

冗余空间机械臂的运动学和笛卡尔阻抗控制方法

董晓星 李 戈 刘刚峰 赵 杰

哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150001

摘要: 为了能让七自由度空间机械臂在空间站外壁换位行走, 需要在对接的过程中能够自动控制机械臂接触力以确保其在安全的范围之内。介绍了七自由度空间机械臂的运动学计算方法, 采用二次计算法求得其逆运动学解。提出了基于安装在空间机械臂末端六维力传感器反馈的笛卡尔空间阻抗控制方法, 将逆运动学解转化到关节空间的位置内环进行位置控制, 经 Simulink 仿真优化参数后在空间机械臂上进行了调试实验, 结果表明, 力的控制效果柔顺。

关键词: 空间机械臂; 运动学; 轨迹跟踪; 笛卡尔阻抗控制

中图分类号: TP241.3; O311

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.008

Kinematics and Cartesian Impedance Control for Redundant Space Robotic Arm

Dong Xiaoxing Li Ge Liu Gangfeng Zhao Jie

Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

Abstract: In order to travel outside the space station safely, a 7-DOF SRA needed to be able to automatically control the contact force during connection process. This paper firstly presented the kinematic solution of SRA which used two-phase calculation to deal with inverse kinematics. Then a valid Cartesian impedance control method based on end force-torque sensor was proposed, after parameter optimization by SIMULINK, the tests were implemented on SRA. Experimental results have verified the effectiveness of the proposed method.

Key words: space robotic arm(SRA); kinematics; trajectory tracking; Cartesian impedance control

0 引言

空间机械臂的末端效应器与地面适配器对接的过程分为三个步骤: 捕获、拉紧、锁合。空间机械臂不可避免地会存在一定的姿态误差, 导致对接过程中末端效应器与地面适配器之间可能存在很大的接触力并造成破坏。为了规避此种风险, 必须对末端效应器与地面适配器之间的接触力进行力主动控制, 并通过安装在末端效应器与机械臂连接处的六维力传感器反馈的力信号进行力伺服控制, 以确保效应器和适配器之间的接触力在允许的范围之内, 避免对机械臂产生意外损害。

机械臂的力阻抗控制由 Hogan^[1] 提出, 他假设物理系统在控制器的控制下与周围环境的相互作用都需要符合物理系统的一般特性。在此基础上, 他将机械臂与环境间的接触力做功纳入考虑, 提出了阻抗控制, 给出了期望的单纯物理系统反馈的重要元素: 期望惯量、期望阻尼、期望刚度。这种被称为“目标阻抗”的期望关系决定了系统的性能, 给出了既能在自由空间又能在约束空间进行柔顺控制的统一框架。

阻抗控制根据控制内环的不同, 可以分为基

于位置和基于力的两种; 根据控制器所在空间的不同, 可以分为关节空间阻抗控制和笛卡尔空间阻抗控制两种; 根据使用的传感器则可以分为无传感器^[2]、基于末端力传感器^[3-4]、基于关节力矩传感器^[5-6]和基于基座力传感器^[7]这几类。无传感器控制需要预知工作环境的情况, 知道接触点的位置和环境刚度的大小, 或者在工作过程中对环境参数做实时的分析估计。基于关节力矩传感器的控制能实现整个机械臂的柔顺控制, 测控的范围更大。基于末端力传感器的阻抗控制能精确测量末端力, 从而对末端实施有效的阻抗特性控制。基于基座力传感器的控制能反映整个机械臂的受力, 但无法精确确定其受力点位置, 适合于受力点位置已知的情况。

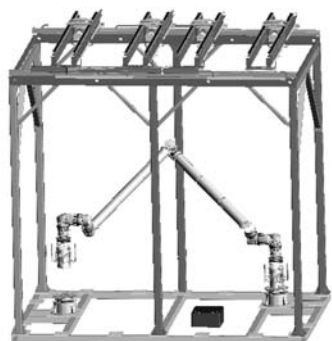
本文利用空间机械臂原理样机末端的六维力传感器, 实现了空间机械臂在笛卡尔空间中基于位置的阻抗控制, 有效控制了对接过程中的接触力。首先介绍了空间机械臂的组成结构, 并给出了七自由度空间机械臂的运动学解, 然后根据空间机械臂的结构特征, 给出了其笛卡尔空间阻抗控制方法, 最后在实验过程中编程控制了该机械臂的对接过程并给出实验结果。

