

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.09.001

崔冰波, 韩逸, 冯诗雨, 等. 基于农机具运动约束辅助的 MEMS-IMU 姿态测量 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(9): 2-10.

基于农机具运动约束辅助的 MEMS-IMU 姿态测量

崔冰波¹, 韩逸¹, 冯诗雨¹, 张之杰¹, 朱永云¹, 陈建锋²

1. 江苏大学 农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 常州工学院 电气信息工程学院, 江苏 常州 213032

摘要: 微机电系统(MEMS)惯性器件在农机导航与机具作业控制中应用广泛, 为抑制农机作业机组连续振动对机具姿态测量的干扰, 提出一种运动约束辅助的级联卡尔曼滤波(CaKF)补偿农机具姿态估计中的外部加速度。首先, 构建惯性测量单元(IMU)姿态估计滤波模型, 并推导农机具姿态的运动约束量测模型; 其次, 采用滤波新息在线更新量测噪声方差并构造级联滤波模型, 实现三轴加速度计外部加速度干扰解耦与误差抑制。基于三轴转台和拖拉机犁耕试验对 CaKF 姿态估计进行验证, 转台试验表明其横滚角均方根误差(RMSE)较现有抗干扰滤波(RKF)改善了 20.8%; 田间试验表明 CaKF 俯仰角 RMSE 由卡尔曼滤波(KF)的 0.59° 降至 0.40°, 并在抑制农机具处于长时间的外部加速度扰动中效果更好。

关键词: 犁具姿态估计; 卡尔曼滤波; 外部加速度补偿; 惯性测量单元

中图分类号: TP391.8

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)09-0002-09

Agricultural Implements Motion Constraint-Aided MEMS-IMU Attitude Estimation

CUI Bingbo¹, HAN Yi¹, FENG Shiyu¹,
ZHANG Zhijie¹, ZHU Yongyun¹, CHEN Jianfeng²

1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu 213032, China

Abstract: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) inertial devices are widely used in agricultural

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271999); 江苏省重点研发计划项目(BE2021313); 江苏省高等学校自然科学基金项目(24KJA470001)。

作者简介: 崔冰波, 副研究员, 博士研究生导师, 主要从事智能农机导航与自主作业控制研究。

machinery navigation and implement operation control. To suppress the interference caused by continuous vibrations of operating machinery on measurement of implement attitude, this study proposes a motion-constrained assisted Cascaded Kalman Filter (CaKF) to compensate for external acceleration variations in agricultural implement attitude estimation. Firstly, an attitude estimation filtering model for Inertial Measurement Unit (IMU) was established, and a motion-constrained measurement model was derived for agricultural implement attitude. Secondly, the filter innovation was employed to dynamically update measurement noise variance, enabling the construction of a cascaded filtering framework. This achieves decoupling of external acceleration interference from triaxial accelerometers and suppression of estimation errors. The proposed CaKF was validated through triaxial turntable and tractor ploughing field experiments. Turntable experiments demonstrated a Root Mean Square Error (RMSE) improvements of 20.8% for roll angle, compared to the state-of-the-art Robust KF (RKF). Field experiments demonstrated that the RMSE for pitch angle error decreased from 0.59° (KF) to 0.40° when using CaKF, confirming its improved ability to suppress external acceleration interference over extended durations during attitude estimation for agricultural implements.

Key words: plough attitude estimation; Kalman filter; external acceleration compensation; inertial measurement unit

惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)是农业机械(农机)导航定位与农机具测控系统的核心模块^[1-3]。受农机田间作业振动状况和机具作业负载变化的影响,农机具的自适应调控对其姿态测量动态性能提出新需求,亟待基于低成本 IMU 研究高精度姿态测量方法^[4-5]。载体姿态变化一般基于陀螺仪角速率积分或加速度计比力获得,前者存在未知初始姿态和陀螺仪偏置导致的姿态漂移问题,后者则受载体外部运动加速度的影响较大^[6]。由于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)惯性器件噪声特性和环境漂移误差非常复杂,研究利用加速度计、磁力计与陀螺仪多源信息融合的载体姿态估计受到广泛关注^[7-8]。

基于陀螺仪和加速度计姿态误差更新频率的互补特征,互补滤波(Complementary Filter, CF)在计算资源受限平台应用广泛^[9-10],由于采用固定增益系数进行信息融合,CF 收敛速度受初始姿态值影响较大,且其在姿态动态估计方面的性能有待改善^[11]。卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)及其扩展算法在姿态动态估计上较 CF 有显著优势,其采用加速度计和磁力计感知载体重力场和磁场信息,并与导航系理论模型导出量构造量测残差,补偿陀螺仪姿态更新漂移误差^[12-13]。虽然 CF 运算量较小且易于部署,但 KF 模型匹配灵活更适用于载体动态姿态估计,因此本研究基于 KF 开展农机具振动工况下的姿态测量。

