

基于多传感器数据融合的姿态控制与应用

刘明亮¹, 崔宇佳¹, 张一迪¹, 林海静¹, 陆起涌^{1,2}

(1 复旦大学 电子工程系, 上海 200433; 2 复旦大学 信息科学与工程学院智慧网络与系统研究中心, 上海 200433)

摘 要: 设计了利用 MPU9250 九轴姿态传感器和 STM32F103 获取、处理姿态数据的智能吸尘器系统。考虑到在实际应用中嵌入式系统对实时性以及姿态检测准确性的要求, 提出了一种算法——利用加速度、陀螺仪数据分别更新四元数并通过互补滤波算法进行融合, 然后利用阈值中值滤波后的磁力计数据修正航向角, 实现了系统对传感器数据的融合以及对载体姿态的估计。将算法应用于智能吸尘器平台, 利用上述算法处理的数据进行姿态控制, 通过仿真和实验证明了算法的可行性和有效性, 实现了智能吸尘器姿态的准确控制。在姿态控制的基础上进行路径规划, 可以提高智能吸尘器在室内清洁区域的覆盖率。

关键词: MPU9250; 姿态检测; 智能吸尘器; STM32

中图分类号: TP212. 9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)07-0065-05

Attitude Control and Application Based on Multi-Sensor Data Fusion

LIU Ming-liang¹, CUI Yu-jia¹, ZHANG Yi-di¹, LIN Hai-jing¹, LU Qi-yong^{1,2}

(1 Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2 Research Center of Smart Networks and Systems, School of Information
Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: An intelligent vacuum cleaner system using MPU9250 nine-axis attitude sensor and STM32F103 which acquire and process the attitude data is designed. Aiming at the real-time requirement of embedded system and the necessity of accurate attitude detection in practical application, an algorithm is proposed - using the accelerometer and gyroscope to update quaternion respectively, and using the fast complementary filter to fuse the data. And then, the heading angle is corrected by the magnetic flux density which is processed by median filter based on the threshold value. Therefore, the system fuses data of sensors and estimates the attitude. To verify the feasibility and effectiveness of the algorithm, we applied it to the intelligent vacuum cleaner platform. The experimental results demonstrate that the intelligent vacuum cleaner using proposed algorithm realizes the accurate attitude control and can accurately select path. And path planning based on the attitude control can improve coverage of the indoor cleaning area for intelligent vacuum cleaner.

Key words: MPU9250; posture detection; intelligent vacuum cleaner; STM32

1 引言

智能测量技术一直以来广泛应用于航空航天、无人机、虚拟现实、可穿戴设备等领域, 而微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 以其小尺寸、低成本、易安装等特点成为重要的测量手段。基于 MEMS 技术的姿态测量系统通常由三轴陀螺仪、三轴加速度和三轴磁力计等传感器组成, 由于

加速度计、磁力计数据易受漂移误差的影响, 磁力计易受软磁场和硬磁场的干扰^[1], 陀螺仪也存在累积误差, 在长时间的姿态检测中可靠性会降低^[2], 所以如果单一利用一种传感器测量效果会非常不理想。因此, 通常的做法是依靠传感器的冗余设计进行测量, 然后将姿态数据进行融合。

本文利用九轴运动姿态传感器 MPU9250 分别获取载体角速度、加速度以及磁感应强度的三维矢

量.在姿态控制方面,STM32F103 作为主控芯片,利用固件库^[3]进行编程,根据姿态数据实现了智能吸尘器航向角的测量和控制,从而以此为基础进行路径规划,提高其室内清洁区域的覆盖率.

2 系统设计

本文设计的智能吸尘器系统以 STM32F103 作为主控核心,STM32F103 主控制器是基于 ARM v7-M 体系结构的 32 位 RISC 处理器^[3].设计中主控制器获取并处理各种传感器的信息来实现姿态控制和路径选择.其中传感器部分包括九轴运动姿态传感器 MPU9250,获取相关的九个不同的姿态数据,作为姿态控制的基础;避障传感器包括红外对管、微动开关等组成,作为对障碍物的检测,其他模块及整体系统组成如图 1 所示.

