

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211377

基于LQEKF的机载光电平台的模型预测控制^{*}晁育平^{1,2} 王日俊^{1,2} 贾凯旋¹

(1.中北大学机械工程学院 太原 030051; 2.中北大学先进制造技术山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了提高机载光电平台对目标稳定跟踪控制性能,提出一种基于线性二次增强卡尔曼滤波器的机载光电平台模型预测控制算法。建立机载光电平台的动力学模型,在卡尔曼滤波状态估计的基础上,引入线性二次调节器增益减小估计状态的相位延迟,使状态估计值更为精确,利用估计的状态设计模型预测控制器,减小目标跟踪误差。跟踪目标仿真实验结果与卡尔曼滤波状态估计结果最大误差减小了58.14%,与扩展卡尔曼滤波状态估计最大误差减小了52.62%,表明本算法能够有效提高机载光电平台对目标的跟踪控制性能,实现了机载光电平台对目标的稳定跟踪控制。

关键词: 机载光电平台;模型预测控制;线性二次调节器;卡尔曼滤波

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Model predictive control of airborne opto-electronic platform
based on LQEKFChao Yuping^{1,2} Wang Rijun^{1,2} Jia Kaixuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the stable tracking control of airborne Opto-electronic platform, a model predictive control algorithm based on linear quadratic enhanced Kalman filter is proposed. A dynamic model of airborne Opto-electronic platform is established. Base on the state Kalman filter, a linear quadratic regulator gain is introduced to reduce the phase delay of the estimated state, which makes the state estimation more accurate. The maximum error between the simulation results of tracking target and the state estimation results of Kalman filter is reduced by 58.14%, and the maximum error between the extended Kalman filter and the state estimation is reduced by 52.62%. The simulation results show that the algorithm can effectively improve the tracking and control performance of the airborne optoelectronic platform, and realize the stable tracking and control of the airborne optoelectronic platform.

Keywords: airborne opto-electronic platform; MPC; linear quadratic regulator; Kalman filter

0 引言

搭载于无人飞行器的机载光电平台是一种光、机、电的高精密设备,通常由控制系统、运动电机、姿态传感器和光电载荷等组成。主要作用在于对目标进行捕获、侦查和跟踪等。然而在载机振动、气流扰动和其他未知干扰的工作环境下,机载光电平台极易受到干扰,严重影响对目标的跟踪性能。因此,如何提高机载光电平台的稳定跟踪控制性能,已逐渐成为机载光电相关研究的热点问题之一,其重要性不言而喻^[1-5]。

针对载机的干扰、摩擦力矩和参数不确定性等影响机

载光电平台的扰动因素,实现机载光电平台对目标的稳定跟踪控制,文献[6]设计了选择位置回路误差及其变化率为观测值的模糊比例、积分和微分(proportional integral derivative, PID)控制器和扰动观测器相结合的方法,实验验证结果有效,但是由于PID本身的缺陷,在提高系统增益时会增大系统带宽,降低系统的稳定性。文献[7]为解决无人机对机动目标的追踪问题,使用卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)对目标状态进行预测和更新,整合无人机状态,利用双层深度Q网络学习(double deep Q-learning, DDQN)算法进行训练,实现了无人机对机动目标的自主跟踪。为提高系统稳定跟踪精度,文献[8]采用了基于KF求

收稿日期:2022-09-13

^{*} 基金项目:中北大学先进制造技术山西省重点实验室开发课题研究基金(XJZZ201905)项目资助

取速度信号与前馈复合控制和跟踪微分器的求取速度信号与前馈复合控制,结果显示卡尔曼滤波更适合前馈复合控制。文献[9]显示光电跟踪机动目标移动速度波动较大,超调严重,得到的速度估计数据不可用。文献[10]针对微型的惯性稳定平台,使用微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)传感器获得系统的角速度,但是MEMS传感器有高频噪声和有限的带宽,不能在大范围的速度范围内提高准确的信息。文献[11]通过加速度反馈方案提供加速度信息,在计算过程中,对位置的微分或者二次微分,这种计算噪声严重,若引入低通滤波器,又会引入额外的相位延迟。针对姿态角解算易受载体运动加速度的干扰,文献[12]提出一种改进卡尔曼滤波算法,并采用电梯升降测量实验,验证改进后的卡尔曼滤波算法能够减小运动加速度对姿态解算的影响。文献[13]利用卡尔曼滤波对系统状态进行估计,并进行了卡尔曼滤波的4种算法比较,显示他们之间的优缺点。

为了提高机载光电平台对目标的轨迹跟踪控制性能,本文在原有卡尔曼滤波状态估计的基础上,引入线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)增益对卡尔曼滤波状态估计值进行相位补偿,得到更为精确的状态估计值,并将其输入到模型预测控制器中,设计出一种基于线性二次增强卡尔曼滤波(linear quadratic enhance Kalman filter, LQEKF)算法的模型预测控制器,从而提高机载光电平台对目标的跟踪控制性能。

