rad, 超出关节1的转角允许范围。第二组解中, 关节1的转角大于第一组解关节1的转角, 依据机器人最优选择准则, 选择第一组解作为完成该运动的最优逆解。依据最优逆解, 机器人末端运动轨迹及各关节运动曲线图, 如图4所示, 关节1的位移量与速度比关节2小, 并且各关节的运动均匀平稳, 速度及位移没有出现突变现象, 符合机器人运动的平顺性要求。

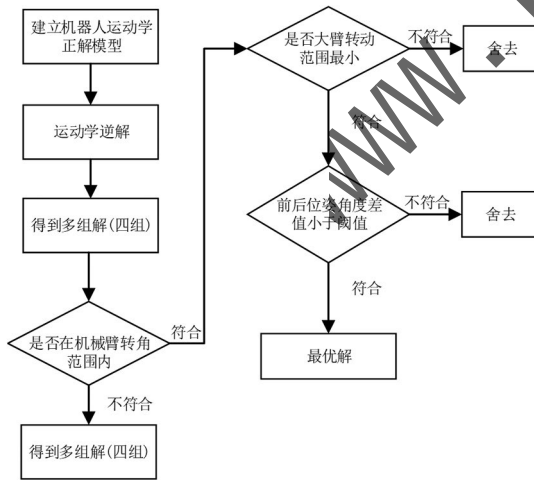


图3 机器人最优选择流程图

Fig.3 Flow chart of robot optimal selection

表2 平面关节机器人末端运动逆解

Tab.2 Inverse solution of end motion of planar joint robot

序号	关节1转角 θ_1 / rad	关节2转角 θ_2 / rad	关节3偏移量 d_3 / mm
1	-1.5708	-1.5708	150
2	-2.7271	1.5708	150

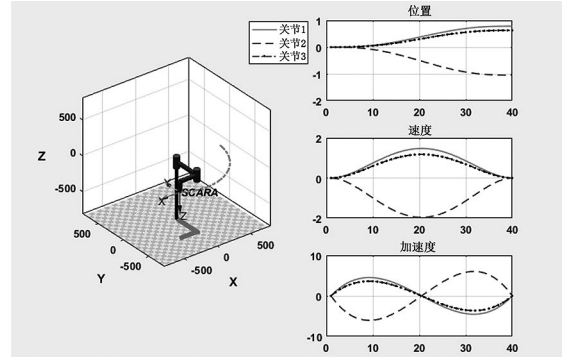


图4 机器人各关节运动曲线图

Fig.4 Motion curve of each robot joint

3 关节空间轨迹规划(Joint space trajectory planning)

3.1 改进“S”形轨迹规划

如图5所示, 将“S”形轨迹分为加加速段 $[0, t_1]$ 、匀加速段 $[t_1, t_2]$ 、减加速度 $[t_2, t_3]$ 、匀速段 $[t_3, t_4]$ 、加减速段 $[t_4, t_5]$ 、匀减速段 $[t_5, t_6]$ 、减减速度 $[t_6, t_7]$ 七段。轨迹规划的输入参数包括机器人系统机械性能约束量最大速度 V_m 、最大加速度 A_m 、最大加加速度 J_m 及目标轨迹约束的各关节运动位移 Q_i 。假设三个关节中最大位移为 Q_m , 并以该位移规划整体轨迹运行时间, 将各关节速度、加速度、加加速度的始、末数值均为0设置为初始条件。

(1) 加加速段 $t \in [0, t_1]$ 。该段轨迹初始位移 $S(t_0)$ 、速度 $V(t_0)$ 、加速度 $A(t_0)$ 、加加速度 $J(t_0)$ 均为0, 结束时加加速度 $J(t_1)$ 为0, 加速度 $A(t_1)$ 达到最大值 A_m , 根据以上条件可得到该段时间内的轨迹, 即

$$\begin{cases} J(t) = J_m \sin\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) \\ A(t) = -\frac{A_m}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) + \frac{A_m}{2} \\ V(t) = -\frac{T_1 A_m}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) + \frac{A_m t}{2} \\ S(t) = \frac{T_1^2 A_m}{2\pi^2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_1}\right) + \frac{A_m t^2}{4} - \frac{T_1^2 A_m}{2\pi^2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $T_1 = \pi A_m / 2J_m$ 。

