

基于两位置法与改进 STEKF 的农机航向角测量方法

何杰^{1,2} 魏正辉¹ 胡炼^{1,3} 汪沛^{1,3} 黄培奎^{1,3} 丁帅奇¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学黄埔创新研究院, 广州 510700;

3. 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)

摘要: 针对单天线 GNSS 农机导航系统起步和低速时航向测量不准问题, 本文基于两位置法与改进强跟踪扩展卡尔曼滤波算法 (Strong tracking extended Kalman filter, STEKF) 进行农机航向测量技术研究, 设计一种适用于单天线 GNSS/IMU 融合的农机航向测量方法。采用两位置法测量高速作业农机航向, 基于 IMU 输出的 9 轴数据和 GNSS 输出的位置与速度信息, 提出改进强跟踪自适应矩阵 R STEKF 算法对农机低速行驶时的航向准确测量, 设计了基于两位置法与改进 STEKF 航向的一维卡尔曼滤波融合方法。以雷沃 M-1204 型拖拉机为试验平台, 进行了速度梯度变化工况下农机航向测量精度和稳定性验证试验, 结果表明, 在农机从静止状态起步, 经历包含直线和曲线的混合路段, 在速度 0.36~5.40 km/h 过程中, 本文提出的融合航向测量方法获取的航向角与双天线 GNSS 获取的航向角误差不超过 0.5°, 表明本文方法适用于农机静止起步到低速运动状态下农机航向稳定获取, 提高了单天线农机导航起步和低速驾驶控制精度和稳定性, 可为高精度农机自主无人作业提供技术基础。

关键词: 农业机械; 导航; 两位置法; 改进 STEKF; 航向测量

中图分类号: S220; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0365-08

OSID:



Method for Measuring Heading Angle of Agricultural Machinery Based on Two-position Method and Improved STEKF

HE Jie^{1,2} WEI Zhenghui¹ HU Lian^{1,3} WANG Pei^{1,3} HUANG Peikui^{1,3} DING Shuaiqi¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Huangpu Innovation Research Institute, South China Agricultural University, Guangzhou 510700, China

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

Abstract: To solve the problems of low accuracy in heading measurement for single-antenna GNSS agricultural machinery navigation system at low speed and the difficulty of starting up, research on agricultural machinery heading measurement technology was conducted based on two-position method and improved STEKF. A suitable heading measurement method for GNSS/IMU fusion in single-antenna agricultural machinery was designed. The heading of high-speed agricultural machinery was measured by the two-position method, and the heading of low-speed agricultural machinery was measured by the improved STEKF algorithm based on the 9-axis data output by the IMU and the position and speed information output by the GNSS. A one-dimensional Kalman filter fusion method based on the two-position method and the improved STEKF heading was designed. The M-1204 tractor produced by Lovol was used as the experimental platform to verify the heading measurement accuracy and stability under speed gradient change conditions. The results showed that during the process of starting up from a stationary state and traversing mixed routes containing straight lines and curves at a speed of 0.36 km/h to 5.40 km/h, the heading angle obtained by the proposed fusion heading measurement method was within 0.5° of the heading angle obtained by the dual-antenna GNSS, indicating that the proposed method was suitable for stable heading acquisition of agricultural machinery in the state of starting up and low-speed movement, which improved the precision and stability of single-antenna agricultural machinery

收稿日期: 2024-04-24 修回日期: 2024-05-18

基金项目: 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0110902)、广东省科技计划项目(20230201)和华南农业大学黄埔创新研究院科研项目(2023GG004)

作者简介: 何杰(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究, E-mail: hooget@scau.edu.cn

通信作者: 黄培奎(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事多源信息融合定位与感知技术研究, E-mail: pkhuang@scau.edu.cn

navigation and low-speed driving control and provided technical basis for high-precision agricultural machinery autonomous unmanned operation.

Key words: agricultural machinery; navigation; two position method; improved STEKF; heading measurement

0 引言

针对不同应用场景,可选择单天线定点、双天线定向和多天线定姿态等合适的全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)配置来满足需求。其中,双天线 GNSS + 载波相位差分技术(Real time kinematic, RTK)的组合以其航向稳定和定位精准已被广泛应用于农业生产等领域^[1-2]。无人农机有助于减少生产成本、提高综合收入^[3]。国内已有高校和企业取得了显著成果。如华南农业大学罗锡文团队的无人农场将双天线 GNSS 应用于各种农机的自动驾驶,实现了农业生产全程无人化作业^[4-5],相关企业推出了双天线 GNSS 和双天线 GNSS/INS(Inertial navigation system, 惯性导航系统)组合导航系统的农机辅助驾驶和自动驾驶套件^[6]。而双/多天线对 GNSS 天线配置要求较高,同时还存在天线安装较困难、天线之间结构件易发生形变、运输易损坏等问题^[7]。此外,为了保证航向精度,一般还会要求主从天线之间基线长度达到 1.20 m 以上,这也不利于双天线设备在小型农机上应用^[8]。同时,由于复杂地况对智能农机适应性提出了更高要求,而惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)等惯性传感器技术逐渐成熟,采用单天线和 IMU 融合便可实现更精简和宽适应度自动驾驶系统^[9-10]。为此,单天线 GNSS 导航系统是当前研究热点之一,稳定测量姿态中的航向角是该领域亟需解决的核心问题。

