

行星采样柔性机械臂运动规划研究

梁常春, 孙鹏飞, 王耀兵, 危清清, 姜水清

(空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要:为适应行星表面较大范围的采样要求及系统减重的需求,采样机械臂通常是细长形臂杆加多关节组成的连杆型关节机械臂,这使得抑制柔性振动成为机械臂控制系统的研究重点。针对采样机械臂的工作过程,提出带抛物线过渡的平滑轨迹规划方法,即在运动过程中使加速度连续,避免关节转动的力矩突变,并且最大限度降低峰值。首先建立基于 D-H 法的机械臂运动学方程,然后在考虑臂杆及关节柔性的动力学模型环境下,进行变加速—匀速—变减速的笛卡尔空间加速度连续平滑轨迹规划运动,达到减小柔性臂振动、提高定位精度的目的。仿真结果表明,在运动规划中引入抛物线过渡的加速度连续环节、降低加速度冲击可以明显改善运动平稳性,对提高动态跟踪精度有直接作用。

关键词:行星采样; 柔性臂; 运动优化

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2015)01-0027-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.01.004

0 引言

无人自动行星样品采集与返回任务通常要求表层采样装置既能适应较大的采样范围要求,又要实现采集样品的精确转移,且整个装置有严格的重量限制^[1],这使得采样装置往往采用细长形臂杆组成的连杆型关节机械臂带动末端采样器实现。此种机械臂具有重量轻、驱动力小、耗能低、速度快等诸多优点。但因为柔性较大,尤其是当末端采样器较重或抓取样品容器时,在运动中会因弹性变形产生振动,从而对定位精度产生影响。因此如何减小振动成为柔性采样机械臂研究的核心内容。

对柔性臂的振动控制可以使用多种方法,如改变结构形式、或采用复杂的主动振动控制方法。最早 Park 等(1993)^[2]用傅立叶级数和多项式混合的函数描述机器人轨迹,首次提出了利用轨迹规划抑制柔性机器人残余振动的方法。随后 Pritam Kumar Sarkar(1997)^[3]按照同样的方法对两杆柔性机器人进行 B 样条轨迹仿真,计算快、效果也更好。其间 Pond 等(1995)^[4]也以变形能为优化目标进行了轨迹规划抑振的研究。此外, H. Kojima 等(2001)^[5]用四次多项式函数描述机械臂关节速度。

这些算法对轨迹的描述或采用的优化算法有所不同,但都直接以振幅等作为优化指标^[6],这就要求

算法对每一条待定轨迹都要先进行控制仿真,因此轨迹规划算法的效率很低,规划结果也与控制仿真中采用的控制方法及数值算法密切相关。并且空间机械臂的高可靠性及简单易用等特殊应用特点使得方法不能过于复杂。本文将使用改进的简便有效的带抛物线过渡的线性插值运动规划方法,对无冗余度的四自由度连杆机械臂的关节运动进行控制,从而达到减轻振动的目的。无冗余度机械臂的运动可规划范围相对有限,所以此方法对进一步进行更加复杂系统的运动规划有很大帮助。

1 表层采样任务

1.1 过程描述

本文研究的表层采样机械臂采用 4 自由度设计,如图 1 所示,所有关节均为回转关节(即为 4R 机械臂),包括肩部两个关节(偏航关节和俯仰关节)、一级臂杆、肘俯仰关节、二级臂杆、腕俯仰关节及末端采样器等^[7]。机械臂整体安装于探测器表面,工作过程如图 2 所示。

