

基于GPS/DR的车载双星定位系统

沈 旻, 李树广

(上海交通大学图像处理与模式识别研究所, 上海 200030)

摘 要: 目前 GPS 的定位技术已经比较成熟, 然而 GPS 正常工作时需要 4 颗可见卫星。该文提出了一种基于高精度数字地图的 GPS 双星定位系统, 结合航位推算系统进行组合导航, 对组合导航的输出信息综合滤波。试验证明, 该算法增强了车载导航系统在城市复杂环境中的适应性, 提供了满足要求的定位精度。

关键词: 全球定位系统; 双星定位; 数字地图; 航位推算系统; 卡尔曼滤波器

Vehicular Two-satellite Positioning System Based on GPS/DR

SHEN Yang, LI Shuguang

(Inst. of Image Processing & Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030)

【Abstract】 While GPS is practical currently, it needs more than 4 observed GPS satellites to work. This paper presents an integrated navigation system based on the information provided by digital map, including two-satellite positioning based on the information provided by the digital map and DR system and its filtering algorithm. Experiments show that the integrated navigation system can provide precise positioning result and enhance the adaptability of vehicles in the complex environment of cities.

【Key words】 GPS; Two-satellite positioning; Digital map; Dead reckoning system; Kalman filter

1 概述

全球定位系统 (GPS) 能够快速、准确和全天候地提供定位导航和时间基准信息, 是当前主流的导航方式。基于单点的 GPS 定位需要 4 颗可见卫星, 当 GPS 的可见星少于 4 颗时, GPS 将降低定位精度甚至失效而不能连续定位。然而在城市环境中高楼林立, 以及立体交通、桥梁的干扰都可能导致 GPS 可见卫星达不到标准。在上海市徐家汇地区的多次路测表明, 在路段上能观测到 4 颗及以上卫星的情况只有 60%, 而观测到 2 颗及以上卫星的情况达到 90% 以上。因此双星定位系统在城市中的智能交通体系中具有很高的应用价值。

我国的北斗双星导航定位系统^[1]具有空间卫星少、用户终端简单等特点, 只用 2 颗卫星即可实现定位。但北斗双星系统的有源定位方式使它在用户容量、隐蔽性和兼容性等方面受到限制, 实现无源定位必然是今后研究和发展的方向。并且由于北斗双星系统的卫星几何位置不好, 更容易受到单方向障碍物的干扰, 因此不适合在城市交通中使用。

基于这一问题, 本文提出了采用基于数字地图信息的 GPS 双星定位, 并结合航迹推算系统 (DR)^[2] 进行组合导航, 在对组合算法进行深入研究的基础上, 建立了 GPS 双星/DR 组合系统全新的系统模型, 并运用卡尔曼滤波对组合导航的信息进行滤波处理, 有效地提高了定位的精度。本系统与单纯的 GPS 导航系统比较而言, 具有以下特点:

(1) 只需在道路切换时进行地图匹配, 确定车辆新的行驶道路, 之后组合导航系统将直接定位到道路上, 自动完成地图匹配;

(2) 试验证明, 组合导航提供的定位结果能满足正常的精度要求, 充分利用了航位推算在短时间内精度高的优点, 消除了其积累误差的影响。

(3) 当 GPS 可见卫星减少甚至完全丢失时, 系统可以继续工作, 可靠性得到提高。

(4) 将站钟差作为未知变量求解, 保证了定位的精度。

2 基于数字电子地图的双星定位和测速原理

2.1 数字地图原理

本文中数字地图的道路是由矢量线段和节点来描述的。线段代表实际的路段, 中间无分支, 可以由其起始节点和终节点定义, 节点同时还表达路段之间的关联; 一条完整的道路由若干相连的线段组成。道路中的不同路段间的节点为连接节点, 只负责前后两个路段的衔接; 而不同道路间相连的节点为交叉节点, 负责道路间的连接和转换。

