

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.002

基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法

张闻宇¹ 王进² 张智刚¹ 何杰¹ 胡炼¹ 罗锡文¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 雷沃重工股份有限公司, 潍坊 261206)

摘要: 针对农机自动导航作业过程中存在的 BDS 信号失锁导致系统突然失控的问题, 提出了一种适用于轮式农机的基于自校准变结构 Kalman 滤波器的农机导航 BDS 失锁续航方法。依据 4 自由度农机运动学模型, 设计了 BDS/INS 信息融合 Kalman 滤波器; 进行 INS 导航定位误差 uncertainty 分析, 并设计了基于自回归模型的航向校准方法、INS 传感器角速率测量零偏差实时校准方法, 结合上述方法设计了自校准变结构滤波器, 进行位姿信息处理, 结合导航跟踪控制方法实现失锁续航功能。根据分米级精度要求, 进行了机器人直线、矩形路径失锁续航试验和农机田间直线续航试验。机器人续航试验结果表明: 行驶速度为 1 m/s 时, 与运用未校准滤波器的续航系统相比, 该方法实际平均横向偏差减小 34%, 横向偏差达到 20 cm 时机器人在路径上的平均行驶距离提高 80%。农机田间续航试验结果表明: 行驶速度为 1 m/s 时, 在实际偏差小于 20 cm 的条件下, 农机在路径上的行驶平均距离达到 16.65 m。

关键词: 农机导航; BDS 失锁续航; BDS/INS 信息融合; Kalman 滤波器; 自校准变结构

中图分类号: TP273; V249.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0018-10

OSID:



Self-calibrating Variable Structure Kalman Filter for Tractor Navigation during BDS Outages

ZHANG Wenyu¹ WANG Jin² ZHANG Zhigang¹ HE Jie¹ HU Lian¹ LUO Xiwen¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. LOVOL Heavy Industry Co., Ltd., Weifang 261206, China)

Abstract: BDS outages and leads to steering failure is an acknowledged challenge when the agricultural machine is automatically navigating. Steering failure will lead to increased labor intensity and loss of agricultural materials. A kind of self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages was presented. A Kalman filter was designed to integrate BDS and INS information for improving positioning quality. The filter was real-time calibrated by a calibration method of initial heading based on auto regressive model and a calibration method of angular rate zero offset online, which could process BDS/INS information and combined navigation tracking control method, thus implementing the continuous navigation function. The method was tested for decimeter accuracy in both robotic vehicle navigation system and tractor in-field to follow paths with lines and rectangles during BDS outages. In the robotic vehicle test, the speed of vehicle was set 1.0 m/s, the performance was compared with that of the variable structure Kalman method without self-calibrating. The results showed that the self-calibrating variable structure Kalman method reduced the actual lateral deviation and BDS between INS positioning distance during BDS outages by 34% and 44%, respectively. The average driving distance was increased by 80% when the lateral deviation reached 20 cm, and then reduced. In the tractor in-field test, the speed of vehicle was set 1.0 m/s, the average driving distance reached 16.65 m when the lateral deviation reached 20 cm. This method had guiding value for the emergency endurance processing of BDS outages in the process of cotton planting automatic navigation.

Key words: tractor navigation; BDS outages; information integration of BDS and INS; Kalman filter; self-calibrating variable structure

收稿日期: 2019-11-16 修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700404)和广东省重点领域研发计划项目(2019B020224001)

作者简介: 张闻宇(1985—),男,博士后,主要从事精准农业和农机自动导航研究,E-mail: 617505084@qq.com

通信作者: 罗锡文(1945—),男,中国工程院院士,教授,主要从事农业机械化、农业电气化与自动化研究,E-mail: xwluo@scau.edu.cn

0 引言

针对旱地农机的导航系统^[1-4]、针对水田农机的导航系统^[5-9]和针对农业机械的导航系统^[10-11],大多以定位系统稳定可靠为设计前提,但是实际作业中存在定位数据不可靠现象,由于差分信号的无线通信不稳定、树木引起的多路径效应和高压线干扰等原因,导致北斗全球定位系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)差分解失锁,系统丢失固定解类,定位误差增大。该现象易导致系统突然失控,对导航作业影响较大,例如,棉花播种铺膜作业时的失控将导致切膜现象,需要揭膜、揭滴灌带和重播,费时、费力、费料。因此,研究农业机械自动驾驶系统 BDS 失锁解决方法具有实际意义。

BDS 失锁问题存在于汽车、飞机和导弹等多个领域,国内外研究者对其进行了相关研究。曹娟娟等^[12]提出一种基于径向基(Radial basis function, RBF)神经网络预测的 MEMS-SINS 误差反馈校正方法,在 4 个 50 s 以内的全球定位系统(Global positioning system, GPS)人为失锁过程中,该方法导航结果与参考系统比较,平均位置误差为 3.8 m,平均速度误差为 0.6 m/s,平均姿态误差为 0.5°。谭红力^[13]利用神经网络标定和补偿陀螺仪误差,结合 Kalman 滤波器设计了惯导快速传递对准算法,5 次跑车试验结果表明,误差由 40 m 下降到 10 m。鲍泳林等^[14]针对飞行条件下惯性导航系统(Inertial navigation system, INS)/GPS 组合导航系统在 GPS 失锁时解算精度下降甚至发散的问题,采用神经网络辅助组合导航算法,飞行试验数据仿真表明,能够在一定程度上抑制解算发散。SHEN 等^[15]针对导航中 GPS 信号中断问题提出了基于径向基函数多层感知机的容积卡尔曼滤波,信号中断 500 s,推算均方误差保持在 23.11 m 以内。刘庆元等^[16]针对组合导航中载体处于恶劣环境下,或者载体处于大机动运动情况下导致的 GPS 失锁问题,提出了一种 GPS/INS 组合导航系统,通过模拟试验表明,经纬度与速度精度均提高了 65% 左右。BROWN 等^[17]研究的组合 GPS/微机电系统(Micro electro mechanical system, MEMS)惯性导航组件应用于无人地面车辆,失锁后 20 s 内误差超过 10 m。

