

文章编号 1004-924X(2015)增-0305-08

航空遥感惯性稳定平台的改进型小脑模型神经网络/比例微分复合控制

周向阳^{1,2*}, 岳海潇^{1,2}, 贾媛^{1,2}, 赵蓓蕾^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:针对航空遥感惯性稳定平台高稳定和高精度控制要求,研究了基于变置信度的改进型小脑模型神经网络控制器(CMAC)和比例微分(PD)控制器的复合控制方法。首先,建立了航空遥感三轴惯性稳定平台框架伺服系统模型。其次,建立了改进型CMAC/PD复合控制器,将改进型CMAC控制器和PD控制器分别加入到惯性稳定平台伺服系统的前馈通道和反馈通道,以提高控制系统精度。最后,整定伺服系统及改进型CMAC/PD复合控制器参数。实验结果表明:使用改进型CMAC/PD复合控制算法后,平台的俯仰框架角位置误差峰值为 0.2154° ,角位置RMS值为 0.0775° ,相比PID控制器分别减小了42.97%和29.86%。与传统PID控制相比,改进型CMAC/PD复合控制方法可显著抑制多源扰动对稳定平台伺服系统的影响,从而有效提高系统控制精度。

关键词:航空遥感;惯性稳定平台;框架伺服系统;改进型小脑模型神经网络控制器/比例微分控制器(CMAC/PD)复合控制;系统控制精度

中图分类号:V243.5;TP273.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0305

CMAC/PD-based compound control of inertially stabilized platform for aerial remote sensing

ZHOU Xiang-yang^{1,2*}, YUE Hai-xiao^{1,2}, JIA Yuan^{1,2}, ZHAO Bei-lei^{1,2}

- (1. *Science and Technology on Inertial Laboratory, Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;*
 2. *School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: xyzhou@buaa.edu.cn*

Abstract: For improving the standard of stability and precision of an Inertially Stabilized Platform (ISP) for aerial remote sensing, this paper introduces a modified Cerebellar Model Articulation Controller(CMAC)/Proportional and Derivative controller(PD) compound control method of the ISP frame servo system for aerial remote sensing based on variable confidence coefficient. First, the frame servo system model of ISP three-axis is established for aerial remote sensing. Then the modified

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2015-05-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375036, No. 51205019);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2012AA120601);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB724001)

CMAC controller and the PD controller are established. In order to enhance the precision of servo system, the modified CMAC controller and PD controller are respectively added in the feedforward and feedback paths. Finally, the parameters of modified CMAC/PD compound controller are adjusted. Experimental results indicate that the pitch frame angular position maximum precision of the system's by modified CMAC/PD compound controller is 0.2154° , and the RMS of angular position is 0.0775° . As compared to the normal PID control method, they respectively reduce by 42.97% and 29.86%. The mentioned modified CMAC/PD compound control method of ISP frame servo system observably reduces the influence of unknown disturbances, and efficiently improves the control precision of ISP servo system for aerial remote sensing.

Key words: aerial remote sensing; Inertially Stabilized Platform (ISP); frame position servo system; Modified cerebellar Model Articulation Controller/Proportional and Derivative Controller (CMAC/PD) compound control; system control precision

1 引言

航空遥感三轴惯性稳定平台用于稳定成像载荷,可有效隔离飞行载体角运动、振动等因素对成像载荷的影响。随着基础测绘、资源勘查、灾害监测、数字地图及国防等领域的迫切需求,航空遥感目前已成为重要的研究领域。然而航空遥感作业时,飞行平台在飞行过程中会受到大气紊流、发动机振动等影响,造成成像载荷相位中心难以保持稳定运动,导致成像质量下降甚至难以拼图^[1]。在航空遥感成像载荷重量不断增加的情况下,要得到高精度的航空遥感数据,要求三轴惯性稳定平台在高负载状态下仍可有效隔离载机干扰角运动,且具有较高的实时响应速度和稳定精度^[1-4]。

