

基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法研究

林爽, 张依恋[†], 丁宗贺, 牛王强

(1. 上海海事大学 航运技术与控制工程交通行业重点实验室, 上海 201306)

摘要: 本文针对自动跨运车状态估计问题, 设计改进的集员滤波算法, 在未知有界噪声环境下, 获取自动跨运车实时运动状态的状态估计信息. 首先, 将自动跨运车运动学模型进行线性化处理, 同时考虑其转向因素和侧倾因素, 得到车辆的动力学线性模型; 其次, 将可能存在的内外部扰动建模为未知有界噪声, 进而设计改进的集员滤波器, 通过获取状态椭圆域实现对自动跨运车运动参数的状态估计, 同时给出改进的集员滤波算法; 最后, 通过仿真实验验证所提算法的可行性和有效性. 实验结果表明, 所提出的改进集员滤波算法具有良好的状态估计性能.

关键词: 集员滤波器; 未知有界噪声; 自动跨运车; 状态估计; 线性离散时变系统; 车辆动力学

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0501

引用格式: 林爽, 张依恋, 丁宗贺, 等. 基于改进集员滤波的港口自动跨运车状态估计方法研究 [J]. 控制与决策.

State estimation of automated straddle carriers via improved set-membership filtering approach

LIN Shuang, ZHANG Yi-lian[†], DING Zong-he, NIU Wang-qiang

(1. Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering Ministry of Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper is concerned with the state estimation problem for an automated straddle carrier. A novel improved set-membership filtering scheme is proposed to solve the state estimation problem of the automated straddle carrier under unknown-but-bounded (UBB) process and measurement noises. First, the kinematic model of the automated straddle carrier is linearized to obtain the vehicle linear dynamic model. Then, an improved filtering method is designed to realize the state estimation of vehicle motion parameters by obtaining the state estimation ellipsoids. Finally, the simulations verify the feasibility and effectiveness of the proposed method. The experimental results show that the proposed algorithm has good state estimation performance.

Keywords: set-membership filter; unknown-but-bounded noise; automated straddle carrier; state estimation; LDTV system; vehicle dynamics

0 引言

随着智慧港口概念的普及和港口自动化技术的发展, 自动化集装箱码头建设不断推进. 自动跨运车是自动化集装箱码头的一类新型运输设备, 准确获取其行驶速度及运动姿态等信息是实现安全可靠运行的关键环节^[1,2]. 然而, 在实际应用中, 码头工作环境复杂多变, 自动跨运车在行驶过程中以及传感器检测过程中均易受到环境因素的干扰, 例如风力、温度等. 这些因素会对自动跨运车状态信息获取的精确性产生影响, 并可能进一步导致控制效果失效, 产生翻车、码头拥堵等一系列严重后果. 因此, 针对干

扰环境下的自动跨运车状态估计问题进行深入研究具有重要意义^[3-7].

目前, 卡尔曼滤波是车辆状态估计方法中应用最为广泛的技术之一^[8-11]. 在理想情况下, 卡尔曼滤波方法可以通过迭代运算获取车辆状态的最优估计. 然而, 卡尔曼滤波对噪声的概率分布有着较高要求, 实际系统往往无法明确其噪声的精确分布或保证其为高斯白噪声, 这将会导致卡尔曼滤波性能有所降低. H_∞ 滤波方法在状态估计和路径跟踪问题上也有着广泛应用^[12-14]. 这种方法具有较好的鲁棒性, 在保证滤波误差系统满足规定的性能指标方

收稿日期: 2022-03-29; 录用日期: 2022-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62176150); 上海市地方院校能力建设项目 (20040501400).

[†]通讯作者. E-mail: zhangyl@shmtu.edu.cn.

面有很大优势,但由于 H_∞ 滤波方法是基于假设噪声能量范数有界,这种假设方法过于保守^[15].对自动跨运车系统而言,车辆所处的码头作业环境下产生的干扰虽然无法准确获取其概率分布,但是通常可以被约束在一定范围内.因此可以将自动跨运车受到的环境扰动及传感器的测量噪声视为未知有界(Unknown-but-Bounded,UBB)噪声.近年来,针对未知有界噪声,国内外专家学者开展了一系列的研究,其中,文献[16]提出了集员滤波方法,该方法进一步被广泛应用于状态估计^[17-19]、轨迹跟踪、故障检测^[20,21]等领域.与卡尔曼滤波以及 H_∞ 滤波方法相比,集员滤波方法基于假设系统噪声统计特性未知但其范围已知,优势在于可以为系统状态提供状态估计集合而非传统状态估计点,这在一定程度上降低了对传感器精度的高要求以及量测不准确带来的影响.

同时,由于自动跨运车车身大、车架高、质心高,运动时受到环境因素干扰和自身滤波及控制精度的影响较大.特别地,在转向过程中,假如自动跨运车受到的干扰较大,由于车辆侧倾因素的存在,可能会出现运动状态不稳定的情况,甚至导致自动跨运车侧翻,造成严重的安全和经济问题^[22].因此,本文针对智慧港口环境下的自动跨运车状态估计问题展开研究,提出一种适用于港口自动跨运车的集员滤波方法.主要工作为:(1)基于自动跨运车的转向原理和侧倾特性,根据牛顿第二运动定律,建立自动跨运车的动力学线性模型,并根据未知有界描述,将所受扰动建模为未知有界噪声;(2)基于所构建的自动跨运车模型,设计了改进的集员滤波器,使得系统在噪声干扰下能够实时获取自动跨运车的状态估计椭圆域.

