



多旋翼无人飞行器机载光电平台的复合补偿控制方法

王日俊^{1*}, 白越², 曾志强¹, 段能全¹, 杜文华¹, 王俊元¹

¹中北大学机械工程学院, 太原 030051;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033



摘要: 为了提高多旋翼无人飞行器机载光电平台的扰动补偿能力, 实现机载光电平台的稳定跟踪控制, 提出一种基于改进扰动观测器和径向基函数(RBF)神经网络逼近的复合补偿控制方法。首先, 对现有扰动观测器结构进行改进, 构建基于速度信号的改进型扰动观测器, 并分析了干扰补偿能力和稳健性; 然后, 利用 RBF 神经网络的函数逼近性质解决非线性未知扰动的补偿问题; 最后, 基于 Lyapunov 稳定性原理设计出复合补偿控制结构。实验结果表明, 机载光电平台的扰动得到有效补偿。该补偿控制方法具有较高的稳定精度和跟踪控制性能, 满足多旋翼无人飞行器机载光电平台的稳定控制要求。

关键词: 多旋翼无人飞行器; 机载光电平台; 扰动观测器; 径向基函数神经网络; 复合补偿

中图分类号: TP273.3

文献标志码: A

Composite compensation control method for airborne opto-electronic platform mounted on multi-rotor UAV

Rijun Wang^{1*}, Yue Bai², Zhiqiang Zeng¹, Nengquan Duan¹, Wenhua Du¹ and Junyuan Wang¹

¹School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; ²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: In order to compensate disturbance and accomplish the stabilized tracking control for airborne platform mounted on multi-rotor unmanned aerial vehicle (MUAV), a self-adjusting tracking control method based on an improved disturbance observer (DOB) and radial basis function (RBF) neural network approximation is proposed. First, a compensated control is introduced into feedback loop in the structure of original disturbance observer, an improved disturbance observer is established based on velocity signals, and the ability of disturbance compensation and robustness are analyzed. Second, aiming at the compensation problem of nonlinear unknown disturbance, a method based on the RBF neural network (RBFNN) approximation properties is utilized. Finally, a composite compensation control structure is designed based on Lyapunov stability theory. The experimental results show that after applying the proposed method, the disturbance of airborne opto-electronic platform is compensated effectively. The proposed method has high precision and stable tracking control performance, and it can fully meet the requirement of airborne opto-electronic platform stability control.

收稿日期: 2017-06-09; 收到修改稿日期: 2017-07-22

*E-mail: wangrijun1982@126.com

Keywords: multi-rotor unmanned aerial vehicle (MUAV); airborne opto-electronic platform; disturbance observer; radial basis function neural network; composite compensation

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.10.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(10): 983-989

1 引言

机载光电平台是多旋翼无人飞行器(multi-motor unmanned aerial vehicle, MUAV)执行目标侦察、识别与跟踪等任务的关键所在^[1]。机载光电设备的成像质量、识别精度以及跟踪精度,在很大程度上取决于机载光电平台的稳定控制性能^[2,3]。然而在飞行作业过程中,机载环境较为恶劣,机载光电平台极易受到气流扰动、机体振动以及其他一些未知扰动因素的干扰,严重影响其稳定性和精确性,甚至会导致侦察、跟踪等任务无法完成^[4]。因此,在实现机载光电平台稳定跟踪的同时,如何提高机载光电平台的抗扰动能力,已成为制约机载光电平台发展与应用的关键问题。

针对机载光电平台的扰动补偿问题,基于扰动观测器(disturbance observer, DOB)的控制方法已得到较为广泛的应用^[5-7]。文献[8]在机载稳定平台的控制系统中,采用扰动观测器结构估计和补偿平台扰动,实现机载平台的扰动补偿,改善其稳定控制性能。但是该结构对高频噪声干扰的补偿作用并不理想。文献[9]针对噪声干扰的补偿问题,在原有扰动观测器结构中新增两个控制器,提出一种改进的扰动观测器结构,提高其抑制噪声干扰的性能。但是,影响多旋翼无人飞行器机载光电平台系统性能的扰动通常具有较强的非线性,因此仅采用 DOB 结构来对其进行补偿,难以取得理想的跟踪控制性能。神经网络、模糊系统等具有实时性、稳健性好、能够逼近任何函数等特点,在稳定平台的跟踪控制系统中已得到广泛应用。文献[10]针对机载云台的稳定跟踪要求,利用模糊系统的逼近性质,提出一种基于扰动观测器的模糊自适应跟踪控制结构,提高了机载云台的稳定跟踪精度。文献[11]提出一种基于扰动补偿的单神经元自适应比例积分(PD)控制策略,利用神经元的自学习和自适应能力,实现了稳定平台在外界扰动和系统变化时平台的稳定跟踪控制。