收稿日期: 2012-09-05

基金项目: 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(2009023)

1 空间机械臂地面试验系统的结构

空间机械臂实验系统是由空间机械臂原理样机和地面三维随动吊挂系统组成的,具体结构如图 1 所示。通过特殊结构的末端效应器和地面适配器之间的对接和分离,空间机械臂具有在不同的地面适配器之间交替对接的功能,从而为在空间站外壁上安装的不同适配器之间移动行走提供了可能。三维随动吊挂系统能够提供随动的恒定吊挂力来抵消机械臂的重力,模拟空间环境中失重的情况,为空间机械臂原理样机在地面环境中进行仿真实验提供了可能。



(a)模型图

效应器的情况下,机械臂完全伸展的全长可达 7914mm,质量约 750kg。为了模拟太空中失重的环境条件,我们使用地面模拟试验系统的随动吊挂将机械臂悬吊。三维随动系统由 4 根随动牵引绳组成,每根牵引绳都能够三维空间内自动跟踪机械臂的运动并且保持恒定的悬吊力(用于抵消机械臂的自身重力)。

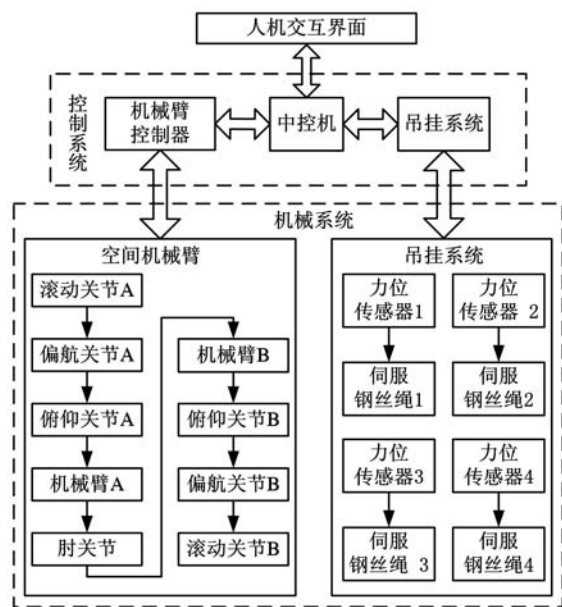


(a)模型图



(b)实物图

图 2 空间机械臂原理样机



(b)结构组成图

图 1 空间机械臂地面试验系统

1.1 机械结构

空间机械臂原理样机是一个拥有 7 个自由度的对称型冗余机械臂,结构如图 2 所示。机械臂的两端各有俯仰、偏航和滚动 3 个自由度,两根大臂杆之间通过第 7 个自由度连接。机械臂的末端连接有 1 个效应器(用于同地面适配器进行对接)。空间机械臂原理样机体积庞大,在不含末端

空间机械臂的每一个关节都是由一个无刷直流电机通过二级减速装置驱动的,空间机械臂的每一个关节都有很大的减速比。两侧的滚动关节通过连接法兰同末端效应器连接。连接法兰上各安装有 1 个六维力传感器。

1.2 控制系统结构

如图 3 所示,空间机械臂的控制系统是由 1 台中控计算机、2 个 Maestro 控制器、7 个 ELMO 关节电机驱动器和 7 个无刷直流电机组成的,他们之间通过 CANopen 总线进行通讯。中控计算机通过六维力传感器采集反馈得到的数据来修正机械臂在工作空间中的运动轨迹,并且通过逆运动学将工作空间中的轨迹转化为关节空间中的轨迹并发送给 Maestro 控制器。控制器将轨迹点依次发送给 ELMO 驱动器,用 PID 的控制方式对无刷直流电机进行位置控制。

