

基于高精度导航设备的海上多传感器配准算法

王成飞, 王航宇, 石章松, 占明锋

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 对海上多平台多传感器误差配准问题, 利用平台的高精度导航信息将各传感器的量测数据转换到地心坐标系下, 构建关于传感器偏差和舰艇姿态误差的伪测量模型, 采用卡尔曼滤波对配准误差进行在线估计和补偿. 算法较好地解决了传统的基于球极投影误差配准技术受地球曲率影响的不足, 并突破了离线配准算法假定配准误差恒定的限制. 仿真实验结果验证了算法的正确性和有效性.

关键词: 数据融合; 海上协同; 传感器配准; 地心坐标系; 卡尔曼滤波

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Maritime sensor registration algorithm based on high-precision navigation equipment

WANG Cheng-fei, WANG Hang-yu, SHI Zhang-song, ZHAN Ming-feng

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei 430033, China)

Abstract: In the error registration of multiple sensors in multiple platforms on the sea, we make use of the high-precision navigation facilities to transform measurements of sensors to the ECEF(earth-centered earth-fixed) coordinates. The fictitious measurement models for both the sensor bias and the attitude errors are built, and a Kalman filter is employed to estimate and compensate the registration errors on line. This algorithm reduces the registration errors due to the curvature of the earth surface in classical registration algorithms based on stereographic projection. It also removes the necessary condition of constant registration error in the off-line algorithms. Simulation results demonstrate the correctness and validity of the algorithm.

Key words: data fusion; maritime cooperation; sensor registration; ECEF coordinate system; Kalman filtering

1 引言(Introduction)

协同作战是信息化战争的主要作战模式, 其实施的关键在于如何利用分布于整个战场区域的传感器信息来形成精确、实时、统一的敌我态势图, 这就需要将各传感器获取的数据转换到一个公共参考系中. 但由于传感器系统偏差和随机测量误差的存在, 直接进行转换很难保证精度和发挥多传感器组网的优越性, 因此在多传感器数据处理时需要进行传感器配准.

现有的多数传感器配准算法都是利用立体投影在一个二维区域平面上实现的, 虽然立体投影技术能够降低配准算法的计算复杂度, 但它忽略了地球表面曲率影响, 当传感器间距较大时将引入误差^[1]. 其次, 立体投影扭曲了数据, 它的保角性虽然可以保持方位角不变形, 但是不能保持斜距离, 从而使系统偏差依赖于量测, 不再是时不变的^[2]. 在地心坐标系(earth-centered earth-fixed, ECEF)中进行误差配准的方法可以解决上述不足, 同时能够对

俯仰角偏差进行估计, 是一种更为直接和精确的配准方法. Zhou等^[2]首次通过地理坐标变换将本地传感器量测转换到地心坐标系中, 运用最小二乘法估计传感器偏差. 类似地, 在地心坐标系下的极大似然法^[3,4]、广义最小二乘法^[5]和引入Levenberg-Marquard算法进行优化^[6]等配准算法相继提出.

基于地心坐标系的海上多平台多传感器配准, 需要各平台具备高精度导航设备(如GPS、双星定位系统等), 直接利用导航数据将传感器量测坐标转换到地心坐标, 实现数据位置对准. 然后在地心坐标系中估计误差, 完成配准. 精确的导航信息能够获得更好的数据转换精度, 并且在信息中继时不会出现传感器定位误差累积效应, 所以在误差配准时可以不考虑传感器位置误差的影响, 仅对传感器偏差和姿态误差进行估计.

传统的地心坐标系配准算法都采用批处理方法来为配准误差提供离线的估计, 不但要求目标的位置已知, 并且假设误差是时不变的. 这两个条件在海

上环境下很难满足,特别是由于舰艇运动、温度、风速和海浪等因素,配准误差呈缓慢变化,因此需要对误差提供在线的估计.文献[7]使用EKF滤波在地心坐标系中在线估计误差,但是其输出是传感器经度、纬度和北向角的偏差.而本文则研究具备高精度导航设备的海上平台的传感器偏差和姿态误差的在线估计和补偿方法,以实现海上多平台多传感器配准.

2 基于高精度导航设备的传感器数据位置对准模型(Sensor data alignment model based on high-precision navigation equipment)

高精度导航设备能够为海上平台提供较精确的地理位置信息,由传感器的地理位置信息可以将传感器对目标的量测转换到地心坐标系中,从而在该公共参考系中实现海上多平台多传感器数据位置对准.

根据导航设备的地理位置信息,传感器在地球上的位置可以表示为 (B, L, H) ,其中 B, L, H 分别为纬度、经度和海拔高度.地心笛卡尔坐标系以地球中心为原点,坐标轴与地球固定连接, X, Y 轴互相垂直并固定于赤道面上, X 轴由地心向外指向本初子午圈与赤道的交点, Z 轴与地球自转轴重合,指向北极, Y 轴和 Z, X 轴构成右手坐标系.

