

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.

基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的农机轮角测量方法

何 杰, 高维炜, 王 辉, 岳斌斌, 张 帆, 张智刚

(华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】设计一种农机前轮转角测量方法, 代替安装复杂的连杆式轮角传感器。【方法】采用 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, 计算 MEMS 陀螺仪与 GNSS 航向微分差值, 获得车轮转动速率; 设计自适应卡尔曼滤波器进行信息融合和校正, 获得车轮转向角, 并进行性能验证和田间应用试验。【结果】与连杆式轮角传感器测量结果对比, 轮角测量方法的拖拉机在偏离航线 2.5 和 1.5 m 进行上线时, 平均绝对误差 (MAE) 分别为 1.13°和 0.87°, 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.90°和 0.68°, 上线时间分别为 29.4 和 23.5 s; 以 4 km/h 田间导航应用时, MAE 为 0.44°, RMSE 为 0.87°, 满足拖拉机旱地作业要求。【结论】GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪轮角测量方法与连杆式轮角传感器测量性能相当, 能够替代轮角传感器用于较低速农业机械导航。

关键词: 转向轮角; MEMS 陀螺仪; 卡尔曼滤波器; 农机导航; 农业机械; 航向
中图分类号: S24; S237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)05-0091-08

Wheel steering angle measurement method of agricultural machinery based on GNSS heading differential and MEMS gyroscope

HE Jie, GAO Weiwei, WANG Hui, YUE Binbin, ZHANG Fan, ZHANG Zhigang
(College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To replace the link-type wheel angle sensor which is complicated to install, a method for measuring the front wheel angle of agricultural machinery was designed. 【Method】GNSS antenna was used to measure the course and speed information, and MEMS gyroscope was used to measure the combined rotation speed of the tractor body and wheel. The differential difference between MEMS gyroscope and GNSS heading was calculated to obtain the wheel rotation rate. The self-adaptive Kalman filter was designed to fuse and correct the information, and wheel steering angle was obtained. Performance verification and field application test were conducted. 【Result】The performance of the wheel angle measurement method designed in this paper was verified by comparing its measurement result with that of the link-type wheel angle sensor. When the course deviations of the tractor were 2.5 and 1.5 m respectively, the mean absolute errors (MAE) of the new measurement method were 1.13° and 0.87° respectively, the root mean square errors (RMSE)

were 0.90° and 0.68° respectively, and the on-line times were 29.4 and 23.5 s respectively. When the method was used with the tractor navigating at the speed of 4 km/h in the field, the MAE was 0.44°, and the RMSE was 0.87°, which could meet the requirements of tractor operation on dry land. 【Conclusion】 The measurement method based on GNSS heading differential and MEMS gyroscope has equivalent measurement performance with the link-type wheel angle sensor. This measurement method can be used to replace wheel angle sensor for the navigation of low speed agricultural machinery.

Key words: steering wheel angle; MEMS gyroscope; Kalman filter; agricultural machinery navigation; agricultural machinery; heading

农业机械自动导航技术已经得到较为普遍的应用^[1-3],前轮转角测量是农业机械自动导航的关键技术之一^[4]。轮角测量传感器的测量精度和安装可靠性是直接影响自动导航控制性能的重要因素^[5]。目前,自动导航农机的轮角传感器主要有连杆式直接安装的测量方式和安装较为简洁的间接测量方式^[6]。连杆式直接安装的角度传感器可直接测量农机的转向轮角,常采用的传感器有电位计^[7]、电阻式角度传感器^[8-10]、绝对式编码器^[11-13]、霍尔式传感器^[14-15]等。这类传感器一般成本较低,但是在实际生产中存在安装较麻烦、需准确标定等问题,且连杆易松动或折断^[16]。间接测量常采用陀螺仪及 MEMS 陀螺仪^[17-18]、磁敏传感器^[19-20]等非接触式传感器测量车轮的相对转动角速率或角度,通过信息处理的方式获得车轮转向角。

本文提出基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的转向轮角测量方法,通过 MEMS 陀螺仪测量车身和车轮的合转动速率以及对 GNSS 天线输出的航向和速度信息进行处理,设计自适应卡尔曼滤波器进行信息的融合和校正,提高轮角测量的精