目前,航空遥感三轴惯性稳定平台俯仰、横滚、方位框架控制方法通常均采取常规 PID 三环伺服控制策略,即“位置环+速度环+电流环”的三环控制方法^[5]。该方法主要依靠反馈回路的高增益来实现对扰动的抑制,易于工程实现,且参数易于整定。当被控系统的线性模型在较小的范围内变化时,常规 PID 控制器才是有效的^[6-7]。然而,三轴惯性稳定平台是一种具有非线性,强耦合的对象,同时受到摩擦、负载变化、质量不平衡、陀螺噪声等诸多扰动因素的影响。因此,常规 PID 控制方法在低速伺服运动下难以有效抑制内部和外部扰动。随着成像载荷的重量和控制精度要求的不断提高,常规 PID 控制在控制器刚度、静态指向精度和动态跟踪精度等主要性能方面不再满足航空遥感作业的需求。近年来,现代控制方法

例如自适应控制、自抗扰控制、最优控制以及模糊控制等逐渐应用于惯性稳定平台控制系统,成为提高平台控制精度和性能的一个重要发展方向^[3-7]。然而,文献中先进控制方法的研究主要应用于小负载惯性稳定平台或光电吊舱,或需要控制模型的先验知识,或参数难以整定。相比而言,小脑模型神经网络控制器(Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC)属于局部逼近网络,具有高效地址映射,学习过程中不会出现局部最小点,采用 LMS 算法简单快速,可以快速学习逼近伺服系统中非线性时变部分的逆映射关系,适用于实时控制领域^[8]。

本文提出一种改进型 CMAC/PD 复合控制方法,提高稳定平台控制系统精度,并应用于高精度航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统中进行验证。

2 三轴惯性稳定平台的构成及其工作原理

2.1 三轴惯性稳定平台的硬件构成

图 1 所示为航空遥感系统结构图。主要由航空遥感三轴惯性稳定平台(Inertially Stabilized Platform, ISP)、相机载荷、位置姿态测量系统(Position and Orientation System, POS)、监控计算机和飞行平台等组成。其中三轴惯性稳定平台由框架、力矩电机、传动系统、控制电路、角度位置传感器等子系统构成。POS 子系统由惯性测量单元(IMU)、全球定位系统(GPS)和导航计算机(PCS)构成。相机载荷为可见光相机。进行航空

遥感作业时,由 POS 输出精确姿态信息作为参考基准,监控计算机根据 POS 实时位置姿态信息控制三轴惯性稳定平台,并使相机载荷系统光轴 (Line of Sight, LOS) 对准预定目标进行测量或拍照^[4]。

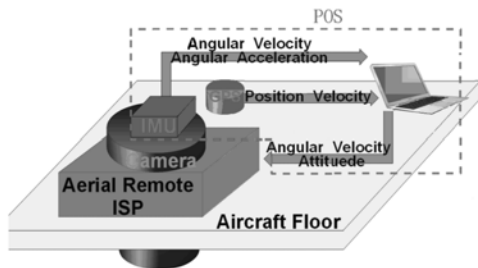


图 1 航空遥感系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of an aerial remote sensing system

2.2 三轴惯性稳定平台的工作原理

航空遥感三轴惯性稳定平台的基本工作原理为:飞行载体姿态在大气紊流等因素影响发生变化时,POS 提供相机载荷的高精度实时姿态基准,此时三轴惯性稳定平台控制系统实时跟踪相机载荷的姿态基准,由力矩电机驱动惯性稳定平台的横滚框、俯仰框和方位框反向转动,对飞行载体的横滚角、俯仰角和偏航角变化及扰动力矩进行隔离,使安装在最内框(方位框)上的成像载荷

的 LOS 保持对跟踪目标的稳定指向。

三轴惯性稳定平台结构如图 2 所示, G_x 、 G_y 、 G_z 分别为安装在俯仰框、横滚框和方位框的 3 个速率陀螺, M_x 、 M_y 、 M_z 为 3 台力矩电机, A_x 、 A_y 为 2 支加速度计, R_x 、 R_y 、 R_z 为 3 个光栅尺。框架伺服系统通常由三环控制,最外环为位置环,由高精度 POS 作为传感器采集相机载荷位置姿态信息并反馈;中间环为速度环,由安装在 3 个框架上的速率陀螺采集各框架角速率信息并反馈;最内环为电流环,由驱动电路中的电流传感器测量电流并反馈。当出现干扰力矩时,控制计算机发出控制信号,力矩电机产生力矩并通过齿轮减速装置进行力矩放大,驱动框架和相机载荷运动以抵消干扰力矩,从而使相机载荷不受飞机姿态变化影响,达到跟踪和稳定的目的。

