

〈系统与设计〉

钢丝绳传动的三轴转台伺服控制的设计

王 凯¹, 孔德杰¹, 宋悦铭², 王国华², 沈宏海², 王 浩²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对某机载平台中钢丝绳传动带来的非线性误差及外部扰动等因素直接影响平台相机成像质量的问题, 提出一种模糊自适应前馈补偿的控制策略。首先对钢丝绳传动机构和高精度直流伺服电机进行了建模, 并建立了摩擦模型, 为转台速度环控制回路引入模糊自适应 PID 控制器。设计出前馈补偿和模糊自适应控制器的复合控制策略。Matlab 仿真结果以及实验表明该复合策略能有效消除飞机振动和钢丝绳非线性带来的抖动, 转台的稳定精度从 1 mrad 提高至 0.2 mrad, 大幅地提高了成像质量。

关键词: 稳定平台; 模糊 PID; 前馈控制; 钢丝绳传动; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)01-0054-07

Design of a Three-Axis Turntable Servo Control Using Wirerope Transmission

WANG Kai¹, KONG Dejie¹, SONG Yueming², WANG Guohua², SHEN Honghai², WANG Hao²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 1300012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the problem of nonlinear errors and external disturbances caused by wirerope transmission in an airborne platform directly affecting the imaging quality of platform cameras, we propose a control strategy using fuzzy adaptive feedforward compensation. First, the wirerope transmission mechanism and a high-precision DC servo motor were modeled, a friction model was established, and a fuzzy adaptive proportional-integral-derivative controller was introduced for the speed loop control loop of the turntable. Based on the principles of feedforward compensation, a feedforward compensation algorithm is proposed. A compound control strategy combining feedforward compensation with a fuzzy adaptive controller is also designed. MATLAB simulation results and experiments demonstrate that this compound strategy can effectively eliminate the jitter caused by aircraft vibration and wirerope nonlinearity. The stability accuracy of the turntable is increased from 1 to 0.2 mrad, which can significantly improve imaging quality.

Key words: stabilization platform, fuzzy PID, feed forward control, wirerope transmission, adaptive control

0 引言

机载三轴稳定平台广泛应用于遥感成像领域, 其主要作用就是隔离载机运动等因素带来的扰动, 减小飞行器姿态角带来的变化, 保证成像质量^[1]。现需研制一台具有高精度的三轴稳定平台, 使搭载在平台上的垂视相机和高光谱相机两种线阵相机工作在稳定的成像环境中, 获得高质量的图像数据。

传统的机载三轴平台机械传动往往采用电机直驱或带有减速箱的传动机构。这些方式均不能满足成像载荷质量大, 稳定平台质量小于 59.8 kg 的指标要求。钢丝绳传动具有高精度、低空回、重量轻等特点, 所以采用了钢丝绳传动机构。但是钢丝绳传动会带来一定的柔性传动, 在线阵相机成像这种高精度的场合往往不能忽略, 会带来图像的抖动和畸变。传统的 PID (proportion integration differentiation) 控制很难满足高

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-11-08.

作者简介: 王凯 (1995-), 男, 硕士研究生, 从事光电平台惯性空间稳定控制的研究。E-mail: kai950912@163.com.

通信作者: 孔德杰 (1978-), 男, 副教授, 博士, 从事各型光电转台、惯性空间姿态控制和伺服驱动器的研究。E-mail: 13578900198@126.com.

基金项目: 国家重点研发计划项目。

成像质量的要求，张洪文针对某遥感扫描组件消旋组件同步提出双电机驱动，采用独立的位置环和速度环控制钢丝绳传动，同步精度达到了 $0.5 \text{ mrad}^{[3]}$ ；谢宏伟在实验中确定了预紧力、负载、绳组数、转速对传动精度的影响^[4]。但是以上稳定平台的成像载荷均比较小，没有明显暴露出钢丝绳传动的缺点，在这次实际工程中，两个成像载荷的重量高达 21.3 kg ，稳定精度的技术指标为 0.35 mrad ，对控制算法的设计提出更高的要求。

