

移动装备捷联惯性导航系统误差补偿技术研究*

杨海 李威 张金尧 司卓印 应葆华

(中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116)

摘要: 以农用机械或者采矿装备等移动装备为研究对象,采用捷联惯导对移动装备位姿进行检测,基于运动载体振动建立了捷联惯导误差补偿模型。首先,对运动载体的角振动和线振动进行等效处理,推导了基于三子样和四子样的捷联惯导圆锥误差以及划船误差补偿模型;其次,搭建捷联惯导定位平台并在农用机械上进行实验研究;实验结果表明三子样和四子样补偿算法能够提高未补偿算法下的捷联惯导定位精度,且四子样补偿算法下的圆锥误差和划船误差较三子样补偿算法分别提高了29.8%和28.3%。

关键词: 移动装备 定位定姿 捷联惯导系统 误差补偿 振动特性

中图分类号: V249.32^{*2}; TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0361-06

Error Compensation Technology of Strapdown Inertial Navigation System for Mobile Equipment

Yang Hai Li Wei Zhang Jinyao Si Zhuoyin Ying Baohua

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The positioning error for strapdown inertial navigation system of mobile equipment will be increased when it works in the environment with strong vibration. Taking agricultural machinery, mining equipment and other mobile equipments as the research objects, the position and orientation of mobile equipment were measured with strapdown inertial navigation system (SINS) and the SINS error compensation model was built based on the vibration form of mobile equipment. Firstly, the magnitude-frequency characteristics and vibration properties were analyzed based on the acceleration and angular velocity which were measured by SINS. The angular vibration and linear vibration of mobile equipment were equivalently processed and the coning/sculling error compensation models for SINS with three samples and four samples algorithms were derived according to the SINS solution theory. Secondly, the experimental platform of SINS was built with agricultural machinery which was used for planning and fertilizing the fields. The SINS was fixedly installed on the agricultural machinery. The SINS data was sent to the positioning computer through two wireless transmission modules. The power was supplied for the SINS and one wireless transmission module through an external mobile power module. Finally, experimental results indicated that positioning accuracy of SINS can be increased with three samples and four samples compensation algorithms, and its accuracy was superior to that with non-compensation model. The coning error and sculling error of SINS with four samples algorithm were increased by 29.8% and 28.3% compared with those of three samples algorithm, respectively.

Key words: Mobile equipment Position and pose Strapdown inertial navigation system Error compensation Vibration characteristics

收稿日期: 2015-04-08 修回日期: 2015-05-13

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA06A411)、江苏省研究生培养创新工程资助项目(KYLX_1374)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 杨海, 博士生, 主要从事移动目标定位研究, E-mail: yanghaicumt@163.com

通讯作者: 李威, 教授, 博士生导师, 主要从事机电装备智能控制及检测应用研究, E-mail: cmecumt512@yahoo.com

引言

移动装备定位定姿技术在国民经济中具有广泛的应用,尤其是在农业自动化以及采矿自动化领域发挥着越来越重要的作用^[1]。精确的位姿定位技术能够应用于农作物的自主灌溉、机器人收割、施肥以及果蔬自动化采摘等领域,提高农业的高产高效及自动化水平^[2]。在煤矿领域应用主要实现矿井运输机械的自动导航、综采工作面“三机”自动化以及采煤机自适应调高等,实现煤矿井下工作面无入、少人自动化开采,提高煤炭开采效率,减少煤矿安全事故发生^[3]。

GPS 导航技术以其稳定、可靠以及广域等优势,使得应用越来越广泛,然而 GPS 在树林、山区以及城市中 GPS 信号容易受到遮挡,产生粗大定位误差,并且在室内和矿井下无法接收卫星信号等,使得 GPS 无法得以广泛应用^[4-5]。捷联惯性导航系统(Strapdown inertial navigation system, SINS)利用测量载体自身的加速度和角速度,通过积分解算来实时获取载体的位置和姿态信息,在短时间内具有定位精度高、定位信息全面以及数据更新率高等特点,适合农业机械以及采矿机械的定位以此来弥补 GPS 定位的不足^[6]。然而由于农用机械以及采矿机械工作环境恶劣,在运行过程中捷联惯导系统会受到各种各样的干扰,其中机械振动是影响定位精度的最主要因素之一^[7]。

