

# 基于光电扫描/捷联惯导系统的室内组合导航算法研究

王 姣 杨凌辉\* 黄 喆 史慎东 黄 东

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 提出了一种基于光电扫描和捷联惯性导航系统(SINS)的组合导航算法。基于实际测量结果,对车间测量定位系统(wMPS)动态测量数据进行时间序列分析,证明了wMPS动态测量误差可以通过一阶自回归过程建模。基于SINS的误差模型和wMPS动态测量误差的时间序列分析结果,建立了室内组合导航系统卡尔曼滤波模型,并进行了算法仿真实验。仿真结果表明,组合导航系统同时具有SINS的高数据率和wMPS的高精度,系统整体性能得到了极大提升。

**关键词** 测量; 光电扫描; 捷联惯性导航系统; 组合导航; 卡尔曼滤波; 时间序列分析

**中图分类号** V241.6 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.101201

## Indoor Integrated Navigation Algorithm Based on Photoelectric Scanning and Strapdown Inertial Navigation System

Wang Jiao Yang Linghui Huang Zhe Shi Shendong Huang Dong

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China

**Abstract** One algorithm for integrated navigation based on photoelectric scanning and strapdown inertial navigation system (SINS) is proposed. Based on the actual measurement results, the time series analysis of wMPS dynamic measurement data is established, and it is proved that a first-order autoregressive process can be applied to model the wMPS dynamic measurement errors. Based on the SINS error model and the time series analysis result of the wMPS dynamic measurement data, the Kalman filtering model of indoor integrated navigation system is established, and the algorithm simulation experiment is conducted. The simulation results indicate that the integrated navigation system simultaneously possess the advantages of high data rate of SINS and high precision of wMPS. The whole performance of this system is significantly enhanced.

**Key words** measurement; photoelectric scanning; strapdown inertial navigation system; integrated navigation; Kalman filtering; time series analysis

**OCIS codes** 120.5800; 120.4640; 120.2440

## 1 引言

车间测量定位系统(wMPS)已广泛应用于工业现场移动物体的动态跟踪或静态物体的实时测量中<sup>[1]</sup>。作为新型分布式绝对坐标测量定位系统<sup>[2]</sup>,wMPS具有测量范围大、360°全空间扫描及多目标探测等独特性能<sup>[3-5]</sup>。然而,当利用wMPS对动态目标进行实时测量或导航时,其性能受限于较低的测量数据更新率。另外,当工厂环境比较复杂时,wMPS发射站与接收器之间的光路极易被遮挡,导致测量结果无法更新。天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室长期从事基于光电扫描的分布式空间三维坐标测量定位系统的理

**收稿日期:** 2016-05-17; **收到修改稿日期:** 2016-06-06; **网络出版日期:** 2016-09-21

**基金项目:** 国家科技重大专项(2010ZX04007-052)

**作者简介:** 王 姣(1992—),女,硕士研究生,主要从事移动机器人组合导航方面的研究。E-mail: wangjiao@tju.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: yanglh.tju@gmail.com

论研究及性能优化工作,取得了诸多进展<sup>[6-8]</sup>,单点坐标静态测量精度优于 0.3 mm,动态精度优于 0.7 mm,数据更新率最高可达 30 Hz。

捷联惯性导航系统(SINS)具有高度的自主性,不需要任何外来信息也不向外辐射任何信息,可在任何介质及条件下实现导航,且能输出位置、速度、方位和姿态等多种导航参数,数据更新率处于千赫兹量级。若能将 SINS 应用于室内,并与 wMPS 组合使用,不但能提升系统的整体数据更新率,还可以有效解决光电测量系统易受遮挡的问题,导航系统的整体性能可得到极大提升。

基于此思想,本文对如何通过系统组合提升测量数据更新率的问题进行了研究。为了实现两系统数据的融合,本文采用了卡尔曼滤波算法<sup>[9]</sup>,且分析了各子系统误差<sup>[10]</sup>,利用时间序列分析方法及动态坐标实测实验结果完成了 wMPS 动态坐标测量误差的建模,推导了基于卡尔曼滤波的室内系统组合导航方程;根据模型及滤波方程,通过 Matlab 对上述算法进行了仿真验证。结果表明,通过该方法,室内组合导航系统的理论精度可达 1.9 mm。

## 2 wMPS 和 SINS 组合系统

### 2.1 wMPS 坐标测量原理

wMPS 三维坐标测量系统主要由激光发射站、光电接收器、信号处理器及终端计算机组成,如图 1 所示。激光发射站工作时,旋转头带动两扫描光平面一同旋转,转速为  $\omega$ 。当旋转头转至某一特定位置,向空间发射激光脉冲信号作为计时起点  $t_0$ 。当两束扫描激光信号扫过接收器时,光电接收器分别记录激光光束扫描时刻  $t_i$ ,得出光电接收器相对于激光发射站的扫面角  $\theta_i = \omega(t_i - t_0)$ <sup>[1,11]</sup>。

