
1. 实验名称及目的

传感器标定实验：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、实验原理

互补滤波是一种用于融合多个传感器或测量数据的滤波方法，其原理是通过将多个信号按照一定的权重进行组合，以得到更准确的估计结果。互补滤波的原理可以总结为以下几个步骤：1、获取传感器数据：首先，需要获取多个传感器的数据或者不同的测量信号。这些传感器可以是不同类型的传感器，例如加速度计、陀螺仪、磁力计等，或者是来自于不同的测量设备或算法的输出。2、定义权重：根据应用的需求和特定的条件，需要为每个传感器或信号定义一个权重。权重可以反映传感器的可靠性或者对特定信号的重要程度。通常，较可靠、准确的传感器会被分配较高的权重，而不可靠或噪声较大的传感器会分配较低的权重。3、互补滤波器输出计算：使用权重对传感器数据进行加权求和，得到最终的估计值。常用的互补滤波方法是简单的加权平均，可以用以下公式表示：综合输出 = (权重 × 传感器测量值) + ((1 - 权重) × 先前估计值)，其中，权重是在 0 到 1 之间的数值，先前估计值是上一时刻的滤波器输出。4、迭代更新：在每个时间步骤或数据采样点上，重复步骤 2 和步骤 3，以更新估计值。根据传感器的测量数据和权重的设定，互补滤波器会根据每个传感器的可靠性自适应地融合各个数据源，产生更准确的估计结果。

互补滤波的优点是简单实用、计算效率高，并且能够有效地融合多个传感器的数据。然而，需要根据具体应用场景仔细选择权重和调整参数，以达到最佳的性能和结果。同时，互补滤波也有其局限性，不适用于动态系统模型和非线性的传感器或测量信号。对于这些情况，其他更复杂的滤波方法如卡尔曼滤波或扩展卡尔曼滤波可能更合适。

卡尔曼滤波是一种用于估计系统状态的递归滤波器，它结合了系统的动态模型和传感器测量数据，提供了对系统状态的最优估计。卡尔曼滤波的原理基于线性系统和高斯噪声的假设。卡尔曼滤波的原理可以分为两个主要步骤：预测和更新。

1、预测（时间更新）步骤：

在预测步骤中，基于系统的动态模型，使用先前的状态估计和控制输入，预测系统在下一个时间步的状态。这个预测通过以下两个方程完成：状态预测方程（系统模型）：根据系统的动态方程和控制输入，估计系统在下一个时间步的状态。协方差预测方程：估计系统状态的不确定性或协方差随时间的演化。

2、更新（测量更新）步骤：

在更新步骤中，基于传感器的测量数据，将预测的状态与测量数据进行融合，得到对系统状态的更新估计。这个更新通过以下两个方程完成：卡尔曼增益方程：计算卡尔曼增

益，该增益决定了预测状态与测量数据之间的权衡。状态更新方程：根据卡尔曼增益和测量数据，更新系统状态的估计值，并计算更新后的协方差。卡尔曼滤波的关键思想是不断对系统状态进行迭代优化，通过结合先前的状态估计和新的测量数据，得到更准确的状态估计，并且考虑了状态估计的不确定性。需要注意的是，卡尔曼滤波仅在满足线性系统模型和高斯分布噪声假设的情况下才能提供最优的估计。对于非线性系统或非高斯噪声，可以使用扩展卡尔曼滤波（EKF）或无迹卡尔曼滤波（UKF）等变种来进行状态估计。

至于基础实验，如果你没有硬件，你可以使用'e3\3.1\AccRaw。直接获取数据，对应的校准函数为“e3\3.1\calLM.m”；如果您有硬件，您将得到一个类似的文件到“e3\3.1\rawdataFile\acc1_A.bin”，对应的校准函数为“e3\3.1\calLMRaw.m”。“e3\3.1\rawdataFile\acc1_A.bin”中的数据由“e3\3.1\acquire_dataag. bin”获取。基金的加速度数据采集模型，并在记录前通过 PX4 进行校准。所以在用它们进行校准之前，你是否应该使用“传感器校准”参数提取未校准的数据，这些参数可以在 QGC 中找到，正如我们在“e3\3.1\calLMRaw.m”的第十四和第十五行。数据在'e3\3.1\AccRaw。其余为可直接用于标定的未标定数据。数据在'e3\3.2\accdata. Mat 用于计算螺距。你可以通过“e3 \ 3.1 \ acquire_data ag. slx'，你应该慢慢旋转 Pixhawk。

3、实验效果

- (1)为得到准确的姿态角数据，使用互补滤波算法对陀螺仪和加速度计的数据进行融合。
- (2)互补滤波算法中对陀螺仪和加速度计数据的使用是通过参数 τ 来控制的，改变 τ 值大小会影响互补滤波效果。
- (3)设计出卡尔曼滤波器，建立过程模型和观测模型，滤波效果优于互补滤波。