本文主要是为了改善钢丝绳传动的三轴转台非线性干扰，设计出一种模糊自适应和前馈复合控制的策略，最后通过仿真和实验验证该控制策略的有效性。

1 控制系统的数学模型

1.1 钢丝绳传动系统的建模

本实验的稳定平台都是小幅有限角运动，钢丝绳机构如图 1 所示，结构图如图 2 所示，采用 ROT-LOK 型结构^[3-4]。在往复运动中，钢丝绳上不断变化的张力会对传动系统引入传动空回。

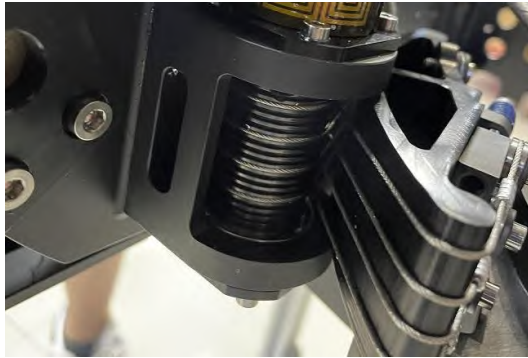


图 1 钢丝绳传动示意图

Fig.1 Wire rope transmission diagram

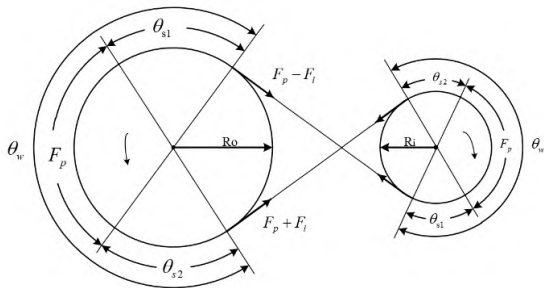


图 2 钢丝绳传动结构图

Fig.2 Schematic representation of wire rope transmission

根据结构的空间和刚性选择 4 组绳组数，被动轮上每组钢丝绳的一端都串联预紧弹簧用以调节钢丝绳的预紧力，可以在实验中精确地调节弹簧的长度来选取合适的预紧力^[5-6]。钢丝绳上的预紧力为 F_p ，负

载力为 F_i ，钢丝绳的变形量为 δ ，被动轮与主动轮的半径是 R_o, R_i ， AE 是刚度即横截面积与弹性模量的乘积， μ 为摩擦系数，钢丝绳的模型为：

$$\delta_o = \int \frac{R_o(F_p + F_i)e^{-\mu\theta}}{AE} d\theta - \int \frac{R_o(F_p - F_i)e^{\mu\theta}}{AE} d\theta \quad (1)$$

$$\delta_i = \int \frac{R_i(F_p + F_i)e^{-\mu\theta}}{AE} d\theta - \int \frac{R_i(F_p - F_i)e^{\mu\theta}}{AE} d\theta \quad (2)$$

则钢丝绳的传动空回 e 为：

$$e = \frac{\delta_o}{R_o} + \frac{\delta_i}{R_i} \quad (3)$$

1.2 直流电机模型

机载三轴稳定平台会涉及到多框架耦合等问题，但本文研究的是钢丝绳传动对伺服造成的影响，所以等效为 3 个相同的控制系统进行设计，由电机的工作原理可以推出电压平衡方程^[7]：

$$U_d - K_i I_d = L \dot{I}_d + R I_d + C_e \dot{\theta}_m \quad (4)$$

式中： U_d 为电枢两端电压； L 、 R 、 I_d 分别为电枢回路等效的总电感、电阻、电流； K_i 为电流反馈系数； C_e 是伺服电机电动势系数； $\dot{\theta}_m$ 和 θ_m 是电机输出轴的转速和转角。

直流伺服电机的动力学方程可以写为：

$$J_m \ddot{\theta}_m = k_t i - b_m \dot{\theta}_m - K_L (\theta_m - \theta_L) \quad (5)$$

