

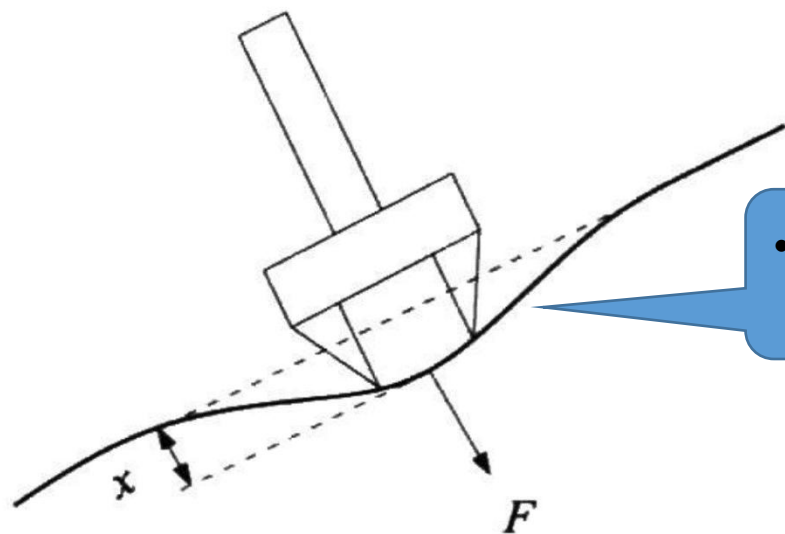
机器人建模与控制

第9章 机器人力控制

9.2 阻抗控制

9.2.1 阻抗控制策略

- 力位混合控制：力约束和位置约束相互正交（该结论在机器人和环境没有摩擦且都为完全刚性的理想条件下成立）

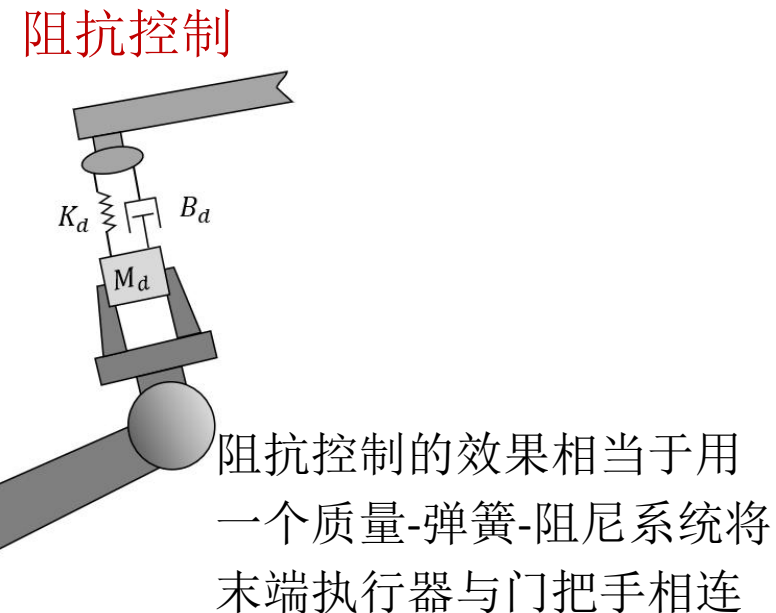
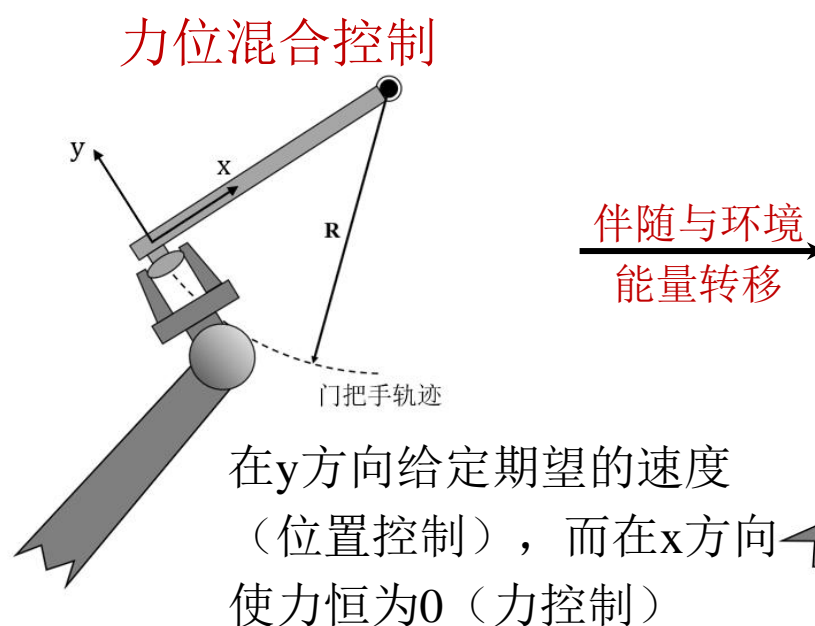
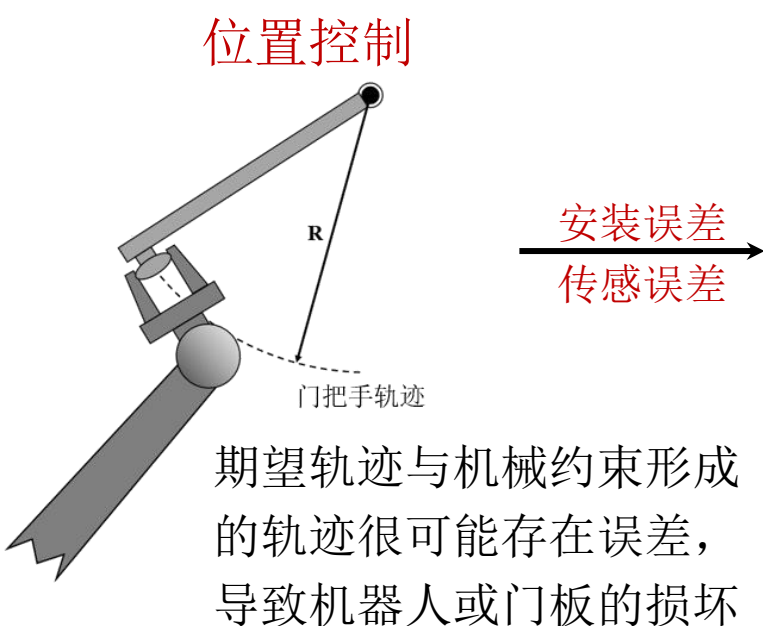