上述研究对农机导航 BDS 失锁问题有一定的借鉴价值,但这些研究对精度的要求为米级,与农机农艺要求不匹配。农机导航系统具有高精度、较低的运动速度和有限缓冲距离需求等特点,上述研究无法直接应用于农业机械导航系统中。

本文根据农机农艺特点,分析 INS 传感器误差对失锁状态导航定位精度的影响规律,研究适应农机农艺要求的基于自校准变结构 Kalman 滤波器的农机导航 BDS 失锁续航方法,该方法能够实现常态与失锁态无缝切换、在有限时间内维持一定的直线跟踪精度(以棉花播种为例,实际偏差小于 20 cm 将不会出现切膜现象),同时提示驾驶员,有足够的缓冲时间和距离进行停车处理,不影响重新获得固定解后继续进行自动驾驶作业。

1 4 自由度农机运动学模型

融合 BDS 和 INS 的系统信息是克服 BDS 系统短时失锁问题的可行方案之一。信息融合需要构建农机简化的运动学模型来表示不同维度信息间的物理关系,依据文献[1]描述的关于横滚俯仰对定位精度的影响原理,设计了 4 自由度农机运动学模型,该模型包含 4 个自由度,分别是前进、转向、横滚和俯仰,农业机械 4 自由度运动学模型如图 1 所示。

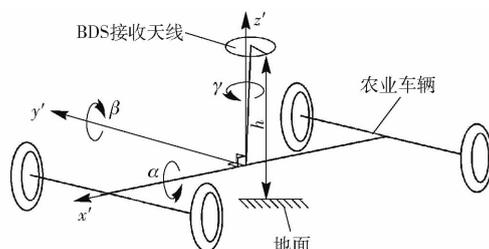


图 1 4 自由度农机简化运动学模型

Fig. 1 Four degrees of freedom simplified kinematics model of agricultural machinery

$x'y'z'$ 是农机车身坐标系,该坐标系随车身移动, x' 方向与航向一致, $x'y'$ 平面为水平面, h 为接收天线到底面的垂直距离(m), α 、 β 和 γ 分别是横滚角、俯仰角和偏航角(rad)。

在前进和转向两个自由度上采用简化二轮车模型^[4]。为将横滚、俯仰自由度上的卫星天线漂移统一到二维平面上来,依据 4 自由度运动学模型对横滚、俯仰引起的定位漂移进行定义。将三维的 BDS 天线定位投影到车身坐标的二维平面($x'y'$),并转换到全局坐标系(XY)中,用于消除横滚、俯仰导致的等效定位误差干扰^[1]。投影和转换的几何关系如图 2 所示。

XYZ 为全局坐标系,该坐标系不随车身移动,其中 XY 平面与 $x'y'$ 平面平行, p_x 为 BDS 的天线坐标在局部坐标系 x' 轴投影, p_y 为 BDS 的天线坐标在局部坐标系 y' 轴投影, θ 为全局坐标系航向角(rad)。

由于农机行驶时 α 和 β 均较小,所以将 $\sin\alpha$ 和 $\sin\beta$ 用 α 和 β 进行等效替换,获得横滚俯仰引起的定位投影相对位置漂移微分方程

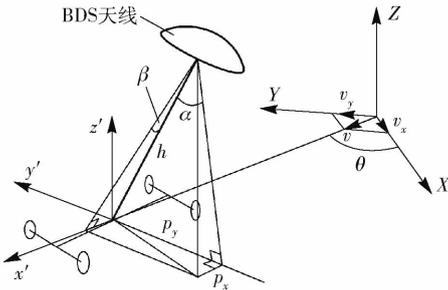


图2 卫星天线平面投影与转换几何关系图

Fig.2 Geometry of plane projection and transformation for satellite antenna

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'' \\ \dot{y}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \sin \theta + \dot{\beta} \cos \theta \\ -\dot{\alpha} \cos \theta + \dot{\beta} \sin \theta \end{bmatrix} h \quad (1)$$

式中 x'' ——全局坐标系横滚俯仰引起的定位相对位置 X 轴投影

y'' ——全局坐标系横滚俯仰引起的定位相对位置 Y 轴投影

2 自校准变结构 Kalman 滤波器设计

2.1 基础 Kalman 滤波器设计

Kalman 滤波器是 BDS/INS 数据融合的常用方法^[18-19]。针对 BDS 失锁、固定解丢失定位误差增大导致的 BDS 定位数据失效的问题,基于 4 自由度运动学模型设计了一种变参数 Kalman 滤波器,以同时适应正常状态下的数据融合功能和失锁状态下的 INS 定位功能。

首先依据简化二轮车模型和横滚、俯仰相对位置漂移模型(式(1))构建状态估计方程和观测方程^[20-21]

$$\mathbf{x}_{kal} = \mathbf{A}_{kal} \mathbf{x}_{kal}^- + \mathbf{B}_{kal} \mathbf{u}_{kal}^- + \mathbf{w}_{kal}^- \quad (2)$$

$$\mathbf{z}_{kal} = \mathbf{H}_{kal} \mathbf{x}_{kal} + \mathbf{v}_{kal} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \mathbf{x}_{kal} = [x \quad y \quad \theta \quad v \quad \alpha \quad \beta]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{kal} = [a_{x'} \quad a_{y'} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\alpha} \quad \dot{\beta}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_{kal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t \cos \theta & h \sin \theta & h \cos \theta \\ 0 & 1 & 0 & t \sin \theta & -h \cos \theta & h \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_{kal} = \begin{bmatrix} 0.5t \sin \theta & 0.5t \cos \theta & 0 & h \sin \theta & h \cos \theta \\ -0.5t \cos \theta & -0.5t \sin \theta & 0 & -h \cos \theta & h \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} t \quad (7)$$

