

基于并联平台的船舶运动测量及补偿

黄玲涛, 李晨旭, 张红彦

(吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对船舶在海浪作用下的多自由度复合运动补偿问题, 提出了一种基于并联平台模拟海浪的船舶运动测量及补偿算法, 包含姿态解算算法及升沉位移解算算法。首先, 搭建一个由 2 个六自由度并联平台串联的船舶运动补偿实验平台; 其次, 基于惯性测量单元, 采用卡尔曼滤波姿态解算算法对船舶模拟运动的横摇、纵摇姿态进行解算; 再次, 设计升沉位移解算算法, 该算法具有高通滤波、相位补偿及海浪频率自适应的特性; 最后, 进行船舶运动补偿实验。实验结果表明, 上置并联平台能够有效抑制海浪对船舶运动的影响, 显著提高船舶作业的平稳性。实验验证了本文所提算法的合理性及有效性, 为真实船舶运动补偿研究提供一种有效方法。

关键词: 自动化技术及设备; 卡尔曼滤波; 高通滤波; 相位补偿; 自适应

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2883-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240005

Ship motion measurement and compensation based on parallel platform

HUANG Ling-tao, LI Chen-xu, ZHANG Hong-yan

(School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem of multi-degree-of-freedom composite motion compensation of ships under the action of sea waves, a ship motion measurement and compensation algorithm based on a parallel platform to simulate sea waves was proposed, which includes an attitude calculation algorithm and a heave displacement calculation algorithm. First, a ship motion compensation experimental platform composed of two six-degree-of-freedom parallel platforms in series was built. Secondly, based on the inertial measurement unit, a Kalman filter attitude calculation algorithm was used to calculate the roll and pitch attitudes of the simulated ship motion. Thirdly, a heave displacement calculation algorithm was designed, featuring high-pass filtering, phase compensation, and sea wave frequency adaptability. Finally, ship motion compensation experiments were conducted. The experiments results showed that the upper parallel platform can effectively suppress the impact of sea waves on the ship's motion, significantly improving the stability of ship operations. The experiments validated the rationality and effectiveness of the proposed algorithm in this paper, providing an effective method for real ship motion compensation research.

Key words: automation technology and equipment; Kalman filtering; high-pass filtering; phase compensation; self-adaption

收稿日期: 2024-01-05.

基金项目: 吉林省重点研发计划项目(20200401130GX); 国家自然科学基金项目(51575219).

作者简介: 黄玲涛(1979-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 机器人技术. E-mail: hlt@jlu.edu.cn

通信作者: 张红彦(1973-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 智能机器人技术及应用. E-mail: zhanghy@jlu.edu.cn

0 引言

近年来,随着陆地资源不断衰竭,船舶在海洋资源开发领域得到了广泛应用,装备有石油开采钻井平台、海洋工程起重机和海底采矿设备的船舶被广泛应用于海上工程作业^[1,2]。由于海浪的影响,船舶在海域中会表现出6个自由度的运动,其中以横摇、纵摇和升沉3个方向为主^[3,4]。这些复杂的运动,对船上作业带来了一些不良影响,因此利用波浪补偿设备来补偿船舶在海域中产生的运动对于船用设备对接、飞机在船舶上安全着陆等船上作业至关重要^[5,6]。因为并联平台结构^[7,8]可以实现6个自由度的运动,所以本文利用该结构模拟船舶在波浪作用下横摇、纵摇和升沉3个方向的运动,并对这3个方向的运动补偿进行研究^[9]。

惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)技术的迅猛发展^[10-12],为船舶运动测量提供了更为精确的数据,成为航海工程领域的研究热点。目前,在船舶姿态解算方面,del Pizzo等^[13]利用图像处理技术,根据图像中地平线的位置和斜率获得船舶姿态角,但该方法容易受到海况突变和天气等因素的影响。黄伟等^[14]在长春理工大学通过IMU采集载体运动信息,利用卡尔曼滤波方法完成载体姿态估计,为本文研究提供了思路。

在船舶升沉位移解算方面,Godhaven^[15]利用高通数字滤波器技术,解决了基于加速度测量的升沉运动估计不稳定问题,该方法还被成功应用于Seatex MRU系统。严恭敏等^[16]设计了一种基于惯导和无时延滤波的升沉测量方法,解决了升沉信息解算存在的相位误差问题,但滤波器输出的升沉信息仍存在较大幅度误差。卢道华等^[17]利用无迹卡尔曼滤波算法对升沉运动进行了滤波解算,虽然得到精确的船舶升沉运动信息,但是该算法复杂性较高,导致升沉信息解算实时性较差。

在波浪的影响下,船舶的运动主要体现为横摇、纵摇和升沉3个方向。为实现船舶运动的精准测量及有效补偿,本文提出一种基于并联平台模拟海浪的船舶运动测量及补偿算法。该算法基于IMU采集的数据,能够对船舶横摇、纵摇和升沉3个方向的运动进行测量,并依据测量结果在并联平台上进行船舶运动反向补偿,最后设计了船舶运动补偿实验对其进行验证。

