

底层飞控开发无人机传感器标定实验

1. 实验目的

1. 利用数据采集模型和飞控采集加速度计和陀螺仪数据，按步骤完成互补滤波，处理所得数据并绘制相关姿态角数据图；基于4.1基础实验，改变滤波器参数，分析滤波器参数对滤波效果的影响；理解卡尔曼滤波原理，并设计卡尔曼滤波器实现滤波器功能。
2. 使用Levenberg-Marquardt(LM)算法实现三轴加速度计的标定。
3. 基于 e3.1中的实验，将重力加速度的值由 9.8 改为 1，再次进行标定；计算出各自的姿态角，体会两种方式对校正参数产生的影响，并分析结果对角度计算的影响。
4. 基于前面的基础实验和分析实验，独立完成磁力计的标定。根据给出的磁力计误差模型，设计磁力计数据采集模型，用测得的数据和 LM 算法函数求出模型参数的最优解，完成磁力计的标定，并绘制标定前后的指标对比图。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]，MATLAB 2022b 及以上，平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6x_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]，Pixhawk 6x飞控^② 1台；遥控器^③ 1台；遥控器接收器 1台；数据线、杜邦线等 若干台。

3. 实验地址

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\5.RflySimFlyCtrl\1.BasicExps\e3-SensorCalib](#)

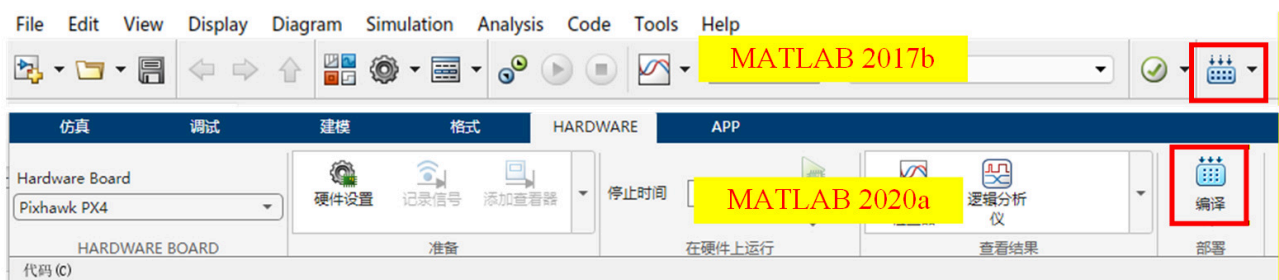
- 第08讲_实验四_滤波器设计实验.pdf：实验配套课件
- e3.1：互补滤波器基础实验资料
- e3.2：互补滤波器参数设计实验资料

- e3.3: 卡尔曼滤波器设计实验资料
- rawdataFile/e_acc_A.bin: 飞控飞行日志文件
- px4_read_binary_file.m: MATLAB飞行日志读取处理函数。
- acquire_data_ag.slx: 获取飞控中加速度计数据模型文件。
- calFunc.m: 加速度计误差模型函数
- calLM.m: 对飞控中采集到的数据基于误差模型进行计算并标定。
- lm.m: Levenberg-Marquardt求解最小值函数。
- Methods for Non-Linear Least Squares Problems.pdf: 非线性最小二乘问题的方法介绍文档，其中有对The Levenberg-Marquardt Method的详细讲解。
- calP9_8.mat: 标定后的尺度因子和偏移的mat文件，用于e3.2小节。
- AccRaw.mat: 采集的特征点mat文件，用于e3.2小节。
- accdata.mat: 原始的加速度计数值，用于e3.2小节。
- readdata.m: 飞控中的数据读取程序。

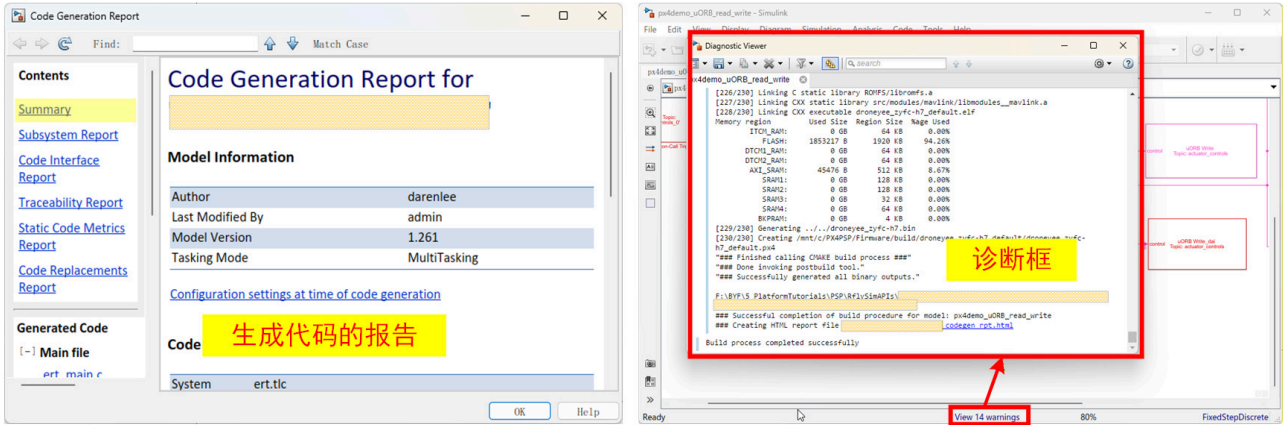
4. 实验内容或步骤

4.1 步骤1 传感器标定实验-e3.1

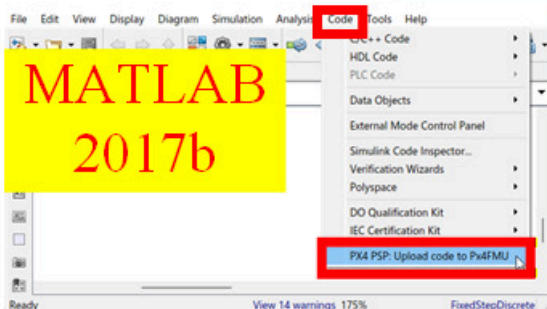
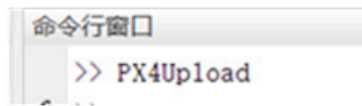
打开MATLAB软件，在MATLAB中打开acquire_data_ag.slx文件，在Simulink中，点击编译命令。



