

文章编号: 2095-2163(2020)05-0063-04

中图分类号: TP23

文献标志码: A

# 基于嵌入式的姿态检测系统设计

周恒, 王民慧

(贵州大学电气工程学院, 贵阳 550000)

**摘要:** 针对现有嵌入式实验枯燥乏味, 学生对做实验兴趣不大, 本文提出了基于 MPU6050 多轴姿态传感器和 STM32F103ZET6 单片机的姿态检测系统。利用传感器内部的加速度计和陀螺仪, 通过 DMA 方式读取 3 个轴的角速度和加速度值, 进而通过卡尔曼滤波或互补滤波对姿态数据进行融合处理得到姿态值, 通过本系统所设计的通信协议, 将数据融合处理前与处理后的得到的数据值发送至上位机进行观测, 通过对两种数据融合处理的方式得到的姿态值对比, 分析两种数据融合处理算法的响应速度以及效果, 增强学生对姿态信息求取的理解, 为日后学生做更为复杂的姿态信息解算做铺垫。

**关键词:** 姿态检测; 卡尔曼滤波; 互补滤波; 数据融合

## Design of Posture Detection System Based on Embedded

ZHOU Heng, WANG Minhui

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, China)

**[Abstract]** In view of the dullness of the existing embedded experiments and the students' little interest in doing experiments, this paper proposes an attitude detection system based on MPU6050 multi-axis attitude sensor and STM32F103ZET6 microcontroller. The accelerometer and gyroscope inside the sensor are used to read the values of the angular velocity and acceleration of the three axes through DMA, and then the attitude data is fused through Kalman filtering or complementary filtering to obtain the attitude value. Agreement, the data values obtained before and after data fusion processing are sent to the host computer for observation, and the attitude values obtained by the two data fusion processing methods are compared and analyzed for the response speed and effect of the two data fusion processing algorithms. Enhance students' understanding of posture information seeking, and provide a foundation for future students to do more complex posture information calculations.

**[Key words]** Attitude detection; Kalman filter; Complementary filter; Data fusion

## 0 引言

随着可穿戴嵌入式设备、无人机、VR 等技术的快速发展, 物姿信息的求取成为了运动控制的前提条件和必要手段。单一的传感器检测的姿态信息, 存在计算的累计误差或存在量测误差, 而无法得到物体姿态的准确信息<sup>[1]</sup>。因此, 本文设计了基于 MPU6050 多轴姿态传感器和 STM32F103ZET6 单片机的姿态检测系统, 通过多个传感器对姿态进行检测, 借助互补滤波器及卡尔曼滤波器对多传感器数据进行融合。实验验证, 两种滤波器均可得到物体准确的姿态信息。

## 1 系统的总体设计

本文所设计的姿态检测系统以 STM32F103ZET6 单片机为核心, 通过 MPU6050 多轴姿态传感器对物体的运动姿态进行检测, 经互补滤波器或卡尔曼滤波器处理后的数据即可在 OLED 显示屏上显示, 也可通过相应的通信协议, 通过串口将处理前及处理后的

数据发送至上位机进行观测, 得到物体的运动曲线。本系统的总体设计如图 1 所示。

## 2 软件设计

### 2.1 系统软件的总体设计

本姿态检测系统的主程序流程图如图 2 所示, 主要由系统初始化程序、传感器数据采集程序、量程转换程序、互补滤波器程序、卡尔曼滤波器程序、按键扫描程序、OLED 显示程序、通信协议程序等几部分组成。系统启动后, 首先对 MPU6050 进行初始化, 并判断是否初始化成功。如果初始化失败, 则 OLED 显示 MPU6050Init error; 如果初始化成功, 则读取 MPU6050 传感器采集的姿态并对按键进行检测, 如果 key1 按键按下, 则状态标志位置 1, 并调用互补滤波器对进行量测转换后的数据进行数据融合处理, 得到物体实时姿态信息。将得到的融合姿态信息及原始数据发送至上位机进行监测; 如果 key2 按键按下, 则状态标志位置 2, 调用卡尔曼滤波器对

