

机载光电跟瞄平台的模糊自适应PID跟踪控制

全昭军, 刘珊中, 李燕凡
(河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为提高机载光电跟瞄平台的跟踪性能, 将模糊控制与PID控制相结合, 通过改变模糊控制器输入与输出变量的论域, 来提高模糊PID控制器的适应性, 以改善光电跟瞄平台的控制性能。仿真结果表明, 该方法能够减小超调量, 缩短响应时间, 提高控制精度, 具有较好的鲁棒性。

关键词: 机载光电跟瞄平台; 模糊控制; 变论域; PID控制

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)04-0065-04

Fuzzy Self-Adaptive PID Tracking Control for Airborne EO Tracking and Pointing Platform

TONG Zhao-jun, LIU Shan-zhong, LI Yan-fan
(Electronic and Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to improve the tracking performance of airborne electro-optical tracking and pointing platform, fuzzy control was used together with PID control. The adaptability of the Fuzzy PID controller was improved by changing the fuzzy input and output variables, thus can enhance control performance of the airborne electro-optical tracking and pointing platform. Simulation results show that the method has preferable robustness, and can decrease overshoot, shorten response time and improve control accuracy.

Key words: airborne electro-optical tracking and pointing platform; fuzzy control; variable universe; PID control

0 引言

机载光电跟瞄平台是飞机上用于跟踪和捕获预定目标的平台, 飞机在高速飞行过程中会有震动、摩擦以及各种不确定干扰因素的影响, 其控制对象比较复杂。由于这种复杂平台系统的模型不容易被确定, 采用经典的控制算法已经很难达到较好的控制效果, 对此, 文献[1]利用模糊控制的自适应性来提高系统的稳定及跟踪精度; 文献[2]提出了模糊控制与PID控制相结合的方法, 通过用模糊推理来完成参数的自适应调整, 以进一步提高平台系统的控制性能, 但平台系统在各种随机干扰下处于大动态范围机动, 其论域范围常常会时而过大时而过小, 系统不能快速做出调整, 导致控制性能变差, 出现响应时间长、不稳定等现象。本文通过建立数学模型, 在机载光电跟瞄平台的跟踪回路中

设计基于伸缩因子的变论域模糊自适应PID控制器, 使论域随着误差的变化而变化, 以期望改善平台系统的动态性能, 提高跟踪精度, 使系统具有更好的鲁棒性。

1 三轴环架平台简介

工作在跟踪状态下的光电跟瞄平台是一个三自由度的角位置随动系统, 其结构如图1所示。

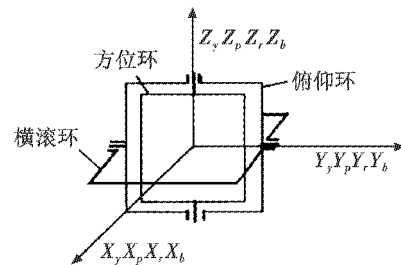


图1 三轴环架结构图

Fig. 1 Block diagram of three-axis gimbals

从内到外依次是方位环、俯仰环、横滚环。光电探测器固连于方位环, 同时, 方位环通过方位轴与俯仰环相连, 方位环可以绕方位轴相对于俯仰环转动, 俯仰环通过俯仰轴与横滚环相连, 可以绕俯仰轴相对于横滚环转动, 横滚环是最外面的环架, 它通过横滚轴与基座

收稿日期: 2013-05-14 修回日期: 2013-06-21
基金项目: 国家自然科学基金(61203047); 河南省教育厅自然科学研究项目(12A120004)
作者简介: 全昭军(1988—), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为光电跟瞄平台的稳定跟踪控制算法。

相连,并可以绕其轴相对于基座转动,基座固连在飞机上。方位力矩、俯仰力矩和横滚力矩由力矩电机通过 3 个转动轴作用在 3 个环架上^[3]。

2 平台数学模型的建立

2.1 平台框架

平台框架的机械结构对于低频输入信号可以当作刚体来处理。根据刚体转动的牛顿定律有

$$J_{\Sigma} \dot{\omega} = M_{\Sigma} \quad (1)$$

式中: J_{Σ} 包括平台框架结构固连的电机转子、角度传感器转子以及框架本身的转动惯量之和; M_{Σ} 包括电机转矩、基座角速度引起的干扰力矩及其他干扰力矩; ω 是平台框架相对惯性空间的角速度。

