第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0202-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:李瑞通, 赵庆生, 王旭平. 基于惯性传感器数据融合的管线三维可视化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 202—207
Li Ruitong, Zhao Qingsheng, Wang Xuping. Pipeline 3D visualization based on inertial sensor data fusion[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 202—207

基于惯性传感器数据融合的管线三维可视化

李瑞通　赵庆生*　王旭平
(太原理工大学电力系统运行与控制山西省重点实验室,太原 030024)

摘　要　受施工技术与管线设计等因素影响,一般管线的三维轨迹通常和设计轨迹有部分误差,而精确了解管线的空间位置又十分重要。提出一种基于 Arduino 平台的六轴陀螺仪姿态解算与融合及管线轨迹可视化算法。首先从六轴陀螺仪收集加速计数据和角速度数据,分别计算出姿态角,并对加速计解算的姿态角进行滑动加权滤波,将滤波后的姿态角与角速度计解算的姿态角经卡尔曼滤波进行融合,得出高精度的翻滚角、偏航角、俯仰角,最后通过融合后的数据求得采样点坐标,绘制出三维轨迹。实验结果证明:该算法不仅能够有效消除陀螺仪传感器的误差,而且测出的三维轨迹曲线与实际管线轨迹基本吻合,有很高的精确度。

关键词　六轴陀螺仪　姿态角　滑动加权滤波　卡尔曼滤波　坐标计算　三维轨迹曲线
中图法分类号　TP249;　　**文献标志码**　A

随着现代都市的飞速发展,各种管线错综复杂,由于技术与历史的原因,很难准确了解这些管线的空间三维信息,因此研究一种能够准确测量管线位置并对其进行三维建模的方法便显得尤为重要[1,2]。目前已知并被国内外广泛认可的管线轨迹测量方法有三种:地质雷达测量法、电磁感应法及电子罗盘测量法[3]。但受管线形状、装置自身误差、磁场等因素影响,测量精度并不能满足实际施工时的需求。基于陀螺仪技术的管线探测法是近年来兴起的新技术[4,5],但其存在严重的零点漂移、随机误差,直接对原始数据进行积分得到的角度会产生很大的累积误差并且会随着时间不断增大[6]。因此,需要设计一种满足需求的姿态解算及融合算法。

目前,在姿态处理方面应用较广的方法主要有互补滤波法、卡尔曼滤波法等[7]。从融合效果看,互补滤波法的精度不高,动态响应速度慢;单独使用卡尔曼滤波融合时也无法消除陀螺仪自身误差[8]。

针对以上问题,本文利用三轴陀螺仪、三轴加速计以及 Arduino 开发板组成姿态测量装置,采用滑动加权滤波法处理加速计解算的姿态角,然后通过卡尔曼滤波融合经滑动加权滤波处理后的姿态角和陀螺仪解算的姿态角,最终求得一个消除多种噪声误差的准确姿态;利用所测得的精准姿态角和管线轨迹算法,构建出待测管线的可视化轨迹模型。

1　惯性陀螺仪技术的原理

老式的惯性陀螺仪大多指机械式陀螺仪,旋转时旋转轴所在方向如果没有外力干扰不会改变。惯性陀螺仪管线三维可视化将陀螺仪姿态融合、定位导航、上位机建模等方法相融合,牵引所设计的惯性测量装置沿待测管线前行,实时收集行进中的角度、时间等数据,从而实时收集行进中的角度、时间等数据,从而获取相等时间间隔后测量装置所在点的坐标,然后将坐标按顺序连成平滑的曲线即为三维管线图。利用惯性陀螺仪技术进行测量可以有效消除测量时地形、管线位置、管线材质等多方面因素对测量结果的影响。测量时只需保证测量装置平稳前行,便能够精确完成三维管线的轨迹模拟。

