

# 机器人原理与应用

Principles and Applications of Robotics

**Instructor:** Dr. 阎华松(Huasong Min). Professor

**Office Location:** 钢铁楼1110(Room No. 1110, GANGTIE Building)

**Class venue:** Room No. F4201

**Email:** [mhuasong@wust.edu.cn](mailto:mhuasong@wust.edu.cn)

**Website:** <https://github.com/mhuasong/Basics-of-Robotics-Theory-and-Technology>

**Mobile:**



# Textbooks

- Textbook:
  - **Robot Modeling and Control**, by M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar (2005) (required)  
机器人建模与控制 (中文译本)
  - **Springer handbook of robotics**. Siciliano, Bruno, and Oussama Khatib, eds. Springer, 2016.  
机器人手册 (中文译本)
  - **Modelling and Control of Robot Manipulators** (Second Edition), L. Sciavicco and B. Siciliano, Springer-Verlag, London, 2000.
  - **Robotics: Modelling Planning and Control**, B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Springer-Verlag, London, 2008.
  - **Modern Robotics. Mechanics, Planning and Control**(现代机器人生学)



# CONTENTS

The course is divided into eight modules covering the following areas:

-  **绪论**  
Introduction and Conceptual Problems
-  **机器人系统分析基础**  
System Model of Robot
-  **运动学**  
Robot Kinematics
-  **动力学**  
Robot Dynamics
-  **机器人运动规划**  
Robot Motion Planning
-  **机器人控制**  
Robot Control
-  **机器人编程语言**  
Programming Language of Robot
-  **典型机器人系统的设计与实现**  
Design and Implementation of Robot System

This is an introductory of robotics course, containing both fundamental as well as some more advanced concepts. It presents a broad overview of robotics with focus on manipulators and mobile robots, and includes robot kinematics, dynamics, planning and control, programming language.

The course is divided between the following areas:

- Robotics Introduction
- System Model of Robot
- Robot kinematics
- Robot dynamics
- Robot control
- Robot motion planning

...

# 回顾：什么是控制？

简单地说，**控制**就是为了达到一定目的而实行的适当操作



步骤：

- (1) 设定期望水位值；
- (2) 传感器监测水池实际水位；
- (3) 计算期望水位与实际水位的误差；
- (4) 根据误差，自动控制器正确地调节水泵电机。

## 自动控制系统的基本环节

**给定环节**: 用于产生给定量, 如给定水位、设定速度等;

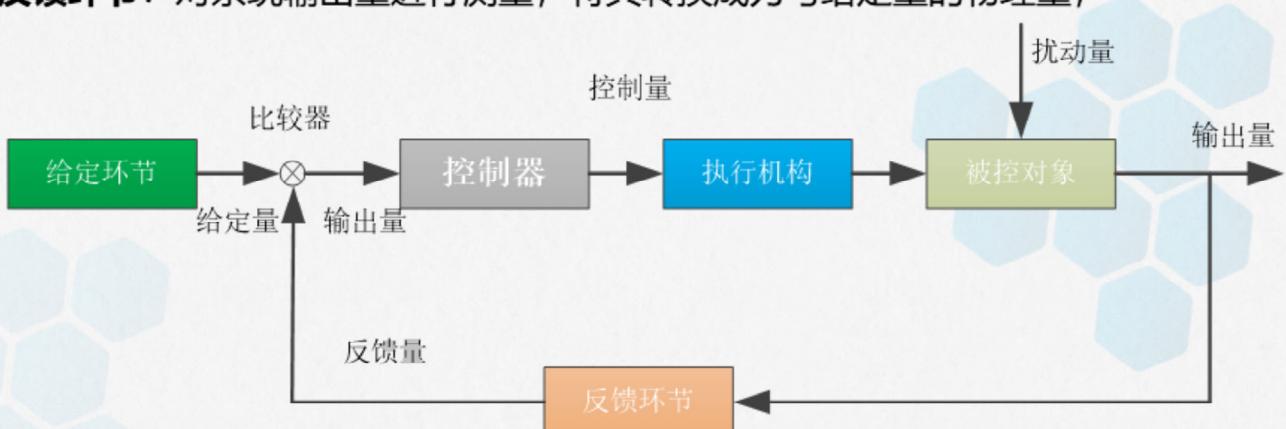
**比较器**: 用于比较给定量与反馈量之间的偏差;

**控制器**: 通常由放大环节和校正环节;

**执行机构**: 它接受控制发生的控制信号;

**被控对象**: 控制系统所要控制的设备或生产过程, 它的输出量就是控制量;

**反馈环节**: 对系统输出量进行测量, 将其转换成为与给定量的物理量;



## 机器人控制的特点

- 1 机器人控制与机构的运动学及动力学密切相关；
- 2 机器人的自由度为3~5个或更多；
- 3 从经典控制理论的角度来看，多数机器人控制系统中都包含有**非最小相位系统**；
- 4 机器人控制系统必然是一个计算机控制系统；
- 5 描述机器人状态和运动的数学模型是一个**非线性模型**，各变量之间还存在耦合；
- 6 机器人的动作往往可以通过不同的方式和路径来完成，因此存在一个“**最优化**”的问题。

### 关键词解释：

**最小相位系统**：对于闭环系统，如果它的开环传递函数极点和零点的实部都小于或等于零，则称它是最小相位系统，如果开环传递函数中有正实部的零点或极点，或有延迟环节，则称系统是**非最小相位系统**。

**非线性系统**：一个系统，如果其输出不与其输入成正比，则它是非线性的。（不满足叠加原理）

# 机器人控制

引言(位形控制、轨迹控制、力控制、力/位混合控制)

6.1 机器人控制系统

6.2 参数标定与辨识

6.3 工业机器人控制

    6.3.1 独立关节控制模型

    6.3.2 独立关节设定点跟踪控制

    6.3.3 独立关节力矩控制

    6.3.4 多关节机器人控制

    6.3.5 力控制

    6.3.6 约束坐标系

    6.3.7 力/位混合控制

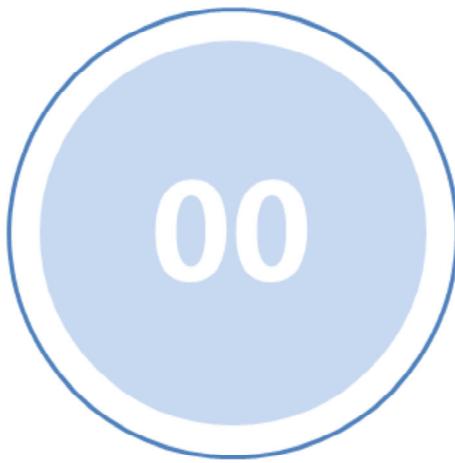
6.4 移动机器人控制

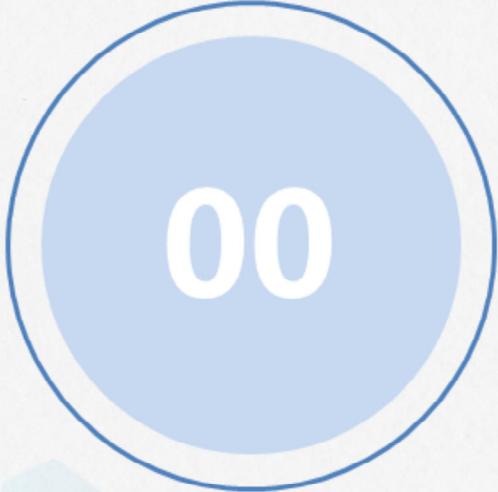
    6.5.1 移动机器人反馈控制原理

    6.5.2 全向移动机器人反馈控制

    6.5.3 移动机器人里程计

6.5 扩展讨论

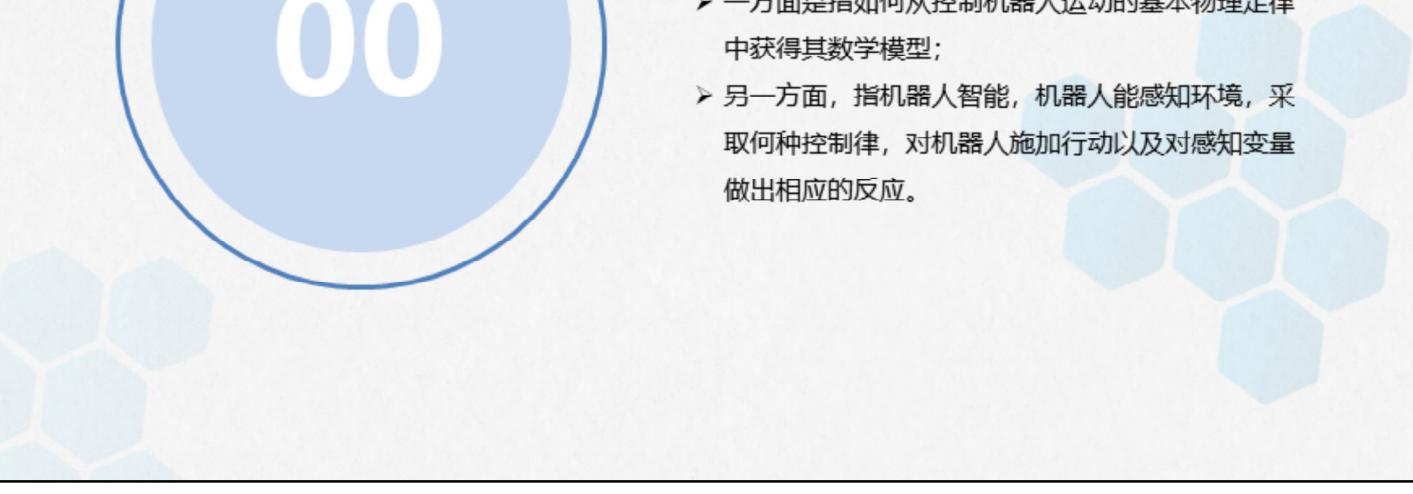




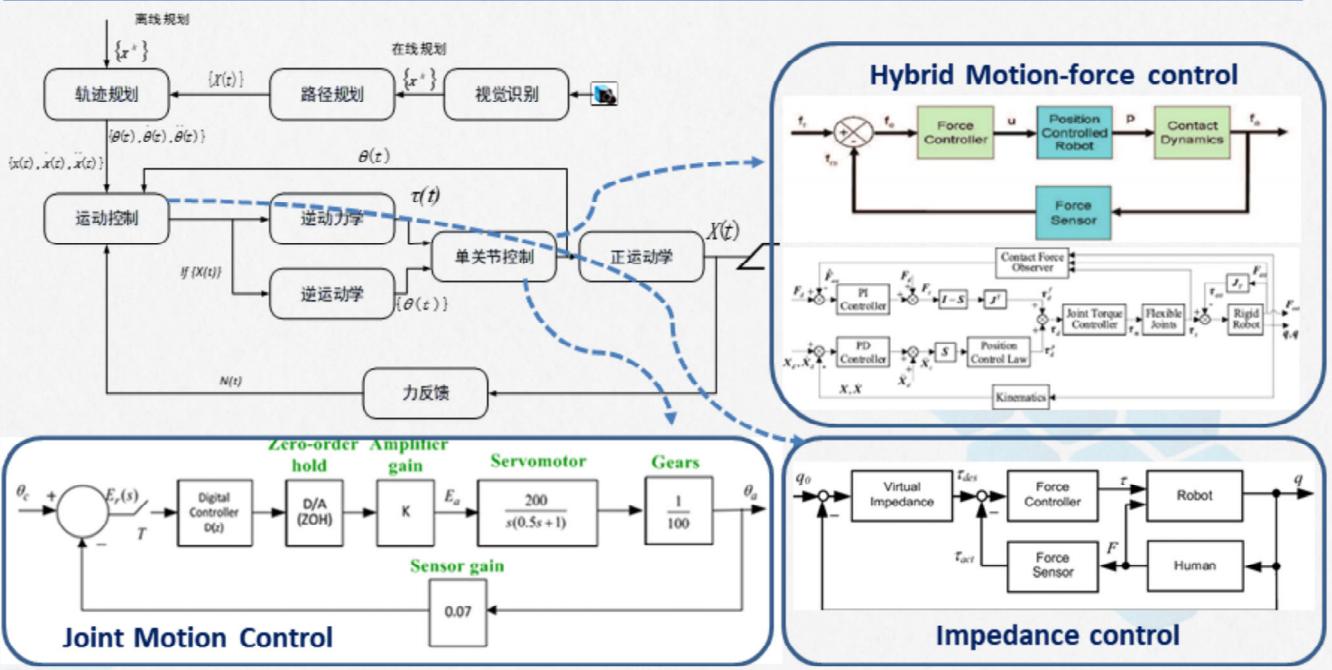
00

## 引言

机器人控制包含两方面的含义：

- 一方面是指如何从控制机器人运动的基本物理定律中获得其数学模型；
  - 另一方面，指机器人智能，机器人能感知环境，采取何种控制律，对机器人施加行动以及对感知变量做出相应的反应。
- 

# 机器人运动规划、动力学与控制之间的关系



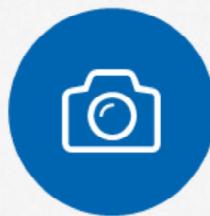
机器人控制系统和机构学、运动学、动力学原理密切相关，设计较为复杂，其输入输出的映射关系不是线性的，输入输出的变量较多，而且输入输出之间还存在交联，从本质上来说，它是一个非线性时变的多变量强耦合控制系统。

## 工业机器人一般有三种工作模式



示教模式

Teaching



再现模式

Playback



远程控制

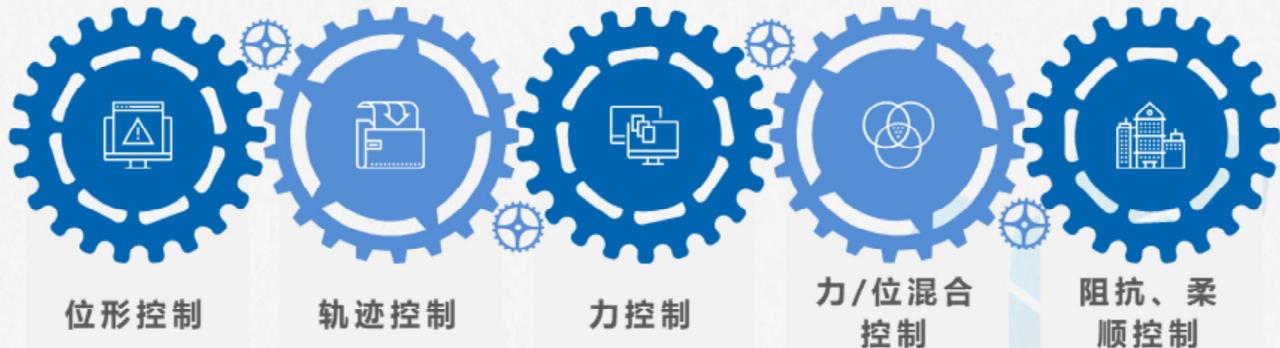
Remote Control



工业机器人一般有三种工作模式：示教(teaching)模式、再现(playback)模式、远程控制(remote control)模式。在示教模式下，操作人员根据厂家提供的示教方式，使用示教器进行轴或末端操作，编写、修改离线程序，以及各种特性文件和参数的设定。在示教模式下完成机器人离线程序编写与仿真校正后，可以进入再现模式，让机器人执行示教程序。而远程控制模式，则是指使用机器人厂家提供的远程连接接口(厂家有可能提供CAN或以太网等通信接口)，在单独的计算机上使用API（应用程序接口）编程来控制机器人完成作业。

工业机器人通常用来替代人工，完成固定的重复性作业，所以普遍采用示教/再现模式，而其他类型机器人，比如移动机器人，可能需要自动规划其运动轨迹，采用远程控制模式（有线或无线的控制接口）。随着嵌入式计算机的发展，机器人控制器的计算与控制能力越来越强大，有些智能机器人的控制器可以直接在上面编程完成复杂的本地在线自动控制。