捷联惯性导航系统采用的是数学平台,比起平台式惯性导航系统,因其敏感元件直接固联在运动载体上,工作环境更加恶劣,并且由于 SINS 直接感知载体的加速度和角速度信息,因此振动引起的误差更加严重^[8]。在诸多误差源中,载体的角振动和线振动引起的误差是 SINS 特有的,也是影响其精度的主要因素。SINS 的惯性器件固连于运载体上,系统通过姿态更新建立数学平台隔离载体的角运动^[9-10]。因惯性器件频带宽度和计算机信息处理速率的限制,以及惯性器件自身误差等因素,SINS 的数学平台不能完全隔离运载体的角运动^[11]。运动载体在工作时,由于齿轮偏心,运动间隙以及地面凹凸不平等因素,都会引起运动载体的角振动和线振动。当运动载体沿各正交机体轴存在同频率的两种振动时,数学平台的不完全隔离会诱发整流分量^[12]。其中,角振动在姿态更新计算中产生圆锥误差^[13];角振动和线振动在速度计算中产生划船误差^[14],在位置计算中产生涡卷误差^[15]。国内外学者们对上述误差进行了研究^[16-17]。

目前基于捷联惯导的移动装备振动误差补偿定

位研究主要集中在理论建模及算法仿真阶段,本文提出一种基于移动装备振动状态监测的捷联惯导振动误差补偿方法以及复杂振动环境下的移动装备定位定姿实验系统构建方案。在作业拖拉机上进行现场实验,以期验证捷联惯导在复杂振动环境下移动装备上定位的适用性,从而实现捷联惯导实时精确位姿信息输出,为捷联惯导在恶劣振动环境下定位提供实践支持。

1 定位模型

根据运动载体的振动特性,可以将载体的任一方向振动等效为沿 3 个轴向方向的线振动和角振动,且对线振动和角振动进行频谱分析,得到运动载体的主振型,并对主振型进行等效分析,开展针对运动载体振动形式的 SINS 误差研究。为了提高 SINS 解算算法的精度,需对 SINS 振动引起的圆锥误差和划船误差进行补偿。

1.1 系统坐标系构建

在研究移动装备 SINS 定位时,首先要选定一个移动装备的参考坐标系,如地面,才能知晓载体的地理位置及其航向与水平姿态。本文主要用到地球坐标系(e 系)、导航坐标系(n 系)和载体坐标系(b 系)。

(1) 地球坐标系($O_e X_e Y_e Z_e$)

地球坐标系与地球固连,并以大小为 $\omega_{ie} = 15.040\ 107$ ($^\circ$)/h 的地球自转角速度不断旋转变换,一般用经纬度和高度来描述该坐标系下的运载体位置。

(2) 载体坐标系($O_b X_b Y_b Z_b$)

载体系固连于运载体,以载体质心为坐标原点,载体纵轴(侧倾轴)为 Y_b 轴,向前为正;将载体横轴(俯仰轴)作为 X_b 轴且向右为正; Z_b 轴(偏航轴)沿竖轴向上。

(3) 导航坐标系($O_n X_n Y_n Z_n$)

导航坐标系作为定位系统导航基准的坐标系,一般根据实际需要来选取,该坐标系原点一般设在移动装备的重心,其坐标轴 X_n 、 Y_n 、 Z_n 轴分别指向地球正东方向、地理正北方向和天向,通常称为“东-北-天”坐标系。

1.2 移动装备的振动等效

移动装备的线振动和角振动在某一方向上的分量可以分解成由多个单一频率的正弦分量与随机噪声的叠加,即

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_j^b(t) = \sum_{i=1}^n L_i \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) + v_\omega(t) \\ \tilde{a}_j^b(t) = \sum_{i=1}^n M_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + v_a(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\hat{\omega}_j^b(t)$ 、 $\hat{a}_j^b(t)$ ——载体坐标系下运动载体的角振动和线振动
 L_i 、 M_i ——角振动和线振动频率分量的幅值
 ω_i ——频率分量的角速度
 ε_i 、 φ_i ——角振动和线振动的相位角
 $v_\omega(t)$ 、 $v_a(t)$ ——角振动和线振动的噪声分量

j ——载体坐标系三轴分量, $j = x, y, z$

由于 SINS 的采样频率限制以及其对 SINS 的解算特性, SINS 主要对低频的机械振动敏感, 且低频的振动幅值一般较大。故本文主要研究运动载体线振动和角振动低频、大振幅下两阶振动分量, 对式(1)进行化简得

$$\begin{cases} \hat{\omega}_j^b(t) = L_1 \sin(\omega_1 t + \varepsilon_1) + L_2 \sin(\omega_2 t + \varepsilon_2) \\ \hat{a}_j^b(t) = M_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + M_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (2)$$