KF 姿态估计受 IMU 偏置、时变量测噪声和外部加速度影响较大,尤其 MEMS-IMU 的随机噪声和偏置会造成姿态估计快速发散。为提高 MARG 模块姿态估计精度,林新华等^[14]采用序贯 Sage-Husa 估计量测噪声抑制磁场干扰和载体线加速度对姿态估计的影响;乔美英等^[15]基于滤波新息序列卡方检验构造模糊边界修正准则,自适应修正容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman Filter, CKF)量测噪声与状态预测协方差。为降低 IMU 姿态滤波对外部加速度的敏感性,储开斌等^[16]采用 CF 与扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)级联方式抑制外部加速度干扰,同时采用 Mahony 滤波对陀螺仪、加速度计和磁力计输出进行预滤波,并以 CF 输出作为 EKF 时间更新初值;刘春等^[17]在 CF 与 EKF 级联滤波中引入强跟踪滤波和噪声自适应,进一步改进 EKF 融合效果;Ding 等^[18]提出基于 IMU 输出序列滑动窗口检测的方法,根据设定阈值自适应调整加速度计量测 KF 更新中的权重,然而其采用单一尺度对加速度三轴外部干扰同步调整,同时受陀螺仪积分计算姿态漂移的影响,因此先验固定阈值无法适应长时间干扰存在的场景。

为解耦三轴加速度计受外加速度干扰的影响,Candan 等^[19]提出加速度计量测噪声多尺度自适应估计

方法,利用滤波新息方差计算外加速度干扰对应的噪声方差,然而量测残差不仅来源于外加速度干扰,还包括陀螺仪偏置,因此随着 KF 的迭代更新,新息中外加速度干扰对应的不确定性低于预测状态偏差的对应值。农机具受到连续振动干扰时,受状态值或滤波新息不确定性逐渐增加的影响,现有自适应滤波方法难以用于长时间的外加速度干扰抑制。Javed 等^[20]利用地球磁场约束构造加速度计量测约束模型,提出了无陀螺仪载体姿态估计方法,但农机作业环境中无法避免磁场的干扰。受磁场量测约束模型的启发,本研究在加速度计噪声方差自适应估计的基础上,利用农机具运动约束构造 MEMS-IMU 姿态估计的级联卡尔曼滤波(Cascaded Kalman Filter, CaKF)结构,改善其姿态估计中外加速度干扰的补偿效果,并通过精密转台角度跟踪和拖拉机田间犁耕试验验证所提方法的有效性。

1 IMU 姿态估计原理

1.1 姿态计算

IMU 通过测量载体系(B 系)相对惯性系(I 系)的角速率和比力,获得载体相对于惯性空间的姿态与位置变化,并在导航系(N 系)中进行姿态的数学表达。常用姿态更新方法包括:欧拉角、方向余弦矩阵(Direction Cosine Matrix, DCM)、四元数等。由于本研究仅考虑农机导航作业时的姿态角计算,其数值一般较小,不存在 DCM 姿态表达中的万向锁问题。定义 B 系至 N 系的变换矩阵为^[21]:

$$\mathbf{C}_B^N = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别为航向角、俯仰角和横滚角。

俯仰角和横滚角的表达式分别为:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-C_{31}}{\sqrt{C_{33}^2 + C_{32}^2}} \right) \quad (2)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{C_{32}}{C_{33}} \right) \quad (3)$$

其中: C_{ij} 为 \mathbf{C}_B^N 的第 i 行、第 j 列元素。

设 I 系下重力加速度 $\mathbf{g}^N = [0 \quad 0 \quad g_e]$, 其中 g_e 为当地重力加速度, 则加速度计测量的重力加速度可通过下式计算:

$$\tilde{\mathbf{g}}^B = (\mathbf{C}_B^N)^T \mathbf{g}^N = \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} g_e \quad (4)$$

由式(4)可知, \mathbf{C}_B^N 最后一行不仅能计算 β 和 γ ,还可以基于当前状态量预测 B 系重力加速度 $\tilde{\mathbf{g}}^B$,为构建线性 KF 滤波模型提供量测残差。选择 \mathbf{C}_B^N 最后一行向量 \mathbf{C}_k 作为 k 时刻的状态向量 \mathbf{x}_k ,即:

$$\mathbf{x}_k = [C_{31} \quad C_{32} \quad C_{33}]^T \quad (5)$$

1.2 姿态估计模型

设 k 时刻陀螺仪和加速度计的测量输出为:

$$\mathbf{y}_{g,k} = \boldsymbol{\omega}_{ib,k}^b + \mathbf{n}_{g,k} \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_{a,k} = \mathbf{a}_k + \mathbf{g}^B + \mathbf{n}_{a,k} \quad (7)$$

