

引用格式:王春阳,姜明瑞,史红伟.四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计[J].电光与控制,2019,26(3):103-107. WANG C Y, JIANG M R, SHI H W. Design of trajectory tracking control system for quad-rotor UAV[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):103-107.

四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计

王春阳^{1,2}, 姜明瑞², 史红伟^{1,2}

(1. 西安工业大学信息感知与控制研究所,西安 710021; 2. 长春理工大学电子信息工程学院,长春 130022)

摘要:针对四旋翼无人机参数不确定性和对外部干扰敏感的问题,提出一种基于线性自抗扰的轨迹跟踪控制系统设计方案。线性自抗扰能够很好地克服无人机的强耦合性、模型不确定性以及外部干扰问题。将四旋翼无人机的轨迹跟踪控制系统分为内外两个环路,内环采用线性自抗扰控制器,外环采用简单的PD控制器。在仿真平台上对线性自抗扰控制系统进行轨迹跟踪实验,并与传统的PID控制系统进行对比分析。通过仿真实验证明,所设计的线性自抗扰控制器不仅能够很好地估计并补偿系统所受内外外部干扰,而且对四旋翼无人机参数的不确定性具有较强的鲁棒性,能够满足无人机姿态调节快速和高稳定度的控制要求,性能指标明显优于PID控制器。

关键词:四旋翼无人机; 线性自抗扰; 轨迹跟踪; PD控制器

中图分类号: TP273 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.021

Design of Trajectory Tracking Control System for Quad-Rotor UAV

WANG Chun-yang^{1,2}, JIANG Ming-rui², SHI Hong-wei^{1,2}

(1. Information Perception and Control Institute, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Department of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A linear active disturbance rejection controller was designed for the trajectory tracking control system of a quad-rotor UAV to reduce the effects of parameter variations and external disturbances. The Linear Active Disturbance Rejection Controller (LADRC) can well overcome the problems of strong coupling, model uncertainty, and external disturbances. In this paper, the quad-rotor UAV trajectory tracking control system is divided into two loops; the outer loop uses a simple PD controller, and the inner loop uses a linear active disturbance rejection controller. The trajectory tracking experiment was performed on the linear active disturbance rejection control system on the simulation platform, and it was compared with the traditional PID control system. Simulation results show that the linear active disturbance rejection controller not only accurately estimates and compensates the internal/external disturbances, but also implements the quad-rotor flight control with robustness under the condition of dynamic parametric uncertainties. The controller meets the design requirements of fast attitude maneuver and high stability, and shows a superior performance to PID controller.

Key words: quad-rotor UAV; linear active disturbance rejection; trajectory tracking; PD controller

0 引言

四旋翼无人机是一种具有4个控制输入和6个控制输出的欠驱动动力学旋翼式直升机^[1]。通过分析可以发现针对四旋翼无人机存在的非线性、欠驱动以及强耦合的特性^[2],采用传统的控制方法很难满足

它的动态性能指标。为了使四旋翼无人机能够有效地解决外部环境干扰和自身参数不确定性等因素的影响,必须设计一种能够有效实现四旋翼无人机轨迹精确跟踪的控制方法。

通过研究四旋翼无人机的模型信息可以明显看出,四旋翼无人机的数学模型存在低增益、非自衡、时滞等特性,这也是工业等控制领域中普遍存在的现象。为了解决这种低增益特性带来的影响,必须加入较大的控制增益才能有效改善控制效果。在实

收稿日期:2018-03-28

修回日期:2018-11-26

作者简介:王春阳(1964—),女,吉林长春人,博士,教授,研究方向为复杂运动系统高精度稳定控制。

际系统中,控制器输出受限,同时受控对象具有非平衡特性。针对四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计问题,国内外研究团队主要采用的控制方法包括 PID 控制、反步法、滑模控制^[3]、自适应控制等。经典的 PID 算法是一种不依赖于模型的控制方法,该方法比较成熟且易于实现。但对于四旋翼无人机所具有的特性,传统 PID 控制方法无法满足其动态性能指标。