1 机载光电平台建模

在SolidWorks中设计三轴机载光电平台的三维实体模型如图1所示。该模型由基座,框架和运动关节以及光电载荷组成。基座设置有4个与四旋翼飞行器联结的安装孔,基座通过橡胶减震器固定在四旋翼飞行器的下方。3个运动关节处分别安装有3个电机用以驱动框架运动,光电载荷随之运动,实现对目标的跟踪。其中,关节1位置为偏航轴,实现机载光电平台的偏航运动;关节2位置为横滚轴,实现机载光电平台的横滚运动;关节3位置为俯仰轴,实现机载光电平台的俯仰运动。

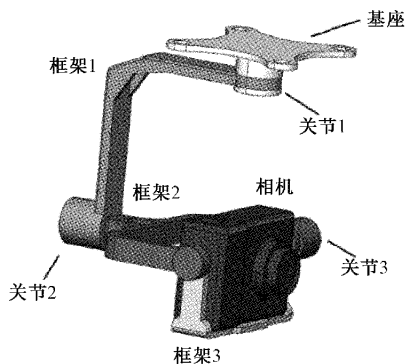


图1 机载光电平台

假设机载光电平台是刚体,同时旋转中心与质心重合的条件下,基于Lagrange-Euler方程,所建立的机载光电平台非线性模型^[14]如下:

$$\tau = M_e(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (1)$$

式中: τ 为力矩,是控制输入的; θ 为关节角位移量; $M_e(\theta)$ 为对称且正定的惯性矩阵; $C(\theta, \dot{\theta})$ 为离心力和科里奥利力(Coriolis Force); $G(\theta)$ 为重力向量。

在非线形模型中, $F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ 为粘滞摩擦力, $\operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ 是非线性的。 $F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ 项可作为机载光电平台的扰动项 F_{distur} 。则可以得到机载光电平台的线性模型:

$$\tau = M_e(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) - F_{distur} \quad (2)$$

选取系统的状态变量 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$;则 $\dot{x}_1 = \dot{\theta}, \dot{x}_2 = \ddot{\theta}$ 。输入函数 $u = \tau$ 。输出函数 $y = x_1$ 。得到机载光电平台的空间状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C}{M_e} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + T_d \\ y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x \end{cases} \quad (3)$$

即,

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + T_d \\ y = Cx \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C}{M_e} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, T_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F_{distur} - G}{M_e} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

2 基于线性二次增强卡尔曼滤波的状态估计

为了提高视轴稳定精度,提高机载光电平台抗干扰能力,需要获取系统模型的状态,用于模型预测控制进行优化求解,因此采用KF对耦合系统模型进行状态估计。

为便于数字化工程设计,假设关节角位移量很小的情况下,将式(3)离散化处理得:

$$\begin{cases} X_k = AX_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ Z_k = HX_k + v_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为采样时间; X_k 为 k 时刻的状态; X_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的状态; Z_k 为 k 时刻的输出; w_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的过程噪声和 v_k 为 k 时刻的测量噪声,二者服从均值为零的高斯分布并且两者不相关; A, B 和 H 为离散化的参数矩阵。

设先验和后验估计误差为:

$$\begin{cases} e_k = X_k - \hat{X}_k \\ e_k = X_k - \hat{X}_k \end{cases} \quad (6)$$

先验状态估计与先验误差协方差阵:

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (7)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q_k \quad (8)$$

矫正卡尔曼增益、后验估计状态和更新协方差阵分别为:

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R} \quad (9)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k(Z_k - H\hat{X}_k^-) \quad (10)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (11)$$

式中: \hat{X}_k^- 是 k 时刻的先验估计; \hat{X}_k 为 k 时刻的后验估计; \hat{X}_{k-1} 为上一时刻的后验估计; P_k 为 k 时刻的先验误差协方差阵, $P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}]$; P_{k-1} 上一次的误差协方差阵; P_k 为更新后的误差协方差阵, $P_k = E[e_k e_k^T]$; K_k 为卡尔曼增益阵; I 为单位阵; $Q_k = E(\omega_k \omega_k^T) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R =$

$$E(v_k^2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

KF 观测器更新的过程由式(7)~(11)递推及实时校准进行描述, KF 具有两个明显的自我信息更新过程: 时间上的更新, 从 $k-1$ 到时间 k 的更新; 状态上的更新, 从 \hat{X}_{k-1} 到状态 \hat{X}_k 的更新. \hat{X}_k 即为卡尔曼滤波估计的状态.

但是此刻的 KF 估计状态, 会存在相位滞后的问题, 因此将 KF 估计的状态经 LQR 增益阵^[15-16]进行修整, 减小 KF 估计状态下引起的相位滞后, 使得估计的状态更接近系统的状态, 本方法称之为 LQEKF 算法. 根据估计出的状态, 设计模型预测控制器对目标进行追踪.

