

文章编号: 1006-2343(2022)03-081-07

Delta 机器人运动轨迹动态规划方法

张 俊, 刘浩阳, 许 涛

(福州大学 机械工程及自动化学院 福州 350116, E-mail: zhang_jun@fzu.edu.cn)

摘 要: 针对 Delta 机器人末端的残余振动和抓取效率问题, 提出一种基于 Bézier 曲线的轨迹动态规划方法, 并为每段轨迹的运动周期提供设置依据。首先, 以机器人路径中障碍物作为控制点的设置原则, 利用多阶 Bézier 曲线动态调整路径中不同数量障碍物所对应的轨迹几何形状。其次, 采用 3-4-5 次多项式对轨迹运动规律进行三维规划, 获得轨迹插补点的位置、速度和加速度。最后, 优化轨迹几何形状, 并基于关节能量近似函数优选机器人运动周期, 以满足运动过程中的高效性和稳定性要求。运动轨迹及运动规律仿真结果表明, 所提轨迹规划方法能够有效规避障碍物, 并且运动速度与加速度连续且光滑。在搭建的 Delta 机器人样机上采用所提轨迹规划方法进行抓取实验, 结果表明, 抓取速率可达 100 次/分钟, 且能够有效降低运动停止后机器人末端的残余振动。

关键词: Delta 机器人; 轨迹规划; Bézier 曲线; 3-4-5 高阶多项式

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2022.0168

Dynamic Trajectory Planning of Delta Robot

ZHANG Jun, LIU Haoyang, XU Tao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: To address the residual vibration and the efficiency problems of Delta robots, a dynamic trajectory planning method based on Bézier curve for a Delta robot is proposed to solve the problem of uncertainty in the selection of critical path points and motion period. The purpose of the critical path points setting is to enable the robot to evade obstacles in the path. Firstly, according to the number of obstacles, the trajectories can be divided into single obstacle trajectory and multiple obstacle trajectory. The 2nd order Bézier curve is used to determine the trajectory geometry when there is a single obstacle while the 3rd order Bézier curve is used to determine the trajectory geometry when there are multiple obstacles. Secondly, the 3-4-5 polynomial is adopted to plan the three-dimensional displacement along the curve and generate the position, velocity and acceleration information necessary for the interpolation points. Finally, the trajectories corresponding to different numbers of obstacles are optimized. And the motion time is optimized based on the energy approximation function of joint torques and angular rates, so that the robot's motion meets the requirements of high efficiency and stability. Simulation results show that the proposed trajectory planning method can dynamically adjust the trajectory shape according to the position and number of obstacles, and the velocity and acceleration are continuous and smooth in the process of motion. The proposed trajectory planning method is used in the pick-and-place operation on the Delta robot, and the results show that the pickup speed can reach 110 times per minute. Through the acceleration motion test, it is proved that the trajectory planning method can effectively reduce the residual vibration of the end-effector after the motion stops and the residual vibration decreases with the increase of the motion period.

Key words: Delta robot; trajectory planning; Bézier curve; 3-4-5 polynomials

作为一类被广泛应用于高速生产线上物料分拣、搬运等

操作的自动化装备, Delta 机器人的运动轨迹和运动规律对整机高速高频工作时的运动精度与稳定性具有决定性影响^[1-3]。Delta 机器人的早期研究主要集中在运动学分析、动力学分析、性能评估等方面^[4-7], 关于轨迹规划的研究相对较少^[8-9]。随着 Delta 机器人在工业高速拾放操作中的广

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2019H6006); 福建省自然科学基金杰青项目(2020J06010); 机械传动国家重点实验室开放基金(SKLM-T-ZDKF-KT-202003)

泛应用,合理规划其工作轨迹变得至关重要。

Delta 机器人在拾放操作中大多采用门字形运动轨迹,由竖直-水平-竖直三部分组成^[10]。由于运动连接处存在直角,速度和加速度变化的不连续易导致运动时产生振动和冲击。为使直角过渡部分变得平滑,常在操作空间采用多项式^[11]、B 样条曲线^[12-13]和修正梯形^[14]等运动规律。上述轨迹规划方法以最小运动周期为优化目标,但未充分考虑控制点设置原则以及运动停止后的残余振动。郑坤明^[15]提出了一种基于 Delta 机器人动力学模型的轨迹规划方法,但其方法计算量大,因而编写的控制程序相对复杂,难以满足实时控制。解则晓^[16]提出了一种基于 Lamé 曲线的拐点平滑过渡轨迹规划方法,并利用高阶多项式运动规律进行三维规划,以获得运动插补点的位置、速度和加速度序列。该方法能够确定轨迹形状并在降低残余振动方面效果良好,但是 Lamé 曲线计算复杂,对控制系统的时效性产生不利影响。梅江平^[17]在关节空间利用五次非均匀有理 B 样条运动规律进行规划,该方法在减小运动过程中机器人振动和降低电动机功率等方面优势明显。Fang^[18]提出一种光滑且时间最优的 S 曲线轨迹规划方法,该方法具有更高的计算效率,且避免了高阶多项式模型的复杂度。然而,上述方法对机器人运动路径上控制点的设置未给出具体依据。如果控制点位置不同,将造成轨迹形状的改变,从而使运动周期也随之变化。故寻求一种使机器人末端能够根据拾放点和障碍物动态调整运动轨迹的方法是十分必要的。