在 k 时刻,若给定传感器 i 的测地坐标 (B_k^i, L_k^i, H_k^i) ,则它的地心坐标 $\vec{X}_e^i(k) \triangleq [X_{ek}^i \ Y_{ek}^i \ Z_{ek}^i]^T$ 为

$$\begin{cases} X_{ek}^i = (N + H_k^i) \cos B_k^i \cos L_k^i, \\ Y_{ek}^i = (N + H_k^i) \cos B_k^i \sin L_k^i, \\ Z_{ek}^i = [(N(1 - e^2) + H_k^i) \sin B_k^i. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $N = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_k^i}$ 为卯酉圆曲率半径; $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$, a, b, e 分别为地球椭球的长半径、短半径和第一偏心率.

舰艇上的方位水平仪、平台罗经等装备可以提供由一组卡尔丹角 (C, φ, θ) 组成的舰艇姿态信息, C, φ 和 θ 分别表示舰艇的航向角、纵摇角和横摇角.当考虑舰艇姿态时,传感器对目标的量测需要表示在不稳定舰艇参考系中.将 k 时刻传感器 i 的目标量测表示为 $(r_k^i, q_k^i, \varepsilon_k^i)$,其中,斜距离 r_k^i 为坐标原点(传感器所在位置)与目标的距离;不稳定本舰舷角 q_k^i 为舰艇纵轴到斜距离在甲板面上投影的角度,范围是 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$,右舷为正;俯仰角 ε_k^i 为斜距离与甲板面之间的夹角,向上为正.

为了在地心坐标系下完成多传感器的数据位置对准,首先要将不稳定舰艇参考系中的目标量测转换到传感器地理直角坐标下.定义 $\vec{x}^i(k) \triangleq [x_k^i \ y_k^i \ z_k^i]^T$ 为该量测在传感器地理直角坐标系下的坐

标,则

$$\vec{x}^i(k) = \Phi_i(C_k^i, \varphi_k^i, \theta_k^i, r_k^i, q_k^i, \varepsilon_k^i),$$

Φ_i 表示不稳定舰艇参考系到传感器地理直角坐标系的转换,

$$\begin{bmatrix} x_k^i \\ y_k^i \\ z_k^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C_k^i & \sin C_k^i & 0 \\ -\sin C_k^i & \cos C_k^i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_k^i & -\sin \varphi_k^i \\ 0 & \sin \varphi_k^i & \cos \varphi_k^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_k^i & 0 & \sin \theta_k^i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_k^i & 0 & \cos \theta_k^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_k^i \sin q_k^i \cos \varepsilon_k^i \\ r_k^i \cos q_k^i \cos \varepsilon_k^i \\ r_k^i \sin \varepsilon_k^i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: C_k^i, φ_k^i 和 θ_k^i 分别为当前 k 时刻传感器 i 所在舰艇的航向角、纵摇角和横摇角.

然后,通过下式将目标量测转换到地心坐标系中的坐标 $\vec{X}^i(k) \triangleq [X_k^i, Y_k^i, Z_k^i]^T$,实现传感器数据位置对准,

$$\vec{X}^i(k) = T_i \begin{bmatrix} x_k^i \\ y_k^i \\ z_k^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{ek}^i \\ Y_{ek}^i \\ Z_{ek}^i \end{bmatrix} = T_i \Phi_i(C_k^i, \varphi_k^i, \theta_k^i, r_k^i, q_k^i, \varepsilon_k^i) + \vec{X}_e^i(k), \quad (3)$$

式中 T_i 为传感器地理直角坐标系到地心坐标系的转换矩阵,

$$T_i = \begin{bmatrix} -\sin L_k^i & \frac{-\sin B_k^i \cos L_k^i}{\sqrt{1 - \frac{a^4 - b^4}{a^4} \cos^2 B_k^i}} & \frac{\cos B_k^i \cos L_k^i}{\sqrt{1 + \frac{a^4 - b^4}{b^4} \sin^2 B_k^i}} \\ \cos L_k^i & \frac{-\sin B_k^i \sin L_k^i}{\sqrt{1 - \frac{a^4 - b^4}{a^4} \cos^2 B_k^i}} & \frac{\cos B_k^i \sin L_k^i}{\sqrt{1 + \frac{a^4 - b^4}{b^4} \sin^2 B_k^i}} \\ 0 & \frac{\cos B_k^i}{\sqrt{1 + \frac{a^4 - b^4}{b^4} \sin^2 B_k^i}} & \frac{\sin B_k^i}{\sqrt{1 - \frac{a^4 - b^4}{a^4} \cos^2 B_k^i}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

3 传感器配准算法(Sensor registration algorithm)

将目标量测转换到地心坐标系进行位置对准的过程中,存在传感器偏差和姿态误差两部分的系统配准误差,需要对误差进行在线估计,完成传感器配准.配准过程如下,首先将两个传感器对共同目标的量测相减得到一个伪测量模型,然后构建配准误差的状态模型,对于伪测量模型和状态模型所组成的线性系统设计一个卡尔曼滤波器,其输出即为这两个传感器的传感器偏差和姿态误差的估计值.