其中: $\boldsymbol{\omega}_{ib,k}^b$ 、 \mathbf{g}^B 为 k 时刻准确的角速率和当地重力加速度; $\mathbf{n}_{g,k}$ 、 $\mathbf{n}_{a,k}$ 为对应传感器零均值高斯白噪声; \mathbf{a}_k 为载体的外部加速度,采用一阶低通滤波白噪声过程表示为^[19]:

$$\mathbf{a}_k = c_a \mathbf{a}_{k-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (8)$$

式中: c_a 为0与1之间的常数; $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 为载体变化的加速度建模误差。

设离散时间姿态滤波模型为:

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (10)$$

其中: \mathbf{x}_k 为 k 时刻状态向量; $\Phi_{k|k-1}$ 为系统状态转移矩阵; \mathbf{z}_k 为量测向量; \mathbf{H}_k 为系统量测矩阵; \mathbf{w}_{k-1} 、 \mathbf{v}_k 分别为系统噪声和量测噪声向量。

基于陀螺仪输出进行滤波时间更新, 采用一阶逼近求解 DCM 微分方程, 即:

$$\mathbf{C}_{B,k}^N = \mathbf{C}_{B,k-1}^N (\mathbf{I}_3 + \Delta T (\boldsymbol{\omega}_{ib,k}^b \times)) \quad (11)$$

式中: ΔT 为陀螺仪采样周期; \mathbf{I}_3 为 3 阶单位矩阵。

由于真实 $\boldsymbol{\omega}_{ib,k}^b$ 无法获得, 将式(6)代入式(11)得:

$$\begin{aligned} {}^z\mathbf{C}_k &= (\mathbf{I}_3 + \Delta T ((\mathbf{y}_{g,k} - \mathbf{n}_{g,k}) \times)) {}^T\mathbf{C}_{k-1} = \\ &(\mathbf{I}_3 - \Delta T (\mathbf{y}_{g,k} \times)) {}^z\mathbf{C}_{k-1} + \Delta T (\mathbf{n}_{g,k} \times) {}^z\mathbf{C}_{k-1} = \\ &(\mathbf{I}_3 - \Delta T (\mathbf{y}_{g,k} \times)) {}^z\mathbf{C}_{k-1} + \Delta T (-{}^z\mathbf{C}_{k-1} \times) \mathbf{n}_{g,k} \end{aligned} \quad (12)$$

对比式(9)可得 $\Phi_{k|k-1} = \mathbf{I}_3 - \Delta T (\boldsymbol{\omega}_{ib,k}^b \times)$, $\mathbf{w}_{k-1} = \Delta T (-{}^z\mathbf{C}_{k-1} \times) \mathbf{n}_{g,k}$ 。设陀螺仪噪声方差 $\boldsymbol{\Sigma}_{gg} = E(\mathbf{n}_{g,k} \mathbf{n}_{g,k}^T)$, 其中 $E(a)$ 表示对变量 a 求期望, 则系统噪声方差为:

$$\mathbf{Q}_{k-1} = -\Delta T^2 ({}^z\mathbf{C}_{k-1} \times) \boldsymbol{\Sigma}_{gg} ({}^z\mathbf{C}_{k-1} \times) \quad (13)$$

基于加速度计量测进行量测更新, 利用 $\mathbf{g}^B = (\mathbf{C}_B^N)^T \mathbf{g}^N = g_e {}^z\mathbf{C}$, 并将式(8)代入式(7)可得:

$$\mathbf{y}_{a,k} - c_a \mathbf{a}_{k-1} = g_e \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k + \mathbf{n}_{a,k} \quad (14)$$

对比式(10)可得 $\mathbf{z}_k = \mathbf{y}_{a,k} - c_a \mathbf{a}_{k-1}$, $\mathbf{H}_k = g_e \mathbf{I}_3$, $\mathbf{v}_k = \boldsymbol{\varepsilon}_k + \mathbf{n}_{a,k}$, 其中外加速度建模误差与加速度计量测噪声相互独立。式(12)和式(14)构成基于 IMU 姿态估计的 KF 滤波模型, 其中加速度计量测中的外加速度建模误差通过系统量测方差 \mathbf{R}_k 影响量测更新新息权重, 滤波估计必须动态调整以匹配加速度输出的不确定性。

