

基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法

周俊¹, 张鹏¹, 刘成良²

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: GPS 广泛用于农业机械导航研究中, 其定位误差信号一般存在明显的自相关性, 不能满足组合导航中常用的卡尔曼滤波算法观测噪声为高斯白噪声的要求。为此, 建立了 GPS 定位误差 AR 模型, 结合卡尔曼估计结果来预测和修正 GPS 定位误差, 再将修正后的 GPS 定位信息应用于组合导航中的卡尔曼滤波过程。试验结果表明, 无论 GPS 接收机是在静止还是在运动条件下, 处理后的定位误差信号自相关性都明显降低, 近似为白噪声; 目标路径直线时的最大跟踪误差约为 0.15 m, 为曲线时, 最大跟踪误差约为 0.3 m。该方法为低精度 GPS 应用于农业机械导航提供了可行途径。

关键词: 农业机器人, 导航, 全球定位系统, 自回归模型, 卡尔曼滤波

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.12.043

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-12-0254-05

周俊, 张鹏, 刘成良. 基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 254—258.
Zhou Jun, Zhang Peng, Liu Chengliang. Kalman filtering for integrated navigation based on time series analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 254—258. (in Chinese with English abstract)

0 引言

目前农业机械自主导航中使用 GPS 绝对定位信息比较普遍^[1-3]。为了提高导航系统的精度和可靠性, 降低成本, 一般还需要在 Kalman 滤波基础上融合其他传感器信息构成某种组合导航形式^[4-9]。如果运动载体的运动状态能用线性模型描述且模型误差和传感器测量误差能用高斯白噪声模型化, 则 Kalman 滤波将在统计意义上提供融合数据的最优估计; 反之, 则不能。实际应用中, 系统噪声和观测噪声往往是有色噪声, 因此造成了 Kalman 滤波效果的下降和较大的系统实际误差产生^[10]。GPS 定位误差就是一个具有自相关性的有色噪声。

本文将采用时间序列分析方法, 对农业机械导航过程中的 GPS 定位误差进行建模, 确定 GPS 定位误差 AR 模型参数, 消除 GPS 定位误差信号的内在自相关性, 使得 GPS 定位误差信号接近于白噪声。然后以处理后的 GPS 定位信息为基础, 根据 Kalman 滤波原理建立农业机械组合导航框架, 来提高其自主导航系统性能。

1 GPS 定位误差时间序列分析

GPS 接收机输出的定位信号在时间上是离散的, 信号中存在加性噪声, 并随着时间随机变化, 当前时刻定位误差信号与该时刻之前的误差信号并不完全独立。可以通过大量的观测数据来分析定位误差特性, 建立 GPS

定位误差模型, 以进行误差预测和修正。

采用 Trimble 公司的 AgGPS 132 接收机, 连续采集 GPS 接收机静止和运动时的定位数据, 高斯投影后转换为平面直角坐标系下的位置数据 (x, y) 。图 1a 是接收机静止时 X 坐标方向的连续 8 000 个采样点构成的误差序列 (Y 坐标方向有类似的结果, 下文同样情况时不再赘述), 图 1b 是对应的定位误差自相关函数曲线。图 2a 是接收机运动时 X 坐标的误差序列, 图 2b 是对应的误差自相关函数曲线。可以看出无论是静态还是动态条件下, 定位误差序列均具有明显的自相关性。

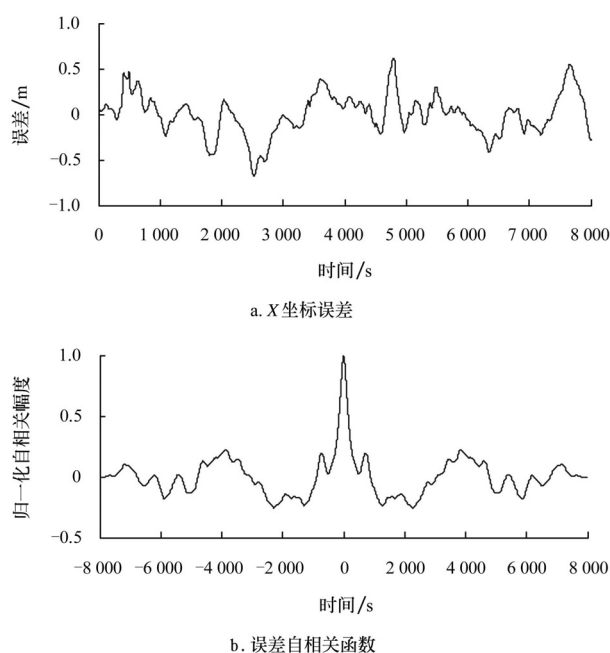


图1 GPS 接收机静止时定位误差

Fig.1 Positioning error with static GPS receiver

收稿日期: 2010-02-25 修订日期: 2010-08-16

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2006AA10Z259, 2006AA10A304)