在Simulink的下方点击View diagnostics指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。在诊断框中弹出Build process completed successfully，即可表示编译成功，左图为生成的编译报告。



用USB数据线链接飞控与电脑。在MATLAB命令行窗口输入：PX4Upload并运行或点击PX4 PSP: Upload code to Px4FMU，弹出CMD对话框，显示正在上传固件至飞控中，等待上传成功。

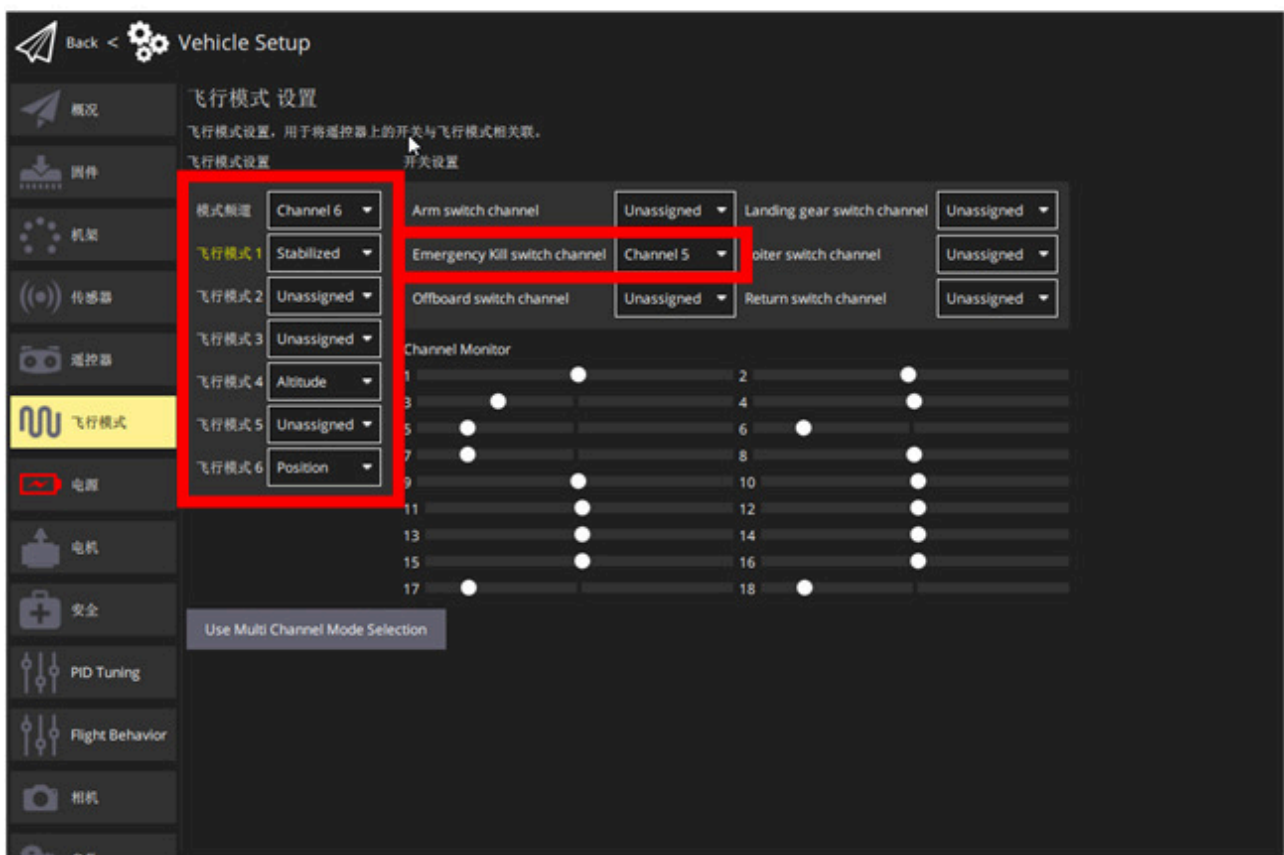


```
C:\WINDOWS\SYSTEM32\cmd  x  +  v
Loaded firmware for board id: █████ size: 1903433 bytes (92.20%), waiting for the bootloader...

Found board id: █████ bootloader version: 5 on COM5
sn: 001e00354256500c20323441
chip: 10016451
family: b'STM32F7[6|7]x'
revision: b'Z'
flash: 2064384 bytes
Windowed mode: False

Erase : [=====] 100.0%
Program: [ ] 3.4%
```

上传成功后，打开QGroundControl软件。确认无人机机架及遥控器通设置如下：



遥控器的设置如下图。注：遥控器设置中，CH5通道需设置为二段式开关，CH6通道设置为三段式开关。



油门：控制上下运动，对应固定翼油门杆
 偏航：控制机头转向，对应固定翼方向舵
 俯仰：控制前后运动，对应固定翼升降舵
 滚转：控制左右运动，对应固定翼副翼

拨动遥控器的CH5到最底部，即：CH5>1500，自驾仪开始往SD卡中写入数据，模型中设置的是采集十个特征点，所以需要将自驾仪面向十个方向放置，将飞控分别按照下图进行摆放，每次放置的时候保持自驾仪不动，红灯慢闪说明采集到一个特征点，采集到全部特征点时红灯将快闪。采集完成后将遥控器CH5拨到最底部，即：CH5<1500，停止写数据到SD卡。

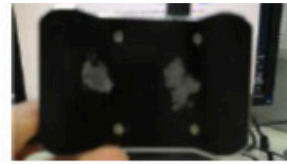
注：若暂时无法采集到飞控中的数据，可使用本实验文件夹中的“rawdataFile/e3_A.bin”文件，也可进行下一步实验，但需将e3_A.bin文件复制到本实验文件夹中。



