

文章编号: 1000-5013(2012)05-0490-05

# 自适应速度约束滤波在 挖掘机 GPS 系统中的应用

陈智博, 刘强

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对挖掘机工作特点的局限性,通过引用速度约束条件和自适应协方差矩阵,在位置速度加速度模型下,提出利用自适应速度约束卡尔曼滤波器对挖掘机动静目标进行跟踪定位. 仿真和实验结果表明:利用自适应速度约束和相关滤波算法,可以有效实现挖掘机运动目标的跟踪定位优化,同时滤波算法的航迹更为连续,跟踪精度更高,均方误差更小.

**关键词:** 挖掘机; 全球定位系统; 自适应; 速度约束; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** TD 422.2; P 228.4; TB 114.2

**文献标志码:** A

对于高精度定位挖掘,数字智能挖掘机在工程机械上具有很重要的作用<sup>[1]</sup>. 随着 GPS 的不断完善与成熟,高精度动静定位成为可能,这对挖掘机实施精密挖掘很有意义. 普通的 CA 码 GPS 接收机的水平定位精度一般可达到 15 m 左右,而经过预处理后的精度一般也能达到 3 m. 但这种精度对于挖掘机而言,特别是精密挖掘或者是精密导航而言,仍不能满足工程要求. 目前,除了 DGPS, PPP, RTK-GPS<sup>[2]</sup>等方法外,另一种能提高 GPS 定位精度,简单且有效的方法是采用卡尔曼滤波算法. 应用卡尔曼滤波方法减小 GPS 动态定位误差十分有效,不需要存储大量的历史观测数据,只需利用新的观测值即可估计系统新的观测值<sup>[3-4]</sup>. 使用卡尔曼滤波进行最优滤波需建立较准确的系统模型和观测模型<sup>[5]</sup>,当模型不准确或载体机动引起运动状态突变时,会降低预测精度. 针对挖掘机在行驶过程中机体运动本身会存在一些约束条件,本文提出在卡尔曼滤波通用公式上增加速度方向约束条件,以及利用新的观测数据对信号模型与噪声统计特性进行实时修正,最终达到定位数据最优或次优解.

## 1 自适应速度约束的 GPS 动态滤波模型

尽管一般的 GPS 接收机能够输出比较好的定位信息,但仍不适合在工程机械应用,特别是在挖掘机的精密导航问题上. 零点漂移问题在 GPS 接收机中很普遍,这种发散定位情况将导致挖掘机使用失效的定位数据进行智能导航,并且影响远程服务器监控平台,从而导致决策失误.

### 1.1 自适应状态方程的建立

施工地区中挖掘机的导航定位,一般不必考虑其高度信息,因而只需建立在二维平面坐标系中的运动方程. 采用机动载体的位置速度加速度模型(position velocity acceleration model, PVAM),即选取位置、速度和加速度作为状态变量<sup>[6-7]</sup>,有

$$\mathbf{X} = [x, \dot{x}, \ddot{x}; y, \dot{y}, \ddot{y}]^T, \quad (1)$$

其连续状态变量为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k), \quad (2)$$

式(1)中:  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  和  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  分别为挖掘机在经度和纬度方向上的位置、速度和加速度.

**收稿日期:** 2012-02-16

**通信作者:** 刘强(1972-),男,副教授,主要从事工程机械电控测试与应用的研究. E-mail: liuqiang@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省高校产学研合作重大项目(2010H6015)

对矩阵  $\mathbf{A}$  有

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_x^2(-1 + \frac{T}{\tau_x} + \exp(-\frac{T}{\tau_x})) \\ 0 & 1 & \tau_x(1 - \exp(-\frac{T}{\tau_x})) \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{T}{\tau_x}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_y^2(-1 + \frac{T}{\tau_y} + \exp(-\frac{T}{\tau_y})) \\ 0 & 1 & \tau_y(1 - \exp(-\frac{T}{\tau_y})) \\ 0 & 0 & \exp(-\frac{T}{\tau_y}) \end{bmatrix}.$$