以双发射站测量系统为例,当发射站的激光平面扫过接收器时,系统的测量方程(激光平面方程)为

$$a_i(\theta_i)x_i + b_i(\theta_i)y_i + c_i(\theta_i)z_i + d_i(\theta_i) = 0, \quad (1)$$

式中  $a_i, b_i, c_i, d_i$  为初始光平面参数,可由标定得到;  $(x_i, y_i, z_i)$  表示接收器的坐标;当  $i=1,2$  时,  $\theta_i$  为第一个激光发射站的两个扫描光平面相对于光电接收器的扫描角;当  $i=3,4$  时,式中  $\theta_i$  为第二个激光发射站相对于光电接收器的扫描角。

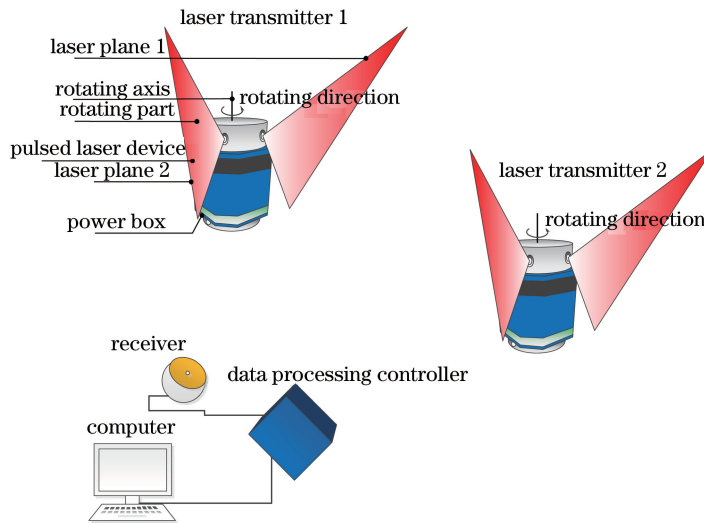


图 1 wMPS 坐标测量系统

Fig. 1 wMPS coordinate measurement system

光平面系数方程为

$$\begin{bmatrix} a_i(\theta_i) \\ b_i(\theta_i) \\ c_i(\theta_i) \\ d_i(\theta_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

一个接收器连同两个发射站可以确定 4 个光平面方程,通过最小二乘原理,计算 4 个平面的交点,即为光电接收器在 wMPS 坐标系下的坐标。

## 2.2 SINS 速度位置更新

在惯性导航系统中,陀螺和加速度计输出的角速度和加速度信息按一定算法处理后,得到离散时间点上的航向、姿态、速度及位置导航解<sup>[12]</sup>。

### 2.2.1 速度算法

取地理坐标系(东北天坐标系)作为导航坐标系,速度方程为

$$\dot{\mathbf{V}}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{V}^n + \mathbf{g}^n, \quad (4)$$

式中  $n$  表示导航坐标系; $b$  表示运载体自身坐标系; $i$  表示地心惯性坐标系; $e$  表示地球坐标系; $\mathbf{f}^b$  为 SINS 输出的加速度; $\mathbf{V}^n$  表示运载体在导航坐标系下的运动速度; $\mathbf{g}^n$  表示重力加速度; $\mathbf{C}_b^n$  为  $b$  系到  $n$  系的旋转矩阵,由三个欧拉角确定; $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n = [0, \boldsymbol{\omega}_{ie} \cos L, \boldsymbol{\omega}_{ie} \sin L]^T$ ,  $\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \left[ -\frac{v_N}{R_M+h}, \frac{v_E}{R_N+h}, \frac{v_E}{R_N+h} \tan L \right]^T$ ,  $R_N, R_M$  表示地球曲率半径, $\boldsymbol{\omega}_{ie}$  表示地球自转角速度, $\boldsymbol{\omega}_{en}$  表示运载体在地球表面运动的角速度, $L$  表示运载体所在纬度, $h$  表示运载体所在高度。

被测目标在室内平稳地自主运动,速度较低,不存在机动,因此计算速度时可不考虑旋转效应和划桨效应。设速度更新周期为  $T_s$ ,且  $T_s = t_m - t_{m-1}$ ,  $m > 1$ ,则  $t_m$  时刻运载体在导航坐标系下的速度为

$$\mathbf{V}_m^n = \mathbf{V}_{m-1}^n + \mathbf{C}_b^n \int_{t_{m-1}}^{t_m} \mathbf{f}^b dt + \int_{t_{m-1}}^{t_m} [\mathbf{g}^n - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{V}^n] dt. \quad (5)$$

### 2.2.2 位置算法

惯性器件均以增量形式输出测量信息,因此速度和姿态只在各自更新时间点上才有输出,位置也只能根据离散时间点上的速度和角增量来求取。 $t$  时刻运载体在导航坐标系下的坐标  $(x_t, y_t, z_t)$  为

