文章编号:1009-2722(2015)06-0072-06

# 海底监测平台的姿态检测技术

魏晗冬<sup>1</sup>,章雪挺<sup>1</sup>,赵铁虎<sup>2</sup>,齐 君<sup>2</sup>,胡 刚<sup>2</sup> (1杭州电子科技大学,杭州 310018;2 青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘 要:介绍了一种基于 9-DOF(自由度)传感器组的海底监测平台姿态检测技术。该技 术采用卡尔曼滤波算法和高斯—牛顿迭代法,通过融合三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴 磁力计的数据进行姿态检测。海底监测平台的姿态四元数由下位机计算所得,并通过串 口发送给上位机,将姿态四元数进行解算并显示整个海底监测平台的三维姿态。该系统 在准静态情况下进行了测试,测试结果表明姿态误差<1%,低姿态漂移率<2°/h,并具 有较高的动态性能。

关键词:姿态检测系统;卡尔曼滤波;数据采集 中图分类号:X83 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.06012

海底监测平台是一个集多种传感器,对海底 环境进行多参数监测的先进平台,其可实现对天 然气水合物赋存地区的多环境参数原位监测,为 天然气水合物勘探和开发提供第1手资料。为了 使海底监测平台能够稳固地施放于海底或者着床 后能进行姿态调整以获得最佳的工作状态,对整 个平台的姿态检测便成为至关重要的技术环节。 该检测技术对其他海底长期观测站的吊装施放也 是必要的。

笔者研究的海底监测平台姿态检测技术,是 基于低成本的 9-DOF 传感器组,配备高速高精度 的数据采集系统,组成嵌入式硬件平台,并在此基 础上,研究一种实时高效,可发挥硬件平台最大效 能的姿态解算算法,实现兼顾成本与精度的一套 姿态检测模块。

1 姿态检测模块总体结构

姿态检测模块由三轴陀螺仪、三轴加速度计 和三轴磁力计组成,数据融合算法采用卡尔曼 滤波算法<sup>[1]</sup>,测试平台包括可以显示三维姿态的上 位机以及三轴无磁转台。测试结果表明,该系统具 有较高的精度、静态稳定性以及动态性能(图 1)。

## 2 数据融合算法

欧拉角、四元数和旋转矩阵是3种常用的姿态表示方法。四元数避免了欧拉角的万向节锁问题,比旋转矩阵更少的参数<sup>[2-4]</sup>,因此,本文在数据融合部分选用了四元数来表示姿态。为了让姿态显示更直观,在上位机部分把姿态四元数解算为欧拉角并通过三维图像显示姿态(图2)。

姿态四元数的一般表达式: q=ai+bi+ck+d (1)

式中:a、b、c和d为实数参量;

i,j和k分别为沿x,y和z轴的单位向量。

卡尔曼滤波每一次迭代主要分为3个步骤: 预测部分,观测部分和更新部分。四元数预测方 程为:

$$\boldsymbol{q}_n = \boldsymbol{F} \boldsymbol{q}_{n-1} + \boldsymbol{B} \boldsymbol{u}_{n-1} + \boldsymbol{W}_{n-1} \tag{2}$$

式中:q<sub>n</sub>为当前状态下的旋转四元数;

 $q_{n-1}$ 为上一个状态下的旋转四元数;

 $W_{n-1}$ 为系统噪声矩阵。

本系统的卡尔曼滤波输入值un-1为零。因

收稿日期:2015-03-09

基金项目:国家海洋地质专项工作项目(GZH201100308) 作者简介:魏晗冬(1990一),男,在读硕士,主要从事海洋电

子技术姿态检测研究工作.E-mail:whd54321@163.com



**图 2 数据融合算法框图** Fig. 2 Diagram of data fusion algorithm

此,方程(2)可以被简化为方程(3),其中 $\dot{q}_n$ 代表 四元数微分值, $\delta$ 代表采样周期。

$$Q_{n} = q_{n-1} + \dot{q}_{n} \delta$$
(3)  
等式(3)可以用状态转换矩阵来表示,如下所示:  
 $q_{n} = q_{n-1} + \dot{q}_{n} \delta = Fq_{n-1}$   
 $q_{n} = Fq_{n-1} =$   