## 机器人控制类型



无论是哪种工作模式，都需要根据机器人作业任务要求的控制目标，设计控制系统的输入，完成相应的控制。例如，轮式移动机器人的轨迹跟踪，需要控制机器人的每个轮子的转速，根据移动机器人的运动学（速度）模型，控制机器人完成沿规划轨迹的运动；工业机械臂的搬运、码垛作业，需要将机器人末端位形作为控制目标（控制输入一般为位形或速度），完成点到点的精确位形控制；连续的焊缝焊接作业需要将机器人的轨迹(位形、速度等)作为控制目标（控制输入一般为速度），完成焊缝轨迹的精确跟踪；而抛光打磨等和操作物体有接触性要求的作业，则需要将力或力矩作为输入，控制机器人和作业对象之间的相互作用力，实现力/位混合控制。由此，我们把机器人控制定义为，根据环境和任务要求，选择适当的输入，迫使机器人尽可能精确地执行任务或动作的过程。

根据控制目标的类型，可以将机器人控制分为位形控制、轨迹控制、力控制、力/位混合控制等类型。

**位形控制(set point regulation):** 点到点将机器人控制到所需位形(set point)，又称镇定(regulation)控制问题，无需严格控制运动速度以及点到点之间的几何路径。

**轨迹控制(tracking control):** 控制机器人遵循所需的几何路径或随时间变化的轨迹。

**力控制(force control):** 控制机器人向环境或其他物体施加所需的力量。

**力/位混合控制(hybrid force/motion control):** 控制机器人的位形和力。

**柔顺控制：**

指机器人与环境进行物理交互时，通过采取一些新的柔顺元件，或者设计新的控制策略使得机器人具有柔顺性，采用相关柔性辅助元件使机器人展现柔顺特性的方式通常被称为被动柔顺，而通过设计相关柔顺控制策略作用于机器人使机器人展现柔顺特性的方式通常被称为主动柔顺。

主动柔顺控制包含：

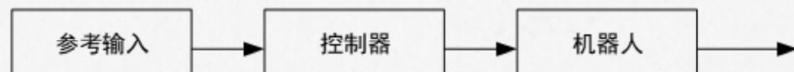
间接力控：间接力控不是单纯的控制力或者控制位置，而是控制力与位置的相对关系，使得与机械臂的末端弹性结构通过软件算法来实现力控。间接力控根据控制原理的不同又分为导纳控制和阻抗控制。

1) 阻抗 (**impedance controlled**)：机器人感知末端运动位置 $x(t)$ 并控制关节力矩和力来生成一个外部力-fext。阻抗控制是将控制器等效为阻抗系统，实现从运动到力的传递函数，Z(S)，输入位置输出力。是由 Hogan 于 1985 年提出的主动柔顺控制策略，是目前柔顺控制使用较多的方法之一。阻抗控制本质为建立机器人在与环境交互过程中所受外界环境交互力与机器人姿态之间的映射关系，从而实现根据外界交互力调节机器人姿态的功能，进而实现机器人的主动柔顺。

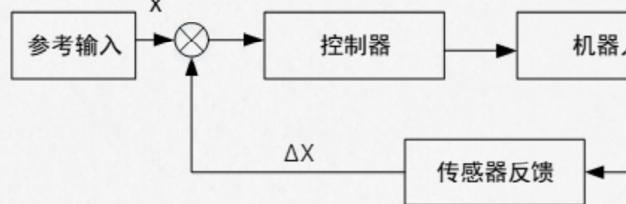
2) 导纳(**admittance controlled**)：机器人使用安装在腕部的力-力矩传感器感知fext，实现从力到运动的传递函数Y(S)，并控制其运动以做出响应。导纳控制广泛应用于实现机器人的主动柔顺从而完成拖动示教，其主要原因是导纳控制器能够建立环境与机器人之间的动态关系，利用虚拟刚度、阻尼、惯性参数创建从力到运动的映射。通过调节上述三种参数，改变机器人柔顺特性，使机器人服从人类施加的力并做出相应的运动。

直接力控：相比于间接力控，直接力控应用于不考虑人机交互安全性的场景，比如打磨场景，需要精确的力输出在某个表面。这种力控方式主要包括通过对电流环、力传感器、关节扭矩传感器等方式进行直接的控制。

## 控制模式



(a) 开环控制



(b) 闭环控制

这些控制类型根据系统的控制精度要求，可以分为开环控制和闭环控制两种模式，如图6.1所示。所谓开环控制，表示系统直接使用运动命令计算运动输入，而无需使用反馈信息。开环控制系统设计简单，但控制误差会较大，系统控制稳定性较差。而反馈控制使用位置、速度或力传感器等测量机器人的实际行为，将其与期望行为进行比较，并调制发送给执行器的控制信号。采用闭环控制模式，可以获得较高的控制精度与较好的系统控制稳定性。

无论是工业机械臂，还是移动机器人等其他类型机器人，我们都可将其抽象成连杆和关节进行建模。所以，机器人控制系统一般是以机器人的单关节或多关节协调运动为控制目的的系统。大多数机器人关节由驱动器驱动，要实现机器人的精确控制，需要计算机器人每个关节的力和力矩，也就是建立机器人完整精确的动力学模型。机器人的动力学模型我们在前面的章节中已进行了介绍，其动力学方程比较复杂，和机器人构件的质量以及转动惯量等参数密切相关，而且有关摩擦、弹性、传动间隙、迟滞等物理现象无法精确表述，所以几乎所有的机器人控制系统都会用到反馈控制来补偿这些不确定性因素。

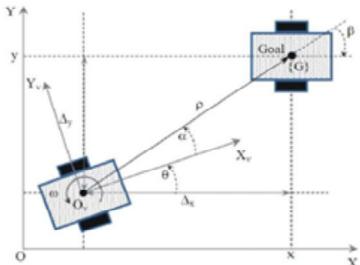
# 01

## 机器人控制系统

机器人控制可分为位形控制、轨迹控制、力控制、力/位混合控制等类型，无论哪种类型，我们都需要建立对应的数学模型，然后在此模型上施加一个合适的控制律。机器人的数学模型通常采用微分或差分方程来进行描述。对于一般刚性机器人系统，我们可以将其简化，用常微分方程进行描述，而对于柔性机械人，则可能需要偏微分方程。

所谓点镇定，也称为位姿镇定、姿态跟踪或设定点调节，简称镇定控制。也就是说我们需要为非完整移动机器人设计一个输入控制策略即控制律(control law)，使机器人能够到达任意给定的点，并在目标点保持稳定。

## 轮式移动机器人的运动学实例分析(仿真)



$$\rho = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta_x}{\Delta_y}\right) - \theta$$

$$\beta = -\theta - \alpha$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \rho \\ \frac{\rho}{\sin\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

为了达到点镇定，我们可以设计一个简单的线性控制律：

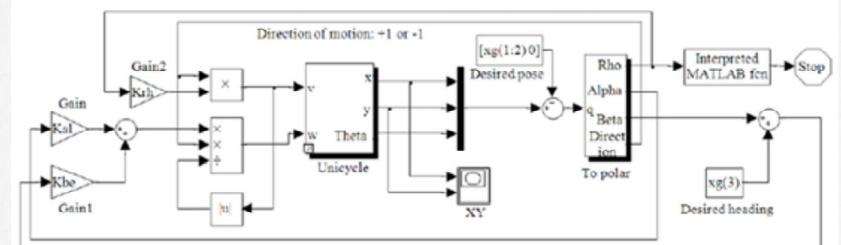
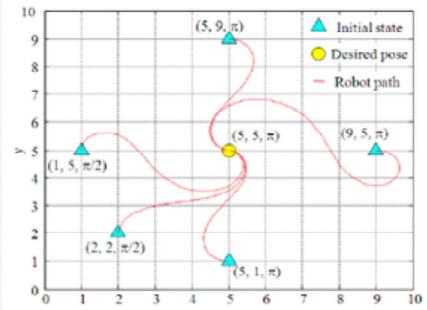
$$v = k_p \rho \quad \omega = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta$$

控制机器人在位姿  $(\rho, \alpha, \beta) = (0, 0, 0)$  时达到稳定

闭环控制方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_p \cos\alpha \\ K_p \sin\alpha - K_\alpha \alpha - K_\beta \beta \\ -K_p \sin\alpha \end{bmatrix}$$

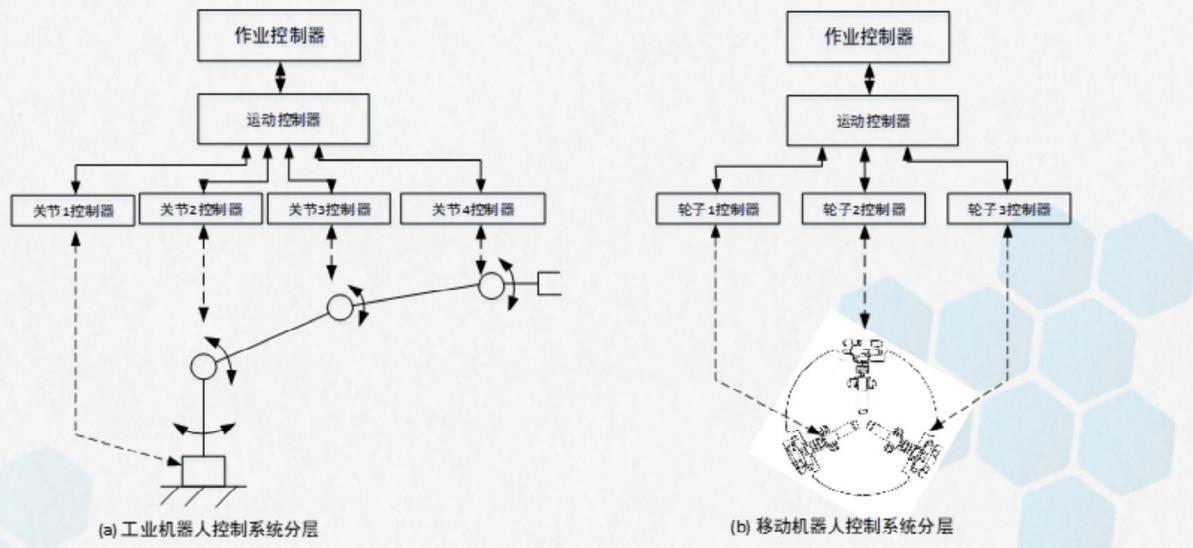
$$K_p > 0, K_\beta < 0, K_\alpha - K_p > 0$$



回顾一下，我们在3.12节中，简单介绍过用于独轮车(Unicycle)点镇定

(Steering to a point) 的线性控制律实例。其基本的原理就是采用一个反馈控制器，根据当前位形和期望位形之间的误差，在每个时间点计算一个控制律，不断调整机器人线速度和角速度，让机器人逼近期望位形。在该移动机器人的控制中，机器人的数学模型采用运动学（线速度、角速度）模型。而在机械臂的运动学章节，我们介绍了机械臂的正运动学、逆运动学以及基于雅可比矩阵的微分运动学模型，除此之外，在机器人动力学一章，还介绍了拉格朗日动力学、牛顿-欧拉动力学等模型。

# 机器人控制系统



机器人控制系统和机构学、运动学、动力学原理密切相关，设计较为复杂，其输入输出的映射关系不是线性的，输入输出的变量较多，而且输入输出之间还存在交联，从本质上来说，它是一个非线性时变的多变量强耦合控制系统。

如图6.2所示，机器人控制系统按照控制逻辑的层次，可划分为三层。最上层实现机器人智能，完成机器人在作业空间中的自主或预定的作业任务，被称为作业控制器。中间层完成多关节的运动控制，将机器人作业空间的任务解算为机器人关节空间控制量（位置、速度、加速度，甚至加加速），一般称为运动控制器。对于机械臂来说，机器人作业空间的任务描述一般侧重于末端工具的运动控制，而对于轮式移动机器人来说，机器人作业空间的任务描述一般侧重于底盘的运动控制。最底层为关节控制器，针对单个关节（工业机器人受控单元为关节，而对于移动机器人来说，则可能是单轮），实现单关节的位置、速度、力矩控制。

## 影响机器人控制系统精度的因素

- **系统因素：**包括运动学模型参数、动力学模型参数以及传感器精度等。机器人运动学模型参数包括杆件长度、轴线的倾斜、关节零位偏差、坐标系定位误差等因素。机器人动力学模型参数包括惯量矩阵、科氏力与向心力、重力、柔性与传动间隙、摩擦力等因素，传感器精度包括关节码盘、力矩传感器等传感器读数精度。
- **环境因素：**温度、湿度、电磁干扰以及随机误差等因素。

运动学参数标定

动力学参数标定

# 02

## 参数标定与辨识

机器人运动学和动力学模型中都包含机器人结构的常数参数，例如连杆长度、关节扭转角、关节偏移量、连杆质量和惯性等参数，因此，在控制之前，需要对运动学和动力学参数进行最佳估计的参数辨识。另外，在实际的应用中，还需对系统设置的参考坐标系进行标定。

## 参数标定与辨识

运动学参数标定

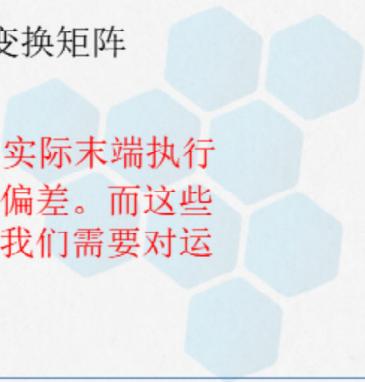
### 为什么需要对运动学参数进行标定？

根据运动学正解，末端执行器的位姿 $T(\theta)$ 可以根据基坐标系下初始位姿 $M$ 计算：

$$T(\theta) = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \cdots {}^{n-1}T_n M$$

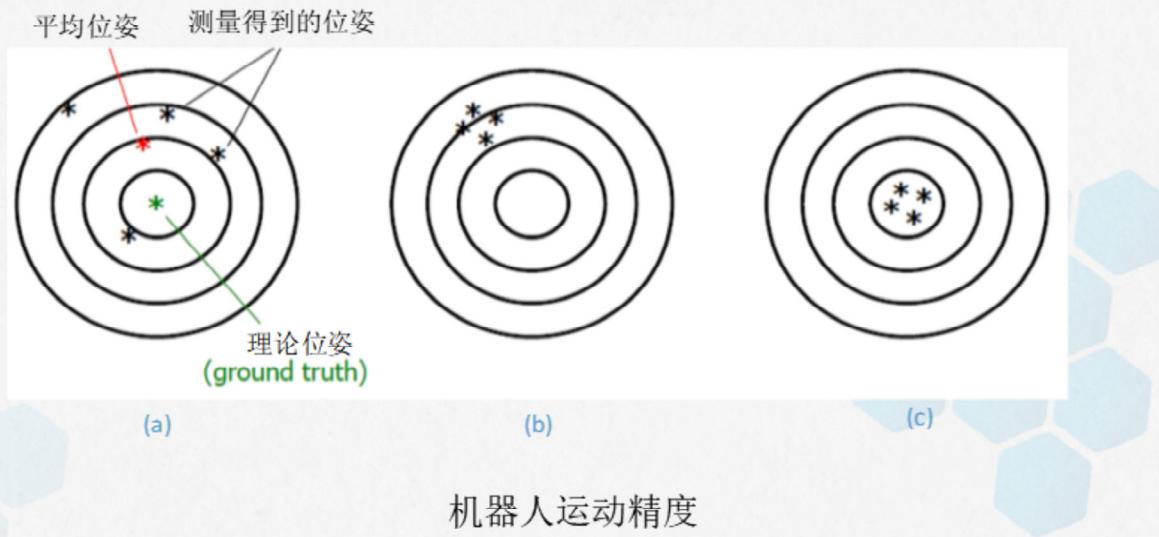
其中 ${}^{i-1}T_i$ 为连杆*i*坐标系相对连杆*i-1*坐标系的变换矩阵

如果定义变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 的运动学参数值不准确，则实际末端执行器位置与使用正运动学模型计算的位置之间将存在偏差。而这些参数可能是在机器人加工、装配的过程中带来的，我们需要对运动学参数进行标定。



