

一种面向 AHRS 的改进互补滤波融合算法^{*}

杜杉杉¹ 吴昊² 张继文³ 马武建¹

(1. 航天东方红卫星有限公司 北京 100094; 2. 北京控制工程研究所 北京 100190;

3. 清华大学机械工程系 北京 100084)

摘 要: 针对三轴陀螺、三轴磁强计和三轴加速度计等 MEMS 传感器所构成的 AHRS 系统对全局环境下的姿态检测问题, 在分析线性融合滤波器、Kalman 滤波器的缺陷基础上, 对互补滤波器的 IMU 姿态解算算法进行拓展, 通过磁场计测量数据在全局坐标系下水平分量的求解, 获得了传感器偏航方向的姿态角, 从而构成了完整的三维空间姿态测量系统。并基于硬件实验验证算法有效消除陀螺漂移和加速度及地磁场干扰的可行性。

关键词: 航姿参考系统; 互补滤波器; 姿态估计; 传感融合

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Kind of improving compensation filter algorithm for AHRS

Du Shanshan¹ Wu Hao² Zhang Jiwen³ Ma Wujian¹

(1. The DFH Satellite Co., LTD, Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The posture measurement problem in global environment is involved in AHRS system, which is mainly composed of MEMS sensors such as 3-axis gyro, 3-axis magnetic sensor and 3-axis accelerator. It extends the algorithm of compensation filter by calculating the horizontal measurements of magnetic sensor in global environment, in facing the defects of linear mixture algorithm and Kalman filter, and therefore constructs the complete 3D space posture detection, when yaw angle is obtained. It was tested on hardware experiment platform, and proves the validity of canceling the gyro drift and disturbance of accelerator and magnetic sensor.

Keywords: AHRS; compensation filter; posture measurement; sensor synthesis

1 引 言

航姿参考系统 (attitude and heading reference systems, AHRS) 是一种主要采用惯性传感器以数据融合和算法精确测量空间姿态的传感系统, 其一般由相互正交的三轴陀螺仪、三轴加速度计以及三轴磁强计组成, 通过算法估算出捷联物体在重力场方向以及地磁场水平分量方向构成的坐标系下的三维姿态^[1-4]。其广泛应用于航空航天^[5]、机器人^[6-7]以及生物运动分析^[8]。

测量角速度的陀螺是 AHRS 的主要部件之一, 传统的机械陀螺、激光陀螺等体积较大, 功耗较高, 不利于姿态测量成本降低和机械结构安装。随着近年来 MEMS 技术的发展, 由 MEMS 陀螺和加速度计、磁强计构成惯性导航

系统由于其体积小易于安装, 价格低廉等优势得到广泛关注。

然而 MEMS 传感器普遍存在精度较低, 易受外界干扰等问题, 无法通过简单的计算得到姿态角的准确估计。例如 MEMS 陀螺的温度漂移较严重, 当系统处于稳态时, 随着误差累计, 将很快偏离被测对象的实际姿态角, 致使测量系统失效, 因此仅能利用陀螺较优的动态性能, 在系统具有较大的角速度时, 给出较为准确的姿态角估计; 另外, 三轴加速度计对重力场的测量则能够在稳态时给出较为准确的估计结果, 但在被测对象运动时, 则会受到附加平动或转动加速度的干扰, 出现较大的测量偏差。同理, 三轴磁场计在测量地磁场的过程中易受周边环境硬磁或软磁干扰而无法独立给出姿态测量结果。因此, 需要结合

收稿日期: 2014-06

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(5175288)、国家自然科学基金(50805082)资助项目

MEMS传感器的优势,发挥加速度计及磁强计在稳态条件下的姿态角测量,以及陀螺在动态条件下的姿态角测量,并对结果进行融合,方能给出较为精确的空间三维姿态转角。同时,算法在保持输出精度的条件下,应具有较低的算法代价,满足低功耗微处理器的计算能力,实现和MEMS传感器体积和重量的匹配。因此,传感信息滤波和融合算法是MEMS器件构成的AHRS系统的关键环节。