1 系统组成

本文研究的海浪自稳定系统框架示意图如图1所示,该系统由船舶运动模拟及船舶运动补偿2个系统组成,硬件主要包括2个串联的并联平台及IMU。其中,并联平台采用Stewart结构的六自由度运动平台^[18,19],IMU型号为mpu6050。具体工作流程如下。

下置并联平台:通过控制6个电动缸的长度改变其动平台的位姿,实现船舶甲板运动的模拟。IMU固连至其动平台上表面中心,实时监测下置并联平台的运动,并通过姿态解算算法解算动平台的位姿。

上置并联平台:利用IMU解算的位姿,根据下方的船舶运动补偿算法计算齐次变换矩阵,利用逆运动学原理控制上置并联平台运动,从而实现补偿。

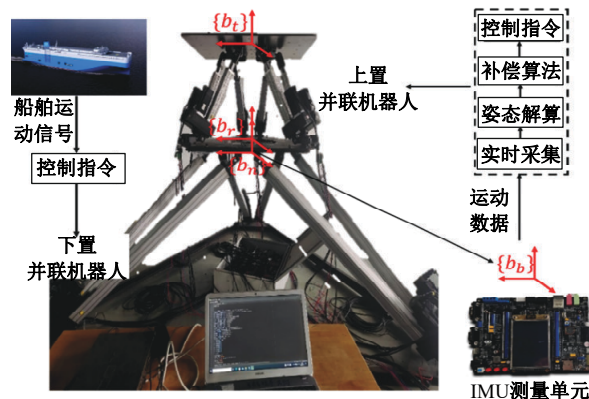


图1 海浪自稳定系统框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the self stabilizing system framework for waves

船舶运动补偿:图1中, $\{b_n\}$ 为静止坐标系(下置并联平台 z 方向移动至中位时其动平台对应坐标系); $\{b_b\}$ 为下置并联平台的动平台坐标系,也是IMU的坐标系; $\{b_r\}$ 为上置并联平台的静平台坐标系; $\{b_i\}$ 为上置并联平台的动平台坐标系。 $\{b_i\}$ 相对 $\{b_r\}$ 的齐次变换矩阵 $H_i^{r[20]}$ 为:

$$H_i^r = (H_b^n H_r^b)^{-1} H_i^n \quad (1)$$

式中: H_b^n 为根据IMU实时解算的变换矩阵; H_r^b 、 H_i^n 由并联平台的结构所决定。

$$H_b^n = T(Z)R(\theta)R(\psi) \quad (2)$$

式中: ψ 、 θ 分别为利用姿态解算算法实时解算的横摇、纵摇姿态角; Z 为利用升沉位移解算算法解算的升沉位移。

$$H_i^n=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&672.4\\0&0&0&0\end{pmatrix},H_r^b=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&10\\0&0&0&0\end{pmatrix}$$

(3)

船舶运动补偿算法的目标是保持 $\{b_i\}$ 与 $\{b_n\}$ 平行,并使 $\{b_i\}$ 的坐标原点始终位于 $\{b_n\}$ 的 z 方向 672.4 mm 处,从而实现 $\{b_i\}$ 相对 $\{b_n\}$ 保持静止。

2 船舶姿态解算

2.1 IMU 姿态解算

本文对基于加速度计的姿态解算算法(无融合算法)、互补滤波姿态解算算法(互补滤波算法)和卡尔曼滤波姿态解算算法(卡尔曼滤波算法)进行对比解算。其中,无融合算法仅依赖加速度计对船舶进行姿态解算^[21];卡尔曼滤波算法需要不断迭代计算,利用加速度计对陀螺仪误差进行实时补偿以获取最佳解^[22];而互补滤波算法则利用加速度计与陀螺仪的互补融合获得最佳解^[23]。

通过静态实验对比选择最佳算法。首先,令下置并联平台运动至中位,然后控制其动平台横摇运动 5°,纵摇运动 20°,期间 IMU 实时解算动平台的姿态。3 种方法静态实验对比曲线如图 2 所示。

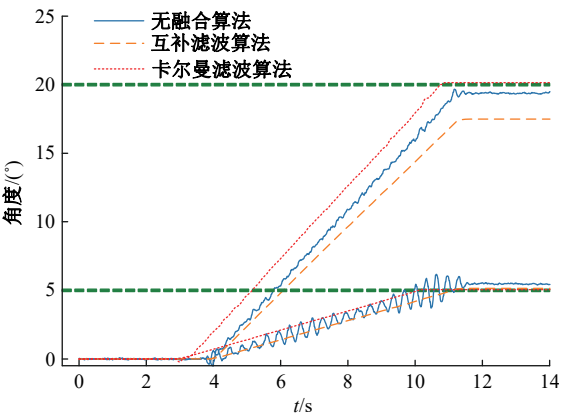


图 2 3 种方法静态实验对比曲线
Fig. 2 Comparison curves of static experiments using three methods

