

一种低成本 GPS/DR 组合导航系统设计

金亮良^{1,2}, 何文涛¹, 徐建华^{1,2}, 叶甜春¹, 翟昆朋¹, 蔺晓龙¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 杭州中科微电子有限公司, 杭州 310053)

摘 要: 根据车载导航的特点, 运用单自由度的加速度计代替里程计, 提出一种基于低成本的单陀螺仪单加速度计的航位推算(DR)方案。航位推算短时精度高, 但误差会随时间积累而变大, DR 与 GPS 导航利用扩展型卡尔曼滤波, 形成 GPS/DR 组合导航系统, 融合 2 个系统的优势, 完善导航能力。实际测试结果表明, 该 GPS/DR 组合导航系统能满足车载导航的基本需求, 在城市峡谷中有较高的定位精度, 且在 GPS 信号遮挡时能保持定位。

关键词: 车载导航; 航位推算; 陀螺仪; 加速度计; 扩展型卡尔曼滤波器; 组合导航系统

A Low-cost GPS/DR Integrated Navigation System Design

JIN Liang-liang^{1,2}, HE Wen-tao¹, XU Jian-hua^{1,2}, YE Tian-chun¹, ZHAI Kun-peng¹, LIN Xiao-long¹

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Hangzhou Zhongke Microelectronics Co., Ltd., Hangzhou 310053, China)

【Abstract】 According to the characteristics of land vehicle navigation, the single degree of freedom accelerometer can be used as a substitute for the odometer. The Dead Reckoning(DR) scheme is proposed based on a low-cost single accelerometer with a single gyroscope. The DR system's error accumulates over time, although it has high precision in a short while. Therefore, a GPS/DR integrated navigation system is formed by utilizing the Extended Kalman Filter(EKF). It combines the advantages of both systems and improves the navigation capacity. Actual test result shows that the GPS/DR integrated navigation system can satisfy the basic requirement of land vehicle navigation. It improves the degree of precision in the city valley and is able to work even when GPS signals are masked.

【Key words】 vehicle navigation; Dead Reckoning(DR); gyroscope; accelerometer; Extended Kalman Filter(EKF); integrated navigation system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.061

1 概述

航位推算根据物体在上一时刻所处的已知位置出发, 根据当前的运行航向和航速推算出物体在当前时刻的位置^[1]。文献[2]设计并实现了基于实时操作系统的低成本捷联惯导系统。利用惯性传感的合理组合可以完成航位推算功能。尽管航位推算(Dead Reckoning, DR)有短时精度高的优点, 但是随着时间的积累, 由于低成本惯性传感器的精度不高, 导致 DR 的精确性也会大大降低, 因此需要 GPS 与 DR 相结合来弥补这一不足。针对 DR 算法, 有多种惯性传感器选择方案: 单自由度陀螺仪和两自由度加速度计的组合^[3], 单自由度陀螺仪和里程计的组合^[4], 单自由度陀螺仪和单自由度加速度计的组合^[5]等。由于里程计的信号要从车中提取出来, 这个方案并不合适; 针对单陀螺仪双加速度计和单陀螺仪单加速度计方案的优缺点, 在文献[3]中有了明确的优缺点对比, 本文分析以上方案的优缺点, 选择单陀螺仪单加速度计的方案。

2 单陀螺仪单加速度计的导航力学编排

惯导系统的基本比力方程^[6]:

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{f}^n - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \quad (1)$$

其中, $\dot{\mathbf{v}}^n$ 、 $\mathbf{f}^n$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ 、 $\mathbf{v}^n$ 和 $\mathbf{g}^n$ 为向量形式。若在二维的车辆导航中, 高度变化一般不大, 可以不予考虑; 同时车辆在行驶过程中, 侧滑不明显, 也可以不用考虑, 因此, $(2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n$ 可以忽略^[2]。

改进后的航位推算模型如下:

$$\mathbf{V}^n(k) = \mathbf{V}^n(k-1) + \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b(k) \mathbf{d}t \quad (2)$$

