

文章编号 1004-924X(2015)05-1409-07

## 姿态匹配法测量船体变形角中时间延迟的补偿

杨功流<sup>1,2</sup>, 郭蔚林<sup>1,2\*</sup>, 袁二凯<sup>3</sup>

- (1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
2. 惯性技术国防重点实验室, 北京 100191;
3. 中国人民解放军 93716 部队, 天津 301700)

**摘要:**提出了一种时间延迟的估计方法来解决用姿态匹配法测量船体变形角时惯性测量单元(IMU)数据之间存在的时延对测量精度的影响。首先,对光学测量得到的船体变形数据进行处理,确定船体变形过程的数学模型。然后,通过高精度的主惯导和子惯导输出的局部姿态信息进行惯性量匹配,并构建卡尔曼滤波器估计船体变形角。最后,在卡尔曼滤波器中加入时间延迟估计参数,对时间延迟进行估计和补偿。设计了一套惯导数据同步录取装置,验证了算法的有效性。实验结果表明:同步录取装置与时间延迟算法补偿所测得的船体变形角与光学测量得到的数据相近,均能达到纵摇角误差 13",横摇角误差 12",艏摇角误差 5"的精度水平。得到的结果显示卡尔曼滤波能有效估计出时间延迟,从而有效补偿时间延迟的影响,提高变形角测量精度。

**关键词:**船体变形;变形角度;姿态匹配;建模;卡尔曼滤波;时间延迟

**中图分类号:**U666.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1409

## Compensation of time delay in ship deformation measured by attitude matching

YANG Gong-liu<sup>1,2</sup>, GUO Wei-lin<sup>1,2\*</sup>, YUAN Er-kai<sup>3</sup>

- (1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China;
  2. Science and Technology on Inertial Laboratory, Beijing 100191, China;
  3. Unit 93716 of the Chinese People's Liberation Army, Tianjin 301700, China)
- \* Corresponding author, E-mail: guoweilinlin@163.com

**Abstract:** To solve the influences of time delay between Inertial Measurement Unit(IMU) data on measuring accuracy in the attitude matching measurement of ship deformation, a time delay estimation method was established. Firstly, the ship deformation data measured by optical devices were proposed to confirm a mathematic model of ship deformation process. Then the local attitude information from high-accuracy master-Inertial Navigation System(INS) and slaver-INS was used to match the inertia and Kalman filter equations were used to estimate the ship deformation. Moreover, the time delay parameters were added into the Kalman filter to estimate and compensate the time delay. Finally, an IMU data synchronous read device was designed to verify the effectiveness of proposed algorithm.

收稿日期:2014-07-30;修订日期:2014-09-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61340044);飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金资助项目(No. FOM2014OF018)

Experimental results show that compensation results by IMU data synchronous read device and the algorithmic are similar to optical measurement data, and the pitch errors, rolling errors and the heading errors are  $13''$ ,  $12''$  and  $5''$ , respectively. These results demonstrate that the Kalman filter estimates the time delay effectively, compensates the time delay and improves the measurement accuracy of ship deformation.

**Key words:** ship deformation; deformation angle; attitude matching; modeling; Kalman filter; time delay

## 1 引言

舰船在海上航行的时候由于受到风浪和日晒等因素的影响,船体会产生微小的变形。这种微小的变形会导致舰船上的中心航姿系统与局部的雷达、舰载机等姿态系统出现角度偏差,从而导致其使用精度和战斗力下降<sup>[1]</sup>。目前普遍采用的测量船体变形角的方法是光学方法<sup>[2]</sup>。长春光机所采用大钢管法研制的光学变形监测系统的测量精度可达  $1''$ 。该方法是在舰船的主惯导和待测点之间利用大钢管建造一条光学通道,在主惯导一端安装光学参考基准作为变形测量的基准<sup>[3-4]</sup>。国防科技大学采用自准直平行光管测量技术可实时测量二维动态变形,其动态变形分辨率为  $0.1''$ ,数据更新时间小于  $0.1\text{ s}$ 。虽然光学方法的测量精度较高,但是设备难以安装和维护,灵活性较差。近年来,利用惯性匹配的方法测量船体变形已成为一个热门研究方向。安装在各部位的捷联惯导系统不仅可以用来测量船体变形,还可以直接为各部位提供较高精度的姿态信息。