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + V_x^{t-1} \Delta t \\ y_t = y_{t-1} + V_y^{t-1} \Delta t, \\ z_t = z_{t-1} + V_z^{t-1} \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中  $V_x^{t-1}, V_y^{t-1}, V_z^{t-1}$  表示导航坐标系下的运载体速度分量。初始时刻运载体的坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  由初始定位可知。

## 2.3 离散卡尔曼滤波

组合导航是根据最小方差估计准则,采用某种统计最优的方法,通过间接的、粗糙的和具有不确定性的观测值对载体的位置、速度、航向和姿态等导航参数和状态进行估计,实现信息的最优融合。合适的滤波算法是组合导航的核心和关键。

卡尔曼滤波是一种线性、无偏、以误差方差最小为估计准则的最优估计算法,分为直接法滤波和间接法滤波。直接滤波法是直接以各子系统的导航参数作为状态来实现组合导航的滤波,间接滤波法是以导航参数的误差量作为状态量,滤波后校正惯导模块的输出数据。由于卡尔曼滤波要求数学模型是一阶的,直接法无法满足线性方程条件,因此采用间接性离散卡尔曼滤波对组合导航的信息进行融合<sup>[10,13]</sup>。

## 2.4 组合导航系统数学模型建立

### 2.4.1 组合导航系统状态方程

导航坐标系是以运载体所在地表为原点,以正东、正北、与指向地心相反的方向三个方向为坐标轴建立的坐标系。SINS 的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{F}_1(t) \mathbf{X}_1(t) + \mathbf{G}_1(t) \mathbf{W}_1(t), \quad (7)$$

式中  $I$  表示 SINS 系统;  $\mathbf{X}_I(t) = [\delta x, \delta y, \delta h, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \epsilon_E, \epsilon_N, \epsilon_U, \nabla_E, \nabla_N, \nabla_U, \phi_E, \phi_N, \phi_U]^T$ , 变量依次表示导航坐标系三个方向的位置误差、速度误差  $\mathbf{v}^n$ 、陀螺仪一阶马尔科夫误差  $\boldsymbol{\epsilon}^n$ 、加速度计漂移  $\nabla^n$  和失准角误差  $\boldsymbol{\Phi}^n$ ; 状态误差  $\mathbf{W}_I(t) = [\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}, \omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}]^T$ , 变量依次表示三个方向的陀螺仪白噪声误差和加速度计白噪声误差; 噪声驱动矩阵  $\mathbf{G}_I(t)$  为

$$\mathbf{G}_I(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 3} & \mathbf{0}_{6 \times 3} \\ \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $\mathbf{0}$  表示零矩阵,  $\mathbf{I}$  表示单位矩阵。

状态方程中的转移矩阵  $\mathbf{F}_I(t)$  由状态量的误差方程确定, 其中 SINS 的位置误差方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = \delta v_E \\ \dot{\delta y} = \delta v_N \\ \dot{\delta h} = \delta v_U \end{cases} \quad (9)$$

SINS 的速度误差方程为

$$\dot{\delta \mathbf{v}} = -\boldsymbol{\Phi}^n \times \mathbf{f}^n + \nabla^n + \delta \mathbf{v}^n \times (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) + \mathbf{v}^n \times \delta \boldsymbol{\omega}_{en}^n. \quad (10)$$

在室内导航环境下, 运载体运动范围小, 将纬度  $L$  看成常数。另外, 导航系统的误差量可看作是少量, 非线性方程中误差量的高阶项可略去不计, 因此可以用线性方程描述速度误差方程。SINS 的失准角误差方程为

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}} = -\delta \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^n + \delta \boldsymbol{\omega}_{in}^n + \boldsymbol{\Phi} \times \boldsymbol{\omega}_{in}^n, \quad (11)$$

式中  $\delta \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^n = \mathbf{C}_b^n ([\delta K_G] + [\delta G]) \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \boldsymbol{\epsilon}^n \approx \boldsymbol{\epsilon}^n$ ,  $\boldsymbol{\omega}_{in}^n = \boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n$ ,  $\delta \boldsymbol{\omega}_{in}^n = \delta \boldsymbol{\omega}_{en}^n$ ,  $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$  为陀螺仪的输出角速度,  $\boldsymbol{\omega}_{in}^n$  为数学平台的指令角速度。计算时, 简化模型, 忽略陀螺的刻度系数误差  $[\delta K_G]$  和安装误差角  $[\delta G]$ 。

陀螺仪误差满足一阶马尔科夫过程, 加速度计存在稳定的零漂, 因此加速度计漂移为常量, 误差方程满足下式

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^n = -\frac{1}{\tau_G} \boldsymbol{\epsilon}^n + \boldsymbol{\omega}_g, \quad (12)$$

