

对开源机械臂 Niryo One 的国产化研究和制作

1. 引言

工业机器人可以说是现代工业的基石。凭借着与多样化传感器的协同及多轴的运动，它可以实现复杂而又精准的各种操作。然而在桌面机械臂的领域，目前的大量产品都是面向于教育领域的，在操作的精度上有所欠缺，同时部分为节约成本而做出的结构设计也存在缺陷。针对这一现状，我们提出了这一课题。我们意图采用国外成熟的开源机械臂 Niryo-One 的硬件设计，通过更改其控制的软件，引入工业上成熟的 CANBUS 总线，使其具有双向的控制方式，提高其精度及可操作性

2. 正文

本次课题研究，我们将整个流程分成多个阶段。

2.1 准备树莓派

Niryo One 提供了一份针对 Raspberry Pi 3 的 SD 卡镜像文件供下载。但由于我们需要改动源代码，因此需要搭建完整的树莓派开发环境：

通过对 Niryo One Raspberry Pi 3 image v2.2.0 恢复到树莓派并研究，决定我们的树莓派采用最适合的官方 Raspbian 操作系统。

镜像文件从 https://downloads.raspberrypi.org/raspbian_full_latest 下载。

用 Win32 Disk Imager 烧录 Raspbian 镜像文件到 TF 卡上。

树莓派正常开机后需要做以下几处 Niryo One 特殊配置：

1. Wifi 设置
2. raspi-config
A1 Expand filesystem 分区扩展到整张 TF 卡。
3. 创建 Niryo 用户

Raspbian 上安装 ROS Kinetic 系统

先期准备工作：

```
$ sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'

$ sudo apt-key adv --keyserver hkp://ha.pool.sks-keyservers.net:80 --recv-key C1CF6E31E6BADE8868B172B4F42ED6FBAB17C654
```

更新 Debian 软件包：

```
$ sudo apt-get update

$ sudo apt-get upgrade
```

安装 Bootstrap 依赖关系包:

```
$ sudo apt-get install -y python-rosdep python-rosinstall-generator python-wstool python-rosinstall build-essential cmake
```

安装 rosdep:

```
$ sudo rosdep init
$ rosdep update
```

创建 catkin 工作空间:

```
$ mkdir -p ~/ros_catkin_ws
$ cd ~/ros_catkin_ws
```

核心包:

```
$ rosinstall_generator ros_comm --rostdistro kinetic --deps --wet-only --tar
> kinetic-ros_comm-wet.rosinstall
$ wstool init src kinetic-ros_comm-wet.rosinstall
```

安装 ROS 额外包:

```
sudo apt-get install ros-kinetic-robot-state-publisher ros-kinetic-moveit
ros-kinetic-rosbridge-suite ros-kinetic-joy ros-kinetic-ros-control ros-kinetic-ros-controllers ros-kinetic-tf2-web-republisher
```

安装额外的 Python 模块:

```
sudo -H pip install jsonpickle
```

进入 catkin 工作空间并下载 Niryo One ROS 源码:

```
cd ~/catkin_ws/src
git clone https://github.com/NiryoRobotics/niryo_one_ros.git .
```

编译源代码包:

```
cd ~/catkin_ws
catkin_make
```

点命令生成执行点

```
source /opt/ros/kinetic/setup.bash
source ~/catkin_ws/devel/setup.bash
```

至此树莓派主控制器安装完毕

2.2 步进电机控制板

虽说 Niryo One 是个开源项目但它所用的步进电机控制板只有简单的原理图。

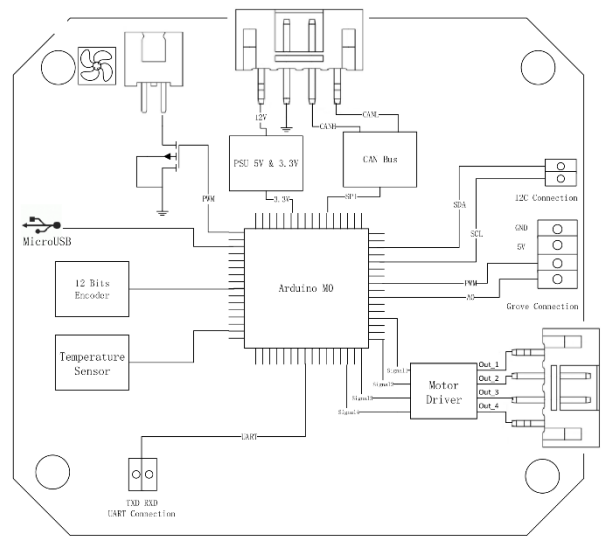


图 2.2_1 Niryo One 步进电机控制器框架图

因此我们找到具有相同功能，主控片同样也是 SAMD21G 的开源步进电机控制板 Misfittech 的 Nano Zero 来替代它。它们之间的区别如下：

| | Niryo Stepper | Nano Zero Stepper |
|------|---------------|-------------------|
| 主控片 | SAMD21G | SAMD21G |
| 电机驱动 | A4954 | A4954 |
| 磁传感器 | AS5600 | AS5047D |
| 通讯 | CAN bus | 串口 |

