

基于 Kalman 滤波农用车辆导航定位方法^{*}

籍颖^{1,2} 刘兆祥¹ 刘刚¹ 张漫¹ 周建军³

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 因 RTD-GPS 定位精度不能满足农田导航作业的需要, 研究了一种提高农用车辆自动导航定位精度的方法。建立天线补偿模型, 对 GPS 天线晃动引起的误差进行了补偿; 建立基于 Kalman 滤波模型, 融合多传感器信息; 使用自主开发的基于 VRS 的 GPS 接收机, 作为 RTD-GPS。将 RTD-GPS、电子罗盘以及速度传感器获得信息进行 Kalman 滤波, 其结果和高精度 GPS 数据进行了比较。实验证明, 直线跟踪中, 平均偏差由 1.601 9 m 减小到 0.597 m; 曲线跟踪中, 平均偏差由 1.208 5 m 减小到 0.486 1 m。

关键词: 车辆导航 定位 Kalman 滤波 信息融合

中图分类号: S220.1 **文献标识码:** A

Positions Research of Vehicle Navigation System Based on Kalman Filter

Ji Ying^{1,2} Liu Zhaoxiang¹ Liu Gang¹ Zhan Man¹ Zhou Jianjun³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Information and Science & Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China
3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

Since the positioning accuracy of low accuracy GPS can not meet the requirements of agricultural production, a new navigation method is studied to improve the position accuracy. The compensate model is built to compensate for the libration caused by the antenna. A Kalman filter is developed, and a VRS-based receiver is used as the low accuracy GPS. The Kalman filter is applied to the data collected from the low accuracy GPS, compass and speed sensor. The data set collected from the RTK-GPS is used as a baseline to evaluate the performance of the filter. Experiment results indicated that the mean error was reduced from 1.601 9 m to 0.597 m straight line track, and from 1.208 5 m to 0.486 1 m in curve track.

Key words Vehicle navigation, Position, Kalman filter, Information fusion

引言

农用车辆自动导航技术在减轻驾驶员劳动强度的同时, 能够提高作业精度、避免重耕漏耕、减少重复作业、降低成本、增加经济效益, 已逐渐成为现代农业技术的重要组成部分。因此, 开展农业机械自动导航技术研究具有重要的现实意义^[1]。目前导航技术使用的主要传感器有 GPS、机器视觉、惯性

导航系统、激光、雷达等。由于农田、作物环境的复杂性, 利用单一传感器感知导航信息(车辆位姿)很难满足农用车辆自动导航系统要求的精度和可靠性。为此, 研究人员采用多传感器信息融合技术以提高导航定位精度。RTK-GPS 可以提供高精度的定位信息, 定位误差可达 2 cm, 但价格昂贵。因此, 降低成本、提高精度, 成为研究人员的重要研究内容。国外有研究人员进行低成本导航系统的研

究,Guo^[2]等研究基于低成本的农用导航系统,将 Garmin GPS 17N 和 IUM 信息进行 Kalman 滤波,定位误差由 1.28 m 降到 0.48 m。国内在这方面的研究相对较少。

本文研究一种提高农用车辆导航定位精度的方法。对 GPS 天线晃动产生的误差进行补偿,对 RTD-GPS 数据和电子罗盘、速度传感器数据进行 Kalman 滤波,实现了直线和曲线的导航实验。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备

实验以改装的电瓶车为导航车,导航系统包括主控计算机、操纵控制器、转向驱动机构、前轮偏角测量装置、电子罗盘、姿态传感器和速度传感器。操纵控制器采用 ARM7 微控制器 LPC 2119;转向驱动机构由北京和利时电机技术有限公司的减速器和步进电动机组成;前轮偏角测量装置采用 WYT-AT-1 型角度传感器;电子罗盘采用北京星网宇达科技开发公司的 XWLP3300 三维固态电子罗盘;姿态传感器采用 MTi-28A33G35 以及 π W10Li 型速度传感器。由车载蓄电池提供电源。使用两种精度的 GPS 设备:一种是高精度 RTK-GPS,选用美国 Trimble 公司的 AgGPS332+MS750;另一种低精度 GPS,选用自主开发的基于 VRS 的 GPS 接收机作

