

IMU你真的了解吗?

IMU原理+噪声模型+标定+选型介绍

苏赞

2022.01.04

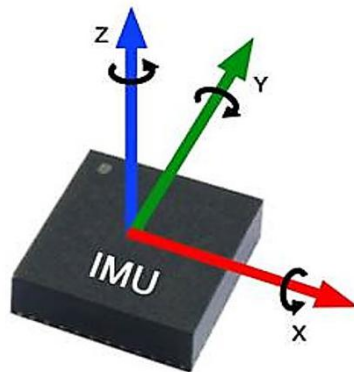
广州视源电子科技股份有限公司
Guangzhou Shiyuan Electronic Technology Company Limited



➤ 能做什么

- IMU: Inertial measurement unit, 惯性测量单元

- ✓ 加速度计: 测量线加速度;
- ✓ 陀螺仪: 测量旋转角速度;



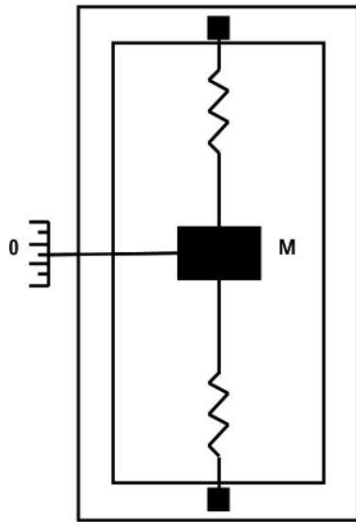
➤ MEMS加速度计工作原理

- 加速度计的本质是检测力而非加速度，即加速度计的检测装置捕获的是引起加速度的惯性力，随后可利用牛顿第二定律获得加速度值。
- 测量原理可以用一个简单的质量块 + 弹簧 + 指示计来表示
- 加速度计测量值 a_m 为弹簧拉力对应的加速度，

$$a_m = \frac{f}{m} = a - g$$

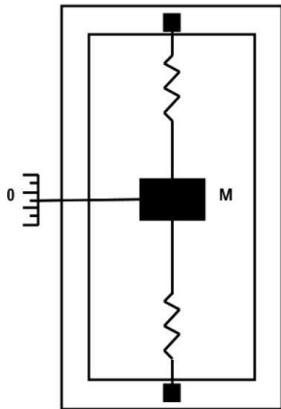
f 弹簧拉力，a 物体在惯性系下的加速度，g 重力加速度

- MEMS 加速度计利用电容或者电阻桥来等原理来测量 a_m



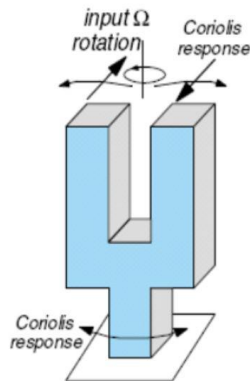
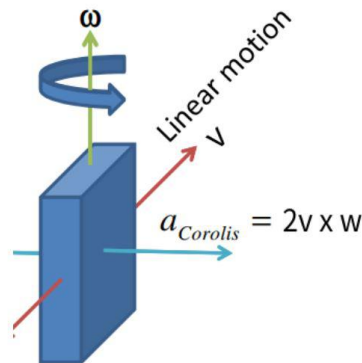
➤ MEMS加速度计工作原理

- 通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件和适调电路等部分组成。
- 根据传感器敏感元件的不同，常见的加速度传感器包括：
 - ✓ **压阻式**：压阻式加速度传感器的质量块在加速度的惯性力作用下发生位移，使固定在悬臂梁上的压敏电阻发生形变，通过测试电阻的变化量，可以得到加速度的大小。
 - ✓ **压电式**：压电元件受到质量块与加速度相反方向的惯性力的作用，在晶体的两个表面上产生交变电荷（电压），传感器的输出电荷（电压）与作用力成正比。
 - ✓ **电容式**：由于惯性力作用导致惯性质量块发生的微位移，平行板电容器的电容值就会发生相应的改变，实际应用中，经常采用差分电容的方式。



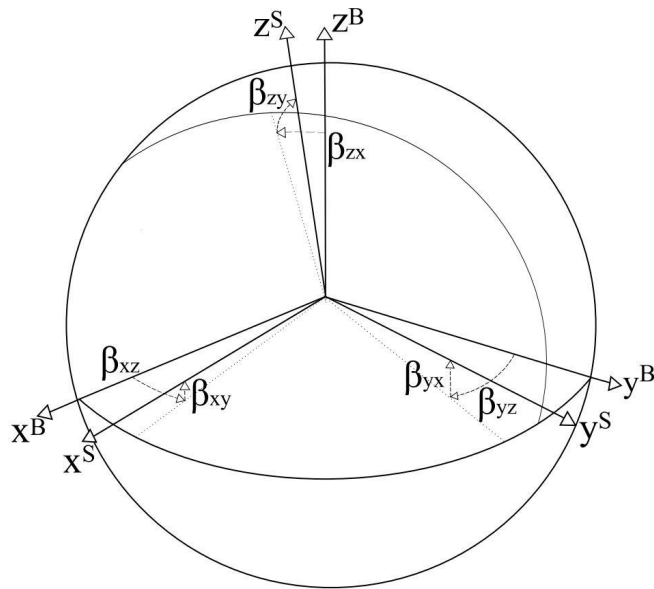
➤ MEMS陀螺仪工作原理

- ✓ 科里奥利力——旋转物体在有径向运动时所受到的切向力。利用科里奥利力正比于角速度的特点，陀螺仪便可以通过它来测量角速度。
- ✓ 以MEMS陀螺仪常见的微机械音叉式陀螺结构为例，陀螺仪中间有一个悬在空中的质量块，它可以在两个互相垂直的平面内振动。在一般状态下，陀螺仪通过加震荡电压迫使质量块在其中一个平面做振动，也就是提供了科里奥利力中的径向运动。在陀螺仪发生旋转时，质量块受到科里奥利力，产生了另一个平面的振动，根据振动产生的电容变化便可以测量科里奥利力的大小，又因为科里奥利力正比于角速度，所以我们可以通过电容变化计算得到角速度。
- ✓ 思考：为什么要两个叉子？