2 带约束抗干扰的姿态估计

2.1 平面运动约束建模

由式(14)可知, 用于姿态量测更新的加速度计数据, 需要去除直接测量中的载体运动加速度。由于载体运动加速度无法直接测量, 可以从量测残差中估计外部加速度, 但其仅适用于短时载体外部加速度的补偿。为改善姿态估计算法在载体长时间变速运动时的可靠性, 基于农机具运动约束提出级联滤波模型, 将 Z 轴加速度计对应的量测更新从平面外的加速度数据扰动中隔离。载体静止或者无速度变化条件下, 加速度计测量的重力加速度值为 $g_e = 9.81 \text{ m/s}^2$, 即:

$$g_{x,k}^2 + g_{y,k}^2 + g_{z,k}^2 = g_e^2 \quad (15)$$

由于农机载体运动速度的变化多位于平面内, 加速度计 Z 轴方向受外加速度的影响较小, 存在:

$$\mathbf{y}_{a,k} = \begin{bmatrix} g_{x,k} \\ g_{y,k} \\ g_{z,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{x,k} \\ a_{y,k} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ax,k} \\ n_{ay,k} \\ n_{az,k} \end{bmatrix} \quad (16)$$

加速度计输出量测为 $\mathbf{y}_{a,k} = [y_{ax,k} \quad y_{ay,k} \quad y_{az,k}]^T$, 忽略 Z 轴加速度计的噪声影响, 可构造约束方程为:

$$g_{x,k}^2 + g_{y,k}^2 = g_e^2 - y_{az,k}^2 \quad (17)$$

对比式(14), 当仅更新状态向量第 3 个元素 $\mathbf{x}_k(3)$ 时, 有:

$$y_{az,k} - c_a a_{z,k-1} = g_e \mathbf{x}_k(3) + \boldsymbol{\varepsilon}_k + n_{az,k} \quad (18)$$

可得:

$$\begin{cases} z_{k,3} = y_{az,k} - c_a a_{z,k-1} \\ \mathbf{H}_{k,3} = g_e [0 \quad 0 \quad 1] \\ v_{k,3} = \epsilon_k + n_{az,k} \end{cases} \quad (19)$$

类似地,可计算 $\mathbf{R}_k = \boldsymbol{\Sigma}_{az} + \boldsymbol{\Sigma}_{z,z,k}$, 其中 $\boldsymbol{\Sigma}_{az}$ 为 Z 轴加速度计的测量噪声, $\boldsymbol{\Sigma}_{z,z,k}$ 为 Z 轴加速度计对应的外加速度建模不确定度。将更新后的 \mathbf{x}_k (3) 代入式(18) 可得更新后的 $\hat{y}_{az,k}$ 。定义 $g_{res} = g_e^2 - \hat{y}_{az,k}^2$ 并结合式(17) 可得:

$$f(\mathbf{x}_k) = g_{x,k}^2 + g_{y,k}^2 - g_{res} = 0 \quad (20)$$

由 $g_{x,k} = g_e \mathbf{x}_k(1)$ 、 $g_{y,k} = g_e \mathbf{x}_k(2)$ 可得:

$$f(\mathbf{x}_k) = g_e^2 [(\mathbf{x}_k(1))^2 + (\mathbf{x}_k(2))^2] - g_{res} \quad (21)$$

为建立预测量测 g_{res} 与状态向量的线性关系, 将 $f(\mathbf{x}_k)$ 在已知点 \mathbf{x}_k^- 处进行一阶泰勒展开:

$$f(\mathbf{x}_k) \approx f(\mathbf{x}_k^-) + f'(\mathbf{x}_k^-)(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_k^-) \quad (22)$$

$$\frac{g_{res}}{g_e^2} + [(\mathbf{x}_k^-(1))^2 + (\mathbf{x}_k^-(2))^2] = 2\mathbf{x}_k^-(1)\mathbf{x}_k(1) + 2\mathbf{x}_k^-(2)\mathbf{x}_k(2) + \zeta_k \quad (23)$$

对比式(10) 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{k,res} = \frac{g_{res}}{g_e^2} + [(\mathbf{x}_k^-(1))^2 + (\mathbf{x}_k^-(2))^2] \\ \mathbf{H}_{k,res} = 2[\mathbf{x}_k^-(1) \quad \mathbf{x}_k^-(2) \quad 0] \\ \mathbf{v}_{k,res} = \zeta_k \end{cases} \quad (24)$$

式中: ζ_k 为泰勒展开引入的截断误差与重力常量比值。由于 ζ_k 无法直接获得, 需对其进行在线自适应估计。

2.2 级联自适应滤波框架

基于 KF 的姿态滤波估计的实现步骤包括:

$$\mathbf{x}_k^- = \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (25)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (26)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (27)$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k^-) \quad (28)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (29)$$