式中 \mathbf{x}_{kal} ——滤波器状态量

\mathbf{u}_{kal} ——滤波器状态输入量

\mathbf{z}_{kal} ——状态观测变量

\mathbf{w}_{kal} ——过程激励噪声

\mathbf{A}_{kal} ——系统状态转移矩阵

\mathbf{B}_{kal} ——系统控制量矩阵

\mathbf{v}_{kal} ——观测噪声 t ——离散时间间隔, s

\mathbf{H}_{kal} ——观测增益矩阵,为 6 阶单位矩阵

v ——农机行驶速度, m/s

$a_{x'}$ ——车辆坐标系 x' 轴加速度, m^2/s

$a_{y'}$ ——车辆坐标系 y' 轴加速度, m^2/s

基于该状态观测方程和 Kalman 滤波器设计方法,设计定位信息融合滤波器。其中 x, y, θ 和 v 由 BDS 定位系统获得, $\alpha, \beta, \dot{\theta}, \dot{\alpha}$ 和 $\dot{\beta}$ 由姿态传感器系统 (Attitude and heading reference system, AHRS) 获得。关键参数过程激励噪声协方差矩阵 \mathbf{Q} 和观测噪声协方差矩阵 \mathbf{R} 会影响 BDS 定位系统数据和 AHRS 系统数据的权重,在正常使用时根据试验整定的结果设定两个参数为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.002 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (9)$$

当 BDS 系统失锁时,减少 BDS 系统数据的权重,依赖 AHRS 系统数据进行定位滤波观测,等待 BDS 系统恢复锁定固定解时切换回式(8)、(9)。失锁状态 BDS 信息噪声增大时减小 BDS 系统观测值权重,使滤波器系统对卫星定位的依赖降低,定位误差由厘米级提高到米级,定位方差提高 100 ~ 200 倍,所以对 BDS 观测相关系数进行调整,将 BDS 观测权重降低至极低的水平,设定失锁状态观测噪声协方差矩阵 \mathbf{R}' 为

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2 INS 导航系统定位误差不确定度分析

BDS 系统失锁后需依赖 INS 系统实现有限直线导航行驶,这里有限直线行驶是指在直线作业过程中出现发散性跟踪偏差,但是该偏差在作业要求的接受范围内。由于 INS 导航系统受零位漂移和噪声等因素的影响,运用惯性导航系统方程推算位置存在累计误差。可以通过不确定度(理论正负最大误差)来表示最大误差最大累计程度。从而分析零位漂移和噪声对农机在 GPS 失锁的状态下保持有限直线行驶的时间和定位误差影响。惯性导航系统方程见文献[22]。

根据惯性导航系统方程可知角速率测量误差以累计方式传递到定位误差上,角速率测量误差 w 为

$$w(t) = b + e(t) \quad (11)$$

式中 b ——零偏,主要受温度和环境变化影响变化缓慢, $(^\circ)/s$

$e(t)$ ——带宽固定的高频白噪声, $(^\circ)/s$

再根据惯性导航系统仿真模型^[22]分析噪声不确定度传递过程。设定行驶速度 v 为常规播种作业速度 1.0 m/s ,车辆初始位置为 $(0,0)$,初始航向为 0 rad ,设角速率测量零偏 b 不确定度为 $\pm 0.03(^\circ)/s$,角速率白噪声 $e(t)$ 幅值为 $\pm 0.05(^\circ)/s$,通过仿真模型计算获得 100 s 内的系统累计误差的不确定度如图 3 所示。 20 s 时定位不确定度为 $\pm 0.1 \text{ m}$, 100 s 时定位不确定度为 $\pm 2.6 \text{ m}$ 。

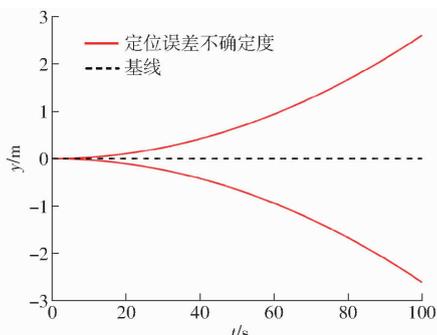


图 3 INS 导航不确定度仿真结果

Fig. 3 Simulation analysis of INS navigation uncertainty

为分析 100 s 时不确定度与转速标定残差不确定度之间的关系,设定行驶速度 v 为 1.0 m/s ,车辆初始位置为 $(0,0)$,初始航向为 0 rad ,白噪声幅值为 $\pm 0.05(^\circ)/s$,分别设定角速率测量零偏 b 的不确定度为 $\pm 0.01(^\circ)/s$ 、 $\pm 0.02(^\circ)/s$ 、 $\pm 0.03(^\circ)/s$ 、 $\pm 0.04(^\circ)/s$ 和 $\pm 0.05(^\circ)/s$ 。计算获得 100 s 时定位不确定度分别为 $\pm 0.9 \text{ m}$ 、 $\pm 1.7 \text{ m}$ 、 $\pm 2.6 \text{ m}$ 、 $\pm 3.5 \text{ m}$ 和 $\pm 4.3 \text{ m}$,运用 Matlab 中 `corrcoef` 函数进行相关性分析,相关系数为 0.99 ,显著相关。以相同方法分析角速率白噪声 $e(t)$,幅值分别为 0.03 、 0.05 、 0.07 、 0.09 、 $0.11(^\circ)/s$,零偏 b 的不确定度设

为 $\pm 0.03(^\circ)/s$ 。于 100 s 时,定位不确定度分别为 $\pm 2.606 \text{ m}$ 、 $\pm 2.633 \text{ m}$ 、 $\pm 2.656 \text{ m}$ 、 $\pm 2.614 \text{ m}$ 和 $\pm 2.580 \text{ m}$,相关系数为 -0.3925 ,相关性不显著。

模型推导和仿真试验结果表明:零偏 b 对推算定位不确定度的影响远大于高频噪声 $e(t)$ 。在导航系统校准时着重校准 INS 传感器零偏 b ,将会有效提高农机 INS 续航定位精度。

2.3 INS 导航参数自校准方法

由于基于 INS 的导航系统跟踪误差受初始状态信息和零偏 b 的影响较大,所以针对这两类参数的校准将有助于控制 INS 导航误差。

2.3.1 基于自回归模型的航向校准方法

INS 导航需要定义初始航向,根据 BDS 报文可以实时获得信号解类,失锁时为非固定解类。以信号解类为失锁标志,在失锁的同时进行初始航向 θ_0 校准,校准方法为 10 阶自回归(Autoregressive, AR)模型,模型定义为

$$X_t = a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_{10} X_{t-10} + \varepsilon_t \quad (12)$$