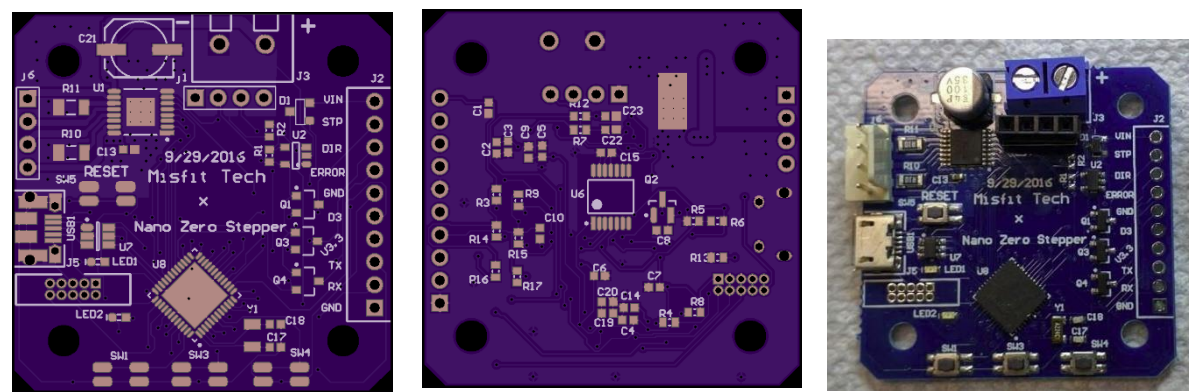


图 2.2_2 Misfittech 的 Nano Zero 电机控制板

2.2.1 磁传感器移植

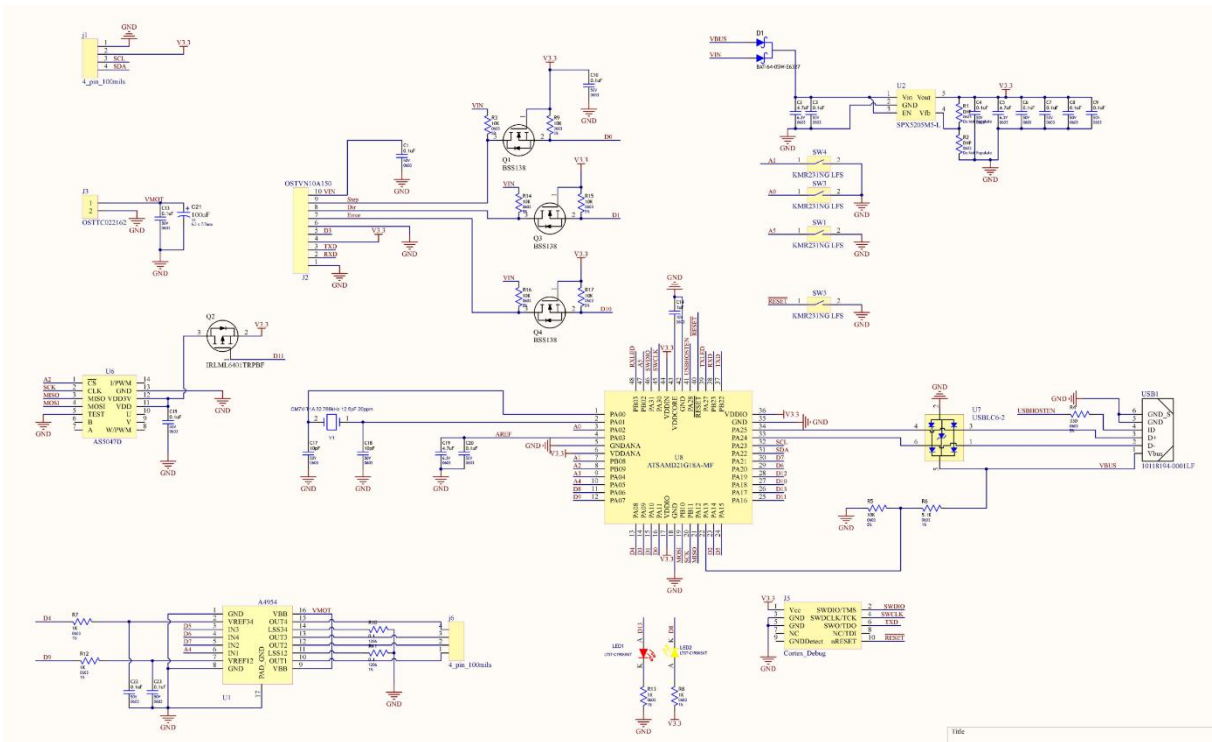


图 2.2.1 Nano Zero 电机控制板电路图

由于 niryo stepper 中原生旋转位置传感器 AS5600 与 SAM D21G 微控器之间采用的是 I2C 协议进行的通信，而 nano stepper 中的 AS5047 旋转位置传感器采用 spi 协议通讯，且 AS5600 为 12 位的输出分辨率，AS5047 为 14 位的输出分辨率。首先，将 AS5047D 中的 spi 初始化代码 SPISettings settingsA(5000000, MSBFIRST, SPI_MODE1);移植到 niryo stepper AS5600 代码中，其中函数 void init_position_sensor();函数 int read_encoder();函数 void update_current_position(int microsteps) 在 niryo stepper 的主程序中被调用，于是将 AS5600 中通过 I2C 获取位置代码 Wire.requestFrom(AS5600_ADDRESS, 2);改为 AS5047d 中通过 SPI 获取位置的代码 (uint32_t)readAddress(AS5047D_CMD_ANGLEUNC)。同理，实现通过 AS5047D 获取位置信息被 niryo stepper 主代码调用。对于 AS5600 与 AS5047 输出分辨率的差别，在整合的代码中对 AS5047 获取的介于 0x0000 与 0xFFFF 的数据右移 3 位，将 14 位数据降至 12 位。通过于 niryo one studio 控制下机械臂的角度核对并矫正 14 位值与角度值之间转换率。

2.2.2 电机驱动移植