由图 2 可知,互补滤波算法与卡尔曼滤波算法有效地改善了无融合算法解算的姿态角震荡现象。比较系统稳定后解算数据与真实数据之间的误差,评估无融合算法、互补滤波算法和卡尔曼滤波算法的性能,对比数据如表 1 所示。

根据表 1 可知,卡尔曼滤波算法解算数据的

表 1 多种算法测量值误差对比
Table 1 Comparison of measurement errors using multiple algorithms (°)

算法	平均绝对误差		极差	
	横摇	纵摇	横摇	纵摇
无融合	0.43	0.58	1.01	0.89
互补滤波	0.14	2.52	0.14	2.90
卡尔曼滤波	0.05	0.15	0.05	0.15

准确性和稳定性较好,因此本文最终选择卡尔曼滤波算法进行姿态解算。

2.2 基本卡尔曼滤波算法双轴联合动态实验

真实波浪又称为随机波浪,可以分解为有限数量线性波浪,这些线性波浪具有不同的频率和振幅^[24],如下所示:

$$\eta(t)=\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t+\phi_i)$$

(4)

式中: $\eta(t)$ 为随机波浪; A_i 为振幅; ω_i 、 ϕ_i 分别为第 i 个波的角频率和相位角; ω_i 为; t 为时间。

由于真实海浪中船舶受海浪影响时的横摇角度大于纵摇角度,因此本文随机生成 3 个叠加的随机波以模拟船舶横摇方向的运动,并随机生成 2 个叠加的随机波以模拟船舶纵摇方向的运动。这些随机波的频率均在海浪谱能量集中频段 0.05~0.2 Hz^[25],图 3 为海况下横摇、纵摇双轴联合运动曲线。

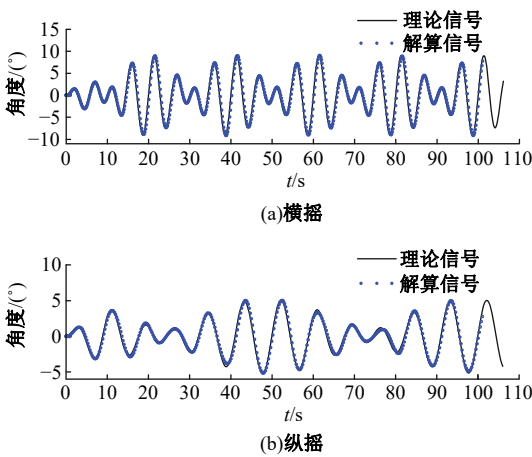


图 3 横摇、纵摇双轴联合运动曲线
Fig. 3 Joint motion curve of roll and pitch axes

对上述实验数据进行误差分析,计算得到横摇、纵摇方向的平均绝对值误差分别为 0.38°、0.15°。该实验验证了卡尔曼滤波算法的准确性。

3 船舶升沉位移解算

3.1 升沉位移解算方案

升沉运动的解算主要利用 IMU 采集到的升沉方向的加速度信息。由于加速度信息 $f^b = (a_x, a_y, a_z)$ 基于 $\{b_b\}$ 坐标系,随平台的上表面运动,而本节解算升沉信息需要载体的垂向加速度,因此需要将这些数据转换为基于半固定坐标系^[26]。半固定坐标系(s 系)随下置并联平台上表面运动,但不随其转动。经式(2)转换后的加速度信息 f^s 中, z 轴加速度即为相对于地面的垂向加速度。对该垂向加速度数据进行积分运算,可以得到下置平台上表面的升沉速度和升沉位移。上述转换过程需要使用第 2 节中利用卡尔曼滤波算法实时解算得到的横摇角和纵摇角,转换公式为:

$$f^s = C_b^s f^b \quad (5)$$

式中: C_b^s 为欧拉角形式的姿态转换矩阵。

$$C_b^s = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

升沉位移解算算法的流程图见图 4。

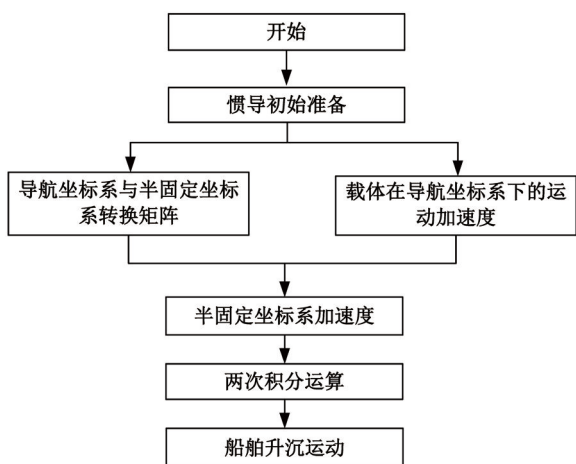


图 4 船舶升沉位移解算流程图

Fig. 4 Flow chart for calculating ship heave displacement

海浪的升沉运动可以近似为正弦曲线^[27]。首先进行一组测试实验,设定 z 轴正弦运动的特定参数,其中振幅为 30 mm,频率为 0.2 Hz。此外, z 轴

的初始位置设置为 0.3 m,作为运动的起始位置。图 5 为运动数据曲线,从中可以明显看出,采集的加速度信号中存在较多噪声。

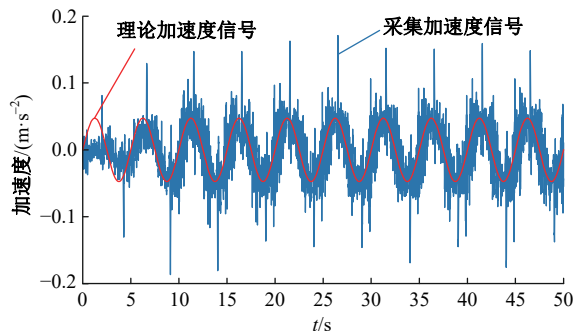


图 5 升沉加速度采集信号与理论信号对比

Fig. 5 Comparison between the acquisition signal of heave acceleration and theoretical signal

根据图 4 流程解算的升沉高度如图 6 所示。其中,实线代表下置并联平台的理论输入信号,虚线代表 IMU 根据采集的加速度信号解算出的船舶升沉高度。

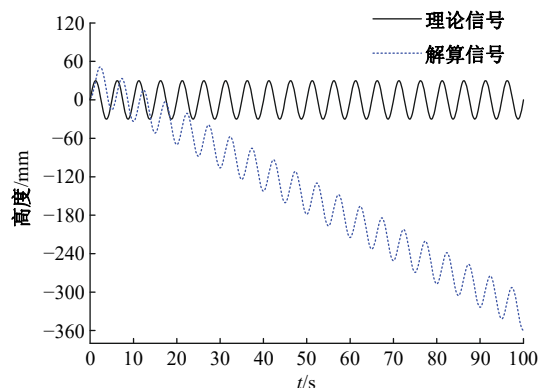


图 6 船舶升沉位移解算图像

Fig. 6 Image of ship heave displacement calculation

从图 6 可以明显看出,随着时间的推移,由于 IMU 采集的信息中存在较多的低频噪声,两次积分操作逐渐放大了低频信息的干扰,最终导致船舶升沉运动位移的解算呈现发散势。

3.2 升沉滤波器的设计

因为加速度计的低频干扰信息与海浪主频率存在差异,所以引入数字高通滤波器滤除加速度计中存在的低频干扰信息,以精确解算出船舶的升沉运动信息。为此,需要在加速度的两次积分环节前加入高通滤波器。本文选用四阶高通滤波器,其传递函数表达式为:

$$H_H(s) = \frac{s^4}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)^2} \quad (7)$$

式中: ξ 为高通滤波器的阻尼系数,取 $\sqrt{2}/2$; ω_n 为

高通滤波器的截止频率。

将高通滤波器同两次积分环节串联构成升沉滤波器,该滤波器既能有效滤除加速度信号中的零偏和噪声等低频干扰,又能对输入的加速度信号进行两次积分,得到船舶的升沉高度。升沉滤波器的传递函数为:

$$H_p(s) = \frac{1}{s^2} H_H(s) = \frac{s^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)^2} \quad (8)$$

升沉滤波器截止频率 ω_n 为0.07 Hz,其与两次积分的幅相频特性曲线如图7所示。

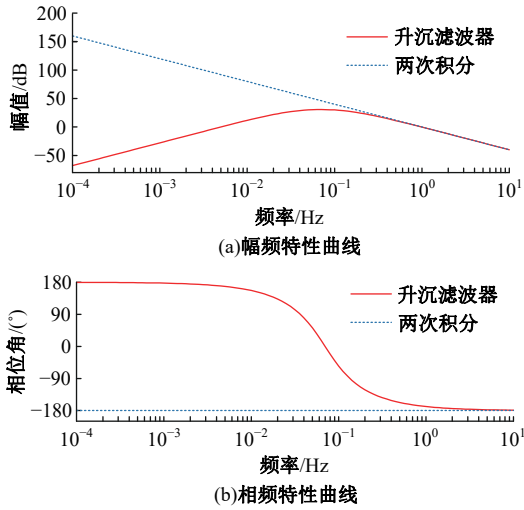


图7 升沉滤波器与两次积分幅相频特性曲线

Fig. 7 Heave filters and twice integrating amplitude and phase frequency characteristic curves

