



北京科技大学

University of Science and Technology Beijing

机械工程学院

# 三自由度机械臂视觉控制及自主学习



指导教师：马祥华



答辩人：杜金磊

安川机器人公司能抓取乒乓球的机器人  
应用了经典的视觉伺服系统

首钢安川机器人公司 ▶



◀ 2015 世界机器人大会



机械臂占据了当今机器人领域的大半江山，各种应用  
研究都围绕机械臂展开

## ► 研究背景

研究思路的确定是一个逆向的过程

### 机器人视觉伺服

传统机器人视觉伺服系统：  
静态的look and move形式  
对机器人及相关设备要求高，  
且需要大量复杂的计算。

### 诱导控制的概念

借鉴早期学者的思想，采用动态的直接视觉伺服，效仿现在热门的端到端控制理念，自主设计了诱导控制模型。

### 研发机械臂实验平台

通过三自由度的机械臂进行可行性验证



# CONTENTS

## 核心内容

1

机械臂实验平台的研发

2

视觉驱动

3

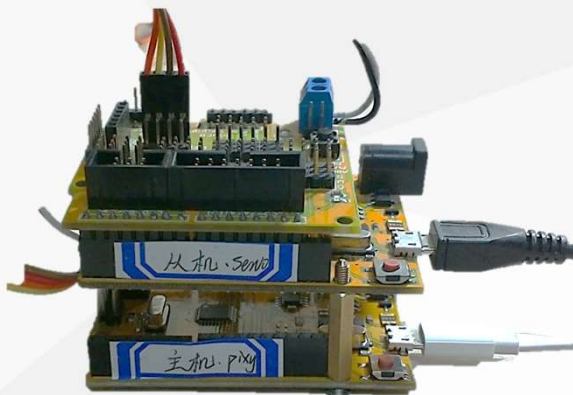
诱导控制

## ► 机械臂实验平台的研发



### 机械主体构架

机械臂三个关节及双臂  
弹簧平衡器的设计及校核



### 硬件模块

伺服电机的选择及负载匹配  
主从控制板  
电机驱动板  
视觉传感器

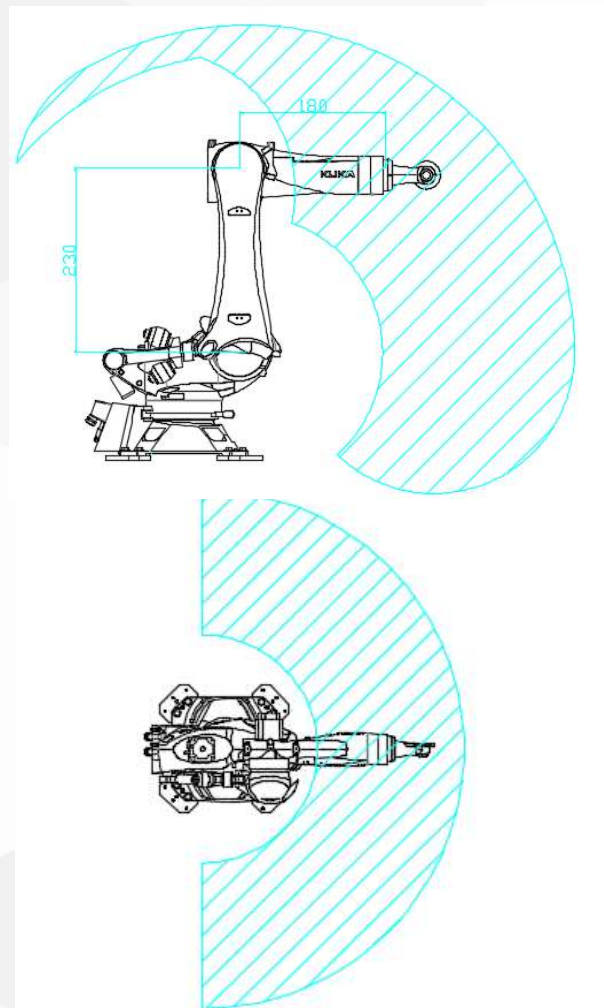
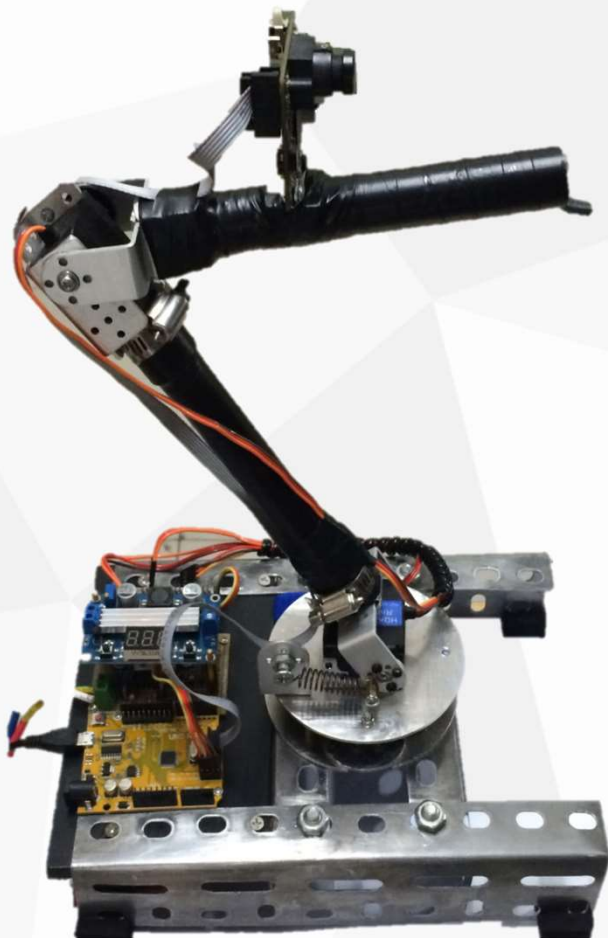


