

基于阻抗控制的工业机器人轨迹跟踪系统设计

陈明^{1,2}, 甘亚辉^{1,2}, 戴先中^{1,2}, 段晋军^{1,2}, 潘建龙^{1,2}

(1. 东南大学 自动化学院, 南京 210096, chenming317@foxmail.com;

2. 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 针对工业机器人作业过程中与环境接触时的受力运动问题, 提出了一种基于阻抗控制的自适应轨迹跟踪系统设计方案。首先从理论上分析了使用阻抗控制来解决机器人受力运动问题的可行性, 提出阻抗控制的具体实现方法, 并从离散系统的角度分析了保持控制系统稳定的条件。其次, 搭建基于 SolidWorks 和 MATLAB/SimMechanics 的联合仿真平台, 并通过系统仿真验证了本方案的可行性。最后, 构建了基于埃斯顿 ER16 工业机器人, EtherCAT 总线控制器, optoforce 六维力/力矩传感器和 ATI 防碰撞传感器的物理实验平台, 对本方案做进一步验证。实验结果表明机器人在受到外力作用时可以自适应的改变运动轨迹, 外力消失后能及时回到原轨迹继续运动, 证明了本方案的可行性与有效性。

关键词: 工业机器人; 轨迹跟踪; 阻抗控制; MATLAB/SimMechanics 建模; 六维力/力矩传感器; 防碰撞传感器

中图分类号: TH133; TP183

Design of Trajectory Tracking System for Industrial Robots Based on Impedance Control

CHEN Ming^{1,2}, GAN Yahui^{1,2}, DAI Xianzhong^{1,2}, DUAN Jinjun^{1,2}, PAN Jianlong^{1,2}

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China, chenming317@foxmail.com;

2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of

Education, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the problem of motion when in contact with the environment and force applied during the operation of industrial robots, an adaptive trajectory tracking system based on impedance control is proposed. Firstly, the feasibility of using impedance control to solve the problem is analyzed theoretically, and the concrete realization method of impedance control is put forward. The stability condition of the control system is analyzed from the perspective of discrete system. Secondly, a joint simulation platform is set up based on SolidWorks and MATLAB/SimMechanics, and the feasibility of the program is verified through simulation. Finally, a physical experiment platform based on Estun ER16 industrial robots, EtherCAT bus controllers, optoforce six-axis force / torque sensors and ATI anti-collision sensors was constructed to further validate this scheme. The experimental results show that the robot can adaptively change the trajectory when it is subjected to external force, and then return to the original trajectory to continue the motion after the external force disappears, which proves the feasibility and validity of the scheme.

Key words: Industrial robot; trajectory tracking; impedance control; MATLAB/SimMechanics modeling; six-axis force/torque sensor; anti-collision sensor

随着机器人技术的发展, 工业机器人已经被广泛应用到工业现场中, 其所执行的任务可分为两类: 非接触作业和接触作业。非接触作业是指机器人在自由

空间中完成作业任务, 即不与外界环境接触, 例如喷涂、焊接^[1]等, 单纯的位置控制即可取得良好的控制效果。而接触作业如打磨、搬运、安装^[1]等任务需要与环境进行接触, 并受到接触力的约束, 对于此类任务, 单纯的位置控制不能满足要求, 需要借助外部传感器使得机器人对环境表现出柔顺性。

阻抗控制^[2]通过建立机器人末端位移和接触力之间的关系, 将机器人/位置控制系统等效为“质量—阻尼—弹簧”物理控制模型, 通过调节惯性、阻尼、刚度参数实现机器人末端执行器和接触力的关系^[3]。

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61503076, 61175113); 江苏省自然科学基金 (BK20150624); 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室开放课题 (MCCSE2014B02)。

作者简介: 陈 明(1989-), 男, 硕士研究生;

甘亚辉(1985-), 男, 讲师;

戴先中(1954-), 男, 教授, 博士生导师;

段晋军(1988-), 男, 博士生;

潘建龙(1992-), 男, 硕士研究生。

经过多年的发展,阻抗控制能够有效解决机器人和环境的交互问题,在空间机械臂接触力及轨迹规划^[4-5],机器人去毛刺^[6],农业机器人果蔬的无损抓取和采摘^[7],康复机器人^[8]等领域得到应用。

本文基于成熟的位置阻抗控制理论,设计并实现了大负载工业机器人的自适应轨迹跟踪系统,通过基于 SolidWorks、MATLAB/SimMechanics 的联合仿真实验,以及基于埃斯顿 ER16 机器人、EtherCAT 总线控制器的物理实验,实现了大负载工业机器人与环境接触时的自适应轨迹跟踪。

1 阻抗控制

1.1 阻抗控制模型

1985 年, Hogan 提出了阻抗控制方法^[2],其主要的控制手段是通过“目标阻抗”和检测或估算得到机器人与环境之间的接触力,来实现机器人的柔顺性控制。机器人阻抗控制并非直接控制机器人与环境之间的接触力,而是通过调整力和位置偏差的动态关系来实现对系统的控制,这种动态关系可称为期望阻抗模型^[9]。工业机器人与环境接触时常用的阻抗模型如图 1 所示:

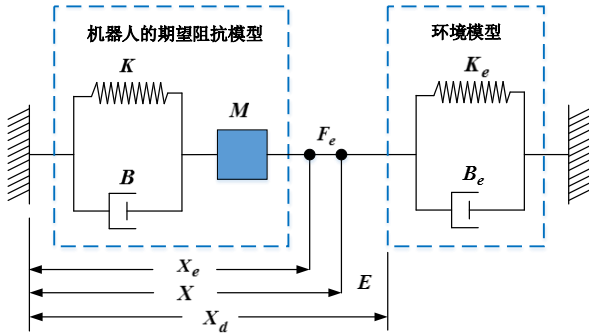


图 1 机器人的阻抗模型

$$F_e = ZE = M\ddot{E} + B\dot{E} + KE \quad (1)$$

式(1)中, $E = X_d - X$, 其中 X_d 为机器人末端的期望位置, X 为机器人末端的实际位置, X_e 为环境在不受力时的位置, Z 为机器人的期望阻抗, F_e 为机器人与环境之间的接触力。对于 n 自由度的工业机器人, M 、 B 和 K 均为 $(n \times n)$ 的正定对称矩阵, 分别称为惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 通常取其为正定对角阵, 即各个方向是解耦^[3]的。其对角线上的每个元素分别代表沿 X 、 Y 、 Z 轴平移和绕 X 、 Y 、 Z 轴转动时的期望阻抗特性。

n 自由度关节型机器人的动力学模型在关节空间可以表示为

$$D(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau + J^T F_e \quad (2)$$

其中, θ 为关节角, $D(\theta)$ 为惯性矩阵, $h(\theta, \dot{\theta})$ 为包括离心力、哥氏力、重力和摩擦力引起的关节力矩。基于力矩的控制算法, 通过建立关节空间和笛卡尔空间的力/位置关系:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J\dot{\theta} \\ \tau &= J^T F_e \end{aligned} \quad (3)$$

可以得到:

$$\begin{aligned} \tau &= D(\theta)J^{-1}[\ddot{X}_d + M^{-1}(B\dot{E} + KE) - \dot{J}\dot{\theta}] \\ &\quad - [D(\theta)J^{-1}M^{-1} + J^T]F_e + h(\theta, \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, J 为雅克比矩阵。实际中, 由于机器人的动力学模型通常是未知的, 或虽然可以通过动力学参数辨识^[10]来估计, 但是过程复杂且精度难以保证。本文采用基于位置的笛卡尔空间阻抗控制方法, 根据机器人在当前笛卡尔空间的位置输出 X , 由逆运动学求出对应机器人驱动器的关节角输入信号 θ 。在力控周期比较短的情况下, 可以实现良好的控制效果。

1.2 阻抗控制的稳定性分析

机器人自适应轨迹跟踪研究的是机器人在按预定轨迹运动过程中受到外力作用时的运动情况, 是以跟踪期望轨迹为目标。为了描述问题的方便, 当机器人阻抗控制模型在各个方向解耦^[3]时, 可以先只考虑某一维的情况, 取 f_e, z, e, m, b, k 分别为 F_e, Z, E, M, B, K 中的一维元素, 则式(1)变为:

$$\begin{aligned} f_e &= ze \\ &= m(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b(\dot{x}_d - \dot{x}) + k(x_d - x) \end{aligned} \quad (5)$$

易知, 当 $f_e = 0$ 时, 系统稳态时有 $x_d = x$; 当 $f_e \neq 0$ 时, 系统稳态时存在位置跟踪误差。

对于连续系统来说, 由于 m, b, k 均大于 0, 因此原二阶系统总是稳定的。式(5)表示的阻抗控制算法实际应用时, 可以通过以下离散化的方式在控制器上编程实现:

$$\begin{cases} x_r((n+1)T) = x_r(nT) + \dot{x}_r(nT)T \\ \dot{x}_r((n+1)T) = \dot{x}_r(nT) + \ddot{x}_r(nT)T \\ \ddot{x}_r(nT) = \ddot{x}_d(nT) + \frac{1}{m}(-f + b(\dot{x}_d(nT) - \dot{x}_r(nT)) + k(x_d(nT) - x_r(nT))) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $x_r(nT)$ 为第 n 个采样周期时机器人末端的实际运动位置, $x_d(nT)$ 为第 n 个采样周期时机器人末端的期望位置, T 为采样周期 (在本文中也是力控周期)。 $f = f_e - f_d$, 其中 f_e 为机器人末端与环境之间的实际接触力, f_d 为机器人末端与环境之间的期望

接触力。对于自适应轨迹跟踪目标而言 $f_d = 0$ 。由于对原二阶连续系统进行了离散化,因此在 m, b, k 均大于零的条件下,并不能保证系统总是稳定的, m, b, k, T 之间需要满足一定的约束关系。选取状态变量及输出变量如下:

$$\begin{cases} x_1(n) = x_r(n) \\ x_2(n) = \dot{x}_r(n) = \dot{x}_1(n) \\ y(n) = x_1(n) \end{cases} \quad (7)$$

