

基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法

刘进一 杜岳峰 张 硕 朱忠祥 毛恩荣 陈 雨

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为解决实际农田环境中农业机械自动导航系统的位姿信息易受跟踪卫星数动态变化、天线遮挡、数据传输错误等因素影响,造成定位精度和稳定性变差的问题,采用全球导航卫星系统(GNSS)、微机械惯性测量单元(MIMU)及航位推算(DR)相融合的组合导航定位系统,建立了农业机械两轮运动学定位模型,针对系统状态噪声不稳定的因素,提出了一种根据当前估计值与预测值的偏差自适应地调节系统状态协方差阵的扩展卡尔曼滤波算法,并分别基于静止状态和直线导轨运动状态进行了试验验证。试验结果表明,在静止状态和直线导轨运动状态下,采用自适应滤波算法的航向角平均值绝对偏差分别为0.0014°、0.0245°,标准差分别为0.0474°、0.2511°;位置距离平均偏差分别为0.0037m、0.0076m,标准差分别为0.0010m、0.0044m,与固定值滤波算法相比,自适应滤波算法的各项评价指标得到了明显改善,进一步验证了算法改进的必要性和优越性。

关键词: 农业机械; 导航; 信息融合; 全球导航卫星系统; 微机械惯性单元; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TP274.2; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0001-07

Automatic Navigation Method for Agricultural Machinery Based on GNSS/MIMU/DR Information Fusion

Liu Jinyi Du Yuefeng Zhang Shuo Zhu Zhongxiang Mao Enrong Chen Yu

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The real-time accurate position update technology of agricultural machinery was one of the most important studies in agricultural machinery automatic navigation system, and it has a very important significance to improve the efficiency of intelligent agricultural production. However, in the field operation of agricultural machinery automatic navigation system, the situations that the number of satellite was unstable, the GPS signal was blocked, and data transmission was wrong would cause low location precision and poor stability. In order to solve the above problems, a two dimensional kinematic model of agricultural machinery was built, and an adaptive extended Kalman filtering algorithm which adjusted the system's state covariance was carried out based on the integrated navigation system of GNSS/MIMU/DR. The algorithm was used to compute the difference of present estimate and predictive value. When the difference became greater, it showed that the system state had changed greatly, so as to make appropriate adjustments to the system state covariance matrix for better filtering. The algorithm was verified by static test and linear guide rail test to accurately evaluate the accuracy of the integrated navigation and positioning system. The tests indicated that: in static state, the average value deviation of heading was 0.0014°, the maximum deviation was 0.0998°, the standard deviation was 0.0474°, and the position average deviation was 0.0037m, the maximum deviation was 0.0081m, the standard deviation was 0.0010m; in straight rail state, the average value deviation of heading was 0.0245°, the maximum deviation was 0.4324°, the standard deviation was 0.2511°, and the position average deviation was

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102307)

作者简介: 刘进一(1989—),女,博士生,主要从事农业机械自动导航相关技术研究,E-mail: jingyao1123@126.com

通信作者: 朱忠祥(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、仿真以及自动导航研究,E-mail: zhuzhongxiang@cau.edu.cn

0.007 6 m, the maximum deviation was 0.018 6 m, the standard deviation was 0.004 4 m. All the different evaluations proved that the adjusted filtering was superior to the traditional filtering, which indicated the necessity and superiority of the proposed algorithm. At the same time, it is proved that the method can satisfy the accuracy and stability requirements of the agricultural machinery navigation and positioning system.

Key words: agricultural machinery; navigation; information fusion; global navigation satellite system; miniature inertial measurement unit; extended Kalman filtering algorithm

