

自由摆上目标动态平衡控制系统的设计

徐智辉, 李卫中, 肖永军

(湖北工程学院物理与电子信息工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘 要:摆系统因具有高阶次、不稳定、非线性和强耦合等特性而广泛用于控制理论算法的研究与验证中. 为达到摆上目标的高精度平衡控制, 采用意法半导体有限公司的先进单片机为控制核心, 搭配步进电机及其驱动电路、倾角传感器和显示电路搭建了动态平衡控制系统. 软件上对倾角传感器数据进行平滑滤波, 并采用了智能模糊比例积分控制算法. 最后依靠搭建的实验系统进行了重复测试实验, 并通过图像传感器采集了光斑在视场内的稳定误差曲线. 结果表明, 在摆的周期运动过程中, 摆上激光笔打出的光斑基本稳定在小幅度范围内, 实现了较高精度的平衡控制.

关键词:自由摆; 单片机; 步进电机; 倾角传感器; 平衡控制

中图分类号:TP273.5

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.01.015

0 引 言

摆是一个典型的非线性、高阶次、多变量、强耦合的开环不稳定系统, 许多抽象的控制概念如系统稳定性、可控性、系统收敛速度和系统抗干扰能力等, 都可通过摆系统直观表现, 其也是进行控制理论研究与验证的理想对象^[1-5]. 随着计算机技术的发展和运用, 自动控制理论和技术在宇航、机器人控制、导弹制导及核动力等高新技术领域中的应用也愈来愈深入^[6-8]. 更多理论诸如最优控制、变结构控制、神经网络控制、云模型控制等被应用于摆系统的稳定技术研究^[9-13], 并取得了较好的控制效果. 但这些控制算法中, 均需要受控对象的精确的数学模型, 且算法设计较为复杂, 需要较多的计算开销. 考虑到模糊控制不依赖于数学模型, 而且传统的比例积分 (Proportion Integral, 以下简称: PI) 控制器在实际工业控制中应用广泛, 因此笔者采用模糊控制与传统 PI 控制器相结合的控制方式.

文中尝试以意法半导体有限公司的 STM32F103ZET6 (下文简称为 STM32) 单片机为核心、搭配步进电机及其驱动模块、模数转换 (Analog to Digital Converter, 以下简称: ADC) 模块、数据采集模块等建立了摆的实验控制系统, 通过施加较为实用的模糊 PI 控制算法, 取得了较好的控制效果.

1 自由摆平板控制系统硬件设计

平板控制系统总体结构框图如图 1 所示, 系统采用 STM32 单片机作为控制核心, 工作模式由键盘控制. 安装在摆杆上的单轴加速度传感器测量摆杆相对于竖直方向的夹角信息, 而安装在平板下方的传感器测量平板于水平方向的夹角. 经过 ADC 模块转换后送入下位机, 下位机根据两个角度信息产生脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, 以下简称: PWM) 脉冲驱动电机, 从而实时调整平板状态, 使达到系统功能.

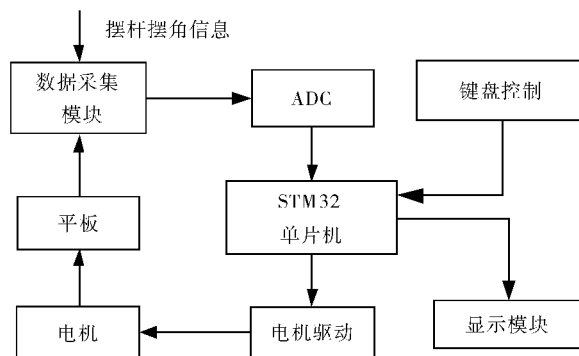


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Diagram block of designed system

现有的系统中, 位置反馈常采用三种方式, 如: 电耦合器件 (Charge-coupled Device, 以下简称: CCD) 或互补性氧化金属半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 以

