

文章编号: 2095-4980(2014)02-0183-07

基于陀螺仪和加速度计的帆船运动姿态测量

苏菲¹, 尚德重¹, 汪建波², 刘小马², 朱谦¹

(1.复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433; 2.上海市水上运动中心, 上海 201713)

摘要: 针对帆船运动姿态监测的需求, 设计并实现了一个基于微机电系统(MEMS)陀螺仪和加速度传感器的运动姿态实时测量系统。多传感器的数据融合, 实现了姿态测量高准确度的要求。应用陀螺仪传感器监测船体姿态角度可避免因船体变速运动而导致的测量偏差; 利用加速度传感器测量数据可有效消除陀螺仪的漂移误差和累积计算误差; 采用加权时变的卡尔曼滤波作为数据融合方法有效地提高了姿态角度测量的精确度和稳定性。该方法已成功应用于 Laser 帆船运动姿态实时测量系统中, 测量精确度达到了 $\pm 1^\circ$ 。

关键词: 姿态测量; 陀螺仪; 加速度传感器; 动态角度测量; 误差补偿; 卡尔曼滤波; 最优估计

中图分类号: TN301; TP274.2 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201402.0183

A measurement method of sailing attitude based on MEMS gyroscope and accelerometer

SU Fei¹, SHANG De-zhong¹, WANG Jian-bo², LIU Xiao-ma², ZHU Qian¹

(1.School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2.Shanghai Aquatic Sports Center, Shanghai 201713, China)

Abstract: To meet the requirements for monitoring the sailing attitude, a real-time sailing attitude measurement system is designed and implemented based on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) gyroscope and accelerometer. Multi-sensor data fusion achieves the high accuracy of attitude measurement. The application of gyroscope can avoid measurement deviations caused by sailing variable motions. The utilization of accelerometer can effectively eliminate gyro drift errors and cumulative calculation errors. Time-variant Kalman filter, as the method of data fusion, can improve the attitude measurement precision and stability greatly. The measurement method has been successfully applied to the real-time attitude measurement system of Laser Sailing with a precision up to $\pm 1^\circ$.

Key words: attitude measurement; gyro; accelerometer; dynamic attitude measurement; error compensation; Kalman filter; optimal estimation

帆船运动是利用风和水流对船帆和船体的作用力推动船体前进的, 在行进过程中调整和控制好船体的姿态尤为重要, 船体的左右倾斜或前后俯仰角度过大会很大程度地影响帆船的运动效率, 从而影响帆船的前进速度。以往帆船运动训练中, 教练员只能凭借目测来判断某个运动员技术动作的规范性和船体的平衡性, 训练和指导难度大, 缺乏科学的数据依据。因此在帆船比赛或训练过程中对船体姿态进行准确的实时监测与警示, 能帮助运动员快速提高竞技水平, 还能够提高训练指导的科学化程度, 促进我国帆船运动水平的提高。帆船运动姿态实时测量系统在水上运动项目中有着良好的应用前景。

近年来, 随着MEMS技术的发展, 加速度和陀螺仪传感器以其高性能、小尺寸、低能耗、重量轻、可靠性高等优点, 在低成本惯性姿态导航系统中获得了广泛的应用^[1-4]。在惯性状态中, 一般采用三轴加速度传感器, 以地球引力方向为基准, 根据重力加速度在3个感应轴上的分量大小来计算物体姿态的倾斜角度。惯性状态下, 加速度传感器测量非常准确。但是当物体处在变速运动状态时, 加速度传感器给出的是其运动加速度和重力加速度合成的叠加值, 此时姿态的倾斜角度会因为物体的运动加速度而无法准确测量。采用三轴陀螺仪传感器, 通过对