机械臂通过四个关节的转动带动末端采样器到达期望采样点,实现对土壤样品的铲取或挖掘。

为避免所采集的样品在返回地球过程中受到污染,拟将样品进行两次封装过程。首先将样品放入探测器侧壁 A 点处的一次封装容器内进行初次封

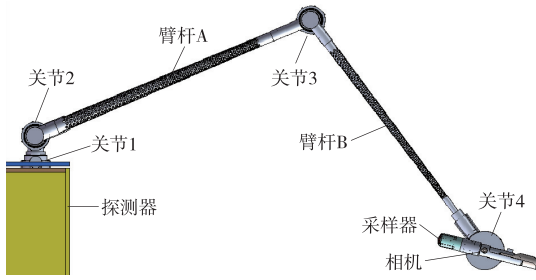


图 1 采样机械臂示意图
Fig. 1 Illustration of sampling manipulator

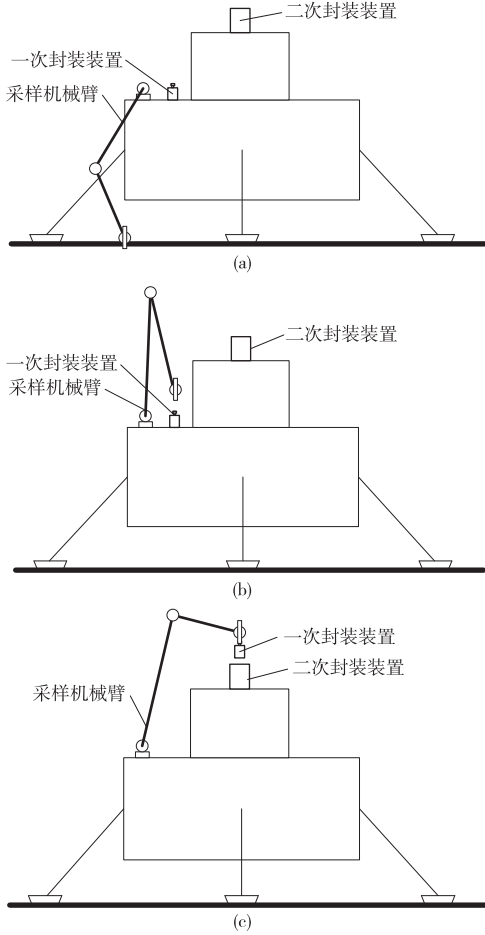


图 2 机械臂工作流程
Fig. 2 The working process of the manipulator

装,然后再抓取一次封装容器将其转移至探测器上方 B 点处的二次封装容器内。

最后机械臂移动至安全位置,整个采样任务结束。

在此过程中,机械臂在 A 点的放样动作、抓取容器动作以及在 B 点的放置容器动作均对机械臂的定位精度提出了较高要求,因此,采用具有避振动效果的运动规划方法显得十分必要。

1.2 运动学建模

根据采样机械臂坐标系定义(图 3),建立 D-H 参数^[8]如表 1 所示。

表 1 采样机械臂 D-H 参数

Table 1 D-H parameters

连杆	变量 θ_i	a_{i-1}	d_i	a_{i-1}
1	θ_1	0°	d_1	0
2	θ_2	90°	d_2	a_1
3	θ_3	0°	d_3	a_2
4	θ_4	0°	d_4	a_3

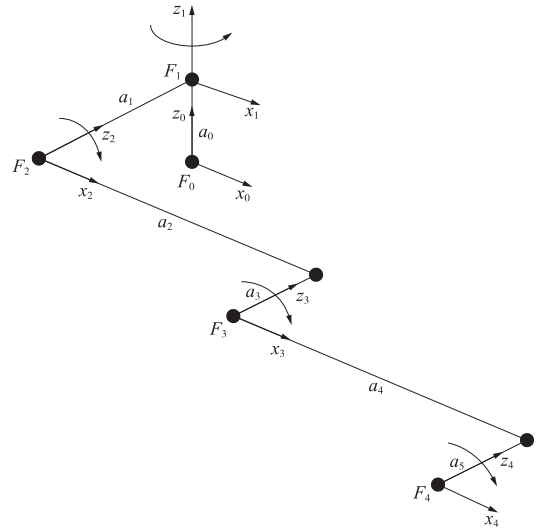


图 3 机械臂坐标系
Fig. 3 Manipulator coordinate

根据 D-H 参数及坐标系之间的变换关系,可以确定机械臂关节空间和末端操作空间的映射关系。连杆 i 对于连杆 $i-1$ 的相对位置采用 4 次齐次变换描述,由 D-H 参数可得各连杆变换矩阵如下

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过将这些连杆变换依次相乘,就可以得到末端坐标相对于基座的变换矩阵

$${}^0T_n = T_1(\theta_1)T_2(\theta_2)T_3(\theta_3)\cdots T_n(\theta_n) \quad (5)$$

机械臂运动时,由于惯性力的作用机械臂产生弹性变形并开始振动。惯性力的大小是与关节转角处的角加速度密切相关的。关节的角加速度则又由端点运动唯一确定,所以通过对运动规律进行规划的问题焦点在于对端点运动规律的规划。而对端点轨迹已经确定的问题,只能对端点运动的速度、加速度进行规划。