3 改进型 CMAC/PD 复合控制器

3.1 CMAC 网络原理及算法

小脑模型神经网络 (Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC) 是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络^[8],可通过响应的学习算法改变表格存储的内容,具有信息分类存储的能力,在伺服控制,图像处理等领域有着重要的应用^[9-10]。

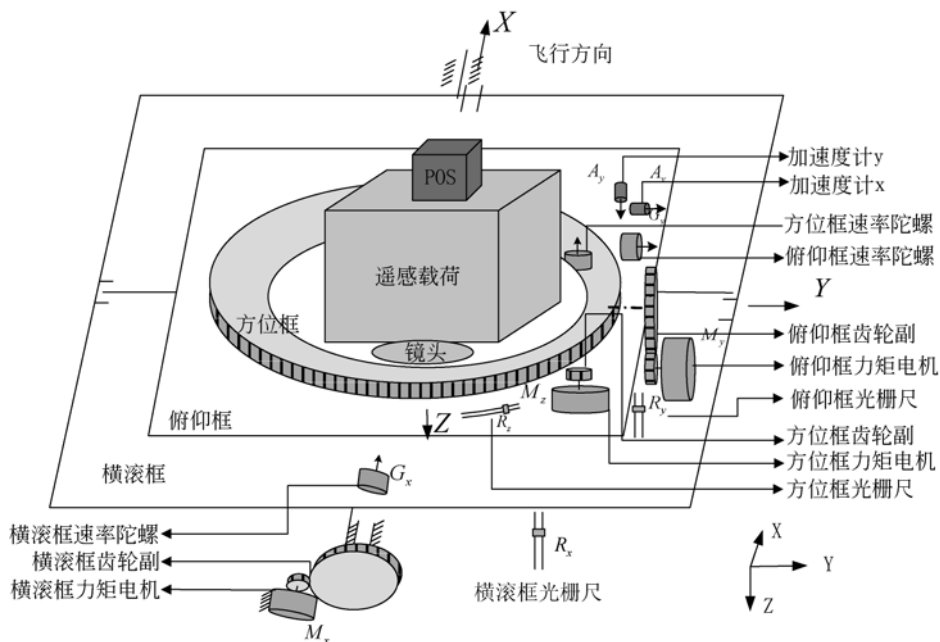


图 2 三轴惯性稳定平台结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of three-axis inertially stabilized platform

CMAC 神经网络的基本思想是^[8]:如图 3 所示,输入空间 U 中的一个状态,一对多地映射到存有地址向量的存储器 AC,并根据地址向量对响应的存储单元 AP 寻址,并将选取的存储单元中的内容进行加权求和,从而得到输出量。CMAC 控制器同时将该次输出与期望输出值进行比较,并根据相应的学习算法对已激活的存储单元内容进行修改,逐渐使控制器输出值逼近期望值。CMAC 是采用表格查询式输入输出算法的局部神经网络模型,具有计算量小,收敛速度快,参数易于整定等特征,适用于伺服系统^[11-14]。

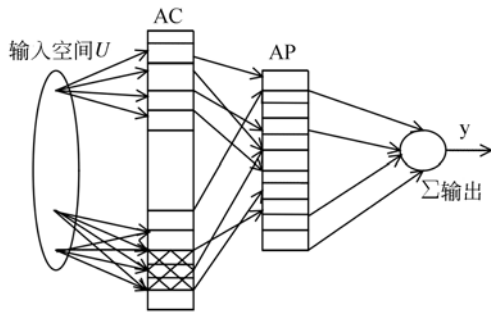


图 3 CMAC 算法结构图^[12]

Fig. 3 Structure diagram of CMAC algorithm^[12]