4、文件目录

文件夹/文件名称	说明
第 08 讲_实验四_滤波器设计实验.pdf	实验配套课件。
e4.1	互补滤波器基础实验资料，详细操作见： Readme.pdf
e4.2	互补滤波器参数设计实验资料，详细操作见： Readme.pdf
e4.3	卡尔曼滤波器设计实验资料，详细操作见： Readme.pdf

1、实验名称及目的

传感器标定实验：使用 Levenberg-Marquardt(LM)算法实现三轴加速度计的标定。

2、实验原理

三轴加速度计是一种惯性传感器，能够测量物体的比力，即去掉重力后的整体加速度或者单位质量上作用的非引力。当加速度计保持静止时，加速度计能够感知重力加速度，而整体加速度为零。在自由落体运动中，整体加速度就是重力加速度，但加速度计内部处于失重状态，而此时三轴加速度计输出为零。

三轴加速度计的原理能够用来测量角度。弹簧压缩量由加速度计与地面的角度决定。比力能够通过弹簧压缩长度来测量。因此在没有外力作用的情况下，加速度计能够精确地测量俯仰角和滚转角，且没有累积误差。

MEMS 三轴加速度计是采用压阻式、压电式和电容式工作原理，产生的比力（压力或者位移）分别正比于电阻、电压和电容的变化。这些变化可以通过相应的放大和滤波电路进行采集。该传感器的缺点是受振动影响较大。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 07 讲_实验三_传感器标定实验.pptx，文献[4]第 07 讲_传感器标定和测量模型 V2.pptx