① 朝上



② 朝下



③ 朝左



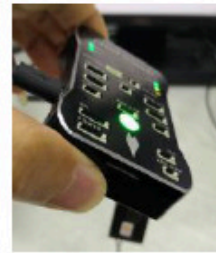
④ 朝右



⑤ 朝前



⑥ 朝后



⑦ 朝左45°



⑧ 朝右45°



⑨ 朝前45°



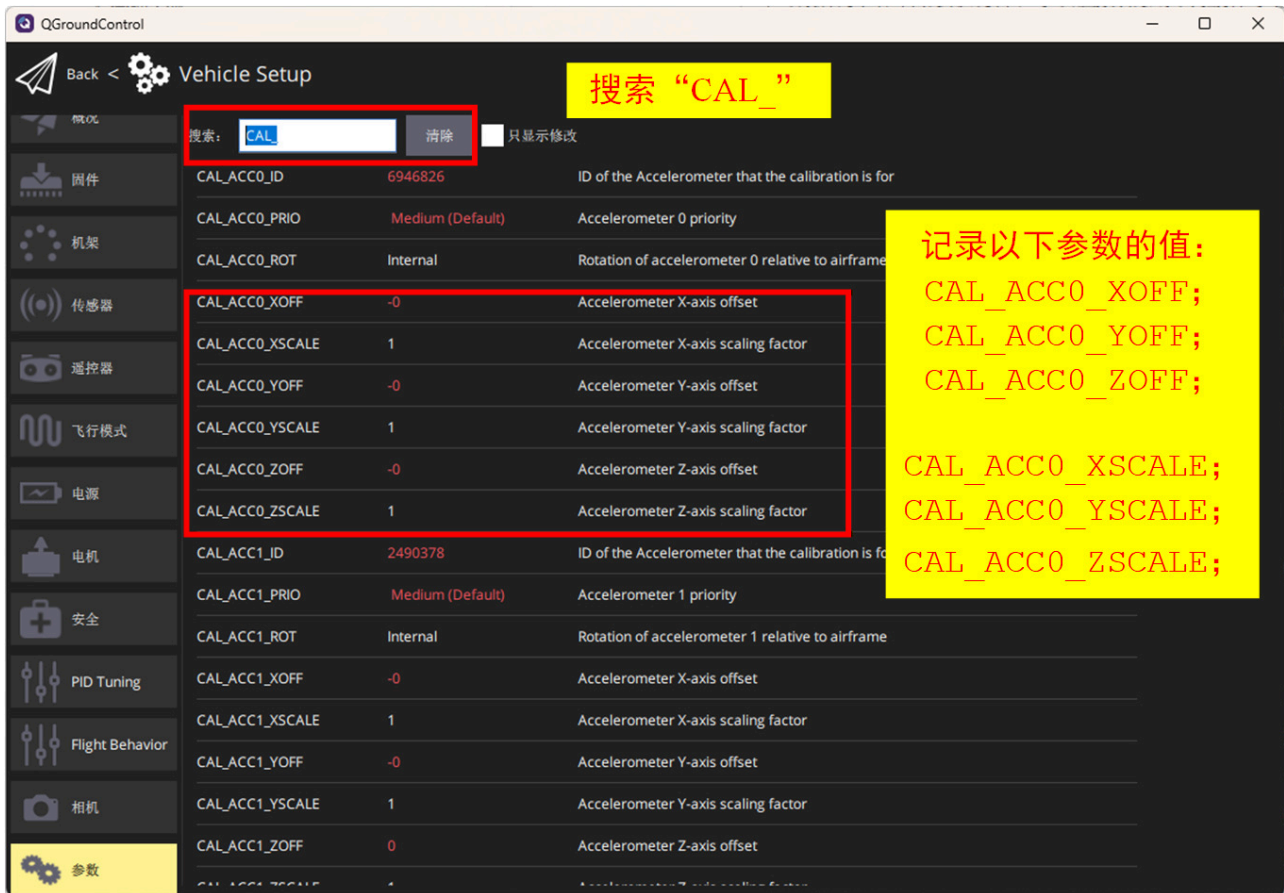
⑩ 朝后45°

读取数据。将SD卡取出，使用读卡器将文件“log/e_acc_A.bin”复制到目录到本实验文件夹中，使用本实验所提供的函数，在MATLAB命令行中依次逐行输入：

```
1 clear;clc;
2 [datapoints, numpts]=px4_read_binary_file('e_acc_A.bin');
3 acc_acq_num = size(find(datapoints(4, :)),2)
```

最终数据保存在“datapoints”中，数据个数保存在“numpts”中，采集到的特征点将保存到“acc_acq”中。注：若依次运行完上述命令后，得出的“acc_acq_num” \neq 10，即表示未完全采集所有特征点，需重复使用“rawdataFile/e3_A.bin”文件

打开QGC软件，在飞控与电脑正常连接的情况下，在“Vehicle Setup” - “参数”中，进行如下图的操作。



将记录的数值对应填写在calLM.m文件中，如下所示：

% 程序第18行

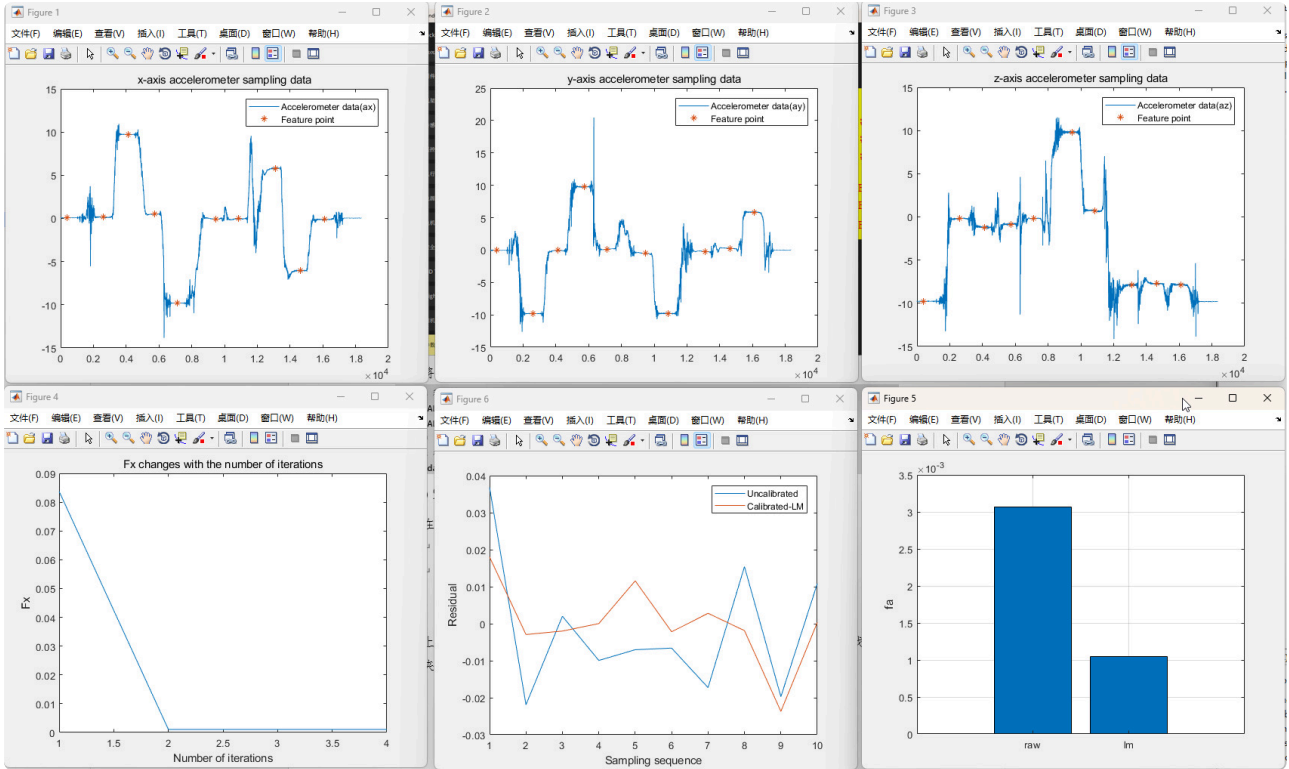
```
CAL_ACC_SCALE= [1;1;1]; % 3*1
```

```
CAL_ACC_OFF=[0;0;0]; % 3*1
```