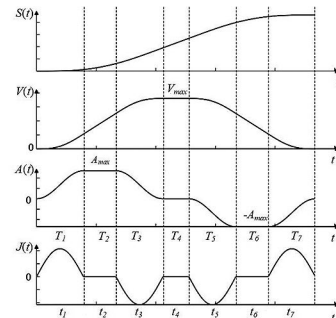


图5 改进“S”形规划轨迹

Fig.5 Improved S-shaped trajectory planning

(2)匀加速段 $t \in [t_1, t_2]$ 。该段轨迹加加速度始终为0，加速度为 A_m ，时长 $T_2 = T_a - T_1 - T_3$ ，根据以上条件可得到该段时间内的轨迹，即

$$\begin{cases} J(t) = 0 \\ A(t) = A_m \\ V(t) = A_m(t - t_1) + V(t_1) \\ S(t) = \frac{A_m}{2}(t - t_1)^2 + V(t_1)(t - t_1) + S(t_1) \end{cases} \quad (8)$$

(3)减加速段 $t \in [t_2, t_3]$ 。该段轨迹初始加加速度 $J(t_2)$ 为0，加速度为 A_m ，结束时加加速度 $J(t_3)$ 为0，加速度 $A(t_3)$ 减为0，速度达到 V_m ，根据以上条件可以得到该段时间内的轨迹，即

$$\begin{cases} J(t) = -J_m \sin\left(\frac{\pi(t - t_2)}{T_3}\right) \\ A(t) = \frac{A_m}{2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_2)}{T_3}\right) + \frac{A_m}{2} \\ V(t) = \frac{T_3 A_m}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi(t - t_2)}{T_3}\right) + \frac{A_m}{2}(t - t_2) + V(t_2) \\ S(t) = -\frac{T_3^2 A_m}{2\pi^2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_2)}{T_3}\right) + \frac{A_m}{4}(t - t_2)^2 + \frac{T_3^2 A_m}{2\pi^2} + V(t_2)(t - t_2) + S(t_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中， $T_3 = T_1$ ， $T_a = \frac{V_m}{A_m} + T_1$ ， $T_2 = \frac{V_m}{A_m} - T_1$ 。

(4)匀速段 $t \in [t_3, t_4]$ 。该段轨迹速度为 V_m ，加速度与加加速度均为0，加速段与减速段运动位移长度相等，时长 $T_4 = \frac{Q_m - 2S(t_3)}{V_m}$ ，根据以上条件可以得到该段时间内的轨迹，即

$$\begin{cases} J(t) = 0 \\ A(t) = 0 \\ V(t) = V_m \\ S(t) = V_m(t - t_3) + S(t_3) \end{cases} \quad (10)$$

(5)加减速段 $t \in [t_4, t_5]$ 。该段轨迹初始速度为 V_m ，加速度与加加速度均为0，结束时加加速度 $J(t_5)$ 为0，加速度 $A(t_5)$ 达到 $-A_m$ ，根据以上条件可以得到该段时间内的轨迹，即

$$\begin{cases} J(t) = -J_m \sin\left(\frac{\pi(t - t_4)}{T_5}\right) \\ A(t) = \frac{A_m}{2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_4)}{T_5}\right) - \frac{A_m}{2} \\ V(t) = \frac{T_5 A_m}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi(t - t_4)}{T_5}\right) - \frac{A_m}{2}(t - t_4) + V(t_4) \\ S(t) = -\frac{T_5^2 A_m}{2\pi^2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_4)}{T_5}\right) - \frac{A_m}{4}(t - t_4)^2 + \frac{T_5^2 A_m}{2\pi^2} + V(t_4)(t - t_4) + S(t_4) \end{cases} \quad (11)$$

其中， $T_5 = \pi A_m / 2J_m$ 。

(6)匀减速段 $t \in [t_5, t_6]$ 。该段轨迹加加速度始终为0，加速度为 $-A_m$ ，时长 $T_6 = T_c - T_5 - T_7$ ，根据以上条件可得该段时间内轨迹，即

$$\begin{cases} J(t) = 0 \\ A(t) = -A_m \\ V(t) = -A_m(t - t_5) + V(t_5) \\ S(t) = -\frac{A_m}{2}(t - t_5)^2 + V(t_5)(t - t_5) + S(t_5) \end{cases} \quad (12)$$