2.2 直流力矩电机

电机电枢电路平衡方程经拉氏变换后得

$$i_a(s) = \frac{U_a(s) - e(s)}{R_a(\tau_e s + 1)} \quad (2)$$

式中, τ_e 为电机的电磁时间常数。电动反电势的表达式为

$$e = K_e \omega(s) \quad (3)$$

力矩电机输出力矩由式(4)决定。

$$M = K_m i_a(s) \quad (4)$$

2.3 位置式陀螺

陀螺的输入有框架相对空间的角速度 ω 和指令角速度 ω_g 。陀螺传递函数为

$$G(s) = \frac{K_g}{s(\tau_g s + 1)} \quad (5)$$

2.4 视频图像跟踪器

视频跟踪器是目标瞄准线与平台瞄准线之间的延迟环节,其传递函数为

$$G(s) = Ke^{-ts} \quad (6)$$

比例系数 K 等于垂直视场角度与扫描线数之比^[4]。

在不考虑耦合的情况下,以方位轴为例,通过确定各部分的数学模型来得到系统的传递函数框图如图 2 所示。

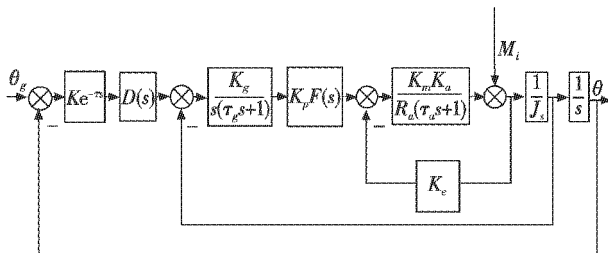


图 2 稳定跟踪系统框图

Fig. 2 Block diagram of stabilization and tracking system

平台的控制系统由稳定回路(速度回路)和跟踪回路(位置回路)两部分组成。其中, θ 、 θ_g 分别为目标视线的指令角和稳定平台转角, $D(s)$ 为本文要设计的控制器。

3 变论域模糊 PID 控制器设计

在模糊控制中加入变论域思想,本质上使输入、输出的基本论域随着控制需求按照一定规则进行适当伸缩,那么定义在基本论域上的模糊划分也会随之相应变化^[5-6]。变论域模糊自适应 PID 控制器结构如图 3 所示,把跟踪目标的误差 e 和误差变化率 e_c 作为该系统的输入量,设其模糊语言变量分别为 E 、 E_c ;把 PID 参数的调整值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为该系统的输出量,设其模糊语言变量分别为 K_p 、 K_i 、 K_d 。并且设定偏差的基本论域为 $[-E, E]$,偏差变化率的基本论域为 $[-E_c, E_c]$,输出量的基本论域为 $[-U, U]$,通过实验可以确定其论域。

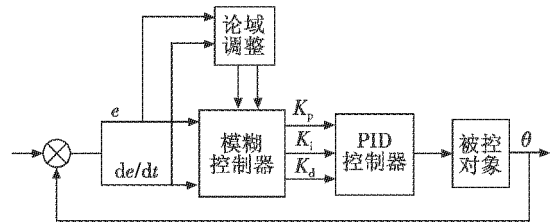


图 3 变论域模糊 PID 控制器结构图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy PID controller with variable universe

3.1 模糊控制规则

该模糊系统属于两输入(E 、 E_c)三输出(ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d)的模糊控制系统,共有 49 条控制规则。输入输出语言值的隶属度函数均选用三角形的隶属度函数,控制规则选择 Mamdani 型。根据实际情况,输入变量和输出变量的模糊子集为{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大},记为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},输入量的初始论域均为 $[-6, 6]$,输出量的基本论域均为 $[-0.6, 0.6]$ 。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊控制模型,应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表,在线修正 PID 参数,算式为

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \quad (7)$$

$$K_i = K'_i + \Delta K_i \quad (8)$$

$$K_d = K'_d + \Delta K_d \quad (9)$$

式中, K'_p 、 K'_i 、 K'_d 为原来整定好的 PID 参数。此过程中,控制系统需对模糊逻辑规则的结果进行查表、运算,模糊控制规则如表 1 所示。

表1 K_p, K_i, K_d 模糊规则表
Table 1 The fuzzy rule table of K_p, K_i and K_d

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/NS/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	ZS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3.2 伸缩因子的选择