本文采用姿态匹配算法测量船体变形角,将放置在待测点的两套 IMU(Inertial Measurement Unit)所测得的局部姿态数据进行解算,通过卡尔曼滤波实时地估计出待测点之间的变形角。在滤波的同时加上时间延迟补偿算法,以补偿时间延迟对变形角测量的影响。

## 2 船体变形角建模

### 2.1 光学测量数据分析

光学设备测量船体变形的理论精度能够达到  $5''$  以内,其测量结果可以近似视为船体的实际变形。对一段船体变形的光学实测数据进行频谱分析可知,3 个方向的船体变形角的频率特性是一致的,取纵挠角为例,其频谱图如图 1 所示。

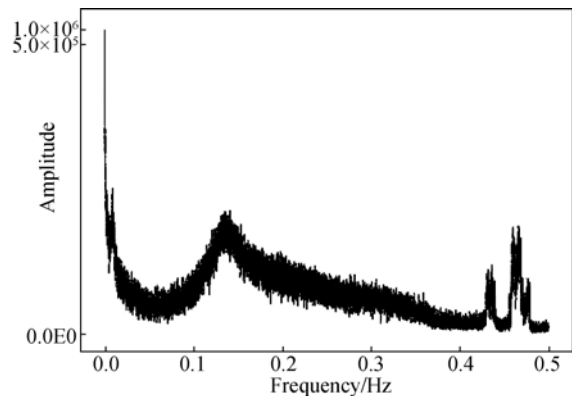
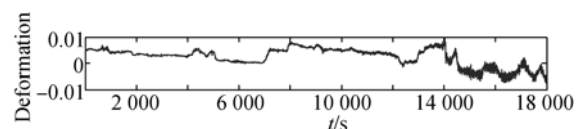


图 1 纵挠角频谱图

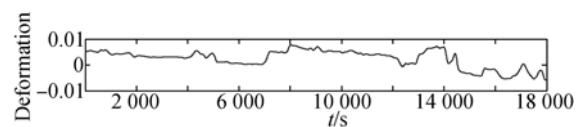
Fig. 1 Spectrogram of vertical twist angles

由图 1 可以看出,频率在  $0.1\text{ Hz}$  处有一个明显的分界,可以将低于  $0.1\text{ Hz}$  部分视为静态形变,而  $0.1\sim 0.3\text{ Hz}$  部分视为动态形变<sup>[5]</sup>。以  $0.1\text{ Hz}$  为临界频率对光学测量所得的变形角进行小波滤波处理,分解得到船体变形的动、静态变形角如图 2 所示。



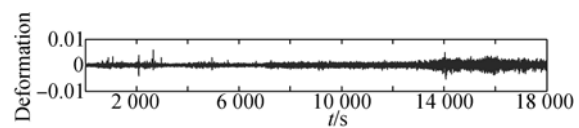
(a) 总纵挠角

(a) Overall vertical twist angles



(b) 静态纵挠角

(b) Static vertical twist angles



(c) 动态纵挠角

(b) Dynamic vertical twist angles

图 2 纵挠角分解图

Fig. 2 Exploded views of vertical twist angles

### 2.2 变形角建模

静态变形是舰船在日晒、夜露和老化作用下,其结构形状逐渐变化所产生的一种缓慢的变形<sup>[6-7]</sup>。实践表明将其视为随机游走过程最为合理:

$$\dot{\varphi}_s = \omega_{\varphi_s}; \dot{\omega}_{\varphi_s} = \alpha_s \omega(t), \quad (1)$$

