DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.02.004

基于GNSS/INS的拖拉机导向轮偏转角度测量系统设计与试验

冯爽[1, 2], 张兆国[1, 2*], 孙连烛[1, 2], 王法安[1, 2], 解开婷[1, 2, 3]

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院,云南昆明,650500;
2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心,云南昆明,650500;
3. 昆明理工大学机电工程学院,云南昆明,650500)

摘要:传统的角度传感器在拖拉机导向轮偏转角度的测量中存在准确度不足、安装调试复杂等问题,这些问题制约了拖拉机在自动导航作业时的高精度、高稳定性的需求。鉴此,本文旨在构建并验证一种新型系统,该系统基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS)的技术原理,能够实现对拖拉机导向轮动态角度的实时解算。首先,对GNSS/INS融合原理进行了深入的分析,并设计了相应的GNSS/INS数据测量台架试验,以获取角度传感器的测量值。随后,采用卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)、扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)和无迹卡尔曼滤波(untraced Kalman filter, UKF)三种滤波算法对角度测量值的滤波处理,以超调量、响应时间和稳定性等指标进行评价,结果表明UKF在本系统中表现最优。其次,针对不同工况(沥青路面和农田),进行了拖拉机在自动导航下转向和直线性能测试。在转向性能测试中,进行了1°、5°和15°的不同角度的固定测量,结果显示在1°时两种环境的响应时间最小,但均产生了最大超调量,同时随着角度的增加,系统对稳态误差的降低有明显作用。直线自动导航性能测试中,沥青路面和农田的最大横向偏差分别为17.51 mm和18.52 mm,系统误差分别为10.45 mm(2σ)和21.07 mm(2σ)。通过对比两种工况,沥青路面的各项性能指标上均优于农田环境,但两种工况在精度、响应时间和平稳性上均满足自动导航系统需求,可应用于拖拉机的自动导航作业中。

关键词:GNSS/INS;拖拉机;导向轮偏转角度;卡尔曼滤波;自动导航
中图分类号:S232.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2024)02-0033-09

冯爽, 张兆国, 孙连烛, 王法安, 解开婷. 基于GNSS/INS的拖拉机导向轮偏转角度测量系统设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(2): 33-41
FENG Shuang, ZHANG Zhaoguo, SUN Lianzhu, WANG Fa'an, XIE Kaiting. Research on deflection angle measurement system of tractor guide wheel based on GNSS/INS [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 33-41

0 引言

农业现代化已然成为实现乡村振兴的必要手段,如何充分利用现有土地资源,对粮食供应提质增量,成为我国农业从业者急需解决的难题之一[1]。精准农业能显著提高农业生产效率,提升农产品质量,降低农业生产成本,已然成为解决粮食安全的有效手段[2-3]。精准农业是利用先进技术手段对农田进行精确检测和管理的现代农业方式,在这一过程中,自动驾驶拖拉机已成为精准农业中不可或缺的一部分,其行驶的稳定性和精确性成为的重要发展趋势[4]。通过拖拉机的稳定自动化驾驶,可以实现更精准的农田作业,提高生产效率,降低劳动强度,同时也为农业现代化发展提供了重要支撑和保障[5-6]。

拖拉机自动导航系统是实现拖拉机自动化驾驶的重要手段,其主要依赖绝对定位法和相对定位法,进行实时定位。各自定位方式有各自的特点,但单独应用任意一种定位方式都有其不足之处,目前研究人员将两种或两种以上的定位方式组合,取长补短,并利用最优的融合算法来提高其定位精度、系统稳定性、定位频

收稿日期:2024-02-01 修回日期:2024-03-20
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2002004)
第一作者:冯爽,男,1999年生,云南宣威人,硕士研究生;研究方向为农业机械装备设计。E-mail:1184788382@qq.com
*通信作者:张兆国,男,1966年生,山东单县人,博士,教授;研究方向为农业机械装备设计。E-mail:zzg@kust.edu.cn

率等[4,7]。BENGOCHEA-GUEVARA 等[8]基于 GPS 与摄像头研究了一种小型自主田地检测车辆,在路径规划中充分考虑田地轮廓与作物类型,以最大限度减少了在田间对作物与土壤的影响。KIM 等[9]基于 GNSS 与惯性测量单元(IMU)采用松耦合策略,设计了一种适用于足球运动员可穿戴的电子表现跟踪系统。