现有的滤波融合算法主要分为3类:线性融合算法、Kalman滤波器和互补滤波器^[9]。以发挥不同传感元件特性为目的,将加速度计的姿态角测量结果通过低通滤波器,而将陀螺的角速度积分结果通过高通滤波器,从而实现传感器融合^[10];为简化传感融合,依据陀螺的角速度的不同区间,选择陀螺和加速度计的不同权重系数,从而实现了简化的姿态估计算法。然而该类方法以启发经验为主导,缺乏传感性能提升的理论支撑,因此输出精度难以保证。

Kalman滤波器是AHRS姿态估计算法的主要方法,大量研究及商业产品均以Kalman滤波器及其变种如EKF滤波器、UKF滤波器等实现姿态估计^[11]。尽管Kalman滤波器具有通用性,但算法实现较为复杂,不利于在计算能力有限的微处理器上实现,针对AHRS非线性系统,EKF或UKF滤波器的线性化和参数化过程均存在较大的误差^[12]。

针对Kalman滤波器用于姿态解算的诸多缺陷,Bachman^[13]和mahony^[14]分别提出补偿滤波器,以加速度计对重力场的测量补偿陀螺的漂移,再对补偿后的角速度进行积分得到姿态转角,成功的实现了姿态角估计,避免了Kalman滤波器的线性化过程。为减轻AHRS姿态解算计算负荷,并引入磁场传感器对方向的矫正^[12],并提出了基于最速下降法的解算算法,将算法的调节参数降低为一个,进而降低了调试难度,并能够在8位单片机上实现姿态解算,同时证实了比Kalman滤波器更高的精度。

尽管^[12]引入了磁强计,然而算法需要对地磁场精确标定,需同时获得地磁场的水平和竖直分量,因而对环境的适应性有限。本文在^[14]中的IMU的补偿滤波器基础上拓展,避免借助GPS给出偏航姿态,引入磁场传感器,从而实现AHRS的三维完整姿态估计。

2 互补滤波器算法描述

如图1所示,世界坐标系 $x_e-y_e-z_e$ 的 z 轴方向与 g 的正方向一致, g 是重力加速度。 E 是地磁场在 xy 平面上的分量,且 x 轴方向与 E 的方向一致。而 $x_b-y_b-z_b$ 是传感器固连坐标系,陀螺、加速度计、磁强计的测量结果均基于该固连坐标系。测量结果可表示为固连坐标系对世界坐标系的旋转矩阵或者旋转变换四元数,本文即以获得该旋转矩(也称作方向余弦矩阵 direction cosin matrix, DCM)

为目标。

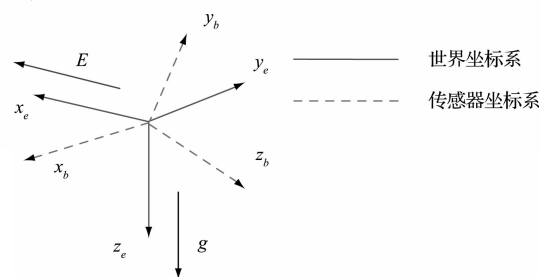


图1 以 g 和 E 定义的世界坐标系及传感器固连坐标系

由于陀螺动态性能较优,可以较精确给出姿态角,因此互补滤波器的主要工作是补偿静态条件下的陀螺漂移以及积分造成的角度测量偏差,即消除了稳态条件下陀螺角速度测量误差,由于该测量误差较小,因此在动态条件下,又不致引入加速度测量的干扰。互补滤波器的原理如图2所示,以加速度计测量结果进行差分计算,得到偏差角速度,该偏差数据经过一个PI调解器,再补偿陀螺测量数据的漂移,从而获得稳定精确的角速度,对该精确角速度积分得到旋转矩阵,进而求得RPY角(roll-pitch-yaw, 横滚-俯仰-偏航角)或欧拉角,期间积分计算会破坏旋转矩阵的正交特性,因此还需针对旋转矩阵执行正交化处理。