作者简介: 周恒(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式; 王民慧(1962-), 女, 学士, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统、自动化装置。

通讯作者: 王民慧 Email: 468427133@qq.com

收稿日期: 2020-03-04

进行量测转换后数据进行数据融合处理,将得到的融合姿态信息及原始数据经通信协议打包发送至上位机进行检测。

位机进行检测。

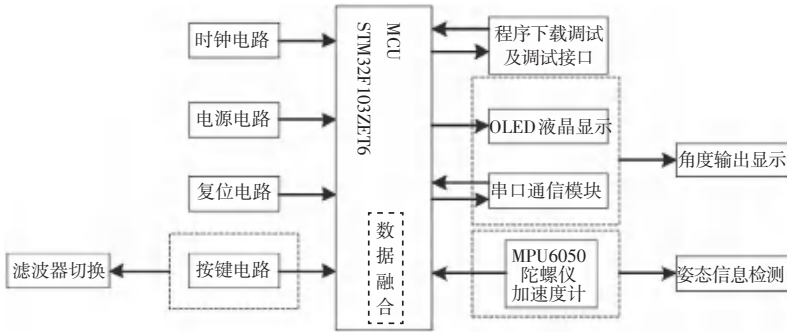


图 1 系统总体设计框图

Fig. 1 Block diagram of the overall design of the system

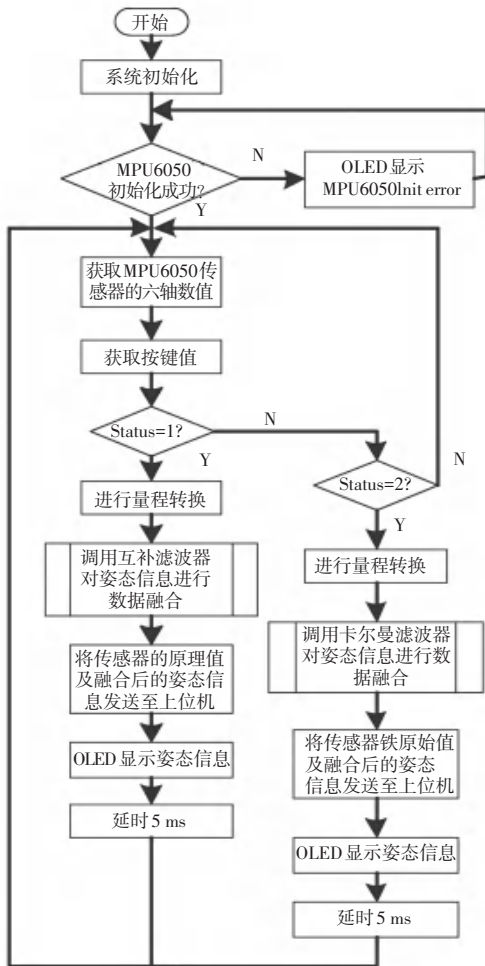


图 2 系统的主程序流程图

Fig. 2 Main program flow chart of the system

## 2.2 互补滤波器设计

互补滤波器就是根据不同传感器特性,通过不同的高通滤波器或低通滤波器,相加得到整个频带的信号<sup>[2]</sup>。针对 MPU6050,由于加速度计对传感器运动过程中的加速度比较敏感,取加速度计的瞬时值计算的姿态信息误差较大;而陀螺仪测得的角速

度经过积分后得到的姿态信息不受传感器运动过程中加速度的影响。但随着时间的推移,通过积分所得到的姿态信息便会有一个较大的累计误差,可采用互补滤波器对两个传感器得到姿态信息进行校正滤波,进而得到一个准确的姿态信息。

