

SINS/计程仪/重力无源组合导航系统仿真研究*

祝燕华,蔡体菁,卢 桢

(东南大学仪器科学与工程学院,南京 210096)

摘要:针对现代应用环境对导航系统自主性、高精度、无源性的要求,提出了捷联惯性(SINS)/计程仪/重力组合的无源导航方案。深入研究了 SINS/计程仪/重力的信息融合算法,构建了 SINS/计程仪/重力组合导航可视化仿真系统,实现了传感器仿真模块构建、组合导航计算、地图和轨迹显示等功能。仿真系统的计算结果表明,SINS/计程仪/重力组合导航系统姿态、速度和位置精度稳定,能够满足长时间、一定精度的导航要求,具有广阔的应用空间。

关键词:SINS;重力;组合导航;信息融合

中图分类号:TJ765.3 **文献标志码:**A

The Simulation Research on SINS/Log/Gravity Passive Integrated Navigation System

ZHU Yanhua, CAI Tijing, LU Zhen

(School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Autonomous, highly precise and passive navigation system is highly demanded in modern environment. To meet the requirements above, a passive navigation scheme was presented and shown as SINS/log/gravity integrated navigation system. The information fusion method was deeply discussed. Then, the SINS/log/gravity integrated navigation visual simulation system was realized and functions including sensors simulation module, integrated navigation computation and the display of map and track were actualized. The simulation results show that the attitude, velocity and positioning accuracy of SINS/log/gravity integrated navigation system are stable and it is able to meet the demand of long time navigation with certain accuracy in wide application.

Keywords: SINS; gravity; integrated navigation; information fusion

0 引言

现代应用环境对导航系统的自主性、高精度和无源性提出了更高的要求^[1-3],例如水面船只、地面车辆以及空中飞行器能够不依赖 GPS 进行导航,水下运载体能够在不露出水面以及不向外发射信号的情况下实现长时间高精度导航等等。惯性导航方式能够自主、连续、实时地提供载体的航向、速度、位置和姿态信息,但其缺点是定位误差随时间累积。利用地球物理场信息(重力场、地形场、地磁场等)来辅助惯性导航的无源组合导航方式发展日益迅速^[4-5]。其中,重力场具有信息稳定、抗干扰能力强等优点,因而重力辅助导航成为近年来组合导航领域的研究热点^[6-7]。

文中提出捷联惯性(SINS)/计程仪/重力组合的

重力辅助惯性导航方案,描述了该系统的工作原理,建立了扩展卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程,并且构建了可视化仿真系统对算法的性能进行验证。

1 SINS/计程仪/重力信息融合方法

1.1 系统工作原理

SINS/计程仪/重力组合导航系统采用东北天(ENU)地理坐标系作为导航系,各传感器信息通过最优卡尔曼滤波器进行融合。一方面,根据 SINS 提供的载体纬度和经度信息 (φ_1, λ_1) ,从数字重力异常图中读取该位置对应的重力异常值 $g_y(\varphi_1, \lambda_1)$,将 $g_y(\varphi_1, \lambda_1)$ 、标准重力的计算值 $g_b(\varphi_1)$ 、厄特弗斯效应的计算值 E_C 、重力传感器的输出值 $g(\varphi, \lambda)$ 以及重力异常梯度 $\partial g_y / \partial \varphi, \partial g_y / \partial \lambda$ 输入卡尔曼滤波器,从而构成重力观测方程;另一方面,将 IMU 提供的载体东向

* 收稿日期:2010-10-08

基金项目:国家高技术研究发展计划重大项目(2006AA06A203,2006AA12Z302)资助

作者简介:祝燕华(1980-),女,江苏常熟人,讲师,博士,研究方向:惯性导航和组合导航技术。

和北向速度信息(V_{IE}, V_{IN})和计程仪输出的对应方向的速度(V_{CE}, V_{CN})输入卡尔曼滤波器,从而构成速度观测方程。

1.2 状态方程

陀螺随机误差为一阶马氏过程和白噪声,加速度计随机误差为白噪声,系统的误差状态变量如下:

$\mathbf{X} = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta v_E \ \delta v_N \ \delta\varphi \ \delta\lambda \ \epsilon_{rx} \ \epsilon_{ry} \ \epsilon_{rz}]^T$
 式中: ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为东向、北向和天向的数学平台误差角; $\delta v_E, \delta v_N$ 为东向和北向速度误差; $\delta\varphi, \delta\lambda$ 为纬度误差和经度误差; $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}$ 为陀螺一阶马氏过程误差,则状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t)_{10 \times 1} = \mathbf{A}(t)_{10 \times 10} \mathbf{X}(t)_{10 \times 1} + \mathbf{G}(t)_{10 \times 9} \mathbf{W}(t)_{9 \times 1} \quad (1)$$