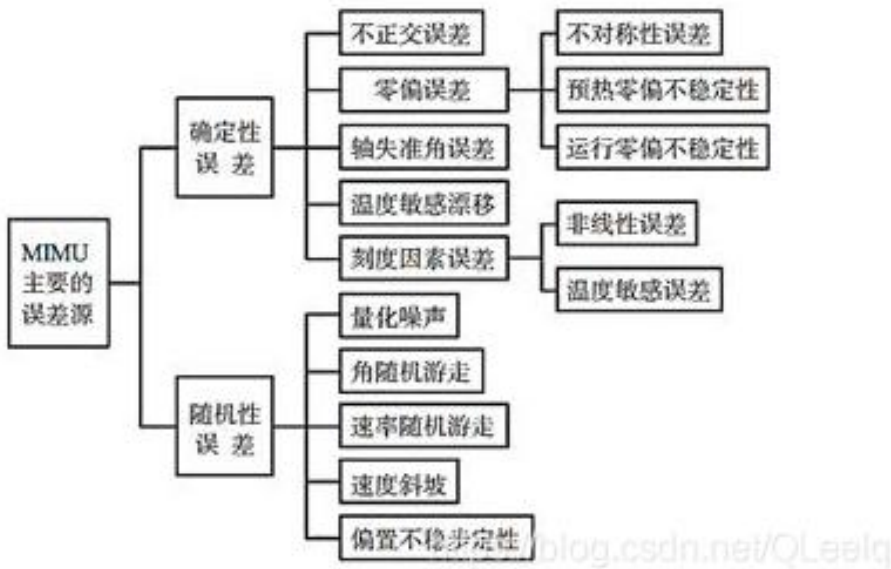
➤ IMU误差模型

- ✓ 对于理想的IMU，加速度计的3个轴和陀螺仪的3个轴定义了一个共享的正交3D坐标系。加速度计测量沿着每个坐标轴的加速度，陀螺仪测量围绕每个坐标轴的角速度。
- ✓ 在实际的IMU内部，由于装配误差使得加速度计和陀螺仪的坐标轴发生了偏移，产生非正交误差。另外传感器的数字信号向物理信号转换的时候会产生误差，而且输出信号会受到非零，可变的零偏的影响。因此IMU的误差来主要来自于四部分，包括噪声(Noise)、零偏(Bias)、刻度因数(Scale errors)和轴偏移(Axis misalignments)。



➤ IMU误差模型

- 加速度计和陀螺仪的误差可以分为：确定性误差，随机误差。
- 确定性误差可以事先标定确定，包括：零偏(Bias)、刻度因数(Scale errors)、轴偏移(Axis misalignments)等。
- 随机误差通常假设噪声服从高斯分布，包括：测量噪声、Bias随机游走。



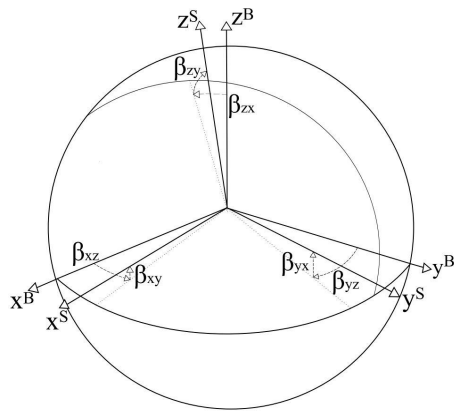
➤ IMU误差模型

加速度计和陀螺仪完整的误差模型可以用式 2.1 和式 2.2 来表示。

$$\mathbf{a}^I = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a + \mathbf{n}^a) \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\omega}^I = \mathbf{T}^g \mathbf{K}^g (\boldsymbol{\omega}^S + \mathbf{b}^g + \mathbf{n}^g) \quad (2.2)$$

其中 a 表示加速度计， g 表示陀螺仪， I 表示 IMU 参考坐标系， S 表示非正交的传感器坐标系。 \mathbf{T} 表示轴偏移的变换矩阵， \mathbf{K} 表示刻度因数， \mathbf{a}^S 和 $\boldsymbol{\omega}^S$ 表示测量值， \mathbf{b} 和 \mathbf{n} 分别表示零偏和噪声。