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2}\omega_{x}\delta & -\frac{1}{2}\omega_{y}\delta & -\frac{1}{2}\omega_{z}\delta \\ \frac{1}{2}\omega_{x}\delta & 1 & \frac{1}{2}\omega_{z}\delta & -\frac{1}{2}\omega_{y}\delta \\ \frac{1}{2}\omega_{y}\delta & -\frac{1}{2}\omega_{z}\delta & 1 & \frac{1}{2}\omega_{x}\delta \\ \frac{1}{2}\omega_{z}\delta & \frac{1}{2}\omega_{y}\delta & -\frac{1}{2}\omega_{x}\delta & 1 \end{bmatrix}$$
(4)

式中: $\omega_x, \omega_y$ 和 $\omega_z$ 分别为来自三轴陀螺仪的x, y和z轴的角速度分量。

采样周期由嵌入在微控制器中的计时器计算 得出。除此之外我们还需要通过等式(5)估算系 统的过程噪声协方差矩阵:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{E} \begin{bmatrix} -\omega_x - \omega_y - \omega_z \\ \omega_x - \omega_y + \omega_z \\ \omega_x + \omega_y - \omega_z \\ -\omega_x + \omega_y + \omega_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\omega_x - \omega_y - \omega_z \\ \omega_x - \omega_y + \omega_z \\ \omega_x + \omega_y - \omega_z \\ -\omega_x + \omega_y + \omega_z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

(5)

假设  $E|\omega_i|=0$  和  $E|\omega_i\omega_j|=0(\forall i \neq j)$ 并简 化等式,得到:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 & -\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_z^2 \\ -\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_z^2 & \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \\ -\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + \sigma_z^2 & \sigma_x^2 - \sigma_y^2 - \sigma_z^2 \\ \sigma_x^2 - \sigma_y^2 - \sigma_z^2 & -\sigma_x^2 - \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 分别为x、y和z轴的角速度噪声方差。

利用等式(7)和(8)可以计算出本状态的旋转 四元数先验值 q<sub>ap.n</sub>和协方差矩阵先验值 p<sub>ap.n</sub>

$$\boldsymbol{q}_{\mathrm{ap},n} = \boldsymbol{F} \boldsymbol{q}_{n-1} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{ap},n} = \boldsymbol{F} \boldsymbol{p}_{n-1} \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{E} | \boldsymbol{W}_{n}^{2} | = \boldsymbol{F} \boldsymbol{p}_{n-1} \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \quad (8)$$

至此,可以利用三轴陀螺仪估算出本状态的 旋转四元数。由于陀螺仪存在较大的零位漂移, 先验值 q<sub>ap.n</sub>的误差会随着时间的增长而增大<sup>[5,6]</sup>。 经过较长时间后,得到的姿态信息已经基本不可 信。因此需要通过融合加速度计和磁力计的数 据,得到不会漂移的姿态<sup>[7]</sup>。这是卡尔曼滤波的 观测部分的主要任务。卡尔曼滤波需要一个本状 态的观测值,如下所示:

$$\boldsymbol{z}_n = \boldsymbol{C} \boldsymbol{q}_{n-1} + \boldsymbol{v}_{n-1} \tag{9}$$

式中:C为增益矩阵;