设两部传感器A和B的地心坐标分别为 $\vec{X}_e^A(k)$ 和

$\vec{X}_e^B(k)$. 在 k 时刻, A和B对目标的量测和舰艇姿态分别表示为

$$\begin{cases} r_k^A = r_t^A(k) + \Delta r_b^A(k) + \Delta r_n^A(k), \\ q_k^A = q_t^A(k) + \Delta q_b^A(k) + \Delta q_n^A(k), \\ \varepsilon_k^A = \varepsilon_t^A(k) + \Delta \varepsilon_b^A(k) + \Delta \varepsilon_n^A(k), \\ C_k^A = C_t^A(k) + \Delta C^A(k), \\ \varphi_k^A = \varphi_t^A(k) + \Delta \varphi^A(k), \\ \theta_k^A = \theta_t^A(k) + \Delta \theta^A(k), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} r_k^B = r_t^B(k) + \Delta r_b^B(k) + \Delta r_n^B(k), \\ q_k^B = q_t^B(k) + \Delta q_b^B(k) + \Delta q_n^B(k), \\ \varepsilon_k^B = \varepsilon_t^B(k) + \Delta \varepsilon_b^B(k) + \Delta \varepsilon_n^B(k), \\ C_k^B = C_t^B(k) + \Delta C^B(k), \\ \varphi_k^B = \varphi_t^B(k) + \Delta \varphi^B(k), \\ \theta_k^B = \theta_t^B(k) + \Delta \theta^B(k). \end{cases} \quad (6)$$

式中: 目标量测的下标 t, b, n 分别表示目标真值、传感器偏差和测量噪声; $\Delta C^i, \Delta \varphi^i$ 和 $\Delta \theta^i (i = A, B)$ 表示姿态误差.

在地心坐标系下, 定义两传感器量测之差 $\Delta \vec{X}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta \vec{X}(k) &\triangleq \Delta \vec{X}^A(k) - \Delta \vec{X}^B(k) = \\ &T_A \Phi_A + \vec{X}_e^A(k) - T_B \Phi_B - \vec{X}_e^B(k). \end{aligned} \quad (7)$$

为了简便, 以下分析将省略时间标记 k . 当所有误差都不考虑时, 有 $\Delta \vec{X} = 0$, 即

$$0 = T_A \Phi_A - T_B \Phi_B + \vec{X}_e^A - \vec{X}_e^B. \quad (8)$$

上式关于量测值和姿态的泰勒级数展开, 并忽略高阶项(由于传感器偏差、测量噪声和姿态误差均为较小量), 可以近似为

$$\begin{aligned} 0 &\simeq T_A \Phi_A - T_B \Phi_B + \vec{X}_e^A - \vec{X}_e^B + \\ &T_A \left[\frac{\partial \Phi_A}{\partial C^A} (C_t^A - C^A) + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \varphi^A} (\varphi_t^A - \varphi^A) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \Phi_A}{\partial \theta^A} (\theta_t^A - \theta^A) + \frac{\partial \Phi_A}{\partial r^A} (r_t^A - r^A) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \Phi_A}{\partial q^A} (q_t^A - q^A) + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \varepsilon^A} (\varepsilon_t^A - \varepsilon^A) \right] - \\ &T_B \left[\frac{\partial \Phi_B}{\partial C^B} (C_t^B - C^B) + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \varphi^B} (\varphi_t^B - \varphi^B) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \Phi_B}{\partial \theta^B} (\theta_t^B - \theta^B) + \frac{\partial \Phi_B}{\partial r^B} (r_t^B - r^B) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \Phi_B}{\partial q^B} (q_t^B - q^B) + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \varepsilon^B} (\varepsilon_t^B - \varepsilon^B) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

由式(5)~(7), 式(9)可以写成

$$\begin{aligned} \Delta \vec{X} &\simeq T_A \left[\frac{\partial \Phi_A}{\partial C^A} \Delta C^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \varphi^A} \Delta \varphi^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \theta^A} \Delta \theta^A + \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial \Phi_A}{\partial r^A} \Delta r_b^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial q^A} \Delta q_b^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \varepsilon^A} \Delta \varepsilon_b^A \right] - \\ &T_B \left[\frac{\partial \Phi_B}{\partial C^B} \Delta C^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \varphi^B} \Delta \varphi^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \theta^B} \Delta \theta^B + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. \frac{\partial \Phi_B}{\partial r^B} \Delta r_b^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial q^B} \Delta q_b^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \varepsilon^B} \Delta \varepsilon_b^B \right] + \\ &T_A \left[\frac{\partial \Phi_A}{\partial r^A} \Delta r_n^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial q^A} \Delta q_n^A + \frac{\partial \Phi_A}{\partial \varepsilon^A} \Delta \varepsilon_n^A \right] - \\ &T_B \left[\frac{\partial \Phi_B}{\partial r^B} \Delta r_n^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial q^B} \Delta q_n^B + \frac{\partial \Phi_B}{\partial \varepsilon^B} \Delta \varepsilon_n^B \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} \Psi_i \triangleq \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial C^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \varphi^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \theta^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial r^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial q^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \varepsilon^i} \right], \\ \Gamma_i \triangleq \left[\frac{\partial \Phi_i}{\partial r^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial q^i} \frac{\partial \Phi_i}{\partial \varepsilon^i} \right], \end{cases} \quad (11)$$