引言

以现代信息技术为支撑的智能农业装备的发展和应用,不仅能够推动精准农业的建设和发展,而且能大幅度地减轻农民劳动强度及提高生产效率。要实现智能农业装备的高效精准工作,首先要依赖于能否对农业机械位置进行准确感知,即农业机械的定位准确度能否保证智能农业的生产效率和作业精准性^[1]。随着农业机械自动导航技术的发展,对农业机械定位精度和稳定性的要求越来越高。由于田间复杂工作环境因素的影响,可能导致传感器信息丢失而造成定位不准确,因此使用单一传感器定位会受到很大局限,多种传感器融合优势互补成为组合导航定位系统发展趋势,文献[2-3]采用GPS、陀螺仪和加速度计等传感器来提高田间车辆作业时的定位准确度和抗干扰性,文献[4]开发了基于机器视觉、RTK-GPS和地磁方位传感器(GDS)信息融合的组合导航系统。当使用多种传感器融合的时候,就涉及到融合算法的选用,而在农业机械定位应用中,若选择复杂的算法,不仅会增加计算量,也会使融合效率降低。文献[5]为了提高农业机械车载GPS和DR组合导航系统定位的精度,将模糊逻辑和卡尔曼滤波相结合,对量测噪声协方差阵进行在线修正,以提高滤波后的定位精度;文献[6]设计了由GPS、电子罗盘和IMU组成的GPS/DR组合导航定位系统,运用基于置信度加权的自适应卡尔曼滤波器提高了组合导航定位系统的容错性能和定位精度。在农业机械的组合导航定位系统研究中,农业机械的位置、速度和航向角是决定农业机械作业导航精度的重要参数,文献[7-9]采用GPS与MEMS-IMU低价传感器进行了速度信息和位置信息或位置信息和姿态信息或速度信息和姿态信息的融合模式,能够获取比单一传感器更高精度的定位信息,但是目前综合利用速度、位置、航向信息的融合研究相对较少,且大多为仿真试验,缺乏实际应用的试验。对于定位方法的精度评价,目前运用较多的是选用精度更高的一组设备提供路径参考值^[5],或在仿真分析时,给定一个预先设定的路径参考真值,用均方

根误差值给予评价^[10],还有通过在电子地图上标定对应路径的信息作为参考值^[11],或是直接比较滤波前后的轨迹平滑度^[12],这2种方式的参考价值均不高,并不能很好地评价算法的好坏。

因此,综合考虑组合导航定位系统的准确性、实时性与快速性要求,以及在农业机械实际应用上的推广,本文采用双天线全球导航卫星系统(GNSS)和由微机械惯性测量单元(MIMU)构成的航位推算定位系统(DR)相结合的定位方式,充分利用绝对定位和相对定位的互补优势。运用农业机械速度信息、位置信息和姿态信息共同融合的模式,建立农业机械两轮运动学定位模型,提出一种自适应调节状态协方差阵的扩展卡尔曼滤波算法,实现简单有效的导航定位,并设计一个参考导轨以量化实车试验中的滤波精度,验证滤波算法的可靠性。

1 组合导航定位系统方案分析

1.1 组合导航定位系统组成

组合导航系统采用双天线全球导航卫星系统(GNSS)和微机械惯性测量单元(MIMU)的组合导航定位方式,该组合导航定位系统原理如图1所示。其中GNSS设备选用上海华测公司的T5型号接收机及配套N71J移动站,整套设备由双天线移动站、移动站接收机、基站、基站接收机、天线等构成,通过双天线实时动态差分计算得到位置与航向角信息;MIMU采用美国ADI半导体公司的型号为ADIS16362的惯性测量单元,它可以直接测得3个方向的加速度和3个方向的角速度信息。本文选择这种绝对定位和相对定位融合的方式是为了使位置信息和航向角信息均能达到更高的精度。

1.2 组合导航定位系统算法设计

1.2.1 农业机械定位模型

假设农业机械的田间作业为二维平面内的运动,且认为农业机械左右对称,作业过程中无侧倾、侧滑和俯仰等运动,并且不考虑农业机械轮胎与地面间的相互作用,那么可以把农业机械的运动看作是类似平面刚体平动与旋转运动的两轮运动学模型,如图2所示。其中, $X-Y$ 为大地平面直角坐标