矢量地图中的道路网络示意图如图 1 所示, 节点 1~节点 3 表示一条完整的道路信息, 其由路段 1-2 和 2-3 组成, 节点 2 为这两个路段的连接节点。道路 1-2-3 与道路 3-4、3-5 相交于交叉节点 3, 交叉节点 3 表示这 3 条道路的交点。在电子地图中, 所有节点的地理位置信息均是已知的。道路中其他点的地理位置信息均可以由其所所在路段的两个端节点的位置信息来推导。

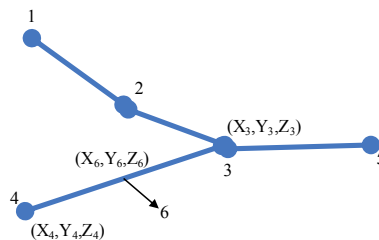


图 1 电子地图中道路与路段示意图

作者简介: 沈 旻(1983 -), 男, 硕士生, 主研方向: 模式识别, 虚拟现实; 李树广, 博士、教授

收稿日期: 2006-05-13 **E-mail:** aerolice@sytu.edu.cn

如图 1 所示, 如果知道路段中节点 6 在道路 3-4 中的比例关系 k , 那么就可以通过端节点 3 和节点 4 的三维坐标求出节点 6 的三维坐标。

$$[x_6, y_6, z_6] = [x_4, y_4, z_4] + k \{ [x_3, y_3, z_3] - [x_4, y_4, z_4] \} \quad (1)$$

2.2 双星定位原理

已知 GPS 观测方程^[2]为

$$\rho = R + c\delta t_{RC} - c\delta t_{SV} \quad (2)$$

式中 ρ 为伪距, 由 GPS 接收机提供; 站钟差 t_{RC} 为未知数; c 为光速; 星钟差 t_{SV} 可由 GPS 卫星广播星历求得, 为已知量。 R 为卫星至接收机的几何距离:

$$R = \sqrt{(X_{RC}(t_{RC}) - X_{SV}(t_{SV}))^2 + (Y_{RC}(t_{RC}) - Y_{SV}(t_{SV}))^2 + (Z_{RC}(t_{RC}) - Z_{SV}(t_{SV}))^2} \quad (3)$$

其中: (X_{RC}, Y_{RC}, Z_{RC}) 是 t_{RC} 时刻接收机位置的坐标, 即是要求解的定位结果; (X_{SV}, Y_{SV}, Z_{SV}) 是 t_{SV} 时刻卫星的位置, 统一使用 WGS-84 坐标系。

如果接收机位于某条已知道路的某个路段上, 则其坐标可以利用该路段的首尾两个节点以参数形式表示:

$$\begin{cases} X_{RC} = (X_{RE} - X_{RS})k + X_{RS} \\ Y_{RC} = (Y_{RE} - Y_{RS})k + Y_{RS} \\ Z_{RC} = (Z_{RE} - Z_{RS})k + Z_{RS} \end{cases} \quad (4)$$

式中, (X_{RS}, Y_{RS}, Z_{RS}) 、 (X_{RE}, Y_{RE}, Z_{RE}) 分别是已知路段的起点和终点的 WGS-84 坐标, k 是参数, 描述了接收机在路段中的位置, 可知: $0 \leq k \leq 1$, 且是一个未知数, 如图 2 所示。

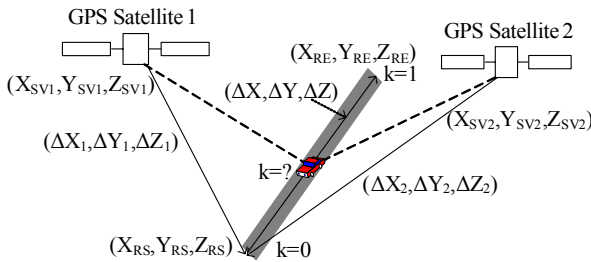


图 2 双星定位示意图

假设现在只能观测到 2 颗 GPS 卫星, 得到 2 个 GPS 观测方程:

$$\begin{cases} \rho_1 = R_1 + c\delta t_{RC} - c\delta t_{SV1} \\ \rho_2 = R_2 + c\delta t_{RC} - c\delta t_{SV2} \end{cases} \quad (7)$$