其中: 式(25)、式(26) 为时间更新, 式(27) ~ 式(29) 为量测更新。泰勒展开数值截断误差通过 \mathbf{K}_k 影响量测新息在状态更新中的权重, 且外加速度建模误差耦合到 \mathbf{x}_k^- 的计算中, 必须根据量测噪声和外加速度变化对 \mathbf{R}_k 进行自适应调整。本研究采用文献[19] 中提出的噪声方差多尺度自适应估计方法在线估计 \mathbf{R}_k 。定义新息 $\mathbf{e}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k^-$, 则有:

$$\mathbf{C}_k = E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T] = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \boldsymbol{\Sigma}_{aa} + \Delta \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k \quad (30)$$

式中: $\boldsymbol{\Sigma}_{aa}$ 为加速度计量测噪声对方差; $\Delta \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k$ 为噪声方差在线调整项。

当滤波信息发生显著变化时, 即:

$$\text{tr}(\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T) > \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \boldsymbol{\Sigma}_{aa} + \Delta \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k) \quad (31)$$

式中: $\text{tr}(\mathbf{A})$ 表示取矩阵 \mathbf{A} 的迹。

利用历史新息序列计算平均新息方差以在线更新 $\Delta \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_k$, 定义:

$$\hat{\mathbf{C}}_k = \frac{1}{\mu} \sum_{j=k-\mu+1}^k \mathbf{e}_j \mathbf{e}_j^T \quad (32)$$

式中: μ 为新息序列长度。设新息方差与平均方差的偏差量为 Δ , 由式(30)可得:

$$\Delta = \hat{\mathbf{C}}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T - \Sigma_{aa} \quad (33)$$

假设载体外加速度对平面内加速度计的量测值影响相互独立, 则:

$$\Delta \hat{\Sigma}_k = \text{diag}(s_1, s_2) \quad (34)$$

式中: $s_i = \max(0, \mathbf{S}_{ii})$, 其中 $\max(a, b)$ 表示取 a 和 b 中的最大值, \mathbf{S}_{ii} 为矩阵的第 i 个对角线元素, 对应平面内加速度计的量测数据有 $i = 1, 2$ 。

基于 Z 轴加速度计量测级联更新的 IMU 带约束抗干扰的姿态估计流程如图 1 所示。

3 试验分析

3.1 转台试验

采用三轴连续转动转台对本研究提出的级联带约束抗干扰 CaKF 算法的有效性进行测试, 其中转台倾角回转误差为 $\pm 5''$, 角位置定位精度为 $\pm 4''$, 最小角速率为 $0.001^\circ/\text{s}$ 。基于荷兰 Xsens 公司 MTI-300 型航姿参考系统(AHRS)验证滤波算法跟踪转台姿态的变化效果, 其内置陀螺仪零偏稳定性为 $10^\circ/\text{h}$, 加速度计零偏稳定性为 $40 \mu\text{g}$, 标称姿态估计精度为 0.2°RMS 。如图 2 所示, 将 MTI-300 固定在工装上并安置于转台台面, 为模拟地面载体行驶过程中外部振动引发的加速度干扰, 转台内轴(对应 MTI-300 的 Y 轴)先静止, 然后以角速率 $3^\circ/\text{s}$ 、角加速度 $3^\circ/\text{s}^2$ 做正弦摇摆运动, 转台外轴旋转至角度为 10° 的位置。MTI-300 测量的转台运动角度变化如图 3 所示, 同步记录转台与 MTI-300 的输出数据, 数据采样频率为 200 Hz , 其中转台数据采用外同步触发获取。运用 KF 和文献[19]中提出的 RKF 对比分析 CaKF 的性能, 除 CaKF 中的约束辅助引入外部参数之外, 3 种滤波器参数配置一致。

转台横滚角角度估计结果如图 4 所示, 其中 MTI-300 和 CaKF 能较好地跟踪转台姿态变化。KF 与 RKF 在角度突变处出现明显的跟踪误差, 其中 RKF 仅基于滤波新息对噪声方差进行自适应, 无法满足角速度较大情况下的角度估计, 其估计结果与 KF 无明显区别。以 MTI-300 输出角度为参考基准, 3 种姿态测量方法下横滚角的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)如表 1 所示, 其中 CaKF 角度跟踪的 RMSE 为 0.42° , 较 RKF 改善了 20.8% 。采用 MATLAB 内置计时函数对 3 种方法的运算耗时进行比较(计算机主频为 2.9 GHz), 结果表明: KF 单采样点运算耗时为 $20.8 \mu\text{s}$, RKF 单采样点运算耗时为 $26.4 \mu\text{s}$, CaKF 单采样点运算耗时为 $35.6 \mu\text{s}$, 即由于 CaKF 增加级联滤波更新步骤, 其运算量大于 RKF。

