



---

# 多旋翼飞行器设计与控制 实践

## 第七讲 传感器标定实验

全权 副教授

qq\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



# 大纲

---

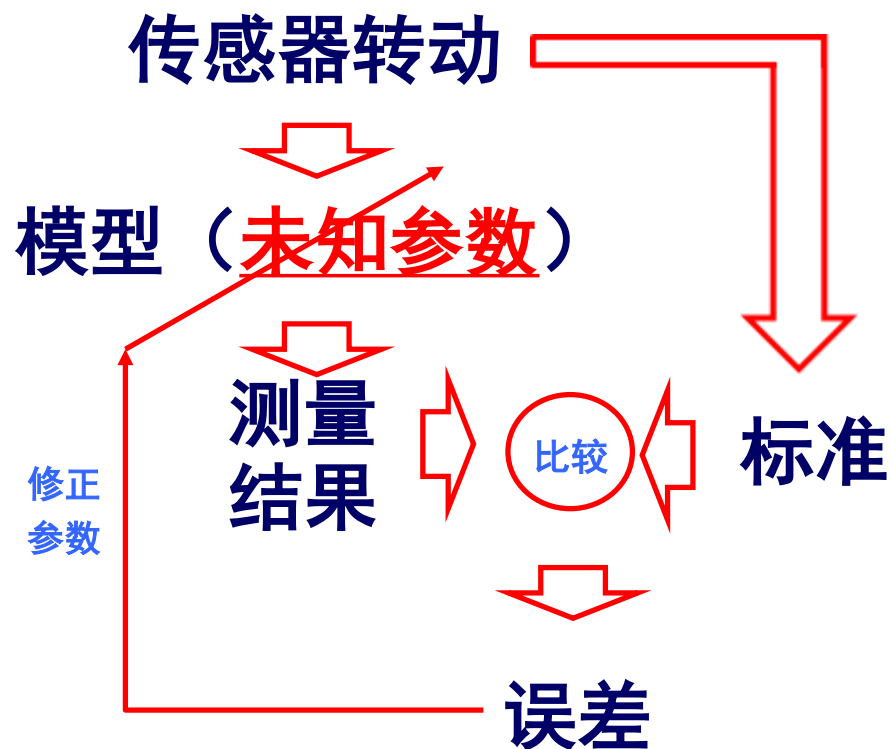
1. 实验原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结



# 实验原理

## □ 校正

### (1) 校正



### (2) 自动标定

- 一般标定：需要外部标定设备，麻烦，但精确
- 自动标定：不需要外部标定设备，简单，精度略微差



# 实验原理

## □ 三轴加速度计自动标定

### (1) 误差模型

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。误差模型如下

$${}^b\mathbf{a}_m = \mathbf{T}_a \mathbf{K}_a ({}^b\mathbf{a}'_m + \mathbf{b}'_a)$$

标定后三轴加速度值

$\mathbf{T}_a = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi_a & -\Delta\theta_a \\ -\Delta\psi_a & 1 & \Delta\phi_a \\ \Delta\theta_a & -\Delta\phi_a & 1 \end{bmatrix}$  微小旋转

$\mathbf{K}_a = \begin{bmatrix} s_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & s_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & s_{az} \end{bmatrix}$  尺度因子

标定前三轴加速度值

$\mathbf{b}'_a = \begin{bmatrix} b'_{ax} \\ b'_{ay} \\ b'_{az} \end{bmatrix}$  偏移



# 实验原理

## □ 三轴加速度计自动标定

### (2) 标定方法

为了标定加速度计的测量值，我们需要估计下列未知参数

$$\Theta_a = [\Delta\psi_a \quad \Delta\theta_a \quad \Delta\phi_a \quad s_{ax} \quad s_{ay} \quad s_{az} \quad b'_{ax} \quad b'_{ay} \quad b'_{az}]^T$$

定义了下面的函数

$${}^b\mathbf{a}_m = \mathbf{h}_a(\Theta_a, {}^b\mathbf{a}'_m) = \mathbf{T}_a \mathbf{K}_a ({}^b\mathbf{a}'_m + \mathbf{b}'_a)$$

原理：“无论加速度计位置如何放置，它的大小始终应该是常值，即当地重力矢量的实际大小”

根据这个原理，我们有

$$\Theta_a^* = \arg \min_{\Theta_a} \sum_{k=1}^M \left( \left\| \mathbf{h}_a(\Theta_a, {}^b\mathbf{a}'_{m,k}) \right\| - g \right)^2$$

$\arg \min \{ \}$  表示使目标函数取最小值时的变量值



# 实验原理

## □ 三轴磁力计自动标定

### (1) 误差模型

三轴磁力计在实际生产过程中和安装过程中，总会出现一些偏差，不仅如此周边的原件（自驾仪芯片，供电电路，电机）也会对其产生影响。误差模型如下

$${}^b\mathbf{m}_m = \mathbf{T}_m \mathbf{K}_m ({}^b\mathbf{m}'_m + \mathbf{b}'_m)$$

标定后  
三轴磁感  
应强度值

$$\mathbf{T}_m = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi_m & -\Delta\theta_m \\ -\Delta\psi_m & 1 & \Delta\phi_m \\ \Delta\theta_m & -\Delta\phi_m & 1 \end{bmatrix}$$

微小旋转

$$\mathbf{K}_m = \begin{bmatrix} s_{mx} & 0 & 0 \\ 0 & s_{my} & 0 \\ 0 & 0 & s_{mz} \end{bmatrix}$$

尺度因子

标定前  
三轴磁感  
应强度值

$$\mathbf{b}'_m = \begin{bmatrix} b'_{mx} \\ b'_{my} \\ b'_{mz} \end{bmatrix}$$

偏移



# 实验原理

## □ 三轴磁力计自动标定

### (2) 标定方法

原理：无论磁力计位置如何放置，它的真实的磁场的感应场的大小是常量，并对其进行归一化处理得  $\|{}^b\mathbf{m}_{m,k}\|^2 = 1, k = 1, 2, \dots, M$ 。

为了标定三轴磁力计模型，我们需要估计下列未知参数

$$\Theta_m \triangleq [\Delta\psi_m \quad \Delta\theta_m \quad \Delta\phi_m \quad s_{mx} \quad s_{my} \quad s_{mz} \quad b'_{mx} \quad b'_{my} \quad b'_{mz}]^T$$

我们定义了下面的函数：

$$\mathbf{h}_m(\Theta_m, {}^b\mathbf{m}'_m) \triangleq \mathbf{T}_m \mathbf{K}_m ({}^b\mathbf{m}'_m + \mathbf{b}'_m)$$

根据这个原理，我们有  $\Theta_m^* = \arg \min_{\Theta_m} \sum_{k=1}^M \left( \|\mathbf{h}_m(\Theta_m, {}^b\mathbf{m}'_{m,k})\| - 1 \right)^2$ 。



# 实验原理

---

以上原理可以详细参考“Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著. 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》, 电子工业出版社, 2018.”的第7章。





# 基础实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk自驾仪系统；
- (2) 软件：MATLAB 2017b或以上版本，PSP工具箱，QGC地面站软件，实验指导包“e3.1”（下载地址：<https://rflsim.com/course>）；
- (3) 在数据方面，若没有硬件，可以直接使用实验指导包“e3.1”中的数据。