李忠利等[10]通过将 GABP 神经网络算法的多传感器信息融合进入导航定位系统,校正拖拉机在田间作业中因地形、土质和转弯引起的定位误差,提高行驶轨迹稳定性。钟银等[11]为提高农机导航精度和可靠性,设计了基于 GNSS 和 INS 的智能农机组合导航系统,该系统利用多种信息源,通过卡尔曼滤波实时校正误差,解算出农机的精准位置、速度和姿态信息。经过试验验证,组合导航系统在静止和直线行驶状态下均表现出明显的优势,定位精度提升显著,为高精度农机自动导航控制提供了技术支持。

在拖拉机自动驾驶过程中,导向轮偏转角的测量精度与稳定性是衡量其准确性与稳定性的重要指标。目前对导向轮偏转角度的测量研究较为深入,其中 NOBORU 等[12]通过测量电机旋转角度来测量导向轮偏转角度。

YANG 等[13]通过在拖拉机装置角度传感器,验证了辅助轮地头转向上中优于传统转向,提升了转向效率。王艳鑫等[14]通过非接触式角度传感器测量磁场方向变化,将磁感应强度转换为电压值,从而测量轮式拖拉机转向角度,何杰等[15]通过 GNSS 天线测量航向和速度,MEMS 陀螺仪测量车身和车轮的合转动速率,进而测量拖拉机前轮转角,结果显示在较低速农业机械导航中表现出与传统连杆式轮角传感器相当的测量性能,可满足实际作业要求。

当前,社会对拖拉机自动导航系统作业质量提出了更高的要求,转向角度测量精度差,GNSS 信号短时间丢失等问题已不能满足自动导航系统长时间精确行驶的实际运行标准。本文提出一种基于 GNSS 与 INS 的拖拉机导向轮偏转角度测量系统,实时测量拖拉机导向轮动态角度。

针对惯性测量单元在运行过程中,随着时间的推移,系统输出的角速率信息会发生迭代,因此,采用卡尔曼及其衍生滤波方法,对 GNSS 和 INS 的输出信号进行处理[18]。同时为解决角度传感器精度低、简化安装调试和 GNSS 短时信息缺失等问题,拟采用基于置信度的方法,本文将 IMU 和 GNSS 的观测数据进行融合,根据信任值赋予不同权重来确定下一时刻的精确角度。

1 装置结构及工作原理

1.1 GNSS/INS 组合导航定位系统组成

目前拖拉机自动导航系统一般采用调整拖拉机导向轮的偏转角度来实现拖拉机以精确的路径行驶[16-17],本文在拖拉机上安装 GNSS 和 INS 组合导航定位系统进而测量车体与导向轮二者偏转角度以实现拖拉机行驶的精确控制。如图 1 所示,首先在整车中点位置垂直于中轴线的两侧分别安装 2 个 GNSS 天线,其次在拖拉机导向轮的转动轴处安装角度传感器,最后,2 个惯性测量单元(IMU)被分别安装在与角度传感器相同位置,以及拖拉机车顶上 2 个 GNSS 天线连线的中点处。



图 1 系统安装示意图

Figure 1 System installation diagram

1. 角度传感器 2. IMU 3. GNSS 天线

1.2　工作原理

在运行过程中，使用双天线进行实时坐标获取，利用GNSS接收机接收车体的方位信息。拖拉机转向轴上的IMU测量出导向轮的偏转角速度，并将其同时间间隔进行积分以获取导向轮的转角，通过拖拉机车顶的IMU对车体的旋转角速度测定，以相同方法求解车体转角。

同时，利用实时固定的GNSS观测数据与当前时刻和下一时刻的惯性导航数据进行迭代运算，以推导和计算下一时刻的车轮的预测偏转角值，并利用卡尔曼滤波器对预测值进行优化处理，最终通过串口发送最佳滤波角度值，从而控制拖拉机按照预定轨迹行驶。

2　系统模型的建立及误差模型

在实际生产作业中，农田环境和沥青路面下少有线性转向的情况出现，同时在进行直线作业时需要测量的转向角度较小，所以本文以此为依据，为了模拟实际工作状态，设计了大角度偏转试验和S型曲线试验。

2.1　大角度偏转试验

在试验中，拖拉机直线行驶一段距离后进行大角度转向，转角规律如式(1)描述，设定向右转向为正方。根据KF，可以直接对试验数据进行滤波处理，但考虑到大角度偏转涉及非线性系统，采用EKF算法，建立非线性系统状态方程式(2)，同时需对非线性系统进行局部线性化处理，以系统状态方程求解Jacobian矩阵如式(3)所示[18-22]。

$$x_1(k)=f_1(k)=\pm 13\sin\left(\frac{\pi}{20}k\right) \tag{1}$$

$$x_1(k+1)=\pm 13\sin\left\{\pm\arcsin\left[\frac{x_1(k)}{13}\right]+\frac{\pi}{20}\right\} \tag{2}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1(k)}=\frac{\cos\left\{\frac{\pi}{20}\pm\arcsin\left[\frac{x_1(k)}{13}\right]\right\}}{\sqrt{1-\left[\frac{x_1(k)}{13}\right]^2}} \tag{3}$$

