

基于灰色预测理论的 NG MU 角速度误差补偿方法

丁明理¹, 王 祁¹, 杜祖良²

(1 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江哈尔滨 150001; 2 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘 要: 无陀螺惯性测量技术是利用加速度计代替传统的陀螺, 构成无陀螺惯性测量组合 (NG MU) 实现制导的. 针对 NG MU 中加速度计安装存在位置偏差和角度偏差的实际情况, 基于灰色预测理论, 提出了一种角速度误差补偿算法. 算法利用加速度计的输出了得到了上述情况下的角速度误差补偿公式, 在传统算法中采用灰色预测方法对角速度进行补偿. 最后基于提出的一种九加速度计 NG MU 配置方案, 组建了实验系统, 进行了角度测试实验. 实验结果验证了方案的可行性, 同时在测试角度为 $\pm 100^\circ$ 时, 经算法补偿后测试精度可提高 $3^\circ \sim 4^\circ$.

关键词: 惯性测量组合; 无陀螺; 角速度; 误差补偿; 灰色预测

中图分类号: V241.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 04-0642-05

An Error Compensation Method of Angular Velocity of NG MU Based on Grey Forecasting Theory

DING Ming-li, WANG Qi, DU Zu-liang²

(1 Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;
2 Beijing Automatic Control and Equipment Institute, Beijing 100074 China)

Abstract Non-gyro inertial measurement unit (NG MU) uses only accelerometers replacing gyroscopes to compute the motion of a moving body. Based on the grey forecasting theory, a new compensation method for the angular rate estimating of NG MU is proposed on the actual condition of existing the accelerometer mounting error which includes the location error and the angle error. The algorithm gets the compensation equation of the angular rate error using the accelerometer output and compensates the angular rate in the traditional algorithm using the grey forecasting method. In addition, a new nine-accelerator configuration of NG MU is presented with its experiment system built. The experiment verification of the proposed methods for estimating the angular velocity is also investigated based on the presented NG MU configuration. The results show the feasibility of the configuration and indicate that in the angle measurement range of ± 100 degree, the measurement precision can be improved for $3 \sim 4$ degree.

Key words inertial measurement unit; non-gyro; angular rate; error compensation; grey forecasting

1 引言

无陀螺惯性测量组合 (Non-gyro Inertial Measurement Unit-NG MU) 就是指惯性测量组合中不用陀螺测量角速度, 而是利用线加速度计测量线加速度的同时, 根据线加速度计的空间位置组合解算出角速度, 从而得到惯性测量的全部参数, 达到惯性导航的目的. NG MU 具有抗高 g 值冲击、低功耗、低成本的特点, 适用于某些制导时间不长, 精度要求不太高的某些武器, 如战术导弹、智能炮弹等.

利用加速度计代替陀螺实现制导的思想国外早有人提出. 早在 1965 年, D Napoli 在他的硕士论文中首次提出

不用陀螺测量物体角速度的想法^[1], Alfred R. Schuler 在 1967 年提出利用线加速度计测量物体的旋转运动的想法, 随后各国学者提出了多种加速度计的配置方案^[2~4]. 目前的研究多集中于六加速度计方案和九加速度计方案, 六加速度计方案为满足系统测试要求的最低要求, 而九加速度计方案比六加速度计方案多了三只加速度计, 其冗余信息提高了系统的解算精度, 同时也增加了系统的可靠性. 在实用化研究上, 1997 年 Kirill 详细研究了基于六加速度计立方体结构配置的算法, 并给出了实际系统装置^[5]. 关于此方向的研究国内刚刚起步, 且多集中于理论分析上, 目前只有少数几所高校进行此方向的探索^[6,7].

