

利用陀螺仪更新倾斜测量和电子罗盘

作者: Andrea Vitali

主要元件	
LSM6DS3	iNEMO 惯性模块: 3D 加速度计和 3D 陀螺仪
LSM6DS3H	iNEMO 惯性模块: 3D 加速度计和 3D 陀螺仪
LSM6DS33	iNEMO 惯性模块: 3D 加速度计和 3D 陀螺仪
LSM6DS0	iNEMO 惯性模块: 3D 加速度计和 3D 陀螺仪
LSM330	iNEMO 惯性模块: 3D 加速度计和 3D 陀螺仪

目的和益处

本设计建议解释了如何利用陀螺仪数据更新倾斜测量（翻转和俯仰角）和电子罗盘（偏航角）。还给出了四元数实现，其不存在奇点问题，也称为万向节锁。

优势:

- 对简单的 6 轴 Acc+Mag 数据融合功能进行了增强，此 6 轴融合算法在存在 high-g 运动或磁异常时无法执行。
- 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。
- 基本实现简短，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）。

Euler 角实现说明

第 1 步: 基于当前角度 Phi / Theta / Psi 和陀螺仪数据 Wx / Wy / Wz（参见图 1），计算角度导数 Phi' / Theta' / Psi':

翻转角导数: $\Phi' = W_x + W_y * \sin(\Phi) * \tan(\Theta) + W_z * \cos(\Phi) * \tan(\Theta)$

俯仰角导数: $\Theta' = W_y * \cos(\Phi) - W_z * \sin(\Phi)$

偏航角导数: $\Psi' = W_y * \sin(\Phi) / \cos(\Theta) + W_z * \cos(\Phi) / \cos(\Theta)$

注意：如果 $\Theta = \pm 90 \text{ deg}$ ，则 $\text{Cos}(\Theta)$ 为零，并且 $\text{Tan}(\Theta) = \text{Sin}(\Theta) / \text{Cos}(\Theta)$ 为 \pm 无穷。这些奇点导致无法计算翻滚角和偏航角的导数。这也称为万向节锁：当 $\Theta = \pm 90 \text{ deg}$ 时， Φ 和 Ψ 所描述的是围绕同一垂直轴的旋转，并会失去一个自由度。由于存在这些奇点，因此首选应该是四元数实现。

第 2 步：根据角度导数计算更新的角度 $\Phi / \Theta / \Psi$ ：

$$\text{翻滚角: } \Phi(t+T_s) = \Phi(t) + \Phi' * T_s$$

$$\text{俯仰角: } \Theta(t+T_s) = \Theta(t) + \Theta' * T_s$$

$$\text{偏航角: } \Psi(t+T_s) = \Psi(t) + \Psi' * T_s$$

第 3 步：与其他角混合，例如利用 $\text{Acc} + \text{Mag}$ 数据融合来计算（可选步骤）

翻滚角和偏航角范围可能存在伪间断点：例如 0° 和 360° 表示相同的角度，当平均的输出为 180° 时，显然是错误的（应为 0° 或 360° ）；另一个例子是， -180° 和 $+180^\circ$ 表示相同的角度，如果平均的输出是 0° ，那么这也显然是错误的（应为 -180° 或 $+180^\circ$ ）。正确的加权平均计算如下：

$$\text{While } (\text{Abs}(\text{Angle1} - \text{Angle2}) > 180) \text{ Angle1} = \text{Angle1} - 360 * \text{Sign}(\text{Angle1} - \text{Angle2})$$

$$\text{MixedAngle} = \text{Angle1} * \alpha + \text{Angle2} * (1 - \alpha), \text{ 其中 } 0 < \alpha < 1$$