度,并在自动导航拖拉机上试验进行验证。

1 材料与方法

1.1 试验材料

如图 1a 所示,选取安装农业机械导航系统的雷沃欧豹 M904-D 型拖拉机为试验研究平台,农机导航系统采用华南农业大学和雷沃重工股份有限公司联合研制的 AGCS-I 系统,其定位定向模块采用上海司南导航技术股份有限公司生产的 K728 GNSS 板卡,RTK 定向更新频率为 10 Hz,航向角测量精度为 0.2°/R(R 为双天线基线长,1.6 m)。试验选用美国 BEI 公司生产的 DUNCAN 9360 型霍尔式角度传感器作为轮角测量的参考对象,如图 1b 所示安装于农机左前轮轮轴上,DUNCAN 9360 型角度传感器的测量精度为 ±0.6%,输出频率最低响应为 1 kHz。选用日本 Silicon sensing 公司生产的 CRS03-02 型硅性模拟量输出的陀螺仪测量车轮转动合角速率,安装于农机左前轮转向轴,如图 1c 所示,CRS03-02 陀螺仪启动时间小于 0.2 s,分辨率小于 ±0.1°/s/g,非线性度小于 ±0.5%,带宽为 10 Hz(-3 dB)。



图 1 试验设备及安装示意图
Fig. 1 Test equipment and installation diagram

1.2 基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的轮角测量方法

如图 2 所示,获取 GNSS 双天线测量车身航向微分,设计自适应卡尔曼滤波器提高双 GNSS 天线

航向微分的精度,获得车身航向微分;采用 MEMS 陀螺仪测量农机转向轮的转动合速率,导航控制器采集 MEMS 陀螺仪数据与 GNSS 双天线测量的车身航向作差值,滤除车轮 MEMS 测得的车身航向

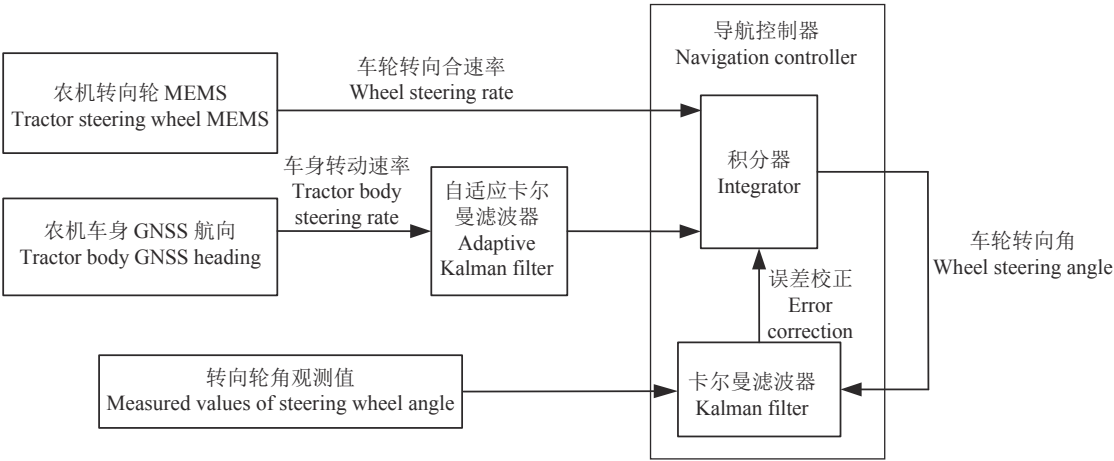


图 2 基于 GNSS 航向和 MEMS 陀螺仪轮角测量方法

Fig. 2 Wheel angle measurement method based on GNSS heading and MEMS

微分, 获得纯车轮转动的速率, 然后进行积分获得车轮转向角度。

由于 MEMS 陀螺仪存在零偏、随机漂移等噪声, 测得的车轮转向角速率被噪声污染, 且积分过程中 MEMS 陀螺仪的噪声误差会随时间累积, 严重影响转向轮角测量结果的准确性, 因此以农机运动学方程计算转向轮角观测值 (α)。

$$\alpha = \arctan(\dot{\phi} L / v), \quad (1)$$

式中, ϕ 为车身航向微分, v 为拖拉机后轮轴中心速度, L 为拖拉机轴距。

以式 (1) 作为观测方程设计自适应卡尔曼滤波器, 滤除 MEMS 陀螺仪的输出信号与航向差值积分过程的噪声干扰, 对角度积分过程进行负反馈误差校正, 获得车轮转向角的精准测量结果。

1.3 自适应卡尔曼滤波器

双天线 GNSS 板卡航向输出频率为 10 Hz, 直接对航向微分处理得到的航向角速率噪声大, 不能直接作为车身航向角速率参与卡尔曼滤波器运算, 因此本文设计了一种自适应卡尔曼滤波器, 利用实时观测数据进行滤波的同时, 通过不断改变模型参数或噪声统计特性进行实时估计和修正, 实现滤波器的在线改进, 缩小实际滤波误差, 改善卡尔曼滤波器的动态性能, 该方法能将系统辨识与滤波估计有效融为一体。

