

GPS/DR 组合导航中一种新的数据融合算法

柴艳菊^{1,2} 欧吉坤¹

(1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)
(2 中国科学院研究生院,北京市玉泉路甲 19 号,100039)

摘 要:在分析以往多传感器组合观测数据融合算法基础上,提出了一种新的数据融合算法。仿真计算结果证实了该方法的可行性。
关键词:数据融合算法;滤波;GPS/DR;组合导航
中图法分类号:P228.41

由于 GPS 能为全球用户提供全天候、连续、实时的高精度位置、速度和时间信息,因此在航空、航海和陆地车辆导航等方面都得到了广泛的应用^[1,2]。但是 GPS 动态性能比较差,卫星信号受阻挡后会引起失锁,出现中断,使得导航定位不完整。在低成本的组合导航系统中,DR 系统比较常见,也是目前车辆、船只导航中比较常用的辅助导航系统。DR 系统是自主导航系统,不受周围环境的影响,能提供连续的导航。但是 DR 的缺陷是定位误差随时间而积累,不能长时间单独使用。GPS/DR 组合导航系统能够互相补充,提高定位的可靠性和完整性^[3,4]。

在组合导航系统中,如何将两种数据进行融合,是决定导航定位精度的关键问题。有关数据融合的算法,大致分为紧密结合和松散结合两种^[4~10]。针对 DR 系统位置误差累计的缺陷,有学者提出了陀螺仪误差补偿法^[11],但准确估计出陀螺仪漂移比较困难。本文在以往方法的基础上,提出了一种新的数据融合算法,先对 DR 观测进行滤波,利用估计出的速度和加速度,再和 GPS 观测结合确定出最终的导航结果。

1 GPS/DR 组合系统的数学模型

1.1 状态方程

在地理(北-东-天)坐标系中,取运动载体在

东向和北向的位置、速度和加速度为状态向量, GPS/DR 组合导航系统的状态方程为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \boldsymbol{\phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (1)$$

式中, $\hat{\mathbf{X}}_k = (e(k) \ v_e(k) \ a_e(k) \ n(k) \ v_n(k) \ a_n(k))^T$

为状态向量; $\boldsymbol{\phi}_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_e & \\ & \boldsymbol{\Phi}_n \end{bmatrix}$ 为一步状态转移矩阵,其中 $\boldsymbol{\Phi}_e = \boldsymbol{\Phi}_n = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ & 1 & \Delta t \\ & & 1 \end{bmatrix}$, Δt 为观

测时间间隔; $\mathbf{w}_{k-1} \sim N(0, \mathbf{Q}_{k-1})$ 为动态噪声。

1.2 观测方程

1.2.1 DR 系统的观测方程

DR 系统包括陀螺仪和里程计, k 时刻陀螺仪的输出是角速率 $\omega(k)$, 里程计的输出量为在采样周期内行进的距离 $s(k)$, 建立观测方程如下^[3]:

$$L_1(k) = \begin{bmatrix} \omega(k) \\ s(k) \end{bmatrix} = F(\hat{\mathbf{X}}_k) = \begin{bmatrix} \frac{v_n(k)a_e(k) - v_e(k)a_n(k)}{v_e^2(k) + v_n^2(k)} \\ \Delta t \varphi \sqrt{v_e^2(k) + v_n^2(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_\omega \\ -\boldsymbol{\varepsilon}_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, Δt 为采样间隔; φ 为里程计的标定系数; $\boldsymbol{\varepsilon}_k = [\boldsymbol{\varepsilon}_\omega \ \boldsymbol{\varepsilon}_s]^T \sim N(0, \mathbf{R}_1)$ 为测量误差。由于式(2)是非线性的,在用扩展 Kalman 滤波对其估计时,需要先进行线性化处理。将式(2)在 $\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$ 附近展开为泰勒级数,并只保留一阶项,得:

$$L_1(k) = F(\hat{X}_{k,k-1}) + H_1(k)(\hat{X}_k - \hat{X}_{k,k-1}) + \varepsilon_k$$

将上式整理得:

$$\underbrace{L_1(k) - F(\hat{X}_{k,k-1}) + H_1(k)\hat{X}_{k,k-1}}_{\tilde{L}_1(k)} = H_1(k)\hat{X}_k + \varepsilon_k \tag{3}$$

其具体线性化步骤见文献[3]。

1.2.2 GPS 观测方程

导航型 GPS 接收机的输出量为载体的位置 e_{obs} 和 n_{obs} ,GPS 在 k 时刻的观测方程为:

$$L_2(k) = \begin{bmatrix} e_{\text{obs}} \\ n_{\text{obs}} \end{bmatrix} = H_2(k)\hat{X}_k + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, $H_2(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 为系数阵;

