

GPS 组合导航系统的数据融合

郑利龙, 曹志刚

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 首先介绍了车载 GPS 加上 DR 组合导航系统的设计, 建立了车辆加速度及影响组合导航系统定位精度的主要误差的数学模型. 然后针对一般组合滤波算法中, 由于 DR 系统误差的引入, 导致滤波效果不好的问题, 提出了一种组合导航系统的数据融合. 对车载 GPS/DR 组合导航系统提供的实际数据的处理结果表明, 该方法既能提高 GPS 定位精度, 又能有效控制 DR 系统的误差发散, 从而有效地消除了一般组合滤波算法中 DR 系统误差对滤波器的影响, 大大提高了组合系统的完整性和可靠性. 令 GPS 在如香港交通环境: 道路狭窄且多弯、交叉线多且密集、街道两侧高楼林立、桥梁多且较密集、隧道多且长、地形类似丘陵且高山较多, 而且车辆也多行驶速度又快的情形下变得可行.

关键词: 全球定位系统; 组合导航系统; 航位推算; 数据融合

中图分类号: TN961 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1384-03

Data Fusion of GPS Integrated Navigation System

ZHENG Li-long, CAO Zhi-gang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, the use of GSM Short Message method incorporating GPS system vehicle guidance is discussed and a mathematical model is founded to represent the acceleration and main error which affects the GPS/DR integrated system position accuracy. A data fusion algorithm of integrated system is introduced to improve the accuracy of the navigation system. Since the dead reckoning (DR) technique is being used in the system, this algorithm is not only improving the GPS position accuracy but also preventing the error of the DR to be diversified. The method has made the integrated system to be robust and reliable in an environment with a lot of tall buildings, tunnels, bridges and mountains like Hong Kong.

Key words: global positioning system; integrated navigation system; dead reckoning data fusion

1 组合定位方式的选择及特点

GPS 系统在动态环境和遮挡地域可能出现接收机不易捕获和跟踪 GPS 信号, 导致 GPS 的功能失效, 不能正常定位的现象. 鉴于香港自身的交通环境特点, 若仅仅采用 GPS 定位, 在有些地方由于卫星信号被遮挡而使接收机不能定位, 这就造成车辆轨迹出现断点 (不连续), 断点持续的时间较长时车辆轨迹就会出现空白 (监控盲区), 车辆轨迹监控可信度就越低. 而系统的 5 秒一次的采样速率, 当车速较高时在转弯等特殊地段, 其车辆的轨迹细节描述较差. 一般而言采用组合定位技术可解决上述问题, 下面具体分析.

导航领域中传统定位方法是利用惯性器件的输出信息进行航位推算 (DR—Dead Reckoning). 其基本原理是利用方向和速度传感器来推算车辆位置, 其推算过程是一个累加过程, 由于这种累加过程会把每一时刻的方向和速度传感器的误差累加起来, 导致 DR 系统定位误差随时间的推移会越来越大. 因此, 利用低成本的惯性器件构成的 DR 系统不能单独、长时间的使用. 而 GPS 系统具有高精度的测速、定位及授时能力, 于

是综合两种系统优势而构成的组合 GPS/DR 系统引起了人们的广泛关注. 组合系统的目的有三个: (1) 利用 GPS 连续提供的高精度位置和速度信息对航位推算系统的误差进行实时的校正和补偿, 从而提高 DR 系统的导航精度. (2) 当在遮挡地域 GPS 系统丢星时, 可利用 DR 系统航位推算的完全自主性进行车辆的轨迹推算, 保障组合系统定位的实时性. (3) 在两次 GPS 数据采样期间 (本系统的采样间隔是 5 秒钟), 可利用 DR 系统进行航位推算 (每秒一次), 从而得到车辆轨迹的细节描述, 提高轨迹监控的可信度.

在本课题采用 GPS/DR 组合定位技术后, 区域“盲点”基本消失, 能保证电子地图上车辆轨迹的连续和平滑.