由于优良的几何性质,Bézier 曲线被广泛应用于移动机器人路径规划、高速数控加工等领域^[19-21]。本文提出一种基于 Bézier 曲线的 Delta 机器人轨迹动态规划方法。根据拾放点位置和障碍物数量及位置确定运动轨迹几何形状,并结合 3-4-5 次多项式运动规律,获得各轨迹插补点的位置、速度和加速度信息。对机器人运动轨迹参数 H 和运动周期 T 进行优化,使运动轨迹能更合理规避障碍物的同时保持机构运动高效性和稳定性。最后通过实验样机验证了所提轨迹动态规划方法可合理规避路径中障碍物,并且能有效降低 Delta 机器人运动停止后的残余振动。

1 轨迹规划

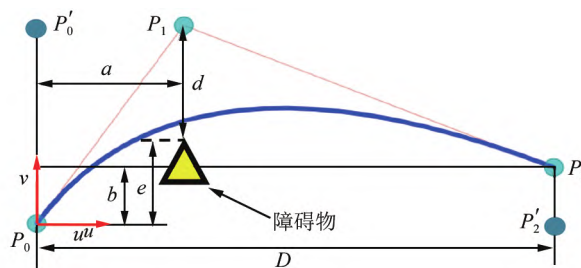
Bézier 曲线可以定义为

$$B(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n b_{i,n}(\varepsilon) \times P_i \quad \varepsilon \in [0, 1] \quad (1)$$

式中: $b_{i,n}(\varepsilon) = C_n^i \varepsilon^i (1-\varepsilon)^{n-i}$; $P_i = (u_i, v_i)$ 为控制点坐标,函数阶数为 n ,控制点个数为 $n+1$ 。

机器人运动轨迹中存在单个障碍物时,轨迹中有三个控制点,分别为运动起始点、障碍物控制点和运动终止点。以下利用二阶 Bézier 曲线建立单障碍物运动轨迹模型。

拾放位置 P_0, P_2 为 Delta 机器人工作空间内任意两点,利用机器视觉识别拾放路径中障碍物的位置和高度信息,如图 1 所示。在 P_0 处建立平面坐标系 P_0-uv , P_1 为障碍物对应控制点,障碍物与 u 轴最大距离为 e 。在该坐标系下, Bézier 曲线控制点坐标分别为 $P_0 = (0, 0)$ 、 $P_1 = (a, d+e) = (a, H)$ 、 $P_2 = (D, b)$ 。



▲ 图 1 单障碍物工作路径及控制点

则单障碍物下的运动轨迹可表示为

$$B_1(\varepsilon) = (1-\varepsilon)^2 P_0 + 2\varepsilon(1-\varepsilon) P_1 + \varepsilon^2 P_2 \quad (2)$$

将图 1 中控制点坐标代入(2)式中得到轨迹参数化表达式

$$\begin{cases} u_1(\varepsilon) = 2a\varepsilon + (D-2a)\varepsilon^2 \\ v_1(\varepsilon) = 2H\varepsilon - (2H-b)\varepsilon^2 \end{cases} \quad (3)$$

Bézier 曲线弧长计算公式为

$$S_1 = \int_0^1 \sqrt{u'(\varepsilon)^2 + v'(\varepsilon)^2} d\varepsilon \quad (4)$$

1.1 轨迹插补点位置、速度和加速度

规划机器人轨迹时需要使运动过程满足平稳性的要求,即要求机器人的位移、速度和加速度连续且不能产生突变。由于 3-4-5 次多项式运动规律对时间三阶导数连续,同时因其公式简单,控制器易于实现实时计算,故被广泛用于机器人操作空间轨迹规划。结合始末位置等边界条件,得到 3-4-5 次多项式运动规律为

$$\begin{cases} s(t) = S(10\tau^3 - 15\tau^4 + 6\tau^5) \\ v(t) = \frac{S}{T}(30\tau^2 - 60\tau^3 + 30\tau^4) \\ a(t) = \frac{S}{T^2}(60\tau - 180\tau^2 + 120\tau^3) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $s(t)$ 为机器人末端的位移的运动规律; $v(t)$ 为机器人末端的速度的运动规律; $a(t)$ 为机器人末端的加速度的运动规律。 T 为运动周期, S 为拾取操作曲线总位移, τ 为当前时刻的等效时间算子, $\tau = t/T$ 。

在确定机器人运动规律后,需要获得轨迹上 t_i 时刻插补点的位置、速度和加速度序列。最后通过机器人逆运动学模型求得主动关节的运动信息,除以减速比后得到机器人操作空间内各插补点所对应的电机驱动序列。

设机器人从 $t=0$ 时开始从 P_0 点沿二阶 Bézier 曲线运动到 P_2 点,并将整个过程分成等分,则时间序列为

$$t_i = T \frac{i}{N} \quad i=0, 1, \dots, N \quad (6)$$

为提高控制器运算时效性,利用弧微分法^[16]计算 t_i 时刻所对应的位置、速度和加速度。

当 $\Delta s_i \rightarrow 0$ 时,利用弧微分可以表示为

$$\Delta u_{i+1} = \frac{\Delta s_i}{\sqrt{1 + [k_i]^2}} \quad (7)$$

式中: $\Delta s_i = s(t_{i+1}) - s(t_i)$; k_i 为 t_i 时刻对应的二阶 Bézier 曲线斜率。

则下一时刻所对应的坐标为

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_{i+1} \quad (8)$$

由式(3)可求出 t_{i+1} 时刻 ε_{i+1} 为

$$\varepsilon_{i+1} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + (D-2a)u_{i+1}}}{D-2a} \quad (9)$$

