

基于传感器数据融合的倾斜角度测量方法研究*

史露强, 何怡刚, 罗旗舞, 何 威

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:倾斜角度的测量精度直接决定了状态控制系统的工作效果。在单一传感器测量倾斜角度的研究基础上,探讨了传感器数据融合技术用于倾斜角度测量的方法。首先分析基于加速度计和陀螺仪测量倾斜角度的原理,并研究加速度计和陀螺仪测量结果的频率特性;然后根据加速度计和陀螺仪测量结果的频率特性选定互补滤波器作为数据融合的方法;最后选定量子粒子优化群(QPSO)算法作为互补滤波器的参数寻优方法,并对比量子粒子优化群算法和粒子群优化算法的参数寻优效果。实验结果表明,互补滤波器可以在广泛频域范围内准确测量倾斜角度值,并且量子粒子群优化算法相对于粒子群优化算法具有更好的参数寻优效果。

关键词: 倾斜角度;数据融合;互补滤波器;量子粒子群优化算法

中图分类号: TH701 TP274 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

Research on the measurement method of tilt angle based on sensor data fusion

Shi Luqiang, He Yigang, Luo Qiwu, He Wei

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The measurement accuracy of tilt angle directly determines the effect of the state control system. On the basis of studying single sensor tilt angle measurement, this paper discusses the method using sensor data fusion technology in tilt angle measurement. Firstly, the tilt angle measurement principle based on accelerometer and gyroscope is analyzed, and the frequency characteristics of accelerometer and gyroscope measurement results are studied. Secondly, the complementary filter is selected as the data fusion method according to the frequency characteristics of accelerometer and gyroscope measurement results. Finally, the quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm is introduced as the parameter optimization method of the complementary filter, and the parameter optimization effects of QPSO and particle swarm optimization (PSO) algorithms are compared in this paper. The experiment results show that the complementary filter can accurately measure the tilt angle in a wide frequency range, and QPSO algorithm has better parameter optimization effect than PSO algorithm.

Keywords: tilt angle; data fusion; complementary filter; quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm

1 引言

倾斜角度测量在很多领域扮演重要角色,如:姿态控制^[1]、导航系统^[2]、运动追踪^[3]和滑坡监测^[4]等。在实际应用中,倾斜角度测量主要采用两种传感器:加速度计和陀螺仪。基于加速度计的倾斜角度测量方法利用重力

加速度和其轴线上的矢量分量之间的三角函数关系计算倾斜角度,但易受外部作用的干扰,具有较差的高频特性^[5]。基于陀螺仪的倾斜角度测量方法采用对角速度积分的方法测量倾斜角度,但是随着时间的增加,误差不断积分,会造成漂移误差的现象,这种方法具有良好的高频误差,但是低频误差较大^[6]。为了更好地解决以上问题,文献[7-8]提出基于Kalman滤波器的加速度计和陀螺仪

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

*基金项目:国家自然科学基金(51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”(2016YFF0102200)和合肥工业大学博士专项科研基金(JZ2016HGBZ1030)项目资助

数据融合方法,但是由于 Kalman 滤波器的数学模型是一个迭代的计算过程、耗时大、无法及时测量出倾斜角度,并且有 3 个参数需要配置,增加了使用 Kalman 滤波器的难度^[9]。加速度计具有良好的低频特性而陀螺仪具有良好的高频特性,根据两者不同的频率特性,本文采用互补滤波器作为加速度计和陀螺仪的数据融合工具,互补滤波器中的高通滤波器用于屏蔽陀螺仪测量结果的低频部分,而低通滤波器可以使加速度计测量结果的低频部分通过,加法器将两者的输出进行融合,这样就可以在广泛的频域内提供精确的倾斜角度值。并且互补滤波器的数学模型简单,在非理想高斯白噪声条件下相比 Kalman 滤波器具有更好的滤波器效果^[10]。