1 自动跨运车建模

本文以8轮独立转向自动跨运车的质心为坐标原点建立坐标系,以 xOz 与 xOy 的平面交线为侧倾轴线,考虑到自动跨运车的运动状况较为复杂,本文作出如下假设:

假设1 自动跨运车速在运动过程中保持恒定;

假设2 自动跨运车转向系统在行驶过程中的传动比保持恒定;

假设3 忽略自动跨运车在俯仰、垂直方向上的运动;

假设4 忽略轮胎及驾驶室等非线性因素;

假设5 自动跨运车在负载集装箱的情况下,集装箱质量均匀分布且与自动跨运车保持相对静止.

本文所考虑的自动跨运车动力学分析简图如图1所示.根据牛顿第二运动定律,可建立自动跨运车的侧向(沿 y 轴)运动方程为:

$$mv \times (\dot{\beta} + \gamma) - mh\ddot{\varphi} = F_y, \quad (1)$$

自动跨运车的横摆(绕 z 轴)运动方程为:

$$I_z \dot{\gamma} - I_{xz} \ddot{\varphi} = M_z, \quad (2)$$

自动跨运车的侧倾(绕 x 轴)运动方程为:

$$I_{xeq} \ddot{\varphi} - I_{xz} \dot{\gamma} = M_x. \quad (3)$$

其中 m 为自动跨运车的质量, v 为自动跨运车的速度, $\dot{\beta}$ 为质心侧偏角速度, γ 为横摆角速度, h 为质心高度, $\ddot{\varphi}$ 为侧倾角加速度, F_y 为自动跨运车 y 轴合力, M_x 、 M_z 分别为绕 x 轴、 z 轴的合力矩, I_x 、 I_z 、 I_{xeq} 分别为自动跨运车整车质量绕 x 轴、 z 轴、侧倾轴的转动惯量, I_{xz} 为自动跨运车关于 x 轴、 z 轴的惯性积.

同时,上述公式中的 F_y 、 M_z 、 M_x 满足以下公式:

$$F_y = \sum_{i=1}^4 F_{li} + \sum_{i=0}^4 F_{ri},$$

$$M_z = \sum_{i=1}^2 L_i(F_{li} + F_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(F_{li} + F_{ri}),$$

$$M_x = m h v (\dot{\beta} + \gamma) \cos \varphi + m g h \sin \varphi - C_\varphi \dot{\varphi} - K_\varphi \varphi,$$

其中 $i = 1, 2, 3, 4$, F_{li} 、 F_{ri} 分别为第 i 行左、右侧轮胎侧偏力, C_φ 为侧倾等效阻尼系数, K_φ 为侧倾等效刚度系数.

由于自动跨运车在工作时的轮胎侧偏角度很小,自动跨运车第 i 行左、右侧车轮的侧偏角度分别为:

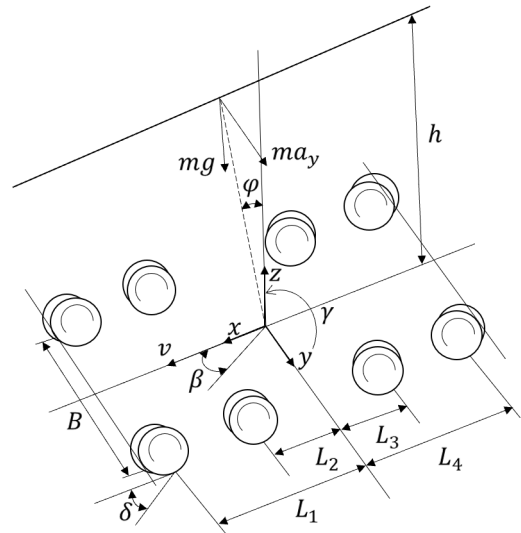


图1 自动跨运车动力学分析简图

$$\beta_{li} = \beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{li},$$

$$\beta_{ri} = \beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{ri},$$

则自动跨运车车轮侧偏力为:

$$F_{li} = -K_{li}(\beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{li}),$$

$$F_{ri} = -K_{ri}(\beta \pm \frac{L_i \gamma}{v} - \delta_{ri}),$$

当 $i = 1, 2$ 时, 式中 $\pm$ 为 $+$, 当 $i = 3, 4$ 时, 式中 $\pm$ 为 $-$, δ 为自动跨运车车轮转角, δ_{li} 、 δ_{ri} 分别为自动跨运车第 i 行左、右侧车轮转角, K_{li} 、 K_{ri} 分别为自动跨运车第 i 行左、右侧车轮侧偏刚度.