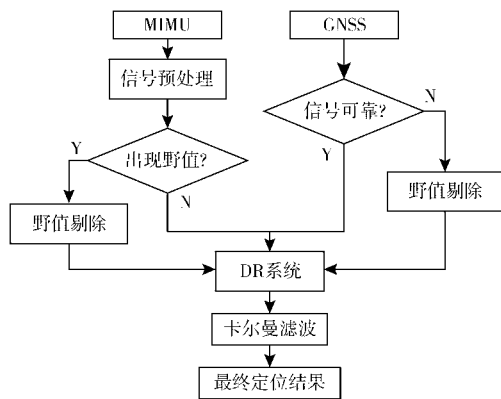


图1 组合导航定位系统原理示意图

Fig.1 Diagram of integrated navigation system

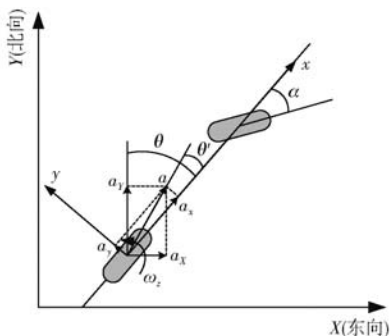


图2 农业机械两轮运动学模型

Fig.2 Two dimensional kinematic model of agricultural machinery

系, $x-y$ 为农业机械车身坐标系。

因此, 根据航位推算原理, 可将农业机械的运动问题描述为

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

其中 $\mathbf{x} = [x, y, u_x, u_y, \theta]^T$

$$\mathbf{z} = [x_z, y_z, u_z, \theta_z]^T$$

式中 $\mathbf{x}_k$ ——系统状态向量 $\mathbf{z}_k$ ——系统量测向量
 $\mathbf{w}_k$ ——系统状态噪声 $\mathbf{v}_k$ ——系统量测噪声
 x, y ——东向和北向的绝对位置坐标
 u_x, u_y ——农业机械纵向和横向速度
 θ ——农业机械车体航向角
 x_z, y_z ——GPS 采集到的东向和北向位置坐标
 u_z ——农业机械前进速度
 θ_z ——GPS 采集到的农业机械车体航向角

由两轮运动学模型可推导出系统状态方程为

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + u_{xk-1} \Delta t + w_{xk-1} \\ y_k = y_{k-1} + u_{yk-1} \Delta t + w_{yk-1} \\ u_{xk} = u_{xk-1} + \sqrt{a_{xk-1}^2 + a_{yk-1}^2} \Delta t \sin(\theta_{k-1} - \theta'_{k-1}) + w_{uxk-1} \\ u_{yk} = u_{yk-1} + \sqrt{a_{xk-1}^2 + a_{yk-1}^2} \Delta t \cos(\theta_{k-1} - \theta'_{k-1}) + w_{uyk-1} \\ \theta_k = \theta_{k-1} + \omega_{zk-1} \Delta t + w_{\theta k-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中 a_x, a_y ——纵向和横向加速度

ω_z ——横摆角速度

θ' ——加速度方向与车体航向的夹角

Δt ——时间间隔

其中, 加速度和横摆角速度由 MIMU 测量得到。

而系统量测方程为

$$\begin{cases} x_{zk} = x_k + v_{xzk} \\ y_{zk} = y_k + v_{yzk} \\ u_{zk} = \sqrt{u_{xk}^2 + u_{yk}^2} + v_{uzk} \\ \theta_{zk} = \theta_k + v_{\theta zk} \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 野点剔除

由于环境影响、遮挡或者数据传输中的原因, 会导致所采集到的数据中包含一些错误的量测值, 它们可能在量级上与正常量测值相差很大, 或者在量级上虽没有明显差别, 但是误差超过了正常状态所允许的误差范围, 将其称之为野点。野点的存在会给实时滤波处理带来很大的误差, 甚至导致滤波发散, 因此需要在进行卡尔曼滤波算法之前进行预处理判断是否出现野点, 并剔除。

定义量测残差 $\mathbf{E}_k$ 为量测值 $\mathbf{Z}_k$ 与量测预测值的差值, 即 $\mathbf{E}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k$, 根据不同的量测向量设定不同的阈值, 当量测残差大于此阈值时, 将该点视为野点, 在具体操作的时候则剔除野点, 将上一次采集的量测值赋给此次量测值。关于各量测量阈值的选取, 可以在不同的试验条件下测定。