作者简介: 周俊 (1974—), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 农业机器人、机器视觉与模式识别。南京 南京农业大学工学院, 210031。

Email: zhoujun@njau.edu.cn

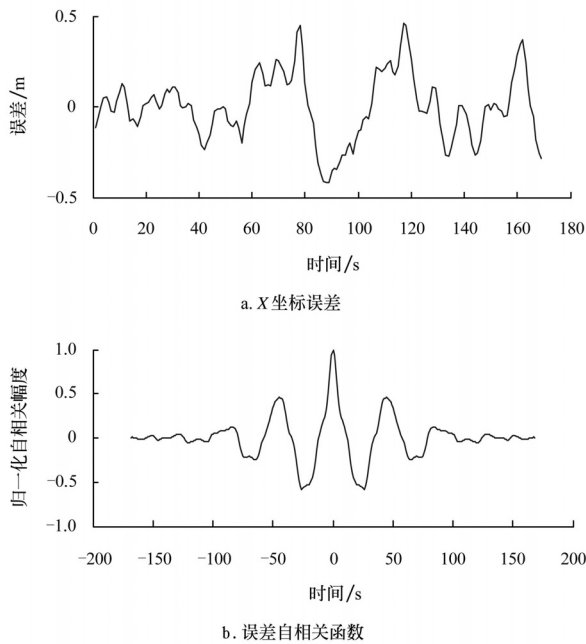


图 2 GPS 接收机运动时定位误差

Fig.2 Positioning error with moving GPS receiver

1.1 AR 模型建立

时间序列是随时间改变而随机变化的信号序列, 分析的目的就是要找到这种变化规律, 建立序列近似的、简化的数学模型, 并将其应用于系统动态特性的描述、预测分析和误差补偿等方面^[11]。这里采用 AR 模型来描述和预测 GPS 定位误差信号的变化规律, 以提高农业机械组合导航中的定位精度。

对于时间序列 $\{X(t), t=0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ 而言, AR(p)模型为

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

($t = p+1, p+2, \dots, p+n$)

式中, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为自回归系数; p 为 AR 模型的阶数; ε_t 为均值为 0, 方差为 σ^2 的白噪声。

自回归系数 φ 由 AR(p) 序列的自协方差函数 $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_p$, 通过 Yule-Walker 方程 (2) 唯一决定。

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \dots & \gamma_{p-1} \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \dots & \gamma_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{p-1} & \gamma_{p-2} & \dots & \gamma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

白噪声的方差 σ^2 由式 (3) 求解。

$$\sigma^2 = \gamma_0 - (\varphi_1 \gamma_1 + \varphi_2 \gamma_2 + \dots + \varphi_p \gamma_p) \quad (3)$$

参数估计是在给定阶次的情况下进行的。由于事先无法判断模型的阶次, 因此在建模过程中先给定模型的某个阶次, 然后按照上述估计方法, 估计出 AR 模型的参数, 得到各阶次模型, 最后通过阶数判定准则来确定 AR 模型。考虑到实时性要求, 应用中在不影响模型精度的前提下尽量选择较低的阶数。

1.2 定位误差预测与修正

当 GPS 接收机静止时, 由于没有实时性要求, 这里选择 10 阶模型, 采用一步预测的方法对误差进行预测

$$\hat{x}_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_{10} x_{t-10} \quad (t=10, 11, \dots, n) \quad (4)$$

$$\omega_t = x_t - \hat{x}_t = x_t - (\varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_{10} x_{t-10}) \quad (5)$$

式中, \hat{x}_t 为误差的一步预测值; ω_t 为预测误差和实际误差的差值。应用中将在定位数据的实际观测值上减去预测定位误差, 来得到更为准确的 GPS 定位信息。