\hat{X}_k 为 KF 估计的 k 时刻的状态, 估计的状态 \hat{X}_k 经式(12)处理:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = (A - BL - CK_k)\hat{X}_k + K_k y \\ y = C\hat{X} \end{cases} \quad (12)$$

其中, L 为 LQR 增益阵, 在估计的状态 \hat{X}_k 中, 引入 BL , 减小 KF 产生的相位迟滞, 使得估计状态 \hat{X}_k 实时性更优, 精确性更好. 更优的系统状态对机载光电平台的跟踪控制也更为有利. L 增益矩阵经式(13)解:

$$L = R^{-1}B^T P \quad (13)$$

P 矩阵为 Riccati 方程的解, 形式为:

$$AP + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q_k = 0 \quad (14)$$

考虑到设计 LQR 增益对系统的稳定性影响, 求解关于 LQR 的 Lyapunov 函数为:

$$V = X^T P X \quad (15)$$

$$\dot{V} = X^T [(A + BL)^T \bar{P} + \bar{P}(A + BL)] X \quad (16)$$

令 $\Phi^T \bar{P} + \bar{P} \Phi = -W$, 其中: $\Phi = A + BL, W = Q_k + L^T R L$, 且 W 正定对称.

计算解出矩阵为 \bar{P} 正定, 即保证 V 正定, \dot{V} 负定, 因此系统是渐进稳定的.

Q_k 和 R 为权重系数, 在此取 $Q_k =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

如图 2 所示为 LQEKF 方框图.

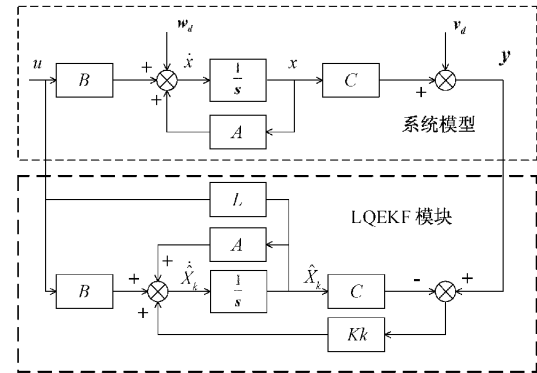


图 2 线性二次增强卡尔曼滤波方框图

3 基于 LQEKF 的机载光电平台的模型预测控制器设计

在传统的模型预测控制 (model predictive control, MPC)^[17-18]中, 包括了模型, 控制和预测 3 个方面系统的状态, 而本次 MPC 是将提出的 LQEKF 最优状态估计理论引入到 MPC 中, 其在状态估计时进行最优估计. MPC 方法的结构如图 3 所示.

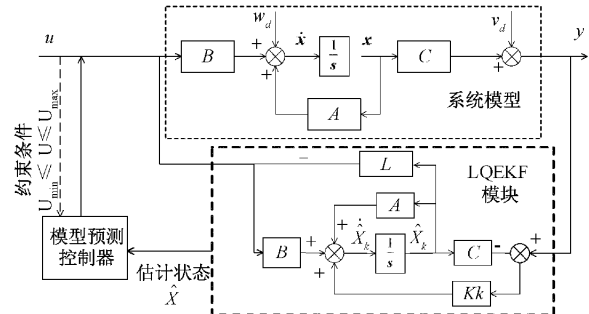


图 3 机载光电平台模型预测控制器原理

系统模型预测离散化处理:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (17)$$

目标函数:

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} [(x(k+i|k))^T Q_i x(k+i|k) + u(k+i|k)^T R u(k+i|k) + x(k+N|k)^T \bar{P} x(k+N|k)] \quad (18)$$

式中: Q_i 为与系统有关的权重系数阵, R 为与输入的权重系数阵, \bar{P} 为最终代价系数, 与 LQR 增益有关的 6 阶正定阵, N 为预测步长, $p=3$ 为输入向量的行数, $n=3$ 为 3 个关节数, $2n$ 为状态向量数, 即角位移和角速度。 $x(k)$ 为 $2n \times 1$ 阵。 $x(k+i|k)$ 为第 k 时刻预测的 $k+i$ 时刻的状态, $u(k+i|k)$ 为第 k 时刻预测 $k+i$ 时刻的输入。

将式(17)写成下式:

$$X(k) = Mx(k) + CU(k) \quad (19)$$

式中:

$$X(k) = \begin{bmatrix} x(k|k) \\ x(k+1|k) \\ \vdots \\ x(k+i|k) \\ x(k+N|k) \end{bmatrix}_{(N+1)2n \times 1}, U(k) = \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+i|k) \\ u(k+N|k) \end{bmatrix}_{(N+1)p \times 1}$$

$$M = \begin{bmatrix} I_{2n \times 2n} \\ A_{2n \times 2n} \\ A_{2n \times 2n}^2 \\ \vdots \\ A_{2n \times 2n}^N \end{bmatrix}_{(N+1)2n \times 2n}, C = \begin{bmatrix} O & O & \cdots & O \\ B & O & \cdots & O \\ AB & B & \cdots & O \\ \cdots & \cdots & \cdots & O \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \cdots & B \end{bmatrix}_{(N+1)2n \times (N+1)p}$$