1.3 角振动补偿算法

载体坐标系 b 相对于导航坐标系 n 存在一个具有 2 个频率分量的正弦角振动。设定振动单位方向矢量为 $[\sin\alpha\cos\beta \quad \cos\alpha\cos\beta \quad \sin\beta]$, 则某一方向振

$$\Delta\theta_m(i) = \int_{t_{m-1}+(i-1)h}^{t_{m-1}+ih} \omega_{nb}^b(t) dt = \begin{bmatrix} 2\sin\alpha\cos\beta [L_1 \sin(\omega_1 h/2) \cos(\omega_1(t_{m-1} + ih - h/2)) + L_2 \sin(\omega_2 h/2) \cos(\omega_2(t_{m-1} + ih - h/2))] \\ 2\cos\alpha\cos\beta [L_1 \sin(\omega_1 h/2) \cos(\omega_1(t_{m-1} + ih - h/2)) + L_2 \sin(\omega_2 h/2) \cos(\omega_2(t_{m-1} + ih - h/2))] \\ 2\sin\beta [L_1 \sin(\omega_1 h/2) \cos(\omega_1(t_{m-1} + ih - h/2)) + L_2 \sin(\omega_2 h/2) \cos(\omega_2(t_{m-1} + ih - h/2))] \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用陀螺的角增量输出并且采用二次曲线和三次曲线拟合载体角速度^[18], 分别得到圆锥误差三子样算法和四子样算法的表达式:

三子样算法

$$\Phi_3(h) = \sum_{i=1}^3 \Delta\theta_m(i) + \frac{9}{20} \Delta\theta_m(1) \times \Delta\theta_m(3) + \frac{27}{40} \Delta\theta_m(2) \times (\Delta\theta_m(3) - \Delta\theta_m(1)) \quad (7)$$

四子样算法

$$\Phi_4(h) = \sum_{i=1}^4 \Delta\theta_m(i) + \frac{214}{315} (\Delta\theta_m(1) \times \Delta\theta_m(2) + \Delta\theta_m(3) \times \Delta\theta_m(4)) + \frac{46}{105} (\Delta\theta_m(1) \times \Delta\theta_m(3) + \Delta\theta_m(2) \times \Delta\theta_m(4)) + \frac{54}{105} \Delta\theta_m(1) \times \Delta\theta_m(4) + \frac{214}{315} \Delta\theta_m(2) \times \Delta\theta_m(3) \quad (8)$$

式中 $\Phi_3(h)$ 、 $\Phi_4(h)$ —— h 时间段内三子样和四子样算法下的旋转矢量

按照理论分析认为用于拟合的子样数越高, 才能够较真实地反映载体的角运动情况。考虑到

动的载体四元数表示为

$$Q_s(t) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\omega}_j^b(t)) \\ \sin\alpha\cos\beta\sin(\hat{\omega}_j^b(t)) \\ \cos\alpha\cos\beta\sin(\hat{\omega}_j^b(t)) \\ \sin\beta\sin(\hat{\omega}_j^b(t)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

且四元数的微分方程形式表示为

$$\dot{Q}_s(t) = Q_s(t) \otimes \omega_{nb}^b(t) / 2 \quad (4)$$

其中

$$\omega_{nb}^b(t) = 2Q_s(t)^* \otimes \dot{Q}_s(t) = \begin{bmatrix} \sin\alpha\cos\beta(\hat{\omega}_j^b(t)) \\ \cos\alpha\cos\beta(\hat{\omega}_j^b(t)) \\ \sin\beta(\hat{\omega}_j^b(t)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\omega_{nb}^b(t)$ ——载体 b 系到 n 系的角速度

通过式(5)看出 $\omega_{nb}^b(t)$ 的所有分量都是关于余弦函数的。将 t_{m-1} 到 t_m 时刻等分为 N 个时间间隔, 且每一个时间间隔的时间为 $h = T/N$ 。陀螺在单位时间间隔内的角增量输出 $\Delta\theta_m(i)$ 为