在 GPS 接收机静止时, 以该位置点多次测量的算术平均值作为真实值, 可得到各次测量的定位误差, 而后建立定位误差 AR 模型。用模型预测值修正实际测量的定位数据, 得到新的定位数据测量噪声归一化自相关函数如图 3 所示。对比图 1 可以看出, 建立的 AR 能够准确地描述 GPS 定位误差的动态特性, 定位数据测量噪声的自相关性显著下降, 与白噪声基本一致。

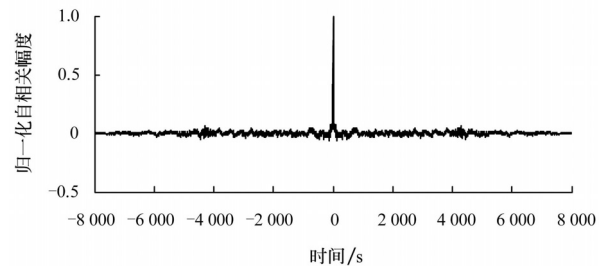
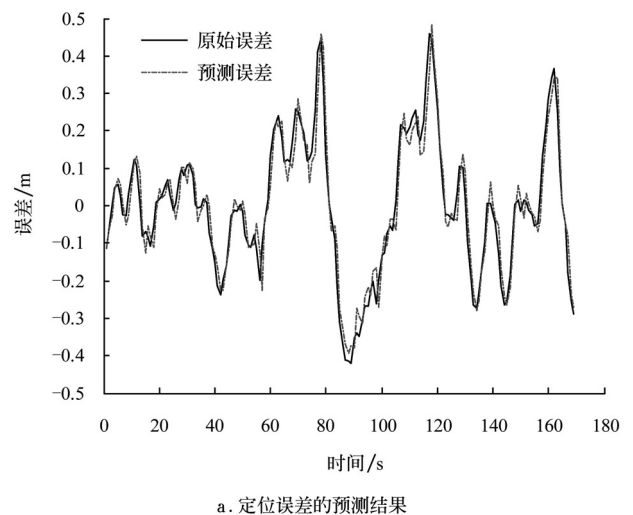


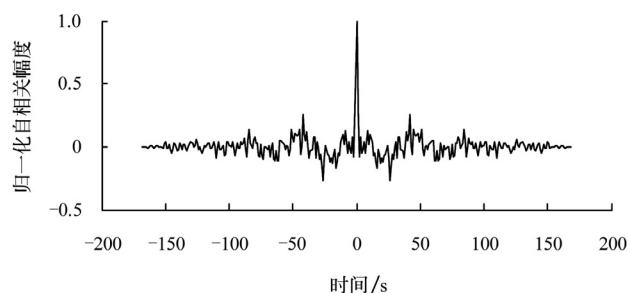
图 3 GPS 接收机静止时修正后定位测量噪声自相关函数

Fig.3 Auto-correlation function of modified measurement noise of positioning data with static GPS receiver

农业机械自主导航过程中, GPS 接收机随农业机械一起运动, 每次测量的实际位置点不断变化。由于 Kalman 滤波可以实时给出农业机械位置的最优估计, 所以把滤波后的位置数据作为对应点的真实值, 这样就可得到 GPS 定位误差序列。为了兼顾系统实时性要求, 分析中定位误差的 AR 模型选为 2 阶。此时得到的定位误差预测结果以及修正后定位数据观测噪声归一化自相关函数分别如图 4a 和 4b 所示。由于模型阶数较低以及各测量点真实位置值存在偏差等原因, 定位误差的预测精度相较 GPS 接收机静止时有所降低, 但是仍然可以被模型足够准确地预测出, 并且对照图 2 可见, 修正后的定位误差自相关性明显下降, 接近于白噪声, 这就为其后的 Kalman 滤波组合导航提供了高质量的信息源。



a. 定位误差的预测结果



b. 修正后定位数据的观测噪声归一化自相关函数

图 4 GPS 接收机运动时定位误差预测

Fig.4 Prediction of positioning error with moving GPS receiver

2 GPS 组合导航

鉴于系统可靠性和成本等方面的原因,农业机械导航过程中一般不会单纯依靠 GPS 定位信息,还要融合里程计等其他传感器信息,其中信息融合框架较多使用 Kalman 滤波原理。融合中不同源信息之间相互补充,可以提高导航系统精度和可靠性。前文已经指出,在 kalman 滤波融合过程中,各信息源观测噪声为白噪声是组合导航系统在统计意义下提供状态数据最优估计的必要条件,而经过 AR 模型处理后的 GPS 定位误差就可以很好地满足这一点。