### 电源及电路

稳压电源供电电路  
电路连接及排线

## ► 机械主体构架

机械臂整体参照库卡KR90系列。保留了三个关节，拥有三个空间自由度，无末端执行器，可在一定的空间范围内到达任意位置，不具备姿态变化。双臂采用圆形碳管，最大程度减轻重量，保证强度，三个关节连接件使用铝合金。底部关节由平面滚子轴承支承



机械臂动作范围



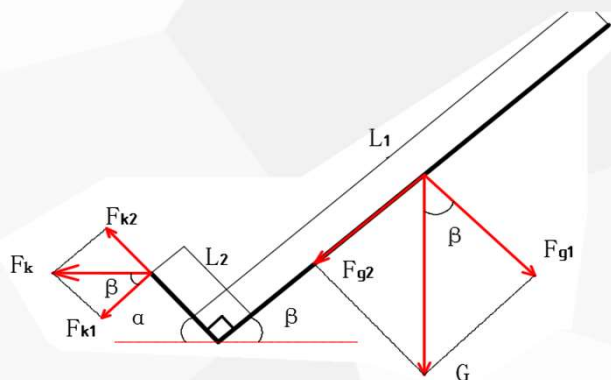
## ▶ 弹簧平衡器的设计及校核



弹簧平衡器

- ▶ 利用弹簧平衡器平衡掉机械臂自身的部分重量，减小对伺服电机输出扭矩的需求。

增加弹簧平衡器后，机械臂可以实现断电条件下任意角度悬停。



$$F_k \cos \beta \cdot L_2 + M_{\text{电机}} = G \cos \beta \cdot L_1$$

带入胡克公式，得

$$k \cdot x \cos \beta \cdot L_2 + M_{\text{电机}} = G \cos \beta \cdot L_1$$

又因为  $x = L_2(1 - \sin \beta)$ ，所以

$$k \cdot L_2(1 - \sin \beta) \cos \beta \cdot L_2 + M_{\text{电机}} = G \cos \beta \cdot L_1$$

$$M_{\text{电机}} = G \cos \beta \cdot L_1 - k \cdot L_2^2(1 - \sin \beta) \cos \beta$$