收稿日期: 2005-06-20 修回日期: 2005-08-25

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (No. E2004-15)

在实际工程中, 加速度计安装不可避免地存在偏差, 一般表现在两个方面: 一是位置偏差, 二是敏感方向偏差. 误差主要是由于忽略了加速度计本身尺寸大小, 加速度计安装精度不高, 加速度计质心位置不准确, 以及敏感轴方向偏移等原因造成的. 以上误差均会影响到角速度解算结果的精度. 虽然该项误差为系统误差, 但若导航计算前补偿, 不仅带来计算的复杂程度, 同时也使计算精度下降. 对与上述问题, 在目前的 NGMU 研究中还未给出理想的解决办法. 本文基于灰色预测理论^[8], 提出了一种角速度补偿算法, 有效提高了角速度解算精度. 同时基于提出的一种 NGMU 九加速度计配置方案, 进行了实验验证.

2 加速度计输出方程

众所周知, 利用陀螺的进动性测量角速度是陀螺的特性. 惯性测量组合就是基于这一原理测量载体的角速度. 积分后可得到物体转动的角度, 即可计算出载体的当前姿态.

为了说明载体系统的运动, 定义惯性坐标系 (I) 和载体坐标系 (b), 如图 1 所示. M 为载体坐标系内一点.

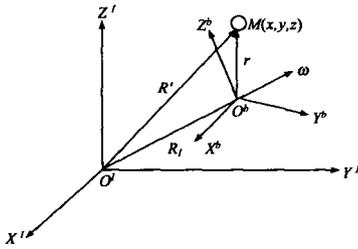


图 1 载体系与惯性系几何图示

根据图 1, 由绝对运动和相对运动的关系可推导出点 M 的加速度

$$a = \dot{R}_i^I + \dot{r}_b^I + \dot{\omega} \times r + 2\omega \times \dot{r}_b^I + \omega \times (\omega \times r) \quad (1)$$

式中 \dot{r}_b^I 为点 M 相对于载体坐标系的加速度; \dot{R}_i^I 为载体系 O^b 相对于惯性系 O^I 的惯性加速度; $2\omega \times \dot{r}_b^I$ 为科氏加速度; $\omega \times (\omega \times r)$ 为向心加速度; $\dot{\omega} \times r$ 为由于载体坐标系的角加速度产生的切向加速度.

如果点 M 是固定在 b 系的, 那么有关 \dot{r}_b^I 和 \dot{r}_b^I 的项可以舍去, 式 (1) 可写作

$$a = \dot{R}_i^I + \dot{\omega} \times r + \omega \times (\omega \times r) \quad (2)$$

载体上任意一固定点 M 安装一个位于 r_i , 敏感方向为 θ_i 的加速度计, 其输出 A_i 为

$$A_i = [\dot{R}_i^I + \Omega r_i + \Omega \Omega r_i] \cdot \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式 (3) 中, $\Omega_i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$ $R_i^I = \begin{bmatrix} R_{ix}^I \\ R_{iy}^I \\ R_{iz}^I \end{bmatrix}$ (4)

考虑 N 个安装在位置 r_1, \dots, r_N , 敏感方向为 $\theta_1, \dots, \theta_N$ 的加速度计, 其中 (r_i, θ_i) 是相对于载体坐标系而言的. 同时令 $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, 在任意三维空间 $N = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ 中, 斜对称矩阵 Ω 满足

$$\Omega \cdot N = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_y n_z - \omega_z n_y \\ \omega_z n_x - \omega_x n_z \\ \omega_x n_y - \omega_y n_x \end{bmatrix}$$

$$= \omega \times N \quad (5)$$

由此在式 (3) 中, 利用 $\omega \leftarrow \Omega$ 得到

$$A_i = (\dot{R}_i^I + \Omega r_i + \Omega \Omega r_i) \cdot \theta_i = \theta_i^T \dot{R}_i^I + (r_i \times \theta_i)^T \dot{\omega} + \theta_i^T \Omega^2 r_i = [(r_i \times \theta_i)^T \ \theta_i^T] \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{R}_i^I \end{bmatrix} + \theta_i^T \Omega^2 r_i \quad (6)$$

在实际计算中, 还应对重力加速度进行相应补偿.