Kalman 滤波中,离散化的组合导航系统状态方程和测量方程

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \Phi(k)X(k) + W(k) \\ Z(k) &= H(k)X(k) + V(k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $X(k)$ 为 k 时刻的 n 维状态向量,也是被估计向量; $Z(k)$ 为 k 时刻 m 维测量向量; $\Phi(k)$ 为 k 时刻的系统一步转移矩阵; $W(k)$ 为 k 时刻 n 维的系统噪声向量; $H(k)$ 为 k 时刻的测量矩阵; $V(k)$ 为 k 时刻的 m 维测量噪声。

卡尔曼滤波要求系统噪声和测量噪声是互不相关的零均值白噪声序列,即有

$$E(W(k)W^T(j)) = \begin{cases} Q(k) & k=j \\ 0 & k \neq j \end{cases} \quad (7)$$

$$E(V(k)V^T(j)) = \begin{cases} R(k) & k=j \\ 0 & k \neq j \end{cases} \quad (8)$$

$$E(W(k)V^T(j)) = 0 \quad \forall k, j \quad (9)$$

式中 $Q(k)$, $R(k)$ 为系统噪声和观测噪声的协方差矩阵。

设定 (x_k, y_k) 为农业机械 k 时刻坐标,即在 WGS-84 坐标系下高斯投影后的东、北向坐标值, (x_{k+1}, y_{k+1}) 为 $k+1$ 时刻的坐标。 v_k 为农业机械纵向速度, θ_k 为航向角,即农业机械纵向与 x 轴正向之间的夹角, T 为采样控制周期。不失一般性,假设农业机械在运动过程中横滚角和俯仰角近似为 0,转向轮转向过程耗费时间相对于农业机械运动速度而言可忽略不计,同时还假设单位采样时间内农业机械行进速度恒定。根据运动几何关系,不难确定农业机械运动轨迹的递推关系式为

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + Tv_k \cos \theta_k \\ y_{k+1} &= y_k + Tv_k \sin \theta_k \end{aligned} \quad (10)$$

考虑计算效率及传感器配置,这里选用线性模型,则式(6)系统状态方程的状态向量为

$$X(k) = [x_k, y_k, v_k] \quad (11)$$

则,系统状态转移矩阵

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T \cos \theta_{k-1} \\ 0 & 1 & T \sin \theta_{k-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

系统观测向量为

$$Z(k) = [x_k, y_k, v_k] \quad (13)$$

则,系统测量矩阵

$$H(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

确定了具体的导航系统状态方程以及观测方程后,按照卡尔曼滤波原理采用递推形式,即在以前时刻的状态估计基础上,根据当前时刻的量测值递推得到当前时刻的状态最优估计值。与通常农业机械自主导航中不一样的是,这里每次递推时采用的位置测量值是经过定位误差模型预测值修正后的 GPS 定位数据。其他方面与通常的卡尔曼滤波组合导航一样,不再赘述。

3 导航试验

在自主研制的轮式农业机器人平台(图 5)上进行 GPS 组合导航试验,该平台采用 CAN 总线分布式控制体系,具有四轮独立驱动和转向能力^[12]。在跟踪路径分别为直线和圆弧曲线两种条件下开展试验,以验证本文算法的有效性。试验过程中实时记录了 GPS 原始测量数据、AR 模型处理后的定位数据以及卡尔曼滤波结果。



图 5 轮式农业移动机器人平台

Fig.5 Prototype of agricultural wheeled mobile robot

图 6 和图 7 分别显示的是直线和曲线路径跟踪时的试验情况,其中 6a 和 7a 是跟踪轨迹图,6b 和 7b 是跟踪误差图。自主导航中直接将 GPS 接收机接收到的第一个定位信息作为滤波器状态向量的初始值。由于 GPS 测量数据存在着较大的漂移和误差^[13],这个初始值实际上与真实值间存在较大偏差。从图 6b 和 7b 可以看到,导航开始时由于卡尔曼滤波融合的里程计等其他传感器信息还比较少,修正过程对克服 GPS 定位误差的作用不大。