其3个感应轴上给出的瞬时角速度积分来计算物体相对于初始状态的运动偏转角度。由于陀螺仪传感器本身存在常值漂移误差,且易受噪声、振动及温度变化等因素干扰,使其产生随机漂移误差。随着时间的推移,漂移误差逐渐累积变大,导致所测得的偏转角度存在较大的累积计算误差,因此基于单一的陀螺仪传感器进行测量无法保证长时间姿态测量角度的准确性。文献[5]采用的加权平均法是一种简单、直观的多传感器测量融合方法,它将加速度传感器和陀螺仪传感器的测量数据进行加权平均,可应用于动态环境,但测量精确度不高^[6]。文献[6]建立了加速度和陀螺仪的误差数据模型,采用卡尔曼滤波方法预测飞行器的飞行姿态,能良好抑制噪声对测量结果的影响,但不能适应运动状态快速变化的场景。

本文构造了一个基于MEMS陀螺仪和加速度传感器的帆船运动姿态角度测量系统。以陀螺仪传感器和加速度传感器各自独立测得的姿态倾角为观测数据,采用时变的卡尔曼滤波方法,对2个测量数据进行加权融合,并将其最优估计数据作为系统姿态倾角测量输出。本文提出一种以测量系统加速度“合成矢量模”为基础的船体非惯性运动判决估计算子,采用动态加权和时变参数的卡尔曼滤波数据融合方法,充分利用了陀螺仪不易受运动加速度影响,在短时间内测量准确性高的特点,同时也发挥了加速度计在惯性状态下利用重力测量姿态倾角无累积误差的优点。利用卡尔曼滤波方法,不仅可以有效地消除陀螺仪的随机噪声误差,还能有效消除传感器受机械冲击(颠簸)及系统随机噪声干扰引起的误差,从而得到平滑的倾角输出曲线和最优的船体姿态估计。

1 倾角测量的系统设计

帆船运动姿态倾角测量警示仪(以下简称倾角警示仪)内部组成结构如图1所示。

倾角警示仪采用意法半导体公司(ST Microelectronics)的三轴加速度传感器(LSM303DLH)和三轴陀螺仪传感器(L3G4200D)作为姿态测量元件,利用C8051F930微处理器进行数据处理和倾角警示控制,内置无线模块可用于实时发送数据。倾角警示仪实物外形如图2(a)所示,当船体向左或向右发生侧倾时,显示表盘上的左右两侧发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)指示灯会根据倾斜角度的大小被逐一点亮。同理,表盘上下方向的LED用于指示俯仰角度的大小。图2(b)为倾角警示仪在Laser帆船上的实际安装位置,其基座被固定在船头区域。系统设计要求最大允许测量误差为 $\pm 1^\circ$ 。