1.2.3 自适应扩展卡尔曼滤波算法

GNSS/DR 组合导航定位实现的关键在于采用什么方法和技术来融合 2 种定位系统的信息以获得最优的定位结果。而卡尔曼滤波算法及其衍生出的各类改进的算法在组合导航定位系统中得到了广泛应用与推广, 根据本文所研究的问题, 采用一种自适应调节系统状态协方差矩阵的扩展卡尔曼滤波算法。扩展卡尔曼滤波算法可以利用非线性系统的局部线性特性来近似描述其非线性, 是一种次优估计方法, 扩展卡尔曼滤波在弱非线性系统的处理中应用较多。能够应用扩展卡尔曼滤波算法的一个前提是系统状态方程和量测方程的非线性变换 (式 (1) 中 f 和 h) 均可微, 进而求得系统状态方程和量测方程的雅可比矩阵。而另一个前提是系统噪声统计和量测噪声统计事先已知, 其中量测噪声根据传感器的信息可以先验得到, 但是由于系统模型的不确定因素较多而导致系统状态噪声的统计特性容易出现较大偏差, 此时若系统噪声协方差阵 $\mathbf{Q}$ 的取值与实际相差较多, 则可能引起滤波发散。因此, 需要对系统状态噪声阵 $\mathbf{Q}$ 进行自适应调节, 以提高滤波的精

确度和稳定性。在针对不确定的系统噪声协方差阵 Q 和量测噪声协方差阵 R 的算法中, Sage - Husa 算法^[13]具有一定的代表性, Sage - Husa 算法利用遗忘因子的引入降低历史信息对 Q 阵和 R 阵的影响, 而提高新测量信息的权重, 但是这种算法随时间的推移, 计算量会逐渐增大, 影响实时性。为了减少自适应调节的计算量, 本文采用一种自适应调节状态噪声协方差阵的方法, 根据当前估计值与预测值之间的偏差动态地调整状态噪声协方差阵 Q , 以得到合适的卡尔曼滤波增益矩阵 K , 提高滤波器的准确性和稳定性。

首先, 根据扩展卡尔曼滤波算法的思想, 为了方便对算法进一步描述, 将式(2)、(3)离散化为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (5)$$

式中 $\mathbf{X}_k$ —— k 时刻的 n 维状态估计

$\mathbf{A}_{k,k-1}$ —— $k-1$ 时刻到 k 时刻的系统状态雅可比矩阵

$\mathbf{W}_{k-1}$ —— $k-1$ 时刻的系统噪声

$\mathbf{Z}_k$ —— k 时刻的量测向量

$\mathbf{H}_k$ ——量测雅可比矩阵

$\mathbf{V}_k$ —— k 时刻的量测噪声

由于状态噪声越大, 相应的状态噪声协方差阵 Q 的值越大, 而卡尔曼增益 K 与状态噪声协方差矩阵 Q 成正比, 系统状态估计更新又与卡尔曼增益 K 有关, 所以当 Q 值越大时, 卡尔曼增益 K 值越大, 系统状态估计更新值被修正的越多, 表明系统状态估计在此时越依赖于量测值, 并且越容易捕捉系统运动状态, 滤波收敛的速度越快; 反之, 当 Q 值越小时, 系统状态估计越依赖系统状态方程的预测值。因此, 以上述为据, 首先假设状态向量各维度之间相互独立, 即 Q 阵为对角矩阵, 通过设置一个比例系数 κ 以及判断 e_k 的大小来检测系统运动状态的变化, 从而动态地来调整状态噪声协方差阵 Q 值的大小, 以便稳定地跟踪系统变化。则自适应扩展卡尔曼滤波算法的实现过程可描述为:

(1) 初始化 $\hat{\mathbf{X}}_0, \mathbf{P}_0$ 。

(2) 计算系统状态方程和量测方程的雅可比矩阵

$$\mathbf{A}_{k,k-1} = \left. \frac{\partial f(\mathbf{x}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \right|_{\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1}}$$

$$\mathbf{H}_{k,k-1} = \left. \frac{\partial h(\mathbf{x}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \right|_{\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1}}$$

(3) 系统状态及协方差预测

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k,k-1}^T + \hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$$

(4) 计算量测残差

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$$

(5) 计算卡尔曼滤波增益

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \hat{\mathbf{R}}_{k-1})^{-1}$$

(6) 系统状态估计及协方差估计更新

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k} = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k,k-1}$$

(7) 计算估计值和预测值之差

$$\mathbf{e}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k} - \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}$$

