

《基于笛卡尔空间力补偿的柔性关节协作机械臂轨迹跟踪控制》

附录

附录 A 仿真与实验相关内容

1. 神经网络训练过程及配置

训练过程及配置如表 A1 所示，训练过程在一台配备 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4 @ 2.20GHz 处理器、2 张 NVIDIA GeForce GTX1080Ti GPU 的计算机上使用 C++ 语言实现，并且操作系统为 Windows 10.

表 A1 神经网络训练过程

损失函数	优化算法	样本数量	训练集	测试集	批数	Epoch	训练时间
MSE	Adam	862577	80	20	10	1000	50min

2. 实验配置

实验过程是在一台配备 Intel Core i7-8550U CPU、NVIDIA MX150 2G GPU 的计算机上使用 C++ 语言完成的，操作系统为 Windows 10.

3. 仿真用机械臂示意图及相关参数

仿真用机械臂刚体分布示意图如图 A1 所示，其参数如表 A2 所示. 表中的参数用于计算机械臂的质量矩阵和科氏力矩阵，需要说明的是所述参数并非精确的参数，仅用于仿真.

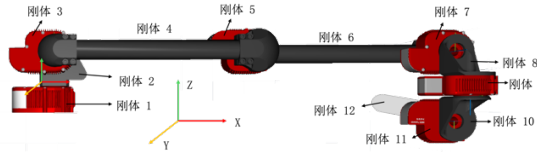


图 A1 仿真用机械臂刚体分布示意图

表 A2 机械臂刚体参数表

参数	值
关节数量	6
刚体数量	12
刚体质量	刚体 1-12 = [0.48, 0.215, 0.48, 0.32, 0.48, 0.32, 0.315, 0.1, 0.315, 0.1, 0.315, 0.1] Kg
每个刚体的惯量矩阵	刚体 1 = diag[5.94, 4.93, 2.93] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 2 = diag[2.21, 1.81, 0.91] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 3 = diag[5.94, 4.93, 2.93] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 4 = diag[50.0, 50.0, 1.12] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 5 = diag[5.94, 4.93, 2.93] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 6 = diag[50.0, 50.0, 1.12] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 7 = diag[4.10, 3.15, 1.71] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 8 = diag[0.93, 0.73, 0.50] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 9 = diag[4.02, 3.16, 1.71] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 10 = diag[0.93, 0.73, 0.50] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 11 = diag[4.02, 3.16, 1.71] Kg × 10 ⁻⁴ · m ² 刚体 12 = diag[0.93, 0.73, 0.50] Kg × 10 ⁻⁴ · m ²

4. 单关节 NN MPC 控制实验平台及 PD 控制器参数



图 A2 单关节 NN MPC 控制实验平台

5. 协作机械臂实验平台



图 A3 协作机械臂实验平台

6. 不同笛卡尔空间轨迹控制算法下关节空间位置跟踪仿真结果如图 A4 所示。

从图 A4 中关节控制仿真结果可以看出，加入补偿后的关节控制效果明显优于未加补偿的方法，在面对未知干扰时采用位置补偿方法会导致关节存在一定的震荡，而基于力补偿的方法几乎没有震荡，很好的抑制了未知干扰的影响。

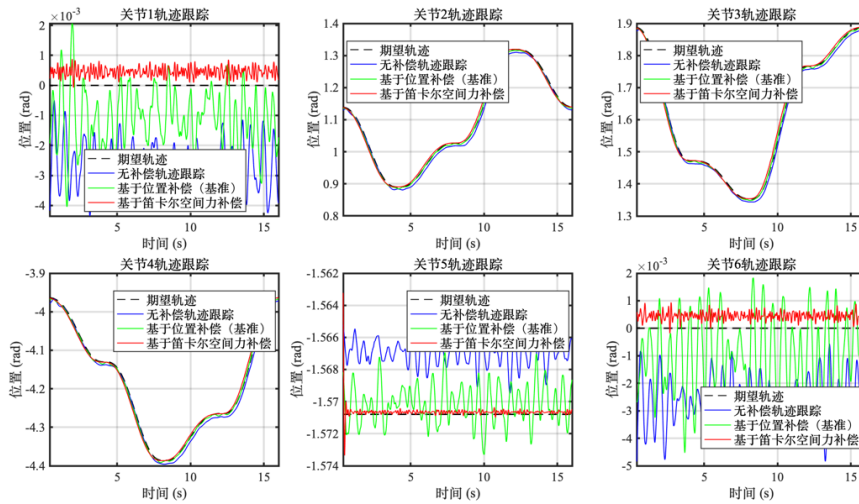


图 A4 不同笛卡尔空间轨迹控制算法下关节空间位置跟踪仿真结果

7. 不同笛卡尔空间轨迹控制算法下关节空间位置跟踪实验结果如图 A5 所示。

无补偿的轨迹跟踪、基于位置补偿的轨迹跟踪和基于笛卡尔空间力补偿的轨迹跟踪算法的关节空间位置跟踪结果如图 A5 所示。从图中可以看出，在无补偿情况下，关节空间位置跟踪效果较差，存在较大误差；使用基于位置补偿的算法时，关节位置跟踪性能有所提升，但仍然存在一定误差；然而使用本文提出的基于笛卡尔空间力补偿的算法时，关节位置跟踪性能得到了显著提升，几乎与目标轨迹一致。对比实验结果进一步说明了笛卡尔空间力补偿算法的优越性。