两边对  $\beta$  求导得

$$\frac{\partial M_{\text{电机}}}{\partial \beta} = -G \times L_1 \times \sin \beta - k \times L_2^2 [-(1 - \sin \beta) \times \sin \beta + \cos \beta \times \cos \beta]$$

$$\text{令 } \frac{\partial M_{\text{电机}}}{\partial \beta} = 0$$

$$\text{解得 } \sin \beta = \frac{kL_2^2}{GL_1 + kL_2^2}$$

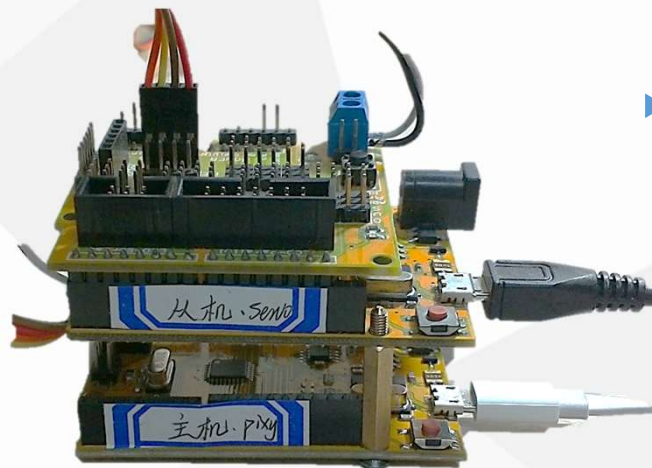
$$\text{当 } \sin \beta \leq \frac{kL_2^2}{GL_1 + kL_2^2} \text{ 时, } \frac{\partial M_{\text{电机}}}{\partial \beta} \geq 0$$

$M_{\text{电机}}$  随  $\beta$  角度在  $0 \sim 90^\circ$  内先增大后减小，在  $\sin \beta = \frac{kL_2^2}{GL_1 + kL_2^2}$  处有最大值，即对驱动电机输出扭矩要求最大，经验算满足要求。

## ► 硬件模块

- 采用两块Arduino UNO R3作为控制板，分为主从机，主机通过SPI与视觉传感器连接，负责视觉信号处理。从机通过IIC与电机控制板连接，负责运动控制。两板间通过SPI通信。
- PCA9685驱动板内置PWM驱动器和时钟。不需要占用控制板的资源。

### 伺服电机驱动板



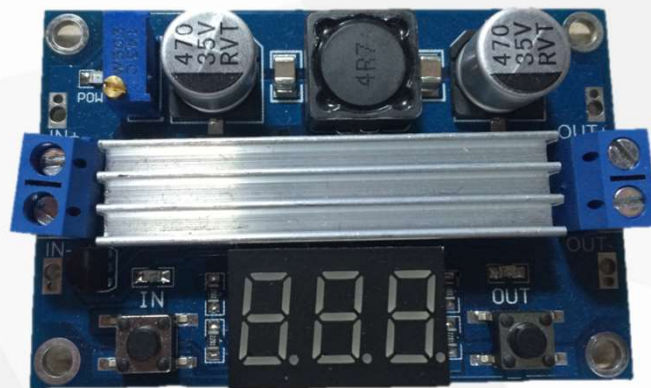
### 视觉传感器

- Pixy是由Charmed实验室联合卡内基梅隆大学共同推出的一款图像传感器  
图像传感器模块上自带处理器和视觉算法，可以通过颜色识别物体。



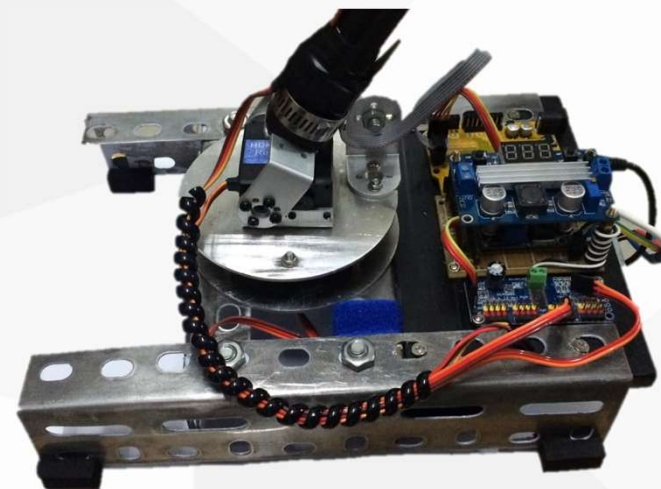
## ▶ 电源及电路

- ▶ 伺服电机的输出扭矩受输入电压影响，为保证机械臂工作稳定，需要稳定的电源电压。  
采用两种供电方式，日常实验使用变压器搭配DC-DC升压模块。同时保留了锂电池供电，以便外出使用。



