

## 多旋翼无人飞行器机载云台的复合稳定控制方法

王日俊<sup>1,2</sup>, 白越<sup>1</sup>, 续志军<sup>1</sup>, 张欣<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 长春工程学院电气与信息工程学院, 长春 130012)

**摘要:** 针对多旋翼无人飞行器机载云台的稳定控制要求, 提出一种采用双速度环控制结构的带有模糊切换条件的模糊自适应PID复合稳定控制方法。在深入分析控制结构扰动抑制能力的基础上, 通过模糊自适应控制中自调整因子的引入和控制规则的在线修正, 提高系统的快速响应能力; 利用变速积分PID控制保证系统的高稳定精度, 模糊切换条件实现复合控制的平稳切换。动态响应和稳态精度实验表明, 系统的调节时间约为20 ms, 稳定精度为0.13 mrad。该方法有效地实现了机载云台的稳定控制, 完全满足了多旋翼无人飞行器的应用需求。

**关键词:** 多旋翼无人飞行器; 机载云台; 双速度环控制; 模糊自适应PID复合控制

**中图分类号:** TP273.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)04-0017-06

## Composite Stability Control of Airborne Platform Mounted on Multi-rotor UAV

WANG Ri-jun<sup>1,2</sup>, BAI Yue<sup>1</sup>, XU Zhi-jun<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2,3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

3. School of Electrical and Information Technology, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** In order to satisfy the demands of stabilized control for airborne platform mounted on multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV), a fuzzy adaptive PID hybrid control strategy with a fuzzy switching condition is put forward, and the control structure has dual rate-speed loops. Analysis is made to the anti-disturbance ability of control structure, and self-adjusting factor and self-learning control rules are introduced to improve the rapid response capability of the system. The variable integral PID control is used to ensure high and stable precision of the system. The fuzzy switching condition guarantees the switching of hybrid control smoothly. Results of dynamic response and steady-state precision experiments show that the adjust time of system is about 20 ms, and the stable accuracy is 0.13 mrad. The proposed method realizes the stable control of airborne platform effectively, and can meet the application requirements of multi-rotor UAV.

**Key words:** multi-rotor UAV; airborne platform; dual rate-loop cascade control; fuzzy adaptive PID hybrid control

### 0 引言

多旋翼无人飞行器具有更好的环境适应性, 在军事和民用领域都有着广阔的应用和发展前景<sup>[1-3]</sup>。多旋翼无人飞行器重量轻、体积小, 且升重比较低, 其载

荷极易受到气流扰动、机体振动、摩擦以及其他一些未知扰动因素的影响, 造成地面站监控平台获得的机载视频图像抖动、模糊<sup>[4]</sup>。因此, 通过稳定控制技术保持机载云台系统在惯性空间中的稳定, 使机载视频图像稳定清晰, 具有重要理论意义和实用价值。

机载云台的稳定控制通常采用陀螺惯性平台结构, 实质上是一种速度伺服控制系统, 常采用基于陀螺速度的单速度环控制结构<sup>[5-6]</sup>, 但是该结构在低速运动时难以有效地抑制扰动和机载云台复杂非线性特性对控制性能的影响; 且难以同时抑制云台系统外部的

收稿日期: 2015-04-13

修回日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11372309, 61304017); 院省专项项目(2014YSHZ004)

作者简介: 王日俊(1982—), 男, 山西阳高人, 博士生, 研究方向为无人机载荷稳像技术。

耦合扰动和云台系统内部的力矩扰动。随着系统稳定隔离精度要求的不断提高,这种控制结构已经不能满足系统的性能指标要求。此外,机载云台稳定系统是典型的运动控制,其中,气流扰动、机体振动、力矩扰动及耦合、系统参数波动等因素决定了它是一类难以获得精确模型的复杂非线性不确定系统<sup>[7]</sup>。目前,针对机载云台稳定控制提出了不少方法<sup>[8-10]</sup>,但大部分算法由于计算复杂、难于实现,仅给出了仿真结果。美国TI公司与Texas大学的研究项目报告中指出自适应控制是惯性稳定系统的发展方向<sup>[11]</sup>。