而

$$\mathbf{Q}(k) = \mathbf{E}[\mathbf{W}(k)\mathbf{W}^T(j)] = \frac{2}{\tau}\sigma_a^2 \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & q_{1,3} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & q_{2,3} \\ q_{3,1} & q_{3,2} & q_{3,3} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} q_{1,1} &= \frac{\tau^5}{2} [1 - \exp(-\frac{2T}{\tau}) + \frac{2T}{\tau} + \frac{2T^3}{3\tau^3} - \frac{2T^2}{\tau^2} - \frac{4T\exp(-\frac{T}{\tau})}{\tau}], \\ q_{1,2} &= q_{2,1} = \frac{\tau^4}{2} [\exp(-\frac{2T}{\tau}) + 1 - 2\exp(-\frac{T}{\tau}) + \frac{2T\exp(-\frac{T}{\tau})}{\tau} - \frac{2T}{\tau} + \frac{T^2}{\tau^2}], \\ q_{1,3} &= q_{3,1} = \frac{\tau^3}{2} [1 - \exp(-\frac{2T}{\tau}) + \frac{2T\exp(-\frac{2T}{\tau})}{\tau}], \\ q_{2,2} &= \frac{\tau^3}{2} [4\exp(-\frac{2T}{\tau}) - 3 - \exp(-\frac{2T}{\tau}) + \frac{2T}{\tau}], \\ q_{2,3} &= q_{3,2} = \frac{\tau^2}{2} [-2\exp(-\frac{T}{\tau}) + 1 + \exp(-\frac{2T}{\tau})], \\ q_{3,3} &= \frac{\tau}{2} [1 - \exp(-\frac{2T}{\tau})]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

挖掘机的最大加速度是有界的,而且如果当前加速度很大,则下一时刻加速度的变化范围就很小,反之也是.挖掘机的加速度可认为是近似符合正态分布.对于这种正态分布的随机变量,其与数学期望的偏差落在  $3\sigma$  的范围之外的概率上限为 0.003.因此假设

$$|a_{\max} - |a|| \leq 3\sigma, \quad (6)$$

则方差与均值之间的关系为

$$\sigma_a^2 = \frac{(a_{\max} - |a|)^2}{9}. \quad (7)$$

由最优估计理论可知,状态  $\ddot{x}(k)$  的估计值  $\hat{\ddot{x}}(k/k)$  为给定输入的条件均值,即

$$\hat{\ddot{x}}(k/k) = \mathbf{E}[\ddot{x}(k)/\mathbf{Z}_k]. \quad (8)$$

式(8)中:  $\mathbf{Z}_k = \{Z(1), Z(2), \dots, Z(k)\}$ , 所以可用  $\hat{\ddot{x}}(k/k)$  代替  $\bar{a}$ , 即

$$\sigma_a^2 = \frac{(a_{\max} - \hat{\ddot{x}}(k/k))^2}{9}, \quad (9)$$

这样扰动协方差矩阵  $Q$  即可以实时更新.

1.2 约束条件的引入

挖掘机在行驶时总是会沿一定的方向运动, 尽管运动方向无法提前准确得到. GPS 接收机在输出挖掘机经纬度信息的同时, 也输出运动速度大小及运动方向. 在缺乏精确完整运动方向信息的情况下, 可以认为机体的速度方向为该时刻机体运动方向. 左峻疆等<sup>[8]</sup>认为利用速度方向可以避免瞬时速度与平均速度不同所带来的误差. 其平均速度方向能表示为

$$d = \frac{\mathbf{S}_y(k) - \mathbf{S}_y(k-1)}{\mathbf{S}_x(k) - \mathbf{S}_x(k-1)}. \tag{10}$$

式(10)中:  $\mathbf{S}_x(k), \mathbf{S}_y(k)$  是  $k$  时刻的位置;  $\mathbf{S}_x(k-1), \mathbf{S}_y(k-1)$  是  $k-1$  时刻的位置. 这就是速度方向对载体的运动轨迹有着一种约束作用. 变换成矩阵形式为

$$\mathbf{D}\mathbf{X}(k) = \mathbf{D}\mathbf{X}(k-1). \tag{11}$$

式(11)中:  $\mathbf{D} = [-d, 0, 0, 1, 0, 0]$ , 矩阵  $\mathbf{D}$  用于更新卡尔曼滤波以及定位轨迹.