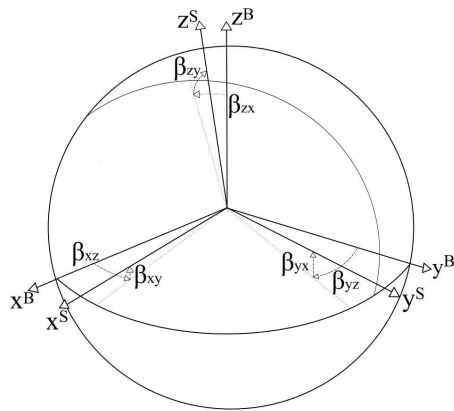
➤ IMU误差模型

为了表述简洁，本文定义 IF 为 IMU 参考坐标系，AF 为非正交加速度计坐标系，GF 为非正交陀螺仪坐标系，AOF 为正交加速度计坐标系，GOF 为正交陀螺仪坐标系。从图 2.3 中可以得到 GOF 与 IF 之间的转换矩阵 \mathbf{T}^g ：

$$\mathbf{T}^g = \begin{bmatrix} 1 & -\beta_{yz} & \beta_{zy} \\ \beta_{xz} & 1 & -\beta_{zx} \\ -\beta_{xy} & \beta_{yx} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

在标定过程中，假设 AOF 与 IF 的 x 轴重合，且 AOF 的 y 轴在 IF 的 x-y 平面内。则变换矩阵 \mathbf{T}^a 定义如下：

$$\mathbf{T}^a = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & \alpha_{zy} \\ 0 & 1 & -\alpha_{zx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$



$$\mathbf{a}^I = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a + \mathbf{n}^a) \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\omega}^I = \mathbf{T}^g \mathbf{K}^g (\boldsymbol{\omega}^S + \mathbf{b}^g + \mathbf{n}^g) \quad (2.2)$$

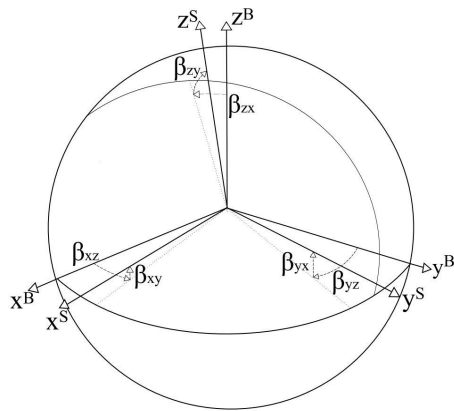
➤ IMU误差模型

刻度因数矩阵 \mathbf{K}^a 和 \mathbf{K}^g 定义如下：

$$\mathbf{K}^a = \begin{bmatrix} s_x^a & 0 & 0 \\ 0 & s_y^a & 0 \\ 0 & 0 & s_z^a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^g = \begin{bmatrix} s_x^g & 0 & 0 \\ 0 & s_y^g & 0 \\ 0 & 0 & s_z^g \end{bmatrix}$$

加速度计和陀螺仪的零偏向量定义如下：

$$\mathbf{b}^a = \begin{bmatrix} b_x^a \\ b_y^a \\ b_z^a \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}^g = \begin{bmatrix} b_x^g \\ b_y^g \\ b_z^g \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{a}^I = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a + \mathbf{n}^a) \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\omega}^I = \mathbf{T}^g \mathbf{K}^g (\boldsymbol{\omega}^S + \mathbf{b}^g + \mathbf{n}^g) \quad (2.2)$$

➤ IMU误差模型

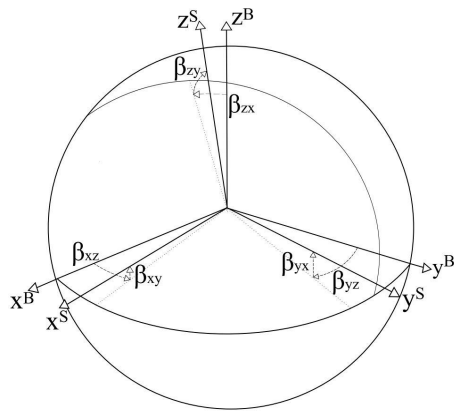
因此，为了标定加速度计，需要估计如下所示的参数向量：

$$\boldsymbol{\theta}^{acc} = [\alpha_{yz}, \alpha_{zy}, \alpha_{zx}, s_x^a, s_y^a, s_z^a, b_x^a, b_y^a, b_z^a]^T \quad (2.7)$$

并且根据误差模型定义如下状态方程：

$$\mathbf{a}^I = h(\mathbf{a}^S, \boldsymbol{\theta}^{acc}) = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a) \quad (2.8)$$

这里需要说明的是，在标定过程中，本文使用一个静态窗口内的平均值作为该次测量值，由于噪声服从高斯分布，其均值为零，因此在状态方程中我们忽略了测量噪声。噪声项我们后续通过静置状态下的艾伦方差曲线来获得。



$$\mathbf{a}^I = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a + \mathbf{n}^a) \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\omega}^I = \mathbf{T}^g \mathbf{K}^g (\boldsymbol{\omega}^S + \mathbf{b}^g + \mathbf{n}^g) \quad (2.2)$$

➤ 加速度计标定

$$\mathbf{a}^I = h(\mathbf{a}^S, \boldsymbol{\theta}^{acc}) = \mathbf{T}^a \mathbf{K}^a (\mathbf{a}^S + \mathbf{b}^a)$$

当我们在地球上某个确定的位置，知道了该地的经纬度和海拔高度，我们就可以得到该地的重力向量的实际大小。然后我们改变传感器的姿态，得到传感器在不同方向上的重力加速度的测量值，由于重力加速度的模长不变，因此所有的数据点应该在一个球面上。因此定义如下代价函数：

$$\mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^{acc}) = \sum_{k=1}^M (\|\mathbf{g}\|^2 - \|h(\mathbf{a}_k^S, \boldsymbol{\theta}^{acc})\|^2)^2$$