2 空间机械臂运动学

根据机器臂结构、各关节的相关参数,运用机器人运动学的相关算法,建立六关节机械臂齐次坐标变换关系,实现机器人运动学建模。根据机器人各部分的关系,分析并建立机器人正/逆解运动学方程,从而实现机器人关节坐标和世界坐标

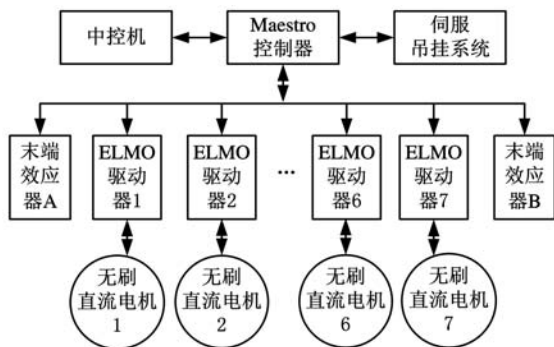


图 3 控制系统结构组成图

的解算。

2.1 建立运动学坐标系

如图 4 所示,按 D-H 方式(参数见表 1)建立坐标系方法建立相应的各个关节的坐标系,并规定坐标系与轴满足右手法则(右手系)。其中,全局坐标系为 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$,简记为 0 系。各个关节为 1 ~ 7 系,工具坐标系为 T 系。

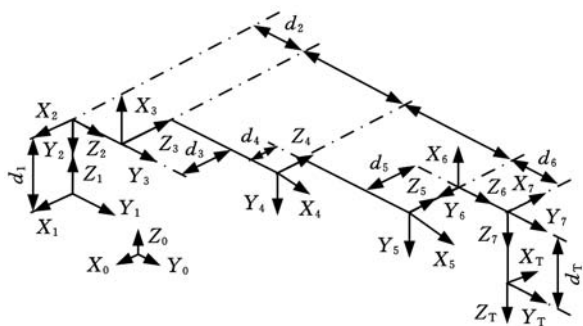


图 4 空间机械臂原理样机杆件坐标系

表 1 大臂的 D-H 参数

	$\theta(^{\circ})$	d_i	a_i	$\alpha_i(^{\circ})$
1 轴	θ_1	d_1	0	-90
2 轴	$\theta_2 - 90$	d_2	0	90
3 轴	$\theta_3 + 90$	d_3	L_1	0
4 轴	θ_4	d_4	L_2	0
5 轴	$\theta_5 - 90$	d_5	0	-90
6 轴	$\theta_6 - 90$	d_6	0	90
7 轴	$\theta_7 - 90$	d_T	0	90

2.2 正运动学分析

根据机械臂各个关节的转角来求取机械臂末端的位置和姿态的过程即为机械臂的正运动学分析,为此我们从 0 坐标系出发,根据坐标变换来求取末端坐标系内的坐标。我们用 $T_{i,i-1}$ 表示从 $i-1$ 坐标系到 i 坐标系的变换矩阵,从图 4 可知,坐标系 1 相对坐标系 0 的变换矩阵为 $T_{1,0}$,依次类推得到 $T_{2,1}$ 、 $T_{3,2}$ 、 $T_{4,3}$ 、 $T_{5,4}$ 、 $T_{6,5}$ 和 $T_{7,6}$ 。工具坐标系相对坐标系 7 的变换矩阵为 $T_{T,7}$,大臂的坐标系 7 相对固定坐标系 0 的变换矩阵为 $T_{T,0}$ 。大臂

运动学为

$$T_{T,0} = T_{1,0} T_{2,1} T_{3,2} T_{4,3} T_{5,4} T_{6,5} T_{7,6} T_{T,7} \quad (1)$$

$$T_{1,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{2,1} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{3,2} = \begin{bmatrix} s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & 0 & -s_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{4,3} = \begin{bmatrix} -s_3 & -c_3 & 0 & -L_1 s_3 \\ c_3 & -s_3 & 0 & L_1 c_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{5,4} = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & L_2 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & L_2 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{6,5} = \begin{bmatrix} s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ -c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{7,6} = \begin{bmatrix} s_6 & 0 & -c_6 & 0 \\ -c_6 & 0 & -s_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{T,7} = \begin{bmatrix} c_7 & -s_7 & 0 & 0 \\ s_7 & c_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$s_i = \sin\theta_i \quad c_i = \cos\theta_i \quad i = 1, 2, \dots, 7$$

