



東南大學

Southeast University

基于阻抗控制的工业机器人 轨迹跟踪系统设计

报告人：陈明
2017.10.28

Part 1	研究背景	02~04
Part 2	阻抗控制	05~11
Part 3	仿真系统设计	12~21
Part 4	实验系统设计	22~34
Part 5	总结	35~36

目录

CONTENTS

研究背景

1. 工业机器人一般应用场景

① 非接触作业

- 在自由空间中完成作业任务，即不与外界环境接触，如喷涂、焊接
- 位置控制即可取得良好的控制效果

② 接触作业

- 需要与外界环境接触，并受到接触力的约束
- 单纯的位置控制不能满足要求，需要借助传感器使得机器人对环境表现出柔顺性



研究背景

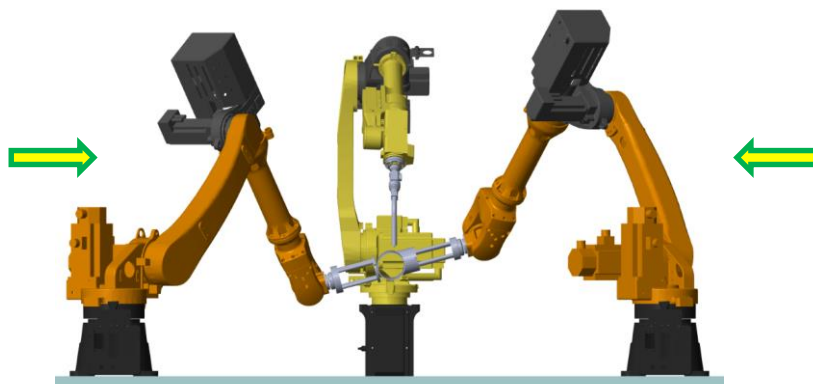
2. 多机器人协作焊接的应用需求



带变位机焊接



需要变位机来
改变工件姿态



Robot1

闭链协作焊接

Robot2



1. 无需变位机, 灵活性高, 适用性强, 成本低.
2. 待焊工件无需点焊固定, 减小机器人负载.

待解决问题:

Robot1和Robot2以及待焊工件形成的
闭链系统的位置/力协调控制.



点焊固定焊接



需要先将待焊
工件点焊固定

Part 1	研究背景	02~04
Part 2	阻抗控制	05~11
Part 3	仿真系统设计	12~21
Part 4	实验系统设计	22~34
Part 5	总结	35~36

目录

CONTENTS

阻抗控制

1. 力控策略主要集中在以下四类：

① 阻抗控制

- Hogan在1985年提出
- 控制精度依赖于操作者对环境知识的精确了解

② 力/位混合控制

- 计算复杂，实施比较困难

③ 自适应控制

- 可以达到较好的力跟踪效果
- 对补偿不准确和不确定性有一定的鲁棒性

④ 智能控制

- 模糊控制、神经网络
- 不需要基于精确的动力学模型

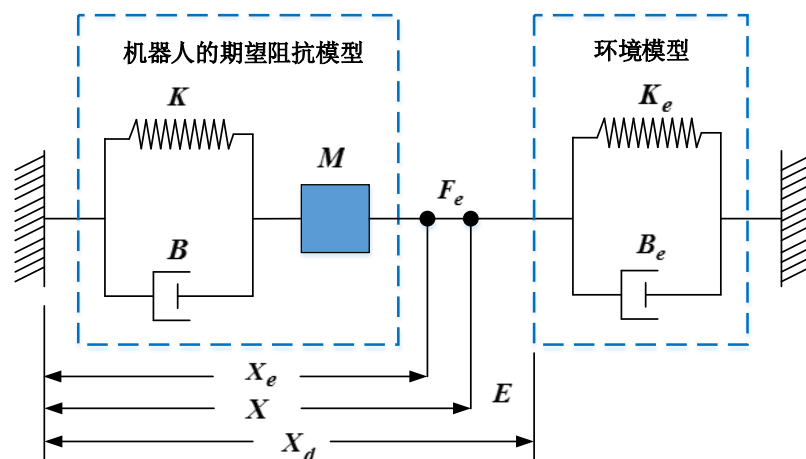


阻抗控制

2. 阻机械臂的阻抗模型

$$E = X_d - X$$

$$F_e = ZE = M\ddot{E} + B\dot{E} + KE$$



机械臂的阻抗模型

其中

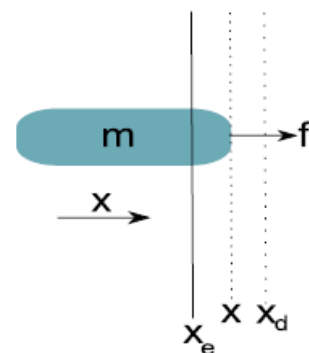
X_e : 环境在不受力时的位置

X_d : 机械臂末端的期望位置

X : 机械臂末端的实际位置

Z : 为机械臂的期望阻抗.

F_e : 为机械臂与环境之间的接触力



机械臂与环境接触模型

阻抗控制

3. 阻抗控制稳定性分析

考虑某一维情况，取 f_e, z, e, m, b, k 分别为 F_e, Z, E, M, B, K 中的一维元素，则有：

$$f_e = ze = m(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b(\dot{x}_d - \dot{x}) + k(x_d - x)$$

其中， f_e 为机器人与环境之间接触力， 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， m, b, k 分别为惯性、阻尼和刚度系数。离散化后：

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

$x_r(nT)$ 和 $x_d(nT)$ 分别为第 n 个采样周期机器人末端实际运动位置和期望位置， T 为采样周期(力控周期)。



阻抗控制

3. 阻抗控制稳定性分析

选取状态变量：

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

可得离散系统的状态空间模型为：

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

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

系统矩阵： $G = \begin{bmatrix} 1 & T \\ -\frac{kT}{m} & 1 - \frac{bT}{m} \end{bmatrix}$



阻抗控制

3. 阻抗控制稳定性分析

系统对应的特征方程：

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

双线性变换令： $z = \frac{s+1}{s-1}$

带入上式，得：

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

由劳斯判据，系统稳定时有：

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

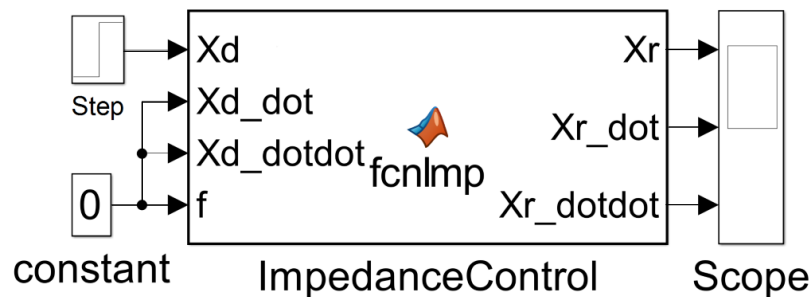
即：

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

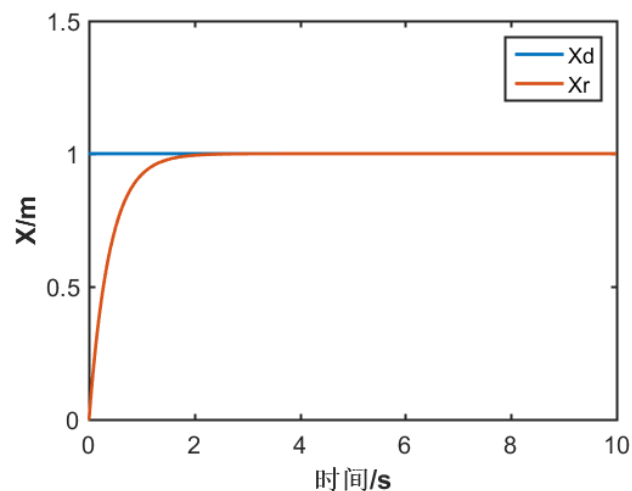

阻抗控制

4. 仿真

选取阻抗参数为 $m=1, b=200, k=300, T=0.005s$, 阻抗控制算法在MATLAB下的单位阶跃响应如下:



MATLAB function仿真模块



单位阶跃响应曲线

Part 1	研究背景	02~04
Part 2	阻抗控制	05~11
Part 3	仿真系统设计	12~21
Part 4	实验系统设计	22~34
Part 5	总结	35~36

目录

CONTENTS

仿真系统设计

1. 仿真平台搭建

① 基于SolidWorks和MATLAB/SimMechanics搭建联合仿真平台



SolidWorks模型

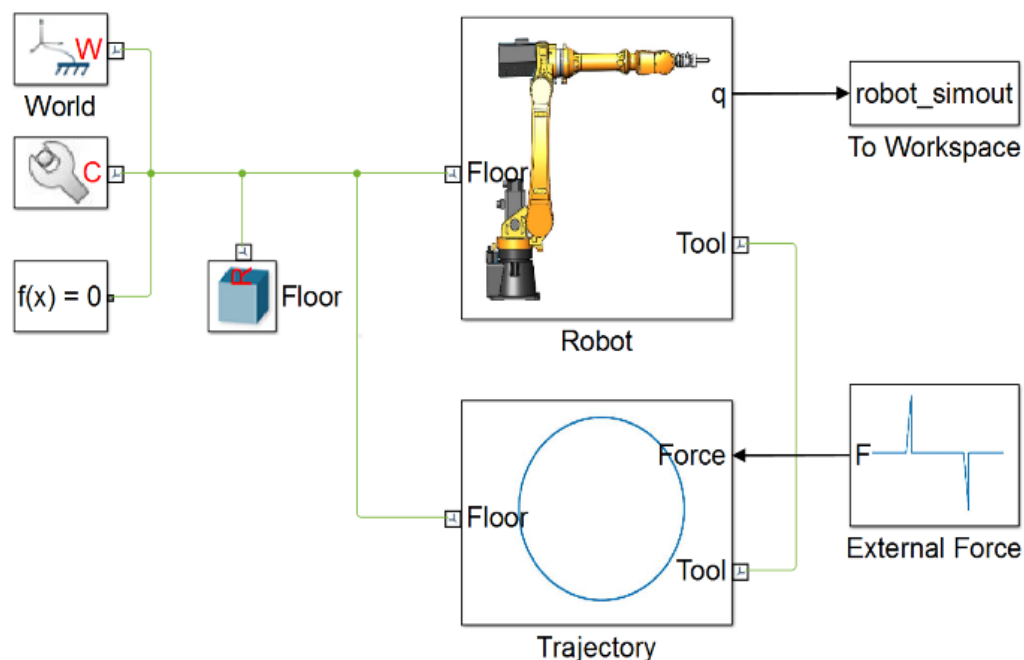


SimMechanics模型

仿真系统设计

1. 仿真平台搭建

② 仿真系统框图

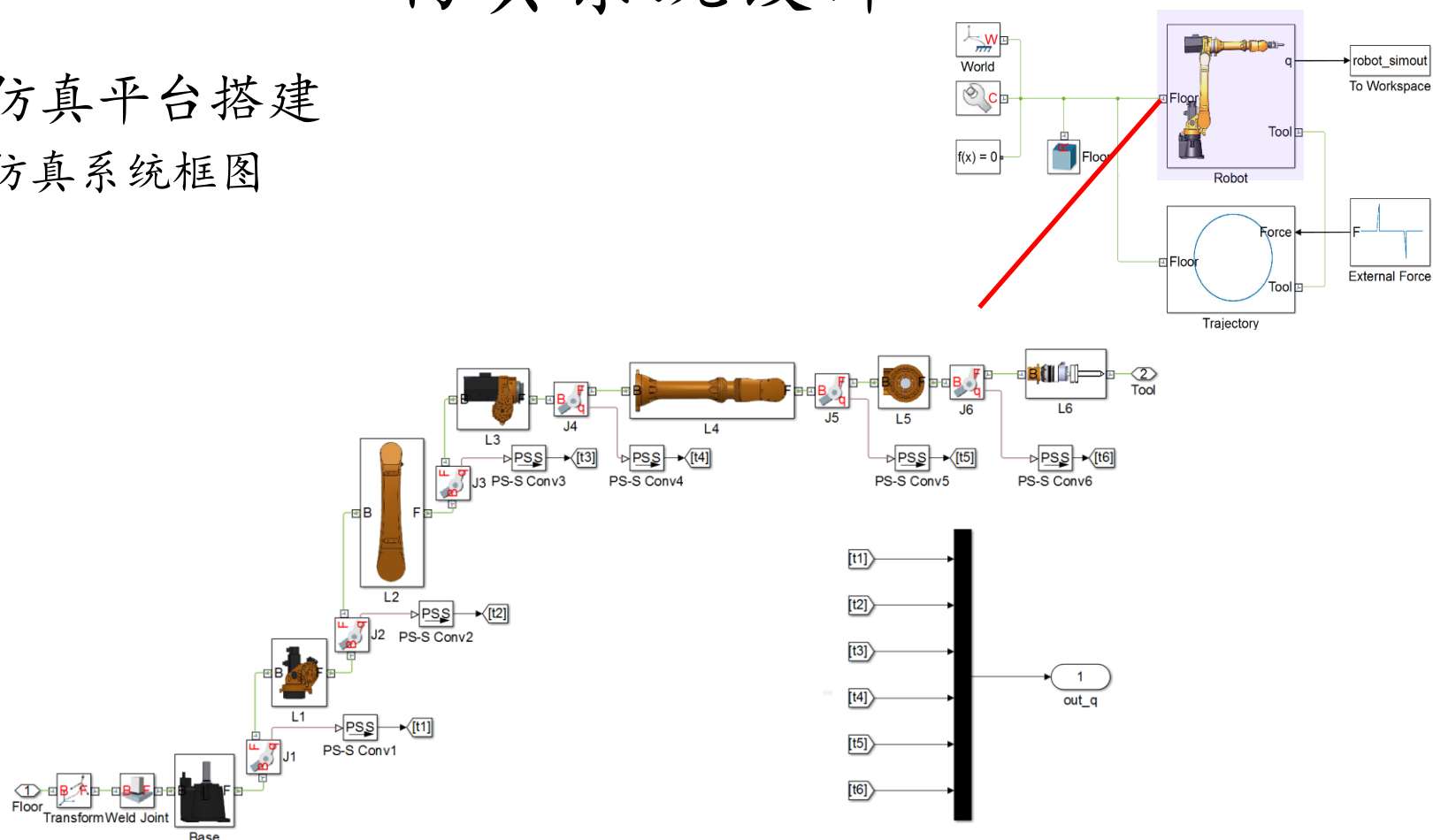


ER16 SimMechanics仿真系统框图

仿真系统设计

1. 仿真平台搭建

② 仿真系统框图

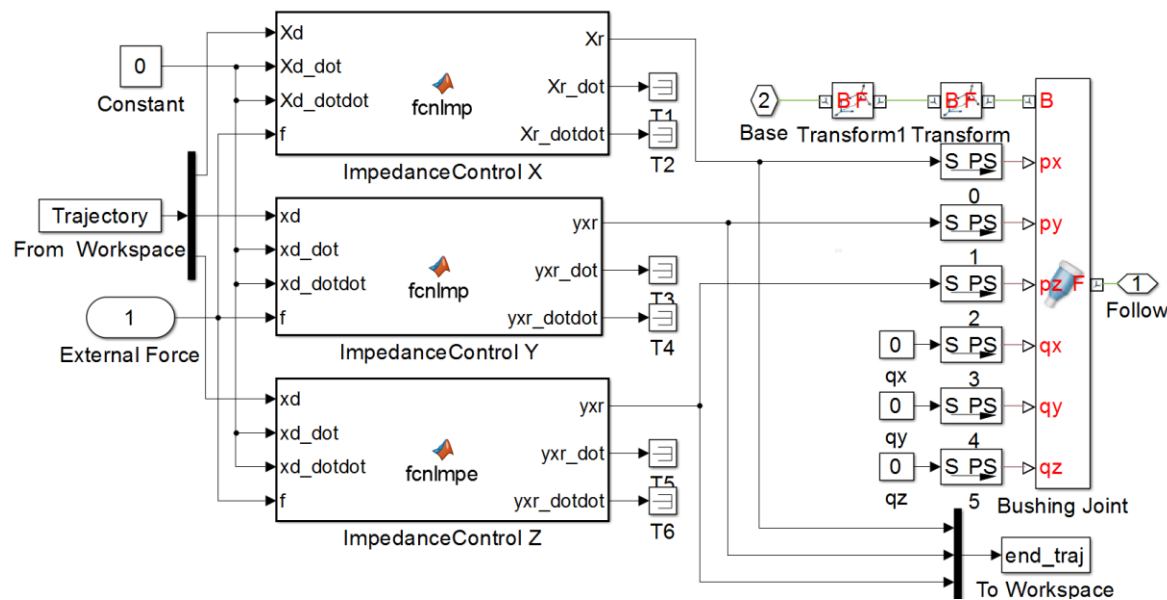
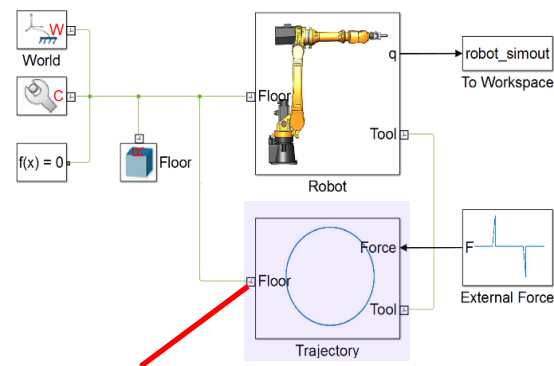


Robot子系统框图

仿真系统设计

1. 仿真平台搭建

② 仿真系统框图