加速度计的标定过程如下：

- 1) 首先将 IMU 静置 T_{init} 秒，并计算测量方差 ζ_{init} ；
- 2) 旋转 IMU 至不同的姿态，并保持静止 t 秒；
- 3) 并在 T_{window} 大小的时间窗口内计算均值 \mathbf{a}_t^S 和方差 ζ_t ；
- 4) 如果 $\zeta_t < \zeta_{init}$ ，将 \mathbf{a}_t^S 加到优化中，否则放弃该段数据；
- 5) 重复步骤 2，3，4，直至采集得到 M 段数据；
- 6) 利用列文伯格-马夸尔特(L-M)算法求解 $\boldsymbol{\theta}^{acc}$ 。

在标定过程中，初始化时间取60秒，旋转后保持静止时间 t 取4秒，窗口时间取2秒，数据量 M 取50次。可以采用自动求导方式，编写残差计算函数，利用ceres非线性优化库进行求解。

➤ 陀螺仪标定

与加速度计相反，我们使用IMU标定过程中的动态数据进行陀螺仪的标定。其中陀螺仪的零偏我们可以利用静止状态数据进行标定，我们还需要估计如下的参数向量：

$$\boldsymbol{\theta}^{\text{gyro}} = [\beta_{yz}, \beta_{zy}, \beta_{xz}, \beta_{zx}, \beta_{xy}, \beta_{yx}, s_x^g, s_y^g, s_z^g]^T$$

陀螺仪标定的**核心思路**：将上一段静态数据中的重力向量作为参考值，然后对陀螺仪测量的角速度进行积分，得到两段静态数据之间的旋转矩阵，利用此旋转矩阵计算下一时间段的重力向量，然后和加速度计实际测量的重力向量做差。根据这个思路，我们可以定义如下代价函数：

$$\mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^{\text{gyro}}) = \sum_{k=1}^M \left\| \mathbf{g}_k^a - \Psi[\boldsymbol{\omega}_i^S, \boldsymbol{\theta}^{\text{gyro}}, \mathbf{g}_{k-1}^a] \right\|^2$$

其中 Ψ 为自定义的运算符，利用两段静态数据之间所有的陀螺仪测量和上一时刻的重力向量，来计算下一时刻的重力向量，最后利用非线性优化算法进行求解。

因此在上述数据采集的过程中，要注意每次旋转IMU时使其姿态变化大一些，而且尽可能使得IMU每个方向都得到测量。

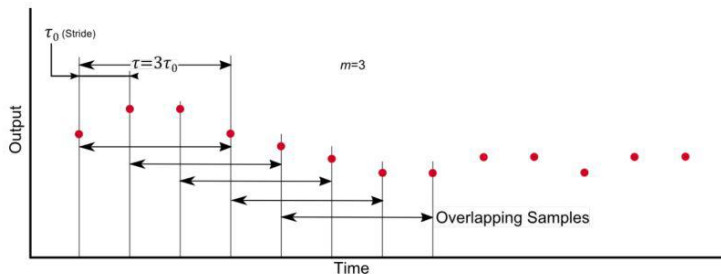
➤ 温度相关参数的标定（全温补偿）

- 这个标定的主要目的是对传感器估计的 **bias** 和 **scale** 进行温度补偿，获取不同温度时 **bias** 和 **scale** 的值，绘制成曲线。该标定方法有两种：
 - ✓ **soak method**: 控制恒温室的温度值，然后读取传感器数值进行标定。
 - ✓ **ramp method**: 记录一段时间内线性升温 and 降温时传感器的数据来进行标定。

➤ 随机误差标定：Allan方差

Allan 方差法是 20 世纪 60 年代由美国国家标准局的 David Allan 提出的，它是一种基于时域的分析方法。
具体的流程如下：

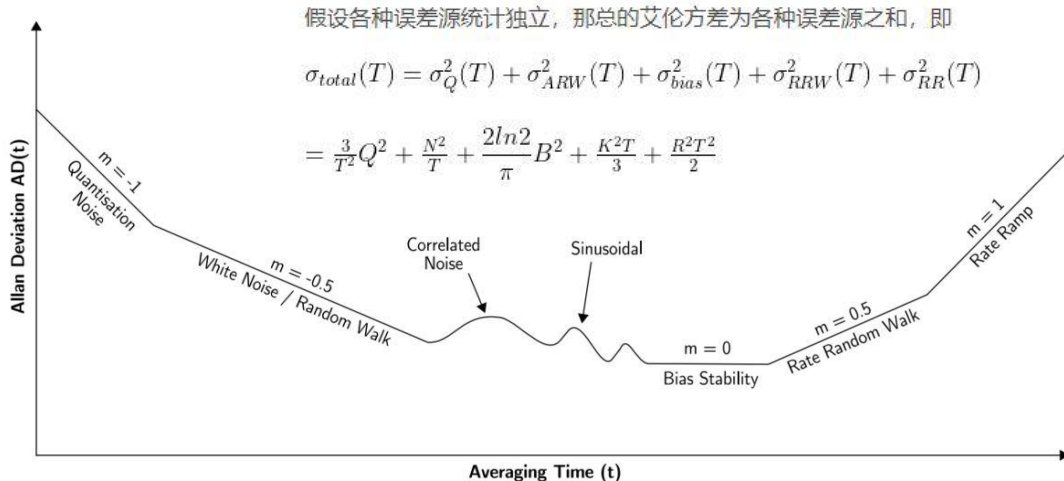
1. 保持传感器绝对静止获取数据。
2. 对数据进行分段，设定时间段的时长，如下图所示。



