

一种新型车载 GPS/DR 组合定位方法

王励扬¹, 何文涛¹, 马成炎¹, 白晓莉²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 罗格斯, 新泽西州立大学, 皮斯卡塔韦 08854)

摘要: 为使GPS/DR系统更适用于车载应用环境, 本文根据车载导航的特点, 首先提出了一种新的DR导航算法。新算法使得DR系统不再局限于东北天坐标系下水平面上的位置定位。该新算法基于差分里程计方案, 由车辆左右后轮上的车速脉冲获得车辆速度和偏航角的变化信息, 并将这些信息转化为东北天坐标系下的速度矢量, 依照所建立的地球模型和前一时刻的系统状态推导出车辆当前时刻的经纬度。然后设计了一种新的数据融合算法将DR系统与GPS进行组合。该算法实现简洁, 可靠性高。仿真和实际跑车实验表明, 该方法能够满足车载导航定位应用的需求, 提高了组合系统的定位精度, 并能在GPS信号遮挡时继续保持连续可靠的定位。

关键词: 地球模型; 航位推算; 数据融合; 组合导航

中图分类号: P228.41 文献标识码: A

New method of GPS/DR data fusion for land vehicle

WANG Li-yang¹, HE Wen-tao¹, MA Cheng-yan¹, BAI Xiao-li²

(1. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

2. Rutgers, The State University of New Jersey, Piscataway 08854, USA)

ABSTRACT: According to the characteristics of land vehicle navigation, a new DR navigation algorithm was proposed based on speed pulse. The new DR navigation algorithm does not limited to the local east-north flat plane, and can provide real-time latitude and longitude according to the earth model, based on velocity vector calculated under the east-north-up coordinate. Then a new data fusion method for GPS/DR integrated navigation system was developed in detail. This method has good robustness and is easier to apply to industry. Simulation and field running experiments show that this method can satisfy the basic requirement of land vehicle navigation. It improves the degree of precision and is able to work even when GPS signals are masked.

KEYWORDS: Earth Model; Dead Reckoning; Data Fusion; Integrated Navigation

1 引言

GPS 具有全球性, 全天候, 高精度, 三维定位等优点。但是由于 GPS 的动态性能较差, 卫星信号受到遮挡时可能引起失锁, 出现中断, 使得导航定位不连续。DR (航位推算) 系统为自主导航定位系统, 不受外界干扰, 信号无丢失, 且短时精度较高。然而, 定位误差会随时间积累迅速增长。因此, GPS 和 DR 系统各有所长, 并且具有互补性^[1]。将二者组合可以提高系统精度, 增强系统的抗干扰能力。针对 DR 算法, 在传感器选择上有多种方案, 其中包括单轴陀螺仪与单轴加速度计方案^[2], 单轴陀螺仪与单里程计方案^[2], 以及双里程计差分方案^[3]。目前由于低成本 MEMS 传感器的精度普遍较低,

且校准方法复杂, 因此前两种方案会使 DR 算法的导航定位精度受到较大限制。双里程计差分方案更适用于低成本车载导航定位应用^[3]。

在对 GPS/DR 系统进行深入分析的基础上, 本文首先提出一种新的改进型双里程计差分方案, 实现 DR 导航系统。该 DR 算法不同于传统算法, 不仅可以获得东北天坐标系下的车辆速度矢量和坐标, 还可以实时给出车辆所在位置的经纬度信息, 无需使用其他传感器, 为与 GPS 进行组合导航提供了便利。另外, 本文详细探讨了一种实现更为简洁, 可靠性更高的 GPS/DR 数据融合算法。该数据融合算法在采用新 DR 算法的航位推测系统实时输出车辆经纬度等信息的情况

下采用加权平均的方式与 GPS 进行组合，权重依据 GPS 信号载噪比和定位标志等信息实时动态变化。

2 一种改进型 DR 算法:

本文所说明的改进型 DR 算法中所使用的坐标系有:

1) 导航坐标系 N: X 轴指向正东方向, Y 轴指向正北方向, Z 轴与地球表面本地垂直向上方向平行。即东北天坐标系。

2) 地心地固坐标系 E: 坐标原点位于地心, Y 轴指向地球北极, X、Z 轴位于赤道平面, Z 轴指向本初子午线。

传统的 DR 算法局限于 N 系, 只能给出东向和北向的速度大小, 以及车辆在 N 系下的坐标位置^[4]。而车载导航定位系统的使用者更加关心车辆所在位置的经纬度。在使用 N 系下 DR 系统导航结果的情况下, 为了同 GPS 进行组合, 需要采用相对复杂的滤波算法, 系统模型即误差模型都较难合理选择^[5]。为了解决这一困难, 本文提出了一种能给出车辆实时经纬度信息的 DR 算法。

2.1 基于双里程计差分方案的 DR 算法原理

车辆左后轮和右后轮上的里程计根据车轮转动情况输出相应的车速脉冲信号。车辆行驶中的线速度, 角速度等信息可以通过这两路车速脉冲信号确定。其中由车速脉冲信号能直接获得线速度信息, 通过轮速差可以获得偏航角的变化信息^[6]。

在采样周期 T 内, 获得车辆行驶速度大小 v 的计算公式为:

$$v = \Delta / T \quad (1)$$

式(1)中, Δ 为在一个更新历元内车辆走过的距离:

$$\Delta = \frac{1}{2}(L_d + R_d) \quad (2)$$

式(2)中, L_d 为左轮在一个更新历元内走过的距离, R_d 为右轮在一个更新历元内走过的距离,

$$L_d = Pt_l \cdot d \quad (3)$$

$$R_d = Pt_r \cdot d \quad (4)$$

式(3-4)中, Pt_l 为在一个更新历元里左轮里程计输出的脉冲数, Pt_r 为在一个更新

历元里右轮里程计输出的脉冲数, d 为与脉冲数相关的标定系数。

当车身转动 ω 角时, 各车轮以相同的转动中心旋转, 每个车轮走过的路径因转弯半径不同而不同, 利用轮速传感器测得内、外侧后轮的转速差, 可计算出车辆的偏航角度变化。获得车辆偏航角度的计算公式如下:

$$\psi_t = \psi_{t-1} + \omega \quad (5)$$

$$\omega = (R - L) / K \quad (6)$$

式(5-6)中, ψ_t 为车辆当前历元的航向角, ψ_{t-1} 为车辆上一历元的航向角。 ω 是车辆当前历元的偏航角变化, K 为车辆左右后轮的间距。

车辆当前东北天坐标系下的坐标更新方程为:

$$e_t = e_{t-1} + \Delta \cdot \sin\left(\psi_{t-1} + \frac{\omega}{2}\right) \quad (7)$$

$$n_t = n_{t-1} + \Delta \cdot \cos\left(\psi_{t-1} + \frac{\omega}{2}\right) \quad (8)$$

式(7-8)中, e_t 为当前时刻车辆东向坐标, e_{t-1} 为上一时刻车辆东向坐标; n_t 为当前时刻车辆北向坐标, n_{t-1} 为上一时刻车辆北向坐标。

根据以上推导, 获得了车辆在 N 系下的实时坐标、速度信息和偏航角度。将车辆速度大小和偏航角度转换为 N 系下的速度矢量 v^N 。 v^N 为一个包含三个元素的列向量, 元素分别表示东向速度, 北向速度和天向速度。由于车辆行驶在路面上, 高度变化一般不大, 可以不予考虑。因此 v^N 的表达式应表示为:

$$v^N = [v \cdot \cos(\psi_t) \quad v \cdot \sin(\psi_t) \quad 0]^T \quad (9)$$

2.2 车辆实时位置经纬度的推导方法

根据 E 系的定义可知, 只要知道在 E 系下的坐标, 就可以获得经纬度信息^[7,8]。因此, 需要求得从 N 系变换到 E 系的方向余弦矩阵 C_N^E :

$$C_{N_t}^E = C_{N_{t-1}}^E \cdot C_{N_t}^{N_{t-1}} \quad (10)$$

式(10)中, $C_{N_t}^E$ 为当前时刻的方向余弦

矩阵 C_N^E , $C_{N_i}^E$ 为上一时刻的方向余弦矩阵

C_N^E , $C_{N_i}^E$ 为 N 系相对 E 系在两个时刻自身变化的方向余弦矩阵。根据实际需求, 将其进行二阶泰勒级数展开:

$$C_{N_i}^E \approx I + (\xi_i \times) + \frac{1}{2}(\xi_i \times)(\xi_i \times) \quad (11)$$