本文针对多旋翼无人飞行器机载光电平台的扰动补偿和稳定跟踪控制要求,提出一种基于 RBF 神经网络(RBFNN)的复合补偿控制方法。将基于改进扰动观测器与基于 RBFNN 逼近理论的补偿控制方法相结合,

提高机载光电平台的稳定精度,保证其稳定跟踪性能,实现对多旋翼无人飞行器机载光电平台的扰动补偿和稳定跟踪控制。

2 机载光电平台系统建模

2.1 机载光电平台建模

通常,机载光电平台可看作刚体,假设其旋转中心与质心重合,根据 Lagrange-Euler 方程^[12],忽略离心力和科氏力,平台的非线性模型方程为

$$T = M_e \ddot{\theta} + F_v \dot{\theta} + F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}), \quad (1)$$

式中: M_e 为载荷的有效惯量, F_v 是粘滞摩擦力, F_c 是库伦摩擦力。将式(1)中的非线性项 $F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ 看作扰动项 T_f , 得到平台的线性模型为

$$T = M_e \ddot{\theta} + F_v \dot{\theta} + T_f. \quad (2)$$

令 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, 则 $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = \ddot{\theta}$ 。系统输出 $y = x_1$, 于是机载光电平台的空间状态模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F_v}{M_e} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M_e \end{bmatrix} \mathbf{u} + \mathbf{T}_d \\ \mathbf{y} = [1 \ 0] \mathbf{x} \end{cases}, \quad (3)$$

即

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{T}_d \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F_v}{M_e} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M_e \end{bmatrix}$,

$\mathbf{C} = [1 \ 0]$, $\mathbf{u} = [0 \ T]$, 模型的扰动项 $\mathbf{T}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ T_f \\ M_e \end{bmatrix}$ 。

2.2 执行机构建模

机载光电平台的执行机构采用直流电机,其数学模型^[13]为

$$a_1 \ddot{\theta} + a_2 \dot{\theta} + u_d = u, \quad (5)$$

式中: θ 是位置角度, u_d 是扰动, u 是输出。在实际应用中,参数 a_1 、 a_2 因扰动产生一定波动,使得实际的参数值为 $a_1 = \hat{a}_1 + \delta a_1$, $a_2 = \hat{a}_2 + \delta a_2$, 其中 \hat{a}_1 和 \hat{a}_2 是实测值, δa_1 、 δa_2 是扰动引起的变化量。可定义包括

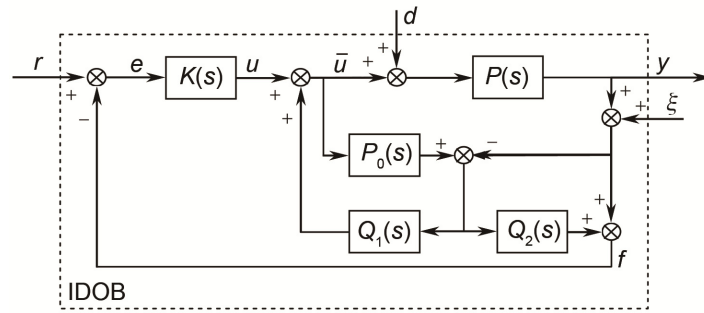


图 1 IDOB 的结构.

Fig. 1 Structure of IDOB.