3. 将传感器数据按照时间段进行平均。
4. 计算方差，绘制艾伦曲线。

➤ 随机误差标定：Allan方差

- Allan方差-时间间隔双对数曲线如下图所示： $m = -0.5$ 与横轴 $t = 0$ 的交点就是高斯白噪声的不确定度； $m = 0.5$ 与横轴 $t = 3$ 的交点就是bias随机游走的不确定度。



- Allan方差对误差项提取的比较多，但是很多误差项的分析都是为了提高器件生产工艺用的，每种误差成分产生的原理不同，通过分析哪种误差成分为主，我们就知道为了提高精度，应该重点改进哪项工艺。如果只是为传感器融合找方差参数，大可不必计算那么细致，在图上看一下大致量级，就可以直接用了。

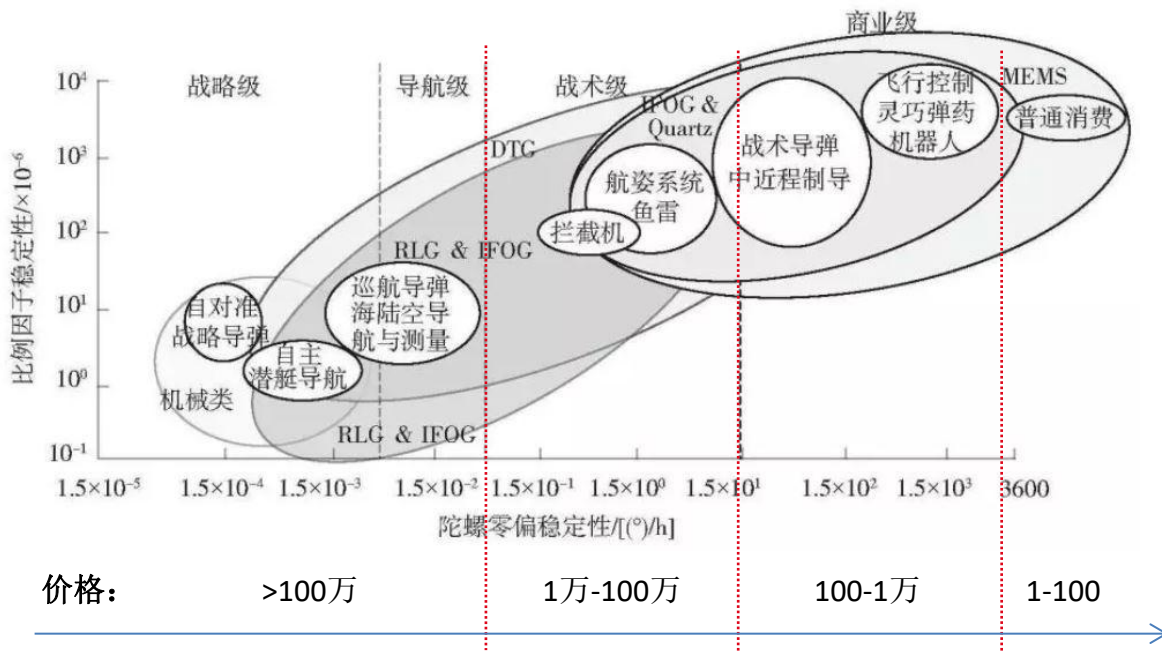
➤ 随机误差标定：Allan方差

- **量化噪声：**量化噪声是数字传感器必然出现的噪声，AD采样频率越高，量化噪声越小。
- **角度随机游走：**计算姿态时，本质上是对角速率做积分，这必然会对噪声也做了积分。白噪声的积分并不是白噪声，而是一个马尔可夫过程，即这一次的误差是在上一次误差的基础上累加一个随机白噪声得到的。角度误差所包含的这种马尔可夫性质的误差就叫做角度随机游走。
- **角速率随机游走：**角速率里面并不全是白噪声，它也有马尔可夫性质的误差成分，而这个误差是由宽带角加速度白噪声累积的结果。
- **零偏不稳定性噪声：**我们可以先把它理解为零偏随时间的缓慢变化，假设在刚开始时零偏大小是某个值，那么过一段时间之后，零偏便发生了变化，具体变化成了多少，无法预估，所以就要给他一个概率区间，来描述它有多大的可能性落在这个区间内，时间越长，区间越大。
- **速率斜坡：**实际上是趋势性误差，而不是随机误差。所谓随机误差，是指你无法用确定性模型去拟合并消除它，最多只能用概率模型去描述它，这样得到的预测结果也是概率性质的。而趋势性误差是可以直接拟合消除的，在陀螺里，这种误差最常见的原因是温度引起零位变化，可以通过温补来消除。

➤ IMU标定工具

- IMU内参标定: imu_tk
 - ✓ https://github.com/Kyle-ak/imu_tk
 - ✓ https://github.com/Neil-Oyoung/imu_tk
- IMU随机误差标定: imu_utils
 - ✓ https://github.com/gaowenliang/imu_utils
- IMU随机误差标定: kalibr_allan
 - ✓ https://github.com/rpng/kalibr_allan