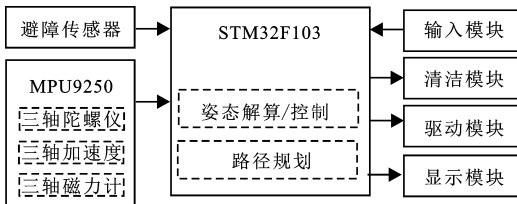


图 1 智能吸尘器姿态控制系统框图

其中,MPU9250 是 InvenSense 公司第二代九轴运动姿态传感器^[4],在 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 QFN 封装中集成了三轴加速度、三轴陀螺仪、三轴磁力计以及数字运动处理器(DMP),并且姿态数据分别以 16 位数字量输出,满足慢速或者快速精确地运动跟踪.此外,MPU9250 提供可编程陀螺仪量程选择($\pm 250, \pm 500, \pm 1\ 000, \pm 2\ 000\text{ dps}$)和可编程加速度量程选择($\pm 2\text{ g}, \pm 4\text{ g}, \pm 8\text{ g}, \pm 16\text{ g}$),磁力计测量范围也可达到 $\pm 4\ 800\ \mu\text{T}$.该传感器提供 I2C 和 SPI 的接口,支持 $2.4 \sim 3.6\text{ V}$ 供电电压,本文设计系统中供电电压为 3.3 V ,通过 I2C 接口进行通信,数据传输频率设置为 100 Hz .

3 姿态四元数更新

在刚体定点转动理论中,根据欧拉定理,以及动坐标系相对参考坐标系的方位,可以通过动坐标系绕某瞬时轴(四元数表示)转过某个角度的一次转动而获得^[5].本文中姿态的表示方法采用这种四元数表示法,而参考坐标系采用北东地(NED)坐标系.

针对本文嵌入式的应用场合,四元数及其解法不仅大大简化了姿态解算中的计算量,避免了采用欧拉角表示的姿态解算中遇到的奇异性问题^[6],而且使不同坐标系间的转换更加方便、快捷.

3.1 角速度更新四元数

首先,通过对角速度三维矢量数据进行积分,可获得相对于初始状态变化一定角度后的姿态四元数,四元数微分方程如下:

$$\frac{dq_{w,t}}{dt} = \frac{1}{2} \Omega_X q_{w,t-1} \quad (1)$$

式中, $q_{w,t}$ 为 t 时刻的姿态四元数; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别是加速度计三个轴的角速度, Ω_X 表示如下:

$$\Omega_X = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & -\omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

则相应的更新方程为

$$q_{w,t} = q_{w,t-1} + \frac{1}{2} \Omega_X q_{w,t-1} \Delta t \quad (2)$$

3.2 加速度更新四元数

A^b 为姿态传感器获取的归一化加速度三维矢量,它在载体坐标系和参考坐标系中的转换关系如下^[7]:

$$A^b = CA^r, \begin{cases} A^b = (a_x, a_y, a_z)^T \\ A^r = (0, 0, 1)^T \end{cases} \quad (3)$$

式中, A^b, A^r 分别是加速度在载体坐标系和参考坐标系中的三维矢量, C 是两种坐标系之间进行转换的方向余弦矩阵:

$$C = (C_1, C_2, C_3) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & -2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_0q_2 + 2q_1q_3 & -2q_0q_1 + 2q_2q_3 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

利用式(3)得出 A^b , 如下:

$$A^b = C_3 = \begin{bmatrix} -q_2 & q_3 & -q_0 & q_1 \\ q_1 & q_0 & q_3 & q_2 \\ q_0 & -q_1 & -q_2 & q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = P_3 q_a \quad (4)$$

式中, $P_3 = \begin{bmatrix} -q_2 & q_3 & -q_0 & q_1 \\ q_1 & q_0 & q_3 & q_2 \\ q_0 & -q_1 & -q_2 & q_3 \end{bmatrix}$; q_a 为单位矢

量,则 $P_3 P_3^T = (q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2) I_{3 \times 3} = I_{3 \times 3}$.