参数波动、扰动项 T_d 以及其他非线性未知扰动等在内的扰动函数 $f(\cdot) = \delta a_1 \ddot{\theta} + \delta a_2 \dot{\theta} + u_d$ 。则扰动条件下执行机构的模型为

$$\hat{a}_1 \ddot{\theta} + \hat{a}_2 \dot{\theta} + f(\cdot) = u. \quad (6)$$

3 扰动观测器的改进设计

针对 DOB 难以抑制噪声干扰的问题, 本文通过在 DOB 结构输出的反馈端引入一个补偿控制器 $Q_2(s)$, 提高其对高频噪声的抑制能力, 提出一种基于速度信号的改进型扰动观测器(improved disturbance observer based on velocity signal, IDOB), 其结构如图 1 所示。

图 1 中 $P(s)$ 为平台模型, $P_0(s)$ 为平台的标称模型, r 为参考输入, d 为外界扰动, ξ 为噪声干扰。通常, d 和 ξ 处于不同的频率范围。假设存在两个截止频率 ω_l 和 ω_h , 且 $\omega_l < \omega_h$, 则有 $\xi(j\omega) \in (\omega_h, \infty)$, $d(j\omega) \in (0, \omega_l)$, $r(j\omega) \in (0, \omega_l)$ 。且在 $(0, \omega_l)$ 内, 有 $Q(s) \approx 1$, 在 (ω_h, ∞) 内, 有 $Q(s) \approx 0$ 。

由图 1 可知, IDOB 结构的传递函数为

$$y(s) = \frac{PK}{PK+1+(P-P_0)(Q_1-KQ_2)} r(s) + \frac{1-P_0Q_1+KP_0Q_2}{PK+1+(P-P_0)(Q_1-KQ_2)} d(s) - \frac{PK+PQ_1-PKQ_2}{PK+1+(P-P_0)(Q_1-KQ_2)} \xi(s). \quad (7)$$

由式(7)可知, 若 $Q_1(s)$ 、 $Q_2(s)$ 满足:

$$Q_1 - KQ_2 \approx P_0^{-1}, \quad \omega \in (0, \omega_l), \quad (8)$$

$$K + Q_1 - KQ_2 \approx 0, \quad \omega \in (\omega_h, \infty), \quad (9)$$

此时, 外界扰动 d 和噪声干扰 ξ 均得到抑制。

机载光电平台极易受到扰动因素的影响, 难以建立精确的模型, 其标称逆模型 $P_0^{-1}(s)$ 的存在性和稳定性无法确定。因此需考虑如下两种情况:

1) $P_0^{-1}(s)$ 存在且稳定。

当 $\omega \in (0, \omega_l)$ 时, 有 $Q_1(s) \approx P_0^{-1}(s)$, $Q_2(s) \approx 0$; 当 $\omega \in (\omega_h, \infty)$ 时, 有 $Q_1(s) \approx 0$, $Q_2(s) \approx 1$, 则传递函数为

$$y(j\omega) \approx \frac{P_0K}{1+P_0K} r(j\omega), \quad \omega \in (0, \omega_l), \quad (10)$$

$$y(j\omega) \approx 0, \quad \omega \in (\omega_h, \infty). \quad (11)$$

2) $P_0^{-1}(s)$ 不存在或不稳定。

当 $\omega \in (0, \omega_l)$ 时, 考虑模型的近似优化问题为 $\inf_{Q_3 \in RH_\infty} \|W_N(I - P_0Q_3)\|_{\infty, 2}$ 。当 $\omega \in (0, \omega_l)$ 时, 权函数 W_N 取得高增益, 则有 $Q_3(s) \approx P_0^{-1}(s)$ 。于是, 当 $\omega \in (0, \omega_l)$ 时, $Q_1(s) \approx Q_3(s)$, $Q_2(s) \approx 0$; 当 $\omega \in (\omega_h, \infty)$ 时, 有 $Q_1(s) \approx 0$, $Q_2(s) \approx 1$ 。同样地, 得到如式(10)与式(11)所描述的输入输出关系。

因此, $P_0^{-1}(s)$ 存在或稳定与否, IDOB 都可以有效地抑制系统的扰动, 保证系统输出对给定信号的稳定跟踪性能。

定理 对于如图 1 所示的 IDOB 结构, 在 $P_0(s) \in H_\infty$ 时, 若 $K(s)$ 满足系统的稳定性要求, 且 $Q_1P_0 + Q_2 = 1$, 则有: $G_{ur}(s) = (1 + KP_0)^{-1}K$, 即给定信号 r 到 $K(s)$ 输出 u 之间的闭环传递函数不变。