下简称:CMOS)图像传感器、三轴加速度传感器和单轴倾角传感器。前者能精确检测视场内目标运动,但图像数据采集及处理需要高速处理器(如 TI DSP 6000 系列等)及相应的复杂硬件电路。三轴加速度传感器,内含数字接口、模数转换器,分辨率高加速度测量场合,对加速度的变化非常敏感,适合大多数加速度测量场合应用。本系统中的平板及摆的加速度变化较快,数据测量噪声大。而单轴倾角传感器具有功耗低和精准直流响应特性,且数据采集几乎不受系统运动的影响。考虑到 SCA60C 为单轴加速度传感器,测量范围为 $\pm 1\text{ g}$,其模拟输出电压 $0.5\sim 4.5\text{ V}$,分辨率较高,较为适合单轴数据采集选用。因此系统设计中,采用 SCA60C 作为数据采集传感器。

2 平板控制系统软件算法设计及实现

2.1 角度数据采集滤波

单轴加速度传感器经调零和定标后,为获得采集数据的稳定性,避免因奇异值导致系统控制出现异常,需要对采集值输出前进行滤波平滑处理。而考虑到算法实时性,采用较为常用的平滑中值滤波法。处理过程如下:

a. 考虑到数据采集速度较快,一次取 3 个采样值 x_1, x_2, x_3 ;

b. 考虑到 3 个值采样时间间隔较短,为防止粗大值,对连续的两个采样值进行 $|x_n - x_{n-1}| < 0.2^\circ$ 判断。如果满足该条件,则接受该采样值;否则丢掉该值,并对 x_{n-1}, x_{n-2} 进行简单的插值计算 $x'_n = 2x_{n-1} - x_{n-2}$,利用 x'_n 代替 x_n ;

c. 计算此 3 个值的均值 $x_\mu = (\sum_{i=1}^{14} x_i)/14$ 。

采纳 x_μ 为本次的采样值,对该均值 x_μ 进行输出。

2.2 模糊 PI 控制策略

系统控制中采用模糊 PI 控制算法,根据 k_P 、 k_I 对系统输出特性的影响情况,结合专家经验,可总结出参数的自整定原则^[11,14-15]。

(1)当 $|e|$ 较大时,应取较大的 k_P 值,使 $k_I = 0$ 。

(2)当 $|e|$ 为中等时,为减小超调,应取较小的 k_I 值, k_P 值的大小要适中,以保证系统响应速度。

(3)当 $|e|$ 较小时,为使系统具有较好的稳态性能,应取较大的 k_I 值;为避免在设定值附近振荡,应取较小的 k_P 。

(4)当 $e \times ec > 0$ (两者同号)时,说明误差在向绝对值增大的方向变化。为扭转这一变化趋势,就适当增大 k_P ;同时为防止积分饱和,应适当减小 k_I 的值。

(5)当 $e \times ec < 0$ (两者异号)时,说明误差在向绝对值减小的方向变化。为防止超调,应适当减小 k_P , k_I 的值也适当。

综合考虑以上调整规则,制定参数调整离线规则表,运动控制中进行查表。

2.3 系统工作控制流程

系统主程序流程如图 2 所示,系统上电初始化完毕后,打开中断进行等待。一旦接收到键盘键入信息,立即查询并进入到相应的模式,采集角度信息,滤波处理之后,进行模糊 PI 计算,进而控制步进电机执行相应的控制。如果达到预定目标,则结束,否则返回继续采集角度信息,计算偏差,进行进一步调整。同时将系统工作模式以及相关角位信息通过无线发送模块实时发送给上位机用于语音播报和显示。