STAFFORD 等在 20 世纪 90 年代末开始研究基于单天线 GNSS 的测姿系统^[11]。RICHARD 等^[12]提出了利用单天线 GNSS 量测信噪比进行姿态测量;ZHU 等^[13]利用空速计差分得到载体运动加速度,并从加速度计输出中减去机体加速度得到重力分量从而获取姿态角;LIN 等^[14]利用 GNSS 速度差分对运动加速度进行了补偿,但差分器滞后性导致结果不实时。刘瑞华等^[15]针对高速飞行的固定翼飞机采用速度和加速度矢量获取伪航向角,用于估计无人机运动时的航向信息;宋宇等^[16]采用自适应扩展卡尔曼融合 9 轴 IMU,得到航向偏差为 $2^\circ \sim 3^\circ$,但对转弯等航向突变时并没有很好的适应;陈光武等^[17]使用互补滤波进行航向估计,但动态追踪效果不佳。在不同速度和各种干扰下,

如何保证单天线 GNSS/IMU 导航系统航向角的稳定性是目前重点研究内容。目前,学者多在高动态运行运载器上充分利用 GNSS 水平速度分量获取伪姿态角,或者是纯 IMU 进行 9 轴融合,或者是利用两位置之间的航迹角获取航向。农机作业速度 $0 \sim 20$ km/h,尤其是 $0 \sim 1$ km/h 低速作业时 GNSS 测速噪声大、磁干扰强和航向易突变,目前结构简单且成熟的航向测量方案尚未见报道^[18-19]。

针对上述单天线农机航向测量存在的问题,本文提出基于两位置法与改进强跟踪扩展卡尔曼滤波(Strong tracking extended Kalman filter, STEKF)的农机航向测量方法,对静止起步和低速作业等工况下农机 GNSS 输出的航向角与 IMU 输出的 9 轴数据融合,以实现自动导航农机静态初始对准,直线、转弯、高低速运行、运行中停止再启动等情况下航向角稳定测量。

1 基于两位置法与改进 STEKF 的航向测量方法

1.1 两位置法农机航向测量原理

两位置法是通过测量农机在两个不同位置点的经纬度作差,进而计算出农机在这两点之间的航向角^[20]。农机以速度 $5 \sim 30$ km/h 作业时,由于农机运行稳定,不频繁变换航向,且相邻采样点之间位置间隔较大有效避免了位置周跳引入的噪声,故航向可采用两位置点的经纬度进行计算^[21]。在考虑地球圆弧情况下,计算出两点之间航向角 ψ_{yaw} (航向角均为 $[-180^\circ, 180^\circ)$,且北偏西为正)^[22]和两个位置点之间距离 Δd ,计算式为

$$\begin{cases} \Delta d = d_s - d_e \\ \Delta E_{lat} = E_{lat_s} - E_{lat_e} \\ \Delta N_{lon} = N_{lon_s} - N_{lon_e} \\ d_s = 7915.7045 \left(\frac{e}{2} \lg \frac{1 - e \sin \frac{E_{lat_s} \pi}{180}}{1 + e \sin \frac{E_{lat_s} \pi}{180}} + \lg \left(\tan \frac{\left(45 + \frac{E_{lat_s}}{2}\right) \pi}{180} \right) \right) \\ d_e = 7915.7045 \left(\frac{e}{2} \lg \frac{1 - e \sin \frac{E_{lat_e} \pi}{180}}{1 + e \sin \frac{E_{lat_e} \pi}{180}} + \lg \left(\tan \frac{\left(45 + \frac{E_{lat_e}}{2}\right) \pi}{180} \right) \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_{yaw} = \begin{cases} -\arctan2(60\Delta N_{lon}, \Delta d) \frac{180}{\pi} \\ 0 & (|\Delta E_{lat}| < \varepsilon, |\Delta N_{lon}| < \varepsilon) \\ -90^\circ & (\Delta N_{lon} > 0, |\Delta N_{lat}| < \varepsilon) \\ 90^\circ & (\Delta N_{lon} < 0, |\Delta N_{lat}| < \varepsilon) \\ 0 & (\Delta N_{lat} > 0, |\Delta N_{lon}| < \varepsilon) \\ -180^\circ & (\Delta N_{lat} < 0, |\Delta N_{lon}| < \varepsilon) \\ -180^\circ & (|\psi_{yaw} + 180| < 0.01) \end{cases} \quad (2)$$

式中 ΔN_{lon} 、 ΔE_{lat} ——经度差、纬度差
 E_{lat_s} 、 E_{lat_e} ——起点、终点纬度
 N_{lon_s} 、 N_{lon_e} ——起点、终点经度
 d_s 、 d_e ——起点、终点距离, m
 e ——WGS84 坐标系下地球偏心率, 取 0.081 82
 ε ——临界波动限制值, 取 e^{-9}