➤ 不同领域IMU精度要求



➤ 陀螺仪选型指标

- **量程：**陀螺仪正、反方向输入角速率的最大值表示陀螺的测量范围，单位为： deg/sec 。一般选择在 $300^\circ/\text{s}$ ， $450^\circ/\text{s}$ 就可以了，其他的根据自己的使用场景做选择。
- **灵敏度：**表示在规定的输入角速率下能感应到的最小输入角速率的增量，越小表示越好。选择时须对不同应用选择合适的测量范围，因测量范围大了，灵敏度会相应降低。
- **带宽：**陀螺能够精确测量输入角速率的频率范围，这个范围越大表明陀螺的动态响应能力越强。
- **非线性度：**刻度因子表示陀螺仪输出与输入角速率的比值，表征了陀螺实际输入/输出数据的偏离程度。
- **初始零偏误差：**零偏是指陀螺仪在零输入状态下的输出，也就是观测值围绕零偏的离散程度，比如 $0.005^\circ/\text{sec}$ 表示每秒会漂 0.005° 。
- **零偏稳定性：**在零输入状态下的长时间稳态输出是一个平稳的随机过程，即稳态输出将围绕均值（零偏）起伏和波动，习惯上用均方差来表示，这种均方差被定义为零偏稳定性。而初始零偏误差可以理解为静态误差，它不会随时间的波动，可以通过软件校准。
- **输出噪声：**当陀螺处于零输入状态时，陀螺的输出信号为白噪声和慢变随机函数的叠加。其慢变随机函数可用来确定零偏或零偏稳定性指标，白噪声定义为单位检测带宽平方根下等价旋转角速率的标准偏差，单位 $(^\circ/\text{sec})/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $(^\circ/\text{hr})/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这个白噪声也可以用单位 $^\circ/\text{hr}$ 的角度随机游走系数来表示。
- **线性加速度影响：**理论上陀螺仪只测试旋转角速度，但实际上所有的陀螺均对加速度敏感，且在现场应用中，又很难保证陀螺不受冲击和振动产生的加速度影响，因此陀螺对加速度的敏感程度指标也非常重要。

➤ 加速度计选型指标

- **量程：**指加速度计可以测量的加速度范围，该值越大表示测量加速度大小的能力越强。针对不同的应用要合理选择测量范围，因测量范围大了，灵敏度会相应降低。。
- **灵敏度：**灵敏度表示在规定的输入加速度下能敏感的最小加速度增量，即加速度传感器对一定范围内的加速度变化的敏感程度。
- **带宽：**测量的频率范围，这个范围越大表明加速度计的动态响应能力越强。
- **零偏稳定性：**当测量轴加速度为0g时的器件输出。
- **输出噪声：**噪声输出的功率谱密度，一般以 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的方式给出，带宽越高噪声越大，带宽大致等于输出数据速率的一半，因此输出速率设定越高，噪声越大。

➤ IMU产品选型官网链接

- ADI 选型页面: <https://www.analog.com/cn/products/sensors-mems.html>
- ST选型页面: <https://www.st.com/zh/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules.html#products>
- TDK选型页面: <https://product.tdk.com.cn/zh/search/sensor/motion-inertial/list>
- invensense系列, TDK子系列: <https://invensense.tdk.com/smartmotion/>
- Bosch选型页面: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/>
- Xsens选型页面: <https://www.xsens.cn/products/mti-1-series/>
- ALUBI选型页面: <https://www.alubi.cn/>
- 深迪半导体(国内IMU芯片制造商): <http://www.senodia.com/?locale=zh-CH>
- 无锡新纳产品选型: <https://www.aceinna.cn/inertial-systems/IMU>
- 武汉元生产品、microstrain、恩智浦(不生产陀螺仪)、EPSON、mcube村田制作所(加速度计, 穿戴设备)、水木智芯、星网宇达;

IMU选型

➤ IMU部分产品参数

● ADIS16505

ACCELEROMETERS ¹	Each axis		
Dynamic Range		±78.4	m/sec ²
Sensitivity	32-bit data format	26,756,268	LSB/(m/sec ²)
Error over Temperature	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±0.07	%
Repeatability ³	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±0.1	%
Misalignment Error	Axis to axis, -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±0.05	Degrees
Nonlinearity	Best fit straight line, ±19.6 m/sec ²	0.25	%FS
	Best fit straight line, ±78.4 m/sec ² , x-axis	0.5	%FS
	Best fit straight line, ±78.4 m/sec ² , y-axis and z-axis	1.5	%FS
Bias			
Repeatability ³	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	19.6 × 10 ⁻³	m/sec ²
In-Run Bias Stability	1 σ		
X-Axis and Y-Axis		26.5 × 10 ⁻⁶	m/sec ²
Z-Axis		43.1 × 10 ⁻⁶	m/sec ²
Velocity Random Walk	1 σ		
X-Axis and Y-Axis		0.009	m/sec/√hr
Z-Axis		0.012	m/sec/√hr
Error over Temperature	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±9.8 × 10 ⁻³	m/sec ²
Output Noise	No filtering		
X-Axis and Y-Axis		4.8 × 10 ⁻³	m/sec ² rms
Z-Axis		6.07 × 10 ⁻³	m/sec ² rms
Noise Density	f = 10 Hz to 40 Hz, no filtering		
X-Axis and Y-Axis		167 × 10 ⁻⁶	m/sec ² /√Hz rms
Z-Axis		243 × 10 ⁻⁶	m/sec ² /√Hz rms
3 dB Bandwidth		750	Hz
Sensor Resonant Frequency	X-axis and y-axis	2.4	kHz
	Z-axis	2.2	kHz
TEMPERATURE SENSOR			
Scale Factor	Output = 0x0000 at 0°C (±5°C)	0.1	°C/LSB

Table 1.