(7)减减速段 $t \in [t_6, t_7]$ 。该段轨迹初始加加速度 $J(t_6)$ 为0，加速度为 $-A_m$ ，结束时加加速度 $J(t_7)$ 、加速度 $A(t_7)$ 减为0，速度降为0，并且此时到达轨迹目标位置，依据以上条件可得：

$$\begin{cases} J(t) = J_m \sin\left(\frac{\pi(t - t_6)}{T_7}\right) \\ A(t) = -\frac{A_m}{2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_6)}{T_7}\right) - \frac{A_m}{2} \\ V(t) = -\frac{T_7 A_m}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi(t - t_6)}{T_7}\right) - \frac{A_m}{2}(t - t_6) + V(t_6) \\ S(t) = \frac{T_7^2 A_m}{2\pi^2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_6)}{T_7}\right) - \frac{A_m}{4}(t - t_6)^2 - \frac{T_7^2 A_m}{2\pi^2} + V(t_6)(t - t_6) + S(t_6) \end{cases} \quad (13)$$

其中， $T_7 = T_5$ ， $T_c = \frac{V_m}{A_m} + T_5$ ， $T_6 = \frac{V_m}{A_m} - T_5$ ， $T_4 = \frac{Q_m - 2S(t_3)}{V_m}$ 。

3.2 关节轨迹规划流程

根据目标轨迹约束条件，匀加速、匀速、匀减速部分时间长度，即 T_2 、 T_4 、 T_6 为0，轨迹规划步骤如图6所示。

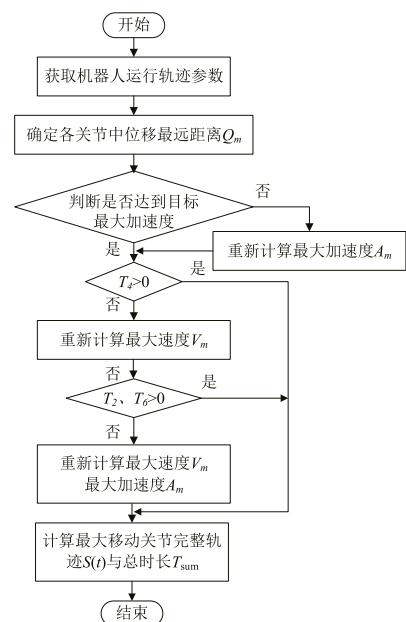


图6 关节轨迹规划流程图

Fig.6 Flow chart of joint trajectory planning

步骤1: 获取机器人运行轨迹参数, 包括各关节当前位置 P_1 、目标位置 P_2 、最大速度 V_m 、最大加速度 A_m 、最大加加速度 J_m , 判断位移距离最远关节的运动范围 $Q_m = \max(P_2(i) - P_1(i))$ 。

步骤2: 根据设定的最大速度与加加速度计算是否能达到目标最大加速度, 如果 $V_m < \frac{\pi A_m^2}{2J_m}$, 则调整最大加速度约束量, 即

$$A_m = \sqrt{\frac{2V_m J_m}{\pi}} \quad (14)$$

步骤3: 判断轨迹中是否存在匀速段, 即计算 $T_4 > 0$ 是否成立, 若成立则规划轨迹为完整轨迹, 跳转到步骤7。

步骤4: 若 $T_4 > 0$ 不成立, 即轨迹无匀速段, 最大速度不可达, 调整最大速度约束量, 其条件为 $T_4 = 0$ 且 $S(t_7) = Q_m$, 即

$$V_m = \frac{1}{4J_m} \left(\sqrt{A_m (\pi^2 A_m^3 + 16Q_m J_m^2)} - \pi A_m^2 \right) \quad (15)$$