两个位置点选择决定最后航向角计算效果, 距离太远无法反映短时间内航向角变化, 距离太近则会因为卫星周跳等引入噪声误差。在测试后确定速度在 0.36 ~ 5.40 km/h 内, 以 0.10 m 为两位置点间距在行驶路径上取点计算航向。但此方法当作业速度低于 0.10 m/s 时会因为周跳噪声误差掩盖真实航向而失效, 因此, 本文引入 STEKF 航向算法。

1.2 改进 STEKF 融合航向算法

当车辆从静止启动或者低速 0 ~ 1 km/h 时, 由于多路径效应造成周跳噪声大和延迟, 在直线作业状态计算出的航向丢失了不少中间信息^[23]; 在转向状态, 距离阈值取点法由于弧线多点距离相同导致航向更新速度慢^[24]。针对上述情况, 提出基于改进 STEKF 的 IMU 9 轴融合算法, 用于低速作业时航向收敛, 其流程图如图 1 所示。

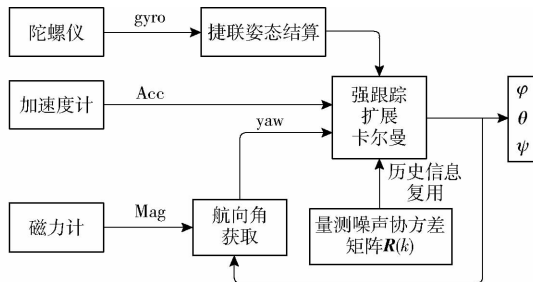


图 1 9 轴融合算法流程图

Fig. 1 Nine-axis fusion algorithm

图 1 中 ψ 为 9 轴融合后航向角, 该算法利用 9 轴 IMU 数据通过强跟踪扩展卡尔曼算法进行融合, 通过对自适应矩阵 R 和历史信息复用约束磁力计的干扰, 算法原理为 (采用东北天导航坐标系 (n 系), 载体坐标系 (b 系) 为右前上):

设非线性系统为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \Gamma_k \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 、 Γ_k 、 $h(\mathbf{x}_k)$ ——非线性系统

\mathbf{x}_k —— n 维度状态向量

\mathbf{z}_k —— m 维量测向量

\mathbf{w}_k 、 \mathbf{v}_k ——系统过程噪声与观测噪声

并且 \mathbf{w}_k 、 \mathbf{v}_k 为互不相关的零均值高斯白噪声, 满足统计学特性

$$\begin{cases} E(\mathbf{w}_k) = 0 \\ E(\mathbf{w}_k \mathbf{w}_j^T) = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \\ E(\mathbf{v}_k) = 0 \\ E(\mathbf{v}_k \mathbf{v}_j^T) = \mathbf{R}_k \delta_{kj} \\ E(\mathbf{w}_k \mathbf{v}_j^T) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathbf{Q}_k ——系统过程噪声 \mathbf{w}_k 的非正定方差矩阵

\mathbf{R}_k ——量测噪声 \mathbf{v}_k 的非正定方差矩阵

δ_{kj} ——Kronecker- δ 函数

\mathbf{v}_j 、 \mathbf{w}_j ——高斯白噪声

且初始状态 \mathbf{x}_0 与 \mathbf{w}_k 和 \mathbf{v}_k 都互不相关。

状态量向量为四元数和三轴陀螺仪随机漂移共 7 维, 量测向量为三轴加速度计和磁力计算的航向共 4 维, 即

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = (q_0(k), q_1(k), q_2(k), q_3(k), b_{wx}(k), b_{wy}(k), b_{wz}(k))^T \\ \mathbf{z}(k) = (a_{bx}(k), a_{by}(k), a_{bz}(k), \psi_m(k))^T \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\psi_m = \begin{cases} 90^\circ & (m_x = 0, m_y < 0) \\ -90^\circ & (m_x = 0, m_y > 0) \\ -\arctan \frac{m_y 180^\circ}{m_x \pi} & (m_x > 0) \\ 180^\circ - \arctan \frac{m_y 180^\circ}{m_x \pi} & (m_x < 0, m_y \leq 0) \\ -180^\circ - \arctan \frac{m_y 180^\circ}{m_x \pi} & (m_x \leq 0, m_y > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $q_i(k)$ ——姿态四元数, $i = 0, 1, 2, 3$

$\mathbf{b}_{wj}(k)$ ——陀螺仪随机漂移向量, $j = x, y, z$

$a_{bj}(k)$ ——载体坐标系中三轴加速度测量值, $j = x, y, z$

$\psi_m(k)$ ——将磁阻仪输出值在水平面上投影所得到的航向角

m_x 、 m_y ——磁力计三轴数据

且需要先补全本地磁偏角, 取广州地区磁偏角为 -3.20° 。

转向时, 由于加速度计敏感或者磁力计干扰造成量测噪声增大, 通过添加自适应 $\mathbf{R}(k) =$

$\begin{bmatrix} \sigma_a^2 I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & \sigma_m^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 初步去除噪声。其中 \mathbf{R} 中加速度计和磁力计前置系数为

$$\begin{cases} \sigma_a^2 = c_a (1 - \|a(k)\| - \|g\|) \\ \sigma_m^2 = c_m (1 - \|m(k)\| - \|h\|) \end{cases} \quad (7)$$