(8) 调节状态噪声协方差阵

$$\mathbf{Q}' = \kappa \mathbf{Q}$$

其中, κ 取值与 $\mathbf{e}_k$ 有关。

根据卡尔曼滤波算法的推导过程可知, 当滤波估计值与预测值之差超过某一临界值 s_x 时, 即表明这一时刻运动状态发生了较大变化, 此时则需要更大程度地依赖量测值来修正滤波值, 即状态噪声协方差阵 Q 的值应相应调大; 当滤波估计值与预测值之差低于临界值 s_x 时, 则表明运动状态没有发生大的变化, 可以保持当前状态噪声协方差阵 Q 不变。

基于本文的研究目的, 假设估计值与预测值的偏差阵 $\mathbf{e}_k = [\Delta x, \Delta y, \Delta u_x, \Delta u_y, \Delta \theta]^T$, 对应临界值阵 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5]^T$, 其中 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 根据试验得到的先验信息确定, 调节系数矩阵 $\kappa = \text{diag}[\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5]$ 。为了简化算法, 根据系统的特征, 重点监测航向角的变化, 其次再监测其他状态量的变化。算法具体流程如图3所示。

2 组合导航定位系统试验与精度分析

为了能更精确地评价组合导航定位系统的精度, 搭建了如图4所示的铝制导轨及放置传感器的移动支架, 以此构建一个直线路径的试验环境。运用 Visual Studio 2008 编写了传感器数据采集及滤波的程序, 实时采集传感器数据并进行融合处理, 其中滤波程序有固定状态噪声协方差和自适应调整状态噪声协方差2种。

通常用来评价组合导航融合好坏的指标有: 平均绝对误差 (MAE)^[14]、均方根值 (RMS)^[15]、滤波前后偏差的最大值、平均值及方差^[5]等。为了能更好地评价滤波的有效性, 对于静止和动态的航向角和位置信息分别采用不同的评价指标。对于静止状态和运动状态的航向角, 对量测值和滤波值分别取平均值, 计算2个平均值之间的绝对偏差, 同时计算滤波值对量测平均值的最大偏差, 偏差越小说明滤波越不失真; 再对比计算量测值和滤波值的标准差, 标准差越小说明滤波越平稳。对于静止状态的位置信息, 分别找到量测值中心点和滤波值中心点, 计算2