- 如果考虑环境变形，此时有垂直于接触面的力和运动

9.2 阻抗控制

9.2.1 阻抗控制策略

- 在许多情况下，交互过程往往伴随着能量的转移，这时单一的位置、速度或力控制就不足以控制交互过程的能量流动。
- **阻抗控制：**设计控制器使交互力与机械臂位置之间呈现出期望的关系，从而实现柔顺控制
 - 这种关系即机械阻抗，一般用一组质量-弹簧-阻尼系统表示
 - 不显式给出环境形变与接触力之间的关系
 - 适用于要求接触力“保持比较小的状态”，但不要求跟踪力轨迹的任务



9.2 阻抗控制

9.2.2 阻抗控制器

■ 机械阻抗 (Mechanical Impedance)

定义：复频域内作用力与速度的比值 $F(s)/\dot{X}(s)$ ，其倒数称为机械导纳

假设一个质量-弹簧-阻尼系统可以用以下微分方程描述：

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F$$

则该系统的机械阻抗为 $Z(s) = \frac{F(s)}{\dot{V}(s)} = Ms + B + \frac{K}{s}$

可以看出，机械阻抗是一个与频率相关的量，低频时的响应主要由弹性项 (K) 决定，而高频时的响应主要由惯性项 (M) 决定

■ 理想的位置控制器对应高阻抗，要外力干扰下维持运动状态不变

$$\frac{F(s)}{\dot{X}(s)} = \infty, \dot{X}(s) = \frac{F(s)}{\infty} = 0$$

■ 理想的力控制器对应低阻抗，要保持期望的作用力，不受位置变化的干扰

$$\frac{F(s)}{\dot{X}(s)} = 0, F(s) = 0\dot{X}(s)$$

■ 理想的位置控制器和力控制器可以看作阻抗控制在阻抗为无穷大或零时的特例

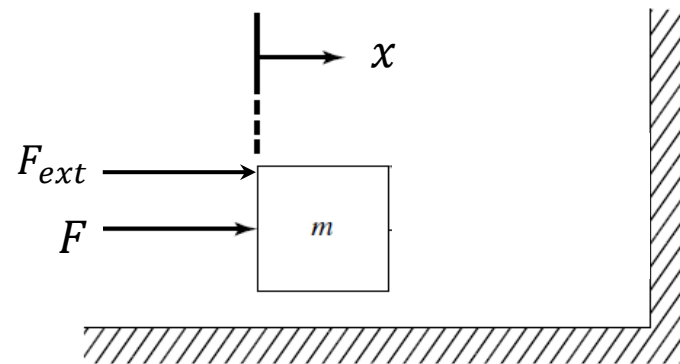
■ 在实际中，机器人能够实现的阻抗范围是有限的

9.2 阻抗控制

■ 阻抗控制

考虑一个简单的一自由度系统：一个质量块与环境进行接触，质量块位移为 x ，质量为 m ， F_{ext} 和 F 分别为环境施加的力和控制力，质量块的运动方程为：

$$m\ddot{x} = F + F_{ext}$$



若质量块期望轨迹为 $x_d(t)$ ，令 $\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t)$ 表示运动的跟踪误差，则阻抗控制目标可以表示为

$$M_d \ddot{\tilde{x}} + B_d \dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x} = F_{ext}$$

式中， M_d ， B_d ， K_d 分别表示期望的惯量、阻尼和刚度，可以通过调整来调节质量块与环境接触时的机械阻抗，三个中任意一个较大时，成为高阻抗；若三个参数都很小，则称为低阻抗。

阻抗控制可以分为两种形式：**阻抗控制（Impedance Control）**和**导纳控制（Admittance Control）**，在一些文献中，这两种形式被成为基于力的阻抗控制和基于位置的阻抗控制

9.2 阻抗控制

■ 阻抗控制率的推导

质量块运动方程: $m\ddot{x} = F + F_{ext}$

阻抗控制目标: $M_d\ddot{\tilde{x}} + B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x} = F_{ext}$

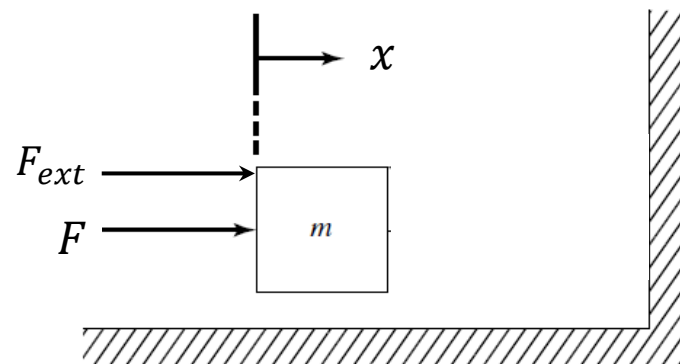
↓ $F = ?$

$$F = m\ddot{x} - F_{ext} = m\ddot{x} - M_d\ddot{\tilde{x}} - B_d\dot{\tilde{x}} - K_d\tilde{x}$$