2 改进的笛卡尔空间运动规划

满足平稳运动规划的目的是使机械臂末端点在按指定轨迹运动时,关节处的角加速度曲线尽量平滑连续且峰值尽量小,以减小柔性臂的振动,提高末端定位精度。一些常见的运动规律如匀速运动、匀加速运动(如图 4 所示速度轮廓曲线,加速度不连续)、简谐运动等^[9]都会使机械臂产生刚性或柔性冲击,使机械臂产生振动,不能满足要求。而高次多项式运动规律所产生的转矩曲线虽然平滑,但在实现一些进回程数量多的复杂运动轨迹时,会产生数值性能很差的转矩曲线,产生较剧烈的振动。

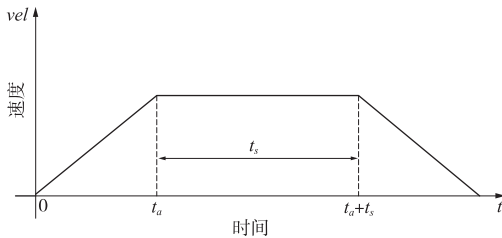


图 4 匀加速运动(梯形)速度变化曲线

Fig. 4 Velocity curve based on constant acceleration movement (Trapezoid)

因为机械臂端点的运动轨迹已经确定,所以规划只能围绕速度或加速度进行。为得到较好的转矩曲线,本文选择带抛物线过渡的线性插值规划的方法。

设机械臂初始和终止位姿分别记为: $X_{e0} = [P_{e0}, \psi_{e0}]$, $X_{ef} = [P_{ef}, \psi_{ef}]$ 。由初始点和终止点坐标计算出首末端直线距离长度为

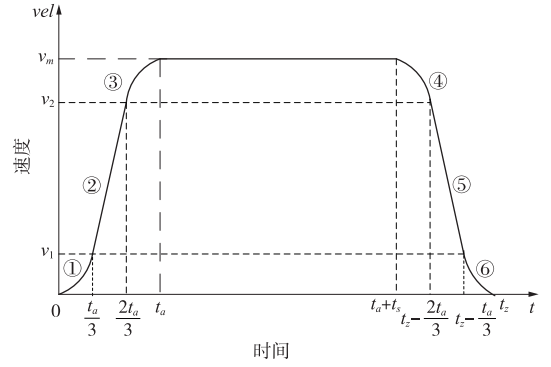


图 5 带抛物线过渡运动速度变化曲线

Fig. 5 Velocity curve based on movement with parabolic contour

$$d_f = \sqrt{\sum_{i=x,y,z} (P_{f,i} - P_{0,i})^2} \quad (6)$$

按照带抛物线过渡圆弧梯形法规划其运行路径,设起点和终点时刻为 0 和 t_z ,加速段(或减速段)时间为 t_a ,匀速段时间为 t_s ,加速段和减速段曲线的过渡点时刻为 $t_a/3, 2t_a/3, t_z - 2t_a/3$ 和 $t_z - t_a/3$,在过渡点时刻 $t_a/3$ (或 $t_z - t_a/3$)、 $2t_a/3$ (或 $t_z - 2t_a/3$)处的速度为 v_1 和 v_2 ,最大速度为 v_m ,终点对应的位移为 d_f ,其运行轨迹如图 6 所示。

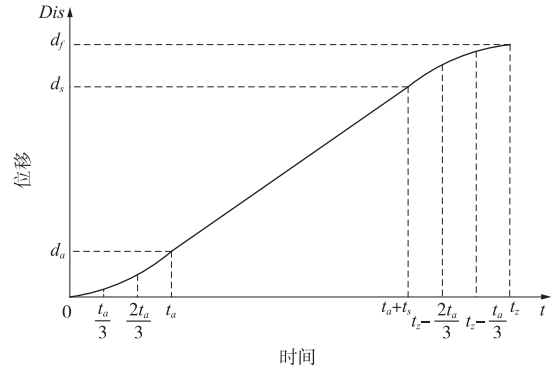


图 6 带抛物线过渡的线性插值位移曲线

Fig. 6 Displacement curve based on linear interpolation with parabolic contour

对通常规划来说, d_f 为已知量。可设 t_z, t_a 和 v_m 中的任意 2 个变量为已知,求出其他变量及曲线函数。为便于计算,设 t_z 和 t_a 为已知,由于速度曲线具有对称性,故 $t_s = t_z - 2t_a$ 。根据定义,设曲线 1~6 的函数分别为

