

农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模*

周俊 张鹏 宋百华

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

【摘要】 为实现高精度的农业机械导航,分析了 GPS 定位误差及其相关性,运用时间序列分析方法建立 GPS 静态和动态定位误差的 AR 模型,给出了导航过程中的定位误差处理方法,并在自制的农田智能移动平台上进行了实验。结果表明,处理后的 GPS 定位误差信号的相关性明显下降,接近于白噪声,定位误差均值从 0.195 1 m 下降为 -0.002 2 m。

关键词: 农业机械 全球定位系统 导航 定位误差 AR 模型

中图分类号: P207; P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0189-04

Analysis and Modeling of GPS Positioning Error for Navigation of Agricultural Machinery

Zhou Jun Zhang Peng Song Baihua

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

The GPS positioning error and its correlation were analyzed, and then corresponding static and dynamic error were described as AR model by using time series methods. Finally, the process for dealing with the positioning error in navigation was presented, and the experiment was carried out with self-made agricultural robot. The experimental results showed that the proposed approach improves the positioning precision of GPS, and the correlation within the positioning error is decreased, similar to white noise. The average value of positioning error is reduced to -0.002 2 m from 0.195 1 m. So it can be applied to achieve high precision navigation of agricultural machinery.

Key words Agricultural machinery, GPS, Navigation, Positioning error, AR model

引言

在农业机械导航领域, GPS 定位信息被较多采用。为了能有效地利用此信息,常常还需要明确 GPS 定位精度和误差模型,如 DR/GPS 组合导航中需要给出 GPS 误差模型,以便更好地进行 Kalman 滤波等运算。因此建立正确的 GPS 误差模型,尤其是导航动态环境下的 GPS 误差模型在实际应用中具有重要的意义。

分析 GPS 定位误差,改善其定位精度,已进行很多研究^[1-6],都不同程度改善了 GPS 的定位精度。但大多是针对静态定位,很少针对动态定位过

程开展研究,对在导航过程中如何分析误差更是少见。本文采用时间序列分析方法,针对在静态和动态下实际测量的数据,给出 GPS 静态和动态误差 AR 模型。在此基础上,对农业机械导航过程中的 GPS 定位误差进行分析处理,消除 GPS 定位误差信号内在的相关性,提高 GPS 定位精度。

1 GPS 数据采集及误差分离

采用 Trimble 公司的 AgGPS 132 型接收机,工作频率为 1 Hz,通过串口从接收机中读出经纬度信息,然后经高斯-克吕格投影转换为平面直角坐标系下的坐标值。

单点静态定位时,连续采集 GPS 接收机的数据,转换为平面直角坐标系下的位置数据 (x, y) ,求其均值作为天线的基准位置 (x_0, y_0) ,然后将连续采集的位置数据 (x, y) 与基准位置数据进行比较,即可得到 GPS 定位误差 $(\Delta x, \Delta y)$ 。图 1a 是 GPS 单点静态定位数据中 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,不再赘述),对该序列作平稳性检验,结果表明单点静态 GPS 误差信号具有平稳性和零均值特性。图 1b 是 X 坐标的误差自相关函数曲线,可以看出误差序列具有明显的内在相关性。

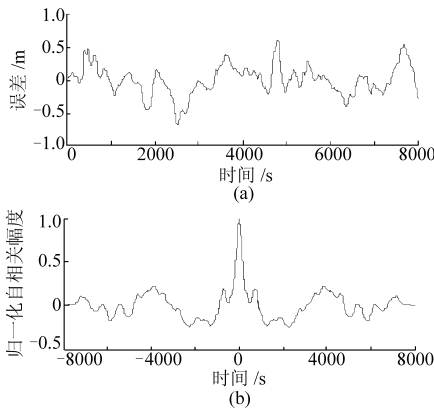


图 1 单点静态 GPS 定位误差曲线
Fig.1 Static positioning error of GPS

(a) X 坐标误差 (b) X 坐标误差自相关函数

动态定位时,通过将 GPS 天线安装在载体上,连续采集载体稳定运动状态下的位置数据。动态环境下的 GPS 误差分离与静态时不同,采用多项式拟合方法分离动态环境下的 GPS 误差。