假设农机自动驾驶直线行驶时车身的角加速度 (a) 为 0, 且存在一个正态分布的随机噪声, 在直线导航状态下可以利用该假设对航向角速率进行卡尔曼滤波, 令:

$$\dot{\phi}_k = \dot{\phi}_{k-1} + a\Delta t + w, \quad (2)$$

式中, $\dot{\phi}_k$ 为当前时刻农机车身角速率, $\dot{\phi}_{k-1}$ 为上一时刻农机车身角速率, $a = 0$, Δt 表示上一时刻与当前时刻的时间间隔, w 为高斯白噪声。

卡尔曼滤波器的状态变量即为农机车身角速率, 无控制输入, 故状态转移矩阵 $A = 1$; 包含噪声的观测值是状态变量的直接体现, 故测量矩阵 $H = 1$ 。建立该卡尔曼滤波器的状态方程和观测方程分别如式 (3) 和 (4) 所示:

状态方程:

$$X_k = AX_{k-1} + w, \quad (3)$$

观测方程:

$$Z_k = HX_k + v, \quad (4)$$

式中, X_k 为 k 时刻农机车身角速率, X_{k-1} 为 $k-1$ 时刻农机车身角速率, Z_k 为 k 时刻双 GNSS 航向微分后的车身转动速率观测值, v 为高斯白噪声。

根据滤波器迭代原理, 建立卡尔曼滤波器时间更新方程式 (5) 和 (6), 测量更新方程式 (7)、(8) 和 (9)。

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}, \quad (5)$$

$$P_k^- = P_{k-1} + Q, \quad (6)$$

$$K_k = P_k^- / (P_k^- + R), \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(Z_k - \hat{x}_k^-), \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k)P_k^-, \quad (9)$$

式 (5)~(9) 中, $\hat{x}_k^-$ 为 k 时刻先验状态估计值, $\hat{x}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻后验状态估计值, P_k^- 为 k 时刻先验估计误差的协方差估计值, P_{k-1} 为 $k-1$ 时刻后验估计误差的协方差估计值, Q 为过程激励噪声协方差矩阵, K_k 为卡尔曼增益, R 为观测噪声协方差矩阵, $\hat{x}_k$ 为 k 时刻计算的后验状态估计值, $\hat{x}_k^-$ 为 k 时刻先验状态估计值, Z_k 为 k 时刻前轮转向角度的观测值, P_k 为 k 时刻后验估计误差的协方差估计值。

由于农机曲线行驶时车身角加速度不能近似为 0, 卡尔曼滤波器在农机曲线行驶时模型失配。本文提出了基于农机横向跟踪偏差进行自适应调

节卡尔曼滤波器的过程激励噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}$, 卡尔曼滤波器判断农机为上线过程时, 可通过增大

$\mathbf{Q}$ 值改变卡尔曼滤波器的权重值解决模型失配的问题。

$$\mathbf{Q} = \begin{cases} \frac{|\mathbf{pe}_{\text{now}}|}{|\mathbf{pe}_{\text{max}}| - |\mathbf{pe}_{\text{min}}|} (q_{\text{max}} - q_{\text{min}}) + q_{\text{min}} & 0.1 < |\mathbf{pe}_{\text{now}}| < 3 \\ q_{\text{min}} & |\mathbf{pe}_{\text{now}}| < 0.1 \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $\mathbf{pe}_{\text{now}}$ 为当前农机的横向跟踪偏差, $\mathbf{pe}_{\text{max}}$ 、 $\mathbf{pe}_{\text{min}}$ 分别为最大上线距离和最小上线距离, q_{max} 和 q_{min} 分别为自适应卡尔曼滤波器过程激励噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}$ 初始化的最大值和最小值。

1.4 试验方法

为验证本文设计的 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪转向轮角测量方法的准确性, 分别设计了如下试验。

1.4.1 自适应卡尔曼滤波器性能验证试验 以安装于拖拉机车身的 MEMS 陀螺仪测量的车身角速率作为参照, 对比检验双天线航向微分采用自适应卡尔曼滤波前后的效果。在华南农业大学增城基地的水泥路面自动驾驶驾驶拖拉机直线行驶、人工驾驶拖拉机曲线行驶, 分别采集后轮轴中心速度、MEMS 陀螺输出角速率、双天线航向角等原始数据进行仿真分析, 对原始数据和滤波效果进行评价。自适应卡尔曼滤波器初始化参数为 $P(0) = 100$, $\mathbf{Q}(0) = 0.005$, $\mathbf{Q}$ 自适应公式为:

$$\mathbf{Q} = \begin{cases} \frac{0.295(|\mathbf{pe}| - 0.1)}{2.9} + 0.005 & 0.1 < |\mathbf{pe}| < 3 \\ 0.005 & |\mathbf{pe}| < 0.1 \end{cases}。 \quad (11)$$

