

单关节力控制实验报告

第三小组

实验要求

- 设计速度控制算法，控制一个机器人关节以恒定速度连续旋转，转速控制精度 $<2\%$ ；
- 设计力控制算法，在关节连续旋转过程中施加任意的阻力，关节能够实现柔顺适应；当阻力消失后，关节能够继续维持连续旋转；
- 在给定的参考代码基础上，调节控制器参数，观察力控制效果

实验原理与方法

实验提供的控制系统中，将期望的关节力矩 F_d 、环境受力 F_{ext} 及关节的期望速度 v_d 与实际速度、加速度作为输入，对关节的速度进行了控制，使关节在施加阻力时适应效果相对柔顺，而没有对关节力矩进行控制。引入的导纳控制器的系统方程如下：

$$M(\ddot{a}) + D(\dot{v} - \dot{v}_d) = F_{ext} - F_d$$

求解该微分方程可以得到：
$$v(t) = \frac{F_{ext} - G + Dv_d}{D} + \frac{DV_0 - (F_{ext} - G)}{D} e^{-\frac{D}{M}t}$$

其形式上近似于 $v = ke^{-\alpha t} + b$ ，具有类似质量-弹簧-阻尼系统的阻尼效果。其中 α 由 M 、 D 共同影响， k 受 D 影响。 M 在时间尺度上影响系统响应， D 在幅值大小及时间尺度上均有影响

实验结果与分析

在实验中，我们无法得知关节力矩的具体形式及参数，只能进行通过控制速度进行间接力控制，使系统具有类似于弹簧的阻尼效果，加速度连续因而关节力矩也柔顺

```

# 初始参数
dq_d = 1 # 目标速度
dq_r = 1 # 参考速度
servo_time = 0.02 # 控制周期
M = 10 # 惯量
D = 80 # 阻尼系数

# PID控制器参数
Kp = 170 # 比例增益
Ki = 0.05 # 积分增益
Kd = 60 # 微分增益

# 初始化 PID 控制状态
integral_T = 0 # 积分误差
previous_T_error = 0 # 上一次的力矩误差

motor.send(1, dq_r) # 发送初始速度

try:
    while True:
        # 获取电机反馈
        feedback = motor.feedback(1)
        q = feedback[0] # 位置反馈
        dq = feedback[1] # 速度反馈
        T = 0.465 * math.sin(q - 0.1) - feedback[2] # 计算力矩误差

        # 打印反馈速度
        print("feedback vel:", dq)

        # 计算 PID 控制输出
        T_error = T # 假设目标力矩为0, 因此力矩误差就是 T
        integral_T += T_error * servo_time # 累计积分误差
        derivative_T = (T_error - previous_T_error) / servo_time # 计算微分误差

        # 计算 PID 输出
        PID_output = Kp * T_error + Ki * integral_T + Kd * derivative_T
        previous_T_error = T_error # 更新上一次误差

        # 使用 PID 输出调整速度变化率
        ddq_r = (- D * (dq_r - dq_d) + PID_output) / M
        dq_r = dq_r + ddq_r * servo_time # 更新参考速度

```

```
motor.send(1, dq_r) # 发送新的参考速度
time.sleep(servo_time - 0.002) # 等待下一个控制周期
```

在计算加速度时，我们采取PID算法来处理力矩，经过参数调整，选取 $K_P = 170$ ， $K_I = 0.05$ ， $K_D = 60$ 取得的效果最佳，既能保证机械臂以指定速度匀速运动，受到外力时也非常柔顺。其中，调参的过程中发现，增大 K_P 可以增加受到外力时机械臂的柔顺程度，但机械臂速度会变慢；增大 K_I 有可能使机械臂无法做完整的圆周运动，因此应选取较小的 K_I ，增大 K_D 也会提升控制的柔顺程度，但太大会导致机械臂无法做完整的圆周运动。

实验给定代码中 M 、 D 的取值分别为10、80，已经具有了非常柔顺的控制效果。将 M 增大时，系统恢复原运动状态所需时间延长，类似于增大物体质量的效果，同时扳动机械臂将更加困难，与实验结果相符；将 M 减小则取得了相反的效果，同样符合预期。将 D 增大时，系统恢复原运动状态所需时间缩短，类似于增大弹簧阻尼的效果，实验结果亦如是；将 D 减小则取得了相反的效果。