因为互补滤波器的上述优点,其广泛应用于多种领域并取得很好的效果^[11]。互补传感器参数对其性能有很大的影响,然而传统方法主要根据经验设置参数值^[9],存在很大随意性,无法使互补滤波器的效果达到最优。近年来,多种参数寻优算法被提出和改进。在文献[12]中,遗传算法(genetic algorithm, GA)被用于路径规划模型的参数寻优,并取得很好的效果,但是 GA 收敛速度慢,无法及时找到最优参数,影响系统的实时性。为了进一步提高收敛速度和参数准确性,粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)被提出。PSO 算法^[13]模拟鸟群的觅食行为,群体中的每个成员根据自身和其他成员的经验不断改变搜索模式,直到寻找到最优参数。相较于 GA, PSO 算法具有更快的收敛速度和精度,但是它易陷入局部最优,一旦陷入局部最优将无法使模型达到最优效果^[14],换言之,PSO 算法的收敛是有限的,不能覆盖整个可行空间^[15]。为了避免 PSO 算法的上述缺陷,本文采用量子粒子群算法(Quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO)作为互补滤波器模型的参数寻优方法,可以保证在整个可行解空间内进行参数寻优。通过与 PSO 算法进行比较,验证本文提出的传感器数据融合技术的可行性。

2 倾斜角度测量方法

2.1 基于加速度计的倾斜角测量

基于加速度计的倾斜角测量方法是利用重力加速度与子轴矢量分量之间的三角函数关系。当重力加速度与地球重力场重合时,重力加速度分量与倾斜角之间存在线性关系。如图 1 所示,被监测物体的倾斜角度可以由加速度计测得的一个重力加速度分量和重力加速度的比值获得。其中 θ 为加速度计的倾斜角度, g_x 为重力加速度在 x 轴上的分量, g 为重力加速度。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right) \quad (1)$$

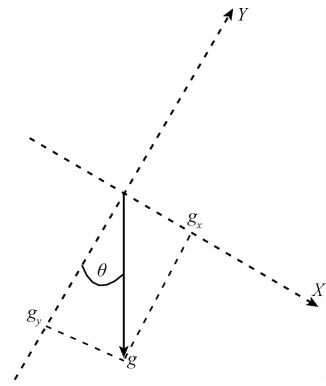


图1 基于加速度计的倾斜角度测量

Fig. 1 Tilt angle measurement based on acceleration sensor

加速度计对因震动引起的外部加速度干扰非常敏感,所以基于加速度计测量倾斜角度的方法只能用于测量准静止物体的倾斜角度。基于加速度计测量倾斜角度的方法从短时间看测量数值不稳定,但是从长时间看,可以测量出倾斜角度的整体变化趋势。

2.2 基于陀螺仪的倾斜角测量

陀螺仪是一种测量物体角速度的装置,且对外部干扰不敏感,被监测物体的倾斜角度可以通过对角速度的积分获得。每次测量得到的角速度都会有微小的偏差。

$$\omega_{\text{gyro}} = \omega + r_g \quad (2)$$

$$\theta_{t_2} = \theta_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} \omega_{\text{gyro}} dt = \theta_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} (\omega + r_g) dt \quad (3)$$

式中: ω_{gyro} 和 ω 分别为由陀螺仪测得的角速度和被监测物体的真实角速度。 r_g 为陀螺仪的测量偏差,主要是有温度变化、外部噪声干扰等引起^[16]。 θ_{t_1} 和 θ_{t_2} 分别是 t_1 和 t_2 时刻的倾斜角度值。从式(3)可知,随着时间的推移,角速度的积分会越来越来,造成漂移误差。所以陀螺仪在短期具有较好的倾斜角度测量效果,但是从长期来看,会产生因为漂移误差引起的衰落。