$R = 0.05$, 初始化轮角值为 0° , 令农机后轮轴中心速度大于 0.2 m/s 时, 自适应卡尔曼滤波器工作。

1.4.2 对比试验 分别以 GNSS 双天线航向微分和 MEMS 陀螺仪测量的轮角和 DUNCAN 9360 型角度传感器测量的轮角作为导航系统的轮角反馈, 选取拖拉机偏离目标航线 1.5 和 2.5 m 作为上线距离, 拖拉机上线速度为 2.88 km/h , 进行对比试验。试验时, 卡尔曼滤波器初始化参数与验证试验的相同, 初始化轮角值为 0° 。试验采集 MEMS 陀螺仪测量轮角的观测值、卡尔曼滤波值和连杆式轮角传感器获得的角度基准值, 比较上线过程卡尔曼滤波器收敛速度和轮角测量的准确性和动态响应性能。

1.4.3 田间直线导航应用试验 采用“1.4.1”所述卡尔曼滤波器初始化参数, 以 4 km/h 行进速度进行田间直线导航试验。试验采集并统计对比前轮转向角度测量值和横向位置偏差, 通过评价拖拉机导航行驶作业性能, 间接考察拖拉机双天线 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪转向轮角测量性能。

2 结果与分析

2.1 自适应卡尔曼滤波器性能验证试验

双天线航向微分计算值、车身陀螺测量值和自适应卡尔曼滤波值的验证试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 自适应卡尔曼滤波值基本与 MEMS

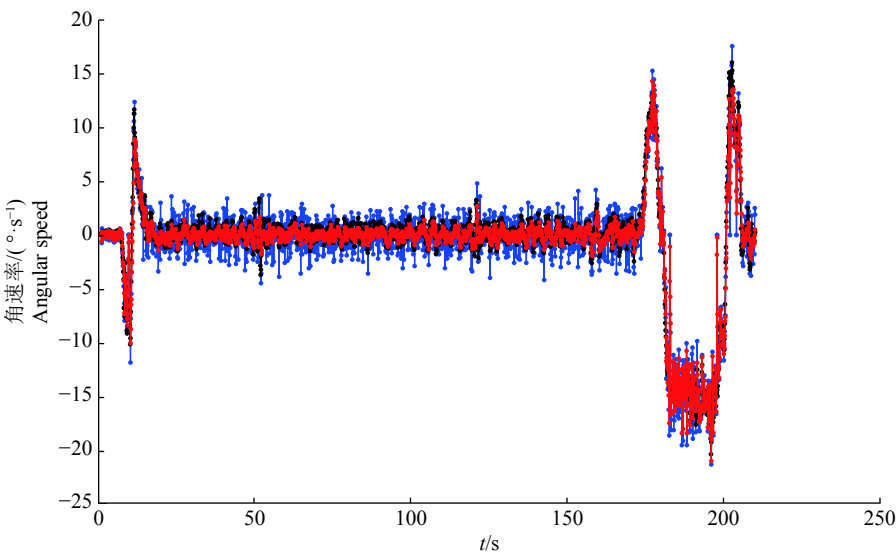


图 3 GNSS 航向微分计算值(蓝线)、车身 MEMS 陀螺仪测量值(黑线)和自适应卡尔曼滤波(红线)对比
Fig. 3 Comparison of the calculated values of GNSS heading differential (bule line), measured values of MEMS gyroscope(black line) and self-adaptive Kalman filter (red line)

陀螺仪测量值吻合, 在直线行驶和转弯部分均得到了较好的滤波效果。以车身 MEMS 陀螺仪测量值为参考, 对滤波前和后的 3 组采样数据进行统计分析, 结果如表 1 所示。

表 1 GNSS 双天线航向微分滤波前后误差

Table 1 Errors of GNSS dual antenna heading differential values before and after Kalman filtering

	处理 Process	最大误差/(°/s) Maximum error	平均绝对误差/(°/s) Mean absolute error	均方根误差/(°/s) Root mean square error
滤波前 Before filtering	直线行驶 1 Straight driving 1	3.88	0.94	1.17
	直线行驶 2 Straight driving 2	5.40	0.92	1.21
	直线行驶 3 Straight driving 3	3.93	0.87	1.09
	曲线行驶 1 Curve driving 1	15.05	1.69	2.75
	曲线行驶 2 Curve driving 2	18.00	1.40	2.61
	曲线行驶 3 Curve driving 3	10.35	1.63	2.48
滤波后 After filtering	直线行驶 1 Straight driving 1	3.07	0.51	0.65
	直线行驶 2 Straight driving 2	4.14	0.60	0.80
	直线行驶 3 Straight driving 3	2.99	0.66	0.85
	曲线行驶 1 Curve driving 1	9.32	1.45	2.12
	曲线行驶 2 Curve driving 2	15.69	1.23	2.34
	曲线行驶 3 Curve driving 3	7.64	1.45	2.11