本实验所设计的互补滤波器以对陀螺仪数据积分得到的姿态信息为最优值,定时对加速度计的数据采样得到的姿态信息来校正陀螺仪得到的姿态,通过加速度计滤除高频信号,陀螺仪滤除低频信号<sup>[3]</sup>,将陀螺仪和加速度计的优点融合起来,使之在高频段及低频段都可以得到一个准确的姿态信息,其算法框图如图 3 所示:

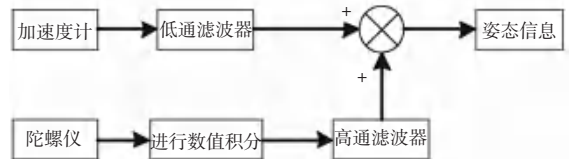


图 3 互补滤波器算法框图

Fig. 3 Block diagram of complementary filter algorithm

其互补滤波器的姿态信息输出方程(1):

$$Angle = (1 - k) * (Angle + Y_{gyro} * dt) + k * X_{acc} \quad (1)$$

式中,  $Angle$  为互补滤波器输出的传感器的当前角度值,  $k$  为对加速度计取值的权重,  $Y_{gyro}$  为陀螺仪的  $Y$  轴输出值,  $X_{acc}$  为加速度计  $X$  轴输出值,  $dt$  为采样周期。

本文中互补滤波器的初始参数设置如表 1 所示:

表 1 互补滤波器的初始值参数

Tab. 1 Initial value parameters of complementary filter

$Angle_0$	$dt$	$k$
0	0.005	0.02

### 2.3 卡尔曼滤波器的设计

首先,建立系统的状态方程(2)及量测方程(3)如下:

状态方程:

$$X_k = AX_{k-1} + BU_k + W_k. \quad (2)$$

量测方程:

$$Z_k = HX_k + V_k. \quad (3)$$

式中,  $X_k$  为系统  $k$  时刻的状态量,  $A$  为系统从  $k-1$  时刻到  $k$  时刻的状态转移矩阵,  $U_k$  为系统  $k$  时刻的输入量,  $B$  为与之对应的输入控制加权矩阵,  $W_k$  是系统  $k$  时刻的过程演化噪声,  $Z_k$  为系统  $k$  时刻量测向量,  $H$  为系统  $k$  时刻的量测矩阵,  $V_k$  为系统  $k$  时刻的量测噪声。

在本系统中,选择陀螺仪  $X$  轴方向上的角度值作为一个状态向量,以加速度计传感器的值估计得到的陀螺仪的常值偏差  $b$  作为另一个状态向量<sup>[4]</sup>,建立其量测倾角的模型(4):

$$\theta_k = \theta_{k-1} + (\omega_k - b_k + v_k) * dt. \quad (4)$$

式中,  $\theta_k$  为 MPU6050 传感器真实旋转的角度,  $\omega_k$  为陀螺仪  $k$  时刻的角速度,  $b_k$  为陀螺仪  $k$  时刻的常值偏差,  $v_k$  为陀螺仪的噪声,  $dt$  为采样周期。根据式(2)~(4),建立离散化后的系统状态方程和量测方程(5):

$$\begin{cases} \dot{X}_k = \begin{bmatrix} 1 & -T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{X}_{k-1} + \begin{bmatrix} T_s \\ 0 \end{bmatrix} \dot{U}_{k-1} + \begin{bmatrix} W_k T_s \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \dot{Z}_k = [1 \quad 0] X_k + V_k. \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $X_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ b_k \end{bmatrix}$ ,  $U_{k-1}$  为  $k-1$  时刻包含固定偏差的陀螺仪输出角速度,  $W_k$  为陀螺仪的量测噪声,  $Z_k$  为加速度计经处理后得到的角度值,  $V_k$  为加速度计的量测量测噪声,  $T_s$  为采样周期。由式(5)可知,

表2 卡尔曼滤波器的初始参数值

Tab. 2 Initial parameter values of Kalman filter

$T_s$	$A$	$B$	$Q$	$R$	$H$	$X_0$	$P_0$
0.005	$\begin{bmatrix} 1 & -0.005 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.005 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.003 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}$	0.5	[1 0]	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