式中 a ——AR 模型参数

X ——历史 BDS 航向数据序列

ε_t ——白噪声

本文采用伯格(Burg)算法,依据已知时间序列递推计算 AR 模型参数,该算法以前项预测误差 e_f 和后项预测误差 e_b 均方误差之和最小为目标求取反射系数 K_m ,再利用反射系数 K_m 递推求解 10 阶参数 a_n ,获得 AR 模型具体形式。计算方法参见文献[23]。

2.3.2 INS 传感器角速率测量零偏实时校准方法

BDS 数据为正常固定解时,利用定位信息通过时间窗进行 INS 传感器零速校准和基于一次线性回归最小二乘模型(Least squares matching, LSM)的零偏动态校准。

设计实时滑动时间窗口为 30 s ,按队列方式定义,新数据载入则删除 30 s 前的数据,先进先出。时间窗口内 BDS 的定位数据最远点之间的距离 L_{\max} 小于 0.1 m 且速度 v 最大值小于 0.1 m/s ,则判定当前窗口内导航系统为零速,由于该值远大于农机最小转弯半径不可能旋转,根据式(11)可得 MEMES 传感器零偏为

$$b = \frac{\sum_{k=0}^m b(k)}{m} \quad (13)$$

其中

$$b(k) = \frac{\sum_{t=1}^n (\dot{\gamma}_t - e(t))}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n \dot{\gamma}_t}{n} - \frac{\sum_{t=1}^n e(t)}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n \dot{\gamma}_t}{n}$$

式中 n ——时间窗内数据集数量

$\dot{\gamma}_t$ —— t 时刻农机坐标系偏航角速度, rad/s

k ——零偏数组编号

农机导航系统正常工作时处于直线跟踪状态, 该状态的特点为行驶目标航向不变。依据该特点设计动态校准方法, 由于时间窗口内轨迹近似直线, 航向在有限范围内围绕目标航向小范围波动, 累计航向变化近似为零, 所以同样可以采用式(13)进行转向率传感器的零偏 b 估计。

判断车辆是否处于直线行驶状态的标准为跟踪轨迹的 LSM 拟合, 采用最小二乘法获得, 前期非道路试验表明: 直线跟踪状态下 30 s 时间窗口的高斯投影坐标一次最小二乘拟合 R^2 检验结果均大于 0.995, 所以判断标准定为 R^2 检验结果大于 0.995 时导航系统处于直线行驶状态, 采用式(13)进行零偏 b 实时校准, 流程如图 4 所示。

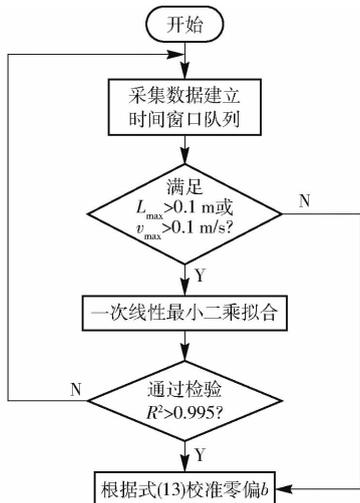


图 4 零偏实时校准流程图

Fig. 4 Zero offset real-time calibration flow chart

由于农机导航系统曲线行驶状态的一般时间较短, 卫星天线获取的航向存在误差, 用于零偏 b 校准影响较大, 所以非直线状态不进行校准处理。

2.4 自校准变结构位姿信息处理方法

针对正常状态和 BDS 失锁状态的位姿处理无缝切换的需求, 设计了一种自校准变结构位姿信息处理方法。该方法包括变结构参数、INS 导航参数校准模块和信息融合 Kalman 滤波器。INS 导航参数校准模块采用的方法如第 4 节所述。其中 Kalman 滤波器设计原理如 2.1 节所述。该方法输入为解类、BDS 和 INS 信号, 输出为融合滤波后的位姿信息, 具体输入输出信息参数为式(4)、(5)。

其中解类信号为变结构判断标准, 来源是 BDS 实时 GPGGA 报文, 固定解(第 4 类)为卫星定位正常状态, 差分定位误差为 $\pm(10 + 1 \times 10^{-6} D)$ mm, D 为基站到移动站的距离, 其他解类均定义为失锁状

态, 定位误差从米级到亚米级不等, 无法用于农业高精度导航控制。当解类为固定解时采用正常状态参数(式(8)、(9)), 否则采用失锁状态观测噪声协方差矩阵 R' (式(10))。解类同时控制校准模块, 正常状态时, 为校准零偏和初始航向模块采集历史数据, 在失锁同时计算初始航向用于 INS 定位处理, 同时启动零偏补偿。总体结构如图 5。

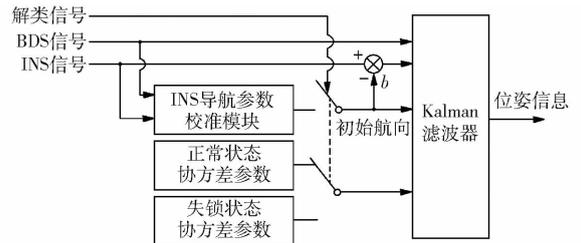


图 5 自校准变结构位姿信息处理方法结构图

Fig. 5 Structure of self-calibrating variable structure Kalman filtering method

3 BDS 失锁续航机器人平台试验

3.1 BDS 失锁续航导航控制器

为构建机器人失锁续航系统, 基于 BDS 失锁变结构位姿信息处理方法设计了 BDS 失锁续航导航控制器, 该控制器能够依据解类信息无缝切换 BDS/INS 组合导航和 INS 导航模式, 运用自校准变结构位姿信息处理模型进行无缝位姿信息处理, 与目标路径相差获得横向偏差和航向偏差, 输入到基于深度强化学习网络的导航控制模型中计算出目标行驶曲率^[24]。模型输入为 BDS、INS 和目标路径信息, 输出为目标曲率。控制器结构如图 6。