根据多项式逼近理论,只要选择合适的模型参数和模型阶数,载体在一段时间内的运动轨迹总可以通过多项式表达。设载体在一段时间内的 N 个观测样本为 $\{(t_i, x_i), i = 1, 2, \dots, N\}$, t_i 为 GPS 观测时间, x_i 为测量值(位置数据),拟合多项式模型为

$$x(t) = f(a, t) = \sum_{i=1}^{n+1} a_i t^{n+1-i} \quad (1)$$

其中,系数 a_i 是 χ^2 量最小时的解

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - f(a, t_i)}{\Delta x_i} \right)^2 \quad (2)$$

式中 Δx_i ——原数据与拟合值间的离差

模型多项式的阶次取得太低,拟合就粗糙,不能反映真实轨迹;阶次太高,拟合过度,使得数据噪声也被纳入模型。应用中,可以根据拟合因子 Q 来判断拟合是否恰当

$$Q(\chi^2, N - n - 1) = 1 - P(\chi^2 < N - n - 1) \quad (3)$$

式中 P ——概率 n ——模型阶数
 N ——样本长度

当 Q 值与 0.5 接近,则认为阶次适当。实验过程中得到的实际拟合因子 Q 为 0.477 8。

通过上面的多项式拟合后,将拟合值作为运动轨迹的真值估计,与在此运动轨迹上连续采集的位置数据进行比较,即可获得 GPS 动态测量的误差值。图 2 是对采集的动态 GPS 位置数据误差分离的结果,其中图 2a 是 X 坐标的误差序列,图 2b 是 X 坐标的误差自相关函数曲线。可以看出动态 X 坐标的误差序列也具有明显的内在相关性。

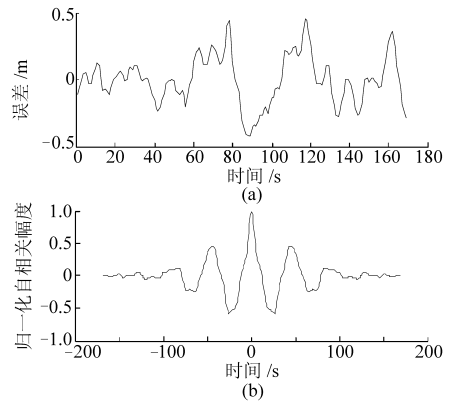


图 2 动态 GPS 定位误差曲线

Fig.2 Dynamic positioning error of GPS

(a) X 坐标误差 (b) X 坐标误差自相关函数

2 误差建模与预测分析

时间序列是随时间改变而随机变化的序列。时间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^[5]。

GPS 接收机的输出信号在时间上是离散的,定位数据也随着时间随机变化,同时信号中存在加性噪声,因此当前时刻误差信号与该时刻之前的误差信号并不是完全独立的。GPS 定位精度本质上是一种误差的概率分布,可以通过大量观测数据研究分析误差特性,建立 GPS 误差模型,进行误差预测和修正。本文采用 AR 模型来描述和预测 GPS 的误差信号。

2.1 AR 模型参数估计

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

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4)$$

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

式中 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ ——自回归系数

p ——AR 模型的阶数

ε_t ——均值为零,方差为 σ^2 的白噪声

参数估计就是按照一定方法估计出 $\sigma^2, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 这些参数。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

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \cdots & \gamma_{p-1} \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \cdots & \gamma_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{p-1} & \gamma_{p-2} & \cdots & \gamma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

惟一决定。白噪声的方差 σ^2 由

$$\sigma^2 = \gamma_0 - (\varphi_1 \gamma_1 + \varphi_2 \gamma_2 + \cdots + \varphi_p \gamma_p) \quad (6)$$

决定。

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确定 AR 模型。

最终确定 X 坐标静态和动态模型的阶数分别为 10 阶和 2 阶,由此得到 AR 模型的参数。

静态 AR(10) 参数: $\varphi_1 = 1.0942, \varphi_2 = 0.0134, \varphi_3 = -0.0155, \varphi_4 = -0.0086, \varphi_5 = -0.0021, \varphi_6 = -0.0101, \varphi_7 = -0.0019, \varphi_8 = -0.0093, \varphi_9 = 0.0019, \varphi_{10} = -0.0625, \sigma^2 = 1.323937 \times 10^{-5}$ 。