DC-DC 升压模块

- ▶ 模块参数  
最大输出功率 75W  
转换效率 96.7%  
输出纹波 24mV



电路连接及排线

- ▶ 机械臂在运动过程中必需保证线路连接紧固，不会缠绕，阻碍机械臂运动

## ► 遇到的问题及解决方案

在试验中发现，机械臂在运动过程中抖动严重，在固定输入角度的状态下，也存在抖动问题。

### 硬件电路的原因

- 电源电压不稳，电机输出扭矩不稳定
- 采用DC-DC稳压电路供电

### 机械上的原因

底座不稳，机械臂运动过程中，基座晃动

- 拓宽底座，采用H型结构
- 添加橡胶脚垫，阻尼缓冲

机械臂太重，伺服电机输出扭矩不够

- 添加弹簧平衡器

伺服电机存在死区，小角度范围内不受控制

- 添加阻尼垫，[如图](#)

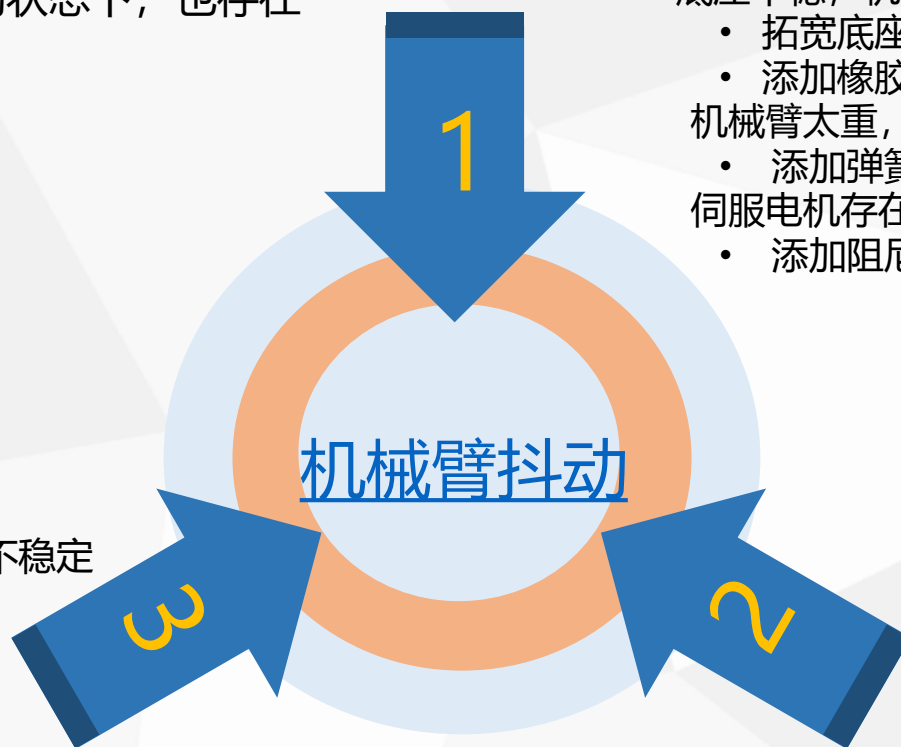
### 控制算法的原因

PD控制器参数不合理，产生超调

- 合理设定PD参数

视觉传感器受环境影响，存在干扰信号

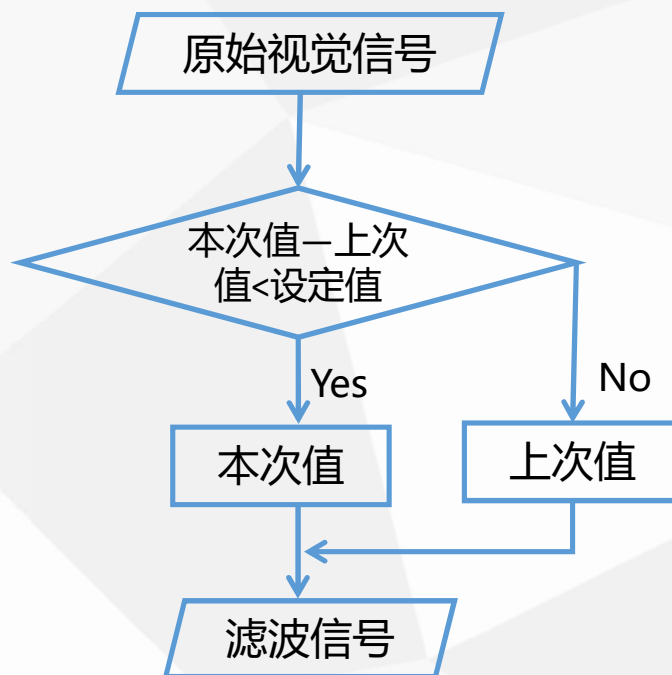
- 添加滤波程序：[限制滤波](#)  
[中位值平均](#) [滤波](#)