俯仰角是从 -90° 到 $+90^\circ$ ，不会出现伪间断点。

混合角度后，角度可以减小到其目标范围内。例如，这是将角度减小到 -180° 到 $+180^\circ$ （滚转、翻滚、俯仰和偏航）所需的处理：

$$\text{MixedAngle} = \text{mod}(\text{MixedAngle}, 360 \text{ deg})$$

$$\text{If } (\text{MixedAngle} > 180) \text{ MixedAngle} = \text{MixedAngle} - 360$$

$$\text{If } (\text{MixedAngle} < -180) \text{ MixedAngle} = \text{MixedAngle} + 360$$

这是将范围缩小到 -90° 到 $+90^\circ$ （俯仰）所需的额外处理：

$$\text{If } (\text{MixedAngle} > 90) \text{ MixedAngle} = 180 - \text{MixedAngle}$$

$$\text{If } (\text{MixedAngle} < -90) \text{ MixedAngle} = -180 - \text{MixedAngle}$$

四元数实现说明

第 1 步：基于当前四元数和陀螺仪数据 $W_x / W_y / W_z$ 计算四元数导数（参见图 1）：

$$Q_w' = -Q_x * W_x - Q_y * W_y - Q_z * W_z$$

$$Q_x' = +Q_w * W_x - Q_z * W_y + Q_y * W_z$$

$$Q_y' = +Q_z * W_x + Q_w * W_y - Q_x * W_z$$

$$\mathbf{Qz}' = -Qy \cdot Wx + Qx \cdot Wy + Qw \cdot Wz$$

第 2 步：基于四元数导数进行更新四元数的计算

$$\mathbf{Q}(t+Ts) = \mathbf{Q}(t) + \mathbf{Q}' \cdot Ts$$

第 3 步：与其他四元数混合，例如利用 Acc+Mag 数据融合来计算（可选）

四元数没有伪间断点，但它们有冗余表示： $+Q$ 和 $-Q$ 表示相同的方向，是同一组角度。简单平均会得到不正确的结果。正确的加权平均计算如下：

$$\text{If } (Q1w \cdot Q2w + Q1x \cdot Q2x + Q1y \cdot Q2y + Q1z \cdot Q2z) < 0, Q2 = -Q2$$

$$\text{MixedQ} = Q1 \cdot \alpha + Q2 \cdot (1 - \alpha), \text{ 其中 } 0 < \alpha < 1$$

第 4 步：从四元数转化为 Euler 角度（可选步骤）

$$Q_{\text{mod}} = Qw^2 + Qx^2 + Qy^2 + Qz^2$$

$$Qt = Qw \cdot Qy - Qx \cdot Qz, \text{ 用来检查奇点}$$

$$\text{If } (Qt > Q_{\text{mod}}/2), \text{ Roll } \Phi = 0, \text{ Pitch } \Theta = +90, \text{ Yaw } \Psi = 2 \cdot \text{Atan2}(Qx, Qw)$$

$$\text{If } (Qt < -Q_{\text{mod}}/2), \text{ Roll } \Phi = 0, \text{ Pitch } \Theta = -90, \text{ Yaw } \Psi = -2 \cdot \text{Atan2}(Qx, Qw)$$

$$\text{滚动: } \Phi = \text{Atan2}(2 \cdot (Qw \cdot Qx + Qy \cdot Qz), Qw^2 - Qx^2 - Qy^2 + Qz^2)$$

$$\text{脚间距: } \Theta = \text{Asin}(2 \cdot Qt / Q_{\text{mod}}), \text{ 当参数介于 } -1 \text{ 和 } +1 \text{ 之间时}$$

$$\text{偏转: } \Psi = \text{Atan2}(2 \cdot (Qw \cdot Qz + Qx \cdot Qy), Qw^2 + Qx^2 - Qy^2 - Qz^2)$$