为了有效提高四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统对外部环境干扰和自身参数不确定性等因素的适应能力,本文设计一种基于线性自抗扰控制(LADRC)的四旋翼无人机轨迹跟踪控制方法^[4]。在对自抗扰控制器进行简要介绍的基础上设计了无人机基于线性自抗扰的控制系统结构及控制器具体算法。最后通过与 PID 控制器的对比实验,验证了自抗扰控制器的控制性能,检验了该系统的抗扰性和鲁棒性。

1 自抗扰控制原理

自抗扰控制器主要包含跟踪微分器(TD)、非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)和扩张状态观测器(ESO)3个部分^[5]。图1所示为二阶自抗扰控制器的结构。

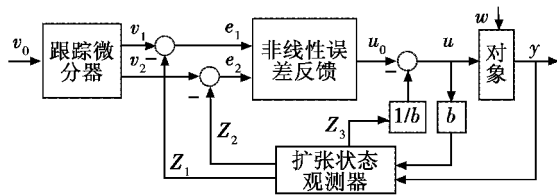


图1 自抗扰控制结构图

Fig.1 Diagram of active disturbance rejection control

跟踪微分器的主要功能就是为输入信号安排过渡过程,从而使比例系数和微分系数可以有更大的选择空间。通过该处理可以使整定工作更加容易,而且可以极大地提高控制器的鲁棒性^[6]。因为具有过渡过程,所以在控制器参数保持不变的情况下系统能够适应的对象范围更大,相当于控制器的适应性更强,而且通过跟踪微分器可以提取出系统比较优质的微分信号。

扩张状态观测器是自抗扰控制器中最重要的一个部分,同时也是本章研究的重点。它不但可以估计出系统的状态量,而且可以估计出由模型不确定性引起的内在扰动以及由环境原因引起的外部扰动的实时作用量;不仅可以对这些扰动进行补偿,而且可以使不确定、非线性的对象达到线性化、确定化,这样就可以把复杂的系统简化为“积分串联器型”线性系统。

非线性状态误差反馈控制的作用就是产生初始的

控制量,它通过非线性组合的方式来处理过渡过程和状态估计之间的误差变量,接着再综合扩张状态观测器估计出的总扰动实时作用量对它进行补偿,得到最终的控制量。

2 基于线性自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计

假设在地面坐标系下无人机相对于原点的坐标为 $\Gamma = (x \ y \ z)$, 欧拉角为 $\Theta = (\phi \ \theta \ \psi)$, 在机体坐标系下无人机转动的角速度为 $\omega = (p \ q \ r)$, 那么四旋翼无人机的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{z} = (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} - g \\ \dot{p} = \frac{I_y - I_z}{I_x} qr - \frac{J_{TP}}{I_x} q\Omega + \frac{U_2 l}{I_x} \\ \dot{q} = \frac{I_z - I_x}{I_y} pr + \frac{J_{TP}}{I_y} p\Omega + \frac{U_3 l}{I_y} \\ \dot{r} = \frac{I_x - I_y}{I_z} pq + \frac{U_4}{I_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为飞行器的质量; I 为惯性张量; l 为无人机质心与旋翼中心的距离; U 为各个通道的输入控制量, 并且满足

$$\begin{cases} U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ U_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ U_3 = b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ U_4 = d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: b 为升力系数; Ω_i 为第 i 个旋翼的转速; d 为反扭矩系数。

通过对四旋翼无人机的动力学模型分析可以看出滚转、俯仰以及偏航这3个通道之间存在耦合特性, 这给控制器的设计带来很大的难度^[7], 如果采用自抗扰控制器就可以有效地解决这个难题。把各个通道之间的相互影响看作系统内部的干扰, 同时结合由环境引起的外部干扰作为该通道的总扰动。随后每个通道各自独立地运用 ESO 对总扰动进行实时估计, 并且对扰动引起的误差进行补偿, 最终有效实现无人机的解耦控制。通过这样的处理, 每个通道由以前的非线性、不确定对象转化为“积分串联器型”线性系统。由于考虑到偏航角始终保持在一个很小的范围内几乎为零, 俯仰角 θ 则作为 x 通道的控制输入, 而横滚角 ϕ 是 y 通道的控制输入。设计四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统为4个独立的回路: 高度控制回路、水平 y - ϕ 控制回路、水平 x - θ 控