根据平行轴定理, 可知 $I_{xeq} = I_x + mh^2$. 由于自动跨运车侧倾角度小, 令 $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi = 1$, 惯性积 $I_{xz} = \int x dz \int z dz = 0$. 自动跨运车的动力学模型可以表示为:

$$\begin{aligned} mv(\dot{\beta} + \gamma) - mh\ddot{\varphi} + \sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri})\beta \\ + \frac{\sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri})}{v} \gamma \\ - \sum_{i=1}^4 (K_{li}\delta_{li} + K_{ri}\delta_{ri}) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_z \dot{\gamma} + \sum_{i=1}^2 L_i(K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li} + K_{ri})\beta \\ + \frac{\sum_{i=1}^4 L_i^2(K_{li} + K_{ri})}{v} \gamma - \sum_{i=1}^2 L_i(K_{li}\delta_{li} + K_{ri}\delta_{ri}) \\ - \sum_{i=3}^4 L_i(K_{li}\delta_{li} + K_{ri}\delta_{ri}) = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_{xeq}\ddot{\varphi} - mhv(\dot{\beta} + \gamma)h - mgh\varphi + C_\varphi \dot{\varphi} + K_\varphi \varphi = 0. \quad (6)$$

选取状态变量 $\dot{x} = [\beta \ \gamma \ \varphi \ \dot{\varphi}]^T$, 输出变量 y , 控制输入 $u_k = [\delta_{l1} \ \delta_{l2} \ \delta_{l3} \ \delta_{l4} \ \delta_{r1} \ \delta_{r2} \ \delta_{r3} \ \delta_{r4}]^T$, 可建立系统的状态方程及观测方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx. \end{cases} \quad (7)$$

其中 A, B, C 如式 (a) 所示.

2 状态估计问题描述

本文考虑如图 2 所示自动跨运车跟踪控制策略. 自动跨运车在实际工作环境下往往受到如风力、温度等环境因素的影响, 例如, 在侧向风作用下, 自动跨运车侧向力、侧倾力矩会增大, 运行的稳定性会受到负面影响. 这些负面干扰往往是不确定的, 无法

具体描述为精确的概率分布, 然而在实际操作中, 可根据已有的统计数据可以获取其近似边界, 因此本文采用未知有界噪声 w_k 和 v_k 描述无人跨运车的噪声干扰. 其中 w_k 和 v_k 分别是过程噪声和测量噪声, 并分别属于以下的椭球集:

$$\mathcal{W}_k \triangleq \{w_k : w_k^T Q_k^{-1} w_k \leq 1\}, \quad (8)$$

$$\mathcal{V}_k \triangleq \{v_k : v_k^T R_k^{-1} v_k \leq 1\}, \quad (9)$$

其中 $Q_k = Q_k^T > 0$, $R_k = R_k^T > 0$ 是具有相容维数的已知矩阵.

将连续时间模型 (7) 按 T_s 离散, 同时考虑系统存在噪声 (8) 和 (9), 可以得到如下离散系统的状态方程 (10) 和观测方程 (11):

$$x_{k+1} = A_p x_k + B_p u_k + w_k, \quad (10)$$

$$y_k = C_p x_k + v_k, \quad (11)$$

其中 $A_p = e^{AT_s}$, $B_p = \int_0^{T_s} e^{A\tau} d\tau$, $C_p = C$.

在实际应用中, 自动跨运车工作时运载集装箱的个数为 n ($n = 0, 1, 2$), 其质量和质心高度随负载不同变化, 本文中 A_p 及 B_p 在负载给定的情况下为定常矩阵, 当负载变化时, A_p 、 B_p 可通过变化参数 m , h 及转动惯量大小而变化, 矩阵的计算公式不变, 因此本文构建的自动跨运车模型可以有效应对不同负载的工作情况.

假设初始状态 x_0 属于如下给定椭球域:

$$\{x_0 : (x_0 - \hat{x}_0)^T P_0^{-1} (x_0 - \hat{x}_0) \leq 1\}, \quad (12)$$

其中 $\hat{x}_0$ 是 x_0 的估计值并假定已给定, $P_k = P_k^T > 0$ 是已知矩阵.

针对受到未知有界的过程噪声和测量噪声干扰的自动跨运车系统 (10)(11), 设计如下形式的集员滤波器:

$$\hat{x}_{k+1} = G_k \hat{x}_k + (I - L_k C_p) B_p u_k + L_k y_{k+1}, \quad (13)$$

其中 $\hat{x}_k$ 是 x_k 的一个任意状态估计值, G_k 和 L_k 是待确定的滤波器参数. 由于本文内容不涉及控制器设计, 控制信号 u_k 设置为一组可变常数矩阵. 与文献 [17,20] 所设计集员滤波器相比, 本文所设计的滤波器 (13) 可以有效消除控制作用的影响.

假设 k 时刻, 真实状态 x_k 包含在椭球域 $\mathcal{X}_k \triangleq \{x_k : (x_k - \hat{x}_k)^T P_k^{-1} (x_k - \hat{x}_k) \leq 1\}$ 内, 且 $P_k = E_k E_k^T$. 则本文的设计目标是设计滤波器 (13) 使得 $k+1$ 时刻自动跨运车的真实状态 x_{k+1} 包含着以下估计椭球内:

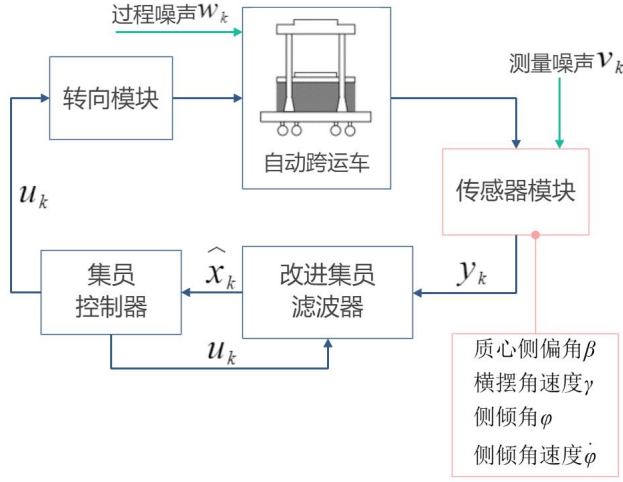


图2 自动跨运车跟踪控制系统框图

$$\mathcal{X}_{k+1} \triangleq \{x_{k+1} : (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1\}. \quad (14)$$

3 集员滤波器设计

针对存在未知有界噪声干扰的自动跨运车系统, 本文设计满足目标 (14) 的改进集员滤波器 (13). 本小节给出了改进集员滤波器的推导过程, 并设计了改进集员滤波器的凸优化递归算法.

由式 (10) 和 (13) 可得, 一步提前估计误差 $x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}$ 为:

$$\begin{aligned} x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} &= A_p x_k + B_p u_k + w_k - G_k \hat{x}_k \\ &\quad - (I - L_k C_p) B_p u_k - L_k y_{k+1} \\ &= A_p x_k + L_k C_p B_p u_k + w_k \\ &\quad - G_k \hat{x}_k - L_k (C_p x_{k+1} - v_{k+1}) \\ &= (I - L_k C_p) A_p x_k - G_k \hat{x}_k \\ &\quad + (I - L_k C_p) w_k - L_k v_{k+1}. \end{aligned} \quad (15)$$

在 k 时刻, 由于 P_k 和 $\hat{x}_k$ 已知, 并且 $(x_k -$

$\hat{x}_k)^T P_k^{-1} (x_k - \hat{x}_k) \leq 1$, 则存在 $\|z\| \leq 1$ 满足

$$x_k = \hat{x}_k + E_k z, \quad (16)$$

因此,

$$x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} = (A_p - A_p L_k C_p - G_k) \hat{x}_k + (A_p - A_p L_k C_p) E_k z + (I - L_k C_p) w_k - L_k v_{k+1}. \quad (17)$$

若令

$$\eta_k = \begin{bmatrix} 1 & z & w_k & v_{k+1} \end{bmatrix}^T, \quad (18)$$

$$\Pi(\hat{x}_k) = \begin{bmatrix} [(A_p - A_p L_k C_p - G_k) \hat{x}_k]^T \\ [(A_p - A_p L_k C_p) E_k]^T \\ (I - L_k C_p)^T \\ (-L_k)^T \end{bmatrix}^T, \quad (19)$$

可以得到

$$x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} = \Pi(\hat{x}_k) \eta_k, \quad (20)$$

因此, $(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1$ 可以写成:

$$\eta_k^T [\Pi^T(\hat{x}_k) P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \text{diag}(1, 0, 0, 0)] \eta_k \leq 0. \quad (21)$$

通过前面的分析, z, w_k, v_{k+1} 有如下约束条件:

$$\begin{cases} \|z\| \leq 1, \\ w_k^T Q_k^{-1} w_k \leq 1, \\ v_{k+1}^T R_{k+1}^{-1} v_{k+1} \leq 1, \end{cases} \quad (22)$$

上式可以用 η_k 表示为:

$$\begin{cases} \eta_k^T \text{diag}(-1, I, 0, 0) \eta_k \leq 0, \\ \eta_k^T \text{diag}(-1, 0, Q_k^{-1}, 0) \eta_k \leq 0, \\ \eta_k^T \text{diag}(-1, 0, 0, R_{k+1}^{-1}) \eta_k \leq 0, \end{cases} \quad (23)$$

根据 S-Procedure 可知, 使得上述不等式 (20) 成立的

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{\sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri}) I_{xeq}}{mv I_x} & -\frac{\sum_{i=1}^2 L_i (K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i (K_{li} + K_{ri}) I_{xeq}}{mv^2 I_x} - 1 & \frac{h(mgh - K_\phi)}{I_x v} & -\frac{hC_\phi}{I_x v} \\ -\frac{\sum_{i=1}^2 L_i (K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i (K_{li} + K_{ri})}{I_z} & -\frac{\sum_{i=1}^4 L_i^2 (K_{li} + K_{ri})}{I_z v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\sum_{i=1}^4 (K_{li} + K_{ri}) h}{I_x} & -\frac{\sum_{i=1}^2 L_i (K_{li} + K_{ri}) - \sum_{i=3}^4 L_i (K_{li} + K_{ri}) h}{I_x v} & \frac{mgh - K_\phi}{I_x} & -\frac{C_\phi}{I_x} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{K_{l1} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l2} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l3} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{l4} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r1} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r2} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r3} I_{xeq}}{mv I_x} & \frac{K_{r4} I_{xeq}}{mv I_x} \\ \frac{I_z}{L_1 K_{l1}} & \frac{I_z}{L_2 K_{l2}} & \frac{I_z}{L_3 K_{l3}} & \frac{I_z}{L_4 K_{l4}} & \frac{I_z}{L_1 K_{r1}} & \frac{I_z}{L_2 K_{r2}} & \frac{I_z}{L_3 K_{r3}} & \frac{I_z}{L_4 K_{r4}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{hK_{l1}}{I_x} & \frac{hK_{l2}}{I_x} & \frac{hK_{l3}}{I_x} & \frac{hK_{l4}}{I_x} & \frac{hK_{r1}}{I_x} & \frac{hK_{r2}}{I_x} & \frac{hK_{r3}}{I_x} & \frac{hK_{r4}}{I_x} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (a)$$