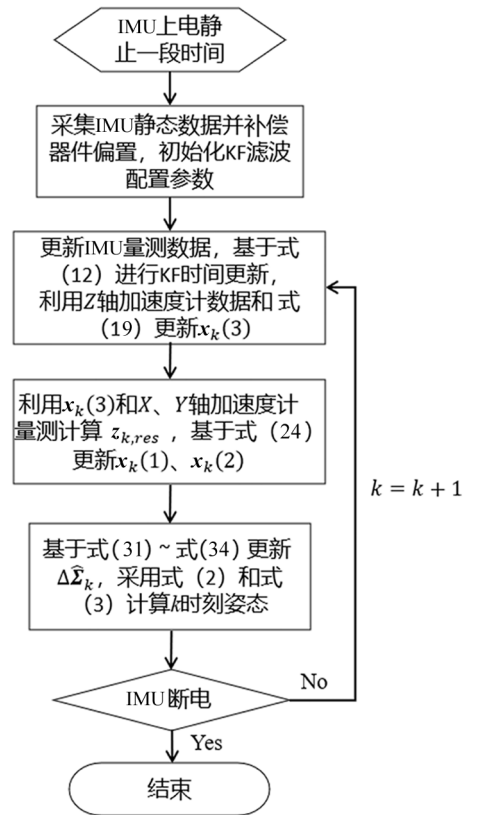


图 1 带约束抗干扰的姿态估计流程

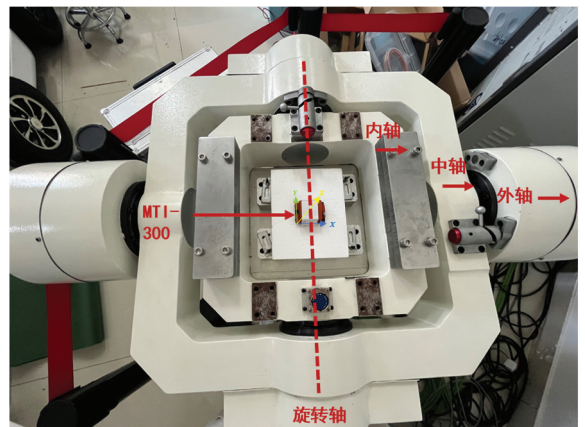


图 2 转台试验

结果表明: KF 单采样点运算耗时为 $20.8 \mu\text{s}$, RKF 单采样点运算耗时为 $26.4 \mu\text{s}$, CaKF 单采样点运算耗时为 $35.6 \mu\text{s}$, 即由于 CaKF 增加级联滤波更新步骤, 其运算量大于 RKF。

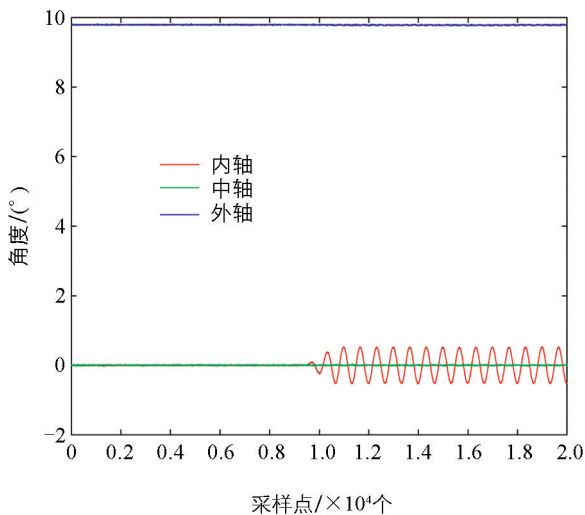


图 3 转台角度输出

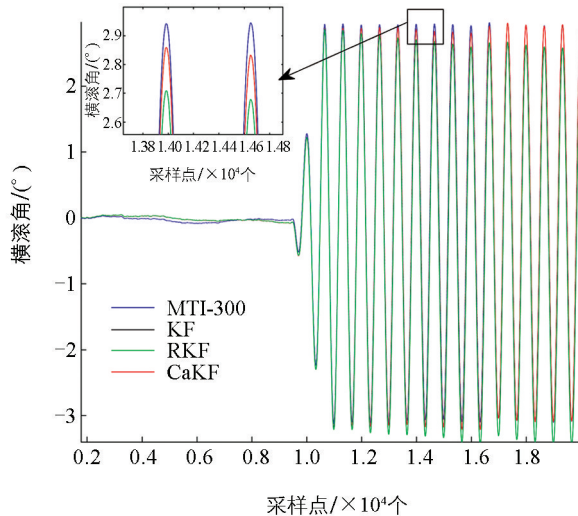


图 4 横滚角估计

表 1 不同姿态估计方法的横滚角 RMSE

方法	横滚角/(°)	方法	横滚角/(°)
KF	0.53	CaKF	0.42
RKF	0.53		

3.2 犁具姿态测量

为进一步验证 CaKF 在田间实际工况下的性能,搭建如图 5 所示的东方红 1104 型拖拉机犁耕作业平台。基于 STM32F429 微控制器和北斗星通 KY-IMU102N-A0 型 MEMS-IMU 自主研发姿态测量板卡,其陀螺仪零偏稳定性为 $12^{\circ}/h$ (10 s 平滑),加速度计零偏稳定性为 $60 \mu g$ 。将自研板卡和 MTI-300 固定于悬挂犁具上,IMU 与 MTI-300 采样频率均为 100 Hz。拖拉机以正常作业速度进行犁耕作业,在线采集自研板卡 IMU 的原始输出并进行后处理,同时与 MTI-300 输出姿态角进行对比分析。