证 由图 1 可知,

$$\bar{u} = u + Q_1[P_0\bar{u} - (Pd + P\bar{u} + \xi)], \quad (12)$$

$$f = Q_2[P_0\bar{u} - (Pd + P\bar{u} + \xi)] + Pd + P\bar{u} + P\xi. \quad (13)$$

将式(12)代入式(13), 有:

$$f = \frac{Q_1P_0 + (1 - Q_2)P}{1 - Q_1P_0 + Q_1P} u - \frac{1 - Q_1P_0 - Q_2}{1 - Q_1P_0 + Q_1P} (Pd + \xi), \quad (14)$$

$\because Q_1P_0 + Q_2 = 1$, 代入式(14)有 $f = P_0u$,

$\therefore G_{ur}(s) = (1 + KP_0)^{-1}K$. 定理得证。

采用加法摄动来表示 $P_0(s)$ 模型误差的集合, 则 $P(s) = P_0(s) + W_1\Delta(s)$, 其中 W_1 是稳定有界的加权函数, $P(s)$ 、 $\Delta(s)$ 均为严格有理稳定的函数。由稳定性定理,

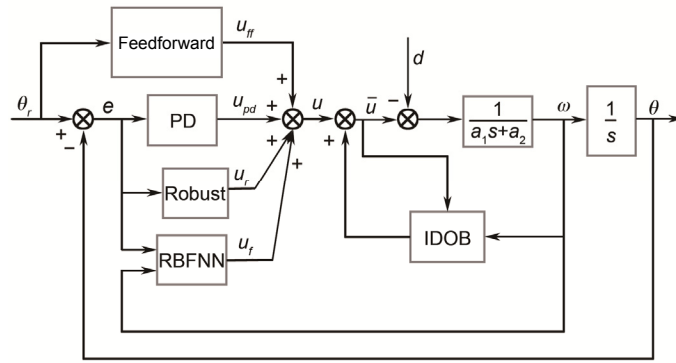


图2 复合补偿控制结构.

Fig. 2 Structure of composite control system based on RBFNN.

得到 IDOB 稳定的充要条件为

$$\left\| \frac{1}{(Q_1 + KQ_2)W_1} \right\|_\infty < 1. \quad (15)$$

4 复合补偿控制方法

在 IDOB 抑制机载光电平台扰动的基础上, 利用 RBFNN 的函数逼近特性来进一步对系统的干扰进行补偿, 提出一种基于 RBFNN 的机载光电平台复合补偿控制方法。其控制结构如图 2 所示。

定义系统误差为 $e = \theta_r - \theta$, θ_r 为位置给定。由图 2 可知, 复合补偿结构的控制律为

$$u = u_{ff} + u_{pd} + u_{rbf} + u_r, \quad (16)$$

式中: 前馈控制器输出 $u_{ff} = \hat{a}_1 \ddot{\theta}_r + \hat{a}_2 \dot{\theta}_r$, 比例微分(PD)控制器输出 $u_{pd} = k_p e + k_d \dot{e}$, 根据式(6)有

$$\hat{a}_1 \ddot{\theta} + \hat{a}_2 \dot{\theta} + f(\cdot) = \hat{a}_1 \ddot{\theta}_r + \hat{a}_2 \dot{\theta}_r + k_p e + k_d \dot{e} + u_{rbf} + u_r, \quad (17)$$

即:

$$\hat{a}_1 \ddot{e} + (\hat{a}_2 + k_d) \dot{e} + k_p e + f(\cdot) = u_{rbf} + u_r. \quad (18)$$

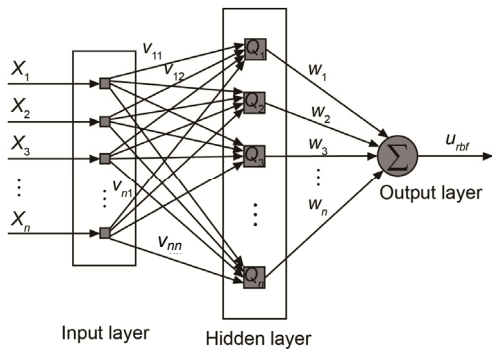


图3 RBFNN 结构.