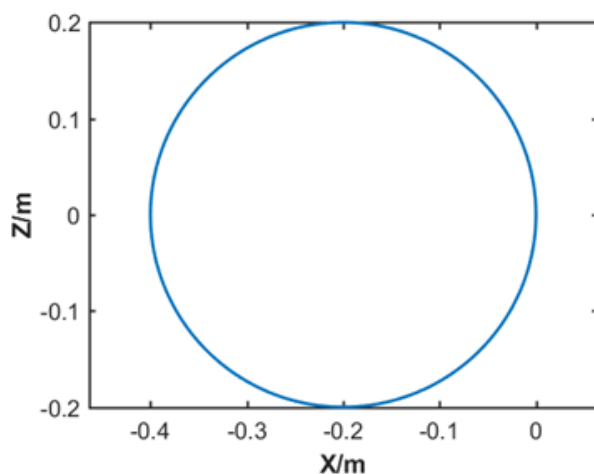


Trajectory子系统框图

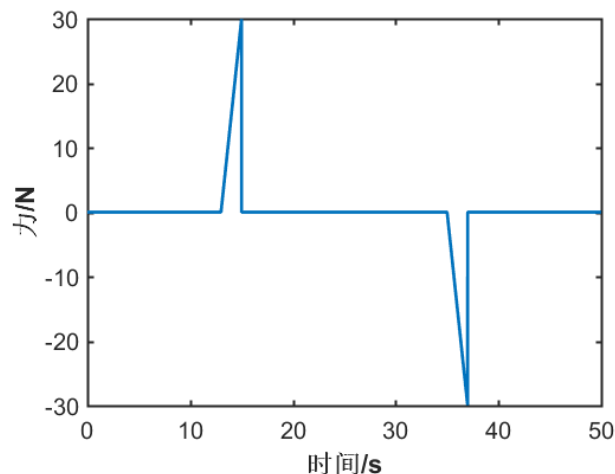
仿真系统设计

2. 仿真实验

设计机器人末端期望轨迹为相对初始位置在工具坐标系XZ平面做半径为0.2m的圆周运动。机器人运动过程中，其末端工具坐标系XYZ轴方向均施加如右下图所示的外力，RPY方向不施加外力矩。



期望轨迹

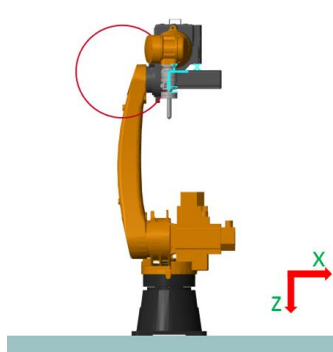


所受外力

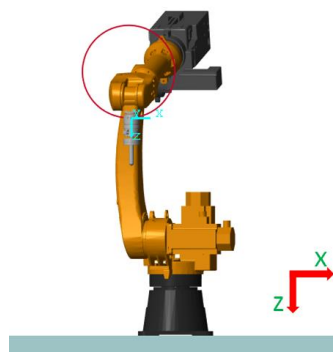
仿真系统设计

2. 仿真实验

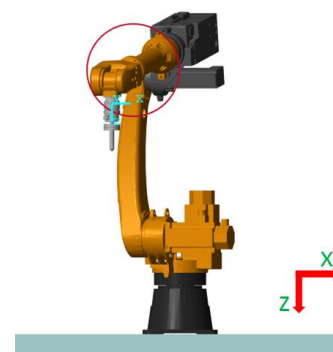
① 仿真过程



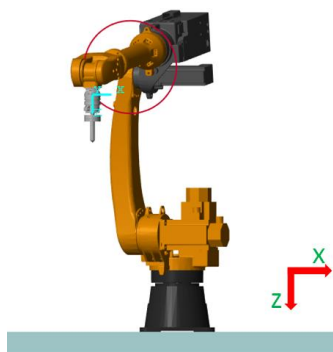
(a)



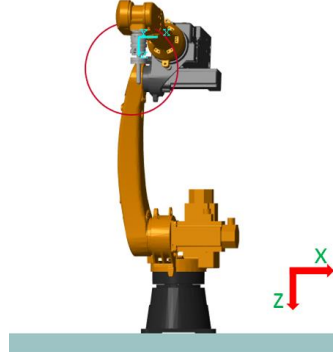
(b)



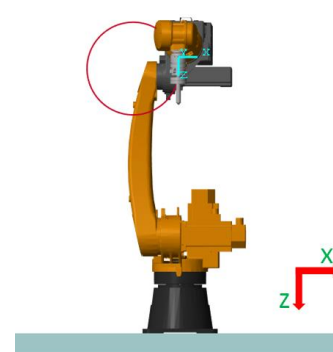
(c)



(d)



(e)