其中:  $\alpha_s$  是静态变形速率方差,具体数值可由变形角分解结果得出;  $\omega(t)$  是均值为 0, 方差为 1 的白噪声过程。

动态变形主要是由波浪和风的运动对船体加载而产生的,从原理上来看为一个质量-弹簧系统,可视为一个二阶 Markov 过程<sup>[8]</sup>:

$$\ddot{\theta}_d + 2\mu_d \dot{\theta}_d + b_d^2 = 2b_d \sqrt{D_d \mu_d} \omega(t), \quad (2)$$

其中:  $b_d^2 = \mu_d^2 + \lambda_d^2$ ,  $\mu_d$  为动态变形不规则系数,也就是动态变形过程的相关时间的倒数;  $\lambda_d$  为频谱中动态形变部分峰值所对应频率;  $D_d$  为动态变形角的方差值。

## 3 姿态匹配算法

### 3.1 船体坐标的定义

系统的安装位置及坐标定义如图 3 所示。其中 IMU1 是舰船的中心主惯导,也是舰船各个部位的姿态基准信息系统。IMU2 是船载设备的惯导系统,在理论上应与 IMU1 的姿态取齐。但是由于船体变形角的存在,  $oxyz$  坐标系与  $oxy'z'$  坐标系并不对准,而是存在 3 个方向上的变形角。一般来说将  $ox$  方向上的变形角称为纵挠角,  $oy$  方向上的变形角称为横扭角,  $oz$  方向上的变形角称为艏挠角。

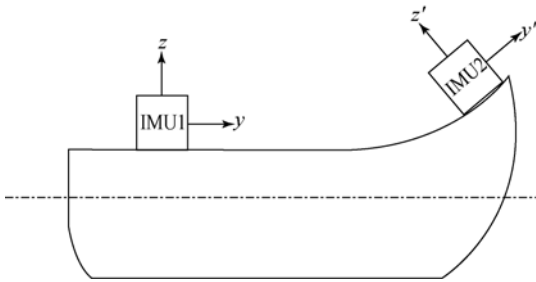


图 3 各系统的安装位置及坐标定义

Fig. 3 Installation location and coordinate definition of IMUs and frames

令 IMU1 所对应的载体坐标系为  $b_1$ , IMU2 所对应的载体坐标系为  $b_2$ 。由于 IMU1 为高精度的中心主惯导系统,其惯性器件精度较 IMU2 要高很多,可视为其对应的惯性空间不随时间的推移而发生变化。理想情况下初始时刻  $t_0$ , IMU1 所对应的惯性坐标系为  $i_1$ , IMU2 所对应的惯性坐标系为  $i_{20}$ 。实际情况下由于 IMU2 的陀螺漂移等因素,其对应的惯性坐标系为  $i_2$ <sup>[9]</sup>。

### 3.2 姿态匹配算法

根据坐标系的定义:

$$C_{b_2}^{i_1} = C_{b_2}^{i_1 T} C_{i_{20}}^{i_1} C_{i_{20}}^{i_2 T} C_{b_2}^{i_2}, \quad (3)$$

式中:  $C_{b_2}^{i_1}$  为  $t$  时刻 IUM1 的姿态矩阵;  $C_{b_2}^{i_2}$  为  $t$  时刻 IMU2 的姿态矩阵;  $C_{i_{20}}^{i_1}$  表示的是  $t_0$  时刻两套 IMU 对应惯性坐标系之间的关系;  $C_{i_{20}}^{i_2}$  表示的是实际情况下 IMU2 的姿态矩阵,它是由于陀螺漂移等因素造成的。根据船体变形角的定义,  $t$  时刻两套 IMU 之间的船体变形可以表示为姿态转移矩阵  $C_{b_2}^{i_1}$  的形式。

记  $t$  时刻 IMU1 和 IMU2 之间的船体变形角为  $\varphi = [\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^T$ , 即纵挠角、横扭角和艏挠角分别为  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 。通常情况下  $\varphi$  为小角度,  $C_{b_2}^{i_1}$  和  $\varphi = [\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^T$  的关系可以近似表示成:

$$C_{b_2}^{i_1} \approx I + \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_z & \varphi_y \\ \varphi_z & 0 & -\varphi_x \\ -\varphi_y & \varphi_x & 0 \end{bmatrix} = I + [\varphi \times]. \quad (4)$$