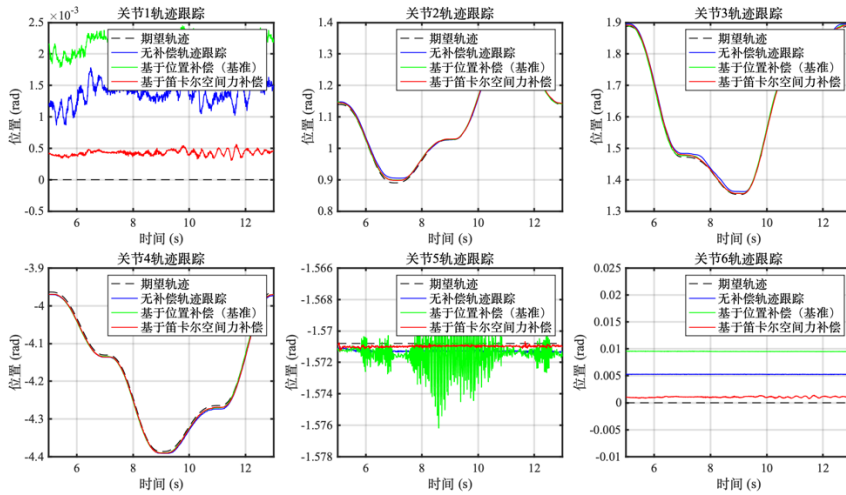


图 A5 不同笛卡尔空间轨迹控制算法下关节空间位置跟踪实验结果

8. 笛卡尔空间轨迹跟踪整体误差.

表 A3 笛卡尔空间轨迹跟踪整体误差

控制器	平均误差 (mm)	最大误差 (mm)
无补偿	4.763	8.723
位置补偿	3.622	7.231
力矩补偿	1.856	3.192

附录 B 扩展图表

1. 单关节 SEA 系统机械结构示意图及描述

串联弹性执行器 (SEA) 系统的结构如图 B1 所示, 该系统由两部分组成: 左侧为电机侧, 包括电机和齿轮减速器; 右侧为连杆侧, 由轻质量的连杆和负载组成. 这两部分通过弹性体串联在一起, 弹性体只在关节旋转的方向产生形变, 该弹性体模型可以等效为一个线性弹簧. 系统中有两个编码器分别监测连杆侧和电机侧的位置, 两个位置之差即为弹性体的形变, 通过弹性体的形变和刚度结合胡克定律可以计算出 SEA 的输出力矩.

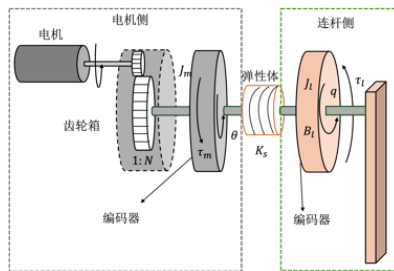


图 B1 SEA 系统机械结构示意图

2. NARX 神经网络结构示意图如图 B2 所示, 其中激活函数采用的是 ReLu 激活函数.

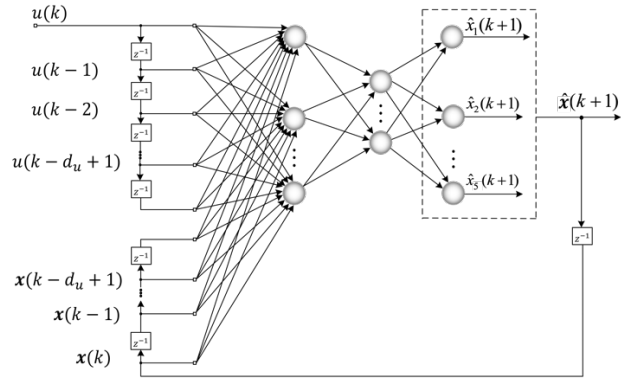


图 B2 NARX 神经网络结构图

3. 关节空间 NNMPC 控制器原理图如图 B3 所示。

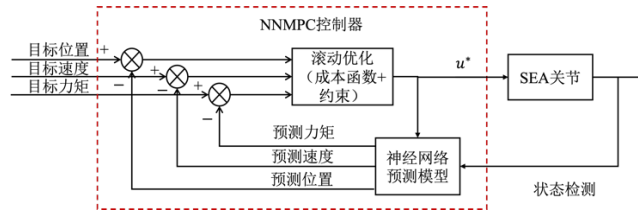


图 B3 关节空间 NNMPC 控制器原理图