3、实验效果

通过建立误差模型和 LM 算法，最终得到标定后的参数如下图：

```
***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、文件目录

文件夹/文件名称		说明
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 L

	evenberg–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。

5、运行环境

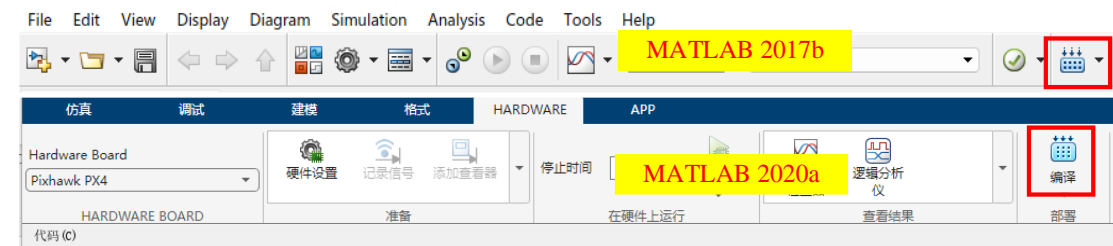
序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量(个)
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版及以上	Pixhawk 6C 飞控 ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	1
4		遥控器接收器	1
5		数据线、杜邦线等	若干

- ①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>
- ②：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>
- ③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209 S。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

6、实验步骤

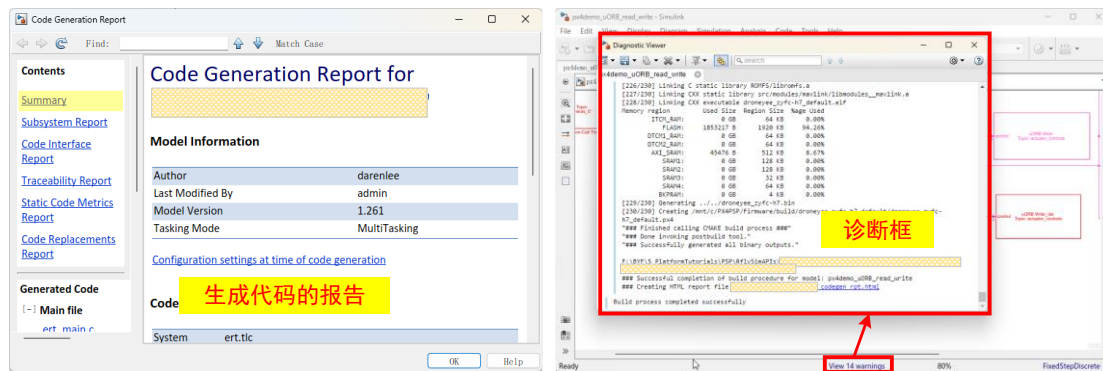
Step 1:

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。



Step 2:

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。