记  $t_0$  时刻 IMU1 和 IMU2 所对应惯性坐标系之间的偏差角度为  $\varphi_0$ ,  $\varphi_0$  包括了两套惯导之间的初始对准误差和  $t_0$  时刻 IMU2 陀螺漂移造成的惯性空间失准  $C_{i_{20}}^{i_2}$  两个部分,其中  $C_{i_{20}}^{i_2}$  对应的欧拉角为  $\theta_i$ 。  $\theta_i$  和  $\varphi_0$  一般也为小角度,近似有:

$$C_{b_2}^{i_1} \approx I + [\varphi \times] C_{i_{20}}^{i_2} \approx I + [\theta_i \times]. \quad (5)$$

忽略二阶小量可得:

$$C_{i_{20}}^{i_1} C_{i_{20}}^{i_2 T} = \{ I + [\varphi_0 \times] \} \{ I + [\theta_i \times] \}^T \approx I + [(\varphi_0 - \theta_i) \times]. \quad (6)$$

记  $\varphi_a = (\varphi_0 - \theta_i)$ , 则式(6)可以改写为:

$$I + [\varphi \times] \approx C_{b_1}^{i_1 T} \{ I + [\varphi_a \times] \} C_{b_2}^{i_2}. \quad (7)$$

记  $C_{b_2}^{i_1}$  和  $C_{b_2}^{i_2}$  为:

$$C_{b_2}^{i_1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}; C_{b_2}^{i_2} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} \\ C'_{21} & C'_{22} & C'_{23} \\ C'_{31} & C'_{32} & C'_{33} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),并根据左右两边的矩阵元素建立等式可得:

$$\begin{bmatrix} \varphi_X \\ \varphi_Y \\ \varphi_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{13} C'_{12} + C_{23} C'_{22} + C_{33} C'_{32} \\ -C_{13} C'_{11} - C_{23} C'_{21} - C_{33} C'_{31} \\ -C_{11} C'_{12} - C_{21} C'_{22} - C_{31} C'_{32} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{33} C'_{22} - C_{23} C'_{32} & C_{13} C'_{12} - C_{33} C'_{12} & C_{23} C'_{12} - C_{13} C'_{22} \\ C_{23} C'_{31} - C_{33} C'_{21} & C_{33} C'_{11} - C_{13} C'_{31} & C_{13} C'_{21} - C_{23} C'_{11} \\ C_{21} C'_{32} - C_{31} C'_{22} & C_{31} C'_{12} - C_{11} C'_{32} & C_{11} C'_{22} - C_{21} C'_{12} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_a. \quad (9)$$

将上式记为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} C_{33} C'_{22} - C_{23} C'_{32} & C_{13} C'_{12} - C_{33} C'_{12} & C_{23} C'_{12} - C_{13} C'_{22} \\ C_{23} C'_{31} - C_{33} C'_{21} & C_{33} C'_{11} - C_{13} C'_{31} & C_{13} C'_{21} - C_{23} C'_{11} \\ C_{21} C'_{32} - C_{31} C'_{22} & C_{31} C'_{12} - C_{11} C'_{32} & C_{11} C'_{22} - C_{21} C'_{12} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} C_{13} C'_{12} + C_{23} C'_{22} + C_{33} C'_{32} \\ -C_{13} C'_{11} - C_{23} C'_{21} - C_{33} C'_{31} \\ -C_{11} C'_{12} - C_{21} C'_{22} - C_{31} C'_{32} \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{Z} = \boldsymbol{\varphi} - \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}_a. \quad (10)$$