$$\begin{cases} f_1(t) = a_1 t^2 + b_1 t \\ f_2(t) = a_2 t + b_2 \\ f_3(t) = a_3 t^2 + b_3 t + c_3 \\ f_4(t) = a_4 t^2 + b_4 t + c_4 \\ f_5(t) = a_5 t + b_5 \\ f_6(t) = a_6 t^2 + b_6 t + c_6 \end{cases} \quad (7)$$

为保证速度和加速度的连续,各曲线在过渡点处除了速度值相等外,曲线斜率即加速度值也相等。同时在 0 、 t_a 、 $t_a + t_s$ 和 t_z 时刻,斜率即加速度为零。

由此,可以得到速度曲线如下

加速阶段

$$f_v(t) = \begin{cases} a_1 t^2 + b_1 t + c_1 & (0 \leq t < t_a/3) \\ a_2 t + b_2 & (t_a/3 \leq t < 2t_a/3) \\ a_3 t^2 + b_3 t + c_3 & (2t_a/3 \leq t < t_a) \end{cases} \quad (8)$$

匀速阶段

$$f_v(t) = v_m \quad (t_a \leq t < t_a + t_s) \quad (9)$$

减速阶段

$$f_v(t) = \begin{cases} a_4 t^2 + b_4 t + c_4 & (t_a + t_s \leq t < t_z - 2t_a/3) \\ a_5 t + b_5 & (t_z - 2t_a/3 \leq t < t_z - t_a/3) \\ a_6 t^2 + b_6 t + c_6 & (t_z - t_a/3 \leq t < t_z) \end{cases} \quad (10)$$

同时可以计算出加速度大小为

加速阶段

$$f_a(t) = \begin{cases} 2a_1 t + b_1 & (0 \leq t < t_a/3) \\ a_2 & (t_a/3 \leq t < 2t_a/3) \\ 2a_3 t + b_3 & (2t_a/3 \leq t < t_a) \end{cases} \quad (11)$$

匀速阶段

$$f_a(t) = 0 \quad (t_a \leq t < t_a + t_s) \quad (12)$$

减速阶段

$$f_a(t) = \begin{cases} 2a_4 t + b_4 & (t_a + t_s \leq t < t_z - 2t_a/3) \\ a_5 & (t_z - 2t_a/3 \leq t < t_z - t_a/3) \\ 2a_6 t + b_6 & (t_z - t_a/3 \leq t < t_z) \end{cases} \quad (13)$$

最终的速度轮廓曲线如图 5 所示。

由上述即可得出采样机械臂末端运行的速度。然后经过逆运动学,得到相应连续平滑的关节速度曲线。

3 末端运动精度仿真分析

3.1 运动规划

为了验证上述运动规划的有效性,下面将对一个典型的运动轨迹进行仿真。在 MATLAB 中建立运动学仿真环境^[10-11],用于得到柔性动力学模型仿真所需的关节角速度输入。

机械臂的参数:一级臂杆长 1.95 m,二级臂杆长 1.75 m;

用于仿真的末端点轨迹:起始点为机械臂展开位置 $[0, -1.7, -0.1]$ m,到位点为采样点位置 $[-0.5, -1.5, -2.0]$ m;