针对上述分析,根据机载稳定云台系统的特点和多旋翼无人飞行器的应用需求,本文提出采用陀螺仪为速度内环,光电编码器微分后构成速度外环的双速度环控制结构,在稳定控制策略上,提出一种带有模糊切换条件的模糊自适应PID复合稳定控制方法。该方法具有快速动态响应性能和高质量的稳定性能,而且简单有效,易于工程实现。

## 1 机载云台的控制结构设计

针对基于陀螺速度的单速度环控制结构中存在的问题,结合基于串级控制的优点,机载云台控制系统的结构采用以速率陀螺获取的速率组成速度环,以光电编码器微分构成稳定环的双速度环伺服控制结构。速度环抑制力矩干扰,消除被控对象非线性特性对系统的影响;稳定环抑制外部载体扰动的影响,实现载荷的稳定控制。图1所示为基于双速度环的伺服控制结构。

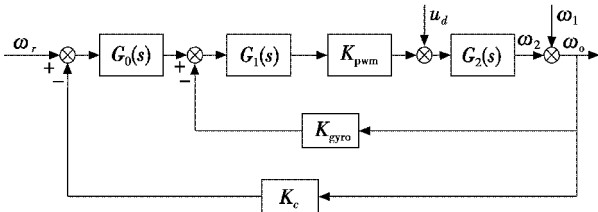


图1 基于双速度环的伺服控制结构

Fig.1 Servo control structure based on dual rate-speed loops

图中: $G_1(s)$  为速度回路校正环节; $G_2(s)$  为电机及负载传递函数; $\omega_r$  为速度给定; $\omega_1$  为外界载体力矩干扰引起的干扰速度; $\omega_2$  为电机的转速输出; $\omega_o$  为负载速度输出; $u_d$  为内部干扰引起的速度; $K_{pwm}$  为功率放大器的放大系数; $K_{gyro}$  为陀螺标度系数; $K_c$  为光电编码器标度系数。将  $\omega_r, u_d, \omega_1$  均视为系统的输入,依据图1可以得到双速度控制系统输出对于系统输入和系统干扰的传递函数为

$$\omega_o = \frac{G_2(s)u_d + [1 + K_{pwm}K_{gyro}G_1(s)G_2(s)]\omega_1}{1 + K_{pwm}G_1(s)G_2(s)[K_{gyro} + K_cG_0(s)]} + \frac{K_{pwm}G_0(s)G_1(s)G_2(s)\omega_r}{1 + K_{pwm}G_1(s)G_2(s)[K_{gyro} + K_cG_0(s)]} \quad (1)$$

在设计速度调节器  $G_1(s)$  和稳定控制器  $G_0(s)$  时应满足

$$|K_{gyro}K_{pwm}G_1(s)G_2(s)| \gg 1 \quad (2)$$

$$|K_{pwm}G_1(s)G_2(s)[K_{gyro} + K_cG_0(s)]| \gg 1 \quad (3)$$

则式(1)可以简化为

$$\omega_o = \frac{u_d}{K_{pwm}G_1(s)[K_{gyro} + K_cG_0(s)]} + \frac{K_{gyro}\omega_1}{K_{gyro} + K_cG_0(s)} + \frac{G_0(s)\omega_r}{K_{gyro} + K_cG_0(s)} \quad (4)$$

由式(4)可知,在基于双速度环的控制结构中, $G_1(s)$  在稳定控制器  $G_0(s)$  的辅助调节下对力矩干扰  $u_d$  进行抑制;而速度调节器  $G_1(s)$  起到了隔离载体扰动、稳定视轴的作用,且与机载云台系统特性参数的变化无关。