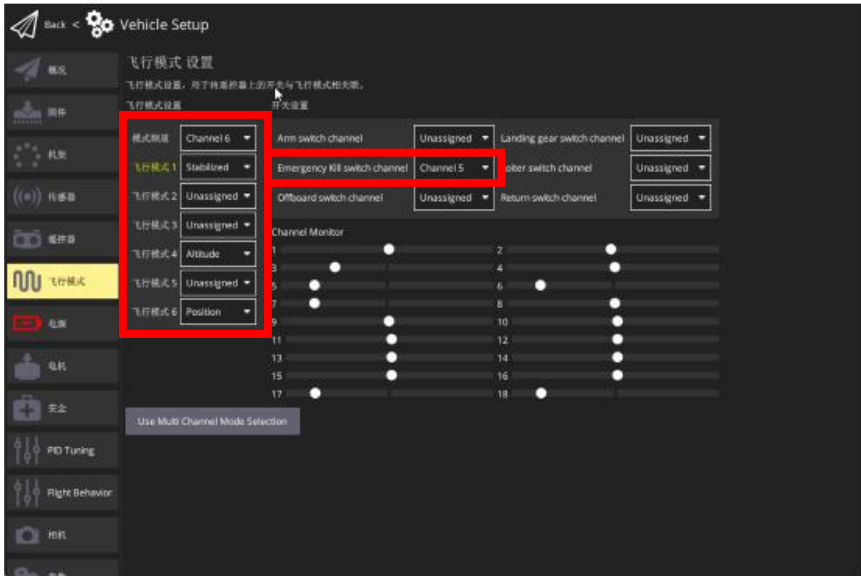
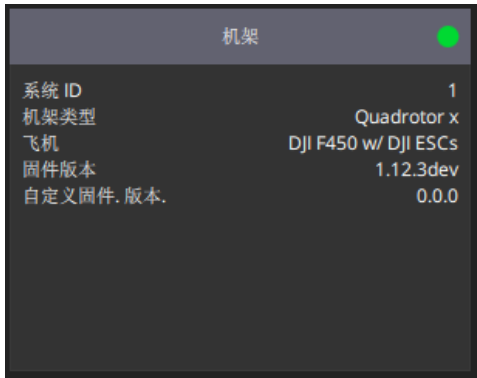
Step 3:

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。



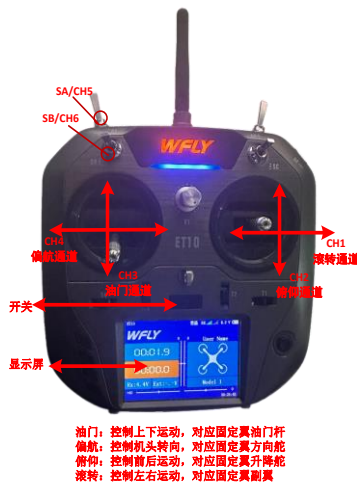
Step 4:

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：



Step 5:

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。



Step 6:

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。



Step 7:

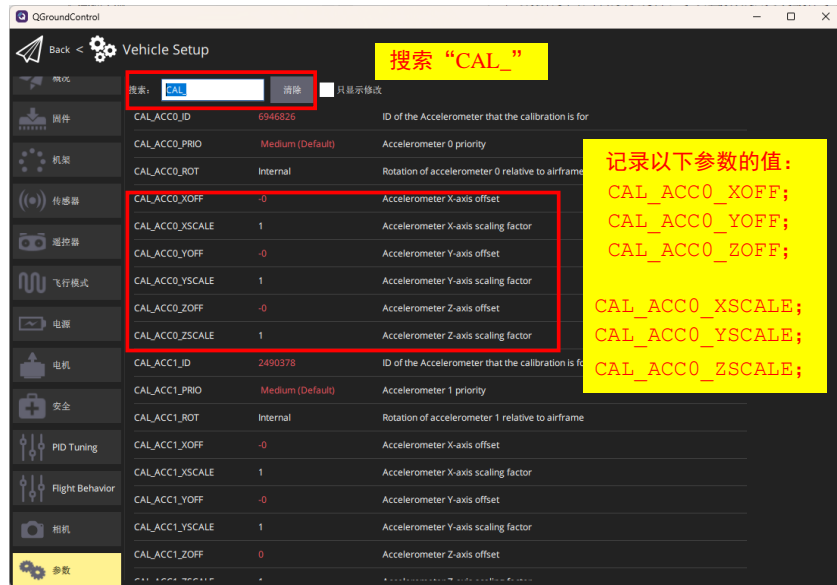
读取数据。将 SD 卡取出，使用读卡器将文件“log/e_acc_A.bin”复制到目录到本实验文件夹中，使用本实验所提供的函数，在 MATLAB 命令行中依次逐行输入：

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

最终数据保存在“datapoints”中，数据个数保存在“numpoints”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 Step 6 中未完全采集所有特征点，需重复 Step 6 或使用“rawdataFile/e3_A.bin”文件

Step 8:

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。



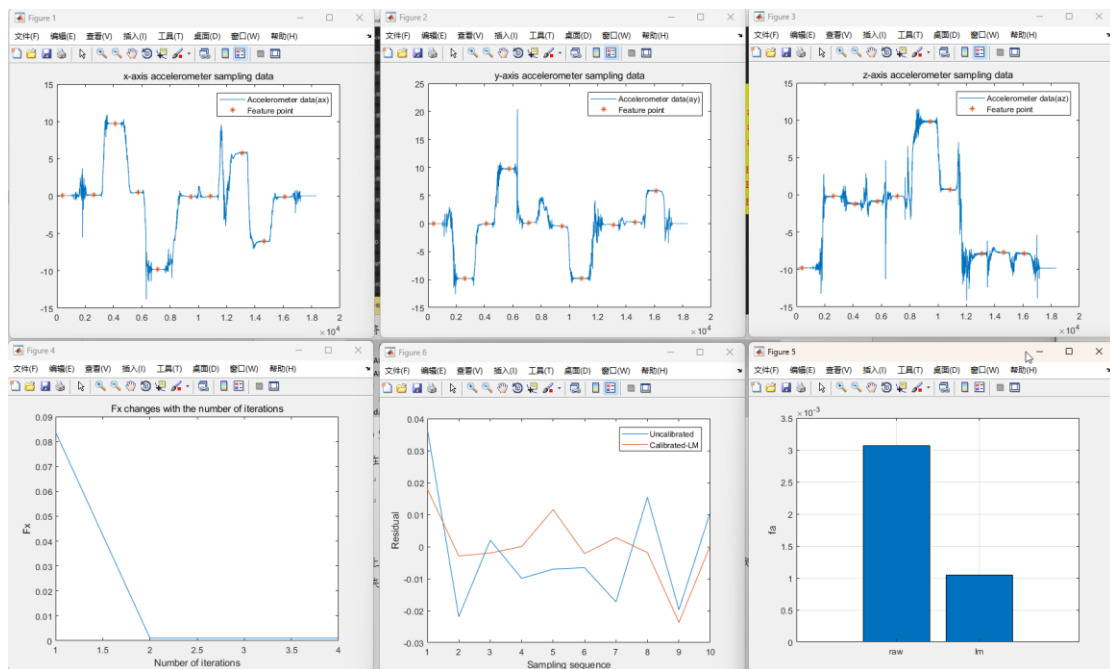
将记录的数值对应填写在 calLM.m 文件中，如下所示：