MPU6050 芯片整合了三轴陀螺仪和三轴加速计,在进行惯性测量时,各司其职,相互配合,陀螺仪负责测量单元的轴向角速度,通过对偏移量的不断修正及角速度的不断积分,解算出基准姿态[9];与此同时加速计负责测量单元的轴向加速度,并计算出三轴相对夹角,将其用滑动加权法滤波后求得无偏移误差的另一组姿态,同时还可以算出装置运行速度。将上述所得两种姿态通过卡尔曼滤波算法进行融合,在上位机显示出坐标与位置信息,运用 MPU6050 芯片进行姿态解算时的原理如图 1 所示。

2018 年 6 月 30 日收到　　国家自然科学青年基金(51505317)和山西省自然科学基金(201601D102039)资助
第一作者简介:李瑞通(1996—),硕士研究生。研究方向:电力系统运行与控制。E-mail:1056889230@qq.com。
*通信作者简介:赵庆生(1969—),博士,副教授。研究方向:电力系统运行与控制及电力系统建模与仿真。E-mail:zhaoqs1996@163.com。

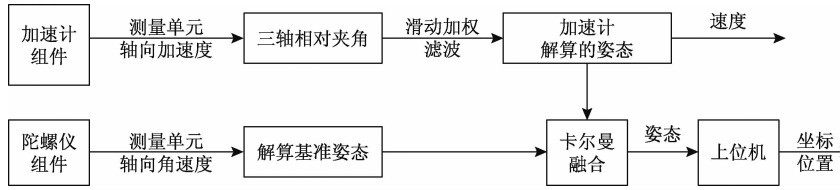

图 1　系统姿态解算原理图

Fig. 1　Schematic diagram of system attitude calculation

2　测量单元的组成

三维管线测量单元由牵引机构、管线探测装置、上位机、和检测计算软件组成,牵引机构牵引管线探测装置沿管线行走,上位机实时收集探测装置所测的姿态角信息,装置行进结束后上位机再对这些数据进行筛选、运算,绘制出装置的行进轨迹,便是被测管线的三维可视化轨迹模型,测量单元的工作示意图如图 2 所示。

2.1　管线探测装置

管线探测装置由主芯片为 MEGA32U4 的 Arduino Leonardo 开发板、RJ11 6P6C 水晶头、陀螺仪芯片 MPU—6050、USB 传输线组成。MPU—6050 芯片是世界上第一款整合了三轴陀螺仪与三轴加速计的运动处理型传感器,与之前独立组合的装置相比,可以直接消除陀螺仪芯片与加速计芯片之间时间基准无法精确统一的误差,同时减少了大量的封装空间。可以通过官方自带的库直接计算出经数据融合后的四元数、欧拉角等结果。开发板与 MPU—6050 芯片通过 RJ11 6P6C 水晶头连接,是电话线接口,方便插拔,体积小,同时带有供电功能;该芯片采用的通信方式是 I2C 通信,通过 I2C 接口向应用端输出融合演算的数据;开发板与上位机通过 USB3.1 连接,带供电和通信功能,没有方向,电流大,传输数据快;陀螺仪芯片收集到的三轴姿态角通过 USB 上传到上位机并在串口监视器中实时显示。

2.2　上位机

上位机在 Arduino IDE 环境下进行编译,实时采集陀螺仪芯片的偏航角、翻滚角、俯仰角,但由于 Arduino 自身条件所限,上位机收集的数据只能通过串口监视器进行显示,无法做到实时存储,因此借助 Processing 编程平台编写合适的接收程序实时将 Arduino 输出的数据保存成文本文档,便于后续的处理与运算。

采集并保存数据的步骤为先下载 Arduino Leonardo 的驱动程序,然后运行 Arduino,在工具栏选择开发板的型号、所用端口号,并将延时函数设定为适当的值保证数据能够实时传输,最后将程序上传至开发板;与此同时打开 Processing 软件,运行编写的数据接收程序,端口、波特率均在程序中设定,读取 Arduino 从 MPU6050 收集的数据信息,在 Console 控制台显示的同时,将数据信息实时保存在 Processing 库文件所在的目录下。