$V_k = [v_1 \quad v_2]^T \sim N(0, R_2)$ 为 GPS 观测误差,且满足 V_k, ε_k 与 w_{k-1} 不相关。

2 GPS/DR 组合系统中滤波新算法

本文在分析以往滤波方法基础上,提出了一种新的滤波方法。首先将式(1)和式(3)输入 Kalman 滤波器,利用扩展 Kalman 滤波方法得到载体的状态估计结果。虽然 DR 系统的位置误差具有累计效应,但是速度和加速度在短时间内相对比较准确。随后利用 DR 系统提供的 k 时刻的速度和加速度及 GPS/DR 系统提供的 $k-1$ 时刻的位置来预测 k 时刻载体的位置,再和 GPS 观测数据一起进行滤波,得到最终的状态估计结果。

2.1 对 DR 系统进行滤波估计

1) 预测

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{k,k-1}^{\text{DR}} &= \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}^{\text{DR}} \\ P_{k,k-1}^{\text{DR}} &= \Phi_{k,k-1} P_{k-1}^{\text{DR}} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

2) 更新

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= P_{k,k-1}^{\text{DR}} H_1^T (H_1 P_{k,k-1}^{\text{DR}} H_1^T + R_1)^{-1} \\ \hat{X}_k^{\text{DR}} &= \hat{X}_{k,k-1}^{\text{DR}} + K_1 (\tilde{L}_1(k) - H_1 \hat{X}_{k,k-1}^{\text{DR}}) \\ P_k^{\text{DR}} &= [I - K_1 H_1] P_{k,k-1}^{\text{DR}} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

2.2 对 GPS 系统进行滤波估计

1) 利用 DR 滤波结果 \hat{X}_k^{DR} 中的速度和加速度及 $k-1$ 时刻 GPS/DR 滤波结果 \hat{X}_{k-1} 中的位置,对 GPS 系统中的状态参数及其误差方差进行预测:

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}_{k,k-1} &= \bar{\Phi}_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}^{\text{new}} \\ P_{k,k-1} &= \bar{\Phi}_{k,k-1} P_{k-1}^{\text{new}} \bar{\Phi}_{k,k-1}^T \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中, $\hat{X}_{k-1}^{\text{new}} = [\hat{X}_{k-1}(1) \quad \hat{X}_{k-1}^{\text{DR}}(2) \quad \hat{X}_{k-1}^{\text{DR}}(3) \quad \hat{X}_{k-1}(4) \quad \hat{X}_k^{\text{DR}}(5) \quad \hat{X}_k^{\text{DR}}(6)]^T$; $\bar{\Phi}_{k,k-1} =$

$$\begin{bmatrix} \bar{\Phi}_1 \\ \bar{\Phi}_2 \end{bmatrix}, \bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; P_{k-1}^{\text{new}} =$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, \text{其中,}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} P_{k-1}^{\text{DR}}(1,1) & 0 & 0 \\ 0 & P_k^{\text{DR}}(2,2) & P_k^{\text{DR}}(2,3) \\ 0 & P_k^{\text{DR}}(3,2) & P_k^{\text{DR}}(3,3) \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} P_{k-1}^{\text{DR}}(4,4) & 0 & 0 \\ 0 & P_k^{\text{DR}}(5,5) & P_k^{\text{DR}}(5,6) \\ 0 & P_k^{\text{DR}}(6,5) & P_k^{\text{DR}}(6,6) \end{bmatrix}。$$

2) 更新

$$\left. \begin{aligned} K_2 &= P_{k,k-1} H_2^T (H_2 P_{k,k-1} H_2^T + R_2)^{-1} \\ \hat{X}_k &= X_{k,k-1} + K_2 (L_2(k) - H_2 \hat{X}_{k,k-1}) \\ P_k &= [I - K_2 H_2] P_{k,k-1} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

2.3 DR 动态噪声方差 Q_k 的自适应估计方法^[3]

$$Q_k = \begin{bmatrix} 2\sigma_{a_e}^2 Q_e(k) & 0 \\ 0 & 2\sigma_{a_n}^2 Q_n(k) \end{bmatrix}$$

式中, $Q_e(k) = Q_n(k) \approx \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^5}{20} & \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{6} & \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{bmatrix}。$

当加速度估计为正时:

$$\sigma_{a_e}^2 = \frac{4-\pi}{\pi} [a_{\text{max}} - \hat{a}_e(k, k-1)]^2 = \frac{4-\pi}{\pi} [a_{\text{max}} - \hat{a}_e(k)]^2$$