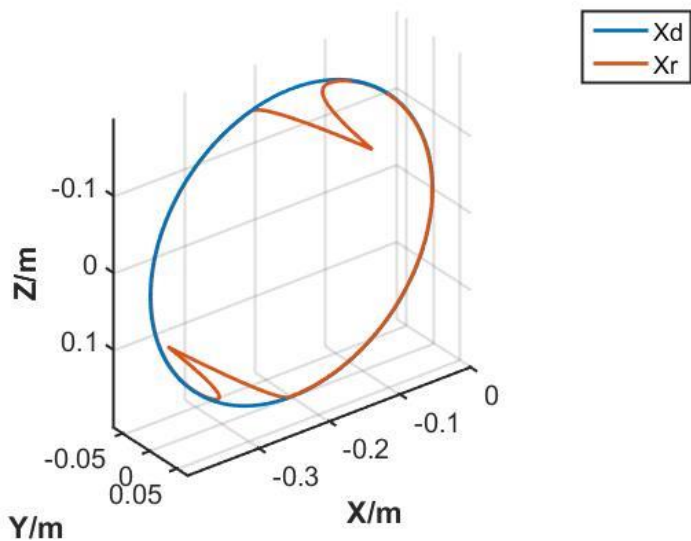
(f)

仿真过程

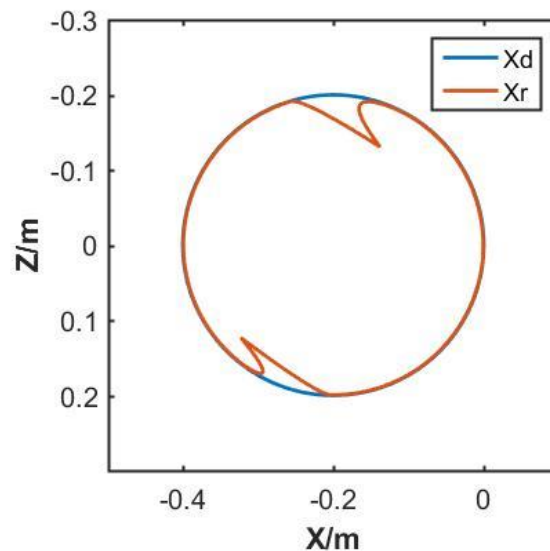
仿真系统设计

2. 仿真实验

② 仿真结果



XYZ空间轨迹对比结果

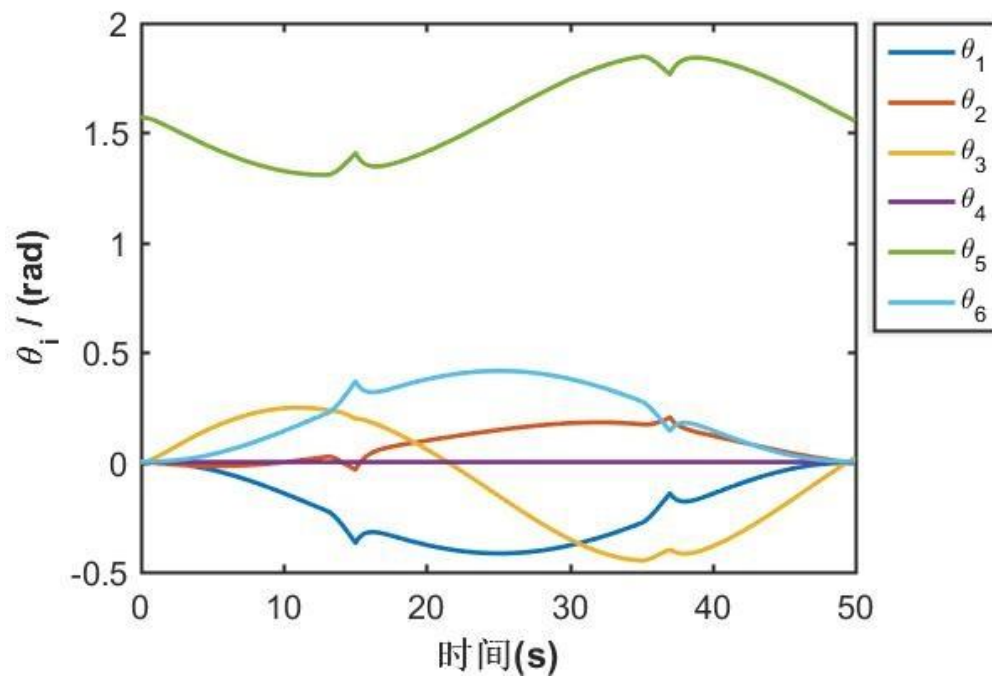


XZ平面轨迹对比结果

仿真系统设计

2. 仿真实验

② 仿真结果

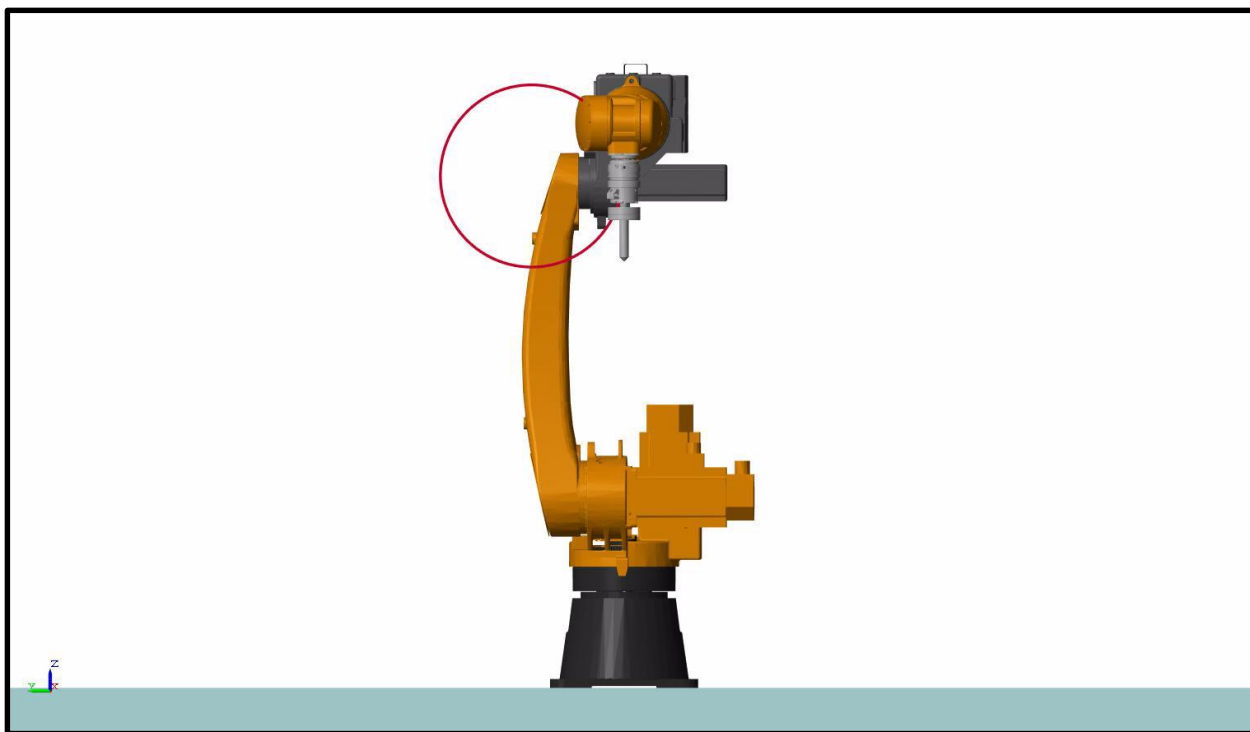


机器人各关节角度曲线

仿真系统设计

2. 仿真实验

③ 仿真视频



仿真视频

Part 1	研究背景	02~04
Part 2	阻抗控制	05~11
Part 3	仿真系统设计	12~21
Part 4	实验系统设计	22~34
Part 5	总结	35~36