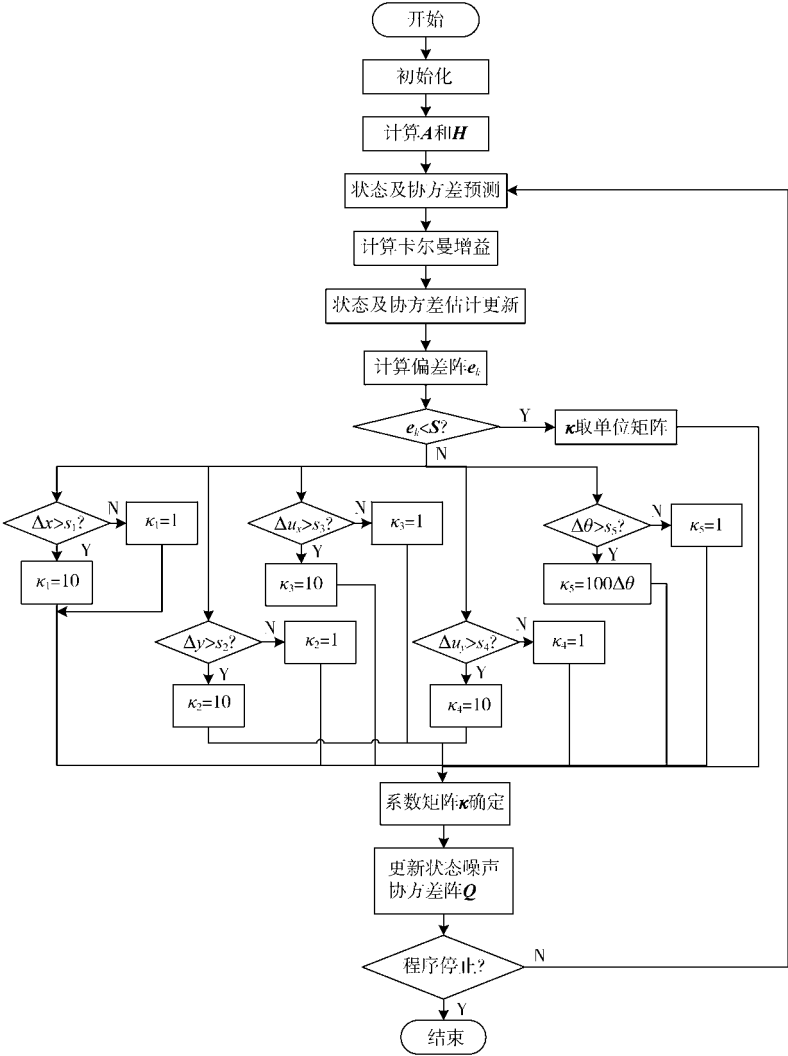


图3 程序设计流程图
Fig. 3 Flow chart of program design

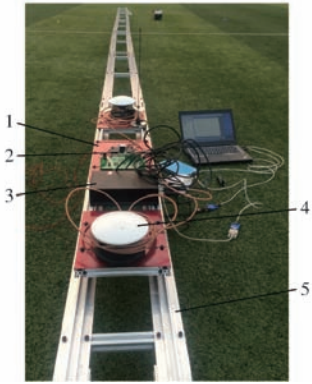


图4 试验导轨及设备实物图

Fig. 4 Hardware of testing guide rail and equipment
1. 移动支架 2. MIMU 传感器 3. 移动站接收机 4. 移动站天线
5. 导轨

个中心点的距离偏差,距离偏差越小说明滤波越不失真;计算滤波值与量测值中心点的距离偏差,取最大距离偏差为滤波半径,滤波半径越小说明滤波越有效;计算距离偏差的标准差,标准差越小说明滤波越平稳。而对于运动状态的位置信息,计算滤波值

和量测值与直线的平均距离偏差和最大距离偏差,偏差越小说明滤波越有效;计算滤波值和量测值与直线距离偏差的标准差,标准差越小说明滤波越平稳。

2.1 导轨静态试验及精度分析

如图 5 所示为静止状态航向角和位置的滤波情况,包括自适应滤波和固定 Q 值滤波。其中,图 5a 所示在 110 s 附近航向角出现了野值,自适应滤波和固定 Q 值滤波都实现了剔除野值,在剔除野值后(如图 5b)自适应滤波与 GPS 量测值的平均值绝对偏差为 0.0014° ,最大偏差值为 0.0998° ,固定 Q 值滤波与 GPS 量测值的平均值绝对偏差为 0.0054° ,最大偏差值为 0.1365° ,2 种滤波方法都保证了滤波效果不失真,且自适应滤波效果优于固定 Q 值滤波;GPS 量测值的标准差为 0.0905° ,自适应滤波的标准差为 0.0474° ,固定 Q 值滤波的标准差为 0.0698° ,可见静止状态时 2 种滤波方法都达到了一定的有效性,但自适应滤波的平稳性优于固定 Q