2 DR 组合导航的数学模型

组合导航系统的卡尔曼滤波的状态变量取为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1^T \quad \mathbf{X}_2^T]^T \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{X}_1^T = [e \ n \ \dot{e} \ \dot{n} \ \ddot{e} \ \ddot{n}] \quad \mathbf{X}_2^T = [\delta_0 \ \delta_s]$$

收稿日期: 2001-07-02; 修回日期: 2002-04-20

基金项目: 香港城市大学 Strategic Grant (No. 7000652-570)

e 和 n 分别为东向位置和北向位置,单位为米; \dot{e} 和 \dot{n} 分别为东向速度和北向速度,单位为米/秒; \ddot{e} 和 \ddot{n} 分别为东向加速度和北向加速度,单位为米/秒²; ϵ_e 和 ϵ_n 分别为各种误差源在两个坐标轴上造成的总的位置误差,单位为米; δ_θ 为陀螺输出的相对转角的误差,单位为弧度; δ_s 为里程仪输出的距离的误差,单位为米.由于在短时间内陀螺的零偏相对变化较小,陀螺的误差主要为随机噪声误差,由文献[5]知,可采用一阶马尔可夫过程来描述 δ_θ ,即

$$\dot{\delta}_\theta = -\tau_{\delta_\theta} \cdot \delta_\theta + \omega_{\delta_\theta} \quad (2)$$

其中 τ_{δ_θ} 是相关时间常数的倒数; ω_{δ_θ} 为均值为零,方差为 $q_{\delta_\theta}^2$ 的高斯白噪声.同样地由于影响里程仪的刻度系数 f 的各种误差源,通过 f 反映到里程仪的测量上表现为里程仪的距离测量附加有一个随机噪声,由文献[5]知,也可采用一阶马尔可夫过程来描述 δ_s ,即

$$\dot{\delta}_s = -\tau_{\delta_s} \cdot \delta_s + \omega_{\delta_s} \quad (3)$$

其中 τ_{δ_s} 是相关时间常数的倒数; ω_{δ_s} 为均值为零,方差为 $q_{\delta_s}^2$ 的高斯白噪声.由于 GPS 定位的各种误差源通常可以等效为一阶马尔可夫过程,实践表明行之有效^[6],因此它们在两个坐标轴上造成的总的位置误差 ϵ_e 和 ϵ_n 可以分别用一阶马尔可夫过程作为其模型,即

$$\dot{\epsilon}_e = -\tau_{\epsilon_e} \epsilon_e + \omega_{\epsilon_e}, \epsilon_n = -\tau_{\epsilon_n} \epsilon_n + \omega_{\epsilon_n} \quad (4)$$

其中 $\tau_{\epsilon_e}, \tau_{\epsilon_n}$ 分别为对应马尔可夫过程的相关时间常数的倒

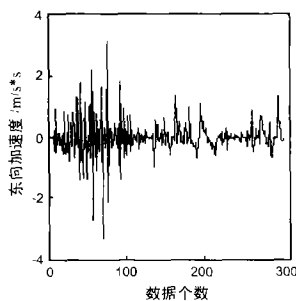


图 1 车辆东向加速度曲线

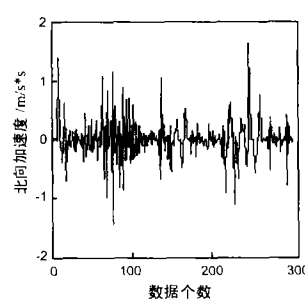


图 2 车辆北向加速度曲线

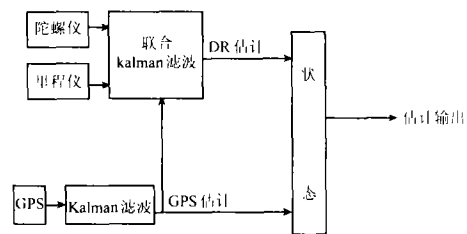


图 3 数据融合示意图

- (1) $X(k, k-1) = \Phi'(k, k-1)X(k-1)$
 - (2) $P_1(k, k-1) = \Phi_1(k, k-1)P_1(k-1)\Phi_1^T(k, k-1) + Q_1(k-1)$
 - $P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1)$
 - (3) $K_1(k) = P_1(k, k-1)H_1^T(k)[H_1(k)P_1(k, k-1)H_1^T(k) + R_1(k)]^{-1}$
 $K(k) = P(k, k-1)H^T[X(k, k-1)] \cdot \{H[X(k, k-1)]P(k, k-1)H^T[X(k, k-1)] + R(k)\}^{-1}$
 - (4) $X(k) = X(k, k-1) + [G_1^T \ 0_{1 \times 2}]^T + [0_{8 \times 1} \ G_2^T]^T$
- 其中,
- $$G_1 = K_1(k)\{Z_1(k) - h_1[X(k, k-1)]\} \quad G_2 = [g_1 \ g_2]^T$$
- g_1, g_2 是列向量 $K(k)\{Z(k) - h[X(k, k-1)]\}$ 的第九和第十个元素
- (5) $P_1(k) = [I - K_1(k)H_1(k)]P_1(k, k-1)$
 - $P(k) = [I - K(k)H[X(k, k-1)]]P(k, k-1)$