式中：k——自然数。

另外，UKF无须求解Jacobian矩阵，只需构建系统的状态方程。在本试验中，UFK的状态方程和EKF一致，可用式(2)表示。

2.2　S型曲线试验

S型曲线试验与大角度偏转实验方案一致，其中拖拉机的偏转角度变化遵循式(4)所示规律，通过EKF建立的非线性系统状态方程如式(5)所示，同时局部线性系统状态方程的Jacobian矩阵则按照式(6)的形式给出。

$$x_2(k)=f_2(k)=20\sin\left(\frac{\pi}{6}k\right) \tag{4}$$

$$x_2(k+1)=20\sin\left\{\arcsin\left[\frac{x_2(k)}{20}\right]+\frac{\pi}{6}\right\} \tag{5}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2(k)}=\frac{\cos\left\{\frac{\pi}{6}+\arcsin\left[\frac{x_2(k)}{20}\right]\right\}}{\sqrt{1-\left[\frac{x_2(k)}{20}\right]^2}} \tag{6}$$

2.3　GNSS/INS的转角测量装置误差模型分析与建立

GNSS误差来源包括星历表误差、星钟误差以和信号传递误差。INS惯型测量设备的误差主要来自长期累积引起的漂移误差，并且随角速度变化增加，形成动态误差，其模型可由式(7)表示。

$$\delta K_{gi}=\delta K_{gli}+\delta K_{gbi}+\delta K_{gri}+W_{gi} \tag{7}$$

式中：i——x,y,z；

δK_{gi}——惯性传感器误差模型；

δK_{gli}——惯性传感器刻度误差；

δK_{gbi}——惯性传感器启动误差；

δK_{gri}——惯性传感器慢变漂移；

W_{gi}——白噪声过程。

其中δK_{gri}是一种随实际情况改变的慢变漂移，可由一阶马尔科夫描述，δK_{gwi}和δK_{gri}可用白噪声过程W_{gi}模拟。

针对GNSS采用5 Hz的世界标准时，INS采用精度为0.001 s的北京时间，需利用CAN接口对CAN数据进行延迟1 s的定时转换，确保两者数据之间的同步。

3　仿真及台架实验

3.1　滤波算法仿真实验

如图2所示，依照图1安装方式分别在约翰迪尔904型号拖拉机上安装偏转角度测量系统，将双天线定位系统安装至车顶，同时以R30为固定基站，R60为流动基站测量系统的航向值；将两个BW－INS225型惯性测量系统分别安装至拖拉机转向轴和车体中心处，用来测量导向轮和车体的旋转角速度；并且将AMG－1102型控制电机安装在拖拉机方向盘下方，将实时接收到融合角度输出给控制电机从而控制方向盘转动角度，进而实现拖拉机的自动驾驶。

通过拖拉机试验平台测量导向轮的角度变化值，试验中拖拉机先进行直线行驶，然后进行大角度偏

转,最终将角度传感器测量值使用MATLAB软件进行滤波算法处理,并对比处理结果确定最佳的滤波算法。

大角度右偏和左偏仿真试验结果分别如图3和图4所示,3种滤波曲线均能跟随角度传感器的变化趋势,但随着拖拉机转角增大,KF精度明显下降,EKF精度略高于KF,而UKF精度最高,同时非线性明显的系统中情况也如此。