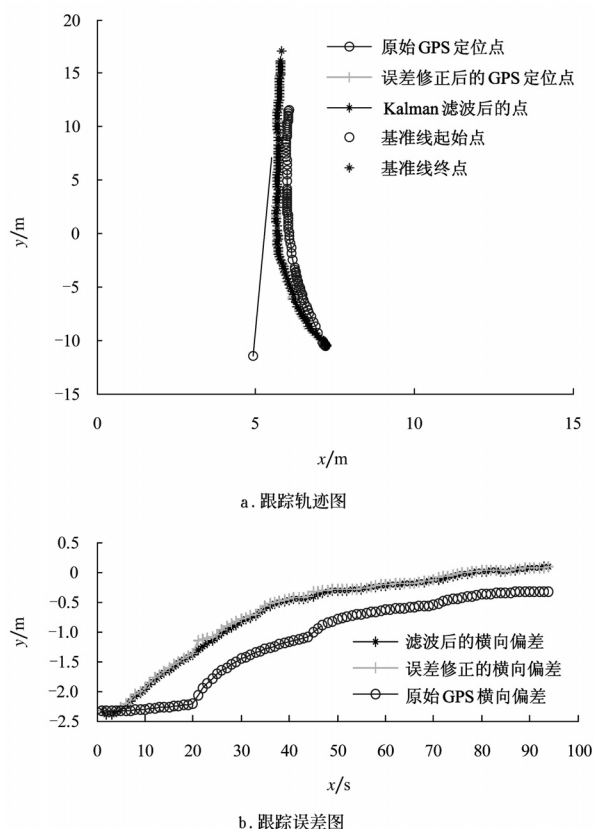


图 6 直线跟踪试验

Fig.6 Navigation experiment of straight path tracking

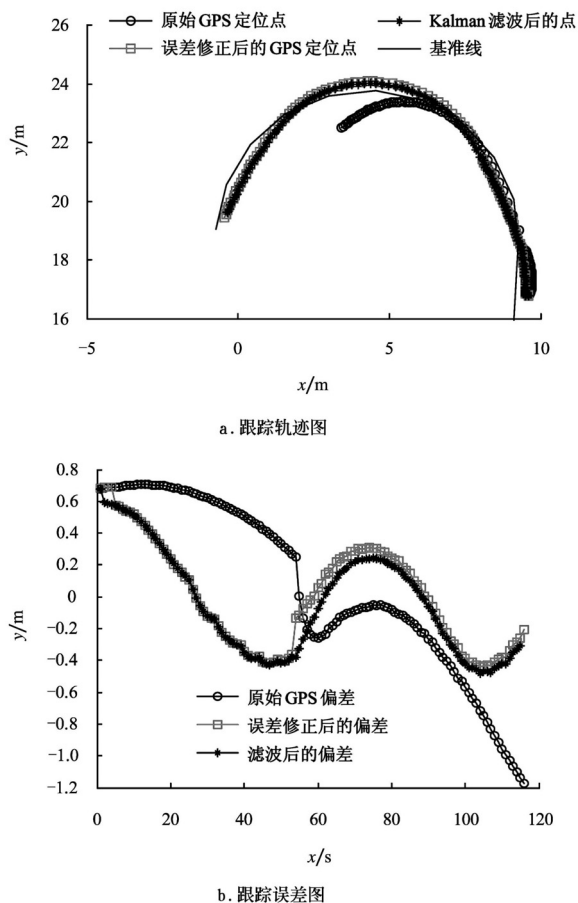


图 7 曲线跟踪试验

Fig.7 Navigation experiment of curve path tracking

由于 GPS 定位误差不满足高斯白噪声分布, 如果直接应用于卡尔曼滤波, 那么滤波结果必然将会随着 GPS 定位误差一起偏离真实值。这里按前文所述算法, 综合卡尔曼滤波结果与 GPS 定位误差 AR 模型来共同修正 GPS 定位数据, 对定位误差进行白化处理, 然后再提供给卡尔曼滤波器, 所以卡尔曼滤波结果很快就与 GPS 实际测量值分离开, 并跟踪上了目标路径的基准线。稳定后直线路径跟踪时的最大误差约为 0.15 m, 曲线跟踪时的最大误差约为 0.3 m。