以车身陀螺仪测量值作为参考, 直线行驶时, 滤波前最大误差为 5.40 °/s, 平均绝对误差最大为 0.94 °/s, 均方根误差最大为 1.21°/s; 自适应卡尔曼滤波器滤波后最大误差为 4.14°/s, 平均绝对误差最大为 0.66°/s, 均方根误差最大为 0.85°/s。3 次直线行驶数据角速率平均绝对误差均值由滤波前的 0.91°/s降低为滤波后的 0.59°/s, 均方根误差均值由滤波前的 1.16°/s降低为滤波后的 0.76°/s。

曲线行驶时, 滤波前最大误差为 18.00 °/s, 平均绝对误差最大为 1.69 °/s, 均方根误差最大为 2.75 °/s; 自适应卡尔曼滤波器滤波后最大误差为 15.69°/s, 平均绝对误差最大为 1.45 °/s, 均方根误差最大为 2.34 °/s。3 次曲线行驶数据角速率平均误差均值由滤波前的 1.57 °/s降低为滤波后的

1.38 °/s, 均方根误差均值由滤波前的 2.61 °/s降低为滤波后的 2.19 °/s。

自适应卡尔曼滤波器有效去除了直线行驶和曲线行驶时 GNSS 双天线航向微分计算的车身角速率值噪声, 平滑了车身角速率值, 降低了平均误差和均方根误差, 滤波效果明显。验证试验结果表明, 设计的自适应卡尔曼滤波器对车身航向角速率滤波效果良好, 满足测量精度要求, 可作为信息源替代车身 MEMS 陀螺仪的输出值参与前轮转向角度的计算。

2.2 对比试验

对比试验结果如图 4 所示。从图 4 可知, 卡尔曼滤波器初始化的轮角为 0°, 真实角度值分别为 -1.0°和 6.2°, 滤波值逼近真实值时间分别为 1.4 和

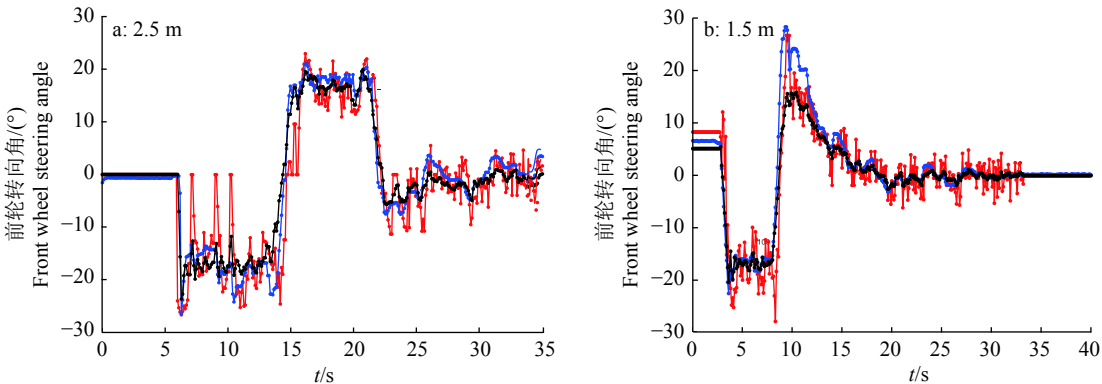


图 4 不同上线距离前轮转向角度观测值(红线)、滤波值(黑线)和角度传感器测量值(蓝线)对比

Fig. 4 Comparison of observed (red line) and filter values (black line) of front wheel steering angle and measured values of angle sensor (blue line) at different on-line distances

1.1 s; 前轮转向角度的观测值噪声大, 影响滤波效果。以滤波逼近真实值时刻为开始, 滤波前和滤波后角度值与连杆式角度传感器输出差值误差统计信息如表 2 所示, 上线距离为 2.5 m 时, 平均绝对误差由 2.66°降低至 1.13°, 均方根误差由 3.48°降低至 0.90°; 上线距离为 1.5 m 时, 平均绝对误差由 1.98°降低至 0.87°, 均方根误差由 2.89°降低至 0.68°。滤波后误差大幅下降, 表明自适应卡尔曼滤波器滤波效果较好。