动态 AR(2) 参数: $\varphi_1 = 1.4816, \varphi_2 = -0.5888, \sigma^2 = 0.002829$ 。

2.2 误差预测与修正

根据上述模型,采用一步预测的方法对误差进行预测,一步预测的方法为

$$\hat{x}_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_{10} x_{t-10} \quad (7)$$

($t = 10, 11, \dots, n$)

$$\omega_t = x_t - \hat{x}_t = x_t - (\varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_{10} x_{t-10}) \quad (8)$$

式中 \hat{x}_t ——误差的一步预测值

ω_t ——预测误差和真实误差的差值

预测与修正结果如图 3 ~ 6 所示。图 3 和图 5 分别是静态和动态模型预测后所得误差与原始误差的对比图,从图中可以看出,静态和动态的预测模型基本上都可以预测原始误差的趋势。因此可将预测的误差作为真实误差的估计,对 GPS 采集的原始数

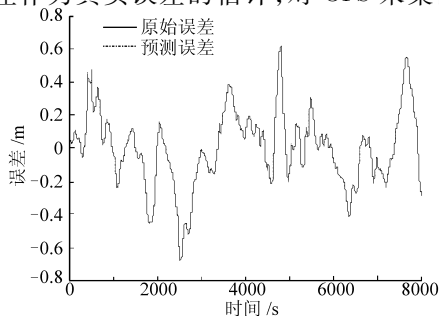


图 3 单点静态 GPS 定位中 X 坐标误差及其预测值
Fig. 3 Static positioning error and corresponding predicted value of GPS

据进行误差修正。修正后的误差如图 4 和图 6 所示,与图 1 和图 2 的原始误差对比可看出,修正后的误差自相关性下降,接近于白噪声,定位精度也得到提高。从图 4 和图 6 的对比可以看出,静态模型的处理效果明显比动态的要好,这主要是因为,为了保证实时性和减少计算量,在不影响模型正确性的前提下动态模型尽量选择了较低的阶数。

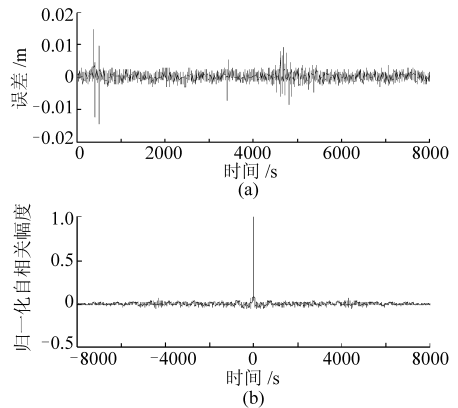


图 4 修正的单点静态 GPS 定位误差
Fig. 4 Modified static positioning error of GPS
(a) 修正的 X 坐标误差 (b) 修正 X 坐标误差自相关函数

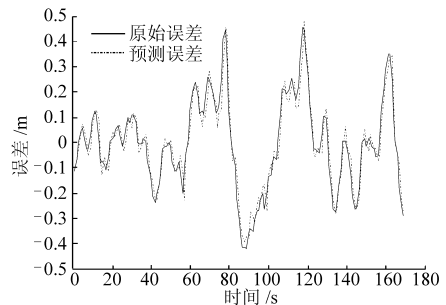


图 5 动态 GPS 定位中 X 坐标误差及其预测值
Fig. 5 Dynamic positioning error and corresponding predicted value of GPS

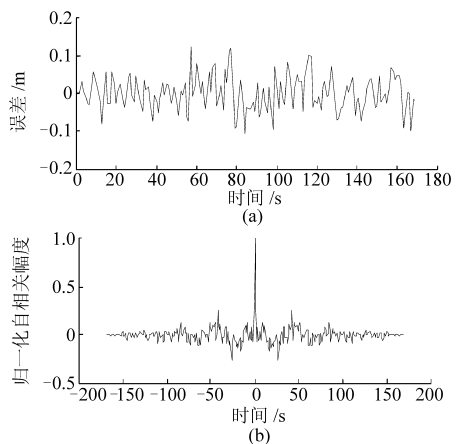


图 6 修正的 GPS 动态定位误差
Fig. 6 Modified dynamic positioning error of GPS
(a) 修正的 X 坐标误差 (b) 修正的 X 坐标误差自相关函数