可得

$$\begin{aligned} \Delta \vec{X} &= [T_A \Psi_A \quad -T_B \Psi_B] \begin{bmatrix} \Delta C^A & \Delta \varphi^A & \Delta \theta^A & \Delta r_b^A & \Delta q_b^A & \Delta \varepsilon_b^A \\ \Delta C^B & \Delta \varphi^B & \Delta \theta^B & \Delta r_b^B & \Delta q_b^B & \Delta \varepsilon_b^B \end{bmatrix}^T + \\ &[T_A \Gamma_A \quad -T_B \Gamma_B] \begin{bmatrix} \Delta r_n^A & \Delta q_n^A & \Delta \varepsilon_n^A & \Delta r_n^B & \Delta q_n^B & \Delta \varepsilon_n^B \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \quad (12)$$

定义

$$H_k \triangleq [T_A \Psi_A \quad -T_B \Psi_B], \quad (13)$$

$$M_k \triangleq [T_A \Gamma_A \quad -T_B \Gamma_B], \quad (14)$$

$$X_b \triangleq \begin{bmatrix} \Delta C^A & \Delta \varphi^A & \Delta \theta^A & \Delta r_b^A & \Delta q_b^A & \Delta \varepsilon_b^A \\ \Delta C^B & \Delta \varphi^B & \Delta \theta^B & \Delta r_b^B & \Delta q_b^B & \Delta \varepsilon_b^B \end{bmatrix}^T, \quad (15)$$

$$X_n \triangleq [\Delta r_n^A \quad \Delta q_n^A \quad \Delta \varepsilon_n^A \quad \Delta r_n^B \quad \Delta q_n^B \quad \Delta \varepsilon_n^B]^T, \quad (16)$$

$$Z_k \triangleq \Delta \vec{X} = \Delta \vec{X}^A - \Delta \vec{X}^B. \quad (17)$$

其中: X_b 为配准误差向量, 由传感器A的3个姿态误差分量 $\Delta C^A, \Delta \varphi^A, \Delta \theta^A$, 3个传感器偏差分量 $\Delta r_b^A, \Delta q_b^A, \Delta \varepsilon_b^A$ 及传感器B的3个姿态误差分量和3个传感器偏差分量组成; X_n 为传感器测量噪声向量, 由两传感器的测量噪声组成, Z_k 为两传感器对同一目标量测的差值. 则

$$Z_k = H_k X_b + M_k X_n = H_k X_b + V_k. \quad (18)$$

上式代表一个对配准误差向量 X_b 的线性化测量模型, 而 V_k 则表示一个虚拟的测量噪声误差, 并假定 V_k 均值为0, 协方差为

$$R_k = E \{V_k V_k^T\} = M_k R_0 M_k^T, \quad (19)$$

式中,

$$R_0 = \text{diag} \{ \sigma_{r_n^A}^2, \sigma_{q_n^A}^2, \sigma_{\varepsilon_n^A}^2, \sigma_{r_n^B}^2, \sigma_{q_n^B}^2, \sigma_{\varepsilon_n^B}^2 \}$$

为初始的传感器协方差矩阵.

一般假设传感器偏差和姿态误差缓慢变化, 并引入状态噪声 $W(k)$, 则状态方程为

$$X_b(k+1) = X_b(k) + W(k), \quad (20)$$

其中: $W(k)$ 的均值为0, 协方差 Q 可采用基于移动

平均的自适应滤波^[8]来确定

$$Q_{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k [\hat{X}_b(i|i) - \bar{w}_k][\hat{X}_b(i|i) - \bar{w}_k]^T, \quad (21)$$

式中:

$$\bar{w}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \hat{X}_b(i|i), \quad (22)$$

$\hat{X}_b(i|i)$ 表示 k 时刻 X_b 的估计, N 表示进行平均的估计计量的数目.