令目标函数式(18)中初始状态: $G = M^T \bar{Q} M, E = C^T$

$$\bar{Q} M, H = C^T \bar{Q} C + \bar{R}。$$

则式(18)写成:

$$J = x(k)^T G x(k) + U(k)^T H U(k) + 2x(k)^T E U(k) \quad (20)$$

式中:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & \cdots & \cdots \\ \vdots & Q & \vdots \\ \cdots & \cdots & \bar{P} \end{bmatrix}_{2n(N+1) \times 2n(N+1)}, \bar{R} = \begin{bmatrix} R & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & R \end{bmatrix}_{(N+1)p \times (N+1)p}。$$

考虑到最小驱动力矩和最大驱动力矩, 设置输入的约束条件: $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, u_{\min}$ 为光电机载平台关节的最小驱动力矩, u_{\max} 电机载平台关节的最大驱动力矩。模型预测控制的约束条件为 $A_{\min} \leq A_e \leq A_{\max}, b_{0\min} \leq b_0 \leq b_{0\max}。$

4 仿真实验

为了验证本文所提出方法的有效性, 以 3 自由度机载光电平台为研究对象, 将机载光电平台的 SolidWorks 三维模型通过 Sim-Mechanic 工具箱导入到 MATLAB/Simulink 模块, 设计得到的机载光电平台仿真模型和目标跟踪仿真模型分别如图 4 和 5 所示。仿真参数设置如下: 采样时间为 $t=0.01$ s, 跟踪时长为 $T=10$ s, 飞行器飞行轨

$$\text{迹设定为: } \begin{cases} x = 0.02t^2 \\ y = 0.2t \\ z = 0.2\sin\left(10 \times \frac{t}{T} \times \pi - \frac{\pi}{2}\right) + 3 \end{cases}; \text{跟踪目标}$$

$$\text{设置为 } 0.02 \text{ m 圆球, 轨迹设定为: } \begin{cases} x = 0.02t^2 + 0.5 \\ y = 0.2t + 0.6 \\ z = 0 \end{cases}。$$