3　数据的处理

数据存储后需要进行处理,将滑动加权滤波和卡尔曼滤波应用于测量装置的姿态解算上,从测量单元获取行走数据进行实验,以陀螺仪芯片收集的姿态数据作为基准,利用加速度计补偿陀螺仪漂移,将获得的原始六轴数据进行处理融合[10]。实验结果表明,在传感器漂移误差大,数据波动明显的情况下,卡尔曼滤波与滑动加权相结合的方法使滤波更为精准与高效、输出效率大大提升,所绘制的三维管线图与实际管线更为接近。

3.1　加速计数据的处理

通过收集的三轴加速计原始数据推算出量化后的 x、y、z 轴实际加速度值的大小:

$$\begin{cases} a_{rx} = \dfrac{a_x}{R_a} \\ a_{ry} = \dfrac{a_y}{R_a} \\ a_{rz} = \dfrac{a_z}{R_a} \end{cases} \tag{1}$$

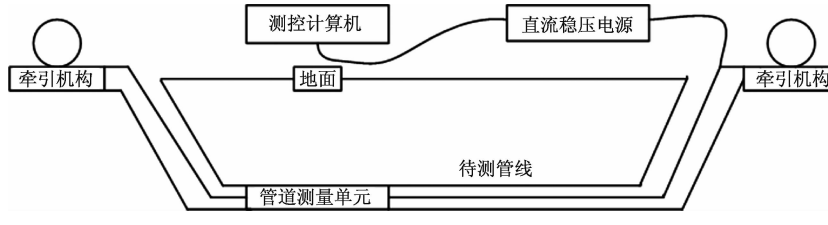

图 2　测量单元工作示意图

Fig. 2　Working diagram of measuring unit

式(1)中：a_x、a_y、a_z 分别为加速度计三轴原始数据；R_a 为加速度计比例系数。

通过对芯片三轴位置关系的分析，可推导出三轴之间相对的夹角，利用数学知识算出三轴姿态角，并将弧度转化为角度，具体计算方法为

$$\alpha_a = \frac{-180}{\pi}\arctan\frac{a_{ry}}{a_{rz}} \tag{2}$$

$$\beta_a = \frac{180}{\pi}\arctan\frac{a_{rx}}{a_{rz}} \tag{3}$$

$$\gamma_a = \frac{180}{\pi}\arctan\frac{a_{ry}}{a_{rx}} \tag{4}$$

式中：α_a、β_a、γ_a 分别为加速计所解算出的三轴姿态角。

以 x 轴为例，对所解算出来的姿态角进行滑动加权滤波，每次提取新的采样值并将其与之前的多次采样值进行加权求和，所得的结果便可以运用到下次计算中。取 N 个采样值，同时预留出一块数据缓存区，每接收一个新的采样值就将其放入缓存区中，同时去掉一个最早的数据，保证这 n 个数据始终是最新更新的数据，具体的实现过程如下。

设加速度计滤波算法采样个数一共有 n 个，对其进行加权求和。

当 $i \leqslant n$ 时，x 轴采样和为

$$S_{ax} = \sum_{i=1}^{n_{\text{sample}}-1} \alpha_{as}[i]i + \alpha_a[n]n \tag{5}$$

