

《智能机器人基础》课程大作业

2022 年秋季

提交方式：网络学堂

截止日期：2022 年 12 月 24 日 23:59

考虑七自由度 KUKA iiwa 机械臂：



访问以下网址可了解机器人的运动学模型、动力学模型、Jacobian 矩阵等信息：

https://ww2.mathworks.cn/help/robotics/robot-models.html?s_tid=CRUX_lftnav

任务 1：（100 分）

设计基于机器人动力学的零空间控制算法，在（第 4、第 6 关节）冗余关节受到外部扰动（ $\tau_e = 100\sin(2\pi(t - t_0))$ ）的情况下，保持末端位置不变化（演示视频参看 github 网站）。

要求：描述设计思路（20 分），分析闭环系统稳定性（20 分，提示：参看课件中的冗余关节运动学算法思路），提交代码（20 分）与运动仿真结果（20 分，包括：末端位置、关节转角、控制输入等），总结参数调整经验（20 分）。

提示：

1. 系统动力学表示为

$$M(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q)\dot{q} + g(q) = u + \tau_e$$

构造控制器

$$u = M(q)v + C(\dot{q}, q)\dot{q} + g(q) - \tau_e$$

其中

$$v = J^+v_1 + Nv_2$$

null space 项 v_2 建模成阻抗形式。

2. 仿真中如何模拟外部扰动：由于在 coppeliasim 端难以施加准确数值的外部扰动，我们在控制端的输入力矩中加上 τ_e 一项，即最终算出的控制力矩 τ 需要经过

```
1. tau = tau + tau_e;
```

再传递给coppeliasim。

任务2：（100分）

设计自适应神经网络轨迹追踪控制算法，驱动机械臂末端从 $[r_{d10}, r_{d20}, r_{d30}]$ 追踪如下时变轨迹：

$$\begin{cases} r_{d1} = r_{d10} \\ r_{d2} = r_{d20} + 0.1\sin(2\pi(t - t_0)) \\ r_{d3} = r_{d30} \end{cases}$$

要求：描述设计思路、证明控制器稳定性（20分），提交代码（20分）与运动仿真结果（20分，包括：末端位置、关节转角、控制输入等），提交自适应神经网络设计细节与权重值（weights）更新结果（20分），总结参数调整经验（20分）。

提示：

1. 可参考论文 Neural Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance; 中文参考材料《机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真》第 1 版第 3 章内容（学校图书馆网站可在线阅读）。



图书
机器人控制系统的设计与MATLAB仿真
刘金琨
北京：清华大学出版社 2008
在架 西馆(逸夫馆)三层音乐图书馆多媒体资料阅览区 (西306) (TP24 L633) 及其它馆藏地 >
在线访问

2. 可以按课上讲的方法，在关节空间中定义滑模向量 $s = \dot{q} - J_m^{-1}(q)(\dot{r}_d - \alpha(r - r_d))$ 。将闭环方程中部分未知的项 f 用一个 RBF 网络估计：把 f 看成 x 的函数（ x 是包含 $q, \dot{q}, \ddot{q}, r_d, \dot{r}_d, \ddot{r}_d$ 的向量，这么看会引入误差 ϵ ），RBF 网络输入为 x ，输出为 $\hat{f}(x)$ ，激活层为径向基函数 $\varphi(x_i) = e^{-\|x_i - c_i\|/b_i^2}$ ，其中 c_i 为中心， b_i 为方差。这两个参数需要人为给定。上述过程可以表示为

$$f = f(x) + \epsilon = W^T \varphi(x) + \epsilon$$

代码表示为（数值是随便给的，需要自己调参）

```
2. c = ones(dimension_of_x,1) * linspace(-1.5,1.5,node_num);
3. b=5;
4.
5. phi = zeros(node_num,1);
6. for j = 1:node_num
7.     phi(j) = exp(-norm(x-c(:,j))^2/(b^2));
8. end
9.
10. f = W_hat' * phi
```