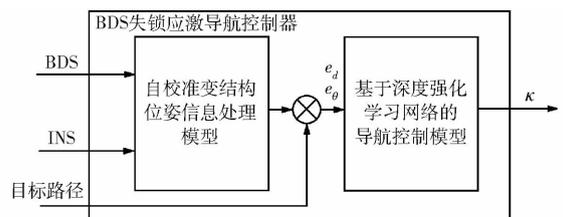


图 6 BDS 失锁续航导航控制器结构图

Fig. 6 Structure of navigation controller for BDS outages

3.2 机器人导航试验系统

为研究 BDS 失锁续航方法的性能, 搭建轮式差速机器人平台。该平台硬件部分包括轮式差速机器人(Husky Robotics Inc.)和卫星定位系统(Swift company); 定位信息获取频率为 10 Hz, 水平定位精度 $\pm(10 + 1 \times 10^{-6} D)$ mm, AHRS 惯性传感器(MicroStrain 公司 3DM-GX5-25 型), 陀螺仪非线性度 0.02%, 横滚/俯仰精度 $\pm 0.25^\circ$, 采样频率 30 Hz; 控制终端为 NVIDIA 公司的 Jetson TX1 嵌入式计算机和触控显示屏。软件部分为基于 BDS 失锁续航导航控制模型的机器人导航控制软件系统,

该软件系统运用 QT5.0 编写加载于 Ubuntu 16.04 LTS 系统中。RKT - GNSS(BDS)定位信息和 AHRS (INS)惯性航姿信息通过串口输入到导航控制系统。该系统将计算获得目标曲率和设定行驶速度,通过 ROS 机器人操作系统传输给 Husky 机器人,机器人自动执行目标控制信号实现自动导航行驶。系统结构如图 7,试验平台实物如图 8。

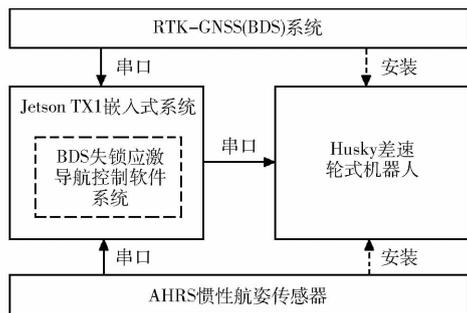


图 7 机器人失锁续航导航试验系统结构图

Fig. 7 Structure of robot BDS outages navigation system



图 8 机器人失锁续航导航试验系统

Fig. 8 Robot BDS outages navigation system

- 1. 导航控制终端 2. 电控转向执行机构 3. 角度传感器 RTK - GNSS 定位系统 4. 显示屏

3.3 BDS 失锁状态续航性能对比试验

为研究 BDS 信号失锁状态下,控制器的无缝处理能力,在机器人系统直线跟踪时人为软件屏蔽 BDS 定位点信息的输入和给出失锁信号。只记录 BDS 定位数据而不作为导航控制输入。使用 INS 递推轨迹作为导航控制器输入进行路径跟踪控制。同时记录 BDS 数据获得实际轨迹,分析失锁续航导航系统性能。

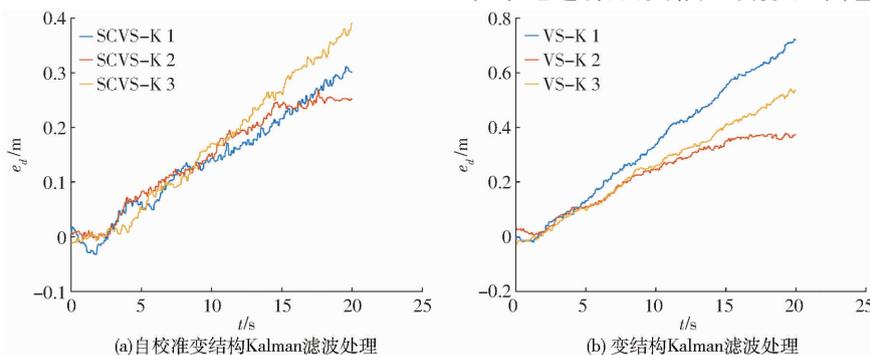


图 9 BDS 失锁状态续航性能对比试验实际横向偏差

Fig. 9 Actual lateral deviation of comparison experiment during BDS outages

试验设计:规划直线路径,使用机器人导航系统在草地进行直线导航跟踪,行驶速度设置为 1 m/s。当系统进入直线跟踪的稳定状态时,切换系统输入为 INS 定位数据和非 4 类解信号。分别采用基于自校准变结构 (Self-calibrating variable structure) Kalman 滤波位姿信息处理方法 (SCVS - K) 的 BDS 失锁续航导航控制器和未校准的变结构 (Variable structure) Kalman 滤波 (VS - K) 进行信息处理,失锁续航控制的时间为 20 s,每组控制器进行 3 次重复试验。

试验指标:实际平均横向偏差 \bar{e}_d ,INS 定位与 BDS 定位平均差值 \bar{d}_{I-B} ,实际偏差达到 10 cm 时机器人在路径上的行驶距离 $L_{10\text{cm}}$,实际偏差达到 20 cm 时机器人在路径上的行驶距离 $L_{20\text{cm}}$,续航处理 20 s 时实际偏差 $e_{20\text{s}}$ 。通过以上指标衡量控制质量。

试验分析:3 组 SCVS - K 方法失锁续航过程的实际横向偏差 e_d 如图 9a 所示,3 组 VS - K 方法失锁续航过程的实际横向偏差如图 9b 所示,1、2、3 分别为试验序号。对比试验结果如表 1,SCVS - K 处理方法较 VS - K 处理方法的 \bar{e}_d 、 \bar{d}_{I-B} 和 $e_{20\text{s}}$ 均值分别减小 34%、44% 和 43%, $L_{10\text{cm}}$ 和 $L_{20\text{cm}}$ 均值提高 66% 和 80%。对比试验结果表明,与传统方法相比 SCVS - K 方法实际跟踪偏差缩小,有效续航距离增大,整体续航质量提高。

3.4 机器人矩形路径 (含有转弯环节) BDS 失锁状态续航试验

转弯跟踪时航向变化率较大,INS 测量误差增大,INS 定位航位推算误差累计较快,为测试矩形路径 (含有转弯环节) 导航失锁续航控制器性能,采用与 3.3 节直线续航试验相同的处理方法获取 BDS 数据获得实际轨迹与 INS 续航轨迹数据,分析失锁续航导航系统性能。