阻尼垫

## 限值滤波



## 原始视觉信号

取20个数据存入数组

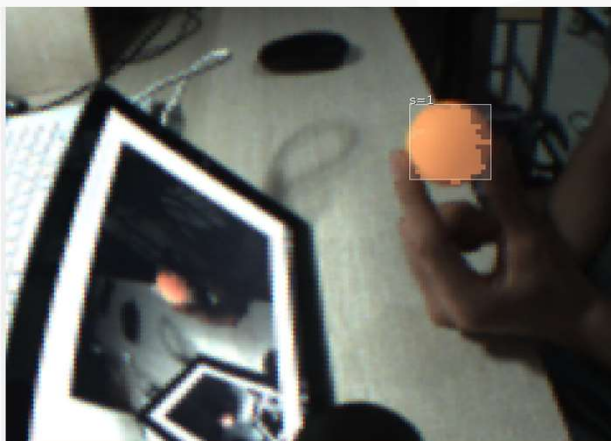
去除最大最小值

求平均值

滤波信号

## 中值平均滤波

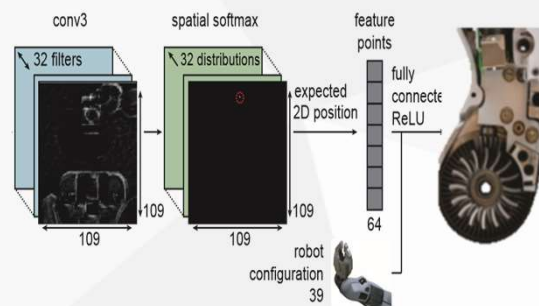
## ► 视觉驱动



### 视觉信号处理

信号的标定及坐标转化

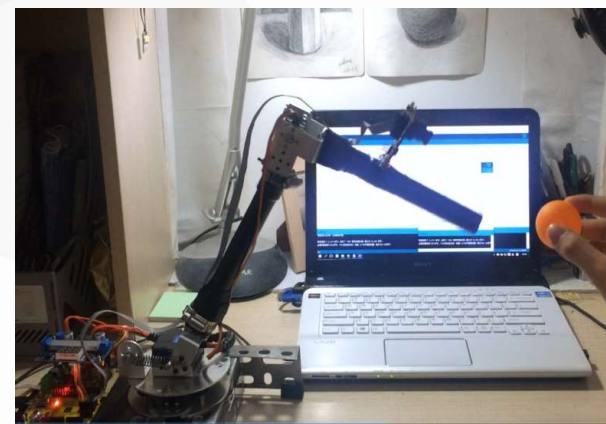
视觉信号的滤波



### 端到端直接驱动

端到端控制模型

控制器参数调节



### 验证实验

物体追踪跟随运动

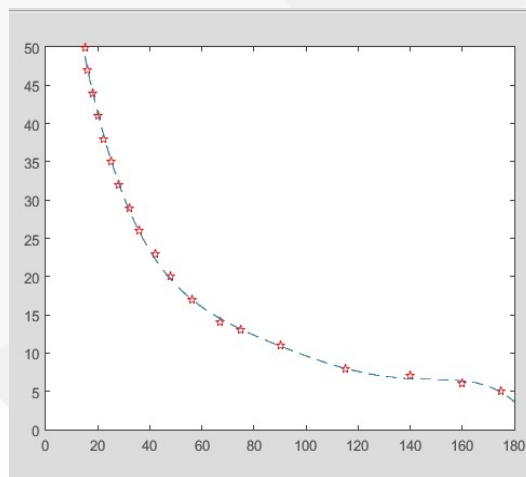
## ► 视觉信号处理 信号的标定及坐标转化

视觉传感器返回的位置信息是对应摄像头的相对位置，不是实际距离参数，所以需要转化。

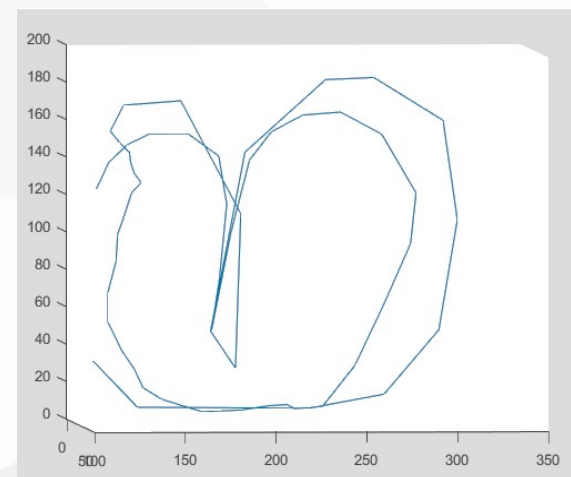
### 距离坐标Z坐标的转换

距离	长度	面积	面积开根
5	160	2350	159
10	89	7500	89
15	62	3500	64
20	48	2100	47
25	39	1300	38
30	29	950	30
35	27	650	25
40	20	450	20
45	17	320	17
50	15	200	15
55	12	150	12

曲线拟合



目标运动  
轨迹跟踪



面积开根最稳定，重复度好。作为变量，与实际距离进行拟合

拟合结果

$$f5 = -4.4072e-09 x1^5 + 2.4013e-06 x1^4 - 0.0005093 x1^3 + 0.053529 x1^2 - 2.9507 x1 + 82.6679$$