移动装备的角振动主要是低频振动, 增加解算的子样数会带来姿态更新的计算量大大增加, 故这里选取三子样和四子样作为移动装备角振动的补偿算法。

1.4 线振动补偿算法

由于移动装备存在沿两正交轴同频的角振动和线振动, 根据式(2)可得

$$f^b(t) = [\hat{a}_x^b(t) \quad \hat{a}_y^b(t) \quad \hat{a}_z^b(t)]^T \quad (9)$$

忽略地球自转对载体产生的影响, 且载体在单位时间间隔内的速度增量 $\Delta v_m(i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 为

$$\Delta v_m(i) = \int_{t_{m-1}+(i-1)h}^{t_{m-1}+ih} f^b(t) dt = [\Delta v_{mx} \quad \Delta v_{my} \quad \Delta v_{mz}]^T \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta v_{mj} = & -2\omega_{1j} M_{1j} \sin(\omega_{1j} h/2) \cdot \\ & \sin(\omega_{1j}(t_{m-1} + ih - h/2) + \varphi) - \\ & 2\omega_{2j} M_{2j} \sin(\omega_{2j} h/2) \sin(\omega_{2j}(t_{m-1} + ih - h/2) + \varphi) \end{aligned} \quad (j = x, y, z)$$

根据划船误差补偿理论^[19], 可以得到划船误差的补偿公式为:

三子样算法

$$\Delta \hat{\mathbf{v}}_{sculm3} = \frac{9}{20} (\Delta \boldsymbol{\theta}_m(1) \times \Delta \mathbf{v}_m(3) + \Delta \mathbf{v}_m(1) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(3)) + \frac{27}{40} (\Delta \boldsymbol{\theta}_m(1) \times \Delta \mathbf{v}_m(2) + \Delta \boldsymbol{\theta}_m(2) \times \Delta \mathbf{v}_m(3) + \Delta \mathbf{v}_m(1) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(2) + \Delta \mathbf{v}_m(2) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(3)) \quad (11)$$

四子样算法

$$\Delta \hat{\mathbf{v}}_{sculm4} =$$

$$\frac{54}{105} (\Delta \boldsymbol{\theta}_m(1) \times \Delta \mathbf{v}_m(4) + \Delta \mathbf{v}_m(1) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(4)) + \frac{46}{105} (\Delta \boldsymbol{\theta}_m(1) \times \Delta \mathbf{v}_m(3) + \Delta \mathbf{v}_m(1) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(3) + \Delta \boldsymbol{\theta}_m(2) \times \Delta \mathbf{v}_m(4) + \Delta \mathbf{v}_m(2) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(4)) + \frac{214}{315} (\Delta \boldsymbol{\theta}_m(1) \times \Delta \mathbf{v}_m(2) + \Delta \mathbf{v}_m(1) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(2) + \Delta \boldsymbol{\theta}_m(3) \times \Delta \mathbf{v}_m(4) + \Delta \mathbf{v}_m(3) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(4) + \Delta \boldsymbol{\theta}_m(2) \times \Delta \mathbf{v}_m(3) + \Delta \mathbf{v}_m(2) \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m(3)) \quad (12)$$

式中 $\Delta \hat{\mathbf{v}}_{sculm3}$ 、 $\Delta \hat{\mathbf{v}}_{sculm4}$ ——三子样和四子样算法下划船效应补偿项

由圆锥误差补偿算法中得到的移动装备姿态等效旋转矢量来构造姿态变化四元数,然后根据四元数理论可以得到描述刚体旋转的姿态变换矩阵。利用文献[20]中的姿态角解算公式得到载体在导航坐标系 n 下的横滚角 γ 、俯仰角 θ 和偏航角 ψ 。将划船误差补偿中得到的划船效应补偿项 $\Delta \hat{\mathbf{v}}_{sculm}$ 代入捷联惯导速度更新算法中,进行划船误差补偿下的移动装备捷联惯导速度解算,并结合姿态更新算法中的姿态角进行位置解算,最终得到移动装备在导航坐标系 n 下的精确位姿信息。

2 实验

2.1 实验平台搭建

利用捷联惯导定位系统在农用机械上进行位姿跟踪实验。移动装备选用向阳红-1004型拖拉机并悬挂旋耕、施肥机进行作业。并且在图1工作现场图中标注出了拖拉机定位信息的导航坐标系 ($O_n X_n Y_n Z_n$) 与载体坐标系 ($O_b X_b Y_b Z_b$)。捷联惯导固定安装在移动装备机身上,并通过无线通信模块进行数据传输,安装移动电源模块分别对捷联惯导以及无线通信模块进行供电。定位主机固定放置在作业地块附近并通过无线通信模块实时接收捷联惯导发送的数据,实现捷联惯导定位数据的无线传输。实验系统搭建结构框图如图2所示。捷联惯导定位系统工作现场布置如图3所示。

