

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108370

基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制*

周向阳^{1,2}, 舒通通¹, 吕子豪¹, 孙步早¹

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191;

2. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院 北京 100191)

摘要:为了实现航空遥感惯性稳定平台在复杂多源扰动环境下的高精度控制,提出基于模糊滑模的惯性稳定平台高精度控制方法,通过对总和扰动抑制实现对多源扰动抑制,从而提高稳定平台控制精度。首先将惯性稳定平台的所有扰动视为整体,基于滑模等效控制设计惯性稳定平台的全局快速终端滑模控制器,实现系统状态快速、精确地收敛到平衡状态并且不离开滑模面。其次,针对控制系统存在鲁棒性与抖振问题无法兼顾的问题,在滑模控制基础上融合模糊切换增益调节,设计模糊规则对惯性稳定平台滑模控制中的切换增益进行实时调节,从而利用切换增益消除干扰项。最后,对所提出方法的正确性进行仿真以及实验验证。结果表明,基于模糊切换增益调节的滑模控制方法扰动抑制能力强、稳定精度高,相对于PID控制和全局快速终端滑模控制,稳定精度分别提高32.7%和15.3%。

关键词: 惯性稳定平台;模糊滑模控制;抖振抑制;多源扰动抑制

中图分类号: TP273.3 V243.5 TH761.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Sliding mode control of inertially stabilized platform based on fuzzy switching gain adjustment

Zhou Xiangyang^{1,2}, Shu Tongtong¹, Lyu Zihao¹, Sun Buzao¹

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To realize the high-precision control of the inertially stabilized platform (ISP) in the complex multi-source disturbance environment, a high-precision control method of the ISP based on the fuzzy sliding mode is proposed. By suppressing the total disturbance, the influence of the multi-source disturbance is reduced, which improves the control accuracy of the ISP. Firstly, all disturbances suffered by the ISP are regarded as an entirety. Based on the sliding mode equivalent control, a global fast terminal sliding mode controller is designed to realize the system state quickly and accurately to the equilibrium state without leaving the sliding mode surface. Secondly, to enhance the robustness and chattering of the control system at the same time, this article fuses fuzzy switching gain regulation on the basis of the sliding mode control platform. By designing the fuzzy rules, the switching gain in sliding mode control of the inertial stabilization platform is adjusted in real time to eliminate the influence of interference by using the switching gain. Finally, simulations and experiments are carried out. Results show that the sliding mode control method based on the fuzzy switching gain adjustment method can improve stability accuracy and disturbance rejection ability. Compared with PID control and global fast terminal sliding mode controller, the stability accuracy values are improved by 32.7% and 15.3%, respectively.

Keywords: inertially stabilized platform; fuzzy sliding mode control; chattering reduction; multi-source disturbance

0 引言

机载航空遥感系统具有分辨率高、机动灵活、实时性

好等优点,在人们的日常生活中发挥着越来越重要的作用^[1-2]。在载机外部环境与内部扰动等多源扰动影响下,载机平台在多维空间上的非理想运动不可避免,突出表现为非线性摩擦干扰力矩、不平衡干扰力矩、交叉耦合等

收稿日期:2021-08-05 Received Date: 2021-08-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51775017)、航空科学基金(2019ZC051003)项目资助

复杂形式,造成相机视轴抖动厉害,不能很好的垂直地面,严重影响高分辨率成像^[3]。

为了有效隔离飞行平台非理想姿态运动,并且使观测载荷视轴始终保持垂直对地状态,将惯性稳定平台安装于飞机与相机之间以获取高分辨率成像^[4-5]。当飞行平台发生角运动、线振动或其它扰动时,高精度位置姿态测量系统提供高精度姿态信息用于稳定平台框架运动基准,从而调整安装其上的航空遥感载荷的姿态,使视轴指向保持相对稳定。

惯性稳定平台在工作中受到来自平台内外部各种扰动,导致惯性稳定平台呈现出非线性、大时滞、时变的特点^[6]。为了实现对稳定平台高精度控制,需要将所有扰动视为整体,对总和扰动进行抑制从而提高稳定平台控制精度。滑模控制(sliding mode control, SMC)方法具有对扰动变化不灵敏,响应速度快、鲁棒性强^[7-8],进入滑模运动便快速地收敛到控制目标等优点,具备了解决总和扰动抑制的能力^[9]。普通滑模控制的状态跟踪误差只能渐近收敛为0,却不能在有限时间内收敛为0。可以考虑结合线性以及指数终端滑模面,设计全局快速终端滑模控制器,实现系统状态快速、精确地收敛到平衡状态^[10]。文献[11]采用全局快速终端滑模控制器,解决永磁直线同步电机伺服系统位置跟踪精度受多因素影响的问题,并取得了良好效果。文献[12]提出基于径向基神经网络的非奇异快速终端滑模控制方法,提高了多自由度机械臂轨迹跟踪控制系统的收敛速度和跟踪精度。