倾角警示仪利用加速度传感器和陀螺仪传感器分别独立测量出船体的姿态角度 ϕ_a 和 ϕ_g ,然后将 ϕ_a 和 ϕ_g 输入一个参数

时变的卡尔曼滤波器进行数据融合,从而得到最优姿态角度估计 ϕ_o 。其角度测量的计算模型如图3所示。

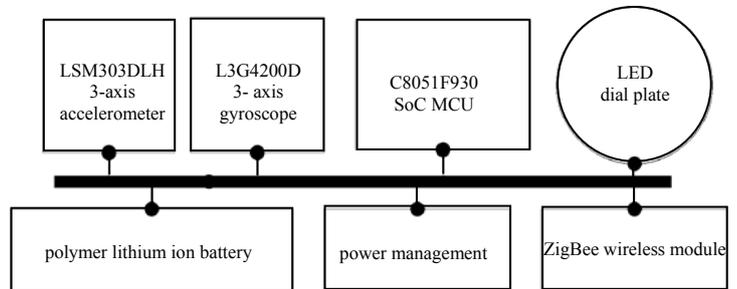


Fig.1 System design of this angle warning instrument
图1 倾角警示仪结构原理图

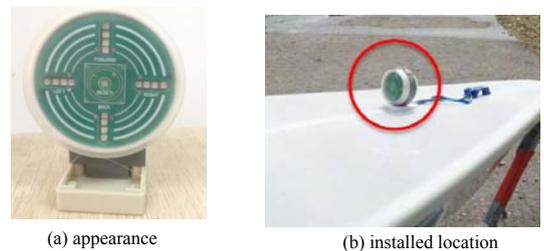


Fig.2 Appearance and installed location of this instrument
图2 倾角仪的外观设计与安装位置

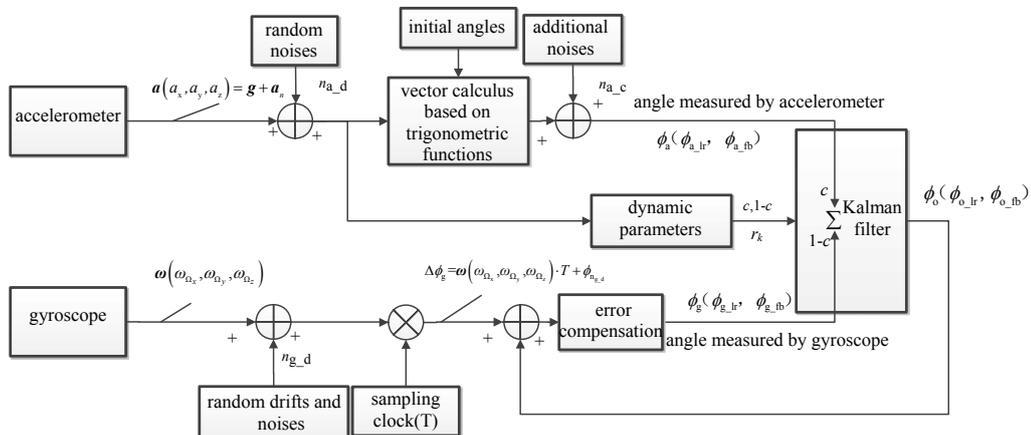


Fig.3 Computational model of angle measurement
图3 角度测量的计算模型

当物体处于惯性运动状态,即物体的运动加速度 \mathbf{a}_n 为0,通过加速度计测量的重力加速度 \mathbf{g} 在其各个感应轴的分量 (a_x, a_y, a_z) 可确定三轴与地球引力方向的相对角度,再和初始状态下三轴和地球引力方向的相对位置进行比较,利用三角函数间的关系即可准确地推算出船体的左右倾角 $\phi_{a_{lr}}$ 和前后倾角 $\phi_{a_{fb}}$ 。当物体处于变速运动状态时,即 $\mathbf{a}_n \neq 0$,加速度计测量到的值为重力加速度和运动加速度的矢量和 $\mathbf{g} + \mathbf{a}_n$,其合成矢量并不一定指向地球引力(重垂)方向,从而导致利用加速度计测量的姿态角度存在偏差。如图4所示,倾角警示仪保持初始校正姿态,即前后倾角和左右倾角为 0° ,当有水平向前的外力作用时,随着其运动加速度 \mathbf{a}_n 的增加,由加速度计测量的前后倾角和左右倾角的测量误差逐渐增加且大大超出了

误差允许范围。记由运动加速度引起的测量误差 n_{a_c} 为非惯性运动附加测量噪声。此测量噪声是加速度计测量姿态角度的最主要误差来源,测量的随机噪声 n_{a_d} 可以忽略不计。采用加速度计测量的合成矢量模 $|\mathbf{a}|$ 和重力加速度常量 g_c 的差值对 n_{a_c} 进行估计,定义 $\Delta a = |\mathbf{a} - g_c| / g_c$ 。 Δa 为加速度计非惯性运动的估计算子,并据此来动态调整由加速度计测得的角度 ϕ_a 在数据融合中的影响因子。随着测量噪声 n_{a_c} 的增大, ϕ_a 在卡尔曼滤波观测方程中的权值 c 就越小,直至 $c=0$,完全忽略加速度计测量数据对最优姿态角度估计的影响。