步骤5: 判断是否存在匀加匀减速段, 即计算 $T_2 > 0$, $T_6 > 0$ 是否成立, 若成立, 则跳转到步骤7。

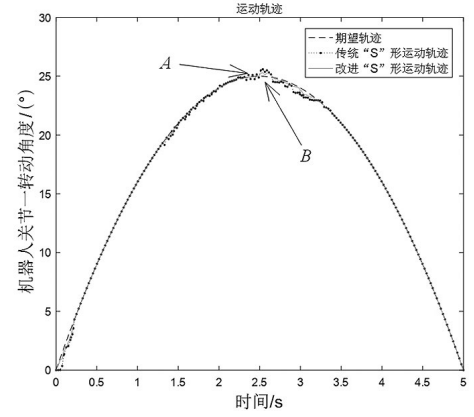
步骤6: 若 $T_2 > 0$, $T_6 > 0$ 不成立, 即轨迹无匀加匀减速段, 最大加速度不可达, 调整最大速度与最大加速度的约束量, 根据条件 $T_2 = 0$ 、 $T_4 = 0$ 、 $T_6 = 0$ 且 $S(t_7) = Q_m$, 可得

$$A_m = \left(\frac{2J_m^2 Q_m}{\pi^2} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ 和 } V_m = \frac{\pi A_m^2}{2J_m}。$$

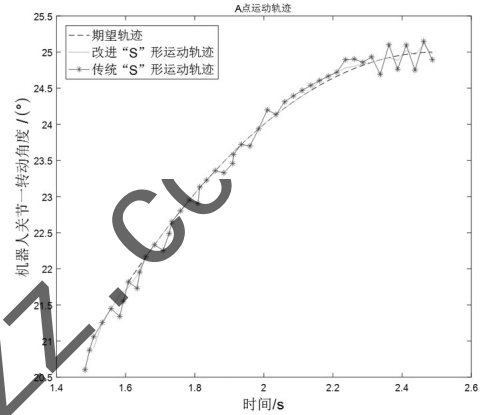
步骤7: 根据上述所得最终最大速度与加速度, 可以得到最大移动关节的完整轨迹、各段轨迹时间长度 $T(i)$ 及总时长 T_{sum} 。

4 实验分析(Experimental analysis)

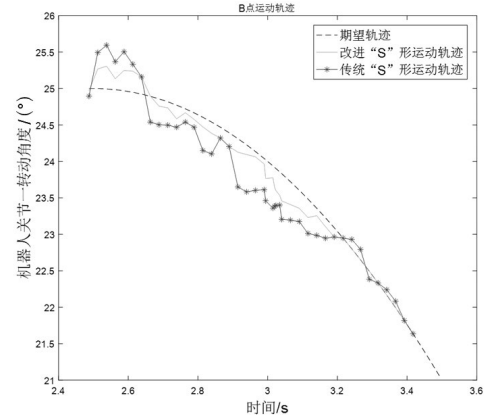
为验证所提出连续有界的多关节改进“S”形时间同步轨迹规划算法, 设置平面关节机器人运动路径起始点 P_1 及终止点 P_2 , 采集并分析机械臂第一关节期望轨迹与实际反馈的关节运动轨迹。图7(a)的A、B两点表示机器人换向运动阶段, 此时机器人关节经历减速、静止、加速三个阶段, 由于惯性和减速度背隙的存在, 因此会出现较大的误差波动。如图7(b)、图7(c)所示, 传统“S”形轨迹算法出现了较大的误差波动, 而改进“S”形轨迹算法的误差变化较为稳定。由此可知, 本文所提出的加加速度连续有界的多关节改进“S”形时间同步轨迹规划方法能够正确规划出不同约束条件下的目标轨迹, 该方法适用于平面关节机器人连续有界平滑轨迹规划, 利用改进“S”形轨迹实现速度、加速度和加加速度有界的连续轨迹规划, 避免阶跃与冲击, 并且保证规划的最大速度、加速度、加加速度均不超过系统设定的最大限制量。



(a) 关节轨迹跟踪曲线



(b) A点轨迹跟踪曲线



(c) B点轨迹跟踪曲线

图7 平面关节机器人第一关节轨迹跟踪曲线

Fig.7 Trajectory tracking curve of the first joint of planar joint robot

5 结论(Conclusion)

本文通过引入双变量反正切函数结合运动学逆解的方法规划机器人最优关节转角范围, 利用三角函数改进“S”形轨迹规划算法, 约束运动过程中的最大速度、加速度、加加速度的限制值, 改善了机器人运动过程中由于加加速度非连续轨迹导致关节驱动力矩的突变。相较于传统算法, 改进的“S”形轨迹规划算法有效提升了机器人的稳定性, 改善了机器人的运动轨迹突变情况。