采用基于6自由度的惯性测量单元 ADIS16350的捷联惯导系统,其中惯性测量单元模块包括三轴陀螺仪和三轴加速度计。系统采用 TMS320C6713 DSP 为核心的信号处理系统,具有强大的数据处理

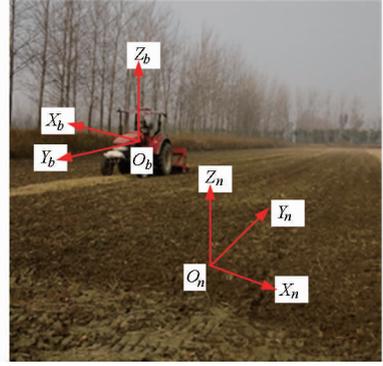


图1 农用机械工作现场图

Fig. 1 Working site for agricultural machinery

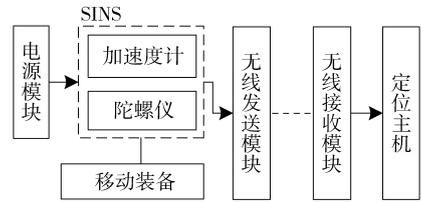


图2 系统搭建结构框图

Fig. 2 Structure diagram of experimental platform



图3 捷联惯导定位系统现场布置图

Fig. 3 Experimental scene for SINS

1. 移动装备
2. 定位主机
3. 无线通信模块
4. 捷联惯导
5. 电源

能力。陀螺仪和加速度计输出的数据通过无线数据传输模块传给定位主机,波特率为 115 200 bit/s,采样周期为 0.01 s。系统主要技术参数如下:

(1) 三轴陀螺仪: 动态数字范围 $\pm 300 (^{\circ})/s$, 14 位分辨率,角速度测量精度 $0.073 3 (^{\circ})/s$, 温度灵敏度漂移 $\pm 0.05\% / ^{\circ}C (-20 \sim 75^{\circ}C)$ 。

(2) 三轴加速度计: $\pm 10 g$ 测量范围, 350 Hz 带宽, 加速度测量灵敏度 $2.78 \times 10^{-3} g$, 出厂灵敏度和漂移经过校准。

(3) 无线数据传输模块: 采用蓝牙串口模块 WE-40, 支持分时一对多通讯, 最大的传输波特率为 1 382 400 bit/s, 最大通信距离 100 m, 可实现数据的稳定高效传输。

2.2 移动装备捷联惯导误差补偿实验

利用捷联惯导定位实验平台在“向阳红”拖拉机上进行定位实验。将捷联惯导实验平台开机运行,拖拉机在麦田中进行旋耕、施肥作业,并按照直线路径行走,并完成从启动、加速、稳定作业到减速停车的一系列流程。拖拉机行走 30 m, 设定其初始位置为 $x_0 = (0, 0, 0)$; 初始速度为 $v_0 = (0, 0, 0)$; 经过初始对准后惯导的初始姿态角为 $\gamma = 0.38^\circ$, $\theta = 1.56^\circ$, $\psi = 56.43^\circ$ 。实验采集 6 000 个采样点, 运行时间 60 s。

对捷联惯导实时测量得到载体坐标系 (b 系) 下的时域加速度和角速度信号进行快速傅里叶变换下的频谱分析, 得到拖拉机运行过程中加速度和角速度的频率-幅值分布图, 如图 4 和图 5 所示。由图可以看出, 由于拖拉机运行环境复杂, 地面不平整、发动机转动以及悬挂旋耕、施肥机的转动都会引起拖拉机机身不同频率下的振动。捷联惯导测得拖拉机的角振动和线振动在所对应的 2 个频率上面出现峰值, 则说明振动的能量主要集中在这 2 个频率上, 且其对捷联惯导振动误差影响最大。提取出振动幅值最大的 2 个频率分量及对应的幅值, 对拖拉机的振动形式进行等效, 得到拖拉机捷联惯导的等效线振动与等效角振动。