采用陀螺仪传感器通过对其感应轴测量的角速度进行时间积分,即可计算出其感应坐标轴相对于初始坐标位置的旋转角度,即船体姿态偏离其初始状态的三维角度,进而能够得到船体的左右倾角 $\phi_{g_{lr}}$ 和前后倾角 $\phi_{g_{fb}}$ 。记陀螺仪传感器的累积测量噪声为 n_{g_d} ,随着累积次数的增加,其逐渐成为影响陀螺仪测量准确性的最主要因素。采用有加速度计参与的卡尔曼滤波数据融合方法,用滤波得到的最优姿态角度估计 ϕ_0 作为陀螺仪测量的先验角度,进行实时校正和补偿,充分减小由 n_{g_d} 带来的测量误差。但当加速度测量的姿态角度 ϕ_a 在卡尔曼滤波数据融合中的权值 c 连续为0时,利用加速度计参与测量来校正和补偿陀螺仪累积测量误差的作用也就消失了,而此时系统测量噪声 v_k 会逐渐增大。因此必须相应增大卡尔曼滤波观测数据的噪声协方差估计值 r_k ,从而减小卡尔曼滤波对陀螺仪的测量值的信任度,来抑制 n_{g_d} 对最优姿态角度 ϕ_0 的影响。

2 卡尔曼滤波的数据融合

这里以陀螺仪测量角度 ϕ_g 、加速度计测量角度 ϕ_a 以及 Δt 内陀螺仪测量的角度变化 $\Delta\phi_g$ 为系统的状态向量,得到相应的状态方程和观测方程:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \phi_g(k|k-1) \\ \phi_a(k|k-1) \\ \Delta\phi_g(k|k-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_g(k-1|k-1) \\ \phi_a(k-1|k-1) \\ \Delta\phi_g(k-1|k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ v_a \\ v_g \end{pmatrix} \\ Y(k) = (1-c \quad c \quad 0) \begin{pmatrix} \phi_g(k|k) \\ \phi_a(k|k) \\ \Delta\phi_g(k|k) \end{pmatrix} + v_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_a 为加速度计的过程噪声,其协方差为 q_a ; v_g 为陀螺仪的过程噪声,其协方差为 q_g ; $Y(k)$ 为系统观测值,由陀螺仪测量角度和加速度计测量角度按权值 $1-c$ 和 c 相加合成; v_k 为系统测量噪声,其协方差为 r_k 。

定义 Δa 为非惯性运动的估计算子: $\Delta a = |\mathbf{a} - g_c| / g_c$,其中 \mathbf{a} 为加速度实时测量的合成矢量; g_c 为重力加速

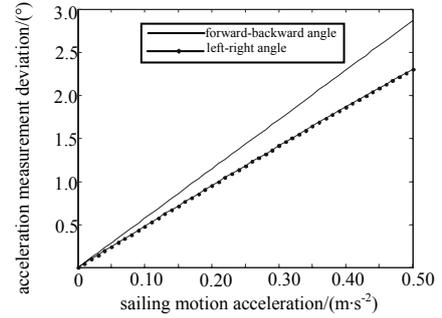


Fig.4 Simulation relation curves by Matlab between forward acceleration values and acceleration measurement deviations in the initial status

图4 初始状态下向前的运动加速度值和加速度测量误差的 Matlab 仿真关系曲线

度常量。假定 Δa 和非惯性运动附加测量噪声 n_{a_c} 具有正相关关系。当 Δa 越小, n_{a_c} 越小, 则加速度计测量角度可信性越高, c 值越大; 当 Δa 越大, n_{a_c} 越大, 则加速度计测量角度可信性越低, c 值越小。具体计算公式为:

$$c = \begin{cases} 0.7 & \Delta a < 0.005 \\ 1 / (\Delta a \cdot 240)^2 & 0.005 \leq \Delta a \leq 0.03 \\ 0 & \Delta a > 0.03 \end{cases} \quad (2)$$

根据图4可知, 小量的物体运动加速度能够导致加速度测量角度较大的计算误差。当 Δa 小于0.005, 除去加速度计测量的随机噪声影响, 判定此时船体处于惯性状态, 其运动加速度为0, 加速度的非惯性运动附加测量噪声 n_{a_c} 忽略不计, 加速度计测量角度的权值 c 最大。由于 Δa 采样和测量的随机噪声的客观存在, 单次采样不足以证明加速度计测量角度完全可信, 因此设计 c_{\max} 等于0.7, 而不是1。如果连续采样的 Δa 都小于0.005, 多次加权后最优姿态估计将趋近于加速度计测量角度, 从而达到加速度计对陀螺仪角度测量进行校正的效果。当 Δa 大于0.03时, 加速度测量角度的计算误差已大于 1° , 超出了倾角警示仪的最大允许测量误差, 加速度计测量角度完全不可信, 因此令 $c=0$ 。当 Δa 在 $[0.005, 0.03]$ 区间内, 设计使 c 的值反比于 Δa 的2次幂, 即随 $(\Delta a)^2$ 单调递减, 随着 Δa 的增大, 加速度计测量角度对最优姿态估计的影响因子快速衰减。实验表明 c 值按此曲线衰减, 最优姿态估计输出的准确性和稳定性等都较优。