## 参数标定与辨识

运动学参数标定



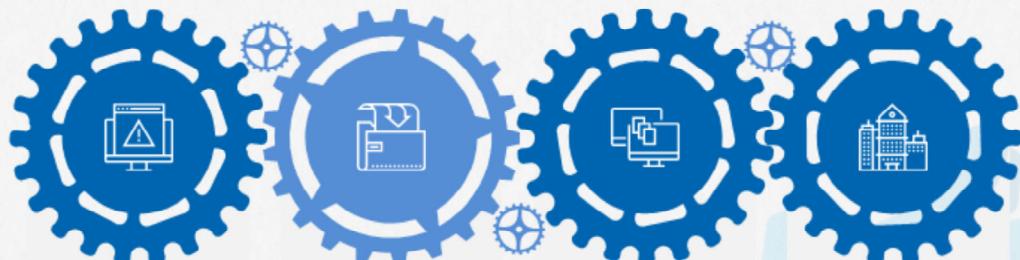
以机械臂为例，其末端定位不可避免会有误差。该误差一部分来源于机构，另一部分来源于运动控制本身。机构误差可能是由于关节摩擦、柔性、齿轮传动及间隙等产生。而运动控制误差可能不仅是由于连杆和关节的制造精度或者位置传感器偏差造成，还可能是由于机械臂的运动学参数估计误差以及扩展的末端工具尺寸估计误差造成。

如图6.3所示，机器人每次运动都为相同的位形控制。图(a)中，每次到达的位姿都不同，其重复定位精度相对较低，而且其运动后的位姿离理论位姿的误差也较大，绝对定位精度也较差。图(b)中，虽然其绝对定位精度也较差，但重复定位精度较高，说明机器人制造的构件及装配精度还是比较高的，其绝对定位精度误差较大的原因，绝大部分的可能是由于运动学参数的误差引起，可以通过运动学参数标定，校正之后达到图(c)的效果，绝对定位精度和相对定位精度都可以达到较高的水平。

## 参数标定与辨识

运动学参数标定

标定过程一般包含四个步骤



### 建立运动学模型

运动学参数标定的第一步骤是建立准确的运动学模型。运动学模型需要标定哪些几何参数，是由我们选择的运动学正逆解算法决定的。

### 末端TCP位姿获取

获取末端TCP位姿的目的，是为了后续的算法分析、验证运动学参数的误差。

### 参数辨识

可采用最小二乘法迭代求解，也可以采用神经网络、遗传算法和模拟退火等算法进行参数标定。

### 对运动学模型进行修正

提供标定程序，标定完成后，允许用户将标定后的参数存入一个标定更新文件，以便机器人能精确定位。

## 参数标定与辨识

运动学参数标定

### 第一步 运动学建模

$${}^i T_{i+1} = \text{Rot}(Z_i, \theta_{i+1}) \times \text{Trans}(0,0, d_{i+1}) \times \text{Trans}(a_{i+1}, 0, 0) \times \text{Rot}(X_i, \alpha_{i+1})$$

**SDH**

$${}^i T_{i+1} = \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -S\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & S\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}C\theta_{n+1} \\ S\theta_{n+1} & C\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & -C\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}S\theta_{n+1} \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1} T_i = \text{Rot}(X_{i-1}, \alpha_{i-1}) \cdot \text{Trans}(X_{i-1}, a_{i-1}) \cdot \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \cdot \text{Trans}(Z_i, d_i)$$

**MDH**

$${}^{i-1} T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

包括DH表示法（包含SDH以及MDH）、旋量法等方法，其建模方法不一致，所需测量和标定的几何参数也不一致，除此之外还有一些其他方法：比如S-Model、CPC等方法。

运动学参数标定的首要步骤是建立准确的运动学模型。运动学模型需要标定哪些几何参数，是由我们选择的运动学正逆解算法决定的。在本教材的第三章我们介绍过DH表示法（包含SDH以及MDH）、旋量法等方法，其建模方法不一致，所需测量和标定的几何参数也不一致。

除了本书介绍过的DH表示法、旋量法等用于标定运动学参数建模之外，还有一些其他的方法：比如S-Model、CPC等方法，有兴趣的读者可以查阅相关文献。本章仅介绍基本的DH参数标定方法。

SDH模型，前一个连杆坐标系{i}相对下一个连杆坐标系{i+1}的相对变换顺序为 $\theta_{i+1}$ 、 $d_{i+1}$ 、 $a_{i+1}$ 、 $\alpha_{i+1}$ ，根据齐次坐标变换原理，依次右乘四个转换矩阵

而如果采用MDH表示法建模，连杆坐标系建立在连杆的输入端，前一个连杆坐标系{i-1}相对下一个连杆坐标系{i}的相对变换顺序为 $\alpha_{i-1}$ 、 $a_{i-1}$ 、 $\theta_i$ 、 $d_i$ ，根据齐次坐标变换原理，依次右乘四个转换矩阵。

对于工业机器人来说，采用DH表示法建模最为简单方便。

## 参数标定与辨识

运动学参数标定

### 第二步 末端TCP位姿获取



获取末端TCP位姿的目的，是为了后续的算法分析、验证运动学参数的误差。获取末端TCP位姿基本的方法有两种：采用高精度的测量装置测量机器人末端TCP位姿（例如三角测量技术测量标记点在笛卡尔空间的位置与方向）或者制作具有限定空间位姿点的特定标定板。将机器人的末端标记点（比如TCP）精确运动到标定板限定位姿点或预计空间点，由限定的空间几何关系计算或由测量装置得到精确的位姿。常用的测量装置包括三坐标测量仪、球杆仪、经纬仪以及激光测量系统等。图6.4所示左边为使用徕卡AT930激光跟踪仪的机器人运动学参数标定，右图为UR机器人使用的一种运动学参数标定台。

## 参数标定与辨识

运动学参数标定

### 第三步 参数辨识

正运动学:  $r = f(\alpha, a, d, \theta)$

其中,  $\alpha = [\alpha_1 \cdots \alpha_n]^T$ ,  $a = [a_1 \cdots a_n]^T$ ,  $d = [d_1 \cdots d_n]^T$ ,  $\theta = [\theta_1 \cdots \theta_n]^T$

位姿偏差:  $\Delta r = r_m - r_n$

$$\Delta r = \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial f}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial f}{\partial \theta} \Delta \theta$$

$$\xi = [\alpha^T \ a^T \ d^T \ \theta^T]^T \quad \Delta \xi = \xi_m - \xi_n$$

计算标称DH参数  
数 $\xi_n$ 的 $(m \times 4n)$   
运动学标定矩阵

$$\Phi = \left[ \begin{array}{cccc} \frac{\partial f}{\partial \alpha} & \frac{\partial f}{\partial a} & \frac{\partial f}{\partial d} & \frac{\partial f}{\partial \theta} \end{array} \right]$$

$$\Delta r = \Phi(\xi_n) \Delta \xi \quad \downarrow$$

$$\Delta r = \begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \vdots \\ \Delta r_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_l \end{bmatrix} \Delta \xi = \bar{\Phi} \Delta \xi$$

$\bar{\Phi}$ 为 $6l \times 4n$ 的矩阵, 为了避免 $\Phi$ 出现病态, 建议 $l \gg 4n$

采用最小二乘法进行求解, 解的形式为:

$$\Delta \xi = \bar{\Phi}^\dagger \Delta r$$

广义伪逆矩阵的左逆矩阵  $\bar{\Phi}^\dagger = (\bar{\Phi}^T \bar{\Phi})^{-1} \bar{\Phi}^T$

## 参数标定与辨识

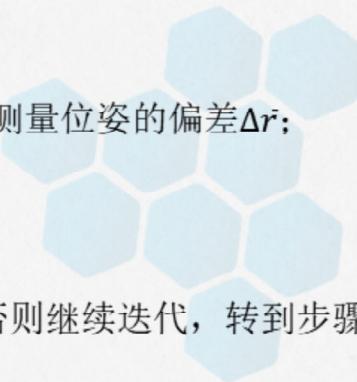
运动学参数标定

### 第三步 参数辨识

迭代求解算法步骤如下：

1. 采用标称DH参数，初始化 $\xi = \xi_n$ ；
2. 根据当前参数 $\xi$ ，计算标定矩阵 $\bar{\Phi}$ 的值；
3. 求伪逆矩阵 $\bar{\Phi}^\dagger$ ；
4. 根据当前参数 $\xi$ ，计算当前理论位姿，并求其与当前测量位姿的偏差 $\Delta\vec{r}$ ；
5. 根据公式(6-5)，求当前参数偏差 $\Delta\xi$ ；
6. 更新 $\xi = \xi + \Delta\xi$ ；
7. 如果 $\Delta\xi$ 收敛于一个给定的阈值范围，则停止迭代，否则继续迭代，转到步骤(2)。

除了采用最小二乘法迭代求解之外，也可以采用神经网络、遗传算法和模拟退火等算法进行参数标定。



## 参数标定与辨识

运动学参数标定

### 第四步 对运动学模型进行修正

一般来说，机器人制造商为了保证其出厂的机器人能达到所标明的精度，都会提供标定程序，标定完成后，允许用户将标定后的参数存入一个标定更新文件，以便机器人能精确定位。

注：在以上标定的过程中，对于关节变量，一般需要首先进行机器人零位校正。通常的做法是将机器人机构调整到给定的零位参考姿态上，然后初始化各关节位置传感器（一般采用增量式编码器）。

一般来说，机器人制造商为了保证其出厂的机器人能达到所标明的精度，都会提供标定程序，标定完成后，允许用户将标定后的参数存入一个标定更新文件，以便机器人能精确定位。

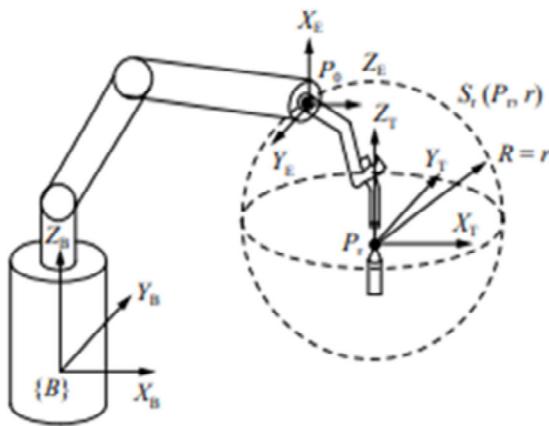


## 参数标定与辨识

坐标系标定



### 坐标系标定



基坐标系{B}、末端坐标系{E}、工具坐标系{T}之间的关系



工业机器人由于知识产权的原因，其标定方法都不太相同，分别都有不同的工具坐标系标定工具以及方法，通常有**3点法、6点法以及n点法**等方法

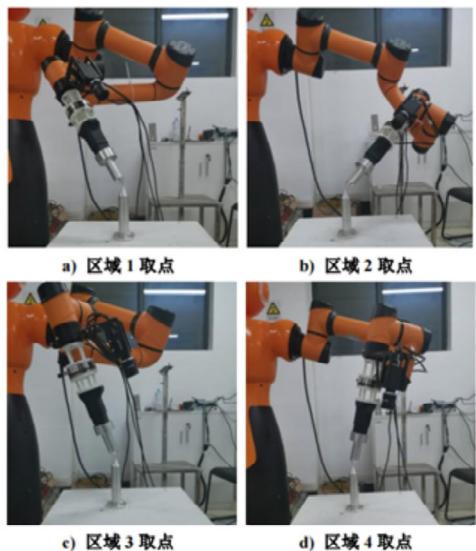
$${}^B T = {}^B E \cdot {}^E T$$

$$\begin{bmatrix} {}^B R & {}^B P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B R & {}^B P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^E R & {}^E P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 参数标定与辨识

坐标系标定

### 坐标系标定



工业机器人由于知识产权的原因，其标定方法都不太相同，分别都有不同的工具坐标系标定工具以及方法，通常有3点法、6点法以及n点法等方法

已知通过机械臂正运动学得到球面上的四点坐标（对应机械臂末端坐标值）为 $\{\overset{B}{E}P_{xi} \overset{B}{E}P_{yi} \overset{B}{E}P_{zi}\} = \{x_i \ y_i \ z_i\}$  ( $i=1,2,3,4$ )，球心固定不动， $\overset{B}{T}P$ 坐标值为固定值 $\{\overset{B}{T}P_x \overset{B}{T}P_y \overset{B}{T}P_z\} = \{h \ k \ l\}$ ， $R$ 为球的半径，也就是从法兰中心点到工具中心点的长度，得到四个球坐标方程：

$$(\overset{B}{E}P_{xi} - \overset{B}{T}P_x)^2 + (\overset{B}{E}P_{yi} - \overset{B}{T}P_y)^2 + (\overset{B}{E}P_{zi} - \overset{B}{T}P_z)^2 = R^2 \quad (i=1,2,3,4)$$

如何求解？

Mooring B W, Roth Z S, Driels M R. Fundamentals of manipulator calibration[M]. Wiley-interscience, 1991.

康存锋, 王红伟, 张鹏飞等. 焊接机器人工具坐标系标定的研究与实现[j]. 北京工业大学学报 2016, 42(1).

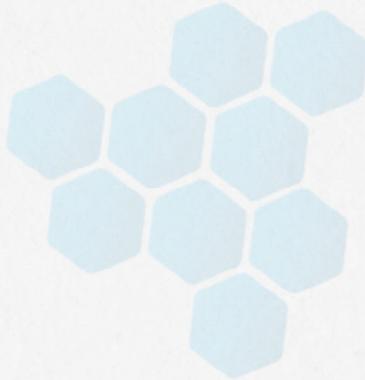
## 参数标定与辨识

动力学参数标定

### 动力学参数标定

获取动力学参数的常用方法有三种：

- CAD技术、
- 物理实验方法
- 参数辨识方法



随着机器人技术的发展，机器人能完成的控制越来越复杂，即使是机械臂，实现更精确的力感知和力控制方面的需求也越来越突出。这就需要我们将动力学应用于控制，而非仅仅只是验证速度、加速度曲线是否连续。在第四章中我们介绍了动力学模型，其中包含一些动力学参数，以工业机械臂为例，通常厂商无法提供一套动力学参数可以应用到其同类型所有的机械臂，这是由于零部件在制造、装配过程中存在差异，会导致动力学参数发生改变。

获取动力学参数的常用方法有三种：CAD技术、物理实验方法以及参数辨识方法。CAD技术根据所采用材质类型与几何形状，对不同组件（连杆、执行器与传动装置）计算其惯性参数值，由于存在加工误差和装配误差，动力学参数会存在一定的误差。而物理实验方法，则是对机械臂每个部件都单独进行物理测试，忽略了装配过程中带来的参数差异。动力学参数辨识方法则是对机器人进行动力学建模，控制机器人运行特定的轨迹，然后采集相关数据，采用最小二乘迭代等方法，估计动力学参数，使按动力学模型计算的关节转矩与实际测量值之间的误差达到一定的允许范围。动力学参数辨识方法能够简单、准确的获得动力学参数，是目前研究和应用最多的一种方法。

## 参数标定与辨识

动力学参数标定

### 动力学参数标定

一般的动力学参数辨识方法包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) 参数估计；
- (5) 参数验证。



Under reviewing: Open Peer Review

Huang W, Min H, Guo Y Liu M. A review of dynamic parameters identification for manipulator control [version 1; peer review: 1 approved]. cobot 2022, 1:5 (<https://doi.org/10.12688/cobot.17444.1>)

模型推导，一般基于动力学正逆解方程对机器人进行建模，利用动力学模型中的线性性分析，将部分动力学参数和几何结构结合起来，组成可辨识的形式。激励轨迹设计是为了更好的激励动力学参数，以降低噪声影响，并完成轨迹运行过程中的数据采集。信号处理环节完成对采集数据的滤波和优化。

一般工业机械臂只有关节编码器，只能获得离散关节位置信息，需要通过微分计算获得速度和加速度。另外，还需要处理数据中的奇异值，避免在参数辨识中造成误差。参数辨识一般采用数值方法，利用测量数据估计动力学参数。参数验证则通过测试轨迹实现，对比预测扭矩曲线和实际扭矩曲线来讨论辨识精度，如果辨识精度达到要求，我们就可以将这些参数应用到基于动力学模型的控制中。

## 参数标定与辨识

动力学参数标定

动力学参数标定

采用拉格朗日力学构建的动力学模型，未考虑摩擦力以及电机惯性的影响

一般动力学参数辨识方法

包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) 参数估计；
- (5) 参数验证。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau$$

↓

$$Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})p = \tau$$

其中， $p \in R^{r \times 1}$  为重新构建的动力学参数向量。  
 $Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \in R^{n \times r}$  为动力学方程的系数矩阵，称为回归矩阵。