### ■ 目标

按步骤完成加速度的标定，并绘制标定前后的指标对比图。



# 基础实验

## □ 实验步骤

### (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

#### 1) 硬件连接。

将遥控器接收机和Pixhawk

自驾仪连接好，如右图所示。



图. 硬件系统连接





# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 1) 硬件连接

打开QGC软件，如下图所示，依次选择“Vehicle Setup” -

“Airframe” - “Quadcopter x” -

“DJI Flame Wheel F450”。

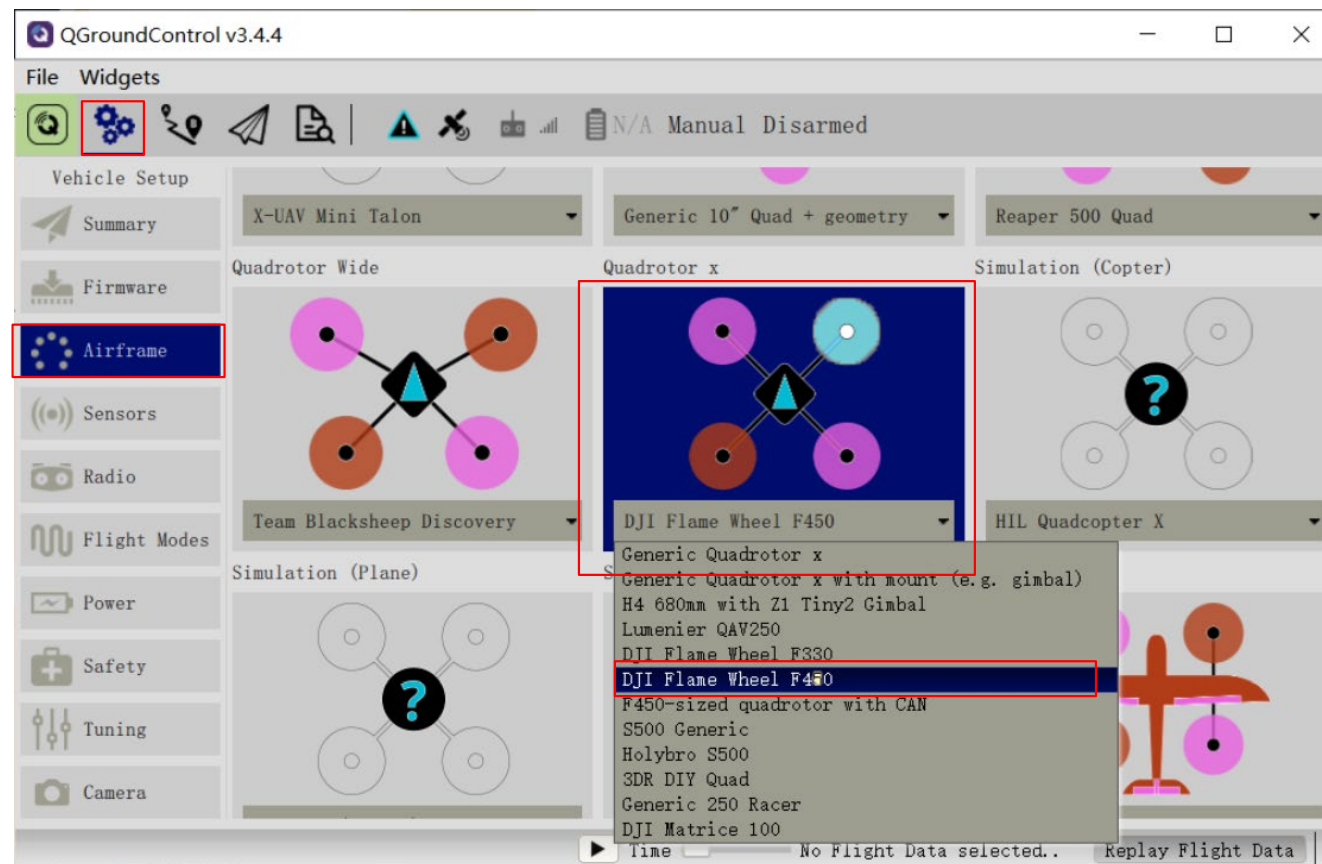


图. QGC中选择机架类型



# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 1) 硬件连接

接下来点击右上角“Apply and Restart”，然后系统会要求再次确认，点击“Apply”后自驾仪会自动重启使修改生效。如右图所示。最后按照QGC地面站软件中给出的提示进行传感器标定即可。

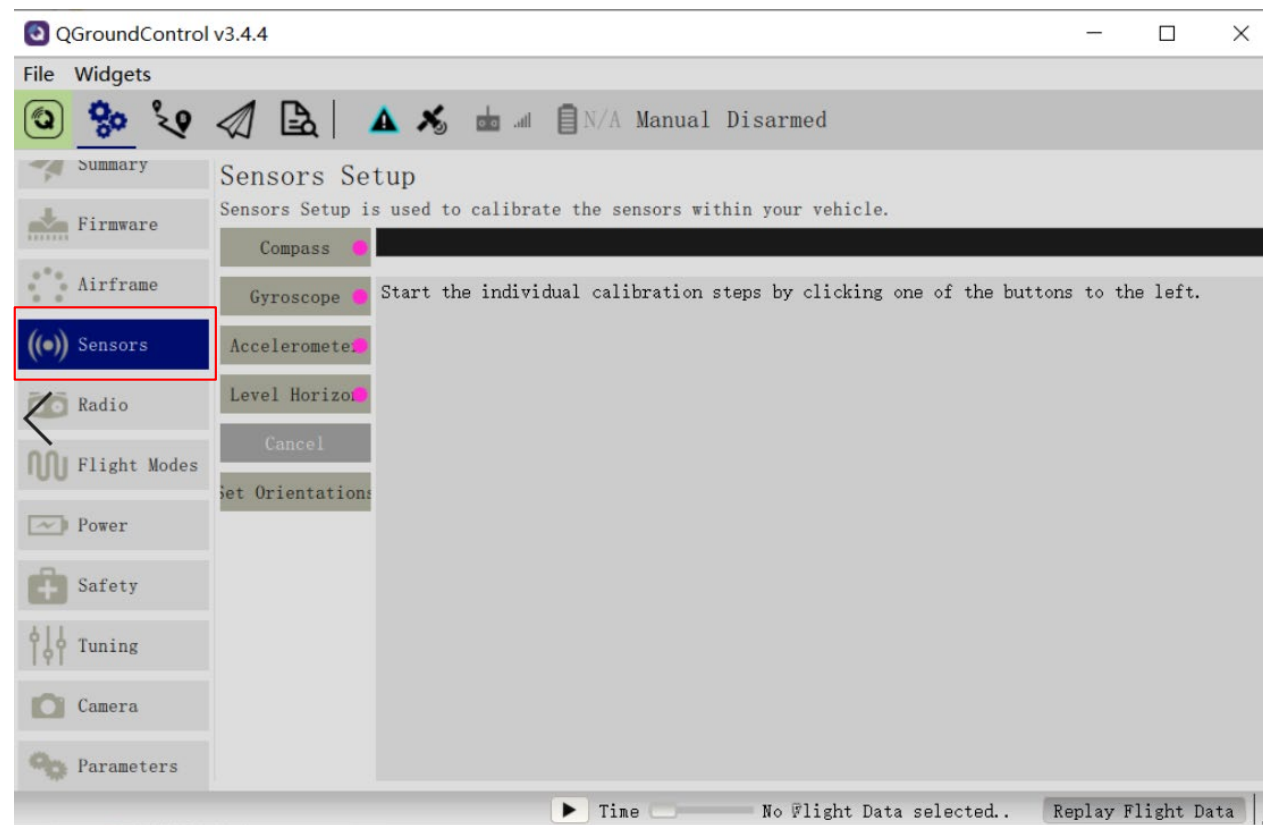


图. QGC中传感器标定



# 基础实验

## □ 实验步骤

### (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

## 2) 打开数据采集模型。

打开 “ acquire\_data\_ag.slx ” Simulink文件，如右图。该文件能使用PSP工具箱的模块搭建读取惯性传感器、遥控器数据，并将数据存储到Pixhawk的SD卡中。