## 2 机载云台的复合控制策略

机载云台的伺服控制系统易受如机体扰动、力矩扰动、气流扰动等随机扰动因素干扰,且这些扰动大都具有非线性的特点,无法实现精确的建模补偿,这就决定了机载云台系统是难以精确建模的、具有很强非线性和不确定性的伺服控制系统。此外,系统的随机扰动因素多,工作环境较为恶劣。因此,对机载云台的控制策略提出了更高的要求:首先,算法要具有自适应能力和鲁棒性,以适应机载云台系统特性参数的变化;其次,整个系统的控制响应时间通常很短,就要求算法具有快速动态响应性能和高质量的稳定性能,而且算法简单有效,易于工程实现。为此,本文将模糊自适应控制与变速积分PID控制相结合,提出一种模糊自适应PID的复合控制策略。在系统的暂态过程中,利用模糊自适应控制保证系统的快速响应能力。在系统的稳态过程中,利用变速积分PID控制保证系统的高稳定精度。在控制方法的切换方式上提出了一种具有基于“模糊切换规则”的模糊切换方式。复合控制结构如图2所示。

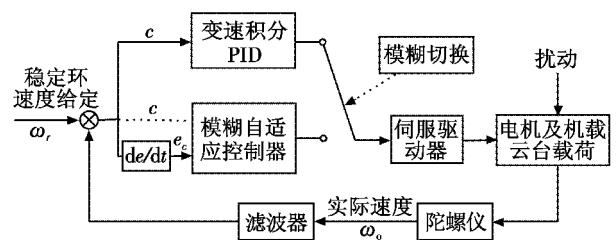


图2 模糊自适应PID复合控制结构图

Fig.2 Structure diagram of fuzzy adaptive PID hybrid control

### 2.1 变速积分PID控制

为了避免传统PID控制方法积分饱和和引起系统出现大的超调甚至是振荡现象,使得过渡时间增大、动态性能变差的问题,提出采用变速积分PID控制方法。该方法的基本思想是使积分值累加速度和偏差大小相

对应,即根据速度偏差的大小改变积分的累加速度。设变速积分比例因子为 $f[e(k)]$ ,它是偏差 $e(k)$ 的函数,可以表述为

$$f[e(k)] = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq b \\ \frac{a - |e(k)| + b}{a} & b < |e(k)| \leq a + b \\ 0 & |e(k)| > a + b \end{cases} \quad (5)$$

变速积分比例因子 $f[e(k)]$ 应满足:其值在区间 $[0,1]$ 之间变化,且当 $|e(k)|$ 增大时, $f[e(k)]$ 减小;当 $|e(k)|$ 减小时, $f[e(k)]$ 增大。参数 $a, b$ 无需精确,易整定。

当 $|e(k)| > a + b$ 时, $f[e(k)]$ 的值为0,积分项 $u_i$ 对当前的速度偏差 $e(k)$ 不进行累加;当 $|e(k)| \leq b$ 时,积分项 $u_i$ 对当前的速度偏差 $e(k)$ 进行累加,此时积分项 $u_i$ 与传统PID的积分项相同,当 $b < |e(k)| \leq a + b$ 时,积分项 $u_i$ 仅对部分当前的 $e(k)$ 进行累加,它的值在0到 $|e(k)|$ 之间,随着 $|e(k)|$ 的变化而变化。

变速积分PID控制算法为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \left\{ \sum_{i=1}^{k-1} e(i) + f[e(k)] e(k) \right\} T + k_d [e(k) - e(k-1)] / T \quad (6)$$

## 2.2 模糊自适应控制器

通常情况下,常规模糊控制中的控制规则是根据数量有限的专家经验来确定的,而且是在假设被控对象特性参数的变化不会超出操作者的经验范围,这在一定程度上限制了控制规则的数量,使得模糊控制适应被控对象参数变化的能力较差,在有些必要的情况下不会产生必要的动作。为了提高模糊控制的品质,本文将自适应调整方法引入到模糊控制中,在保持其优点的基础上,同时具备了对外界扰动、参数变化等情况的鲁棒适应能力。设计提出了一种模糊自适应控制器,如图3所示。