式(5)中：$\alpha_{as}[i]$ 表示 x 轴方向加速计解算姿态角的采样队列，S_{ax} 表示 x 轴采样和。

求和后将角度调幅至 0°～90°，应用实验法取得合适的系数，采用的比例系数为 9/7，调幅后由加速计解算的 x 轴姿态角为

$$\alpha_{as}[i] = \frac{2S_{ax}}{11n_{\text{sample}}}\frac{9}{7} \tag{6}$$

3.2 角速度计数据的处理

通过收集回的三轴角速度原始数据推算出量化后的 x、y、z 三个方向实际角速度值的大小，并将其转化为角度数据，具体计算方法为

$$\alpha_g = -\frac{g_x - g_{x0}}{R_g}t \tag{7}$$

$$\beta_g = -\frac{g_y - g_{y0}}{R_g}t \tag{8}$$

$$\gamma_g = -\frac{g_y - g_{y0}}{R_g}t \tag{9}$$

式中：α_g、β_g、γ_g 分别表示 x、y、z 轴方向上陀螺仪解算出的姿态角；g_x、g_y、g_z 分别为三轴原始数据；g_{x0}、g_{y0}、g_{z0} 分别为三轴陀螺仪偏移量；R_g 为陀螺仪比例系数。

对所求角度进行积分即可得到任意时刻陀螺仪传感器解算出的姿态角[11]。

3.3 卡尔曼滤波融合姿态数据

Kalman 滤波算法在时间范围上进行滤波，运用不断更新的状态对系统进行描述，系统中所产生的噪声并不会成为影响精度的因素，反而可以统计其特性并在状态估计过程中加以利用，计算时不断地进行“预测-修正”，同时在计算时不需要储存源源不断的数据，只要观测到新的采样值就能立刻计算出新的滤波结果[12]。

利用测出的多个姿态角信息来估计测量系统的误差并进行校正。陀螺仪传感器可以对自身传输的角速率信号进行积分解算出姿态；而加速计传感器可以解算出在多种噪声下没有偏移误差的姿态；卡尔曼滤波法可以综合这两种不同情况下的姿态情况，计算卡尔曼增益，将多个姿态进行融合，解算出最接近实际情况的姿态[13]。

Kalman 滤波器融合姿态的过程如下，以 x 轴为例进行说明。

(1)计算加速计所解算的姿态角方差阵：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\alpha_{as}[i] - M)^2}{n} \tag{10}$$

式(10)中：M 表示 n 个采样点的平均值。

(2)系统在 k 时刻一步预测协方差阵：

$$P(k+1/k) = P(k/k) + 0.002\,5 \tag{11}$$

式(11)中：$P(k/k)$ 表示 k 时刻协方差阵。

(3)计算卡尔曼增益：

$$K(k+1) = P(k+1/k)[P(k+1/k) + R]^{-1} \tag{12}$$

(4)陀螺仪角度与加速计姿态进行融合：

$$\alpha(k+1) = \alpha_g(k) + K(k+1)[\alpha_a(k) - \alpha_g(k)] \tag{13}$$

式(13)中：$\alpha(k+1)$ 表示经卡尔曼融合后的最终姿态角。

(5)更新 P 值：

$$P(k+1/k+1) = [1 - K(k+1)]P(k+1/k) \tag{14}$$

当给出初始时刻的姿态变量后，卡尔曼滤波器便会循环计算，最终求得三轴高精度姿态角 α、β、γ。

3.4 姿态角坐标系的变换

由于设计的测量单元与载体关联于一体，所以上述所得的三轴高精度姿态角为载体参考系下的欧拉角，进行坐标计算前需要将其转化到地理坐标系下，该过程由欧拉角变化率与机体角速度间的关系进行表示，地理坐标系下欧拉角与欧拉角变化率分

别用 α_n、β_n、γ_n 与 $\dot{\alpha}_n$、β_n、$\dot{\gamma}_n$ 表示，表达式如下：

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\alpha_n \\ 0 & \cos\beta_n & -\sin\beta_n\cos\alpha_n \\ 0 & -\sin\beta_n & \cos\beta_n\cos\alpha_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_n \\ \dot{\alpha}_n \\ \dot{\gamma}_n \end{bmatrix} \tag{15}$$

式(15)左右两侧对时间积分后便可以推导出载体参考系与地理坐标系间欧拉角的关系：

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\alpha_n \\ 0 & \cos\beta_n & -\sin\beta_n\cos\alpha_n \\ 0 & -\sin\beta_n & \cos\beta_n\cos\alpha_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_n \\ \alpha_n \\ \gamma_n \end{bmatrix} \tag{16}$$