 $v_{n-1}$ 为测量噪声。

在本文中C等同于单位矩阵H,可以通过高 斯一牛顿迭代法计算。首先,定义如下的旋转矩 阵和误差函数:

$$\mathbf{R}_{n} = \begin{bmatrix} d^{2} + a^{2} - b^{2} - c^{2} \\ 2(ab + cd) \\ 2(ac - bd) \end{bmatrix}$$

$$2(ab - cd) \qquad 2(ac + bd) \\ d^{2} + b^{2} - a^{2} - c^{2} \qquad 2(cb - ad) \\ 2(cb + ad) \qquad d^{2} + c^{2} - b^{2} - a^{2} \end{bmatrix}$$
(10)

$$E(q_{n-1}) = \varepsilon^{T} \varepsilon =$$

$$(\mathbf{y}^{E} - \mathbf{M} \mathbf{y}^{S})^{T} (\mathbf{y}^{E} - \mathbf{M} \mathbf{y}^{S})$$
(11)

式中:**y**<sup>E</sup> 为地球坐标系下由三轴加速度分量和三 轴磁力分量组成的矩阵;

y<sup>s</sup>为传感器坐标系下由三轴加速度分量和 三轴磁力分量组成的矩阵。

可以通过以下等式得到雅克比矩阵

$$\boldsymbol{J}(q_{n-1}^z) = -\left[\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial a}\boldsymbol{y}^s \quad \frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial b}\boldsymbol{y}^s \quad \frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial c}\boldsymbol{y}^s \quad \frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial d}\boldsymbol{y}^s\right]$$
(12)

其中

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_n & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{R}_n \end{bmatrix}$$
(13)

于是可以得到如下所示的迭代方程:

$$\boldsymbol{q}_{n}^{z} = \boldsymbol{q}_{n-1}^{z} - [\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q}_{n-1}^{z})]\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q}_{n-1}^{z})]\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{q}_{n-1}^{z}) \quad (14)$$
  
最后得到观测值:

$$\boldsymbol{z}_n = \boldsymbol{H} \boldsymbol{q}_n^z \tag{15}$$

在更新部分,首先计算式(16)所示的差值,或 者可以称作:

$$\boldsymbol{q}_{\mathrm{re},n} = \boldsymbol{z}_n - \boldsymbol{q}_{\mathrm{ap},n} \tag{16}$$

与此同时计算出卡尔曼增益矩阵:

$$\mathbf{K} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{ap},n} (\boldsymbol{p}_{\mathrm{ap},n} + \boldsymbol{R})^{-1}$$
(17)

式中:**R** 为观测噪声协方差矩阵,其与过程噪声协 方差矩阵一样比较难得到准确的值<sup>[8]</sup>,因此,可以 通过观察实验结果反过来调整其值<sup>[9,10]</sup>。它们一 起作用,通过改变**K**的值来决定最终输出的姿态 四元数 **q**<sub>po,n</sub>是更倾向于预测的值还是观测的值, 如下面 2 个等式所示:

$$\boldsymbol{q}_{\mathrm{po},n} = \boldsymbol{q}_{\mathrm{ap},n} + \boldsymbol{K} \boldsymbol{q}_{\mathrm{re},n} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{p}_{\text{po},n} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}) \, \boldsymbol{p}_{\text{ap},n} \tag{19}$$

### 3 实验与分析

实验的硬件平台见图 3。实验在准静态的实验室环境下进行,通过连接上位机,可以看到转化为欧拉角以后的姿态信息(图 4),系统动态性能通过对比 Xsens 公司的 MTi-28A53G35 测资模块得出(图 5)。对比结果(图 6),其中红色曲线代表 MTi的姿态输出,绿色曲线代表9-DOF姿态



Fig. 3 Hardware circuit

检测模块的姿态输出。图 7~9 分别代表了横滚 角、俯仰角、偏航角的输出。



**图4**上位机界面 Fig.4 PC interface



图 5 9-DOF 姿态检测模块和 MTi-28A53G35 Fig. 5 9-DOF azimuth measurement module and MTi-28A53G35



