



---

# RflySim 底层飞行控制算法开发系列课程

## 第七讲 传感器标定实验



# 大纲

---

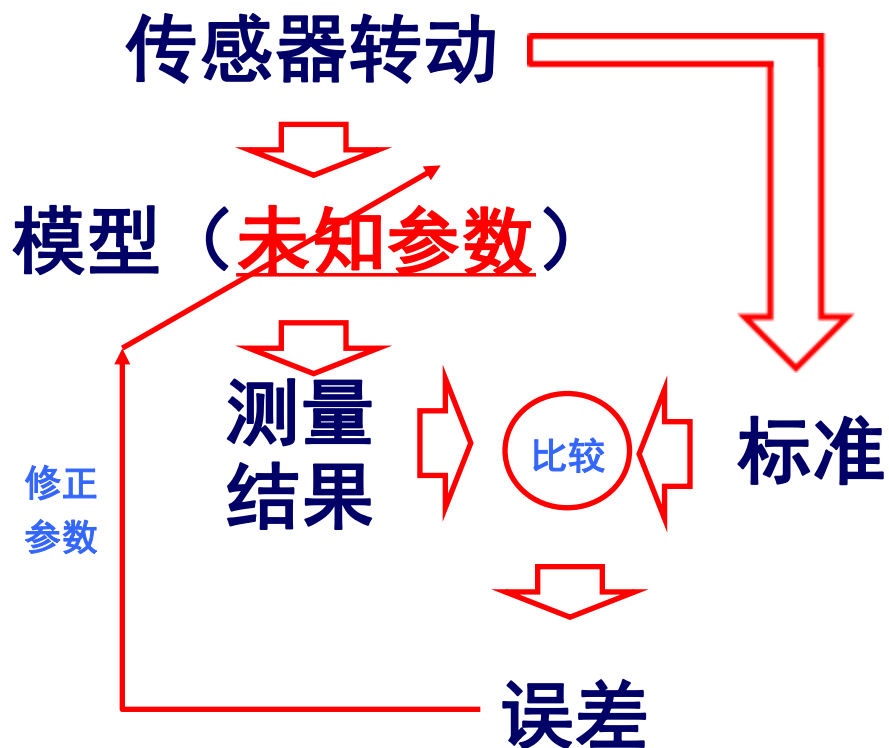
1. 实验原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结



# 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  $\Theta_m^* = \arg \min_{\Theta_m} \sum_{k=1}^M (\|\mathbf{h}_m(\Theta_m, {}^b\mathbf{m}'_{m,k})\| - 1)^2$ 。



## 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“[RflySimAPIs\Exp02\\_FlightControl\e3-SensorCalib\e3.1](https://rflsim.com/course)”（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

见 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\e3-SensorCalib\e3.1\readme.docx](#)”





# 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

---

## □ 实验步骤

见 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\e3-SensorCalib\e3.2\readme.docx](#)”





## □ 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 “[RflySimAPIs\Exp02\\_FlightControl\e3-SensorCalib\e3.3](https://rflsim.com/course)”  
(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