目录

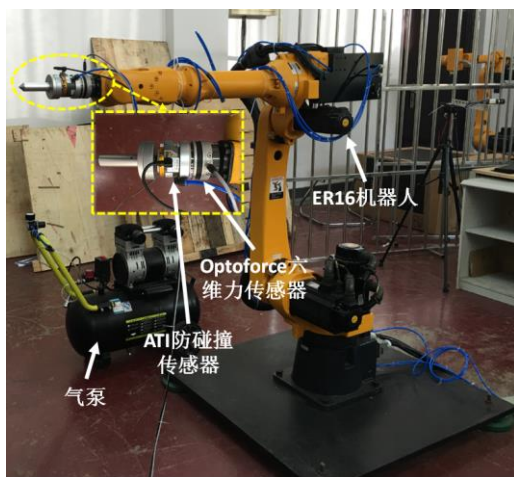
CONTENTS



实验系统设计

1. 硬件平台

- ① ER16机器人(最大负载16Kg)、基于EtherCAT的总线控制器(1-5ms)、optoforce 6维力/力矩传感器(采样频率最大为1000Hz)、ATI防碰撞传感器。



实验装置装配图

optoforce 6维力/力矩测量范围

力/力矩	测量范围	形变范围
F_{xy}	$\pm 200\text{ N}$	$\pm 1.7\text{ mm}$
$F_z(\text{压})$	1000 N	1 mm
$F_z(\text{拉})$	450 N	0.7 mm
T_{xy}	$\pm 10\text{ Nm}$	$(\pm 2^\circ)$
T_z	$\pm 6.5\text{ Nm}$	$(\pm 5^\circ)$