系统的协方差方程和卡尔曼增益方程为:

$$\begin{cases} P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q \\ K(k) = P(k|k-1)H^T(HP(k|k-1)H^T + r_k)^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中: } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_a & 0 \\ 0 & 0 & q_g \end{pmatrix}; \quad H = (a \quad b \quad 0)。$$

假定 q_a, q_g 值不随系统状态而变化, 其与 r_k 的数值大小与卡尔曼滤波器对传感器测量数据的信任程度有关。当 r_k 为常值, 则认为观测数据为平稳随机过程。事实上由于权值 $(c, 1-c)$ 的动态调整, 系统的测量噪声是一个非平稳随机过程, r_k 具有时变性。当 $c=0$ 时, 加速度计测量角度对最优姿态角度估计的影响因子为零, 陀螺仪的累积积分误差没有被有效抑制, 随着累积次数的增加, 陀螺仪的累积噪声不断增大, 则 r_k 也逐渐增大; 当 $c \neq 0$ 时, 加速度计测量角度对最优姿态角度估计存在影响因子, 陀螺仪的测量噪声被加速度计有效抑制, 认为此时系统测量噪声仅为加速度计的测量噪声。具体可表示为:

$$\begin{cases} r_k = r_a & c \neq 0 \\ r_k = r_{k-1} + \Delta r & c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_a 为在 $\Delta a \leq 0.03$ 的情况下加速度计测量噪声的协方差; Δr 为陀螺仪累积一次的测量噪声协方差增量。 r_a 和 Δr 可以通过实验预先计算而获得。

根据式(1)、式(2)、式(3)和式(4)的计算结果, 然后按照式(5)更新系统的状态变量和协方差矩阵, 再重复进行后验估计, 周而复始, 卡尔曼增益迅速收敛, 从而找到加速度计和陀螺仪传感器最优的测量角度 $X(k|k)^{[7-9]}$ 。

$$\begin{cases} X(k|k) = X(k|k-1) + K(k) \cdot (Y(k) - HX(k|k-1)) \\ P(k|k) = (I - K(k)H)P(k|k-1) \end{cases} \quad (5)$$

最优姿态角度估计为 $\begin{cases} \phi_{o_{lr}} = (1-c) \cdot \phi_{g_{lr}}(k|k) + c \cdot \phi_{a_{lr}}(k|k) \\ \phi_{o_{fb}} = (1-c) \cdot \phi_{g_{fb}}(k|k) + c \cdot \phi_{a_{fb}}(k|k) \end{cases}$, $\phi_{o_{lr}}, \phi_{o_{fb}}$ 分别为系统观测的最优左右倾角和前后

俯仰角度。卡尔曼滤波器的初始化参数见表1。

表 1 卡尔曼滤波器的初始化参数
Table1 Initial parameters of the Kalman filter

	Q	R	$X[0]$	$P(0)$
value	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.02 \end{pmatrix}$	0.005	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

图 5 为实测的卡尔曼滤波前后的姿态测量数据比较,数据采样周期为 40 ms。手持倾角警示仪在桌面任意晃动(包括与桌面轻微碰撞),随意调整倾角警示仪的姿态,并同时利用内置的无线传输模块(ZigBee)实时将卡尔曼滤波前后的测量姿态输出,并运用 Matlab 进行数据分析。从图 5 可以看出,经过卡尔曼滤波后测量的姿态曲线比仅使用加权而未使用卡尔曼滤波方法测量的姿态曲线更加平滑,更加符合物体的运动规律。