充分条件是存在正标量 τ_1 、 τ_2 和 τ_3 , 使

$$\begin{aligned} & \Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \text{diag}(1, 0, 0, 0) \\ & - \tau_1 \text{diag}(-1, I, 0, 0) - \tau_2 \text{diag}(-1, 0, Q_k^{-1}, 0) \\ & - \tau_3 \text{diag}(-1, 0, 0, R_k^{-1}) \leq 0. \end{aligned} \quad (24)$$

进一步, 式 (24) 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} & \Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \\ & \text{diag}(1 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3, \tau_1 I, \tau_2 Q_k^{-1}, \tau_3 R_k^{-1}) \leq 0. \end{aligned} \quad (25)$$

若令

$$\begin{aligned} & \Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \\ & = \text{diag}(1 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3, \tau_1 I, \tau_2 Q_k^{-1}, \tau_3 R_k^{-1}), \end{aligned} \quad (26)$$

那么式 (25) 可以表示为

$$\Pi(\hat{x}_k)^T P_{k+1}^{-1} \Pi(\hat{x}_k) - \Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \leq 0. \quad (27)$$

式 (27) 等价于

$$\begin{bmatrix} -P_{k+1} & \Pi(\hat{x}_k) \\ \Pi^T(\hat{x}_k) & -\Theta(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \end{bmatrix} \leq 0, \quad (28)$$

根据 Schur 补引理, 该优化问题可以利用半定规划 (Semi-definite programming, SDP) 方法通过内点法求解. 因此, 若存在 $P_{k+1} > 1$, G_k , L_k , $\tau_1 > 0$, $\tau_2 > 0$, $\tau_3 > 0$ 使递归矩阵不等式 (28) 成立, 则自动跨运车的真实状态 x_{k+1} 包含在其估计椭圆 ($x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T P_{k+1}^{-1} (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}) \leq 1$ 中. 此外, 状态估计椭圆的中心为 (13).

上述线性矩阵不等式 (28) 提供了包含真实状态 x_{k+1} 的状态估计椭圆集, 然而无法获得一个最优的估计椭圆. 因此可以通过解决以下的凸优化问题, 确定最优的状态估计椭圆:

$$\begin{aligned} & \min_{P_{k+1} > 0, G_k, L_k, \tau_1 > 0, \tau_2 > 0, \tau_3 > 0} \text{Tr}(P_{k+1}). \quad (29) \\ & \text{s. t. (27)} \end{aligned}$$

综上所述, 本文所提出的改进集员滤波算法可以总结归纳如下算法 1:

step 1: 设置初始状态 x_0 和初始状态估计椭圆 $\mathcal{X}_0(\hat{x}_0, P_0)$, 给定初始形状矩阵 P_0 , 初始状态估计 $\hat{x}_0$, 过程噪声矩阵和测量噪声矩阵 Q_k, R_k ; 设置最大迭代次数 k_N ; 令 $k = 0$;

step 2: 通过 $P_k = E_k E_k^T$ 计算 E_k ; 利用 S-Procedure 引理, 得到由 (18) 和 (19) 表示的一步提前估计误差 (20), 求得使包含真实状态的估计椭圆 (21) 成立的充分条件 (24);

step 3: 利用 Schur 补引理, 将式 (26) 带入式 (25), 得到递归矩阵不等式 (28);

step 4: 通过解决优化问题 (29) 确定最优估计椭圆, 计算形状矩阵 P_{k+1} , 集员滤波器参数 G_k 和 L_k ;

step 5: 通过 $P_{k+1} = E_{k+1} E_{k+1}^T$ 计算 E_{k+1} ; 由式 (12) 计算椭圆中心 $\hat{x}_{k+1}$; 输出集员估计椭圆集 $\mathcal{X}_{k+1}(\hat{x}_{k+1}, P_{k+1})$;

step 6: 置 $k = k + 1$, 返回 step 2; 若 $k = k_N$, 即达到最大迭代次数, 则停止循环.

4 仿真验证

本文选择用 MATLAB 进行仿真实验, 将算法应用于自动跨运车的状态估计问题中. 为确保仿真实验的准确性, 假设自动跨运车处于负载一个集装箱的情况下, 其车速保持为 6m/s 恒定, 自动跨运车的部分参数选取自文献 [4] 中参数, 具体参数如表 1.