② 参数选型

基于EtherCAT的总线控制器，周期选为5ms。

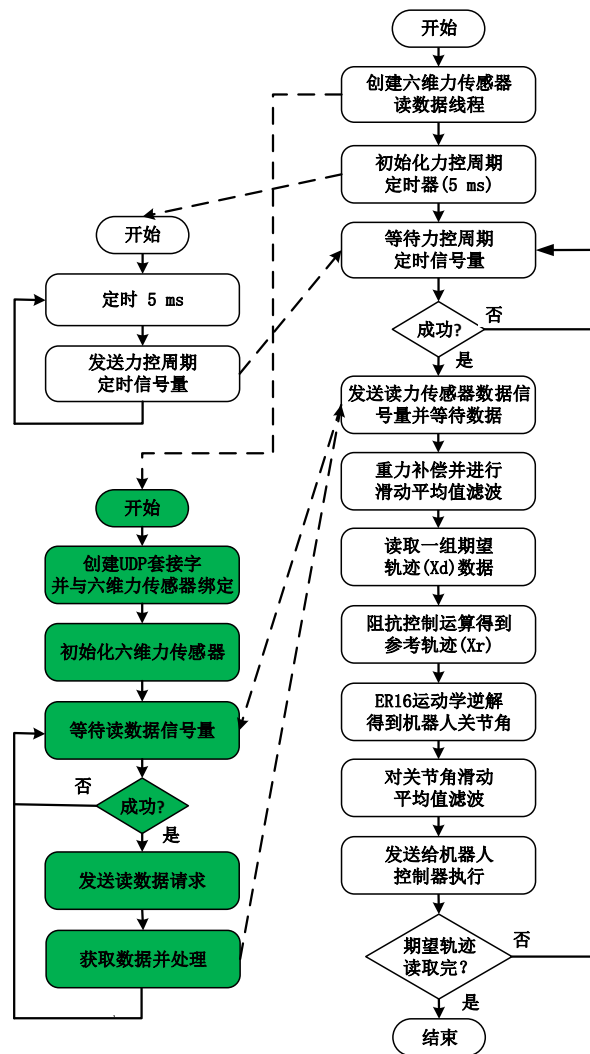
optoforce 6维力/力矩传感器采样频率设置为1000Hz。

实验系统设计

2. 控制程序流程

① 创建六维力/力矩传感器读线程

六维力/力矩传感器与控制器之间通过**UDP协议**通信。读数据线程的优先级高于计算线程，并会在等待读数据信号量时阻塞。



实验系统设计

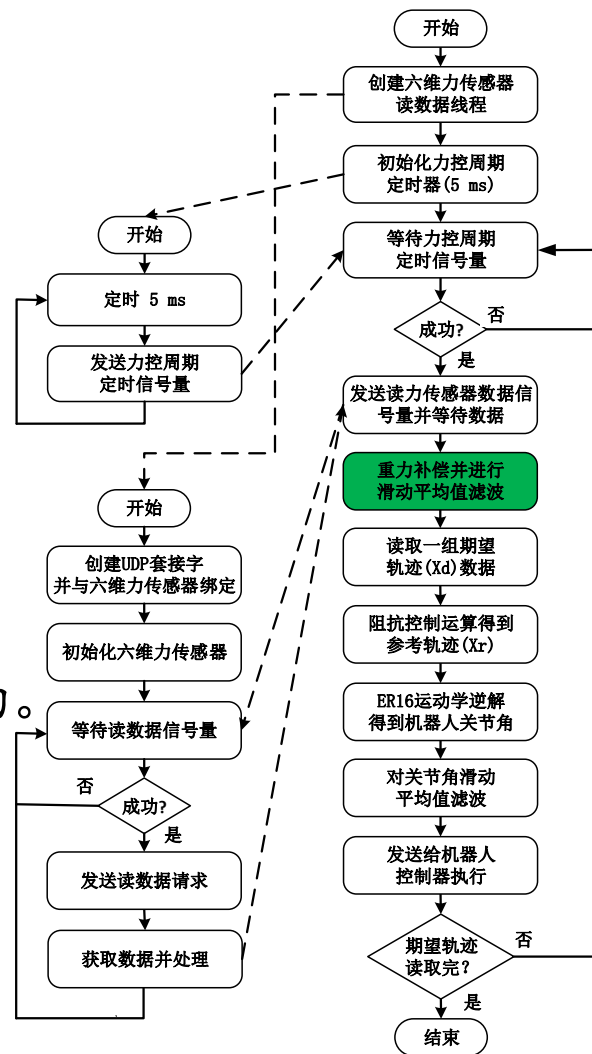
2. 控制程序流程

① 创建六维力/力矩传感器读线程

六维力/力矩传感器与控制器之间通过**UDP协议**通信。读数据线程的优先级高于计算线程，并会在等待读数据信号量时阻塞。

② 重力补偿

机器人末端的防碰撞传感器、抓手等会对测量力/力矩有影响。通过重力补偿尽量减小此影响。



实验系统设计

2. 控制程序流程

③ 滑动平均值滤波

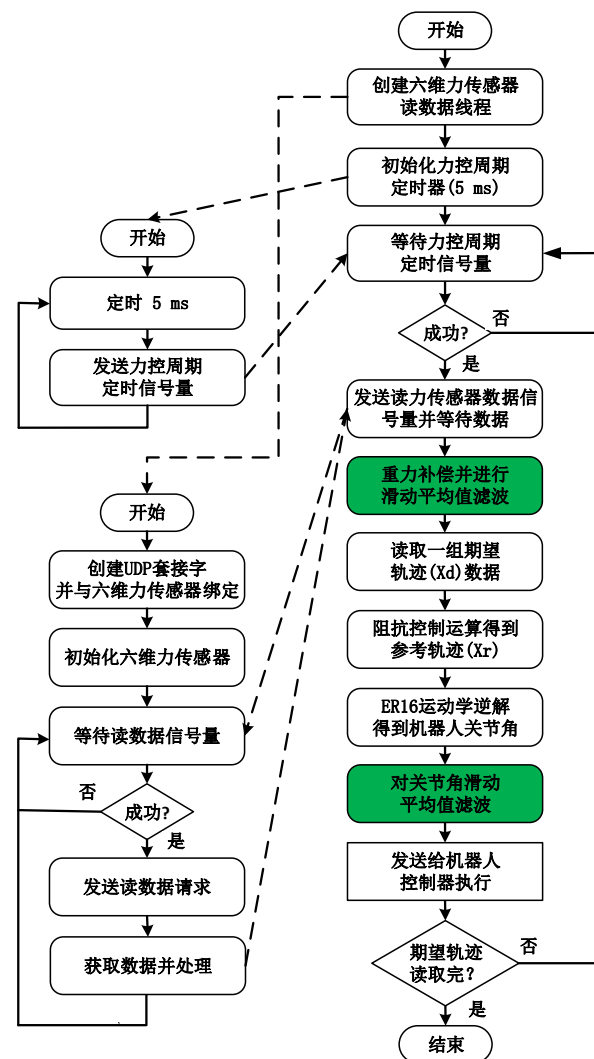
将连续的采样数据看成一个固定长度为 N 的队列，新测量的数据插入队列末尾，对头数据删除，设输入为 x ，输出为 y ，则：

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \cdots + x(n-N+1)}{N}$$

根据愈是近期数据对预测值影响愈大，可采用**加权滑动平均值滤波**：

$$y(n) = \frac{\lambda_0 x(n) + \lambda_1 x(n-1) + \lambda_2 x(n-2) + \cdots + \lambda_{N-1} x(n-N+1)}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_{N-1}}$$

其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2 \cdots > \lambda_{N-1}$

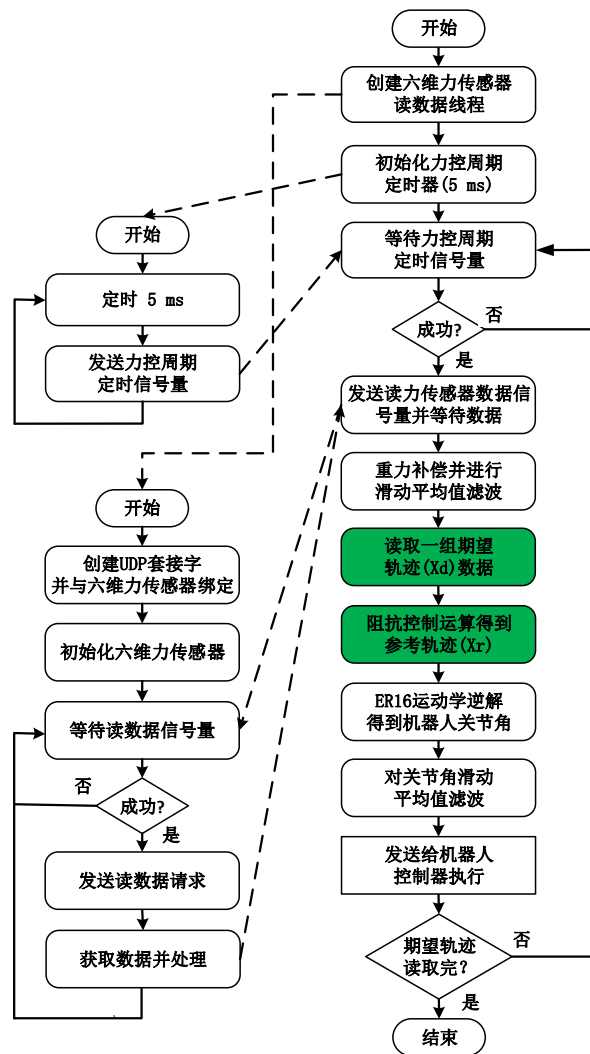


实验系统设计

2. 控制程序流程

④ 阻抗控制

根据六维力/力矩传感器数据以及期望的运动轨迹(X_d), 由阻抗控制算法计算得到机械臂末端在笛卡尔空间的参考轨迹(X_r).



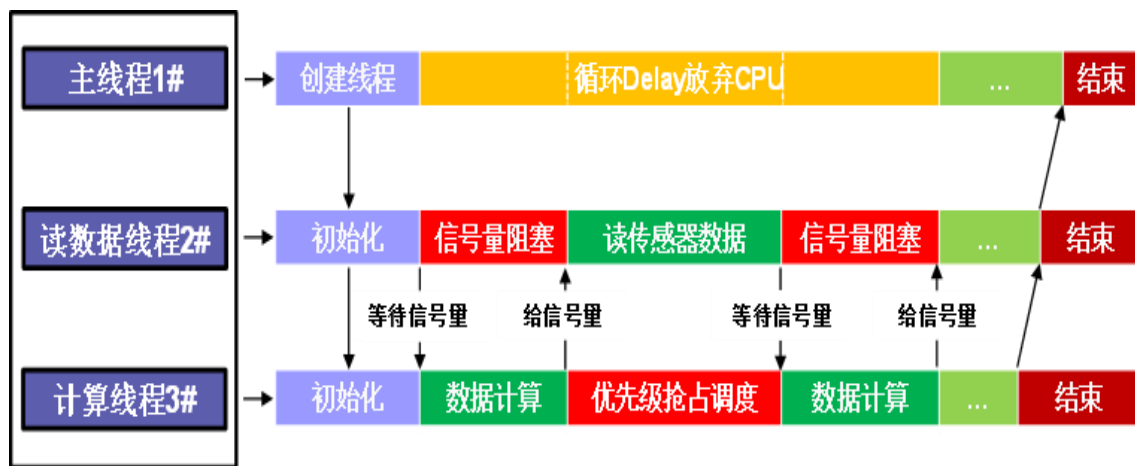
实验系统设计

2. 控制程序流程

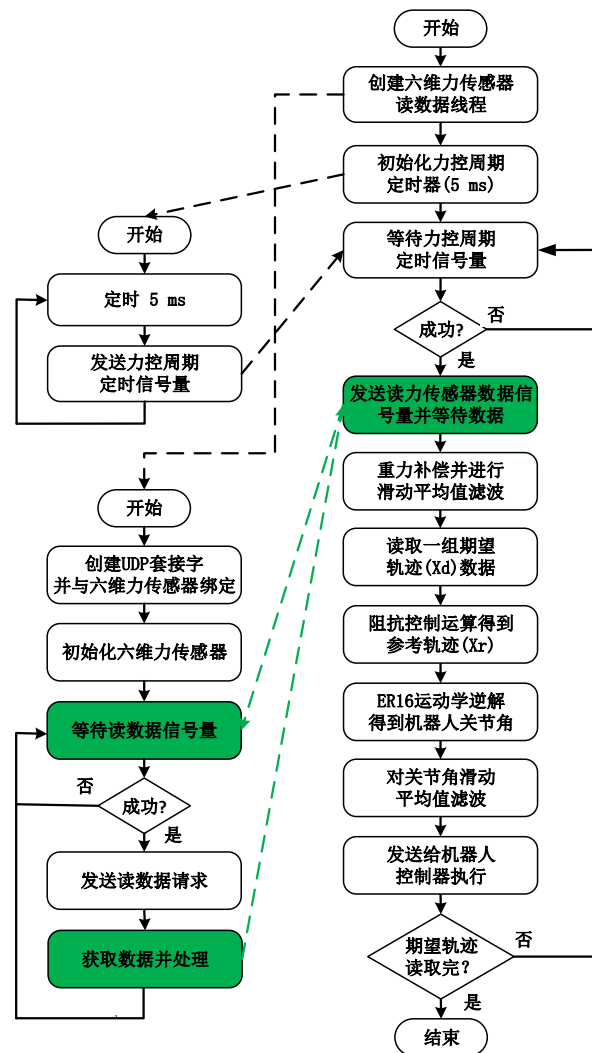
⑤ 线程调度

程序设置3个线程：主线程、读数据线程和计算线程。采用基于优先级的抢占式调度算法，三个线程的优先级为：

主线程 > 读数据线程 > 计算线程



线程调度流程



实验系统设计

3. 物理实验

① 控制算法参数

使用Matlab规划轨迹(同仿真实验, 10000组关节角度)