图 5 为采用 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量转向轮角导航时 2.5 m 和 1.5 m 上线距离下拖

拉机的上线时间, 图 6 为采用角度传感器导航时 2.5 和 1.5 m 上线距离下拖拉机的上线时间。在 1.5 和 2.5 m 的上线距离和相同速度下, 采用传统角度传感器时上线时间分别为 15.0 s 和 14.2 s, 采用 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量轮角时上线时间分别为 29.4 和 23.5 s, 较采用传统角度传感器时的上线时间长, 动态响应性能稍逊。主要原因是模型失配导致角度测量误差较大, 上线超调量较大, 但采用的自适应卡尔曼滤波器收敛较快, 且未出现发散和震荡, 上线时间在可接受范围内, 能满足导航作业的基本需求。

表 2 滤波前后角度值与连杆传感器输出值对比的统计数据

Table 2 Statistics of angle values before and after filtering compared to the output values of link-type angle sensor					
上线距离/m	处理	最大误差/(°)	平均绝对误差/(°)	均方根误差/(°)	
On-line distance	Process	Maximum error	Mean absolute error	Root mean square error	
2.5	滤波前 Before filtering	17.30	2.66	3.48	
	滤波后 After filtering	5.04	1.13	0.90	
1.5	滤波前 Before filtering	11.26	1.98	2.89	
	滤波后 After filtering	4.32	0.87	0.68	

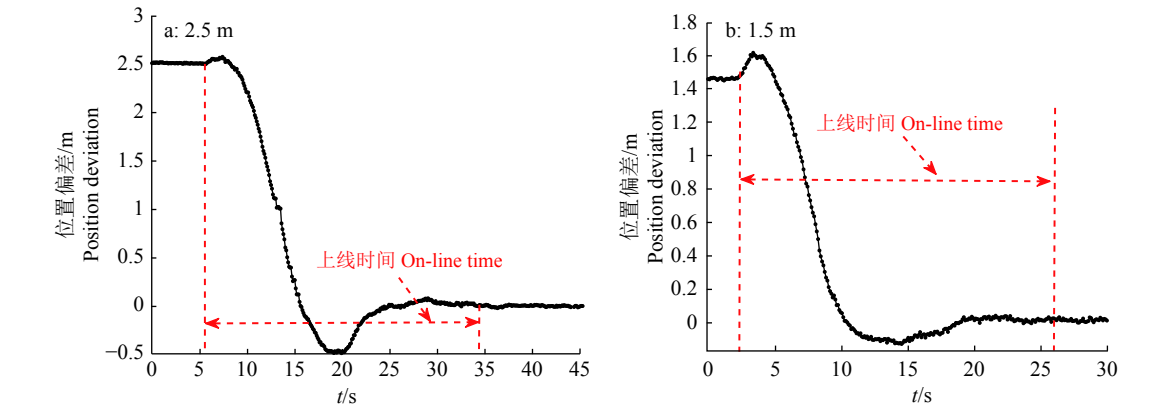


图 5 不同上线距离 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量转向轮角导航时的上线时间

Fig. 5 On-line time at different on-line distances when measuring steering wheel angle with GNSS heading differential and MEMS gyroscope

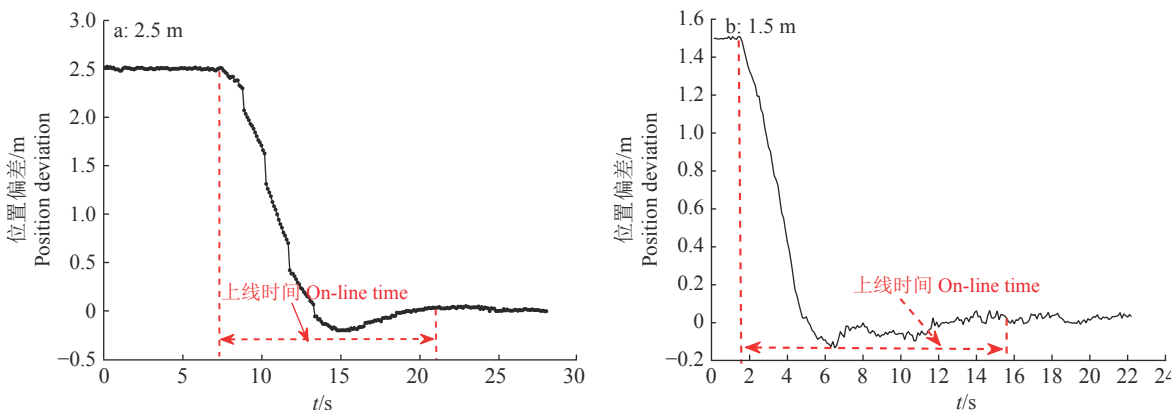


图 6 不同上线距离角度传感器测量转向轮角导航时的上线时间

Fig. 6 On-line time at different on-line distances when measuring steering wheel angle with angle sensor