表 1 自动跨运车参数

参数	数值	单位	参数	数值	单位
m	89000	kg	K_φ	15700000	N/rad
h	7.9891	m	C_φ	300000	N·m/s/rad
$L_{1,4}$	3.85	m	I_z	1052500	kg·m ²
$L_{2,3}$	1.95	m	I_{xeq}	2119600	kg·m ²
K_f	560000	N/rad	K_r	460000	N/rad

设置采样点数量 N 为 100, 采样周期 T_s 为 1ms, 初始状态 $x_0 = [-3 \ -8 \ 2 \ 10]^T$, 输入 $u_k = \frac{u_{max}}{k_N} * k$, 其中 $u_{max} = [22 \ 16 \ 16 \ 21 \ 20 \ 15 \ 15 \ 19]^T$, 噪声为未知有界的随机噪声, 且满足过程噪声 $|w_k| \leq 0.3$, 测量噪声 $|v_k| \leq 0.5$, 并取

$$Q_k = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, R_k = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}.$$

设定初始状态椭圆中心 $\hat{x}_0 = [-3 \ -8 \ 2 \ 10]^T$, 初始形状矩阵:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

为了验证本文所提出算法的可行性及有效性, 将文献 [17] 所提出的集员滤波方法以及传统卡尔曼滤波方法作为对比试验, 在相同环境下进行仿真验证, 得到仿真结果如图 3-6 所示. 图 3-6 分别是自动跨运车质心侧偏角、横摆角速度、侧倾角、侧倾角速度的真实值、估计边界和卡尔曼估计值随时间变化曲线. 其中, 估计上(下)界 1 和估计上(下)界 2 分别表示本文设计的改进集员滤波器所得估计边界与文献 [17] 设计的集员滤波器所得估计边界. 从图中可

以明显看出, 本文所提出的集员滤波方法所获得的状态估计上下界总能包含系统的状态真值. 因此, 利用本文所提出的滤波算法对自动跨运车进行状态估计是可行有效的. 进一步, 通过和文献 [17] 所提集员滤波算法的对比, 可以看出本文所提集员滤波算法的估计上界和估计下界都在文献 [17] 方法所获得的估计上界和估计下界之内, 因此可以得到本文所提出的改进的集员滤波算法保守性更小, 优于传统集员滤波算法.

由于图 3-6 仅描述了两种集员滤波方法所获取的状态估计域上下界及卡尔曼方法所获取的状态估计点, 为了进一步比较本文所提方法相较于卡尔曼方法的优越性, 选取集员估计域中心点与卡尔曼滤波结果进行估计误差的比较. 估计误差分别定义为卡尔曼状态估计值与真实值之间的偏差及集员状态估计域中心点与真实值之间的偏差, 绘制各个状态估计值与真值之间的估计误差图如图 7-10 所示. 集员滤波误差 1 和 2 分别表示本文所提集员滤波算法与文献 [17] 所提集员滤波算法的状态估计误差. 从图中可以看出, 与本文所提出的集员滤波方法相比, 文献 [17] 所提集员滤波算法与卡尔曼滤波方法下的估计误差数值波动较大, 且卡尔曼滤波状态偏离的趋势较大. 因此, 对比实验可以进一步证明本文所提滤波方法的有效性.

从仿真耗时来看, 本文所提集员滤波算法与卡尔曼滤波相比, 消耗的时间略长, 与文献 [17] 中集员滤波算法相比耗时几乎一致. 其原因主要在于本文所提集员滤波算法迭代步骤较为复杂, 迭代次数较多情况下耗时增加. 总体来看, 这三种算法仿真耗时差距较小, 均能满足自动跨运车实时性的要求.

通过文献 [6] 和文献 [7] 可知, 自动跨运车在正常运行过程中, 其运动状态具有一定的限制范围, 若超出范围则有可能造成严重后果. 例如, 其转向角最大角度约为 50° , 侧倾角最大范围与转向角有关, 约为 20° . 从仿真结果来看, 本文所提的集员滤波算法所获得的状态估计域与系统真实状态值之间的偏差范围足够满足文献 [6]、[7] 所提自动跨运车实际运行需求, 因此, 本文所提出的集员滤波方法可以用于后续控制器设计.