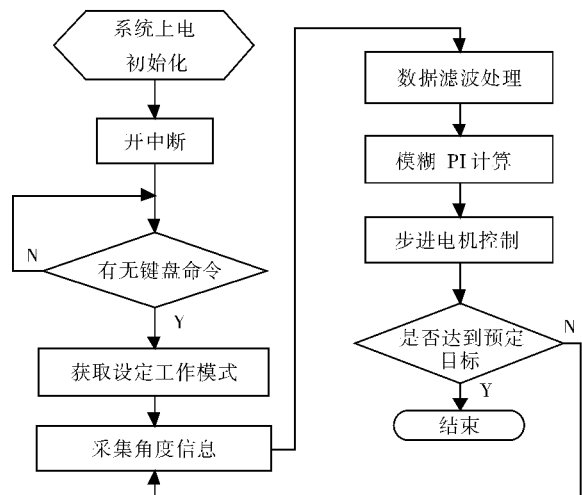


图 2 控制系统工作流程

Fig. 2 Flow chart of the control system

3 实验方案及结果分析

实验测试如图 3 所示,在摆上安装有平板,平板安装在电机轴上,依靠平板安装一激光笔。当激光笔开启时,出射激光打在一侧的白纸上。当摆处于平衡位置时,激光笔出射激光打在 A 点,将摆抬起一定角度,然后释放,在摆的周期运动过程中,需要保持激光笔出射激光始终打在 A 点上。运动过程中,需要实时测量摆相对于平衡位置的摆角 θ ,针对 θ 实时调整平板倾角 φ 。如果要求在运动中始终指向起始位置 A 点,经理论计算,可得:

$$\tan \varphi = \frac{l - \cos \theta}{1.5 \pm l \sin \theta} \quad (l \text{ 为平板和白纸之间的距离})$$

离线计算 θ 与 φ 角的对照表,直接将平板调整到 φ 角。

实验中为测试实时的指向偏差,利用 CCD 在白纸的另一侧进行观测,CCD 相机与白纸的距离

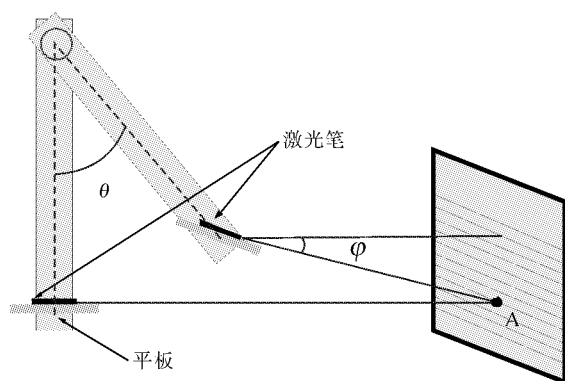


图3 实验测试示意图

Fig. 3 The scheme of experimental setup

为3 m, CCD采用黑白面阵CCD,有效像素为582(H)×512(V)(H表示水平分解力,V表示垂直分解力,下同),像素尺寸为8.25(H) μm×7.03(V) μm,采样频率为25帧/秒,CCD上安装有100 mm焦距镜头,CCD相机放置在平行光管的焦平面上,根据透镜成像原理可知:CCD相机的视场角为48.0 mrad(H)×33.0 mrad(V),每像素的空间角分辨率为82.5 μrad(H)×70.2 μrad(V).则对应于白纸上的观测范围为14.4 cm(H)×9.9 cm(V),其分辨率为0.247 mm(H)×0.193 mm(V).

通过在计算机上安装的视频采集卡实时采集出射激光在白纸上的误差视频,并利用MATLAB软件进行误差分析.实验中,在控制稳定时,对白纸上的光斑进行实时采样,采集2 000帧图像,即80 s的稳定误差数据如图4所示,可见,光斑误差基本控制20 mm之内,换算为相对角度值为1.5'.因此,模糊PI控制算法及传感器数据平滑滤波相结合的控制方式达到了较好的控制效果.

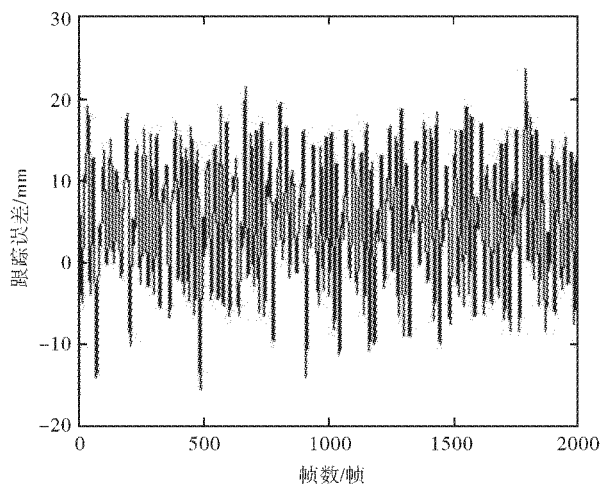


图4 光斑稳定误差曲线

Fig. 4 Experimental data curve of the stabilized error

4 结 语

摆系统因具有高阶次、不稳定、多变量、非线性和强耦合等特性而广泛用于控制理论算法的研究与验证中.笔者尝试以STM32单片机为控制核心,以步进电机及其驱动电路、倾角传感器和显示电路搭建了自由摆的平板控制系统,采用模糊PI控制算法,进行了摆的控制实验,并根据现有条件对实验控制误差数据进行了采集.实验证实,在摆的周期运动过程中,激光笔打出光斑基本稳定在20 mm范围之内,达到了较好的控制效果.