注释

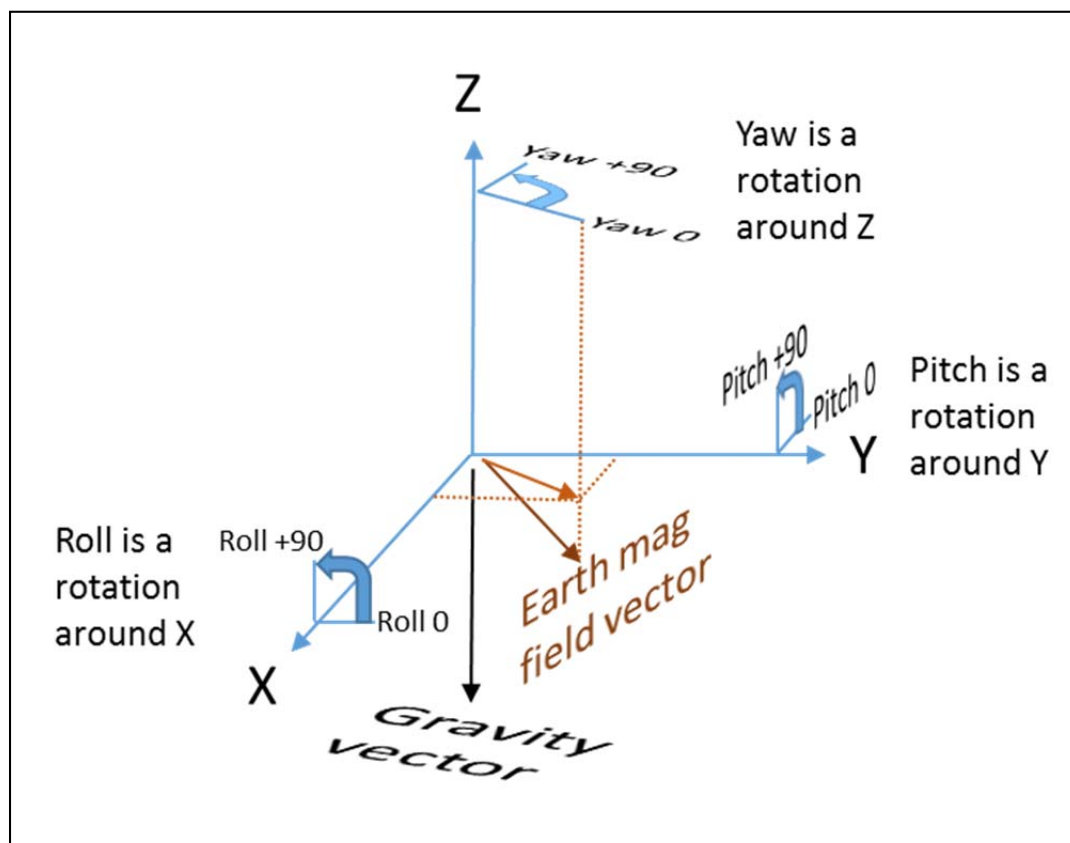
即使角速率为零，陀螺仪数据通常也会具有非零输出。这被称为陀螺仪偏差，必须在使用数据之前将其减去。例如，可以通过在系统静止时平均陀螺仪输出来估计偏差。当来自加速度计和磁力计的数据恒定并且它们各自的模数分别接近 $1g$ 和本地地磁场时，系统静止不动。

陀螺仪灵敏度可以是非统一的，即可以有 3% 的容差。校准可以改善输出。可以通过围绕给定轴执行完整旋转，并将利用陀螺仪估计的最终角度与其他传感器（例如加速度计和磁力计）测量的角度进行比较来完成校准。

要得到准确的结果，时间间隔 Ts 至关重要。实际值应尽可能与目标值相匹配；任何差异都会导致类似于非统一陀螺仪灵敏度的误差。

时间间隔 Ts 越小，输出越精确，因此最好使用陀螺仪来获得的更快输出数据速率（例如 LSM6DS3 可达到 1.6kHz）和/或使用插值法。

Figure 1. 陀螺仪输入数据的参考方向和输出数据的参考方向：翻滚角、俯仰角和偏航角。



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	
设计建议, DT0058, 计算倾斜测量和倾斜补偿电子罗盘	

版本历史

日期	版本	变更
2016 年 4 月 11 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