虽然 niryo stepper 与 nano stepper 步进电机闭环控制器中都使用了 A4954 步进电机驱动模块，但是对照 nano stepper 的电路原理图与 niryo stepper 的代码后发现 A4954 步进电机驱动模块与 SAM D21G 微控制器的引脚并不相同，于是对代码做了以下改动

| Niryo stepper | | | Nano Zero stepper | | |
|---------------|------|------|-------------------|------|------|
| IN_4 | (8) | PA06 | PIN_A4954_IN3 | (5) | PA15 |
| IN_3 | (3) | PA09 | PIN_A4954_IN4 | (6) | PA20 |
| IN_2 | (17) | PA04 | PIN_A4954_IN2 | (7) | PA21 |
| IN_1 | (15) | PB08 | PIN_A4954_IN1 | (18) | PA05 |
| VRCF_2 | (4) | PA08 | PIN_A4954_VRCF34 | (4) | PA08 |
| VRCF_3 | (9) | PA07 | PIN_A4954_VRCF12 | (9) | PA07 |

2.2.3 CAN bus 移植

对于电机控制板和树莓派主机之间通讯，Niryo One 是用 CAN bus 通讯，针对替代板 Nano Zero 电机控制板，我们曾尝试用单线 Modbus 协议建立通讯。但考虑到不能像 CAN bus 那样很好地处理中断，因此还是改回使用 CAN bus 协议，转换芯片用 MC2515。

由于 Nano Stepper 中微处理器原有的 SPI 口被 AS5047D 所占用，并且 SAMD21G 引脚与 AS5047D 之间的电路无法引出跳线，所以缺乏连接 CAN bus 转换片 MCP2515 的 spi 引线。通过查阅 SAMD21G 有关资料，发现能开放第 2 个 SPI 口。结合 Nano Zero 步进电路板的特殊布局，通过几次探索性飞线，最后确定唯一能用的引出口是 Nano Stepper 中 SDA 、SCL、 step、 dir、 enable、 d3 口。