2.3 数据融合技术

综合上述分析,单一使用加速度计和陀螺仪都无法准确测量被监测物体的倾斜角度。因为角速度计的测量结果具有良好的低频特性,但是高频特性较差,可以测量倾斜角度变化的整体趋势;陀螺仪的测量有优秀的高频特性,但是低频特性较差,可以用于测量短时间内的倾斜角度变化。为了准确地测量倾斜角度,应该融合加速度计和陀螺仪的优点,同时避免它们的缺点。传感器数据融合技术可以同时在高频域和低频域可靠测量倾斜角度。在传感器数据融合技术中, Kalman 滤波器和互补滤波器被广泛应用。

Kalman 滤波器是一种线性二次估计算法,其利用系统的已知输入、测量系统的输出和输入输出的关系来进

行状态估计,通过这种方法可以提高数据的精度。但是, Kalman 滤波器的计算过程是一个迭代的过程,需要依赖大量的迭代计算,无法及时地计算出被监测物体准确的倾斜角度。除此之外, Kalman 滤波器模型多个参数需要配置,这在很大程度上增加了 Kalman 滤波器的使用难度^[9]。

为了克服这些缺陷,在本文中互补滤波器被选定为传感器数据融合的工具。如上文所述,加速度计和陀螺仪具有不同的频率特性,而互补滤波器可以融合两者的优势频段,在广泛的频率范围内提供精确的倾斜角度值。互补滤波器的原理框图如图 2 所示。

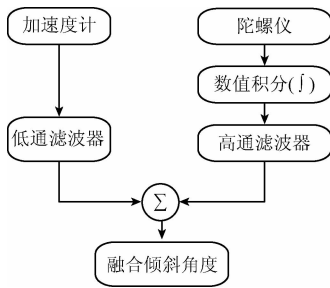


图 2 互补滤波器原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of the complementary filter

互补滤波器的数学模型描述如下:

$$\theta_{angle} = \eta \times (\theta_{angle} + \omega_{gyro} \times \Delta t) + (1 - \eta) \times \theta_{accelerometer} \quad (4)$$

式中: θ_{angle} 为倾斜角度, η 是互补滤波器的系数, ω_{gyro} 是由

$$\begin{cases} X_i(t+1) = P_i(t) + \alpha |Mbest_i(t+1) - X_i(t)| \times \ln(1/u), & k \geq 0.5 \\ X_i(t+1) = P_i(t) - \alpha |Mbest_i(t+1) - X_i(t)| \times \ln(1/u), & k \leq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = \omega_{max} - \frac{iter}{iter_{max}} \times \omega_{min} \quad (7)$$

$$Mbest_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j(t-1) \quad (8)$$

$$P_i(t) = P_i(t-1) + (1 - \beta)P_g(t-1) \quad (9)$$

式中: $P_i(t)$ 是第 t 代的第 i 个粒子的最优位置, u 和 k 是在 $[0, 1]$ 的随机值, α 收缩系数。 ω_{min} 和 ω_{max} 分别是最小和最大的惯性权重, $iter$ 是当前迭代次数, $iter_{max}$ 是最大迭代次数。 $Mbest_i(t)$ 是在 $t-1$ 代的所有粒子最佳位置的均值, N 是种群中粒子的数量, $P_j(t-1)$ 是第 $t-1$ 代中第 j 个粒子的最优位置。 β 是在 $[0, 1]$ 范围内的随机值, $P_g(t-1)$ 直到第 $t-1$ 代为止, 所有粒子中的全局最优位置。 每次迭代结束时, $P_i(t)$ 和 $P_g(t)$ 都会更新, 粒子的适应度函数也会根据它们的新位置重新计算。

陀螺仪测得的角速度, $\theta_{accelerometer}$ 是由加速度计测得的倾斜角度。滤波器的时间常数 τ ($\tau \in [0, 1]$) 和通过滤波器信号频率有关。当信号通过低通滤波器时, 频率比 $1/\tau$ 小的信号会保留, 频率比 $1/\tau$ 大的信号就会被过滤掉; 当信号通过高通滤波器时, 则相反^[5]。假设信号的采样周期为 Δt , 当以 Δt 为周期循环采样时:

$$\tau = \frac{\eta \Delta t}{1 - \eta} \leftrightarrow \eta = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \quad (5)$$