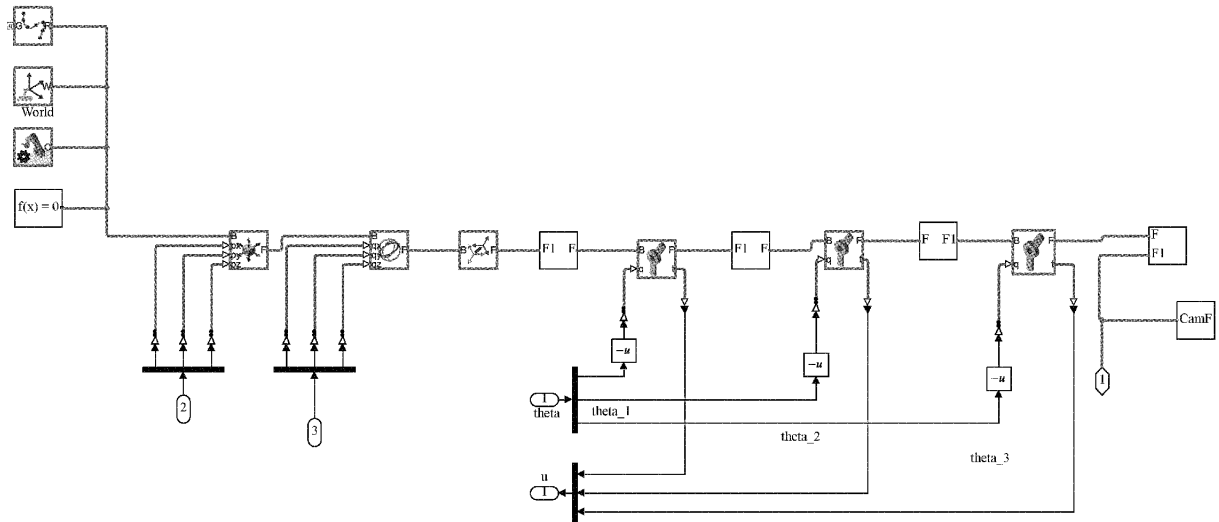


图 4 机载光电平台 Simulink 模型

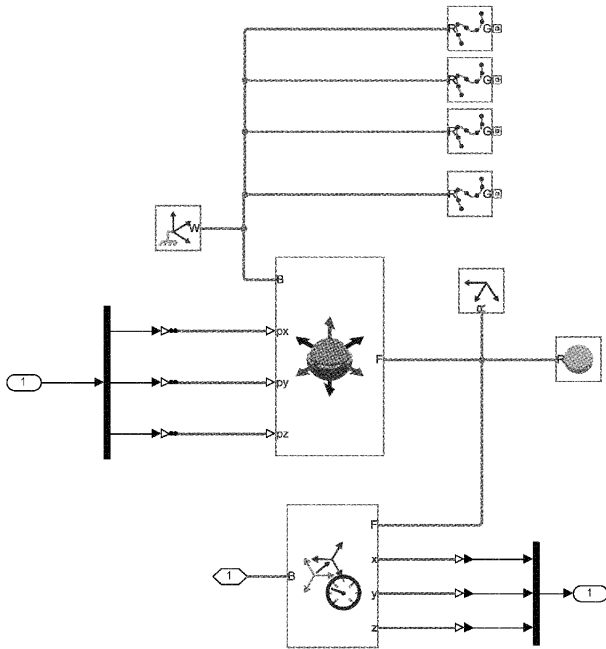


图 5 目标跟踪轨迹 Simulink 模型

机载光电平台的参数如表 1 所示。

通过机载光电平台在偏航、横滚和俯仰这 3 个自由度上对给定角位移和角速度的跟踪对比实验来验证本文提出方法的有效性,对比基于 KF 估计状态的 MPC 控制方法和基于扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 状态估计的 MPC 控制方法实验。实验结果分别如图 6~8 所示。其中,点线为采用本文方法的跟踪结果,双点划线为基于 KF 的 MPC 控制方法的对比跟踪结果,短点划线为基于 EKF 的 MPC 控制方法的对比跟踪结果。从图 6 中可以看出,相对于基于 KF 的 MPC 控制方法,采用本文方法时,偏航角位移跟踪过程产生的超调量由原来的 -47.773 rad 减小为 -33.341 rad,跟踪响应速度更快,

表 1 机载光电平台参数

参数	对象	数值
质量/kg	框架 1	0.323 4
	框架 2	0.323 2
	框架 3	0.670 1
臂长/mm	框架 1	130
	框架 2	72
	框架 3	65
控制器	步长 N	7
	u_{max}	6
	u_{min}	-6
	T	10
转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	t	0.01
	I_{xx_1}	0.013 97
	I_{yy_1}	0.002 01
	I_{zz_1}	0.000 68
	I_{xx_2}	0.001 29
	I_{yy_2}	0.000 82
	I_{zz_2}	0.002 08
	I_{xx_3}	0.006 15
	I_{yy_3}	0.000 61
	I_{zz_3}	0.001 27

相对于基于 EKF 的 MPC 控制方法,采用本文方法时,能更快的到达稳定追踪状态。角速度跟踪过程产生的振荡更小且稳定时间较小了约 0.5 s。从图 7 中可以看出,采用本文方法,横滚角位移的超调量比基于 KF 的 MPC 控制方法小 62%,加速度跟踪调整时间更短,产生的振荡更小,相比于基于 EKF 的 MPC 控制方法能更快实现稳定追踪。从图 8 中可以看出,相对于基于 KF 的 MPC 控制方法,采用本文方法,俯仰角位移和角速度的稳定时间更短,基于 EKF 的 MPC 控制在稳定跟踪阶段有较大的波动。