式中 c_a, c_m ——权益因子

g ——重力加速度, m/s^2

$a(k)$ ——三轴加速度计测量值, m/s^2

$m(k)$ ——三轴磁力计测量值, mg

根据加速度和磁干扰强度调整状态增益矩阵, 减缓 Kalman 的预测校准。但 EKF (Extended Kalman filter) 算法由于原理缺陷无法应对快速转弯甚至原地转圈等航向突变情况。利用文献[25]开源数据集(用宝马车 + mti300 在北京取值)进行试验, 结果如图 2 所示。

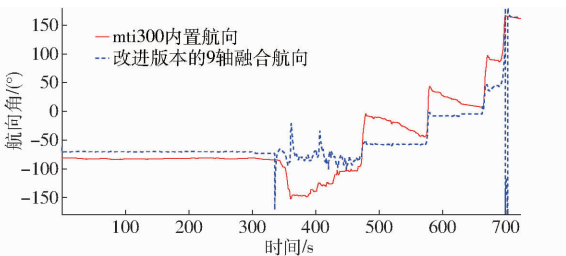


图 2 EKF \mathbf{R} 阵自适应航向测量与 mti300 航向测量比较
Fig. 2 Comparison between EKF \mathbf{R} array adaptive heading measurement and mti300 heading measurement

由图 2 可得, 2 种算法针对航向突变(特别是农机转向时)都不能快速收敛。

为解决上述问题, 采用改进 STEKF 算法, 优化因子进行抑制。STEKF 原理为^[26]

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{X}}(k|k) \\ \mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) \\ \boldsymbol{\gamma}(k+1) = \mathbf{z}(k+1) - \hat{\mathbf{z}}(k+1|k) \\ S_0(k+1) = \begin{cases} \boldsymbol{\gamma}(1)\boldsymbol{\gamma}^T(1) & (k=0) \\ \frac{\rho S_0(k) + \boldsymbol{\gamma}(k+1)\boldsymbol{\gamma}^T(k+1)}{1+\rho} & (k \geq 1) \end{cases} \\ N(k+1) = S_0(k+1) - \mathbf{H}(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{H}^T(k) - \beta\mathbf{R}(k+1) \\ M(k+1) = \mathbf{H}(k)\mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T(k)\mathbf{H}^T(k) \\ \lambda_0 = \frac{\text{tr}[N(k+1)]}{\text{tr}[M(k+1)]} \\ \lambda(k+1) = \begin{cases} 1/\lambda_0 & (\lambda \geq 1) \\ 1 & (\lambda < 1) \end{cases} \\ \mathbf{P}(k+1|k) = \lambda(k+1)\mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \\ \mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k+1|k) \cdot \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k+1)]^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ ——第 k 个状态量估计值

$\mathbf{P}(k+1|k)$ ——第 k 个状态协方差矩阵

ρ ——遗忘因子, 取 0.965

β ——弱化因子, 取 3.500

$\mathbf{F}(k)$ ——状态转移矩阵

$\lambda(k+1)$ ——次优渐消因子

$\mathbf{K}(k)$ ——卡尔曼增益系数

$\mathbf{H}(k)$ ——观测矩阵

$\boldsymbol{\gamma}(k+1)$ ——残差

$\mathbf{R}(k)$ ——量测噪声协方差矩阵

$\mathbf{Q}(k)$ ——过程噪声方差矩阵

实际农机运行中航向突变多出现在转弯时, 为进一步限制航向漂移, 添加历史航向信息信任, 即针对量测值中的加速度计和磁力计信息在一定窗口长度内出现波动太大(对应转向太大和磁力计受到大干扰情况)时, 选择信任历史信息^[27]。

1.3 航向融合原理

两位置法和 9 轴融合算法在航向收敛上各有优缺点, 为实现各种速度梯度和工况下航向收敛, 设计了一种航向融合机制, 利用 IMU 陀螺仪 z 轴数据和 GNSS 位置点在时间阈值(取 0.50 s)内经验值的变换从而判断农机运动状态是处于静止^[28]、直线行驶、转弯行驶、高低速行驶等状态, 具体逻辑如图 3 所示。其中判断的依据为 GPS 阈值时间内移动增量/阈值时间可获取载体速度, 陀螺仪 z 轴数据较大可视为转向, 较小时可视为直线。基于此, 也可判断农机是否处于静止再启动工况, 可以辅助航向锁定功能^[29], 限制航向在一定范围, 再次启动后省去静态航向对准过程。