| Pin | | | | A | | | | B | | | | C | | | | D | | | | E | | | | F | | | | G | | | |
|-------------------------|---|---|------|--------|--------|------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|--------|--|--|---------|------|----|-----|----|--|--|----|---|--|----|--|---|----|--|--|
| SAMD21E SAMD21G SAMD21L | | | | IO Pin | Supply | Type | ENC | REF | ADC | AC | PRC | DAC | SERCOM | | | SERCOM | ALT | TC | PRC | TC | | | TC | | | TC | | | TC | | |
| 1 | 1 | 1 | PA00 | VDDANA | | EXTINT[0] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA00 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2 | 2 | PA01 | VDDANA | | EXTINT[1] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA01 | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3 | 3 | PA02 | VDDANA | | EXTINT[2] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA02 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 4 | PA03 | VDDANA | | EXTINT[3] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA03 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA04 | VDDANA | | EXTINT[4] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA04 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA05 | VDDANA | | EXTINT[5] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA05 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA06 | VDDANA | | EXTINT[6] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA06 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA07 | VDDANA | | EXTINT[7] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA07 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA08 | VDDANA | | EXTINT[8] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA08 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA09 | VDDANA | | EXTINT[9] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA09 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA10 | VDDANA | | EXTINT[10] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA10 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA11 | VDDANA | | EXTINT[11] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA11 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA12 | VDDANA | | EXTINT[12] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA12 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA13 | VDDANA | | EXTINT[13] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA13 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA14 | VDDANA | | EXTINT[14] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA14 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA15 | VDDANA | | EXTINT[15] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA15 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA16 | VDDANA | | EXTINT[16] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA16 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA17 | VDDANA | | EXTINT[17] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA17 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA18 | VDDANA | | EXTINT[18] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA18 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA19 | VDDANA | | EXTINT[19] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA19 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA20 | VDDANA | | EXTINT[20] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA20 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA21 | VDDANA | | EXTINT[21] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA21 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA22 | VDDANA | | EXTINT[22] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA22 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA23 | VDDANA | | EXTINT[23] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA23 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA24 | VDDANA | | EXTINT[24] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA24 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA25 | VDDANA | | EXTINT[25] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA25 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA26 | VDDANA | | EXTINT[26] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA26 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA27 | VDDANA | | EXTINT[27] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA27 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA28 | VDDANA | | EXTINT[28] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA28 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA29 | VDDANA | | EXTINT[29] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA29 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA30 | VDDANA | | EXTINT[30] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA30 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA31 | VDDANA | | EXTINT[31] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA31 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA32 | VDDANA | | EXTINT[32] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA32 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA33 | VDDANA | | EXTINT[33] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA33 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA34 | VDDANA | | EXTINT[34] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA34 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA35 | VDDANA | | EXTINT[35] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA35 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA36 | VDDANA | | EXTINT[36] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA36 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA37 | VDDANA | | EXTINT[37] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA37 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA38 | VDDANA | | EXTINT[38] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA38 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA39 | VDDANA | | EXTINT[39] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA39 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA40 | VDDANA | | EXTINT[40] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA40 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA41 | VDDANA | | EXTINT[41] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA41 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA42 | VDDANA | | EXTINT[42] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA42 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA43 | VDDANA | | EXTINT[43] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA43 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA44 | VDDANA | | EXTINT[44] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA44 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA45 | VDDANA | | EXTINT[45] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA45 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA46 | VDDANA | | EXTINT[46] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA46 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA47 | VDDANA | | EXTINT[47] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA47 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA48 | VDDANA | | EXTINT[48] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA48 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA49 | VDDANA | | EXTINT[49] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA49 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA50 | VDDANA | | EXTINT[50] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA50 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA51 | VDDANA | | EXTINT[51] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA51 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA52 | VDDANA | | EXTINT[52] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA52 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA53 | VDDANA | | EXTINT[53] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA53 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA54 | VDDANA | | EXTINT[54] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA54 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA55 | VDDANA | | EXTINT[55] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA55 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA56 | VDDANA | | EXTINT[56] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA56 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA57 | VDDANA | | EXTINT[57] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA57 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA58 | VDDANA | | EXTINT[58] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA58 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA59 | VDDANA | | EXTINT[59] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA59 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA60 | VDDANA | | EXTINT[60] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA60 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA61 | VDDANA | | EXTINT[61] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA61 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA62 | VDDANA | | EXTINT[62] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA62 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA63 | VDDANA | | EXTINT[63] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA63 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA64 | VDDANA | | EXTINT[64] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA64 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA65 | VDDANA | | EXTINT[65] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA65 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA66 | VDDANA | | EXTINT[66] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA66 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA67 | VDDANA | | EXTINT[67] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA67 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA68 | VDDANA | | EXTINT[68] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA68 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA69 | VDDANA | | EXTINT[69] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA69 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA70 | VDDANA | | EXTINT[70] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA70 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA71 | VDDANA | | EXTINT[71] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA71 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA72 | VDDANA | | EXTINT[72] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA72 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA73 | VDDANA | | EXTINT[73] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA73 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA74 | VDDANA | | EXTINT[74] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA74 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA75 | VDDANA | | EXTINT[75] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA75 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA76 | VDDANA | | EXTINT[76] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA76 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA77 | VDDANA | | EXTINT[77] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA77 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA78 | VDDANA | | EXTINT[78] | | | | | | | | | | SERCOM0 | PA78 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PA79 | VDDANA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