称函数 $\alpha: X \rightarrow [0, 1], x \mapsto \alpha(x)$ 为论域 $X = [-E, E]$ 的一个伸缩因子^[7]。在变论域模糊PID控制器的设计中,如何选取合适的伸缩因子是关键,本文中选取基于函数模型的伸缩因子,输入变量 e 和 e_c 的伸缩因子均选取为 α

$$\alpha(e) = \left(\frac{|e|}{E}\right)^{\tau_1} \quad (10)$$

$$\alpha(e_c) = \left(\frac{|e_c|}{E_c}\right)^{\tau_2} \quad (11)$$

式中: $e \in [-E, E]; e_c \in [-E_c, E_c]; 0 < \tau_1 < 1; 0 < \tau_2 < 1$ 。

输出变量 K_p, K_i, K_d 的伸缩因子选取统一为 β 。

$$\beta(e, e_c) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{|e|}{E}\right)^{\tau_1} + \left(\frac{|e_c|}{E_c}\right)^{\tau_2} \right] \quad (12)$$

根据伸缩因子的原理,当误差因为复杂环境变化而增大或减小时,此时论域就会随着膨胀或者收缩,那么加入伸缩因子后的输入论域分别为 $[-\alpha(e)E, \alpha(e)E], [-\alpha(e_c)E_c, \alpha(e_c)E_c]$; 输出论域变为 $[-\beta U, \beta U]$ 。但由于伸缩因子正规性的约束,当误差 e 最大为 E 时, $\alpha(e) = 1$ 变化后的最大论域为 $[-E, E]$, 不能继续拉伸,所以论域最大拉伸到原有宽度,不能继续放大。

4 控制系统仿真

将本文设计的变论域模糊PID控制器应用于平

台跟踪回路的控制,利用 Matlab 对某机载光电跟踪系统的传递函数进行仿真,并与一般模糊PID控制器的控制效果相比较。平台稳定回路的对象传递函数^[8]为

$$G(s) = \frac{81.8(s+0.01)}{s(s+0.009262)(s^2+10.34s+88.32)} \circ$$

在 Simulink 环境中,利用模糊逻辑工具箱中的各种模块画出变论域模糊PID控制系统的仿真图。输入信号是初始值为0、终值为1的阶跃信号,仿真步长取为0.01,仿真时间为10s。误差和误差率作为控制器的输入量, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为该系统的输出量,其量化因子取 $K_e = 1, K_r = 0.1$, 比例因子取0.5。系统延迟环节 K 取0.8, t 取0.1s。在变论域模块中,伸缩因子函数式的参数 τ_1, τ_2 均取0.5。而经典PID初始值可由预整定得到,方法有动态特性参数法、衰减曲线法等等,在 Matlab/Simulink 环境下,采用稳定边界法进行整定。根据经验公式计算参数整定值为

$$K_p = 0.6K, \quad (13)$$

$$K_i = 1.2K/T, \quad (14)$$

$$K_d = 0.075KT \circ \quad (15)$$

利用稳定边界法得到参数 $K = 11.15; T = 1$ 。由以上算式得 $K_p = 6.69; K_i = 13.38; K_d = 0.84$ 。变论域模糊PID的系统仿真如图4所示。