```
% 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');
```

Step 9

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
```

7、参考文献

- [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

8、常见问题

Q1: 无

A1: 无

1、实验名称及目的

传感器标定实验：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。

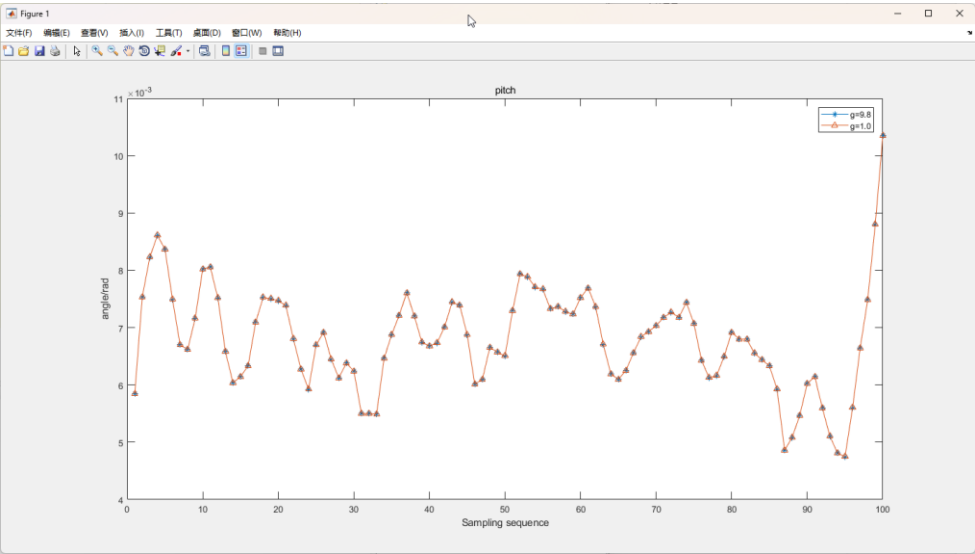
2、实验原理

校正分为一般校正：需要外部标定设备，麻烦但精确。自动校正：不需要外部标定设备，简单，精度略微差。三轴加速度计在实际生产过程中和安装过程中，总会出现一些偏差。因此，需要建立标定前和标定后的三轴加速度的关系。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 07 讲_实验三_传感器标定实验.pptx，文献[4]第 07 讲_传感器标定和测量模型 V2.pptx。