试验设计:规划矩形路径,使用机器人导航系统在草地进行矩形路径导航跟踪,直线行驶部分速度

表1 BDS失锁状态续航性能对比试验结果

Tab.1 Results of comparison experiment during BDS outages

m

试验序号	SCVS-K					VS-K				
	\bar{e}_d	\bar{d}_{I-B}	$L_{10\text{ cm}}$	$L_{20\text{ cm}}$	$e_{20\text{ s}}$	\bar{e}_d	\bar{d}_{I-B}	$L_{10\text{ cm}}$	$L_{20\text{ cm}}$	$e_{20\text{ s}}$
1	0.16	0.18	6.50	13.03	0.30	0.38	0.41	3.85	5.87	0.72
2	0.17	0.18	5.79	11.97	0.25	0.07	0.25	3.68	7.03	0.37
3	0.30	0.31	7.15	11.05	0.39	0.52	0.51	4.19	7.13	0.54
平均	0.21	0.22	6.48	12.02	0.31	0.32	0.39	3.91	6.68	0.54

设置为1 m/s,转弯上线部分速度设置为0.5 m/s。当系统进入直线跟踪的稳定状态时,切换系统输入为INS定位续航状态数据和非4类解信号。采用基于SCVS-K方法的BDS失锁续航导航控制器进行信息处理,失锁续航控制对矩形路径进行续航,进行3次重复试验。

试验指标:全程实际平均横向误差 \bar{e}_d (包含转弯上线过程),INS航向与BDS航向平均差值 $\bar{\theta}_{I-B}$,INS定位与BDS定位平均差值 \bar{d}_{I-B} ,平均速度 \bar{v} 。通过以上指标研究控制质量。

试验分析:SCVS-K方法矩形路径跟踪失锁续航试验1的INS与BDS定位轨迹和实际横向偏差 e_d 如图10所示,图中start,loss和end分别为轨迹记录起始点、定位数据切换点和轨迹记录结束点,INS和BDS分别为INS、BDS轨迹。INS定位与BDS定位差值 d_{I-B} 如图11所示;BDS定位实际横向误差 e_d 如图12所示。试验结果如表2,SCVS-K处理方法 \bar{e}_d 、 $\bar{\theta}_{I-B}$ 、 \bar{d}_{I-B} 和 \bar{v} 分别为0.35 m、1.07°、0.77 m和0.85 m/s。试验结果表明矩形路径跟踪失锁续航在有限时间内不会发散,具有一定的实用价值。图中误差 e_d 突变的尖峰为目标直线切换点,同时开始转弯上线导航控制,结合图11和图12可以分析出在转弯过程中的INS推算定位误差较直线跟踪增大,由于INS系统存在累计误差,影响到后续矩形路径导航跟踪。针对转弯行驶的INS定位精度提高,有待进一步深入研究解决。

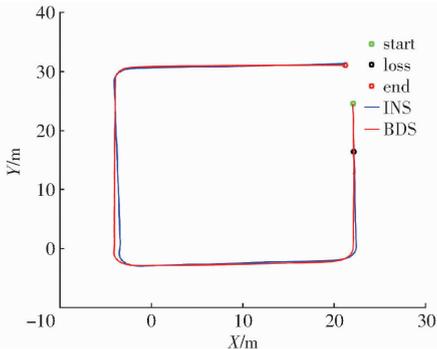


图10 机器人矩形路径BDS失锁续航试验1轨迹

Fig.10 Rectangular path navigation during BDS outages experiment one

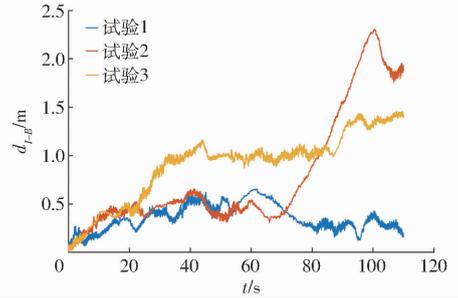


图11 续航试验BDS定位与INS定位差值变化曲线

Fig.11 BDS and INS positioning distance of rectangular path navigation during BDS outages experiment

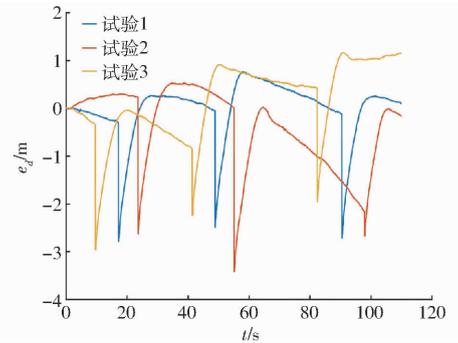


图12 续航试验实际横向误差变化曲线

Fig.12 Actual lateral deviation of rectangular path navigation during BDS outages experiment

表2 机器人矩形路径BDS失锁续航试验结果

Tab.2 Experimental results of rectangular path navigation during BDS outages experiment

试验序号	\bar{e}_d/m	$\bar{\theta}_{I-B}/(^{\circ})$	\bar{d}_{I-B}/m	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.06	0.70	0.33	0.85
2	0.58	1.78	1.04	0.85
3	0.40	0.73	0.95	0.84
平均	0.35	1.07	0.77	0.85

4 农机导航系统BDS失锁续航田间试验

4.1 农机导航系统

为验证BDS失锁续航控制方法田间工作效果,将BDS失锁续航控制方法移植到雷沃重工AGCS-I自动导航系统中,搭载于雷沃重工M-1104型拖拉机,在雷沃阿波斯智慧农业示范基地的试验田进行田间试验。RTK-GNSS定位模块(司南公司的K728),定位信息获取频率为10 Hz,水平定位精度

$\pm (10 + 1 \times 10^{-6} D) \text{ mm}$; AHRS 惯性传感器 (XSENS 公司 MTi-30 AHRS), 陀螺仪非线性度 0.01%, 横滚/俯仰精度 $\pm 0.3^\circ$, 采样频率 25 Hz; 前轮转角传感器为 BEI-9902120CW 型, 非线性度为 $\pm 2\%$, A/D 采样精度为 12 位; 转向执行机构为力士乐公司的 HT801053; 控制终端为 AGCS-I 控制器和触控显示屏。运用 Metrowerks Code Warrior for ARM Developer Suite v1.2 进行软件开发。系统结构如图 13 所示, 试验平台实物如图 14 所示。