有上述数学模型可知, 互补滤波器的计算效率高(模型简单), 其中系数 η 的选取决定着互补滤波器的性能, 因此如何高效的选取最优化的滤波器系数 η 成为重要的问题。最简单的方法是根据经验设定滤波器系数 η 的数值, 这种方式有较大的随意性, 无法保证取到最优化的滤波器系数 η 。

3 基于 QPSO 算法的参数寻优

作为一种模拟鸟类觅食行为的算法, PSO 算法在 1995 年被提出。 PSO 是一种高效的全局优化算法, 具有算法简单、计算效率高的优点, 但是 PSO 算法容易陷入局部优化^[14]。为了克服该缺点, QPSO 算法将量子力学的思想引入到 PSO 算法中, 提高参数寻优效果。在 QPSO 算法中, 每一个粒子的状态都被视为搜索空间中的潜在解, 不同于 PSO 算法中将粒子状态通过位置和速度来描述, QPSO 将粒子状态通过波函数来描述。

在搜索空间中, 第 t 代的第 i 个粒子的当前位置表示为 $X_i(t)$ 。粒子通过式(6)更新它的位置。

4 算法流程

4.1 参数寻优流程

为了平衡效率和寻优效果之间的关系, QPSO 算法的种群数量和最大迭代次数分别设置为 20 和 100, 粒子位置被限制在 $0.02 \sim 100$, ω_{min} 和 ω_{max} 分别被设置为 0.9 和 0.5。并将计算获得的倾斜角和真实倾斜角之间的绝对误差设置为适应度函数。

$$E_{AE} = |\hat{\theta} - \theta| \quad (10)$$

式中: $\hat{\theta}$ 为寻优结果计算的倾斜角度值, θ 为倾斜角度的真实值, E_{AE} 为计算获得倾斜角和真实倾斜角之间的绝对值误差。

基于 QPSO 算法的寻优步骤如下所述。

1) 如上所述进行参数初始化。

2) 计算初始适应度函数值并保存适应度函数值和滤波器系数 η 。

3) 根据式(7)~(9),更新参数并计算新的适应度函数值和滤波器系数 η 。

4) 与之前保存的适应度函数值进行比较。若更小,替换适应度函数值和滤波器系数 η ;若更大,保留适应度函数值和滤波器系数 η 。

5) 判断迭代是否结束。若迭代结束,执行步骤6);若未结束,跳转到步骤4)。

6) 输出滤波器系数 η 作为全局最优解。

7) 结束。

4.2 整体实验流程

本文提出一种传感器数据融合方法测量物体的倾斜角度,并采用 QPSO 算法对互补滤波器的参数进行寻优。实验整体流程如下所述。

1) 将数据分为训练集和测试集。

2) 根据上述 QPSO 算法寻优过程利用训练集求出全局最优的滤波器系数 η 。

3) 将全局最优的滤波器系数 η 配置给互补滤波器。

4) 利用已配置参数的互补滤波器对加速度计和陀螺仪测得的数据进行数据融合,在较宽的频率范围内获得更精确的被测物体倾斜角度值。

5 实验结果与分析

如图3所示,本文提出的倾斜角度测量系统分为数据采集部分和数据处理部分。数据采集部分采用一个融合了3轴加速度计和3轴陀螺仪的 MPU-6050 模块,相比于使用独立的加速度计和陀螺仪分别测量倾斜角度和角速度,MPU-6050 模块可以消除轴间耦合偏差。数据处理部分采用 FPGA 平台,其 FPGA 芯片为 Xilinx 公司的 XC3SD3400A,互补滤波器以 IP 核的形式设置在 FPGA 芯片中。