3、实验效果

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。为了俯仰角在连续过程的变化情况，当 Pixhawk 自驾仪被缓慢旋转时加速度计的数据被再次采集，如下图所示。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、文件目录

文件夹/文件名称	说明
calFunc.m	加速度计误差模型函数
calLM2.m	对飞控中采集到的特征点进行标定的程序。
lm.m	Levenberg–Marquardt 求解最小值函数。
calP1.mat	$g=1$ 时，标定后的尺度因子和偏移值的 mat 文件。
differentG_effect.m	不同的重力加速度的标定参数对姿态角的影响对比程序。

5、运行环境

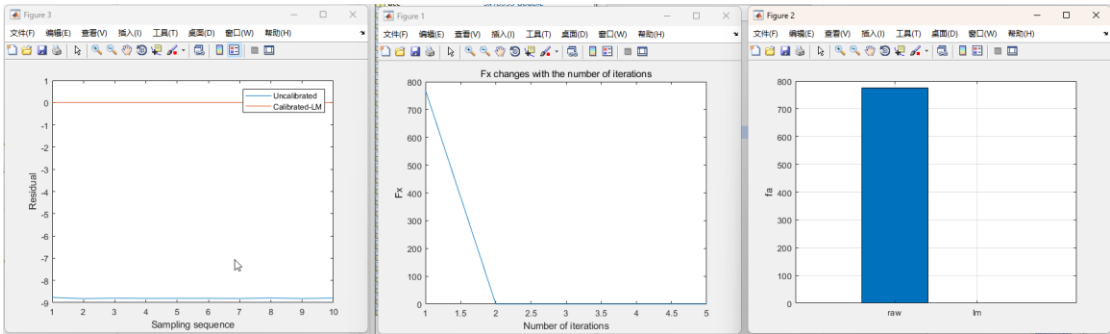
序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量(个)
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版及以上		
3	MATLAB 2017B 及以上		

④：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>

6、实验步骤

Step 1:

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 =

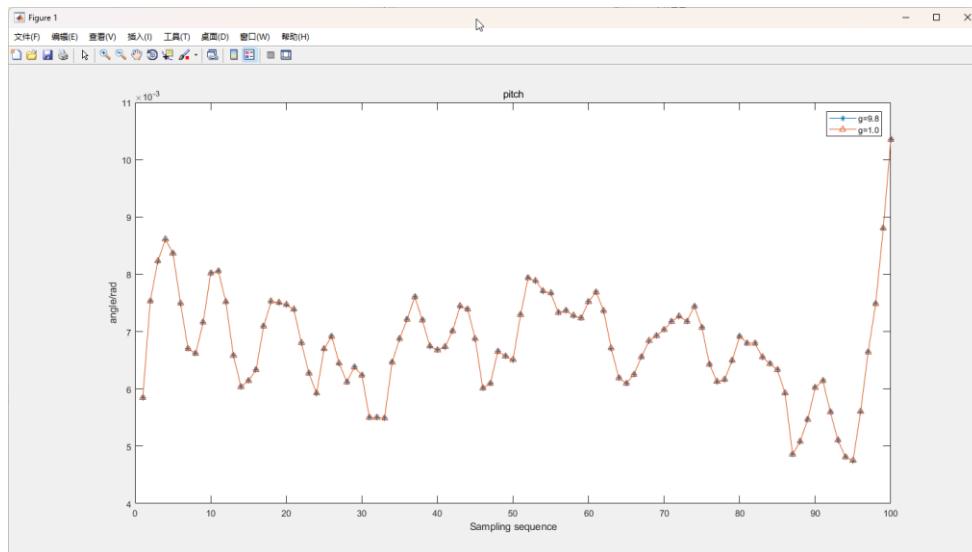
    0.1020    0    0
         0    0.1019    0
         0    0    0.1021