制回路以及偏航控制回路,同时每个回路中都采用线性自抗扰控制器。整个系统的结构如图2所示。

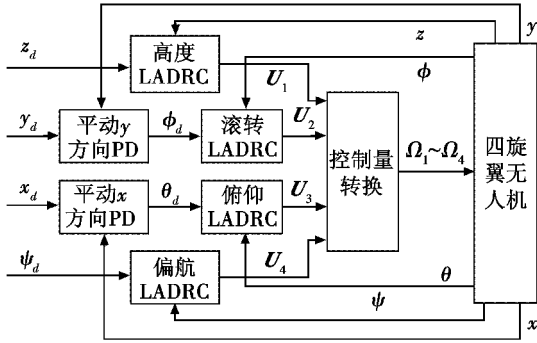


图2 基于LADRC的控制系统结构

Fig. 2 Diagram of control system based on LADRC

图2中,水平 $y-\phi$ 通道以及水平 $x-\theta$ 通道的结构均选择内外环嵌套的形式,而且外环的平动控制器都选用PD算法控制。PD控制器通过对比输入的期望轨迹信号以及无人机的位置状态,进而就可以确定无人机在平动方向上所需要的控制量。结合四旋翼无人机的运动学模型,将PD控制器的控制量反解为期望的姿态角信息,然后将信息传送给内环的自抗扰姿态控制器。最后由自抗扰算法控制无人机,从而保证姿态跟踪输入的参考信号,这样就实现了对于目标轨迹的实时跟踪。

3 控制器设计

以水平 $y-\phi$ 通道作为示例,轨迹跟踪控制框如图3所示。

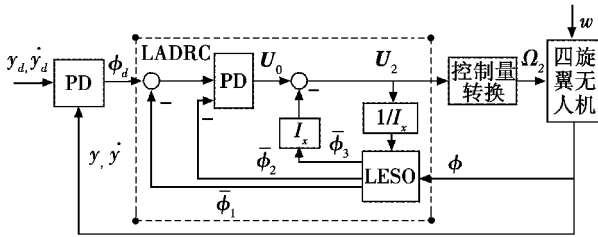


图3 $y-\phi$ 通道轨迹跟踪控制框图

Fig. 3 Structure diagram of $y-\phi$ channel trajectory tracking control

在线性自抗扰控制理论中,线性扩张状态观测器(LESO)可以准确地对目标进行观测,所以在这里没有使用自抗扰算法中的跟踪微分器部分。这样不仅可以简化线性自抗扰的结构,而且更易于工程实现,简化了设计过程。并且ESO中的非线性函数 $fal(\cdot)$ 采用 $y-\phi$ 通道内环的LESO误差代替^[8],可以表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \bar{\phi}_1 - \phi \\ \dot{\phi}_1 = \bar{\phi}_2 - \beta_{y01} \varepsilon_1 \\ \dot{\phi}_2 = \bar{\phi}_3 - \beta_{y02} \varepsilon_1 + U_2/I_x \\ \dot{\phi}_3 = -\beta_{y03} \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{\phi}_1$ 为滚转姿态角的估计值; $\bar{\phi}_2$ 为滚转角微分的估计值,也就是对滚转角速度的估计值; $\bar{\phi}_3$ 为对 $y-\phi$ 通道总的不确定性 w 的估计值。定义 $y-\phi$ 通道的LESO的控制增益为 $L_y = (\beta_{y01} \ \beta_{y02} \ \beta_{y03})^T$,可以得到特征方程式,即

$$s^3 + \beta_{y01} s^2 + \beta_{y02} s + \beta_{y03} \bar{\phi}_1 = 0 \quad (4)$$

通过分析,配置控制增益 $L_y = (3\omega_{y0} \ 3\omega_{y0}^2 \ \omega_{y0}^3)^T$,其中, ω_{y0} 表示观测器的带宽,所以特征方程可以表示为 $(s + \omega_{y0})^3$ 。这样系统更容易达到稳定状态,而且调节时间更短,并且对于LESO的参数只需调节一个 ω_{y0} 即可,极好地简化了自抗扰的控制参数调节工作。通过分析可以发现,即使LESO是线性结构,它也可以实现很好的控制效果。对于系统存在的未知模型信息、非线性的动态和未知外部的干扰等一系列影响,LESO都可以很好地补偿^[9]。