规划周期:50 ms。

关节角度、角速度、角加速度运动规划结果如图 7 所示。通过 MATLAB 规划结果可知,关节角度、角速度规划曲线均平滑连续,关节角加速度连续过渡、峰值较小。

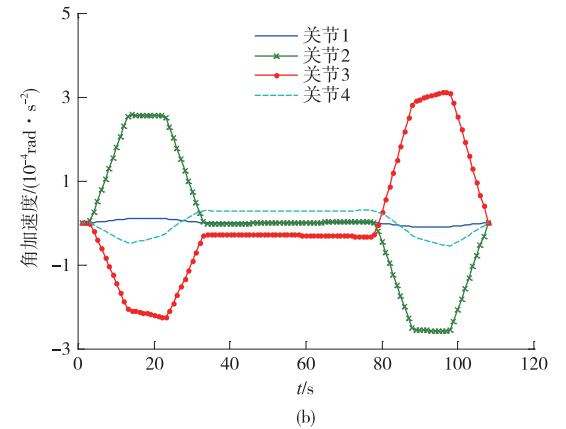
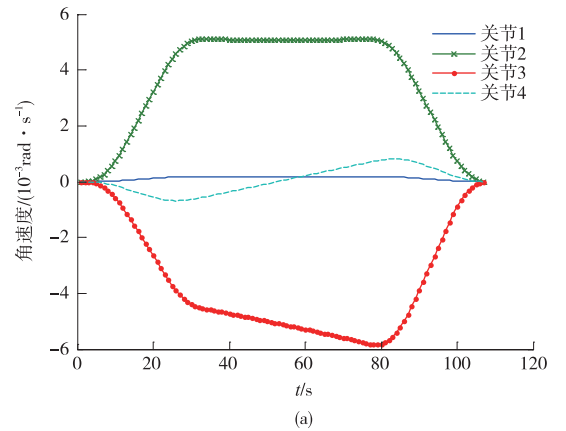


图 7 运动规划关节曲线结果

Fig. 7 Joint motion curve based on path planning

3.2 系统仿真建模

根据机械臂的设计方案进行多体系统建模^[12-13]。根据分析的目标,模型中应建立包含机械结构、执行机构、传感器和数字控制器在内的动力学与控制模型,实际建模包含的要素包括:1)全柔性多体动力学模型;包含机械臂各质量部件,弹性臂杆组件,末端采样器弹性连接件等;2)机械臂关节全柔性体模型;3)机械臂传动系统模型;4)详细电机模型;5)控制模型,包含整臂运动控制器及关节控制器的数字控制器模型;6)数字传感器模型。

机械臂末端变形主要由关节和臂杆的柔性引

起,而关节和臂杆的拉压刚度较高,引起机械臂的末端变形非常小;关节回转方向的角度变形,可由关节闭环控制消除。为了节省中央控制器计算资源,对机械臂末端变形计算简化为静力学问题,主要考虑关节及臂杆的弯曲刚度的影响。