得到了式(4)~式(8) 5 个公式, 且有 5 个未知数, 方程组可以通过线性迭代求解, 可得接收机的位置和准确值的站钟差值。

2.3 双星测速原理

通过测定 GPS 接收机载波频率的多普勒频移来求得距离变化率、伪距离变化率, 其包括了卫星的三维速度、接收机的三维速度和钟差率。

当车在路上行驶的时候, 可以认为车的行驶方向与路的方向基本相同。车的三维速度与位置一样可以看作是只有一个未知量, 可以将车辆的绝对速度和路的方向信息扩展为车辆的三维速度信息。因此只用对 2 颗卫星的伪距变化率测定, 即可得到接收机的速度和接收机钟差变化率。

卫星 j 的多普勒频移方程^[3]为

$$\dot{\phi}_j \lambda = \dot{R}_j + c\delta \dot{t}_{RC} - c\delta \dot{t}_{SVj} \quad (9)$$

式中 $\dot{\phi}_j$ 为卫星 j 的多普勒频移观测值, 单位 Hz; λ 为载波波长,

$\dot{\phi}_j \lambda$ 即为伪距离变化率。 $\delta \dot{t}_{SVj}$ 和 $\delta \dot{t}_{RC}$ 分别为卫星 j 的时钟和接收机时钟的钟差变化率; c 为光速; R_j 为接收机到卫星 j 的几何距离, \dot{R}_j 为其变化率, 其表达式为

$$\dot{R}_j = (\dot{R}_{SVj} - \dot{R}_{RC}) \cdot (X_{RC} - X_{SVj}) / R_j \quad (10)$$

对方程(10)线性化并代入方程(9)可得

$$\dot{\phi}_j \lambda = [l_j \ j_j \ k_j] [\dot{X}_{RC} \ \dot{Y}_{RC} \ \dot{Z}_{RC}] + [l_j \ j_j \ k_j] \quad (11)$$

$$[\dot{X}_{SVj} \ \dot{Y}_{SVj} \ \dot{Z}_{SVj}] + c\delta \dot{t}_{RC} - c\delta \dot{t}_{SVj}$$

式中, $[l_j \ j_j \ k_j]$ 是线性化后的系数, 可以看作已知参数; 其中卫星 j 的速度、卫星的钟差变化率 $\delta \dot{t}_{SVj}$ 均可由导航电文求得。

$[\dot{X}_{RC} \ \dot{Y}_{RC} \ \dot{Z}_{RC}]$ 表示车载系统的速度, 其方向与道路的方向一致, 表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{RC} \\ \dot{Y}_{RC} \\ \dot{Z}_{RC} \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} X_{RE} - X_{RS} \\ Y_{RE} - Y_{RS} \\ Z_{RE} - Z_{RS} \end{bmatrix} \quad (12)$$

只有接收机速度参数 α 和接收机钟差变化率为未知参数。因此, 当观测到 2 颗卫星时, 可以得到 2 个二元一次方程, 可直接解出这两个未知数, 从而可以得到 GPS 接收机的三维速度。

3 GPS 双星/DR 组合导航系统

在只能观测到 2 颗可见卫星的环境中, 卫星间的几何位置不是非常理想, 定位精度比正常情况下有所降低, 因此可以引入航位推算系统的辅助来增加精度。航位推算系统完全自主式, 不受外界环境的干扰影响, 无信号丢失等问题。在本系统中, 航位推算系统负责辅助双星定位中的路段切换, 并利用其短时间内精度较高的优点, 提高双星定位的精度。当可观测卫星数目少于 2 或系统处于道路切换过程中, 双星定位不再有效, 系统将切换到单一的航位推算系统工作模式。

3.1 航位推算系统简介

航位推算系统^[4]由测量航向角的传感器和测量距离的传感器构成。一般航位推算系统可以选择角速率陀螺和里程仪等组成。角速率陀螺输出方位角的角速率信息, 汽车里程仪计算车辆行驶的速度。