同时 t_{i+1} 时刻下

$$v_{i+1} = 2H\varepsilon_{i+1} - (2H-b)\varepsilon_{i+1}^2 \quad (10)$$

设二维坐标系 P_0-uv 下轨迹位置序列到系统坐标系 $O-XYZ$ 的转换矩阵为 R 满足

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 \\ r4 & r5 & r6 \\ r7 & r8 & r9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

坐标系 $O-XYZ$ 下 P_0 和坐标 P_2 为 (x_0, y_0, z_0) 、 (x_2, y_2, z_2) 坐标系 P_0-uv 下 P_0, P_0', P_2, P_2' 坐标分别为 $(0, 0)$ 、 $(0, H)$ 、 (D, b) 、 $(D, 0)$ 可求得转换矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \frac{x_2 - x_0}{D} & 0 & x_0 \\ \frac{y_2 - y_0}{D} & 0 & y_0 \\ 0 & 1 & z_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此, 系统坐标系下 t_i 时刻插值点的位置坐标为

$$S_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

当 $\Delta s_i \rightarrow 0$ 时 $\Delta s_i \approx \sqrt{\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2}$, 则

$$\begin{bmatrix} v_{ui} \\ v_{vi} \end{bmatrix} = s'(t_i) \begin{bmatrix} \Delta u_i / \sqrt{\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2} \\ \Delta v_i / \sqrt{\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2} \end{bmatrix} \approx \frac{s'(t_i)}{\Delta s_i} \begin{bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时, 系统坐标系下的速度为

$$V_i = \begin{bmatrix} r1 & r2 \\ r4 & r5 \\ r7 & r8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ui} \\ v_{vi} \end{bmatrix} \quad (15)$$

P_0-uv 坐标系下加速度为

$$\begin{bmatrix} u''(t_i) \\ v''(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u''(\varepsilon_i)(\varepsilon'(t_i))^2 + u'(\varepsilon_i)\varepsilon''(t_i) \\ v''(\varepsilon_i)(\varepsilon'(t_i))^2 + v'(\varepsilon_i)\varepsilon''(t_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

上式 $u'(\varepsilon_i)$ 、 $u''(\varepsilon_i)$ 、 $v'(\varepsilon_i)$ 、 $v''(\varepsilon_i)$ 可通过式(3)求得。由于

$$s'(t_i) = \sqrt{[u'(t_i)]^2 + [v'(t_i)]^2} = \varepsilon'(t_i) \sqrt{[u'(\varepsilon_i)]^2 + [v'(\varepsilon_i)]^2} \quad (17)$$

所以

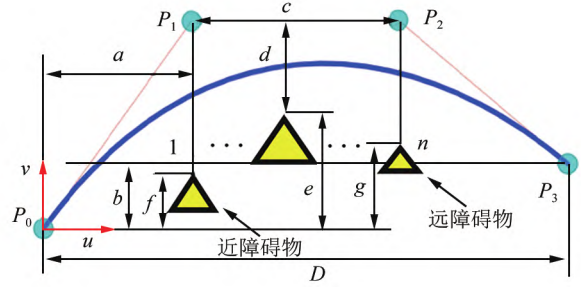
$$\varepsilon'(t_i) = \frac{s'(t_i)}{\sqrt{[u'(\varepsilon_i)]^2 + [v'(\varepsilon_i)]^2}} \quad (18)$$

式(18)对时间求导, 可得 $\varepsilon''(t_i)$ 。则系统坐标系 $O-XYZ$ 下的加速度为

$$A_i = \begin{bmatrix} r1 & r2 \\ r4 & r5 \\ r7 & r8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u''(t_i) \\ v''(t_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

通过上述计算得到单障碍路径下的位置、速度和加速度

信息。同时考虑到机器人拾放路径中存在多处障碍物情况如图2所示, 近障碍物坐标为 (a, f) , 远障碍物坐标为 $(a+c, g)$, 障碍物中与 u 轴的最大距离为 d 。为保证所有障碍物都能在路径下, 分别取近、远障碍物所对应的 P_1, P_2 点作为曲线控制点。



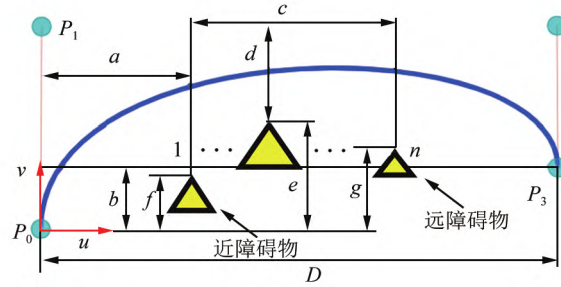
▲图2 多障碍物工作路径及控制点

P_0-uv 坐标系下, 拾放点和障碍物所对应的控制点为 $P_0 = (0, 0)$ 、 $P_1 = (a, d+e) = (a, H)$ 、 $P_2 = (a+c, d+e) = (L, H)$ 、 $P_3 = (D, b)$ 。

则轨迹方程为

$$\begin{cases} u_2(\eta) = (3a + D - 3L)\eta^3 + (3L - 6a)\eta^2 + 3a\eta \\ v_2(\eta) = b\eta^3 - 3H\eta^2 + 3H\eta \end{cases} \quad (20)$$