Fig. 3 Structure diagram of RBFNN.

RBFNN 采用的结构如图 3 所示。

由图 3 可知, RBFNN 控制器的输出为

$$u_{rbf} = WQ, \quad (19)$$

式中: $W = [w_1, w_2, \dots, w_k] \in \mathbf{R}^{1 \times k}$ 是隐含层到输出层的互联加权矩阵, Q 是隐含层节点, 且

$$Q = \exp[-(VX - m)^2 / s] = [Q_1, Q_2, \dots, Q_k]^T \in \mathbf{R}^{k \times 1}, \quad (20)$$

式中: $V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{k1} & v_{k2} & \dots & v_{kn} \end{bmatrix}$ 为输入层到隐含层的互

联加权矩阵, $X = [X_1, X_2, \dots, X_k]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为输入向量, $m = [m_1, m_2, \dots, m_k]^T \in \mathbf{R}^{k \times 1}$ 和 $s = [s_1, s_2, \dots, s_k]^T \in \mathbf{R}^{k \times 1}$ 是 RBF 径向基函数的可调参量。

利用 RBFNN 控制输出逼近扰动函数 $f(\cdot)$ 为

$$f(\cdot) = W^*Q + \delta, \quad (21)$$

式中: W^* 为参数 W 的最优估计值, δ 为逼近误差, $|\delta| < \varphi$, $\varphi > 0$ 。且存在参数 W 和 φ 的估计值 \hat{W} 、 $\hat{\varphi}$, 使得其估计误差 $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$, $\tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}$, 将式(21)代入式(18)有

$$\hat{a}_1 \ddot{e} + (\hat{a}_2 + k_d) \dot{e} + k_p e = \tilde{W}Q + \delta - u_r. \quad (22)$$

$$\text{令 } X = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -\hat{a}_2 + k_d \\ \hat{a}_1 & \hat{a}_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \hat{a}_1 \end{bmatrix},$$

$A = \tilde{W}Q + \delta - u_r$, 则得到系统控制律的状态空间形式为

$$\dot{X} = AX + BA. \quad (23)$$

考察系统的稳定性, 定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} X^T P X + \frac{1}{2\gamma_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \tilde{W}) + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\varphi}^2, \quad (24)$$

式中: γ_1 和 γ_2 为学习系数, 且 $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$ 。将式(24)对时间进行求导,

$$\dot{V} = \frac{1}{2} X^T (A^T P + PA) X + A^T B^T P X + \frac{1}{\gamma_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}}, \quad (25)$$

式中: $A^T P + PA = -H$, P 、 H 均为正定对称矩阵,

$$\text{取 } P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}, \lambda = \frac{p_{22}}{\hat{a}_1} \dot{e} + \frac{p_{21}}{\hat{a}_1} e,$$

则 $A^T B^T P X = \Delta \lambda$, 式(25)可简化为

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} X^T H X + \tilde{W}^T Q \lambda + \delta \dot{\lambda} - u_r \lambda - \frac{1}{\gamma_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} - \frac{1}{\gamma_2} \phi \dot{\phi}. \quad (26)$$

令参数自适应律 $\dot{\tilde{W}} = \gamma_1 \lambda Q^T$, $\dot{\tilde{\phi}} = \gamma_2 \cdot \lambda \cdot \text{sgn}(\lambda)$, 鲁棒控制器输出 $u_r = \hat{\phi} \cdot \text{sgn}(\lambda)$, 代入式(26)有:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} X^T H X + \delta \dot{\lambda} - \phi |\lambda| \leq -\frac{1}{2} X^T H X + |\lambda| (|\delta| - \phi).$$

因 $|\delta| < \phi$, 且 H 为正定对称矩阵, 则有:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} X^T H X < 0. \quad (27)$$

因此, 复合补偿控制系统采用上述控制律和参数自适应律时, 系统是渐进稳定的。

5 实验研究

本实验以搭载于某多旋翼无人飞行器上的机载光电平台系统作为研究对象, 如图 4 所示。



图 4 实验用搭载于多旋翼无人飞行器的机载光电平台。
Fig. 4 Airborne opto-electronic platform mounted on mUAV for experiment.