2.3 田间直线导航应用试验

图 7 为 4 km/h 速度下前轮转向角度滤波值、观测值和角度传感器测量的基准值对比试验结果, 由图 7 可知 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量的轮角和角度传感器测量值的基准角度趋势一致, 测量结果稳定, 设计的自适应卡尔曼滤波器能很快收敛, 并滤除杂波。以连杆式轮角传感器测量结果为基准, 对采用卡尔曼滤波前后 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的测量结果进行统计分析可得, 滤波前平均绝对误差为 1.07°, 均方根误差为 2.12°; 滤波后平均绝对误差为 0.44°, 均方根误差为 0.87°。应用试验结果表明自适应卡尔

曼滤波器效果良好, 能够替代角度传感器用于农业机械导航。

图 8 为 4 km/h 速度下采用 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量值作为轮角反馈进行直线导航时采集的拖拉机横向位置偏差。从导航路径跟踪效果看, 最大横向位置偏差为 5.6 cm, 平均偏差为 1.8 cm, 横向位置偏差均方根为 2.2 cm, 极差为 10.5 cm, 跟踪精度基本能满足拖拉机旱地作业要求。试验结果表明, GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量轮角方法基本可满足拖拉机自动驾驶作业场景, 且成本相对较低, 具有一定的应用前景。

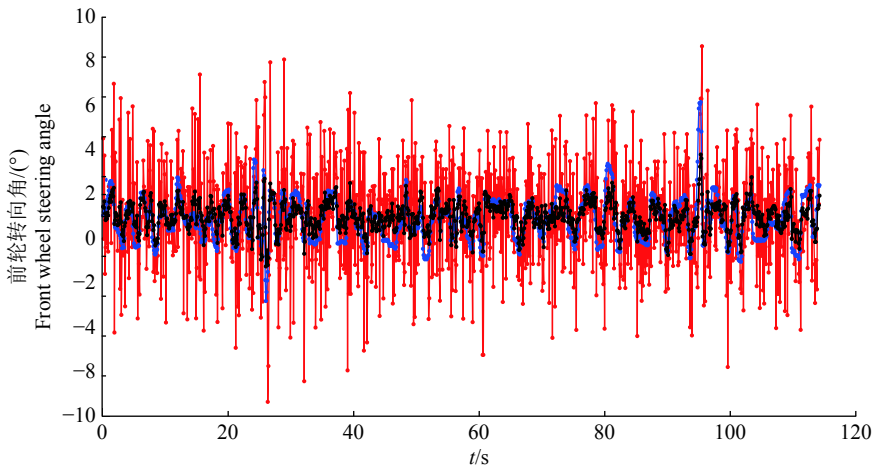


图 7 田间试验中前轮转向角观测值（红线）、滤波值（黑线）和角度传感器测量值（蓝线）对比图
Fig. 7 Comparison chart of observed (red line) and filtered values (black line) of front wheel steering angle and measured values of angle sensor (blue line) in field experiment

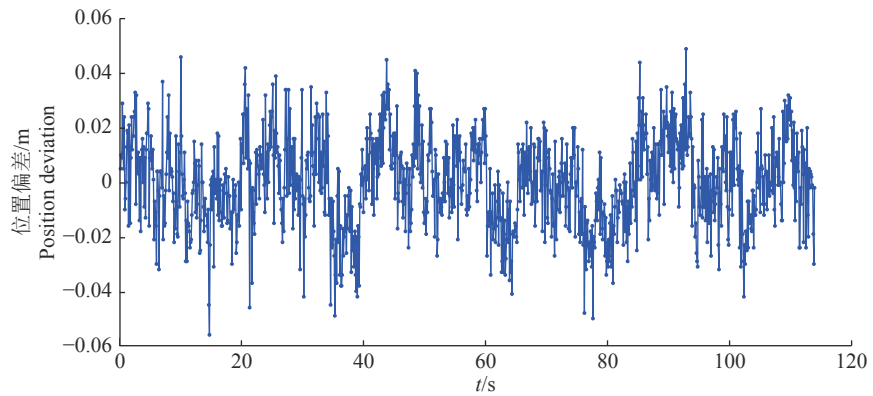


图 8 拖拉机直线导航作业时横向位置偏差
Fig. 8 Deviation of lateral position during linear navigation operation of tractor