在控制时,控制系统的偏差信号与三轴惯性稳定平台框架位移信号进行量化后,输入地址并查找到响应的存储单元,激活存储单元对应的 c 个地址单元,并将其权值相加,得到 CMAC 控制器输出。即 CMAC 控制器的输出算法为:

$$y = \sum_{i=1}^c \omega_i, \quad (1)$$

式中: y 为 CMAC 控制器总输出, ω_i 为被激活地址对应权值。

梯度下降法在常规 CMAC 控制器学习算法经常采用^[14],其权值调整为:

$$\Delta \omega(t) = -\eta \frac{[r(t) - y(t)]}{c} \cdot \frac{\partial y}{\partial \omega} = \eta \frac{e(t)}{c}, \quad (2)$$

其中: $\Delta \omega(t)$ 为权值变化量, η 为网络学习效率,即学习率, $\eta \in (0, 1)$, $r(t)$ 为 CMAC 控制器输出, $y(t)$ 为 CMAC 控制器总输出。

伺服系统对实时跟踪精度要求比较高,而常规 CMAC 控制器需要多个周期才能收敛到一定的精度。且在动态跟踪中,会产生过学习现象,导

致控制精度下降,甚至使系统崩溃。对于具有相同置信度的常规 CMAC 控制器,误差会被平均分配到所有已经激活的存储单元,而经过 $t-1$ 次迭代后,不同的存储单元具有不同的学习历史,这样会造成学习效率和控制精度的下降。因此,若提高 CMAC 控制器的控制精度,所有的存储单元应具有不同的置信度^[15-17]。

3.2 改进型 CMAC 控制器算法

改进型 CMAC 控制器基于 CMAC 存储单元权值更新次数,将其存储单元的学习次数作为置信度的依据。其置信度越高,系统对权值的修正量就越小。由此,式(2)可修改为:

$$\Delta \omega_j(t) = \eta \left\{ \frac{[f(j) + 1]^{-1}}{\sum_{j=1}^c [f(j) + 1]^{-1}} \right\} \cdot e(t), \quad (3)$$

其中: $f(j)$ 为第 j 个存储单元的学习次数,也代表该存储单元的置信程度。首先 $f(j)$ 等于零,当第 j 个存储单元被编址后, $f(j)$ 自加 1。在训练过程中,已激活存储单元的误差修正量与 $[f(j) + 1]^{-1}$ 成正比。式(2)分母中 $f(j) + 1$ 防止分母变成零值。然而在权值实际更新过程中,将要更新的存储单元的 $f(j)$ 值总是大于或等于 1 的。式(3)可更新为:

$$\Delta \omega_j(t) = \eta \left\{ \frac{\left[1 - \frac{f_t(j)}{\sum_{m=1}^t \sum_{l=1}^c f_m(l)} \right]^k}{\sum_{j=1}^c \left[1 - \frac{f_t(j)}{\sum_{m=1}^t \sum_{l=1}^c f_m(l)} \right]^k} \right\} \cdot e(t), \quad (4)$$

其中: $f_t(j)$ 为第 j 个存储单元第 t 次更新的学习次数,也代表该存储单元的置信程度。 $f_t(j)$ 在最后一次学习过程后更新为零值。在此,把公式(2)中指数项 -1 修改为 $-k$,并在式(3)中定义 k 为均衡学习常数,合理的均衡学习常数可以有效的提高 CMAC 控制器在学习初期的学习速度。另外,对于不同的目标函数需要设置不同的 k 值以优化学习过程。学习次数越多,相应的权值更新次数就越多,置信度越高,其权值修正量就越小。而在抑制误差过程中,学习次数少的激活存储单元的权值修正量相对较大。因此,该算法可以使得相邻尚未学习存储单元拥有较小的置信度,并进行较大的权值修正,从而提高 CMAC 控制器的输出精度。

3.3 改进型 CMAC/PD 复合控制器结构

三轴惯性稳定平台框架改进型 CMAC/PD 复合控制系统图如图 4 所示,小脑模型神经控制器实现前馈控制,实现被控对象的逆动态模型,常规 PD 控制器实现反馈控制,以保证系统的稳定性,抑制未知扰动。开始时,系统主要由常规 PD 控制器进行控制,每一控制周期结束时,计算 CMAC 控制器的输出 $u_n(k)$,并与总控制输出 $u(k)$ 相比较,修正权重。在学习过程后,使控制总输出与 CMAC 的输出之差最小。经过一定周期数的学习,CMAC 控制器逐步取代常规 PD 控制器,系统的控制总输出主要由 CMAC 控制器产生。常规控制器未采用积分项,使得 CMAC 的学习过程仅依赖于实时误差的测量值 and 变化值^[12]。