值滤波。图5c所示静止状态自适应滤波中心点位置距GPS量测值中心点位置0.0037m,滤波半径为0.0081m,位置点波动标准差为0.0010m,固定 Q

值滤波中心点位置距GPS量测值中心点位置0.0052m,滤波半径为0.0124m,位置点波动标准差为0.0019m,由此可见自适应滤波更有效。

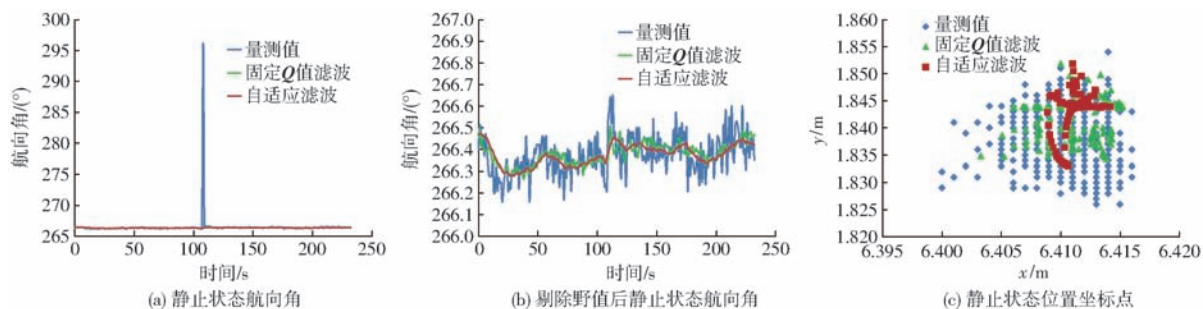


图5 静止状态航向角和位置

Fig.5 Heading angle and location in static state

2.2 导轨直线运动试验及精度分析

如图6所示为直线运动状态航向角和位置的滤波情况,包括自适应滤波和固定 Q 值滤波。其中,图6a所示为直线导轨上运行的航向角结果,固定 Q 值滤波平均值与量测值平均值的绝对偏差为0.1198°,最大偏差为0.5476°,标准差为0.2534°;自适应滤波平均值与量测值平均值的绝对偏差为0.0245°,最大偏差值为0.4324°,标准差为0.2511°。单从标准差数据看,自适应滤波与固定 Q 值滤波平稳性相差不大,但从曲线走势上看,自适应滤波的跟

随性明显优于固定值滤波,即保证了滤波不失真。如图6b、6c所示为直线导轨上运行的位置结果,根据图6c可知,量测值平均距离偏差为0.0198m,最大位置距离偏差为0.0786m,标准差为0.0166m;固定 Q 值滤波的平均距离偏差为0.0176m,最大位置距离偏差为0.0399m,标准差为0.0112m;自适应滤波的平均距离偏差为0.0076m,最大位置距离偏差为0.0186m,标准差为0.0044m,自适应滤波明显优于固定值滤波,与滤波前量测值相比精度也得到了提高。

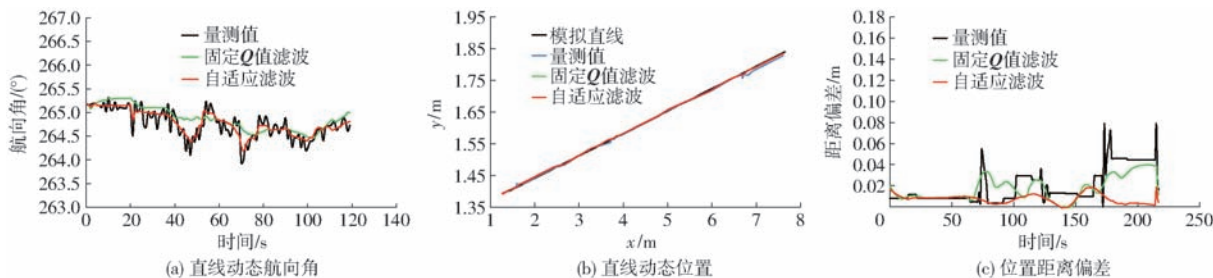


图6 直线动态航向角和位置

Fig.6 Heading angle and location in linear state

3 结束语

针对农业机械导航定位系统需要高精度定位、高稳定性等问题,研究了一种基于GNSS/MIMU/DR组合导航系统的位置、航向信息融合的扩展卡尔曼滤波算法,采用自适应调节状态噪声协方差阵的方式提高数据融合的有效性和跟随性,减少因系统状态噪声不稳定而引起的融合偏差,通过设置调节系数矩阵来实时监测系统状态噪声的变化,调节状态噪声协方差阵,从而重新分配量测值和系统模型预测值的比例,得到最接近真实值的估计状态。将此算法分别在静止状态和直线导轨上进行了试验验

证,静止状态的固定值滤波,航向角平均值绝对偏差为0.0054°,位置平均偏差为0.0052m,静止状态的自适应滤波,航向角平均值绝对偏差为0.0014°,位置平均偏差为0.0037m;直线导轨状态的固定值滤波,航向角平均值绝对偏差为0.1198°,位置平均偏差为0.0176m,直线导航状态的自适应滤波,航向角平均值绝对偏差为0.0245°,位置平均偏差为0.0076m。试验结果表明,无论是在静止状态还是运动状态下,对于航向角和位置信息的融合,自适应滤波的有效性和跟随性都要优于固定值滤波,进而证明了这种自适应调节系统状态协方差矩阵的方法可以满足农业机械导航定位的精度及稳定性要求。