式(11)中, I 为单位矩阵; ξ_i 为关联 N 系和 E 系上的旋转矢量:

$$\xi_i \approx \int_{t_{i-1}}^{t_i} w_{EN}^N dt \quad (12)$$

式(12)中, w_{EN}^N 为更新周期 T 内, 从 N 系的 E 系的角速度在 N 系下的投影, 由 v^N 推导得到:

$$w_{EN}^N(t) = F_C^N (u_{ZN}^N \times v^N) + w_{EN3}^N(t-1) \cdot u_{ZN}^N \quad (13)$$

式中, u_{ZN}^N 为 N 系下天向单位向量,

$u_{ZN}^N = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。 $w_{EN3}^N(t-1)$ 为上一时刻 w_{EN}^N

的第三个元素。 F_C^N 为一个 3×3 的地球曲率矩阵, 由当前载体所在的位置唯一确定, 其计算公式为:

$$F_C^N = \begin{bmatrix} F_{C11} & F_{C12} & 0 \\ F_{C21} & F_{C22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

为了求得曲率矩阵 F_C^N 中的各个元素,

需要根据地球参数建立地球模型:

$$feh = fe \cdot fh \quad (15)$$

$$fe = \frac{(1-e)^2 - 1}{1 + D_{23}^2 [(1-e)^2 - 1]} \quad (16)$$

$$fh = \frac{1}{1 + h/Rs'} \quad (17)$$

式(15-17)中, D_{2j} 为上一时刻方向余弦矩阵 C_N^E 第二行的对应元素, rl 为地球曲率半径, h 为海拔高度, e 为地球椭圆率, Rs'

为从地球中心到本地表面的修正距离。曲率矩阵 F_C^N 中的各个元素可以表示为:

$$F_{C11} = \frac{1}{rl} (1 + D_{21}^2 feh) \quad (18)$$

$$F_{C12} = \frac{1}{rl} D_{21} D_{22} feh \quad (19)$$

$$F_{C21} = \frac{1}{rl} D_{21} D_{22} feh \quad (20)$$

$$F_{C22} = \frac{1}{rl} (1 + D_{22}^2 feh) \quad (21)$$

由式(10)可以得到更新以后时刻的方向余弦矩阵 C_N^E , 再从 C_N^E 中解出经纬度信息:

$$l = \tan^{-1} \left(\frac{D_{23}}{\sqrt{D_{21}^2 + D_{22}^2}} \right) \quad (22)$$

$$L = \tan^{-1} \left(\frac{D_{13}}{D_{33}} \right) \quad (23)$$

其中, l 为纬度, L 为经度。

3 组合系统数据融合方法:

3.1 DR 系统的启动及初始化

由 DR 系统的工作原理知, 推算新的位置和偏航角必须建立在前一时刻位置和偏航角的基础上。因此, 在 DR 系统参与工作前应由 GPS 系统给出车辆的位置和偏航角信息, 用于 DR 系统的初始化。由前一节的分析可知初始化 DR 系统也即给出车辆在 N 系下的初始偏航角 ψ 和初始方向余弦矩阵

C_N^E 。

对初始偏航角 ψ , GPS 定位后可给出。但当车辆行驶速度较低时 GPS 所给出的偏航角 ψ 误差较大, 因此需当车辆行驶速度达到一定水平后再启动 DR 系统。

对初始方向余弦矩阵 C_N^E , 可由 GPS 给出的经纬度进行确定^[7,8]:

$$C_N^E = \begin{bmatrix} \cos L & -\sin L \cdot \sin l & \sin L \cdot \cos l \\ 0 & \cos l & \sin l \\ -\sin L & -\cos L \cdot \sin l & \cos L \cdot \cos l \end{bmatrix} \quad (24)$$