于是在 mcp_can 的代码中添加此新 spi 口 SPIClass mySPI (&sercom3, 20, 21, 10, SPI_PAD_0_SCK_1, SERCOM_RX_PAD_2)。

| | Pin | Arduino ‘Pin’ | SERCOM | SERCOM alt | Pin |
|---|------|---------------|-----------|------------|----------|
| 1 | PA22 | D20 / SDA | SERCOM3.0 | SERCOM5.0 | SPI_MISO |
| 2 | PA23 | D21 / SCL | SERCOM3.1 | SERCOM5.1 | SPI_SCK |
| 3 | PA18 | D10 | SERCOM1.2 | SERCOM3.2 | SPI_MOSI |

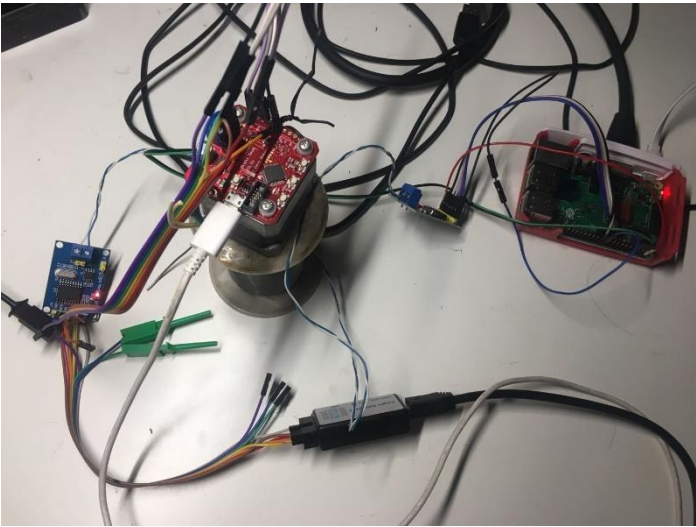


图 2.2.3_2 步进控制与树莓派通讯调试

在 Nano Stepper 步进电机闭环控制器上找到所有对应的引脚接口，通过跳线与 MCP2515 CAN bus 转换芯片连接，使 MCP2515 的 SPI 引脚与在 Nano Stepper 上 SAMD21G 模拟出的 SPI 接口一一对应。

尝试通过连接的 MCP2515 转换芯片与装有 MCP2515 的树莓派主机板通信，并通过多通道数字逻辑分析仪监视 spi 通道中的信号流，检查所有焊线与接线，更正接线。

联调中，我们碰到一个困惑我们很久的问题，通讯时好时坏，通过逻辑分析仪采集分析，发现 CAN bus 接口分 L 和 H 端口，所以需要 2 色双绞线区分连接，然后通讯就很稳定了。