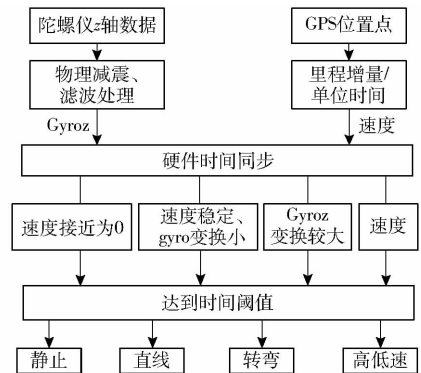


图 3 农机状态判断逻辑

Fig. 3 State judgment logic of agricultural machinery

根据农机状态调整航向角 ψ_{yaw} 和 ψ 权重, 采用一维卡尔曼滤波方式进行航向融合^[30-31]。其中, 量测量为 2 种算法计算的航向角, 状态量为实时更新航向角, 即

$$\begin{cases} z(k) = \text{mean}(\psi_{yaw}, \psi_{imu}) \\ \mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{P}(k-1|k-1) + \mathbf{Q} \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k-1|k-1)/\mathbf{P}(k|k-1) + \mathbf{R} \\ x(k|k) = x(k|k-1) + \mathbf{K}(k)(z(k) - \mathbf{H}x(k|k-1)) \\ \mathbf{P}(k|k) = (1 - \mathbf{K})\mathbf{P}(k|k-1) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $z(k)$ ——量测量

2 试验与结果分析

2.1 试验设计

2.1.1 试验材料

试验平台采用雷沃 M-1204 型拖拉机,由线控底盘、卫星定位系统、导航控制系统等组成,如图 4 所示。



图 4 试验平台设备

Fig. 4 Test platform equipment

配置 melodic 版本的机器人操作系统 ROS (Robot operating system) 便携式计算机作为导航控制系统 (Ubuntu 18.04 + R7 处理器);定位模块采用 UM982 板卡,其定位精度为 2.5 mm,航向精度为 0.20°,同时在试验平台上安装双天线 GNSS 作为对照组;IMU 采用 mti300。GNSS 和 IMU 设备主要参数如表 1 所示。

表 1 GNSS 和 IMU 设备参数

Tab.1 GNSS and IMU device parameters

设备	参数	数值/型号
GNSS	板卡型号	UM982
	数据更新频率/Hz	10
	PPS 更新频率/Hz	1
	静态水平精度/mm	2.5
	动态水平精度/mm	8
IMU	型号	MTI-300-2A5G4
	翻滚角、俯仰角/(°)	0.20
	航向角/(°)	1.00
	陀螺仪零漂/((°)·h ⁻¹)	10
	陀螺仪噪声密度/((°)·s ⁻¹ ·Hz ^{-1/2})	0.01
	陀螺仪 g-sensitivity/((°)·s ⁻¹ ·g ⁻¹)	0.003
	加速度计零偏/μg	15
加速度随机游走/μg	60	

2.1.2 试验方法

为验证本文融合航向测量方法收敛效果,在华南农业大学农业工程楼附近进行试验,试验分 2 组进行。①静态航向获取试验:拖拉机在同一个位置做朝向不同方向旋转试验,试验其磁力计的航向效果。②动态航向试验:拖拉机在 GNSS 信号无遮挡区域行驶,包括静止、直线、转弯、高低速、运行中静止再启动等各种常见工况,以全面验证算法的有

效性。

试验时需要先对磁力计进行椭圆拟合,校正软磁、硬磁干扰,获取到校正后磁力计值 $C^{[32-33]}$ 为

$$C = (D - b)A \quad (10)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0.537966932829803 & -0.000000000000006 & 0 \\ -0.000000000000006 & 1.001380918873126 & -0.000000000000007 \\ 0 & -0.000000000000007 & 0.649312390349438 \end{bmatrix}$$

$$b = [-0.078474254098447 \quad 0.785622208399385 \quad 0.676188244743707]$$

式中 A ——软磁干扰矩阵

b ——硬磁干扰矩阵

D ——磁力计原始数据

航向融合时,通过给定不同的 R ,使农机在不同工况下均取得较好的融合效果,表 2 为实际使用中在不同工况下 R 参考值。

表 2 农机不同状态融合时 R 参考值

Tab.2 R reference value when different states of agricultural machinery were fused

农机工况	R
静止	1.5
直线	0.3
转弯	0.6
低速/高速	0.6/0.8

2.2 磁力计静态航向获取

磁力计静态航向获取试验结果如表 3 所示,表中 GNSS 航向为 GNSS 双天线设备航向折算到以北偏西为正的航向。试验序号 2~7 为纯磁力计在不受到环境干扰时,静态初始对准可达 0.57°~2.99°,但如果附近有磁干扰,如卷闸门时航向精度明显降低(试验序号 1、8~12),偏差甚至达到 24.39°。由结果可见,磁力计具有一定的航向收敛效果,因此,单纯依靠磁力计需要辅助抗干扰设计。

表 3 纯磁力计航向初始对准

Tab.3 Initial alignment of pure magnetometer heading (°)

序号	GPS 航向角	磁力计航向角	航向角差值绝对值
1	120.75	127.36	6.61
2	150.19	153.18	2.99
3	180.64	178.31	2.33
4	149.32	147.35	1.97
5	119.75	117.70	2.05
6	89.76	88.15	1.61
7	59.93	60.50	0.57
8	29.84	24.04	5.80
9	0.76	-18.46	19.22
10	-30.98	-55.37	24.39
11	-60.09	-83.47	23.38
12	-89.64	-107.10	17.46