为进一步简化方程, 弱化障碍物位置对运动轨迹的影响, 使控制系统更易实现。将控制点的 u 轴坐标分别改为运动起始点、终止点的 u 轴坐标, 则控制点坐标分别为 $P_1 = (0, d+e) = (0, H)$ 、 $P_2 = (D, d+e) = (D, H)$, 如图3所示。



▲图3 简化后工作路径及控制点

简化后的多障碍物轨迹方程用3阶 Bézier 曲线表示为

$$\begin{cases} u_3(\eta) = 3D\eta^2 - 2D\eta^3 \\ v_3(\eta) = b\eta^3 - 3H\eta^2 + 3H\eta \end{cases} \quad (21)$$

该段轨迹插补点位置、速度和加速度的求解方法与2阶 Bézier 曲线求法相同, 此处不再赘述。

1.2 曲线参数优化

根据前文建立的轨迹方程, 机器人轨迹几何形状与 Bézier 曲线参数 H 相关, 而轨迹插补点位置、速度和加速度与运动周期 T 相关, 故可考虑分别对变量 H 和 T 进行优化。

1.2.1 曲线参数

若使运动能合理规避所有障碍物, 则需满足

$$\left. \begin{aligned} v_1(\varepsilon_j) > e, \varepsilon_j \in (0, 1) \\ v_3(\eta_j) > e, \eta_j \in [\eta_1, \eta_2] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中: v_1 表示单障碍物轨迹满足条件, 且 $u_1(\varepsilon_j) = a$; v_3 表示多障碍物轨迹满足条件, 且 $u_3(\eta_1) = a, u_3(\eta_2) = a + c$ 。

运动轨迹为单障碍物工作路径时, 将式(22)中 $v_1(\varepsilon_j)$ 带入式(3)中, 有

$$H > \frac{e - b\varepsilon_1^2}{(2\varepsilon_1 - 2\varepsilon_1^2)} \quad (23)$$

运动轨迹为多障碍物工作路径时, 将式(22)中 $v_3(\eta_j)$ 带入式(21)中, 有

$$v_3(\eta_j) = b\eta_j^3 - 3H\eta_j^2 + 3H\eta_j > e$$

$v_3(\eta_j)$ 为 $[\eta_1, \eta_2]$ 区间内最小值, 为确定 η_j 的值, 对 v_3 求导得

$$v_3'(\eta_j) = 3b\eta_j^2 - 6H\eta_j + 3H$$

(1) 当 $H > b$ 时

由于 $\Delta = 36H^2 - 36bH > 0$, 所以极值点为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{H - \sqrt{H(H-b)}}{b} \\ x_2 &= \frac{H + \sqrt{H(H-b)}}{b} \end{aligned} \right\}$$

可以证明 $0 \leq x_1 \leq 1$ 且 $v_3(x_1)$ 为极大值, $[0, x_1]$ 内 v_3 单调增, $[x_1, 1]$ 内 v_3 单调减。所以, 当 $\eta_1 < \eta_2 < x_1$ 时, 最小值为 $v_3(\eta_1)$; 当 $\eta_1 < x_1 < \eta_2$, 最小值为 $\min(v_3(\eta_1), v_3(\eta_2))$; 当 $x_1 < \eta_1 < \eta_2$ 时, 最小值为 $v_3(\eta_2)$ 。

假设最小值为 $v_3(\eta_1)$, 则

$$H_1 = \frac{e - b\eta_1^3}{(3\eta_1 - 3\eta_1^2)}$$

$$v_3(\eta_1) = b\eta_1^3 - 3H\eta_1^2 + 3H\eta_1$$

$$v_3(\eta_2) = b\eta_2^3 - 3H\eta_2^2 + 3H\eta_2$$

若 $v_3(\eta_1) < v_3(\eta_2)$, 则假设成立

$$H > H_1 \quad (24)$$

若 $v_3(\eta_1) > v_3(\eta_2)$, 则假设不成立

$$H > \frac{e - b\eta_2^3}{(3\eta_2 - 3\eta_2^2)} \quad (25)$$

(2) 当 $H \leq b$ 时

由于 $\Delta \leq 0$, v_3 在 $[\eta_1, \eta_2]$ 区间内单调递增, 故

$$H > \frac{e - b\eta_1^3}{(3\eta_1 - 3\eta_1^2)} \quad (26)$$

1.2.2 运动周期

为探究运动周期和运动轨迹的关系, 首先根据 Delta 机器人的运动学和动力学模型来确定机器人运动轨迹所对应的关节运动信息^[5]。为降低残余能量以抑制残余振动, 以驱动电动机在运动周期 T 内的平均输出能量 F_a 为优化目标^[22]。

$$F_a = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N Q_i \quad (27)$$

目标优化函数 F_a 表示电机在给定运动周期 T 内的平均功率, F_a 数值越小, 机器人拾放操作的能量需求就越小, 从而可减小运动停止后的残余振动。

$$Q_i = |\tau_{i1} \dot{q}_{i1}| + |\tau_{i2} \dot{q}_{i2}| + |\tau_{i3} \dot{q}_{i3}| \quad (28)$$

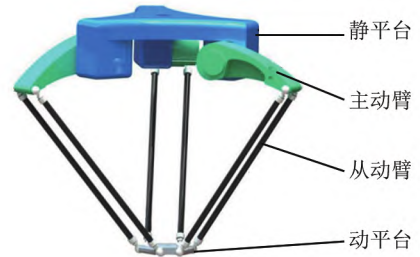
式中: Q_i 为 t_i 时刻 Delta 三个主动关节驱动电机的瞬时功率绝对值之和, τ 为关节驱动力矩, \dot{q} 为关节角速度^[23]。