低通滤波器 $Q_1(s)$ 选择典型的 Q_{31} 滤波器, 时间常数 $\tau = 0.01$ s, 低通滤波器为

$$Q_1(s) = \frac{3\tau s + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1}, \quad (28)$$

补偿控制器为

$Q_2(s) = 1 - P(s) \times Q_1(s) = 1 - [C(sI - A)^{-1} B] Q_1(s)$, 将式(4)中的 A 、 B 、 C 代入 $Q_2(s)$ 中得到:

$$Q_2(s) = 1 - 31.847 \frac{1}{s(s-0.732)} \frac{3\tau s + 1}{\tau^3 s^3 + 3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1}, \quad (29)$$

对称正定矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} 1000 & 200 \\ 200 & 100 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

学习系数 $\gamma_1 = 200$, $\gamma_2 = 0.1$; PD 控制器参数 $k_p = 15$, $k_d = 2$ 。RBFNN 输入向量 $X = [\theta_r, e]^T$, 隐含层节点数为 3, RBF 权值初始值取 0。通过扫频法辨识得到机载光电平台的模型参数如表 1 所示。

表 1 机载光电平台模型参数。

Table 1 Parameters of airborne opto-electronic platform.

Parameter	Value
Pitch channel $M_e / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.0314
Pitch channel $F_v / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad})$	0.0023
Yaw channel $M_e / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.4286
Yaw channel $F_v / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad})$	0.0055
Parameters \hat{a}_1	0.5
Parameters \hat{a}_2	2

5.1 视轴稳定控制实验

该实验以滚转通道为例, 主要验证 IDOB 对机载光电平台扰动的补偿能力。根据图 1 设计 IDOB 控制结构, 飞行器在飞行过程中, 平台给定滚转角度为 0° 时, 视轴稳定控制精度对比实验结果如图 5 所示。

当采用 DOB 补偿结构时, 视轴的稳定误差最大值约为 5° , 误差均方值小于 2.35° , 如图 5(a) 所示。当采用 IDOB 补偿结构时, 视轴的稳定误差最大值小于 1.8° , 误差均方值小于 0.80° , 如图 5(b) 所示。实验结果表明, IDOB 结构具有更好的扰动抑制能力和更高的稳定精度, 从而验证了改进的有效性。

5.2 跟踪控制实验

该实验以滚转通道为例, 通过对给定位置信号的跟踪性能来验证本文提出的补偿控制方法的有效性。根据图 2 设计平台控制系统, 飞行器在平飞过程中, 通过 RC 遥控给定平台滚转角度, 位置跟踪控制实验结果如图 6 和图 7 所示。

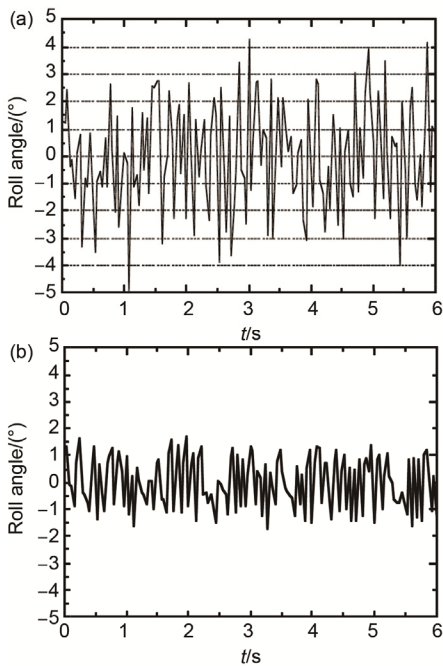


图5 视轴稳定控制对比结果. (a) 扰动观测器. (b) 改进型扰动观测器.

Fig. 5 Comparison results of line of sight error. (a) DOB. (b) IDOB.