另外,观测方程的线性化必然引入线性化误差,为抵消此

数; $\omega_{\epsilon_e}, \omega_{\epsilon_n}$ 分别为均值为零,方差为 $q_{\epsilon_e}^2, q_{\epsilon_n}^2$ 的高斯白噪声.由于受到许多外界因素的影响,如路线形状,路面条件,驾驶员状态以及交通拥挤情况等,车辆加速度的变化过程是一个随机过程.图 1 和图 2 为在车辆的整个行驶过程中的东向加速度曲线和北向加速度曲线.是利用传统的 Singer 加速度模型.其中 τ_{a_e}, τ_{a_n} 为对应马尔可夫过程的相关时间常数的倒数; $\omega_{a_e}, \omega_{a_n}$ 为均值为零,方差为 $2\tau_{a_e}\sigma_{a_e}^2, 2\tau_{a_n}\sigma_{a_n}^2$ ($\sigma_{a_e}^2, \sigma_{a_n}^2$ 为机动加速度的方差)的高斯白噪声.

状态方程的离散化,设采样周期为 T ,通过典型的离散处理方法,可以得到离散状态方程为(参看文献[7,8]).

$$X(k+1) = \Phi(k+1)X(k) + U(k) + W(k) \quad (5)$$

由于陀螺仪和里程仪的误差被引入滤波器的位置、速度和加速度的估计中去.由于随着时间的推移,陀螺仪和里程仪的误差会越来越大,因此滤波器的位置、速度和加速度的估计所受的影响也会越来越大.而位置、速度和加速度的估计的不准确又会对陀螺和里程仪的误差估计造成不良影响.为了提高整个组合系统的估计精度,首先必须提高位置、速度和加速度的估计精度,为此需要将两个系统分离.然后利用对位置、速度和加速度的较准确的估计再对陀螺和里程仪的误差进行估计,此时需要将两个系统结合(见图 3).只有这样,才能在数据融合过程中做到既提高组合导航系统的定位精度,又能将陀螺和里程仪的误差尽可能准确地估计出来.为此我们提出如下的数据融合算法(参看文献[7,8]):

误差,采用迭代的方法.具体做法是:当按照以上步骤第一次得到滤波估计 $X(k)$ 后,求 $h[X(k)], H[X(k)]$.然后以 $h[X(k)], H[X(k)]$ 替换相应各式中的 $h[X(k, k-1)], H[X(k, k-1)]$ 重新得到 G_2 ,把 G_2 的两个元素对应地加到 $X(k)$ 第九和第十个元素上,得到新的估计 $X(k)$,该估计作为滤波结果[8].

假设 $k'T$ 时刻 GPS 系统发生了丢星,不能给出定位解,那么数据融合停止.此时由航迹推算系统按照以下的式子继续给出车辆的位置, $e()$ 和 $n()$ 分别为向东和向北位置.

$$e(k') = e(k'-1) + s(k')\sin[\beta(k'-1) + \theta(k')]$$

$$n(k') = n(k'-1) + s(k')\cos[\beta(k'-1) + \theta(k')]$$

3 算法的跑车实验验证

为了验证前面提出的数据融合算法的有效性,进行了跑车实验,采样周期为 1 秒.