### 2.4 通信协议设计

为了便于学生对实验数据的观察,本系统不仅可通过oled显示屏查看MPU6050传感器的当前姿态信息,还可通过上位机以波形的形式查看传感器的姿态变化情况,其下位机与上位机的通信协议如表3所示:

根据  $k-1$  时刻的角度值对  $k$  时刻的角度值进行预测,再根据  $k-1$  时刻系统的误差协方差矩阵预测  $k$  时刻的误差协方差矩阵,通过卡尔曼滤波器进行递归运算,直至估算出最优的角度值。在此基础上,通过系统的过程噪声协方差矩阵  $Q$ ,量测噪声的协方差矩阵  $R$ ,对卡尔曼滤波器进行校正<sup>[5]</sup>,  $Q$  与  $R$  的形式如(6)所示:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{angle} & 0 \\ 0 & Q_{gyro} \end{bmatrix}, \quad R = R_{acce}. \quad (6)$$

式中,  $Q_{angle}$  为角度估算值的协方差,  $Q_{gyro}$  为陀螺仪位偏差的协方差,其数值表示卡尔曼滤波器对传感器数据的信任程度,数值越小,表明信任程度越高。因此,卡尔曼滤波递推公式可概括为5个核心公式(7)~(11):

系统此刻状态的预估值为公式(7):

$$X_k |_{k-1} = AX_{k-1} |_{k-1} + BU_k, \quad (7)$$

与之相伴的误差协方差阵为公式(8):

$$P_k |_{k-1} = AP_{k-1} |_{k-1} A^T + Q, \quad (8)$$

卡尔曼增益为公式(9):

$$K_k = P_k |_{k-1} H^T (HP_k |_{k-1} H^T + R)^{-1}. \quad (9)$$

系统状态的更新值为公式(10):

$$X_k |_k = X_k |_{k-1} + K_k (Z_k - HX_k |_{k-1}). \quad (10)$$

与之相伴的误差协方差阵更新为公式(11):

$$P_k = P_k |_{k-1} - K_k HP_k |_{k-1}. \quad (11)$$

式中,  $X_k |_{k-1}$  为  $k$  时刻的预测值,  $X_{k-1} |_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的最优值,  $P_k |_{k-1}$  为  $k$  时刻误差协方差阵的预估值,  $P_{k-1} |_{k-1}$  为  $k-1$  时刻误差协方差阵的更新值,  $Q$ 、 $R$  及  $Z_k$  上文已提及,  $K_k$  为系统的卡尔曼增益,  $H$  为本系统的量测矩阵。

本文中卡尔曼滤波器的初始参数设置如表2所示。经多次试验,该初始值设置使卡尔曼滤波器具有很好的鲁棒特性和准确性。

表3 上位机与下位机之间的通信协议

帧头	功能字	数据长度	数据	计算校验和
0x88	0xAF	0x1C	DATA	SUM

Tab. 3 Communication protocol between upper computer and lower computer

表中 DATA 表示要发送的数据,最大数据长度不超过 28 个字节, SUM 表示从帧头 0x88 一直到 DATA 最后一个字节的和,通过该协议帧格式,可将数据通过串口上传至上位机进行观测。