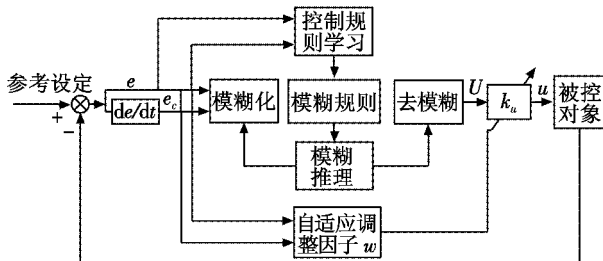


图3 模糊自适应控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of control scheme of fuzzy adaptive control

该控制器在常规模糊控制的基础上,引入一种自适应调整因子对输出比例因子在线修正,改善其动态性能和稳态性能;在先验知识有限的情况下,提出一种基于系统误差和误差变化的自适应交互学习算法,实

现控制规则的调整 and 自学习,满足机载云台系统不同状态下的控制要求。

### 1) 模糊控制器设计。

采用双输入、单输出的形式来设计模糊控制器。两个输入分别为误差 $E$ 和误差变化 $E_c$ ,分别是实际速度跟踪误差 $e$ 及其变化 $e_c$ 的模糊语言变量,输出为 $U$ ,是控制输出电压 $u$ 的模糊语言变量。 $E, E_c$ 和 $U$ 的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ,其隶属度函数采用对称、均匀分布、全交迭的三角形形式<sup>[12]</sup>。

实际变量分别表示为

$$e(k) = \omega_r(k) - \omega_o(k) \quad (7)$$

$$e_c(k) = e(k) - e(k-1) \quad (8)$$

$$u(k) = f[e(k), e_c(k)] \quad (9)$$

由于在实际系统中,考虑变量 $e(k), e_c(k)$ 和 $u(k)$ 存在不对称的情况,设其基本论域分别为 $[e_{\min}, e_{\max}]$ ,  $[e_{c\min}, e_{c\max}]$ 和 $[u_{\min}, u_{\max}]$ ,归一化模糊论域为 $[-1, 1]$ ,论域正规化变换式为

$$\begin{cases} E = k_e \left( e - \frac{e_{\min} + e_{\max}}{2} \right), k_e = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}} \\ E_c = k_{ec} \left( e_c - \frac{e_{c\min} + e_{c\max}}{2} \right), k_{ec} = \frac{2}{e_{c\max} - e_{c\min}} \\ U = \left( u - \frac{u_{\min} + u_{\max}}{2} \right) / k_u, k_u = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k_u$ 为输出变量的比例因子; $k_e, k_{ec}$ 为输入变量的量化因子。应用常规模糊关系和模糊条件建立“IF  $A_i$  and  $B_i$  THEN  $C_i$ ”形式的模糊规则。根据Mamdani的min-max模糊推理法则有<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} R = \bigcup_{i=1}^n R_i = \bigcup_{i=1}^n (A_i \times B_i) \times C_i \\ \mu_R = \min \{ \mu_{A_i}(E), \mu_{B_i}(E_c), \mu_{C_i}(U) \} \\ \mu_C(U) = \max_{E, E_c} \{ \mu_{A \times B}(E, E_c), \mu_R(E, E_c, U) \} \end{cases} \quad (11)$$

采用加权平均去模糊化得到输出为

$$U = \frac{\sum_i \mu_{C_i}(U_i) C_i}{\sum_i \mu_{C_i}(U_i)} \quad (12)$$

最终得到实际控制输出为

$$u(k) = k_u(k) \cdot U + \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} \quad (13)$$

### 2) 自适应调整因子的引入。

模糊控制的动态性能和静态性能之间存在着一定的矛盾,这就要求系统能在不同的工作阶段对控制器的比例因子进行调整,改善控制器性能,通过参数的修正获得满意的控制效果。为此,本文引入一个在线自适应调整因子来实现比例因子根据速度偏差及偏差变化的自修正,从而保证系统超调小,且快速响应,具有优良的动、静态性能和抗扰动性。

在线自调整因子  $w(e, e_c)$  是速度偏差  $e$  和速度偏差变化  $e_c$  的函数, 即

$$w(e, e_c) = 1 - \gamma \cdot \exp(-(\alpha \cdot e^2 + \beta \cdot e_c^2)) \quad (14)$$