全局快速终端滑模控制方法克服了在有限时间内不能使得跟踪误差收敛为零的问题,但还存在抖振问题。并且多源扰动下的惯性稳定平台系统工作环境条件会发生变化,固定增益的常规滑模控制器不具有实时性变化能力难以满足控制需求。为了使稳定平台系统在复杂环境下能保持理想的控制性能,并能够解决抖振所带来的不稳定性问题,可以根据当前系统状态实时自动调节切换增益的模糊滑模控制方法成为理想的选择^[13]。文献[13]将基于模糊切换增益调节的滑模控制算法用于机械手的运动控制,具有较好的控制精度和鲁棒性。文献[14]设计基于模糊切换增益调节的滑模控制算法,用饱和函数代替符号函数来减小抖振,提高了可控励磁直线同步电动机磁悬浮进给平台的抗干扰能力。

为了实现惯性稳定平台的高精度控制,首先基于滑模等效控制,本文设计了基于全局快速终端滑模控制器(global fast terminal sliding mode control, FGFTSMC)的惯性稳定平台多源扰动抑制方法。其次,针对滑模控制存在的抖振问题,在滑模控制的基础上融合模糊切换增益调节,引入模糊控制器,设计基于模糊切换增益调节的全局快速终端滑模控制(fuzzy global fast terminal sliding mode control, FGFTSMC)方法,柔化控制信号以减弱抖振

现象,从而提高系统稳定精度。最后,通过仿真与实验对该方法进行验证。

1 惯性稳定平台系统

1.1 惯性稳定平台在航空遥感系统中的作用

图1所示为惯性稳定平台隔离扰动前后航拍图像的对比效果。可以明显看到,在有惯性稳定平台的情况下,测绘图片的清晰度要比没有平台情况下的清晰度高出很多。飞机飞行时,由于气流扰动、飞机颠簸等会造成相机视轴晃动,从而造成图片失真。惯性稳定平台可以隔离这些扰动,使相机视轴稳定从而获得高清晰照片,从而也能提高飞机飞行效率,降低飞行成本以及提高测绘图片后处理效率。

实际运动中的干扰和振动

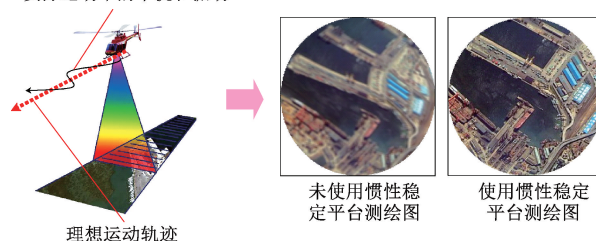


图1 惯性稳定平台隔离扰动提高图像质量效果图

Fig. 1 The effect of the ISP for isolating disturbances to improve imaging quality

1.2 惯性稳定平台工作原理

图2为惯性稳定平台系统示意图。惯性稳定平台通过3个方向的电机驱动框架转动来补偿干扰力矩;3个方向的码盘用于测量框架相对转角实现框架软锁;3个方向的角速率陀螺分别用于敏感框架相对于惯性空间角速率;两轴加计用于敏感俯仰、横滚两个水平框架当地加速度信息,为位置环提供位置信息;线轮及齿轮可放大电机力矩,提升惯性稳定平台鲁棒性。

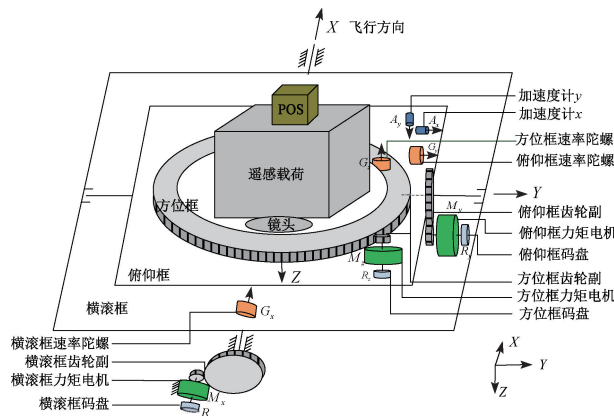


图2 航空遥感惯性稳定平台系统示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the aerial remote ISP

2 模糊滑模控制器设计

2.1 滑模控制器设计

为保证惯性稳定平台系统能在较短的有限时间内从任意初始状态面到达滑动面,并快速精确地收敛到平衡状态且不离开滑模面^[9],综合线性滑动模态与快速终端滑模模态,本文采用全局快速终端滑模控制。

惯性稳定平台可被近似视为一个形如下式的二阶非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + u(t) + d(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 代表输出角位置 θ_{out} ; $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\theta}_{out}$ 为角速度; u 为系统输入; $d(t)$ 为系统受到的外部扰动; 定义角位置误差 $e = \theta_{in} - \theta_{out}$, θ_{in} 为参考角位置。

针对所示的惯性稳定平台系统状态空间方程,将全局快速终端滑模面设计为:

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta e^{p_2/p_1} \quad (2)$$

其中, α, β 为滑模面常量; p_1, p_2 均为正奇数, 满足 $p_1 > p_2$; 当达到理想滑动面 ($s = 0$), 系统满足条件:

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta e^{p_2/p_1} = 0 \quad (3)$$

设置合适的控制器参数 α, β, p_1, p_2 , 可以使得系统在有限时间从任意初始状态到达平衡状态^[15], 求取时间 t_s 的公式为:

$$t_s = \frac{p_1}{\alpha(p_1 - p_2)} \ln \frac{\alpha \theta_{out}(0)^{(p_1 - p_2)/p_1} + \beta}{\beta} \quad (4)$$

根据滑模等效控制法设计控制器, 等效控制律为 $u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$, 其中 u_{eq} 是等效控制项, u_{sw} 是非线性控制项^[9]。当系统状态量达到理想滑动模态时, $\dot{s} = 0$, 即:

$$\begin{aligned} \dot{s} = \ddot{e} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} = \\ \ddot{\theta}_{out} - f - u - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

当系统状态量处于滑动状态时, 暂且先不考虑系统的外部扰动, 令干扰 $d(t) = 0$, 从而可求出等效控制项 u_{eq} :

$$u_{eq} = \ddot{\theta}_{out} - f + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} \quad (6)$$

随后, 将系统的外部扰动和参数摄动考虑在内, 以满足滑模的可达性条件, 控制律就表示为:

$$\begin{aligned} u = u_{eq} + u_{sw} = \ddot{\theta}_{out} - f - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} + u_{sw} \\ u_{sw} = G(t) \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (7)$$

$G(t)$ 为切换增益, 取为^[10]:

$$G(t) = \max |d(t)| + \eta \quad (8)$$

其中, $\eta > 0$ 。

对系统进行稳定性分析, 选取李雅普诺夫函数:

$$V(t) = 0.5s^2(t) \quad (9)$$

对 $V(t)$ 求之间的一阶导数:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = s\dot{s} = s \left(\ddot{\theta}_{out} - f - u - d(t) + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} \right) = \\ s[-u_{sw}(t) - d(t)] = s[-G(t) \operatorname{sgn}(s) - d(t)] = \\ -G(t) |s| - d(t)s \leq -\eta |s| < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

满足滑模可达性条件。

2.2 模糊滑模控制器设计

上文滑模控制系统中, 为满足滑模存在性条件 ($s\dot{s} < 0$), 切换增益 $G(t)$ 用来补偿外部扰动 $d(t)$ 。但是由于 $G(t)$ 值的大小变化, 也会造成系统不同程度的抖振。为降低外部扰动 $d(t)$ 对系统造成的影响, 抑制抖振现象, 在滑模控制器的基础上引入模糊控制, 当 $d(t)$ 随时间大小变化时, 使得 $G(t)$ 也随之进行相应实时变化。根据经验, 设计模糊规则^[16] 如下:

如果 $s\dot{s} > 0$, 则 $G(t)$ 应增大;

如果 $s\dot{s} < 0$, 则 $G(t)$ 应减小。

根据 $s\dot{s}$ 与 $\Delta G(t)$ 之间的逻辑关系, 模糊控制系统输入以及输出模糊集定义如下:

$$\begin{aligned} \dot{s}s = \{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\} \\ \Delta G(t) = \{NB \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PB\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: NB 为负大, NM 为负中, NS 为负小, ZO 为 0, PS 为正小, PM 为正中, PB 为正大。

根据控制需求, 定义模糊控制器的输入输出隶属度函数如图 3 与 4 所示。

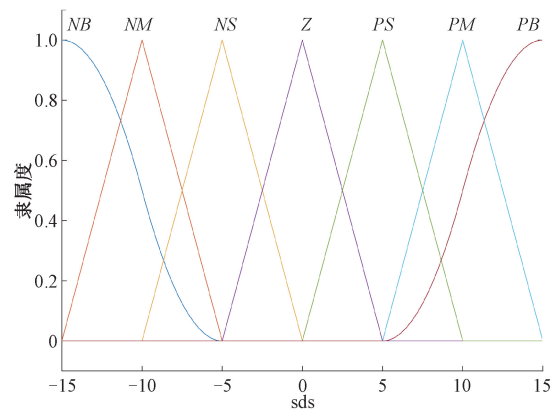


图 3 模糊输入的隶属函数

Fig. 3 The membership function of input

切换增益 $G(t)$ 的变化范围为 0~1 之间, 设计模糊规则用于模糊推理如表 1 所示。

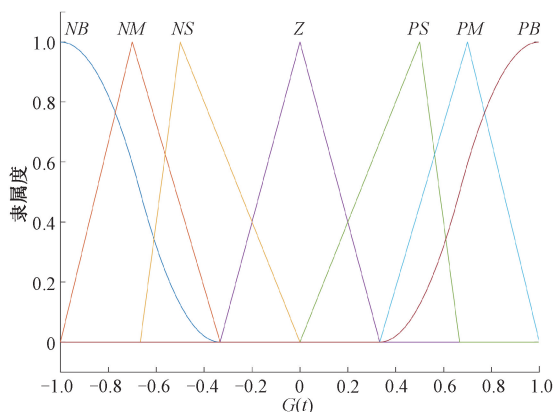


图4 模糊输出的隶属函数

Fig. 4 The membership function of output

表1 $G(t)$ 模糊规则Table 1 The fuzzy rules of $G(t)$

$\dot{s}s$	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
$G(t)$	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