$$M = \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$$

$$B = \text{diag}\{200, 200, 200, 200, 200, 200\}$$

$$K = \text{diag}\{300, 300, 300, 300, 300, 300\}$$

$$T = 0.005 \text{ s}$$

力/力矩放大系数:

$$\begin{bmatrix} k_{F_x} & k_{F_y} & k_{F_z} & k_{T_x} & k_{T_y} & k_{T_z} \end{bmatrix}^T = [3000 \ 4000 \ 4000 \ 10000 \ 8000 \ 12000]^T$$

$$k_{F/T} f = m(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b(\dot{x}_d - \dot{x}) + k(x_d - x)$$

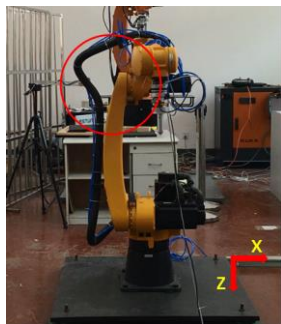


实验系统设计

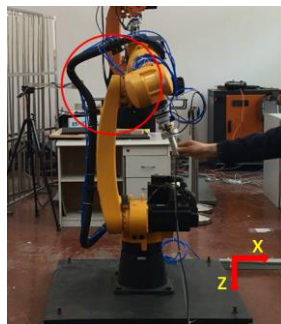
3. 物理实验

② 实验过程

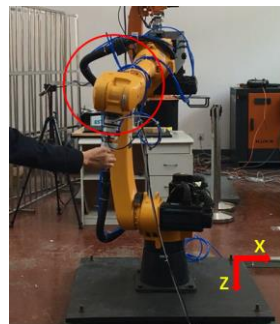
(b) (c) (d) (e) (f) (g) 分别为受到向右、上、左、前、后、下的外力



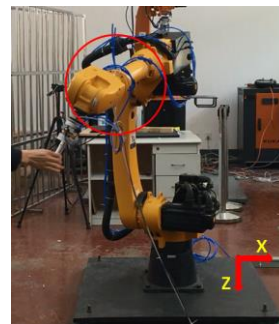
(a)



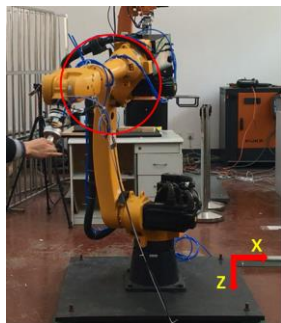
(b)



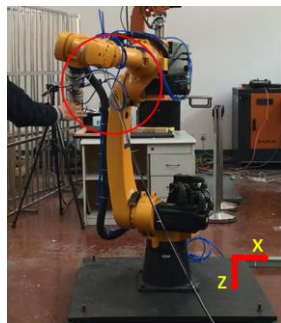
(c)



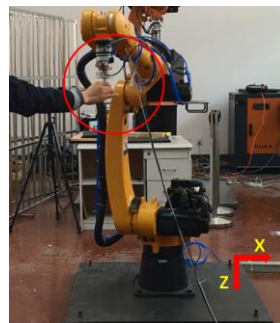
(d)



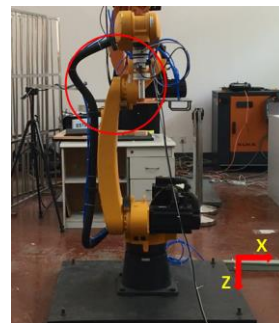
(e)



(f)



(g)

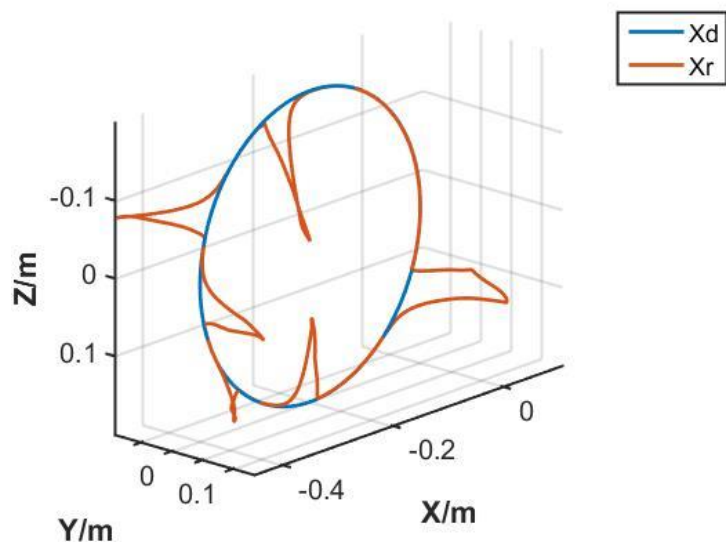


(h)