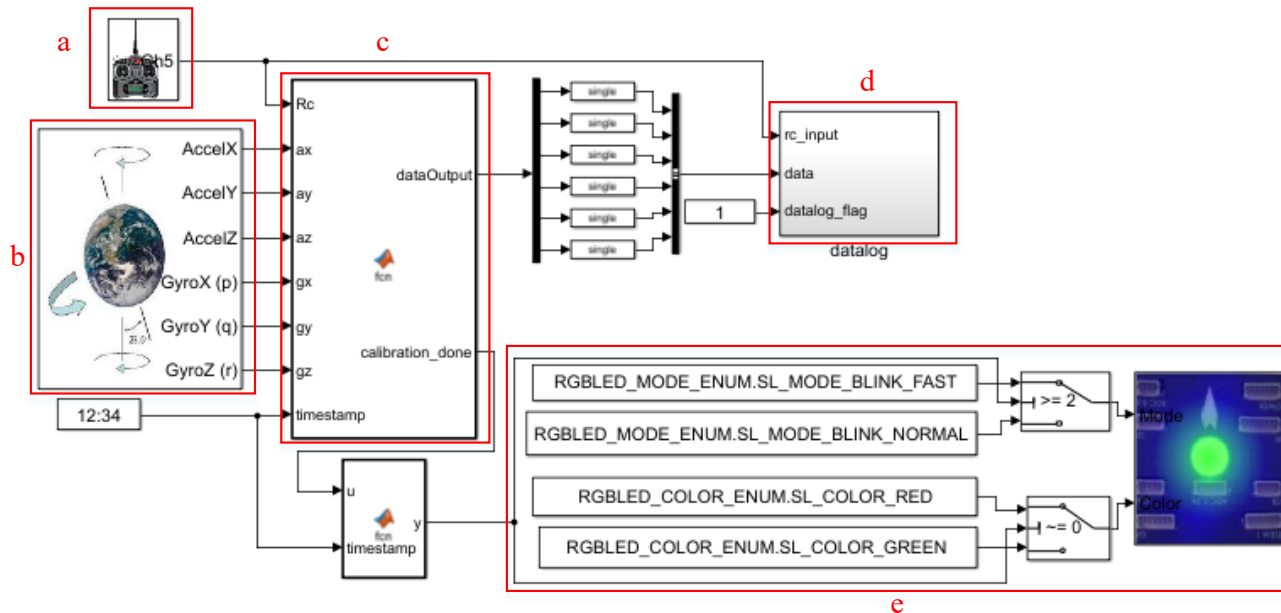


图. 加速度数据采集模型



# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 2) 打开数据采集模型。

写入数据到microSD卡使用的是“binary\_logger”模块，双击此模块，可以看到右图所示窗口。不能更改“/fs/microsd/log/e\_acc”的前三个路径名，而“e\_acc”是记录数据的文件名，可以自行更改。