% 确认第21行程序中的bin文件名称是否与采集到的文件名称对应。

```
[datapoints, numpoints] = px4_read_binary_file('e_acc_A.bin');
```

在MATLAB中，运行calLM.m文件，MATLAB将会弹出如下图像，其中第1行分别是：X、Y、Z轴的加速度计的采集数据和特征点，第2行分别是：LM算法的迭代次数、标定前后的对比图、标定前后的数据指标图。



MATLAB命令行中也将弹出，最终标定后的参数，如下图所示。

```

***Accelerometer data collected***
***The collected data are averaged from the previous 100 data points***
**** The first derivative of Fx tends to zero ****
**** epsilon_1 = 1.000000e-06 ****
***Number of iterations: 3.000000e+00

Ka9_8 =

    0.9992     0     0
         0    0.9984     0
         0     0    1.0007

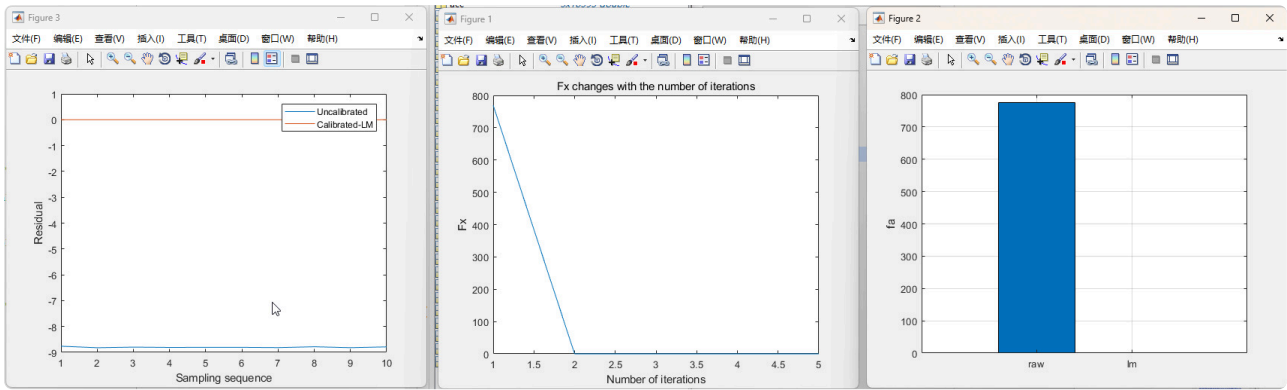
ba9_8 =

    0.0107
    0.0038
   -0.0114

```

4.2 步骤2 传感器标定实验-e3.2

打开MATLAB软件，在MATLAB中打开运行calLM2.m文件。运行完成后，弹出下图。



在MATLAB的命令行中，显示g=1时，标定后的参数。

```

命令窗口
**** The first derivative of Fx tends to zero ****
**** epsilon_1 = 1.000000e-06
***Number of iterations: 4.000000e+00

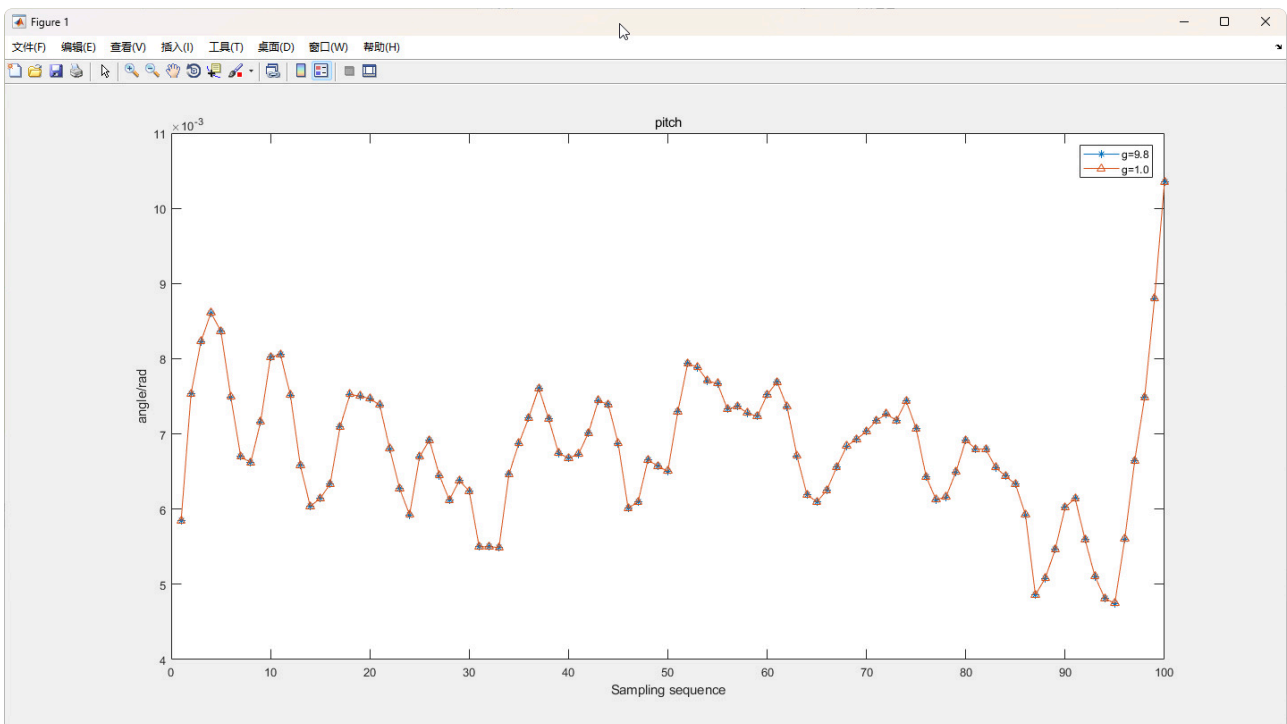
Kal =

    0.1020    0    0
         0    0.1019    0
         0    0    0.1021

bal =

    0.0107
    0.0038
   -0.0114
  