式中： $k_t i$ 为电磁转矩； k_t 为电机的转矩系数；电动机输出轴的转动惯量为 J_m ；电机的粘性阻尼系数为 b_m ； K_L 为电机和框架的耦合刚度系数； $\dot{\theta}_L$ 和 θ_L 为负载的转速和转角。此系统的负载的转动惯量大以及精度要求高，所以将电机和惯性负载视为二质量系统进行建模分析^[8]。设负载的黏性阻尼系数为 b_L ， T_{mL} 为负载输出力矩，可以得知负载的数学模型如下：

$$J_L \ddot{\theta}_L = T_{mL} - b_L \dot{\theta}_L \quad (6)$$

$$K_L (\theta_m - \theta_L) - T_{mL} = 0 \quad (7)$$

在仿真中将脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）环节近似的等效为一个比例环节，置为 k_u ；速度环放大系数为 k_s ；反馈系数为 K_v 。

1.3 建立摩擦模型

在伺服系统中，摩擦模型的建立相当重要，根据相关文献，仿真建立了较为经典的 *Lugre* 模型^[9]。设状态变量 z 代表接触面鬃毛的平均变形，*Lugre* 的数学模型可由下式表示：

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \alpha \dot{\theta} \quad (8)$$

$$\dot{z} = \dot{\theta} - (\sigma_0 |\dot{\theta}| / g(\dot{\theta})) z \quad (9)$$

$$g(\dot{\theta}) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{v_s}\right)^2} + \alpha \dot{\theta} \quad (10)$$

式中: σ_0 与 σ_1 为动态摩擦参数, 其中 σ_0 为刚毛的刚性系数, σ_1 为滑动阻尼系数。 F_c 、 F_s 、 α 、 v_s 为静态摩擦参数, 其中 F_c 为库仑摩擦; F_s 为静摩擦; α 为粘性摩擦系数; v_s 为 stribeck 特性阶段的动静切换速度, 而本文针对项目情形进行了实测, 得出相关参数的具体数值。

2 控制器设计

2.1 模糊自适应控制设计

由于机载平台的特点, 传统 PID 控制难以满足其精度要求, 实验设计了模糊自适应 PID 控制器。其结构如图 3 所示。

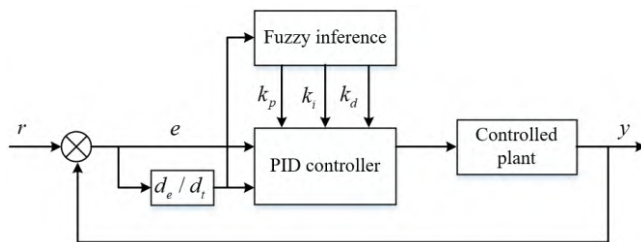


图3 模糊控制原理结构图

Fig.3 Fuzzy control principle structure diagram

从结构图可以看出模糊控制采用两输入三输出二维模糊控制模块, 以摆扫速度误差 e 和误差变化率

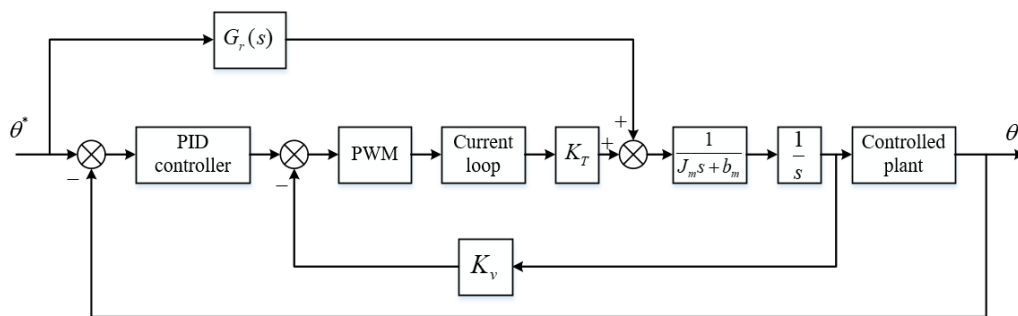


图4 模糊自适应前馈控制框图

Fig.4 Block diagram of fuzzy adaptive feedforward control

采用基于输入的自适应前馈补偿来提高伺服系统的性能, 可以求得:

$$G_1(s) = \frac{Ls + R + K_i}{G_2(s)} \quad (15)$$

$$G_2(s) = \{J_L J_m L s^4 + [J_L J_m (R + K_i) + (J_L b_m + J_m b_L) L] s^3 + [(J_L b_m + J_m b_L) (R + K_i) + b_m b_L L] s^2 + b_m b_L (R + K_i) s\} k_u k_t k_s K_v \quad (16)$$

