

平衡小车倾角测量

在直立控制原理的章节中，我们学习到，完成小车的直立控制需要测量小车的倾角和角速度。如图1所示。本节我们将介绍两种传感器来帮助我们完成这项工作。



图1 平衡小车直立控制原理图

1. 线加速度传感器

角度的测量可以使用加速度传感器，加速度传感器有两种：一种是角加速度计，另一种就是线加速度计，这边需要使用的是线加速度计。加速度传感器可以测量由地球引力作用或者物体运动所产生的加速度。InvenSense公司推出的MPU6050就集成了三轴加速度计，可以通过IIC接口同时输出三个方向上的加速度信号。

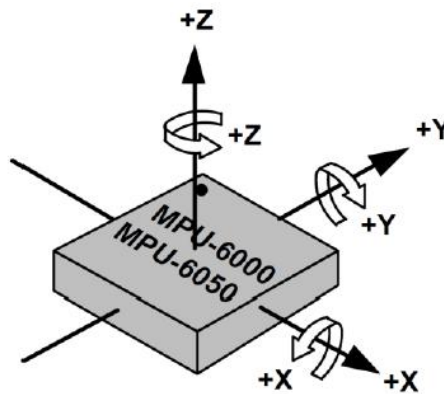


图2 MPU6050

理想情况下，我们只需测量其中一个方向上的加速度值，就可以计算出小车的倾角。比如使用Y轴，或者X轴。小车静止的时候，只存在重力加速度，没有运动加速度，此时X和Y轴都输出零。当小车有一定的倾角之后，g会在X轴或Y轴有重力加速度分量，而且该轴倾斜的角度和重力分量的大小相关。因为我们使用的是三轴的加速度计，所以可以使用 $\text{atan2}(y,x)$ 函数更科学的计算倾角。

$$\text{Angle_Y} = \text{atan2}(\text{Accel_Y}, \text{Accel_Z}) * 180 / \text{PI} \quad (1)$$

$$\text{Angle_X} = \text{atan2}(\text{Accel_X}, \text{Accel_Z}) * 180 / \text{PI} \quad (2)$$

$\text{atan2}(y,x)$ 是表示X-Y平面上所对应的(x,y)坐标的角度,返回的是原点至点(x,y)的方位角,即与坐标系的x轴的夹角,如图3所示。它的值域范围是 $(-\text{Pi}, \text{Pi})$,也就输出值要通过 $*180/\text{PI}$ 转化为角度。