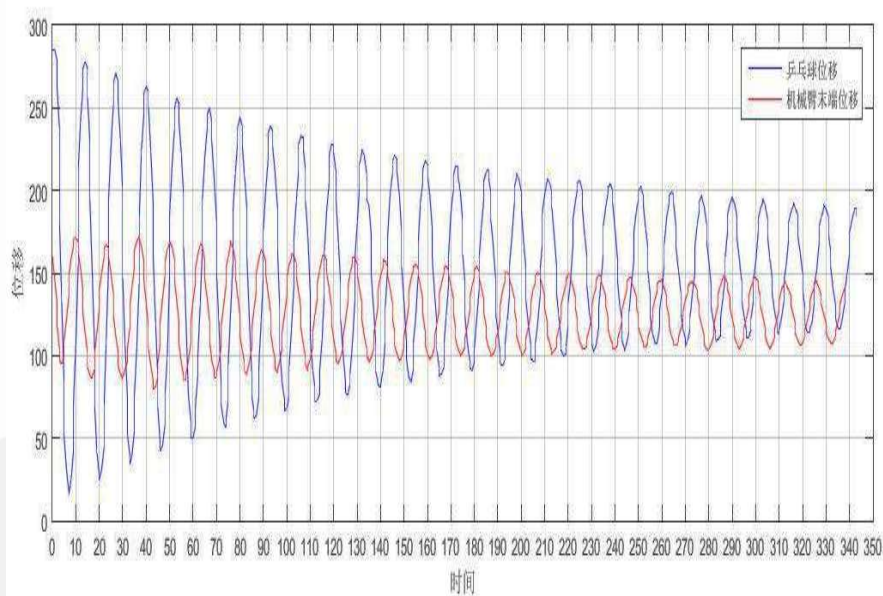


## ► 端到端直接视觉驱动模型

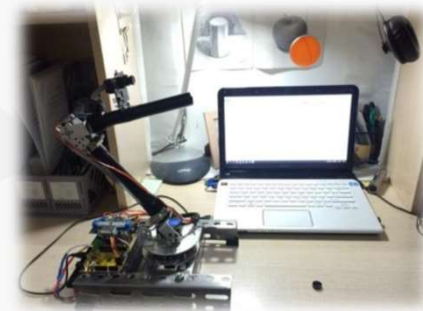
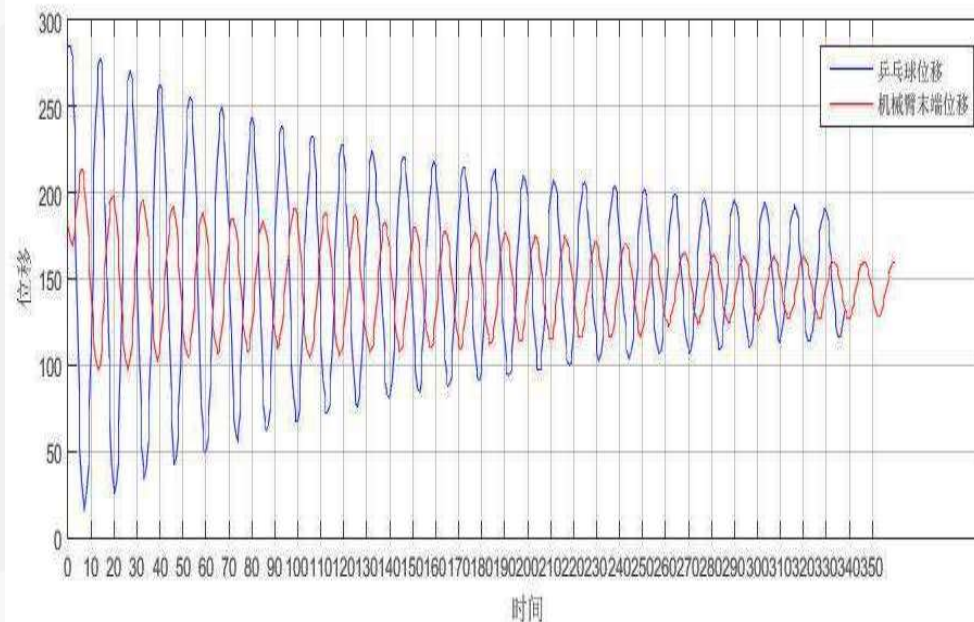
端到端直接驱动的核心是PD控制器：摄像头中值坐标设为预定量，视觉传感器所得目标当前位置信号为输入量。