对于式(18)的测量方程和式(20)的状态方程构成的线性系统, 可以利用卡尔曼滤波器来估计它的状态, 如式(23)所示, 其输出即为配准误差向量 X_b .

$$\begin{cases} \hat{X}_b(k|k-1) = \hat{X}_b(k-1|k-1), \\ P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q_{k-1}, \\ K_k = P(k|k-1)H_k^T [H_k P(k|k-1)H_k^T + R_k]^{-1}, \\ \hat{X}_b(k|k) = \hat{X}_b(k|k-1) + K_k [Z_k - \\ H_k \hat{X}_b(k|k-1)], \\ P(k|k) = [I - K_k H_k] P(k|k-1). \end{cases} \quad (23)$$

4 仿真分析(Simulation analysis)

为了检验配准算法的有效性, 设置如下剧情进行仿真, 两部雷达A, B所在舰艇的初始经纬度为(N20:00:00, E115:00:00)和(N20:00:00, E115:30:00), 分别以航向角150°、速度12 m/s和330°、8 m/s作匀速直线运动; 一空中目标T以200 m/s的速度从高度2000 m到4000 m作机动飞行; 平台和目标的数据由作战仿真软件STAGE产生, 仿真剧情如图1所示.

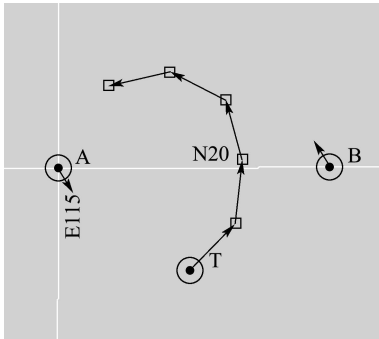


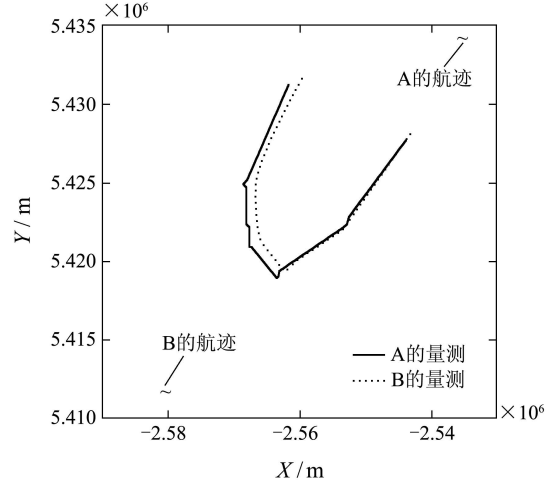
图1 仿真剧情示意图

Fig. 1 Situation map of scenario

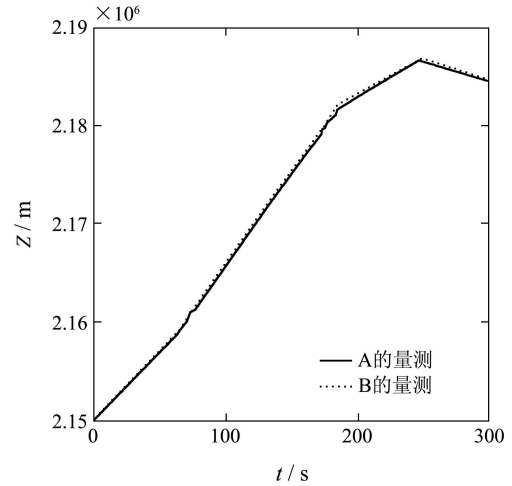
A, B分别对T进行300次测量, 采样周期为1 s. A, B具有相同的传感器偏差为 $\Delta r_b^A = \Delta r_b^B = 1 \text{ km}$, $\Delta q_b^A = \Delta q_b^B = \Delta \varepsilon_b^A = \Delta \varepsilon_b^B = 0.5^\circ = 8.727 \text{ m} \cdot \text{rad}$, 测量精度都为 $\sigma_{r^A} = \sigma_{r^B} = 50 \text{ m}$, $\sigma_{q^A} = \sigma_{q^B} = \sigma_{\varepsilon^A} = \sigma_{\varepsilon^B} = 0.5^\circ$. 所在舰艇的姿态角为 $C^A = 150^\circ$, $C^B = 330^\circ$, $\varphi^A = \varphi^B = \theta^A = \theta^B = 0^\circ$; 姿态误差为 $\Delta C^A = \Delta C^B = 0.1^\circ = 1.745 \text{ m} \cdot \text{rad}$, $\Delta \varphi^A = \Delta \varphi^B = \Delta \theta^A = \Delta \theta^B = 0.03^\circ = 0.534 \text{ m} \cdot \text{rad}$.