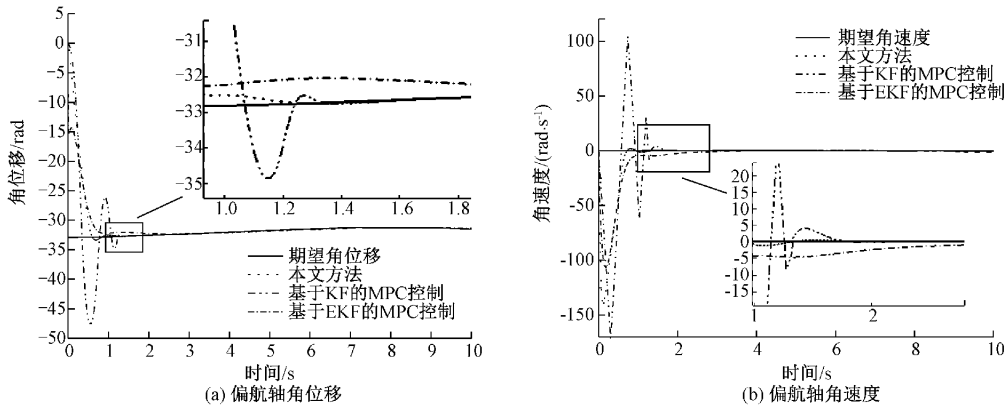


图 6 偏航跟踪对比实验结果

为了进一步验证所提方法的有效性,如图 9~11 分别为机载光电平台在偏航、横滚和俯仰 3 个自由度在稳定跟

踪阶段的误差对比图。其中实曲线为本文方法的误差结果,双点划曲线为基于 KF 的 MPC 稳定跟踪误差结果,短

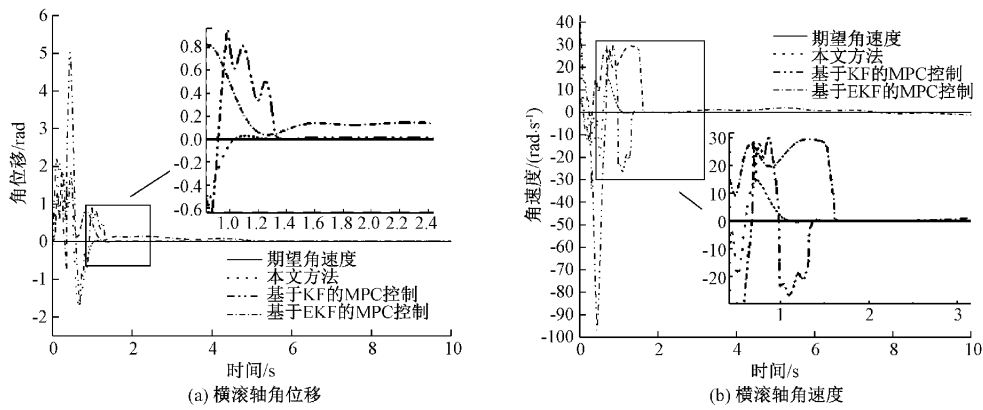


图7 横滚跟踪对比实验结果

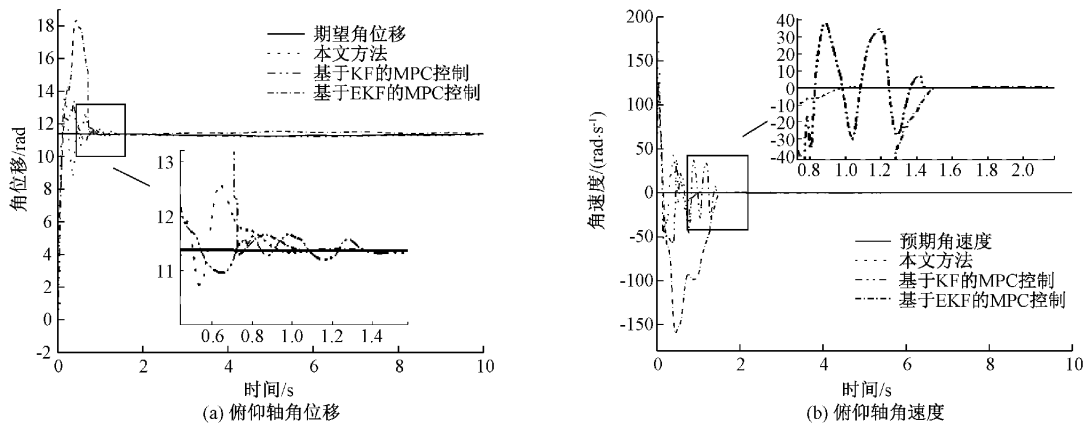


图8 俯仰跟踪对比实验结果

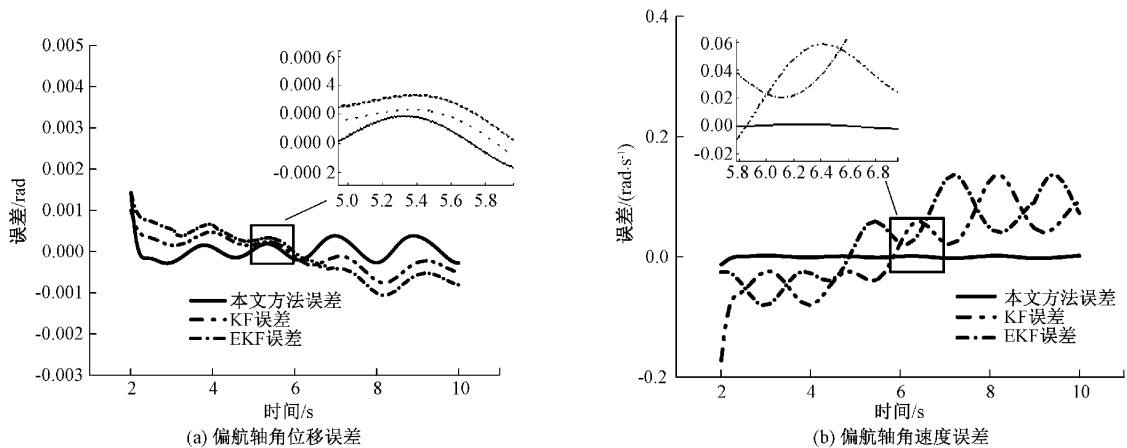


图9 偏航跟踪误差对比实验结果

点划线为基于EKF的MPC稳定跟踪误差结果。由图9偏航角位移和角速度误差看出,基于KF的MPC方法误差很大,基于EKF的MPC的方法误差较大,本文方法的误差更小。从图10中明显看出本文方法的横滚角位移误差更小,对于角速度来说,相比于KF的MPC方法的最大误