其中, θ_i 为关节 i 的转角,根据式(1)便可得到空间机械臂的正运动学解,根据 Creig 的方法^[8]可由正运动学得到机械臂的雅克比矩阵。

2.3 逆运动学分析

空间机械臂是具有 7 个自由度的冗余机械臂,相对于一般的六自由度机械臂更加灵活,具有避奇异、避障、克服关节极限等特点,但是逆运动学求解更加复杂,有无数多组解,因此采用固定关节角法求解逆运动学解。固定关节角法是冗余机器人逆运动学求解常用的方法之一,这种方法对以任意一个具有封闭表达式形式解的冗余机器人都适用,所得的关节角是准确值,而且多步计算时不存在累计误差,因此可以达到比较高的精度^[9]。根据各个关节在空间机械臂对接过程中不同的作用,我们在控制机械臂的时候可以首先单独控制 θ_2 ,然后固定关节 2,再求解其余 6 个自由度的关节角。逆变换时,首先求 $T_{7,0}$,可用逆变换 $T_{T,7}^{-1}(0)$ 右乘方程 $T_{T,0} = T_{7,0} T_{T,7}(0)$ 两边,得

$$T_{7,0} = T_{T,0} T_{T,7}^{-1}(0) \quad (2)$$

由 $T_{T,0}$ 、 $T_{T,7}(0)$ 即可求得 $T_{7,0}$ 。定义平面 O_M 为过关节 7 末端并且与长杆 L_1 、 L_2 平行,定义平面 O'_M 为坐标原点沿标定点平移 $\Delta P = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 后,沿关节 1 方向平移关节 1 的长度 d_1 ,则 O'_M 平面方程为

$$a(x - M'_x) + b(y - M'_y) + c(z - M'_z) = 0$$

$$\mathbf{n} = (a, b, c) = (-c_2 s_1, c_2 c_1, s_2) \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_p = (M_x, M_y, M_z, 1) = \mathbf{T}_{T,0}(0, 0, 0, 1) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}'_p &= (M'_x, M'_y, M'_z) = \\ &(M_x - \Delta x, M_y - \Delta y, M_z - \Delta z - d_1) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, \mathbf{n} 为平面法相向量。

设坐标原点向平面 O'_M 的投影点 P 的法向向量为

$$\mathbf{P} = (x, y, z) = d\mathbf{n} = (-dc_2 s_1, dc_2 c_1, ds_2) \quad (6)$$

式中, d 为原点到投影点的长度, $d = d_3 + d_4 + d_5$ 。

根据空间几何关系, $\mathbf{M}'_p - \mathbf{P}$ 在平面 O'_M 内, 向量 \mathbf{n} 垂直于平面 O'_M , 则有 $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{M}'_p - \mathbf{P}) = 0$ 。从而由式(2)~式(5)得到如下方程:

$$\begin{aligned} c_2 s_1 (dc_2 s_1 + M'_x) + c_2 c_1 (dc_2 c_1 - M'_y) + \\ s_2 (ds_2 - M'_z) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$dc_2^2 s_1^2 + M'_x c_2 s_1 + dc_2^2 c_1^2 - M'_y c_2 c_1 + ds_2^2 - M'_z s_2 = 0 \quad (8)$$

$$M'_x c_2 s_1 - M'_y c_2 c_1 - M'_z s_2 + d = 0 \quad (9)$$

其中, $M'_x, M'_y, M'_z, d, \theta_2$ 为已知量, 则可由式(6)~式(9)求得

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2 \pm \left(\arcsin \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \arctan \frac{2b}{a} - \frac{\pi}{2} \right)} \quad (10)$$

根据 θ_1, θ_2 可以确定平面 O'_M 方程的解析式和平面 O'_M 的法向向量 \mathbf{n} 。根据式(2)可以获得关节 7 坐标系下的 x 方向向量 \mathbf{n}_{7x} 、 y 方向向量 \mathbf{n}_{7y} 和 z 方向向量 \mathbf{n}_{7z} :