d_e 为输入语言变量, 以 Δk_p , Δk_i , Δk_d 为输出语言变量。对于每个状态的 3 个参数, 有:

$$k_p(t) = k_p(t-1) + \Delta k_p(t) \quad (11)$$

$$k_i(t) = k_i(t-1) + \Delta k_i(t) \quad (12)$$

$$k_d(t) = k_d(t-1) + \Delta k_d(t) \quad (13)$$

输入变量 e 和 d_e 的模糊集合可以划分为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}, 输出变量 Δk_p , Δk_i , Δk_d 的论域划分和输入变量的划分是一致的。输入输出变量边缘采用高斯隶属函数曲线, 其余部分采用三角形隶属函数曲线如式(14):

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq 0 \\ \frac{c-x}{c-b} & 0 \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (14)$$

e 和 d_e 分别有 7 个论域, 故一共有 49 条控制规则, 可以根据相应领域专家的技术和经验编写控制规则表^[10-12]。

2.2 前馈补偿控制设计

前馈控制的引入就可以直接将干扰引入到控制装置, 在控制系统中同时使用前馈控制加反馈控制的方法称为复合控制^[12-14]。

实际钢丝绳传动会引起一定的滞后, 前馈补偿基于不变性原理, 通过前馈补偿环节把可以测量的扰动误差引入到控制器的设计中, 从而能很好地抑制干扰, 减小系统的误差, 控制模型如图 4 所示。

$$G_r(s) = \frac{G_2(s)}{Ls + R + K_i} \quad (17)$$

式中: G_1 为电机机电部分和负载的等效传递函数; G_r 为前馈补偿装置的传递函数。

3 三轴转台模糊自适应前馈控制仿真

3.1 三轴转台的参数分析

在本次实验中, 所用电机参数如下: $L=2.2$ mH,

$R=10\Omega$, $k_t=2.1\text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $C_e=2.1\text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, $J_m=0.0037\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_L=7.91\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $b_m=0.01$, $b_L=15.0$, $K_i=0.001$, $K_L=6.0$; 摩擦模型参数: $\sigma_0=2600$, $\sigma_1=25$, $\alpha=0.2$, $F_c=5.2$, $F_s=6.4$, $v_s=0.01$; 钢丝绳选用的是 SUS304 材质, 直径 1 mm , 它的实际参数是 $\mu=0.0015$, $AE=8\times 10^3$; 在调试平台时, 测得预紧力 $F_p=21.3\text{ N}$ 效果最好; PWM 环节放大倍数 $k_u=11$, 速度环放大倍数 $k_s=6$, 反馈系数 $K_v=2$; PID 控制器 3 个参数 $k_p=100$, $k_i=1.0$, $k_d=50$; 根据以上相关参数求出前馈部分传递函数:

$$G_1(s) = \frac{0.041s^4 + 81.210s^3 + 373.203s^2 + 415.842s}{0.0022s + 10.001} \quad (18)$$

前馈控制的输入是根据飞机上的主惯导获得数据, 经过控制板处理之后用来补偿飞机姿态, 由于条件限制, 仿真的时候所用的是以前在飞机下载的惯导数据。基于传统 PID 控制仿真模型和模糊自适应 PID 前馈补偿控制仿真模型框图如图 5、图 6 所示。

3.2 三轴转台仿真结果分析

运行仿真得到的仿真曲线如图 7, 采用传统 PID 控制, 在速度过零点时, 波形明显发生畸变, 出现位置跟踪“平定”现象和速度跟踪“死区”现象, 位置跟踪出现很大的滞后。而采用了模糊控制 PID 控制器和前馈控制符合的控制算法, 消除了“平定”和“死区”现象, 对系统滞后明显改善, 响应速度更快。