将卡尔曼滤波融合后的角度代入式(16)分别求解出地理坐标系下三轴姿态角。

3.5　地下管线的三维坐标

根据卡尔曼滤波器所收集的俯仰角 $\alpha(t)$、翻滚角 $\beta(t)$、偏航角 $\gamma(t)$，以及所测的离散位移对测量装置行进过程中的空间坐标进行计算，首先计算出装置每秒所走的位移矢量，即每秒在 x、y、z 三轴上的行进距离，然后将管线起始点的坐标与 $(0,t)$ 内计算的矢量和进行叠加，即可得到所求管线的三维坐标，并据此绘制出三维可视化轨迹模型，计算方法如下。

管线内三维坐标用 (x_t,y_t,z_t) 表示，$(t-1,t)$ 时间间隔内位移矢量用 (i_t,j_t,k_t) 表示，所以管线各点空间坐标公式如下：

$$\begin{pmatrix} i_t \\ j_t \\ k_t \end{pmatrix} = \Delta l(t) \begin{pmatrix} \cos\alpha(t)\cos\gamma(t) \\ \cos\alpha(t)\sin\gamma(t) \\ \sin\alpha(t) \end{pmatrix} \tag{17}$$

$$(x_t,y_t,z_t) = (x_0,y_0,z_0) + \sum_{n=0}^{t}(i_n,j_n,k_n) \tag{18}$$

4　实验结果及分析

为了验证加速计滤波算法的精确度，将测量装置放置在一个表面光滑的实验台，启动装置，并轻微晃动，单独收集加速计的原始数据与滑动加权算法处理后的数据，通过 Matlab 验证平台进行分析，所得到的三轴加速计数据对比结果如图 3 所示。