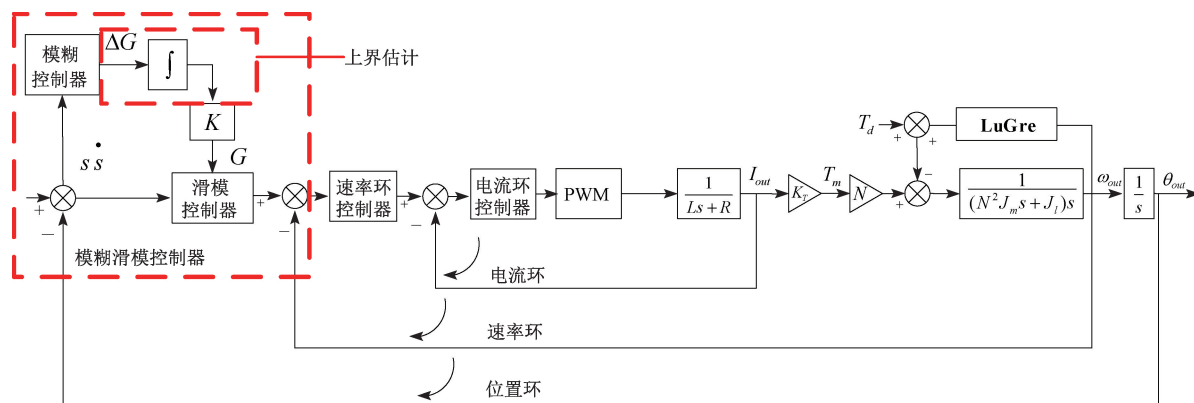


图5 基于模糊滑模控制器的控制系统结构图

Fig. 5 The control system structure diagram based on the fuzzy sliding mode controller

3 仿真分析

3.1 基于全局快速终端滑模控制的惯性稳定平台仿真

1) 阶跃响应

采用全局快速终端滑模控制器,输入幅值为 1° 的阶跃信号,仿真结果如图 6 所示,对比结果总结如表 2 所示。图 6(a)所示为阶跃响应,可以看出, GFTSMC 几乎没有超调量,调节时间为 0.61 s ,较 SMC 减少了 0.55 s ,快速性更好。在稳定阶段,SMC 的 RMS 为 0.0636° 相对于 PID 精度提升 29.1% ; GFTSMC 的稳态误差较小, RMS 为 0.0607° ,相对于 PID 精度提升 32.3% ,稳定性更好,抗干扰能力更强。图 6(b)所示为相轨迹曲线,可以看

并采用积分的方法对 $G(t)$ 的上界进行估计^[17]:

$$\hat{G}(t) = K \int_0^t \Delta G dt \quad (12)$$

其中, K 为比例系数,且 $K > 0$,根据经验确定。将得

到切换增益 $\hat{G}(t)$ 代替滑模控制律中的 $G(t)$,使用模糊控制实现切换增益 G 的变化,此时系统模糊滑模的控制律如下式所示:

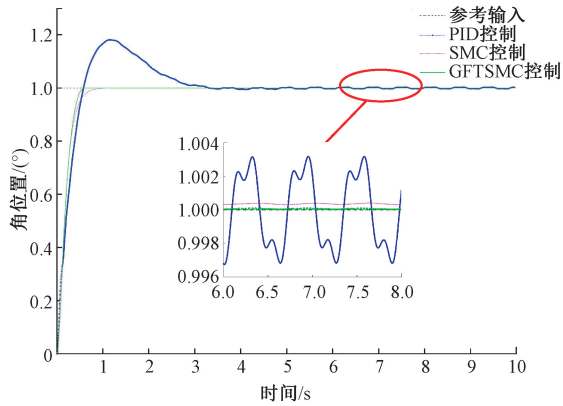
$$u = \ddot{\theta}_{out} - f + \alpha \dot{e} + \beta \frac{d(e^{p_2/p_1})}{dt} + \hat{G}(t) \text{sgn}(s) \quad (13)$$

惯性稳定平台控制系统采用伺服三环复合控制,三环由内向外分别为电流环、速率环和位置环。其中,电流环和速率环均采用 PID 控制方法^[18]。位置环采用滑模控制器与模糊控制器相结合的复合控制方案,在全局快速终端滑模控制的基础上融合模糊切换增益调节,设计模糊规则对惯性稳定平台滑模控制中的切换增益进行实时调节,柔化控制器的输出信号,减轻或避免滑模控制的抖振现象,基于模糊滑模的惯性稳定平台控制系统结构图如图 5 所示。