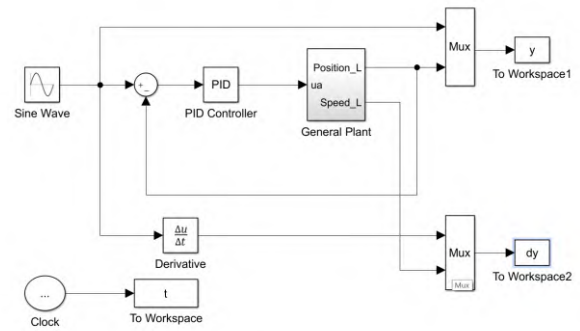


图 5 传统 PID 控制仿真模型

Fig.5 Traditional PID control simulation model

4 实验

4.1 摇摆台抗干扰实验

钢丝绳传动误差是制约伺服性能的关键, 传动误差是指当输入轴单向转动时, 输出轴的实际值对理想值的误差, 在摇摆台实验室, 模拟飞机环境对稳定平台进行实验测量, 图 8 是平台测试情况, 在稳定平台横滚框架安装平面反射镜, 横滚框架位于零位, 反射镜与地面平行, 在反射镜正下方放置自准直仪, 自准直仪精度设置为 $1\mu\text{rad}$, 俯仰轴以 0.3° , 0.5 Hz 摆动。用传统 PID 控制和模糊自适应前馈控制算法分别测试曲线如图 9。从输出曲线可以看出, 传统 PID 存在很大的抖动, 传动精度在 1 mrad , 而模糊自适应前馈控制传动精度达到了 0.2 mrad , 极大地改善了钢丝绳对系统带来的抖动, 能达到指标要求。