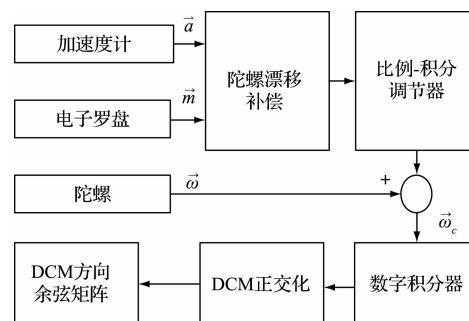


图2 AHRS的DCM矩阵补偿滤波算法

考虑到MEMS磁强计采样频率及通频带较低,无法起到及时矫正作用;同时由于地理位置不同而引起的地磁场变化较大,磁场准确标定存在困难,因此,角速度补偿主要依赖加速度计的观测值实现,即首先将AHRS简化为一个IMU,计算得到俯仰和横滚角度后,再依据磁强计计算偏航角度,从而省去了磁场标定过程及对过高的磁强计采样频率要求。

2.1 角速度积分获得姿态角

假设如图1所示传感器坐标系相对于世界坐标系的DCM为 $R(t)$,当传感器以固连坐标系下的 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 角速度转动时,在微小时间 Δt 内,则根据刚体运动学理论^[15]有:

$$R(t+\Delta t) = R(t) \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\theta_z & \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z & 1 & \Delta\theta_x \\ -\Delta\theta_y & \Delta\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$R = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & \sin\phi\sin\theta\cos\phi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\phi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\phi & \sin\phi\sin\theta\sin\phi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\phi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_x, R_y, R_z 分别表示绕世界坐标系的 x, y, z 轴旋转角度所生成的旋转矩阵, 若 $R(0)$ 及任意时刻传感器的精确角速度 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 已知, 则可以根据上述表达式求得任意时刻的空间姿态角 (ϕ, θ, ψ) 。若不考虑磁场计的条件下, 可预设 $\psi = 0$, 进而可得:

$$R_{\psi=0} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\phi & \sin\theta\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 角速度补偿值计算

如式(1)所述 $R(t)$ 推算的基本假设是 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 是准确的, 然而由 MEMS 陀螺直接测得的角速度数据将受到振动噪声和温度漂移的干扰, 不能直接用于 $R(t)$ 的积分, 而应通过加速度计或磁强计等不易受到漂移干扰的传感器补偿这些漂移。

其中加速度计测量数值经过单位化后有 $g_s = (g_x, g_y, g_z)^T$, 该单位向量表示传感器坐标系下的场方向。而世界坐标系下, 理论的场方向可表示为 $G = (G_x, G_y, G_z)^T$, 因此在传感器坐标系下, 理论上的场向量可以通过已求得的 DCM 表示为:

$$g_n = R^{-1}G = R^T G \quad (5)$$

若对理论的场方向向量 g_n 和实际测量的场方向向量 g_s 进行叉积运算, 得到的向量垂直于 2 个向量, 并且其大小正比于两向量的夹角大小, 由此在一个解算周期内, 根据方向传感器对重力场的感知所应补偿的角速度方向和大小与式(6)相关:

$$\Delta = g_n g_s = (R^T G) g_s \quad (6)$$

Δ 即是传感器坐标系下, 由加速度计计算所得的角速度补偿量。通过 PI 控制器对陀螺测量的角速度进行补偿, 进而求得补偿后的角速度向量 ω 。

$$\omega = \omega_{gyro} + \omega_{comp} \quad (7)$$

式中: ω_{gyro} 是陀螺测得的角速度, ω_{comp} 是补偿角速度, 可表示为:

$$\omega_{comp} = K_p \Delta + K_i \Delta t \sum \Delta \quad (8)$$

由此即可得到补偿的角速度信息。

2.3 DCM 矩阵的单位正交化处理

得到补偿后的角速度向量后, 根据式(1)推算得到任意时刻的姿态转角和角速度信息。然而由于数值算法误差的不断累积, 原本应为单位正交阵的 DCM 矩阵的单位

$$\Delta\theta_x = \omega_x \Delta t$$

$$\Delta\theta_y = \omega_y \Delta t$$

$$\Delta\theta_z = \omega_z \Delta t$$

(2)

DCM 方向余弦矩阵表示为:

正交特性不再满足, 故每运算周期都对 DCM 进行正交化操作。设 r_1, r_2, r_3 分别是 R 的第 1, 2, 3 列, $\{r_1, r_2, r_3\}$ 应为单位正交向量组, 即 r_1, r_2 应满足:

$$e = r_1 \cdot r_2 = r_1^T r_2 = \|r_1\| \|r_2\| \cos\phi \approx \cos\phi = 0 \quad (9)$$

当向量间不再正交后 $e \neq 0$ 。因此 e 描述了 r_1 和 r_2 的夹角误差大小, 可采用式(10)实现向量的正交化:

$$\begin{aligned} r_{1orth} &= r_1 - \frac{e}{2} r_2 \\ r_{2orth} &= r_2 - \frac{e}{2} r_1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$r_{3orth} = r_{1orth} \times r_{2orth}$$

即得到相互正交的非单位向量, 再对该 3 个向量分别进行单位化运算, 为简化运算负担, 平方和相除的单位化过程可以使用 Tylor 级数展开并转化为简单乘和加运算:

$$r_{inorm} = \frac{1}{2} (3 - r_{1orth} \cdot r_{1orth}) r_{1orth} \quad (11)$$

式中: $i=1, 2, 3$, 进而得到新的 DCM 矩阵 $[r_{1norm} \ r_{2norm} \ r_{3norm}]$, 从而完成 DCM 的正交化处理。

2.4 偏航角的求解

基于三轴陀螺和三轴加速度计构成的 IMU 可求得 (ϕ, θ) , 从而得到式(4)的 DCM 矩阵, 将三轴磁强计测量数据 $(m_x, m_y, m_z)^T$, 经式(4)变换后, 可得世界坐标系下的磁场方向:

$$(M_x, M_y, M_z)^T = R_{\psi=0} \cdot (m_x, m_y, m_z)^T \quad (12)$$

由于考虑到地磁场在竖直方向也存在分量的状况, 仅取水平方向的分量, 从而求得磁场与传感器 x 轴方向的夹角, 从而求得 ϕ 。

$$\phi = \arctan2(M_x, M_y) \quad (13)$$

3 AHRS 实验系统

为减小传感器的整体尺寸, 采用 cortex-M3 核心的处理器 LPC1768 通过 I²C 总线采集九轴传感器输出, 实验系统外形如图 3 所示, 传感器参数如表 1 所示。

实验过程中采样频率为 100 Hz, 姿态解算与数据融合的频率亦为 100 Hz。而根据磁强计更新偏航角的频率为 20 Hz。

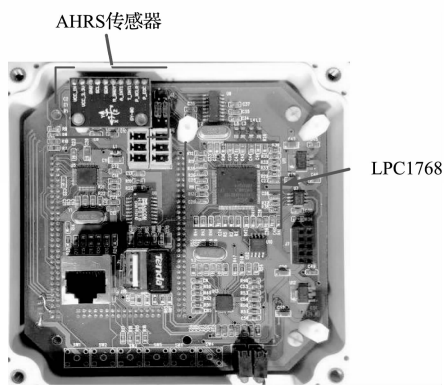


图3 AHRS实验系统外形

表1 AHRS组成传感器参数

传感器名称及型号	量程	精确度	频带宽度/Hz
加速度计/ ADXL345	±16 g	4 mg/LSB	1 600
陀螺/ L3G4200D	±500 dps	17.5 mdps/LSB	50
磁强计/ HMC5883	±2.5 Ga	1.51 mGa/LSB	30