3 角速度误差补偿算法

3.1 算法描述

上述加速度计输出方程的推导均是在考虑加速度计为一个质点的理想条件下进行的, 而在实际工程中, 加速度计的安装不可避免地存在偏差, 一般表现在两个方面: 一是位置偏差, 二是敏感方向偏差. 以上误差均会影响到角速度估算结果的精度. 下面通过分析, 得到存在加速度计安装误差条件下的加速度计输出补偿算法, 间接提高角速度精度.

理想条件下, 加速度计的安装位置距原点距离 l 而实际安装位置为 l , 其位置误差为 l_e , 可以得到如下关系

$$l = l + l_e \quad (7)$$

同理, 理想条件下敏感方向的真值为 θ 实际敏感方向为 θ_e , 误差为 θ_e , 可得

$$\theta = \theta + \theta_e \quad (8)$$

那么由式 (5) 可得理想和实际状态下加速度计一般输出方程为

$$A = [\dot{R}_i^I + \Omega l + \Omega^2 l] \cdot \theta \quad (9a)$$

$$A_r = [\dot{R}_i^I + \Omega l_r + \Omega^2 l_r] \cdot \theta_r \quad (9b)$$

很容易得到加速度计输出误差

$$A_e = \dot{R}_i^I \cdot \theta_e + [\Omega l_e + \Omega^2 l_e] \cdot \theta_e + [\Omega l_e + \Omega^2 l_e] \cdot \theta \quad (10)$$

满足 $A_r = A + A_e$.

由上述分析可知, Ω , Ω 和 \dot{R}_i^I 在计算时可用如下形式表示

$$\Omega_j = f[A_j(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I)] \quad (11a)$$

$$\Omega_j = g[A_j(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I)] \quad (11b)$$

$$\dot{R}_{1j}^I = h[A_j(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I)] \quad (11c)$$

式中 j 表示当前运算次数. 同时有

$$A(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I, l, \theta) = A_r(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I, l, \theta_r) - A_e(\Omega_j, \Omega_j, \dot{R}_{1j}^I, l, \theta_e) \quad (12)$$

可见只要去除了误差项 A_e , 我们便可以得到比较准确的导航参数真值.

3.2 灰色预测方法

但在计算时, 当 $t = t_j$ 时, A 中的 Ω , Ω_j 和 \dot{R}_i^I 参数值是未知的. 这里我们采用一种利用时间序列数据进行预测的灰色预测方法. 灰色系统是指信息不完全与不确定的系统, 介于白色系统和黑箱之间, 用来解决信息不完备的系统. 灰色模型对于随机波动较多的数列拟合较差、精度较低, 然而在反映现象的趋势方面, 灰色模型有明显的优势. 按照灰色系统理论导出的灰色预测方法 GM (1, 1) 预测模

型不是通过数据样本本身的多少去寻找其规律,而是将变量视为在一定范围内变化的、且与时间有关的灰色量来处理,并以此建立灰色预测模型,这样做的目的在于弱化原始数据的随机性,突出其内在规律性。与传统的预测方法相比,灰色预测方法只需少量原始数据,这显然非常适合本文对算法中参数的预测需求,下面介绍其方法。

(1)将原始数据组成时间序列数据

$$x_t^{(a)} = (x_1^{(a)}, x_2^{(a)}, \dots, x_N^{(a)}), \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

(2)对 $x_t^{(a)}$ 作一次累加生成处理,得

$$x_t^{(b)} = (x_1^{(b)}, x_2^{(b)}, \dots, x_N^{(b)}), \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

其中 $x_k^{(b)} = \sum_{t=1}^k x_t^{(a)}$.