4 结 论

1) 采用时间序列分析与卡尔曼滤波相结合的方法, 考察了 AgGPS 132 接收机在静止和运动两种工况下的定位误差的相关性, 建立了定位误差的 AR 模型, 对 GPS 定位误差进行了预测修正。试验结果显示, 处理后的定位误差自相关性明显降低, 近似为白噪声, 为农业机械基于卡尔曼滤波的组合导航系统提供了高质量的定位信息源。

2) 应用修正后的 GPS 定位数据, 基于卡尔曼滤波原理设计了农业机械 GPS/DR 组合导航框架。试验结果表明, 直线路径跟踪时最大误差约为 0.15 m, 曲线跟踪时最大误差约为 0.3 m。

[参 考 文 献]

- [1] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 88—92.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 88—92. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张漫, 周建军, 籍颖, 等. 农用车辆自动驾驶定位方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 74—77.
Zhang Man, Zhou Jianjun, Ji Ying, et al. Positioning method for automatic navigation of agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [3] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动驾驶控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139—145.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139—145. (in Chinese with English abstract)
- [4] Noguchi N, J F Reid, J Will, et al. Vehicle automation system based on multi-sensor integration[C]//Annual International ASAE Meeting, MI, 1998, No.983111.
- [5] Bergeijk Van J, Goense D, et al. Digital filter to integrate global positioning system and dead reckoning[J]. J Agric Eng Res, 1998, 70(2): 135—143.
- [6] Guo L, Y He, Q Zhang, et al. Real-time tractor position estimation system using a Kalman filter [J]. Transactions of CSAE, 2002, 18(5): 96—101.

- [7] Yoshisada Nagasaka, Hidefumi Saito, Katsuhiko Tamaki, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. *Journal of Field Robotics* 2009, 26(6):537–548.
- [8] 张智刚, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊 1): 6–12.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. *Transactions of the CSAM*, 2009, 40(Supp.1):6–12. (in Chinese with English abstract)
- [9] 籍颖, 刘兆祥, 刘刚, 等. 基于 Kalman 滤波农用车辆导航定位方法[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊 1): 13–17.
Ji Ying, Liu Zhaoxiang, Liu Gang, et al. Positions research of vehicle navigation system based on Kalman filter[J]. *Transactions of the CSAM*, 2009, 40(Supp.1): 13–17. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周俊, 姬长英. 自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(5):113–116.
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle[J]. *Transactions of the CSAM*, 2002, 33(5): 113–116. (in Chinese with English abstract)
- [11] 曹力, 黄圣国. GPS 误差的时间序列分析建模研究[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(35): 213–216.
Cao Li, Huang Shengguo. Studying on GPS errors modeling by time series analysis[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(35): 213–216. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王友权, 周俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 110–113.
Wang Youquan, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 110–113. (in Chinese with English abstract)
- [13] 冯斌. AgGPS132 定位测量技术研究[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(6): 83–85.
Feng Bin. Study on technology of AgGPS132 positioning measurement[J]. *Transactions of the CSAM*, 2002, 33(6): 83–85. (in Chinese with English abstract)

Kalman filtering for integrated navigation based on time series analysis

Zhou Jun¹, Zhang Peng¹, Liu Chengliang²

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: GPS is applied widely in autonomous navigation of the agricultural machinery. Its positioning error, however, is characterized by autocorrelation, can not satisfy the requirement of Kalman filtering, which is the base of the integrated navigation system of the agricultural machinery. So the characteristic of GPS positioning error was described as AR model with the time series analysis. Then the method to predict and modify the GPS positioning error with AR model and optimal estimation of Kalman filtering was introduced. And the corrected GPS positioning data were applied in the Kalman filtering for the integrated navigation of the agricultural machinery. The experimental results showed that the autocorrelation between neighboring positioning error data was decreased dramatically, and being similar to the white noise, no matter the GPS receiver was static or not. And when the tracked path was straight and curve, the maximum tracking error was about 0.15 m and 0.3 m respectively. This method can provide a viable way to achieve high-accuracy navigation with low-accuracy GPS for the agricultural machinery.

Key words: agricultural robots, navigation, GPS, AR model, Kalman filtering