图2所示为两雷达未进行配准时的目标量测, 图2(a)为舰艇航迹和两传感器量测的 X, Y 轴地心坐

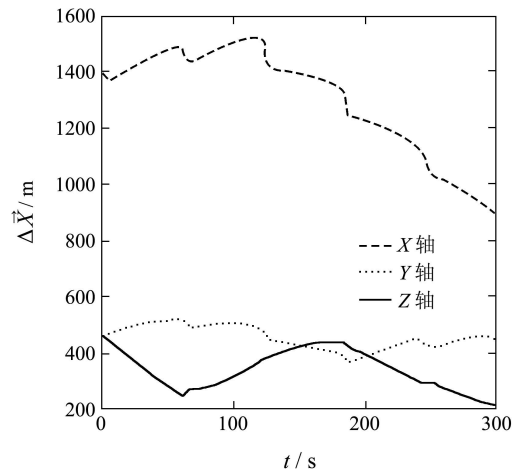
标, 图2(b)为两传感器量测的 Z 轴地心坐标, 图2(c)分别列出了地心坐标系 X, Y, Z 轴上两量测的差值, Y, Z 轴坐标的均值误差分别为454.9 m和338.3 m, 而 X 轴坐标的均值误差为1303.6 m, 最大甚至达到1515.8 m.



(a) 舰艇航迹和目标量测的 X, Y 轴地心坐标



(b) 目标量测的 Z 轴地心坐标



(c) 目标量测在地心坐标中的差值

图2 未配准的目标量测

Fig. 2 Unregistered target measurements

用本文的海上平台多传感器配准算法对配准误差进行估计和补偿,图3为配准过程中对姿态误差和传感器偏差估计值的变化曲线,图中的横向双划线

为仿真中预设的姿态误差和传感器偏差. 可以看出,在第 200 次观测之前,对配准误差的估计值均收敛于各误差分量的预设值.

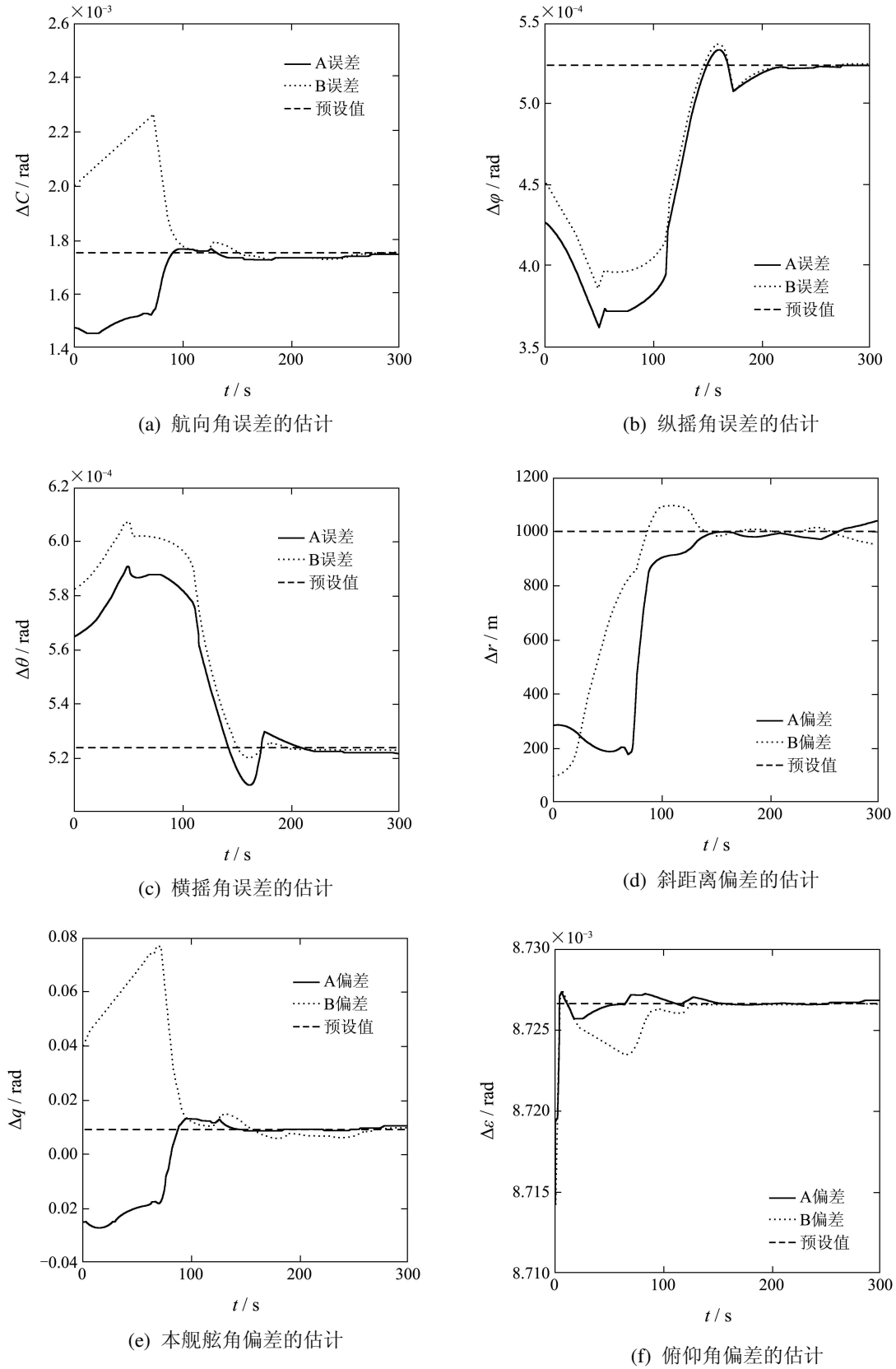
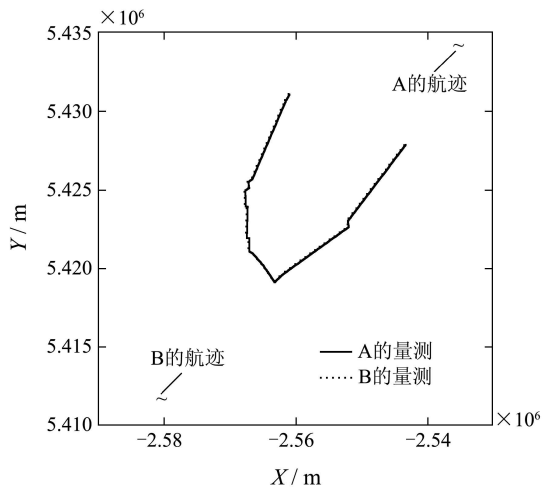