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{n}_{7x} &= \mathbf{T}_{7,0}(1, 0, 0, 0)^T \\ \mathbf{n}_{7y} &= \mathbf{T}_{7,0}(0, 1, 0, 0)^T \\ \mathbf{n}_{7z} &= \mathbf{T}_{7,0}(0, 0, 1, 0)^T \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

设函数 $F(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3)$ 的返回值为向量 \mathbf{P}_1 以向量 \mathbf{P}_3 为轴到向量 \mathbf{P}_2 的夹角。设 $\mathbf{n}_{n-y} = \mathbf{n} \times \mathbf{n}_{7y}$, 当 $|\mathbf{n}_{n-y}| \approx 0$ 时, $\mathbf{n}_{n-y} = \mathbf{T}_{6,0}^T(0, 0, 1, 0)^T$ 。从关系式中可以看出 \mathbf{n}_{n-y} 为关节 6 坐标系 Z 轴的方向向量。关节 6 和关节 7 有如下计算公式:

$$\theta_6 = \pi/2 \pm F(\mathbf{n}, \mathbf{n}_{7y}, \mathbf{n}_{n-y}) \quad (12)$$

$$\theta_7 = F(\mathbf{n}_{n-y}, \mathbf{n}_{7y}, \mathbf{n}_{7z}) \quad (13)$$

定义关节 3、关节 4 和关节 5 的坐标原点在平面 O'_M 的投影点分别为 P_A, P_B 和 P_C 。通过以上关节的求解可以得到 P_A 和 P_C 的坐标, $\mathbf{P}_A = \mathbf{P} + \Delta\mathbf{P} + (0, 0, d_1) + d_2 \mathbf{n}_{2-z}$, $\mathbf{P}_C = \mathbf{T}_{7,0}(0, 0, 1, 0) - d_7 \mathbf{n}_{n-y}$, 即 $\mathbf{P}_A = d\mathbf{n} + \Delta\mathbf{P} + (0, 0, d_1) + d_2(c_2, s_2, 0)$ 。从而可以求出点 P_A, P_B 和 P_C 构成的三角形的边长:

$$\left. \begin{aligned} L_{AB} &= a_1 \\ L_{BC} &= a_2 \\ L_{CA} &= |\mathbf{P}_C - \mathbf{P}_A| \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

通过三角关系可以求取 3 个关节角:

$$\theta_3 = F(\mathbf{n}_{2-z}, \mathbf{P}_C - \mathbf{P}_A, \mathbf{n}) \pm$$

$$(\pi - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{CA}^2 - L_{BC}^2}{2L_{AB}L_{CA}}) \quad (15)$$

$$\theta_4 = \pm (\pi - \arccos \frac{L_{AB}^2 + L_{BC}^2 - L_{CA}^2}{2L_{AB}L_{BC}}) \quad (16)$$

$$\theta_5 = F(\mathbf{P}_C - \mathbf{P}_A, \mathbf{n}_{n-y}, \mathbf{n}) \pm$$

$$(\pi - \arccos \frac{L_{BC}^2 + L_{CA}^2 - L_{AB}^2}{2L_{BC}L_{CA}}) \quad (17)$$

综上所述便可得到空间机械臂的逆运动学解 $\mathbf{R}^T(\mathbf{X})$ 。

3 笛卡尔阻抗控制及其仿真

机械臂的阻抗控制方法由 Hogan 在 1985 年提出, 其主要的控制手段是通过“目标阻抗”和检测或估算得到机械臂环境之间的接触力, 来实现机械臂的柔顺性控制。同机械臂的力位混合式柔顺控制方法相比, 阻抗控制方法能够有效地对机械臂动力学特性整体做控制, 特别是能够对机械臂的速度阻尼特性做很好的控制。其目标阻抗特性一般可采用如下的 2 阶微分方程来表示:

$$\mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{X}}_r - \ddot{\mathbf{X}}) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{X}}_r - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_d(\mathbf{X}_r - \mathbf{X}) = \mathbf{F}_r - \mathbf{F} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d$ 和 \mathbf{K}_d 均为 6 阶对角矩阵, 其每个元素分别代表 X, Y, Z 轴平动和转动的期望阻抗特性; \mathbf{F}_r 为机械臂的参考接触力; \mathbf{F} 为机械臂与环境之间的实际接触力; $\ddot{\mathbf{X}}_r, \dot{\mathbf{X}}_r, \mathbf{X}_r$ 分别为 6 个自由度上的参考加速度、参考速度和参考位置, 均为 6×1 的矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{X}$ 分别为 6 个自由度上的实际加速度、实际速度和实际位置, 均为 6×1 的矩阵。

