

## 计算倾斜测量和倾斜补偿电子罗盘

作者: Andrea Vitali

主要元器件	
LSM303AGR	超紧凑高性能电子罗盘: 超低功耗 3D 加速度计和 3D 磁力计模块
LSM303C	超紧凑高性能电子罗盘: 3D 加速度计和 3D 磁力计模块
LSM303D	超紧凑高性能电子罗盘: 3D 加速度计和 3D 磁力计模块

## 目的和益处

本设计建议说明了如何根据加速度计数据计算倾斜度（滚动角和俯仰角）。它还解释了如何根据倾斜补偿磁力计数据来计算电子罗盘（偏航角）。还说明了从 Euler 角到四元数的转换。

优势:

- 增加了 osxMotionFX 库提供的数据融合功能，该库提供 9 轴 Acc+Mag+Gyro 和 6 轴 Acc+Gyro 融合，但不提供 6 轴 Acc+Mag 的。
- 使用 osxMotionFX 库提供的完整数据融合，可减少固件占用空间，请参阅设计支持材料段落中的 Open.MEMS。
- 基本实现简便，可以让最终用户轻松实现定制和增强（osxMotionFX 仅以二进制格式提供，而不是源代码）
- 易于在任意微控制器上使用（osxMotionFX 只能在 STM32 上运行，并且只有在 Open.MEMS 许可证服务器发布了适当的许可证时才能运行）。

## 说明

步骤 1: 计算 Phi (滚动角, 也称为倾斜角; 参见图 1)

$$\text{滚动角: } \Phi = \text{Atan2}( G_y, G_z )$$

注意: 如果  $\Theta = +/-90$  deg, 那么  $G_y$  和  $G_z$  接近于零且  $\Phi$  不稳定; 如果需要保持稳定性, 那么  $G_z$  可以用  $G_z + G_x * \alpha$  代替,  $\alpha = 0.01-0.05$ 。

步骤 2: 计算 Theta (俯仰角, 也称为姿态角; 参见图 1)

$$G_z^2 = G_y * \sin(\Phi) + G_z * \cos(\Phi)$$

---

### 俯仰角: $\Theta = \text{Atan}(-G_x / G_z)$

注意: 如果  $\Theta = +/-90$  deg, 则  $G_y$  和  $G_z$  接近于零,  $G_z^2$  也接近零; 不能除以零, 所以如果  $G_x > 0$ , 则  $\Theta = -90$  deg, 如果  $G_x < 0$ , 则  $\Theta = +90$  deg;  $G_x$  不能为零

步骤 3: 计算  $\Psi$  (偏航角, 也称为航向; 参见图 1)

$$By_2 = B_z * \sin(\Phi) - B_y * \cos(\Phi)$$

$$Bz_2 = B_y * \sin(\Phi) + B_z * \cos(\Phi)$$

$$Bx_3 = B_x * \cos(\Theta) + Bz_2 * \sin(\Theta)$$

$$\text{偏航角: } \Psi = \text{Atan2}(By_2, Bx_3)$$

注意: 如果  $\Theta = +/-90$  deg 并且  $\Phi$  不稳定, 那么  $\Psi$  也可能不稳定; 如果  $\Phi$  如上所述变得稳定, 那么  $\Psi$  也将是稳定的。无论稳定性如何, 总和  $\Phi + \Psi$  总是稳定的。参见关于奇点和万向节锁的段落。

第 4 步: 从 Euler 角转换为四元数 (可选步骤)

$$Q_w = \cos(\Phi/2) * \cos(\Theta/2) * \cos(\Psi/2) + \sin(\Phi/2) * \sin(\Theta/2) * \sin(\Psi/2)$$

$$Q_x = \sin(\Phi/2) * \cos(\Theta/2) * \cos(\Psi/2) - \cos(\Phi/2) * \sin(\Theta/2) * \sin(\Psi/2)$$

$$Q_y = \cos(\Phi/2) * \sin(\Theta/2) * \cos(\Psi/2) + \sin(\Phi/2) * \cos(\Theta/2) * \sin(\Psi/2)$$

$$Q_z = \cos(\Phi/2) * \cos(\Theta/2) * \sin(\Psi/2) - \sin(\Phi/2) * \sin(\Theta/2) * \cos(\Psi/2)$$

奇点和万向节锁

如果  $\Theta = +/-90$  deg, 则  $\Phi$  和  $\Psi$  描述的是围绕同一垂直轴的旋转 (失去一个自由度, 这也称为万向节锁定); 无论  $\Phi$  和  $\Psi$  的输入/稳定性如何,  $\Phi + \Psi$  总和都是正确的。

High-G 运动

如果正在进行 high-g, 则加速度计数据不能用于倾斜测量 ( $\Phi$  和  $\Theta$ )。加速度计数据只能在模数接近 g 时使用:  $G_x^2 + G_y^2 + G_z^2 = 1$ , 当  $G_x / G_y / G_z$  用 g 表示时。