图2 拖拉机系统安装示意图

Figure 2 Test platform for tractor automatic navigation control system

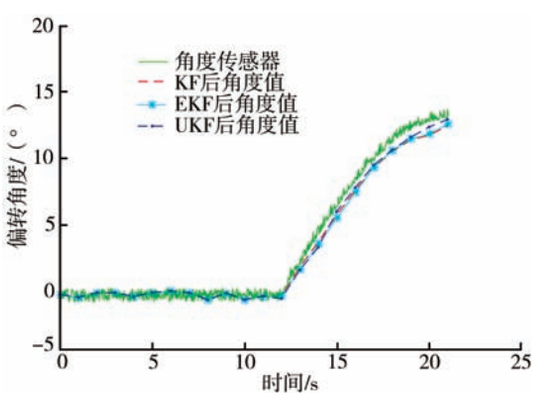


图3 大角度右偏滤波曲线

Figure 3 Large angle right deflection filter curve

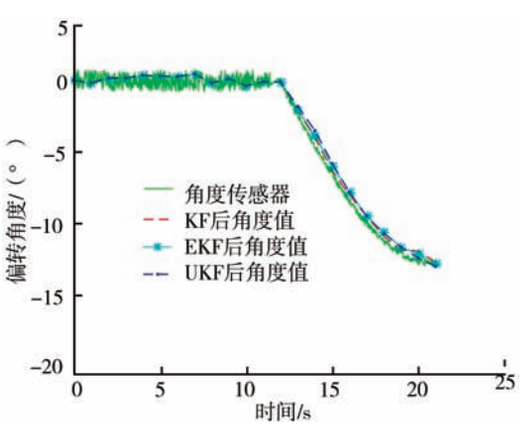


图4 大角度左偏滤波曲线

Figure 4 Large angle left deflection filter curve

在响应时间上,KF相应最快,这是由于EKF与UKF计算量更大,但UKF具有最小的对应时刻曲线相位差。同时从曲线平滑度看,UKF曲线最为平滑,KF与EKF在大角度时均存在较大波动。

S形曲线行驶滤波如图5所示,3种滤波曲线均能及时追踪角度传感器的变化趋势,但UKF在曲线峰值时偏差最小,KF和EKF在角度大幅度变化时精度明显下降。与大角度偏转相同KF曲线响应时间最短。UKF曲线与角度传感器角度曲线拟合度最好。

通过对以上3种仿真试验结果分析发现:UKF精度较高,其与角度传感器测得曲线平均偏差最小;同时UKF在大角度转向时,平滑度为3种曲线中最好的一种;KF与UKF滤波曲线与角度传感器测量曲线相比,变化趋势相同点的时间差较小,其中UKF的时间差更小。

该方法具有精度高、稳定性好、时延快等优点,所以选取UFK滤波作为本文提出的角度测量系统的滤波方式,其可有效解决测量过程中误差积累的问题。

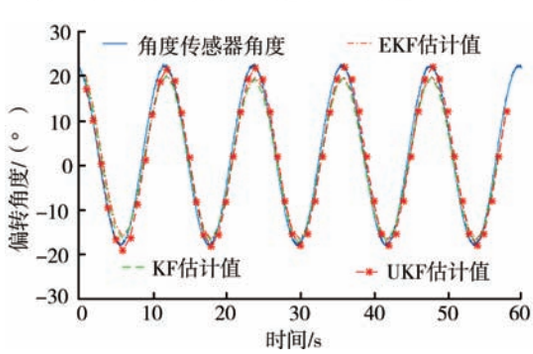


图5 S形曲线滤波试验结果

Figure 5 S-Curve driving filter test results

3.2　基于GNSS/INS的转角测量系统试验

为评估UKF滤波算法在转角测量系统中的实际应用效果，在小汤山国家精准农业研究示范基地进行了转向和直线性能测试实验，分别选择了一条长200 m、宽100 m的农田和沥青路面作为测试场地，将安装好测量系统的约翰迪尔904型号拖拉机，以固定速度(5 km/h)进行了1°、5°和15°三种不同的导向轮偏转角的转向性能测试以及两导航点的直线行驶性能测试。

对GNSS/INS组合转角测量系统的精度、稳定性以及时延进行检验，以评估其是否满足拖拉机在田间精确自主导航的要求。

3.2.1　沥青路面正常作业速度下转向性能测试试验

在沥青路面上分别进行导向轮偏转角度为1°、5°和15°试验的实测角和目标转角如图6～图8所示。试验结果按转向测量性能评定指标评定，评定结果见表1。

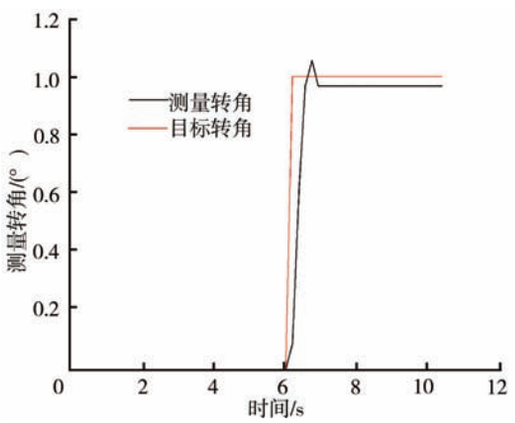


图6　偏转1°测量结果

Figure 6　Measurement result with 1° deflection

由上述试验结果可得，沥青路面环境下系统延迟受偏转角变化影响较小，最大值为0.141 s。

随着偏转角度的增加系统的上升、峰值、调节时间变化较大，但1°时三个测量值的时间均为最短，且其所表征的响应速度，随着角度的增加呈下降趋势但总体仍保持在较高水平。

从平稳性上看，仅1°时存在5.5%的超调量，其余角度并不存在超调量。同时角度的增大，系统的稳态误差有明显的降低趋势，绝对误差最大值为0.167°，而15°的稳态误差仅为0.193%。

