

基于 MEMS 和 MR 传感器的嵌入式系统姿态测量

1. 介绍:

传统的姿态测量系统采用捷联式惯导系统 (SINS)，相比平台式惯导系统而言，其具有体积相对更小，成本相对更低，易于安装和维护并且可靠性更高的有点，因此，捷联惯导系统在飞行器导航和姿态测量中得到了广泛的研究和应用。

然而，传统的姿态测量系统包括捷联式惯导普遍具有体积大，重量大，复杂程度高等特点，使得传统的姿态测量系统无法应用于日常应用。同时，传统的捷联惯导系统一般需要一个寻北系统的辅助来获得载体的方位角，但是传统的寻北系统多为基于陀螺的系统，其体积和复杂度也是日常应用所无法接受的。可见，对于对体积具有严格限制的嵌入式系统而言，需要研制一种小型的姿态测量系统来满足其姿态测量的要求。MEMS 技术和 MR 技术的快速发展，为研制这种低成本，小体积，高集成度的姿态测量系统提供了可能，从而可以使得对体积和成本敏感的系统具有姿态测量的能力。

本文论述了由 MEMS 加速度计和 MR 传感器组成的姿态测量系统。在本系统中，三轴 MEMS 加速度计用来获得载体基于重力向量的俯仰角和横滚角，而三轴 MR 传感器的输出经过以俯仰角和横滚角为参数的矩阵变换后可以给出载体相对于地磁北极的方位角。

2. 硬件描述:

本论文论述的姿态测量系统主要由三轴 MEMS 加速度计，三轴 MR 传感器，ARM 内核微控制器和用于显示结果的 LCD 显示器组成。

2.1 三轴 MR 传感器

本系统选用了 Honeywell 的 HMC2003 三轴磁阻传感器。HMC2003 是一个高灵敏度三轴 MR 传感器，它是由单轴 MR 传感器 HMC1001 和双轴 MR 传感器 HMC1002 组合而成。其精度可以达到 400 μ gauss，量程为 ± 2 gauss，灵敏度为 1V/gauss。磁阻传感器在经历了强磁场之后会被磁化而引起磁滞，从而引起输出信号的失真，Honeywell 的“set/reset”功能可以消除这种磁滞而使传感器恢复到正常的工作状态。

2.2 三轴 MEMS 加速度计

本系统中的加速度计选用了 Freescale 的 MMA7260Q 单片三轴加速度计。MMA7260Q 是一个低成本的电容式微机械加速度计，其内部具有信号调整、单极低通滤波器、温度补偿等功能，其量程可以通过编程选择 1.5g/2g/4g/6g 之一。其主要特点如下：

- 可选量程：1.5g/2g/4g/6g
- 低功耗：500uA
- 低工作电压：2.2V-3.6V
- 小型封装：6mm*6mm*1.4mm QFN
- 高灵敏度：800mV/g@1.5g, 3.3V, 25℃
- 集成了低通滤波器和信号调理功能
- 低噪声：4.7mVrms, 0.1Hz-1kHz
- 内部取样频率：11kHz

2.3 微处理器

本系统选用的微处理器为 Atmel 公司的 At91sam7s64 ARM 微控制器。At91sam7s64 是基于 32 位 ARM 内核的低管脚数高性能并且内置 Flash 的微控制器。其内部集成了 64k 字节 Flash 和 16k 字节的 SRAM 以及大量的外设接口，例如两个 USART 接口，可以分别用来与 PC 机通信和控制串口 LCD 屏显示测量结果。其具有一个 10 位的 SAR 逐次逼近式 A/D 转换器，并具有 8 选 1 模拟复用器。A/D 转换器的采样率可以达到 384ksp/s。At91sam7s64 的 ARM 内核的最高运行频率可以达到 55MHz，0.9Mips/MHz，以上的特点使 At91sam7s64 非常适合于低成本体积小敏感的姿态测量系统。

2.4 硬件结构：

本系统的硬件结构如图 2.4 -1 所示。由于 At91sam7s64 具有片上 A/D 转换器而且具有 8 选 1 模拟复用器，使得 MMA7260Q 和 HMC2003 可以直接与微控制器相连而不必外加 A/D 转换器和复用器，不仅降低了系统的成本和体积，提高了系统的集成度，同时减少了误差源，提高了精度。经过 A/D 转换的测量数据经过 ARM 核的处理后，被送到串口 LCD 并通过 RS232 接口送入 PC 机进行进一步的分析。

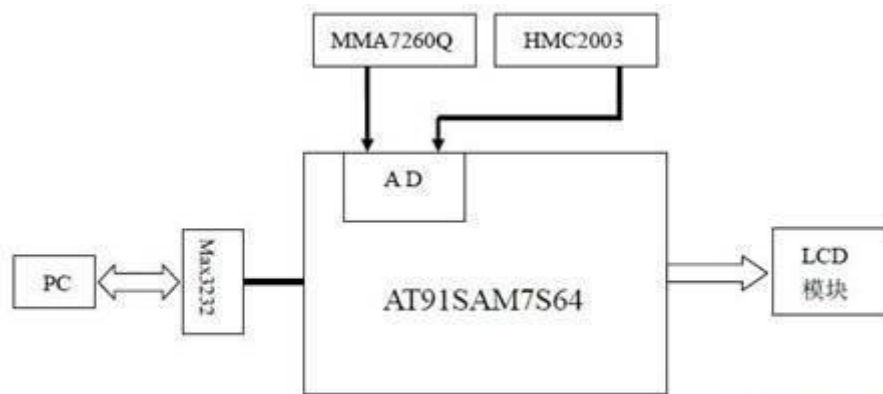


图 2.4-1: 系统硬件结构

3. 姿态参数的获得

在本系统中，三轴加速度计和三轴 MR 传感器都以以下的方式安装于电路板上：它们的 X 轴平行于系统的横轴指向右，Y 轴平行于系统的纵轴指向前，X、Y、Z 轴定义为右手坐标系，如图 3 -1 所示。