3 导航过程中的定位误差分析

对 GPS 误差进行建模分析, 目的在于寻找合适的模型描述 GPS 误差, 进而预测和修正误差, 以提高定位精度, 可以为以后改善农业机械导航精度提供方法和依据。因此针对提出的误差模型, 结合导航过程研究了 GPS 的定位误差处理。

导航实验采用轮式农业机器人组合导航平台, 该平台采用基于 CAN 总线的分布式控制体系, 能够实现四轮驱动和四轮转向, 具有视觉、GPS 及组合等多种导航方式。在学校内一块废弃操场进行自主导航, 实时记录了导航过程中动态的 GPS 原始数据和 Kalman 滤波后的数据。

在误差提取过程中, 将 Kalman 滤波后的数据作为 GPS 原始定位数据真值的估计, 与原始的 GPS 定位数据比较, 然后使用上述动态误差模型进行预测和修正, 结果如图 7 和图 8 所示。图中原始误差序列均值为 0.195 1 m, 处理后的误差序列均值为 -0.002 2 m; 原始误差序列标准差为 0.271 2, 处理后的误差序列标准差为 0.138 3。由此可见, 修正后的 GPS 动态定位精度有明显提高, 误差相关性明显降低, 接近于白噪声。组合导航系统中的 Kalman 滤波算法, 要求没有模型化的系统噪声且观测噪声必须是白噪声, 但实际上这些噪声往往都是有色噪声^[7], 而经过 AR 模型预测和修正后的 GPS 误差接近于白噪声, 这就为以后进一步提高组合导航精度提供了可能的途径。

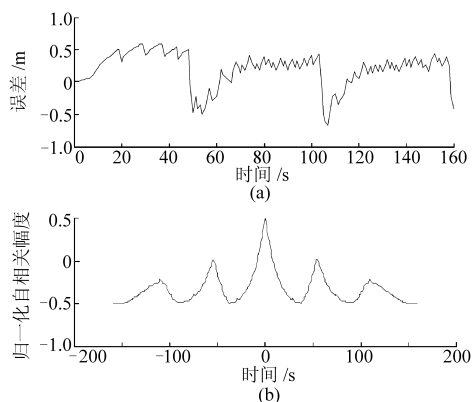


图 7 导航中 GPS 的原始定位误差

Fig. 7 Raw positioning error of GPS in navigation

(a) X 坐标误差 (b) X 坐标误差自相关函数

农业机器人平台导航时, 在 Kalman 滤波过程中, 状态变量的初始值没有进行任何特殊的初始处

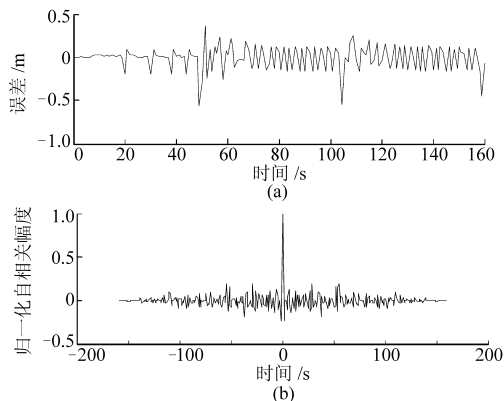


图 8 导航中修正的 GPS 定位误差

Fig. 8 Modified positioning error of GPS in navigation

(a) 修正的 X 坐标误差 (b) 修正的 X 坐标误差自相关函数

理, 只是将接收机第一个定位的位置信息作为滤波器状态变量的初始值。随着滤波的进行, 滤波器所输出的状态变量很快就跟踪上了真实的状态。最后将记录的 GPS 定位数据通过 AR 模型处理后, 即把 GPS 实际定位值减去模型对定位误差的预测值, 所得结果接近于 Kalman 滤波的输出值, 如图 9 所示。图中坐标(0,0)点为导航起始点。由此可见, AR 模型在导航动态条件下也能很好地预测出 GPS 的定位误差, 进而为消除误差, 改善导航精度提供了可靠的基础。