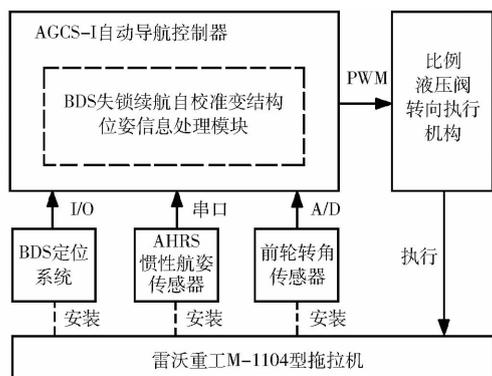


图 13 农机导航系统试验平台结构图

Fig. 13 Structure of agricultural machinery navigation system



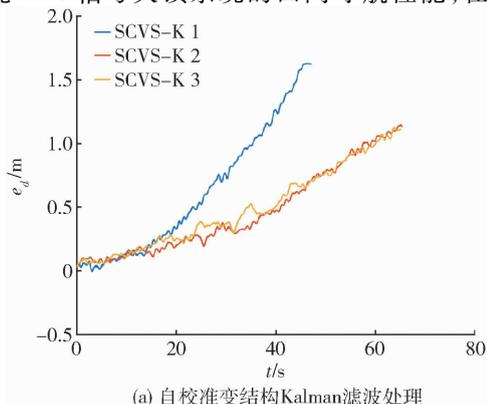
图 14 农机导航系统田间试验

Fig. 14 Agricultural machinery navigation system

1. 导航控制终端
2. 电控转向执行机构
3. 角度传感器
4. RTK-GNSS 定位系统

4.2 BDS 失锁状态田间续航试验

为研究 BDS 信号失锁系统的田间导航性能,在



(a) 自校准变结构Kalman滤波处理

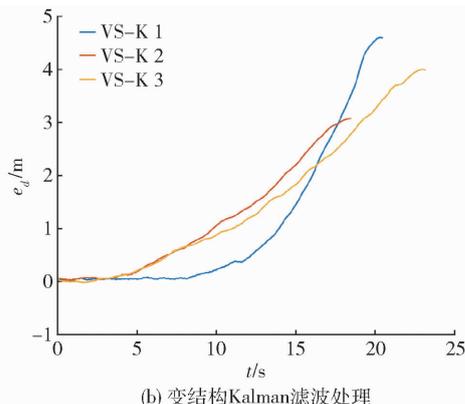
农机导航系统直线跟踪时人为软件屏蔽 BDS 定位点信息的输入和给出失锁信号。采用与机器人试验相同方法,记录 BDS 数据和 INS 推算数据获得实际轨迹和递推轨迹,分析失锁续航导航系统性能。

试验设计:规划直线路径,使用机器人导航系统在试验田地进行直线导航跟踪,直线行驶速度设置为 1 m/s。当系统进入直线跟踪的稳定状态时,切换系统输入为 INS 定位续航状态数据和非 4 类解信号。采用基于 SCVS-K 方法和未校准的 VS-K 方法分别对直线路径进行 BDS 失锁续航处理,分别进行 3 次重复试验。

试验指标:平均速度 \bar{v} , 实际定位平均横向误差 \bar{e}_d , 实际偏差达到 10 cm 时农机在路径上的行驶距离 $L_{10 \text{ cm}}$, 实际偏差达到 20 cm 时农机在路径上的行驶距离 $L_{20 \text{ cm}}$, 实际偏差达到 50 cm 时农机在路径上的行驶距离 $L_{50 \text{ cm}}$ 。

试验分析:农机田间试验中,3 组 SCVS-K 方法失锁续航过程的实际横向偏差 e_d 如图 15a 所示,3 组 VS-K 方法失锁续航过程的实际横向偏差如图 15b 所示。对比试验结果如表 3, SCVS-K 处理方法平均 $L_{20 \text{ cm}}$ 达到 16.65 m, 满足棉花播种失锁应激处理的要求。

文献[12]中采用基于神经网络预测的误差反馈矫正方法,在车辆行驶速度为 16 m/s 时,失锁时间 25 s 内位置误差为 3.5 m。文献[15]中采用基于立方 Kalman 滤波器和神经网络的失锁定位方法,速度为 1.48 m/s 时,500 s 内定位误差为 23.11 m。在文献[17]的研究中使用 MEMS 惯性传感器在 GPS 失锁时进行续航,20 s 内误差超过 10 m。上述研究没有对分米级精度失锁续航特性进行细分研究。文献[25]采用扩展 Kalman 滤波器进行拖拉机失锁续航,横向误差达到 20 cm 时,行驶距离小于 10 m。使用本文方法续航,横向误差达到 20 cm 时,行驶距离大于 15 m。



(b) 变结构Kalman滤波处理

图 15 BDS 失锁状态田间续航试验实际横向偏差变化曲线

Fig. 15 Actual lateral deviation of in-field experiment during BDS outages

表3 BDS失锁状态田间续航试验结果

Tab.3 Results of in-field experiment during BDS outages

试验序号	SCVS-K					VS-K				
	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	\bar{e}_d/m	$L_{10\text{cm}}/\text{m}$	$L_{20\text{cm}}/\text{m}$	$L_{50\text{cm}}/\text{m}$	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	\bar{e}_d/m	$L_{10\text{cm}}/\text{m}$	$L_{20\text{cm}}/\text{m}$	$L_{50\text{cm}}/\text{m}$
1	1.04	0.61	8.77	15.08	24.46	0.98	1.03	8.43	9.50	11.83
2	1.05	0.46	2.65	19.04	43.10	1.03	1.12	4.01	5.40	7.40
3	1.05	0.48	6.94	15.83	36.32	1.04	1.47	4.09	5.26	7.42
平均	1.05	0.52	6.12	16.65	34.63	1.02	1.21	5.51	6.72	8.88

5 结论

(1) 针对农机导航作业过程中因存在 BDS 信号失锁而导致突然失控的问题,提出了一种基于自校准变结构 Kalman 滤波的农机导航 BDS 失锁续航方法,使操作人员有足够的缓冲距离进行进一步处理,减轻由于突然失控导致的农资损失和额外劳动强度。该方法为棉花播种导航作业过程中 BDS 失锁应急续航处理提供了研究基础。