由式(10)可见,主、子惯导之间的姿态误差存在着近似线性的关系,这种线性关系可以用来作为卡尔曼滤波器的观测量,从而以此为基础设计一个可用来估计变形角的卡尔曼滤波器<sup>[10]</sup>。

$$\mathbf{C}_{b_2}^i(\psi, \theta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\gamma + \sin\gamma\sin\theta\sin\psi & \sin\psi\sin\theta\cos\psi - \cos\psi\cos\gamma & -\sin\gamma\cos\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\theta & \sin\theta \\ \sin\gamma\cos\psi - \cos\gamma\sin\theta\sin\psi & -\sin\psi\sin\gamma - \cos\gamma\cos\psi\sin\theta & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

而由于  $\Delta t$  的存在,实际子惯导的姿态矩阵为  $\tilde{\mathbf{C}}_{b_2}^i(\tilde{\psi}, \tilde{\theta}, \tilde{\gamma})$ , 其中:

$$\tilde{\psi} = \psi + \Delta\psi, \tilde{\theta} = \theta + \Delta\theta, \tilde{\gamma} = \gamma + \Delta\gamma. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)中,由于  $\Delta\psi$ 、 $\Delta\theta$  和  $\Delta\gamma$  都是小角度,在泰勒展开后忽略高次项可得:

$$\mathbf{C}_{b_2}^i(\psi, \theta, \gamma) = \tilde{\mathbf{C}}_{b_2}^i(\tilde{\psi}, \tilde{\theta}, \tilde{\gamma}) + \Delta\mathbf{C}_{b_2}^i(\psi, \theta, \gamma). \quad (13)$$

又由于时间延迟是一个非常小的时间,在这段时间内可近似将姿态的变化视为线性,即:

$$\Delta\psi = \dot{\psi}\Delta t; \Delta\theta = \dot{\theta}\Delta t; \Delta\gamma = \dot{\gamma}\Delta t. \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)可得:

$$\mathbf{C}_{b_2}^i(\psi, \theta, \gamma) = \tilde{\mathbf{C}}_{b_2}^i(\tilde{\psi}, \tilde{\theta}, \tilde{\gamma}) + \mathbf{C}_{b_2}^i(\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\gamma})\Delta t. \quad (15)$$

## 5 卡尔曼滤波模型

### 5.1 状态方程

卡尔曼滤波器的状态向量取如下 19 维形式:

$$\mathbf{X} = [\varphi \quad \omega_\varphi \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \varphi_a \quad \varepsilon \quad \Delta t], \quad (16)$$

其中:  $\varphi$  为静态变形角;  $\omega_\varphi$  为静态变形角速度;  $\theta$  为动态变形角,  $\dot{\theta}$  为动态变形角速度;  $\varphi_a$  为惯性空间失准角;  $\varepsilon$  为 IMU2 的陀螺漂移;  $\Delta t$  是时间延迟,视为随机常量  $\Delta i = 0$ 。

### 4 时间延迟补偿

采用姿态匹配法测量船体变形角中时间延迟产生的主要原因是主、子惯导输出信息不匹配,这种时间上的不匹配性将会影响测量精度,尤其是在船体变形角测量这种高精度测量场合。这里采用子惯导内插至标称主惯导信息产生时刻的时间延迟补偿方法,得到标称时刻的子惯导信息。

假设主惯导不存在时间延迟,则子惯导与主惯导之间存在时间延迟  $\Delta t$ 。理想的子惯导的姿态矩阵为<sup>[11]</sup>:

系统状态方程的矩阵形式如下:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W}, \quad (17)$$