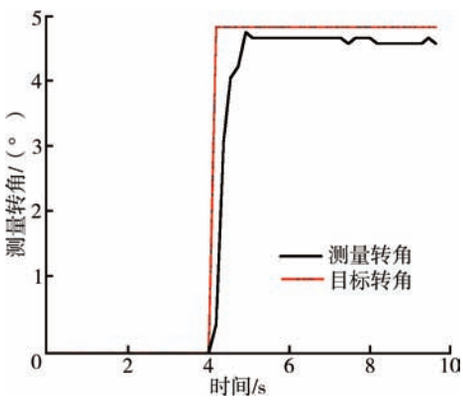


图7　偏转5°测量结果

Figure 7　Measurement result with 5° deflection

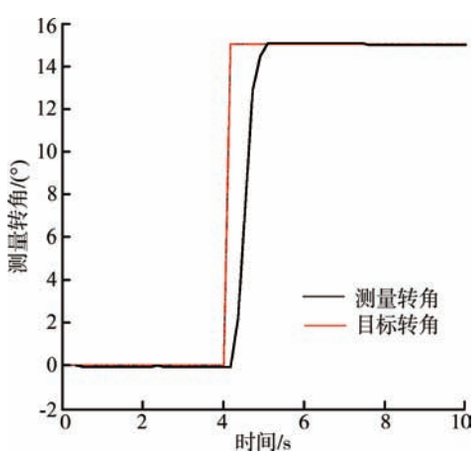


图8　偏转15°测量结果

Figure 8　Measurement result with 15° deflection

表1　沥青路面偏转系统测量结果

Table 1　Measurement results of asphalt pavement deflection system

转角角度/(°)	延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	超调量/%	绝对误差/(°)	稳态误差/%
1	0.128	0.311	0.734	0.906	5.500	0.033	3.3
5	0.112	0.799	0.921	1.093	无超调	0.167	3.340
15	0.141	0.628	0.922	0.922	无超调	0.029	0.193

3.2.2　农田环境正常作业速度下转向性能测试试验

同理，在正常作业速度下，分别设置导向轮偏转角度为1°、5°、15°的农田环境试验，得到农田环境偏转系统测量结果如表2所示，测量结果如图9～图11所示。在农田环境下偏转角度变化对延迟时间和上升时间影响较小，峰值和调节时间在车轮转角为1°时最短，与沥青路面具有相同趋势，虽有下降趋势但总体水平仍然较高。

农田环境下3种转向角均产生了超调量，其中最大超调量在转角为1°时产生为5.4%。此外角度与系统的稳态误差呈负相关，在转角为15°时产生最大绝对误差值为0.235°，此时稳态误差为1.566%。

表 2 农田环境偏转系统测量结果

Table 2 Measurements of environmental deflection systems in agricultural fields

转角角度/(°)	延迟时间/s	上升时间/s	峰值时间/s	调节时间/s	超调量/%	绝对误差/(°)	稳态误差/%
1	0.162	0.450	0.547	0.547	5.400	0.083	8.300
5	0.242	0.432	0.719	1.266	0.002	0.010	0.200
15	0.134	0.526	0.719	1.453	0.780	0.235	1.566