差0.5 rad/s,本文方法误差更小。从图11明显看出俯仰角位移和角速度误差对比,基于KF的MPC方法误差很大,基于EKF的MPC方法误差较大,但本文方法的误差更小。

通过机载光电平台对给定目标的轨迹跟踪对比实验,验证本文提出方法的有效性。实验结果跟踪轨迹如图12

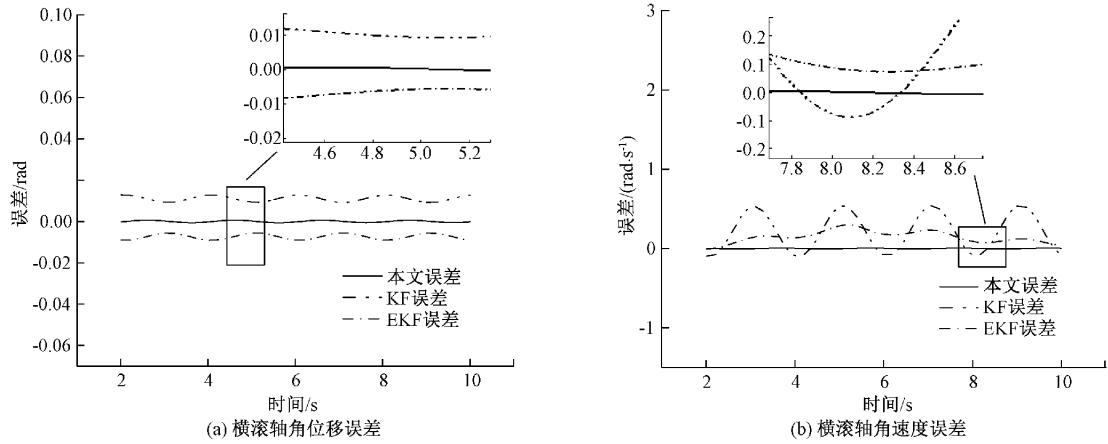


图 10 横滚跟踪误差对比实验结果

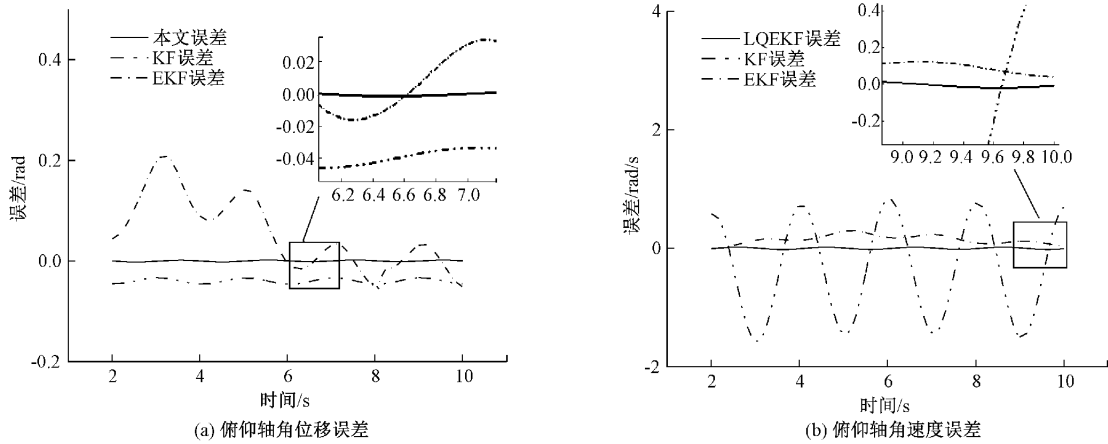


图 11 俯仰跟踪误差对比实验结果

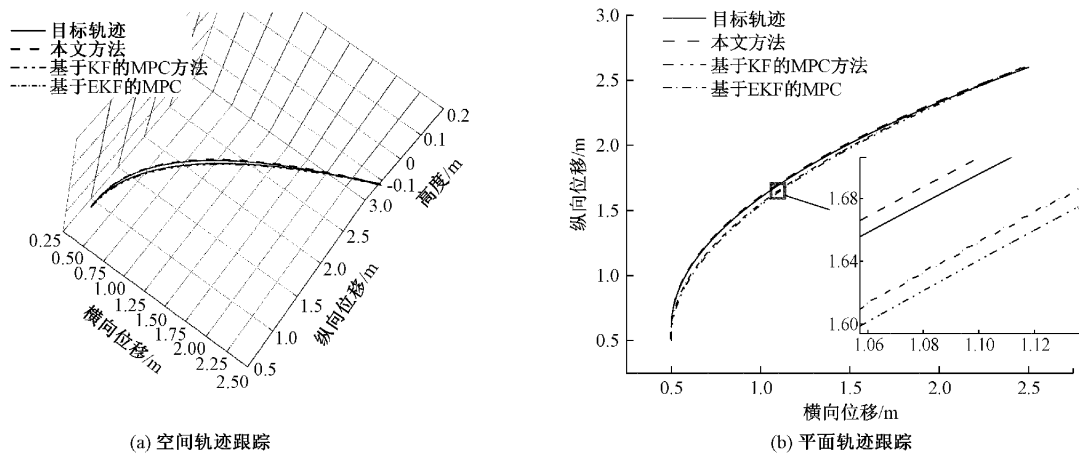


图 12 目标轨迹跟踪实验结果

所示,如图 12(a)所示三维空间的追踪曲线,其中轨迹高度为 0 m,如图 12(b)所示追踪轨迹,为清晰分辨个轨迹进行局部放大处理。

如图 12(a)和(b)中实线为目标运动轨迹,划线为本文方法追踪的轨迹线,双点划线为基于 KF 的 MPC 方法追踪轨迹线,点划线为基于 EKF 的 MPC 方法追踪轨迹线。图

中显示本文方法的跟踪轨迹与目标轨迹在稳定跟踪阶段更能准确跟踪目标,误差更小,即本文方法跟踪性能良好。实际跟踪目标统计误差结果,基于 KF 的 MPC 方法的最大误差为 0.043 m,基于 EKF 的 MPC 方法的最大误差为 0.038 m,而本文方法的最大误差为 0.018 m,最大误差分别减小了 58.14%和 52.63%。显然本文方法的稳定跟踪

性能更优。

5 结 论

为了提高机载光电平台稳定跟踪目标的性能,本文以机载光电平台为研究对象,建立机载光电平台的状态空间模型,设计了LQEKF状态估计器使得状态估计值更为精确,提出了一种基于LQEKF的机载光电平台MPC轨迹跟踪控制器。仿真实验结果验证了所设计状态估计器及控制策略能够满足机载光电平台稳定跟踪控制。证明了所提方法的可行性。

参考文献

- [1] 陈旭璇,万潇月,叶桦. 基于机载光电平台的目标跟踪与轨迹预测算法[J]. 电光与控制, 2019, 26(3): 74-79, 107.
- [2] 王平,刘家燕,李永刚,等. 机载光电平台外框架结构优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 84-91.
- [3] AHMED J, ALI A, KHAN A, et al. Stabilized active camera tracking system [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016, 11(2): 315-334.
- [4] 高文,朱明. 无人飞行器光电平台及跟踪系统的研究现状[J]. 光机电信息, 2011, 28(7): 33-40.
- [5] 周向阳,舒通通,吕子豪,等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 263-271.
- [6] 侯宏录,唐瑞,王秀. 基于速度扰动观测和模糊PID的视轴稳定控制[J]. 自动化仪表, 2019, 40(9): 35-45.
- [7] 李琳,张修社,韩春雷,等. 基于卡尔曼滤波和DDQN算法的无人机机动目标跟踪[J]. 战术导弹技术, 2022(2): 98-104.