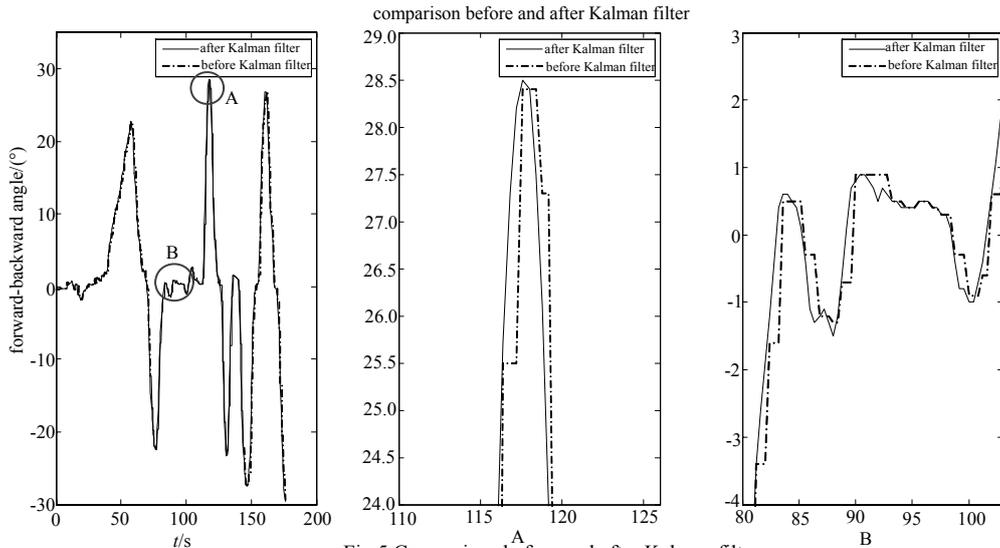


Fig.5 Comparison before and after Kalman filter
图 5 卡尔曼滤波前后的比较

3 算法验证与测量实验

3.1 重力摆验证实验

为了验证误差补偿以及数据融合的有效性,在此构建了一个重力摆验证实验装置来模拟船体在海面由于水浪作用的上抛和下落过程,如图 4 所示。根据运动力学原理,当重力摆摆长、初始摆角、阻尼系数一定时,其任意时间的运动学状态可以完全确定。将倾角警示仪如图 6(a)或 6(b)固定在重力摆上,当重力摆摆动时,倾角警示仪测量的左右倾角或前后倾角即为重力摆的摆动角度,应符合重力摆的运动规律。重力摆验证的实验条件参数见表 2。

图 7 为倾角警示仪按图 6(a)固定在重力摆上测量的左右侧倾角的输出值曲线,图 8 为倾角警示仪按图 6(b)固定在重力摆上测量前后俯仰角的输出值曲线。两者的数据都是通过内置无线传输模块(ZigBee)实时输出,采样周期均为 40 ms。

由于重力摆本身的局限和释放时操作因素的加入,重力摆并不是理想地在单一方向上摆动,摆动转轴摩擦力大小也有时变性,从而导致阻尼系数亦有时变。所以在重力摆释放之初,测得的倾角衰减包络稍不明显,并有一定的抖动。随着重力摆运行的稳定,系统测得的倾角衰减包络明显,测量值趋近于真实值,与重力摆运动理论模型趋近。