所以由式(4)解得:

$$\mathbf{q}_a = \mathbf{P}_3^T \mathbf{A}^b = \begin{bmatrix} -a_x q_2 + a_y q_1 + a_z q_0 \\ a_x q_3 + a_y q_0 - a_z q_1 \\ -a_x q_0 + a_y q_3 - a_z q_2 \\ a_x q_1 + a_y q_2 + a_z q_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5) 得到四元数通过加速度进行迭代的公式:

$$\mathbf{q}_a(t) = \mathbf{W}_a \mathbf{q}_a(t-1) \quad (6)$$

$$\text{式中, } \mathbf{W}_a = \begin{bmatrix} a_z & a_y & -a_x & 0 \\ a_y & -a_z & 0 & a_x \\ -a_x & 0 & -a_z & a_y \\ 0 & a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} \text{ 为 } t \text{ 时刻加速}$$

度数据构成的转换矩阵。

根据现代控制理论,式(6) 迭代过程可以看作从 $t-1$ 到 t 时刻采样间隔 T 内的线性定常数系统,则可以将它转化为

$$\frac{d\mathbf{q}_a}{dt} = \mathbf{H}_a \mathbf{q}_a \quad (7)$$

当且仅当 $\mathbf{W}_a$ 满足如下条件,式(7) 才成立:

$$\mathbf{W}_a = e^{\mathbf{H}_a T} \quad (8)$$

则相应的式(7) 微分方程的解为

$$\mathbf{q}_a = e^{\mathbf{H}_a t} \mathbf{q}_0 \quad (9)$$

根据式(8) 的条件,较高采样频率下 T 和 $\mathbf{H}_a$ 都是非常小的,所以以 $e^{\mathbf{H}_a T}$ 的一阶泰勒展开式近似 $\mathbf{W}_a$:

$$\mathbf{W}_a \approx \mathbf{I}_{4 \times 4} + \mathbf{H}_a T \quad (10)$$

则: $\mathbf{H}_a = \frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}_{4 \times 4}}{T}$, 相应的:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_a^2 &= \left(\frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}_{4 \times 4}}{T} \right) \left(\frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}_{4 \times 4}}{T} \right) \\ &= \frac{\mathbf{W}_a^2 - 2\mathbf{W}_a + \mathbf{I}_{4 \times 4}}{T^2} = -2 \frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}_{4 \times 4}}{T^2} = -\frac{2}{T} \mathbf{H}_a \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \mathbf{H}_a^3 = \frac{4}{T} \mathbf{H}_a$$

$$\Rightarrow \mathbf{H}_a^n = \left(\frac{-2}{T} \right)^{n-1} \mathbf{H}_a$$

将式(9) 中 $e^{\mathbf{H}_a t}$ 进行泰勒展开,并利用上面公式整理如下:

$$\begin{aligned} e^{\mathbf{H}_a t} &= \mathbf{I}_{4 \times 4} + \mathbf{H}_a t + \frac{\mathbf{H}_a^2 t^2}{2!} + \dots + \frac{\mathbf{H}_a^n t^n}{n!} \\ &= \mathbf{I}_{4 \times 4} + \frac{T}{2} \mathbf{H}_a \left[-\frac{2}{T} t + \left(\frac{-2}{T} t \right)^2 + \dots + \right. \\ &\quad \left. \frac{\left(\frac{-2}{T} t \right)^{n+1}}{n!} \right] \\ &= \mathbf{I}_{4 \times 4} + \frac{T}{2} \mathbf{H}_a (1 - e^{-\frac{2}{T} t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\xrightarrow{\frac{2}{T} t \rightarrow +\infty} \\ &\Rightarrow \mathbf{I}_{4 \times 4} + \frac{T}{2} \mathbf{H}_a \end{aligned} \quad (12)$$

将 $\mathbf{H}_a$ 表达式和式(12) 的结果带入式(9) 得到:

$$\mathbf{q}_a = \frac{\mathbf{W}_a + \mathbf{I}}{2} \mathbf{q}_0$$

由此,可以得到根据加速度数据进行更新姿态四元数的方程:

$$\mathbf{q}_{a,t} = \mathbf{q}_{a,t-1} + \frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}}{2} \mathbf{q}_{a,t-1} \quad (13)$$

4 姿态解算

本文采用互补滤波算法将更新四元数进行融合,然后将姿态四元数转换为欧拉角.在智能吸尘器平台应用中主要根据参考坐标系内的航向角进行方向的确定,所以必须对欧拉角中的航向角进行修正.航向角修正依靠经过阈值中值滤波处理的磁力计数据,即首先在静止状态下测量出环境的平均磁感应强度,并设定磁感应强度的允许变化阈值,以此判断运行中获取的磁感应强度矢量的有效性,不在阈值范围内的磁感应强度将不会进行航向角修正,此时利用欧拉角对其进行修正,算法流程如图2所示.