推导过程见讲义

$$\tau_i = Y^i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})p^i = [Y_0^i \quad Y_1^i \quad Y_2^i] \begin{bmatrix} P_0^i \\ P_1^i \\ P_2^i \end{bmatrix}$$

$$Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = [Y^1 \quad \dots \quad Y^n] \in R^{n \times 10}$$

$$p_i = [P_0^i \quad P_1^i \quad P_2^i]^T$$
$$= [m_i \quad m_i^{-1}P_{c_{ix}} \quad m_i^{-1}P_{c_{iy}} \quad m_i^{-1}P_{c_{iz}} \quad I_{ixx} \quad I_{ixy} \quad I_{ixz} \quad I_{iyx} \quad I_{iyz} \quad I_{izx}]^T$$

动力学参数  $p$  为恒值参数向量，共10个

## 参数标定与辨识

动力学参数标定

动力学参数标定

考虑摩擦力以及电机  
惯性的影响

一般的动力学参数辨识方法

包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) 参数估计；
- (5) 参数验证。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = \tau$$

↓

$$Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})p = \tau$$

其中， $p \in R^{r \times 1}$ 为重新构建的动力学参数向量。  
 $Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \in R^{n \times r}$ 为动力学方程的系数矩阵，称为回归矩阵。

推导过程见讲义

$$\tau_i = Y_{new}^i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})p_{new}^i$$

$$= [Y_0^i \quad Y_1^i \quad Y_2^i \quad Y_C^i \quad Y_V^i \quad Y_M^i] \begin{bmatrix} P_0^i \\ P_1^i \\ P_2^i \\ P_C^i \\ P_V^i \\ P_M^i \end{bmatrix}$$

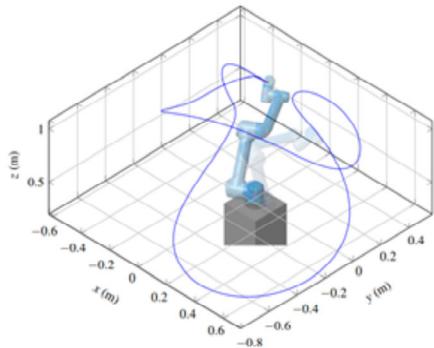
$$p_i = [m_i \quad m_i^{-1}P_{c_{ix}} \quad m_i^{-1}P_{c_{iy}} \quad m_i^{-1}P_{c_{iz}} \quad \hat{I}_{ixx} \quad \hat{I}_{ixy} \quad \hat{I}_{ixz} \quad \hat{I}_{iyx} \quad \hat{I}_{iyy} \quad \hat{I}_{iyz} \quad \hat{I}_{izx} \quad f_{c_i}G \quad f_{V_i}G^2 \quad J_{m_i}G^2]^T$$

每根连杆的动力学恒定参数向量增加到了13个

10个参数、13个参数的推导过程可以参考现代机器人学的教材。

## 参数标定与辨识

动力学参数标定



- 1) 采用持续的轨迹激发
- 2) 激励轨迹参数化

## 动力学参数标定

一般的动力学参数辨识方法包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；

- 
- 
- 

$$\begin{cases} q_i(t) = q_{i,0} + a_{i,0} \sin(\omega_0 t) + b_{i,0} \cos(\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{h-1} a_{i,k} \sin(k\omega_l t) + \sum_{k=1}^{h-1} b_{i,k} \cos(k\omega_l t) \\ \dot{q}_i(t) = a_{i,0} \omega_0 \cos(\omega_0 t) - b_{i,0} \omega_0 \sin(\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{h-1} a_{i,k} k \omega_l \cos(k\omega_l t) - \sum_{k=1}^{h-1} b_{i,k} k \omega_l \sin(k\omega_l t) \\ \ddot{q}_i(t) = -a_{i,0} \omega_0^2 \sin(\omega_0 t) - b_{i,0} \omega_0^2 \cos(\omega_0 t) - \sum_{k=1}^{h-1} a_{i,k} k^2 \omega_l^2 \sin(k\omega_l t) - \sum_{k=1}^{h-1} b_{i,k} k^2 \omega_l^2 \cos(k\omega_l t) \end{cases}$$



目的：误差最小

例如：

- 1) 采用有限项傅里叶级数；
- 2) 对这个级数的参数进行优化

Under reviewing: Open Peer Review

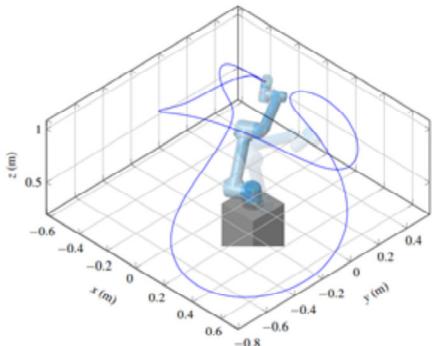
Huang W, Min H, Guo Y et al. A review of dynamic parameters identification for manipulator control [version 1; peer review: 1 approved]. cobot 2022, 1:5 (<https://doi.org/10.12688/cobot.17444.1>)

参数优化的目标：使观测矩阵条件数达到最小

为了被识别，动力学参数必须采用持续的轨迹激发。这种轨迹一般可以通过轨迹规划程序实现，以便能够获得充分轨迹的同时，不会由于噪声过大造成过拟合，抑制数据噪声。对于一段连续的激励轨迹，可以将其轨迹参数化。激励轨迹参数化是对两个优化后的轨迹点之间的位置、速度、加速度的曲线进行插补，保证连续性。可采用的轨迹规划方法可参见第五章中描述的五次多项式优化轨迹等方法。进行轨迹激励的目的，是为了通过一系列特定的轨迹来“激励”动力学模型中的部分参数，以便保证后面辨识算法的收敛性，提高辨识精度。

## 参数标定与辨识

动力学参数标定

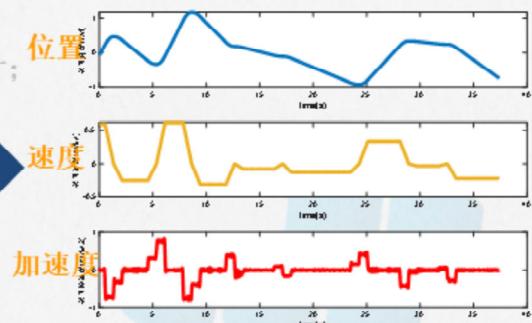


### 动力学参数标定

一般的动力学参数辨识方法包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) 参数估计。
- (5) 参数验证。

位置、速度、加速度  
数据采集



将激励轨迹在机器人上执行，并通过一定的方法获得关节扭矩。

一般的机械臂仅包含关节位置编码器，速度和加速度需要通过微分计算获得，测量得到的位置信号是离散的，无法采用模拟滤波的方式进行滤波，可采用巴特沃斯低通滤波器等方法滤除噪声。在完成对位置信号的滤波后，为了保证求取速度和加速度时没有相移，一般还需要采用中心差分法等方法进行计算。在没有关节扭矩传感器的前提下，采用电流计算扭矩同样也需要进行滤波，去除扭矩异常值。

## 参数标定与辨识

动力学参数标定

一般的动力学参数辨识方法

包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) **参数估计**；
- (5) 参数验证。

$$\bar{\tau} = \begin{bmatrix} \tau(t_1) \\ \vdots \\ \tau(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t_1) \\ \vdots \\ Y(t_N) \end{bmatrix} P = \bar{Y}P \quad (6-32)$$

$$Nn \gg p$$

## 动力学参数标定

- 最小二乘法
- 最大似然估计法
- 加权最小二乘法
- 扩展卡尔曼滤波法
- 非线性最小二乘法
- 工具变量方法等方法

参数估计完成从大量的数据中估计出需要的动力学参数精确值，基本思想为如何估计一组参数，使得测量扭矩和使用动力学模型计算的估计扭矩之间的误差最小

$$\min \sum_{i=1}^n (\bar{\tau}_i - \tau_i)^2$$

通过最小二乘法求解式 (6-32)，可以得到以下形式的解：

$$P = (\bar{Y}^T \bar{Y})^{-1} \bar{Y}^T \bar{\tau} \quad (6-34)$$

其中  $(\bar{Y}^T \bar{Y})^{-1} \bar{Y}^T$  为测量回归矩阵  $\bar{Y}$  的左伪逆矩阵

除了基本最小二乘法以外，其他常用方法还有：最大似然估计法、加权最小二乘法，扩展卡尔曼滤波法，非线性最小二乘法以及工具变量方法等方法

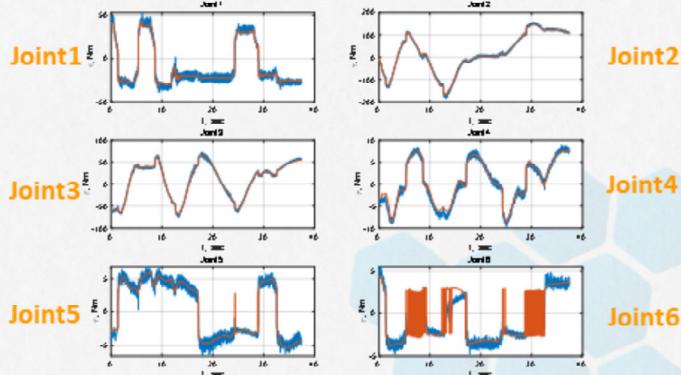
## 参数标定与辨识

动力学参数标定

### 动力学参数标定

一般的动力学参数辨识方法包含5个步骤：

- (1) 模型推导；
- (2) 激励轨迹设计；
- (3) 信号处理；
- (4) 参数估计；
- (5) 参数验证。



得到动力学参数估计值之后，我们在真实的环境下，对这些辨识出来的参数进行验证，通过控制机器人运行验证轨迹，对比分析预测扭矩曲线和实际扭矩曲线，评判辨识精度。

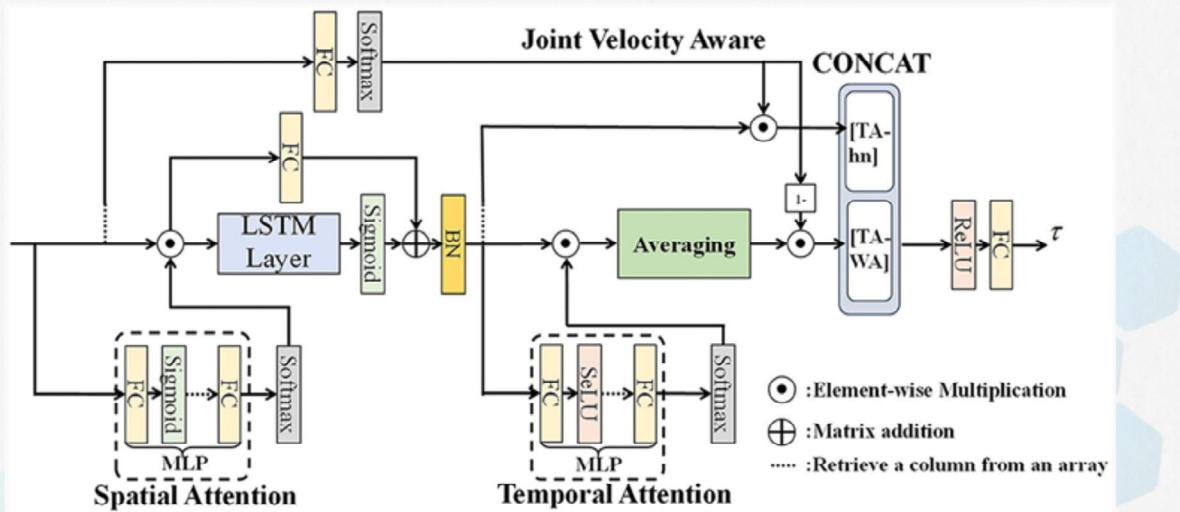
基于式(6-34)采用最小二乘法，在机械臂关节较少的情况下，可以直接检查动力学模型方程来确定可辨识参数的最小个数，否则需要将测量矩阵 $\bar{Y}$ 进行QR分解，消除那些无法计算的参数。由于 $\bar{Y}$ 是通过一组测量值得到的，如果矩阵 $\bar{Y}$ 不满秩，可采用 $\bar{Y}$ 的阻尼最小二乘求逆计算，此时解的精度将取决于阻尼因子的权重。

在本节的讨论中，未阐述机械臂末端执行器的负载情况。这种情况下，可以将有效负载附加在最后一根连杆上，对最后一根连杆的结构进行修正，再辨识动力学参数，如果末端装配了力传感器，可直接由末端力传感器测量末端扭矩。参数辨识方法除了依据式(6-34)构建的基本最小二乘法以外，其他常用方法还有：最大似然估计法、加权最小二乘法，扩展卡尔曼滤波法，非线性最小二乘法以及工具变量方法等方法。

机器人系统越来越复杂，动力学参数需要通过辨识获得模型的精确值。动力学参数可以分为三类：完全可识别的参数、可识别的线性相关性参数（又称为基本参数）、完全无法识别的参数。在采用数值方法求解动力学参数时，可能会出现参数不具备物理意义，例如质量和惯性矩阵小于零的情况，这会导致动力学模型的不准确。这种情况下，需要对求解方程进行物理一致性约束，相关问题的探讨，读者可查阅最新的研究。

需要注意的是，动力学参数辨识，是在认为所有的轨迹规划、运动学估计值都是足够精确的前提下进行的。一般来说，任何厂家的机器人，其出厂之后的运动学参数并非和标称值完全一致。因此，在进行动力学参数辨识前，需要先进行运动学参数标定。

## 动力学模型：白盒模型、黑盒模型、灰盒模型



Huang, W., Lin, Y., Liu, M., & Min, H. (2024). Velocity-aware spatial-temporal attention LSTM model for inverse dynamic model learning of manipulators. *Frontiers in Neurorobotics*, 18, 1353879.

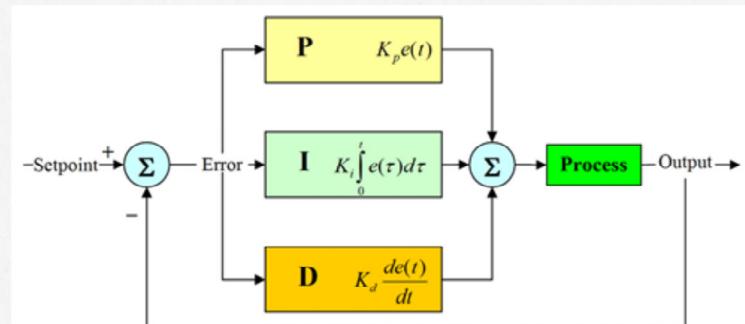
实验室黄文晖博士的一篇研究论文，虽然期刊级别比较低一些，但研究本身还是非常不错的，有较高的参考价值。

03

## 工业机器人控制

- 独立关节控制模型
- 独立关节设定点跟踪控制
- 独立关节力矩控制
- 多关节机器人控制
- 力控制
- 约束坐标系
- 力/位混合控制





基本的PID控制器框图

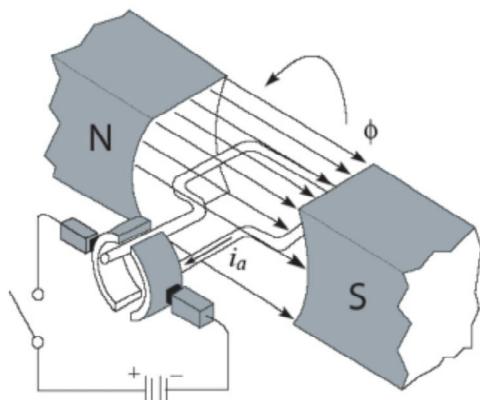
一般来说，工业机械臂控制系统最底层的控制为关节控制器。

PID控制器（比例-积分-微分控制器）是在工业控制应用中最常见的反馈控制器，如图6.9所示，由比例单元（Proportional）、积分单元（Integral）和微分单元（Derivative）组成，可以通过调整这三个单元的增益 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 来调定其特性。PID控制器把测量得到的数据和某个参考值进行比较，然后将这个差值用于计算新的输入值，使用这个新的输入值来控制系统的输出达到或者保持在参考值。PID控制器可以根据历史数据和差别的出现率来调整输入值，从而使系统更加准确而稳定，适用于基本上线性、且动态特性不随时间变化的系统。