```

在MATLAB中打开运行differentG_effect.m文件。运行完成后，弹出下图。

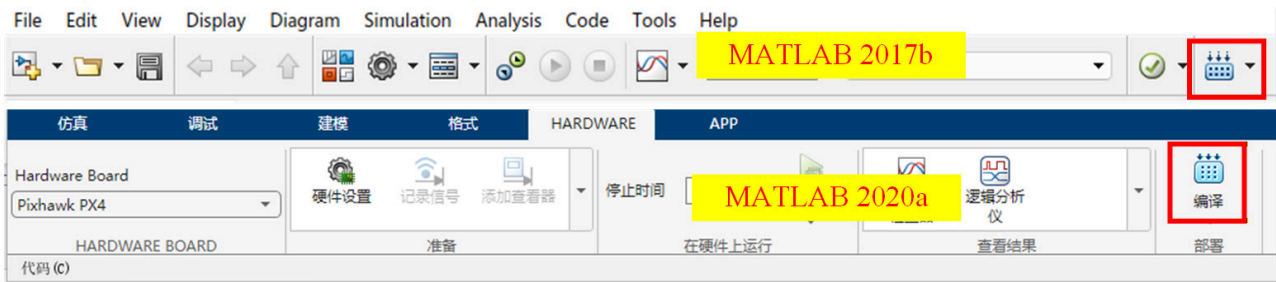


从图中可以得出，可以看到g=1时得到的标定参数ba'与g=9.8时得到的标定参数ba相比几乎不变，但是K*a'的值变得更小。K*a'的值应该缩小为K*a的1/9.8，这与理论分析的结论一致。三轴加速度计固连在多旋翼机体上，其坐标轴与机体坐标轴一致。可以通过矫正后

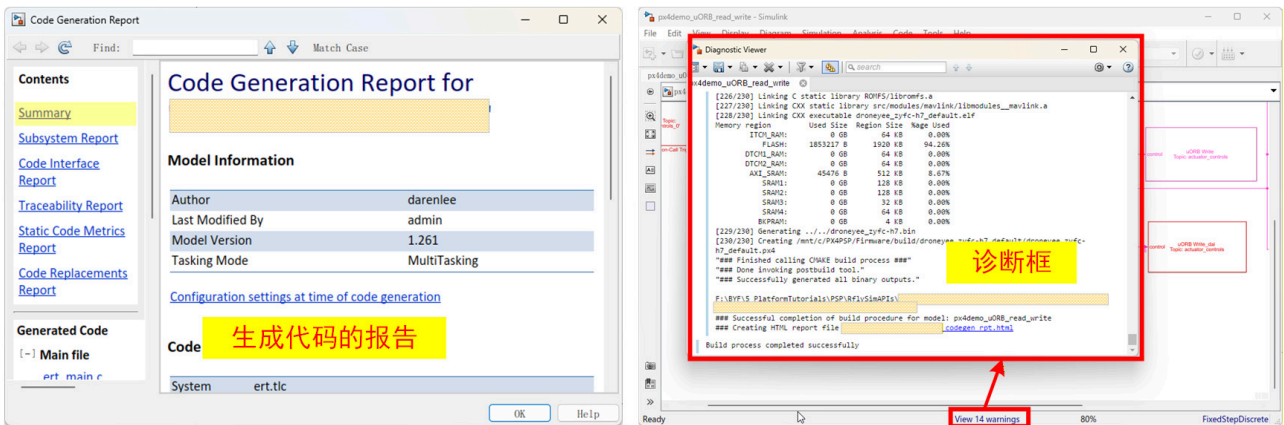
加速度计的值和计算得到g分别为9.8 和1时的俯仰角。因此可以发现加速度计计算得到的结果和参考的重力加速度的大小无关。

4.3 步骤3 传感器标定实验-e3.3

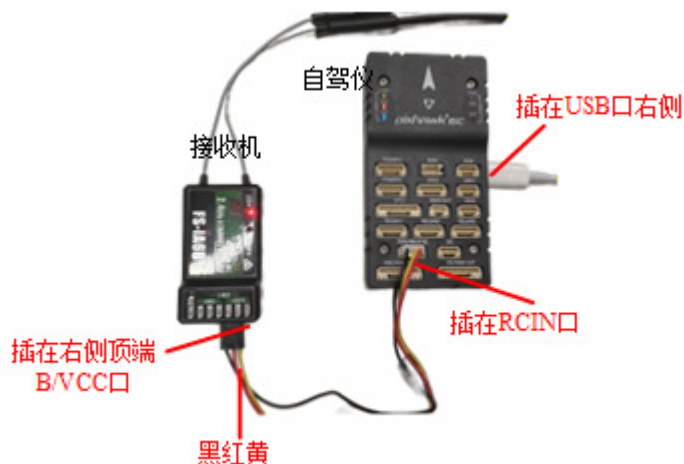
打开MATLAB软件，在MATLAB中打开acquire_data_ag.slx文件，在Simulink中，点击编译命令。

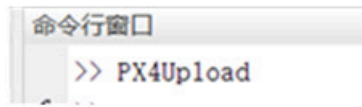


在Simulink的下方点击View diagnostics指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。在诊断框中弹出Build process completed successfully，即可表示编译成功，左图为生成的编译报告。