2.3 动态航向试验

所行驶路径和速度如图5所示,运行中GNSS航向如图6红线所示(航向以北偏西为正, $(-180^{\circ}, 180^{\circ}]$)。试验包括静止起步、直线、转弯、高低速等常见农机作业工况。以双天线GNSS航向为参照基准,对不同航向角获取算法进行比较,其中横坐标对应的是以20 Hz进行采样的GNSS数据序号。依据速度区分,即图5a前和f后为静止阶段,ab段和ef段为低速段,bc段、cd段为高速段的直线、转弯段;按照位置区分,图5b中A前和F后为静止阶段,AB段和EF段为低速段,BC段、CD段为高速段的直线、转弯段。

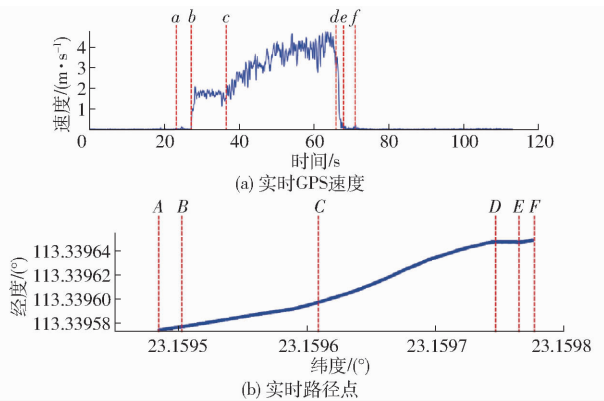


图5 行车轨迹和实时速度

Fig. 5 Driving trajectory and real-time speed

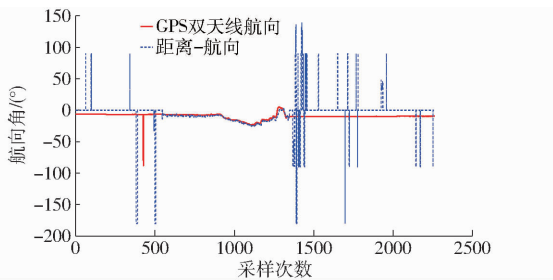


图6 以距离为阈值的航向获取方式

Fig. 6 Course acquisition method with distance as threshold

图6蓝线为以行驶距离为阈值(取0.1 m)获取到的航向数据,可见其在速度0.36~5.40 km/h内航向角获取精度较高,参考双天线航向误差均值小于 0.30° ,但在静止阶段航向明显偏离红线,最大偏差达到 10.08° 。图7蓝线部分为改进后的9轴融合算法和双天线航向数据对比,由于磁力计对于航向的收敛性,在静止时以及动态追踪过程中都较为接近双天线航向,但绝对精度上即使补充了磁偏角也与双天线GNSS数据有一定的误差。

图8蓝线为融合后航向角,相较于单一的航向算法,融合后兼具了静止状态下航向角的收敛和动态追踪过程,整个过程中与双天线GNSS航向角平均绝对误差在 0.50° 以内。

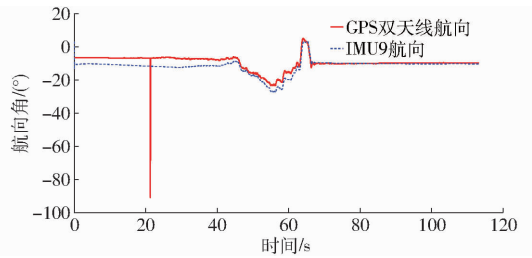


图7 9轴融合算法单独计算航向角

Fig. 7 Nine-axis fusion algorithm calculated heading separately

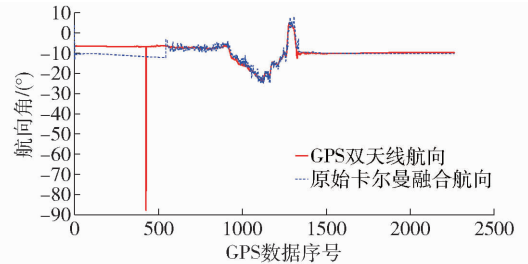


图8 航向融合后对比

Fig. 8 Course contrast after fusion

针对运行中静止到启动这种农机作业工况,如图9a中第2次速度零速段,再启动后,利用航向锁定技术,可直接复用上一时刻测量的航向角,省去静止航向对准时间(图9b,可以快速航向对准)。

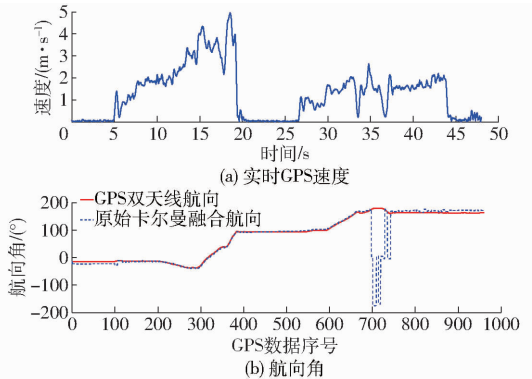


图9 运行过程中停止再启动航向融合

Fig. 9 Run through car stop and start course fusion diagram

针对静止起步瞬间、直线、转弯和高低速作业工况的航向与双天线GNSS设备的平均绝对误差,如表4所示。由表4可知,采用STKF融合航向测量方法在不同作业工况下均有较好的航向测量精度,满足农机自动驾驶控制需求。