↓ $\tilde{x} = x - x_d$
 $m\ddot{x} = m\ddot{x}_d + m\ddot{\tilde{x}}$

阻抗控制律: $F = m\ddot{x}_d + (m - M_d)\ddot{\tilde{x}} - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$

跟踪误差的二阶导数



9.2 阻抗控制

■ 阻抗控制的两种形式

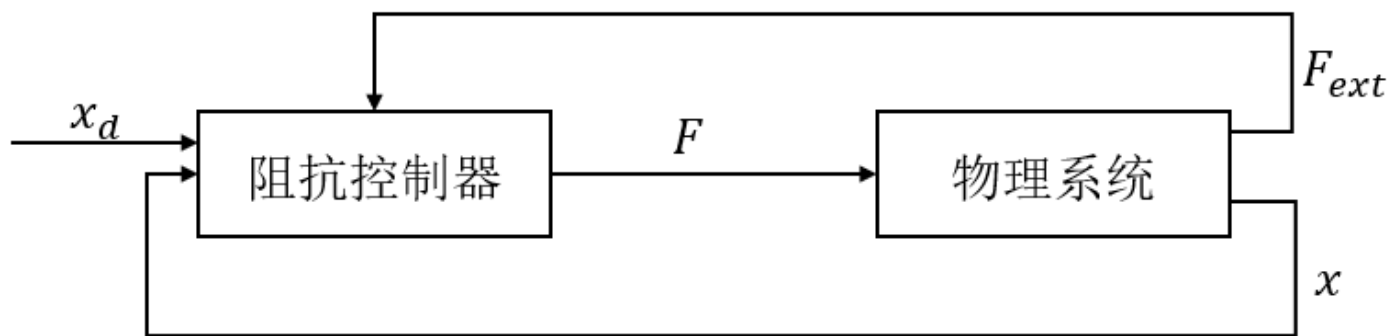
阻抗控制：在阻抗控制中，传感器测量当前位置与目标位置的偏差，并调整控制力的大小来达到预期的阻抗关系，基本控制律为：

$$F = m\ddot{x}_d + (m - M_d)\ddot{\tilde{x}} - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$$

上式出现了跟踪误差的二阶导数，这可能会引入严重的测量噪声。如果能测量环境力，则可以修改控制律以消去二阶导数项：

$$F = m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_d} (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x}) + \left(\frac{m}{M_d} - 1 \right) F_{ext}$$

阻抗控制框图：



- 控制器表现为机械阻抗
- 物理系统表现为机械导纳

9.2 阻抗控制



$$F = m\ddot{x}_d + (m - M_d)\ddot{\tilde{x}} - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$$



$$\begin{aligned}\tilde{x} &= x - x_d, \ddot{\tilde{x}} = \ddot{x} - \ddot{x}_d \\ m\ddot{x} &= F + F_{ext} \\ \ddot{\tilde{x}} &= \frac{F + F_{ext}}{m} - \ddot{x}_d\end{aligned}$$

$$F = m\ddot{x}_d + (m - M_d)\left(\frac{F + F_{ext}}{m} - \ddot{x}_d\right) - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$$

$$\cancel{F} = \cancel{m}\ddot{x}_d + \cancel{F} + F_{ext} - \cancel{m}\ddot{x}_d - \frac{M_d}{m}F - \frac{M_d}{m}F_{ext} + M_d\ddot{x}_d - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$$

$$\frac{M_d}{m}F = M_d\ddot{x}_d + F_{ext} - \frac{M_d}{m}F_{ext} - (B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x})$$

$$F = m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_d}(B_d\dot{\tilde{x}} + K_d\tilde{x}) + \left(\frac{m}{M_d} - 1\right)F_{ext}$$

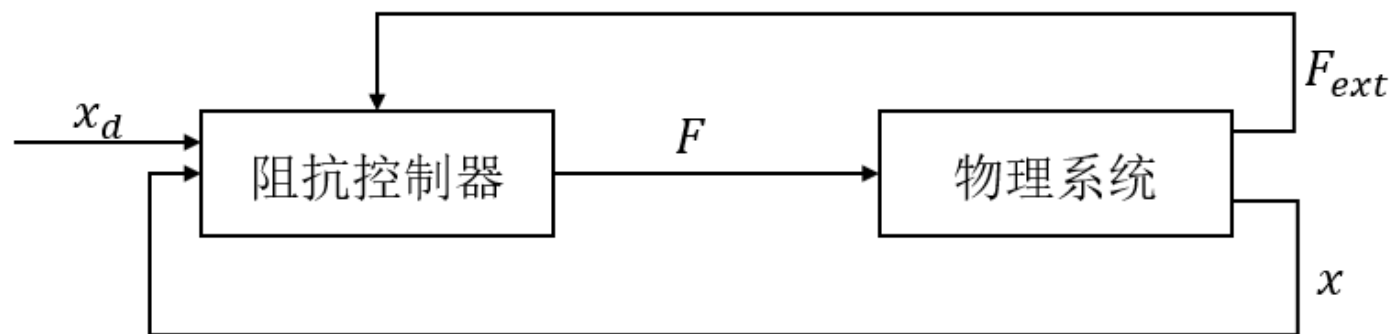
使用外力测量的阻抗控制器

9.2 阻抗控制



■ 导纳控制

阻抗控制框图：



- 阻抗控制基于测量的位置来控制外力，需要直接对关节力矩进行控制，但很多机械臂不开放底层力矩控制接口
- 此时可以使用导纳控制来实现与环境接触时的阻抗特性。导纳控制基于测量的外力来控制位置，只需要发送位置/速度指令
- 考虑之前的一自由度模型。在导纳控制器中，环境力 F_{ext} 通过二阶导纳模型生成一个附加的运动信号，将预期的运动轨迹 x_d 变为新的运动轨迹 x_m