图3 倾斜角度测量系统

Fig.3 Tilt angle measurement system

5.1 加速度计和陀螺仪频率特性

使用 MPU-6050 模块中加速度计和陀螺仪单独测得倾斜角度的频率特性如图4所示,图4表示两者测量结果与真实倾斜角度间的绝对误差和信号频率(倾角变化速率)之间的关系,横坐标为信号频率,单位为 rad/s。在低频域中,加速度计测得的倾斜角度值与真实的倾斜角度值之间的误差较小,换言之加速度计在低频域中测得倾斜角度值更精确,其有良好的低频特性。但是随着频率的增大,误差随之增大,所以加速度计的高频特性较差。在高频域中,陀螺仪的倾斜角度测量误差小于加速度计,且频率越高,误差越小,在低频域则相反,所以陀螺仪有较好的高频特性。加速度计和陀螺仪不同的频率特性正是互补滤波器可以应用到本文的根本原因。

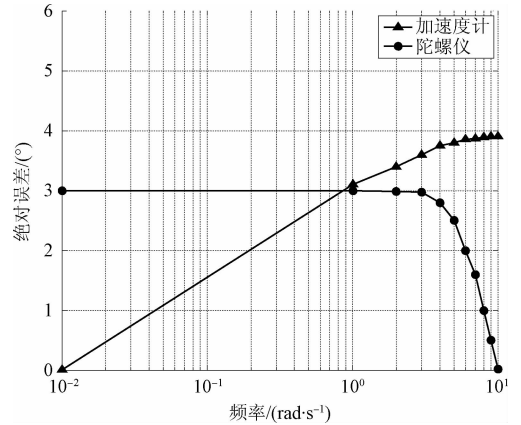


图4 加速度和陀螺仪的频率特性

Fig.4 Frequency characteristics of the accelerometer and gyroscope

图5所示为加速度计、陀螺仪和互补滤波器测得的倾斜角度值的比较,其中采样间隔为0.05 s(即采样频率为20 Hz)。其中陀螺仪采用16 bit 输出,最大测量范围为 $\pm 2000^\circ/\text{s}$,最低有效位(least significant bit, LSB)灵敏度为16.4 LSB/ $^\circ/\text{s}$ 。如图5所示,加速度计测得的倾斜角度曲线有很大的噪声,说明加速度计易受外界干扰,高频特性不好。但是从整体趋势上却和互补滤波器测得的倾斜角度相同,说明加速度计有良好的低频特性。由陀螺仪测得的倾斜角度没有噪声干扰,说明陀螺仪具有良好的高频特性,但是随着时间的推移测得的倾斜角度值不断衰减,这是由角速度的偏差积分造成的漂移误差。互补滤波器可以同时避免加速度计和陀螺仪的缺点,在低频域和高频域都准确测量被监测物体的倾斜角度。

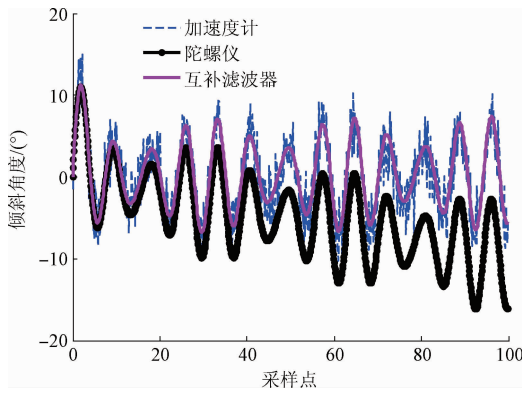


图 5 加速度计、陀螺仪和互补滤波器测得倾斜角度
Fig. 5 The tilt angles measured with accelerometer, gyroscope and complementary filter