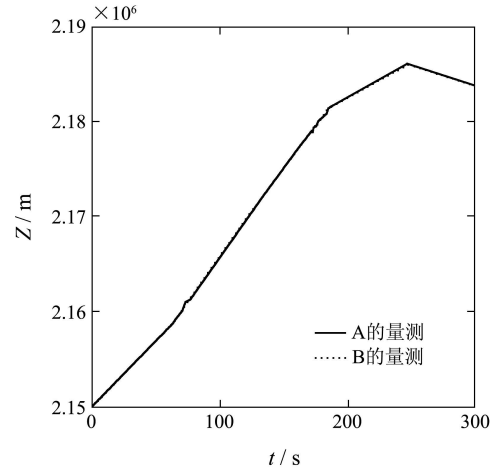
图 3 配准误差估计

Fig. 3 Estimate of registration error

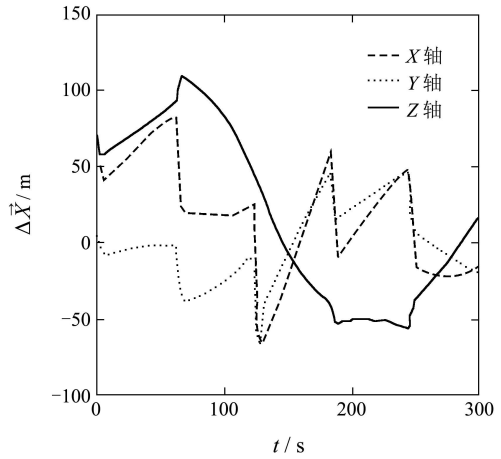
图4为配准后两量测的地心坐标,从图中看出,经过误差配准后,两传感器对目标的量测在X,Y,Z轴都能够较好地重合.图4(c)为配准后两传感器目标量测的差值,与图3(c)配准前量测差值相比,各坐标的最大误差和均值误差有较大幅度降低,如表1所示.配准前的误差同号、都为正值,均值较大,这主要是传感器偏差和姿态误差的原因.配准后误差均值下降到20m以内,说明配准算法对传感器偏差和姿态误差有效地补偿;误差在零值上下振荡,这主要是目标在不同地理位置时由于坐标变换精度和地球模型近似而残留的误差引起的,并且造成配准前后均方误差的下降不如均值误差明显.



(a) 舰艇航迹和目标量测的X, Y轴地心坐标



(b) 目标量测的Z轴地心坐标



(c) 目标量测在地心坐标中的差值

图4 配准后的目标量测

Fig. 4 Registered target measurements

表1 配准前后目标量测误差比较

Table 1 Comparison between unregistered and registered errors of target measurements

误差类型	X坐标误差/m		Y坐标误差/m		Z坐标误差/m	
	配准前	配准后	配准前	配准后	配准前	配准后
最大误差	1515.85	82.04	519.10	47.31	463.77	109.05
均值误差	1303.56	17.15	454.90	-0.32	338.27	18.10
均方误差	185.47	35.22	41.66	23.84	68.14	56.50

5 结论(Conclusion)

本文研究了海上平台进行多传感器配准的问题,当平台装备有高精度导航设备时,将传感器测量数据转换到地心坐标系下完成误差配准.首先给出海上平台在地心坐标系中进行多传感器数据位置对准的步骤,并对位置对准的数学模型进行推导,然后考虑海上环境的特点,用两传感器对同一目标进行测量,将两个量测值的地心坐标之差作为伪观测值,进行线性化处理,从而构建关于传感器偏差和舰艇姿态误差的伪测量模型,对配准

误差进行在线估计.地心坐标系下的海上平台多传感器配准算法,充分考虑了地球曲率对传感器配准的影响,不要求目标位置已知,并打破了传统离线地心坐标配准算法假定传感器偏差恒定的限制,可以实现海上平台的传感器配准,仿真结果表明该算法能够实时估计配准误差,有效地完成传感器配准.