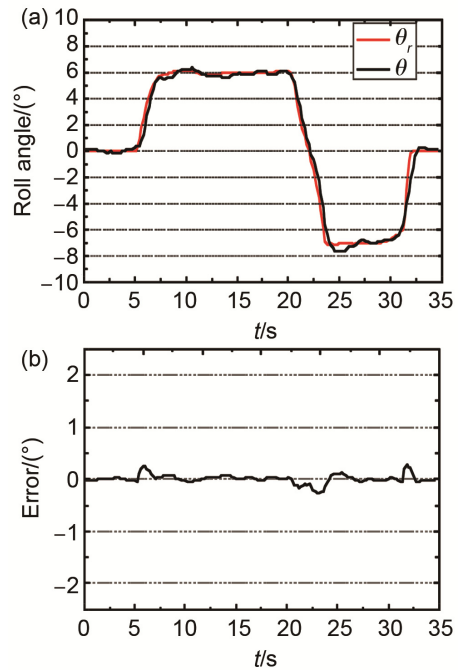


图7 引入RBFNN跟踪曲线. (a) 位置跟踪曲线. (b) 跟踪误差.

Fig. 7 Position tracking curve with RBFNN. (a) Position tracking curve. (b) Position tracking error.

图6(a)和6(b)分别为未引入RBFNN补偿控制的位置跟踪曲线和跟踪误差。此时，机载光电平台跟踪给定位置信号的误差较大，误差最大值约为4.5°。由于扰动因素干扰作用，跟踪曲线呈现一定幅度的波动，这显然无法满足机载光电平台的精确跟踪控制要求。

图7(a)和7(b)分别为本文提出补偿控制方法的位置跟踪曲线和跟踪误差。此时，机载光电平台跟踪给定位置信号的误差最大值不超过0.25°，跟踪误差明显减小。由扰动干扰引起的跟踪曲线波动现象减弱，跟踪给定位置信号的跟踪效果较为理想。

5.3 自动跟踪控制实验

实验以滚转通道为例，验证本文提出的补偿控制方法在实际飞行过程中，自动对给定位置信号进行跟踪控制的能力。在室外有风的飞行条件下(外界风速为3.0 m/s~3.5 m/s)，多旋翼无人飞行器的航向角垂直于风向，实验结果如图8所示。

图8(a)和8(b)分别为对给定位置信号自动跟踪控制的跟踪曲线和跟踪误差。从图中可以看出，在机载环境下，本文提出的补偿控制方法能够实现机载光电平台对给定位置信号的自动跟踪，在给定位置发生较大切换处，跟踪误差的最大值不超过2.5°，且基本无振荡。在非切换处的跟踪误差小于0.3°。

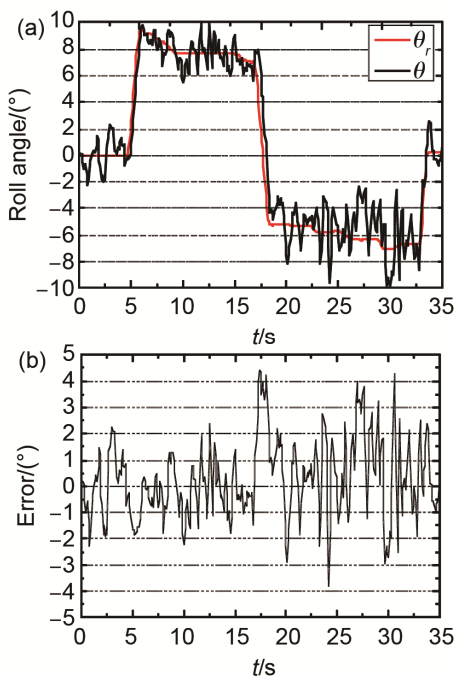


图6 未引入RBFNN的位置跟踪曲线. (a) 位置跟踪曲线. (b) 跟踪误差.

Fig. 6 Position tracking curve without RBFNN. (a) Position tracking curve. (b) Position tracking error.