5.2 QPSO 参数寻优效果

以一次参数寻优过程为例,比较 QPSO 和 PSO 算法的迭代过程如图 6 所示。由图 6 可知,QPSO 在第 11 次迭代的时候就达到收敛状态,而 PSO 在第 15 和第 41 次迭代都达到收敛状态,所以 PSO 算法已陷入局部收敛的陷阱,而 QPSO 算法则避免了局部收敛。

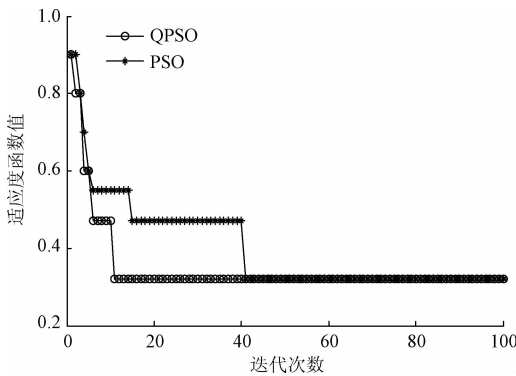


图 6 迭代过程的收敛状态

Fig. 6 Convergence situation of the iteration process

为了更精确地寻找互补滤波器的最优系数,本文将取 300 加速度计、陀螺仪测量的倾斜角度值和真实倾斜角度值,并将其等分为 10 组,每组中有 30 加速度计、陀螺仪测量的倾斜角度值和真实倾斜角度值。将前 20 加速度计、陀螺仪测量的倾斜角度值和真实倾斜角度值作为训练集,后 10 加速度计、陀螺仪测量的倾斜角度值和真实倾斜角度值作为测试集。并将 10 组测试集的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为目标函数,来判定参数寻优算法的优劣。

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \bar{\theta}_i - \theta_i^2}{N}} \quad (11)$$

式中: E_{RMSE} 为均方根误差, N 为测试集的个数, $\bar{\theta}_i$ 为第 i 组训练集训练出的互补滤波器计算出的测试集倾斜角度值, θ_i 为第 i 组测试集的真实倾斜角度值。

图 7 和表 1 所示为 QPSO 和 PSO 算法的优化结果。由图可知,QPSO 的优化效果要好于 PSO 算法,在本文中将互补滤波器的时间常数 τ 和采样间隔分别设置为 0.7 和 1 s。则互补滤波器的系数 η 可以有式(5)求得约等于 0.412。

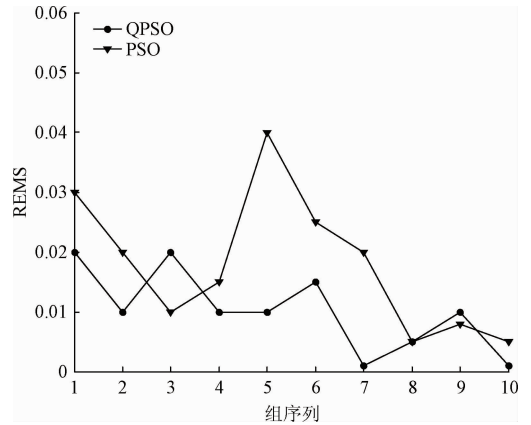


图 7 不同算法的优化结果

Fig. 7 Optimization results of different algorithms

表 1 QPSO 和 PSO 的优化结果

Table 1 Optimization results of QPSO and PSO

算法	最优 REMS	最差 REMS	平均 REMS	最优滤波器 系数 η
QPSO	0.001	0.02	0.01	0.412
PSO	0.005	0.04	0.02	0.444