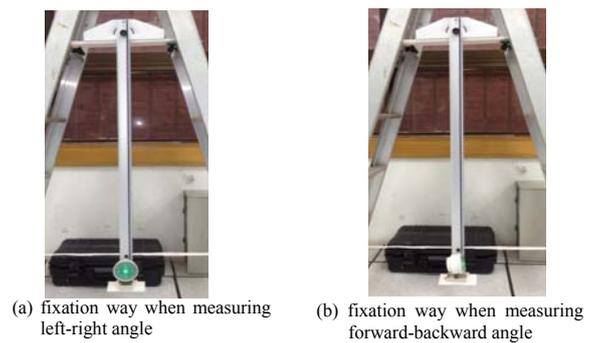


Fig.6 Two fixation styles of this instrument in the gravity pendulum system

图 6 倾角警示仪在重力摆验证系统的 2 种固定方式

表 2 重力摆的实验条件参数
Table2 Parameters of the experimental gravity pendulum

	length/cm	gravity acceleration/(m·s ⁻²)	damping coefficient
value	95	≈9.8	≈0.018

为了定量分析倾角警示仪的测量精确度，在重力摆转轴处安装一个线性度优于 0.1%的滑动电阻式角度传感器，由 Agilent MSO-X2012A 示波器采集和存储重力摆转轴处测量电桥两端的电压波形，见图 9，通过标定输出电压值和摆动角度之间的关系，获得重力摆摆动过程的倾角变化曲线，并以此作为定量分析的参照依据。通过对比倾角警示仪采集的角度数据，即可检验倾角警示仪的测量真实性和测量精确度。图 10 为重力摆转轴角度传感器和倾角警示仪同步采集的对比数据曲线，从图 10 可以看出 2 条曲线基本吻合，本倾角警示仪的最大测量误差为 $\pm 1^\circ$ ，测量误差在允许范围之内。

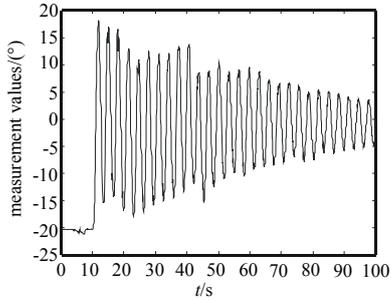


Fig.7 Left-right angle output curves
图 7 左右倾角的输出值曲线

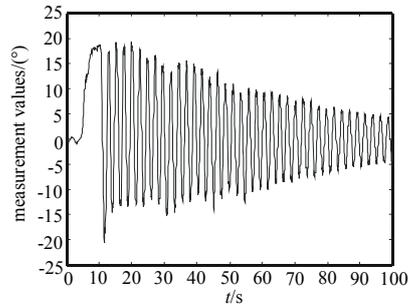


Fig.8 Forward-backward angle output curves
图 8 前后倾角的输出值曲线

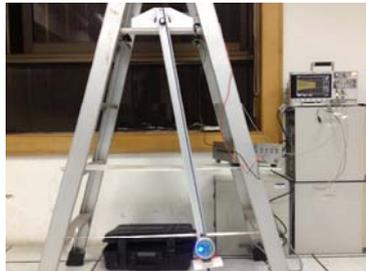


Fig.9 Data collecting scene of the inclinometer
图 9 角度传感器数据采集场景

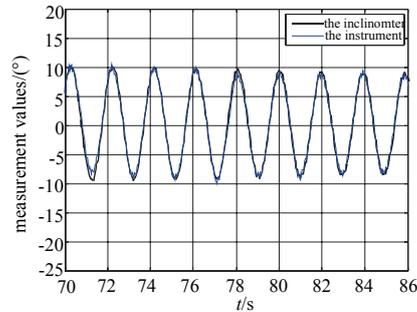


Fig.10 Comparison of measured values from the inclinometer and this instrument respectively
图 10 角度传感器和倾角警示仪测量值对比

3.2 水平旋转测试

为了验证船体保持任意倾角情况下其航向(水平)旋转应该对测量输出无影响，将倾角警示仪以任意姿态固定在水平玻璃转盘上，如图 11。此时倾角警示仪左边 3 个 LED 灯被点亮，即左右侧倾角为 $[-20,-15]$ ；倾角警示仪上方一个 LED 灯被点亮，即前后俯仰角为 $[5,10]$ 。在玻璃转盘水平转动情况下，倾角警示仪的输出值应基本保持不变，见图 12。



Fig.11 Attitude of this instrument fixed on a horizontal plate
图 11 水平转盘上倾角警示仪的姿态