将矩阵  $\mathbf{D}$  导入标准卡尔曼滤波递推方程里, 可得最后的递推公式

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k | k-1) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k-1), \\ \tilde{\mathbf{X}}(k) &= \hat{\mathbf{X}}(k | k-1) - \mathbf{D}^T(\mathbf{D}\mathbf{D}^T)[\mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}(k | k-1) - \mathbf{D}\tilde{\mathbf{X}}(k-1)], \\ \hat{\mathbf{X}}(k) &= \tilde{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{X}}(k)], \\ \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}(k | k-1)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(k | k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}, \\ \mathbf{P}(k | k-1) &= \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{P}(k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}]\mathbf{K}(k | k-1). \end{aligned}$$

}

(12)

2 软件仿真分析

利用 MATLAB 软件仿真生成一个经纬度位置, 然后对该位置施加白噪声, 并把每个动态点的角度变化值也记录下来, 如图 1 所示. 图 1(a)是对静态定位点的仿真结果. 根据目标静态定位分布结果可知, 受到干扰的定位点分布在经度和纬度 0.6 m 的范围内, 而经过本文算法后, 尽管受到经度和纬度方向上的干扰, 滤波后的定位点仍聚集在真实值的附近, 漂移误差减小至 0.1 m 内. 图 1(b)是在单点定位的基础上, 在匀速运动仿真下的结果. 运动轨迹受到干扰后, 本文算法能快速的进行收敛并趋近于无误差, 有效的避免干扰所带来的扰动和破坏, 具有鲁棒性好、快速收敛等特点. 从图 1 可以看出, 仿真的效果是比较理想的.

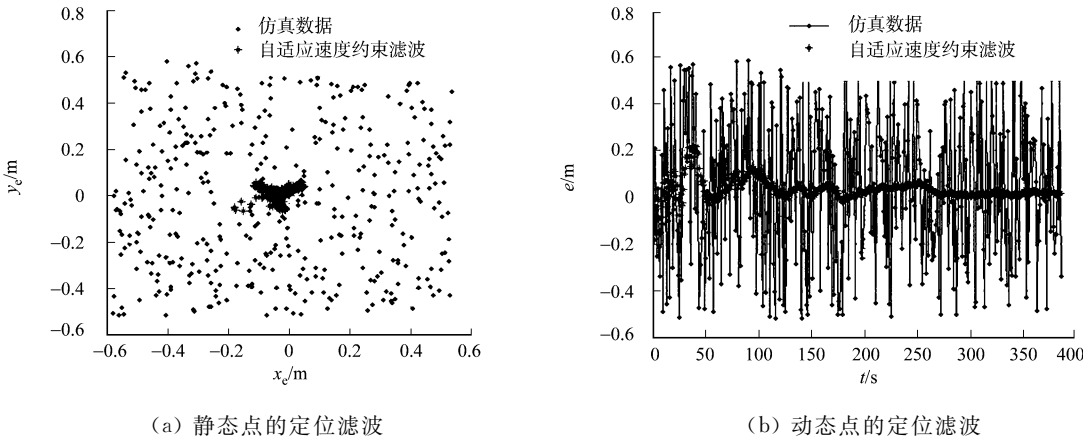


图 1 自适应速度约束滤波仿真结果

Fig. 1 Simulation result of adaptive velocity constraint filter

3 可靠性与精度分析

使用挖掘机远程智能信息系统采集原始数据来分析算法实际使用的可靠性与精度. 所有数据均在华侨大学的室外场地进行采集. 挖掘机被放置在一个空旷的场地来测试其静态位置与运动位置的效果.