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
GYROSCOPES					
Dynamic Range	ADIS16505-1 ADIS16505-2 ADIS16505-3	±125 ±500 ±2000			°/sec °/sec °/sec
Sensitivity	ADIS16505-1, 16-bit data format ADIS16505-2, 16-bit data format ADIS16505-3, 16-bit data format ADIS16505-1, 32-bit data format ADIS16505-2, 32-bit data format ADIS16505-3, 32-bit data format		160 40 10 10,485,760 2,621,440 655,360		LSB/°/sec LSB/°/sec LSB/°/sec LSB/°/sec LSB/°/sec LSB/°/sec
Error over Temperature	ADIS16505-1, -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ ADIS16505-2, -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ ADIS16505-3, -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±0.5 ±0.5 ±0.3			% % %
Misalignment Error ¹	Axis to axis, -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ	±0.25			Degrees
Nonlinearity ²	ADIS16505-1, full scale (FS) = 125°/sec ADIS16505-2, FS = 500°/sec ADIS16505-3, FS = 2000°/sec	0.2 0.2 0.2			%FS %FS %FS
Bias					
Repeatability ³	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ, x-axis and z-axis -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ, y-axis	0.14 1.4			°/sec °/sec
In-Run Bias Stability	ADIS16505-1, 1 σ, x-axis ADIS16505-1, 1 σ, y-axis ADIS16505-1, 1 σ, z-axis ADIS16505-2, 1 σ, x-axis ADIS16505-2, 1 σ, y-axis ADIS16505-2, 1 σ, z-axis ADIS16505-3, 1 σ, x-axis ADIS16505-3, 1 σ, y-axis ADIS16505-3, 1 σ, z-axis	1.5 2.3 1.7 2.2 2.7 1.6 7.5 8.1 4.9			°/hr °/hr °/hr °/hr °/hr °/hr °/hr °/hr °/hr
Angular Random Walk	ADIS16505-1, x-axis and y-axis, 1 σ ADIS16505-1, z-axis, 1 σ ADIS16505-2, x-axis and y-axis, 1 σ ADIS16505-2, z-axis, 1 σ ADIS16505-3, x-axis and y-axis, 1 σ ADIS16505-3, z-axis, 1 σ	0.13 0.19 0.15 0.2 0.29 0.32			°/√hr °/√hr °/√hr °/√hr °/√hr °/√hr
Error over Temperature	-40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ, x-axis and z-axis -40°C ≤ T _c ≤ +85°C, 1 σ, y-axis	±0.3 ±0.7			°/sec °/sec
Linear Acceleration Effect	X-axis, 1 σ Y-axis, 1 σ Z-axis, 1 σ	0.572 × 10 ⁻³ 1.02 × 10 ⁻³ 0.045 × 10 ⁻³			(°/sec)/(m/sec ²) (°/sec)/(m/sec ²) (°/sec)/(m/sec ²)
Vibration Rectified Error (VRE)	X-axis, random vibration, 19.6 m/sec ² rms, 50 Hz to 2 kHz Y-axis, random vibration, 19.6 m/sec ² rms, 50 Hz to 2 kHz Z-axis, random vibration, 19.6 m/sec ² rms, 50 Hz to 2 kHz	3.1 × 10 ⁻⁶ 5.6 × 10 ⁻⁶ 0.3 × 10 ⁻⁶			(°/sec)/(m/sec ²) (°/sec)/(m/sec ²) (°/sec)/(m/sec ²)

➤ IMU部分产品参数

- Bosch: BMI055
- 产品级别的IMU一般比芯片级别贵，下面将列举机器人比较常用的IMU。

BMI055 Technical data	
Digital resolution	Accelerometer (A): 12 bit Gyroscope (G): 16 bit
Resolution	(A): 0.98 mg (G): 0.004 °/s
Measurement ranges (programmable)	(A): ±2 g, ±4 g, ±8 g, ±16 g (G): ±125 °/s, ±250 °/s, ±500 °/s, ±1000 °/s, 2000 °/s
Sensitivity (calibrated)	(A): ±2 g 1024 LSB/g ±4 g 512 LSB/g ±8 g 256 LSB/g ±16 g 128 LSB/g (G): ±125 °/s 262.4 LSB/°/s ±250 °/s: 131.2 LSB/°/s ±500 °/s: 65.6 LSB/°/s ±1000 °/s: 32.8 LSB/°/s ±2000 °/s: 16.4 LSB/°/s
Zero-point offset	(A): ± 70 mg, (G): ± 1 °/s
Noise density (typ.)	(A): 150 µg/√Hz (G): 0.014 °/s/√Hz
Bandwidths (progr.)	1000 Hz ... 8 Hz
Digital inputs/outputs	SPI, I ² C, 4 x digital interrupts
Supply voltage (V _{DD})	2.4 ... 3.6 V
I/O supply voltage (V _{DDIO})	1.2 ... 3.6 V
Temperature range	-40 ... +85 °C