此时,式(6)可以转化为:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = x_1(n) + x_2(n)T \\ x_2(n+1) = -\frac{kT}{m}x_1(n) + (1 - \frac{bT}{m})x_2(n) + u(n) \\ y(n) = x_1(n) \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$u(n) = \ddot{x}_d(n)T + \frac{T}{m}[-f + b\dot{x}_d(n) + kx_d(n)] \quad (9)$$

进一步整理可得离散系统的状态空间模型为:

$$\begin{cases} x(n+1) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -\frac{kT}{m} & 1 - \frac{bT}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} + u(n) \\ y(n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

其系统矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -\frac{kT}{m} & 1 - \frac{bT}{m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(10)所示为一个离散时间线性定常系统,当系统矩阵 G 的特征值全部位于 z 平面以原点为圆心的单位圆内部时,原系统渐进稳定。式(10)所示系统对应的特征方程为:

$$\begin{aligned} |zI - G| &= \begin{vmatrix} z-1 & -T \\ \frac{kT}{m} & z-1+\frac{bT}{m} \end{vmatrix} \\ &= z^2 + (\frac{bT}{m} - 2)z + 1 - \frac{bT}{m} + \frac{kT^2}{m} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

采用离散时间系统稳定性的代数判据分析其稳定性,由双线性变换令:

$$z = \frac{s+1}{s-1} \quad (13)$$

带入式(10)可得:

$$kT^2s^2 + 2T(b-kT)s + (kT^2 - 2bT + 4m) = 0 \quad (14)$$

由劳斯判据可知,要使原系统稳定,必须有:

$$\begin{cases} kT^2 > 0 \\ 2T(b-kT) > 0 \\ kT^2 - 2bT + 4m > 0 \end{cases} \quad (15)$$

成立,从而系统稳定的条件为:

$$\begin{cases} b^2 < 4mk \text{ 时, } 0 < T < \frac{b}{k} \\ b^2 \geq 4mk \text{ 时, } 0 < T < \frac{b - \sqrt{b^2 - 4mk}}{k} \end{cases} \quad (16)$$

在满足上述系统稳定性的条件下,选取合适的阻抗参数^[11-12]可使系统满足期望的动态性能。本文选取的阻抗参数为 $m=1, b=200, k=300, T=0.005s$, 阻抗控制算法在 MATLAB 下的单位阶跃响应如图 2 所示。图 2(a) 通过 MATLAB function 对式(6)的算法进行了具体实现,图 2(b) 为对应的阶跃响应曲线。

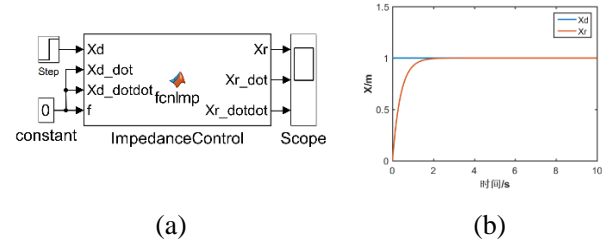


图 2 阻抗控制算法仿真

2 仿真系统设计

2.1 仿真平台搭建

SimMechanics^[13]是集成在 MATLAB 下的进行多体动力学建模和分析的环境,立足于 Simulink 之上^[14]。本文采用 SolidWorks、SimMechanics 联合建模的方式,先将机器人厂商提供的 ER16 机器人 CAD 模型导入 SolidWorks,再使用 SimMechanics Link 插件生成对应版本的 SimMechanics 可以导入的 STL 文件。