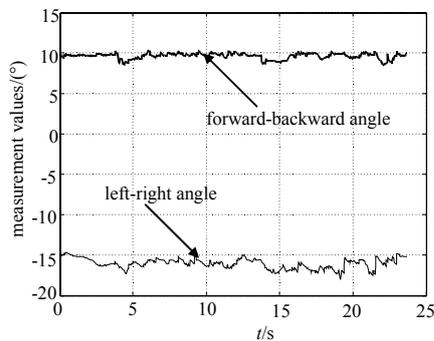


Fig.12 Left-right angle output curve and forward-backward angle output curve when turning horizontally
图 12 水平转动时左右和前后倾角数值变化曲线

从图 12 可以看出，前后倾角和左右倾角值变化幅度在 $\pm 1^\circ$ ，此时的幅度变化还包括了由于桌面和玻璃转盘本身不平整引入的随机误差，总体误差在测量允许的精确度范围之内。

4 结论

本文设计并实现了一种基于加速度计和陀螺仪传感器的帆船姿态角度测量警示仪,能够即时指示和实时发送船体的姿态角度数据。该测量警示仪以三轴陀螺仪测量数据为核心,周期性将陀螺仪测量与加速度计测量所得角度通过加权时变的卡尔曼滤波进行数据融合,并对陀螺仪测量角度进行误差修正,有效地提高了帆船运动姿态测量的精度和稳定性。该方法已成功应用于 Laser 帆船运动姿态实时测量系统中。

参考文献:

- [1] 金光明,张国良,陈林鹏,等. MEMS陀螺仪静态漂移模型与滤波方法研究[J]. 传感器与微系统, 2007,26(11):48-50. (JIN Guang-ming,ZHANG Guo-liang,CHEN Lin-peng,et al. Research on filter method and model of MEMS gyro static drift[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007,26(11):48-50.)
- [2] 唐海林,程永生,苏伟. 微机械梳状陀螺仪的瞬态分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004,2(2):118-120. (TANG Hai-lin,CHENG Yong-sheng,SU Wei. Transient Analysis of a Micro Gyroscope[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2004,2(2):118-120.)
- [3] 秦勇,臧希喆,王晓宇,等. 基于MEMS惯性传感器的机器人姿态检测系统的研究[J]. 传感器技术学报, 2007,20(2):298-301. (QIN Yong,ZANG Xi-zhe,WANG Xiao-yu,et al. Research of Attitude Estimation System Using MEMS Inertial Sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(2):298-301.)
- [4] Aravind K. Basic Human Motion Tracking Using a Pair of Gyro and Accelerometer MEMS Devices[C]// IEEE 14th International Conference one-Health Networking, Applications and Services(Healthcom). Beijing:[s.n.], 2012:298-302.
- [5] 李媛媛,张立峰. 多传感器自适应加权融合算法及其应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2008(2):10-13. (LI Yuan-yuan,ZHANG Li-feng. Research of Multi-Sensors' Adaptive Weighted Algorithm. Automation and Instrumentation, 2008(2):10-13.)
- [6] 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. (FENG Zhi-yong,ZENG Han,ZHANG Li,et al. Angle Measurement Based on Gyroscope and Accelerometer Signal Fusion[J]. Journal of Southwest China Normal University:Natural Science Edition, 2011,36(4):137-141.)
- [7] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008. (QIN Yong-yuan. Theory of Kalman Filter and Integrated Navigation[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University Press, 2008.)
- [8] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009,8(11):33-34. (PENG Ding-cong. Basic Principle and Application of Kalman Filter[J]. Software Guide, 2009,8(11):33-34.)
- [9] 李文军,陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术研究[J]. 光学精密工程, 2006,14(2):279-284. (LI Wen-jun,CHEN Tao. Equivalent combined control technique based on Kalman filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2006,14(2):279-284.)

作者简介:



苏菲(1989-),女,四川省绵阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络.email:sokat1989@gmail.com.

尚德重(1989-),男,沈阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。

汪建波(1986-),男,江西省上饶市人,上海市水上运动中心科研成员,主要负责帆船项目运动技术监控与分析、比赛场地分析等。

刘小马(1966-),男,上海市人,国家级教练,上海帆船队主教练、国家帆船雷迪尔级主教练。

朱谦(1960-),男,上海市人,高级实验师,主要研究方向为数据通信与网络、无线传感器网络应用。