当加速度计数据不能使用时, 可使用陀螺仪数据来更新倾斜输出。

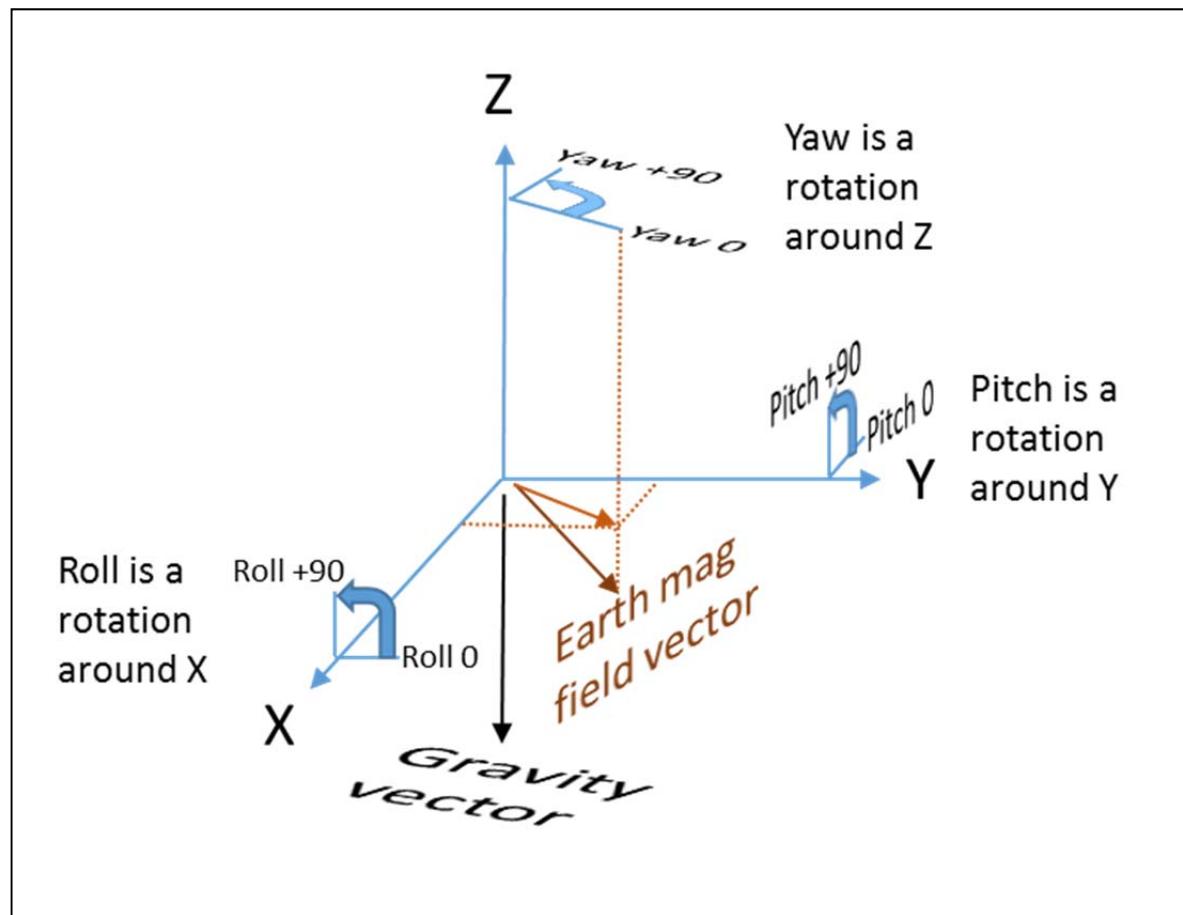
硬/软铁效应和磁异常

如果没有补偿硬/软铁效应干扰, 则磁力计数据不能用于电子罗盘 ( $\Psi$ )。硬铁效应是产生的偏移, 它们必须从  $B_x / B_y / B_z$  中减去。软铁效应是非统一轴灵敏度和非零交叉轴灵敏度, 必须通过矩阵乘法来进行补偿。

磁力计数据只能在模数接近标称地场值时使用，这种情况发生在没有磁异常以及硬/软铁效应得到补偿时： $Bx^2 + By^2 + Bz^2 = B$ .

当磁力计数据不能使用时，可使用陀螺仪数据来更新电子罗盘输出。

**Figure 1.** 来自加速度计和磁力计的输入数据参考方向以及输出数据参考方向：滚动角、俯仰角和偏航角。



### 三角函数的优化实现 ( $\sin$ , $\cos$ , $\text{atan2}$ )

如果在所选微控制器上（例如，STM32F4 或 STM32L4 中的 cortex-M4 上）可以使用浮点单元（FPU），则可以使用矢量化计算来加速计算。数据在缓冲区中收集，然后分批处理。

如果在所选微控制器上（例如，在 STM32F1、STM32L1、STM32F3 中的 cortex-M3 上）可以进行单周期乘法，那么使用 Horner 评估阶的多项式近似法是非常有效的。

最后，最简单的微控制器可以充分利用 CORDIC 实现，因为它只需要表查找和移位相加操作。粗略地说，CORDIC 算法所需的迭代次数与精度位数同样多；另外，要同时计算两个函数： $\sin$  &  $\cos$ 、 $\text{atan2}$  和  $\text{modulus}$  等。

---

## 辅助资料

相关的设计支持材料
面向 STM32Cube 的 BlueMicrosystem1、蓝牙低功耗和传感器软件扩展
面向 STM32Cube 的 Open.MEMS、MotionFX、实时运动传感器数据融合软件扩展
文件
应用笔记, AN3192, 使用 LSM303DLH 实现倾斜补偿电子罗盘
应用笔记, AN4509, 使用 low-g 3 轴加速度计进行倾斜测量

## 版本历史

日期	版本	变更
2016 年 2 月 15 日	1	初始版本

重要通知 - 请仔细阅读

---

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和/或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 及 ST 标识是意法半导体公司的商标。其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2016 STMicroelectronics - 保留所有权利