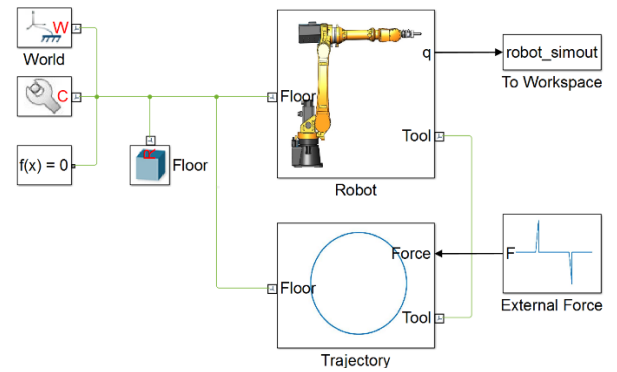


图 4 ER16 SimMechanics 仿真系统框图

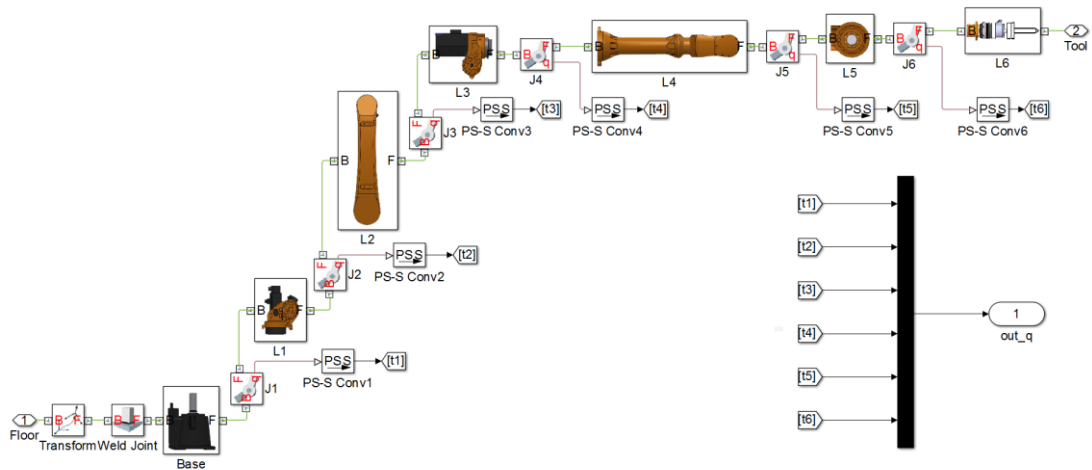


图 5 Robot 子系统框图

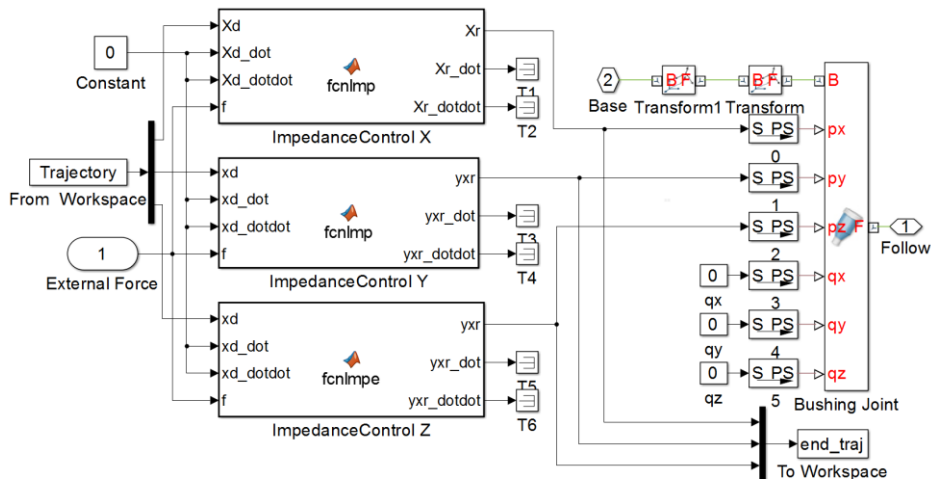


图 6 Trajectory 子系统框图

ER16 机器人模型导入 SimMechanics 后，为达到对机器人模型的控制功能，需要添加适当的 SimMechanics/Simulink 组件。仿真系统整体框图如图 4 所示，从图中可以看出，ER16 机器人本体和运动轨迹都被封装为一个独立的子系统。图 5 所示为 Robot 子系统的内部框图，主要由关节和连杆组成。图 6 所示为 Trajectory 子系统的内部框图，其内部使用了图 2 所示的阻抗控制算法模块，输出的参考轨迹通过 Bushing Joint 模块完成机器人模型的自动求解逆运动学功能，避免了人工繁琐的求逆过程。

2.2 仿真

仿真实验设计机器人末端期望运动轨迹为相对初始位置在末端工具坐标系 XZ 平面做半径为 0.2 m 的圆周运动，观察其在运动过程中受到外力干扰时的轨迹跟踪情况。机器人的期望运动轨迹如图 7(a) 所示。机器人运动过程中，其末端工具坐标系 XYZ 轴方向均施加如图 7(b) 所示的外力，RPY 方向不施加外力

矩。整个仿真过程持续时间为 50 s。

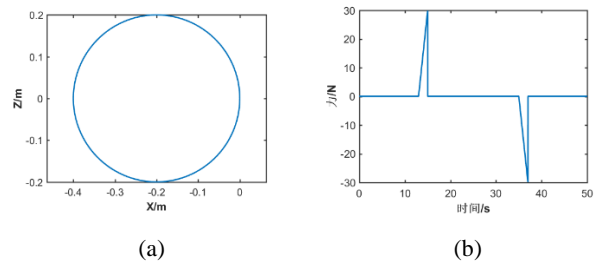


图 7 期望轨迹及施加的外力

图 8 所示为仿真实验的详细过程，其中图 8(a)中机器人末端处于期望运动轨迹的初始位置，图 8(b) 中机器人末端沿期望圆周轨迹运动，图 8(c) 中机器人末端由于受到外力作用而偏离了期望的运动轨迹，图 8(d) 中机器人末端在外力消失后重新回到期望轨迹运动，图 8(e) 中机器人末端由于受到反方向的外力作用而偏离期望的运动轨迹，图 8(f) 中机器人末端回到初始位置，轨迹跟踪结束。