参 考 文 献

- 1 HUANG J Y, TSAI C H. Improve GPS positioning accuracy with context awareness[C]//IEEE International Conference on Ubi-Media Computing, 2008:154 – 159.
- 2 冯雷. 基于 GPS 和传感技术的农用车辆自动导航系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
FENG Lei. Study on navigation system for off-road vehicle guidance based on GPS and sensor technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 3 刘晓光,胡静涛,白晓平,等. 插秧机多传感器组合导航方法研究[J]. 农机化研究,2014(5):24 – 30.
LIU Xiaoguang, HU Jingtao, BAI Xiaoping, et al. Research on multi-sensor integrated navigation for transplanter[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014(5):24 – 30. (in Chinese)
- 4 REID J F, QIN Z, NOGUCHI N, et al. Agricultural automatic guidance research in north America[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 25(1 – 2):155 – 167.
- 5 周建军,王秀,张睿,等. 农业机械车载 GPS 和 DR 组合导航系统定位方法[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):262 – 265.
ZHOU Jianjun, WANG Xiu, ZHANG Rui, et al. GPS/DR integrated navigation positioning method for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):262 – 265. (in Chinese)
- 6 朱忠祥,韩科立,宋正河,等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):210 – 215.
ZHU Zhongxiang, HAN Keli, SONG Zhenghe, et al. Fusion positioning method based on weighted-confidence for tractor integrated navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):210 – 215. (in Chinese)
- 7 李昂,王伟,吴佳楠. 低成本 IMU/GPS 组合导航系统设计[J]. 测控技术,2012,31(8):12 – 15.
LI Ang, WANG Wei, WU Jianan. Design in low-cost integrated navigation system[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(8):12 – 15. (in Chinese)
- 8 徐勇,何秀凤. GPS/IMU 组合定位定向系统设计[J]. 全球定位系统,2004,29(4):24 – 28.
XU Yong, HE Xiufeng. Design of GPS/IMU integration for positioning and orientation[J]. GNSS World of China, 2004, 29(4):24 – 28. (in Chinese)
- 9 贾瑞才,伍蔡伦,智奇楠,等. 低成本 MEMS IMU 与 GPS 组合导航算法研究[C]//中国卫星导航学术年会, 2013.
JIA Ruicai, WU Cailun, ZHI Qinan, et al. Research on lower cost MEMS IMU and GPS integrating algorithm[C]//China Satellite Navigation Conference, 2013. (in Chinese)
- 10 杨荣荣,张玲. UKF 在车辆组合定位技术中的应用[J]. 科学技术与工程,2010,10(25):6310 – 6313.
YANG Rongrong, ZHANG Ling. Application of UKF in vehicle integrated positioning technology[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(25):6310 – 6313. (in Chinese)
- 11 寇艳红,张其善,李先亮. 车载 GPS/DR 组合导航系统的数据融合算法[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(3):264 – 268.
KOU Yanhong, ZHANG Qishan, LI Xianliang. Data fusion algorithm for GPS/DR integrated vehicle navigation system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(3):264 – 268. (in Chinese)
- 12 刘旭,张其善,杨东凯. 一种用于 GPS/DR 组合定位的非线性滤波算法[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(2):184 – 187.
LIU Xu, ZHANG Qishan, YANG Dongkai. Nonlinear filter algorithm for GPS/DR integrated positioning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2):184 – 187. (in Chinese)
- 13 魏伟,秦永元,张晓冬,等. 对 Sage – Husa 算法的改进[J]. 中国惯性技术学报, 2012,20(6):678 – 686.
WEI Wei, QIN Yongyuan, ZHANG Xiaodong, et al. Amelioration of the Sage – Husa algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012,20(6):678 – 686. (in Chinese)
- 14 张京,陈度,王书茂,等. 农业机械 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法[J]. 农业机械学报, 2015,46(增刊):1 – 7.
ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Research of INS/GNSS heading information fusion method for agricultural machinery automatic navigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(Supp.):1 – 7. (in Chinese)
- 15 李士心,王岩飞,杨晔,等. 低成本 GPS/IMU 组合导航中的速度匹配对准研究[J]. 中国惯性技术学报,2005,13(1):35 – 37.
LI Shixin, WANG Yanfei, YANG Ye, et al. Velocity matching alignment of low cost INS/GPS integrated system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(1):35 – 37. (in Chinese)