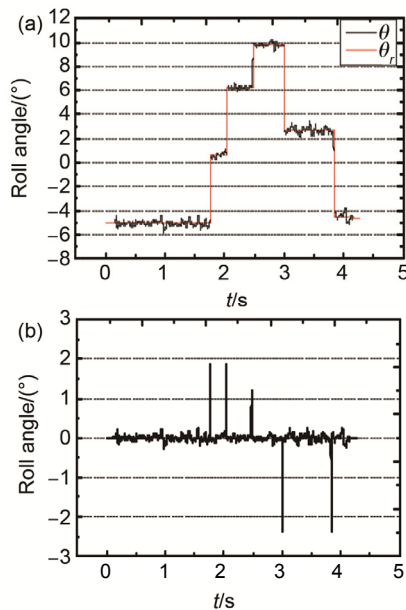


图 8 机载环境下的跟踪曲线和跟踪误差。(a) 位置跟踪曲线。(b) 跟踪误差。

Fig. 8 Tracking curve and tracking error of proposed method in airborne environment. (a) Position tracking curve. (b) Position tracking error.

6 结论

机载光电平台的稳定控制是多旋翼无人飞行器在各个领域内完成飞行作业任务的重要基础。为提高机载光电平台的抗扰动能力和稳定控制精度，基于 IDOB 的扰动观测和 RBFNN 的扰动逼近理论相结合，利用 Lyapunov 稳定性原理设计一种多旋翼无人飞行器机载光电平台的复合补偿控制方法。在理论分析证明了系统的稳定性基础上，通过实验验证了该方法的有效性。实验结果表明，采用本文提出的补偿控制方法，机载光电平台系统能够更为有效地抑制扰动的影响，具有较高的稳定跟踪精度，满足多旋翼无人飞行器机载光电平台的稳定跟踪控制的要求。

基金项目

国家自然科学基金(11372309);中北大学自然科学基金(XJJ2016006)。

参考文献

- Gao Wen. Research on the target tracking application to photoelectricity platform[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
高文. 机载光电平台目标跟踪技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.

- Mei Y, Zhao H Y, Guo S Y. The analysis of image stabilization technology based on small-UAV airborne video[C]// *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 2012: 586–589.
- Qiu Baomei, Wan Jiquan, Wang Jianwen. Active disturbance rejection controller of the aerial photography stabilized platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(4): 21–26.
邱宝梅, 万吉权, 王建文. 机载摄影稳定平台的自抗扰控制[J]. *光电工程*, 2012, **39**(4): 21–26.
- Wang Rijun. Study on image stabilization technology for the payload of mUAV[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
王日俊. 多旋翼无人飞行器载荷稳像技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods: an overview[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(2): 1083–1095.
- Ren Yan, Liu Zhenghua, Zhou Rui. Application of low speed opto-electronic tracking systems based on sliding mode disturbance observer[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, **39**(6): 835–840.
任彦, 刘正华, 周锐. 低速光电跟踪系统在低速光电跟踪系统中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, **39**(6): 835–840.
- Lee M H, Park H G, Lee W B, et al. On the design of a disturbance observer for moving target tracking of an autonomous surveillance robot[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, **10**(1): 117–125.
- Li Jiaquan, Ding Ce, Kong Dejie, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 998–1004.
李嘉全, 丁策, 孔德杰, 等. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 998–1004.
- Xie Wei, He Zhongliang. Control method with improved disturbance observer[J]. *Control Theory and Applications*, 2010, **27**(6): 695–700.
谢巍, 何忠亮. 采用改进型扰动观测器的控制方法[J]. *控制理论与应用*, 2010, **27**(6): 695–700.
- Wang Rijun, Bai Yue, Xu Zhijun, et al. Fuzzy self-adjusting tracking control based on disturbance observer for airborne platform mounted on multi-rotor unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, **49**(10): 2005–2012.
王日俊, 白越, 续志军, 等. 基于扰动观测器的多旋翼无人机机载云台模糊自适应跟踪控制[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, **49**(10): 2005–2012.
- Zhu Hairong, Li Qi, Gu Juping, et al. Single-neuron adaptive PI control of the gyrostabilized platform based on disturbance compensation[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, **16**(3): 65–70, 77.
朱海荣, 李奇, 顾菊平, 等. 扰动补偿的陀螺稳定平台单神经元自适应PI控制[J]. *电机与控制学报*, 2012, **16**(3): 65–70, 77.
- Khalil H K. *Nonlinear system*[M]. 3rd edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 24.
- Hu Hongjie, Wang Yuanzhe. Composite compensation control scheme for airborne opto-electronic platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1272–1281.
扈宏杰, 王元哲. 机载光电平台的复合补偿控制方法[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1272–1281.