将此方法应用于机械臂的阻抗控制时, 用 $\Delta\mathbf{X}$ 表示根据目标阻抗得到的修正量, 则有 $\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_r - \Delta\mathbf{X}$, \mathbf{X}_d 为具有目标阻抗特性的机械臂期望位置。我们使用 m_{di}, b_{di}, k_{di} 表示自由度 i 上的期望阻抗特性, Δx_i 为自由度 i 的修正量, Δf_i 为自由度 i 的接触力偏差, 那么根据式(18)可得

$$\Delta x_i(s) = \frac{\Delta f_i(s)}{m_{di}s^2 + b_{di}s + k_{di}} \quad (19)$$

其中, $(m_{di}s^2 + b_{di}s + k_{di})^{-1}$ 为机械臂在自由度 i 上的期望导纳, 用于描述力偏差与位置偏差的对应关系。

在设计机械臂阻抗控制前, 我们需要先对力传感器的反馈做一些处理, 以使其更准确地反映末端效应器与环境之间的接触力。由于六维力传感器位于末端效应器与关节 7 的连接处, 因此在机械臂末端与地面对接时, 传感器与实际接触点之间有一个随着拉紧过程不断变化的距离 L 。事实上, 对接过程中机械臂与环境间沿 XY 方向的水平实际接触力会在六维力传感器上引起 XY 方向的水平力及 XY 方向的力矩, 其关系为

$$F = TF_c \quad (20)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -L & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, F_c 为 6×1 的矩阵, 是六维力传感器坐标系中所受的六维力矩阵, 且有 $F_c = F_a - F_b$; F_a 为六维力传感器反馈的六维力数据; F_b 为传感器的零点漂移; T 为转换矩阵, 它与拉紧开始过后的时间有关; L 为末端坐标系到六维力传感器坐标系之间的距离, 在拉紧过程中会随着拉紧过程而不断变小, 变化关系为 $L = L_0 - vt$; v 为拉紧速度; L_0 为对接初始时刻的距离。

由此设计的基于末端六维力传感器的空间机械臂位置内环阻抗控制原理如图 5 所示, 其中, F_d 为末端与环境接触的期望力, F_0 为六维力传感器坐标系中所受的六维力矩阵, 且 $F_0 = F_a - F_b$ 。

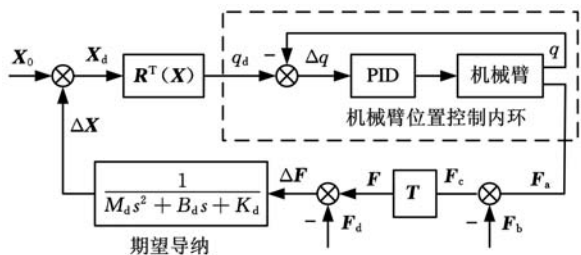


图 5 基于末端六维力传感器的位置内环阻抗控制

如图 6 所示, 采用 Simulink 对此控制方法进行仿真, 仿真条件为初始距离位置 250mm, 拉紧速度为 5mm/s。为了简化仿真过程, 我们将机械臂的动力学系统简化为一个 4s 的延时环节, 并假设环境刚度为 10N/mm。 M_d 、 B_d 和 K_d 在 Z 轴方向上的分量分别为 0.5kg、55N·s/m、0, 期望接触力为 0, 对接过程中位置和接触力仿真结果如图 7 所示。