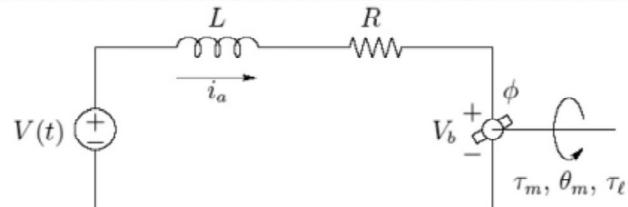
在典型的PID调节控制器中，PD控制器可用于位置和速度的反馈控制，当系统适用双积分器模型时，它具有良好的闭环特性。工业机器人的关节驱动一般为电机，可采用PD控制器。

## 工业机器人控制

独立关节控制模型



永磁直流电机工作原理图

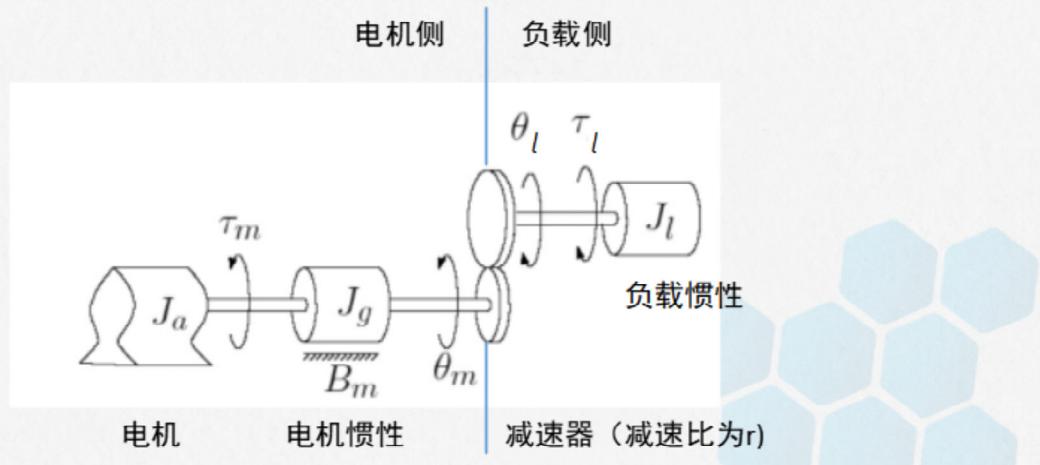


永磁直流电机等效电路简化模型

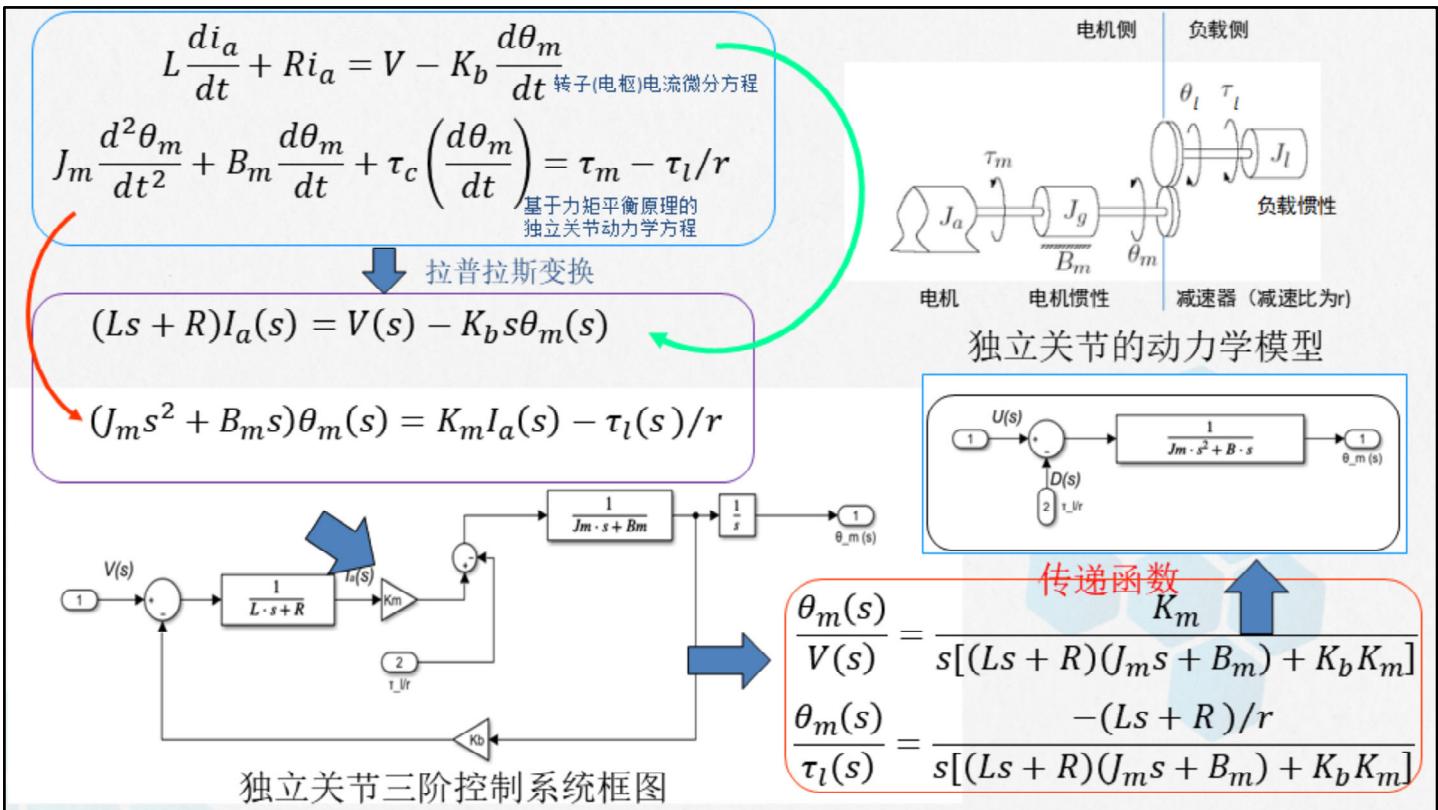
在传统的工业机器人领域，永磁直流电机、交流电机以及无刷直流电机被大量使用。近年来随着协作机器人的发展，无框直驱力矩电机也有了典型广泛的应用。为了简化模型，本章仅讨论永磁直流电机加上齿轮减速器的单关节模型。

# 工业机器人控制

独立关节控制模型



典型机器人关节传动示意图



首先是需要掌握单关节的控制问题：

需要对关节进行建模，通过两个基本方程：转子(电枢)电流微分方程、基于力矩平衡原理的独立关节动力学方程，经过拉普拉斯变换得到两个新的方程，其中， $B_m$ 为黏性摩擦系数， $\tau_c$ 为库仑摩擦力矩， $\tau_m$ 为电机力矩， $\tau_l$ 为负载转矩， $J_m$ 为驱动器与齿轮箱的惯量总和。可以看到这是一个三阶的控制系统。

通过这两个方程，实际我们得到了系统的两个传递函数：

得到输入电压 $V(s)$ 到输出角度 $\theta_m(s)$ 的传递函数，还有从负载转矩 $\tau_l(s)$ 到输出位置 $\theta_m(s)$ 的传递函数，要简明控制原理，然后我们可以将其降阶到二阶，可以将负载力矩构成项 $D(s)$ 当成控制系统的输入扰动，则独立关节的控制系统框图可简化这样的一个二阶模型。

# 工业机器人控制

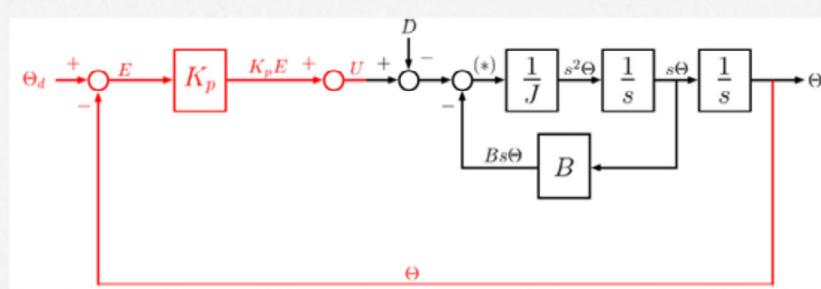
独立关节设定点跟踪控制

独立关节设定点跟踪控制

$$e(t) = \theta^d(t) - \theta(t) \quad (6-51)$$

比例控制率

$$U(t) = K_p e(t) \rightarrow U(s) = K_p E(s)$$



## 工业机器人控制

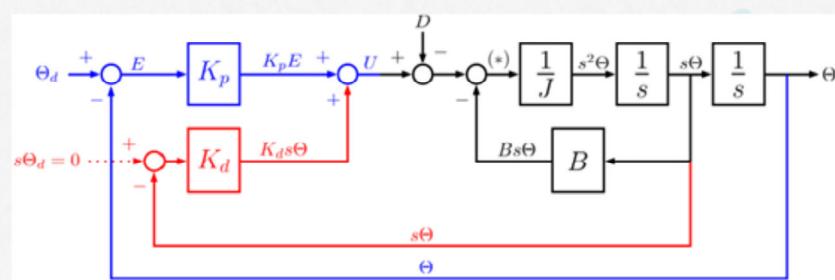
独立关节设定点跟踪控制

独立关节设定点跟踪控制

$$e(t) = \theta^d(t) - \theta(t) \quad (6-51)$$

PD控制率

$$U(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) \rightarrow U(s) = (K_p + K_d s) E(s)$$



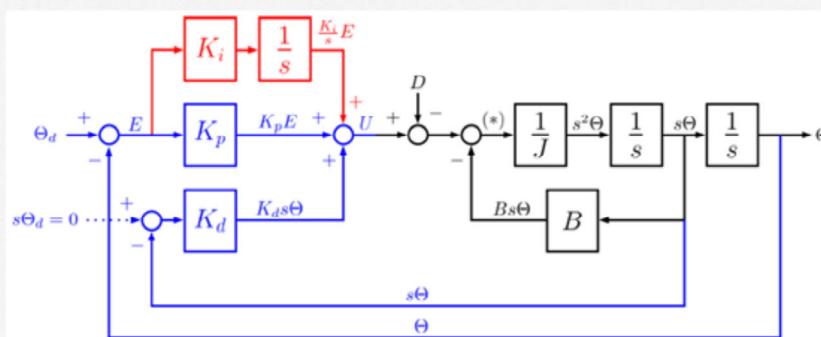
## 工业机器人控制

独立关节设定点跟踪控制

$$e(t) = \theta^d(t) - \theta(t) \quad (6-51)$$

### PID控制率

$$U(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + K_i \int e(t) dt \rightarrow U(s) = (K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}) E(s)$$



通过对比与分析，可以得出一些基本的观点：

**P(比例)控制器：**采用纯比例控制器会带来稳态误差，增益 ( $K_p$ ) 越大系统收敛越快，高增益可以降低稳态误差，但增益增大的同时会引起振荡并可能导致系统不稳定。

**I(积分)控制器：**采用积分控制可以消除稳态误差，增加  $K_i$  可以加速控制，增大  $K_i$  将增加稳定时间，同样的，过高的  $K_i$  可能会产生振荡，

**D(微分)控制器：**较大的  $K_d$  可以减少振荡，较低的  $K_d$  值可以提高稳定性，如果某项值引入了噪声误差的导数，则可能对噪声高度敏感，较高的噪音会导致系统不稳定。

从以上的分析可以认为，在PD或PID控制器中，增益系数增大的同时，可以实现快速响应，同时可使由恒定干扰引起的稳态误差变得更小。但在实际的控制中，还需要分析饱和对控制系统的影响。所谓饱和(saturation)，指电机的输入最大扭矩是有限制的，一般的伺服系统都会使用限流器，以免过流而引起损坏。另外就是在前面的关节建模过程中，都是基于关节是刚性的假设前提，但实际上关节是柔性的，特别是目前发展最快速的协作机器人，其独立关节大部分是由直流无刷电机加谐波减速机的组成形式，关节柔性对系统的影响也需要纳入到控制系统的考虑范畴。

# 工业机器人控制

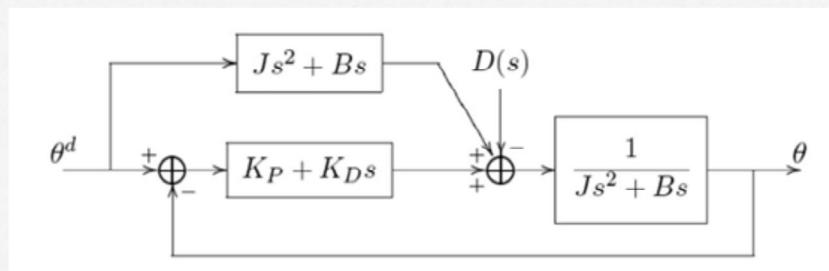
独立关节设定点控制

独立关节设定点跟踪控制

$$e(t) = \theta^d(t) - \theta(t) \quad (6-51)$$

前馈控制

$$F(s) = J_m s^2 + Bs$$

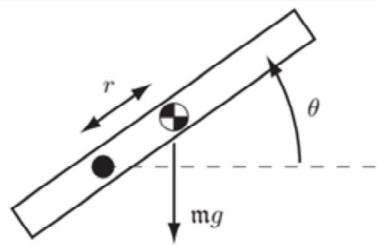


独立关节PD控制+前馈控制

# 工业机器人控制

独立关节力矩控制

## 独立关节力矩控制



$$\tau = M\ddot{\theta} + mgrcos\theta$$

$$\tau = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + mgrcos\theta$$

$$\boxed{\tau = M\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta})}$$

↓ 考虑粘性摩擦引起的旋转摩擦  $\tau_{fric} = b\dot{\theta}$

↓ 简化

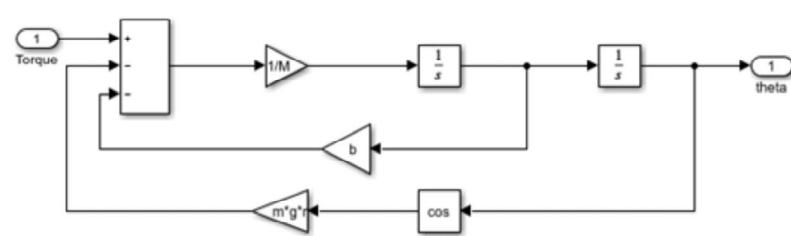
# 工业机器人控制

独立关节力矩控制

## 独立关节力矩控制

$$\tau = M\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + mgrcos\theta$$

做拉普拉斯变换，我们可以得到  
输入力矩与输出关节角度之间的  
传递函数

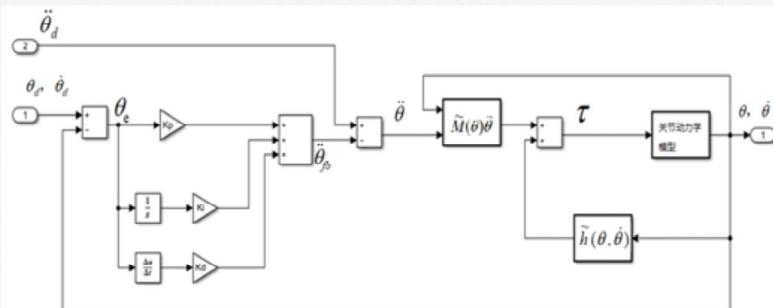


输入为力矩的独立关节动力学控制模型

# 工业机器人控制

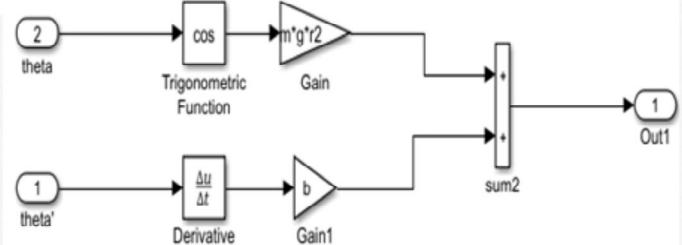
独立关节力矩控制

## 独立关节力矩控制



$\tilde{h}(\theta, \dot{\theta})$  模型

独立关节计算力矩控制框图



针对力矩控制，实际可对应电机的旋转加速度控制。我们希望输入参考（期望）值  $\ddot{\theta}_d$  与实际输出值  $\ddot{\theta}$  之间的误差为零，将误差定义为：

$$\ddot{\theta}_e = \ddot{\theta}_d(t) - \ddot{\theta}(t) \quad (6-59)$$

如果采用PID反馈控制来控制误差  $\ddot{\theta}_e$ ，则：

$$\ddot{\theta}_e + K_d \dot{\theta}_e + K_p \theta_e + K_i \int \theta_e(t) dt = 0 \quad (6-60)$$