利用本文前面推导的角振动和线振动补偿算法对等效振动形式进行解算。分别针对不补偿情况、三子样以及四子样补偿算法对捷联惯导的圆锥误差和划船误差进行精度分析。得到的圆锥误差和划船误差在不同子样数补偿算法下的计算结果如图 6 和图 7 所示。其中图 6 表示捷联惯导在不同子样数补偿算法下的圆锥误差曲线, 图 7 表示捷联惯导在不同子样数补偿算法下的划船误差曲线。

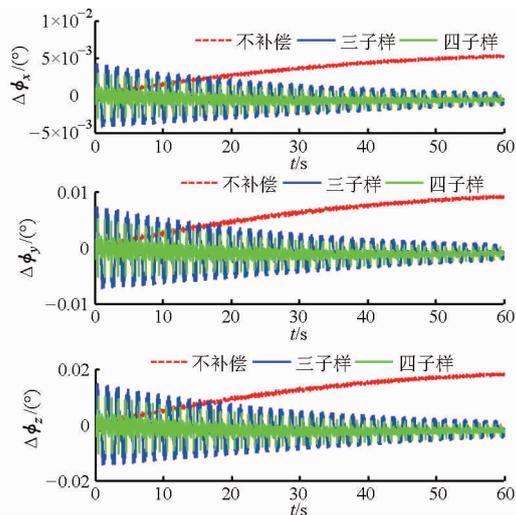


图 6 捷联惯导不同子样数补偿下圆锥误差曲线
Fig. 6 SINS coning error curves with different multi-sample algorithms

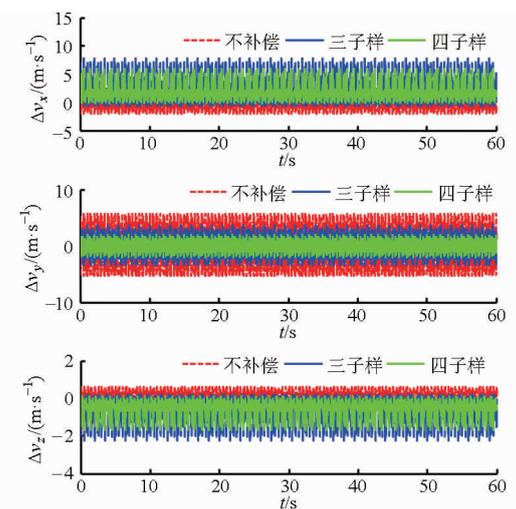


图 7 捷联惯导不同子样数补偿下划船误差曲线
Fig. 7 SINS sculling error curves with different multi-sample algorithms

由图 6 可以看出在拖拉机振动环境下的捷联惯导圆锥误差在三子样和四子样补偿算法下呈现波动趋势并且随着时间推移出现误差收敛的现象。然而由于四子样补偿算法是采用三次函数来拟合载体角速度的, 相比于利用二次函数来拟合载体角速度的三子样算法其圆锥误差在相同的波动趋势下误差幅值更小。其中三子样和四子样补偿算法下的圆锥误

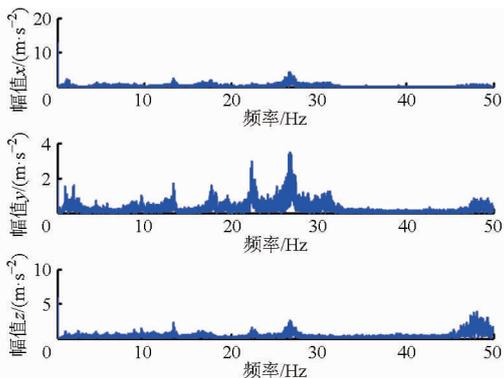


图 4 捷联惯导线振动幅频特性

Fig. 4 Spectrum characteristic of linear vibration for SINS

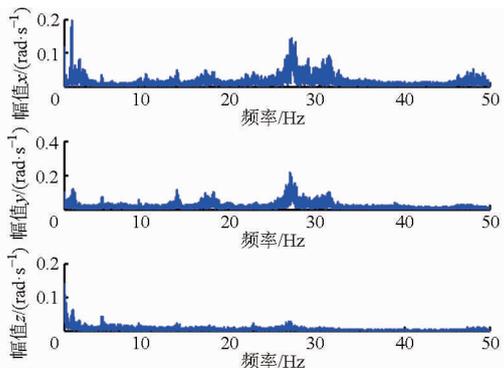


图 5 捷联惯导角振动幅频特性

Fig. 5 Spectrum characteristic of angular vibration for SINS

差最大值分别为 0.0252° 和 0.0177° 。然而由图可以看出不补偿算法下的圆锥误差在系统开始时呈小幅波动并且从零点开始发散,随着时间的推移发散一直持续,其圆锥误差要远大于采用三子样和四子样算法下的圆锥误差。四子样圆锥误差补偿算法下的捷联惯导在角振动情况下具有较好的定位性能。