参考文献(References)

- [1] 田宇.基于机器人操作系统的智能移动小车目标识别研究[J].软件工程,2021,24(08):11-15.
- [2] 沈念伟,于大泳.基于多信息融合的轮式机器人定位算法研究[J].软件工程,2022,25(09):13-17.
- [3] 游有鹏,张宇,李成刚.面向直接示教的机器人零力控制[J].机械工程学报,2014,50(3):10-17.
- [4] 杜亮.六自由度工业机器人定位误差参数辨识及补偿方法的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [5] 殷凤健,梁庆华,程旭,等.基于时间最优的机械臂关节空间轨迹规划算法[J].机械设计与研究,2017,33(05):12-15.
- [6] 李小为,胡立坤,王琬.速度约束下PSO的六自由度机械臂时间最优轨迹规划[J].智能系统学报,2015,10(3):393-398.
- [7] 王学琨,李刚,周东凯,等.基于DE的时间最优6-DOF机械臂轨迹规划算法[J].计算机仿真,2015,32(8):332-337.
- [8] 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.
- [9] 钱文学,宋帅,李昊,等.基于混合样条曲线的换刀机器人换刀轨迹规划研究[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(10):1427-1434.
- (上接第58页)
- [7] 马佳力,谢娅娅.基于物联网的智慧农业大棚系统的研究与实现[J].信息通信,2019(01):134-135.
- [8] LI Y, WANG H, DANG L M, et al. Crop pest recognition in natural scenes using convolutional neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020(169):105174.
- (上接第62页)
- [2] 党向盈,巩敦卫,姚香娟.基于统计分析的弱变异测试可执行路径生成[J].计算机学报,2016,39(11):2355-2370.
- [3] NGUYEN Q V, MADEYSKI L. Addressing mutation testing problems by applying multi-objective optimization algorithms and higher order mutation[J]. Intelligent and Fuzzy Systems, 2017, 32(2):1173-1182.
- [4] SAXENA A, PRASAD M, GUPTA A. A review of clustering techniques and developments[J]. Neurocomputing, 2017, 267(6):664-681.
- [5] PAPADAKIS M, MALEVRIS N. Automatically performing weak mutation with the aid of symbolic execution, concolic testing and search-based testing[J]. Software Quality, 2011, 19(4):691-723.
- [6] DANG X Y, GONG D W, YAO X J. Enhancement of mutation testing via fuzzy clustering and multi-population genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2022, 23(4):2426-2463.
- [7] NISHTHA J, BHARTI S, SHWETA R. Systematic literature review on search based mutation testing[J]. E-Informatica Software Engineering, 2017, 11(1):61-78.
- [8] AICHERNIG B K, TAPPLER M. Efficient active automata learning via mutation testing[J]. Automated Reasoning, 2019, 63(4):1103-1134.
- 作者简介:**
党向盈(1978-),女,博士,副教授.研究领域:软件测试,进化算法应用.
李金凤(1980-),女,硕士,实验师.研究领域:计算机应用,软件开发.
- 作者简介:**
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(09):2248-2255.
- [11] EVGEBIEVICH I S, TATIANA Z, TATIANA V, et al. Mathematical modeling of the dynamics of 3-DOF robot-manipulator with software control[J]. Procedia Computer Science, 2020, 178(7):311-319.
- [12] 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.
- [13] 李鹏浩.七自由度冗余空间机械臂多目标轨迹规划研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- 作者简介:**
陈登钱(1995-),男,硕士生.研究领域:智能路径规划.
孔维宾(1982-),男,博士,副教授.研究领域:电子信息,智能算法.
王德智(1987-),男,本科,工程师.研究领域:控制系统,机器人.
孔祥晔(1998-),男,硕士生.研究领域:智能控制系统,信号检测.
平欣(1996-),男,硕士生.研究领域:系统与自动控制.
- 作者简介:**
王俊博(2001-),男,本科生.研究领域:智能物联.
杜洪波(1977-),男,硕士,副教授.研究领域:数据挖掘与机器学习.
梁振华(2002-),男,本科生.研究领域:智能物联.
戴煜仁(2002-),男,本科生.研究领域:智能物联.