bal =

    0.0107
    0.0038
   -0.0114
```

Step 2:

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。

7、参考文献

- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. 第 07 讲_实验三_传感器标定实验.pptx.
- [8]. 第 07 讲_传感器标定和测量模型 V2.pptx

8、常见问题

Q1: 无

A1: 无

1、实验名称及目的

传感器标定实验：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、实验原理

建立了加速度计和磁力计的标定模型，并使用 Simulink 的 PSP 工具箱进行数据采集。在记录加速度计数据时，为了避免额外的非重力加速度，保持 Pixhawk 静止是必要的。为了消除加速度计噪声，标定过程中并没有采用所有采样点，而是选取一定的特征点进行计算。将重力加速度 g 由原先的 9.8 改为 1 后，再进行标定，尺度因子 Ka 缩小为原来的 $1/9.8$ ，但计算出来的姿态角与 $g=9.8$ 标定后计算出的姿态角相同。这说明重力加速度的大小并不影响角度的测量。

详细内容请参考上层路径文献[3]第 07 讲_实验三_传感器标定实验.pptx，文献[4]第 07 讲_传感器标定和测量模型 V2.pptx

3、实验效果

标定后的最优化指标比标定前的最优化指标更小，最优化指标随着迭代次数的增加收敛的很快，并且趋向于常值 0.5。

4、文件目录

文件夹/文件名称		说明
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。
readdata.m		飞控中的数据读取程序。

5、运行环境

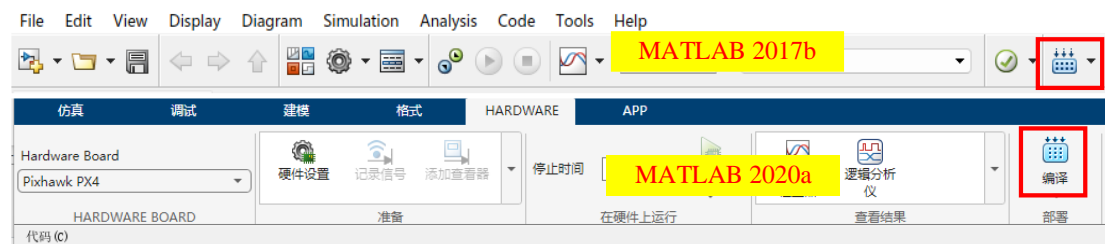
序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量(个)
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版及以上	Pixhawk 6C 飞控 ^②	1
3	MATLAB 2017B 及以上	遥控器 ^③	1
4		遥控器接收器	1
5		数据线、杜邦线等	若干

- ⑤：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com/1.1InstallMethod.html>
- ⑥：须保证平台安装时的编译命令为：px4_fmu-v6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>
- ⑦：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF209 S。遥控器相关配置见：<http://doc.rflysim.com/hardware.html>

6、实验步骤

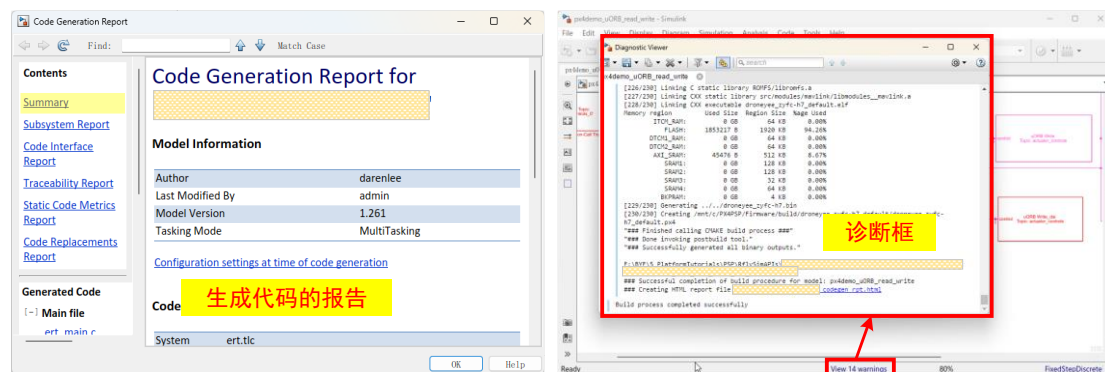
Step 1:

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。



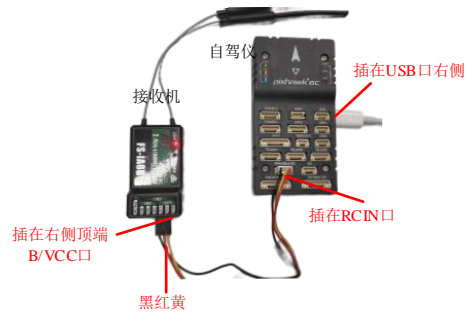
Step 2:

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。



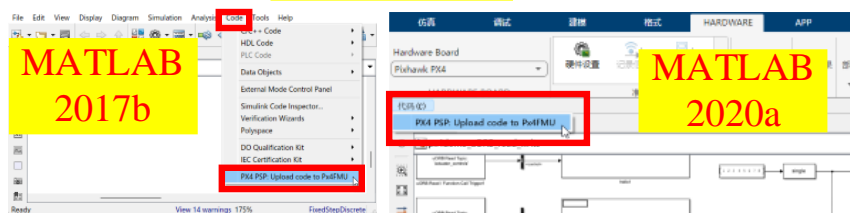
Step 3:

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。



命令行窗口
>> PX4Upload

或



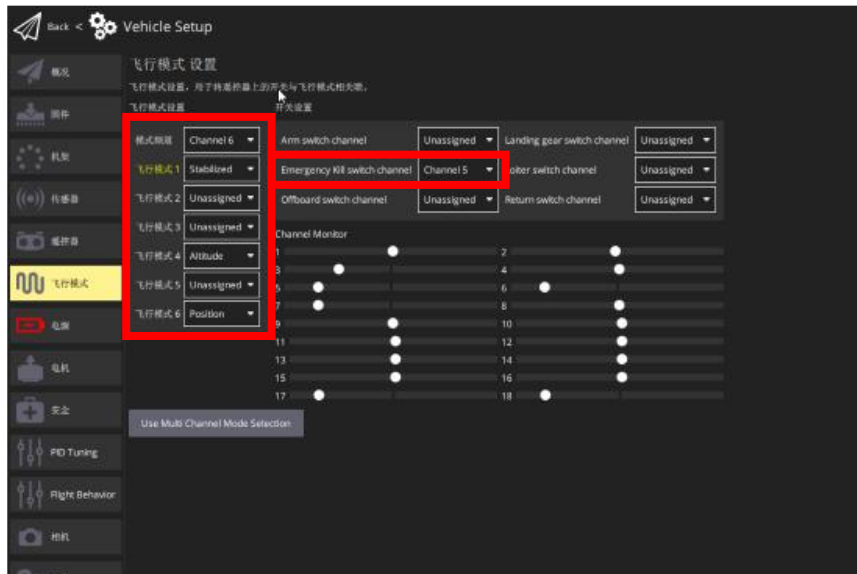
```
C:\WINDOWS\SYSTEM32\cmd
Loaded firmware for board id: size: 1903433 bytes (92.20%), waiting for the bootloader...