图 5 拖拉机犁耕作业平台

拖拉机耕地过程中的犁具振动会对其俯仰角的估计产生影响,不同滤波算法的俯仰角估计结果如图 6、图 7 所示。由于 KF 未对振动引起的外加速度进行补偿,其与 MTI-300 俯仰角区别较大。RKF 采用自适应量测噪声估计减少外加速度对陀螺仪预测姿态校正的影响,估计误差较 KF 有明显改善。然而随着振动时间的增加,RKF 滤波新息逐渐被状态估计误差污染,导致其抗干扰能力逐渐减弱,表现在图 7 中 RKF 俯仰角误差随采样点数的增加而逐渐增大。基于 Z 轴加速度计振动数据隔离的 CaKF 较 RKF 更能有效地抑制长时间的外部振动干扰,以 MTI-300 输出作为俯仰角参考值,不同滤波方法的俯仰角估计 RMSE 如表 2 所示。由表 2 可知,CaKF 较 KF 在犁具俯仰角估计上改善了 32.2%,其在振动工况下且持续时间较长时较 RKF 能更好地抑制外部加速度的干扰。

拖拉机耕地过程中的犁具振动会对其俯仰角的估计产生影响,不同滤波算法的俯仰角估计结果如图 6、图 7 所示。由于 KF 未对振动引起的外加速度进行补偿,其与 MTI-300 俯仰角区别较大。RKF 采用自适应量测噪声估计减少外加速度对陀螺仪预测姿态校正的影响,估计误差较 KF 有明显改善。然而随着振动时间的增加,RKF 滤波新息逐渐被状态估计误差污染,导致其抗干扰能力逐渐减弱,表现在图 7 中 RKF 俯仰角误差随采样点数的增加而逐渐增大。基于 Z 轴加速度计振动数据隔离的 CaKF 较 RKF 更能有效地抑制长时间的外部振动干扰,以 MTI-300 输出作为俯仰角参考值,不同滤波方法的俯仰角估计 RMSE 如表 2 所示。由表 2 可知,CaKF 较 KF 在犁具俯仰角估计上改善了 32.2%,其在振动工况下且持续时间较长时较 RKF 能更好地抑制外部加速度的干扰。