以图 4 所示

的 Delta 机器人为例, 其各个参数参数如表 1 所示, 其中 H 为满足推论条件的最小整数, 在其工作空间内选取具有典型性的运动起始点和终止点, 并在该段轨迹平面内设置两个障碍物。

运动周期 T 与功率 F_a 及其曲线斜率 $K = F_a'(T)$ 的关系如图 5 所示, 其中运动周期的计算步长 $\Delta t = 0.05$ s。

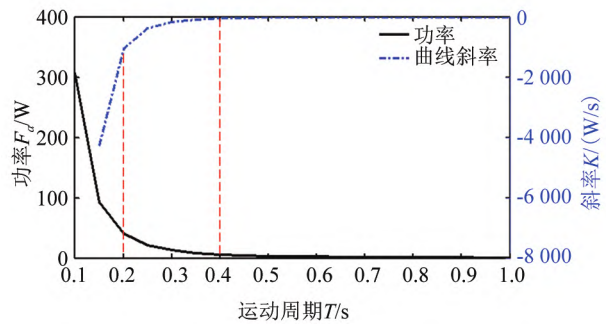
由功率曲线可知, 当周期在 0.1 ~ 0.2 s 之间时, 功率 F_a 随运动周期 T 的增加而快速降低, 而在 0.2 s 之后 F_a 随 T 的增加缓慢减小并逐渐趋于 0 W。由功率的曲线斜率可知, 曲线斜率随 T 的增加在不断变小, 所以功率变化量在不断减小, 在 0.4 s 后功率变化量逐渐趋于 0 W/s。



▲图 4 Delta 机器人的结构图

表 1 Delta 机器人结构参数和轨迹参数

参数	数值/mm
静平台半径 R	60
主动臂长度 l_1	250
从动杆长度 l_2	420
动平台半径 r	45
起始点坐标 P_0	(-100, -420)
近障碍物坐标 P_1	(-30, -385)
远障碍物坐标 P_2	(40, -385)
终止点坐标 P_3	(100, -400)
曲线参数 H	47



▲图 5 功率 F_a 和运动周期 T 的关系

功率曲线斜率的变化量相对较小时表示为运动周期的变化对功率的影响不明显。曲线斜率的变化量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} K_i - K_{i-1} &= K_{fi} \\ K_{i+1} - K_i &= K_{bi} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

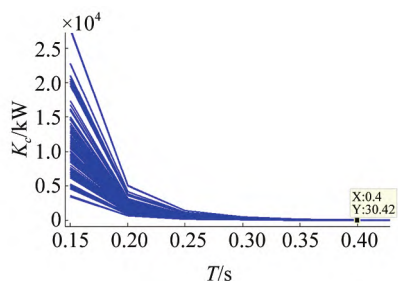
式中: K_i 为 T_i 时刻对应的功率曲线斜率, K_{fi} 和 K_{bi} 分别为 T_i 时刻与 T_{i-1} 和 T_{i+1} 时刻的功率曲线斜率的变化量。

$$K_{fi} - K_{bi} \leq K_c \quad (30)$$

运动周期取功率曲线斜率的变化量小于 K_c 时所对应的 T_i 时刻。 K_c 的大小与机器人尺度参数和计算步长 Δt 相关,

在机器人运动空间内进行大量轨迹数据仿真,结果如图6所示。

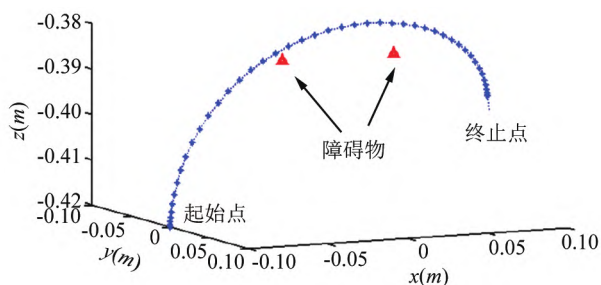
由图6中曲线变化规律可知,功率曲线斜率的变化量相对较小时主要集中在 $T_i = 0.4$ 。为达到该效果,将 K_c 设为30较为合理。