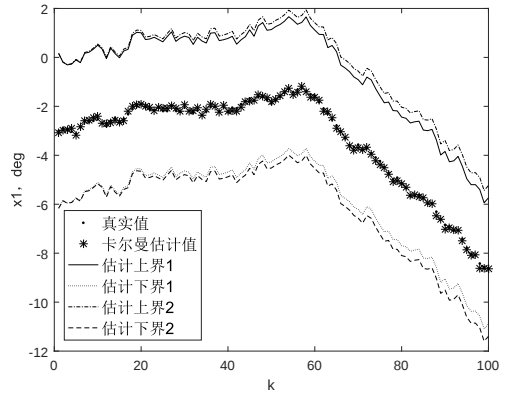


图3 自动跨运车的质心侧偏角变化曲线

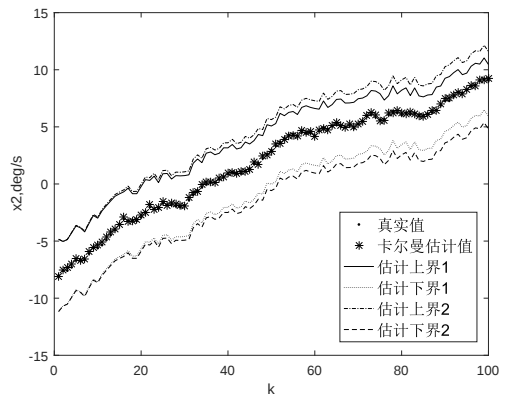


图4 自动跨运车的横摆角速度变化曲线

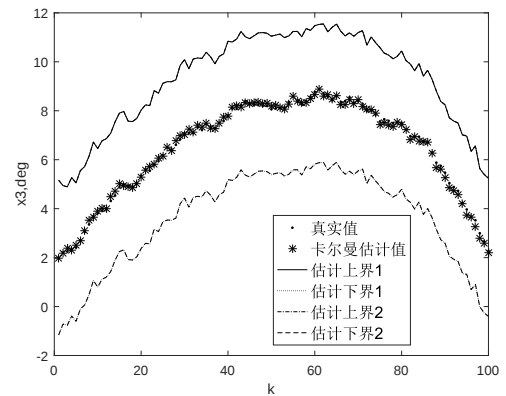


图5 自动跨运车的侧倾角变化曲线

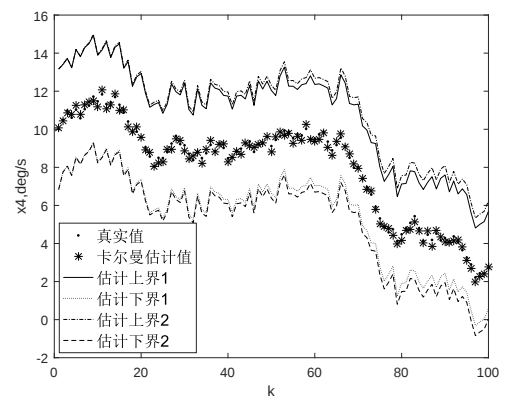


图6 自动跨运车的侧倾角速度变化曲线

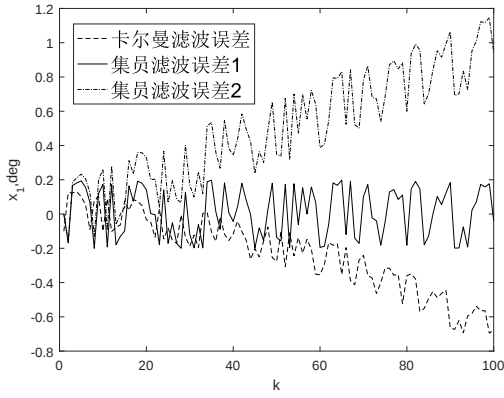


图 7 自动跨运车质心侧偏角估计误差对比

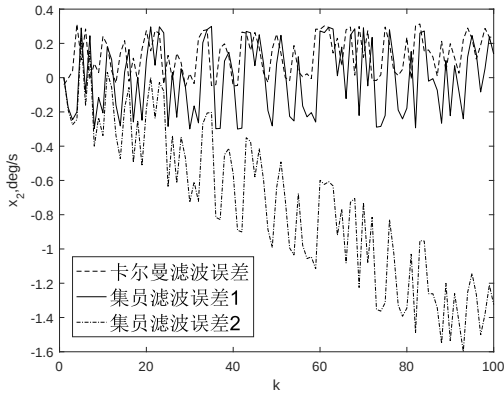


图 8 自动跨运车横摆角速度估计误差对比

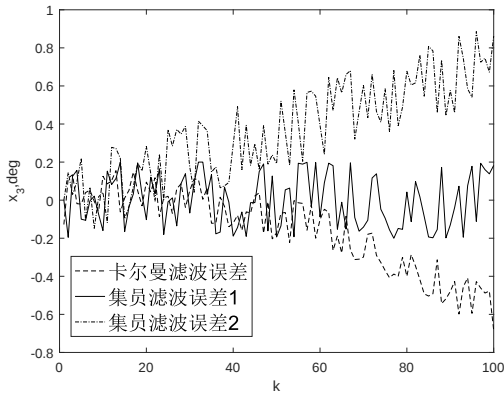


图 9 自动跨运车侧倾角估计误差对比

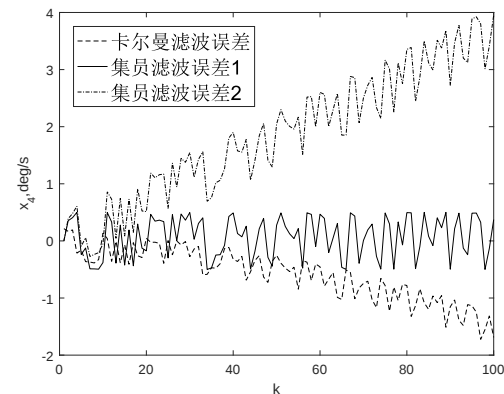


图 10 自动跨运车侧倾角速度估计误差对比

5 结论

本文设计了一种针对港口自动跨运车的改进集员滤波方法. 根据自动跨运车的结构特性, 建立了考虑侧倾和转向因素的车辆动力学模型, 并将过程噪声和测量噪声建模为未知有界噪声. 在此基础上设计了集员滤波方法, 推导包含真实状态的估计椭球存在的条件, 通过求解线性矩阵不等式得到估计椭球集, 利用凸优化方法获得最优的状态估计椭球, 并总结为改进的集员滤波算法. 最后, 仿真实验验证了所提改进集员滤波算法的可行性和有效性, 并通过了与传统集员滤波及卡尔曼滤波的对比, 进一步验证了其优越性. 通过本文工作, 可以实现对自动跨运车在未知有界干扰下的可靠状态估计, 后续研究重点将集中在基于所获取的集员状态估计域设计自动跨运车控制器及故障观测器, 进一步加强本文工作的研究意义与应用价值.