(3)构造数据矩阵 A 及数据向量 B

$$A = \begin{bmatrix} -0.5[x_2^{(b)} + x_1^{(a)}] & 1 \\ -0.5[x_3^{(b)} + x_2^{(a)}] & 1 \\ \dots & \dots \\ -0.5[x_N^{(b)} + x_{N-1}^{(a)}] & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = [x_2^{(b)} \quad x_3^{(b)} \quad \dots \quad x_N^{(b)}]^T \quad (16)$$

(4)用最小二乘法求参数列 \hat{m}

$$\hat{m} = [m \quad u]^T = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (17)$$

其中 m 为发展系数, u 为灰色作用量。

(5)建立一阶线性灰色微分方程,记为 GM (1, 1)

$$\frac{dx^{(b)}}{dt} + mx^{(a)} = u \quad (18)$$

其时间响应函数为

$$\hat{x}_{t+1}^{(b)} = \left[x_1^{(a)} - \frac{u}{m} \right] e^{-mt} + \frac{u}{m} \quad (19)$$

对 $\hat{x}_{t+1}^{(b)}$ 求导或做累减生成(累减:指前后两个数据之差),得到原始数列的预测值计算公式

$$\hat{x}_{t+1}^{(a)} = (-mx_1^{(a)} + u)e^{-mt} \quad (20)$$

由上述可见,GM (1, 1)模型是一个微分方程,它要求原始序列具有光滑性,又允许原始序列具有一定的随机性,描述了数据序列中所蕴含的指数函数规律。同时还可通过模型拟合值与实际值之差对模型做适当修正,提高预测精度。

利用上述方法对相应参数进行预测,由此,可得误差项 A_e 估计值表达式

$$\tilde{A}_e(t_j) = A_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta_e) \quad (21)$$

在式(21)的基础上,可得角速度估计的表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_j &= f[\tilde{A}(t_j)] = f[A_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta_e) \\ &\quad - \tilde{A}_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta_e)] \\ &= f[A_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta) + A_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta_e) \\ &\quad - A_e(\tilde{\Omega}_j, \tilde{\Omega}_j, \tilde{R}_{1,j}^*, \mathbf{I}, \theta_e)] \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)即为在加速度计安装存在误差的条件下的角速度算法。该算法从理论上利用误差估计值代替误差真值对加速度计输出进行了补偿计算,使运算过程成为一个闭环系

统,在经过一定时间的计算后角速度可逼近真值。

4 九加速度计配置方案

本文提出一种九加速度计配置方案,下面对其进行分析。九只加速度计在载体坐标系中的安装位置及敏感方向如图2所示,图中箭头所指方向为各加速度计的敏感方向。

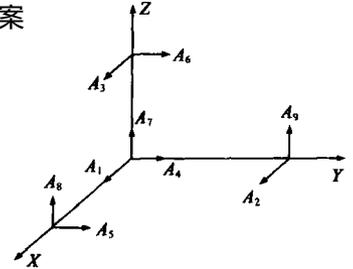


图2 九加速度计配置方案示意图

九只加速度计位置表达式为

$$[r_1, \dots, r_9] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, l 为加速度计距载体坐标系原点距离。加速度计敏感方向表达式为

$$[\theta_1, \dots, \theta_9] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由式(6)可以得到

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \\ \dot{R}_x \\ \dot{R}_y \\ \dot{R}_z \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_y \omega_z \\ \omega_x \omega_z \\ \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

由式(25)可以解得

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = \frac{1}{2l}(A_4 + A_9 - A_6 - A_7) \\ \dot{\omega}_y = \frac{1}{2l}(A_3 + A_7 - A_1 - A_8) \\ \dot{\omega}_z = \frac{1}{2l}(A_1 + A_5 - A_2 - A_4) \end{cases} \begin{cases} \dot{R}_x = A_1 \\ \dot{R}_y = A_4 \\ \dot{R}_z = A_7 \end{cases} \quad (26)$$