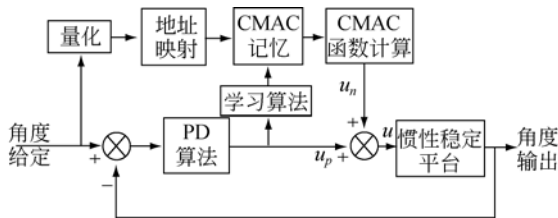


图 4 惯性稳定平台改进型 CMAC/PD 复合控制框图
Fig. 4 Diagram of modified CMAC/PD compound control of inertially stabilized platform

该系统的控制算法为:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i, \quad (5)$$

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k), \quad (6)$$

式中: c 为 CMAC 网络的泛化参数, a_i 为二进制选择向量, $u_n(k)$ 为 CMAC 控制器的输出量, $u_p(k)$ 为常规 PD 控制器的输出量。采用 LMS 算法,取性能指标函数:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u(k) - u_n(k))^2 \cdot \frac{a_i}{c}. \quad (7)$$

CMAC 控制器的调整指标为:

$$w(t) = w(t-1) + \Delta w(t) + \alpha [w(t-1) - w(t-2)], \quad (8)$$

式中: α 为惯性量, $\alpha \in (0, 1)$ 。

4 系统仿真研究

为了验证 CMAC/PD 复合算法的有效性,首先进行仿真分析。由于俯仰框相对于其它两个框架更易受到扰动力矩影响,因此以俯仰框架为控制对象,进行对比仿真分析。

如图 5 所示,仿真中常规 PID 控制器参数为: $P = 40$, $I = 1.2$, $D = 0.5$ 。复合控制器中 CMAC 控制器参数分别为: $\eta = 0.1$, $\alpha = 0.04$,

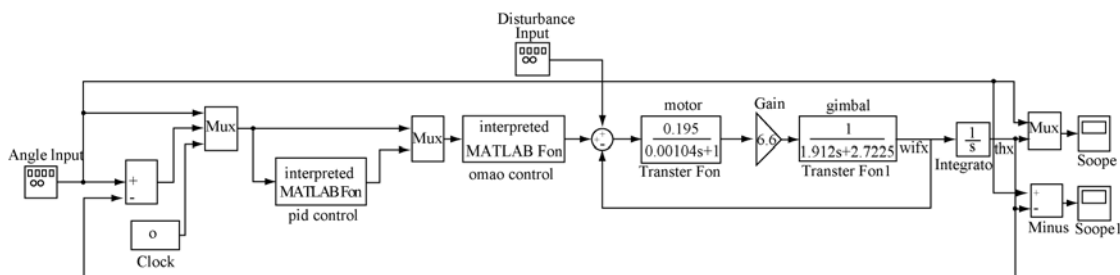


图 5 基于改进型 CMAC/PD 控制器的三轴惯性稳定平台控制系统 Simulink 仿真结构图
Fig. 5 Simulink figure of three-axis ISP system based on modified CMAC/PD controller

$c = 5$, $k = 1.34$, $N = 100$;PID 控制器参数分别为: $P = 40$, $D = 0.35$ 。

给定频率 0.5 Hz,幅值 0.5° 的正弦角度指令,在无干扰信号的情况下,仿真结果如图 6 所示。

仿真结果显示,常规 PID 控制器和改进型 CMAC/PD 控制器都可以很好地跟踪给定角度。但常规 PID 控制器反馈值最大误差仍有约 0.01° ,改进型 CMAC/PD 控制器在无附加干扰信号的

情况下,可更加精确地逼近角度实时给定值,所以改进型 CMAC/PD 控制器比常规 PID 控制器有更好的跟踪性能。

在给定频率 0.5 Hz,幅值 0.5° 的正弦角度指令下,另加入了频率为 4 Hz,幅值为 0.1° 的方波干扰信号。如图 7 所示,与常规 PID 控制器和存储单元具有相同置信度的常规 CMAC/PD 控制器进行了误差比较,改进型 CMAC/PD 控制方法可以更好地补偿惯性稳定平台系统角位置

