

文章编号: 1004-4213(2011)09-1346-5

# 基于数字信号处理技术的连续变焦镜头控制系统设计

李零印<sup>1,2</sup>, 王一凡<sup>1</sup>, 薛育<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 针对以往连续变焦镜头控制系统存在的速度响应慢、准确度低等缺点, 对连续变焦镜头及其控制系统的设计方法进行改进. 采用机械补偿的变焦距镜头理论, 确定变焦距系统位移曲线. 基于数字信号处理技术和步进电机的控制技术, 设计了包括数字信号处理器、步进电机、步进电机驱动器、键盘控制、计算机通信、液晶显示模块为一体的控制系统, 同时对变焦距系统增加了自锁模块, 提高了控制系统的安全性与可靠性. 初步实验结果表明, 控制系统准确度在 0.01 mm 以内, 满足 0.12 mm 的设计指标.

**关键词:** 变焦镜头; 机械补偿; 自锁; 数字信号处理器; 集成度

中图分类号: TM359.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1346

## 0 引言

变焦距光学系统是一种焦距可以连续变化而像面保持稳定的光学系统, 广泛应用于精密光机电一体化设备的头部<sup>[1]</sup>. 为了快速得到稳定、清晰的图像数据, 就必须对光学系统进行连续变焦. 变焦距镜头控制系统的稳定性、可靠性、精确性与设备本身的性能息息相关, 国内外都在设计与研究控制灵活、准确度高、通用能力强的变焦距控制系统<sup>[2]</sup>. 新型电动变焦镜头已经在高精尖产品中崭露头角, 其原理与传统变焦镜头没有本质差别, 但其设计思想, 首先减少中间机械传动数量, 采用光机电一体化技术, 电机直传技术等综合方法, 基于数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP) 的控制系统和高准确度直线导轨的使用, 都促进变焦镜头向着体积小、传动精密、结构简单方向发展<sup>[3-4]</sup>. 目前的电动变焦镜头多采用单片机作为数据处理, 存储空间有限, 数据处理能力较弱, 无法实现多级共享、多通道控制的通信需求与控制系统准确度保证, 需要对控制系统性能升级.

本文主要介绍基于 TI 公司数字信号处理器 TMS320F2812 为核心的控制单元, 设计电动变焦镜头及其控制系统, 扩展了控制系统的通用性和接口能力, 大大提高了变焦距系统控制准确度.

## 1 变焦系统工作原理

传统的变焦补偿方式有光学补偿和机械补偿两种. 参照光学设计部分, 采用机械式补偿方式, 就是由精密机械驱动变倍组做移动, 补偿组做相对少量的非线性运动, 通过变倍组与补偿组的相对运动, 来控制变焦距系统的焦距变化<sup>[5]</sup>. 机械补偿的光学系统模型如图 1. “前固定组 I”和“后固定组 IV”位置保持不变, 由调焦机构驱动“变倍组 II”做线性移动, “补偿组 III”做相对少量的非线性运动, “变倍组”与“补偿组”的相互运动, 从而达到变焦目的而不改变成像平面位置.

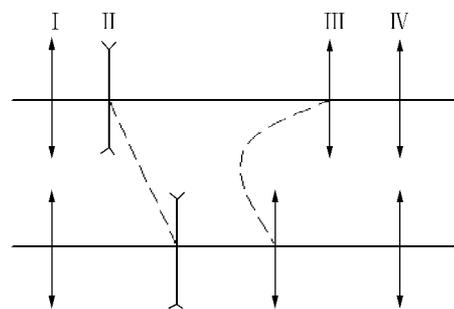


图 1 机械补偿光学系统图

Fig. 1 Optical model of mechanical compensation

由变焦距光学系统理论公式知, 变倍组与补偿组必须满足式(1)和(2)<sup>[6]</sup>

$$L_1 = \beta_2 + \beta_3 + (\beta_2 \cdot \beta_3 \cdot f / \beta_1) \quad (1)$$

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2008AA0049) 资助

第一作者: 李零印 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变焦距系统研究. Email: lilinyin\_02@163.com

导师 (通讯作者): 王一凡 (1958-), 男, 研究员, 主要研究方向为光机电系统设计. Email: wangyifan1958@163.com

收稿日期: 2011-01-01; 修回日期: 2011-04-01

$$L_2 = \beta_1 + \beta_2 + (\beta_1 \cdot \beta_2 / \beta_3 \cdot f) \tag{2}$$

式中:  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  为各个光组的焦距;  $f$  光学系统焦距;  $L_1$  变倍组与补偿组的距离;  $L_2$  补偿组与固定组的距离。

系统在进行焦距调整时,通过变倍组与补偿组的相对位移运动,用以实现连续变焦。由光学设计数据带入式(1)和(2),得到变焦距系统变倍组与补偿组位移数据,变倍组和补偿组的位移曲线如图 2。只要严格保证变倍组与补偿组按照曲线所对应位移变化,就可以达到按预期目的变焦。

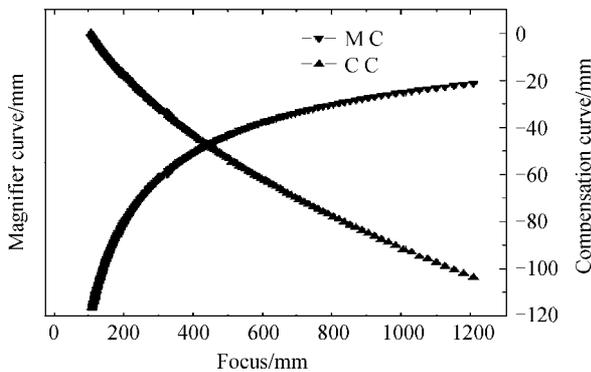


图 2 变倍组与补偿组位移曲线  
Fig. 2 Magnifier and compensation displacement curve

## 2 变焦系统控制系统设计

变焦镜头是以各种电机作为执行元件的动力源来改变镜头的焦距与光亮等光学指标。对于变焦镜头的连续焦距变化,只需要准确控制执行机构位移,就会为成像系统提供焦距连续变化的图像源,因此,合理选择电控芯片与执行机构是镜头控制系统设计的关键。