对于 $y-\phi$ 通道内环的线性化NLSEF,依然选择PD控制器,即

$$\begin{cases} U_0 = k_{yP}(\phi_d - \bar{\phi}_1) - k_{yD}\bar{\phi}_2 \\ U_2 = U_0 - I_x \bar{\phi}_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_{yP}, k_{yD} 是PD控制器的参数; ϕ_d 代表希望达到的滚转角度。通常,对于线性NLSEF的参数分配采用如下规则: $k_{yP} = \omega_{yc}^2, k_{yD} = 2\xi_y \omega_{yc}$,其中, ω_{yc} 和 ξ_y 分别为闭环自然震荡频率和阻尼比。因此在解算出 U_0 之后再加入对扰动估计值的补偿,最后就可以得到滚转力矩 U_2 。同样的方法,在分析其他3路通道 U_1, U_3, U_4 时,依然和上述线性自抗扰控制设计过程一样。以此实现四旋翼无人机按照期望的轨迹飞行。

4 基于线性自抗扰的四旋翼无人机稳定性分析

线性扩张状态观测器是线性自抗扰控制器的核心部分,它的稳定性就决定了线性自抗扰的稳定性,而且已经可以证明LESO为有界输入有界输出(BIBO)稳定^[10]。因为四旋翼无人机分为4个通路进行独立的轨迹跟踪控制研究,所以关于4个子系统的稳定性也独立地进行分析。

同样以 $y-\phi$ 通道为例进行分析。取 $x' = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, y =$

$x_1 = \phi$,可以把 $y-\phi$ 通道内环的滚转子系统表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = U_2/I_x + w \\ \dot{x}_3 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{取 } C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1/I_x \\ 0 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \text{在}$$

满足干扰 w 与 $h = \dot{w}$ 都是有界的情况下,可以把 y - ϕ 通道内环的滚转子系统的状态方程表达为

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + BU_2 + Hh \\ y = Cx' \end{cases} \quad (7)$$

那么根据式(5)有

$$U_2 = U_0 - I_x \bar{\phi}_3 = k_{y,p}(\phi_d - \bar{\phi}_1) - k_{y,D} \bar{\phi}_2 - I_x \bar{\phi}_3 \quad (8)$$

在 y - ϕ 通道中观测向量为 $z = (\bar{\phi}_1 \quad \bar{\phi}_2 \quad \bar{\phi}_3)$, 所以式(8)可以改写为

$$U_2 = Fz + R \quad (9)$$

式中: $F = (-I_x k_{y,p} \quad -I_x k_{y,D} \quad -I_x)$; $R = I_x k_{y,p} \phi_d$ 。综合以上分析,可以把基于线性自抗扰的滚转子系统表示成如下状态空间的形式

$$\begin{pmatrix} \dot{x}' \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & BF \\ LC & A - LC + BF \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} BR + Hh \\ BR \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中: 控制增益 $L = (\beta_{y,01} \quad \beta_{y,02} \quad \beta_{y,03})^T = (3\omega_{y,0} \quad 3\omega_{y,0}^2 \quad \omega_{y,0}^3)^T$ 。所以基于线性自抗扰的滚转子系统的特征值可以表示为

$$\text{eig} \left(\begin{pmatrix} A & BF \\ LC & A - LC + BF \end{pmatrix} \right) = \text{eig} \left(\begin{pmatrix} A + BF & BF \\ \mathbf{0} & A - LC \end{pmatrix} \right) = \text{eig}(A + BF) \cup \text{eig}(A - LC) \quad (11)$$

式中: $A + BF$ 的特征方程为 $s^2 + k_{y,D}s + k_{y,p} = 0$; $A - LC$ 的特征方程为 $s^3 + 3\omega_{y,0}s^2 + 3\omega_{y,0}^2s + \omega_{y,0}^3 = (s + \omega_{y,0})^3$ 。所以只要满足

$$\begin{cases} \omega_{y,0} > 0 \\ k_{y,p} > 0 \\ k_{y,D} > 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$A + BF$ 与 $A - LC$ 的特征方程的特征根全位于 s 平面的左半面,也就相当于线性自抗扰滚转子系统的特征根全都小于零。同时 ϕ_d 已知与 h 是有界的,所以 y - ϕ 通道内环滚转子系统 BIBO 稳定。