3.2 DR 系统与 GPS 的数据融合

以前的 GPS/DR 数据融合方法多使用 Kalman 滤波器^[5]，文献[9]使用了更为复杂的粒子滤波算法。这些方法需要建立较为复杂的系统状态方程和观测方程，并需建立准确的噪声模型来描述过程噪声和观测噪声。这往往是不易准确确定的^[10]。由于本文所采用的 DR 算法可以直接获得车辆的经纬度信息，因此可以使用相对简单的加权平均滤波算法实现数据融合。

假设 l_D 为 DR 系统所解出的纬度， l_G 为 GPS 所解出的纬度，那么车辆在当前时刻的纬度可以表示为：

$$l = \alpha_l \cdot l_G + (1 - \alpha_l) \cdot l_D \quad (25)$$

其中， α_l 为对 GPS 解算纬度的权重，取值范围为 0 到 1。可以看出，当 α_l 取值为 1 时，纬度 l 等于 l_G ，即完全相信 GPS 所给出的纬度值；当 α_l 取值为 0 时，纬度 l 等于 l_D ，即完全相信 DR 系统所给出的纬度值。 α_l 的选取取决于 GPS 是否定位，信号载噪比，解算所利用到的卫星数目等因素。当 GPS 信号载噪比较大，参与定位卫星数较多的情况下，将 GPS 的权重增大；当信号载噪比低，参与定位的卫星较少时将 GPS 的权重降低；当 GPS 信号完全受到遮挡时， α_l 取为 0，即系统输出完全为 DR 系统的导航定位结果。同理，对于经度 L 、东向速度 V_e 、北向速度 V_n 、偏航角 ψ ，有：

$$L = \alpha_L \cdot L_G + (1 - \alpha_L) \cdot L_D \quad (26)$$

$$V_e = \alpha_{V_e} \cdot V_{eG} + (1 - \alpha_{V_e}) \cdot V_{eD} \quad (27)$$

$$V_n = \alpha_{V_n} \cdot V_{nG} + (1 - \alpha_{V_n}) \cdot V_{nD} \quad (28)$$

$$\psi = \alpha_\psi \cdot \psi_G + (1 - \alpha_\psi) \cdot \psi_D \quad (29)$$

3.3 组合系统结构框图及算法流程

综合以上所述的新型 DR 定位算法以及新型数据融合方法设计组合系统的工作结构及算法流程。在系统上电时首先等待 GPS 定位，在 GPS 定位后先将 GPS 的定位结果进行输出，同时判断车速，定位精度等信息。当满足 DR 系统启动条件时，以 GPS 输出的车辆状态对 DR 系统进行初始化，随后

GPS/DR 组合系统开始工作。以前一时刻组合系统输出车辆的经纬度，速度和偏航角信息作为下一时刻的初始状态。首先使用这些信息对 DR 系统进行新的初始化，再根据本次更新历元内的车速脉冲信号推导得到车辆新的速度和偏航角的估计值。将 GPS 所输出的速度以及偏航角与 DR 系统的估计值进行加权平均，获得本次组合系统对速度和偏航角的最优估计。再将最优估计的速度矢量经过地球模型的推算获得对经纬度的估计值。将此估计值与 GPS 给出的经纬度进行加权平均，获得组合系统当前时刻对经纬度的最优估计并输出。