联合式 (6-59) (6-60)，可得：

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d + K_d \dot{\theta}_e + K_p \theta_e + K_i \int \theta_e(t) dt \quad (6-61)$$

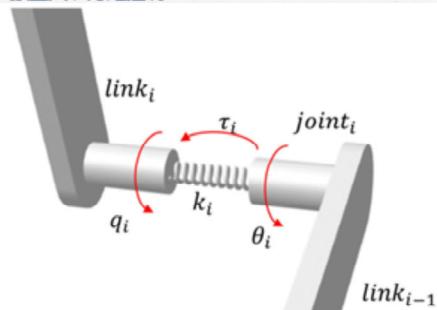
将公式 (6-61) 中的  $\ddot{\theta}$  代入独立关节的动力学简化模型 (6-58)，可得：

$$\tau = \tilde{M}(\theta)(\ddot{\theta}_d + K_d \dot{\theta}_e + K_p \theta_e + K_i \int \theta_e(t) dt) + \tilde{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (6-62)$$

式 (6-62) 即为计算力矩控制器，其中  $\ddot{\theta}_d$  为输入的前馈加速度，将  $\tilde{h}(\theta, \dot{\theta})$  作为位置  $\theta$  和速度  $\dot{\theta}$  的反馈，其控制框图如图6.21所示，该计算力矩控制器将前馈加速度  $\ddot{\theta}_d$  与由PID反馈控制器计算的加速度  $\ddot{\theta}_{fb}$  相加，产生加速度指令  $\ddot{\theta}$ ，经由惯量模型  $\tilde{M}(\theta)$ ，将所需的关节加速度转换为关节力矩  $\tau$ ，实现关节力矩的简化线性控制，通过独立关节动力学控制模型，输出关节位置或速度。

## 工业机器人控制

独立关节力矩控制



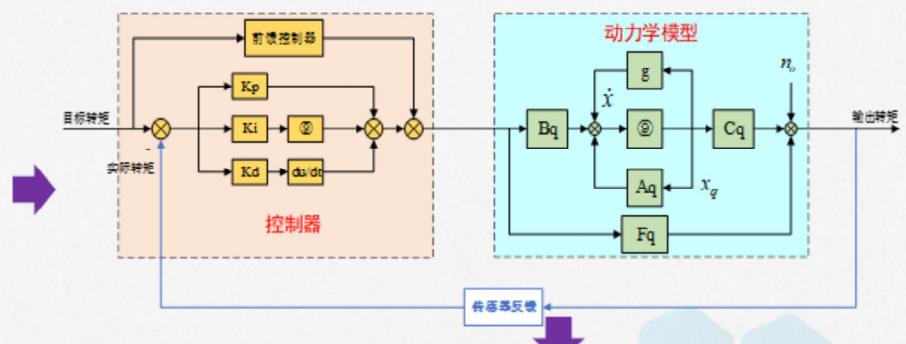
柔性关节力学模型图

柔性关节力学：牛顿-欧拉法

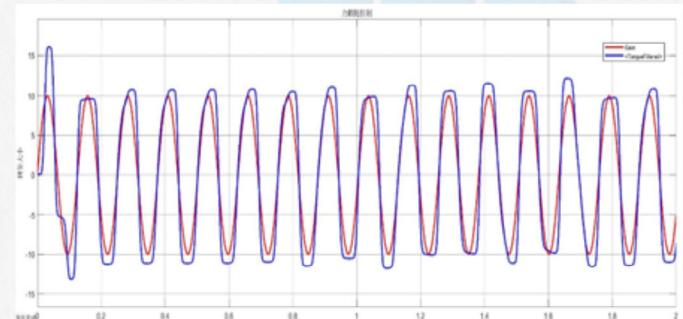
$$M(q_i)\ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + g(q_i) = \tau_g - \tau_e$$

$$J_m \ddot{\theta}_i + \tau_f + \tau_g = \tau_i$$

$$\tau_g = k_i(\theta_i - q)$$



关节力跟随控制结果：PD+前馈控制



在以上针对工业机器人的控制模型描述中，关节的柔性是被忽略的，关节模型被定义为一个单输入单输出模型(SISO)，关节之间的耦合效应被视为施加在单个系统上的干扰项D。在关节控制器层面实现基本的PID反馈控制，关节角度反馈控制可对应电机控制中的位置环、关节旋转速度反馈控制对应速度环，而关节的力矩反馈控制则可对应电机控制的电流环，一般来说PD反馈控制即可满足大部分的工业要求。但在类似最新的人形机器人、柔性机械臂等研究中，关节采用了更多柔性材料制成，其传动系统的弹性因素对于系统动态特性有着无法忽略的影响，因此可以考虑在关节控制器层面引入状态空间的概念，采用鲁棒控制、自适应控制等方法。

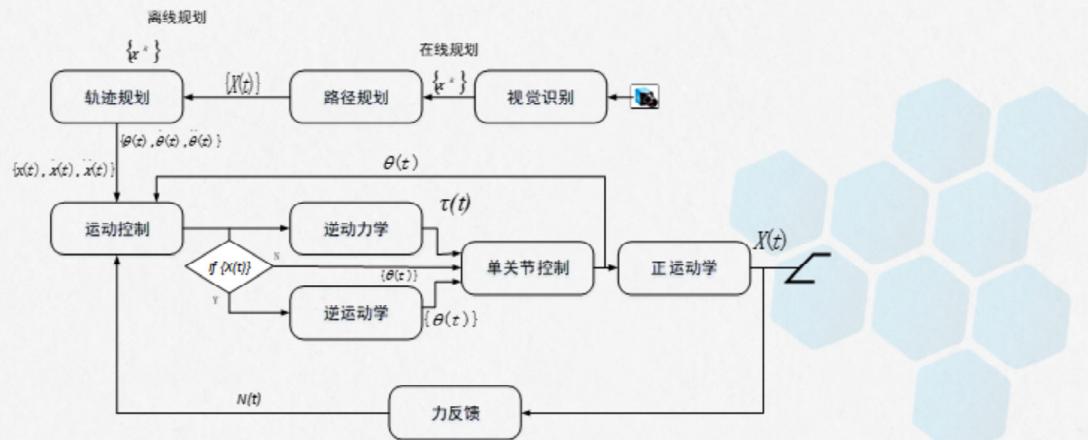
一般柔性关节模型可以简化为线性弹簧模型，用弹簧的弹性系数来代替关节的刚度系数。然后通过牛顿-欧拉法建立动力学模型。右侧控制框图为柔性关节的一般控制框图，对于关节力跟随控制可以采用PD+前馈控制的方法。由右下角仿真结果可以看出，该方法有较好的跟踪效果。除了该控制方法，像关节阻抗控制、模糊自适应控制、模型预测控制等也是目前比较流行的关节控制方法。

# 工业机器人控制

多关节机器人控制

多关节机器人有两种类型的控制形式：

- 分散控制，每个关节都有单独的控制器，关节之间没有信息共享；
- 集中控制，每个关节的完整状态信息都可以用来计算各关节所需的控制。

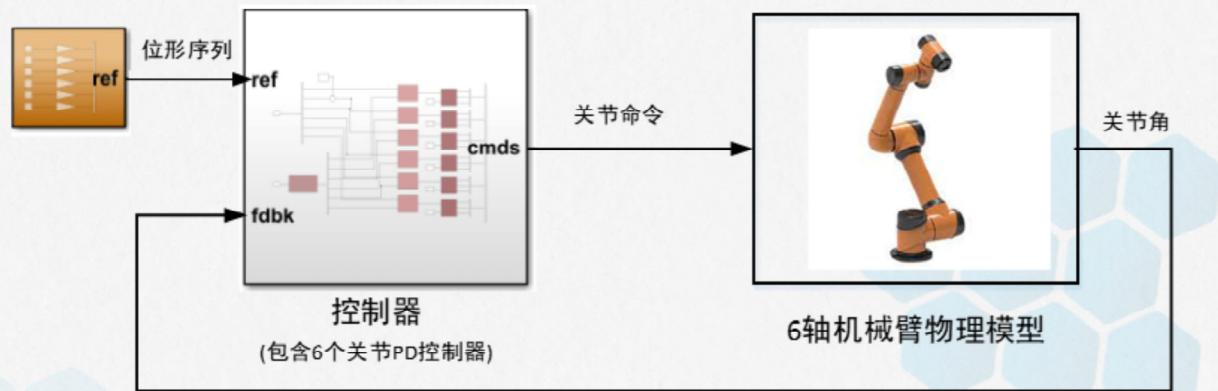


传统的工业机器人大多采用集中控制器的方式，也就是将各关节电机的控制与伺服信号，采用并行的方式接入主控制器，控制器需要为每个关节单元扩展出控制接口。而目前轻量化机械臂、协作型机械臂均采用模块化关节构成独立关节，每个独立关节均具有嵌入式控制器，主控制器与独立关节控制器之间采用总线（RS485、CAN、Ethercat等通信总线）进行通信。

如图6.23所示，由 $n$ 个关节组成的工业机械臂末端作业路径为 $\{x^k\} \in \mathbb{R}^k$ ，该路径可能是离线预设好的，也可能是由视觉等传感器实时获取的。该路径将由轨迹规划算法进行求解，给出各关节期望位形的时间序列（位置、速度、加速度）（如果是笛卡尔空间轨迹规划，需要采用运动学逆解转换到关节空间变量 $\theta(t)$ ），输入关节控制器执行。如果想采用全局反馈控制精度，可以采取位置传感器进行反馈，执行全局位置闭环控制算法；如果对操作力或力矩有更高要求，可以采用力传感器，结合动力学执行力反馈控制。

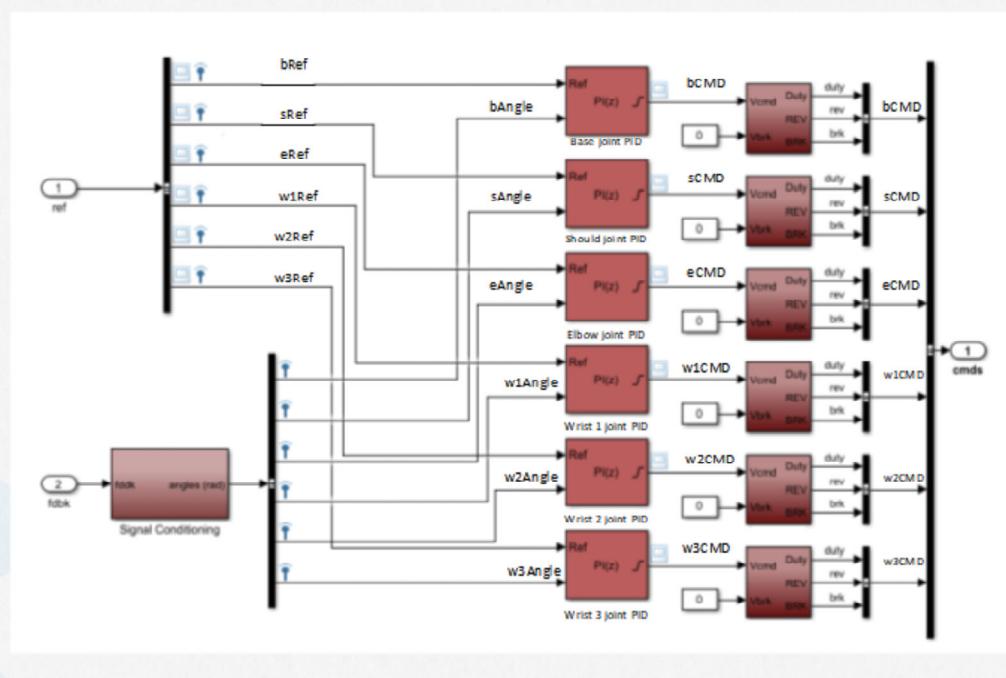
# 工业机器人控制

多关节机器人控制



# 工业机器人控制

多关节机器人控制



## 工业机器人控制

力控制

机械臂在自由空间运动的时候，其自然约束力都应为零，但如果机械臂末端处于障碍物空间，和环境有接触时，存在两种极端作业情况：

- 第一种情况下，末端和环境接触，但几乎不再做相对运动；
- 另一种就是机械臂还需要沿被加工物体表面运动，并施加相应的力，例如采用机械臂进行打磨等作业。(后面再讨论，力/位混合控制)

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) + J^T(\theta)\mathcal{F}_{tip}$$

第一种情况下，可以忽略速度和加速度： $\tau = g(\theta) + J^T(\theta)\mathcal{F}_{tip}$

$$\tau = \tilde{g}(\theta) + J^T(\theta)\mathcal{F}_d \quad \text{具有前馈和重力补偿的PI力控制器}$$

$$\tau = \tilde{g}(\theta) + J^T(\theta)(\mathcal{F}_d + K_{fp}\mathcal{F}_e + K_{fi} \int \mathcal{F}_e(t)dt)$$

力旋量误差  $\mathcal{F}_e = \mathcal{F}_d - \mathcal{F}_{tip}$

一种解决方案是在机械臂末端安装六维力-力矩传感器，直接测量末端执行器的力旋量  $\mathcal{F}_{tip}$ ，这个时候可以设计一个具有前馈和重力补偿的PI力控制器：

$$\tau = \tilde{g}(\theta) + J^T(\theta)(\mathcal{F}_d + K_{fp}\mathcal{F}_e + K_{fi} \int \mathcal{F}_e(t)dt) \quad (6-65)$$

其中，力旋量误差  $\mathcal{F}_e = \mathcal{F}_d - \mathcal{F}_{tip}$ ， $K_{fp}$  和  $K_{fi}$  分别为比例与积分环节的正定增益矩阵。

## 工业机器人控制

约束坐标系

### 约束坐标系 自然约束 附加约束

根据约束，我们可以将 $n$ 自由度机器人位形 $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]$ ，表达为位形空间(C – Space)的 $K$ 个独立约束方程：

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} g_1(\theta_1, \dots, \theta_n) \\ \vdots \\ g_k(\theta_1, \dots, \theta_n) \end{bmatrix} = 0 \xrightarrow{\text{微分}} \frac{d}{dt} g(\theta(t)) = 0$$
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \theta_1}(\theta)\dot{\theta}_1 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n}(\theta)\dot{\theta}_n \\ \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial \theta_1}(\theta)\dot{\theta}_1 + \dots + \frac{\partial g_k}{\partial \theta_n}(\theta)\dot{\theta}_n \end{bmatrix} = 0 \xrightarrow{} \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \theta_1}(\theta) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n}(\theta) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial \theta_1}(\theta) & \dots & \frac{\partial g_k}{\partial \theta_n}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} = 0$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta}(\theta)\dot{\theta} = 0$$

$$A(\theta)\dot{\theta} = 0 \quad A(\theta) \in \mathbb{R}^{k \times n}$$

速度约束方程：Pfaffian约束

工业机器人最初都是应用于相对简单的应用场景，例如搬运、码垛、点焊、喷漆等操作，在磨削、去毛刺等应用中，用到了简单的力控制。目前机器人的应用领域越来越广泛，特别是协作机器人的兴起，机器人可以完成更复杂的任务。在高精度的零件装配以及典型的“销孔装配(peg-in-hole)”等作业中，实现接触力与高精度位形控制的混合控制尤为重要。

上一节中，我们只介绍了力反馈情况下实现单一力控制的基本原理，没有考虑末端执行器的几何路径约束。但在实际的作业环境中，接触力会引起末端执行器偏离期望轨迹，而位形控制系统则会试图消除这个偏离量，如果环境刚性和位形控制精度要求越高，这一对矛盾就会激化，导致关节执行器达到饱和或者作业触点被损坏。因此，这一类的作业对于机器人的控制提出了新的要求，需要在交互中保证一定的柔性响应。这种交互控制策略可分为间接力控制与直接力控制两类。间接力控制无须将力的控制形成反馈回路，通过运动控制来完成力控制；而直接力控制需要力反馈，控制接触力达到期望值。对于装配任务来说，每一个操作任务都可以分解为多个末端执行器与作业环境之间处于不同接触状态的子任务。我们将子任务中由操作位形特定的机构与几何特征所形成的约束称为自然约束。自然约束分为自然位置约束以及自然力约束，例如，刚性物体表面不能被机械臂穿过，则机械臂在该表面上存在自然位置约束，如果该表面不允许施加切向力，则还存在自然力约束。