上述模型内容根据设计参数进行建模后,统一到同一仿真平台中,该模型能够支持控制系统开发、运动任务验证需求。模型的可视化界面如图 8 所示。

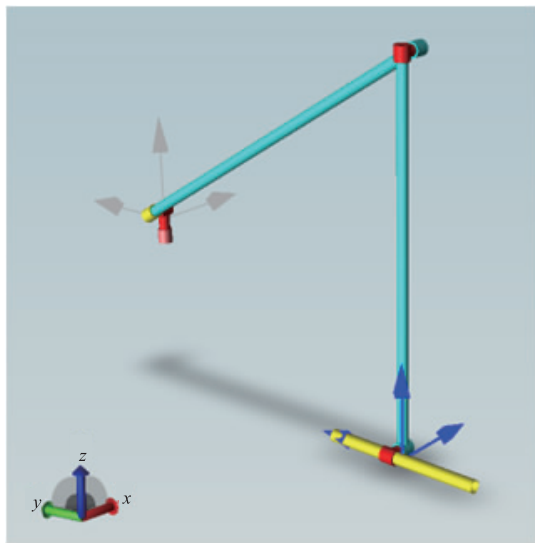


图 8 系统仿真模型可视化界面

Fig. 8 Visual interface for system simulation model

3.3 精度分析

以上述轨迹规划结果为输入,进行加速度非连续运动跟踪与抛物线过渡加速运动跟踪对比仿真。末端运动过程位移如图 9 所示。

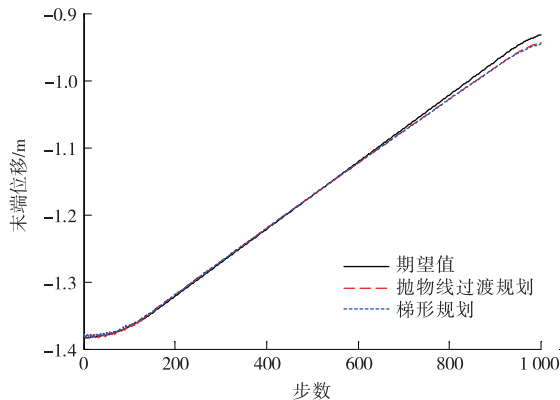


图 9 末端位移对比曲线

Fig. 9 A contrast between tip displacement based on different planning ways

通过仿真结果可以看出,带抛物线过渡的加速

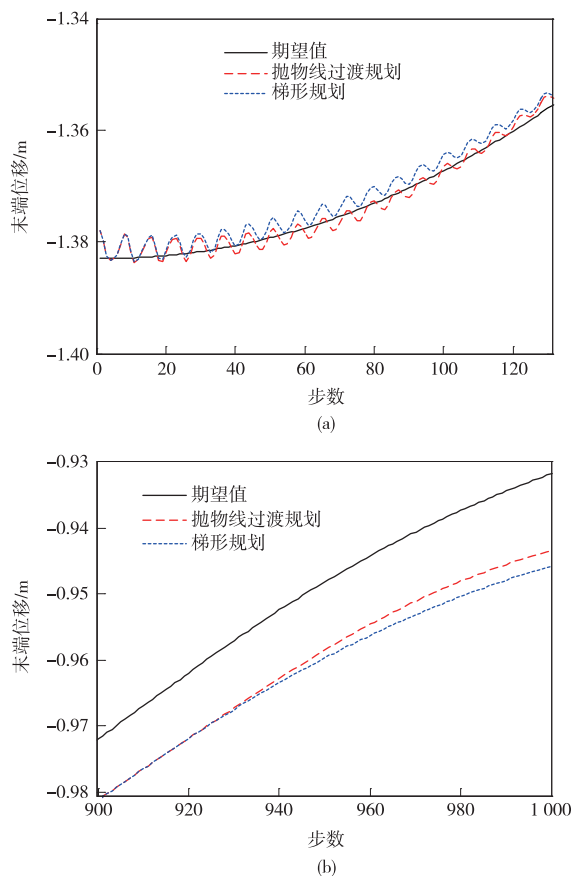


图 10 末端位移起始放大(a)和终止放大(b)

Fig. 10 Initial and final enlarged drawings of tip displacement

度连续运动规划轨迹在运动过程中更加平稳(如图 10(a)所示),引起的末端偏振较小。同时,末端运动跟踪精度更高(如图 10(b)所示),两者精度相差最大时约 3 mm(如图 11 所示)。即系统的运动品质得到明显改善,从而实现位置的快速、精确控制,同时还具有较好的轨迹跟踪特性。

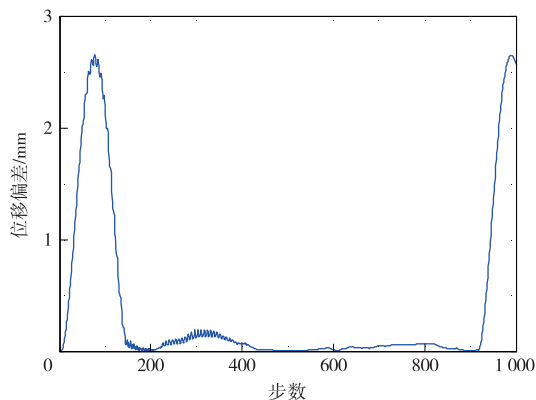


图 11 两种规划方法位移偏差曲线

Fig. 11 Displacement error curve between two planning ways

4 结论

本文结合行星采样机械臂任务规划及控制系统验证的需求,通过系统建模、运动控制器设计,完成了采样机械臂运动过程的精度分析,对不同运动规划策略条件下的末端运动精度进行了比较。在合理建模、算法验证的基础上,针对机械臂系统仿真模型设计的控制器,能够保证运动过程控制精度提高的需求。

对比不同规划方案下的仿真结果,可以得到以下结论:

1) 机械臂的运动规划策略对系统的跟踪定位精度有直接影响,降低加速度冲击对提高动态跟踪精度有直接作用;