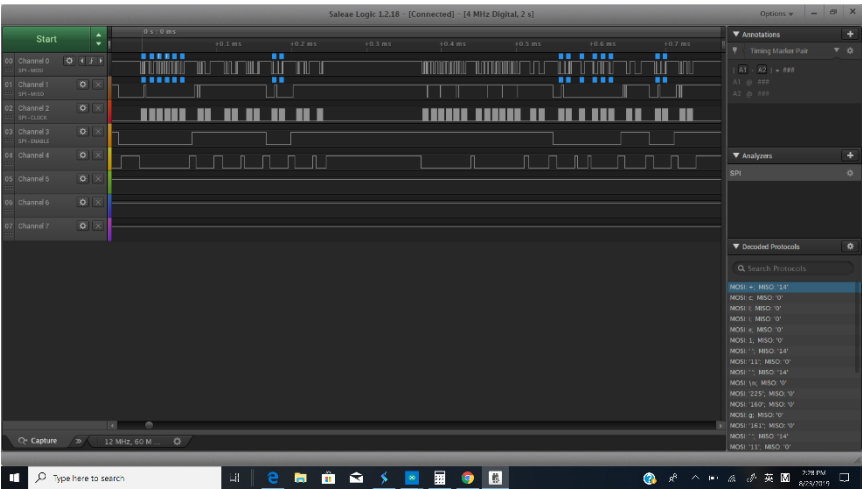


图 2.2.3_3 MCP2515 的 SPI 接口逻辑分析图

2.3 树莓派扩展板

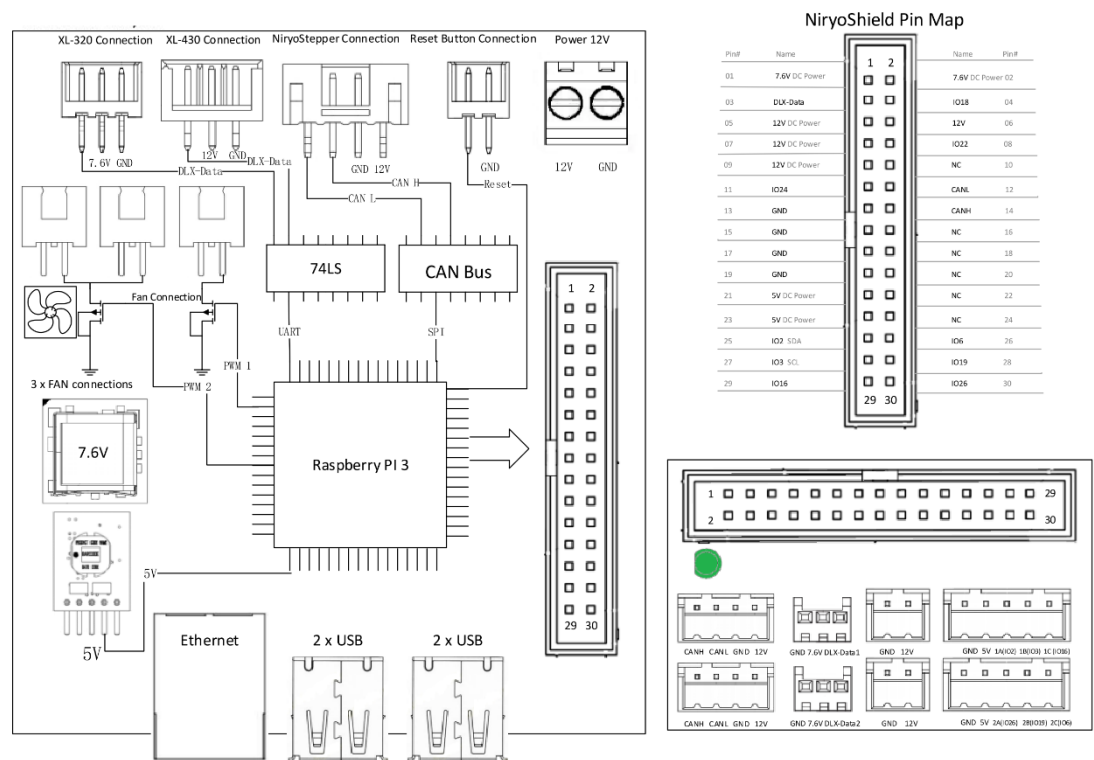
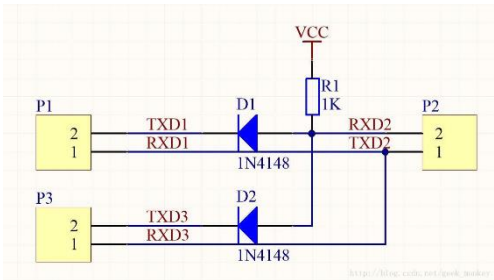


图 2.3_1 Niryo One 树莓派扩展板

Niryo One 树莓派扩展板主要完成和 CAN bus 通讯，和 DYNAMIXEL 舵机通讯，以及电源分配。通过对 niryo_one_ros-master 代码的解读，和 CAN bus 通讯采用 MCP2515 转换，和 DYNAMIXEL 舵机通讯是 1-wire 专用协议，用树莓派的硬串口。

看似简单，但制作过程遇到不少挫折：

1. 用了国产的 Dynamixel 转接板，但不成功，原因不明。
2. 通过分析 Niryo One 用的是 74LS241 三态缓冲，应用上后不能通讯。通过逻辑分析仪分析，串口 TX 发出的包舵机能正常接受，但舵机发回的包串口 RX 不能正常接受。请教了电子工程师，建议把 TTL 的 74LS241 改为 CMOS 的 74HC241，问题得到解决，由此看出 DYNAMIXEL 信号输出驱动力弱。



3. 由于 DYNAMIXEL 舵机用了 2 种 XL320 和 XL430，两者的电压不同，一个是 7.2v 另一个是 12v，因此需要分开，串口需要驱动 2 组转接，简单的并联会引发不稳定。需要用二极管做单向导通。