车辆的运动可以近似看作是在地表平面上的二维运动, 如果车辆的起始位置和所有时刻的位移已知, 则通过在初始位置上累加位移矢量的方法就可计算出车辆的位置。采用东北坐标系, 则车辆的位置就可以由东向、北向位置坐标 (X, Y) 来描述。在 t_n 时刻, 车辆的初始位置为 (X_n, Y_n) , t_{n+1} 时刻, 车辆的位置 (X_{n+1}, Y_{n+1}) 可按下列公式计算:

$$X_{n+1} = x_n + v_n T \sin(\theta_n) \quad (13)$$

$$Y_{n+1} = y_n + v_n T \cos(\theta_n) \quad (14)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n + w_n T \quad (15)$$

$\Delta \theta$ 是 t_n 时刻车辆的航向角; 当采样周期 T 足够小时, w_n 是 t_n 时刻车辆的角速度, 可以看作常数; v_n 为里程仪记录的车辆的速度, 也可以看作常数。因此只要确定初始位置, 即可推算出未来时刻车辆的位置。

3.2 道路切换算法

由于双星定位中依据当前道路段信息进行定位, 当车辆离开当前路段时, 包括中途进入未知区域或者下一道路, 针对当前的路段的双星定位不再有效。因此需要考虑车辆在电子地图中道路的路切换问题、交叉口的转弯问题、车辆何时转弯以及转到哪一个道路。

实际中,当汽车在交叉路口开始转弯时,车辆的航向角开始不断变化,直到完全转到下一个道路上航向角开始稳定下来即可认为已经进入下一个路段。记录下此时的航向角与转弯前的航向角比较,再通过与地图中待匹配的道路的交叉角进行比较,得到新的道路进行双星定位。根据这个模型,车辆在交叉路口的转弯问题处理过程流程图如图3所示。

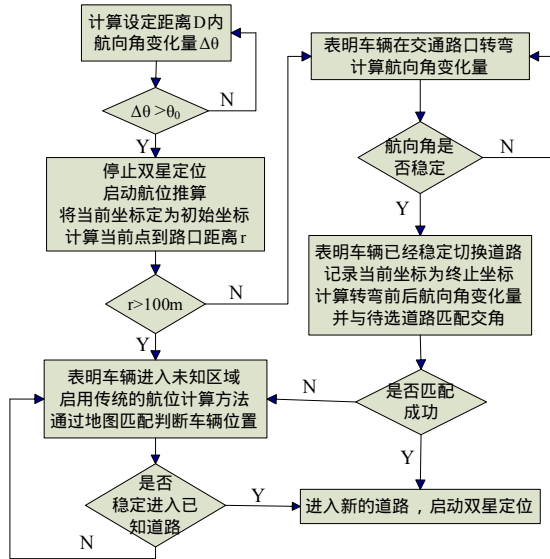


图3 转弯处理过程流程

3.3 GPS 双星/DR 组合导航系统的卡尔曼滤波

使用卡尔曼滤波方式的车载GPS /DR组合导航系统能够融合GPS与DR各自的观测信息,从而得到比单一的GPS定位或DR推算更高的精度^[4]。卡尔曼滤波器同时处理来自2个系统的观测数据,工作于全组合方式,如图4所示。

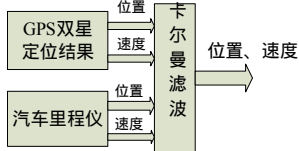


图4 组合卡尔曼滤波

在一般的系统中,选择系统的三维位置、速度、加速度、误差一共12个变量为状态变量,导致系统计算量非常复杂。而在车载导航的双星定位和测速系统中,车载系统的三维位置和速度可以通过参数K和a,与路的两个端点相关,故本系统中的卡尔曼滤波方程的状态变量可以将三维简化为一维,状态变量简化为4个:

$$X=[r \ v \ a \]^T \quad (16)$$

其中,r为车辆到当前路段起点的距离,v为车辆的绝对速度,a为车辆的绝对加速度, ε 为车辆在道路方向上定位总误差。

由于GPS定位的各种误差源可以等效为一阶马尔可夫过程,因此误差可以表示为

$$\varepsilon = \frac{-1}{\tau_\varepsilon} \varepsilon + W_\varepsilon \quad (17)$$