式中  $\boldsymbol{\omega}_g$  为陀螺仪的常值漂移,  $\tau_G$  为一阶马尔科夫常数。

$$\dot{\nabla}^n = \boldsymbol{\omega}_a, \quad (13)$$

式中  $\boldsymbol{\omega}_a$  为加速度计的常值漂移。

wMPS 的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_w(t) = \mathbf{F}_w(t) \mathbf{X}_w(t) + \mathbf{G}_w(t) \mathbf{W}_w(t), \quad (14)$$

式中  $w$  表示 wMPS 系统;  $\mathbf{X}_w(t) = [\delta x, \delta y, \delta z, \delta v_x, \delta v_y, \delta v_z]^T$ ;  $\mathbf{F}_w(t)$  由误差方程确定;  $\mathbf{W}_w(t) = [\omega_x, \omega_y, \omega_z, \omega_{v_x}, \omega_{v_y}, \omega_{v_z}]^T$  表示 wMPS 测量坐标和速度时的测量白噪声, 其中  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  和  $\omega_{v_x}, \omega_{v_y}, \omega_{v_z}$  分别表示位置测量白噪声和速度测量白噪声在导航坐标系下的三个分量;  $\mathbf{G}_w(t)$  为系统噪声分配矩阵, 此处  $\mathbf{G}_w(t) = \mathbf{I}$ 。

wMPS 的动态测量误差满足二阶方程, 而卡尔曼滤波的状态方程是线性的, 二阶方程并不适用, 因此用近似的一阶模型对动态误差进行建模。自回归[AR(1)]模型为线性方程, 在计算上比自回归移动平均(ARMA)与移动平均(MA)模型更具优势<sup>[14-15]</sup>, 因此 wMPS 的误差方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = -k_x \delta x + \omega_x \\ \dot{\delta y} = -k_y \delta y + \omega_y \\ \dot{\delta z} = -k_z \delta z + \omega_z \\ \dot{\delta v_x} = -k_{v_x} \delta v_x + \omega_{v_x} \\ \dot{\delta v_y} = -k_{v_y} \delta v_y + \omega_{v_y} \\ \dot{\delta v_z} = -k_{v_z} \delta v_z + \omega_{v_z} \end{cases}, \quad (15)$$

式中线性系数  $k$  由多次仿真实验测试得出,结果表明,当  $k$  为  $1/5300$  时<sup>[10,16]</sup>,滤波效果最好。

因此,组合导航系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_w(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1(t) \\ \mathbf{X}_w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_w(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1(t) \\ \mathbf{W}_w(t) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

即  $\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t)$ 。

#### 2.4.2 组合导航系统测量方程

将 SINS 和 wMPS 的所有测量量作为卡尔曼滤波的测量量,充分利用 wMPS 的信息来校正惯导。为了得到线性测量方程,将 wMPS 输出的位置信息和速度信息与惯导相应的输出信息相减得到测量方程

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t), \quad (17)$$

式中

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) - x_w(t) \\ y_1(t) - y_w(t) \\ z_1(t) - z_w(t) \\ v_{x1}(t) - v_{xw}(t) \\ v_{y1}(t) - v_{yw}(t) \\ v_{z1}(t) - v_{zw}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x_1(t) - \delta x_w(t) + \omega_x(t) \\ \delta y_1(t) - \delta y_w(t) + \omega_y(t) \\ \delta z_1(t) - \delta z_w(t) + \omega_z(t) \\ \delta v_{x1}(t) - \delta v_{xw}(t) + \omega_{v_x}(t) \\ \delta v_{y1}(t) - \delta v_{yw}(t) + \omega_{v_y}(t) \\ \delta v_{z1}(t) - \delta v_{zw}(t) + \omega_{v_z}(t) \end{bmatrix}。$$

#### 2.4.3 状态方程和测量方程的离散化

由于计算机只能处理离散的数据,因此需对连续型状态方程和测量方程进行离散化处理,将导函数看成前后两个时刻的数据之差与时间的比值:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \frac{\mathbf{X}(t + \Delta t) - \mathbf{X}(t)}{\Delta t}。$$

系统噪声  $\mathbf{W}(t)$  和测量噪声  $\mathbf{V}(t)$  满足下式<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} E[\mathbf{W}(t)\mathbf{W}^T(\tau)] = \mathbf{Q}(t)\delta(t - \tau) \\ E[\mathbf{V}(t)\mathbf{V}^T(\tau)] = \mathbf{R}(t)\delta(t - \tau) \\ E(\mathbf{W}_k\mathbf{W}_j) = \mathbf{Q}_k\delta_{kj} \\ E(\mathbf{V}_k\mathbf{V}_j) = \mathbf{R}_k\delta_{kj} \end{cases}, \quad (18)$$