为 RTD-GPS。基于 VRS 技术的 GPS 接收机由单片机、AC12 GPS 模块、GSM 模块等组成,采用 VRS 差分后定位精度达到 1.25 m(95%)^[3]。

1.2 实验方法

实验中,将高精度 RTK-GPS 和 RTD-GPS 天线同时安装在导航车顶部,两天线中心距 20 cm。将 RTD-GPS 和电子罗盘采集的数据进行融合,为导航车提供位置信息。以高精度 RTK-GPS 数据作为参考,RTD-GPS 融合后的数据与之进行比较。

2 模型的建立

2.1 天线位置补偿模型

实际农田应用中,由于田间环境复杂,农用车辆在田间行走时,道路颠簸较大,致使固定在农用机械上的 GPS 的天线有较大晃动,从而使测得的 GPS 数据误差增加、定位精度下降。通过大量实验得出,天线杆长 42 cm、横滚角 15°时,有 10.5 cm 的偏差。因此,需要通过补偿来降低天线倾斜对定位精度的影响,以减少定位误差。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} - E^{-1}(\phi \quad \theta_p \quad \theta_r) \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$E^{-1}(\phi \quad \theta_p \quad \theta_r) = E(-\phi \quad -\theta_p \quad -\theta_r) = \begin{bmatrix} \cos\theta_r \cos\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \sin\phi & \cos\theta_p \sin\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \sin\phi + \sin\theta_r \cos\phi \\ -\cos\theta_r \sin\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \cos\phi & \cos\theta_p \cos\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \cos\phi - \sin\theta_r \sin\phi \\ -\sin\theta_r \cos\theta_p & \sin\theta_p & \cos\theta_r \cos\theta_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 x, y, z ——准确的天线位置

X_a, Y_a, Z_a ——测得的天线位置

θ_r ——横滚角 θ_p ——俯仰角

ϕ ——航向角

a, b, h ——天线倾斜角在 3 个方向的投影距
天线中心的距离

使用姿态传感器获得横滚角、俯仰角和航向角等信息,通过这些信息和 GPS 测得的天线位置信息可以计算出天线的准确位置,从而对其进行补偿。

2.2 导航车运动学模型

导航车长 278 cm、宽 114 cm、轴距 131 cm^[4]。在不考虑轮胎与地面侧向滑动的前提下,将四轮车简化为如图 1 所示二轮车模型进行运动学分析。

从图 1 中可以得出

$$\begin{cases} v_x = v \cos\theta \\ v_y = v \sin\theta \\ v_q = v / \cos\alpha \end{cases} \quad (3)$$

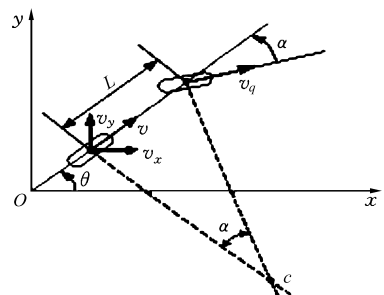


图 1 二轮车运动学模型

Fig. 1 Kinematics model of two-wheel vehicle

式中 θ ——导航车航向角, rad

α ——导航车前轮转向角, rad

v ——导航车纵向行驶速度, m/s

v_x ——导航车沿 x 方向速度分量, m/s

v_y ——导航车沿 y 方向速度分量, m/s

v_q ——导航车前轮速度, m/s

L ——导航车轴距, m

导航车角速度为

$$\omega = (v_q \sin \alpha) / L = \dot{\theta} \quad (4)$$

将式(3)中的 v_q 代入式(4),即可求解到二轮车的运动学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = (v \tan \alpha) / L \end{cases}$$