式中:  $\gamma$  为积分常数, 且  $0 < \gamma < 1$ ;  $\alpha, \beta$  分别为  $e$  和  $e_c$  的加权系数, 且  $\alpha > 0, \beta > 0$ 。假设比例因子的初始值为  $k_u(0)$ , 由式(14)得到  $k_u$  的表达式为

$$k_u(k) = k_u(0) \cdot w(e(k), e_c(k)) \quad (15)$$

通过  $w(e, e_c)$  的引入,  $k_u$  也得到调整, 使得系统的输出控制量能够根据  $e$  和  $e_c$  的变化自适应地调节, 改善了控制品质。在  $e$  和  $e_c$  的变化都较大时, 增大  $k_u$ , 加强控制作用来快速减小误差、加快动态响应; 随着  $e$  和  $e_c$  的减小, 减小  $k_u$ , 减弱控制作用对输出进行细微调节, 保证稳态精度, 有效地提高了机载云台系统的动态性能和稳态性能。

### 3) 控制规则自学习。

控制规则的确定和自学习能力对于机载云台伺服控制系统的性能具有决定性的作用。由于本系统的先验知识缺乏, 操作经验较少, 被控过程的非线性和时变性, 再加上多种干扰的影响, 必然造成所得控制规则不完善。为了实现控制规则的可调整性, 本文引入一种基于负梯度下降的交互学习算法实现控制规则的在线调整, 实现机载云台系统的自适应控制<sup>[14-15]</sup>。定义如下性能指标函数

$$J = \sum_{k=1}^n \sqrt{e^2(k) + \rho \cdot e_c^2(k)} \quad (16)$$

式中:  $k$  为采样时间;  $\rho$  为加权系数且  $\rho > 0$ 。式(16)分别对速度偏差、偏差变化求偏导, 则性能优化的负梯度为

$$-|\nabla J| = - \left| \frac{e(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot e_c^2(k)}} \right| - \rho \left| \frac{e_c(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot e_c^2(k)}} \right| \quad (17)$$

根据优化控制对控制信号进行调整, 有

$$\Delta U(k) = \eta \cdot (-|\nabla J|) \cdot \begin{bmatrix} e(k) \\ e_c(k) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中,  $\eta$  为学习速率, 且  $0 < \eta < 1$ 。则控制规则算法表示为

$$\begin{cases} \Delta C_i = \Delta U \cdot \frac{\mu_{c_i}(U_i)}{\sum_i \mu_{c_i}(U_i)} \\ C_i = C_i + \Delta C_i \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\Delta C_i$  为第  $i$  条控制规则的修改量;  $\mu_{c_i}(U_i)$  为第  $i$  条控制规则的激活度。控制规则通过上述依据系统性能的自适应学习算法来实现在线自动调整。

### 2.3 复合控制切换条件

通常两种控制的切换采用的是事先设定切换阈值

$e_m$  的切换方法, 该方法存在的缺陷有: 1) 当阈值  $e_m$  较大时, 影响系统的动态响应, 延长动态过程, 当阈值  $e_m$  较小时, 容易造成切换抖动; 2) 两种控制模式切换时, 为了使输出控制量连续输出, 防止输出控制量的跃变, 在该切换点处, 两种控制模式的输出量必须保证相等。而在实际工作中, 当闭环控制系统进行模式切换时, 保证系统控制量输出连续且相等是很困难的, 因此在采用阈值切换时不可避免地存在着切换扰动, 使得系统的超调量增大, 动态性能下降。