否则,

$$\sigma_{a_e}^2 = \frac{4-\pi}{\pi} [a_{\text{-max}} + \hat{a}_e(k)]^2$$

同理可以得出 $\sigma_{a_n}^2$ 的自适应估计,同时求得 Q_k 。

如果 k 时刻没有 GPS 观测信息,数据融合停止,由式(7)求得的状态预报值即为载体的导航结果。

3 计算仿真与分析

为了验证本文提出的滤波算法的效果,进行如下模拟。假设车辆从(0,0)点出发,以 $10\sqrt{2}$ m/s 的速度沿 45° 航向作匀速运动,即 $v_e(0) = v_n(0) = 10$ m/s, $a_e(0) = a_n(0) = 0$ m/s²,运行时间为 250 s。陀螺仪的输出为均值为 0、方差为

($0.4^{\circ}/\text{s}$)²的高斯白噪声。采样周期为 0.05 s。里程表在采样周期内的里程取样为在 0.707 m 的基础上叠加了一个均值为 0、方差为(0.01 m)²的高斯白噪声。在机动加速度方差自适应算法中,取 $a_{\text{max}}=a_{\text{-max}}=20\text{ m/s}^2$ 。模拟的 GPS 观测误差分布为 $N(0,7^2\text{ m}^2)$,采样周期为 1 s,且在 100~110 历元中断 10 s。由于 DR 系统的采样率

是 GPS 系统的 20 倍,DR 系统每隔 20 个历元和 GPS 进行一次融合,其余由 DR 系统利用扩展 kalman 滤波单独估计。分别采用本文提出的滤波方法(方案 I)和松散组合算法(方案 II)进行计算。其结果的统计值见表 1,DR 系统的位置误差见图 1,速度和加速度滤波结果见图 2,GPS/DR 组合系统的位置滤波误差见图 3。

表 1 E、N 方向模拟的 GPS 位置误差、新方法的滤波误差和松散组合滤波误差统计结果

Tab. 1 Statistical Results of the Simulated GPS Positioning Errors、the Filtering Errors of the New Method and that of the Loosely-coupled Method in the Directions of E and N

统计量	模拟误差		方案 I 结果		方案 II 结果	
	E 方向	N 方向	E 方向	N 方向	E 方向	N 方向
求和	168.810 2	10.301 5	-23.413 9	3.706 0	292.735 9	592.100 1
最小值	-19.716 3	-18.877 0	-9.877 5	-11.335 2	-26.859 6	-7.848 4
最大值	21.395 5	21.402 6	11.525 8	10.617 1	12.286 5	25.383 2
平均值	0.675 2	0.041 2	-0.093 7	0.014 8	1.170 9	2.368 4
标准差	7.074 5	6.766 0	4.408 6	4.574 2	5.085 1	4.691 2