其中:  $\mathbf{F}$  为  $19 \times 19$  维的稀疏矩阵,由式(8),式(9),式(10)可得:

$$\mathbf{F} = \text{diag} \{ [\mathbf{A}_{6 \times 6} \quad \mathbf{A}'_{6 \times 6} \quad \mathbf{A}''_{6 \times 6} \quad \mathbf{0}] \},$$

$$\mathbf{A}_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}; \mathbf{A}'_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{B}_{3 \times 3} & \mathbf{B}'_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}''_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{b_2}^i \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \text{diag} \{ [-b_x^2, -b_y^2, -b_z^2] \},$$

$$\mathbf{B}' = \text{diag} \{ [-2\mu_x, -\mu_y, -\mu_z] \}. \quad (18)$$

$\mathbf{G}$  为系统噪声系数矩阵,是  $19 \times 19$  维的对角阵,其中非零元素为:

$$G(4,4) = \sigma_x; G(5,5) = \sigma_y; G(6,6) = \sigma_z;$$

$$G(12,12) = 2b_z \sqrt{D_z \mu_z}. \quad (19)$$

### 5.2 观测方程

卡尔曼滤波观测方程的矩阵形式为:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{v}. \quad (20)$$

其中:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad -\mathbf{A} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{B}],$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}_{b_2}^i(\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\gamma}) \cdot \mathbf{C}_{b_2}^{i T} \cdot \mathbf{C}_{b_2}^i,$$

$$\mathbf{B} = [D(3,2) \quad -D(3,1) \quad D(2,1)]^T. \quad (21)$$

### 6 实验、仿真与结果

#### 6.1 同步录取装置

同步录取装置(图 4)主要由系统上位机、串口拓展板,数据同步采集单元、UPS 以及 DC/DC 电源模块组成。IMU 每接到一个由装置发出的 200 Hz 的脉冲信号,就将数据同步打包发送至装置中,装置每产生一个脉冲,就将接下来 5 ms 从各个 IMU 接到的信号统一进行处理。

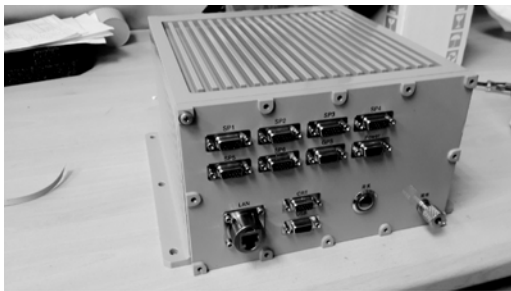


图 4 同步录取装置

Fig. 4 Synchronous read device

#### 6.2 实船实验

实验在某大型测量舰船上进行。舰船上安装有高精度的光学变形监测系统,理论精度达到 5" 以内,可作为标准参考变形。在光学监测系统的监测部位安装有高精度激光陀螺 IMU,安装中确保 IMU 与光学监测系统传感器的敏感轴对齐。测量时舰船在大洋中航行,取其中具有代表性的 50 h 测量数据进行半实物仿真。