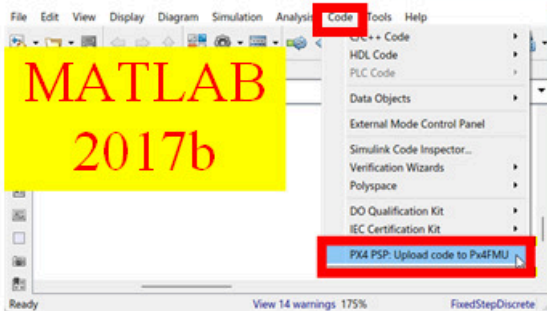


用USB数据线链接飞控与电脑。在MATLAB命令行窗口输入：PX4Upload并运行或点击PX4 PSP: Upload code to Px4FMU，弹出CMD对话框，显示正在上传固件至飞控中，等待上传成功。





或

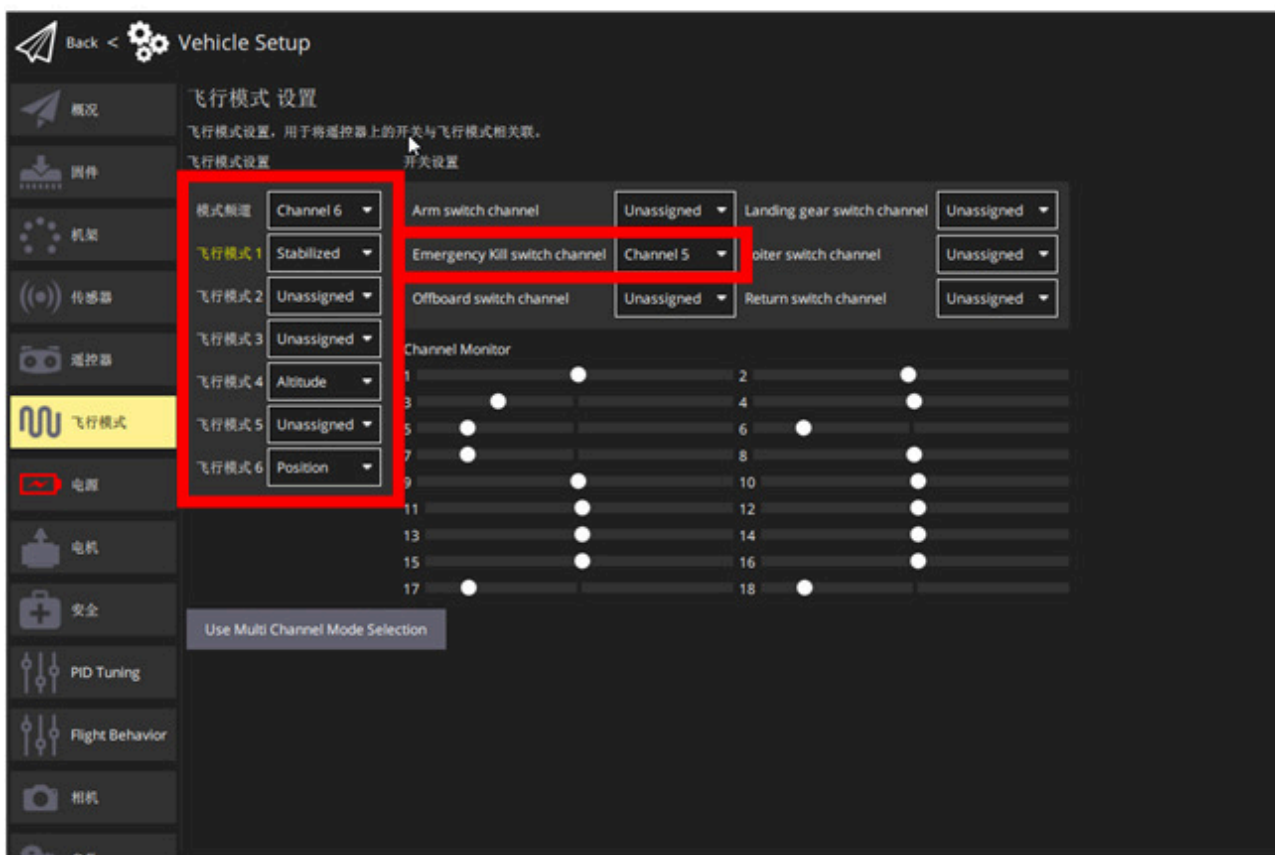


```
C:\WINDOWS\SYSTEM32\cmd  x  +  v
Loaded firmware for board id: [redacted] size: 1903433 bytes (92.20%), waiting for the bootloader...

Found board id: [redacted] bootloader version: 5 on COM5
sn: 001e00354256500c20323441
chip: 10016451
family: b'STM32F7[6|7]x'
revision: b'Z'
flash: 2064384 bytes
Windowed mode: False

Erase : [=====] 100.0%
Program: [          ] 3.4%
```

上传成功后，打开QGroundControl软件。确认无人机机架及遥控器通设置如下：



遥控器的设置如下图。注：遥控器设置中，CH5通道需设置为二段式开关，CH6通道设置为三段式开关。



油门：控制上下运动，对应固定翼油门杆
 偏航：控制机头转向，对应固定翼方向舵
 俯仰：控制前后运动，对应固定翼升降舵
 滚转：控制左右运动，对应固定翼副翼

拨动遥控器的CH5到最底部，即：CH5>1500，自驾仪开始往SD卡中写入数据，然后按照下图所示面向六个方向放置自驾仪，并分别在每个方向逆时针或顺时针旋转自驾仪。最后，将遥控器CH5 通道拨到最顶部，即：CH5<1500，会停止采集数据。

注：若暂时无法采集到飞控中的数据，可使用本实验文件夹中的“rawdataFile/e3_m_A.bin”文件，也可进行下一步实验，但需将e3_m_A.bin文件复制