上式中的具体参数定义可参见文献[8]。

1.3 观测方程

正将重力观测方程表示为:

$$\mathbf{Z}_g = \mathbf{H}_g \mathbf{X} + \mathbf{V}_g \quad (2)$$

式中: \mathbf{H}_g 为重力观测矩阵; \mathbf{V}_g 为观测噪声,由重力传感器噪声、重力异常图制作噪声和线性化误差等构成; \mathbf{Z}_g 为观测量,考虑到厄特弗斯效应的影响,将 \mathbf{Z}_g 表示为:

$$\mathbf{Z}_g = g_y(\varphi_1, \lambda_1) - (g(\varphi, \lambda) - g_b(\varphi_1) + E_C) \quad (3)$$

式中: $g_y(\varphi_1, \lambda_1)$ 为重力异常图上根据 SINS 提供的载体位置(φ_1, λ_1)获取的重力异常值; $g(\varphi, \lambda)$ 为重力传感器的输出值; $g_b(\varphi_1)$ 为标准重力的计算值; E_C 为厄特弗斯效应的计算值。

将式(3)线性化可得:

$$\mathbf{Z}_g = -\frac{\partial E_C}{\partial v_E} \delta v_E - \frac{\partial E_C}{\partial v_N} \delta v_N + \left(\frac{\partial g_y}{\partial \varphi} + \frac{\partial g_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_C}{\partial \varphi} \right) \delta\varphi + \frac{\partial g_y}{\partial \lambda} \delta\lambda \quad (4)$$

由式(4)可得重力观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{\partial E_C}{\partial v_E} & -\frac{\partial E_C}{\partial v_N} & \frac{\partial g_y}{\partial \varphi} + \frac{\partial g_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_C}{\partial \varphi} & \frac{\partial g_y}{\partial \lambda} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:重力异常梯度 $\frac{\partial g_y}{\partial \varphi}$ 和 $\frac{\partial g_y}{\partial \lambda}$ 可采用九点拟合或全平面拟合等方法计算。

将速度观测方程表示为:

$$\mathbf{Z}_v = \mathbf{H}_v \mathbf{X} + \mathbf{V}_v \quad (6)$$

式中: \mathbf{H}_v 为速度观测矩阵; \mathbf{V}_v 为观测噪声; \mathbf{Z}_v 为观测量,由 SINS 解算的速度(V_{IE}, V_{IN})和计程仪输出的速度(V_{CE}, V_{CN})之差构成,即:

$$\mathbf{Z}_v = \begin{bmatrix} V_{IE} - V_{CE} \\ V_{IN} - V_{CN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_v = [\mathbf{0}_{2 \times 3} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad \mathbf{0}_{2 \times 5}] \quad (8)$$

2 仿真研究

为了验证 SINS/计程仪/重力无源组合导航算法的有效性,基于 VC++6.0 开发了重力辅助惯性导航可视化仿真系统,该系统实现了传感器仿真模块的构建、组合导航计算、地图和轨迹显示等功能,其中,组合导航计算的原理和卡尔曼滤波算法如前所述,下面重点讨论传感器仿真模块的构建以及基于该仿真平台所进行的仿真试验结果。

2.1 传感器仿真模块的构建

正确模拟捷联惯性导航系统、计程仪和重力仪的量测输出是构建 SINS/计程仪/重力组合导航仿真系统的前提和重要环节。图 1 和图 2 所示分别为 SINS 和重力仪的仿真示意图,图 2 中下标 M 表示航迹发生器输出的理论值。其中,惯性器件误差发生器包括零偏、安装误差、刻度系数误差、一阶马氏过程误差等模型的建立;重力仪的误差等效为白噪声;为了简化起见,计程仪的速度仿真直接在航迹发生器产生的理论值上叠加白噪声。

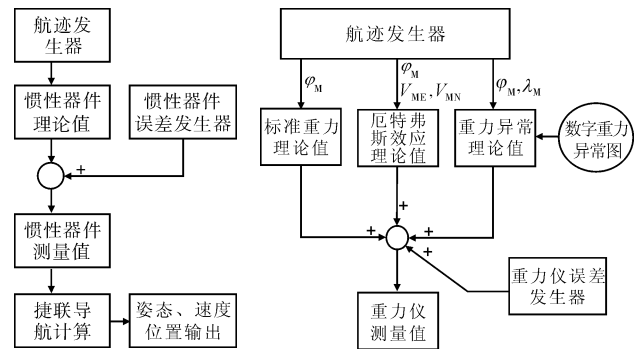


图 1 SINS 仿真示意图

图 2 重力仪仿真示意图

2.2 仿真结果与分析

假定载体的初始位置为北纬 30.7°、东经 124.2°,以速度 20m/s 向东北方向作匀速直线运动,各传感器的误差大小如下:陀螺仪和加速度计的三轴安装误差角均为 10",刻度系数误差均为 0.01%;陀螺仪的零偏、随机常数、马氏过程和白噪声均为 10°/h;加速度计的零偏和白噪声均为 $5 \times 10^{-4} g$;计程仪的量测白噪声为 0.8m/s;重力仪的量测白噪声为 5mgal;选用某一区域的数字重力异常图,其分辨率为 0.05°。