出,趋近滑模面阶段,系统在有限时间内快速到达滑模面;趋于平衡阶段,系统状态快速、精确地收敛到平衡状态,然而放大系统状态曲线会发现,相轨迹存在着强烈的抖振现象。

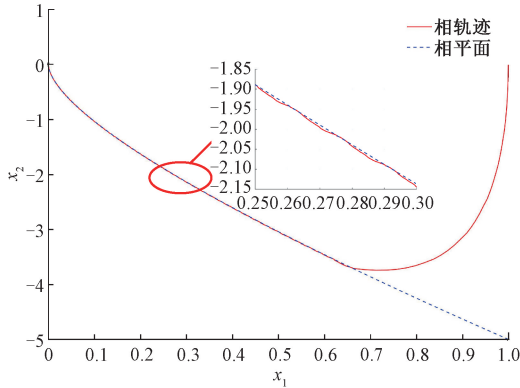
2) 正弦响应

为验证在不同控制器作用下惯性稳定平台的跟踪能力,本文还进行了不同控制方法对于正弦响应的仿真。给定幅值为 1° 的正弦输入角指令,仿真结果如图 7 所示。通过图 7 可以看出, PID 控制会出现跟踪延迟现象,并且更容易受扰动影响,出现较大的角位置跟踪误差;普通滑模控制不能在有限时间内收敛为 0,跟踪过程中出现小幅震荡。相比之下,全局快速终端滑模控制能够快速、准确地跟踪正弦输入,而且具备更强的扰动抑制补偿



(a) 3种控制方法的阶跃响应对比图

(a) Step response comparison between PID, SMC and GFTSMC



(b) 基于全局快速终端滑模控制的相轨迹

(b) Phase trajectory based on global fast terminal sliding mode control

图 6 采用 PID、普通滑模和全局快速终端滑模控制器的阶跃响应对比

Fig. 6 Comparison of step signal feedbacks among PID, SMC, and GFTSMC

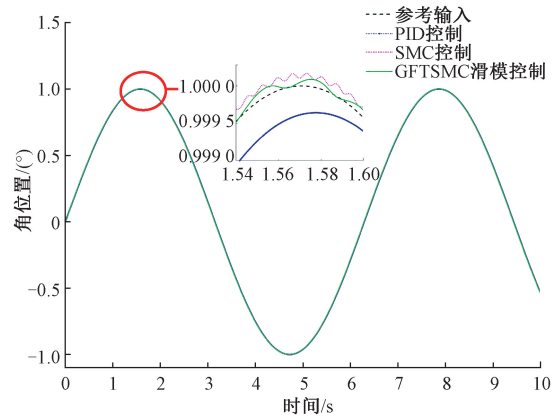


图 7 采用 PID、普通滑模和全局快速终端滑模控制器的正弦响应对比

Fig. 7 Comparison of sine signal feedbacks among PID, SMC, and GFTSMC

能力,在外加干扰的情况下,曲线平滑性更好,但同时也存在抖振问题。

3.2 基于模糊滑模控制的惯性稳定平台仿真

为验证基于模糊切换增益调节的滑模控制器的可行性和控制效果,对该控制器进行了仿真分析。以惯性稳定平台横滚框为对象进行仿真,并与滑模控制和 PID 控制进行对比。仿真过程中,加入摩擦干扰以及不平衡力矩干扰,通过 MATLAB/Simulink 仿真模块搭建的模糊滑模仿真模型如图 8 所示。滑模控制器以输出角度 θ 、角速度 ω 、干扰 T_d 、参考输入 r 以及切换增益 $G(t)$ 作为系统输入,控制器通过 S-function 的程序编写实现,输出误差 e 方便查看控制器相轨迹,输出 u_t 方便查看控制器输出。