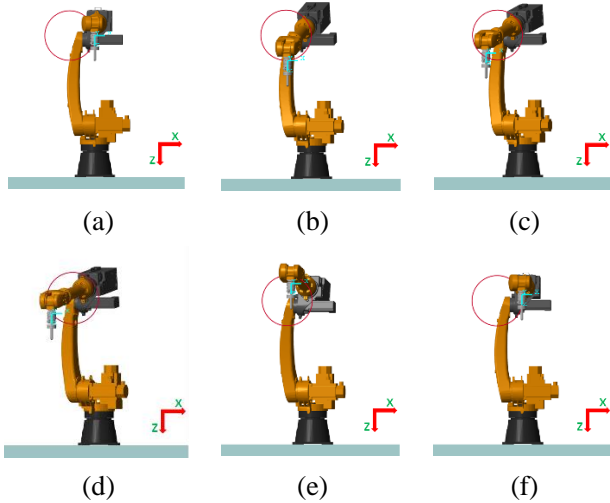


图 8 圆周运动自适应轨迹跟踪过程

2.3 仿真结果分析

圆周运动自适应轨迹跟踪过程仿真结果如图 9 所示。其中图 9(a) 所示为仿真实验中机器人末端在笛卡尔空间的期望轨迹与实际仿真轨迹的对比结果,图 9(b) 所示为机器人末端在工具坐标系 XZ 平面的期望轨迹与仿真实实际轨迹的对比情况,图 9(c) 所示为对应机器人各关节角度曲线。

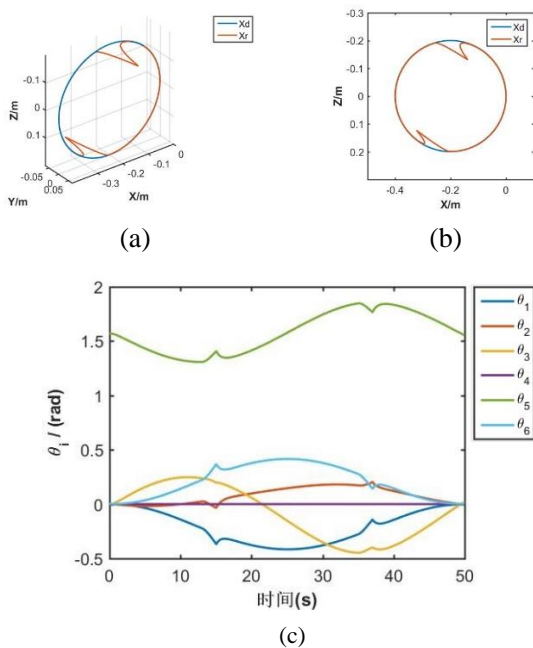


图 9 圆周运动轨迹跟踪仿真结果

仿真结果表明: 机器人末端在运动过程中受到外力干扰时可以自适应的调整其运动轨迹, 在外力干扰消失后, 又可以快速稳定地跟踪到期望的轨迹继续运动, 并且机器人各关节角度在受力阶段无突变(在外力消失的瞬间有突变), 符合预期的轨迹跟踪效果, 验证了控制方案的可行性。

3 实验系统设计

在上述仿真实验结果的基础上, 基于实验室的现有条件, 针对本文提出的控制算法, 设计物理实验对其进行验证。有别于多数机器人力控系统设计方案, 本文着眼于解决工业现场大负载机器人的自适应轨迹跟踪问题, 因此机器人本体使用了具有较大负载的埃斯顿 ER16 机器人, 研究其受力运动轨迹跟踪性能。

3.1 实验平台搭建

实验系统硬件包括埃斯顿 ER16 机器人本体及伺服驱动器、EtherCAT 总线控制器、optoforce 六维力/力矩传感器、ATI 防碰撞传感器、气泵等。

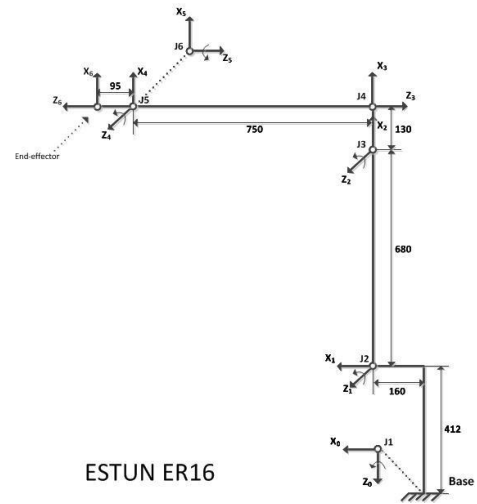


图 10 埃斯顿 ER16 机器人 D-H 坐标系

埃斯顿 ER16 机器人其负载大小为 16 kg。按照 D-H 方法建立其运动学模型如图 10 所示, 得到其 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 埃斯顿 ER16 机器人 D-H 参数表