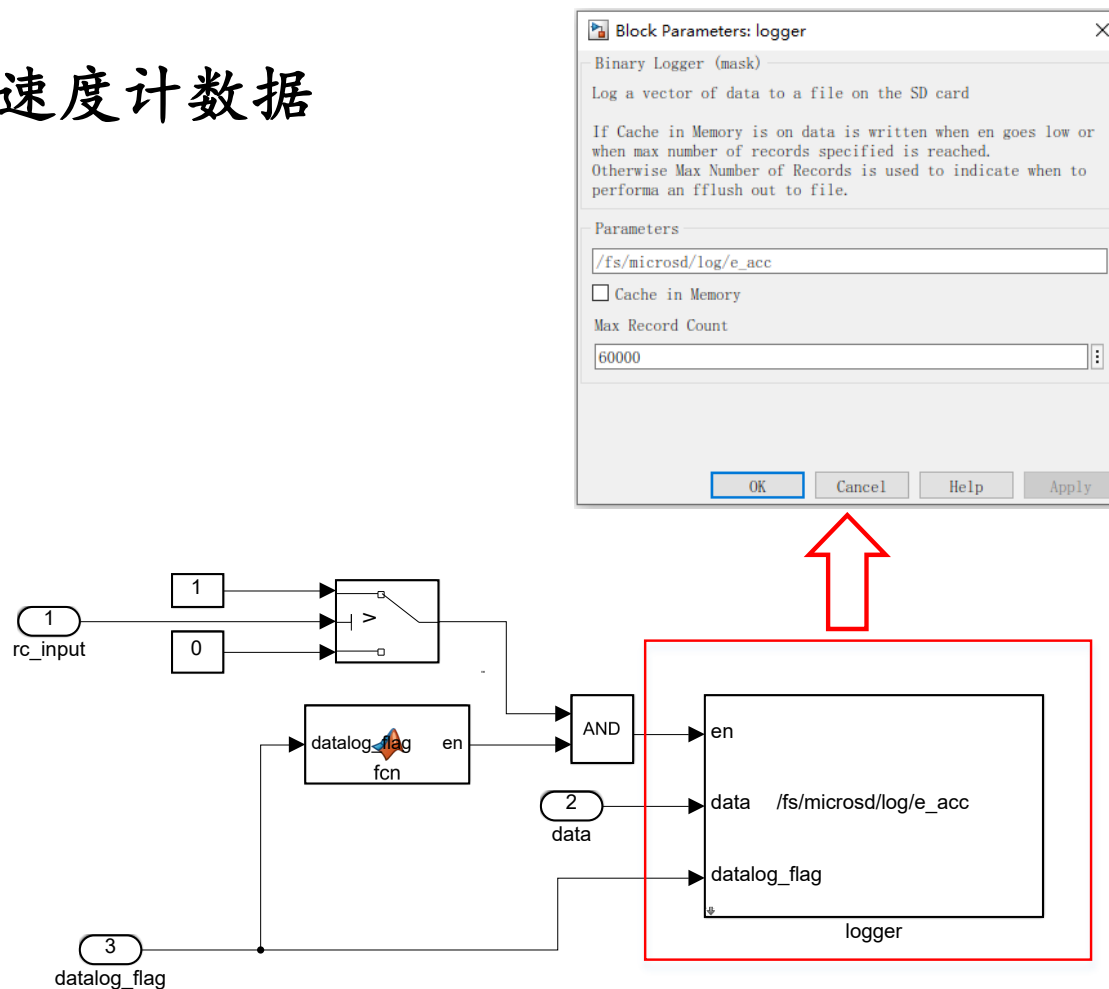


图. 加速度数据采集“binary\_logger”模块



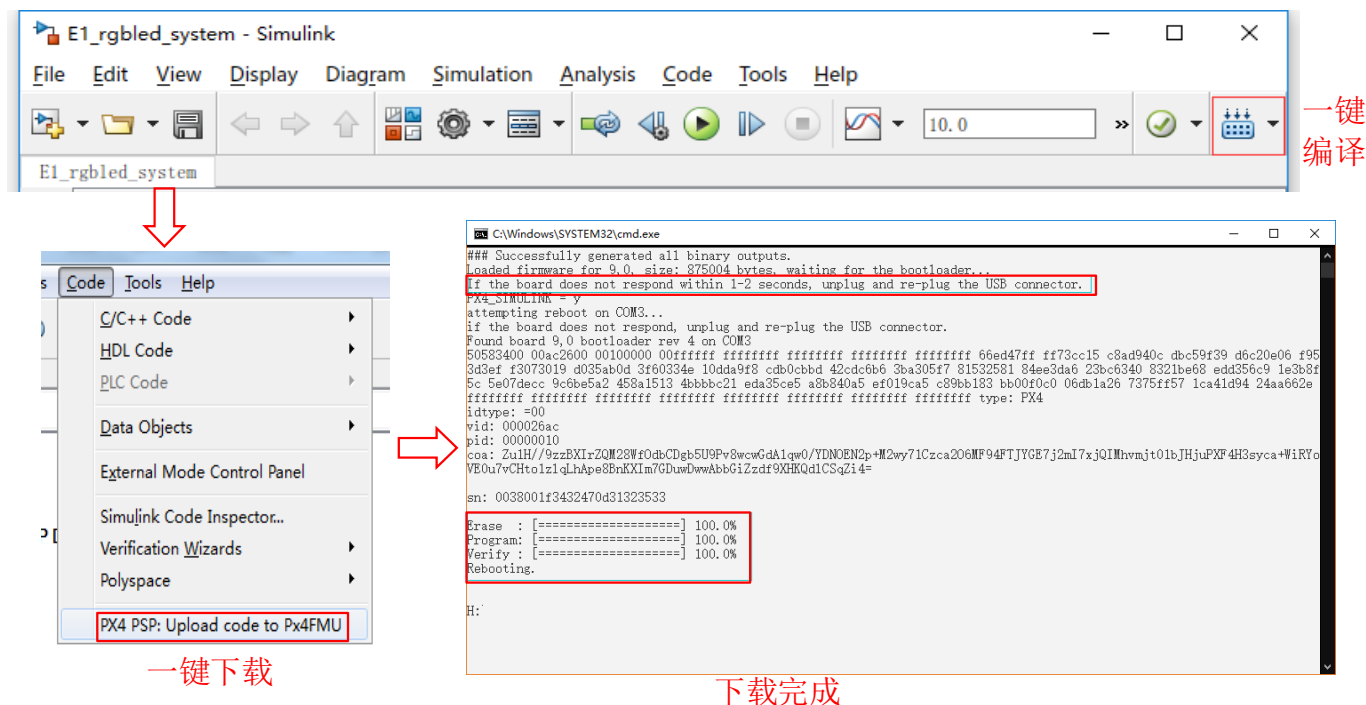


# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 3) 将设计好的数据采集模型编译并下载文件到Pixhawk自驾仪中

Pixhawk 自驾仪将能够运行数据采集模型“acquire\_data\_ag.slx”，完成数据采集。



一键编译

一键下载

下载完成



# 基础实验

---

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 4) 转动Pixhawk自驾仪，采集数据

- **放置方式。**希望采集的加速度数据测量的是重力加速度的值，而不包括由外力引起的加速度，所以需要在自驾仪静止时采集加速度（匀速运动状态人手动难以保持）。
- **采样点规则。**为减弱传感器噪声影响，取100个加速度计数据的平均值作为最后用于校准的加速度计数据（特征点）。为降低特征点之间的相关性，我们通过在采样过程中强制要求所有特征点之间的相对距离大于一定阈值。





# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 4) 转动Pixhawk自驾仪，采集数据

将遥控器ch5拨到最下（ $ch5 > 1500$ ，最远离使用者的挡位），模型中设置的是采集10个特征点，所以需要将自驾仪面向10个方向放置，如右图所示。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（最靠近使用者的档位）停止写数据到SD卡。



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°

图. 自驾仪放置方式





# 基础实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪加速度计数据

### 5) 读取数据

将SD卡取出，使用读卡器将文件“e\_acc\_A.bin”复制到目录“e3\e3.1”中。采用提供函数

```
[datapoints, numpoints] =
```

```
px4_read_binary_file('e_acc_A.bin')
```