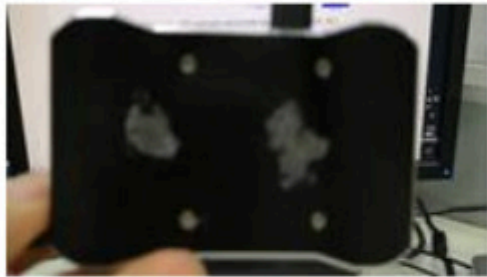
到本实验文件夹中。



① 朝上



② 朝下



③ 朝左



④ 朝右



⑤ 朝上



⑥ 朝下

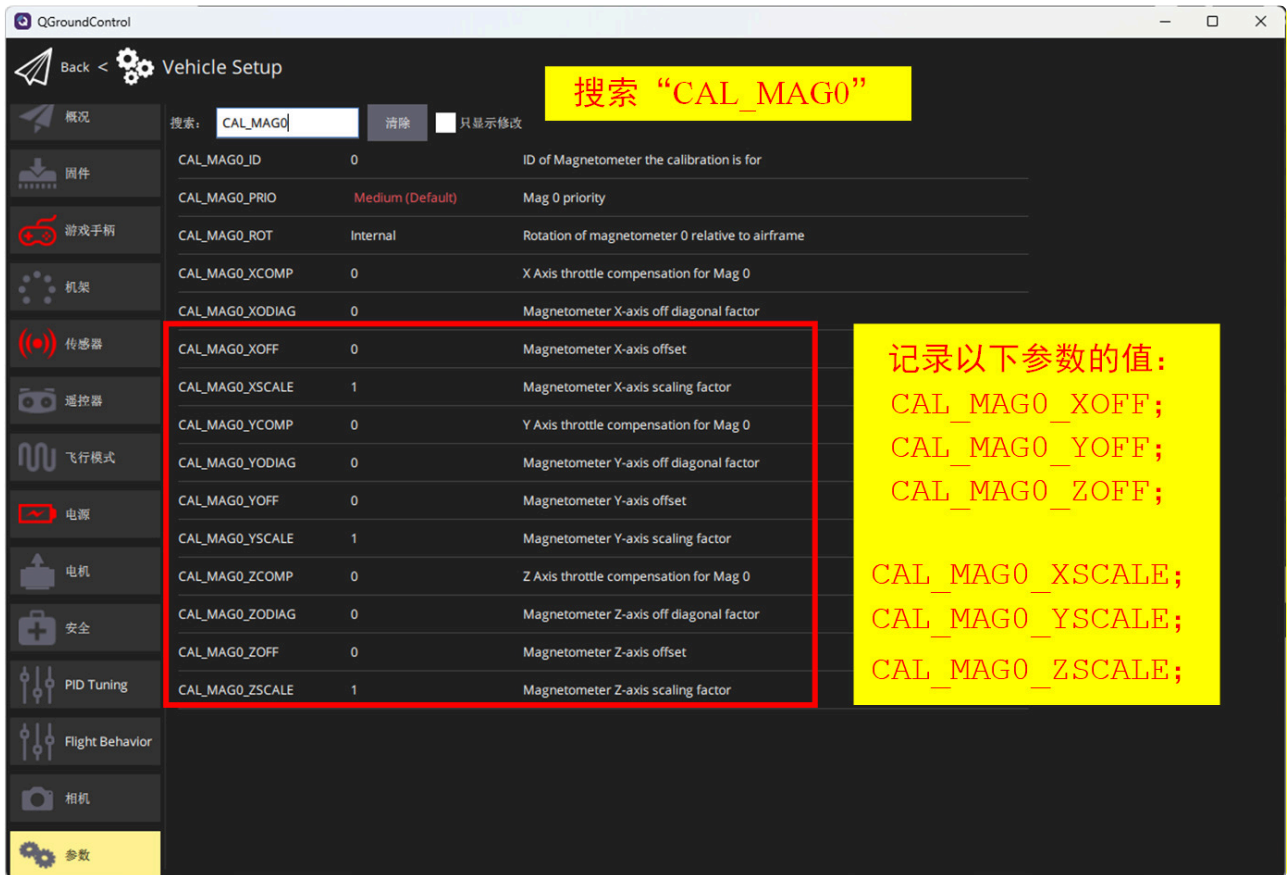
读取数据。将SD卡取出，使用读卡器将文件“log/e3_m_A.bin”复制到目录到本实验文件夹中，使用本实验所提供的函数，在MATLAB命令行中**依次逐行**输入：

```
clear;clc;
```

```
[datapoints, numpts]=px4_read_binary_file('e3_m_A.bin');
```

最终数据保存在“datapoints”中，数据个数保存在“numpts”中。

打开QGC软件，在飞控与电脑正常连接的情况下，在“Vehicle Setup” - “参数”中，进行如下图的操作。



将记录的数值对应填写在calLM.m文件中，如下所示：

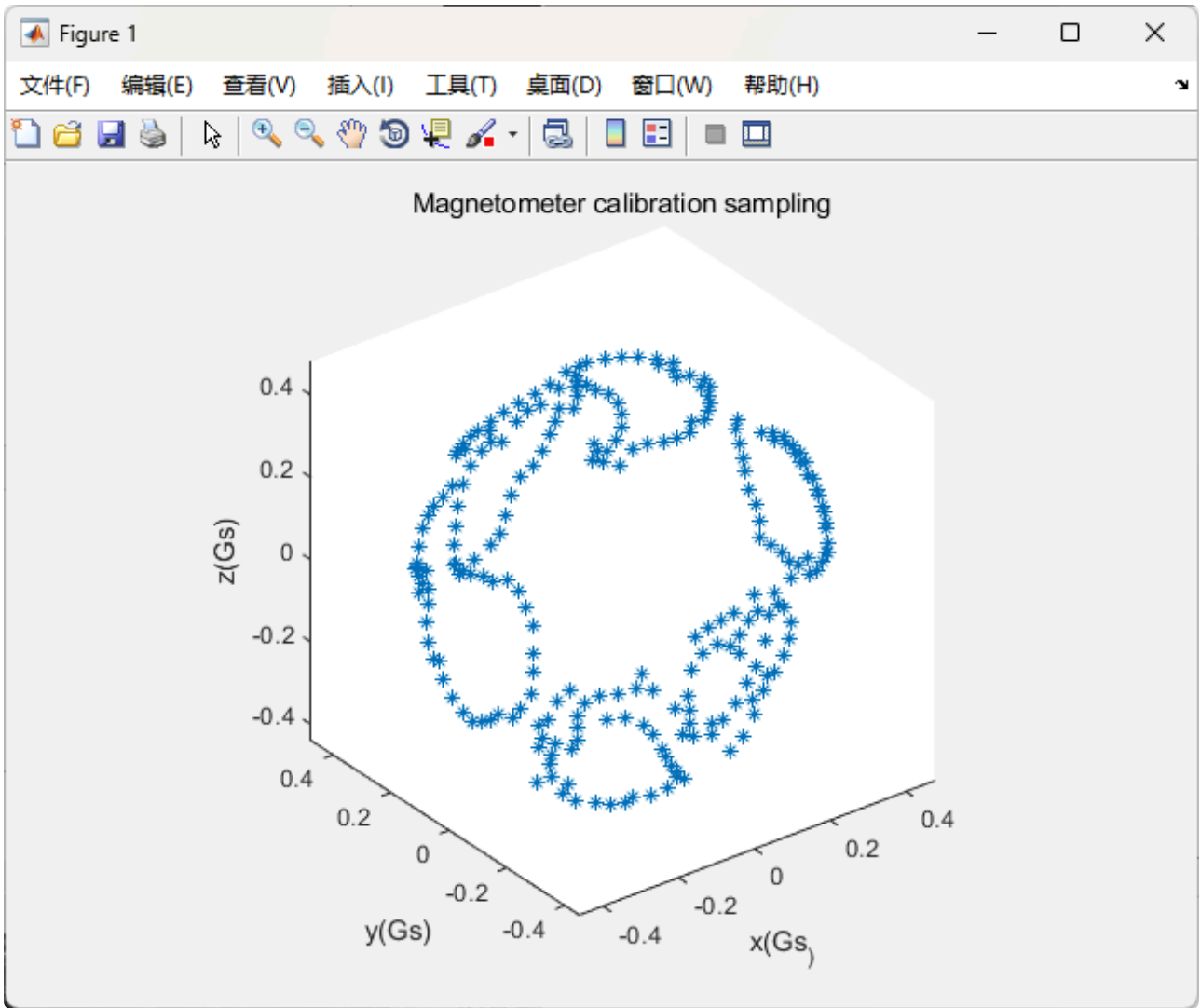
% 确认第8行程序中的bin文件名称是否与采集到的文件名称对应。

```
[datapoints, numpoints] = px4_read_binary_file('e3_m_A.bin');
```