图 3 所示为 SINS/计程仪/重力组合导航仿真系统的工作界面,图 4~图 6 分别为组合导航的姿态误

差、速度误差和位置误差, 仿真时间共 300min。

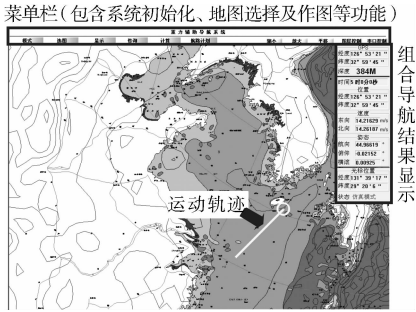


图 3 SINS/计程仪/重力组合导航仿真系统工作界面

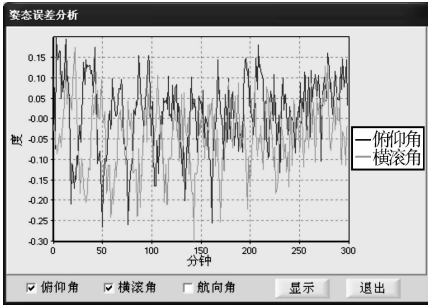


图 4 姿态误差曲线

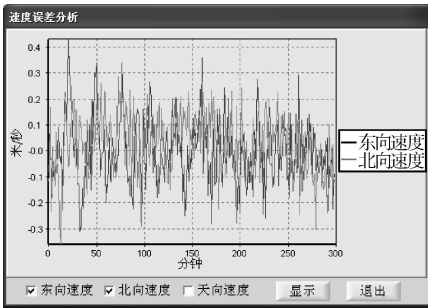


图 5 速度误差曲线



图 6 位置误差曲线

由图 4~图 6 可知, 通过计程仪和重力的量测信息对 SINS 误差的校正, 有效的控制了惯性导航系统速度和位置误差的累积, 组合导航系统的姿态误差小于 $0.2^\circ(1\sigma)$; 速度误差小于 $0.3\text{m/s}(1\sigma)$; 位置误差在一个重力图网格内, 并且 50min 之后, 经度误差保持

在目标系统误差的 4% 以内, 纬度误差保持在目标系统误差的 7% 以内。通过分析载体运动区域的重力场特征(包括重力场信息熵、粗糙度、相关系数、坡度等参数)可知, 经度、纬度误差较大的区域重力场特征较弱, 并且经度方向的重力场特征要好于纬度方向。因此, 仿真实验结果与理论分析完全相符。

3 结论

文中提出了 SINS/计程仪/重力组合的重力辅助惯性导航方案, 深入研究了 SINS、计程仪、重力信息融合方法, 构建了重力辅助导航可视化仿真系统, 不仅验证了文中提出的惯性导航算法和组合算法的正确性, 并且为重力辅助导航的进一步研究和工程化应用提供了良好的平台。

通过大量的仿真, 证明文中构建的 SINS/计程仪/重力组合导航系统姿态、速度和位置精度稳定, 能够满足长时间、一定精度的导航要求, 具有广阔的应用空间。

参考文献:

[1] 徐遵义, 晏磊, 宁书年, 等. 海洋重力辅助导航的研究现状与发展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 104—111.

[2] Hugh Rice, Louis Mendelsohn, Robert Aarons, et al. Next generation marine precision navigation system [C]//IEEE 2000 Position Location and Navigation Symposium. IEEE, Inc, 2000: 200—206.

[3] 刘繁明, 成怡. 重力/惯性匹配导航系统的仿真研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(3): 22—25.

[4] 程力, 蔡体菁. 基于支持向量机的重力匹配算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21): 5953—5956.

[5] Bishop G C. Gravitational maps and navigational errors [J]. IEEE Journal Ocean Engineering, 2002, 27(3): 726—737.

[6] Cai Tijing. Study on novel gravity passive navigation system[J]. Journal of Southeast University, 2006, 22(1): 53—58.

[7] 赖际舟, 刘建业, 林雪原. 低阶卡尔曼滤波器在低成本 SIAHRS 中的实现研究[J]. 中国空间科学技术, 2004 (1): 61—65.