2) 在运动规划中引入抛物线过渡的加速度连续环节可以明显改善运动平稳性,进而提高机械臂系统的控制精度。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,邓湘金,彭兢. 国外深空探测态势特点与启示[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 403 - 405 [Ye P J, Deng X J, Peng J. Features of deep space exploration in other countries and the enlightenment for the development in China[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 403 - 405.]
- [2] Park K, Park Y. Fourier-based optimal design of a flexible manipulator path to reduce residual vibration of the endpoint[J]. Robotica, 1993, 11(3): 263 - 272.
- [3] Sarkar P K, Yamamoto M, Mohri A. Significance of spline curve in path planning of flexible manipulator [C]// Proc of the 1997 IEEE Inter Conf on Robotics & Automation. Albuquerque New Mexico: IEEE, 1997: 2535 - 2540.
- [4] Pond B, Sharf I. Motion planning for flexible manipulators [C]// IEEE Inter Conf on Systems, Man and Cybernetics. [S. l.]: IEEE, 1995: 2103 - 2108.
- [5] Kojima H, Kibe T. Optimal trajectory planning of a two-link flexible robot arm based on genetic algorithm for residual vibration reduction[C]// Proc of the 2001 IEEE/RSJ Inter Conf on Intelligent Robots and Systems. Maui, Hawaii. USA: IEEE, 2003: 2276 - 2281.
- [6] 戈新生,崔玮,赵秋玲. 刚柔性耦合机械臂轨迹跟踪与振动抑制[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 188 - 191. [Ge X S, Cui W, Zhao Q L. Trajectory tracking control and vibration suppression of rigid flexible manipulators[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 188 - 191.]
- [7] 刘志全,庞瑰,李新立. 深空探测自动采样机构的特点及应用[J]. 航天器工程, 2011, 20(3): 120 - 125. [Liu Z Q, Pang Y, Li X L. Characteristics and applications of automatic sampling mechanisms for deep space exploration [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(3): 120 - 125.]
- [8] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. [Cai Z X. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.]
- [9] 朱炜. TELBOT 机器人弹性臂仿真及误差补偿[D]. 北京, 北京邮电大学, 硕士学位论文, 2001. [Zhu Wei. Flexible arm simulation and error compensation of TELBOT robot[D]. Beijing: University of Posts and Telecommunications, 2001.]
- [10] 张志涌. 精通 MATLAB6. 5 版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. [Zhang Z Y. Jing Tong MATLAB6. 5[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003.]
- [11] 陈礼顺,李立,杨志军. 基于 MATLAB 四自由度焊接机器人轨迹规划及仿真[J]. 机械设计与研究, 2009 年增刊: 136 - 140. [Chen L S, Li L, Yang Z J. Track planning and motion simulink of 4-DOF welt-robot based on MATLAB [J]. Machine Design and Research, 2009: 136 - 140.]
- [12] 陈辛. 机械臂的动力学研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工程大学, 硕士学位论文, 2007. [Chen Xin. Study on dynamics of manipulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.]
- [13] 彭祺攀,李海阳. 基于虚拟样机技术的机械臂建模与仿真[J]. 华东理工大学学报, 自然科学版, 2007, 33(6): 58 - 62. [Peng Q B, Li H Y. Modeling and simulation of robot manipulator based on virtual prototyping technology [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 33(6): 58 - 62.]

作者简介:

梁常春(1987—),男,工程师,主要研究方向:航天器总体设计、空间机器人。

通信地址:北京市 5142 信箱 360 分箱(100094)

电话:(010)68113135

E-mail:yingsuifeng@126.com

Motion Planning of Sampling Flexible Manipulator on Planet

LIANG Changchun, SUN Pengfei, WANG Yaobing, WEI Qingqing, JIANG Shuiqing

(Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Applications,

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100092, China)

Abstract: In order to adapt to a wide range of planetary surface sample acquisition and requirements of weight optimization, manipulator usually consists of several slender arms and rotary joints. This makes the flexibility compensation and vibration suppression become research focus in the manipulator control system. In this paper, a smooth trajectory planning method with parabolic contour for sampling motion of manipulator is proposed. In the motion process acceleration is made to be continuous to avoid joint torque mutation and debase the peak value farthest. Firstly, the kinematic equations of manipulator based on D-H and dynamics model with flexible deformation of joints and arms are established. Then, the variable acceleration-uniform motion-deceleration trajectory is planned in Cartesian space, which acceleration is consistent and smooth. Finally, the typical tasks of manipulator are simulated. Results indicate that this method is useful to make acceleration of joint motion continuous. This control strategy can obviously improve dynamic tracking accuracy and position precision.

Key words: sampling on planet; flexible manipulator; motion optimization

[责任编辑:高莎]