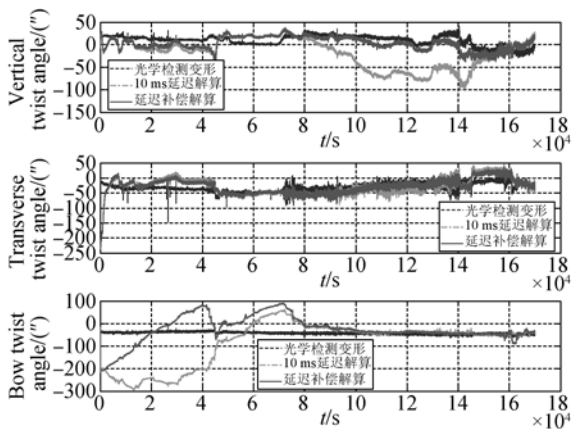


图 5 变形角计算结果

Fig. 5 Results of deformation angle calculation

#### 6.3 仿真与结果

由于在录取数据时已经加入同步录取功能,理论上数据契合度在 5 ms 以内。在进行仿真时人为将数据设置 10 ms 延迟,得到图 5 和图 6 的结果。

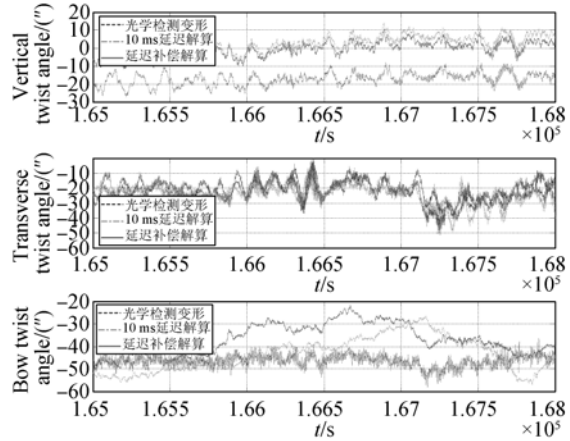


图 6 变形角计算结果局部放大图

Fig. 6 Partial enlarged views of deformation angle calculation

再分别设置 10, 20 和 50 ms 延迟,仿真所得时间延迟估计结果如图 7。

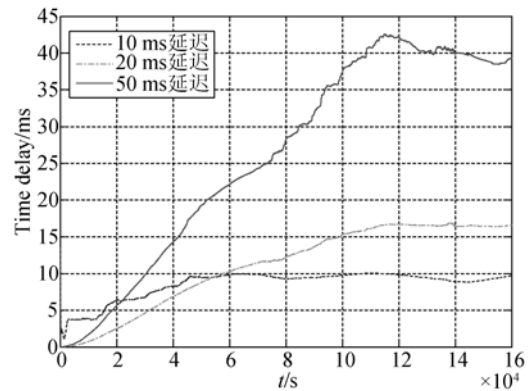


图 7 时间延迟估计结果

Fig. 7 Estimation results of time delay

各仿真结果与光学监测系统测量偏差如表 1 所示(其中艏挠角取稳定之后的结果)。

由图 5 可以看出,时间延迟对于纵挠角的估计影响较大,误差可达 20",而对于横扭角和艏挠角影响较小。由图 6 可以看出,在经过一段时间的解算和估计之后,姿态匹配法的估计结果能够很好地跟踪光学监测的变形数据,每一个变化趋势都能得到正确的估计,即使是有 10 ms 的时间

延迟,其与光学数据的吻合度也很高,证明了姿态匹配算法估计船体变形的有效性。

表 1 变形角计算误差

Tab.1 Calculation error of ship deformation angle(")

仿真条件	纵挠角误差	横扭角误差	艏挠角误差
10 ms 延迟	35.060 5	19.296 8	8.031 1
10 ms 延迟补偿	15.631 4	14.635 8	6.530 2
20 ms 延迟	90.900 6	45.082 5	41.390 7
20 ms 延迟补偿	21.650 0	16.635 2	10.453 7
50 ms 延迟	143.817 6	77.664 5	53.784 6
50 ms 延迟补偿	41.738 6	32.650 0	16.632 5
同步录取装置 (延迟小于 5 ms)	13.605 1	13.410 0	6.042 9
同步录取装置+ 延迟补偿	13.568 2	12.784 2	5.808 9

对于 10 ms 延迟而言,同步录取装置得到的同步数据的计算结果较时间延迟补偿得到的结果要高  $0.5''\sim 2''$ ,而在同步录取装置的基础上加入时间延迟补偿算法后,其精度提高不到  $1''$ ,表明消除时间延迟影响后,该姿态匹配算法的精度只能达到以下水平:纵挠角误差为  $13''$ ,横扭角误差为  $12''$ ,艏挠角误差为  $5''$ ,若要进一步提高精度,

只能从变形角模型和提高 IMU 的精度等方面进行研究,这也从侧面证明了时间延迟补偿算法的有效性。从图 7 和表 1 可以看出,当延迟大于 50 ms 时,变形角误差较大,而时间延迟补偿算法中又多次采用小角度近似,从而导致时间延迟估计模型不准确,造成时间延迟估计效果下降。此时虽然能够补偿一部分误差,但是其精度已经不足以满足船体变形角的测量要求。