AHRS融合算法的流程图如图4所示。

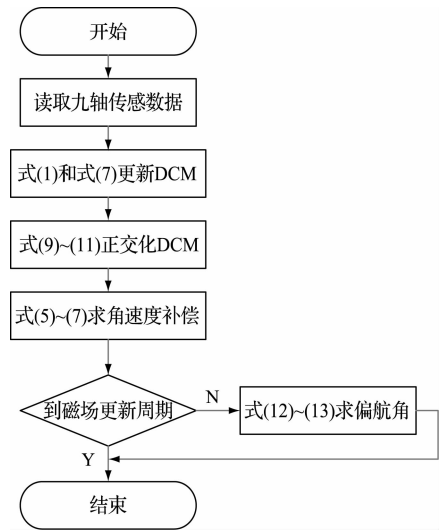
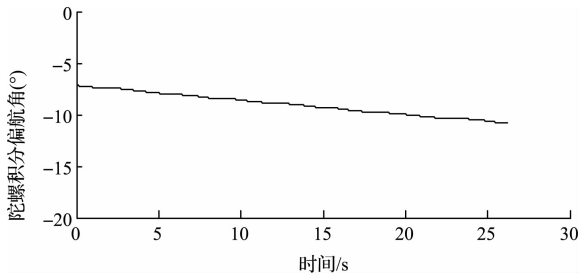
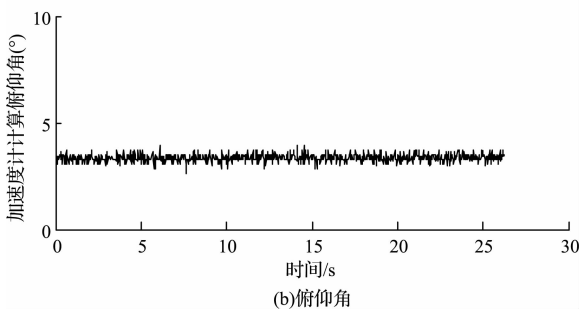
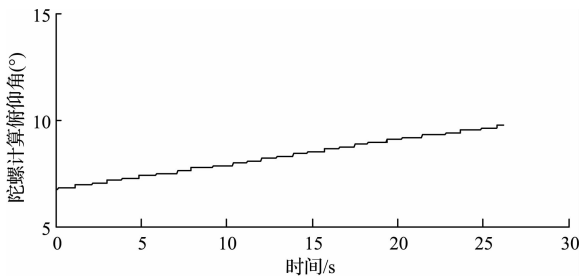
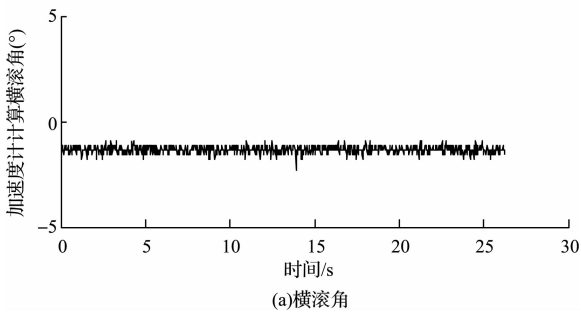
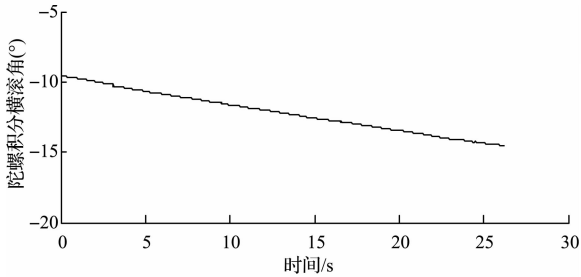