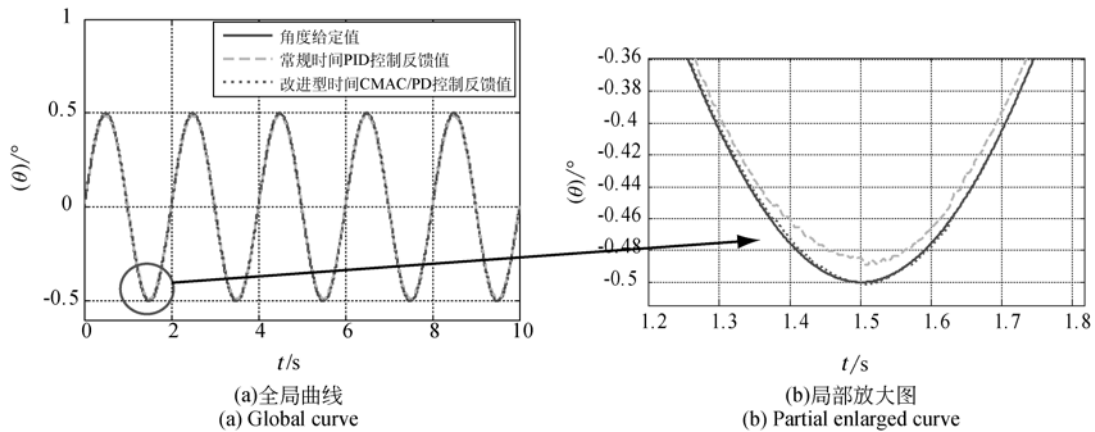


图 6 常规 PID 与改进型 CMAC/PD 控制器角位置反馈对比图

Fig. 6 Compared figure of feedback angle position for normal PID and modified CMAC/PD controller

误差。

在图 7 中,加入周期为 4 Hz,幅值为 0.1° 的方波干扰信号后,常规 PID 控制器的控制误差约为 0.015° ,常规 CMAC/PD 控制器的控制误差约为 0.01° ,而改进型 CMAC/PD 控制器的控制误差只有约 0.004° 。

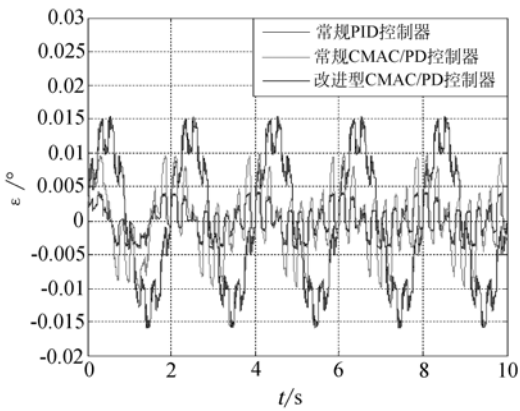


图 7 常规 PID、常规 CMAC/PD 及改进型 CMAC/PD 控制器角位置误差对比图

Fig. 7 Compared figure of angle position error for normal PID, normal CMAC/PD and modified CMAC/PD controller

因此,从仿真结果中可以看出,改进型 CMAC/PD 控制器具有比前两种控制器更高的精度和抗干扰性能。

5 实验验证

利用本实验室研制的某三轴惯性稳定平台

(ISP)和高精度位置姿态测量系统(POS)对改进型 CMAC/PD 控制效果进行实验验证。实验系统照片如图 8 所示,包括自研某三轴惯性稳定平台(ISP),高精度位置姿态测量系统(POS),其中包括光纤陀螺子系统(IMU)、全球定位系统(GPS)和导航计算机(PCS),系统监控计算机和 28 V 直流供电电源。其中,模拟载荷 40 kg,POS 俯仰精度为 $0.01^\circ/h(1\sigma)$ 。三轴惯性稳定平台主要参数为:自重为 40 kg,最大承载为 80 kg,俯仰框架最大转角为 $\pm 5^\circ$ 。POS 安装在模拟载荷中心以测量载荷相位中心的姿态,三轴惯性稳定平台基座与汽车固连。