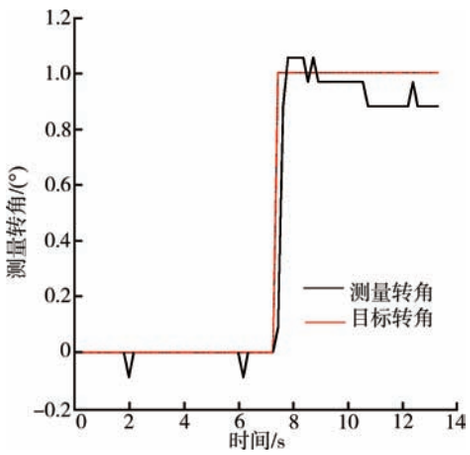


图 9 偏转 1°测量结果

Figure 9 Measurement result with 1° deflection

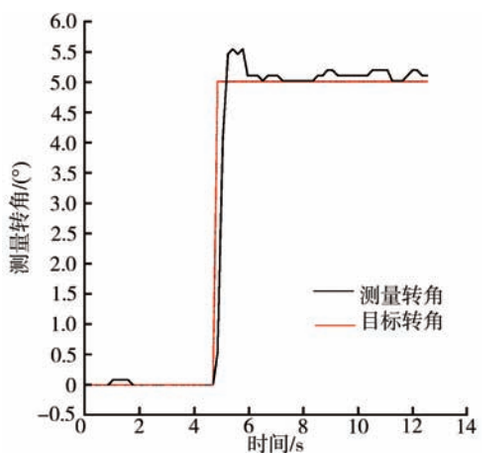


图 10 偏转 5°测量结果

Figure 10 Measurement result with 5° deflection

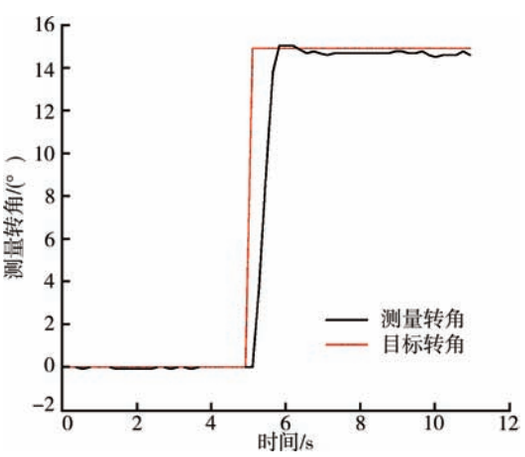


图 11 偏转 15°测量结果

Figure 11 Measurement result with 15° deflection

3.2.3 直线自动导航性能测试试验

通过直线自主导航试验,验证该系统的准确性和稳定性。在测试场地中,分别在农田和沥青路面下各自选取两个导航坐标点,同时将两点导航坐标生成一条直线导航轨,并沿该轨迹以 5 km/h 速度行驶,测量在两坐标点内其与设定轨迹之间的横向偏差。以车体重心位置与设定轨迹的横向偏差和标准差作为导航系统的精度和稳定性评价指标,其结果如图 12~图 13 所示。

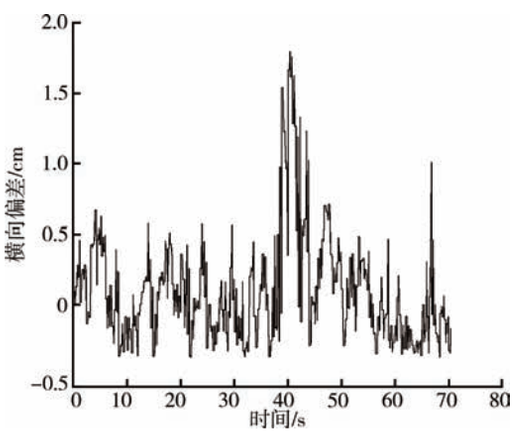


图 12 沥青路面横向偏差图

Figure 12 Transverse deviation diagram for asphalt pavement

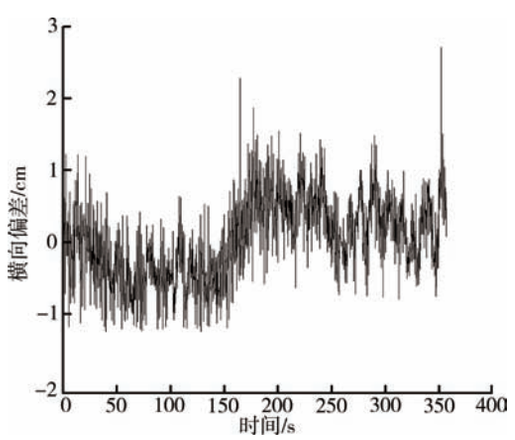


图 13 农田环境横向偏差图

Figure 13 Horizontal deviation map of farmland environment

如表 3 所示,拖拉机在沥青路面环境下直线行驶时,自动导航的横向偏差均值为 5.02 mm,标准差为 8.71 mm,横向偏差最大值为 17.51 mm,且系统误差为 10.45 mm(2σ)。农田环境,横向偏差的均值为

10.87 mm，标准差为12.98 mm，横向偏差最大值为18.52 mm，系统误差为21.07 mm（2σ）。

表3　直线自动导航偏差结果

Table 3　Deviation results for linear autopilot

	横向偏差均值/mm	横向偏差标准差/mm	横向偏差最大值/mm	直线自动导航系统误差/mm
沥青地面	5.02	8.71	17.51	10.45
农田环境	10.87	12.98	18.52	21.07

3.3　结果分析

研究通过对比沥青路面与农田环境的试验结果，无论是在哪种环境下当车轮转角为1°时，系统的响应时间均为最短，同时随着角度增加响应速度都呈下降趋势，但从宏观来看系统都能以较快的速度做出响应。