关节 i	θ_i ($^\circ$)	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i ($^\circ$)	θ_i 范围
1	0	-412	160	90	$\pm 180^\circ$
2	-90	0	680	0	$+140^\circ \sim -60^\circ$
3	0	0	130	90	$+80^\circ \sim -170^\circ$
4	0	-750	0	-90	$\pm 360^\circ$
5	0	0	0	9	$+135^\circ \sim -120^\circ$
6	0	-95	0	180	$\pm 360^\circ$

实验基于自主研发的 EtherCAT 总线的控制器。选用配备 Pentium CPU 的工控机 IPC 作为系统主控, 搭载 VxWorks 实时和多任务操作系统, 负责插补轨迹的运算、顺序控制和与外界设备通讯等, 底层运动控制算法对用户开放^[15]。

机器人末端与环境之间的接触力是通过六维力/

力矩传感器来测量的。实验中使用的是 optoforce HEX-70-XE-1000N 六维力/力矩传感器，其采用 USB/CAN/Ethernet-UDP/TCP 接口，最大采样频率可达 1000Hz。为了防止机器人末端和外界环境之间的接触力过大而造成对机器人或操作员的伤害，实验中在六维力传感器末端安装了一个 ATI 防碰撞传感器。整个实验装置的装配实物图如图 11 所示。

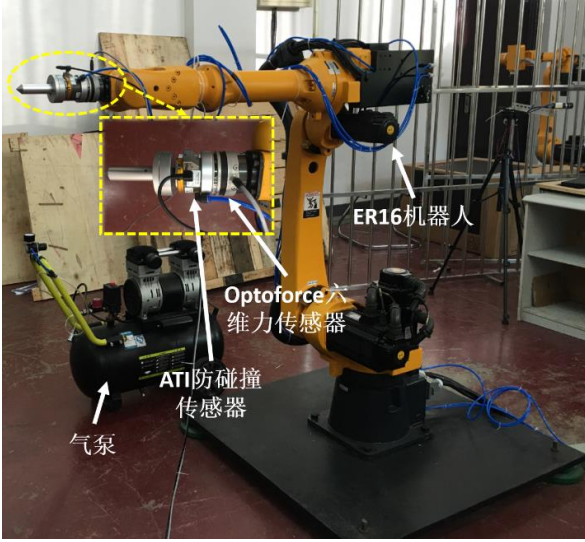


图 11 实验装置装配图

3.2 控制系统设计

埃斯顿 ER16 机器人伺服驱动器所支持的通讯周期为 1~8 ms，考虑到六维力/力矩传感器的采样周期、控制算法所消耗的时间以及尽可能短的力控周期，实验中配置伺服驱动器的通讯周期为 5 ms，并且采用伺服系统的位置闭环控制(周期同步位置控制模式)。

六维力/力矩传感器与控制器之间通过 Ethernet-UDP 接口通讯，采样频率设置为 1000 Hz。ATI 防碰撞传感器的输入气压设置为 10 psi (0.69 bar)，其输出信号直接控制 ER16 机器人的伺服下电开关。

实验控制程序流程图如图 12 所示。在图 12 中，一个完整的力控周期(5 ms)包括：先读取六维力/力矩传感器数据，获取期望的运动轨迹(X_d)，再由阻抗控制算法计算得到机器人末端在笛卡尔空间的参考轨迹(X_r)，经过逆运动学得到机器人的各关节角度值，最后将得到的关节角度值发送给机器人驱动器执行。

力/力矩传感器末端安装的法兰和 ATI 防碰撞传感器的重力会对测量结果有影响，必须对读取的六维力/力矩传感器数据进行重力补偿；此外由于六维力/力矩传感器数据存在噪声干扰，实验中采用移动平均

值滤波的方法对补偿后的数据进行了滤波。为使机器人的各关节轴运动平稳光滑，在将逆运动学运算得到的关节角发送给机器人驱动器执行前，也对其进行了移动平均值滤波。本实验规划的期望圆周轨迹由 10000 组数据组成，因此整个自适应轨迹跟踪的时间为 50 s。

实验中阻抗控制算法使用的参数设置如下：

$$\begin{aligned} M &= \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1, 1\} \\ B &= \text{diag}\{200, 200, 200, 200, 200, 200\} \\ K &= \text{diag}\{300, 300, 300, 300, 300, 300\} \\ T &= 0.005 \text{ s} \end{aligned} \quad (15)$$

上述参数对应的控制系统的动态响应可参考图 2(b)所示。为实现自适应轨迹规划的柔顺性，对滤波后的六维力/力矩传感器数据进行了适当的放大，当外界对机器人施加一个不太大的力，也可以使机器人的运动轨迹产生较为明显的改变。力/力矩的放大系数如下：

$$\begin{bmatrix} k_{F_x} & k_{F_y} & k_{F_z} & k_{T_x} & k_{T_y} & k_{T_z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 3000 & 4000 & 4000 & 10000 & 8000 & 12000 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