双环嵌套结构的四旋翼无人机 y - ϕ 通路的基于 LADRC 的内环通路只要满足式(12)的条件也是 BIBO 稳定的。因此只要外环的 PD 控制器选取合适的比例及微分控制参数,就可以实现四旋翼无人机的双环 y - ϕ 通道 BIBO 稳定。

同样的方法,也可以证明四旋翼无人机的双环嵌套 x - θ 通道也为 BIBO 稳定子系统。综上所述,基于线性自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统为 BIBO 稳定。

5 仿真实验及结果分析

本章进行基于自抗扰的四旋翼无人机轨迹跟踪仿

真实验。无人机的物理参数设置如下: $l = 0.196 \text{ m}$, $I_x = I_y = 2.364 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_z = 5.496 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。4 个回路的自抗扰控制器参数设置如下: $\omega_0 = 4\omega_c$, $\xi = 1$, $\omega_{x,c} = 50$, $\omega_{x,c} = 5$, $\omega_{y,c} = 10$; 其中, y - ϕ 通道及 x - θ 通道的外环 PD 参数设置为 $k_{y,p} = 18$, $k_{y,D} = 10$; $k_{x,p} = 14$, $k_{x,D} = 5$; 无人机的期望轨迹为从地面坐标的坐标原点 $O(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 飞至目标位置 $A(1 \text{ m}, 1 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 。因为偏航角在很小的范围内变化,设置期望偏航角为 1° 。同时,在 5 s 时给 Z 通道加一个幅值为 1.2 m 的跳变信号。

从图4可以看到,位置 $x(t)$ 的输出几乎没有超调量,调节时间约为 1.8 s ,另外 $y(t)$ 有不到 3% 的超调量,调节时间约为 1.2 s ; $z(t)$ 几乎没有超调量;从姿态的控制效果图可知,自抗扰控制器对于系统的姿态角的控制效果并不理想,虽然调节时间比较短,但是超调大,抖动幅值也大。通过在高度通道加入跳变信号来比较它们的抗干扰性能,可以明显看出 LADRC 的抗干扰能力更强。总体来看,本文设计的线性自抗扰四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统具有更好的抗干扰性和鲁棒性。

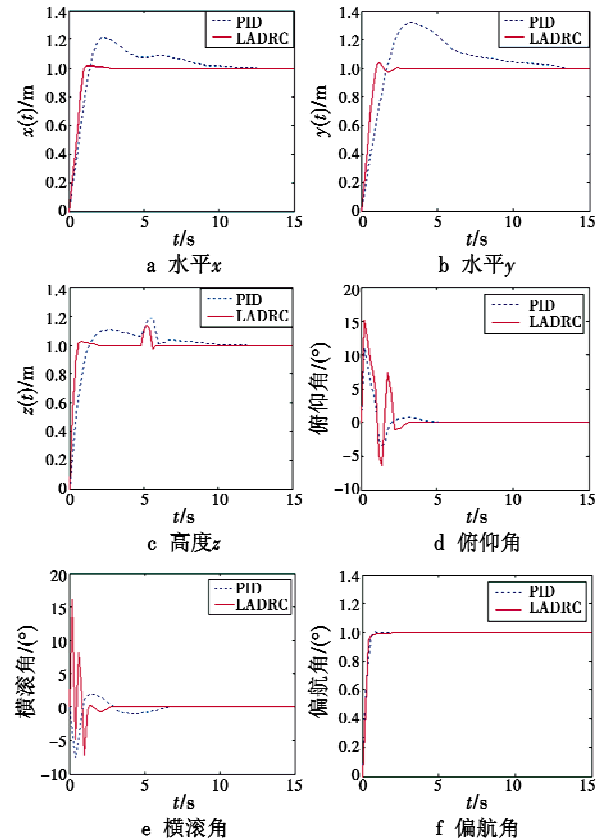


图4 四旋翼无人机轨迹跟踪曲线

Fig.4 Results of quad-rotor UAV trajectory tracking

仿真结果表明,在 LADRC 控制器的控制之下,无人机在 2 s 内就可以完成调整,实现姿态增稳和飞行高度控制,因此 LADRC 比 PID 算法具有更好的控制效果。