▲图6 功率变化率 K_c 和运动周期 T 的关系

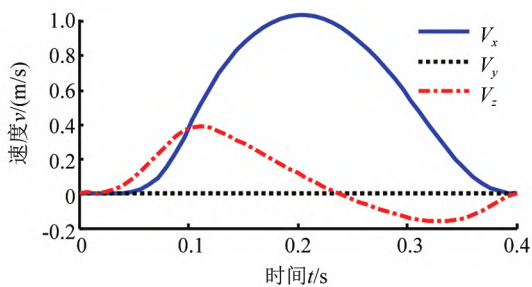
2 仿真与实验

由表1中的位置信息,仿真得到机器人运动轨迹,如图7所示。显然,该运动轨迹能准确规避路径中障碍物。

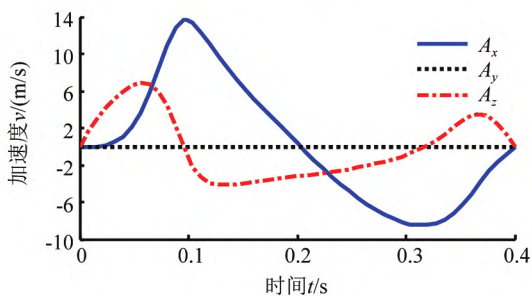


▲图7 机器人末端运动轨迹

图8为该运动轨迹下机器人末端 x 、 y 、 z 轴方向的速度与加速度曲线,可以看出速度与加速度连续且光滑,表明该机器人运动平稳且具有较好的动态特性。



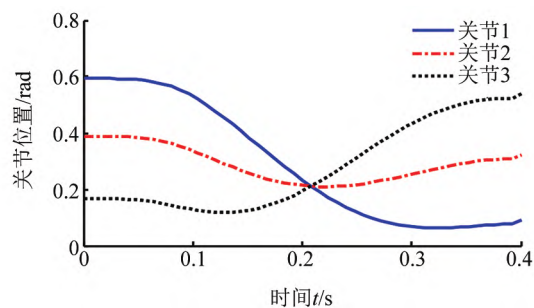
(a) 速度



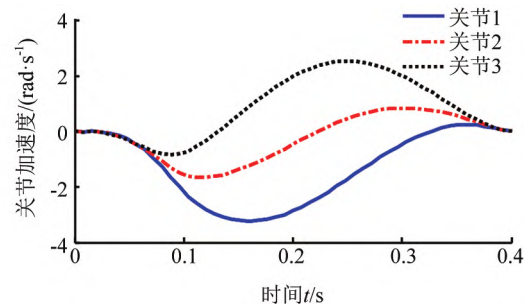
(b) 加速度

▲图8 机器人末端速度和加速度曲线

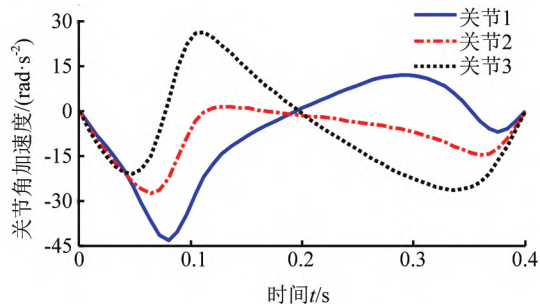
将获得的插补点位置、速度和加速度序列通过机器人逆运动学转化为每个运动关节的转角位置、角速度和角加速度信息,其结果如图9~11所示。



▲图9 运动关节位置

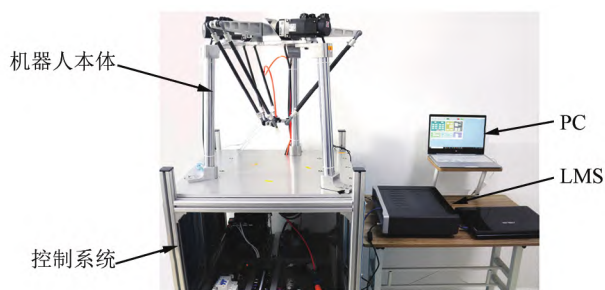


▲图10 运动关节角速度



▲图11 运动关节角加速度

为验证机器人在该轨迹规划方法下的运动性能,搭建了如图12所示的Delta机器人实验平台。



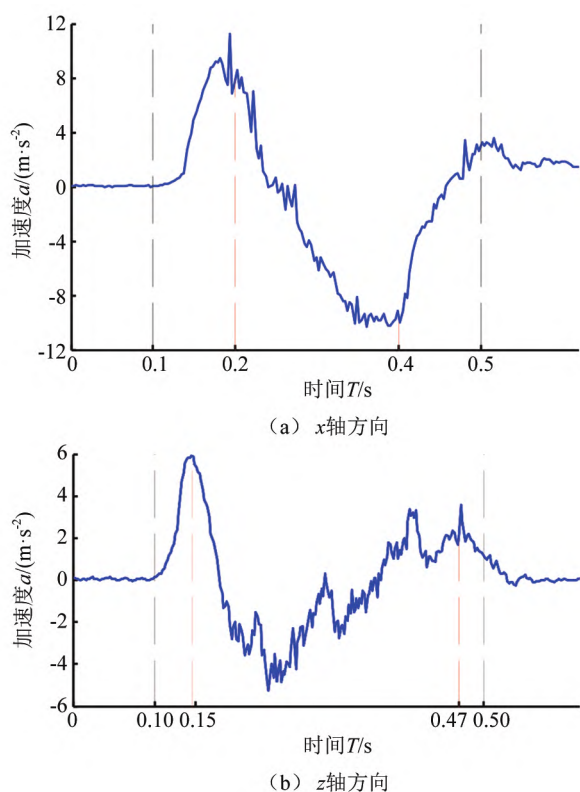
▲图12 Delta 机器人样机实验系统

其中控制器采用 SMC606 六轴运动控制器,伺服电机和驱动器采用三菱 HG-KR43J + MR-J4 系列。数据采集系统为西门子 LMS SCADAS Mobile SCM05,分别将3个 Kistler 8778A500 单向加速度传感器固定在操作器末端 x 、 y 、 z 三个方向上。实验中,利用 VC2015 软件基于 C# 语言开发的上位机系统将轨迹信息通过控制器发送给驱动器,从而实现电机运动。