5.3 数据融合效果

为了测试互补滤波器测量倾斜角度的效果,本文采用 35 组加速度计、陀螺仪测量的倾斜角度值和真实倾斜角度值,并分别用 QPSO 和 PSO 提前对互补滤波器的系数进行优化。测量结果和测量误差如图 8 和 9 所示。由图 8 和 9 可知,互补滤波器可以精确的测量出被测物体的倾斜角度。通过与图 5 的比较可知,互补滤波器有效地消除了外部干扰和漂移误差对倾斜角度的影响。并且由图 9 可知,QPSO 优化的互补滤波器模型相较于 PSO 算法优化的互补滤波器模型测量误差更小,对倾斜角度的测量效果更好。若简单地利用经验对滤波器系数 η 进行设置,无法保证取到滤波器系数 η 的最优值,而且不同的测试环境和测试对象都会导致滤波器系数最优值的变化,增加了测试结果的随意性,就无法得到准确的测试结果。

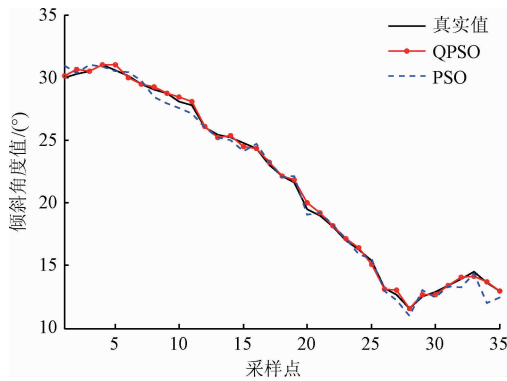


图8 互补滤波器测量结果

Fig.8 Measurement result of the complementary filter

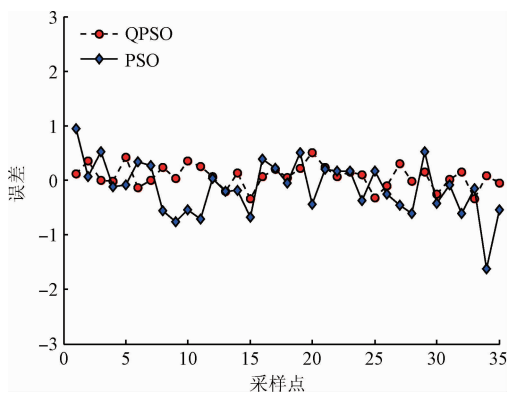


图9 互补滤波器测量误差

Fig.9 Measurement error of the complementary filter

6 结 论

针对单一传感器无法精确测量倾斜角度的情况,提出了一种基于互补滤波器的数据融合方法,该方法融合了加速度计和陀螺仪测量结果中精度较高的频段同时降低了精度较低频段的误差,避免了外界干扰和漂移误差对测量结果的影响。互补滤波器的效果很大程度上取决于参数的选择,本文利用 QPSO 算法对互补滤波器模型进行参数寻优,并且比较了 QPSO 和 PSO 算法的参数寻优效果。通过对数据集进行仿真实验,验证了使用互补滤波器比单一使用加速度计或陀螺仪有更好的倾斜角度测量效果,提高了测量精度和频域适用范围。本文提出的算法相对于基于 PSO 的互补滤波器能够更有效地配置参数,能够高效地对互补滤波器进行参数寻优。

参考文献

[1] HAN S I, LEE J M. Balancing and velocity control of a unicycle robot based on the dynamic model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 405-413.

[2] 罗君,王志乾. 捷联寻北系统自动调平方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1117-1122.
LUO J, WANG ZH Q. Research on automatic leveling method for strap-down north seeking system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(10): 1117-1122.

[3] VILLENEUVE E, HARWIN W, HODERBAUM W, et al. Signal quality and compactness of a dual-accelerometer system for gyro-free human motion analysis [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(16): 6261-6269.

[4] MARCIANO J S, HILARIO C G, ZABANAL M A B, et al. Monitoring system for deep-seated landslides using locally-developed tilt and moisture sensors: System improvements and experiences from real world deployment[C]. Global Humanitarian Technology Conference, 2014: 263-270.

[5] GUI P, TANG L, MUKHOPADHYAY S. MEMS based IMU for tilting measurement: Comparison of complementary and kalman filter based data fusion[C]. Industrial Electronics and Applications, 2015: 2004-2009.