与自然约束相应，需要对机器人的控制进行附加约束。将受到位置约束的位形定义为一个广义表面，则自然力约束沿广义约束表面切向，自然位置约束沿广义约束表面法向。而附加约束，又称人工约束，是需要对机器人的运动进行控制的约束，人工力约束沿广义约束表面法向，人工位置约束沿广义约

束表面切向。由此我们可以在具有自然约束的广义表面，定义约束坐标系，分析其自然约束与人工约束，根据不同的作业要求，将任务分离为位置控制和力控制两部分，在约束坐标系中，选择不同的方案进行控制。

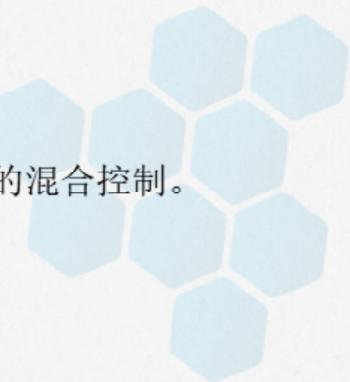
## 工业机器人控制

力/位混合控制

### 力/位混合控制

按照不同的作业要求，力/位混合控制器的设计可分成三种类型：

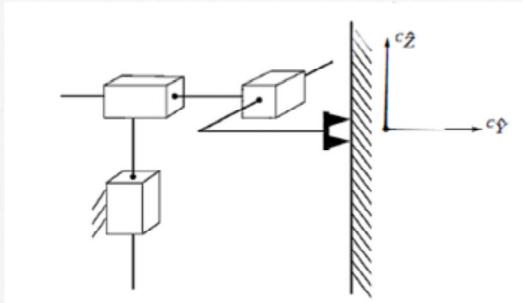
- 沿有自然力约束的方向进行机械臂的位置控制；
- 沿有自然位置约束的方向进行机械臂的力控制；
- 沿约束坐标系的正交自由度方向进行位置和力的混合控制。



## 工业机器人控制

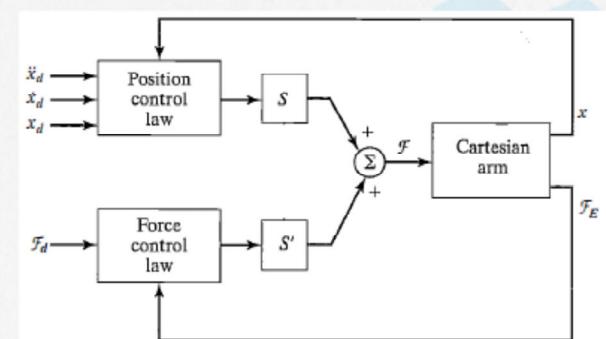
力/位混合控制

### 力/位混合控制



与墙面接触的三自由度直角坐标机器人约束坐标系

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

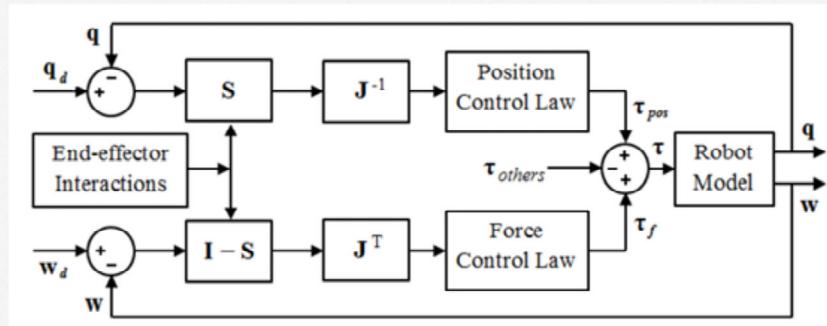


三自由度笛卡尔机械臂的混合控制器

# 工业机器人控制

力/位混合控制

## 力/位混合控制



一般串联机械臂的力/位混合解耦控制原理

自然正交补矩阵(NOC: Natural Orthogonal Complement Matrices)解耦法(DeNOC)最初被应用于串联机器人的动力学建模，后来也被应用于并联机器人以及其他闭链系统解耦。采用自然正交补矩阵对机器人动力学进行解耦的方法，通常需要首先将动力学方程进行线性化简化，且忽略摩擦力的影响，解耦之后的控制框图原理如图6.28所示，参见[文献saha2018]。

## 工业机器人控制

力/位混合控制

$$\Lambda(\theta) = J^{-T} M J^{-1}$$

$$\eta(\theta, V) = J^{-T} h(\theta, J^{-1}V) - \Lambda(\theta) J J^{-1} V$$

力/位混合控制

可采用运动旋量和力旋量进行解耦控制的方法，参见《现代机器人学-机构、规划与控制》一书

$$\begin{aligned}\tau &= J^T(\theta) \left( \underbrace{P(\theta) \left( \widetilde{\Lambda}(\theta) \left( \frac{d}{dt} ([Ad_{X^{-1}X_d}]V_d) + K_p X_e + K_i \int X_e(t) dt + K_d V_e \right) \right)}_{\text{运动控制}} \right. \\ &\quad \left. + (I - P(\theta)) \left( F_d + K_{fp} F_e + K_{fi} \int F_e(t) dt \right) + \underbrace{\tilde{\eta}(\theta, V)}_{\text{科氏力和重力项}} \right)\end{aligned}$$

推导过程见我的讲义

$P(\theta)$  和  $I - P(\theta)$  为正交投影，因此它们是互相解耦的。但采用这种解耦方法存在最大的问题在于如何判断  $A(\theta)V = 0$  的约束在什么时候有效。由于环境存在不确定性，因此需要采用某种估计方法对约束条件进行识别，例如采用力反馈传感器，实时估算约束方向，或者将反馈增益降低，让运动控制变“软”，同时让力控制更能容忍力的误差。

以上内容仅介绍了刚性环境下，对机器人进行刚性建模，并进行反馈控制的基本原理。针对复杂的环境和操作，机器人的控制器设计越来越复杂，有兴趣的读者可进一步学习有关机器人的鲁棒控制器、自适应控制器、迭代学习控制器，以及阻抗/变阻抗控制、顺应控制等内容。

# 04

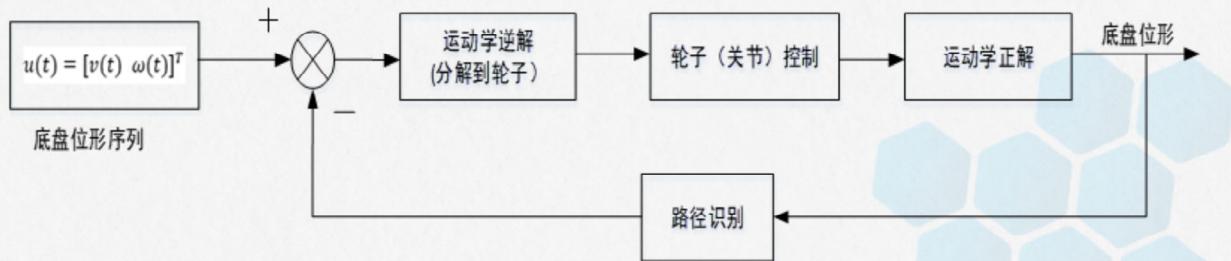
## 移动机器人控制

➤ 移动机器人三个基本的运动控制问题，  
即点镇定、路径跟随、轨迹跟踪

# 移动机器人控制

移动机器人反馈控制原理

## 移动机器人反馈控制



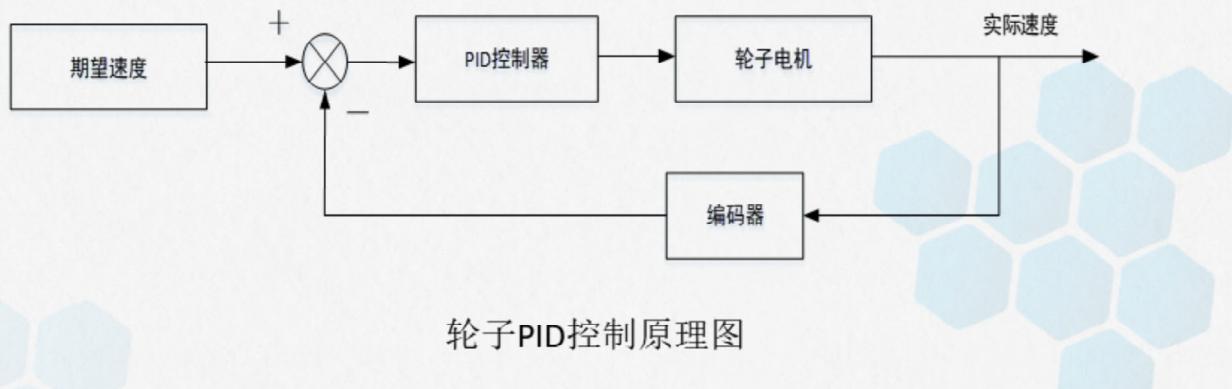
移动机器人的路径跟随控制，参考控制输入可以用 $u = [v \omega]^T$ 表示，一般选取两个输入量中的前进量 $v$ 为任意的常量或时变量，而另一个输入量作为控制量。因此路径跟随控制问题可以转换为关于路径跟随误差的一个标量函数的零点稳定问题，控制的目标是使机器人运动与给定路径之间的距离为零。轨迹跟踪控制与路径跟随控制的最大区别在于：控制轨迹与时间相关，其几何曲线 $f(x(t), y(t), \theta(t))$ ，自变量为时间 $t$ 的函数，曲线方程为 $t$ 的隐函数，此时，参考控制输入为 $u(t) = [v(t) \omega(t)]^T$ ，机器人必须跟踪满足特定时间规律的笛卡尔轨迹。

针对移动机器人来说，我们往往将其视为任务空间中的一个点来对待，那么机器人的路径或者轨迹均只是以机器人几何中心的位形集合。但实际的移动机器人由多个轮子组成，我们也可以将其与工业机械臂一样对待。每个轮子都可以被看成一个独立的关节，那么其控制就是将底盘的控制量 $u = [v \omega]^T$ ，按照相应的运动学模型，分解为单独的轮子控制即可。采用反馈控制机制的控制框图如图6.30所示，以循迹机器人为例，其实时路径识别可以采用CCD传感器进行识别获取，并进行反馈校正控制。

# 移动机器人控制

移动机器人反馈控制原理

## 移动机器人反馈控制



轮子PID控制原理图

如果轮子控制采用电机驱动，那么单个轮子（关节）控制和前面介绍的控制方法没有任何的差别，移动机器人轮子控制大都采用速度控制方案，其PID控制的工作原理如图6.31所示。

## 移动机器人控制

全向移动机器人反馈控制

全向移动机器人反馈控制



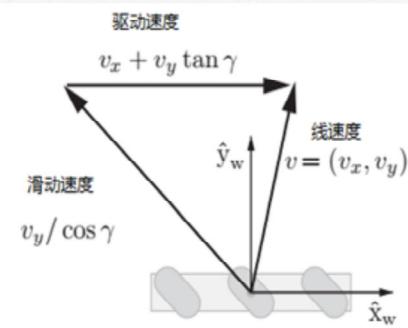
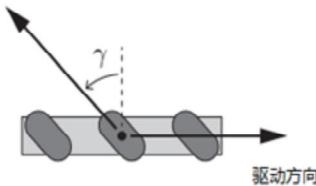
$$V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = v_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + v_s \begin{bmatrix} -\sin\gamma \\ \cos\gamma \end{bmatrix}$$

# 移动机器人控制

全向移动机器人反馈控制

## 全向移动机器人反馈控制

自由“侧滑”方向



麦克纳姆轮的速度分解  $v_d$  表示驱动速度,  $v_s$  表示滑动速度

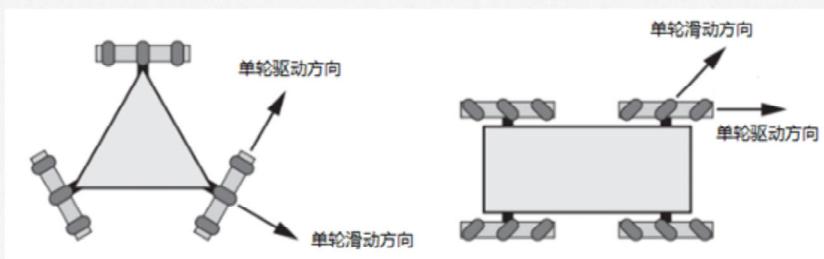
$$v_d = v_x + v_y \tan \gamma$$
$$v_s = v_y / \cos \gamma$$

$$u = \frac{v_d}{r} = \frac{1}{r} (v_x + v_y \tan \gamma)$$

## 移动机器人控制

全向移动机器人反馈控制

### 全向移动机器人反馈控制

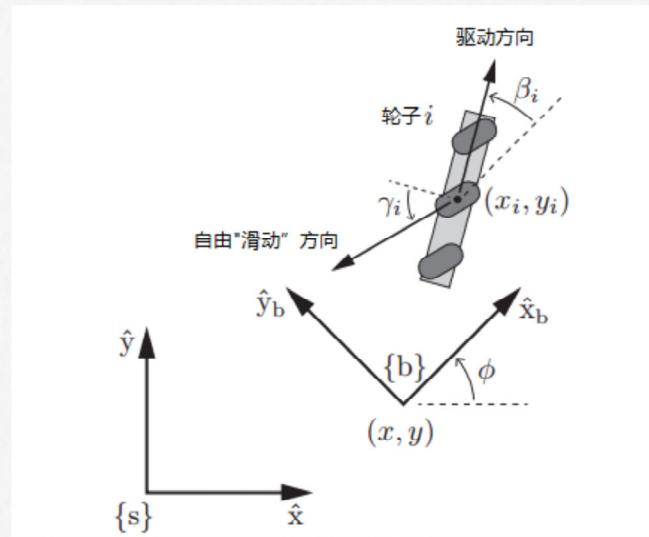


轮式移动机器人的两种典型结构

# 移动机器人控制

全向移动机器人反馈控制

## 全向移动机器人反馈控制

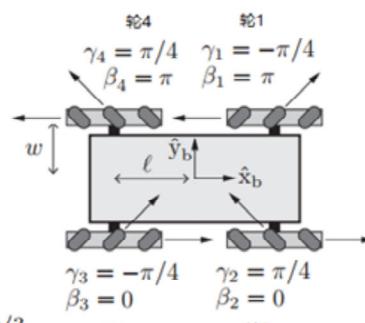
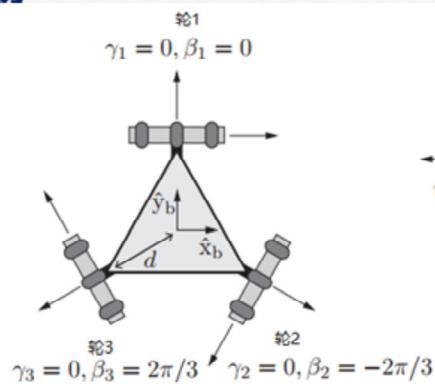


单轮速度与底盘坐标系以及全局坐标系的转换关系

## 移动机器人控制

### 全向移动机器人反馈控制

全向移动机器人反馈控制



两种典型全向移动机器人的运动学模型，所有轮子的半径为 $r$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = H(0)V_b = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -d & 1 & 0 \\ -d & -1/2 & -\sin(\pi/3) \\ -d & -1/2 & \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bz} \\ v_{bx} \\ v_{by} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = H(0)V_b = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -l-w & 1 & -1 \\ l+w & 1 & 1 \\ l+w & 1 & -1 \\ -l-w & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bz} \\ v_{bx} \\ v_{by} \end{bmatrix}$$

$$\dot{q}(t) = \dot{q}_d(t) + K_P(q_d(t) - q(t)) + K_I \int_0^t (q_d(t) - q(t)) dt$$