针对上述问题, 提出一种采用“基于模糊规则”的模糊切换方式, 其切换原理如图4所示。

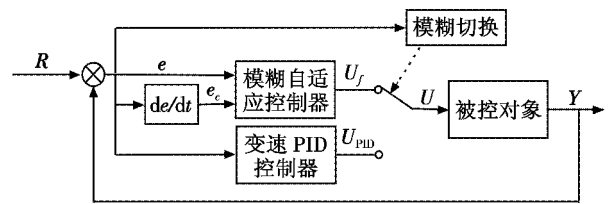


图4 模糊切换的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of fuzzy switching

“模糊切换控制规则”为: IF  $e$  is  $Z$  then  $U$  is  $U_{PID}$ , ELSE  $U$  is  $U_f$ 。其中,  $U_{PID}$  和  $U_f$  分别表示变速积分PID控制输出和模糊自适应控制输出, 其输出强度系数分别为  $\lambda_{PID}$  和  $\lambda_f$ ,  $Z$  表示模糊切换的隶属度函数, 如图5所示。

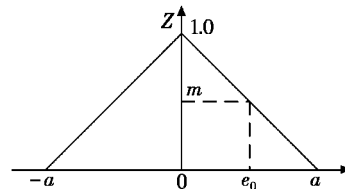


图5 切换规则的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of switching rules

当输入偏差为  $e_0$  时,  $m = Z(e_0)$ , 则  $\lambda_{PID} = m$ , 而  $\lambda_f = 1 - \lambda_{PID}$ , 采用加权平均法得到混合输出为

$$U = \frac{\lambda_{PID} U_{PID} + \lambda_f U_f}{\lambda_{PID} + \lambda_f} = \lambda_{PID} U_{PID} + \lambda_f U_f \quad (20)$$

从式(20)可知, 当偏差  $e$  较大, 系统处于暂态过渡过程时,  $\lambda_f$  值较大, 输出控制量主要由模糊自适应控制器提供。当由暂态进入稳态, 偏差  $e$  较小时,  $\lambda_{PID}$  值较大, 系统由变速PID控制实现稳态控制。由此实现了复合控制的平稳切换, 避免了阈值切换方式中阈值选取和切换扰动的问题。

## 3 实验及结果分析

本实验以搭载于某多旋翼无人飞行器上的机载云台稳定跟踪控制系统作为研究对象, 如图6所示。





图6 实验用搭载于多旋翼无人飞行器的机载云台  
Fig. 6 Airborne platform mounted on multi-rotor UAV for experiment

控制系统采用 STM32F103RCT6 作为处理器, 整个控制周期约为 30 ms, 采用光电编码器作为位置传感器; 采用某 MEMS 陀螺仪和加速度计作为速率传感器和加速度传感器。依据传感器的技术参数和机载云台的实际控制输出, 选取速度跟踪误差  $e$ , 误差变化  $e_c$  以及控制输出量的基本论域分别为  $[-50, 50]$  (单位  $(^\circ) \cdot s^{-1}$ ),  $[-500, 500]$  (单位  $(^\circ) \cdot s^{-2}$ ) 和  $[-12.5, 12.5]$  (单位 V)。模糊系统输入模糊化的量化因子  $k_e = 1/50, k_{e_c} = 1/500$ , 自调整比例因子初始值  $k_u(0) = 8$ , 自调整因子的参数初始值分别取  $\alpha = 3, \beta = 1.5, \gamma = 0.75$ , 则自适应调整因子为:  $w(e, e_c) = 1 - 0.75 \cdot \exp(-3 \cdot e^2 + 1.5 \cdot e_c^2)$ 。控制规则的自学习参数分别取  $\rho = 3$  和  $\eta = 0.2$ 。实际运行过程中, 利用自适应机构的自学习功能在线修正  $w(e, e_c)$  和控制规则。采用临界比例度法对变速积分 PID 控制器参数进行初步整定, 再依据控制结果进行修正。