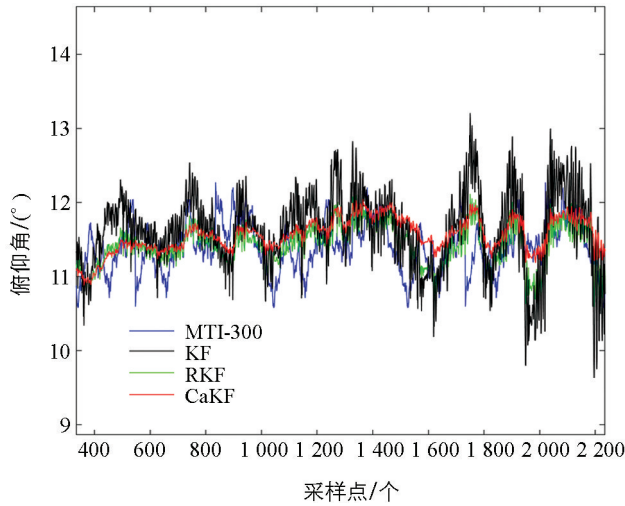


图 6 犁具俯仰角估计

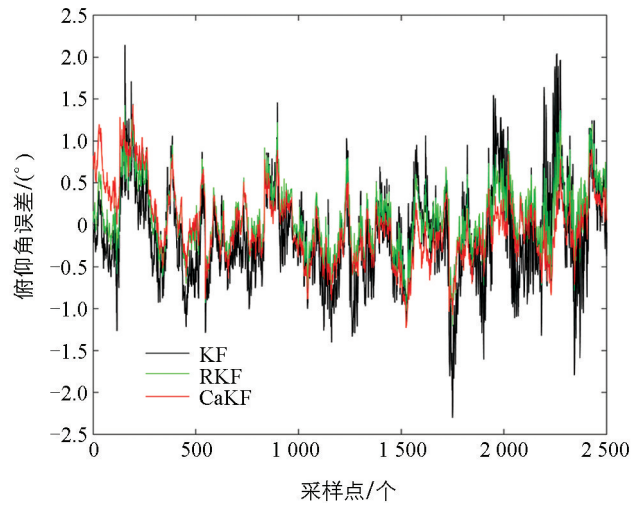


图 7 犁具俯仰角估计误差

表 2 不同姿态估计方法的俯仰角 RMSE

方法	俯仰角/(°)	方法	俯仰角/(°)
KF	0.59	CaKF	0.40
RKF	0.43		

4 结论

针对农机作业复杂工况下机具高精度姿态估计的需求, 提出一种基于平面加速度运动约束的姿态测量 CaKF 估计方法, 分别采用三轴转台和拖拉机田间耕地试验验证 CaKF 的有效性。转台试验表明 CaKF 角度跟踪优于 KF 和 RKF, 其横滚角 RMSE 由 RKF 的 0.53° 降低为 0.42° 。拖拉机耕地作业试验表明 CaKF 较 KF 在俯仰角估计上性能提升 32.2%, 且较 RKF 能更好地抑制耕作犁具长时间外部加速度的干扰。后续将围绕犁具耕深测量与控制中不同干扰对应的姿态误差建模与补偿开展研究。

参考文献:

- [1] 刘杰, 付兴兰, 李旭, 等. 丘陵山地柑橘果园机器人自主导航与精确控制系统设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(8): 184-197.
- [2] HE J, LUO X W, ZHANG Z G, et al. Positioning Correction Method for Rice Transplanters Based on the Attitude of the Implement [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 105598.
- [3] 薛秀云, 马肇冰, 杨钟杰, 等. 基于 3D 激光 SLAM 的果园导航感知系统 [J/OL]. 河南农业大学学报, (2024-04-30) [2025-03-20]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.001>.
- [4] 夏俊芳, 李栋, 刘国阳, 等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 386-395.
- [5] 黄培奎, 张智刚, 罗锡文, 等. 农机具姿态倾角测量系统设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 9-16.
- [6] LEE J K, PARK E J, ROBINOVITCH S N. Estimation of Attitude and External Acceleration Using Inertial Sensor Measurement during Various Dynamic Conditions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(8): 2262-2273.
- [7] SHAABAN G, FOURATI H, KIBANGOU A, et al. MARG Sensor-Based Attitude Estimation on $SO(3)$ under Unknown External Acceleration [J]. IEEE Control Systems Letters, 2023, 7: 3795-3800.

- [8] HU J S, SUN K C. A Robust Orientation Estimation Algorithm Using MARG Sensors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(3): 815-822.
- [9] MAHONY R, HAMEL T, PFLIMLIN J M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(5): 1203-1218.
- [10] WU J, ZHOU Z B, CHEN J J, et al. Fast Complementary Filter for Attitude Estimation Using Low-Cost MARG Sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(18): 6997-7007.
- [11] WILSON S, EBERLE H, HAYASHI Y, et al. Formulation of a New Gradient Descent MARG Orientation Algorithm: Case Study on Robot Teleoperation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 130: 183-200.
- [12] SABATINI A M. Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing [J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2006, 53(7): 1346-1356.
- [13] 黄培奎, 张智刚, 罗锡文, 等. 田间作业车辆外部加速度辨识与姿态测量系统研制 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 9-15.
- [14] 林新华, 赵陶然, 林威, 等. 基于序贯自适应误差状态 Kalman 滤波的 MARG 姿态估计算法 [J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(12): 1175-1180.
- [15] 乔美英, 高翼飞, 李宛妮, 等. 基于模糊鲁棒自适应 CKF 算法的 MEMS-IMU 姿态估计 [J]. *中国惯性技术学报*, 2022, 30(3): 296-303.
- [16] 储开斌, 赵爽, 冯成涛. 基于 Mahony-EKF 的无人机姿态解算算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(12): 12-18.
- [17] 刘春, 何敏, 戴雷. 基于 Mahony 与改进 Kalman 融合的姿态解算方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(9): 64-71.
- [18] DING W, GAO Y. Attitude Estimation Using Low-Cost MARG Sensors with Disturbances Reduction [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1009111.
- [19] CANDAN B, SOKEN H E. Robust Attitude Estimation Using IMU-Only Measurements [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9512309.
- [20] JAVED M A, TAHIR M. A Gyroless Attitude Estimation for Ground Vehicle under Severe Dynamic Conditions [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 13538-13548.
- [21] 冯江, 张慧, 张喜海, 等. 基于反步滑模算法的植保无人机姿态控制研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(1): 55-65.

责任编辑 柳剑