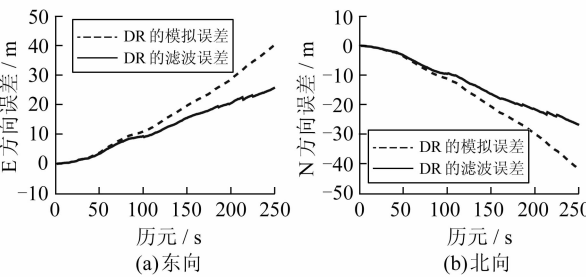


图 1 DR 模拟误差与滤波误差

Fig. 1 Simulating Emors and Filtering Errors of DR

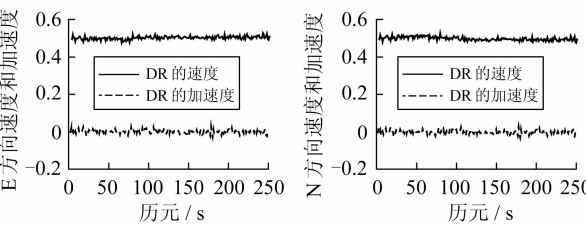


图 2 DR 的速度和加速度滤波结果

Fig. 2 Velocity and Acceleration Filtering Results of DR

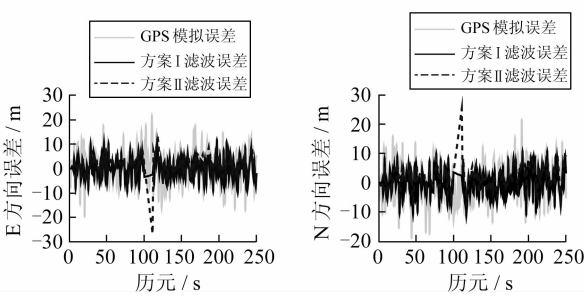


图 3 GPS 模拟位置误差及 GPS/DR 滤波误差

Fig. 3 Simulating Position Errors of GPS and Filtering Errors of GPS/DR

从表 1 可知,方案 II 求得的 E、N 方向的误差序列各项统计值与模拟的 GPS 位置误差相比除了标准差偏小外,其它项都比较大,这主要是因为松散组合算法中 DR 的位置误差也参与了最终的滤波,对整个系统的结果影响比较大,尤其当 GPS 信号中断时,定位误差明显增大。方案 I 求得的 E、N 方向的误差序列各项统计值比模拟情况都小,这是由于新的滤波算法中 DR 的位置没有参与滤波,因此削弱了 DR 的位置误差对滤波结果的影响。当 GPS 信号中断时,利用 DR 系统估计得到的速度和加速度,对位置信息进行预报而不直接利用 DR 的位置估计结果,避免了 DR 位置误差的积累影响。但是因为 GPS 中断时间不长,两种方案算得的标准差都比模拟的小,这也说明两种系统的组合要优于单一导航系统。

从图 1 和图 2 可以看出,DR 系统的位置误差具有明显的累积效应,而速度和加速度滤波结果比较稳定,因此在滤波过程中必须对位置误差进行处理,削弱它对导航定位的影响,同时要充分利用 DR 的速度和加速度信息。模拟误差及两种方案的定位结果也可以从图 3 中反映出来。从图 3 中可以看出,当 GPS 信号中断时,单独的 DR 系统导航结果比较差。

4 结 语

1) 以往的数据融合算法由于 DR 的位置一起参与滤波,结果受位置误差累积的影响比较大,而本文提出的滤波方法对于削弱 DR 位置误差积

累的影响有一定的作用。尤其当 GPS 信号中断时,单独利用 DR 系统进行导航,位置误差积累比较明显。而用 DR 估计的速度和加速度来估计位置对于抑制 DR 位置误差的积累效果比较好。

2) 新的滤波算法在实施过程不需要进行误差分配,实施比较简单、方便。

3) 本文的研究仅仅是初步,对于比较复杂的实际观测和载体运动情况,该方法还需要作进一步研究。

参 考 文 献

1 王惠南. GPS 导航原理与应用. 北京:科学出版社, 2003

2 常 青,郑平方,柳重堪,等. 车载 GPS/DR 组合导航系统数据融合算法研究. 通信学报,2000,21(2):42~48

3 万德钧,房建成,王 庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用. 南京:江苏科学技术出版社,2000

4 Ochieng W Y, Polark J W, Zhao L, et al. Integrating of GPS and Dead Reckoning for Real Time Vehicle Performance and Emissions Monitoring. ION-GPS, 2002, 396~408

5 杨元喜,高为广. 基于方差分量估计的自适应融合导航. 测绘学报,2004,33(1):22~26

6 Wu Q P, Gao Z Y, Wan D J. An Adaptive Information Fusion Method to Vehicle Integrated Navigation. IEEE, 2002, 248~253

7 耿延睿. GPS/SINS 组合系统算法与工程设计研究: [博士学位]. 北京:北京航空航天大学,2001

8 Donald T. Knight Rapid Development of Tightly Coupled GPS/INS System. IEEE,1996,300~305

9 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用: [博士学位]. 武汉:武汉大学,2004

10 杨剑宏. 舰载光纤陀螺捷联系统快速初始对准及 GPS/SINS 组合技术研究:[博士学位]. 上海:上海交通大学,2001

11 Kim J, Lee J G. Compensation of Gyroscope Errors and GPS/DR Integration. IEEE, 1995, 464~470

第一作者简介:柴艳菊,博士生。现主要从事 GPS/INS/DR 组合导航方面的研究工作。代表成果:卡尔曼滤波质量控制的一种改进算法及单历元周跳的探测与修复等。
E-mail:cyjigg@sina.com

A New Data Fusion Method for GPS /DR Integrated Navigation System

CHAI Yanju^{1,2} OU Jikun¹

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Chinese Academy of Sciences, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, A 19 Yuquan Road, Beijing 100039, China)

Abstract: A new data fusion method is put forward on the basis of analyzing the virtue and shortcoming of the previous data fusion methods of multiple sensors. The final results avoid the affection of the position errors accumulation because only the velocity and acceleration parameters of DR are used when combined with the GPS observations. When the GPS signal is interrupted, the final positions are predicted by using the velocity and acceleration parameters but not estimated directly from the DR system. The feasibility of this method is certified through a simulating example of GPS/DR.

Key words: data fusion; filtering; GPS/DR; integrated navigation

About the first author: CHAI Yanju, Ph. D candidate. She is concentrated on the GPS/INS/DR integrated navigation. Her typical achievements are “a new approach for quality control in the kalman filtering” and “the method for detecting and repairing the cycle slips in the GPS navigation”, et al.
E-mail: cyjigg@sina.com