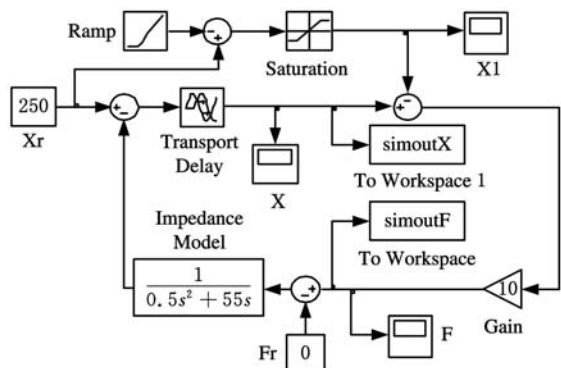
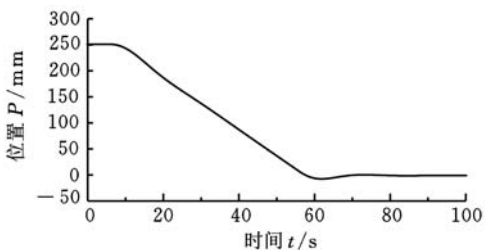
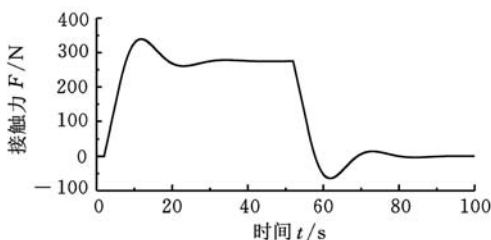


图 6 阻抗控制的 Simulink 仿真模型



(a) 位置—时间曲线



(b) 接触力—时间曲线

图 7 阻抗控制的仿真结果

4 实验及结果

根据上节描述的阻抗控制原理编写控制程序并在空间机械臂原理样机试验平台上完成相关实验。首先需要对阻抗控制原理进行离散化以利于编写控制程序, 根据理想阻抗特性有 $H(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{M_d s^2 + B_d s + K_d}$, 对系统进行双线性变换, 令 $s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$, T 为系统的采样周期, 得到

$$H(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta F(s)} = \frac{T^2(z+1)^2}{\omega_1 z^2 + \omega_2 z + \omega_3} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= 4M_d + 2B_d T + K_d T^2 \\ \omega_2 &= -8M_d + 2K_d T^2 \\ \omega_3 &= 4M_d - 2B_d T + K_d T^2 \end{aligned} \right\}$$

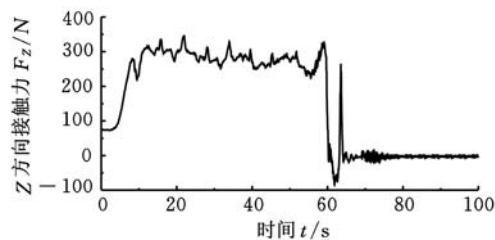
由此可得到阻抗控制器的离散表达方式:

$$\Delta X(n) = T^2(\Delta F(n) + 2\Delta F(n-1) + \Delta F(n-2))/\omega_1 - \omega_2 \Delta X(n-1)/\omega_1 - \omega_3 \Delta X(n-2)/\omega_1 \quad (23)$$

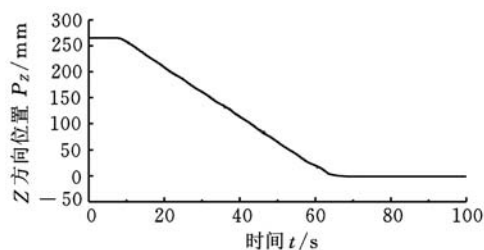
编写好控制程序后, 在实验平台上针对空间机械臂对接中的拉紧过程做实验。末端效应器初始位置垂直位于地面适配器正上方 200mm, 在钢丝绳的拉力作用下沿 Z 轴匀速运动, 直至与地面适配器接触啮合。适配器自重 1200N, 拉紧速度为 4mm/s, 通讯系统延时约为 2s, 采样周期为 50ms, M_d 、 B_d 和 K_d 在 Z 轴方向上的分量分别为 0.5kg、80N·s/m、0, 其余方向的分量为 0.1kg、80N·s/m、1000N/m。