2.3 Kalman 滤波模型

通过多传感器信息融合技术可以获得环境信息特征较为准确的描述信息^[5],提高结论的可信度,增加容错能力。目前在导航系统中使用最多的是 Kalman 滤波方法。Kalman 滤波利用递推方法估计导航系统的各种状态,并通过估计的状态值去校正系统^[5]。本模型是基于航位推算的方法,建立线性离散的 Kalman 滤波模型。

航位推算的递推公式为

$$x_k = x_{k-1} + vT \cos \theta_{k-1} \quad (5)$$

$$y_k = y_{k-1} + vT \sin \theta_{k-1} \quad (6)$$

系统状态方程和观测方程为

$$\mathbf{X}_k = \boldsymbol{\varphi}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \boldsymbol{\gamma}_k \quad (8)$$

式中 \mathbf{X}_k —— k 时刻 $n \times 1$ 维过程向量

$\boldsymbol{\varphi}_k$ —— $n \times n$ 维状态转移矩阵

\mathbf{w}_k —— $n \times 1$ 过程噪声,其协方差是 \mathbf{Q}_k

\mathbf{Z}_k —— k 时刻 $m \times 1$ 维的测量向量

\mathbf{H}_k —— $m \times n$ 的测量连接矩阵

$\boldsymbol{\gamma}_k$ —— $m \times 1$ 测量噪声,其协方差为 \mathbf{R}_k

假设 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 为零均值高斯白噪声且互不相关,状态空间向量为

$$\mathbf{X}_k = [x_k \quad y_k \quad v_k \quad \theta_k]^T$$

其中, x_k 、 y_k 是 RTD-GPS 的数据在 WGS-84 坐标系下高斯投影平面 x 向和 y 向坐标, v_k 为导航车纵向行驶速度。 θ_k 为导航车纵向在 WGS-84 高斯投影平面坐标下的角度分量,设定横轴正向为零度,逆时针方向为正^[6]。根据运动学模型和航位推算公式,状态转移矩阵为

$$\boldsymbol{\varphi}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T \cos \theta_k & 0 \\ 0 & 1 & T \sin \theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & T \tan \phi_k / L & 1 \end{bmatrix}$$

其中, T 为采样时间, ϕ_k 是转向轮的转向偏角(转向轮以导航车纵向方向为基准线,偏左为正,偏右为负)。电子罗盘采集的角度 θ_k 提供给导航车,可对状态转移矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_k$ 进行实时更新。

将采集到 RTK-GPS 的位置信息作为观测向量, $\mathbf{Z}_k = [x \quad y]^T$,其中 x 、 y 是高精度 GPS 输出的位置坐标;测量矩阵 $\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为常数矩阵。将线性离散 Kalman 滤波器的递归差分方程构成预测方程

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_k \hat{\mathbf{X}}_k \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \boldsymbol{\varphi}_k \mathbf{P}_k \boldsymbol{\varphi}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (10)$$

以下构成校正方程,滤波方程为

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k^-) \quad (11)$$

增益方程为

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (12)$$

滤波误差方差方程为

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (13)$$

在 Kalman 滤波中, \mathbf{Q}_k 、 \mathbf{R}_k 和 \mathbf{P}_k 初始值的选取对融合效果有很大影响^[7],并且它们之间有一定的关系:观测方程噪声协方差 \mathbf{R}_k 越小,残余的增益 \mathbf{K}_k 越大;先验估计误差协方差 \mathbf{P}_k 越小,残余的增益 \mathbf{K}_k 越小。经过反复实验,设定 \mathbf{Q}_k 、 \mathbf{R}_k 和 \mathbf{P}_k 的初始值,其中

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} 2250 & 0 \\ 0 & 2250 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} 2500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