[6] ZHANG X, ZHANG R, GUO M, et al. The performance impact evaluation on bias of gyro and accelerometer for foot-mounted INS[C]. IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015: 1541-1546.

[7] RINCON PASAYE J J, BONALES VALENCIA J A, JIMENEZ PEREZ F. Tilt measurement based on an Accelerometer, a Gyro and a Kalman Filter to control a self-balancing vehicle [C]. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, 2013: 1-5.

[8] THAO N G M, NGHIA D H, PHUC N H. A PID backstepping controller for two-wheeled self-balancing robot[C]. International Forum on Strategic Technology, 2010: 76-81.

[9] GHANBARI M, YAZDANPANA H M J. Delay compensation of tilt sensors based on mems accelerometer using data fusion technique [J]. Sensors Journal IEEE, 2015, 15(3): 1959-1966.

[10] 张勇刚,张云浩,李宁. 基于互补滤波器的 MEMS/GPS/地磁组合导航系统[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2272-2279.
ZHANG Y G, ZHANG Y H, LI N. MEMS/GPS/geomagnetic integrated navigation system based on complementary filter [J]. System Engineering and Electronics, 2014, 36(11): 2272-2279.

[11] 阎世梁,王银玲,张华. 基于改进互补滤波器的低成本

- 本微小飞行器姿态估计方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(7):2078-2082.
- YAN SH L, WANG Y L, ZHANG H. Improved complementary filter for attitude estimation of micro air vehicles using low-cost inertial measurement units [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33 (7): 2078-2082.
- [12] 于海聰, 陆锋. 一种基于遗传算法的多模式多标准路径规划方法[J]. 测绘学报, 2014(1):89-96.
- YU H C, LU F. A multi-modal multi-criteria route planning method based on genetic algorithm [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014(1):89-96.
- [13] 陈仁文, 朱霞, 徐栋霞, 等. 基于改进型粒子群算法的卡箍直径检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1837-1843.
- CHEN R W, ZHU X, XU D X, et al. Spring clamp diameter detection algorithm based on the improved particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2014, 35(8):1837-1843.
- [14] CHEN P, YUAN L, HE Y, et al. An improved SVM classifier based on double chains quantum genetic algorithm and its application in analogue circuit diagnosis [J]. Neurocomputing, 2016, 211 (10): 202-211.
- [15] 刘征宇, 杨俊斌, 张庆, 等. 基于 QPSO-BP 神经网络的锂电池 SOC 预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3):224-228.
- LIU ZH Y, YANG J B, ZHANG Q, et al. Estimation for SOC of lithium battery based on QPSO-BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(3):224-228.

- [16] LIU Y, NOGUCHI N, ISHII K. Development of a low-cost IMU by using sensor fusion for attitude angle estimation [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3):4435-4440.

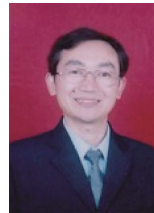
作者简介



史露强, 2015 年于华侨大学获得学士学位, 现为合肥工业大学博士研究生, 主要研究方向为 RFID 技术及智能电网技术的研究。

E-mail: 2015110409@mail.hfut.edu.cn

Shi Luqiang received his B. Sc. degree in 2015 from Huaqiao University. He is now purchasing Ph. D. degree in electrical engineering in Hefei University of Technology. His main research interest includes RFID, wireless sensor network, smart grid, and intelligent and real-time information processing.



何怡刚 (通讯作者), 1992 年于湖南大学获得硕士学位, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为模拟和混合集成电路设计、测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术、虚拟仪器和智能信号处理。

E-mail: 18655136887@163.com

He Yigang (Corresponding author) received his M. Sc. degree in electrical engineering from Hunan University in 1992 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology. His main research interests are design, test and fault diagnosis of analog and mixed-signal circuits, smart grid, radio frequency identification technology, and intelligent signal processing.