实验的过程和结果如图 8 所示, 从实验结果可以看出, 随着拉紧过程的进行, 接触力首先快速上升至 300N 左右, 随后在第 8s 左右时候机械臂的主动柔顺功能开始令机械臂伴随钢丝绳向下运动, 接触力开始保持在 250N 左右, 最大值 340N

在允许的安全范围之内。当末端效应器被拉到底时,接触力快速减小至 0,此时由于控制系统的延时,接触力产生了比较大的振荡,但最大幅度也仍然在 100N 以内,且振荡马上减弱,随后接触力便一直稳定为 0。



(a) Z 方向接触力—时间曲线



(b) Z 方向位置—时间曲线

图 8 Z 方向的接触力和位置在拉紧实验中的变化

5 结语

本文介绍了七自由度对称冗余空间机械臂原理样机的运动学解算方法,详细阐述了二次计算法解其逆运动学的过程,提出了基于安置在空间机械臂末端效应器上的六维力传感器反馈的笛卡尔空间阻抗控制方法。该方法在理想无重力条件下建模,与在三维随动吊挂平衡重力下的微重力情况下进行空间机械臂实验相符。实验证明,该阻抗方法在有较大延迟的情况下,对空间机械臂末端效应器和地面适配器的对接过程中的力的控制仍然能够取得良好的效果。将来的研究应会注重于同时利用机械臂首尾 2 个力传感器,来弥补末端力传感器无法检测机械臂本体受力的缺点,实现涵盖机械臂整体的力柔顺控制和碰撞检测,从而确保能够在机械臂整体发生意外碰撞时主动控制碰撞力以免产生破坏。

参考文献:

- [1] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation; Part I—III[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1985, 107(11): 1-24.
- [2] Lu Shujun, Chung J H, Velinsky S A. Human—Robot Collision Detection and Identification Based on Wrist and Base Force—torque Sensors[C]//Pro-

ceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, 2005: 3796-3801.

- [3] 杨磊,高晓辉,刘宏,等. 基于指尖力传感器的 HIT 机器人灵巧手笛卡尔阻抗控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1255-1258.
Yang Lei, Gao Xiaohui, Liu Hong, et al. Cartesian Impedance Control for HIT Dexterous Robot Hand Based on Fingertip Force Sensor[J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 1255-1258.
- [4] 李正义,唐小琦,熊烁,等. 沿任意倾斜面的机器人力/位置控制方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 304-309.
Li Zhengyi, Tang Xiaoqi, Xiong Shuo, et al. Study on Robot Force Position Control Method for Arbitrarily Inclined Plane Tracking[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3): 304-309.
- [5] 王岚,李趁前,刘艳秋,等. 基于力阻抗控制的手臂康复机器人实验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(13): 1518-1522.
Wang Lan, Li Chenqian, Liu Yanqiu, et al. Experimental Research on Force—based Impedance Control of Arm Rehabilitation Robot[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(13): 1518-1522.
- [6] Liu H, Hirzinger G. Cartesian Impedance Control for the DLR Hand[C]//Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. Kobe, Japan, 2009: 106-112.
- [7] Ott C, Nakamura Y. Base Force/Torque Sensing for Position Based Cartesian Impedance Control[C]//The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems. St. Louis, 2009: 3244-3250.
- [8] Salisbury J K, Craig J J. Articulated Hands: Force Control and Kinematics Issues[J]. The International Journal of Robotics Research, 1982, 1(1): 4-17.
- [9] 祖迪,吴镇伟,谈大龙. 一种冗余机器人逆运动学求解的有效方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 71-75.
Zu Di, Wu Zhenwei, Tan Dalong. Efficient Inverse Kinematic Solution for Redundant Manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 71-75.

(编辑 张 洋)

作者简介:董晓星,男,1988年生。哈尔滨工业大学机器人研究所硕士研究生。主要研究方向为机器人控制。李 戈,男,1977年生。哈尔滨工业大学机器人研究所讲师。刘刚峰,男,1980年生。哈尔滨工业大学机器人研究所讲师。赵 杰,男,1968年生。哈尔滨工业大学机器人研究所教授、博士研究生导师。