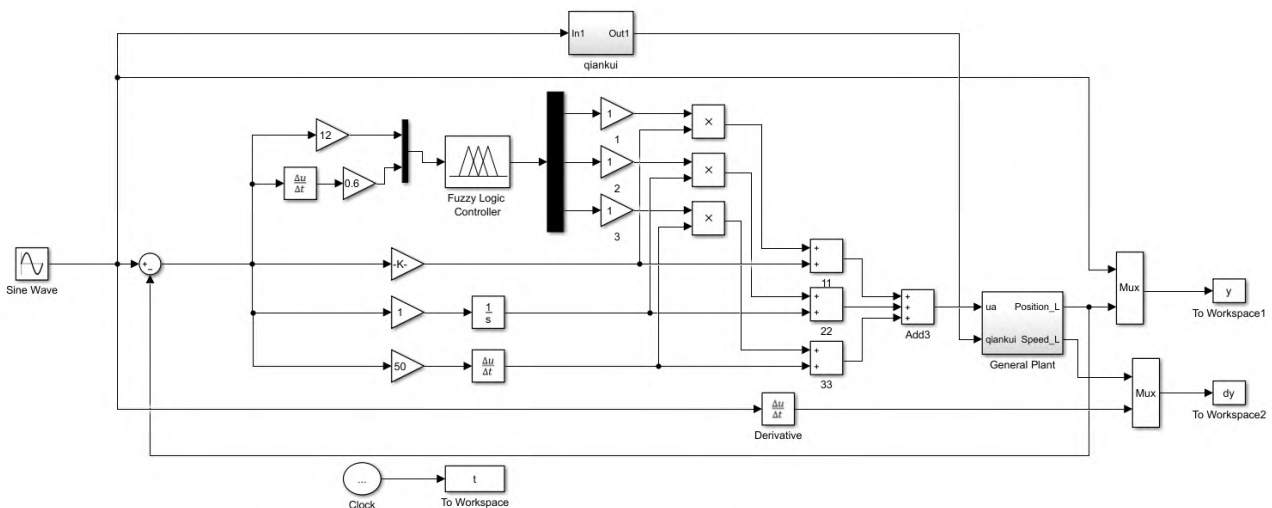


图 6 模糊自适应 PID 前馈补偿控制仿真模型

Fig.6 Fuzzy adaptive PID feedforward compensation control simulation model

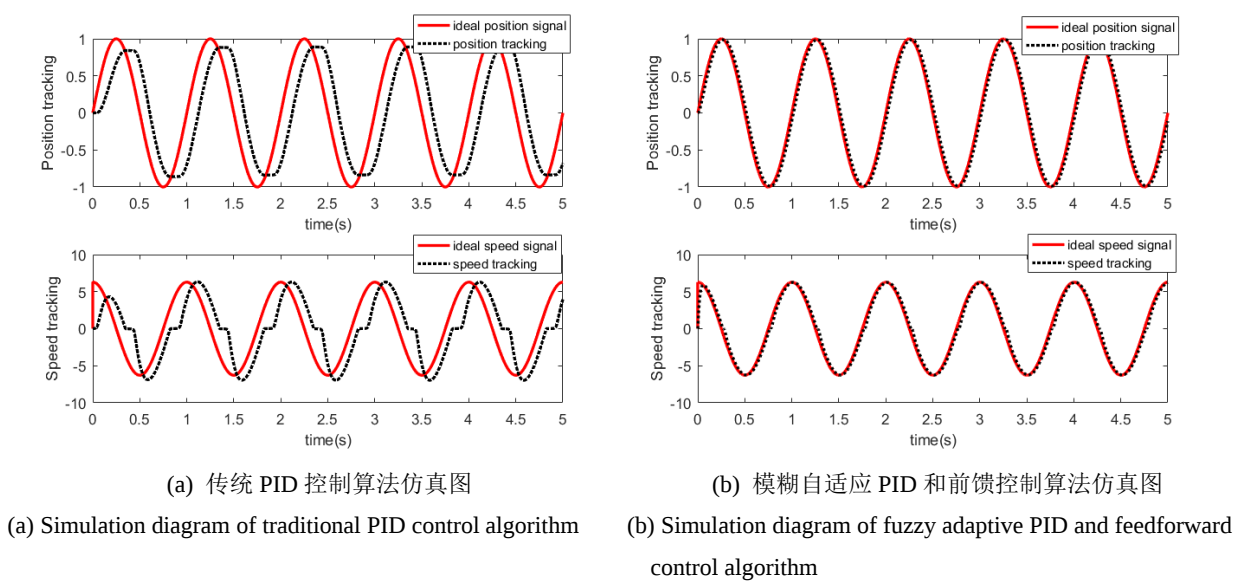


图7 仿真结果图

Fig.7 Simulation result graph

4.2 速度稳定性实验

用平行光管模拟无穷远处，设备摆放如图10，稳定平台俯仰框架以固定速度摆扫，相机通过反射镜对靶标进行成像，平行光管采用模块化光电测试系统METS L19型号，分辨率靶标选择使用美军标USAF1951分辨率靶。拍出的靶标如图11所示。图11(a)采用传统PID控制拍出来的靶标，存在抖动弯曲的现象，用Matlab查看每行相差两个像素，相机角分辨率为10 μrad，而图11(b)采用模糊自适应前馈控制算法拍出来的靶标用Matlab查看靶标每行像素是基