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。



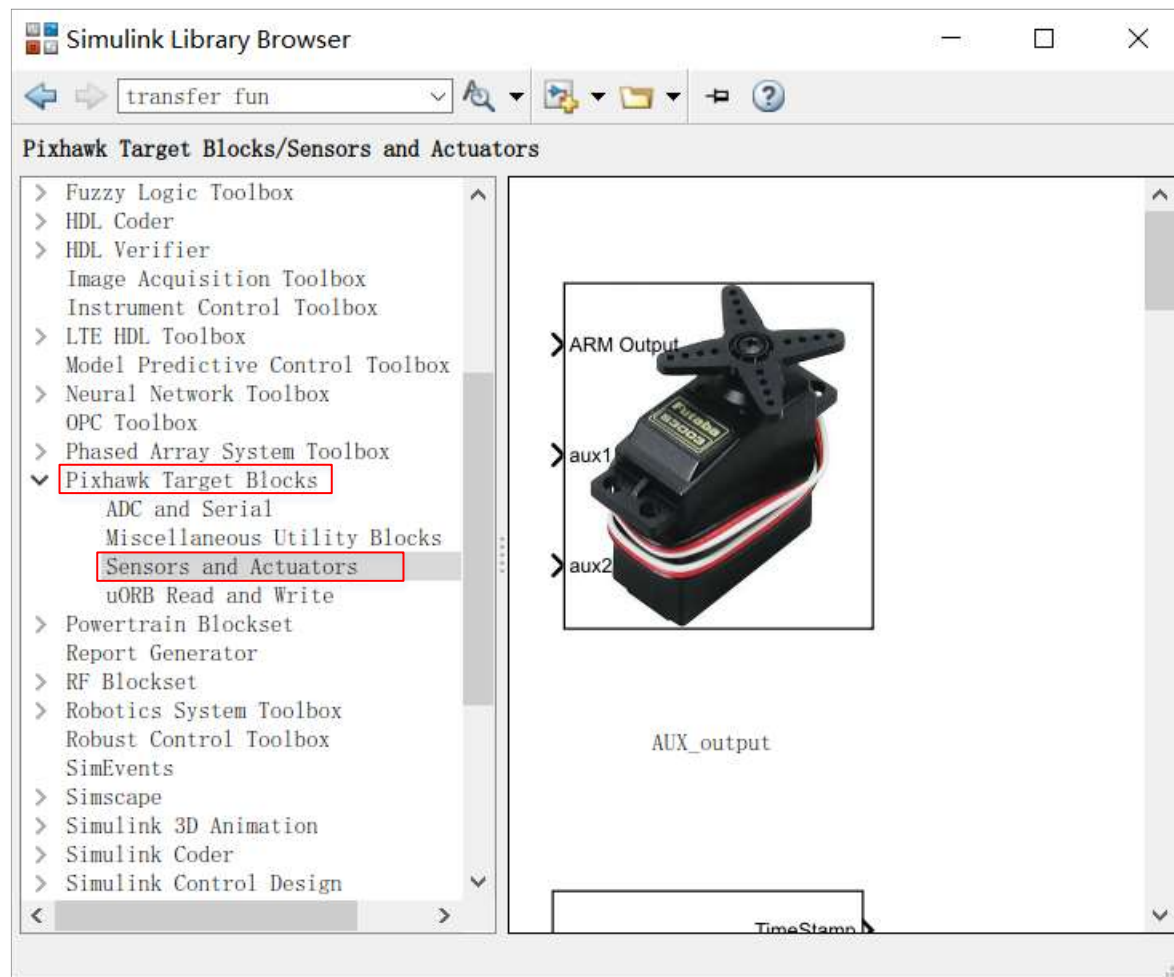
# 设计实验

## □ 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。







## □ 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。

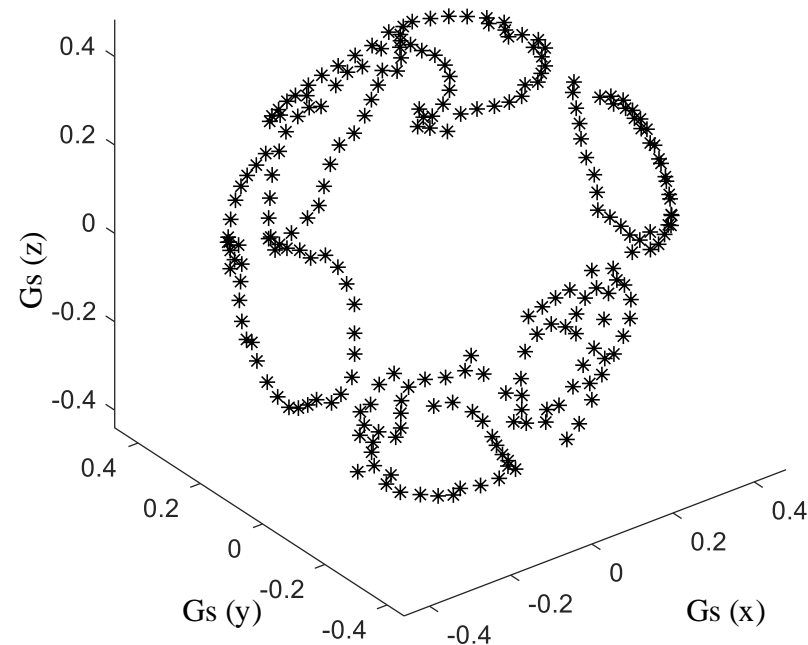


图. 采集的磁力计数据



# 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]'
```





## □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:

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

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

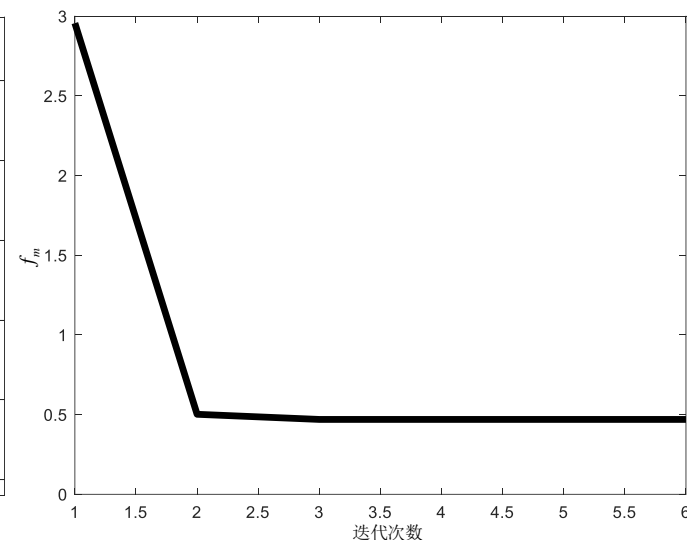
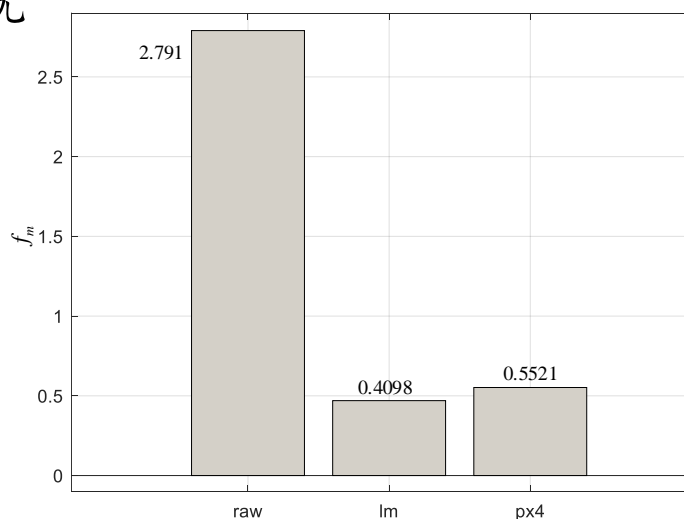


图. 磁力计校正对比值





# 设计实验

---

## □ 实验步骤

见 “[RflySim3D\Exp02\\_FlightControl\3-SensorCalib\3.3\readme.docx](#)”





## 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://doc.rflysim.com>查询更多信息。



**谢 谢！**