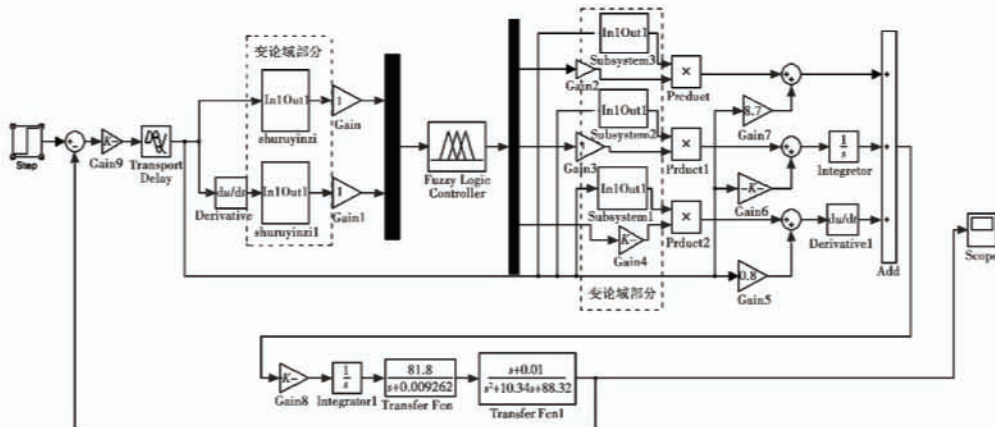


图4 变论域模糊PID控制器仿真模型

Fig. 4 The simulation model of fuzzy PID controller with variable universe

去掉仿真图中的变论域部分就为一般模糊 PID 控制器的仿真图,仅以方位回路进行仿真的阶跃响应对比曲线如图 5 所示。

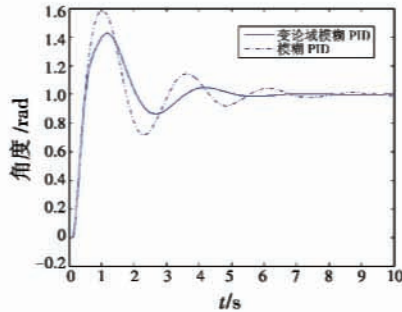


图 5 仿真对比图

Fig. 5 Comparison of simulation

为了更好地体现变论域控制算法的优越性,仿真过程中在控制对象后加入脉冲干扰,仿真结果如图 6 所示。从图上可以看出,在 0.7 s 处加入振幅为 0.1、周期为 5 s、占空比为 0.1 的干扰后,变论域模糊 PID 控制与模糊 PID 控制相比,超调量上升的幅度小,稳定性增强,说明变论域控制算法的抗干扰能力以及鲁棒性要优于模糊 PID 控制。

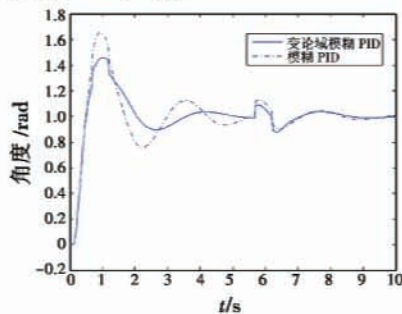


图 6 加入干扰后对比图

Fig. 6 Comparison after adding interference

5 结论

从仿真结果可以看出,相对于传统的模糊 PID 控制,机载光电跟踪系统采用变论域模糊 PID 控制方法能够更快地进入稳态,误差小且精度高。能够克服模糊控制随着误差减小而稳态误差增大的缺点,超调量较小。变论域的方法有自适应能力强的特点,改善系统的动态性能,使机载光电跟踪平台能够快速跟踪并瞄准目标。

参考文献

- [1] 车宏,卢广山. 模糊控制在机载光电跟踪系统中的应用[J]. 电光与控制,2001,8(4):15-20.
CHE H, LU G S. Application of fuzzy control in airborne E-O tracking system [J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(4):15-20.
- [2] 徐晓霞. 机载光电跟踪系统的模糊 PID 控制[J]. 电子设计工程,2012,20(2):108-111.
XU X X. Research on fuzzy PID control of airborne electro-optical pointing and tracking systems [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(2):108-111.
- [3] 郑翔,黄一,吕俊芳,等. 机载光电跟踪平台三轴环架模型的建立[J]. 飞机设计,2003(4):41-45.
ZHENG X, HUANG Y, LÜ J F, et al. The modeling of three-axis frames of airborne electro-optical tracking and pointing platform on aircraft [J]. Aircraft Design, 2003 (4):41-45.
- [4] 卢广山. 高精度机载光电跟踪系统的自适应算法研究[J]. 西北工业大学学报,2002,20(4):563-566.
LU G S. Adaptive fuzzy control of airborne electro-optical tracking system [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(4):563-566.
- [5] LI H X, MIAO Z H, WANG J Y. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system [J]. Science in China Series E: Technology Science, 2002, 45(3):225-240.
- [6] LI H X, CHEN C L P. Adaptive fuzzy controllers based on variable universes theory [C]//Artificial Neural Networks in Engineering Conference (ANNIE'01), 2001:223-228.
- [7] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,1999,29(1):32-42.
LI H X. Adaptive fuzzy control based on variable universe [J]. Science in China Series E: Technology Sciences, 1999, 29(1):32-42.
- [8] 高嵩,徐晓霞,肖秦琨,等. 机载光电跟踪系统的模糊自适应控制[J]. 西安工业大学学报,2009,29(6):565-569.
GAO S, XU X X, XIAO Q K, et al. The research on fuzzy self-adjusting control of airborne electro-optical pointing and tracking systems [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2009, 29(6):565-569.