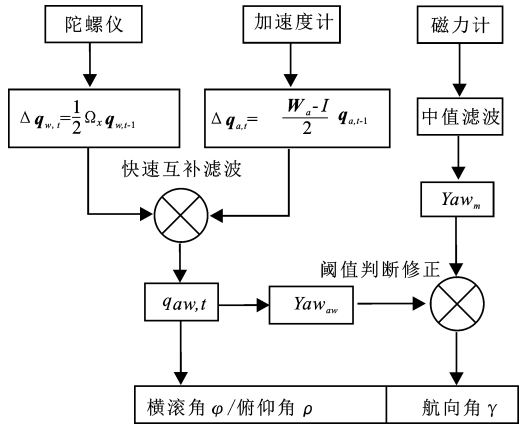


图2 算法流程框图

4.1 姿态四元数数据融合

由上述推导,利用互补滤波算法将式(2) 和式(13) 获得的更新四元数进行融合,方程如下:

$$\mathbf{q}_{aw,t} = (1-\gamma) \frac{1}{2} \Omega_X \mathbf{q}_{w,t-1} \Delta t + \gamma \frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}}{2} \mathbf{q}_{a,t-1} \quad (14)$$

式中, γ 为滤波器参数,则根据式(14) 得到姿态四元数,如下:

$$\mathbf{q}_{aw,t} = \left\{ \mathbf{I} + \frac{(1-\gamma)\Delta t}{2} \Omega_X + \gamma \frac{\mathbf{W}_a - \mathbf{I}}{2} \right\} \hat{\mathbf{q}}_{aw,t-1} \quad (15)$$

对式(15) 中姿态四元数进行归一化:

$$\hat{\mathbf{q}}_{aw,t} = \frac{\mathbf{q}_{aw,t}}{\|\mathbf{q}_{aw,t}\|} \quad (16)$$

由此得到利用加速度和陀螺仪数据进行更新的四元数,接下来根据式(17)所示的关系,将式(16)得到的四元数转换为欧拉角表示:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{q_2 q_3 + q_0 q_1}{0.5 - q_1^2 - q_2^2}\right) \\ \rho = -\arcsin(2(q_1 q_3 - q_0 q_2)) \\ Yaw_{aw} = \arctan\left(\frac{q_1 q_2 + q_0 q_3}{0.5 - q_2^2 - q_3^2}\right) \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)便得到了姿态在参考坐标系内的欧拉角表示,其中, φ 为横滚角, ρ 为俯仰角, Yaw_{aw} 为航向角。但是由于航向角是基于初始位置的变化角度,而不是参考坐标系内的绝对航向角,所以接下来还需要对航向角进行修正。

4.2 航向角修正

由于磁力计易受到周围磁场的干扰,所以直接利用磁力计修正的航向角噪声比较大。在对磁力计数据的处理过程中,首先采用中值滤波^[8]对磁力计数据进行处理,有效抑制数据中的脉冲噪声。当窗口在原始数据序列上滑动时,中值滤波器的输出为 $med(x_i)$,公式如下:

$$med(x_i) = \begin{cases} x(k+1), & \text{当 } n = 2k+1; \\ \frac{1}{2}(x(k)+x(k+1)), & \text{当 } n = 2k; \end{cases} \quad (18)$$

式中, $x(k)$ 表示窗口内原始数据中第 k 个数据; n 为中值滤波窗口长度。

在实验室环境下保持姿态传感器静止,并计算出平均的磁感应强度大小 M^b_{mean} ,确定磁感应强度的允许变化阈值 M_{thr} ,磁感应强度大小的原始数据和中值滤波效果如图3所示。