图4 AHRS融合算法流程

4 实验结果

首先在不具备 AHRS 滤波算法,传感器处于静止条件下,由陀螺积分直接求得姿态角,测得的绕图 1 所示的的横滚、俯仰、偏航 3 个角度结果如图 5 所示。图中还会

制出由加速度计直接求解的姿态角,可见在传感器并未移动的条件下,陀螺的积分的累积误差增长,并迅速偏离实际角度,进而无法完成姿态角的测量。



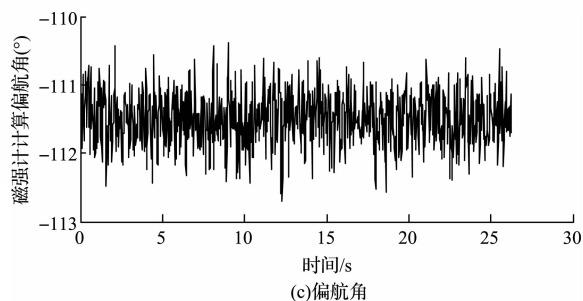


图5 传感器静止状态下的陀螺积分和加速度计及磁强计计算结果对比结果

如图6所示是传感器仅具有平动的条件下,AHRS滤波算法输出和仅由加速度计和磁强计计算得出的姿态角,可见AHRS滤波算法能够有效滤除平动加速度所引起的错误姿态角观测结果。