9.2 阻抗控制

$$M_d \ddot{\tilde{x}} + B_d \dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x} = F_{ext}$$

控制目标



■ 阻抗控制的两种形式

导纳控制：机械导纳为机械阻抗的倒数，在导纳控制中，物理系统接收位置输入，测量环境力并给出运动信号，根据下式：

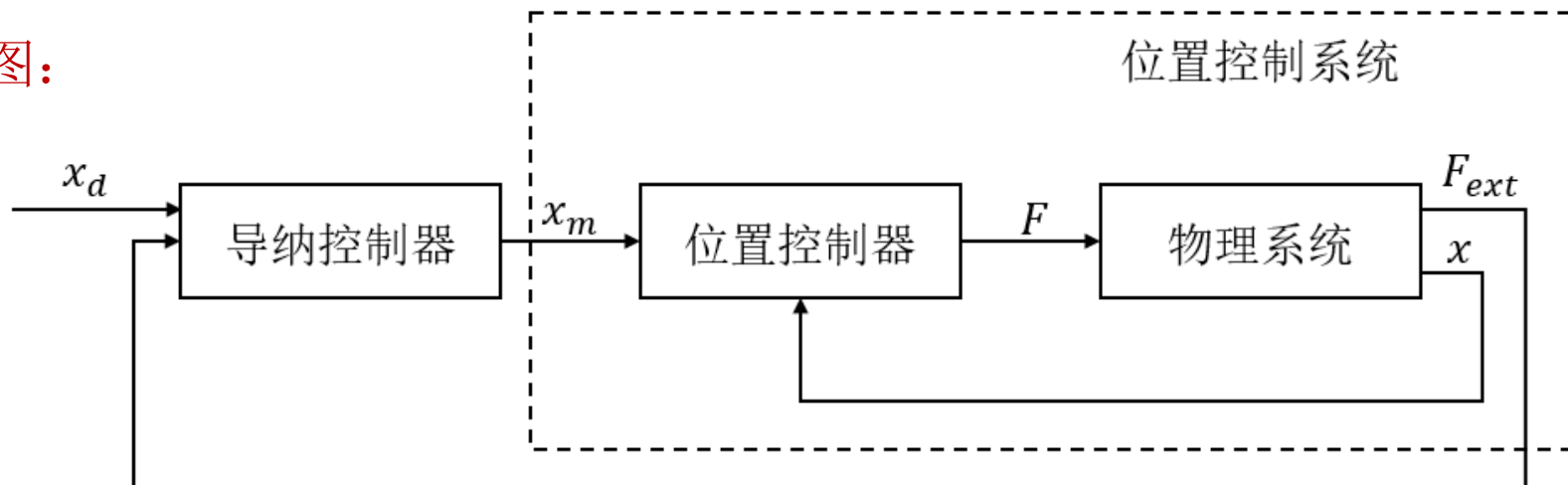
$$M_d (\ddot{x}_m - \ddot{x}_d) + B_d \dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x} = F_{ext}$$

来计算所需的加速度，求解得到：

$$\ddot{x}_m = \ddot{x}_d + \frac{1}{M_d} (F_{ext} - B_d \dot{\tilde{x}} - K_d \tilde{x})$$

再对所求得的加速度做两次积分，得到新的运动轨迹并送入位置控制环，来完成最终的控制

导纳控制框图：



9.2 阻抗控制

9.2.3 机器人阻抗控制

■ 笛卡尔空间阻抗控制

回顾已学内容，机器人关节空间动力学模型可以表示为：

$$M(\Phi)\ddot{\Phi} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) = \tau + J^T(\Phi)F$$

其中 $J^T(\Phi)F$ 是由于末端执行器与环境接触而引起的关节负荷力/力矩向量。在笛卡尔空间阻抗控制中，希望保持机器人末端执行器的位移与环境力之间的关系，因此利用分析雅可比矩阵，需要建立笛卡尔空间的动力学模型：

$$M(\Phi)\ddot{\Phi} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) = \tau + J^T(\Phi)F$$

关节空间动力学模型



$$\dot{X} = J_a(\Phi)\dot{\Phi} \Rightarrow \ddot{X} = \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + J_a(\Phi)\ddot{\Phi} \Rightarrow \ddot{\Phi} = J_a^{-1}(\Phi)\ddot{X} - J_a^{-1}(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}$$

$$M(\Phi)(J_a^{-1}(\Phi)\ddot{X} - J_a^{-1}(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}) + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) = \tau + J^T(\Phi)F$$

9.2 阻抗控制



$$M(\Phi)(J_a^{-1}(\Phi)\ddot{X} - J_a^{-1}(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}) + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) = \tau + J^T(\Phi)F$$

$$J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)(J_a^{-1}(\Phi)\ddot{X} - J_a^{-1}(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}) + J_a^{-T}(\Phi)V(\Phi, \dot{\Phi}) + J_a^{-T}(\Phi)G(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)\tau + J_a^{-T}(\Phi)J^T(\Phi)F$$

$$J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)\ddot{X} - J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + J_a^{-T}(\Phi)V(\Phi, \dot{\Phi}) + J_a^{-T}(\Phi)G(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)\tau + J_a^{-T}(\Phi)J^T(\Phi)F$$



$$M_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)$$

$$M_X(\Phi)\ddot{X} - M_X(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + J_a^{-T}(\Phi)V(\Phi, \dot{\Phi}) + J_a^{-T}(\Phi)G(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)\tau + J_a^{-T}(\Phi)J^T(\Phi)F$$



$$V_X(\Phi, \dot{\Phi}) = J_a^{-T}(\Phi)V(\Phi, \dot{\Phi}) - M_X(\Phi)\dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}, G_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)G(\Phi), F_a = J_a^{-T}(\Phi)J^T(\Phi)F$$

$$M_X(\Phi)\ddot{X} + V_X(\Phi, \dot{\Phi}) + G_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)\tau + F_a$$