图 2.3_2 串口并联原理图

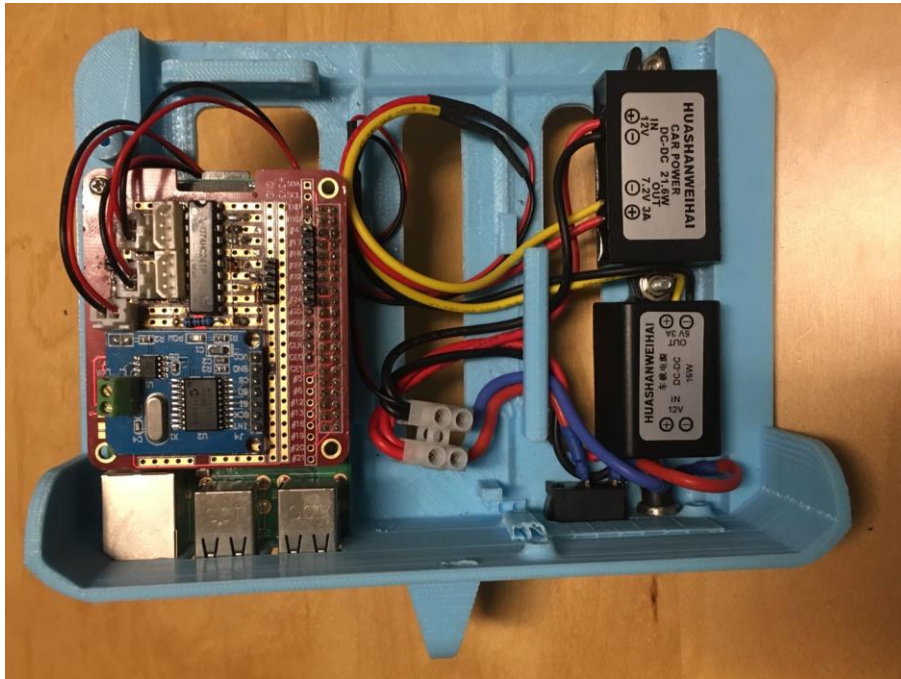


图 2.3_3 Niryo One 机械臂主控板

2.4 3D 打印机械臂组件

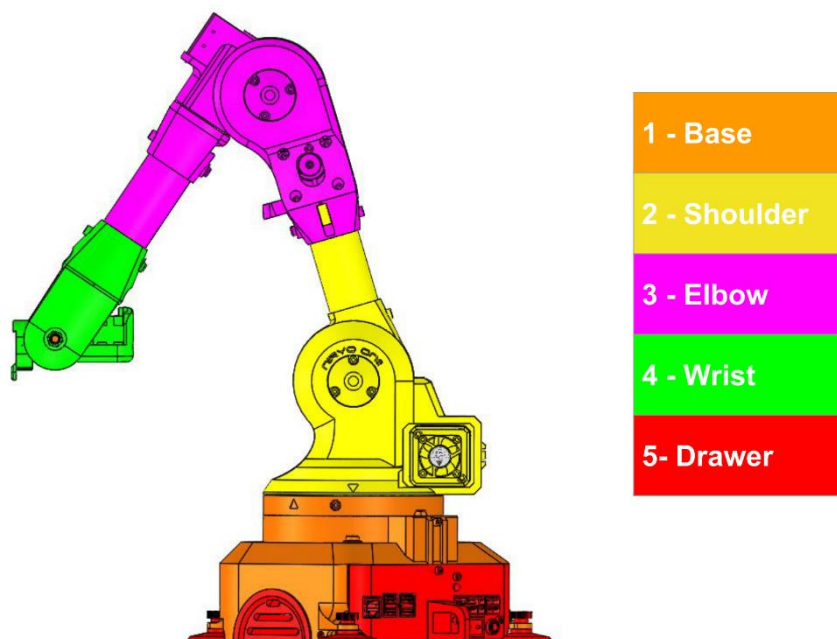


图 2.4_1 Niryo One 组件构成

3D 打印图纸从 Github.com 的 Niryo 频道下载。

然后用 Repetier-Host 软件切片。

3D 打印机用 Core XY 结构，精度能满足要求。

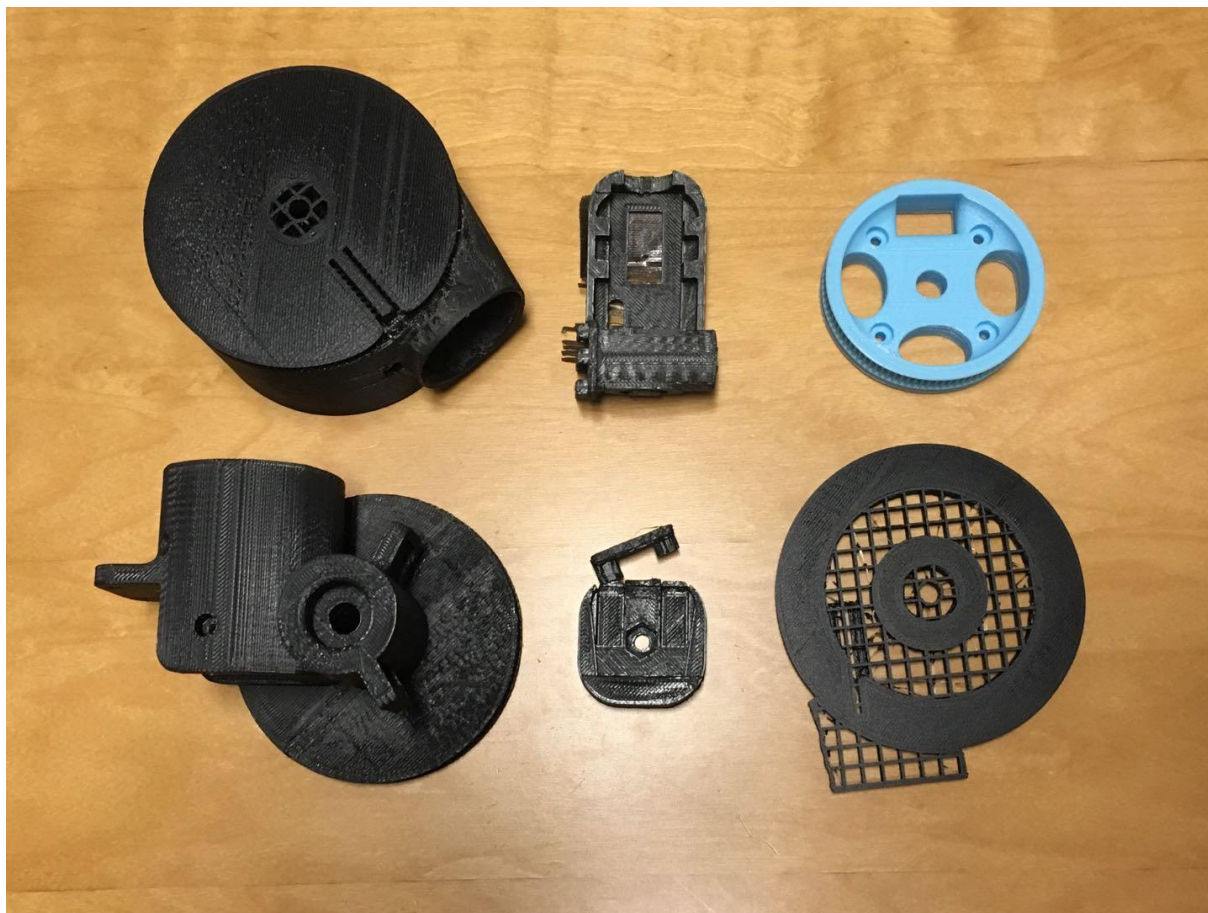


图 2.4_2 部分打印失败的零部件