由图7(a)幅频特性曲线可知,升沉滤波器在低频段幅值衰减较大,能够有效滤除低频信息。在频率为0.05~0.2 Hz时,升沉滤波器和两次积分环节具有相似的幅频特性。因此,本文所设计的升沉滤波器不仅能有效滤除加速度计采集信号中的低频信息,还能在波浪频段内对输入的加速度信号进行两次积分。由图7(b)可知,升沉滤波器也会引起相位超前。

利用双线性变换,将式(8)从模拟滤波器转化成数字滤波器,转化结果如式(9)所示。式中出现的数值在本文中均保留至小数点后6位,实际应用中,应以实际软件生成数值为准。

$$H(z) = (1.050214 \times 10^{-5} z^4 - 2.100429 \times 10^{-5} z^2 + 1.050214 \times 10^{-5}) / (z^4 - 3.992537 z^3 + 5.977638 z^2 - 3.977667 z + 0.992565) \quad (9)$$

设定 z 轴正弦运动与图5相同,船舶升沉位移解算数据如图8所示。由图8可知,经升沉滤波器解算的船舶升沉位移信号得到了有效的抑制,但

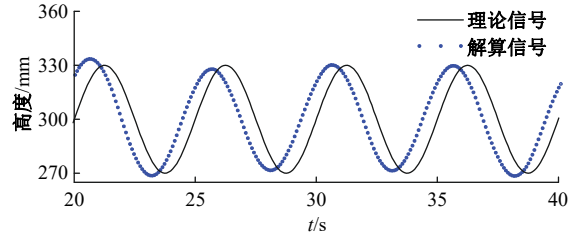


图8 升沉滤波器解算的升沉信号

Fig. 8 Heave signal calculated by the heave filter

是相位与图7(b)一致,解算后的升沉位移信号超前于理论的输入信号。

3.3 基于频率分析的相位校正

针对升沉滤波器引起的相位超前,通过Butterworth模拟低通滤波器 $H_{lp}(s)$ 即可实现相位补偿。Butterworth模拟低通滤波器的传递函数表达式为:

$$H_{lp}(s) = \left(\frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\xi\omega_1 s + \omega_1^2} \right)^2 \quad (10)$$

在引入Butterworth模拟低通滤波器进行相位补偿后,新的升沉滤波器的表达式为:

$$H_n(s) = H_p(s) H_{lp}(s) \quad (11)$$

整理得到:

$$H_n(s) = \left[\frac{\omega_1^2 s}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s^2 + 2\xi\omega_1 s + \omega_1^2)} \right]^2 \quad (12)$$

式中: ω_1 为低通滤波器的截止频率。

由此可得高通滤波器 $H_p(s)$ 和低通滤波器 $H_{lp}(s)$ 的相频响应表达式为:

$$\angle H_p(s) = \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{2} \omega \omega_n}{\omega^2 - \omega_n^2} \right) \right]^2 \quad (13)$$

$$\angle H_{lp}(s) = \left[\arctan \left(\frac{\sqrt{2} \omega \omega_1}{\omega^2 - \omega_1^2} \right) \right]^2 \quad (14)$$

为了对高通滤波器所产生的相位进行校正,需要确保低通滤波器的相位特性为:

$$\angle H_p(s) + \angle H_{lp}(s) = 0 \quad (15)$$

根据式(13)~式(15),可得模拟低通滤波器的截止频率为:

$$\omega_1 = \omega^2 / \omega_n \quad (16)$$

低通滤波器的截止频率与高通滤波器的截止频率及海浪的主频率相关,其中海浪的主频率通过快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)获得。对升沉解算信号频率为0.2 Hz、幅值为30 mm的加速度信号,进行FFT分析,得到的结果如图9所示。

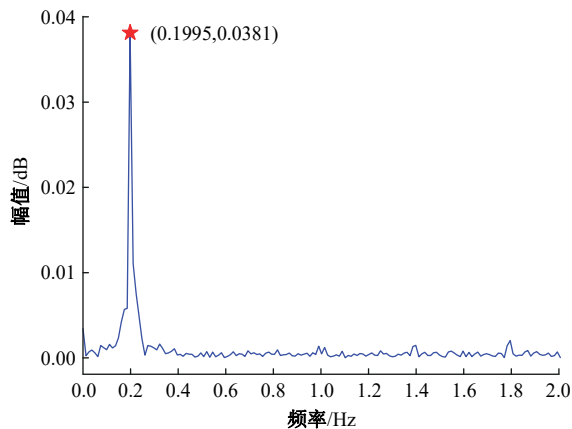


图 9 基于 FFT 的频率估计图像

Fig. 9 Frequency estimation image based on FFT

基于 FFT 频率估计的结果显示,信号在频率为 0.199 5 Hz 处达到峰值,因此可以有效提取式(12)中船舶运动信号的主频信息,完成相位校正。加入相位校正后,船舶升沉解算数据如图 10 所示。由图 10 可知,加入低通滤波器进行相位校正后,船舶升沉解算数据的超前现象得到显著的改善。