通过在同种稳定控制器作用下, 分别采用单速度环结构和双速度环结构, 来验证本文提出的控制结构对扰动的抑制能力。其视轴稳定结果如图 7 所示。

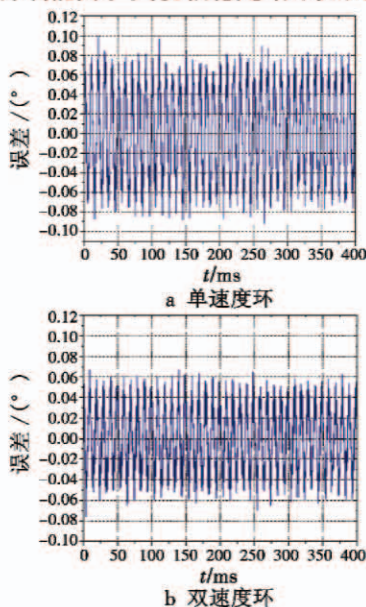


图7 控制结构的视轴稳定对比实验  
Fig. 7 Contrast experiment for LOS stabilization of control structure

可以看出, 采用单速度环结构时视轴稳定误差最大值为  $0.10^\circ$ , 采用双速度环结构时视轴稳定误差最大值约为  $0.06^\circ$ 。结果表明, 双速度环结构具有更好的抑制扰动能力。

通过伺服控制系统的动态响应和稳态精度的对比实验对模糊自适应 PID 复合控制方法进行验证。

1) 伺服控制系统的动态响应实验。

通过分别采用常规模糊控制器和模糊自适应 PID 复合控制器时系统的阶跃响应曲线来对比分析系统的动态性能。在给定速度为  $20 (^\circ) \cdot s^{-1}$  时系统的阶跃响应曲线对比结果如图 8 所示。其中, 模糊自适应 PID 控制的超调量约为 5.2%, 调节时间约为 20 ms; 常规模糊控制的超调量约为 10.5%, 调节时间约为 40 ms。复合控制的设计以及自适应机构的引入对抑制超调、提高系统响应速度起到了有效作用, 提高了其稳态精度。同时, 由于采用了模糊切换方式, 复合控制的切换抖动也得到了抑制。

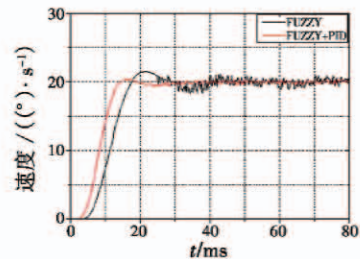
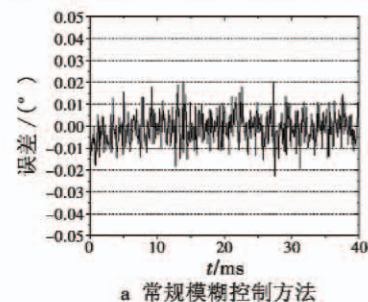


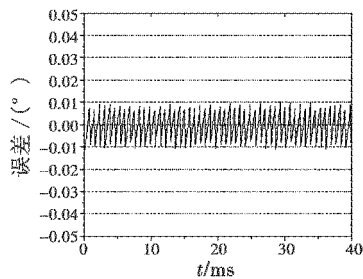
图8 与常规模糊控制方法的阶跃响应对比  
Fig. 8 Contrast of step responses of the conventional fuzzy control and fuzzy adaptive PID hybrid control

2) 伺服控制系统的稳态精度实验。

其稳态性能通过视轴稳定误差对比实验来验证。在机载云台给定速度为 0 时, 采用常规模糊控制器和本文提出的复合控制器的稳定误差曲线如图 9 所示。其中, 图 9a 为采用常规模糊控制的稳定误差结果, 其稳定误差在  $\pm 0.02^\circ$  之间, 稳定精度约为 0.26 mrad; 图 9b 为采用模糊自适应 PID 复合控制器的稳定误差曲线, 其稳定误差均小于  $0.01^\circ$ , 稳定精度约为 0.13 mrad, 其稳定精度和运动平稳性均优于常规模糊控制, 表明模糊自适应 PID 复合控制克服了由非线性扰动因素产生的偏差, 具有良好的控制性能和鲁棒性。



a 常规模糊控制方法



b 模糊自适应 PID 复合控制方法

图 9 视轴稳定误差曲线对比

Fig. 9 Contrast of error curves of LOS

#### 4 结束语

针对多旋翼无人飞行器机载云台稳定控制的需求,本文提出一种采用双速度环控制结构的机载云台复合控制方法。

1) 为了提高机载云台伺服控制系统中控制结构的抗扰动能力,提出采用速度陀螺测速作为速度内环,光电编码器微分作为速度外环的双速度环控制结构,抗扰动能力实验结果表明,双速度环结构具有更好的抑制扰动的能力。