#### 图 6 9-DOF 姿态检测模块与 MTi-28A53G35 输出对比



从图中可以看出姿态无漂移。横滚角和俯仰 角的静态稳定性在 0.1°RMS 左右,偏航角的静态 稳定性在 0.3°RMS左右。这是由于在实验室环



图 7 横滚角静态输出





图 8 俯仰角静态输出

Fig. 8 Static output of pitch angle





境下的磁场分布不均匀并且干扰较大,而偏航角 的测量主要依靠磁力计采集到的磁场数据,因此, 偏航角的稳定性要低于横滚角和俯仰角。精度的 测量主要依靠三轴无磁转台。在旋转并且记录转 台的角度读数的同时,记下上位机所示读数,如图 10~12 所示。其中红色表示转台读数,作为实际 角度值,绿色为上位机显示的读数,为系统测量到 的角度值,从中可以看出姿态误差<1%。



图 10 上位机读数与转台读数对比(横滚角) Fig. 10 Comparison of roll angle read from



#### 图 11 上位机读数与转台读数对比(俯仰角)

编号

Fig. 11 Comparison of pitch angle read from PC and from turntable





## 4 结论

(1)9-DOF 传感器的海底监测平台的姿态检测技术除了应用在海底监测平台的姿态检测外, 还可用于对体积、功耗、稳定性有严格要求的水下 潜水器的姿态检测。

(2)要注意的噪声协方差矩阵的选取,比如高 速运动的场合更信赖陀螺仪的数据,相反在低俗 运动状态下更信赖加速度计和磁力计的数据,而 可以通过调整协方差矩阵的值改变系统对不同数 据的信赖程度。

(3)在后续的工作中可以考虑添加加速度补 偿和磁干扰补偿,减小外界对数据的影响,增加姿 态信息的可靠性。

#### 参考文献:

- Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Fluids Engineering, 1960, 82 (1): 35-45.
- [2] Roetenberg D, Luinge H J, Baten C T M, et al. Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation[J]. Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on, 2005, 13(3): 395-405.
- [3] Diebel J. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors[J]. Matrix, 2006, 58: 15-16.
- [4] Marins J L, Yun X, Bachmann E R, et al. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors[C] // Intelligent Robots and Systems 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2001;2 003-2 011.
- [5] 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].传感技术学报,2007,20
   (2):298-301.doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2007.02.012
- [6] 王佳凤. MEMS 惯性导航系统数据解算及误差补偿算法研 究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- [7] Kaplan G B, Lana A. Comparison of proposed target tracking algorithm, GRNNa, to Kalman Filter in 3D environment[C] // Radar Symposium (IRS), 2013 14th International. IEEE, 2013; 387-392.
- [8] Bohner M, Wintz N. The Kalman filter for linear systems on time scales [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2013, 406(2): 419-436.
- [9] 代 刚. MEMS-IMU 误差分析补偿与实验研究[D]. 北 京:清华大学, 2011.
- [10] Madgwick S O. An efficient orientation filter for inertial

and inertial/magnetic sensor arrays [R]. Report x-io and University of Bristol (UK), 2010.

# AZIMUTH MEASUREMENT TECHNOLOGY FOR SEAFLOOR OBSERVATORY STATION

WEI Handong<sup>1</sup>, ZHANG Xueting<sup>1</sup>, ZHAO Tiehu<sup>2</sup>, QI Jun<sup>2</sup>, HU Gang<sup>2</sup>

(1 Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In this paper, a kind of azimuth measurement technology for seafloor observatory station is proposed based on 9-Dimension of Freedom(9-DoF) Attitude and Heading Reference System(AHRS). It uses Kalman filter to estimate orientation and Gauss-Newton iteration method to get measurement state, and then combines gyroscope, accelerometer and magnetometer data from MEMS sensors to make a detection. For Kalman filter, the system error, which is sensitive to changes in temperature, and the measurement error are both estimated. Finally, the system is tested under quasi-static conditions and compared with the orientation obtained with non-magnetic turntable. The results show an improved performance: the error is less than 1% and low angle bias of pitch and yaw direction is less than 2 degrees per hour.

Key words: AHRS; Kalman filter; data fusion

# 关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文 章发表的行为即视为同意上述声明。

> 《海洋地质前沿》编辑部 2013年1月10日