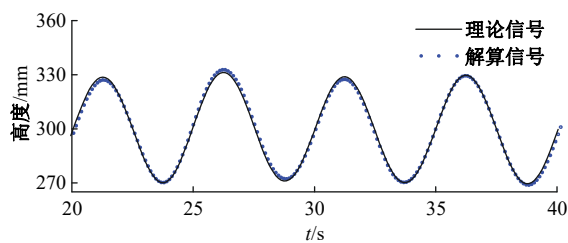


图 10 新的升沉滤波器解算的升沉信号

Fig. 10 New heave filter calculates the heave signal

3.4 自适应滤波器方案设计

鉴于海域中海浪频率具有随机性,海浪主频率会随机发生变化,可能导致解算的升沉信号精度大幅降低。设定 z 轴正弦运动与图 5 相同,前 120 s 频率设置为 0.1 Hz,在 120 s 时刻升沉频率变化为 0.2 Hz。实验结果如图 11 所示。

从图 11 可以发现,当海浪主频率发生变换

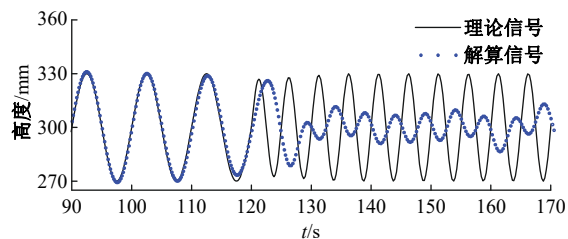


图 11 未加频率自适应环节实验曲线

Fig. 11 Experimental curve without frequency adaptive link added

时,固定参数的低通滤波器会导致信号解算误差较大。为提高算法的鲁棒性,本文加入了滑动监测窗口,利用 FFT 实时监测和分析海况,进而自适应确定低通滤波器的截止频率。图 12 为自适应滤波器设计流程。

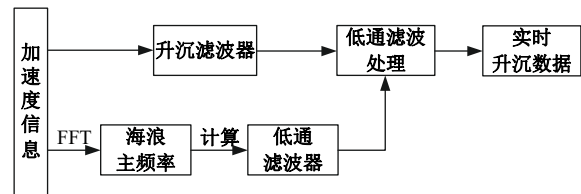


图 12 自适应滤波器设计方案

Fig. 12 Adaptive filter design scheme

设定 z 轴正弦运动的特定参数与图 11 中的参数一致。高通滤波器截止频率仍为 0.07 Hz,低通滤波器的截止频率根据监测窗口数据获得,实验结果如图 13 所示。当频率发生变化时,滤波器解算需要调整时间,导致初始 IMU 解算的升沉信号与理论信号存在显著偏差。然而,当升沉解算数据稳定后,滤波器能够有效跟踪并联平台的运动。

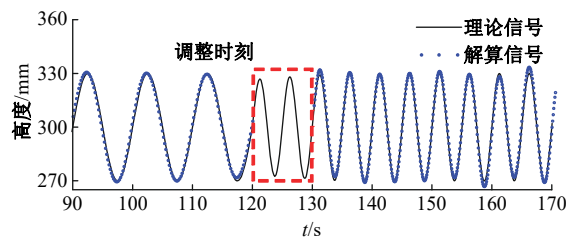


图 13 加入频率自适应环节实验曲线

Fig. 13 Experimental curve of adding frequency adaptive link

4 实验结果及分析

为进一步验证所提方法的有效性,本文开展了三轴联合运动实验。横摇、纵摇方向按照 2.2 节中生成的随机波进行测试,升沉方向设定振幅为 30 mm,前 60 s 频率为 0.1 Hz,在 60 s 时刻升沉频率变化为 0.2 Hz。实验中,下置平台按照横摇、纵摇、升沉 3 个方向的信号动态连续运动,如图 14 所示,蓝色曲线代表 $\{b_i\}$ 的位姿变化,红色曲线代表 $\{b_i\}$ 的初始设定位置,黑色曲线代表 $\{b_b\}$ 的输入信号,即船舶运动模拟信号。

根据图 14 可知,补偿平台的中心位置基本保持在初始位置附近,图 14(b)中的 60~70 s 为滤波器参数调整时间。为了评估补偿精度,对实验数据进行补偿误差分析,选取最大绝对值误差