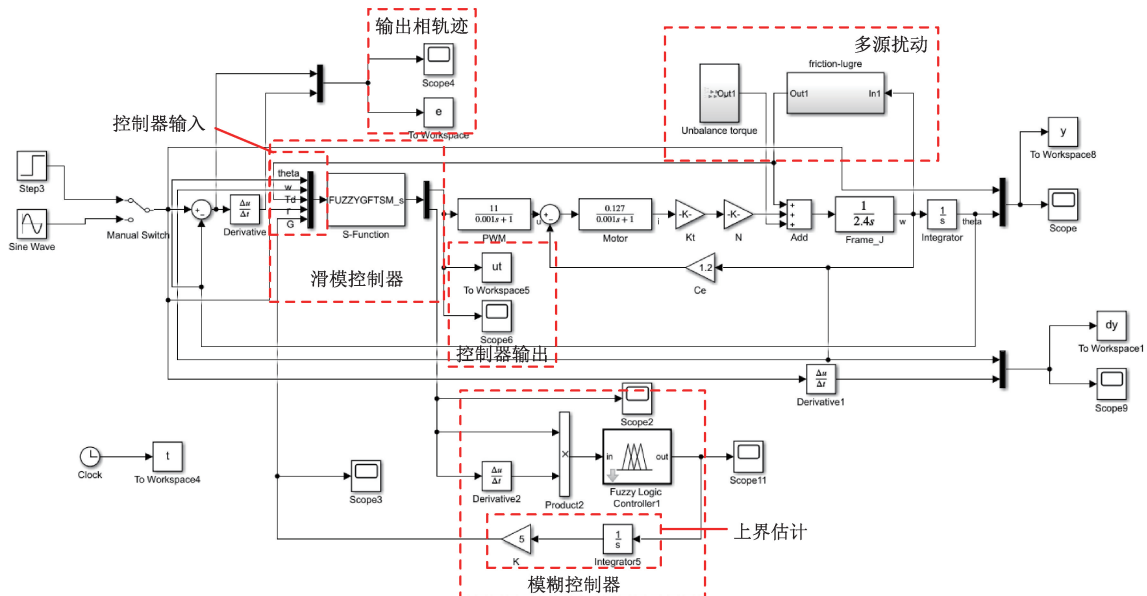


图 8 基于模糊切换增益调节的滑模控制器仿真

Fig. 8 Simulation of the sliding mode controller based on fuzzy switching gain adjustment

1) 阶跃响应

采用基于模糊切换增益调节的滑模控制器,输入信号为幅值为 1° 的阶跃信号,仿真结果如图 9 所示,对比结果总结如表 2 所示。图 9(a)所示为阶跃响应,可以看出滑模控制的调节时间为 0.61 s ,而模糊滑模调节时间为 0.59 s ,减少了 0.02 s ,快速性更好。在稳定阶段,滑模控制震荡相对更加剧烈,角位置误差为 0.0607° ,而模糊滑模控制的稳态误差较小,RMS 为 0.0553° ,相对于 PID 稳定精度提升 38.4% ,稳定性更好,抗干扰能力更强。图 9(b)所示为相轨迹曲线,可以看出趋近滑模面阶段,系统在有限时间内快速到达滑模面;趋于平衡阶段,系统状态快速、精确地收敛到平衡状态,然而放大系统状态曲线会发现抖振现象得到明显降低,相轨迹曲线更加平滑。

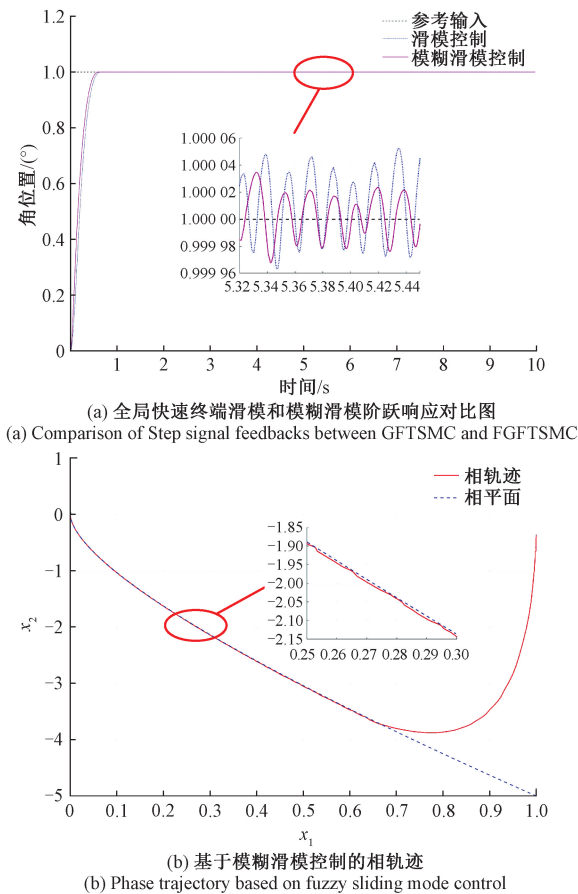


图 9 采用全局快速终端滑模和模糊滑模控制器的阶跃响应对比

Fig. 9 Comparison of step signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC

2) 正弦响应

为验证模糊滑模控制器的跟踪能力,本文还进行了对于正弦响应的仿真。给定幅值为 1° 的正弦输入角指令,仿真结果如图 10 所示。通过图 10 可以看出,全局快

表 2 全局快速终端滑模和模糊滑模控制器的阶跃响应对比结果

Table 2 Comparison results of step signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC		
方法	RMS/($^\circ$)	相比 PID 提高/%
PID	0.089 7	—
SMC	0.063 6	29.1
GFTSMC	0.060 7	32.3
FUZZY-GFTSMC	0.055 3	38.4

速终端滑模控制更容易受扰动影响,角位置跟踪误差为 0.0011° ;相比之下,模糊滑模控制更能够准确快速地跟踪正弦输入,RMS 为 0.0005° ,稳定精度提升了 54% ,具备更强的扰动抑制补偿能力。全局快速终端滑模和模糊滑模控制器的正弦响应对比结果总结如表 3 所示。