参考文献(References):

- [1] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版

- 社, 2006.
(HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. *Multi-source Information Fusion*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.)
- [2] ZHOU Y F, LEUNG H, BLANCHETTE M. Sensor alignment with the Earth-Centered Earth-Fixed(ECEF) coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 410 – 418.
- [3] RISTIC B, OKELLO N. Sensor registration in ECEF coordinates using the MLR algorithm[C] // *Proceedings of the Sixth International Conference of Information Fusion*. Sunnyvale, CA: Int Soc Information Fusion, 2003, 7: 135 – 142.
- [4] 李教, 敬忠良, 王安. 基于地心坐标系的传感器极大似然配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(2): 245 – 249.
(LI Jiao, JING Zhongliang, WANG An. An maximum likelihood registration algorithm for sensor alignment based on Earth-Centered Earth-Fixed coordinate system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(2): 245 – 249.)
- [5] DONG Y L, HE Y, WANG G H. A generalized least squares registration algorithm with Earth-Centered Earth-Fixed(ECEF) coordinate system[C] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications*. New York: IEEE, 2004, 11: 79 – 84.
- [6] 李达, 李少洪. 一种新的地心地固坐标系传感器配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(1): 143 – 146.
(LI Da, LI Shaohong. New registration algorithm of sensor in earth-centered earth-fixed(ECEF) coordinate system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(1): 143 – 146.)
- [7] LI I T, GEORGANAS J. Multi-target multi-platform sensor registration in geodetic coordinates[C] // *Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion*. Sunnyvale, C A: Int Soc Information Fusion, 2002, 7: 366 – 373.
- [8] DELA E J, ALOUANI A T, RICE T R, et al. Sensor registration in multisensor systems[C] // *Proceedings of SPIE on Signal and Data Processing of Small Targets*. Orlando, USA: SPIE, 1992, 4: 382 – 393.
- [9] 王航宇, 王士杰, 李鹏. 舰载火控原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
(WANG Hangyu, WANG Shijie, LI Peng. *Principles of Shipborne Fire Control*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.)
- [10] HELMICK R, RICE T. Removal of alignment errors in an integrated system of two 3-d sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(4): 1333 – 1343.

作者简介:

王成飞 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为信息融合与协同控制, E-mail: wang.chengf@163.com;

王航宇 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为协同控制与火力控制, E-mail: wanghangyu@163.com;

石章松 (1975—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为目标跟踪与信息融合等, E-mail: shizhangsong@163.com;

占明锋 (1984—), 男, 助理工程师, 研究方向为导航与定位.

(上接第496页)

2) Young's 不等式.

引理 2^[4] 设 $a > 0$, $b > 0$, $p > 1$, $q > 1$, $\kappa > 0$, 且 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. 则有 $ab \leq \frac{\kappa a^p}{p} + \frac{\kappa^{-q/p} b^q}{q} \leq \kappa a^p + \kappa^{-q/p} b^q$. 特别地, 当 $p = q = 2$ 时, 上等变为 $ab \leq \frac{\kappa}{2} a^2 + \frac{1}{2\kappa} b^2$.

3) 输入到状态稳定性.

定义 1^[8] 系统

$$\dot{x} = f(x, \omega), \quad (24)$$

其中 f 关于 x 和 ω 满足局部 Lipschitz 条件. 如果存在 \mathcal{KL} 类函数 β 和 \mathcal{K} 类函数 γ , 对于任何 $x(0)$ 和任何连续并在 $[0, \infty)$ 上有界的输入 $\omega(\cdot)$, 使得当 $t \geq 0$ 时, 解 $x(t)$ 满足

$$\|x(t)\| \leq \beta(|x(0)|, t) + \gamma(\|\omega\|_\infty), \quad (25)$$

那么系统(24)是输入到状态稳定的(ISS).

引理 3^[8] 对于系统(24), 下面各性质等价:

① 系统是 ISS 的;

② 存在一个光滑正定的径向无界函数 V 和 \mathcal{K}_∞ 类函数 ρ_1 及 ρ_2 , 使得下面的耗散不等式成立:

$$\frac{\partial V}{\partial x} f(x, \omega) \leq -\rho_1(|x|) + \rho_2(|\omega|);$$

③ 系统是鲁棒稳定的.

作者简介:

陈虹 (1963—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为模型预测控制、最优和鲁棒控制以及它们在过程控制和机电系统中的应用, 本文通信作者, E-mail: chenh@jlu.edu.cn;

胡云峰 (1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为发动机控制和汽车电子, E-mail: huyunfeng83125@126.com;

郭宏志 (1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为发动机控制和汽车电子, E-mail: guohongzhi11111@163.com;

宋同好 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为发动机控制和汽车电子, E-mail: sth8502@163.com.