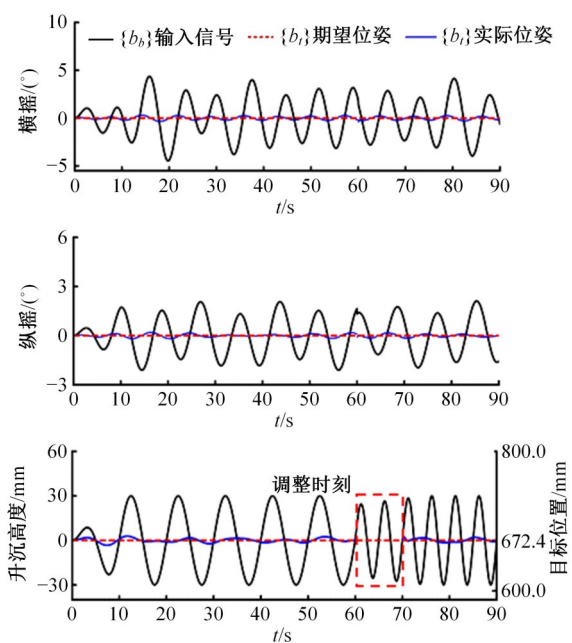


图 14 运动激励下上置并联平台中心位置

Fig. 14 Center position of upper parallel platform under motion excitation

$|e|_{\max}$ 、标准差 σ_e 及平均绝对误差 MAE 3 个指标分析补偿精度,结果如表 2 所示。其中,升沉数据的误差表征相对于目标位置 672.4 mm 的偏差。

表 2 运动补偿系统误差

Table 2 Motion compensation system error			
性能指标	横摇/(°)	纵摇/(°)	升沉/mm
$ e _{\max}$	0.41	0.21	7.04
σ_e	0.08	0.05	1.58
MAE	0.13	0.07	1.87

根据上述数据分析和实验人员对实验台的观察,在运动补偿过程中,上置并联平台的动平台在横摇、纵摇和升沉方向上出现了轻微的起伏和位移,这一现象证明了本文提出的补偿算法的有效性。该现象的产生原因有两个:①传感器自身的信号采集精度有限;②前文所提测量算法获得的测量信号与理论信号存在微小误差。

5 结束语

为提高船舶作业的稳定性,本文构建了一个由 2 个六自由度并联平台串联的船舶运动补偿实验平台。通过静态实验对比 3 种姿态解算算法,最终选择了卡尔曼滤波算法作为船舶运动姿态解算算法。同时,设计了船舶升沉位移解算算法,并根据海浪频率设计了高通数字滤波器,有效解决了升沉位移解算中数据发散的问题。在此基础

上,提出相位校正方法,校正了数字高通滤波器引入的相位误差,有效提高了升沉解算的实时性。此外,采用滑动窗口和快速傅里叶变换,自适应地确定相位校正方案中低通滤波器的截止频率。通过实验验证,本文设计的算法能够有效抑制模拟船舶运动引起的上置平台位姿变化,上置并联平台的横摇、纵摇和升沉 3 个方向的实时补偿平均绝对误差分别为 0.13°、0.07°和 1.87 mm,这一精度的补偿效果能够显著提高船舶作业的平稳性。本文的研究工作可为真实船舶运动补偿提供一种有效方法,具有一定的实际意义。

参考文献:

[1] 张哲,郑国富,丁兰,等. 福建省海洋工程装备产业现状与发展对策探讨[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(5): 114-118.

Zhang Zhe, Zheng Guo-fu, Ding Lan, et al. The industrial status and developing countermeasures of marine engineering equipment in Fujian province[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(5): 114-118.

[2] 刘贤胜. 船用起重机主动升沉补偿控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2016.

Liu Xian-sheng. Research on active heave compensation control system for marine cranes[D]. Harbin: School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, 2016.

[3] From P J, Gravdahl J T, Abbeel P. On the influence of ship motion prediction accuracy on motion planning and control of robotic manipulators on seaborne platforms[C]//Proceeding of International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, N J: IEEE, 2010: 5281-5288.

[4] 付怀达. 基于 IMU 的船舶纵横摇及升沉信息测量技术研究[D]. 镇江:江苏科技大学机械工程学院, 2021.

Fu Huai-da. Research on information measurement technology of ship pitch roll and heave based on IMU [D]. Zhenjiang: School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, 2021.

[5] 陈远明,叶家玮,宋鑫. 波浪运动补偿稳定平台系统的设计与建模[J]. 机床与液压, 2007, 35(10): 115-117,170.