3 实验结果和分析

为了验证 RTD-GPS 和电子罗盘、速度传感器融合后的定位精度的变化,在中国农业大学运动场分别进行直线和曲线的导航实验。

3.1 直线跟踪

导航车沿操场跑道直线行驶,速度为 1 m/s。多次实验中,任取其中一组数据进行分析,直线导航定位效果如图 2 所示。图中 * 线是高精度 GPS 采集的数据,即参考标准;+ 线是低精度 GPS 采集到的数据; Δ 线是使用 Kalman 滤波后的数据。可以看出,低精度 GPS 的相对精度较高,和参考标准始终有一致的偏移。通过融合前后偏差分析,可以看出融合后偏差都有明显降低,如图 3 所示。

从表 1 数据分析可以看出,融合后定位精度显

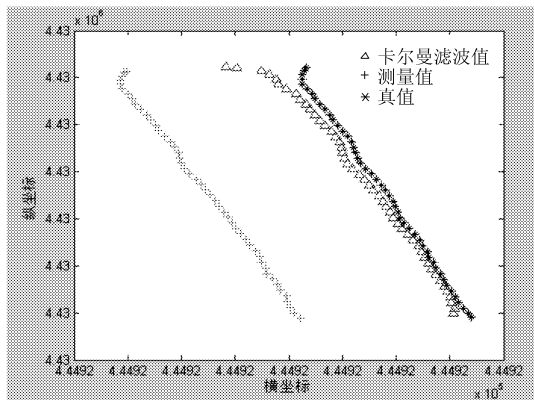


图2 直线定位效果图

Fig.2 Straight-line position

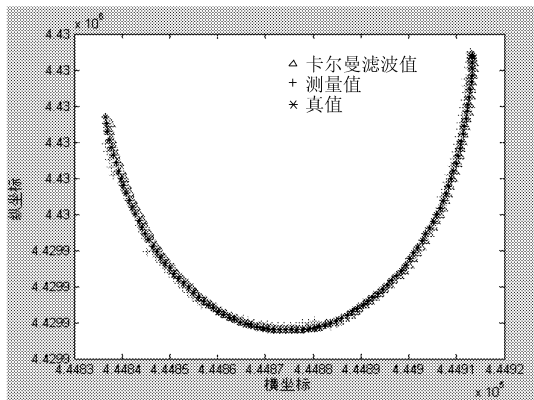


图4 曲线定位效果图

Fig.4 Curve position

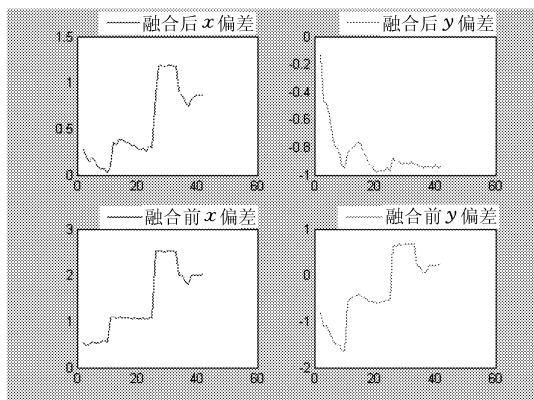


图3 直线融合前、后偏差图

Fig.3 Deviation of straight line pre-fusion and fusion

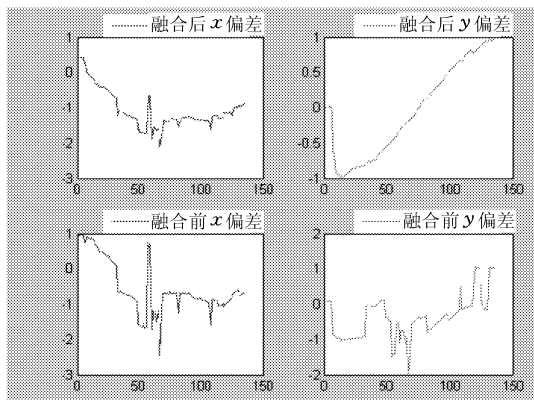


图5 曲线融合前、后偏差图

Fig.5 Deviation of curve pre-fusion and fusion

表1 直线偏差数据

Tab.1 Deviation of straight-line data

组别		融合前	融合后
第1组	均值/m	1.434 9	0.558 1
	方差	0.259 8	0.158 7
第2组	均值/m	1.768 9	0.635 9
	方差	0.112 0	0.016 7