### 3 实验测试

通过两种滤波器均有效滤除了陀螺仪传感器产生的漂移误差,得到物体的实际姿态情况,如图 4、图 5 所示。

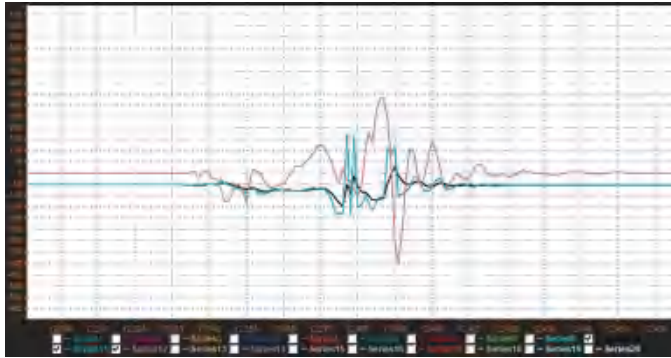


图 4 互补滤波器实验测试

Fig. 4 Complementary filter experiment test

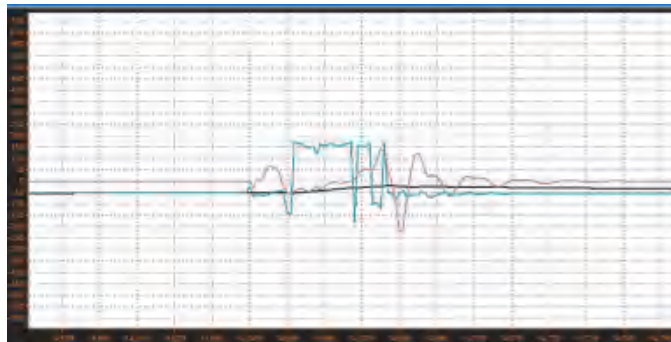


图 5 卡尔曼滤波器实验测试

Fig. 5 Kalman filter experimental test

### 4 结束语

本姿态检测系统利用 MPU6050 传感器和 STM32F103ZET6 单片机搭建,实现了 MPU6050 传感器六轴数据的读取,通过量程转换之后以本系统所设计的互补滤波器和卡尔曼滤波器对陀螺仪、加速度计传感器的值进行数据融合,提高了物体姿态检测的准确性。该系统具有响应快、量测准确、数据显示直观、实时性好等特点,可广泛应用于本科实验教学,增强学生对互补滤波和卡尔曼滤波算法的理

解以及学生对 STM32 单片机的应用。

### 参考文献

- [1] 陈国定,周鹏豪,胡朕豪,等. 基于 MPU6050 的四轴硬件姿态解算研究[J]. 机电工程,2018,35(1):95-100.
- [2] 陈光武,李少远,李文元,等. 基于递推最小二乘与互补滤波的姿态估计[J]. 控制理论与应用,2019,36(7):1096-1103
- [3] 李二闯,张建杰,袁亮,等. 基于四元数互补滤波的小型四旋翼姿态解算[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(3):37-39+43.
- [4] 王晓初,李宾,刘玉县,等. 一种基于改进卡尔曼滤波的姿态解算算法[J]. 科学技术与工程,2019,19(24):416-422.
- [5] 冯智勇,曾瀚,张力,等. 基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):137-141.
- [3] Kim Zetter. Countdown to Zero Day: Stuxnet and the Launch of the World's First Digital Weapon[M]. Crown, 2014.
- [4] HUIPING H, SHIDE X, XIANGYIN M, et al. Attack tree-based method for assessing cyber security risk of industrial control system [J]. application research of computers, 2015.
- [5] GAO H, PENG Y, DAI Z, et al. An industrial control system testbed based on emulation, physical devices and simulation[C]// International Conference on Critical Infrastructure Protection. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014: 79-91.
- [6] BO Z, TING Z, XINGKUN X U, et al. Safety Analysis of Industrial Control System and Improvement of Communication Protocol Design[J]. Electric Power, 2015, 15(9):2091-2095.

(上接第 62 页)

结果分析,本文阐述的工控网络靶场能在较短时间内完成工控网络场景的部署,可多用户同时段使用,前期投入及后期运维成本均不高,适合于工控安全领域的科研、教学任务。

### 参考文献

- [1] 姚羽,祝烈煌,武传坤. 工业控制网络安全技术与实践[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [2] 方滨兴,贾焰,李爱平,等. 网络空间靶场技术研究[J]. 信息安全学报,2016:1-9.