Found board id: bootloader version: 5 on COM5
sn: 001e00354256500c20323441
chip: 10016451
family: b'STH32F7[6|7]x'
revision: b'Z'
flash: 2064384 bytes
Windowed mode: False

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

Step 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：



Step 5:

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。



Step 6:

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。

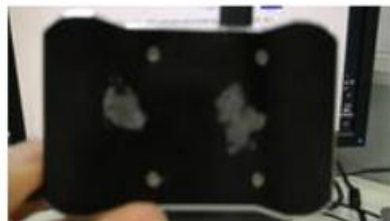
注：若暂时无法采集到飞控中的数据，可使用本实验文件夹中的“rawdataFile/e3_m_A.bin”文件，也可进行下一步实验，但需将 e3_m_A.bin 文件复制到本实验文件夹中。



① 朝上



② 朝下



③ 朝左



④ 朝右



⑤ 朝上



⑥ 朝下

Step 7:

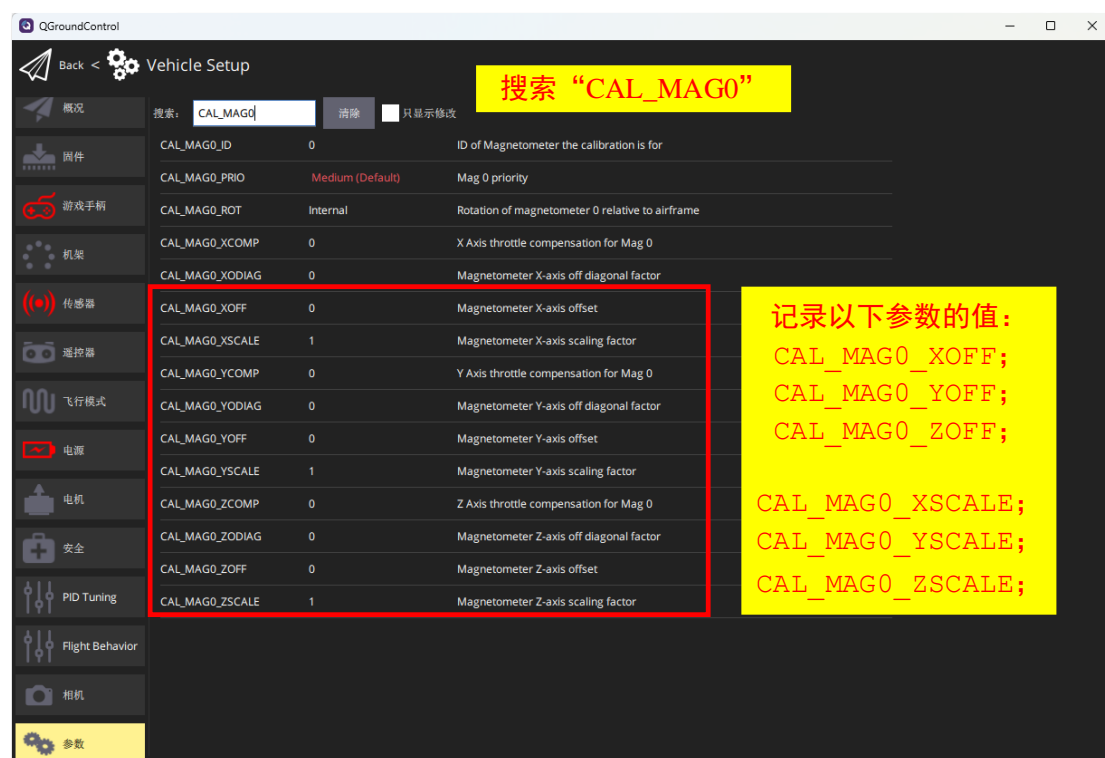
读取数据。将 SD 卡取出，使用读卡器将文件“log/e3_m_A.bin”复制到目录到本实验文件夹中，使用本实验所提供的函数，在 MATLAB 命令行中依次逐行输入：

```
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“numpoints”中。

Step 8:

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。



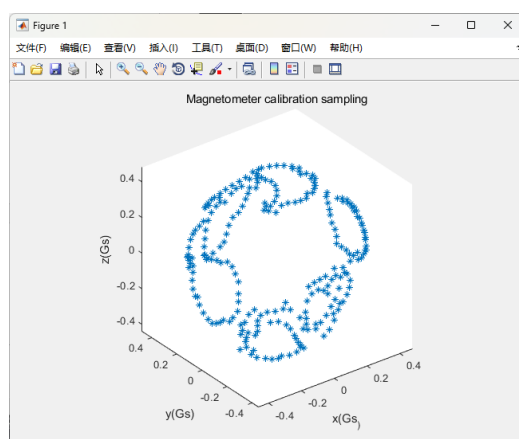
将记录的数值对应填写在 calLM.m 文件中，如下所示：

```
% 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]';
```

Step 9

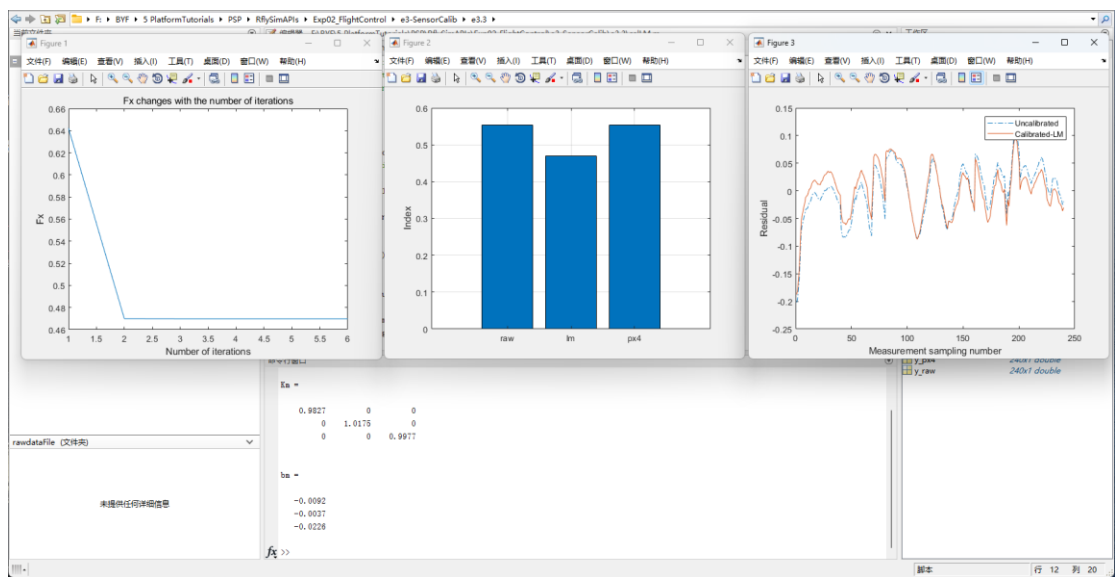
在 MATLAB 中，运行 readdata.m 文件，MATLAB 将会弹出如下图像，该图像表示的是 Step 6 中采集的飞控中的磁力计数据。



Step 10:

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 >>
```

7、参考文献

[9]. 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.

[10]. 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.

[11]. 第 07 讲_实验三_传感器标定实验.pptx

[12]. 第 07 讲_传感器标定和测量模型 V2.pptx

8、常见问题

Q1: 无

A1: 无