可见该九加速度计方案推导出的线加速度和角加速度表达式均为加速度计输出的线性组合,简化了计算,且

配置均衡。

5 实验研究

5.1 实验系统建立

系统由九只加速度计、硬件电路系统、软件系统组成。其中硬件电路包括信号调理电路、A/D 转换电路、信号处理电路(DSP 系统)及 CRT 显示器组成。软件系统包括系统工作软件及上述角速度误差补偿算法、滤波算法、姿态算法等算法设计。加速度计采用 IC Sensor 公司的压阻式硅加速度传感器(3022 型),然后按图 2 所示配置方案安装在加工好的刚体上(尺寸为 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$),如图 3 所示。



图 3 九加速度计 NGMU 实物图

图 4 实验系统图片

5.2 角度测试实验

在加速度计标定基础上,进行了测量光学分度头平台倾斜时姿态变化的实验,并对上述算法进行了验证。采样率为 100Hz 图 4 为实验系统图示。

首先在水平平面内进行测试。将光学分度头在水平位置固定,将刚体安装在光学分度头上,然后在水平平面内进行旋转,记录实际转过的角度和测试输出的角度。然后在垂直平面内,利用手动机构调节光学分度头的倾斜角度,并记录实际转过的角度和测试输出的角度。

本文重点考虑由于加速度计自身体积大小所带来的位置偏差,根据实际所用加速度计(3022 型)的实际尺寸和安装情况来计算它的位置偏差。由于加速度计为轴对称结构,所以可以假定质心均在加速度计中心处,忽略质心误差。结合实验系统中加速度计实际的安装情形,可得到九只加速度计的位置偏差。

对于角度偏差,本文考虑采用标定的方法来确定。其基本原理是利用重力来确定角度偏差。首先对每只加速度计进行水平方向标定,即保持加速度计的敏感轴方向水平,那么它的输出即加速度为 0 时的输出;再进行加速度计垂直方向标定,根据重力加速度输出与预先设定的 100mV 对应 1g 进行比对,利用其差值求解角度偏差。设水平输出为,垂直输出为,角度偏差可由下式确定

$$\theta = \arccos \left(\left| \frac{V_2 - V_1}{100} \right| \right) \quad (27)$$

其符号可由加速度计经过垂直方向时候的变化趋势来确定,按三维坐标系右手定则旋转方向为正。

在确定位置偏差和角度偏差的基础上,进行了角速度误差补偿算法实验,表 1 给出了多次测量后的部分实验结果。

表 1 角度测试数据(°)

平台偏角	-84.82	-76.33	-64.85	-53.49	-39.45	-27.63	-14.57	-10.28
测试角度	-89.76	-79.28	-59.37	-51.58	-34.59	-21.48	-10.27	-11.51
补偿后角度	-81.35	-78.24	-62.86	-51.20	-35.67	-23.19	-10.53	-9.47
平台偏角	13.49	27.61	38.28	49.26	68.19	72.36	86.46	95.16
测试角度	16.27	30.73	43.48	56.27	76.39	78.46	94.67	103.41
补偿后角度	14.84	29.46	40.59	51.84	71.94	76.42	92.75	98.76

5.3 实验结果分析

由表 1 中数据我们可以计算补偿前后测试结果的绝对误差,由数据可以得出经算法补偿后角度测试误差明显下降,下降幅度可达 $3^\circ \sim 4^\circ$ 左右,效果明显。但误差的变化趋势还不具有一致性,这主要是由于加速度计噪声等其他原因造成的。

从绝对误差的角度考虑,在测试小角度时误差较小,测试大角度时误差较大。这主要是因为在小角度测试时,对其施加力的作用时间较短,也就是说误差的累积时间减少了,造成了误差相对减小。经分析,测试结果中的误差还与以下几个因素有关:①加速度计信号零点漂移。由于各加速度计特性不一致,实验中发现各位置零点并不完全相同,所以采用动态零点补偿方法。但受方法所限,仍含有误差。②加速度计输出噪声。经对加速度计输出测试发现,噪声达到了毫伏级,其在真实信号中的比重很大。系统采用了相应的硬件和软件滤波处理方法,但仍有一定缺陷,该项因素对结果影响很大。③交叉耦合误差。该项误差可能由传感器敏感元件本身的位置或刚体加工精度不高等原因造成的。④算法误差。在算法设计中,所采用的积分算法极易带来误差的累积效应。同时受实验设备所限,也会带来一定误差。