致谢

湖北省教育厅为本工作提供了资金资助,易青松老师为本系统的软件设计提供了大量的帮助,罗雄同学和付新浩同学安装、调试了整个系统的硬件部分,并在系统调试、标定过程中付出了大量的心血,湖北工程学院电子设计小组也参与了本系统的部分设计工作,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 薛彦斌,魏衡华.二轮小车倒立摆系统避障控制研究[J].计算机仿真,2008,25(6):318-321.
- [2] 梁西银,兰建平,董秀娟,等.基于ARM9的自由摆平板控制系统设计[J].微型机与应用,2012,31(8):81-83.
- [3] 周浩敏,钱政.智能传感技术与系统[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [4] 张立迎,王划一.二级倒立摆稳定控制研究[J].控制工程,2009,16(增刊):162-165.
- [5] 胡寿松.自动控制原理:第五版[M].北京:科学出版社,2007.
- [6] 陈占林,吴小所.平板自由摆动态平衡控制系统的设计[J].自动化与仪器仪表,2012(3):179-180.
- [7] 朱秀梅.基于Cortex-M3+ARM的自由摆平衡控制系统的研究[D].南京:东南大学,2010.
- [8] Li Y F, Lau C C. Development of fuzzy algorithms for servo system [J]. IEEE Control System Magazine, 1989, 9(3): 65-72.
- [9] Hu B G, Mann G K L, Gosine R G. New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers [J]. IEEE, Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(5): 521-539.
- [10] Yi Y, Zhang T P, Guo L. Multi-objective PID control for non-Gaussian stochastic distribution system based on two-step intelligent models [J]. Science in

- China Series F: Information Sciences, 2009, 52 (10):1754-1765.
- [11] Zhao Q X, Wang H, Xu H J, et al. Controlling Study of D-STATCOM Based on PSO-PID Algorithm [J]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, 149:343-348.
- [12] Liu Y J, Gu D Y. Fuzzy PID Control Strategy Applied in Boiler Combustion System [J]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, 159: 435-439.
- [13] Wang J J, An D W, Zhang C F. Genetic optimization algorithm of PID decoupling control for VAV air-conditioning system [J]. Transactions of Tianjin University, 2009, 15(4):308-314.
- [14] Zhang R, Song L P, Yang J L, et al. DC Motor Speed Control System Simulation Based on Fuzzy Self-tuning PID [J]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2009, 62: 967-975.
- [15] Oh S K, Roh S B. The Design of Fuzzy Controller by Means of Evolutionary Computing and Neurofuzzy Networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3516: 37-39.

Design and implementation of control system for platform on free pendulum

XU Zhi-hui, LI Wei-zhong, XIAO Yong-jun

(School of physics and electronic information engineering, HuBei Engineering University, Xiaogan 432000, China)

Abstract: Pendulum system is widely applied in the research and validation of the control theory algorithm for its higher-order, unstable, nonlinear and strong coupling characteristics. In order to achieve high precision balance controlling for targets, dynamic balance control system was built with the control core of the single-chip microcomputer STM32F103ZET6, stepping motor and its drive circuit, Angle sensor and display circuit. Through smoothing filtering of the angle sensor data and application of the intelligent fuzzy proportion-integral control algorithm, dynamic balance control function was achieved. At last, the experimental is done based on designed system and stabilized error of the laser spot was collected through the image sensors. The results show that in the pendulum of periodic motion process, the spot outputted from the laser pen is maintained within a small range, realizing a high precision balance control.

Key words: free pendulum; microcomputer; step motor; angle sensor; balance controlling

本文编辑: 苗 变