Chen Yuan-ming, Ye Jia-wei, Song Xin. Design and modeling of a wave motion compensating stable platform system[J]. Machine Tool and Hydraulic,

- 2007, 35(10): 115-117, 170.
- [6] 王守平. 外军海上补给装备发展趋势[J]. 航海, 2007(4): 26-27.
Wang Shou-ping. The development trend of foreign naval supply equipment[J]. Navigation, 2007(4): 26-27.
- [7] Henriksen V W, Roine A G, Skjong E, et al. Three-axis motion compensated crane head control[J]. IF-AC-Papers OnLine, 2016, 49(23): 159-166.
- [8] Harib K, Srinivasan K. Kinematic and dynamic analysis of stewart platform-based machine tool structures[J]. Robotica, 2003, 21(5): 541-554.
- [9] 黎锐. 船用吊运机械臂工况模拟与运动补偿控制研究[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2019.
Li Rui. Research on ship motion simulation and mechanical arm lifting motion compensation control[D]. Changchun: School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2019.
- [10] Suzuki T. Attitude-estimation-free GNSS and IMU integration[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(2): 1090-1097.
- [11] Liu X K, Wen W S, Hsu L T. GLIO: Tightly-coupled GNSS/LIDAR/IMU integration for continuous and drift-free state estimation of intelligent vehicles in urban areas[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 142-144.
- [12] Akbari A, Rahemi F, Khosrowjerdi M J, et al. Roll and pitch estimation from IMU data using an LPV H_∞ filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: No. 9511110.
- [13] del Pizzo S, Gaglione S, Angrisano A, et al. Reliable vessel attitude estimation by wide angle camera[J]. Measurement, 2018, 127: 314-324.
- [14] 黄伟, 田明, 冯进良, 等. 基于模糊卡尔曼滤波的姿态估计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2023, 46(2): 120-127.
Huang Wei, Tian Ming, Feng Jin-liang, et al. Pose estimation based on fuzzy Kalman filtering[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 46 (2): 120-127.
- [15] Godhaven J M. Adaptive tuning of heave filter in motion sensor[C]//Proceedings of the IEEE Oceanic Engineering Society, OCEANS'98. Piscataway, N J: IEEE, 1998: 174-178.
- [16] 严恭敏, 苏幸君, 翁浚, 等. 基于惯导和无时延滤波器的舰船升沉测量[J]. 导航定位学报, 2016, 4(2): 91-93.
Yan Gong-min, Su Xing-jun, Weng Jun, et al. Measurement of ships heave motion based on INS and zero-phase-delay digital filter[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4 (2): 91-93.
- [17] 卢道华, 付怀达, 王佳, 等. 基于IMU与UKF的船舶升沉运动信息测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(7): 1323-1331.
Lu Dao-hua, Fu Huai-da, Wang Jia, et al. Measurement method of ship's heave motion information based on IMU and UKF algorithm[J]. Journal of Beihang University, 2021, 47 (7): 1323-1331.
- [18] 马建明, 何景峰, 熊海国, 等. 六自由度运动模拟器振动控制策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(2): 511-516.
Ma Jian-ming, He Jing-feng, Xiong Hai-guo, et al. Vibration control strategy for six-DOF motion simulator[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40 (2): 511-516.
- [19] 刘香福. 海浪补偿模拟系统的优化设计及实验分析[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2018.
Liu Xiang-fu. The optimal design and experimental analysis of wave compensation simulation system[D]. Changchun: School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2018.
- [20] 倪涛, 黎锐, 缪海峰, 等. 船载机械臂末端位置实时补偿[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(6): 2028-2035.
Ni Tao, Li Rui, Miao Hai-feng, et al. Real time compensation of the end position of shipborne robotic arms[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(6): 2028-2035.
- [21] 陶幸. 基于IMU的人体动作捕捉方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学电子信息学院, 2022.
Tao Xing. Research on human motion capture method based on IMU[D]. Nanjing: School of Electronic Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [22] 廖坤男, 郭玉英. 基于改进自适应卡尔曼滤波的姿态解算方法研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(6): 154-159.
Liao Kun-nan, Guo Yu-ying. An improved adaptive Kalman filter based attitude estimation algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45 (6): 154-159.
- [23] 余义, 章政. 单球驱动自平衡机器人的互补滤波姿态解算[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(4): 154-159.

- 969-975.
- Yu Yi, Zhang Zheng. Complementary filtering pose solution for a single ball driven self balancing robot [J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40 (4): 969-975.
- [24] Wampler C W. Forward displacement analysis of general six-in-parallel SPS (Stewart) platform manipulators using soma coordinates[J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(3): 331-337.
- [25] 邸瑛琳. 基于惯性导航的升沉测量系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学航天学院, 2020.
- Di Ying-lin. Research on heave measurement system based on inertial navigation[D]. Harbin: School of Aerospace Science, Harbin Institute of Technology, 2020.
- [26] 黄荣. 基于惯性测量和数字滤波的舰船升沉运动计算方法研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院, 2019.
- Huang Rong. Research on calculation method of ship heave motion based on inertial measurement and digital filtering[D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 2019.
- [27] 陈琦, 李格伦, 李智刚. 用于船舶升沉运动估算的自适应数字滤波器[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26 (4): 421-427.
- Chen Qi, Li Ge-lun, Li Zhi-gang. Adaptive digital filter for vessel's heave motion estimation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26 (4): 421-427.