(2) 为提高 BDS 失锁续航质量,进行 INS 导航误差不确定度分析,设计了基于自回归模型(AR)的航向校准方法和 INS 传感器角速率测量零偏实时校准方法。依据上述分析和设计,构建了基于 4 自由度运动学车辆模型的变结构自校准 Kalman 滤波器,用于导航位姿信息无缝续航处理。机器人对比试验表明:运用自校准 Kalman 滤波器的导航系统比运用未校准滤波器的导航系统,其 \bar{e}_d 、 \bar{d}_{I-B} 和 e_{20s} 均值

分别减小了 34%、44% 和 43%, $L_{10\text{cm}}$ 和 $L_{20\text{cm}}$ 均值分别提高了 66% 和 80%。

(3) 根据农机导航系统低速、高精度的特点,进行了 BDS 失锁续航方法的田间试验,试验结果表明:在实际偏差小于 20 cm 的条件下,农机在路径上的行驶平均距离达到 16.65 m,预留反应距离能够满足农机导航作业需求。

(4) BDS 失锁试验结果表明,INS 导航航向角速率测量零偏对直线路径失锁续航影响较大,进一步提高零偏的校准效率和精度能够提高直线路径失锁续航质量和可靠性。

(5) 机器人矩形路径 BDS 失锁续航试验表明,系统在转弯环节续航误差迅速增加,并影响后续续航效果,这主要是测量误差、采样率和系统延时等因素导致,进一步研究导航航向和航向变化率的测量、采样、预测和插值方法,能够提高非直线续航质量。

参 考 文 献

- [1] 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):6-12.
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 6-12. (in Chinese)
- [2] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7):12-20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7):12-20. (in Chinese)
- [3] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1):205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):205-210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130139&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039. (in Chinese)
- [4] 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1):29-36.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005. (in Chinese)
- [5] BEVLY D M, GERDES J C, PARKINSON B W. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002, 124(4):659-667.
- [6] 何杰,朱金光,张智刚,等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3):17-24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):17-24. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190302&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.002.

(in Chinese)

- [7] 段贤强,陶建峰,覃程锦,等. 变速条件下农业机械路径跟踪稳定控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):18-24,32. DUAN Xianqiang, TAO Jianfeng, QIN Chengjin, et al. Agricultural machinery path tracking stability control method under variable speed conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):18-24,32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190902&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.002. (in Chinese)
- [8] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15-21. LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1):15-21. (in Chinese)
- [9] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报,2019,35(4):11-19. WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4):11-19. (in Chinese)
- [10] 姚立健, SANTOSHK K P, 杨自栋, 等. 基于超宽带无线定位的农业设施内移动平台路径跟踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2):17-24. YAO Lijian, SANTOSHK K P, YANG Zidong, et al. Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2):17-24. (in Chinese)
- [11] 陈黎卿,许鸣,柏仁贵,等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):25-32. CHEN Liqing, XU Ming, BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):25-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)
- [12] 曹娟娟,房建成,盛蔚,等. GPS 失锁时基于神经网络预测的 MEMS-SINS 误差反馈校正方法研究[J]. 宇航学报,2009,30(6):2231-2236,2264. CAO Juanjuan, FANG Jiancheng, SHENG Wei, et al. Adaptive neural network prediction feedback for MEMS-SINS during GPS outage[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6):2231-2236,2264. (in Chinese)
- [13] 谭红力. 航弹族低成本捷联惯导系统关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007. TAN Hongli. Research on key technology of low-cost strapdown inertial navigation systems for aerial guided munition[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [14] 鲍泳林,李皓,袁鸣,等. 基于神经网络的 INS/GPS 组合导航误差补偿研究[J]. 弹箭与制导学报,2019,39(2):55-59. BAO Yonglin, LI Hao, YUAN Ming, et al. Research on error compensation for INS/GPS integrated navigation systems based on neural networks[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(2):55-59. (in Chinese)
- [15] SHEN C, ZHANG Y, TANG J, et al. Dual-optimization for a MEMS-INS/GPS system during GPS outages based on the cubature Kalman filter and neural networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133(106222):1-14.
- [16] 刘庆元,郝立良,黄书捷,等. 神经网络辅助的 GPS/MEMS-INS 组合导航算法[J]. 测绘科学技术学报,2014,31(4):336-341. LIU Qingyuan, HAO Liliang, HUANG Shujie, et al. A new study of neural network aided GPS/MEMS-INS integrated navigation[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(4):336-341. (in Chinese)
- [17] BROWN A K, LU Y. Performance test results of an integrated GPS/MEMS inertial navigation package[C]//Proceedings of ION GNSS, 2004. Long Beach, California, 2004:1-8.
- [18] 靳标,李建行,朱德宽,等. 基于自适应有限冲激响应-卡尔曼滤波算法的 GPS/INS 导航[J]. 农业工程学报,2019,35(3):75-81. JIN Biao, LI Jianxing, ZHU Dekuan, et al. GPS/INS navigation based on adaptive finite impulse response-Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3):75-81. (in Chinese)
- [19] 洪剑青,赵德安,孙月平,等. 基于卡尔曼滤波离散滑模控制的明轮船直线跟踪[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):33-39. HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Linear trajectory tracking of paddle boat using discrete sliding mode control based on Kalman filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):33-39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190904&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.004. (in Chinese)
- [20] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1):35-45.
- [21] WELCH G, BISHOP G. An introduction to the Kalman filter[M]. Chapel Hill:University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [22] 以光衢. 惯性导航原理[M]. 北京:航空工业出版社,1987.
- [23] PALIWAL K. Performance of the weighted burg methods of AR spectral estimation for pitch-synchronous analysis of voiced speech[J]. Speech Communication, 1984, 3(3):221-231.
- [24] ZHANG W Y, GAI J Y, ZHANG Z G, et al. Double-DQN based path smoothing and tracking control method for robotic vehicle navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166(104985):1-11.
- [25] STENTZ A, DIMA C, WELLINGTON C, et al. A system for semi-autonomous tractor operations[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1):87-104.