## 移动机器人控制

移动机器人里程计

## 移动机器人里程计

机器人轮子速度向量  $\dot{\theta}$  以及  $\Delta\theta$  与机器人本体刚体运动旋量  $V_b$  之间的关系为:

$$\dot{\theta} = \Delta\theta = H(0)V_b \quad V_b = H^\dagger(0)\Delta\theta$$

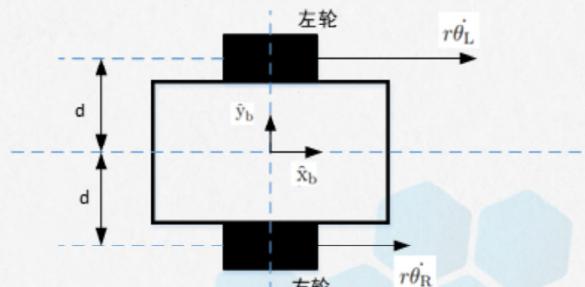
$$V_b = \begin{bmatrix} \omega_{bz} \\ v_{bx} \\ v_{by} \end{bmatrix}$$

**三轮全向**

$$V_b = H^\dagger(0)\Delta\theta = r \begin{bmatrix} -1/(3d) & -1/(3d) & -1/(3d) \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & -1(2\sin(\pi/3)) & 1/(2\sin(\pi/3)) \end{bmatrix} \Delta\theta$$

**四轮全向**

$$V_b = H^\dagger(0)\Delta\theta = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} -1/(l+w) & 1/(l+w) & 1/(l+w) & -1/(l+w) \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \Delta\theta$$



**两轮差速** 驱动机器人或后轮驱动汽车

$$V_b = H^\dagger(0)\Delta\theta = r \begin{bmatrix} -1/(2d) & 1/(2d) \\ 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_L \\ \Delta\theta_R \end{bmatrix}$$

## 移动机器人控制

移动机器人里程计

### 移动机器人里程计

$$\text{如果 } \omega_{bz} = 0, \Delta q_b = \begin{bmatrix} \Delta\phi_b \\ \Delta x_b \\ \Delta y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_{bx} \\ v_{by} \end{bmatrix}$$

$$\text{如果 } \omega_{bz} \neq 0, \Delta q_b = \begin{bmatrix} \Delta\phi_b \\ \Delta x_b \\ \Delta y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{bz} \\ (v_{bx}\sin\omega_{bz} + v_{by}(\cos\omega_{bz} - 1))/\omega_{bz} \\ (v_{by}\sin\omega_{bz} + v_{bx}(1 - \cos\omega_{bz}))/\omega_{bz} \end{bmatrix}$$

$k$ 时刻底盘在全局坐标系 $\{s\}$ 中的方向角为 $\phi_k$ , 那么机器人在全局坐标系下的位形变化 $\Delta q$ :

$$\Delta q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_k & \sin\phi_k \\ 0 & -\sin\phi_k & \cos\phi_k \end{bmatrix} \Delta q_b$$

那么在 $k+1$ 时刻下的底盘位形里程计估计值为:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q$$

综上所述, 我们可以采用底盘坐标系下的刚体运动旋量 $V_b$ 以及底盘方位角 $\phi_k$ 计算底盘位形里程计估计值。其中,  $V_b$ 可用式(6-96)的形式表达为轮子的角度变化值 $\Delta\theta$ 的函数。计算得到这个底盘位形里程计估算值, 就可以将其用于类似式(6-95)表示的反馈控制系统中。

需要注意的是, 由于车轮可能会打滑以及发生不可预见的侧滑, 速度积分计算或上述的估算方法会随着时间的推移带来越来越大的累计误差。因此移动机器人通常还会安装超声波测距、GPS、激光测距、地标等位置传感器, 对里程计进行补充计算。这些传感器的误差虽然不会累积, 但其测量模式本身具有不确定性。一般来说, 通过速度积分估算的里程计, 通常需要通过其他传感器周期性地进行校正, 并在基于卡尔曼滤波、粒子滤波等方法的估计框架中与其他类型传感器进行融合。

本章重点关注刚性机器人的控制, 有关柔性机械臂以及弹性关节、移动机械臂(可认为是移动机器人(浮动基)+机械臂)等控制并未涉及。本章内容仅介绍了一般机器人的基本反馈控制方法, 将非线性系统简化为线性系统进行处理, 该类控制方法在一般的刚性工业环境中可以解决大部分的实际问题。伴随着机器人技术的发展, 机器人可以完成的任务越来越高级, 其作业环境以及任务要求也越来越复杂, 有关非线性系统的控制, 需要读者继续深入学习现代控制理论中的一些方法, 例如状态空间、鲁棒控制、自适应控制、迭代学习、被动柔顺、变阻抗执行器、柔顺控制等内容。

# 05

## 扩展阅读

➤伴随着机器人技术的发展，机器人可以完成的任务越来越高级，其作业环境以及任务要求也越来越复杂，机器人控制问题已经不再仅仅是一个轨迹控制精度的问题，在保证轨迹精度的同时，需要机器人具备对外部环境的感知能力，并能够做出智能、快速、准确的反应和操作。

本章重点关注刚性机器人的控制，讨论的许多模型及控制方法是在理想环境下开展的，与实际应用还存在一定的区别，也未涉及有关柔性机械臂以及弹性关节、移动机械臂（可认为是移动机器人（浮动基）+机械臂）等控制。机器人控制需要面临许多的问题，如移动机器人控制，实际应用中普遍存在打滑、定位丢失、模型不准确、测量误差、环境变化等现象，这会使得一些简单的控制策略达不到预期的效果。机械臂控制也存在相同的问题，模型误差、缺乏环境感知和适应能力等。伴随着机器人技术的发展，机器人可以完成的任务越来越高级，其作业环境以及任务要求也越来越复杂，机器人控制问题已经不再仅仅是一个轨迹控制精度的问题，在保证轨迹精度的同时，需要机器人具备对外部环境的感知能力，并能够做出智能、快速、准确的反应和操作。

## 传统的研究思路：现代控制理论

### 非线性系统的控制问题：

- 状态空间
- 鲁棒控制
- 自适应控制
- 迭代学习
- 被动柔顺
- 变阻抗执行器
- 柔顺控制

### 学习控制

### 结合AI：赋予机器人控制器学习能力

强化学习 模仿学习 多模态

自主交互学习 具身智能

sim2real .....

但是，机器人现有的感知与控制能力还无法完全满足动态变化的环境以及日益复杂的任务。机器人控制系统面临的是一个复杂多变量耦合的非线性系统，大量不同类型的传感器测量数据，动态且未知的环境特征。

现代控制理论中有一些方法可以被用来解决有关非线性系统的控制问题，例如状态空间、鲁棒控制、自适应控制、迭代学习、被动柔顺、变阻抗执行器、柔顺控制等内容。需要控制器或控制策略能够自主抑制扰动对系统造成的影响，一种典型思路是自适应控制方式。自适应控制方式具备一定的环境适应能力，可以根据环境变化动态调节控制策略。此外，还希望控制策略能够像人类一样，能够在不断重复中来完善技巧，这时可以采用迭代学习的思路。其基本做法是：对于一个在有限时间区间内执行轨迹跟踪任务的机器人，利用前一次或前几次操作时测得的误差信息修正控制输入，使得该重复任务在下一次操作过程中做得更好。如此不断重复，直至在整个时间区间内输出轨迹跟踪期望轨迹。

现代控制理论中主要还是基于模型的控制方法。在第三章和第四章已经对机器人运动学和动力学建模方法进行了基础的介绍，无论运动学模型和动力学模型，想要完整精确建模是非常困难的，这限制了现代控制理论在机器人应用中的进一步发展。

赋予机器人控制器学习能力是使机器人能够真正实现人机协作和应对复杂环境的关键。

强化学习方法的出现为机器人控制提供了另外一种思路--自主交

互学习。强化学习是深度学习的一个分支，强化学习通过与环境交互不断试错来学习，机器人可以自行学习操作技能，避免了复杂建模和繁琐的人工调参。但是，强化学习需要巨大的样本量，这对于实际机器人来说是非常困难的。为解决样本量带来的挑战，提出了sim2real的方法，也就是从仿真到现实。通过从现实世界数据中学习机器人的基本物理特性以及执行器特性，在仿真环境中搭建于现实世界相近的场景，然后在仿真环境中进行大量的模拟训练，训练完成后，将训练好的策略应用到真实场景中。这种方式让机器人具备了自主从环境中学习控制策略的能力，许多难以实现的应用成为了可能，感兴趣的读者可以继续查阅相关文献。

## 习题

1. 简要说明机器人控制的概念、类型以及基本组成。
2. 根据控制目标的类型，可以将机器人控制分为哪些类型？
3. 机器人运动学标定的目的是什么？一般包含哪些步骤？
4. 机器人控制系统按照控制逻辑的层次，可划分为哪三层，各自完成什么任务？
5. 获取机器人动力学参数的常用方法有哪些？一般的动力学参数辨识方法包含哪些步骤？

## 程序设计

1. 编程实现AUBO-i5的运动学参数标定，比较标定算法和厂家自带标定算法的精度，并撰写实验报告。
2. 编程实现AUBO-i5的工具坐标系标定，比较标定算法和厂家自带标定算法的精度，并撰写实验报告。
3. 编程实现AUBO-i5的动力学参数辨识，并撰写实验报告。
4. 给定某6轴协作机械臂肩关节的电机和驱动器参数，如表6.2。针对图6.18，请将控制框图细化，并在matlab/Simulink中进行单关节的模型仿真，分别设计该关节的P/PD/PID控制器以及前馈控制并编程实现，设计输入为设定点以及轨迹跟踪实验，分析 $K_p$ 、 $K_d$ 、 $K_i$ 参数对控制性能的影响，并撰写实验报告。
5. 以三轮（四轮麦克纳姆轮）全向移动机器人为例，进行模型仿真，实现基于线性近似轨迹跟踪控制器设计，设计轨迹为直线、圆、8字形、正方形实验等实验，比较分析加入不同反馈控制的性能。
6. 以三轮（四轮麦克纳姆轮）全向移动机器人为例，分析里程计的误差来源，设计包含笛卡尔坐标校正与姿态校正算法及实验。

表 6.2 肩关节电机参数

电机类型	功率	额定电压	连续电流	反电动势常数	转矩常数	相电阻	定子 d/q 等效电感	极数	定转子质量
永磁同步电机	400 W	48 V	11.5 A	9.8Vrms/Krpm	0.155 Nm/A rms	0.12 欧	0.3mH	12	1.71kg

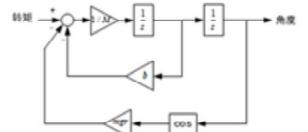
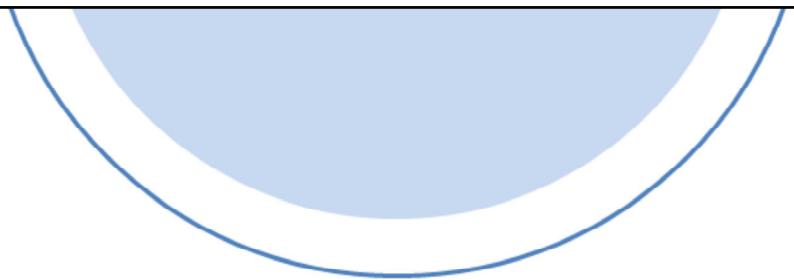


图 6.18 输入为力矩的独立关节动力学控制模型

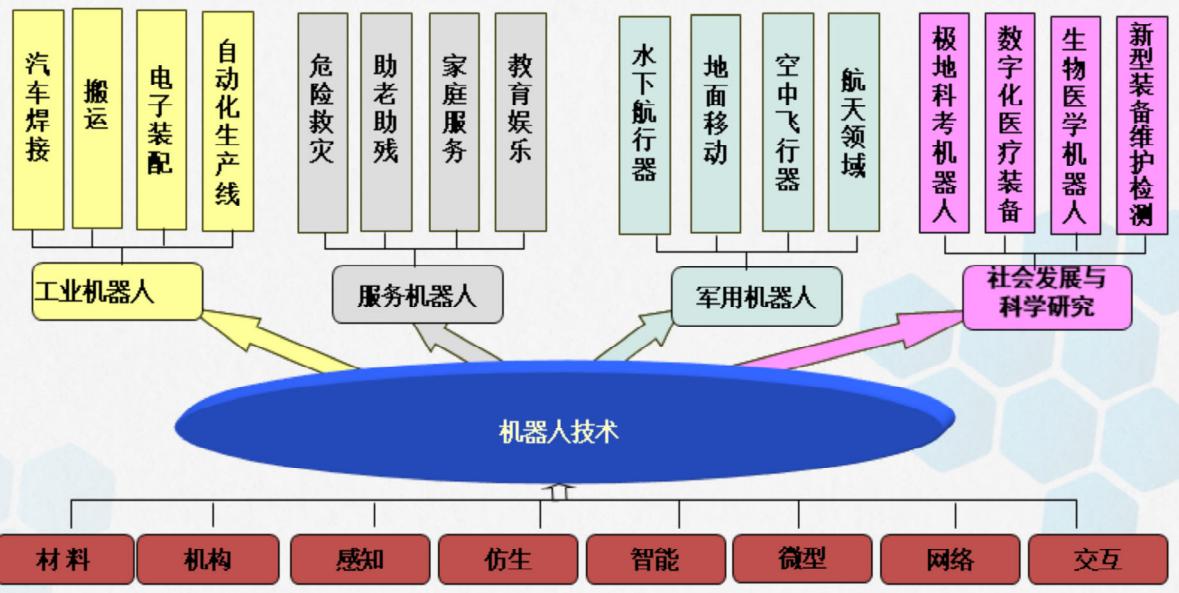


# THANK YOU

标题、正文等都可以通过点击进行修改，可以对字体、字号、颜色、行距进行修改。

添加文字

## 机器人技术涉及的学科知识\*

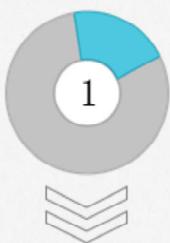


近年来，机器人在社会生活和劳动生产上的应用越来越广泛，机器人工程专业也顺应时代发展而火热起来。但机器人专业人才的培养并不是现在才开始的。以前只是一些985的高校设置了机器人所，机器人的专业培养集中在这类研究生的人才培养方面，一直以来只是因为机器人的社会需求还没有那么突出，所以相应的院校也没有专设机器人专业。

所以对于机器人工程专业的解读，我们可以从机器人技术涉及的学科知识以及科学的研究涉及的学科知识这两个方面来进行考查。

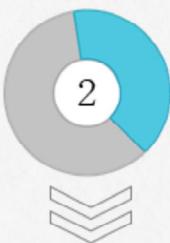
目前来看，机器人在包括工业机器人、服务机器人、军用机器人以及社会发展与科学的研究等方面有重大的需求，机器人的技术涉及到材料、机构、感知、仿生、智能、微型、网络、交互等方面的研究。

## 机器人学涉及的学科前沿交叉研究方向



### 智能化

人工智能（AI）是对人的意识、思维的信息过程的模拟，未来机器人将可以像人类一样具有自我意识，特别是脑科学的研究，会带来重大进展



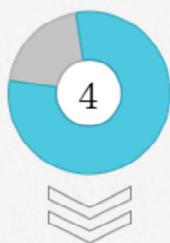
### 智能人机接口

智能人机接口如多语种语音、自然语言理解、图像、手写字识别等，可以更好地适应不同的用户和不同的应用任务，提高人与机器人交互的和谐性



### 多传感技术

传感器集成融合将促使机器人对自然环境的外界变化做出实时、准确、灵活的行为响应，机器人能够更快地适应不同要求的作业场合



### 网络化

利用通信网络技术将各种机器人连接到计算机网络上，并通过网络对机器人进行有效的控制，同时实现各种（云）数据的互联共享



### 仿生智能材料

利用仿生智能材料，可以设计多自由度运动形式仿生驱动，有望在仿生机器人、智能传感、微机电、生物医疗、航空航天等领域获得广泛应用

**“Tosense, toact, toadapt, tolearn, toevolve, tobeintelligent, todisappear”**

机器人学相关的科学研究最新成果也很先进，引起了自然、科学等杂志的重要关注。《科学》杂志自1880年创立后，200多年左右的时间，已经发展为世界顶级期刊，成为全世界最权威的学术期刊之一。《科学》在2017年迎来一位新成员：《科学·机器人学》。《科学·机器人学》编辑之一的杨广中教授认为当今的机器人，包括“达芬奇”机器人缺乏智能性和针对性。鉴于目前外科手术机器人的缺点，杨广中教授提出了未来医疗机器人的发展目标—“**Tosense, toact, toadapt, tolearn, toevolve, tobeintelligent, todisappear**”（翻译中文就是：感知，操控，适应，学习，进化，智能化，最终与人融为一体）