3 结论

本文分析了基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的农机轮角测量方法, 设计了自适应卡尔曼滤波器抑制 GNSS 双天线航向微分测量噪声, 提高了农机轮角测量的精度和稳定性。

设计了自适应卡尔曼滤波器性能验证试验, 对获取的双天线 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量的车身角速率以及自适应卡尔曼滤波后的车身转动速率进行比较, 验证试验结果表明, 卡尔曼滤波器在直线行驶和曲线行驶时对双天线航向微分计算的车身角速率值的噪声进行了有效去除且平

滑了车身角速率值,降低了平均绝对误差和均方根误差,滤波效果良好,满足测量精度要求。

GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量值和角度传感器测量值对比试验结果表明,该方法转向轮角测量精度与传统轮角传感器测量结果相当,2.5 和 1.5 m 上线距离均方根误差分别为 0.90° 和 0.68° ,基本满足农机自动驾驶轮角测量需求;动态响应性能比传统角度传感器性能稍逊,分别采用本文方法和轮角传感器进行导航,拖拉机偏离目标航线 2.5 m 时上线时间分别为 29.4 和 15.0 s,偏离目标航线 1.5 m 时上线时间分别为 23.5 和 14.2 s,较采用传统角度传感器时上线时间长。

4 km/h 速度直线导航应用试验结果表明,GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量的轮角与角度传感器测量的轮角平均绝对误差为 0.44° ,导航路径跟踪横向位置偏差均方根为 2.2 cm,满足拖拉机旱地作业要求。

3 组试验结果表明,本文提出的 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量方法性能与连杆式轮角传感器相当,且成本相对较低,能够替代角度传感器用于农业机械较低速导航,具有一定的应用前景。

由于转向轮上 MEMS 陀螺仪存在零偏未校正,GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪测量的轮角值存在初始化角度值不准确的缺陷,后续研究应进行 MEMS 陀螺仪零偏校正。由于 GNSS 板卡更新频率低,在高速导航作业时 GNSS 航向微分噪声较大,前轮转向角度测量系统稳定性会变差,农机高速导航作业时轮角测量精度和稳定性有待验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张智刚,王进,朱金光,等.我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(18): 23-27.
- [3] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 1-10.
- [4] 王朝阳.基于陀螺仪的车辆前轮转角测量方法研究[D].上海:上海工程技术大学,2016.
- [5] 缪存孝,楚焕鑫,孙志辉,等.基于双 GNSS 天线及单陀

螺的车轮转角测量系统[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 17-23.

- [6] 王鹤,胡静涛,高雷,等.农业机械自动驾驶车轮转角测量误差补偿模型[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 33-37.
- [7] YIN X, NOGUCHI N. Development and evaluation of a general-purpose electric off-road robot based on agricultural navigation[J]. *Int J Agr Biol Eng*, 2014, 7(5): 14-21.
- [8] HU J, LI T. Cascaded navigation control for agricultural vehicles tracking straight paths[J]. *Int J Agr Biol Eng*, 2014, 7(1): 36-44.
- [9] 胡书鹏,尚业华,刘卉,等.拖拉机转向轮转角位移式和四连杆式间接测量方法对比试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 76-82.
- [10] YIN X, DU J, NOGUCHI N, et al. Development of autonomous navigation system for rice transplanter[J]. *Int J Agr Biol Eng*, 2018, 11(6): 89-94.
- [11] 张智刚,罗锡文,李俊岭.轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 77-80.
- [12] NAGASAKA Y, SAITO H, TAMAKI K, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. *J Field Robot*, 2009, 26(6/7): 537-548.
- [13] 吴鹏,李东京,负超.一种惯性传感器与编码器相结合的 AGV 航迹推算系统[J]. *机电工程*, 2018, 35(3): 310-316.
- [14] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等.雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 15-21.
- [15] 何杰,朱金光,罗锡文,等.基于电动方向盘的插秧机转向控制系统设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 10-17.
- [16] 连志鹏.自动驾驶农机转向控制研究[D].上海:上海工程技术大学,2015.
- [17] BREWER D E, WHITE G W, PEAKEJ W. Vehicle gyro based steering assembly angle and angular rate sensor: 20070088477[P]. 2007-04-19.
- [18] 布里维 D E,怀特 G W,派科 J W.基于转向组件角度及角速率传感器的车辆陀螺仪: 101326094 B[P]. 2008-12-17.
- [19] 吴晓鹏,赵祚喜,张智刚,等.东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(S1): 1-5.
- [20] 张立新,陈佳俊. MSP430 与 TMR 的智能磁敏角度传感器设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2019, 19(9): 62-65.

【责任编辑 霍 欢】