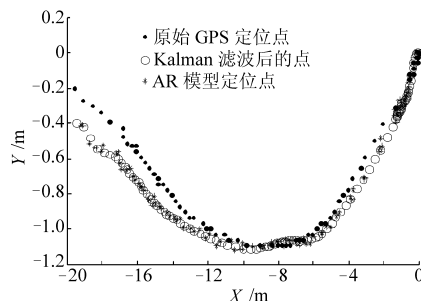


图 9 导航实验结果

Fig. 9 Result of navigation experiment

4 结束语

在对大量 GPS 定位数据时间序列分析的基础上, 分别建立了静态和动态时 GPS 定位误差的 AR 模型, 同时分析了实际导航过程中 GPS 定位误差处理方法。结果表明, 该模型可以显著地提高 GPS 定位精度, 降低定位误差的自相关性, 修正后的误差信号接近白噪声。这不仅可以为进一步改善农业机械 GPS 导航精度提供参考, 同时也可应用于其他需要高精度 GPS 定位信息的场合。 (下转第 198 页)

参 考 文 献

- 1 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪, 等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析[J]. 农业机械学报, 1990, 21(2): 44~49.
Ren Luquan, Xu Xiaobo, Chen Bingcong, et al. Initial research on claw shapes of the typical soil animals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(2): 44~49. (in Chinese)
- 2 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1): 1~12.
- 3 陈秉聪, 任露泉, 徐晓波, 等. 典型土壤动物体表形态减粘脱土的初步研究[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 1~6.
Chen Bingcong, Ren Luquan, Xu Xiaobo, et al. Initial research on reducing soil adhesion of body surface shapes of the typical soil animals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1990, 6(2): 1~6. (in Chinese)
- 4 丛茜, 任露泉, 吴连奎, 等. 几何非光滑生物体表形态的分类学研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(2): 7~12.
Cong Qian, Ren Luquan, Wu Liankui, et al. Taxonomic research on geometric nonsmooth animal surface shapes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1992, 8(2): 7~12. (in Chinese)
- 5 任露泉, 王云鹏, 李建桥, 等. 典型生物柔性非光滑体表的防粘研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 31~36.
Ren Luquan, Wang Yunpeng, Li Jianqiao, et al. Bionic research on flexible nonsmooth surface of typical animals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1996, 12(4): 31~36. (in Chinese)
- 6 佟金, 吴娜. 臭蜣螂唇基表面轮廓曲面数学模型建立及分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 113~116.
Tong Jin, Wu Na. Mathematical models and analysis of profiles of the clypeus surface of Dung Beetle Coprisochus Motschulsky [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 113~116. (in Chinese)
- 7 Nevo E. Mosaic evolution of subterranean mammals: regression, progression and global convergence[M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- 8 李世武, 佟金, 张书军, 等. 逆向工程技术与工程仿生[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 109~112.
Li Shiwu, Tong Jin, Zhang Shujun, et al. Reverse engineering and engineering bionics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 109~112. (in Chinese)
- 9 徐涛. 数值计算方法[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002.

(上接第 192 页)

参 考 文 献

- 1 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 83~85. (in Chinese)
- 2 刘国海, 李康吉. 基于 PDA 的 GPS 定位精度提高方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(5): 448~452.
Liu Guohai, Li Kangji. Improving GPS positioning accuracy based on PDA[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(5): 448~452. (in Chinese)
- 3 何勇, 葛晓锋, 俞海红, 等. 农用 GPS 测试精度分析及提高精度方法的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 168~171.
He Yong, Ge Xiaofeng, Yu Haihong, et al. Analyses of measurement precision of GPS for agricultural purposes and method for improving precision[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 168~171. (in Chinese)
- 4 朱虹, 关永, 田健仲, 等. 单点 GPS 定位误差建模研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(6): 206~208.
Zhu Hong, Guan Yong, Tian Jianzhong, et al. Study on single-stand GPS positioning error modeling[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(6): 206~208. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
Zhang Zhigang. Automatic guidance system based on DGPS for rice transplanter[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 7 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 113~116. (in Chinese)