6 结论

本文着重研究四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计问题。针对四旋翼无人机非线性、强耦合、欠驱动的特性,本文设计了一种基于线性自抗扰的轨迹跟踪控制方法,并通过与传统PID控制方法的对比仿真实验来验证所提方法的抗扰性和鲁棒性。在今后的工作中将利用实际四旋翼无人机来进行实际平台验证,完成自抗扰控制器从理论到实践的过渡。此外还将尝试把自抗扰控制技术与其他智能控制方法相结合,以取得更好的四旋翼无人机轨迹跟踪控制效果。

参考文献

- [1] 陈雯雯. 小型四旋翼无人机轨迹规划算法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [2] 胡锦涛, 舒怀林. 基于PID神经网络的四旋翼飞行器控制算法研究[J]. 自动化与信息工程, 2015, 36(1): 18-22.
- [3] 王璐, 李光春, 王兆龙, 等. 欠驱动四旋翼无人飞行器

的滑模控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(10): 1248-1253.

- [4] CSANK J, GAO Z. Uncertainty reduction through active disturbance rejection[C]//American Control Conference, 2008: 3689-3694.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 19-23.
- [6] 刘一莎, 杨晟萱, 王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1351-1360.
- [7] 张岳军. 基于鲁棒与完全跟踪控制的四旋翼无人直升机飞控系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.
- [9] 彭艳, 刘梅, 罗均, 等. 无人旋翼机线性自抗扰航向控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1894-1900.
- [10] YANG X X, HUANG Y. Capabilities of extended state observer for estimating uncertainties [C]//American Control Conference, IEEE, 2009: 3700-3705.

(上接第79页)

同态滤波解决光照不均问题,并通过构建掩膜图像进行目标提取;将H通道、V通道、LBP纹理特征并联,与Sobel算子提取的边缘特征级联构建目标特征模板,并在无遮挡的情况下隔帧动态更新目标,提高了跟踪的准确性与长期稳定性;在处理全遮挡问题的时候,利用二次遮挡判断的方法节省了计算成本、提高了判断的效率,并通过相对Kalman模型校正了在相机相对移动时偏移的背景中心,对目标进行了有效的轨迹预测。

研究中仍存在一些不足,遮挡情况下轨迹预测的准确性有待提高,在长时间、全遮挡的情况下的目标跟踪依旧是当前的研究难点。

参考文献

- [1] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [2] 王鑫, 唐振民. 一种改进的基于Camshift的粒子滤波实时目标跟踪算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(10): 1507-1514.
- [3] 李冠彬, 吴贺丰. 基于颜色纹理直方图的带权分块均值漂移目标跟踪算法[J]. 计算机辅助设计与图形学

学报, 2011, 23(12): 2059-2066.

- [4] 李凌. 融合颜色和边缘特征的改进型CamShift跟踪算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(7): 138-142.
- [5] 闫钧华, 陈少华, 艾淑芳, 等. 基于Kalman预测器的改进的CamShift目标跟踪[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 536-542.
- [6] 刘亚伟, 李小民, 陈为元. 基于改进CamShift融合Kalman滤波的无人机目标跟踪研究[J]. 光电与控制, 2017, 24(8): 33-37.
- [7] 袁国武. 智能视频监控中的运动目标检测和跟踪算法研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [8] 乐应英, 仲涛. 适用于遮挡和目标尺度变化的改进CamShift算法[J]. 计算机与数字工程, 2015(6): 1018-1022.
- [9] 姚志均. 一种新的空间直方图相似性度量方法及其在目标跟踪中的应用[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1644-1649.
- [10] 许晓航, 肖刚, 云霄, 等. 复杂背景及遮挡条件下的运动目标跟踪[J]. 光电工程, 2013(1): 23-30.
- [11] MIAN A S. Realtime visual tracking of aircrafts [C]//Digital Image Computing: Techniques and Applications, IEEE Computer Society, 2008: 351-356.