虽然实验数据存在误差,但实验结果仍表明系统可以跟踪平台角度的变化,较准确地反映被测平台的姿态。经过进一步研究,系统的精度将会得到提高。

6 结论

本文提出了加速度计存在安装误差条件下的角速度补偿算法,该算法得到了加速度计输出的误差方程,并利用传统算法中信息结合灰色预测方法对角速度进行补偿,有效抑制了安装误差引起的解算误差,提高了系统角速度解算精度。测量范围在 $\pm 100^\circ$ 时,角度测试精度可提高 $3^\circ \sim 4^\circ$ 。该算法具有一般性,同样适合于其他不同的配置方案。

经多次实验,实验系统可达到如下性能指标:NGMU 体积为 $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$;重量 $< 500 \text{ g}$ 线加速度测量范围为 $\pm 2.5 \text{ g}$ 角速度测量范围为 $\pm 120^\circ/\text{s}$ 工作温度在 $-45^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$;测试绝对误差在 7% 左右。

NGMU 可以同导航误差不随时间累积的导航系统,如 GPS 组成组合导航系统。取长补短,导航精度将进一步提高,应用范围将更为广泛。

参考文献:

- [1] D Napoli L D. The measurement of angular velocities without the use of gyros[D]. The Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania Philadelphia 1965: 34- 41.
- [2] Alfred R S M. Measuring rotational motion with linear accelerometers[J]. IEEE Transactions on AES, 1967, 3(3): 465- 472.
- [3] Shmuel JM. A nongyroscopic inertial measurement unit [J]. Journal of Guidance, 1982, 5(3): 227- 235.
- [4] SourChen Lee, Yu-Chao Huang. Innovative estimation method with measurement likelihood for all-accelerometer type inertial navigation system [J]. IEEE Transactions on AES, 2002, 38(1): 339- 346.
- [5] Mostov K S, et al. Accelerometer based gyro-free multi-sensor generic inertial device for automotive applications [A]. Proceedings of the 1977 IEEE Conference on Intelligent Transportation System, ITSC [C]. Piscataway: IEEE, 1997. 1047- 1052.
- [6] 王晓沁, 李永新, 朱明武. 全加速度计惯性测量的优化设计及仿真分析 [J]. 弹道学报, 2003, 15(4): 12- 16, 59.
WANG X Q, LI Y X, ZHU M W. Optimization design and simulation of accelerometer-based inertial measurement unit [J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(4): 12- 16, 59. (in Chinese)
- [7] 丁明理, 王祁, 洪亮. GPS与无陀螺微惯性测量单元组合导航系统设计 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2005, 29(1): 98- 101.
DING M L, WANG Q, HONG L. Design of integrated navigation system of GPS and non-gyro micro inertial measurement unit [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(1): 98-101. (in Chinese)
- [8] 曹奎, 冯玉才. 基于GM(1, 1)模型的压缩域图像表示与检索技术 [J]. 计算机工程, 2004, 30(7): 121- 123, 127.
CAO K, FENG Y C. GM(1, 1)-based approach to image representation and retrieval [J]. Computer Engineering, 2004, 30(7): 121-123, 127. (in Chinese)

作者简介:



丁明理 男, 1977年 10月生于黑龙江省五常市, 博士, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系讲师. 主要研究方向为多传感器系统及信息处理. E-mail: dingm@hit.edu.cn



王祁 男, 1944年 5月生于黑龙江省哈尔滨市, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授、博导. 主要研究方向为传感器信息融合、信号处理. E-mail: wangq@hit.edu.cn