解码数据，最终数据保存在“datapoints”中，数据个数保存在“numpoints”中。采集到的x轴数据如右图。

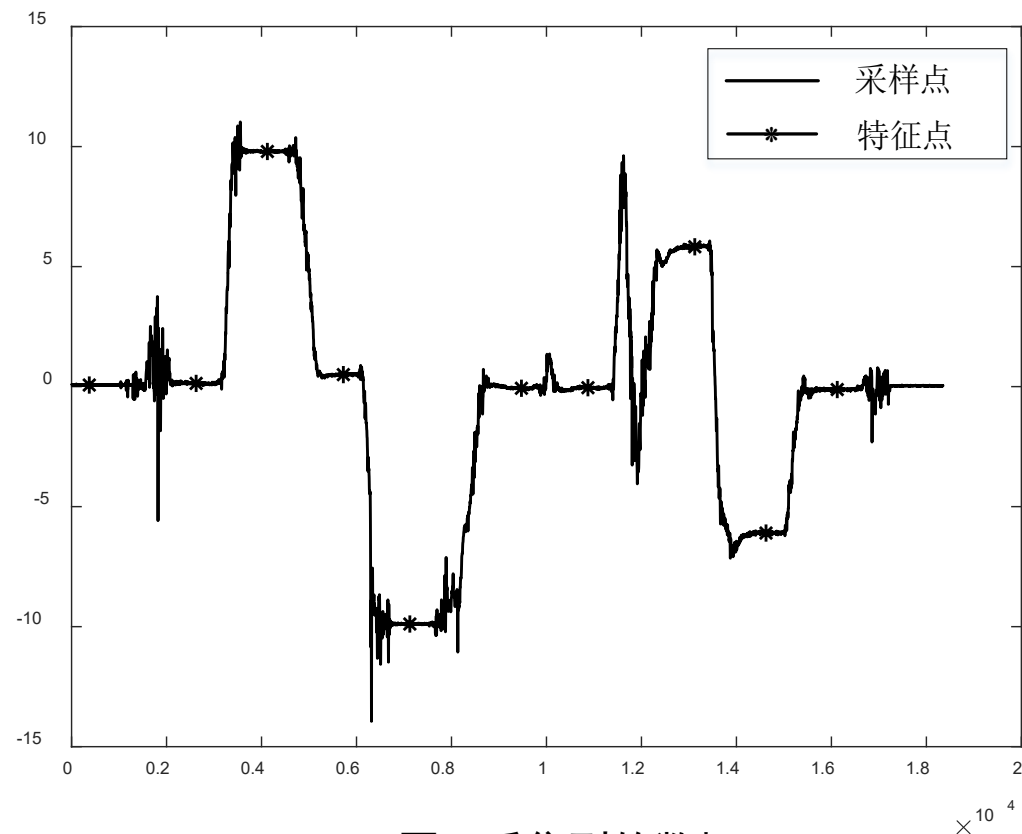


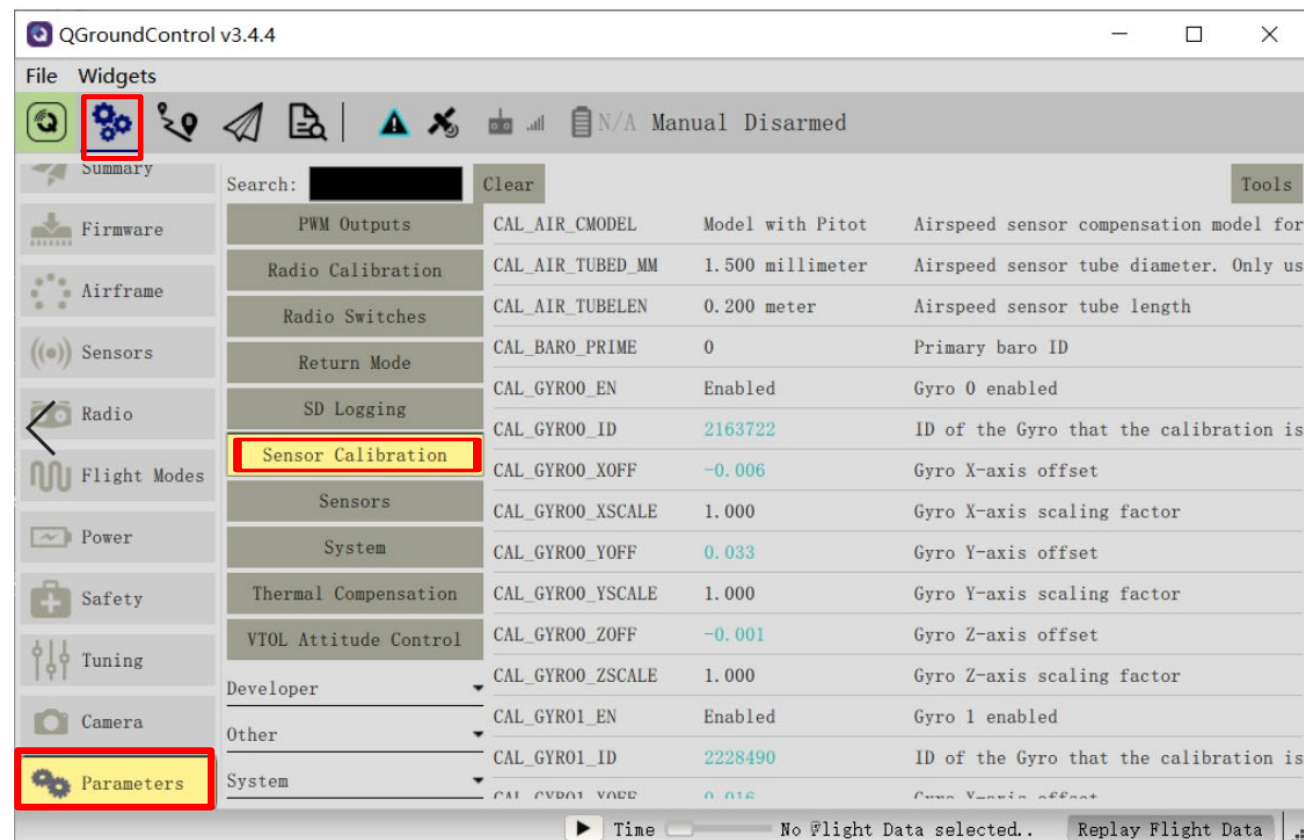
图. 采集到的数据



# 基础实验

## (2) 步骤二：参数标定

为了读出Pixhawk自驾仪对加速度计的标定参数，得出未经标定的原始数据，将自驾仪与地面站相连。接下来进入参数列表，然后找到传感器的标定系数，具体过程如右图所示。然后，根据获得的参数将数据还原为非标定数据。





# 基础实验

## (2) 步骤二：参数标定

### 1) LM函数使用说明

$$p = \text{lm}(\text{func}, p, x, y\_dat, dp, p\_min, p\_max)$$

- 输入参数：
- **func** 函数名  $y\_hat = \text{func}(x, p)$ ，其函数关系式为  $\|T_a K_a ({}^b a'_m + b'_a)\|$ ，令  $T_a = I_3$
- **p**: 待估计参数的初始化值
- **x**: 特征点
- **dp**: 与Jacobian矩阵的求解有关。
- **p\_min**: 未知参数的最小值，默认  $-100 * \text{abs}(p)$
- **p\_max**: 未知参数的最大值，默认  $100 * \text{abs}(p)$
- 输出
- **p**: 算法迭代估计出的未知参数值，即为  $\Theta_a^*$





# 基础实验

## (2) 步骤二：参数标定

2) 利用LM算法，编写m文件，主要代码见calLM.m文件，主要代码如下表图所示。

```
1 %文件描述:
2 % 根据加速度计误差模型，使用lm优化算法对加速度计误差模型参数进行计算。
3 close all
4 clc
5 clear
6
7 load AccRaw %加载未标定加速度计值
8 g = 9.8;
9 m = length(AccRaw);
10
11 y_dat = g*ones(m, 1); %期望重力加速度值
12 p0 = [1 1 1 0 0 0]';
13 p_init = [1.0 1.0 1.0 0.1 0.1 0.1]'; %加速度计误差模型参数初始值
```

```
14 y_raw = calFunc(AccRaw, p0); %未标定时的重力加速度值
15 y_raw = y_raw(:);
16
17 r_raw = y_dat - y_raw; %未标定时加速度计测量的重力加速度与
18 标准重力加速度的差
19 p_fit = lm('calFunc', p_init, AccRaw, y_dat);
20 y_lm = calFunc(AccRaw, p_fit); %标定后的重力加速度值
21 y_lm = y_lm(:);
22 r_lm = y_dat - y_lm;
23
24 kx = p_fit(1);
25 ky = p_fit(2);
26 kz = p_fit(3);
27 bx = p_fit(4);
28 by = p_fit(5);
29 bz = p_fit(6);
30
31 Ka9_8 = [kx 0 0; 0 ky 0; 0 0 kz]
32 ba9_8 = [bx by bz]'
33 save('calP9_8', 'Ka9_8', 'ba9_8')
```





# 基础实验

## (2) 步骤二：参数标定

标定结果如图，可以看到标定后残差变小了，指标函数也明显减小。同时得到的标定参数如下：

$$\mathbf{K}_a^* = \begin{bmatrix} 0.9912 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9974 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9947 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{b}_a^* = \begin{bmatrix} 0.0168 \\ 0.2691 \\ 0.1253 \end{bmatrix}$$

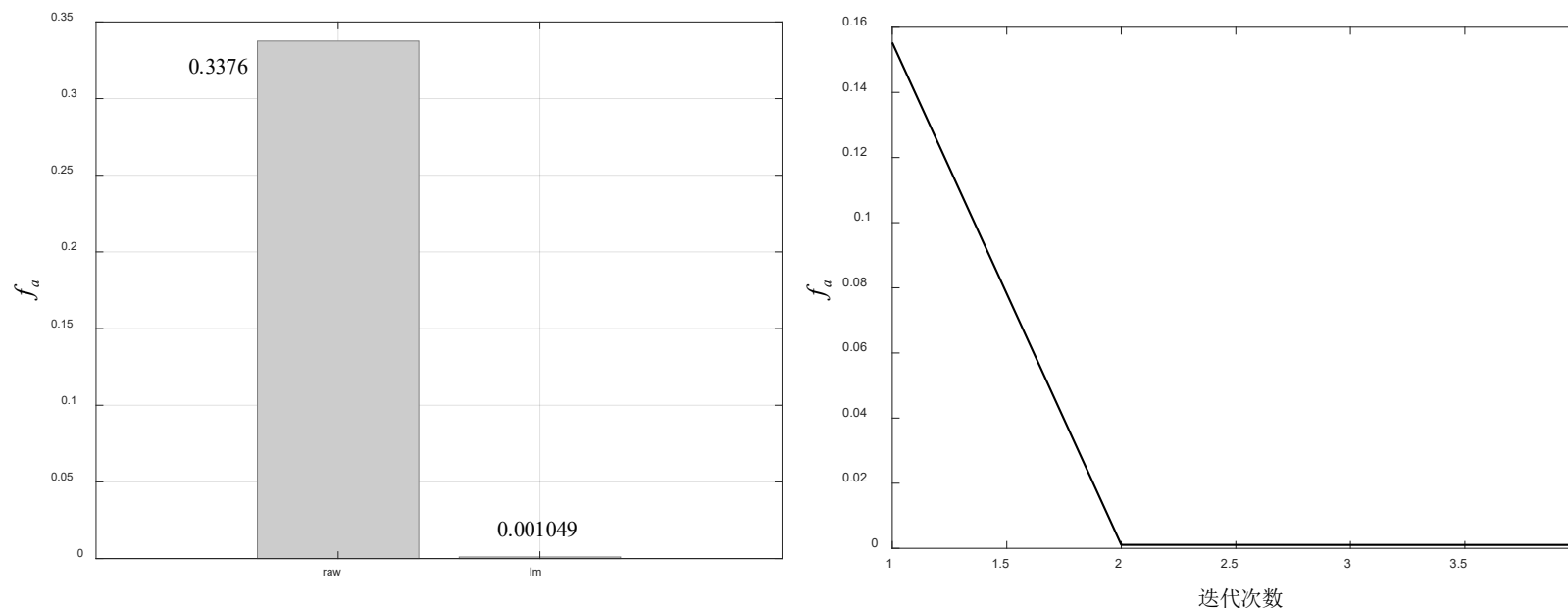


图. 加速度校正对比值





# 分析实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

基础实验所采集的加速度数据及相关文件。

### ■ 目标

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，体会两种方式对标定参数产生的影响，并分析结果对角度计算的影响。