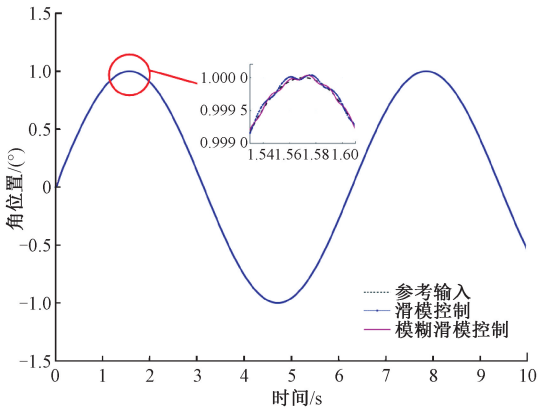


图 10 全局快速终端滑模和模糊滑模控制器的正弦响应对比

Fig. 10 Comparison of sine signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC

表 3 全局快速终端滑模和模糊滑模控制器的正弦响应对比结果

Table 3 Comparison results of sine signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC		
方法	RMS/($^\circ$)	相比提高/%
GFTSMC	0.001 1	—
FUZZY-GFTSMC	0.000 5	54

4 实验验证

为了进一步验证与评估基于模糊切换增益调节的滑模控制方法的控制效果,采用图 11 所示的试验系统,在动基座实验条件下进行实验验证。系统由航空遥感惯性稳定平台,上位机,推车以及 28 V 直流电源组成。惯性

稳定平台工作模式是调平,水平框架跟踪 0° ,实验研究对象为横滚框。其中,惯性稳定平台的主要参数为:最大承载 80 kg,自重 40 kg,最大转角范围为水平 $\pm 5^\circ$ 、航向 $\pm 25^\circ$,实验时负载 30 kg。

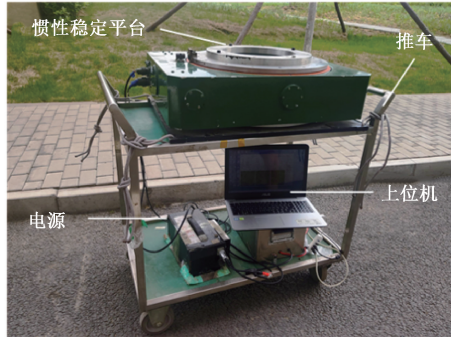


图 11 惯性稳定平台动基座试验系统

Fig. 11 The ISP experimental system under movable base condition

分别使用 PID、全局快速终端滑模以及模糊滑模控制方法对平台进行动态推车实验,实验采集到的结果如图 12 所示。经过计算,PID 控制作用下惯性稳定平台的横滚框调平稳定精度为 0.6948° (RMS);滑模控制作用下调平稳定精度为 0.5527° (RMS),较 PID 控制方法提高约 15.3%;模糊滑模控制作用下调平稳定精度为 0.4679° (RMS),较 PID 控制方法提高约 32.7%,具有更好的控制效果,控制器性能更加优越。动基座下实验数据的 RMS 值总结对比结果如表 4 所示。

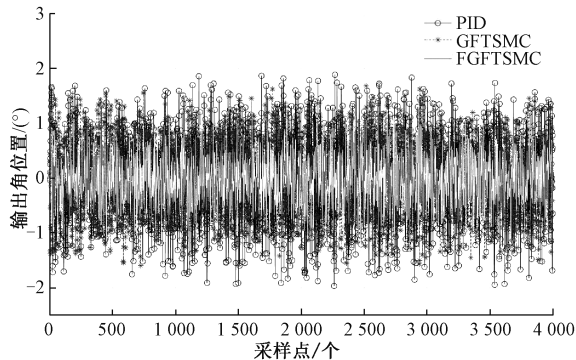


图 12 动基座调平实验对比

Fig. 12 Comparison of sine signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC

表 4 动基座调平实验对比结果

Table 4 Comparison results of sine signal feedbacks between GFTSMC and FGFTSMC

方法	RMS/ $^\circ$	相比 PID 提高/%
PID	0.694 8	—
GFTSMC	0.552 7	15.3
FUZZY-GFTSMC	0.467 9	32.7

5 结 论

为了对惯性稳定平台的多源扰动进行有效抑制,实现高精度控制,提出基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制方法。作为对比,PID 控制和全局快速终端滑模控制方法也应用于平台。为了验证该方案,分别开展了仿真和实验。结果表明,该方案可以实时调节切换增益减弱抖振影响,明显提高了惯性稳定平台的稳定精度。动基座实验下,相对于 PID 控制,惯性稳定平台基于全局快速终端滑模控制和基于模糊切换增益调节的滑模控制的角位置输出稳定精度分别提高 32.7% 和 15.3%。有效隔离了多源扰动,保证了对地观测载荷视轴对地遥感成像的惯性垂直稳定,为高分辨率成像航空遥感提供了保障。