在沥青路面情况下，除了1°时有5.5%的超调量外，其他角度都没有超调。而在农田环境中，3种转向角均产生了超调量，最大值在1°为5.4%。同时随着角度的增加，系统的稳态误差均有所减小。然而，在农田环境中，15°角度下的稳态误差（1.566%）要高于在沥青路面情况下的稳态误差（0.193%）。此外在直线行驶过程中，农田环境下的各项误差值均高于沥青路面。综上所述，沥青路面的准确性、稳定性等性能均优于农田环境，但农田环境下所表达情况均在实际使用误差范围内。

4　结论

1）针对拖拉机在使用自动导航系统作业时可能面临的短时间GNSS信号丢失和INS误差随时间递增的问题，创新性地提出了一种基于INS为主系统，辅以GNSS为辅助系统的拖拉机导向轮偏转角度测量系统，旨在确保拖拉机在行驶过程中的精确性和稳定性。

2）通过对比拖拉机台架试验中大角度左偏、大角度右偏，以及S形曲线行驶情况下的FK、EFK和UFK滤波曲线，从曲线精度、响应时间、曲线平滑度考量，确定UFK为本系统的最佳滤波算法。

3）转向性能测试试验中，分别在沥青路面和农田环境工况下自动导航性能测试。实验结果表明，在三种角度（1°、5°、15°）的转向性能测试中，角度在两种工况下的增加并未对系统的响应速度产生较大影响。两种工况下最大超调量均出现在仅1°时，同时农田工况下3种角度有不同超调量致使系统的平稳性有所降低。最大偏差出现在转向角15°的农田工况下为0.235°，但系统降低角度增加带来的误差有较为明显的作用。

4）在直线行驶性能测试中，分别在沥青路面和农田环境工况下，横向偏差均值为分别为5.02 mm和10.87 mm，标准差分别为8.71 mm和12.98 mm，最大横向偏差值为17.51 mm和18.52 mm，直线自动导航系统误差分别为10.45 mm（2σ）和21.07 mm（2σ），沥青路面的各项偏差量均小于农田环境。

综上所述，本文研究的基于GNSS/INS的拖拉机导向轮偏转角度测量系统在精度、稳定性和延迟时间上均达到国内目前自动导航系统指标，可以进行精准农业作业。

参　考　文　献

[1] 姚成胜，滕毅，黄琳. 中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J]. 农业工程学报，2015，31(4)：1－10.
YAO Chengsheng，TENG Yi，HUANG Lin，et al. Evaluation index system construction and empirical analysis on food security in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31(4)：1－10.

[2] 郑旭媛，徐志刚. 资源禀赋约束、要素替代与诱致性技术变迁——以中国粮食生产的机械化为例[J]. 经济学(季刊)，2017，16(1)：45－66.
ZHEN Xuyuan，XÜ Zhigang. Endowment restriction，factor substitution and induced technological innovation：A case research on the grain producing mechanization in China [J]. China Economic Quarterly，2017，16(1)：45－66.

[3] 匡远配，易梦丹. 精细农业推进现代农业发展：机理分析和现实依据[J]. 农业现代化研究，2018，39(4)：551－558.
KUANG Yuanpei，YI Mengdan. Precision agriculture promoting the development of modern agriculture：Theoretical mechanism and practical evidence [J]. Research of Agricultural Modernization，2018，39(4)：551－558.

[4] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man，JI Yuhan，LI Shichao，et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18.

[5] 王雷，赖维军. 自动导航拖拉机在精准农业上的运用[J]. 河北农机，2021(8)：27－28.

[6] 白学峰，常江雪，滕兆丽，等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3

(2): 10－21.
BAI Xuefeng, CHANG Jingxue, TENG Zhaoli, et al. Research progress on key technologies of intelligent agricultural tractors in China [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(2): 10－21.

[7] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18－21, 27.
LIU Yanliang, ZHANG Haiping, XU Yantian, et al. Development status and trend of global navigation satellite system [J]. Journal of Navigation Positioning, 2019, 7(1): 18－21, 27.

[8] BENGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUÑOZ J, ANDÚJAR D, et al. Merge fuzzy visual servoing and GPS-based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop-inspection robot [J]. Sensors, 2016, 16: 276.

[9] KIM M, PARK C, YOON J. The design of GNSS/IMU loosely-coupled integration filter for wearable EPTS of football players [J]. Sensors, 2023, 23: 1749.

[10] 李忠利, 刘小锋, 陈修魁, 等. 基于信息融合的拖拉机组合导航定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 382－390, 399.
LI Zhongli, LIU Xiaofeng, CHEN Xiukui, et al. Tractor integrated navigation and positioning system based on data fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(08):382－390, 399.

[11] 钟银, 薛梦琦, 袁洪良. 智能农机GNSS/INS组合导航系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 40－46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 40－46.

