

## 第六章 总结与展望

随着人工成本的增加，机器人技术的发展，机器人的应用场景变得越来越多，其中使用机器人进行力控制是一个很复杂的课题。由于力控制和视觉控制不一样，没有较为完善和统一的框架，并且在研究的过程中很多算法并没有一个很好的分类方法，所以力控制算法往往是根据具体的实现目标而具有一个特定的实现算法。本文主要使用了一些经典的力控制算法，并在实验室的 SCARA 机器人上实现了阻抗控制、力控制等实验。本论文的主要工作包括以下几个方面：

1) 本文介绍了力控制的经典控制理论，调研了被动柔顺和主动柔顺的研究现状，并且详细介绍了力位混合控制和阻抗控制的发展，比较了两种控制具有的优缺点和具体实现的时候所必须具备的条件；

2) 分析了 SCARA 的正向运动学模型、逆向运动学和雅克比矩阵，并结合 Simscape Multibody 工具箱和 Robotics System Toolbox 进行基于动力学的仿真，使用以上工具构建了基于计算力矩的位置控制器；

3) 选取了一种简单的环境交互力模型，之后通过仿真对比了基于力矩的阻抗控制和基于位置的阻抗控制器的控制效果。然后使用基于位置的变参数阻抗控制实现了力控制，并且给出了两种不同的变参数方法，最后还推导了变阻抗控制的稳定性条件；

4) 针对固高运动控制卡的特性，选择合适的运动模式，实现了电机的控制和关节零点位置的对应，并由此构造 SCARA 机器人的基本运动学。此后使用力传感器构建了虚拟力模块和阻抗控制模块，并将各个模块封装成 C++ 中的类，给出了类之间的关系图；

5) 描述了实验过程，并实现了 3D 模型的实时显示。实验的过程中，简化并实现了阻抗控制，并分析了实验数据和结果，展示了基于阻抗控制的示教过程。最后，给出了基于阻抗控制的力控制的输出结果。

由于本人能力和精力有限，加上实验室并没有可以参考的项目，而且没有一个完整的位置控制的机器人的平台，所以最后的实现以及实验部分都显得有些简单，没有深入研究目前更加热门的基于深度强化学习的阻抗控制理论或者一些基于应用的变参数阻抗控制，但是即使在现有的实验条件下，可以在以下几个方面进行继续的提高和改进：

1) 文章中并没有实现阻抗控制的完整形式，是一种易于实现的简化策略，而且本文没有做很多关于变刚度变阻尼对不同应用场景的适配，后续可以针对场景进行控制的优化；

2) 只使用了板卡 PID 位置控制，事实上对本文的实验条件，可以考虑在控制中加入速度前馈和加速度前馈；

3) 目前在编写机器人三维实时显示程序时，该软件只是接受服务器发来的机器人的数据信息，可以考虑在该程序中添加一些可以提前规划好的参数，例如离线规划的功能等，将一些提前规划好的任务通过服务器转发给机器人本体执行。

以上改进都在现有的实验平台中，但是这个平台的硬件的实时性只能尽量保证，如果想要硬性满足，必须使用基于一个实时系统的平台，例如 Vxworks 或者裁剪的实时 Linux 内核等，或者考虑使用 TwinCAT 软 PLC。另外有些运动控制卡本身带有 PT（位置时间）和 PTV（位置时间速度）可

以进行位置速度时间的同时插补，更适合阻抗控制的应用场景。对本文所做工作，可以将板卡控制类替换为新控制卡的封装，而机器人运动学层、力层面和阻抗控制层可以经过少量修改后继续使用。