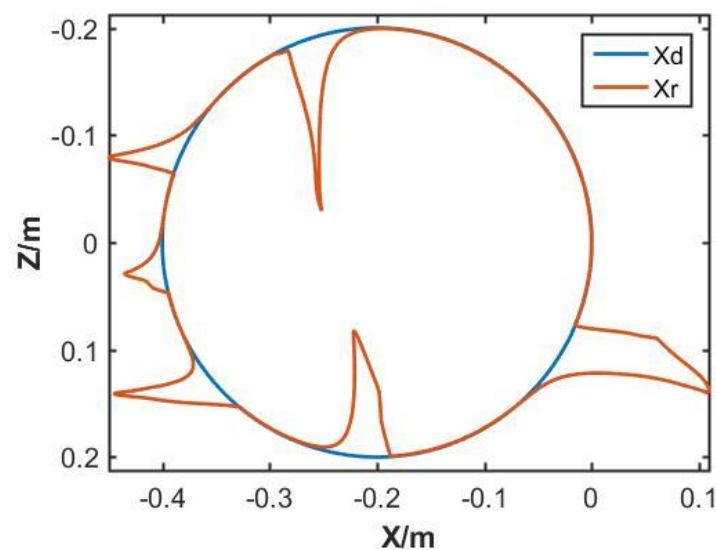
实验系统设计

3. 物理实验

③ 实验结果



XYZ空间轨迹对比结果

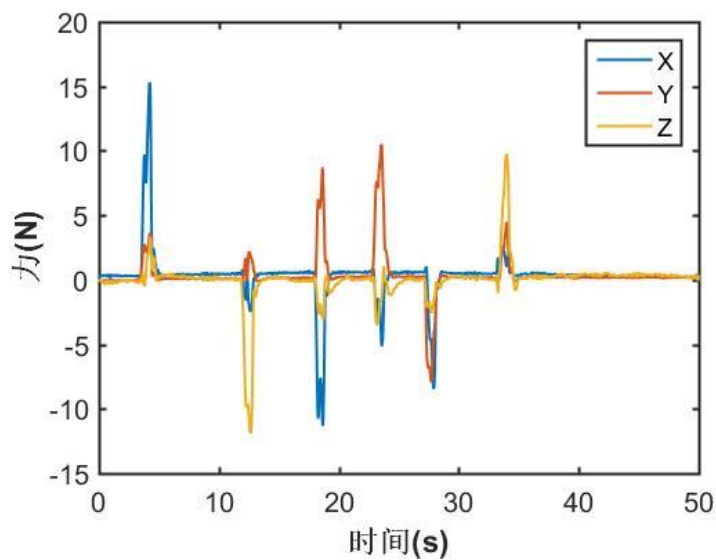


XZ平面轨迹对比结果

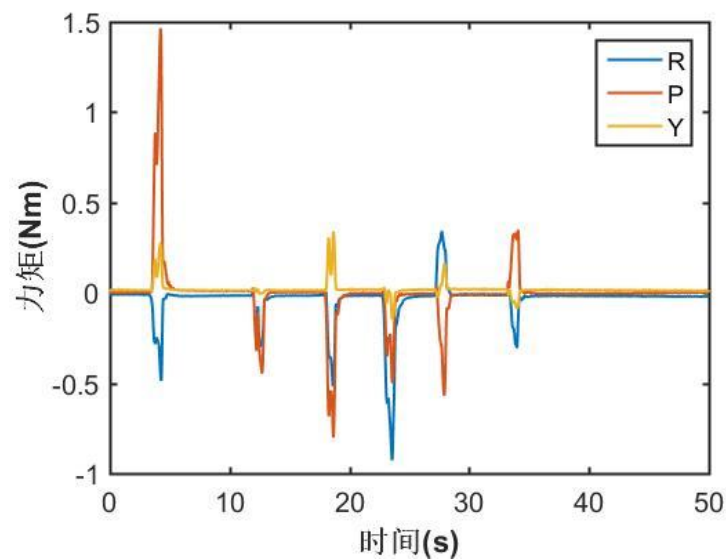
实验系统设计

3. 物理实验

③ 实验结果



XYZ方向作用力曲线

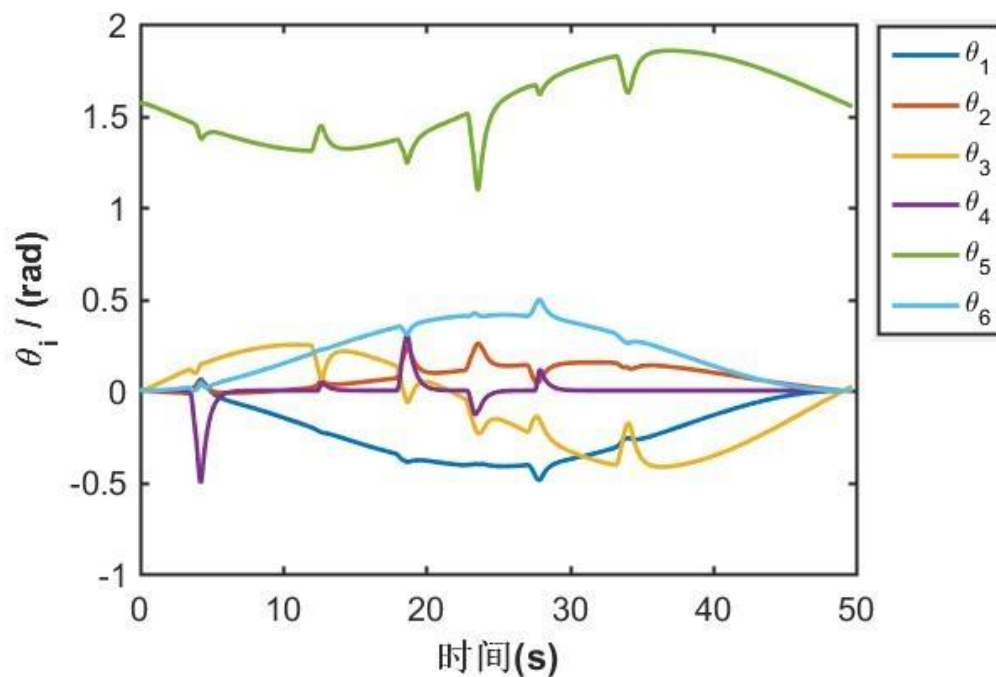


RPY方向力矩曲线

实验系统设计

3. 物理实验

③ 实验结果

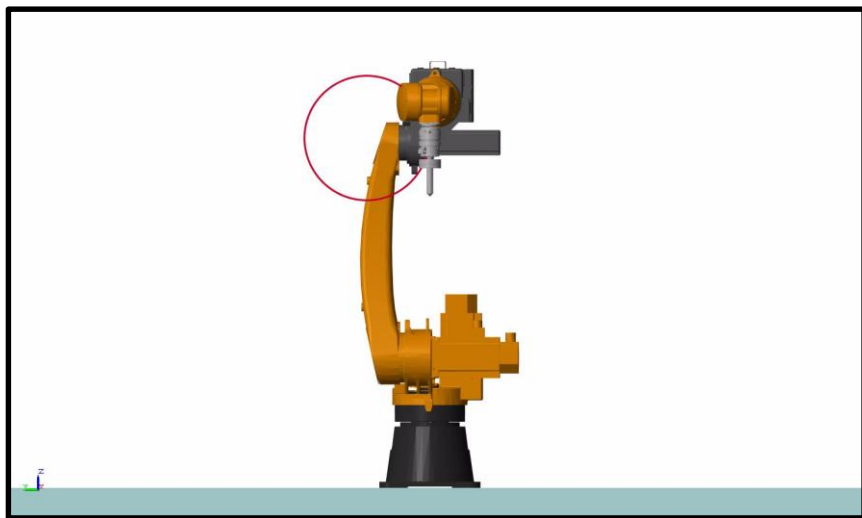


机器人各关节角度曲线

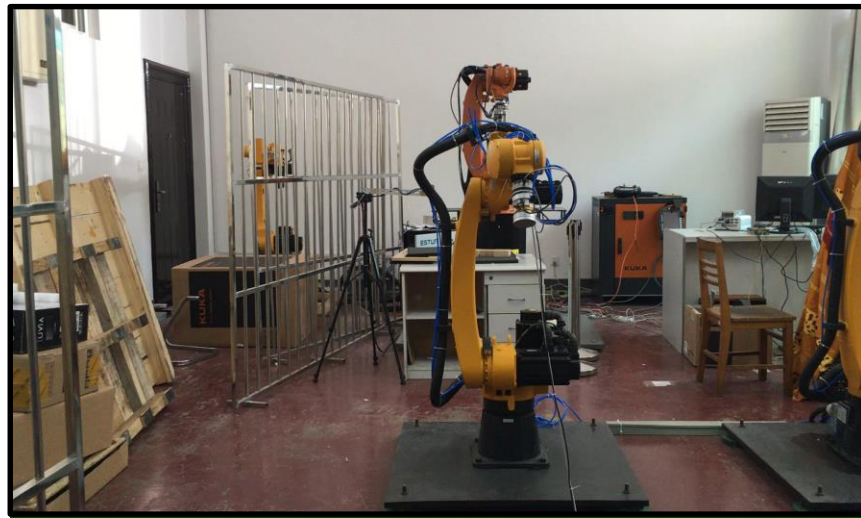
实验系统设计

3. 物理实验

④ 实验视频



仿真实验



物理实验

Part 1	研究背景	02~04
Part 2	阻抗控制	05~11
Part 3	仿真系统设计	12~21
Part 4	实验系统设计	22~34
Part 5	总结	35~36

目录

CONTENTS

总结

1. 基于位置的阻抗控制能较好的解决的机器人与环境之间的接触力问题。
2. 自由空间的力控可以使机器人根据所受外力自适应的调整轨迹。
3. 为课题组后续进行机器人的力控和多机器人间的协作控制夯实了基础。



谢谢大家！

陈明

chenming317@foxmail.com