### PD控制器参数调校

P300 D200



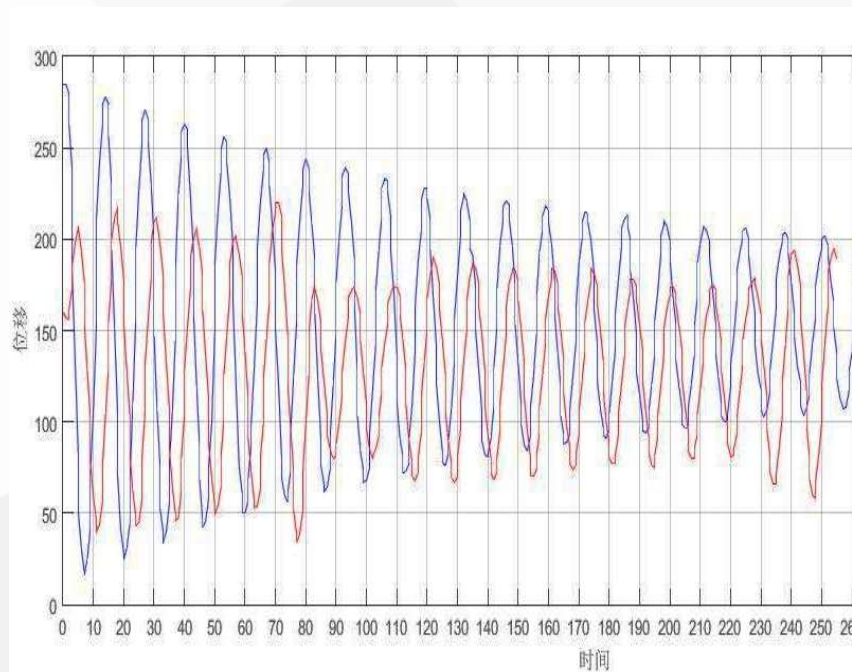
P300 D400



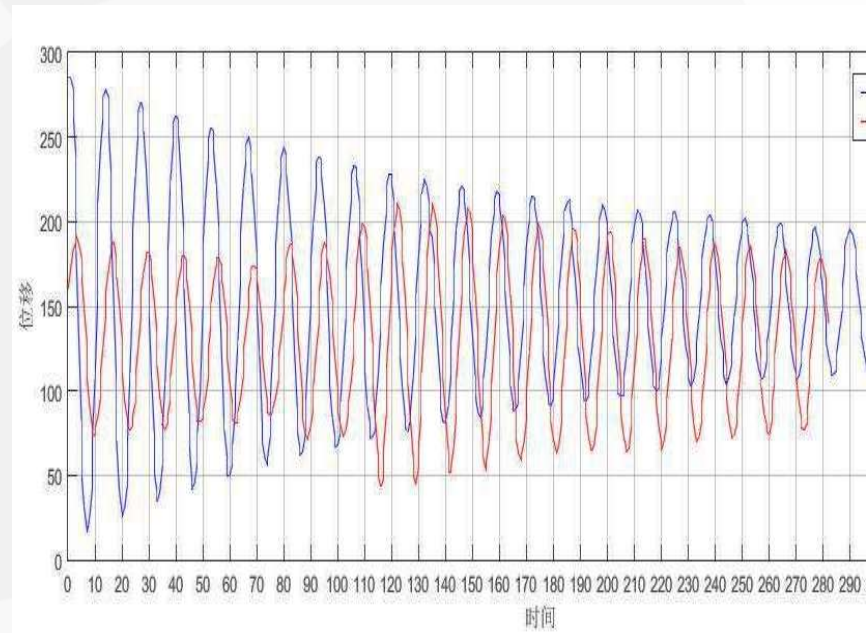
## ▶ 端到端直接视觉驱动模型

### PD控制器参数调校

P500 D400

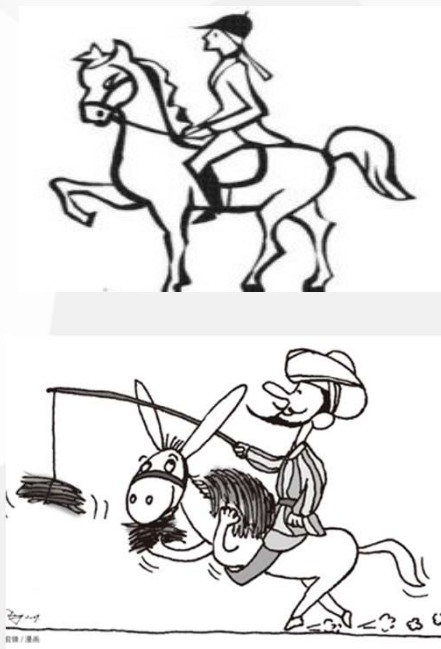


P500 D600



## ▶ 诱导控制

### 诱导控制的思想

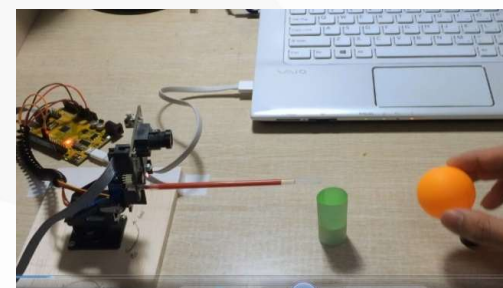


### 诱导控制方法

该控制算法分两层，底层是预先设定的控制指令，是基础指令，相当于生物的反射运动：移动机器人，以使摄像头中心以一定的距离正对目标。上层是诱导控制指令，视具体任务而修改添加，是人控制机器人的渠道：改变视觉传感器的返回值，使机器人所“看到”的不是真实看到的。

对比传统的直接控制机器人运动的方法，诱导控制通过控制机器人看到的目標来控制机器人，大大简化控制过程，从而避免大量的计算，具有更高的效率，且不受机器人的尺寸、位置等参数的限制，具有更好的移植性和灵活性。

### 验证实验



自主避障



捕捉运动中的物体



感谢聆听