图一给出组合系统的结构框图：

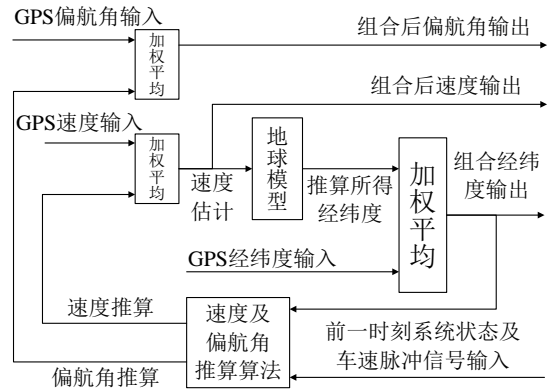


图 1 组合系统结构框图

图二给出组合系统的算法流程图：

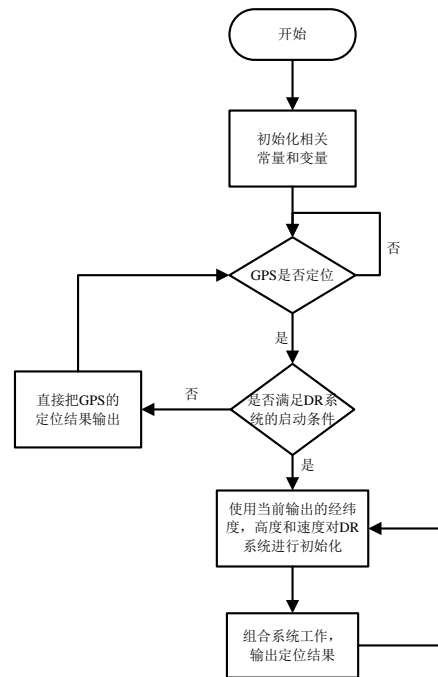


图 2 组合系统算法流程图

由于DR系统的推算建立在每次系统状态更新以后的基础上，因此在GPS/DR组合工作的情况下避免了单DR系统误差累积的问题。

4 实验验证：

本文使用Spirent公司的GSS6700模拟器作为仿真平台。GSS6700是一个强大的、灵活的Multi-GNSS开发、集成和验证测试平台。在搭配SimGEN和相应硬件板卡后，该仿真平台能编辑车辆运行轨迹，并在运行编辑好的轨迹同时给出模拟GPS信号以及车速脉冲信号，同时保存所编辑运行轨迹的标准NMEA文件，便于同组合系统输出进行对比。本文设置GPS输出为1HZ，DR系统及组合系统输出也为1HZ。

4.1 DR算法有效性验证

编辑车辆初始经度为东经40度，纬度为0度（赤道），以30m/s的速度匀速向西行驶，所有条件均为理想情况下。图三为DR导航定位结果与从标准NMEA信息中提取的位置信息对比图，及位置误差随时间变化图：

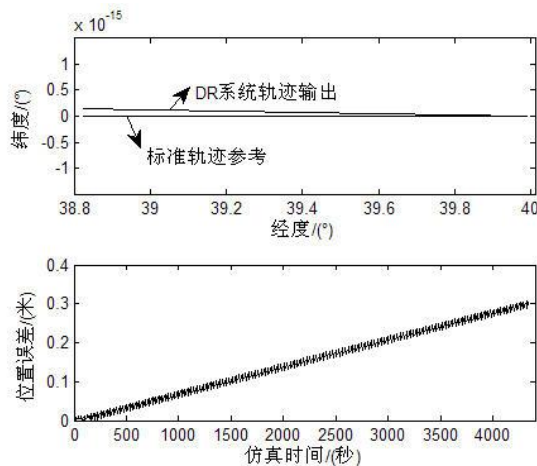


图3 DR算法测试

由图三可以看出，该DR系统所输出的实时经纬度信息和标准参考信息保持了高度的一致性，证明了使用该方法获得的实时经纬度有效可靠。将经纬度信息转化为ECEF坐标系下的三维坐标，并将DR系统每次输出的位置同每一时刻标准位置做差，并求其绝对值，计算可得，在仿真时间内，DR系统平均每秒位置偏移量约为 7×10^{-5} 米。

4.2 组合系统仿真及跑车实验结果及分析

首先进行模拟器平台下的仿真实验。编辑一段轨迹，其中包含了匀速直行，变速直行，匀速转弯，变速转弯等情形，并在运行场景时变化GPS信号的强度，甚至切断。图四为组合系统在仿真场景下的测试结果：