式中  $\mathbf{W}(t)$ 、 $\mathbf{V}(t)$  分别表示连续系统的状态和测量噪声;  $\mathbf{W}_k$ 、 $\mathbf{W}_j$  和  $\mathbf{V}_k$ 、 $\mathbf{V}_j$  分别表示离散化后不同时刻的状态和测量噪声;  $\mathbf{Q}(t)$ 、 $\mathbf{R}(t)$  为连续状态下的系统和测量噪声方差矩阵;  $\mathbf{Q}_k$ 、 $\mathbf{R}_k$  为离散状态下的系统和测量噪声方差矩阵,且  $\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}(t)/T_s$ 、 $\mathbf{R}_k = \mathbf{R}(t)/T_s$ ;  $E(\cdot)$  表示求白噪声在  $t$  时刻和  $\tau$  时刻协方差的函数,  $\delta(t - \tau)$  是脉冲函数。

## 3 wMPS 时间序列分析

时间序列是按照时间的先后顺序记录的一系列有序数据,这些数据受到各种偶然因素的影响,往往表现出某种随机性,但一般事物的发展都具有惯性或延续性,所以这些数据彼此之间又存在一定的相关性。时间序列分析就是依据变量本身的变化规律,利用外推机制描述时间序列的变化<sup>[18]</sup>。Eviews 是美国 QMS 公司研制的在 Windows 下专门从事数据分析、回归分析和预测的工具,此处使用 Eviews 对时间序列数据进行处理。

### 3.1 数据初步分析

对 wMPS 作动态坐标测量实验,获取坐标误差时间序列数据,并对数据进行初步分析。分析过程如下:首先确定数据是否具有平稳性和自相关性,这是建立时间序列模型的前提。若自相关图和偏相关图的衰减很快,说明数据满足平稳性要求;若自相关图和偏相关图的检验值对应的概率  $P$  明显小于 0.05,说明数据的自相关性明显。

当时间序列非平稳时,可以通过差分使序列平稳后再建立时间序列模型。

### 3.2 平稳序列建模分析

时间序列模型分为 4 种类型,分别为自回归过程[即  $AR(p)$ 模型]、移动平均过程[即  $MA(q)$ 模型]、自回归移动平均过程和单整自回归移动平均过程,其中  $p$  和  $q$  分别表示自回归过程和移动平均过程的阶数。这里选取自回归移动平均过程,即  $ARMA(p, q)$ 模型,对动态误差序列进行建模。

建立  $ARMA(p, q)$ 模型需要确定  $ARMA(p, q)$ 的阶数、确定模型的参数及模型检验。 $ARMA(p, q)$ 的阶数根据  $AR(p)$ 模型的自相关函数的拖尾特性及  $MA(q)$ 模型的偏自相关函数的拖尾特性确定;模型的参数由 Eviews 的输出结果确定,若参数的  $T$  检验值对应的概率  $P$  明显小于 0.05,说明该参数可被接受<sup>[14, 17]</sup>;判断模型是否符合建模时的假设,最根本的是检验残差序列是否满足白噪声序列,根据残差的自相关图和偏相关图可以判断序列是否满足平稳性及非自相关性,若满足,则认为该模型可用。

## 4 实 验

### 4.1 动态误差建模实验

为使 wMPS 的仿真数据更加接近真实情况,需对 wMPS 的测量误差进行建模,实验过程如下:将光电接收器固定在导轨平台上作匀速直线运动,测量 wMPS 的坐标误差。选用直流伺服电动机驱动的导轨,导轨直线度为 0.1 mm,实验平台如图 2 所示。wMPS 在发射站坐标系下的测量误差  $[\delta x, \delta y, \delta z]$  如图 3 所示。发射站坐标系与发射站固联,以发射站为原点,三轴方向由标定过程获取。