参考文献 (References)

- [1] Kizilay D, Eliyi D T. A comprehensive review of quay crane scheduling, yard operations and integrations thereof in container terminals[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2021, 33: 1-42.
- [2] Cai B H, Huang S D. Multiobjective optimization for autonomous straddle carrier scheduling at automated container terminals[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3): 711-725.
- [3] Stavrou D, Timotheou S, Panayiotou C G, Polycarpou M M. Optimizing container loading with autonomous robots[J]. IEEE Transactions on automation science and engineering, 2018, 15(2): 717-730.
- [4] 李国栋. 无人驾驶跨运车抗倾覆控制 [D]. 河北: 燕山大学车辆与能源学院, 2019: 9-30.
(Li G D. Anti-overtum control of unmanned straddle carrier[D]. HeBei: School of Vehicles and Energy, Yanshan University, 2019: 9-30.)
- [5] 王艳国. 无人驾驶跨运车转向系统控制策略研究 [D]. 河北: 燕山大学车辆与能源学院, 2019: 5-7.
(Wang Y G. Research on control strategy of unmanned straddle carrier steering system[D]. HeBei: School of Vehicles and Energy, Yanshan University, 2019: 5-7.)
- [6] 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 21-25.
(Yu Z P, Gao X J. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.)
- [7] Durrant W H, Pagac D, Rogers B. An autonomous straddle carrier for movement of shipping containers[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007, 14(3): 14-23.
- [8] Rhode S, Hong S, Hedrick J K, Gauterin F. Vehicle tractive force prediction with robust and windup-stable

- Kalman filters[J]. Control Engineering Practice, 2016, 46: 37-50.
- [9] Smieszek M, Dobrzanska M. Application Of Kalman filter in navigation process[J]. Metrology and Measurement Systems, 2015, 22(3): 443-454.
- [10] Sen S, Chakraborty S, Sutradhar A. Estimation of vehicle yaw rate and lateral motion for dynamic stability control using unscented Kalman filtering (UKF) approach[C]. Michael Faraday IET International Summit 2015. Kolkata: IET, 2015: 24-29.
- [11] Chen T, Cai Y F, Chen L. Design of vehicle running states-fused estimation strategy using kalman filters and tire force compensation method[J]. IEEE Access, 2019, 7: 87273-87287.
- [12] Chang X H, Liu Y. Robust H_∞ filtering for vehicle sideslip angle with quantization and data dropouts[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10435-10443.
- [13] Boada B L, Boada M J L, Melendez V, Diaz V. A robust observer based on H_∞ filtering with parameter uncertainties combined with Neural Networks for estimation of vehicle roll angle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99:611-623.
- [14] Ghaoui L E, Calafiore G. Robust filtering for discrete-time systems with bounded noise and parametric uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(7): 1084-1089.
- [15] 谢蓉, 王新民, 巩建英. 范数有界型参数不确定性系统的概率鲁棒 H_∞ 控制方法 [J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1301-1305.
(Xie R, Wang X M, Gong J Y. Probabilistic robust H_∞ control method of norm-bounded parameter uncertainty system[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1301-1305.)
- [16] Schweppe F C. Recursive state estimation: unknown but bounded errors and system inputs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1968, 13(1): 22-28.
- [17] Yang F W, Li Y M. Set-membership filtering for systems with sensor saturation[J]. Automatica, 2009, 45(8): 1896-1902.
- [18] 彭瑞, 岳继光. 区间分析及其在控制理论中的应用 [J]. 控制与决策, 2006, 21(11): 1201-1207.
(Peng R, Yue J G. A review on interval analysis and its applications to control problems[J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1201-1207.)
- [19] 沈强, 刘洁瑜, 赵乾, 王琪. 非线性系统中心差分集员估计方法 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1239-1248.
(Shen Q, Liu J Y, Zhao Q, Wang Q. Central difference set-membership filter for nonlinear system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(8): 1239-1248.)
- [20] Zhang Y L, Qiu Q W, Yang F W, Han Q L. Set-membership filtering approach for fault detection of systems with unknown-but-bounded noises[C]. 2015 5th Australian Control Conference(AUCC). Australia: IEEE, 2015: 170-175.
- [21] 王子赞, 张梦迪, 王艳, 纪志成. 基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计 [J]. 控制与决策, 2021, 36(12): 2973-2979.
(Wang Z Y, Zhang M D, Wang Y, Ji Z C. Vector set inversion interval filtering based fault observer design[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2973-2979.)
- [22] 王康, 李琼琼, 王子洋, 杨家富. 考虑侧倾的无人车 NMPC 轨迹跟踪控制研究 [J/OL]. 控制与决策, 2021: 1-8.
(Wang K, Li Q Q, Wang Z Y, Yang J F. Trajectory tracking control for automated vehicle based on NMPC considering vehicle rolling motion[J/OL]. Control and Decision, 2021:1-8.)

作者简介

林爽(1998—), 女, 硕士生, 从事港口自动跨运车位姿估计方法等研究, E-mail: linas2020@163.com;

张依恋(1987—), 女, 讲师, 硕士生导师, 从事智慧港口网络化控制系统滤波与控制算法等研究, E-mail: zhangyl@shmtu.edu.cn;

丁宗贺(1997—), 男, 硕士生, 从事港口自动跨运车跟踪控制方法等研究, E-mail: 1713955352@qq.com.

牛王强(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事港口装卸设备能量管理、控制技术等研究, E-mail: wqniu@shmtu.edu.cn.