表2 曲线偏差数据

Tab.2 Deviation of curve data

组别		融合前	融合后
第1组	均值/m	1.185 0	0.514 4
	方差	0.422 1	0.361 0
第2组	均值/m	1.231 9	0.457 8
	方差	0.539 1	0.290 6

著提高,平均提高 62.55%,即使用融合算法后,定位精度在 0.6 m 左右。

提高,平均提高 59.72%。

3.2 曲线跟踪

导航车沿操场弯道部分进行曲线跟踪。进行了多组实验,其行驶速度为 1 m/s。图 4 为曲线导航定位效果图,图中 * 线是高精度 GPS 采集的数据,即参考标准;+ 线是低精度 GPS 采集到的数据;Δ 线是使用 Kalman 滤波后的数据效果。图 5 是融合前后偏差图,可以看出,融合后偏差有显著降低。从表 2 曲线数据分析可以看出,融合后定位精度明显

4 结束语

建立了天线位置补偿模型,并对天线晃动引起的误差进行了补偿,为在田间导航提供了理论基础。基于 Kalman 滤波模型进行了多组直线和曲线导航实验。将电子罗盘测得的航向角和速度传感器测得的速度等多传感器信息进行 Kalman 滤波,获得精度更高的定位信息。实验表明,Kalman 滤波模型能够有效提高低精度 GPS 导航定位精度。

参考文献

1 宋正河,吕安涛,陈文良,等.拖拉机自动驾驶系统的研究[J].拖拉机与农用运输车,2005(3):1~5
 Song Zhenhe,Lü Antao,Chen Wenliang, et al. On tractor autonomous driving system[J]. Tractor & Farm Transporter, 2005(3):1~5. (in Chinese)

- 2 Guo Linsong, He Yong, Zhang Qin, et al. Real-time tractor position estimation system using a Kalman filter [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 96~101.
 - 3 张漫, 何月芳, 李民赞, 等. 基于 VRS 技术的 GPS 接收系统设计与实现 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 97~99.
Zhang Man, He Yuefang, Li Minzan, et al. Design and realization of GPS receiver based on VRS [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 97~99. (in Chinese)
 - 4 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 151~156.
Zhou Jianjun, Zhan Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151~156. (in Chinese)
 - 5 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): 113~117.
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 113~117. (in Chinese)
 - 6 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统的研究 [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 Han S, Zhang Q, Noh H. Kalman filtering of DGPS position for a parallel tracking application [J]. ASAE, 2002, 45(3): 553~559.
 - 8 曹倩, 王库, 杨永辉, 等. 基于 TMS320DM642 的农业机器人视觉导航路径检测 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 171~175.
Cao Qian, Wang Ku, Yang Yonghui, et al. Identifying the navigation route based on TMS320DM642 for agriculture visual robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 171~175. (in Chinese)
-

(上接第 27 页)

- 13 王荣本, 李琳辉, 金立生, 等. 基于双目视觉的智能车辆障碍物探测技术研究 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2 158~2 164.
Wang Rongben, Li Linhui, Jin Lisheng, et al. Study on binocular vision based obstacle detection technology for intelligent vehicle [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2 158~2 164. (in Chinese)
- 14 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1 330~1 334.
- 15 Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91~110.
- 16 Marius Muja, Lowe D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration [C] // International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09), 2009.
- 17 丁幼春, 王书茂, 陈度. 基于图像旋转投影的导航路径检测算法 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 155~160.
Ding Youchun, Wang Shumao, Chen Du. Navigation line detection arithmetic based on image rotation and projection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 155~160. (in Chinese)