# 分析实验

## □ 实验分析

最优参数解  $\Theta_a^*$  被得到后，可以得到如下关系

$$\left. \frac{\partial \sum_{k=1}^M \left( \left\| \mathbf{T}_a \mathbf{K}_a^* \left( {}^b \mathbf{a}'_m + \mathbf{b}'_m \right) \right\| - g \right)^2}{\partial \Theta_a} \right|_{\Theta_a = \Theta_a^*} = 0$$

其中  $\mathbf{T}_a = \mathbf{I}_3$ 。若重力加速度发生改变，例如  $g$  变成  $\alpha g, \alpha > 0$ 。则上式两边同时乘以  $\alpha$  可以得到如下关系式

$$\left. \frac{\partial \sum_{k=1}^M \left( \left\| \mathbf{T}_a \alpha \mathbf{K}_a^* \left( {}^b \mathbf{a}'_m + \mathbf{b}'_m \right) \right\| - \alpha g \right)^2}{\partial \Theta_a} \right|_{\Theta_a = \Theta_a^*} = 0$$

这意味着在重力加速度改变后，可以得到  $\mathbf{K}_a^{*'} = \alpha \mathbf{K}_a^*$  和  $\mathbf{b}_a^{*'} = \mathbf{b}_a^*$







# 分析实验

## □ 标定步骤

(1) 步骤一：更改性能指标函数中的参考标准值。打开“calLM.m”文件，将g由9.8改为1。

(2) 步骤二：将在基础实验中获得的传感器数据复制到“calLM.m”文件所在目录下。

(3) 步骤三：得到标定结果和曲线。运行“calLM.m”文件，即可得到标定结果和曲线。

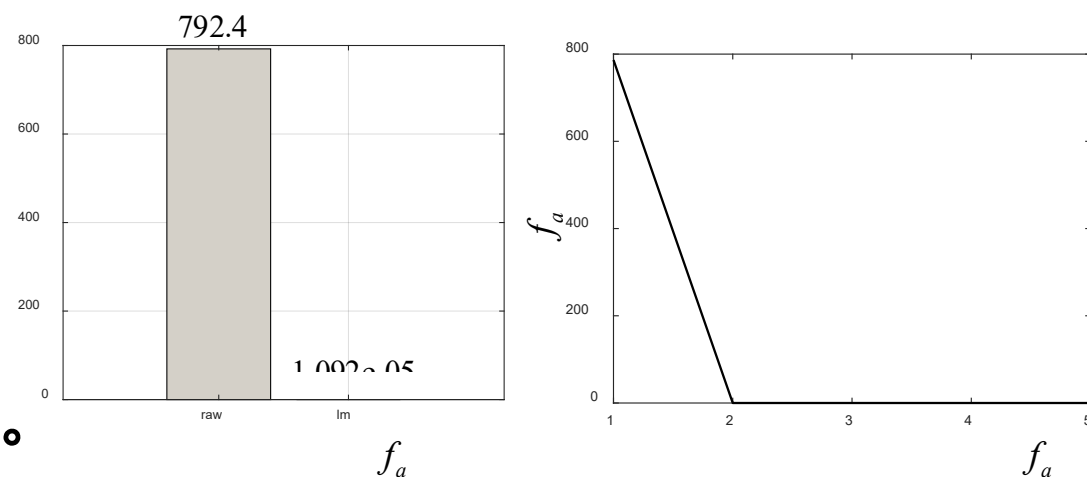


图.  $g=1$ 时的标定结果



# 分析实验

## □ 实验步骤

(3) 步骤三：得到标定结果和曲线。

■  $g=9.8$

$$\mathbf{K}_a^{*'} = \begin{bmatrix} 0.9912 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9974 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9947 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_a^{*'} = \begin{bmatrix} 0.0168 \\ 0.2691 \\ 0.1253 \end{bmatrix}$$

■  $g=1$

$$\mathbf{K}_a^{*'} = \begin{bmatrix} 0.1012 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1017 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1014 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_a^{*'} = \begin{bmatrix} 0.0123 \\ 0.2771 \\ 0.1456 \end{bmatrix}$$

可以看到偏置的标定结果很接近， $K_a$ 的变化较大。理想情况下， $g$ 由原先的9.8改为1后，尺度因子 $K_a$ 应该缩小为原来的1/9.8，对比 $g=9.8$ 和 $g=1$ 的标定结果，发现正好吻合。



# 分析实验

## □ 实验步骤

### (3) 步骤三：得到校正结果和曲线

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。为了观察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，如右图所示。可以观察得到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。

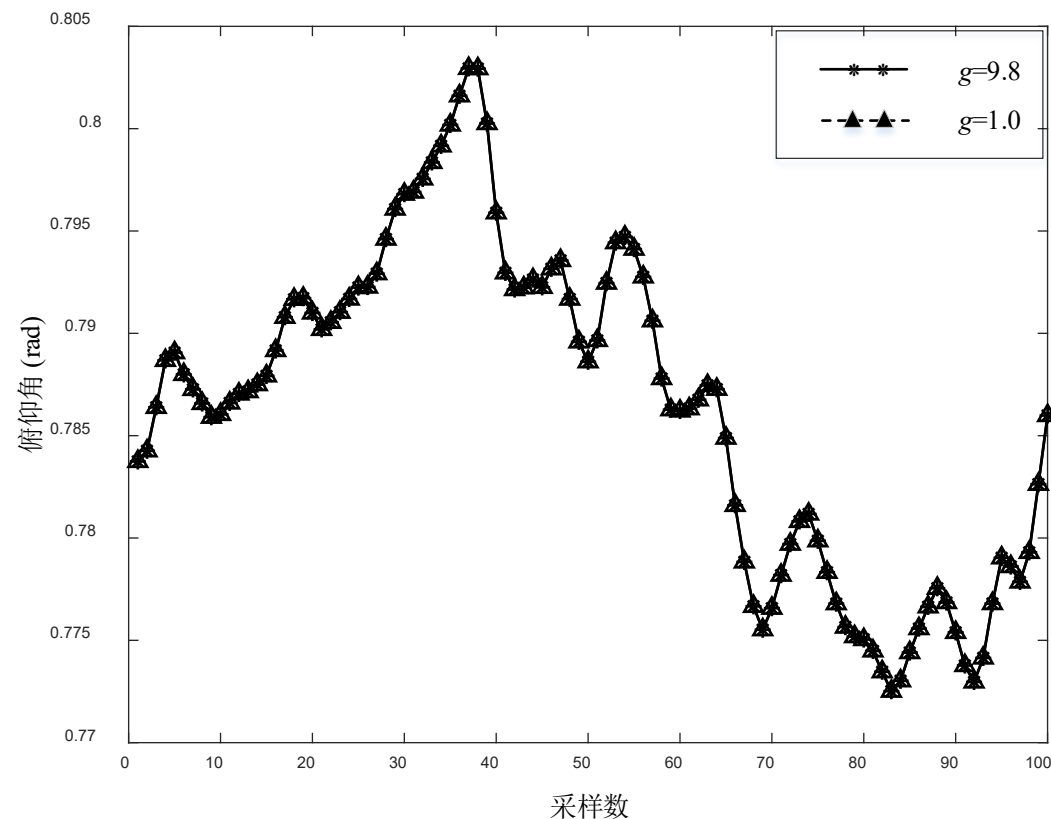


图. 不同g值对俯仰角影响





# 设计实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

- (1) 硬件: Pixhawk 自驾仪系统;
- (2) 软件: MATLAB 2017b或以上版本, PSP工具箱, QGC地面站软件, 实验指导包“e3.3” (下载地址: <https://rflysim.com/course>);
- (3) 在数据方面, 若没有硬件, 可以直接使用实验指导包“e3.1”中的数据。