其中, $\mathbf{V}^n = [\mathbf{v}_E^n \ \mathbf{v}_N^n]^T$; $\mathbf{f}^b = [f_x^b \ f_y^b]^T$; $\mathbf{C}_b^n = [\sin\varphi \ \cos\varphi]^T$; φ 为航向角; $\mathbf{d}t$ 为惯性传感器采样时间间隔。

3 GPS/DR 组合导航算法

3.1 系统状态方程的建立

GPS/DR 组合导航系统的核心算法是扩展卡尔曼滤波器, 针对单陀螺仪单加速度计的航位推算系统, 建模如下: 系统的状态方程, 可表示为^[7]:

作者简介: 金亮良(1986—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 卫星导航信号处理, 组合导航; 何文涛, 助理研究员; 徐建华、叶甜春, 研究员、博士生导师; 翟昆朋、蔺晓龙, 博士研究生

收稿日期: 2011-11-17

修回日期: 2012-02-01

E-mail: jinliangliang@casic.ac.cn

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ v_e(k+1) \\ a_e(k+1) \\ x_n(k+1) \\ v_n(k+1) \\ a_n(k+1) \end{bmatrix} = \text{diag}\{\Phi_e, \Phi_n\} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \\ a_e(k) \\ x_n(k) \\ v_n(k) \\ a_n(k) \end{bmatrix} + \omega(k) \quad (3)$$

其中:

$$\Phi_e = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_{ae}^2 \left(-1 + \frac{T}{\tau_{ae}} + e^{-\frac{T}{\tau_{ae}}} \right) \\ 0 & 1 & \tau_{ae} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_{ae}}} \right) \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T}{\tau_{ae}}} \end{bmatrix}; \quad \Phi_n = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_{an}^2 \left(-1 + \frac{T}{\tau_{an}} + e^{-\frac{T}{\tau_{an}}} \right) \\ 0 & 1 & \tau_{an} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_{an}}} \right) \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T}{\tau_{an}}} \end{bmatrix}$$

其中, x_e 、 v_e 、 a_e 分别为载体东向位移、速度和加速度;
 x_n 、 v_n 、 a_n 分别为载体北向位移、速度和加速度; T 为离散化步长; τ_{ae} 、 τ_{an} 分别为车辆东向和北向运动机加速度的相关时间常数; ω 为系统状态的过程噪声向量。

过程噪声 ω 的协方差矩阵 Q 为^[8]:

$$Q = \text{diag} \left\{ \frac{2\sigma_{ae}^2}{\tau_{ae}}, \frac{2\sigma_{an}^2}{\tau_{an}}, \frac{2\sigma_{ax}^2}{T}, \frac{2\sigma_{ay}^2}{T} \right\} \quad (4)$$

$$\text{其中, } Q_e = Q_n = \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix}.$$

3.2 系统观测方程的建立

观测量和状态量的关系式为:

$$\begin{cases} x_{\text{GPS}e} = x_e + \omega_{xe} \\ x_{\text{GPS}n} = x_n + \omega_{xn} \\ \omega_{\text{DR}} = \frac{\partial \tan^{-1}(v_e/v_n)}{\partial t} + \omega_\omega = \frac{v_n a_e - v_e a_n}{v_e^2 + v_n^2} + \omega_\omega \\ a_x = a_e / \sin(\varphi) + \omega_{ax} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $x_{\text{GPS}e}$ 、 $x_{\text{GPS}n}$ 为 GPS 东向和西向位移; ω_{DR} 、 a_x 分别为陀螺仪和加速度的测量值; ω_{xe} 、 ω_{xn} 、 ω_ω 和 ω_{ax} 分别为 GPS 东向位置、西向位置、陀螺仪、加速度计观测噪声; φ 为载体航向。因此, 由式(5)所推, 观测方程与 GPS/DR 观测方程会有所不同, 如下式所示:

$$Z(k+1) = \begin{bmatrix} x_{\text{GPS}e}(k+1) \\ x_{\text{GPS}n}(k+1) \\ \omega_{\text{DR}}(k+1) \\ a_x(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ x_n(k+1) \\ \frac{v_n(k+1)a_e(k+1) - v_e(k+1)a_n(k+1)}{v_e^2(k+1) + v_n^2(k+1)} \\ a_e(k+1)/\sin(\varphi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{xn} \\ \omega_{xn} \\ \omega_\omega \\ \omega_{ax} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{其中, } h(X) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ x_n(k) \\ \frac{v_n(k)a_e(k) - v_e(k)a_n(k)}{v_e^2(k) + v_n^2(k)} \\ a_e(k)/\sin(\varphi) \end{bmatrix}.$$

观测方程是非线性的, 非线性系统一般采用扩展卡尔

曼滤波器, 也可以采用 Unscented 卡尔曼滤波器^[9]:

$$Z(k) = f(\hat{X}_k^-) + H_k(\hat{X}_k - \hat{X}_k^-) + W_k \quad (7)$$

$$\text{其中, } H_k = \left. \frac{\partial h(X)}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_k^-} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & h_2 & 0 & h_3 & h_4 \\ 0 & 0 & h_5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\text{其中, } \begin{cases} h_1 = \frac{a_n v_e^2 - 2v_e v_n a_e - a_n v_n^2}{(v_e^2 + v_n^2)^2} \\ h_2 = \frac{v_n}{v_e^2 + v_n^2} \\ h_3 = \frac{a_e v_e^2 + 2v_e v_n a_e - a_e v_n^2}{(v_e^2 + v_n^2)^2} \\ h_4 = \frac{-v_e}{v_e^2 + v_n^2} \\ h_5 = 1/\sin(\varphi) \end{cases}$$

观测噪声 W_k 的协方差矩阵 R 为:

$$R = \text{diag} \{ \sigma_{\text{GPS}e}^2, \sigma_{\text{GPS}n}^2, \sigma_\omega^2/T, \sigma_{ax}^2/T \} \quad (8)$$

4 测试结果

GPS 导航模块为杭州中科微电子的导航接收机开发平台; 惯性传感器模块为 ADI 公司的 ADIS16365, 选取 ADIS16365 的 Z 轴陀螺仪和 X 轴加速度计; 射频芯片为 MaxIM2769。惯性传感器采样率为 50 Hz, GPS 定位输出频率为 1 Hz, GPS/DR 组合导航定位输出频率 1 Hz。GPS 模块的准确定位信息初始化 DR 系统, 初始化信息包括速度、位置和航向。在程序 0.8 ms 的测量中断中提取惯性传感器的采样测量值, 采样测量值包括陀螺仪的角速度和加速度计的加速度, 采样时间间隔为 20 ms, 且所得采样测量值要严格与 GPS 时间同步, 通过 GPS 系统输出的秒脉冲(PPS)实现对准。DR 系统被初始化后即具有导航能力。当 GPS 信号被遮挡无法定位时, DR 系统可单独工作并可连续导航。当 GPS 信号恢复后, 可继续以 GPS/DR 组合导航的方式给出定位信息。

图 1 为 DR 和 GPS 单独导航结果。测试时间为 300 s。由于 GPS 定位导航误差并不会随时间积累, 因此 GPS 定位导航结果会比较稳定, 不会越偏越远。从图 2 可以明显看出, 单独的 DR 导航会随着时间的积累而误差变大。其中, 实际轨迹与 GPS 测试导航轨迹重合。