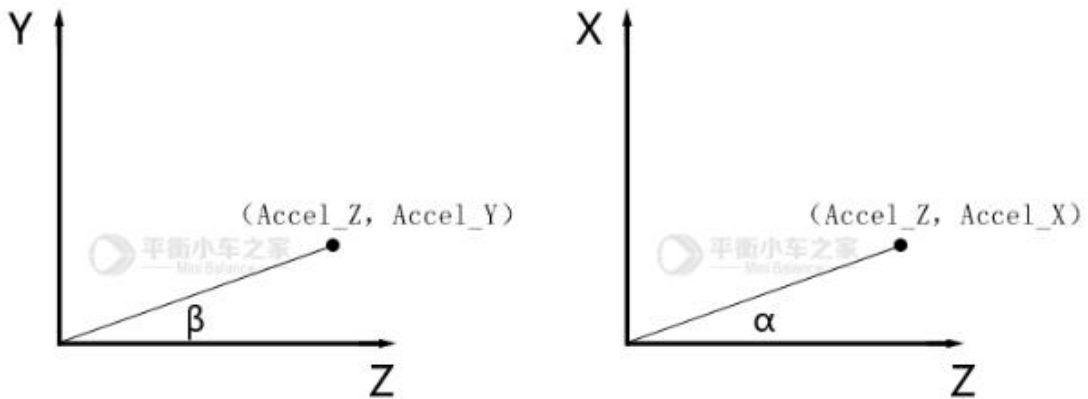


图3 三轴加速度表示角度

Accel_X、Accel_Y、Accel_Z分别表示重力加速度在该轴的分量。

似乎我们已经通过加速度计完成了角度的测量,然后通过差分求得角速度即可。我们先看一下加速度计在实际运动时的输出,如图4所示。



图4 MPU6050加速度计实际输出

之前是分析是基于加速度计只测量重力加速度的前提下的,但是实际上,由于运动加速度的累加,会影响角度测量的精度。下面简单分析运动所产生的干扰信号。如图5所示。

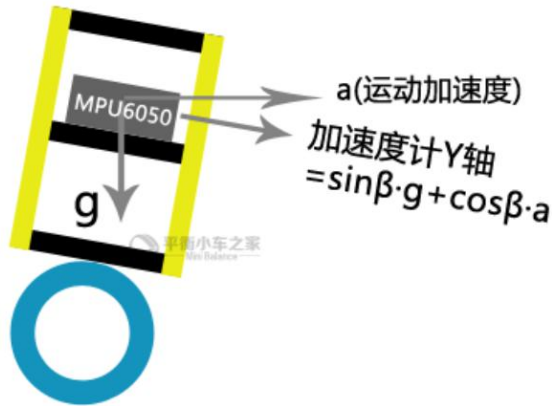


图5 运动加速度对角度测量的影响

β 为小车的倾角，在没有运动加速度叠加的理想情况下，Y轴加速度计测量值

$$\text{Accel_Y} = \sin\beta \cdot g \quad (3)$$

实际运动中小车的Y轴加速度计测量值

$$\text{Accel_Y} = \sin\beta \cdot g + \cos\beta \cdot a \quad (4)$$

其中 a 为小车的运动加速度，由小车的角加速度 $h\alpha$ 和行走的线加速度 a_1 组成

$$a = a_1 + h\alpha$$

h 为MPU6050到电机轴的距离，理论上把MPU6050安装的离电机轴越近越好，这样可以减小运动角加速度对角度测量的影响，但是工程实践中，这样传感器容易受到电机的影响导致稳定性下降。而且就算是避免了运动的角加速度，线加速度也是无法避免的，所以无法彻底消除运动加速度对角度测量的影响。

2. 角速度传感器

陀螺仪是用高速回转体的动量矩敏感壳体相对惯性空间绕正交于自转轴的一个或二个轴的角运动检测装置。利用其他原理制成的角运动检测装置起同样功能的也称陀螺仪。一般我们使用陀螺仪对角速度进行测量。而我们的MPU6050里面也集成了三轴陀螺仪，所以下面我们继续使用MPU6050测量角速度。

因为陀螺仪输出的是角速度，所以不受小车运动的影响。根据经验，我们可以对角速度进行积分得到角度，这样我们又多了一种传感器可以测量角度了。比如我们在一个5ms的定时中断服务函数里面执行以下语句

$$\text{Angel_X} = \text{Angel_X} - \text{Gyro_X} \cdot 0.005$$

Gyro_X为陀螺仪的输出，注意此时的单位必须是°/s。

MPU6050输出的陀螺仪的原始数据是-32768~32768，转换成单位为°/s的数据可以根据以下语句

$$\text{Gyro_X} = \text{Gyro_X}/k$$

其中k和我们初始化时的量程有关，可以在MPU6050的手册中查到，当初初始化为±2000°/s时，k=16.4如图6所示。

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
	Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	

图6 陀螺仪量程转换

由于从陀螺仪测量的角速度获得角度信息，需要经过积分运算。如果角速度信号存在微小的偏差和漂移，比如在传感器静止的情况下，输出不为零。经过积分运算之后，变化形成积累误差。这个误差会随着时间的延长逐步增加，无法输出正确的角度信号。

下面我们做一个实验，让一个小车在桌面上直立，然后轻轻拍打着桌面。我们通过上位机观察3条曲线，如图7所示。其中白线是通过陀螺仪积分获得的角度，黄线是加速度计测量的角度，红线是两者通过算法融合得到的角度。