笛卡尔空间动力学模型

使用内环/外环控制架构设计阻抗控制律。内环控制器实现笛卡尔空间的反馈线性化，令

$$\tau = J_a^T(\Phi) \left[M_X(\Phi)a_d + V_X(\Phi, \dot{\Phi}) + G_X(\Phi) - F_a \right]$$

9.2 阻抗控制

$$\begin{aligned}
 M_X(\Phi)\ddot{X} + V_X(\Phi, \dot{\Phi}) + G_X(\Phi) &= J_a^{-T}(\Phi)\tau + F_a \\
 \tau &= J_a^T(\Phi)[M_X(\Phi)a_d + V_X(\Phi, \dot{\Phi}) + G_X(\Phi) - F_a]
 \end{aligned}
 \quad \Rightarrow \quad \ddot{X} = a_d$$

将上式代入动力学方程后，得到的闭环系统是笛卡尔空间中的一个双积分系统，令末端期望运动轨迹分别为 $X_d(t)$ ， M_d, B_d, K_d 分别表示期望惯量、阻尼和刚度矩阵， $\tilde{X}(t) = X(t) - X_d(t)$ 表示跟踪误差，则期望的阻抗关系为：

$$M_d\ddot{\tilde{X}} + B_d\dot{\tilde{X}} + K_d\tilde{X} = F_a$$

取外环控制律为 $a_d = \ddot{X}_d + M_d^{-1}[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} + F_a]$ 即可。为了将各个分量解耦，通常将期望惯量、阻尼和刚度矩阵都取为对角阵。

最终经过计算可得 **关节空间阻抗控制率** 为：

$$\begin{aligned}
 \tau &= M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)\left[\ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + M_d^{-1}(-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X})\right] \\
 &\quad + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + J_a^T(\Phi)[M_X(\Phi)M_d^{-1} - I]F_a
 \end{aligned}$$

9.2 阻抗控制



- 关节空间阻抗控制率的推导

$$\dot{X} = J_a(\Phi)\dot{\Phi} \longrightarrow \ddot{X} = J_a(\Phi)\ddot{\Phi} + \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \longrightarrow \ddot{\Phi} = J_a^{-1}(\Phi) (\ddot{X} - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi})$$

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = F_a$$

$$\longrightarrow \ddot{X} = \ddot{X}_d + M_d^{-1} \left[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} + F_a \right]$$

$$M(\Phi)\ddot{\Phi} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) = \tau + J_a^T(\Phi)F_a$$

$$\longrightarrow \tau = M(\Phi)\ddot{\Phi} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) - J_a^T(\Phi)F_a$$

$$\longrightarrow \tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) (\ddot{X} - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi}) + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) - J_a^T(\Phi)F_a$$

9.2 阻抗控制

$$\ddot{X} = \ddot{X}_d + M_d^{-1} \left[-B_d \dot{\tilde{X}} - K_d \tilde{X} + F_a \right]$$



$$\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left(\ddot{X} - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right) + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) - J_a^T(\Phi)F_a$$

→
$$\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d + M_d^{-1} \left[-B_d \dot{\tilde{X}} - K_d \tilde{X} + F_a \right] - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right\} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) - J_a^T(\Phi)F_a$$

→
$$\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d + M_d^{-1} \left[-B_d \dot{\tilde{X}} - K_d \tilde{X} \right] - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right\} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)M_d^{-1}F_a - J_a^T(\Phi)F_a$$