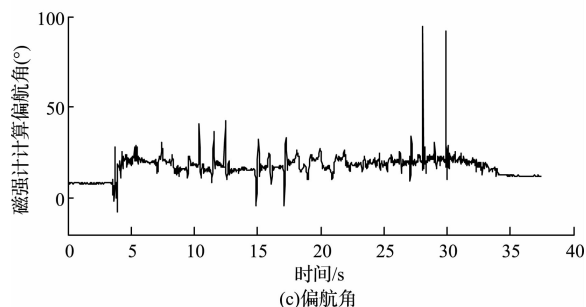
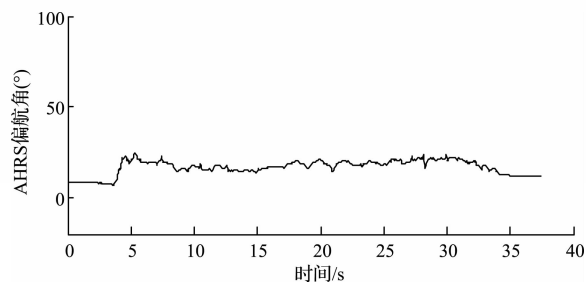
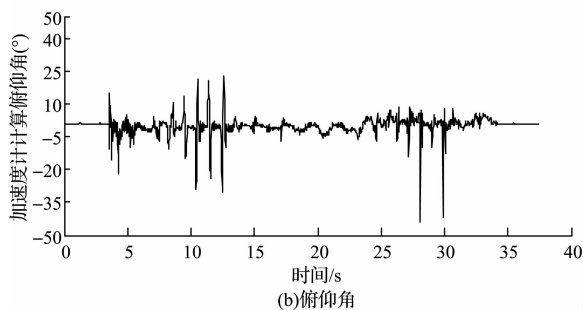
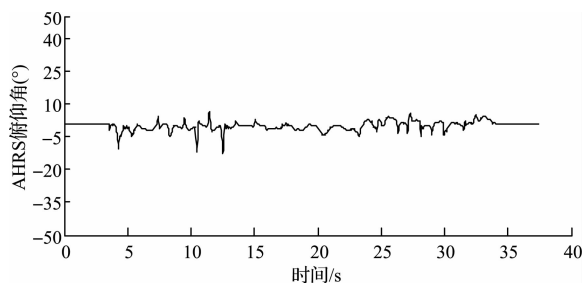
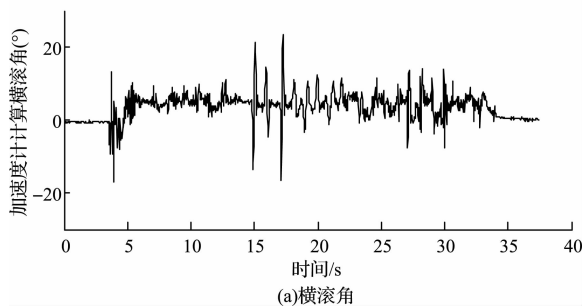
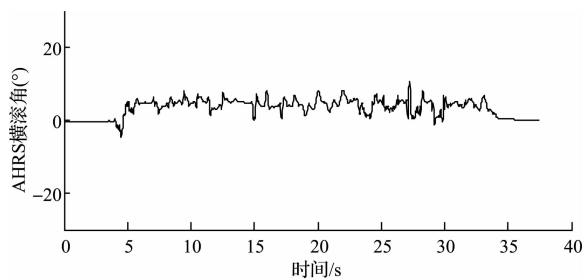
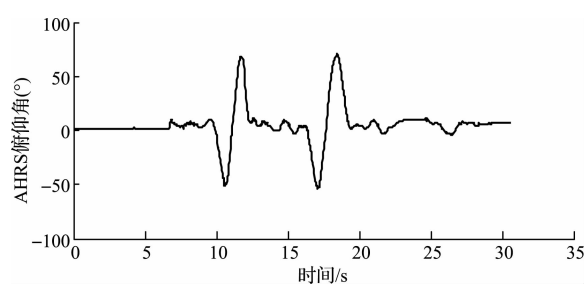
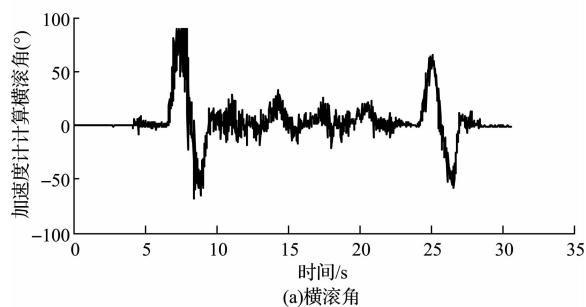
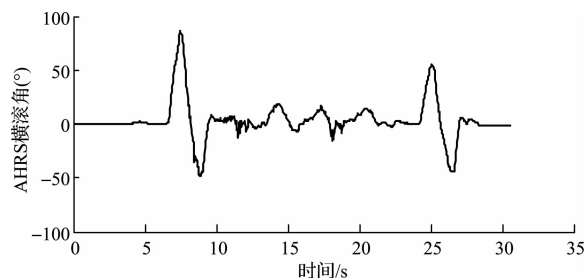


图6 传感器平动条件下的陀螺积分和加速度计及磁强计计算结果对比结果

此后在传感器具有3个方向变化时,由AHRS输出和加速度计、磁强计执行几何计算得到的结果如图7所示,可见在AHRS滤波算法能够有效滤除加速度计及磁强计的干扰,准确给出姿态测量角度。