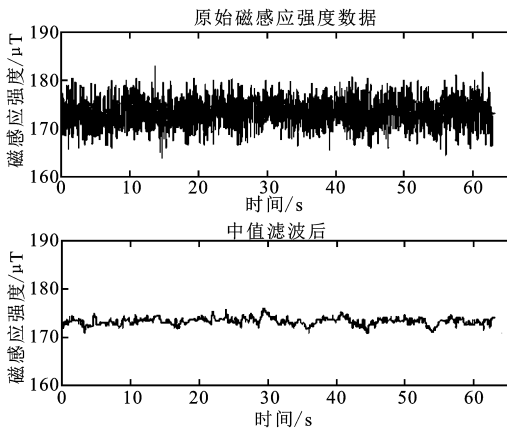


图3 静止时磁力计数据滤波效果对比

在姿态传感器应用中,由于载体坐标系的XY坐标轴不在水平面内,即存在横滚角 φ 和俯仰角 ρ

时,需要将载体坐标系内测量的磁感应强度矢量 M^b 转换到参考坐标系内的 M^r ,并求解载体的磁航向角^[9],转换公式为

$$\begin{cases} M^r_x = M^b_x \cos\rho + M^b_z \sin\rho \\ M^r_y = M^b_x \sin\varphi \sin\rho + M^b_y \cos\varphi - M^b_z \sin\varphi \cos\rho \\ M^r_z = -M^b_x \cos\varphi \sin\rho + M^b_y \sin\varphi - M^b_z \cos\varphi \cos\rho \end{cases} \quad (19)$$

则航向角 Yaw_m 为

$$Yaw_m = \arctan\left(\frac{M^r_y}{M^r_x}\right) \quad (20)$$

通过上述处理过程,可得到由磁力计数据计算的航向角 Yaw_m ,然后结合前面得到的航向角 $Yaw_{a,w}$,进行最终航向角的阈值判断修正,当 M^b 与 M^b_{mean} 满足如下条件:

$$|\|M^b\| - M^b_{mean}| < M_{thr} \quad (21)$$

此时航向角由磁力计数据经行修正时:

$$\gamma = Yaw_m \quad (22)$$

否则利用角速度与加速度数据得出的结果修正:

$$\gamma = \gamma + \Delta Yaw_{aw} \quad (23)$$

5 实验验证

传感器 MPU9250 模块安装在智能吸尘器顶端,通过主控制器 STM32 完成初始化。测试中,主控制器控制吸尘器各种动作的同时,将各项数据通过串口传输至计算机,然后利用 matlab 对传感器进行仿真,并与实际效果进行对比验证。

首先,智能吸尘器保持静止状态,分别在无磁干扰和有磁干扰环境下进行对比测试,图4所示为一组对比结果。

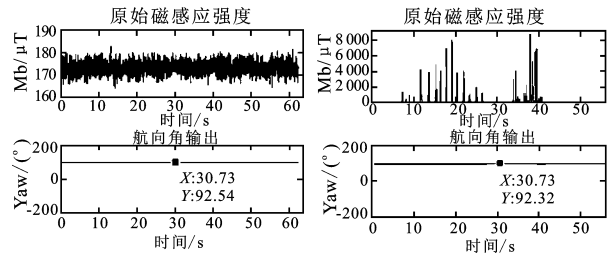


图4 无磁干扰(左)和有磁干扰(右)对比结果

由图4看出,在有磁干扰环境下解算结果与无磁干扰环境下对比相差 0.22° ,统计结果显示两者平均之差也仅在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内,并且有磁干扰环境下不仅对航向角进行了修正,而且不易受到磁场波动的影响,因此证明,在静止状态下本文算法可以很好地适应无磁和有磁干扰环境下对姿态角的解算。