图7为捷联惯导在三子样和四子样补偿算法下以及在不补偿算法下的划船误差曲线。由图中可以看出不同子样数补偿算法下的划船误差均呈周期性波动,且波动幅值稳定。随着补偿算法的不同,其对应的划船误差的幅值也不同。采用三子样补偿下的划船误差的幅值大于四子样划船误差,由于三子样划船误差补偿是采用二次函数来逼近拟合载体的速度增量,相比于采用三次函数拟合的四子样算法精度较低。三子样和四子样补偿算法下的捷联惯导划船误差最大值分别为 8.6268 m/s 和 6.1842 m/s 。然而采用不补偿算法的划船误差大于采用三子样和四子样补偿算法下的划船误差。由于不补偿算法是

直接利用载体的速度增量进行解算,不对其进行拟合,使得其计算误差增大。不补偿算法下的划船误差最大值为 15.3573 m/s 。四子样划船误差补偿算法下的捷联惯导具有较好的定位性能。

3 结束语

针对农业和采矿业等复杂工作环境下移动装备捷联惯导定位系统受载体振动影响较大的情况,提出了一种基于线振动和角振动特性的捷联惯导圆锥误差和划船误差补偿方法。农用拖拉机作业时进行捷联惯导定位实验,结果表明:在复杂振动环境下四子样圆锥误差补偿算法优于采用三子样以及不补偿算法下的圆锥误差;四子样划船误差补偿算法同样优于三子样以及不补偿算法,且四子样圆锥误差和划船误差分别为 0.0177° 和 6.1842 m/s ,相对三子样补偿算法下的圆锥误差和划船误差分别提高 29.8% 和 28.3% ,在复杂振动环境下具有较高的定位性能。

参 考 文 献

- 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44-54.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):44-54. (in Chinese)
- 李建平,林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(9):232-236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(9):232-236. (in Chinese)
- 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山-借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报,2012,37(3):357-365.
Wu Lixin, Wang Yunjia, Ding Enjie, et al. Thirdly study on digital mine; serve for mine safety and intellimine with support from IoT [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3):357-365. (in Chinese)
- 周建军,王秀,张睿,等. 农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统定位方法[J]. 农业机械学报,2013,43(增刊1):263-265.
Zhou Jianjun, Wang Xiu, Zhang Rui, et al. GPS/DR integrated navigation positioning method for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,43(Supp. 1):263-265. (in Chinese)
- 吕振,刘丹,李春光. 基于捷联惯性导航的井下人员精确定位系统[J]. 煤炭学报,2009,34(8):1149-1152.
Lü Zhen, Liu Dan, Li Chunguang. The precise positioning system of the mine personnel in coal pit based on strapdown inertial navigation [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8):1149-1152. (in Chinese)
- Wu Y X, Pan X F. Velocity/position integration formula part II: application to strapdown inertial navigation computation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2013,49(2):1024-1034.
- 罗成名,李威,杨海,等. 移动目标位姿同步跟踪技术研究[J]. 农业机械学报,2014,45(10):47-52.
Luo Chengming, Li Wei, Yang Hai, et al. Synchronized position and pose tracking technology for mobile target[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):47-52. (in Chinese)
- Zheng B, Yang J F. Vibration analysis of base structure on SINS using PZT actuators[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2012,20(6):901-913.
- Suh Y S. Inertial sensor-based smoother for gait analysis [J]. Sensors, 2014,14(12):24338-24357.
- 杨海,李威,罗成名,等. 基于捷联惯导的采煤机定位定姿技术实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2550-2556.
Yang Hai, Li Wei, Luo Chengming, et al. Experimental study on position and attitude technique for shearer using SINS measurement[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(12):2550-2556. (in Chinese)
- Li Q, Ben Y Y, Zhu Z J, et al. A ground fine alignment of strapdown INS under a vibrating base[J]. The Journal of Navigation, 2013,66(1):49-63.
- Savage P G. Coning algorithm design by explicit frequency shaping[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2010, 33(4):1123-1132.
- Ignagni M. Optimal sculling and coning algorithms for analog-sensor systems[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012,35(3):851-860.