实验系统有挖掘机智能信息 GPS 接收机板、有源 GPS 接收天线和用于数据接收的 PC 机。接收机定位精度 2.5 m, 冷启动时间 29 s, 热启动时间小于 1 s, 支持 A-GPS 和 SBAS。系统计算当前位置有 2 种方案: 一种是直接采用 GPS 接收机的位置输出; 另一种是其输出结果使用自适应速度约束算法。测试结果如图 2、图 3 和表 1 所示。表 1 中, 2dRMS 为 2 倍标准差, 95% 以内的数据范畴。

从图 2 和表 1 可以看出: 静态点漂移问题在使用本文算法后能得到比较好的效果, 经度和纬度上的抖动漂移与干扰漂移得到平滑, 2dRMS 从 2.14 m 下降到 1.30 m, 下降比例较大。这是因为静态漂移时运动方向时刻在大幅度变化, 并且加速度变化也很大, 而本文算法时刻监控着这两个变化量, 有效抵消了干扰。

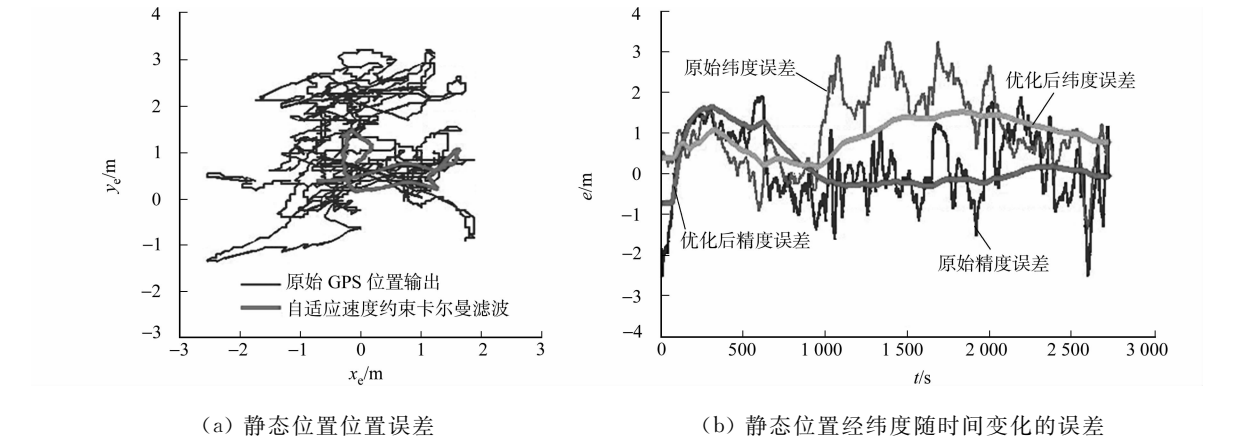


图 2 原始 GPS 接收机输出与自适应速度约束算法的静态位置比较

Fig. 2 Static position of the original GPS receiver output and adaptive velocity constraint algorithm

表 1 数据分析

Tab. 1 Data analysis

方法	静态位置		动态位置	
	2dRMS/m	$e$ /m	2dRMS/m	$e$ /m
原始 GPS 接收机输出	2.14	1.53	1.95	0.93
自适应速度约束卡尔曼滤波算法	1.30	1.14	1.88	0.83

在运动方面, 因为 GPS 接收机内部已经有一定的滤波算法, 整体输出效果较好, 但在抖动误差方面, 效果仍不理想, 如图 3 所示。在挖掘机行走过程中, 出现异常抖动数据, 这可能是因为 GPS 接收机在解算定位方程式出现的病态解数据。经本文算法滤波后, 这些异常数据得到控制。

由表 1 可知, 静态位置的偏差精度从 1.53 m 降至 1.14 m, 而运动位置从 0.93 m 降至 0.83 m。尽管在某些极端特殊的挖掘任务下 1 m 的精度仍不够精确, 但对于大部分的挖掘引导以及挖掘机作业过程管理而言是足够的。