本一致的，满足指标要求。

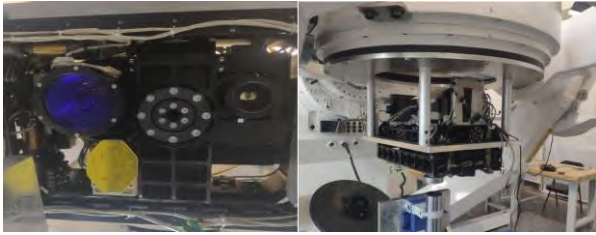


图8 摇摆台实验设备示意图

Fig.8 Schematic diagram of swing table experimental equipment

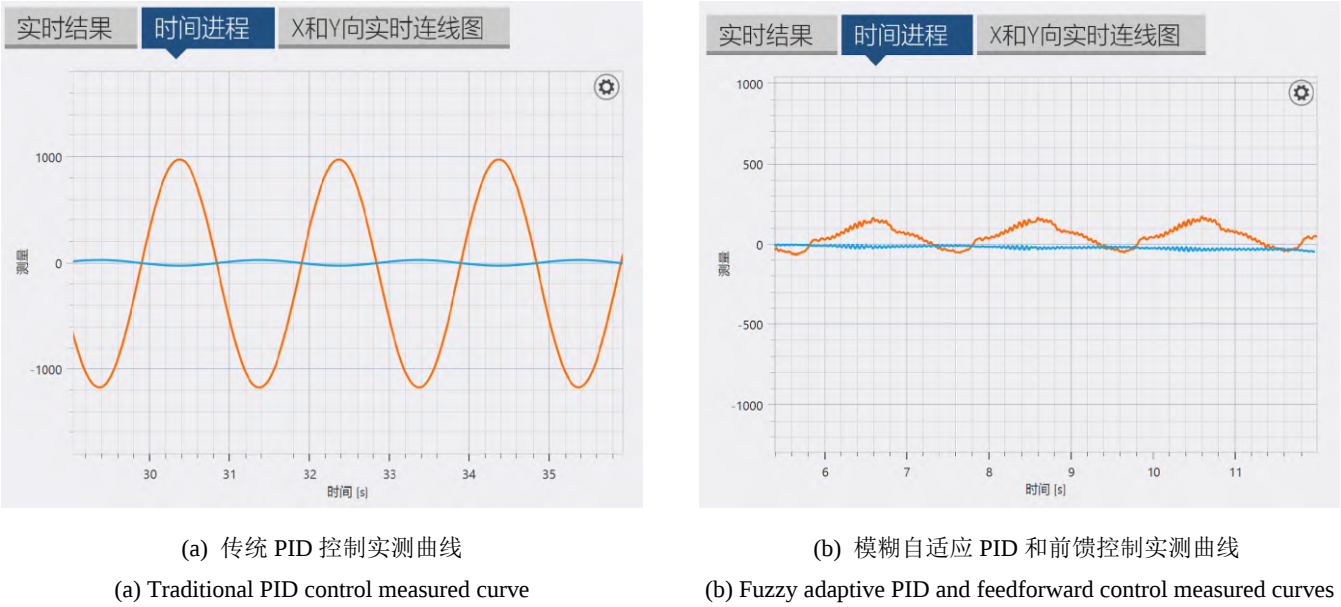


图9 自准直仪输出曲线

Fig.9 Autocollimator output curves

4.3 实验结果分析

在摇摆台模拟飞机环境做的抗干扰实验，将控制系统的稳定精度从 1 mrad 改善到 0.2 mrad，在速度平稳性实验中，采用平行光管测靶标成像的方式，采用复合控制的算法能较好地改善钢丝绳带来的速度抖动性，以上实验与仿真结果也相吻合，仿真和实验都说明了采用复合控制策略较传统 PID 对控制精度带来了大幅的改善，可以为以后类似的工程提供参考。

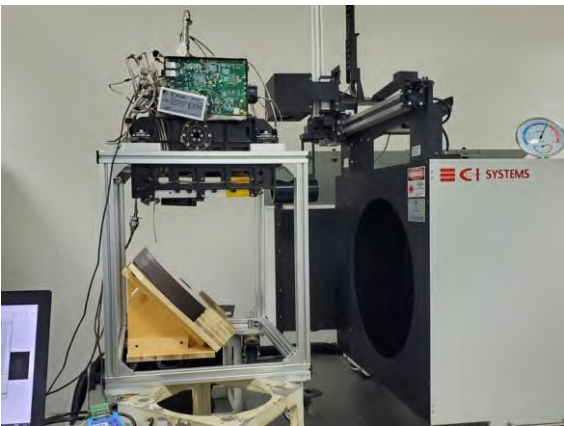
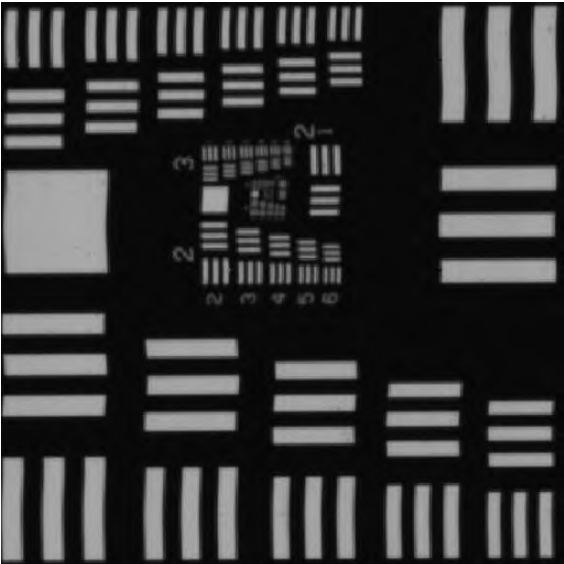