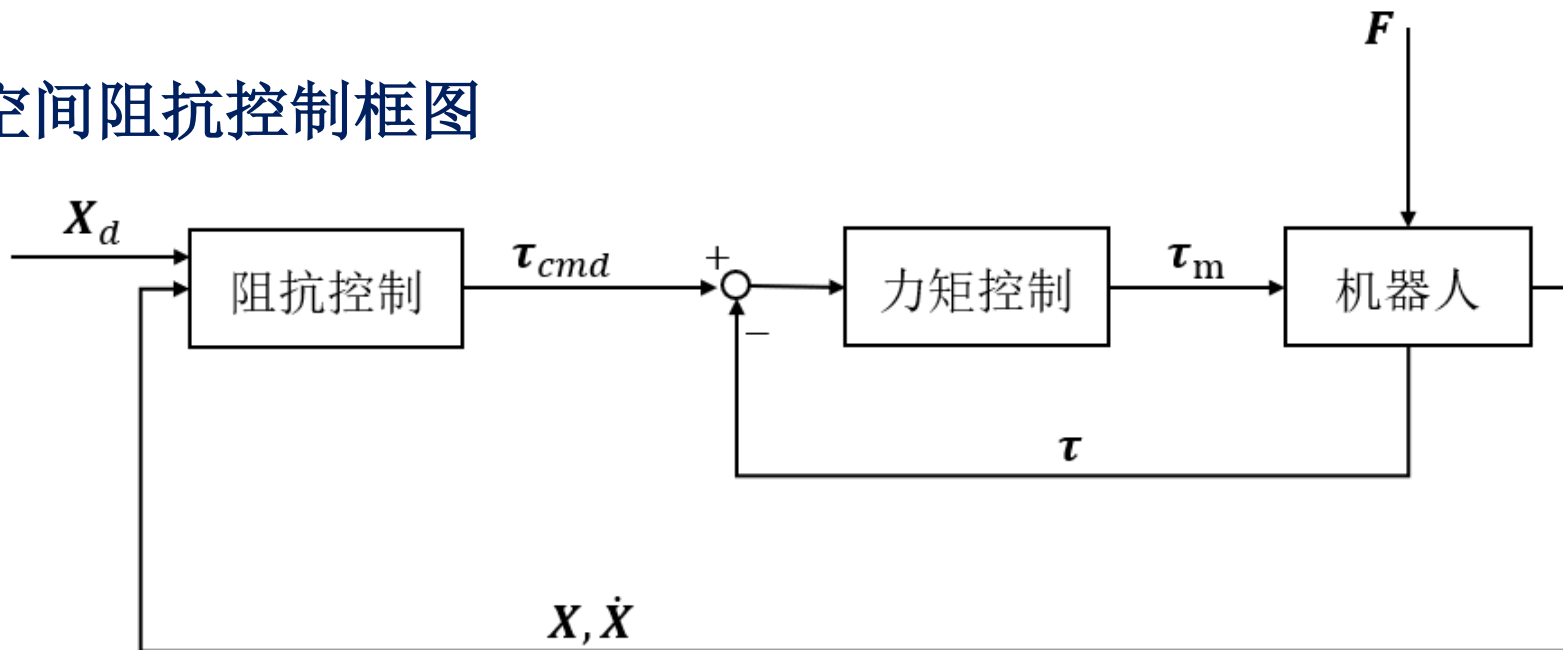
$$M_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)$$

$$M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) = J_a^T(\Phi)M_X(\Phi)$$

→
$$\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + M_d^{-1} \left[-B_d \dot{\tilde{X}} - K_d \tilde{X} \right] \right\} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + J_a^T(\Phi) \left[M_X(\Phi)M_d^{-1} - I \right] F_a$$

9.2 阻抗控制

■ 笛卡尔空间阻抗控制框图



■ $X_d(t)$ 选取

$$M_d(\ddot{X} - \cancel{\ddot{X}_d}) + B_d(\dot{X} - \cancel{\dot{X}_d}) + K_d(X - X_d) = F_a$$

在实际任务中，需要根据任务情况选取期望末端轨迹。

在一些人机交互任务中，期望位姿 $X_d(t)$ 是一个常量，设定了机器人在自由空间中的静息位置。

9.2 阻抗控制

$$\ddot{X} = a_d = \ddot{X}_d + M_d^{-1} \left[-B_d \dot{\tilde{X}} - K_d \tilde{X} + F_a \right]$$



■ 阻抗参数选取原则

- K_d 反映末端执行器的刚度大小，为主要调节的控制参数，决定了环境接触力大小
- B_d 变化一般不影响稳态，可以用来调节与环境交互的动态过程，决定响应过程
- M_d 惯性参数一般不需要进行调节，根据实际情况进行选取
- 以**互补**的方式匹配环境的动态特征（特别是环境阻抗的估计值）
- **避免**环境的未知几何特征造成的**大冲击力**，防止机械系统的损坏
- 模仿人类手臂的动作：自由运动时快速、刚性，在有限制的环境中慢速、柔性



- 在预期会与环境发生接触的方向上选择较小的 $K_{d,i}$ ，使得接触力不会太大 较小的 $a_{d,i}$
- 在预期能够自由运动的方向上选择较大的 $K_{d,i}$ ，以减小轨迹跟踪的误差 较大的 $a_{d,i}$

9.2 阻抗控制

■ 阻抗参数选取原则

$$\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + M_d^{-1} \left[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} \right] \right\} \\ + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + J_a^T(\Phi) \underbrace{[M_X(\Phi)M_d^{-1} - I]}_{\text{测量接触力的权重矩阵}} F_a$$

由于系统硬件结构、反馈信号、工作空间等不同，也存在不同构造的阻抗控制器，如果机器人不具备末端力/力矩传感器，而是依靠**准确的关节输出力矩**来表现设定的阻抗特性，则可将期望的惯量矩阵取为机器人的笛卡尔惯量矩阵

$$M_d = M_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) = (J_a(\Phi)M^{-1}(\Phi)J_a^T(\Phi))^{-1}$$

关节控制律 $\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left(\ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right) + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + J_a^T(\Phi) \left(-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} \right)$

9.2 阻抗控制

如果在设计阻抗控制律时将期望的惯量矩阵取为机械臂的笛卡尔惯量矩阵：

$$M_d = M_X(\Phi) = J_a^{-T}(\Phi)M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) = (J_a(\Phi)M^{-1}(\Phi)J_a^T(\Phi))^{-1}$$

$$\begin{aligned}\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} + M_d^{-1} \left[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} \right] \right\} \\ + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + J_a^T(\Phi) \left[M_X(\Phi)M_d^{-1} - I \right] F_d\end{aligned}$$

→

$$\begin{aligned}\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right\} \\ + M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)M_d^{-1} \left[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} \right] \\ + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta)\end{aligned}$$

$$M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi)M_d^{-1} = J_a^T(\Phi)$$