### ■ 目标

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。



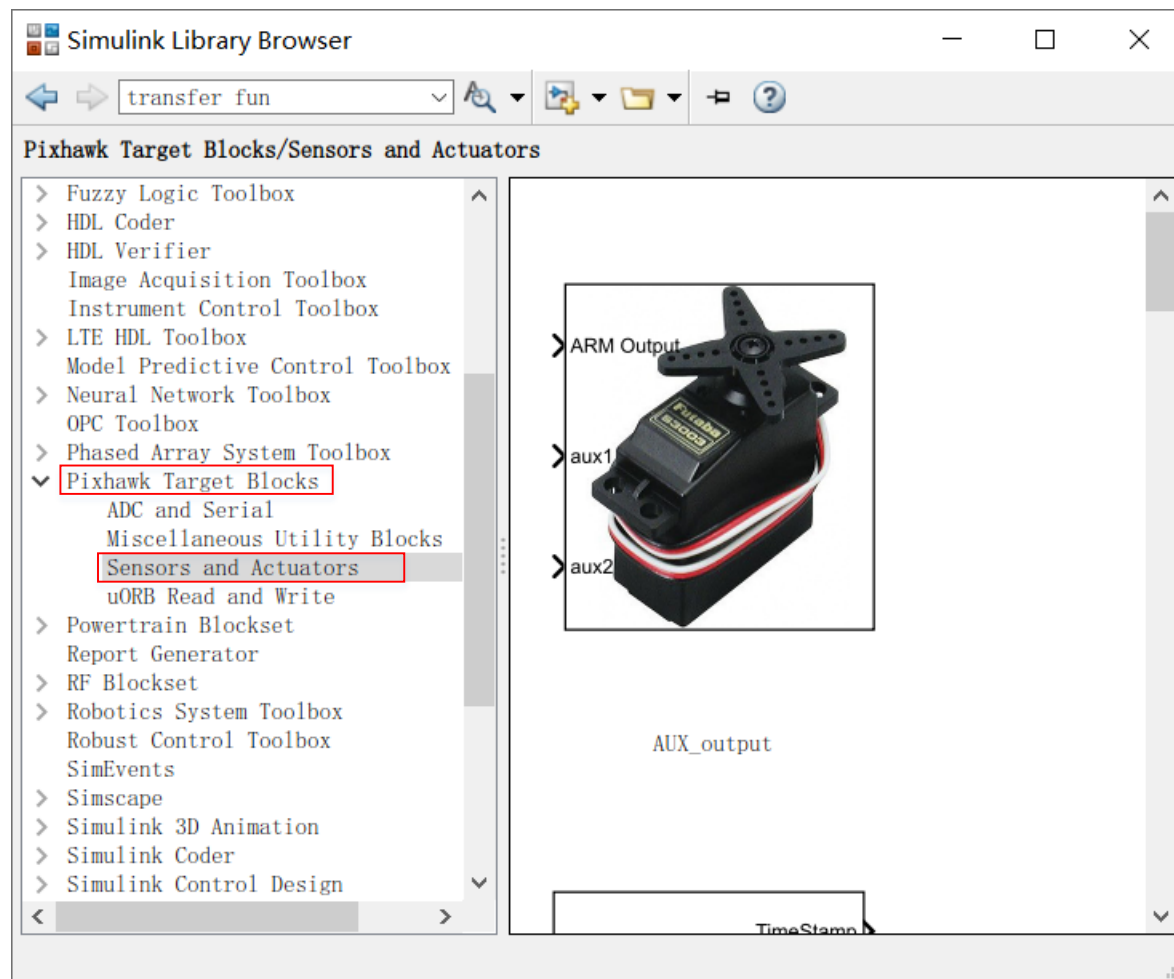
# 设计实验

## □ 磁力计标定步骤

### (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪 磁力计数据

#### 1) 搭建数据采集模型。

新建一个Simulink文件，从PSP工具箱（如右图）中提取相应的输入输出接口。使用PSP工具箱相应的模块搭建读取惯性传感器、遥控器数据并将数据存储到Pixhawk的SD中的数据采集模型。





# 设计实验

## □ 磁力计标定步骤

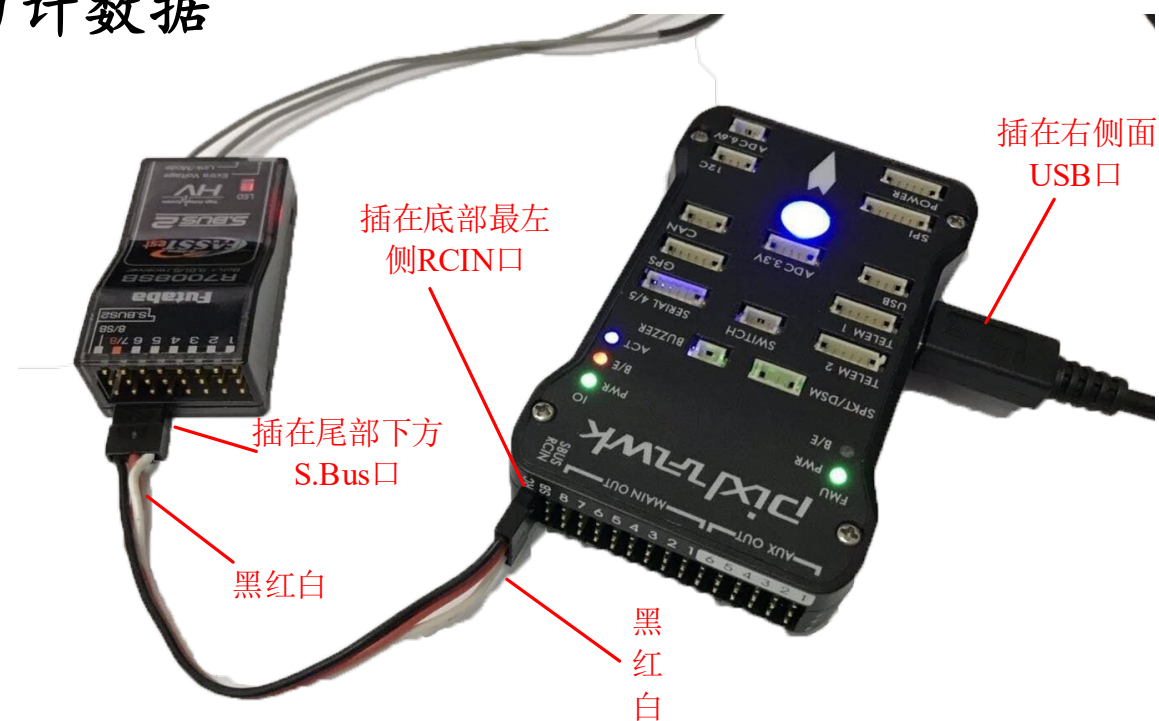
(1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪磁力计数据

2) 硬件连接。

将遥控器接收机和Pixhawk自驾

仪连接好。如右图所示。

3) 代码编译及下载。







# 设计实验

## □ 磁力计标定步骤

### (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪磁力计数据

#### 4) 采集数据

首先，将遥控器CH5 通道拨到最顶部，开始采集数据。然后按照右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。每个方向数据采集完成后，红灯会慢闪；六个方向的数据采集完成后，红灯会快闪。最后，将遥控器CH5 通道拨到最底部（最靠近使用者的档位）停止采集数据。



①朝上



②朝下



③朝左



④朝右



⑤朝上



⑥朝下

图. 6面数据采集



# 设计实验

## (1) 步骤一：获取Pixhawk自驾仪磁力计数据

### 5) 读取数据

将 SD 卡取出，使用读卡器将文件  
“e3\_m\_A.bin”复制到目录“e3\e3.3”。采用函数  
`[datapoints, numpoints] =`  
`px4_read_binary_file(e3_m_A.bin)`