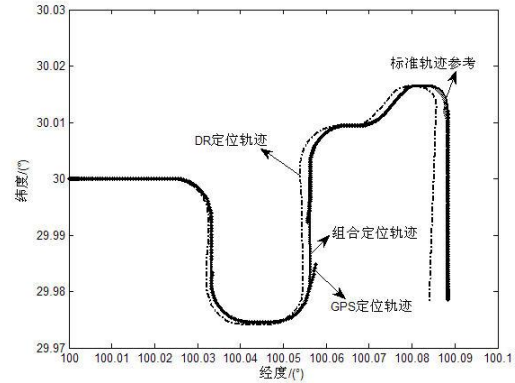


图4 组合系统仿真测试

由图四可以看出，单DR系统工作时误差随时间不断累积，而组合系统成功避免了误差累积的问题；当卫星数和信号强度受到限制时，单GPS的定位轨迹明显偏离了参考轨迹位置，但此时组合系统的轨迹输出依然和标准参考轨迹保持了较好的一致性，提高了定位精度；当信号强度进一步被减弱，GPS中断定位的情况下，组合系统依然保持了连续定位，并维持了较高的定位精度。

图五为实际跑车测试结果。测试路段位于杭州市滨江区，其中包含了半边高楼、两边高楼、多层立交桥等城市峡谷场景，也包括隧道场景。



图5 实际跑车测试结果

从图五中可以看出, GPS/DR 组合算法在城市峡谷, 和立交桥场景中拥有较高的导航精度, 且在转弯处获得了平滑的导航结果。

图六为隧道场景在 MATLAB 中的局部放大图:

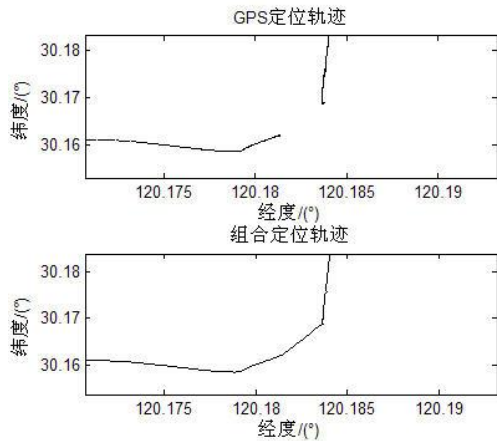


图 6 隧道场景局部放大

从图六看出, 当 GPS 信号在隧道中被完全遮挡之后, 但 GPS 的定位轨迹出现中断, 而 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 结论:

以往的 GPS/DR 组合系统中 DR 系统局限于东北天坐标系, 与 GPS 的数据融合较为复杂。本文所提出的改进型 DR 算法能直接以经纬度的形式给出车辆的位置信息, 并证明了该方法的有效性。在此基础上所给出的 GPS/DR 数据融合算法较为简洁, 可靠性高。实验证明, 该 GPS/DR 系统能够满足车载导航系统的定位要求, 并且在 GPS 误差较大甚至定位中断时保持系统较高的可靠性和定位精度, 具有较高的工程实践价值。

参考文献:

- [1] 柴艳菊, 欧吉坤. GPS/DR 组合导航中一种新的数据融合算法[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2005,30(12): 1048-1051
- [2] 金亮良, 何文涛, 徐建华, 叶甜春, 翟昆朋, 蔺晓龙. 一种低成本 GPS/DR 组合导航系统设计 [J]. 计算机工程, 2012,38(18): 228-230
- [3] 杨宜康, 林勇, 黄永宣, 胡保生. 车辆无陀螺航位推算系统的导航原理及其算法

[J]. 西安交通大学学报, 2001,35(12): 1284-1287

[4] 杨兆升, 王伟, 董升, 朱伟权, 沈建惠. GPS/DR 组合定位系统信息融合技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008,38(3): 508-513

[5] 刘钢, 余春暄. 一种新型的 GPS/DR 组合定位系统数据融合算法[J]. 计算机仿真, 2007,24(1): 107-110

[6] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 129-134.

[7] P G Savage. Strapdown Inertial Navigation System Algorithm Design, Part1: Attitude Algorithm [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(1): 10-28.

[8] P G Savage. Strapdown Inertial Navigation System Algorithm Design, Part1: Velocity and Position Algorithm [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(2): 208-221.

[9] 焦雅林, 高社生, 薛丽. GPS/DR 车辆组合导航改进的粒子滤波算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2011,29(1): 39-43

[10] 许丽佳, 陈阳舟, 崔平远. GPS/INS 组合导航系统中的信息融合算法研究[J]. 计算机仿真, 2004,21(5): 19-23