接下来进行动态测试,控制智能吸尘器每次旋转 45°,测量得到的原始数据如图 5 所示。

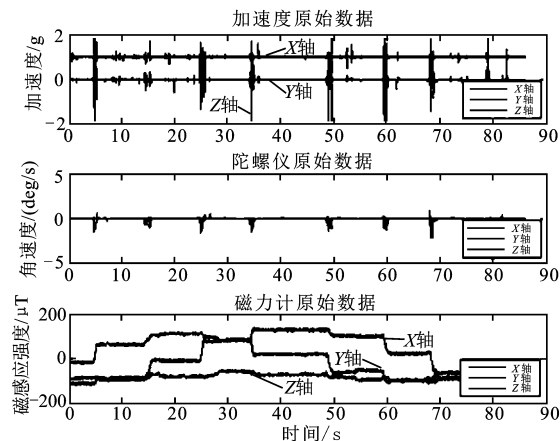


图 5 传感器原始数据

图 6 为智能吸尘器上述运行过程中解算出的航向角,由图中标出的几个坐标数据可以看出,智能吸尘器在以每次 45°旋转一周的情况下,每次误差不到 0.4°,因此可以说明主控芯片通过姿态数据可以很好地进行姿态的解算,并且利用解算结果对吸尘器的航向角的控制,从而可以进行下一步的路径规划,提高工作效率。

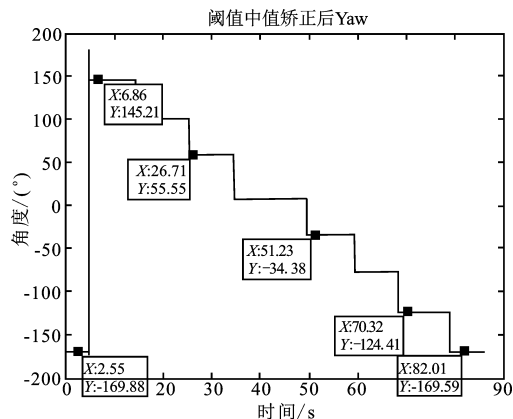


图 6 姿态解算结果

6 结束语

本文提出了一种互补滤波与阈值中值滤波相结合的姿态检测算法,通过将角速度更新的四元数与加速度更新的四元数进行互补滤波,然后将融合的四元数转换为相应的欧拉角,再利用阈值中值滤波处理过的磁感应强度对航向角进行修正,最终获得了准确的载体姿态数据. 将算法应用于智能吸尘器平台,通过实时解算姿态数据并对智能吸尘器进行姿态控制,以实现各种基本动作和工作模式,如精确旋转一定角度实现来回往返的清扫覆盖,实现低重

复率与高覆盖率的目的. 实验结果表明,本文算法具有较高的实时性和准确性,并可应用于多种姿态检测的领域,具有广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] Guoyu Zuo, Kai Wang. Multi-sensor fusion method using MARG for a fixedwing unmanned aerial vehicle [C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2012: 664-669.
- [2] ZHOU Y, ZHANG H, ZHANG TAO, et al. A fusion attitude determination method based on quaternion for MEMS gyro/accelerometer/magnetometer [C]// 2013 25th Chinese Control and Decision Conference, IEEE, 2013: 3228 - 3232.
- [3] 刘火良, 杨森. STM32 库开发实战指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] InvenSense, MPU-9250-Datasheet. [EB/OL]. [2016-04-03]. <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>. 2016. 9.
- [5] 柴卫华, 侯芸. 捷联惯导系统姿态算法研究 [J]. 现代防御技术, 2001, 29 (4): 42-45.
- [6] Peng Mi, Du Qingxiu, Ye Longmao, et al. An adaptive fast quaternion-based human motion tracking algorithm with inertial/magnetic technology [C]// IEEE 10th International Conference on Signal Processing: IEEE, 2010: 1252-1258.
- [7] Wu J, Zhou Z, Chen J, et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low-cost MARG sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (18): 6996-7007.
- [8] 陈贺新. 非线性滤波器与数字图像处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 39-42.
- [9] Song Q, Feng J, ZHANG X, et al. Obtaining the real time yaw angle using electronic compass in quadrotor systems [C]// 2012 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE, 2012: 238-242.

作者简介:

刘明亮 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为多传感器数据融合与路径规划. E-mail: mlliu14@fudan.edu.cn.
崔宇佳 女, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为模式识别以及音频处理.
张一迪 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为信号处理及其应用.
林海静 女, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统.
陆起涌 男, (1966-), 教授, 硕士生导师. 研究方向为智能控制、嵌入式系统、物联网技术等.