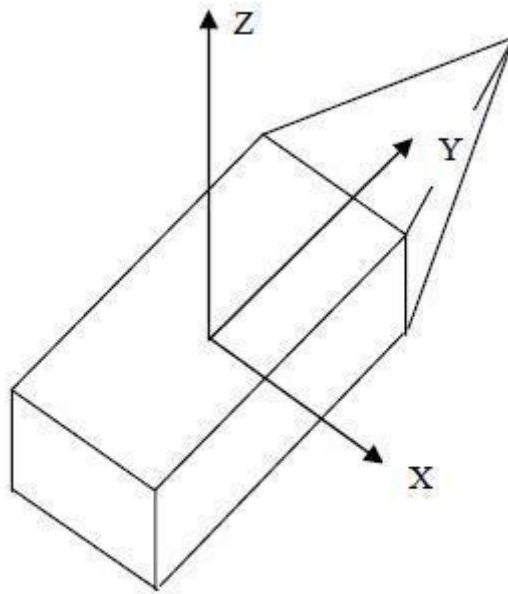


图 3-1 传感器

3.1 俯仰角与横滚角的获得:

为了获得系统基于重力向量的俯仰角 θ 和横滚角 φ ，需要使用加速度计的三个输出： A_x ， A_y ， A_z 。俯仰角和横滚角可以通过以下公式（1）和公式（2）计算得到。对于微控制器，函数中的 $\arctan(x)$ 需要通过以下公式（3）的泰勒展开后才能计算得到。

$$\varphi = \begin{cases} \arctan \frac{A_x}{A_z} & , (A_z \geq 0, A_x \neq 0) \\ \arctan \frac{A_x}{A_z} + \pi & , (A_z < 0, A_x \geq 0) \\ \arctan \frac{A_x}{A_z} - \pi & , (A_z < 0, A_x < 0) \\ \text{undefined} & , (A_z = 0, A_x = 0) \end{cases} \quad \text{---式 (1)}$$

$$\theta = \arctan \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \quad \text{---式 (2)}$$

$$\arctan(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + R_n \quad \text{---式 (3)}$$

3.2 方位角的获得:

为了获得系统相对于当地地磁向量的方位角，需要使用 MR 传感器的三个输出 M_x ， M_y ， M_z 。当系统置于水平状态时（俯仰角和横滚角都为 0）时，方位角 ψ 可以由公式（4）直接给出，但是在大多数情况下，系统并不是工作在水平状态，此时地磁场的竖直分量将会影响 M_x 和 M_y 的值，因此不能直接由公式（4）获得相对于地磁向量的方位角。为了在所有情况下都能获得正确的方位角，必须将俯仰角和横滚角考虑在内，即必须通过以俯仰角和横滚角为参数的坐标变换，将测得的 (M_x, M_y, M_z) 向量变换为与载体坐标系有相同方位角的水平坐标系下的向量 (M'_x, M'_y, M'_z) ，其变换矩阵如公式（5）。

$$\psi = \begin{cases} \arctan \frac{M_x}{M_y}, (M_y > 0) \\ \frac{\pi}{2}, (M_y = 0, M_x > 0) \\ -\frac{\pi}{2}, (M_y = 0, M_x < 0) \\ \arctan \frac{M_x}{M_y} + \pi, (M_y < 0, M_x > 0) \\ \arctan \frac{M_x}{M_y} - \pi, (M_y < 0, M_x < 0) \end{cases}$$

----式 (4)

$$R_t = R_x(-\theta)R_y(-\varphi)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta & \sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}$$

----式 (5)

变换后的 (M'x, M'y, M'z) 应该为:

$$\begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

----式 (6)

从而相对于地磁向量的方位角 ψ 可由一下公式 (7) 给出:

$$\psi = \begin{cases} \arctan \frac{M'_x}{M'_y}, (M'_y > 0) \\ \frac{\pi}{2}, (M'_y = 0, M'_x > 0) \\ -\frac{\pi}{2}, (M'_y = 0, M'_x < 0) \\ \arctan \frac{M'_x}{M'_y} + \pi, (M'_y < 0, M'_x > 0) \\ \arctan \frac{M'_x}{M'_y} - \pi, (M'_y < 0, M'_x < 0) \\ \text{undefined}, (\theta = \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

----式 (7)

至此，系统的 3 个姿态参数全部由公式 (1) (2) (7) 给出。

4. 误差分析:

本文论述的姿态测量系统主要由 MEMS 加速度计和 MR 传感器组成。由于现有 MRMS 技术的限制，其精度和传统的加速度计还有一定的差距，这将给所得到的俯仰角和横滚角带来更大的误差。MR 传感器是对磁场敏感的器件，当其被放置在铁磁环境中的时候，地球的磁场将受到附近铁磁环境的扭曲，这将导致方位角的误差。然而这种由于附近铁磁物质的影响而引入的误差是可以补偿的。

5. 结论:

使用 MEMS 加速度计和 MR 传感器构成的姿态测量系统有效的降低了整个系统的体积、成本以及功耗，使得嵌入式系统也可以引入姿态测量的功能。本文论述的姿态测量系统非常适用于汽车导航，机器人姿态测量等领域。本文的创新点在于使用 MEMS 和 MR 元件构造了应用于嵌入式系统中的姿态测量系统，并详细给出了各姿态参数的计算方法。