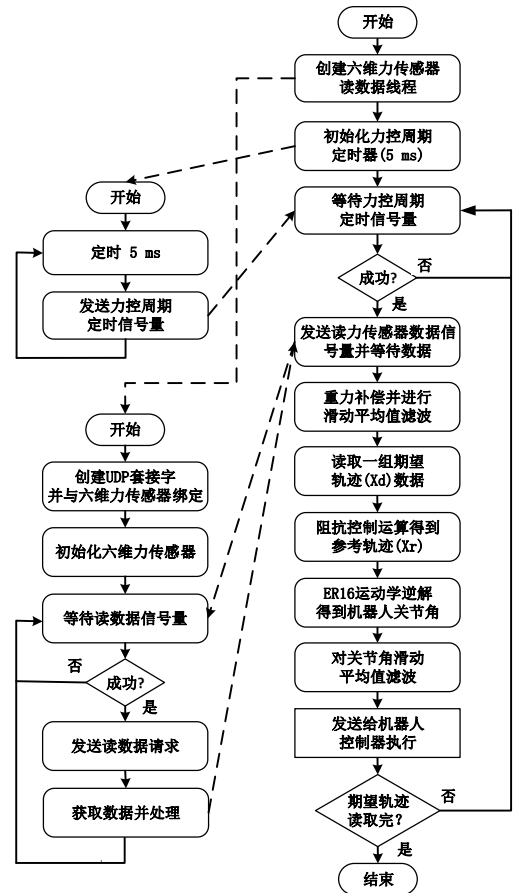


图 12 控制程序流程图

3.3 实验过程

物理实验的过程与仿真实验类似。如图 13 所示，在机器人末端相对于初始位置在 XZ 平面做半径为 0.2 m 的圆周运动过程中，通过人为施加外力来改变其运动轨迹。图 13(a) 中机器人末端处于初始位置，准备沿图中红色圆圈所示圆周运动；图 13(b) 中机器人末端在沿圆周向下运动的过程中，受到一个向右的外力作用而改变运动轨迹，当外力消失后重新回到期望的轨迹继续运动；图 13(c) 中机器人末端在运动到圆周底部时，受到了一个向上的外力作用而改变运动轨迹；图 13(d) 中机器人末端在向圆周左端运动时，受到了一个向左的外力作用而改变运动轨迹；图 13(e) 中在机器人末端运动到圆周左端时施加一个向前的外力来改变机器人的运动轨迹；图 13(f) 中在机器人末端向圆周顶部运动的过程中，受到了一个向后的外力作用而改变运动轨迹；图 13(g) 中机器人末端运动到圆周顶部时受到一个向下的外力而改变运动轨迹；图 13(h) 中，机器人末端没有受到外力作用，沿圆周轨迹向初始位置运动，图 13(i) 中，机器人重新回到初始位置。

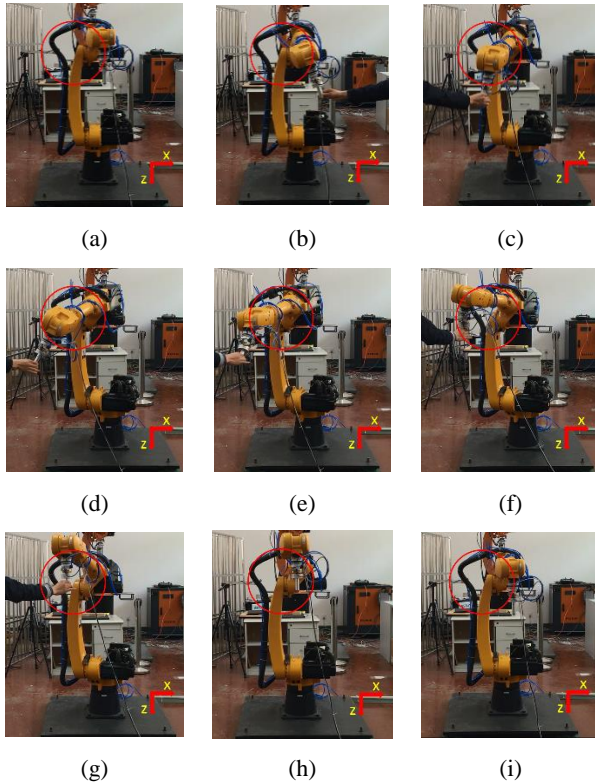


图 13 XZ 平面圆周运动自适应轨迹跟踪

3.4 实验结果分析

实验过程对应的结果如图 14 所示。图 14(a) 为机器人末端相对初始位置在笛卡尔空间的实际运动轨迹与期望运动轨迹的对比结果；图 14(b) 所示为机器人

末端相对初始位置在 XZ 平面的实际运动轨迹与期望运动轨迹的对比结果；图 14(c) 所示为机器人末端六维力/力矩传感器在 XYZ 方向所受到的力随时间的变化曲线；图 14(d) 所示为机器人末端六维力/力矩传感器在 RPY 方向所受到的力矩随时间变化曲线。图 14(e) 所示为对应机器人各关节角度曲线。