图 10 平行光管实验
Fig.10 Schematic diagram of collimator experiment



(a) 采用传统 PID 控制时靶标
(a) Target when using traditional PID control



(b) 采用模糊自适应 PID 和前馈控制时靶标
(b) Target when using fuzzy adaptive PID and feedforward control

图 11 靶标对比图

Fig.11 Target comparison chart

5 结论

本文针对采用钢丝绳传动的大质量线阵相机的伺服控制精度，提出模糊自适应 PID 前馈补偿的复合控制策略，将按输入设计的前馈控制方法与模糊自适应控制结合起来，通过仿真和实验证明，该策略能够有效地消减钢丝绳传动误差，平台稳定精度从 1 mrad 提高到 0.2 mrad，满足了成像的指标要求。

参考文献：

[1] 马经帅, 于洵, 刘晓宇, 等. 高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 597-607.

MA Jingshuai, YU Xun, LIU Xiaoyu, et al. Servo stabilization control algorithm in high-precision photoelectric tracking system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 597-607.

[2] 鲁亚飞. 精密柔索传动机理与设计方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

LU Yafei. Study on the Principle and Design Method of the Precise Cable Drive[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

[3] 张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 钢丝绳传动在航空光学遥感器上的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 418-422.

ZHANG Hongwen, CAO Guohua, LI Yanwei, et al. Application of wire rope gearing in aerial optical remote sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 418-422.

- [4] 谢宏伟, 陶忠, 侯军占, 等. 多绳精密传动的传动精度实验研究[J]. 兵工学报, 2017, **38**(4): 728-734.
XIE Hongwei, TAO Zhong, HOU Junzhan, et al. Experimental research on transmission accuracy of multi-cable drive[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, **38**(4): 728-734.
- [5] Kilic E, Dolen M. Prediction of slip in cable-drum systems using structured neural networks[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, **228**(3): 441-456.
- [6] Baser O, Konukseven E I. Theoretical and experimental determination of capstan drive slip error[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, **45**(6): 815-827.
- [7] 陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
CHEN Juan. Study on the low velocity properties and jitter compensation for the servo system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [8] 石文兵, 唐小琦. 基于模糊自整定 PID 的二质量伺服控制系统的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(2): 3-5.
SHI Wenbing, TANG Xiaoqi. A study of two-mass servo control system based on a fuzzy self-tuning PID controller[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2007(2): 3-5.
- [9] 刘强, 尔联洁, 刘金琨. 摩擦非线性环节的特性、建模与控制补偿综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002(11): 45-52.
LIU Qiang, ER Lianjie, LIU Jinkun. Overview of characteristics, modeling and compensation of nonlinear friction in servo systems[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002(11): 45-52.
- [10] Esfandyari M, Fanaei M A, Zohreie H. Adaptive fuzzy tuning of PID controllers[J]. *Neural Computing and Applications*, 2013, **23**(1): 19-28.
- [11] Jahed M, Farrokhi M. Robust adaptive fuzzy control of twin rotor MIMO system[J]. *Soft Computing*, 2013, **17**(10): 1847-1860.
- [12] 孙战磊, 徐开, 王栋, 等. 自适应模糊 PID 前馈补偿在机载挂飞摆扫转台控制中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, **23**(12): 4071-4074, 4083.
SUN Zhanlei, XU Kai, WANG Dong, et al. Application of fuzzy PID adaptive feed forward compensation on swing turntable control mounted on flying helicopter[J]. *Computer Measurement and Control*, 2015, **23**(12): 4071-4074, 4083.
- [13] 魏贵玲, 王斌, 邓劲松, 等. 一种复合控制器在陀螺稳定平台中的应用[J]. 压电与声光, 2016, **38**(3): 415-419.
WEI Guiling, WANG Bing, DENG Jinsong, et al. Compound control method is applied in the gyro stabilized platform[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, **38**(3): 415-419.
- [14] 辛林杰, 魏志强, 李斌. 前馈控制在光电跟踪系统中的应用研究[J]. 电视技术, 2020, **44**(4): 27-31.
XIN Linjie, WEI Zhiqiang, LI Bin. Research and application of feedforward control in photoelectric tracking system[J]. *Video Engineering*, 2020, **44**(4): 27-31.