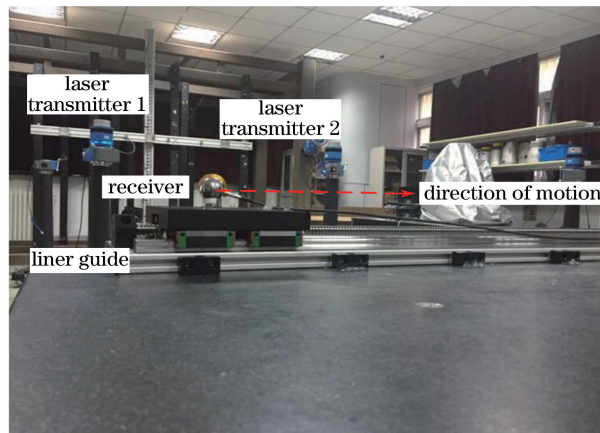


图 2 动态误差建模实验平台

Fig. 2 Experiment platform for modeling dynamic errors

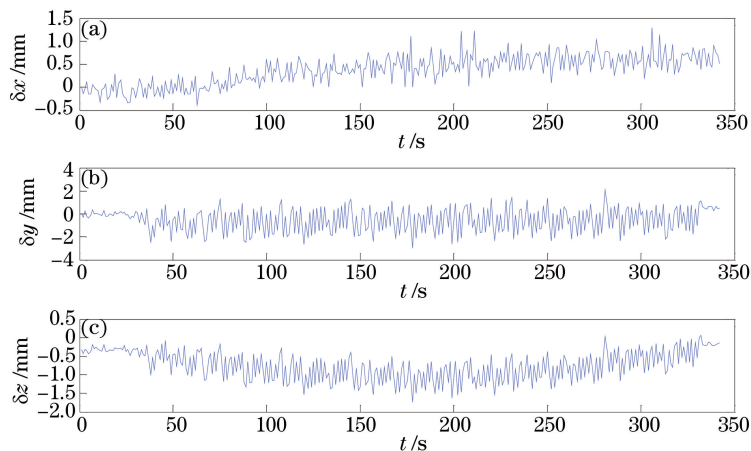


图 3 匀速直线运动状态下 wMPS 三轴方向的测量误差。(a)  $x$  轴; (b)  $y$  轴; (c)  $z$  轴

Fig. 3 wMPS measurement errors along three axes in a state of uniform linear motion.

(a)  $x$  axis; (b)  $y$  axis; (c)  $z$  axis

由图 3 可以看出,除幅值不同外,wMPS 三轴方向的动态坐标测量误差分布规律大致相同,因此简化分析过程,以  $z$  轴坐标误差的 ARMA 建模为例进行详细分析, $x$ 、 $y$  轴坐标误差不再赘述。通过 EViews 软件计算得出  $z$  轴动态测量误差的相关图和偏相关图,如表 1 所示,其中 Prob.表示 Q 统计量的可信程度。

表 1  $z$  轴动态测量误差的自相关和偏相关Table 1 Autocorrelation and partial correlation of dynamic measurement errors along  $z$  axis

Coefficient of auto correlation	Coefficient of partial correlation	Q-statistic	Prob.
0.834	0.834	104.37	0.000
0.829	0.439	208.26	0.000
0.809	0.225	307.91	0.000
0.786	0.100	402.64	0.000
0.770	0.064	494.03	0.000
0.749	0.025	581.16	0.000
0.738	0.047	666.45	0.000
0.730	0.061	750.43	0.000
0.712	0.012	830.85	0.000
0.681	-0.071	905.04	0.000

由表 1 可知, $z$  轴动态误差存在明显的自相关性,但自相关图的衰减特性并不明显,因此动态的坐标误差并不满足平稳性的要求。差分后的时间序列  $D(z)$  平稳性得到明显改善,因此可以利用 ARMA 模型对差分后的动态误差进行建模,时间序列分析结果如表 2 所示。

表 2 时间序列分析结果

Table 2 Result of time series analysis

Element	Coefficient	Std. error	t-statistic	Prob.
AR(1)	0.477824	0.230580	2.072275	0.0400
MA(1)	-1.221060	0.226525	-5.390404	0.0000
MA(2)	0.425801	0.152428	2.793453	0.0059

由表 2 可知,差分后的  $z$  轴动态误差  $D(z)$  满足 ARMA(1,2)模型。对模型的残差值作自相关分析,如表 3 所示,Q 统计量小于 16.013,说明建模后的残差值基本满足白噪声特性,模型可以作为最终估计结果。

表 3 ARMA 模型残差值分析

Table 3 Residual value analysis of ARMA model

Coefficient of auto correlation	Coefficient of partial correlation	Q-statistic	Prob.
-0.029	-0.029	0.1230	
0.070	0.069	0.8436	
0.036	0.040	1.0372	
-0.030	-0.033	1.1700	0.279
-0.090	-0.097	2.3897	0.303
-0.071	-0.075	3.1607	0.368
-0.010	0.001	3.1764	0.529
0.027	0.045	3.2889	0.556
0.038	0.043	3.5145	0.742
0.042	0.028	3.7925	0.803

$x$ 、 $y$ 、 $z$  轴动态坐标误差的具体模型公式为

$$\begin{cases} \delta[x(t)] = 0.73\delta[x(t-1)] + 0.27\delta[x(t-2)] - 0.81\mu_{t-1} + \mu_t \\ \delta[y(t)] = 0.25\delta[y(t-1)] + 0.75\delta[y(t-2)] - 0.66\mu_{t-2} + \mu_t \\ \delta[z(t)] = 1.48\delta[z(t-1)] - 0.48\delta[z(t-2)] - 1.22\mu_{t-1} + 0.43\mu_{t-2} + \mu_t \end{cases}, \quad (19)$$

式中  $\mu$  为白噪声,其标准差由表 3 确定。

#### 4.2 组合导航仿真实验

通过仿真实验对 wMPS/SINS 组合导航系统的动态测量效果进行分析,验证组合导航系统在动态测量

应用中的可行性及效果。

#### 4.2.1 仿真轨迹及滤波参数说明

卡尔曼滤波的效果很大程度上取决于滤波参数的选取,其中状态噪声方差矩阵  $\mathbf{Q}_k$  由惯导模块的陀螺仪和加速度计的参数以及 wMPS 动态测量不确定度决定;测量噪声为随机白噪声,因此测量噪声方差矩阵  $\mathbf{R}_k$  由白噪声方差决定;状态初值  $\mathbf{X}_0$  由初始定位可知;估计误差协方差矩阵初值  $\mathbf{P}_0$  的选取不影响最终协方差矩阵的数值,因此  $\mathbf{P}_0$  为单位矩阵。