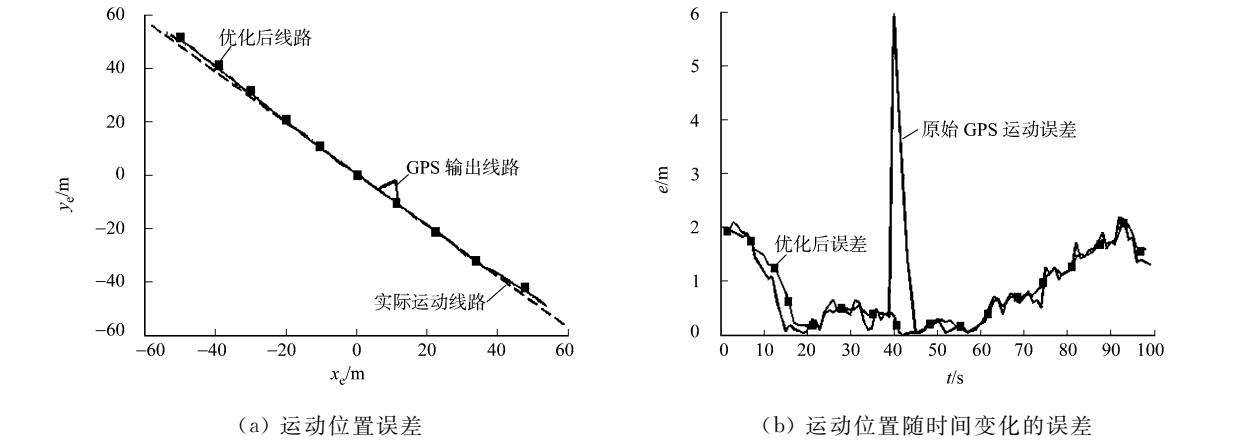


图 3 原始 GPS 接收机输出与自适应速度约束算法的运动位置比较

Fig. 3 Moving position of the original GPS receiver output and adaptive velocity constraint algorithm

4 结 论

本文对挖掘机在静止条件和运动条件下的精密定位方法进行了讨论,利用自适应速度约束卡尔曼滤波算法对挖掘机进行跟踪定位. 理论分析、仿真实验和实验测试表明:该方法能够利用速度方向的约束以及加速度自适应变化有效实现挖掘机精密挖掘中的跟踪定位. 同时,滤波算法收敛速度快,定位精度高,航迹连续更趋于真实情况. 未来,使用多卫星数据融合方案可以更进一步提高引导精度并用于更精密的智能挖掘.

参考文献:

[1] YOU S J,LEE K W,KWON S W. Building an digital model of an earthwork site for autonomous excavator operation [C]//ICROS-SICE International Joint Conference, Japan;Fukuoka,2009;2217-2219.

[2] 章红平,温宇斌,张志勇,等. 静态 GPS 测量与 RTK 测量实例分析[J]. 测绘通报,2006(1):28-32.

[3] 孙罡,王昌明,张爱军. GPS 静态单点定位的滤波算法比较[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2011,35(1):80-85.

[4] DOUGHERTY J J,ELSHERIEF H,SIMON D J,et al. GPS modeling for designing aerospace vehicle navigation system[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems,1995,31(2):695-704.

[5] 黄建新. Kalman 滤波的人体运动位置跟踪算法[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2003,24(3):254-256.

[6] 何友,王国宏,陆大瑜,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007.

[7] 邓自立. 信息融合滤波理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.

[8] 左峻疆,鲍远律,刘艳. 一种带约束条件的 GPS 动态滤波新方法[J]. 计算机仿真,2004,21(12):80-83.

Application of Adaptive Velocity Constraint Filter  
in Excavator GPS System

CHEN Zhi-bo, LIU Qiang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on the working performance limitation of excavator, a new adaptive velocity constraint kalman filter is proposed by referencing the velocity constraint conditions and adaptive covariance matrix. Under the position velocity acceleration model, the Kalman filter is improved to track and position the static and dynamic targets of excavator. Simulation and experimental results show that using adaptive velocity constraint and correlation filtering algorithm can realize the excavator moving target tracking and positioning optimization effectively. Meanwhile, the track of the filtering algorithm is more continuous, more accurate and smaller mean square error.

**Keywords:** excavator; GPS; adaptive; velocity constraint; kalman filter

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 杨建红)