3. 也可以直接在笛卡尔空间中定义滑模向量，最后算得的末端力通过 J^T 投影回关节空间，其余步骤同 1。也可以用多个 RBF 网络分别估计不同的项。方法很多，能完成任务即可。

任务3：（100分）

按照提示思路设计**基于任务空间的阻抗控制算法**，驱动机械臂末端从 $[r_{d10}, r_{d20}, r_{d30}]$ 追踪如下时变轨迹：

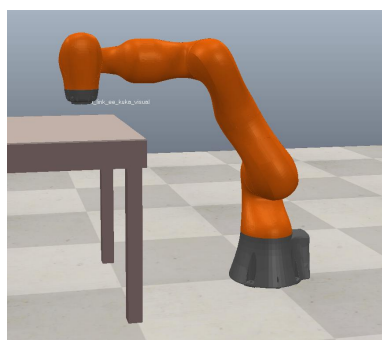
当 $t - t_0 < 1$ 时

$$\begin{cases} r_{d1} = r_{d10} \\ r_{d2} = r_{d20} \\ r_{d3} = r_{d30} - 0.25\sin(0.5\pi(t - t_0)) \end{cases}$$

当 $t - t_0 \geq 1$ 时

$$\begin{cases} r_{d1} = r_{d10} \\ r_{d2} = r_{d20} \\ r_{d3} = r_{d30} - 0.25 \end{cases}$$

末端的方向一直保持为初始方向。按照该轨迹运行时，机械臂末端会撞到场景中的桌面。



要求：描述设计思路（20 分），提交代码（20 分）与运动仿真结果（40 分，包括：末端位置、关节转角、控制输入等，分析现象），总结参数调整经验（20 分）。

提示：

1. 笛卡尔空间 6 个自由度互相解耦的期望阻抗模型为

$$M_d \ddot{\tilde{r}} + D_d \dot{\tilde{r}} + K_d \tilde{r} = F_{ext}$$

$$\tilde{r} = r_d - r$$

其对应控制输入为

$$\tau = M(q)J^{-1}(q)M_d^{-1} \left(M_d \ddot{r}_d + D_d \dot{\tilde{r}} + K_d \tilde{r} - M_d \dot{J}(\dot{q}, q) \dot{q} \right) + (J^T(q) - M(q)J^{-1}(q)M_d^{-1})F_{ext} + g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q}$$

但由于 `coppeliiasim` 无法方便地提供 F_{ext} 的数值，我们将控制器中第二行省去，即采用

$$\tau = M(q)J^{-1}(q)M_d^{-1} \left(M_d \ddot{r}_d + D_d \dot{\tilde{r}} + K_d \tilde{r} - M_d \dot{J}(\dot{q}, q) \dot{q} \right) + g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q}$$

请在设计思路中分析省略该项会对期望阻抗模型产生什么影响。

2. 但是，上述控制器不适用于冗余机械臂，我们最终采用笛卡尔空间 **pd+控制** 以及零空间控制，标准的公式为

$$\tau = J^T(q)(D\dot{\tilde{r}} + K\tilde{r}) + g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + (I - J^T J^{+T})\nu$$

为了适用于轨迹跟踪，我们加上前馈项

$$\tau = J^T(q)(\ddot{r}_d + D\dot{\tilde{r}} + K\tilde{r}) + g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + (I - J^T J^{+T})\nu$$

该控制器为本任务**最终控制器形式**。其中 $\dot{\tilde{r}}$ 可以通过 $\dot{\tilde{r}} = \dot{r}_d - J\dot{q}$ 获得，也可以通过数值差分获得（但是这两种方式的数值稳定性有差别）。

本任务需要控制机械臂末端方向，计算末端方向误差时直接使用函数 `build_error.m` 即可。有兴趣的同学可阅读其内容了解方向误差的计算方式，以及通过链接

<https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/positionOrientationTransformation.htm>

了解 `coppeliiasim` 定义方向的方式。

3. 另外，为了获得更好的仿真质量，不同于之前任务的物理引擎是 `Newton`，本任务的场景文件 `task3.ttt` 中，物理引擎更换为 `Bullet 2.78` 的形式。