仿真轨迹如图 4 所示,从左到右分别为被测目标真实运动轨迹、SINS 测量轨迹和 wMPS 测量轨迹,小车作匀速运动,其中直线运动的速度为 0.5 m/s,转向运动的角速度为 0.2 rad/s。运动过程中,不仅航向角发生改变,俯仰角和翻滚角也作正弦函数形式的非线性变化以模拟非平面运动。

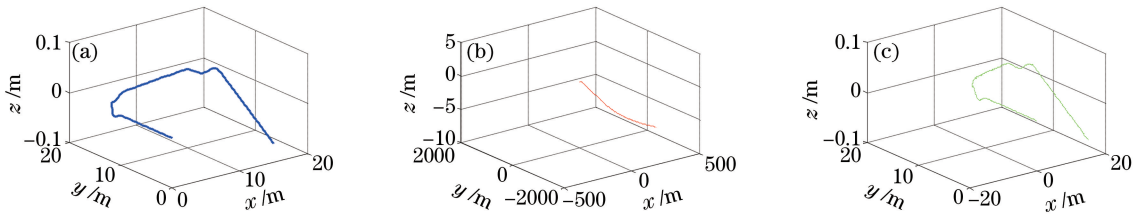


图 4 (a) 被测目标真实轨迹; (b) SINS 测量轨迹; (c) wMPS 测量轨迹

Fig. 4 (a) Real orbit of measured target; (b) SINS measurement orbit; (c) wMPS measurement orbit

#### 4.2.2 组合系统的时间对准及仿真结果

仿真实验中,选取 wMPS 的数据更新率为 10 Hz, SINS 的数据更新率为 100 Hz,短时间内运动物体的运动状态可以简单看作匀速直线运动,因此对每隔 0.1 s 的 wMPS 位置信息数据作线性插值,估计每 0.01 s 的位置信息,再和 SINS 的位置输出信息融合作为卡尔曼滤波的测量值。

仿真结果如图 5、6 所示,图 6 从上到下依次为卡尔曼滤波后的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的坐标测量误差。

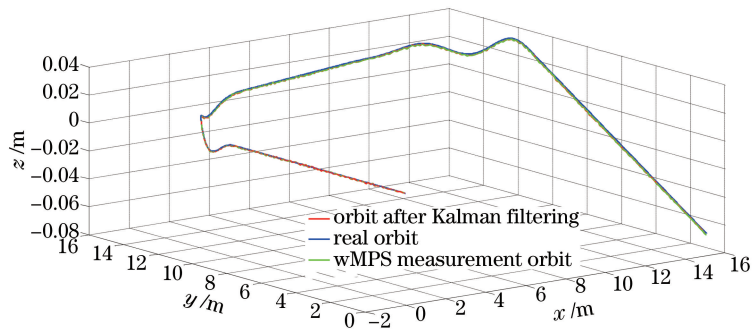


图 5 卡尔曼滤波后的测量轨迹与真实轨迹

Fig. 5 Real and measurement orbits after Kalman filtering

由仿真结果可知,卡尔曼滤波后的轨迹与真实轨迹的误差在  $x$  轴方向的最大值为  $-1.38$  mm,在  $y$  轴方向的最大值为  $-1.87$  mm,在  $z$  轴方向的最大值为  $-1.65$  mm;坐标误差值大部分处于  $-1.87 \sim 0.85$  mm;卡尔曼滤波很好地校正了惯导模块的漂移误差,定位精度达到了 1.9 mm 以内。

## 5 结 论

提出基于 wMPS 与 SINS 的组合导航系统,利用 wMPS 的高精度弥补了 SINS 导航误差随时间累积的缺陷,使系统同时具有 SINS 的高数据率和 wMPS 的高精度,具有一定的工程应用价值。为了验证卡尔曼滤波算法的可行性,进行了仿真实验,结果表明,组合导航系统的定位精度在 1.9 mm 以内。

在今后的工作中,有如下几方面问题需进一步研究:首先,此处采用的组合方式为松耦合,如何根据 wMPS 的底层数据信息进行紧耦合有待进一步研究;其次,此处采用的滤波算法是基于白噪声的线性卡尔曼滤波,基于有色噪声的卡尔曼滤波的算法是否能达到更高的定位精度是接下来的研究重点。