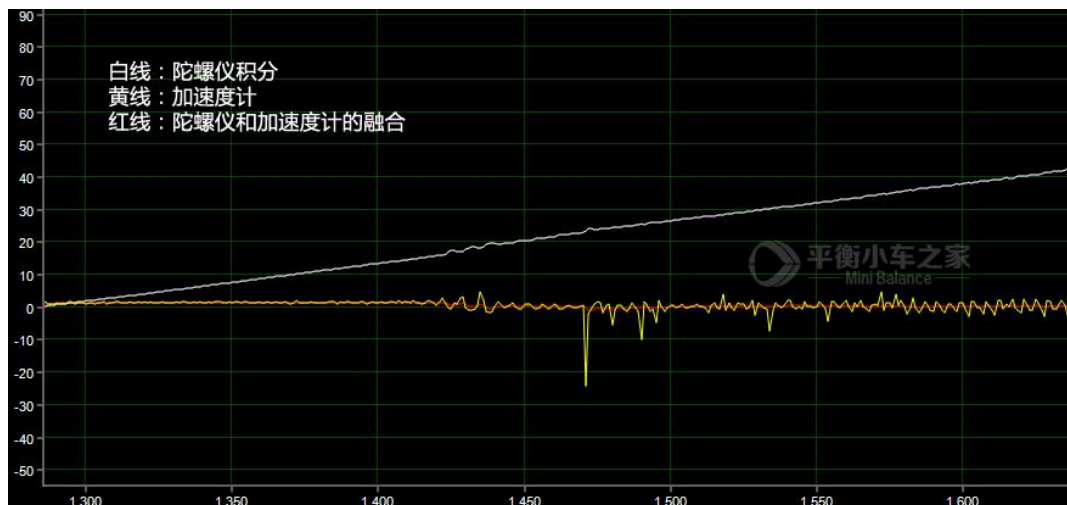


图7 陀螺仪和加速度计的特点

可以看到，陀螺仪积分得到的角度因为自身的零点漂移，误差随着时间变化逐步增加，误差越来越大。加速度计测量的角度信号在受到外界干扰的情况下，会有很大的毛刺。而通过算法融合得到的角度值则非常稳定。

上面的红色线其实是使用简单的互补滤波得到的,公式如下。

$$\text{angle} = K1 * \text{angle_m} + (1-K1) * (\text{angle} + \text{gyro_m} * \text{dt});$$

angle 是融合后的角度值， angle_m 是加速度测量得到的角度， $\text{angle} + \text{gyro_m} * \text{dt}$ 是陀螺仪积分得到的角度， dt 为采样周期，单位是s，在我们的代码中是0.005。K1是滤波器系数，这边我们选取0.02。一阶互补滤波也可以看做是加权平均。

当然，我们也可以使用更复杂的卡尔曼滤波，在我们的代码中的filter.c文件里面有相关的函数，我们可以在中断服务函数里面直接调用。

$$\text{Kalman_Filter}(\text{Accel_Angle}, \text{Gyro_X});$$

下图8是分别使用卡尔曼滤波和互补滤波融合得到的角度。

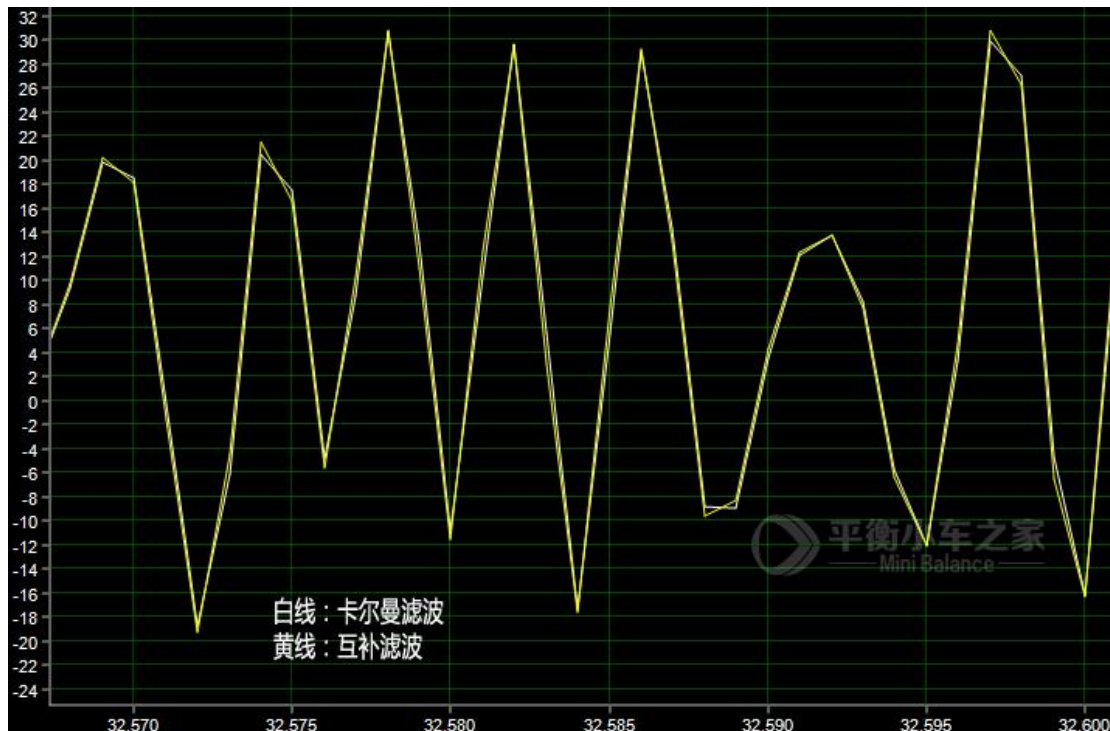


图8 卡尔曼滤波和互补滤波

白线是卡尔曼滤波融合得到的角度，黄线是互补滤波融合得到的角度，两者基本重合。根据工程实践经验，使用卡尔曼滤波和互补滤波融合得到的角度，应用在平衡小车上，其控制效果基本是一致的。