→

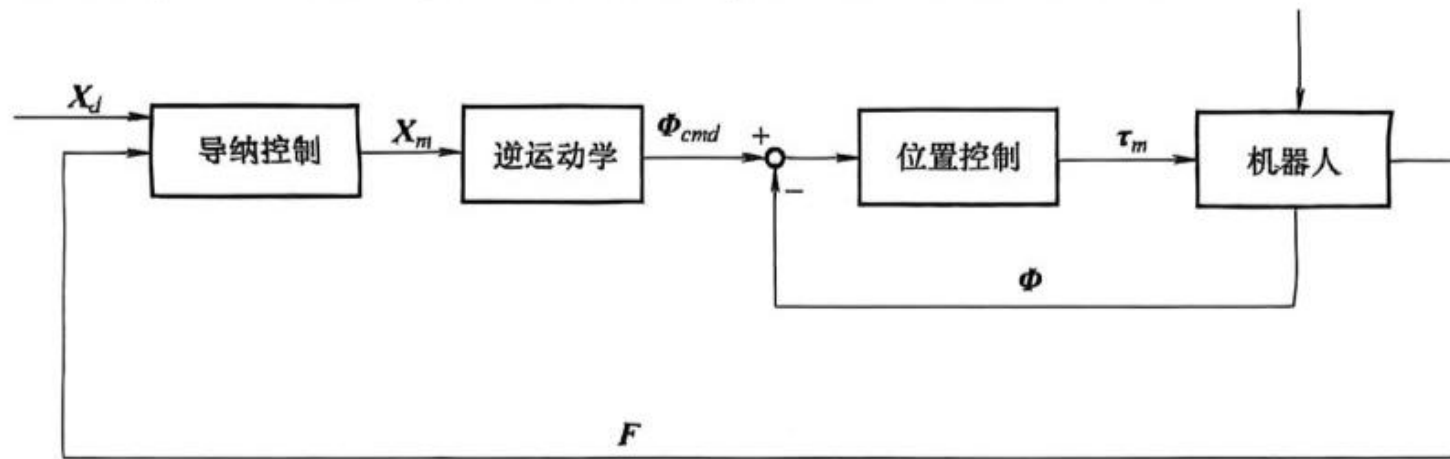
$$\begin{aligned}\tau = M(\Phi)J_a^{-1}(\Phi) \left\{ \ddot{X}_d - \dot{J}_a(\Phi)\dot{\Phi} \right\} + V(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) \\ + J_a^T(\Phi) \left[-B_d\dot{\tilde{X}} - K_d\tilde{X} \right]\end{aligned}$$

9.2 阻抗控制



■ 笛卡尔空间导纳控制

- 阻抗控制方法属于隐式力控制，无法用于跟踪特定的力轨迹
- 导纳控制中，物理系统接收位置输入，表现出机械阻抗的特性；控制器可以被视为机械导纳，测量环境力并给出运动信号。
- 导纳控制必须有环境接触力反馈，因此机械臂需要装备力/力矩传感器



导纳控制框图

9.2 阻抗控制



■ 笛卡尔空间导纳控制器设计

- 阻抗控制基于测量的位置来控制外力，需要直接对关节力矩进行控制，但很多机械臂不开放底层力矩控制接口
- 此时可以使用导纳控制来实现与环境接触时的**阻抗特性**。导纳控制**基于测量的外力来控制位置**，只需要发送位置/速度指令，机器人通常都有位置控制模式

$$M_d \ddot{X} + B_d \dot{X} + K_d X = F_a$$

将期望阻抗模型中的接触力替换为接触力误差 $F_e = F_r - F$ ，则新的阻抗关系可以表示为：

跟踪接触力向量 F_r

$$M_d \ddot{X} + B_d \dot{\tilde{X}} + K_d \tilde{X} = F_e$$

9.2 阻抗控制

- 实际应用中 F_r 常为定值，且许多任务中只需要在某个特定方向保持恒定的接触力
- 假设该方向上的参考位置也是定值，即 $\dot{x}_d = \ddot{x}_d = 0$

简化为单一特定方向下参考位置为定值的恒定接触力任务： $m\ddot{x} + b\dot{x} + k(x - x_d) = e$ $e = f_r - f$

利用线性弹簧对环境进行建模 $F = K_e(X - X_e)$ ，得到 $x = \frac{1}{k_e}f + x_e = \frac{1}{k_e}(f_r - e) + x_e$

- k_e : 环境刚度
- x_e : 未发生形变的环境表面的位置

↓

$$\ddot{x} = -\frac{1}{k_e}\ddot{e}, \dot{x} = -\frac{1}{k_e}\dot{e}$$

带入阻抗关系可以得到 $m\ddot{e} + b\dot{e} + (k + k_e)e = kf_r - k_e k(x_d - x_e)$

$$\text{稳态误差 } e_{ss} = \frac{k}{k+k_e}[f_r + k_e(x_e - x_d)] \Rightarrow x_d = x_e + \frac{f_r}{k_e} \Rightarrow e_{ss} = k_{eq}\left[\frac{f_r}{k_e} + x_e - \left(x_e + \frac{f_r}{k_e}\right)\right] = 0$$

9.2 阻抗控制



■ 控制方法对比

阻抗控制

- 环境 = 发生微小有限形变的机械系统
- 两个耦合动态系统（机器人和环境）之间的交互产生了接触力
- 控制器指定力与运动之间的动态关系

力位混合控制

- 机器人与刚性环境的接触限制了机器人的运动自由度
- 机器人试图违反环境施加的几何约束，因此受到接触力
- 任务空间被划分为正交的子空间，分别在其中进行力控制和运动控制