- [8] 赵增基,李骏锋,梁宝生,等. 卡尔曼滤波器和跟踪微分器在光电跟踪系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(10): 174-176.
- [9] 杨达莉. 光电平台机动目标移动速度的自动估计研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(9): 175-178.
- [10] ZHOU X, ZHANG Z, FAN D, et al. Improved angular

velocity estimation using MEMS sensors with applications in miniature inertially stabilized platforms [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 648-656.

- [11] 王正玺,贺柏根,朱小伟. 基于卡尔曼滤波算法的加速度反馈控制在航空光电稳定平台中的应用[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1257-1264.
- [12] 刘震,王雪梅,倪文波. 基于MEMS传感器的高精度姿态角测量研究[J]. 中国测试, 2017, 43(2): 6-12.
- [13] LIU H, HU F, SU J S, et al. Comparisons on Kalman-filter-based dynamic state estimation algorithms of power systems [J]. IEEE Access, 2020(8): 51035-51043.
- [14] 王日俊,白越,曾志强,等. 多旋翼无人飞行器机载光电平台的复合补偿控制方法[J]. 光电工程, 2017, 44(10): 983-1029.
- [15] BUCOLO M, BUSCARINO A, FORTUNA L, et al. LQR control of linear lossless positive real systems: The continuous time and discrete time cases [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2022(10): 1075-1083.
- [16] 赵强,孙柱. 基于卡尔曼滤波的车辆液压主动横向稳定杆最优控制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(11): 128-135.
- [17] 姜俊豪,陈刚. 驾驶机器人转向操纵的动态模型预测控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 594-603.
- [18] 夏勇生,吴东升,平兰兰. 基于MPC的爆胎车辆轨迹控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 154-160.

作者简介

晁育平,硕士研究生,主要研究方向为机载光电平台稳定控制技术。

E-mail: 18292835815@163.com

王日俊,副教授,主要研究方向为飞行器故障诊断与容错控制技术。

E-mail: wangrijun1982@126.com