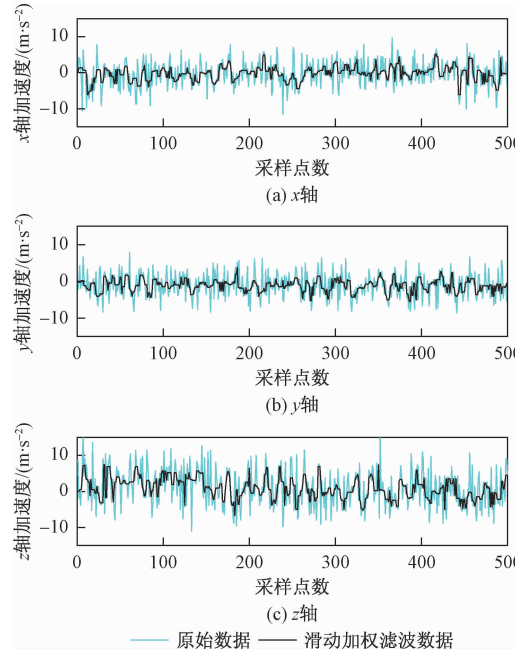

图 3　滑动加权滤波效果对比

Fig. 3　Comparison of sliding weight filter effect

由图 3 可知滤波后加速计数据可以更好地反应实际的波动，保持测量的精度。

在相同的实验条件下收集卡尔曼滤波前后的姿态角数据，通过 Matlab 验证平台进行分析，得到的对比结果如图 4 所示。

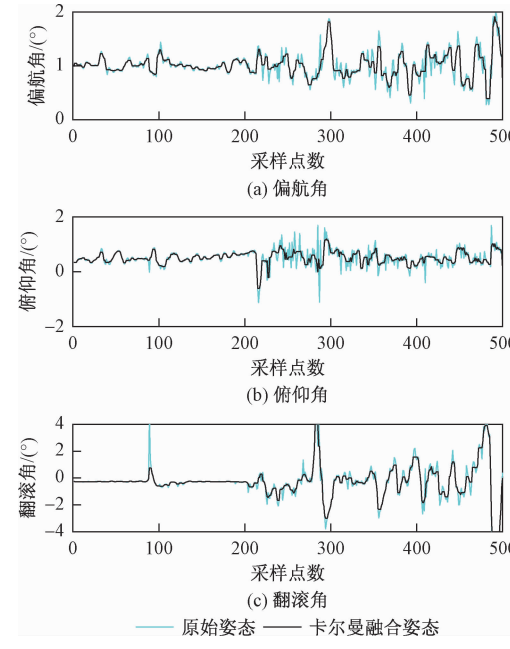

图 4　卡尔曼滤波融合前后的姿态对比

Fig. 4　Comparison of the attitude before and after Kalman filter fusion

由图 4 可知滤波后的三轴姿态角更加平滑，有效地去除了毛刺，使融合的角度更加精确。

在实验场地选一封闭的暖气管线进行实验，启动测量装置使其沿管线平稳前进转一圈回到起点，收集数据后按式(17)、式(18)进行计算，将明显误差点剔除，并将曲线拟合后绘制出暖气管线的三维管线图，实际暖气管线长约为 90 cm、宽 8 cm、高 67 cm。所绘的三维可视化轨迹模型如图 5 所示。

5　结论

设计了一套集姿态数据采集、数据存储、数据处理及管线绘制的测量装置，并将滑动加权滤波与卡

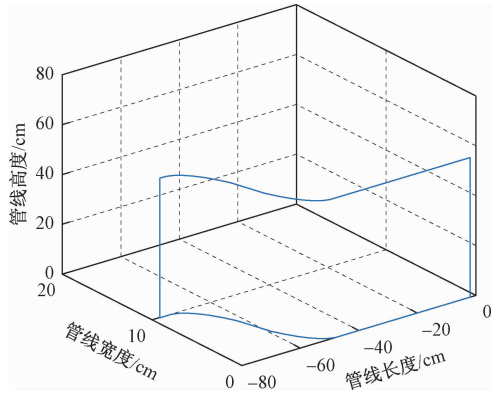

图 5 拟合后的三维可视化轨迹模型

Fig. 5 The fitted 3D visual trajectory model

尔曼滤波应用于该系统,经过对实验过程中滤波效果对比图和三维管线轨迹的分析,可以得到如下结论。

(1)所设计的上位机程序可以实时存储姿态数据,满足测量运算的需求。

(2)所设计的姿态解算及融合算法有效地消除了器件本身带来的误差及环境等因素的影响,大大提高了角度精度。

(3)设计的管线可视化算法,经实际操作,可以基本准确还原管线轨迹,实用性强。

参 考 文 献

1 李清泉, 严 勇, 杨必胜, 等. 地下管线的三维可视化研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2003; 28(3): 277—282
Li Qingquan, Yan Yong, Yang Bisheng, *et al*. Research on 3D visualization of underground pipeline. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003; 28(3): 277—282

2 李 融, 丁 欣, 郑文庭, 等. 基于 GPU 的海量城市管线高效建模与实时绘制. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015; 27(4): 597—604
Li Rong, Ding Xin, Zheng Wenting, *et al*. High-efficiency modeling and real-time rendering of massive urban pipelines based on GPU. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015; 27(4): 597—604

3 沈璟璟. 非开挖铺管竣工管道三维轨迹检测系统研发. 武汉:中国地质大学(武汉), 2011
Shen Jingjing. Research and development of 3D trajectory detection system for Non-excavation pipeline. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2005

4 朱能发, 王 成, 王 健. 惯性陀螺仪在非开挖施工管线定位测量中的应用. 测绘通报, 2015; 31(增刊2): 57—58
Zhu Nengfa, Wang Cheng, Wang Jian. Application of inertial gyroscope in location survey of non-excavation construction pipeline. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015; 31(S2): 57—58

5 王嘉骏, 杨 录, 张元军. 基于 MPU—6050 运动传感器的惯性导航定位系统. 科学技术与工程, 2017; 17(18): 253—257
Wang Jiajun, Yang Lu, Zhang Yuanjun. Inertial navigation and positioning system based on MPU—6050 motion sensor. Science Technology and Engineering, 2017; 17(18): 253—257