解码数据，数据保存在“datapoints”中，数据个数保存在“numpoints”中。采集到的数据右图所示。

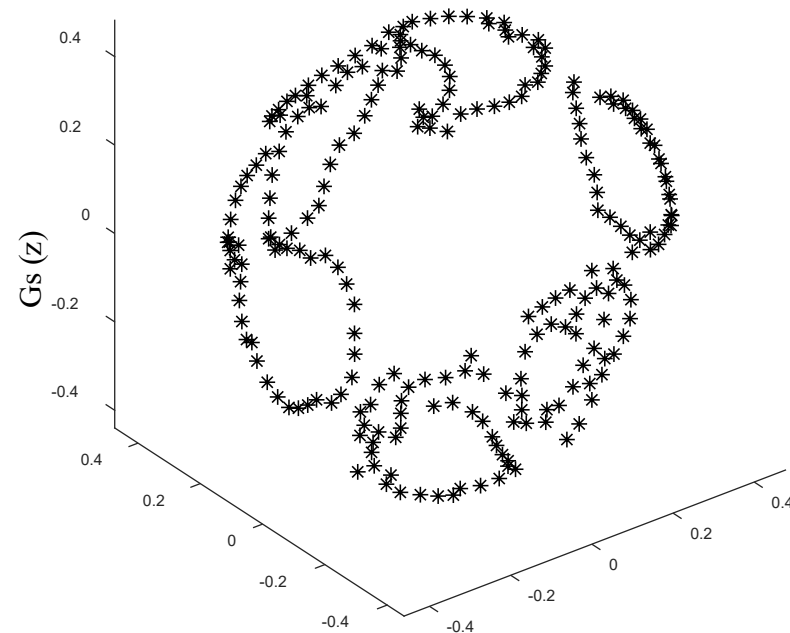


图. 采集的磁力计数据





# 设计实验

利用LM算法，编写m文件，实现校正，见文件  
“calLM.m”，其主文件如下表所示。

```
1 close all
2 clc
3 clear
4 load MagRaw.mat
5 CAL_MAG_SCALE = [1, 1, 1]'; %自驾仪中的标定值
6 CAL_MAG_OFF = [0.064, 0.014, -0.053]';
7 MagRaw = (mag + CAL_MAG_OFF)./CAL_MAG_SCALE; %原始的
  磁力计数据
8
9 m = length(MagRaw);
10 MagSum = 0;
11 for k = 1 : m
12     MagSum = MagSum + norm(MagRaw(:, k));
13 end
14 MagAver = MagSum/m; %估计的磁场强度大小
15 Vdata = MagRaw/MagAver; %归一化
16
17 y_dat = ones(m, 1);
18 p0 = [1 1 1 0 0 0]';
```

```
19 p_init = [1 1 1 0.01 0.01 0.01]'; %参数估计初始值
20
21 y_raw = calFunc(Vdata, p0); %未标定时的磁力计值
22 y_raw = y_raw(:);
23 r_raw = y_dat - y_raw;
24 p_fit = lm('calFunc', p_init, Vdata, y_dat, 0.001);
25 y_lm = calFunc(Vdata, p_fit); %标定后的磁力计值
26 y_lm = y_lm(:);
27 r_lm = y_dat - y_lm;
28 y_px4 = calFunc(mag/MagAver, p0); %px4标定过的磁力计值
29 y_px4 = y_px4(:);
30 r_px4 = y_dat - y_px4;
31
32 kx = p_fit(1);
33 ky = p_fit(2);
34 kz = p_fit(3);
35 bx = p_fit(4);
36 by = p_fit(5);
37 bz = p_fit(6);
38
39 Km = [kx 0 0; 0 ky 0; 0 0 kz]
40 bm = [bx by bz]'
```



# 设计实验

## 磁力计标定步骤

### (2) 步骤二：参数标定

校正结果如下,可以看到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。得到的校正参数:

$$\mathbf{K}_m^* = \begin{bmatrix} 0.9853 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0202 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0004 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_m^* = \begin{bmatrix} -0.1448 \\ -0.0334 \\ -0.0898 \end{bmatrix}$$

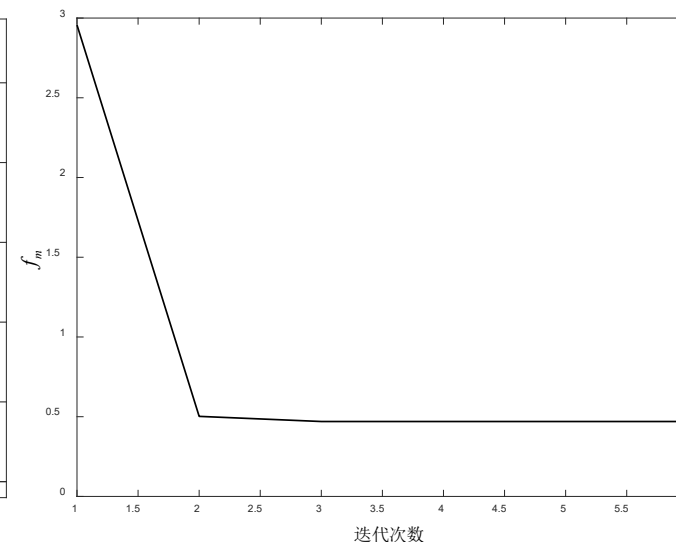
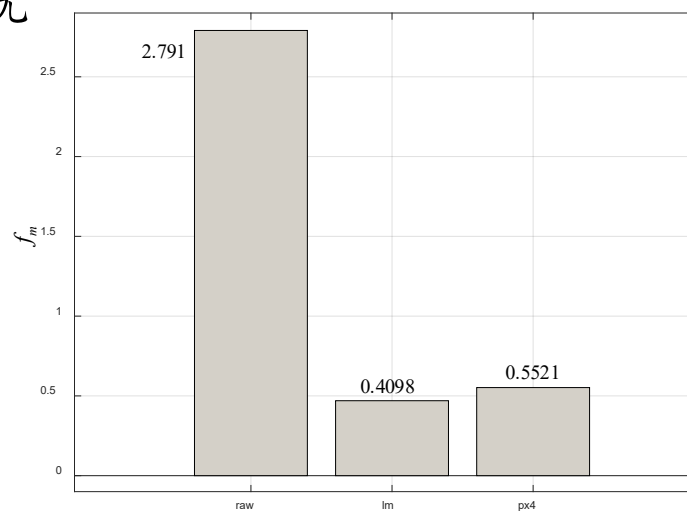


图. 磁力计校正对比值



## 小结

---

- (1) 本实验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。
- (2) 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。
- (3) 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 $K_a$ 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。
- (4) 采集磁力计数据时，采样六面旋转的方式采集数据，通过编写标定程序，结果表明对原始传感器数据的标定结果符合预期。

如有疑问，请到<https://rflsim.com>查询更多信息。



# 资源

- 本课程的所有课件、视频和源码将会发布在官方网站: <https://rflysim.com/zh>
- 更详细的内容可以参考我们的教材: 全权, 戴训华, 王帅著. 《多旋翼飞行器设计与控制实践》. 北京: 电子工业出版社. 2020
- 扫二维码关注可靠飞行控制研究组公众号 [buaarfly](#) (文章、资讯等)
- 多旋翼控制实践课程交流QQ群: [951534390](#) (答疑、资料分享等)
- 如果遇到任何问题, 也可以在我们的Github页面查找答案或提问  
<https://github.com/RflySim/RflyExpCode/issues>
- 针对无人机/无人车的视觉/集群/AI等顶层控制算法的快速开发与验证, RflySim同时推出了高级版平台和课程, 请访问我们的网站了解更多  
[https://rflysim.com/zh/4\\_Pro/Advanced.html](https://rflysim.com/zh/4_Pro/Advanced.html)
- 我们的官方联系邮箱是: [rflysim@163.com](mailto:rflysim@163.com)





# 致谢

---

## 感谢控制组同学



王帅



宁俊清

为本节课程准备做出的贡献



---

# 谢 谢！