其中, τ_ε 为其对应马尔可夫过程的相关时间常数, W_ε 为 $(0, \sigma^2)$ 的高斯白噪声。

由当前统计模型^[5],可以得到状态方程为

$$X(k+1)=A X(k)+U(t)+W(t) \quad (18)$$

$$\text{状态转移矩阵 } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_\varepsilon \end{pmatrix} \quad (19)$$

τ_a 为加速度相关时间常数, $U(t)=[0 \ 0 \ \frac{a}{\tau_a} \ 0]$, $W(t)=[0 \ 0 \ W_a \ W_\varepsilon]$ 为系统的噪声向量。

系统的观测方程的作用是将GPS、DR的有关信息组合在一起。双星定位解算结果k乘该路段总距离,记为r1,为GPS所测的车辆到路段起始点的距离。将里程计从该路段起始点开始到当前点的累计输出量记为r2,代表里程计所记录的车辆到路段起始点的距离。可以看出,里程计所存在的累计误差将会在每次更换道路时清零,减小了对系统的影响。将r1、r2、双星解算速度v1和里程计当前采样周期输出的速度v2 4个测量值作为观测变量Y:

$$Y=[r1 \ v1 \ r2 \ v2]^T \quad (20)$$

观测值包括真实值和和各种误差源造成的位置误差以及测量误差,观测值r1、v1、r2、v2对应的测量误差 V_{r1} 、 V_{v1} 、 V_{r2} 、 V_{v1} 可以看作 $(0, \sigma_{r1}^2)$ 、 $(0, \sigma_{v1}^2)$ 、 $(0, \sigma_{r2}^2)$ 、 $(0, \sigma_{v2}^2)$ 的高斯白噪声。

则观测方程为

$$Y=H X+V \quad (21)$$

$$\text{式中观测矩阵 } H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} V_{r1} \\ V_{v1} \\ V_{r2} \\ V_{v1} \end{pmatrix}$$

由所建立的系统方程和观测方程可见,这就是典型的线性卡尔曼滤波模型。由于 $\text{RANK}[H^T, (HA)^T, (HA^2)^T, (HA^3)^T]T=4$ =状态变量个数,因此系统是完全可观测的。

根据上述系统方程和观测方程建立的离散自适应卡尔曼滤波方程如下^[6]:

$$\begin{aligned} x(k+1/k+1) &= x(k+1/k) + K(k+1)\varepsilon(k+1) \\ x(k+1/k) &= A(k+1/k)x(k/k) \\ \varepsilon(k+1) &= y(k+1) - Hx(k+1/k) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} K(k+1) &= P(k+1/k)H^T[HP(k+1/k)H^T + R(k+1)]^{-1} \\ P(k+1/k) &= \lambda(k+1)A(k+1/k)P(k/k)A^T(k+1/k) + Q(k) \\ P(k+1/k+1) &= [I - K(k+1)H]P(k+1/k) \end{aligned}$$

4 GPS /DR 双星定位系统导航试验

在实际测试中,初始定位点需要用户设置,剩下导航工作系统自动完成。图5为实际路测中4种不同情况下的双星系统定位效果与单一的GPS定位比较。图中白色线段表示实际路段,浅色圆点是双星定位的结果,分布在路段上;黑色方块点是单一GPS的解算结果;图中每个方格边长40m,可以据此来对比定位误差。

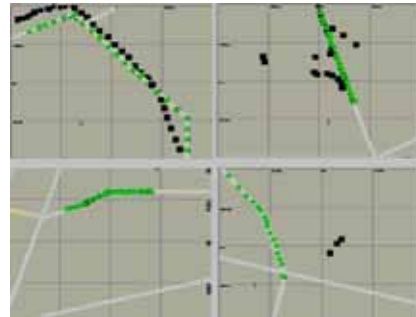


图5 实际路测结果

在GPS正常工作期间,双星定位系统仍具有相当的参考价值。图5上两幅图都是在上海市华山路较南段得到的结果,此时卫星数目大于3颗,GPS可以正常定位,双星定位取信号较好的两颗卫星作为仿真。从图中可以发现,地图的经纬

(下转第254页)