Delta 机器人样机采用所提轨迹规划方法在工作空间内进行拾放操作测试,实验过程中机器人运动平稳,抓取速率

可达 100 次/min。

同时, Delta 机器人依据表 1 中的轨迹参数, 从起始点运动到终止后停止。由于运动方向在 $x-z$ 平面内, 分别测量出 x 轴和 z 轴方向的加速度, 如图 13(a) 和 (b) 所示。



▲图 13 机器人末端加速度

从图 13 可以看出, 机器人从 0.1 s 开始运动, 0.5 s 后运动结束, 加速度在运动结束后快速衰减, 有效减小了运动停止后的残余振动。对比图 8 中仿真结果可知, x 和 z 方向上的加速度变化规律一致, 而 z 方向上实测加速度的峰值略小于仿真结果, 原因可能在于所采用的减速机存在较大背隙, 向上运动时对 z 方向的速度产生较大影响。同时由于碳纤维材料的从动杆具有弹性和运动关节间隙的存在使机器人运动过程中加速度产生了一定波动。

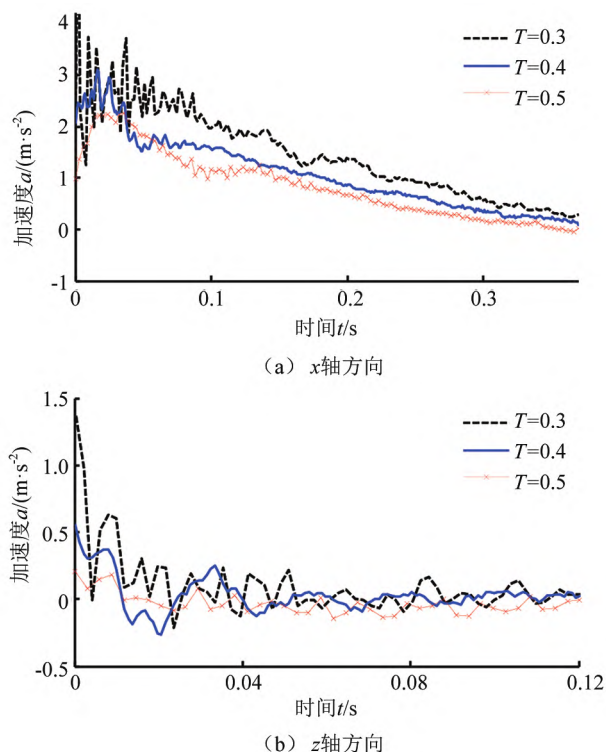
此外, 为验证运动周期对残余振动的影响, 使机器人分别以 $T=0.3$ s、 $T=0.4$ s、 $T=0.5$ s 为运动周期沿同一轨迹运动, 并分别多次采集 x 轴和 z 轴方向的残余振动, 其结果如图 14(a) 和 (b) 所示。

可以看出, 在 x 轴方向机器人末端残余振动随运动周期 T 的增大而减小。不仅如此, $T=0.4$ s 与 $T=0.5$ s 间残余振动的变化量较小于 $T=0.3$ s 与 $T=0.4$ s 间残余振动的变化量。同样 z 轴方向机器人末端残余振动随运动周期 T 的增大而减小, 且更快速地趋于稳定。

3 结论

本文以 Delta 机器人为研究对象, 针对其末端的残余振动和抓取效率问题, 利用 Bézier 曲线对机器人末端轨迹进行动态规划, 并通过仿真和实验分析验证了该轨迹规划的有效性和正确性, 得出以下结论:

(1) 基于 Bézier 曲线提出的 Delta 机器人动态轨迹规



▲图 14 不同运动周期残余振动

划方法, 可根据拾放点位置和路径中障碍物数量及位置动态调整轨迹几何形状, 有效解决了路径中控制点设置不明确的问题。

(2) 基于关节能量近似函数为每段轨迹运动周期提供设置依据, 从而可以优选出对该段轨迹的残余振动影响不明显的运动周期。

(3) 以典型位置下 Delta 机器人的运动轨迹为例, 结合 3-4-5 次多项式运动规律对运动轨迹进行了三维规划, 得到位置、速度和加速度序列。仿真结果表明, 所提轨迹规划方法能够有效规避障碍物, 运动过程中速度与加速度连续且光滑。

(4) 在 Delta 机器人样机上进行测试实验, 结果表明, 采用所提轨迹规划方法进行抓取操作时, 速度可达 100 次/min, 且能有效降低运动停止后机器人末端的残余振动。

参考文献

- [1] 冯季航, 张为公, 龚宗洋, 等. Delta 系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人, 2014, 36(3): 375-384.
- [2] KELAIAIA R. Improving the pose accuracy of the Delta robot in machining operations [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 2205-2215.
- [3] ZHENG K M, ZHANG Q J. Comprehensive analysis of the position error and vibration characteristics of Delta robot [J]. Advanced Robotics, 2016, 30(19/20): 1322-1340.
- [4] BRINKER J, CORVES B, TAKEDA Y. Kinematic performance evaluation of high-speed Delta parallel robots based on motion/force transmission indices [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 125: 111-125.
- [5] 张利敏, 梅江平, 赵学满, 等. Delta 机械手动力尺度综合[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 1-7.