参考文献

- [1] ZHOU X Y, SHI Y J, ZHU J, et al. Structural multi-objective optimization on a MUAV-based pan-tilt for aerial remote sensing applications[J]. ISA Transactions, 2020, 100(5): 405-421.
- [2] WU G, PEDRYCZ W, LI H, et al. Coordinated planning of heterogeneous earth observation resources[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics Systems, 2016, 46(1): 109-125.
- [3] 钟麦英, 矫成斌, 李树胜, 等. 基于 PMI 的三轴惯性稳定平台干扰力矩补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 781-787.
ZHONG M Y, JIAO CH B, LI SH SH, et al. Study on the compensation method for disturbance torque of three axis inertially stabilized platform based on PMI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 781-787.
- [4] ZHOU X Y, LI Y T, YUE H X, et al. An improved cerebellar model articulation controller based on the compound algorithms of credit assignment and optimized smoothness for a three-axis inertially stabilized platform[J]. Mechatronics, 2018, 53: 95-108.
- [5] KENNEDY P J, KENNEDY R L. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(1): 3-15.
- [6] 周向阳, 时延君. 惯性稳定平台单神经元/PID 自适应

- 应复合控制与参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 189-196.
- ZHOU X Y, SHI Y J. Single neuron/PID adaptive compound control and parameter optimization for the inertially stabilized platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 189-196.
- [7] 贾林, 王耀南, 何静, 等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 89-96.
- JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 89-96.
- [8] 姜伟, 裘锦霄, 郑颖, 等. 基于惯量估计的工业机器人关节伺服系统变增益自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 118-128.
- JIANG W, QIU J X, ZHENG Y, et al. Active disturbance rejection control with variable gain for joint servomechanism of industrial robot based on inertia estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 118-128.
- [9] 周向阳, 李玲玲, 赵立波. 基于扩张状态观测器的稳定平台非奇异终端滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 161-169.
- ZHOU X Y, LI L L, ZHAO L B. Nonsingular terminal sliding mode control for the ESO-based stabilized platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 161-169.
- [10] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- LIU J K, SUN F CH. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418.
- [11] 付东学, 赵希梅. 永磁直线同步电机自适应反推全局快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1634-1641.
- FU D X, ZHAO X M. Adaptive backstepping global fast terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1634-1641.
- [12] 吴爱国, 刘海亭, 董娜. 机械臂神经网络非奇异快速终端滑模控制[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 395-404, 240.
- WU AI G, LIU H T, DONG N. Nonsingular fast terminal sliding mode control of robotic manipulators based on neural networks[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 395-404, 240.
- [13] CHEN J, CHEN L, ZOU Q. Sliding mode control for manipulator based on fuzzy switching gain adjustment[J]. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2019: 822-826.
- [14] LAN Y P, LI J, ZHANG F G, et al. Fuzzy sliding mode control of magnetic levitation system of controllable excitation linear synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5585-5592.
- [15] XIAO L, JUIN T F, YUN C X. Adaptive fuzzy control of MEMS gyroscope using global fast terminal sliding mode approach [J]. 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, 2017: 109-112.
- [16] 刘攀, 杨鹏, 马文良, 等. 基于模糊切换增益调节的PMSM滑膜控制算法的仿真[J]. 电子测量技术, 2019, 42(19): 106-110.
- LIU H, YANG P, MA W L, et al. Simulation of PMSM synovial control algorithm base on fuzzy switching gain adjustment [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(19): 106-110.
- [17] CHEN J, CHEN L, ZOU Q. Sliding mode control for manipulator based on fuzzy switching gain adjustment [J]. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2019: 822-826.
- [18] 周向阳, 贾媛. 航空遥感惯性稳定平台模糊/PID复合控制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2545-2554.
- ZHOU X Y, JIA Y. Fuzzy /PID compound control for inertially stabilized platform in airborne remote sensing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2545-2554.

作者简介



周向阳 (通信作者), 1992 年于合肥工业大学获得学士学位, 分别在 2002 年和 2008 年于西安交通大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 主要研究方向为机电一体化、伺服控制技术和 MEMS 传感器。

E-mail: xyzhou@buaa.edu.cn

Zhou Xiangyang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1992, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2002 and 2008, respectively. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include mechatronics, control technology and MEMS sensors.



舒通通, 2019 年于山东科技大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为惯性稳定平台设计与控制。

E-mail: ZY1917229@buaa.edu.cn

Shu Tongtong received his B. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2019. He is currently a

master student at Beihang University. His main research interests include design and control of the inertially stabilized platform.



吕子豪, 2021 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 目前的研究方向为惯性稳定平台设计与控制。

E-mail: lvzihao123@126.com

Lyu Zihao received his B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2021. He is currently a master student at Beihang University. His current research interests include design and control of the inertially stabilized platform.



孙步早, 2020 年于北京科技大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为惯性稳定平台设计与控制。

E-mail: ZY2017518@buaa.edu.cn

Sun Buzao received his B. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2020. He is currently a master student at Beihang University. His main research interests include design and control of the inertially stabilized platform.