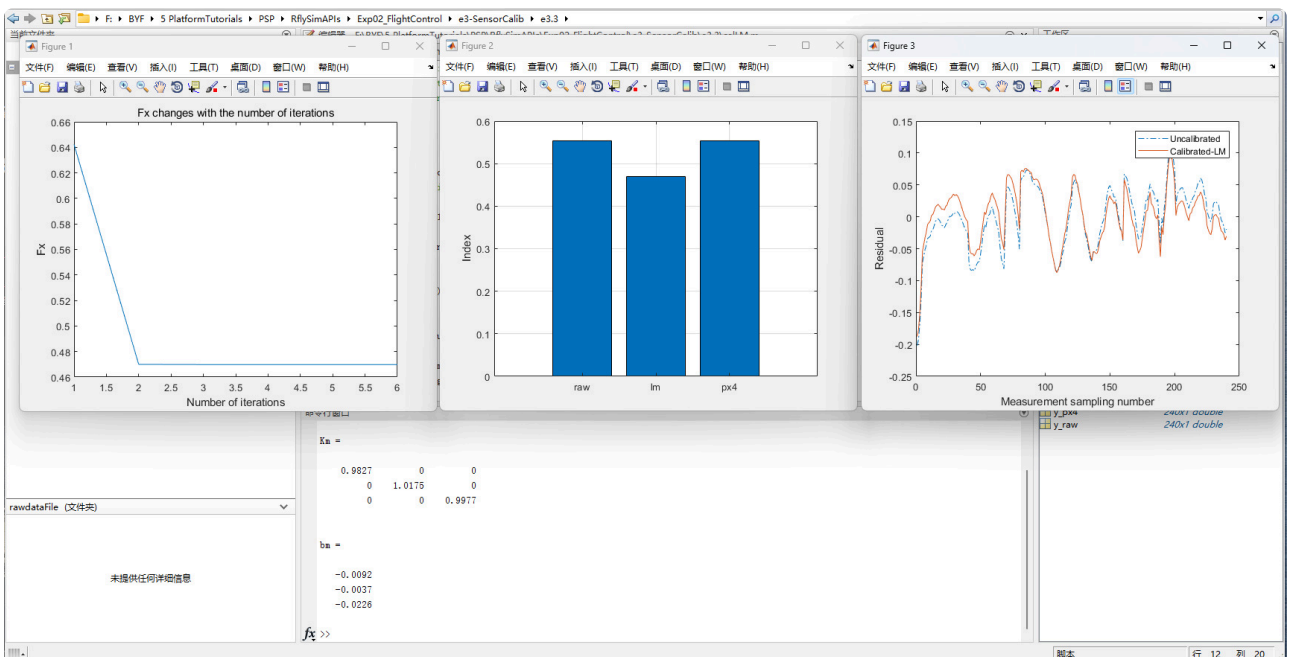
```
CAL_MAG_SCALE = [1, 1, 1]';
```

```
CAL_MAG_OFF = [0, 0, 0]';
```

在MATLAB中，运行readdata.m文件，MATLAB将会弹出如下图像，该图像表示的是采集的飞控中的磁力计数据。



运行calLM.m文件，即可弹出标定的结果如下图所示。其中Figure 1表示利用LM法迭代过程中适应度函数的变化；Figure 2表示未标记数据、LM法标记数据、PX4标记数据的指标函数对比；Figure 3表示未标定和标定后的数据对比。



MATLAB命令行中也将弹出，最终标定后的参数，如下图所示。

```
命令行窗口

Km =

    0.9827    0    0
         0    1.0175    0
         0         0    0.9977

|
bm =

   -0.0092
   -0.0037
   -0.0226

fx >>
```

5. 关键知识点

- 三轴加速度计的工作原理。
- 磁力计的工作原理
- Levenberg-Marquardt(LM)算法的原理。

6. 参考资料

1. 全权,杜光勋,赵峙尧,戴训华,任锦瑞,邓恒译.多旋翼飞行器设计与控制[M],电子工业出版社, 2018.
2. 全权,戴训华,王帅.多旋翼飞行器设计与控制实践[M],电子工业出版社, 2020.
3. 第07讲_实验三_传感器标定实验.pptx
4. 第07讲_传感器标定和测量模型V2.pptx

7. 常见问题

Q1: 无

A1: 无

1. <https://rflysim.com/> ↩

2. 推荐配置请见: <https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf> ↩