## 7 结 论

本文通过对光学监测的变形数据进行数学分析与建模,建立了一个可靠的船体变形角数学模型并提出了时间延迟估计方法。提出的方法采用姿态匹配方式,由卡尔曼滤波器估计出变形角,并且在其中加入了时间延迟的补偿和估计模型来提高变形角的估计精度。仿真结果表明,在较小时间延迟的情况下采用带有时间延迟补偿的姿态匹配变形角测量算法能够实时、有效地估计船体变形角。实验得到的纵挠角误差为  $13''$ ,横扭角误差为  $12''$ ,艏挠角误差为  $5''$ ,这些结果相对于不采用延迟补偿算法有较大的提高,能基本满足船体变形角测量的要求。

## 参考文献:

- [1] ABUBAKAR A, DOW R S. Simulation of ship grounding damage using the finite element method [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(5):623.
- [2] 朱昉昭,汪顺亭,缪玲娟,等. 船体变形测量技术综述[J]. *船舶工程*, 2007, 29(6):58-61.  
ZHU Y ZH, WANG SH T, MIAO L J, et al.. Review of measuring technique for ship deformation [J]. *Ship Engineering*, 2007, 29(6):58-61. (in Chinese)
- [3] 李岩,张尧禹,岳俊华. 船体变形测量的新技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11):2235-2238.  
LI Y, ZHANG Y Y, YUE J H. New technology of ship distortion measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2235-2238. (in Chinese)
- [4] 王晓明,张尧禹,乔彦峰. 用动态水平基准测量系统实时测量船体横扭角和纵挠角[J]. *光学精密工*
- 程, 2013, 21(2):294-300.
- WANG X M, ZHANG R Y, QIAO Y F. Real-time measurement of ship's transverse and vertical twist angles by dynamic horizontal datum measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):294-300. (in Chinese)
- [5] 郑佳兴,秦石乔,王省书. 考虑准静态缓变量的船体角形变测量[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(1):6-10.  
ZHENG J X, QIN SH Q, WANG X SH. Ship hull angular deformation measurement taking slow-varying quasi-static component into account [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(1):6-10. (in Chinese)
- [6] MICHITAKA ODA, NORICHIKA K. The deformation of ship's hull under construction [J]. *Journal of Zosen Kiokai*, 2010, 1965(118):358-368.
- [7] MOCHALOV A V, KAZANTSEV. Use of the ring laser units for measurement of the moving object de-

- formation [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002 (4680):85-92.
- [8] 王曦峤,陈熙源. 舰船甲板动态变形惯性测量方法研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(2):24-29.  
WANG W Q, CHEN X Y. Inertial measurement method of ship dynamic deformation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(2):24-29. (in Chinese)
- [9] 袁二凯,杨功流,于沛,等. 一种基于惯性匹配的船体姿态基准传递方法[J]. *舰船科学技术*, 2014, 35(12):60-64.  
YUAN E K, YANG G L, YU P, et al.. Transfer method of ship's attitude references based on inertial matching method [J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 35 (12):60-64. (in Chinese)
- [10] 郑佳兴,秦石乔,王省书. 基于姿态匹配的船体形变测量方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(2):175-180.  
ZHENG J X, QIN SH Q, WANG X SH. Attitude matching method for ship deformation measurement [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(2):175-180. (in Chinese)
- [11] 高钟毓. 惯性导航系统技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2012:224-253.  
GAO ZH Y. *Inertial Navigation System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012:224-253.

#### 作者简介:



郭蔚林(1991—),男,江西赣州人,硕士研究生,2013年于天津大学获得学士学位,主要研究方向为惯性导航技术。  
E-mail:guoweilinlin@163.com

#### 导师简介:



杨功流(1967—),男,福建南平人,教授,博士生导师,1987年、1990年于哈尔滨船舶工程学院(现为哈尔滨工程大学)分别获得学士、硕士学位,2004年于清华大学获得博士学位,主要从事惯性技术,惯性导航系统方面研究。  
E-mail:bhu17\_yang@139.com

(版权所有 未经许可 不得转载)