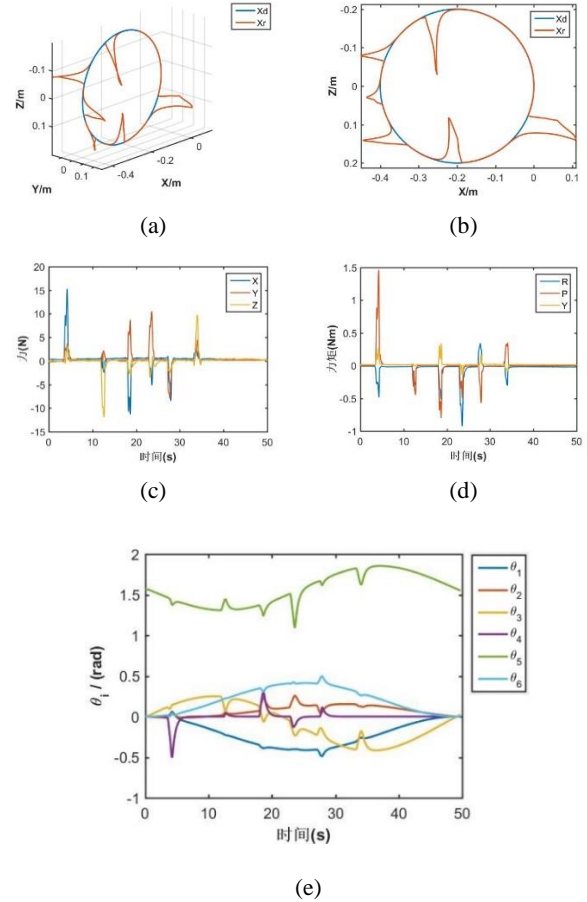


图 14 XZ 平面圆周运动轨迹跟踪实验结果

实验结果表明：机器人末端在运动过程中受到外力时，能及时的改变原来的运动轨迹，在外力消失后，又能快速的回到期望轨迹继续运动。物理实验结果与在 $MATLAB/SimMechanics$ 下的仿真结果基本一致，进一步验证了本文所用控制方案的正确性与有效性。

4 结论

本文针对大负载工业机器人在与外界环境接触时的自适应轨迹跟踪问题，提出了基于阻抗控制的控制系统方案，并通过搭建的仿真实验平台和物理实验平台验证，结果表明机器人在与环境接触时具有良好的柔顺性，能够自适应的跟踪期望轨迹，证明了本方案的可行性与有效性。为后续课题组进行机器人的力控和多机器人的协作控制等夯实了基础。同时，本文设

计的控制方案和仿真/实验系统架构可以容易的结合一些自适应控制算法^[16-17]和智能控制算法^[18]来达到更好的控制效果, 这些将是课题组下一步需要完成的工作。

参考文献:

- [1] 高杰. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 中国科技纵横, 2016(20).
- [2] Hogan N. Impedance control - An approach to manipulation. I - Theory. II - Implementation. III - Applications[J]. Asme Transactions Journal of Dynamic Systems & Measurement Control B, 1984, 107(1):304-313.
- [3] 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应[D]. 华中科技大学, 2011.
- [4] 黄剑斌, 李志. 基于阻抗控制的空间机械臂接触控制与迹规划技术[J]. 航天器工程, 2013, 22(4):43-48.
- [5] 董晓星, 李戈, 刘刚峰,等. 冗余空间机械臂的运动学和笛卡尔阻抗控制方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(1):36-41.
- [6] 章健. 基于恒力控制的机器人去毛刺轨迹动态规划[D]. 浙江大学, 2016.
- [7] 王学林, 肖永飞, 毕淑慧,等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):58-63.
- [8] 文忠, 钱晋武, 沈林勇,等. 基于阻抗控制的步行康复训练机器人的轨迹自适应[J]. 机器人, 2011, 33(2):142-149.
- [9] 李二超. 未确知环境下机器人力控制技术研究[D]. 兰州理工大学, 2011.
- [10] 蔡金狮. 动力学系统辨识与建模[M]. 国防工业出版社, 1991.
- [11] 杨振. 基于阻抗控制的机器人柔顺性控制方法研究[D]. 东南大学, 2005.
- [12] 崔亮. 机器人柔顺控制算法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2013.
- [13] SimMechanics-Model and Simulate Multibody Mechanical Systems. <http://www.mathworks.com/products/simmechanics/>.
- [14] Viliam Fedák, František Ďurovský, Róbert Üveges. Analysis of Robotic System Motion in SimMechanics and MATLAB GUI Environment[J]. Matlab Applications for the Practical Engineer, 2014.
- [15] 罗灿威. 基于 SERCOS III总线的工业机器人控制器运动功能设计[D]. 东南大学, 2015.
- [16] Jung S, Hsia T C, Bonitz R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3):474-483.
- [17] Seraji H, Colbaugh R. Force tracking in impedance control[J]. International Journal of Robotics Research, 1997, 16(1):97-117.
- [18] Jung S, Hsia T C. Neural network impedance force control of robot manipulator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(3):451-461.