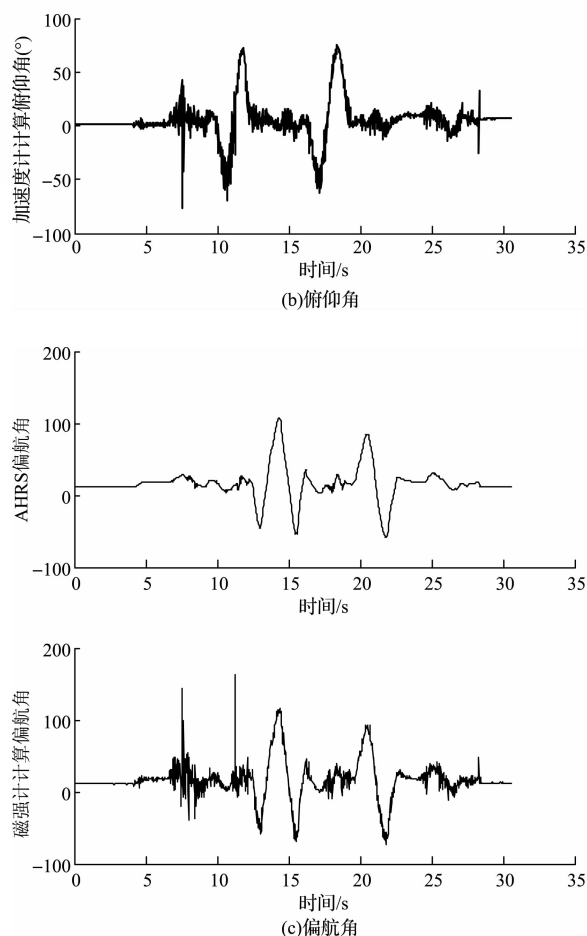


图7 传感器选装条件下的陀螺积分和加速度计及磁强计计算结果对比结果

5 结 论

为了考虑引入三轴磁场传感器的 AHRS 航姿参考系统的全局姿态求解,在首先采用互补滤波器求解三轴陀螺和三轴加速度计所构成的 IMU 基础上,将 DCM 矩阵应用于三轴磁强计的测量,进而求解地磁场在全局坐标系下的水平分量,从而实现了完整的姿态估计。在有限计算资源的单片机系统上实现算法,实验结果表明,算法能够有效补偿陀螺漂移,并能够准确计算获得偏航方向的估计。

参 考 文 献

- [1] 李翔,李智. 航姿参考系统三轴磁强计校正的点积不变法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1813-1818.
- [2] 张利,秦海春,王文彬,等. 超声波与航迹推算融合的智能轮椅定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 62-68.
- [3] 秦国庆,赖际舟,陈狙,等. 捷联航姿系统加速度计振动噪声平滑技术[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 87-91.
- [4] 周胜明,徐庆九,曲东才. 航向姿态系统综合检测仪[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(2): 20-22.

- [5] EUSTON M, COOTE P, MAHONY R, et al. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV with a low-cost imu[C]. 6th International Conference on Field and Service Robotics, 2007: 1-6.
- [6] SEN GUPTA G, BARLOW P, SANJAY D. Review of sensors and sensor integration for the control of a humanoid robot[C]. IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC), 2011: 1-5.
- [7] YI S J, ZHANG B T, HONG D, et al. Learning full body push recovery control for humanoid robots[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 2047-2052.
- [8] KIM S K, HONG S, KIM D. A walking motion imitation framework of a humanoid robot by human walking recognition from IMU motion data[C]. 2009 IEEE International Conference on Humanoid Robots, 2009.
- [9] 刘辉邦,褚金奎,支炜,等. 基于 STM32 的无人机姿态测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8): 108-110.
- [10] HYDE R A, KETTERINGHAM L P, NEILD S A, et al. Estimation of upper-limb orientation based on accelerometer and gyroscope measurements[J]. IEEE transaction on Biomedical Engineering, 2008, 55(2): 746-754.
- [11] 丁君,赵忠华. AHRS 航姿解算中的两种滤波方法的比较研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 60-65.
- [12] SEBASTIAN O H, MADGWICK ANDREW J L. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm[C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2011: 1-7.
- [13] BACHMANN E R, MCGHEE R B, YUN X P, et al. Inertial and magnetic posture tracking for inserting humans into networked virtual environments [C]. Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2001: 9-16.
- [14] MAHONY R, HAMEL T, PFLIMLIN J M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2008, 53(5): 1203-1218.
- [15] CRAIG J J. Introduction to robotics mechanics and control[M]. Pearson Education International, 2005.

作 者 简 介

杜杉杉, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程。