表4 农机各阶段航向平均绝对误差

Tab. 4 Average absolute error of course of agricultural machinery at each stage

农机状态	平均绝对误差/ $(^{\circ})$
静止起步瞬间	0.29
直线	0.42
转弯	0.69
高速(5~30 km/h)	0.19
低速(0~1 km/h)	0.57

3 结论

(1) 提出了两位置法与改进 STEKF 融合航向测量方法, 根据农机运动过程中运动速度的变化, 将农机行驶分为低速 ($0 \sim 1 \text{ km/h}$) 和高速 ($5 \sim 30 \text{ km/h}$) 行驶两状态, 分别采用改进的 9 轴 IMU 的 STEKF 融合算法和两位置航向获取法得到农机两状态的航向信息, 并集成设计了两位置法与改进 STEKF 航向的一维卡尔曼滤波融合方法, 实现了静止和宽作业速度范围的农机航向稳定获取。

(2) 利用 9 轴融合中的加速度计和陀螺仪信息结合自适应矩阵 R 和历史信息检测, 可有效抵抗磁场和转向时线加速度的突变, 增加抗干扰能力。

(3) 不同工况试验结果表明, 两位置法与改进 STEKF 融合航向测量算法提高了单天线农机航向的稳定性, 在农机常见的静止、直线行驶、曲线行驶、高低速、行驶过程中静止再启动等工况下, 与双天线 GNSS 的航向角平均绝对误差在 0.50° 以内, 可满足智能农机生产作业的需求。

参 考 文 献

- [1] 熊超, 刘宗毅, 卢传芳, 等. 国外卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报, 2021, 9(3): 13 - 19.
XIONG Chao, LIU Zongyi, LU Chuanfang, et al. Development status and trend of satellite navigation system in foreign countries [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(3): 13 - 19. (in Chinese)
- [2] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8 - 17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8 - 17. (in Chinese)
- [3] 韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 381 - 391.
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. A review of the development of agricultural machinery automatic navigation and driverless vehicles[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(4): 381 - 391. (in Chinese)
- [4] 王辉. 基于双天线 GNSS 的拖拉机自动导航关键技术研究及系统集成应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
WANG Hui. Research on key technology of tractor automatic navigation based on double antenna GNSS and application of system integration[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [5] 张闻宇, 张国城, 张智刚, 等. 基于 ARMAX - KF 与速度补偿的拖拉机无前轮传感器转角估计方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 415 - 426.
ZHANG Wenyu, ZHANG Guocheng, ZHANG Zhigang, et al. Steering angle estimation method for tractors without angle sensor using ARMAX - KF and speed compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 415 - 426. (in Chinese)
- [6] 董方园, 李晓宇, 王锐, 等. 农机车辆的自动驾驶系统的调试方法、装置和农机车辆: CN116700293A[P]. 2023 - 09 - 05.
- [7] 何格格. GPS 单天线测姿算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
HE Gege. Research on GPS single-antenna attitude measurement algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018. (in Chinese)
- [8] 黄晓财, 宋广鹏, 高翔, 等. 日本小型农机的现状与发展分析[J]. 现代农业装备, 2023, 44(6): 16 - 23.
HUANG Xiaocai, SONG Guangpeng, GAO Xiang, et al. Analysis of the current situation and development of small farm machinery in Japan[J]. Modern Agricultural Equipments, 2023, 44(6): 16 - 23. (in Chinese)
- [9] 马培圣, 肖前贵, 杨柳庆. 基于单天线 GPS 的无陀螺姿态测量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1465 - 1466.
MA Peisheng, XIAO Qiangui, YANG Liuqing. Design of gyro free attitude measurement system based on single antenna GPS [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(6): 1465 - 1466. (in Chinese)
- [10] 袁洪良, 杨浚宇, 唐睿, 等. 基于低成本惯导和运动约束的农机高精度定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 17 - 25.
YUAN Hongliang, YANG Junyu, TANG Rui, et al. High-precision localization of autonomous agricultural machinery using low-cost IMU and motion constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 17 - 25. (in Chinese)
- [11] JOHN V. Implementing precision agriculture in the 21st century[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(3): 267 - 275.
- [12] RICHARD P, KEITH A, JOHN D, et al. Applications of global positioning system velocity-based attitude information[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(5): 998 - 1008.
- [13] ZHU R, SUN D, ZHOU Z, et al. A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors[J]. Measurement, 2007, 40(3): 322 - 328.
- [14] LIN Xiaobo, YU Yao, SUN Changyin. Real-time attitude and gyro-bias estimation for small UAVs using low-cost sensors[C]//2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016.