6 王晓娟, 马游春, 索艳春, 等. 基于 MEMS 传感器的实时位置解算系统设计与实现. 中国测试, 2017; 43(10): 69—73
Wang Xiaojuan, Ma Youchun, Suo Yanchun, *et al*. Design and implementation of real-time location solving system based on MEMS sensor. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017; 43(10): 69—73

7 张 栋, 焦嵩鸣, 刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法. 传感器与微系统, 2017; 36(3): 62—65
Zhang Dong, Jiao Songming, Liu Yanquan. Fused attitude estimation algorithm based on complementary filtering and Kalman filtering. Transducer and Microsystem Technologies, 2017;36(3): 62—65

8 乔相伟, 周卫东, 吉宇人. 用四元数状态切换无迹卡尔曼滤波器估计的飞行器姿态. 控制理论与应用, 2012; 29(1): 97—103
Qiao Xiangwei, Zhou Weidong, Ji Yuren. Estimation of aircraft gesture using quaternion state switching unscented Kalman filter. Control Theory and Applications, 2012; 29(1): 97—103

9 韩 萍, 桑威林, 赵爱军, 等. 基于单向无迹卡尔曼滤波的飞机姿态算法. 中国惯性技术学报, 2014; 22(5): 629—633
Han Ping, Sang Weilin, Zhao Aijun, *et al*. Aircraft attitude algorithm based on one-way unscented Kalman filter. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014; 22(5): 629—633

10 高社生, 李 伟, 桑春萌. 基于四元数的 SINS/SAR 组合导航系统. 中国惯性技术学报, 2010; 18(1): 63—69
Gao Shesheng, Li wei, Sang Chunmeng. Quaternion based SINS/SAR integrated navigation system. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010; 18(1): 63—69

11 程 章, 许江宁, 郭士荦. 船用捷联式惯性导航仿真系统设计. 科学技术与工程, 2017; 17(25): 317—322
Cheng Zhang, Xu jiangning, Guo shiluo. Design of strapdown inertial navigation simulation system in ship. Science Technology and Engineering, 2017; 17(25): 317—322

12 Benziane L, Hadri A E, Seba A, *et al*. Attitude estimation and control using linearlike complementary filters: Theory and experiment. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016; 24(6): 2133—2140

13 Han P, Gan H, He W, *et al*. Aircraft attitude estimation based on central difference kalman filter. IEEE International Conference on Signal Processing. New York: IEEE, 2013: 294—298

Pipeline 3D Visualization Based on Inertial Sensor Data Fusion

LI Rui-tong, ZHAO Qing-sheng*, WANG Xu-ping
(Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[**Abstract**] Due to factors such as construction technology and pipeline design, the three-dimensional trajectory of the general pipeline is usually partially offset from the design trajectory, and it is very important to accurately understand the spatial position of the pipeline. A six-axis gyro attitude solution and fusion algorithm and pipeline trajectory visualization algorithm based on Arduino platform are presented. Firstly, accelerometer data and angular velocity data of the six-axis gyroscope are collected, and the attitude angles are respectively calculated, and the sliding angle-weighted filtering is performed on the attitude angles calculated by the accelerometer, and the attitude angles of the filtered attitude angle and the angular velocity are calculated. Filtering is carried out to obtain a high-precision roll angle, yaw angle and pitch angle. Finally, the coordinates of the sampling point are obtained from the fused data, and a three-dimensional trajectory is drawn. The experimental results show that the algorithm can not only effectively eliminate the error of the gyro sensor, but also the measured three-dimensional trajectory curve is basically consistent with the actual pipeline trajectory, and has high accuracy.

[**Key words**] six-axis gyroscope　attitude angle　sliding weighted filtering　Kalman filter　coordinate calculation　three-dimensional trajectory