- [6] 郑坤明, 张秋菊. 含关节间隙的 Delta 机器人弹性动力学与振动特性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 39-48.
- [7] JHA R, CHABLAT D, BARON L, et al. Workspace, joint space and singularities of a family of delta-like robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 127: 73-95.
- [8] GASPARETTO A, ZANOTTO V. A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(4): 455-471.
- [9] LIU L, CHEN C Y, ZHAO X H, et al. Smooth trajectory planning for a parallel manipulator with joint friction and jerk constraints [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(4): 1022-1036.
- [10] 苏婷婷, 张好剑, 王云宽, 等. 基于 PH 曲线的 Delta 机器人轨迹规划方法[J]. 机器人, 2018, 40(1): 46-55.
- [11] BORYGA M, GRABOŚ A. Planning of manipulator motion trajectory with higher-degree polynomials use [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(7): 1400-1419.
- [12] 王攀峰, 梅江平, 黄田. 高速并联机械手抓放操作时间最优轨迹规划[J]. 天津大学学报, 2007, 40(10): 1139-1145.
- [13] LI Y H, HUANG T, DEREK G C. An approach for smooth trajectory planning of high-speed pick-and-place parallel robots using quintic B-splines [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126: 479-490.
- [14] 张祥. 高速轻型并联机械手控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [15] 郑坤明, 张秋菊. 基于轨迹晶格与综合动力灵巧度的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 31-37.
- [16] 陈伟堤, 方红根, 何文松, 等. Delta 机器人三参数 Lamé 曲线门型轨迹优化[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 8-12.
- [17] 梅江平, 臧家炜, 乔正宇, 等. 三自由度 Delta 并联机械手轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 9-17.
- [18] FANG Y, HU J, LIU W H, et al. Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines [J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 127-153.
- [19] MOHAMED E, ABDULAZIZ S, YUAN X H. Optimizing robot path in dynamic environments using genetic algorithm and Bézier curve [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 33(4): 2305-2316.
- [20] SIMBA K R, UCHIYAMA N, ALDIBAJA M, et al. Vision-based smooth obstacle avoidance motion trajectory generation for autonomous mobile robots using Bézier curves [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(3): 541-554.
- [21] SANTIAGOPEREZ J, OSORNIORIOS R A, ROMEROTRONCOSO R, et al. FPGA-based hardware CNC interpolator of Bezier, splines, B-splines and NURBS curves for industrial applications [J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(4): 925-932.
- [22] KIM J H, YANG J Z, ABDEL-MALEK K. A novel formulation for determining joint constraint loads during optimal dynamic motion of redundant manipulators in DH representation [J]. Multibody System Dynamics, 2008, 19(4): 427-451.
- [23] 张彦斐, 宫金良, 林于一. 一种并联操作机器人的驱动力矩特性分析[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(4): 19-21.

作者简介: 张俊(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师; 主要研究方向: 机械传动、机械系统动力学、并联机器人。近三年发表 40 余篇论文。

(上接第 80 页)

参考文献

- [1] 陈落根, 罗振军, 李玉航, 等. 基于 SAMCEF 的四自由度并联机器人动力学建模与仿真 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29(6): 12-15.
- [2] CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space. US, 4976582 [P], 1990-12-11.
- [3] 张利敏. 基于动力学指标的 Delta 高速并联机械手集成优化设计方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [4] LI Y H, MA Y, LIU S T, et al. Integrated design of a 4-DOF high-speed pick-and-place parallel robot [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 185-188.
- [5] LI Y H, HUANG T, CHETWYND D G. An approach for smooth trajectory planning of high-speed pick-and-place parallel robots using quintic B-splines [J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126: 479-490.
- [6] ZHANG Q, LI C D, ZHANG J T, et al. Active vibration control and coupled vibration analysis of a parallel manipulator with multiple flexible links [J]. Shock and Vibration, 2016(2): 1-19.
- [7] SHAN J, LIU H T, SUN D. Slewing and vibration control of a single-link flexible manipulator by positive position feedback (PPF) [J]. Mechatronics, 2005, 15(4): 487-503.
- [8] SINGHOSE W. Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(4): 153-168.
- [9] HA M T, KANG C G. Experimental analysis of natural frequency error to residual vibration in ZV, ZVD, and ZVDD shapers [C]. Proceedings of International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Jeju, South Korea, 2013: 195-199.
- [10] LI B, ZHANG X, MILLS J K, et al. Vibration suppression of a 3-PRR flexible parallel manipulator using input shaping [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009: 3539-3544.
- [11] 吴军, 李铁民, 唐晓强. 平面并联机构的残余振动控制 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 49-53.
- [12] 鞠锦勇. 移动柔性操作臂系统机电耦合动力学特性及振动控制研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [13] 高明旺, 张宪民. 高速平面并联机器人残余振动抑制实验 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 164-168.
- [14] 刘松涛. 一类 2-、3-、4-自由度高速并联机械手设计理论与方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [15] 孙建香, 李其昀. 基于 ANSYS 的焊接机器人结构优化设计 [J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 39-43.
- [16] MA Y, NIU W, LUO Z, et al. Static and dynamic performance evaluation of a 3-DOF spindle head using CAD-CAE integration methodology [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 41: 1-12.
- [17] 汪沙娜, 刘夫云, 匡兵, 等. 基于 CAD/CAE 集成的零件变型设计系统开发 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29(4): 64-67.
- [18] 李兵, 谢里阳, 魏玉兰, 等. 多模态输入整形法抑制一种 3 自由度并联机器人的残余振动 [J]. 机械制造, 2010, 48(7): 21-25.
- [19] 李玉航. 一种 SCARA 型高速并联机器人集成设计与振动控制方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.

作者简介: 王慧(1986—), 讲师, 硕士; 主要研究方向为机器人学与机构学, 已发表论文 5 篇。