图 4 曲线 1,3 为原始 GPS 系统和 DR 系统测量曲线,由图

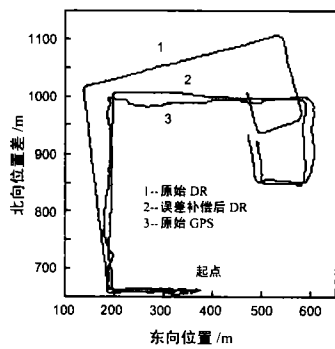


图 4 滤波前后 GPS 曲线比较

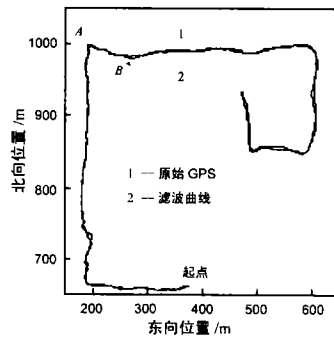


图 5 误差补偿前后的 DR 曲线和

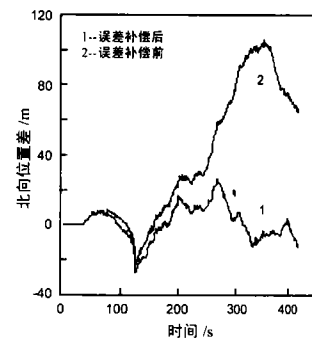


图 6 误差补偿前后 DR 和 GPS 北向位置差值曲线

4 可见, GPS 的测量曲线与实际路线基本重合, 而航迹推算系统的测量曲线随着时间的推移, 误差逐渐积累, 出现定位漂移。

将 GPS 与航迹推算系统按照上面的算法进行数据融合, 结果计算时初始条件选取为: $\tau_e = \tau_n = 0.01$, $\tau_a = \tau_n = 1$, $\tau_b = 2000$, $\tau_{b_0} = 2000$, $\sigma_a = \sigma_n = 0.8$, $\sigma_b = 2$, $\sigma_{b_0} = 0.1$, $\sigma_e = \sigma_n = 10$, $X(0) = [z_1(0), z_2(0), 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, $P(0) = \text{diag}\{20^2, 20^2, 1^2, 1^2, 0.2^2, 0.2^2, 5^2, 5^2\}$, $P_1(0) = \text{diag}\{20^2, 20^2, 1^2, 1^2, 0.2^2, 0.2^2, 5^2, 5^2\}$, $R = \text{diag}\{10^2, 10^2, 1^2, 1^2, 0.05^2, 2^2\}$ 。

由图 5 知, 组合滤波曲线与 GPS 观测曲线基本一致。滤波曲线相比于原始曲线有很好的平滑效果, 达到了滤波的目的。图 5 是 DR 系统误差补偿前后的曲线, 从图 5 可以看出 DR 经过误差补偿后, 误差发散得到有效控制。图 6 是误差补偿前后的 DR 系统和原始 GPS 系统北向位置差值曲线。从图 6 可以看出, 经过误差补偿后的 DR 系统, 其偏离 GPS 的位置始终保持在一定的范围内, 而不会随着时间的推移而出现发散, 充分证明了算法的有效性。模拟结果也给出 GPS 失效时切换到 DR 后的短时间内, DR 系统完全可以满足定位精度的要求^[8]。

参考文献:

- [1] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 桑吉章. 全球定位系统原理及其应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [2] Mar J, Leu J H. Simulation of the positioning accuracy of integrated vehicular navigation systems [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, UK, 1996, 143(2): 121-128.
- [3] 吴秋平, 王庆, 万德钧, 房建成. 车载 GPS 组合导航与定位系统研究 [J]. 导航, 1996, (4): 18-24.

- [4] Collier W C. In-vehicle route guidance systems using map matched dead reckoning [A]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, Record, The 1990's-A Decade of Excellence in the Navigation Science [C]. USA: IEEE PLANS'90, IEEE, 1990. 359-363.
- [5] 徐爱功. 用 GPS 观测值对数据进行非线性平滑的模型建立 [J]. 解放军测绘学院学报. 郑州, 1997, 4(2): 85-90.
- [6] 吴秋平, 王庆, 万德钧, 徐晓苏. GPS 动态跟踪精度的研究 [J]. 导航, 1997, (2): 54-60.
- [7] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [8] 常青, 柳重堪, 张其善. GPS 定位方法及其应用研究 [D]. 北京, 北京航空航天大学, 1998.

作者简介:



郑利龙 男, 汉族, 1952 年 12 月 27 日生于香港, 1976 年毕业于英国伦敦大学, 1979 年获英国伦敦大学硕士学位, 1991 年至今受聘于香港城市大学为高级讲师, 助理教授等职, 研究方向主要是无线定位, 加密技术和量子计算机等, 在国际会议和国际期刊上发表了 30 多篇论文, 现为清华大学电子工程系博士生。



曹志刚 男, 1962 年毕业于清华大学无线电电子学系, 获国家科学大会、电子工业部、国家教委等七项奖励, 并获政府特殊津贴。已发表论文 200 余篇, 合作著译五部, 并参与了《高技术辞典》编撰, 持专利三项, 目前的研究领域包括通信理论、卫星通信、宽带移动通信、远程教育、抗噪声语音信号处理等。