- [15] 刘瑞华,张鹏,张磊. 基于单天线 GPS 的伪姿态测量算法研究[J]. 中国民航大学学报, 2009,27(6): 25-28.
LIU Ruihua, ZHANG Peng, ZHANG Lei. Research on pseudo-attitude measurement algorithm based on single antenna GPS [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009,27(6): 25-28. (in Chinese)
- [16] 宋宇,翁新武,郭昕刚. 基于四元数 EKF 算法的小型无人机姿态估计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2015,53(3): 511-518.
SONG Yu, WENG Xinwu, GUO Xin'gang. Attitude estimation of small UAV based on quaternion EKF algorithm[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2015,53(3): 511-518. (in Chinese)
- [17] 陈光武,李少远,李文元,等. 基于递推最小二乘与互补滤波的姿态估计[J]. 控制理论与应用, 2019,36(7): 1096-1103.
CHEN Guangwu, LI Shaoyuan, LI Wenyuan, et al. Attitude estimation based on recursive least squares and complementary filtering[J]. Control Theory & Applications, 2019,36(7): 1096-1103. (in Chinese)
- [18] 张智刚,朱启明,何杰,等. 基于 RTK-GNSS 和 MEMS 陀螺仪的车辆航向角测量技术[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 34-37.
ZHANG Zhigang, ZHU Qiming, HE Jie, et al. Vehicle heading angle measurement technology based on RTK-GNSS and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(5): 34-37. (in Chinese)
- [19] 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. Agricultural wheel angle measurement method based on GNSS course differentiation and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020,41(5): 91-98. (in Chinese)
- [20] 徐洪群,何文东,刘斌,等. CGCS2000 大地问题解算工程运用研究[J]. 火力与指挥控制, 2016(10): 168-173.
XU Hongqun, HE Wendong, LIU Bin, et al. Research on application of CGCS2000 geodetic problem solving engineering[J]. Fire Control & Command Control, 2016(10): 168-173. (in Chinese)
- [21] 许志,史伟,唐硕. 一种带航迹角约束的临近空间目标拦截中制导算法[J]. 宇航学报, 2020, 41(9): 1175-1183.
XU Zhi, SHI Wei, TANG Shuo. Amidcourse guidance algorithm with track angle constraint for near space target interception [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(9): 1175-1183. (in Chinese)
- [22] 周祖洋,庄广琛,郭玉胜,等. 一种载体航迹角计算方法及系统:CN116858238A[P]. 2023-10-10.
- [23] 李正帅,缪玲娟,周志强,等. GNSS/SINS 组合导航中多路径效应的识别与抑制算法[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 85-92.
LI Zhengshuai, MIAO Lingjuan, ZHOU Zhiqiang, et al. Multi-path effect recognition and suppression algorithm in GNSS/SINS integrated navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022,9(4): 85-92. (in Chinese)
- [24] 陆婵. GPS 软件仿真系统的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
LU Chan. Research on GPS software simulation system[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese)
- [25] 赵彦明,秦永元,严恭敏. 自主式微航姿系统信息融合方法比较[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10): 122-126.
ZHAO Yanming, QIN Yongyuan, YAN Gongmin. Comparison of information fusion methods for autonomous micro-attitude systems[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10): 122-126. (in Chinese)
- [26] 叶斌,徐毓. 强跟踪滤波器与卡尔曼滤波器对目标跟踪的比较[J]. 空军雷达学院学报, 2002(2): 17-19.
YE Bin, XU Yu. Comparison of strong tracking filter and Kalman filter for target tracking[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2002(2): 17-19. (in Chinese)
- [27] 吴建华,杜威,王辰,等. 北极东北航道商船陀螺罗经航向误差修正算法[J]. 交通信息与安全, 2021,39(6): 73-81.
WU Jianhua, DU Wei, WANG Chen, et al. Course error correction algorithm of gyro compass for merchant ship in Arctic Northeast Passage[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021,39(6): 73-81. (in Chinese)
- [28] 张全,牛小骥,付立鼎. 一种静止状态的判断方法及装置:CN108120450B[P]. 2018-06-05.
- [29] 吴飞,朱龙泉,陈向东,等. 一种约束惯性/卫星组合导航静止时航向漂移的方法:CN112729281A[P]. 2021-04-30.
- [30] 黄小平,王岩. 卡尔曼滤波原理及应用 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2015.
- [31] WANG P, HU L, HE J, et al. Method for measuring the steering wheel angle of paddy field agricultural machinery by integrating RTK-GNSS and dual-MEMS gyroscope[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2022, 15(6): 197-205.
- [32] 陈洋豪,徐祥,李凤,等. 基于 RLM 的 MEMS 三轴磁力计标定方法[J]. 传感技术学报, 2023,36(10): 1569-1575.
CHEN Yanghao, XU Xiang, LI Feng, et al. Calibration method of MEMS three-axis magnetometer based on RLM [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023,36(10): 1569-1575. (in Chinese)
- [33] 沈跃,孙志伟,沈亚运,等. 直线型植保无人机航姿 UKF 两级估计算法[J]. 农业机械学报, 2022,53(9): 151-159.
SHEN Yue, SUN Zhiwei, SHEN Yayun, et al. UKF two-stage estimation algorithm for heading and attitude of linear plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9): 151-159. (in Chinese)