2.5 机械臂组装



图 2.5 组装好的机械臂

2.6 ROS 操作系统

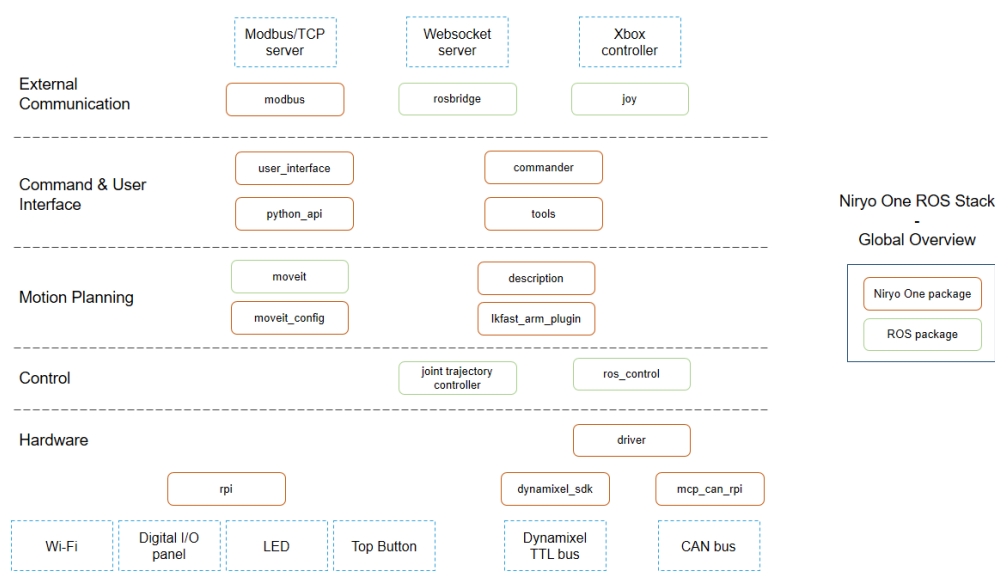


图 2.6 Niryo One 机械臂 ROS 操作系统框架

3. 结论与展望

在为期一学年的课题研究中，我们小组针对目前功能较完善的开源机械臂系统 Niryo One 的控制系统，进行了对于获取较困难的控制板的更换，同时移植了属于工业现场总线的 CANBUS 总线，通过双向控制保证了机械臂上六个步进电机移动的精准性，同时也使得机械臂具有了与工业机器人一致的可操作性。下一步，我们希望能够在多台同种机械臂上实现多台协同控制，并进一步丰富它的功能，使其同时具有更好的教学性与实用性。