2) 针对机载云台系统中外部飞行器的随机扰动、力矩耦合及系统参数变化等非线性、不确定性因素对稳定精度的影响,提出了一种带有模糊切换条件的模糊自适应 PID 复合补偿控制策略。伺服控制系统的动态响应和稳态精度的实验表明,调节时间约为 20 ms,稳定精度达到 0.13 mrad,具有良好的控制性能,完全满足了多旋翼无人飞行器机载云台的稳定性要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 张洪涛. 四旋翼微型飞行器位姿及控制策略的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. (ZHANG H T. Study on pose and control strategy of quad-rotor micro air vehicles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. )
- [2] 申斌, 吴一波, 林冬生. 旋翼机的发展与应用 [J]. 科技传播, 2013(23): 145-146. (SHEN B, WU Y B, LIN D S. The development and application of rotorcraft [J]. Applied Technology, 2013(23): 145-146. )
- [3] 肖永利, 张琛. 微型飞行器的研究现状与关键技术 [J]. 宇航学报, 2001, 22(5): 26-32. (XIAO Y L, ZHANG C. Study on present situation and development of micro air vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(5): 26-32. )
- [4] MILLER R, MOOTY G, HILKERT J M. Gimbal system configurations and line-of-sight control techniques for small UAV applications [C] // Proc. SPIE 8713, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications X, 871308. Baltimore, 2013.
- [5] 毕永利, 刘洵, 葛文奇, 等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计 [J]. 光电工程, 2004, 31(2): 16-18. (BI Y L, LIU X, GE W Q, et al. Design of a velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope-stabilized platform [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(2): 16-18. )
- [6] 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. (LI J Q, DING C, KONG D J, et al. Velocity based disturbance observer and its application to photoelectric stabilized platform [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 998-1004. )
- [7] 黄一, 吕俊芳, 卢广山. 机载光电跟瞄平台稳定与跟踪控制方法研究 [J]. 飞机设计, 2003(3): 38-42. (HUANG Y, LYU J F, LU G S. Research on methods of stabilization & tracking control for an airborne electro-optical Tracking & pointing platform [J]. Aircraft Design, 2003(3): 38-42. )
- [8] 王日俊, 白越, 续志军, 等. 基于扰动观测器的机载云台扰动复合补偿方法 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(1): 108-115. (WANG R J, BAI Y, XU Z J, et al. A composite disturbance compensation method for airborne platform based on improved disturbance observer [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(1): 108-115. )
- [9] KRISHNA J. A. MARATHE R, SULE V R.  $H^\infty$  control law for line-of-sight stabilization for mobile and vehicles [J]. Optical Engineering, 2002, 41(11): 2935-2944.
- [10] LIN C M, HSU C F, MON Y J. Self-organizing fuzzy learning CLOS guidance law design [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1144-1151.
- [11] HILKERT J M, HULLENDER D A. Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization systems [C] // SPIE Conference on Acquisition, Tracking and Pointing IV, 1990, 1304: 190-206.
- [12] DOYLE J, STEIN G. Multivariable feedback design: concepts for a classical/modern synthesis [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1): 4-16.
- [13] 王晓华, 敬忠良. 仅有角测量的被动式机动目标跟踪 [J]. 控制理论与应用, 2004, 19(6): 845-850. (WANG X H, JING Z L. Bearings only passive tracking for maneuvering target [J]. Control Theory and Application, 2004, 19(6): 845-850. )
- [14] HO W K, HANG C C, CAO L. Tuning of PID controllers based on gain and phase-margin specification [J]. Automatica, 1995, 31(3): 497-502.
- [15] HO W K, LEE T H, HAN H P, et al. Self-tuning IMC-PID control with interval gain and phase margins assignment [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(3): 535-541.