- 16 徐腊梅, 肖金生, 潘牧, 等. 基于电化学模型的 PEM 燃料电池建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(5): 933-936.
Xu Lamei, Xiao Jinsheng, Pan Mu, et al. Modeling and simulation of PEM fuel cell based on electrochemical model[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(5): 933-936. (in Chinese)
- 17 陈静, 王登峰, 刘彬娜. 燃料电池-蓄电池-超级电容混合动力汽车控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 36-39.
Chen Jing, Wang Dengfeng, Liu Binna. Control strategy of fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 36-39. (in Chinese)
- 18 Wai Rong-Jong, Jhung Shih-Jie, Liaw Jun-Jie, et al. Intelligent optimal energy management system for hybrid power sources including fuel cell and battery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3231-3244.
- 19 Yu Ruihong, Li Yanqin, Cai Jianxian. Maximum power point tracking from a wind turbine emulator using a DC-DC converter controlled[J]. International Journal of Control and Automation, 2014, 7(1): 117-128.
- 20 李玉芳, 林逸, 何洪文. 燃料电池混合动力汽车能源系统优化配置[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 39-42.
Li Yufang, Lin Yi, He Hongwen. Optimization study on power system configuration for fuel cell hybrid vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 39-42. (in Chinese)
- 21 王猛, 孙泽昌, 卓桂荣, 等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 6-10.
Wang Meng, Sun Zechang, Zhuo Guirong, et al. Braking energy recovery system for electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 6-10. (in Chinese)

(上接第 366 页)

- 14 Zhang T, Chen K, Fu W X, et al. Optimal two-iteration sculling compensation mathematical framework for SINS velocity updating [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 1065-1071.
- 15 严恭敏, 周琪, 翁浚, 等. 捷联惯导系统内杆臂补偿方法及试验验证[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 62-67.
Yan Gongmin, Zhou Qi, Weng Jun, et al. Inner lever arm compensation and its test verification for SINS [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 62-67. (in Chinese)
- 16 Kang C W, Cho N I, Park C G. Approach to direct coning/sculling error compensation based on the sinusoidal modelling of IMU signal[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2012, 7(5): 527-534.
- 17 Lai J Z, Lv P, Liu J Y, et al. Noncommutativity error analysis of strapdown inertial navigation system under the vibration in UAVs[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9: 1-8.
- 18 汤传业, 陈熙源, 李博天. 基于新的圆锥补偿结构的姿态算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(5): 580-586.
Tang Chuanye, Chen Xiyuan, Li Botian. Attitude algorithm based on a novel coning correction structure [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(5): 580-586. (in Chinese)
- 19 Zhang T, Chen K, Fu W X, et al. Optimal two-iteration sculling compensation mathematical framework for SINS velocity updating [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(6): 1065-1071.
- 20 赵欣, 王仕成, 杨东方, 等. 一种改进的高动态捷联惯导解算算法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 163-169.
Zhao Xin, Wang Shicheng, Yang Dongfang, et al. Improved algorithm for high dynamic strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2): 163-169. (in Chinese)

(上接第 371 页)

- 14 Miao Z, Xu J L, Yang X F, et al. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 75(22): 1065-1075.
- 15 Wei D H, Lu X S, Lu Z, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1113-1119.
- 16 Chang J C, Chang C W, Hung T C, et al. Experimental study and CFD approach for scroll type expander used in low-temperature organic Rankine cycle [J]. Apply Thermal Engineering, 2014, 73(2): 1444-1452.
- 17 Miao Z, Yang X F, Xu J L, et al. Development and dynamic characteristics of an organic Rankine cycle [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33): 4367-4378.
- 18 Gao P, Jiang L, Wang L W, et al. Simulation and experiments on an ORC system with different scroll expanders based on energy and exergy analysis [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 75(22): 880-888.
- 19 Yun E, Kim D, Yoon S Y, et al. Experimental investigation of an organic Rankine cycle with multiple expanders used in parallel [J]. Applied Energy, 2015, 145: 246-254.
- 20 Wu Z, Pan D, Gao N, et al. Experimental testing and numerical simulation of scroll expander in a small scale organic Rankine cycle system [J]. Apply Thermal Engineering, 2015, 87(5): 529-537.