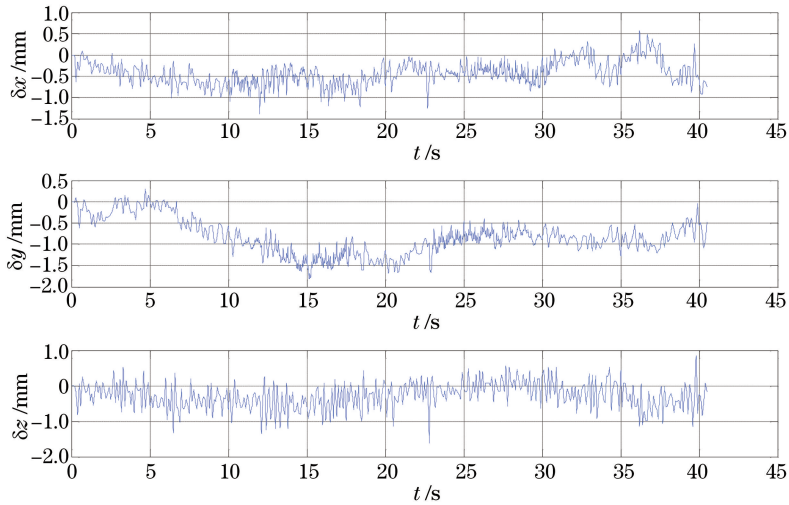


图 6 卡尔曼滤波后的坐标误差

Fig. 6 Coordinate error after Kalman filtering

## 参 考 文 献

- 1 Xue Bin, Zhu Jigui, Yang Linghui, *et al.* The application of the wMPS in airplane level measurement[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 22-26.  
薛彬, 郝继贵, 杨凌辉, 等. wMPS系统在飞机水平测量中的应用[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 22-26.
- 2 Chen Xingxiu, Zhang Jinyi, Yan Li, *et al.* Inertial indoor navigation with 3D complex motion mode of pedestrian dead reckoning[J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 32(4): 349-356.  
陈兴秀, 张金艺, 晏理, 等. 三维复杂运动模式航迹推算惯性导航室内定位[J]. 应用科学学报, 2014, 32(4): 349-356.
- 3 Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.* Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.  
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.
- 4 Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Development of a laser-based geometric measurement system for large-scale conical[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508008.  
周森, 郭永彩, 高潮. 基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508008.
- 5 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Peng Peng, *et al.* Layout optimization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108006.  
胡进忠, 余晓芬, 彭鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108006.
- 6 Wu J, Zhu J, Yang L, *et al.* A highly accurate ultrasonic ranging method based on onset extraction and phase shift detection[J]. Measurement, 2014, 47(1): 433-441.
- 7 Liu Z, Zhu J, Yang L, *et al.* A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105004.
- 8 Zhao Z, Zhu J, Lin J, *et al.* Transmitter parameter calibration of the workspace measurement and positioning system by using precise three-dimensional coordinate control network[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 084108.
- 9 Duan Muqiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui. Study on tracking algorithm for wMPS based on least square-Kalman filter[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2012, 25(2): 236-239.  
端木琼, 杨学友, 郝继贵. 基于小二乘-卡尔曼滤波的wMPS系统跟踪定位算法研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2): 236-239.
- 10 Xue Bin. The performance analysis and optimization of the distributed workspace measuring and positioning system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 9-25.  
薛彬. wMPS分布式空间测量定位系统性能分析与优化[D]. 天津: 天津大学, 2014: 9-25.
- 11 Qin Yongyuan. Inertial Navigation[M]. Beijing: Science Press, 2014: 331-360.

- 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 331-360.
- 12 Qin Yongyuan. Kalman filter and integrated navigation theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998: 312-315.
- 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 312-315.
- 13 Luo Jianjun. Principle and application of integrated navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012: 105-113.
- 罗建军. 组合导航原理与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 105-113.
- 14 Li Shuguang, Jing Bianshun, Su Yanmin. Analysis and establishment of GPS SA error model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(3): 91-94.
- 李曙光, 荆便顺, 苏彦民. GPS系统SA误差模型分析和建立[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(3): 91-94.
- 15 Meng Tao, Wang Hao, Li Hui, *et al.* Error modeling and filtering method for MEMS gyroscope [J]. Systems Engineering & Electronics, 2009, 31(8): 1944-1948.
- 蒙涛, 王昊, 李辉, 等. MEMS陀螺误差建模与滤波方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1944-1948.
- 16 Miao Yuewang. Research on data processing methods of SINS/GPS integrated navigation[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2013: 16-33.
- 苗岳旺. SINS/GPS组合导航数据处理方法研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2013: 16-33.
- 17 Li Ren. Research on SINS/GPS integrated navigation system[D]. Harbin: Harbin Institute Of Technology, 2006: 47-60.
- 李仁. SINS/GPS组合导航系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 47-60.
- 18 Zhang Xiaotong. Econometric[M]. Tianjin: Nankai University Press, 2001: 282-320.
- 张晓响. 计量经济学基础[M]. 天津: 南开大学出版社, 2001: 282-320.