图1 GPS/DR 组合导航系统实物

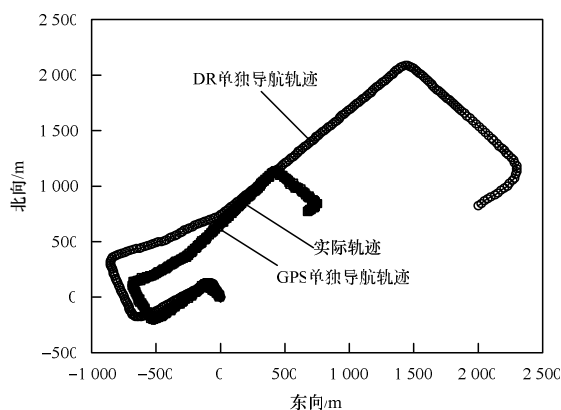


图 2 DR 和 GPS 测试结果

图 3 和图 4 均为 GPS/DR 实际跑车结果。



图 3 GPS/DR 组合导航测试结果 1



图 4 GPS/DR 组合导航测试结果 2

图 3 中包含了半边高楼、两边高楼的城市峡谷场景,也包含转弯转圈等对卡尔曼滤波器要求较高的场景,从图中可以看出, GPS/DR 组合导航在城市峡谷中拥有更高的

导航精度,且在转弯处有更平滑的导航结果。图 4 是在杭州市滨江区冠山隧道的测试结果,从图中可以看出当 GPS 信号在隧道中被遮挡之后, GPS/DR 组合导航系统还能依靠 DR 系统继续保持导航定位,且定位结果较为准确。

5 结束语

对于单陀螺仪单加速度的 DR 导航,误差随时间积累明显变大。GPS 和 DR 2 种导航存在互补关系,本文利用扩展卡尔曼滤波器,融合 GPS/DR 测量值,有较好的定位导航能力。在原有的 GPS 接收机上增加一个自由度的陀螺仪和一个自由度的加速度计,就能形成组合导航系统,该 GPS/DR 导航组合系统硬件简单,成本较低。

参考文献

- [1] 谢 钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 杜继永, 黄国荣, 程洪炳, 等. 基于实时操作系统的低成本捷联惯导系统[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 251-255.
- [3] Seong Yun Cho, Wan Sik Choi. Robust Positioning Technique in Low-cost DR/GPS for Land Navigation[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(4): 1132-1142.
- [4] 赵超凡, 付梦印, 张继伟. 低成本组合导航系统滤波算法的研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(4): 215-217.
- [5] 贾继超, 吴训忠, 夏加和, 等. 一种车辆航位推算改进方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(4): 453-455.
- [6] Farrel J A, Barth M. The Global Positioning System and Inertial Navigation[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1999.
- [7] 张红梅, 刘 胜, 张晓宇. 一种车载组合导航系统的联邦滤波新算法[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6): 30-33.
- [8] 房建成, 申功勋, 万德钧. 一种自适应联合卡尔曼滤波器及其在车载 GPS/DR 组合导航系统中的应用与研究[J]. 中国惯性技术学报, 1998, 6(4): 1-6.
- [9] Julier S, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.

编辑 索书志

(上接第 227 页)

参考文献

- [1] 张 隼, 吴晓平, 赵东明. 地球引力场在主动段弹道制导中的应用研究[C]//中国测绘学会 2006 年学术年会论文集. 郑州: [出版者不详], 2006.
- [2] 张 隼, 吴晓平. 重力场模型截断误差对弹道扰动引力计算的影响[C]//中国地球物理学会第 22 届年会论文集. 北京: [出版者不详], 2007.
- [3] Li Xiaoyan, Wang Xingtao, Li Yingchun. Effects of Disturbing Gravity on Passive Trajectory of Intercontinental Ballistic Missile[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2010, 27(2): 123-126.
- [4] 张 毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.
- [5] 王继平, 王明海, 周 伟, 等. 导弹主动段扰动引力的分段梯度法逼近[J]. 弹道学报, 2009, 21(2): 59-60.
- [6] 陈国良, 安 虹, 陈 峻, 等. 并行算法实践[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [7] 郭本俊, 王 鹏, 陈高云, 等. 基于 MPI 的云计算模型[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 84-86.
- [8] Zhao Dongming, Wu Xiaoping. Approximation of the Disturbing Gravity of the Active Phase of Trajectory Using Finite Element Method[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 309-313.

编辑 索书志