➤ IMU部分产品参数

- ALUBI: LpmsIG1
- 官方售价2000人民币

名称	LPMS-IG1 CAN	LPMS-IG1 RS232
通信接口	CAN Bus, USB	RS232, USB
最大波特率	1M bit/s	921600 bit/s
通讯协议	LpCAN/CANOpen	LpBUS
尺寸	51 x 45 x 24 mm	
重量	74 g	
姿态角范围	Roll: $\pm 180^\circ$; Pitch: $\pm 90^\circ$; Yaw: $\pm 180^\circ$;	
解析度	0.01°	
加速度计参数	3-axis, $\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$ g, 16 bits	
双陀螺仪参数	#1: 3-axis, ± 400 , 24 bits #2: $\pm 1000 / \pm 2000$ dps, 16 bits	
零位稳定性	#1: 4 °/hour, #2: 6 °/hour	
陀螺仪噪音密度	#1: 0.002 dps/ $\sqrt{\text{Hz}}$, #2: 0.004 dps/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
磁场传感器参数	3-axis, $\pm 2 / \pm 8$ gauss, 16 bits	
数据输出类型	原始数据/欧拉角/四元素	
输出频率	5 ~ 500 Hz	
功耗	≤ 400 mW @12 V	
系统电压	5 V ~ 24 V DC	
连接接头类型	M12	
外壳材料	铝合金	
工作温度范围	-20 ~ +80°C	

➤ IMU部分产品参数

- Xsens: MTi630
- 官方售价6000人民币

Gyroscope specification ⁴		Unit	Value
	Standard full range	[°/s]	±2000
	In-run bias stability	[°/h]	8
	Bandwidth (-3dB)	[Hz]	520
	Noise density	[°/s/√Hz]	0.007
	g-sensitivity (calibrated)	[°/s/g]	0.001
	Non-linearity	[%FS]	0.1
	Scale Factor variation	[%]	0.5 (typical) 1.5 (over life)

Accelerometer ⁴		Unit	Value
	Standard full range	[g]	±10
	In-run bias stability	[mg]	0.01
	Bandwidth (-3dB)	[Hz]	500
	Noise density	[μg/√Hz]	60
	Non-linearity	[%FS]	0.1

➤ IMU部分产品参数

- 无锡新纳: OpenIMU300ZI
- 官方售价1000人民币

产品参数

轴的数量	9
产品类型	嵌入式
尺寸	2.4 x 3.7cm
接口	SPI / UART
连接器样式	20-Pin(10×2)1.0mm间距
陀螺仪范围	+/- 400 deg/sec
陀螺仪零偏稳定性	6deg/hr
陀螺仪标定因子	0.03%
陀螺仪带宽	5 - 50Hz
陀螺仪温度误差	0.3deg/sec
角度随机游走	0.3deg/√hr
加速度范围	+/-8g
加速度零偏稳定性	10ug
加速度标定因子	0.6%
加速度带宽	2 - 50Hz
加速度温度误差	3mg
速度随机游走	0.06m/s/√hr
磁场范围	+/-8Gauss

➤ IMU选型关键参数

全部选择 重置表格 最大值滤波器 按最新排序 保存至 myAnalog 下载到 Excel 分享 Quick Tips 发送反馈									
产品型号	Gyro Angular Random Walk typ °/√hr	Gyro In-Run Bias Stability typ °/hr	Gyro Noise Density typ (°/s)/√rtHz	Gyro Linear G typ (°/s)/g	Gyro Bias Repeatability typ °/s	Accel. In-Run Bias Stability typ g	Accelerometer Velocity Random Walk typ (m/s)/√hr	Noise Density typ g/√rtHz	Price (1000+) \$ US
<div>Filter Parts</div>	<div>0.09 - 2</div>	<div>0.8 - 25</div>	<div>0.002 - 0.2</div>	<div>0.005 - 0.05</div>	<div>0.05 - 3</div>	<div>2.7u - 250u</div>	<div>0.008 - 0.2</div>	<div>7.47u - 500u</div>	<div>130.9 - 1907.4</div>
43 器件	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>	<div>HIDE</div>
ADIS16446 NEW	0.66	14.5	0.0135	0.015	0.5	250μ	0.11	230μ	\$357.50 (ADIS16446BMLZ)
ADIS16486 NEW	0.25	5.3	0.0068	0.009	0.2	70μ	0.029	63μ	-
ADIS16500	0.29	8.1	0.0061	0.0085	0.14	12.7μ	0.033	7.47μ	\$130.90 (ADIS16500AMLZ)
ADIS16505-1	0.13	2.3	0.003	0.0085	0.14	2.7μ	0.009	17μ	\$294.53 (ADIS16505-1BMLZ)
ADIS16505-2	0.15	2.7	0.0034	0.00849	0.14	2.7μ	0.009	17μ	\$294.53 (ADIS16505-2BMLZ)
ADIS16505-3	0.29	8.1	0.0046	0.00849	0.14	2.7μ	0.009	17μ	\$294.53 (ADIS16505-3BMLZ)
ADIS16507-1	0.13	2.3	0.003	0.0085	0.14	12.75μ	0.033	74.7μ	\$294.53 (ADIS16507-1BMLZ)
ADIS16507-2	0.15	2.7	0.0034	0.0085	0.14	12.75μ	0.033	74.7μ	\$294.53 (ADIS16507-2BMLZ)
ADIS16507-3	0.29	8.1	0.0061	0.0085	0.14	12.75μ	0.033	74.7μ	\$294.53 (ADIS16507-3BMLZ)
ADIS16470	0.34	8	0.008	0.015	-	13μ	0.037	100μ	\$148.50 (ADIS16470AMLZ)
ADIS16475-1	0.15	2	0.003	0.01	0.7	3.6μ	0.012	23μ	\$367.40 (ADIS16475-1BMLZ)

THANKS!