[12] YIN X, NOGUCHI N. Development and evaluation of a general-purpose electric off-road robot based on agricultural navigation [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(5): 14－21.

[13] YANG Y, ZHANG G, CHEN Z Z, et al. An independent steering driving system to realize headland turning of unmanned tractors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107278.

[14] 王艳鑫, 李加琪, 王显, 等. 轮式拖拉机转向角测量装置的研制与试验[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 203－211.
WANG Yanxin, LI Jiaqi, WANG Xian, et al. Development and test of a steering angle measuring device for wheeled tractor [J]. Journal of Agricultural University, 2022, 27(1): 203－211.

[15] 何杰, 高维炜, 王辉, 等. 基于GNSS航向微分和MEMS陀螺仪的农机轮角测量方法[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 91－98.
HE Jie, GAO Weiwei, WANG Hui, et al. Wheel steering angle measurement method of agricultural machinery based on GNSS heading differential and MEMS gyroscope [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 91－98.

[16] 陈云, 何艳. 基于GNSS姿态与电机编码器的农机转向角度测量系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 10－17.
CHEN Yun, HE Yan. Development of agricultural machinery steering wheel angle measuring system based on GNSS attitude and motor encoder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(10): 10－17.

[17] 高维炜. 基于GNSS和MEMS陀螺的拖拉机自动导航前轮转向角测量方法研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
Gao Weiwei. Research of steering angle measurement of front wheel based gnss and mems gyroscope used on automatic navigation of tractor [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.

[18] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32－34.
PENG Dingcong. Pseudo-linear Kalman filter in passive target tracking [J]. Software Guide, 2009, 8(11): 32－34.

[19] 宋迎春. 动态定位中的卡尔曼滤波研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
SONG Yingchun. Research on Klaman filter in kinematic positioning [D]. Changsha: Central South University, China, 2008.

[20] 蔡頔. GNSS/INS组合导航数据融合算法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
CAI Di. Research on GNSS/INS integrated navigation data fusion algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023.

[21] 赵强, 范思远, 唐政林. 基于迭代扩展卡尔曼滤波的车辆运动状态估计[J]. 森林工程, 2021, 37(1): 66－72, 79.
ZHAO Qiang, FAN Siyuan, TANG Zhenglin. Vehicle motion state estimation based on iterative extended Kalman filter [J]. Forest Engineering, 2021, 37(1): 66－72, 79.

[22] 孙连烛. 基于GNSS/INS的拖拉机导向轮偏转角度测量系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
SUN Lianzhu. Research on deflection angle measurement system of tractor guide wheel based on GNSS / INS [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

Research on deflection angle measurement system of tractor guide wheel based on GNSS/INS

FENG Shuang[1, 2], ZHANG Zhaoguo[1, 2*], SUN Lianzhu[1, 2], WANG Fa´an[1, 2], XIE Kaiting[1, 2, 3]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*; 2. *Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials in Yunnan Universities, Kunming* 650500, *China*; 3. *Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Traditional angle sensors have problems such as insufficient accuracy and complex installation and debugging when measuring the deflection angle of tractor guide wheels, which hinder the high precision and stability requirements of tractor automatic navigation operations. Therefore, this paper aims to construct and validate a novel system based on the principles of Global Navigation Satellite System (GNSS) and Inertial Navigation System (INS), which is capable of real-time calculation of dynamic angles of the tractor's steering wheel. First, a in-depth analysis of GNSS/INS fusion principles was conducted, and corresponding GNSS/INS data measurement bench tests were designed to obtain measurement values from angle sensors. Subsequently, three filtering algorithms, namely Kalman Filter (KF), Extended Kalman Filter (EKF), and Unscented Kalman Filter (UKF), were employed to filter the angle measurement values, evaluating metrics such as overshoot, response time, and stability, and the results showed that UKF performed best in this system. Second, steering and straight-line performance tests were conducted under different conditions (asphalt road and farmland) for tractor automatic navigation. In the steering performance tests, fixed measurements at different angles of 1°, 5°, and 15° were conducted, and the results showed that the response time of the two environments was the smallest at 1°, but both produced the largest overshoot. At the same time, an increase in angle demonstrated a significant reduction in steady-state error. In the straight-line automatic navigation performance tests, the maximum lateral deviations for asphalt road and farmland were 17.51 mm and 18.52 mm, respectively, with system errors of 10.45 mm (2σ) and 21.07 mm (2σ). A comparison between the two conditions indicated superior performance metrics on asphalt road, yet both conditions met the requirements of precision, response time, and stability for automatic navigation systems, thus suitable for tractor automatic navigation operations.

Keywords: GNSS/INS; tractor; steering wheel deflection angle; Kalman filter; automatic navigation