9.3 关节力/力矩控制

9.3.1 电流环控制

- 在使用直驱电机或减速比很小的情况下，关节力矩与电流之间基本成正比关系 $\tau = k_T I$ ，可以通过控制电流对输出力矩进行控制
- 在收到指定的力矩信号后，内部的电流传感器对实际电流进行反馈，并调节电机电压来输出期望的电流。在实际使用中，还需要考虑摩擦力补偿等来提高控制精度
- 这种测量方式实现简单且成本较低，但是只适用于减速比很小的情况，当电机串联复杂减速箱等环节时，摩擦力的建模难度会大大增加，同时齿轮存在空程的问题，系统中将存在较大的模型不确定性，仅通过电流环很难准确地控制输出力矩

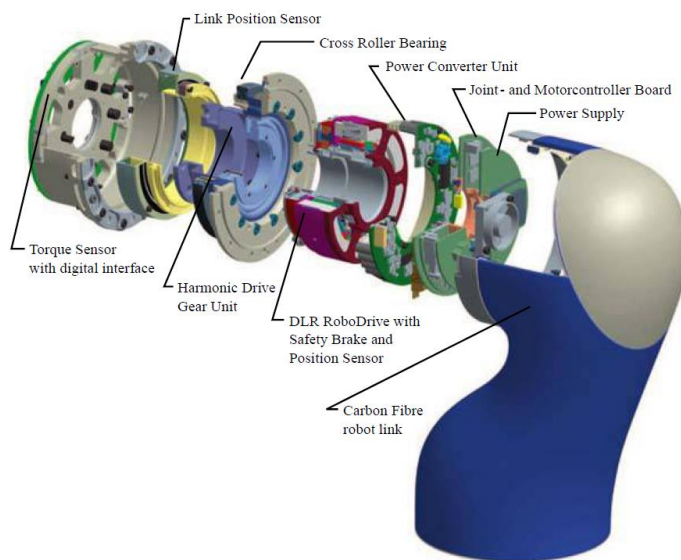


- 直驱电机想要输出足够的力矩往往需要做成很大的尺寸，因此这种方案在实际中并不常用。目前使用电流环力矩控制的代表案例是UR（Universal Robot）机器人

9.3 关节力/力矩控制

9.3.2 应变片式力矩传感器

- 在带有减速器的电机中，一种常见的方案是使用谐波减速器
- 谐波减速器具有较高的减速比，且能够基本消除空程的问题
- 在使用谐波减速器时，一般会在输出端设计弹性体，这样可以通过弹性体的形变测量扭矩，也能够保护减速箱
- 通过在弹性体上安装应变片的方式，可以对减速箱输出端的力矩进行测量，并经过反馈回路对电机电流进行调节，来产生期望的力矩

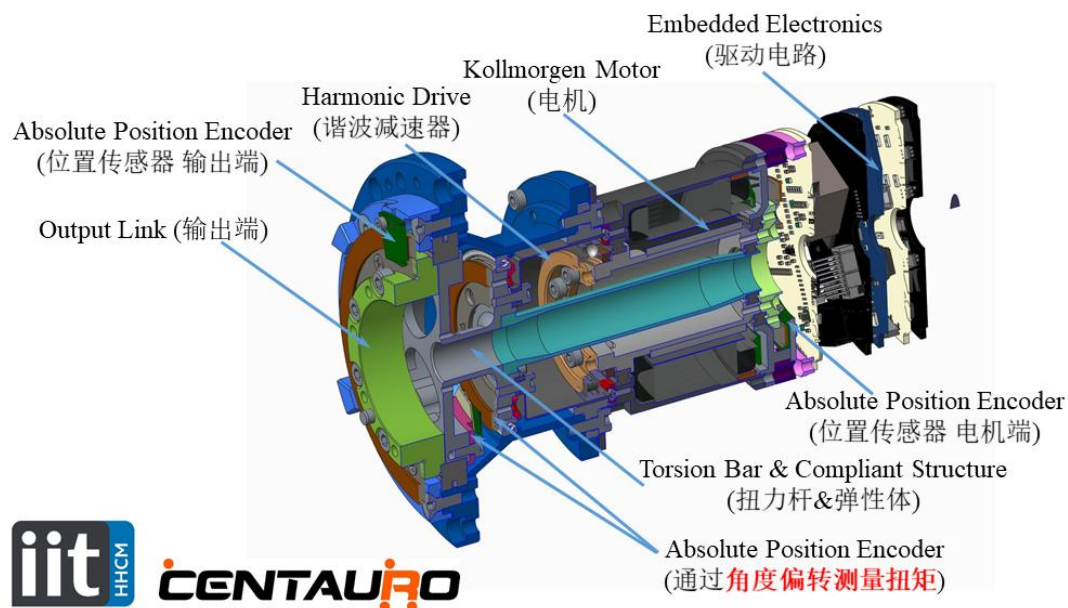


- 这种测量方式测量精度较高，但工艺比较复杂、成本较高，而且存在温漂、零漂等问题
- 增加的弹性体也会使机器人的动力学变得更加复杂，增加了高速运动时的控制难度
- 使用应变片式力矩传感器的代表案例是Kuka iiwa机器人

9.3 关节力/力矩控制

9.3.3 串联弹性驱动器

- 串联弹性驱动器（Series Elastic Actuator, SEA）同样包括电机、减速箱（通常为谐波减速器）和输出端的弹性体，但弹性体的刚度远小于使用应变片的情况
- SEA的弹性体形变相对比较明显，可以用光学、电磁或电容等传感器测量弹性体的扭转 $\Delta\phi$ ，而驱动器输出力矩为 $k_\phi\Delta\phi$ ，其中 k_ϕ 是弹性体的刚度系数
- SEA实际输出力矩通过反馈控制器调节电机电流，产生期望的力矩



- SEA中的弹性体柔性较强，因此适用于人-机器人交互的任务，但这种结构同样会使得关节构型更加复杂，而弹性体也增加了高频和高速运动的控制难度

Thanks!