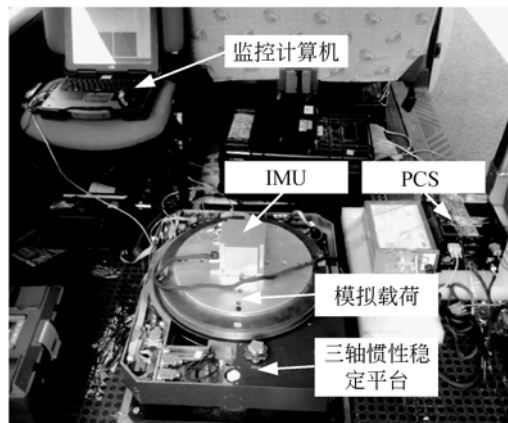


图 8 车载实验系统装配图

Fig. 8 Picture of vehicle-mounted experiment system

跑车实验中,给定系统俯仰框姿态角为 0° ,车速约为 45 km/h。在相同路面条件下,含有常规 PID 控制器和改进型 CMAC/PD 控制器的控制系统测试采样时间为 120 s,其中采样点 6 000

个,采样频率 50 Hz。实验过程中,常规 PID 控制参数与仿真时不变,为 $P = 40$, $I = 1.2$, $D = 0.5$;改进型 CMAC/PD 控制参数为: $\eta = 0.1$, $\alpha = 0.04$, $c = 5$, $k = 1.34$, $N = 100$, $P = 40$, $D = 0.35$ 。

如图 9 所示,基于传统 PID 控制器的系统角位置输出误差峰值为 0.3777° ,基于改进型 CMAC/

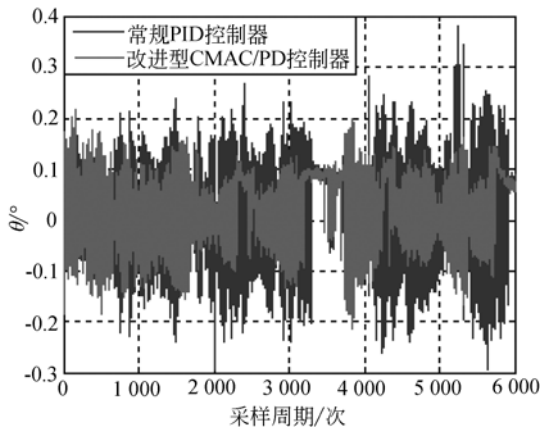


图 9 常规 PID 与改进型 CMAC/PD 控制器角位置输出对比图

Fig. 9 Comparison of angle position out curves for normal PID and modified CMAC/PD controllers

PD 控制器的系统角位置输出误差峰值为 0.2154° ,比 PID 减小了 42.97%。经计算,常规 PID 控制器的系统角位置输出 RMS 值为 0.1105° ,改进型 CMAC/PD 控制器的系统角位置输入 RMS 值为 0.0775° ,比 PID 减小了 29.86%。实验表明:改进型 CMAC/PD 控制策略可以更好地提升三轴惯性稳定平台的指向精度。

5 结 论

本文根据航空遥感高稳定度、高精度的要求,提出了改进型 CMAC/PD 复合控制方法。研究了常规 CMAC 神经控制算法和改进型 CMAC/PD 复合控制算法。通过仿真和实验,对比了常规 PID 控制方法和改进型 CMAC/PD 复合控制算法的控制精度。实验结果表明:改进型 CMAC/PD 复合控制算法俯仰框架角位置误差峰值为 0.2154° ,角位置 RMS 值为 0.0775° ;与常规 PID 控制算法相比分别减小了 42.97% 和 29.86%。说明改进型 CMAC/PD 复合控制算法能够有效对扰动进行抑制,可明显提高惯性稳定平台控制系统角位置控制精度。

参考文献:

- [1] ZHOU X Y, GONG G H, LI J P, *et al.*. Decoupling control for a three-axis inertially stabilized platform used for aerial remote sensing [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2014, Doi: 10. 1177/0142331214557667. (published online)
- [2] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology: concepts and principles [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008(12): 26-46.
- [3] 朱明超,刘慧,张鑫,等. 惯性稳定平台自适应前馈控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 141-148.
ZHU M CH, LIU H, ZHANG X, *et al.*. Adaptive feed-forward control for inertially stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 141-148. (in Chinese)
- [4] ZHOU X Y, ZHANG H Y, YU R X. Decoupling control for two-axis inertially stabilized platform based on an inverse system and internal model control [J]. *Mechatronics*, 2014 (24): 203-1213.
- [5] 周向阳,赵强. 航空遥感三轴惯性稳定平台双速度环控制[J]. *中国惯性学报*, 2013, 21(4): 439-445.
ZHOU X Y, ZHAO Q. Dual rate-loop method of three-axis inertially stabilized platform for aerial remote sensing application [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21 (4): 439-445. (in Chinese)
- [6] MARTIN R., ZDENE K.. Vibration rejection for inertially stabilized double gimbal platform using acceleration feedforward [C]. 2011 *IEEE International Conference on Control Applications (CAA)*. Denver, 2011: 363-368.
- [7] 李贤涛,张葆,沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2223-2231.
LI X T, ZHANG B, SHEN H H. Improved if isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2223-2231. (in Chinese)
- [8] ALBUS J S. A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller

- (CMAC) [J]. *Tran. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 1975, 97(3): 220-227.
- [9] ALBUS J S. Data storage in cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. *Tran. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 1975, 97(3): 228-233.
- [10] 刘桂雄, 林绪虹. 基于 CMAC 的图像融合快速算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 950-956.
LIU G X, LIN X H. Image fusion fast algorithm based on CMAC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 950-956. (in Chinese)
- [11] GE Y Q, LUO X P, DU P Y. A new improved CMAC neural network [C]. 2010 *IEEE Control and Decision Conference (CCDC)*, 2010: 3271-3274.
- [12] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 117-129.
LIU J K. *Advanced PID control methods and MATLAB simulations (Second edition)*[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2008: 117-129.
- [13] 王刚, 李建府, 朱荣刚. CMAC 改进算法在电动负载模拟器的应用[J]. *电光与控制*, 2011, 18(4): 72-76.
WANG G, LI J F, ZHU R G. Application of an improved arithmetic based on CMAC in electrical load simulator [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(4): 72-76. (in Chinese)
- [14] YANG B, BAO R, HAN H T. Robust hybrid control based on PD and novel CMAC with improved architecture and learning scheme for electric load simulator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(10): 5271-5279.
- [15] 苏刚, 陈增强, 袁著社. 小脑模型关节控制器 (CMAC) 理论及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 269-273.
SU G, CHEN Z Q, YUAN ZH ZH. The theory and application of CMAC [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 269-273.
- [16] LIN C M, PENG Y F. Adaptive CMAC-based supervisory control for uncertain nonlinear systems [J]. *IEEE Tran. On Syst, Man, & Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2004, 34(2): 1248-1260.
- [17] 刘媛, 王卫红. 基于 CMAC 的伺服系统控制研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(3): 515-519.
LIU Y, WANG W H. CMAC controller research for servo system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(3): 515-519. (in Chinese)

导师简介:



周向阳(1971—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 2008 年于西安交通大学获得博士学位, 主要研究方向为机电一体化、稳定平台系统设计与控制、微机电系统。E-mail: xyzhou@buaa.edu.cn



赵蓓蕾(1992—), 女, 湖南汨罗人, 硕士研究生, 2014 年于南昌航空大学获得学士学位, 主要从事航空遥感惯性稳定平台控制系统鲁棒性研究。E-mail: zhaobeilei1992@buaa.edu.cn

作者简介:



岳海潇(1990—), 男, 天津人, 硕士研究生, 2013 年于西北工业大学获得学士学位, 主要从事航空遥感惯性稳定平台高精度控制方法研究。E-mail: victor_yue@buaa.edu.cn



贾媛(1992—), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 2014 年于燕山大学获得学士学位, 主要从事航空遥感惯性稳定平台高精度控制方法研究。E-mail: jiayuan@buaa.edu.cn