TMS320F2812 是世界上主流的高性能运动控制芯片,内部集成众多资源:存储资源 Flash、RAM;通信接口 SCI、SPI、eCAN 总线接口;事件管理器、定时器、看门狗以及大量的 GPIO 供开发使用。

步进电机作为执行元件,是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。它的旋转是以固定的角度一步一步运行的,可以通过控制脉冲频率来控制电机转速和加速度,从而达到调速的目的。利用步进电机具有可靠性高、定位保持力矩等特点,广泛应用于各种开环控制<sup>[7]</sup>,控制系统指标如表 1。

表 1 控制系统参量

Table 1 Parameters of the control system

Adjusting time	Less than 1 s
Displacement accuracy	Better than 0.12 mm
Driving subdivision	200 subdivision
Displacement limited	Mechanical, electric
Control mode	Keyboard, remote control

### 2.1 控制方案设计

传统的变焦镜头中,以伺服电机作为动力元件,齿轮组作为传动机部件,凸轮做执行元件,凭借两条凸轮曲线来实现位移控制。由于凸轮曲线的加工准确度要求高,且磨损后不易修复等特点,在控制准确度上有一定限制。同时,随着步进电机控制技术的发展,基于步进电机和 DSP 为一体的光机电产品,在一些控制领域中已经开始使用<sup>[8-9]</sup>,也就使得其实现成为可能。本文参考国内外步进电机控制技术以及步进电机控制系统相关知识,设计连续变焦距镜头的控制系统和控制系统的相应的模块。

TMS320F2812 是一款专门用作控制的多功能芯片,波特率 150 M,整合存储资源、通信接口、ADC 模块、事件管理器、定时器以及看门狗为用户使用,图 3 为以 DSP 为控制核心的控制系统控制方案设计。

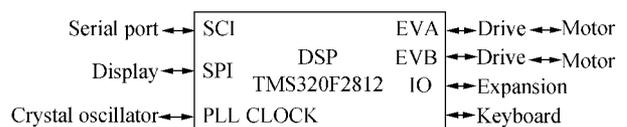


图 3 DSP 控制系统图  
Fig. 3 DSP control system

TMS320F2812 为核心的控制系统,通过 SCI 接口与计算机通信,用于实现远程操控;键盘控制作为人工调节变倍组与补偿组的位移与调试时使用;显示部件用来显示变倍组与补偿组的实时监控位移;晶振模块提供控制系统时钟频率;EVA、EVB 模块通过驱动器的放大功能来驱动步进电机移动,从而带动变倍组与补偿组做相应运动。

### 2.2 软件设计

直线步进电机控制系统的软件由主程序、通信程序、正向运行子程序、反向运行子程序、键处理程序、显示程序、通信程序等组成。主程序主要完成芯片与各变量的初始化、中断处理及控制量输出等工作,程序流程图如图 4。

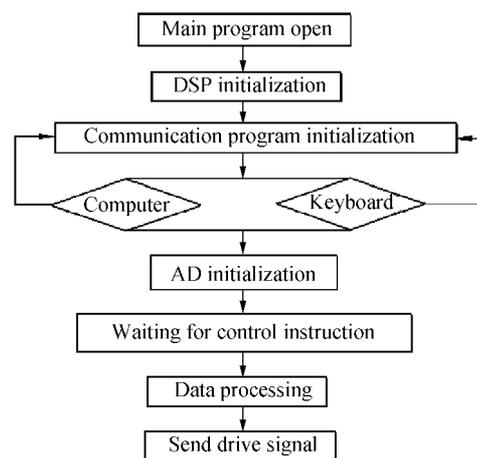


图 4 控制系统程序流程图  
Fig. 4 Flow chart of control system process

系统上电后扫描控制信号,当通信接口或者控制键盘有效输入时,程序向下继续执行,否则,继续执行扫描程序.驱动系统:主要功能是接收控制系统的控制信号,采用斩波恒流驱动方式和细分驱动的方式,输出功率信号给步进电机.

### 2.3 自锁模块设计

为了实现高准确度的位移定位与调整,本文采用步进电机带动滚珠螺杆传动方式,由于滚珠螺杆难以闭锁的问题,在传动系统中使用上电自锁开关,通过控制 DB9 口的 2、3 引脚的高低电位来锁定电机台(见图 5).

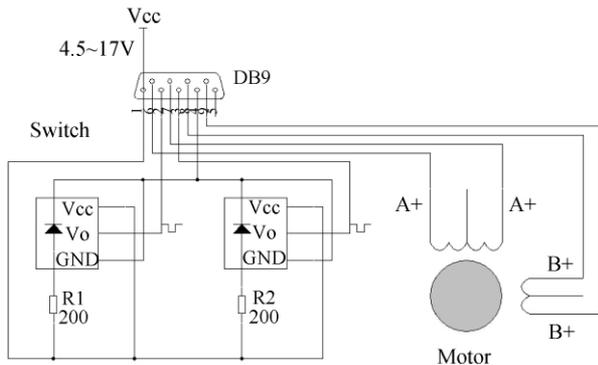


图 5 自锁模块设计

Fig. 5 The design of self-locking blocks

### 2.4 脉宽调制波形调制

脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)信号是一种脉宽可变的脉冲信号,通过改变占空比<sup>[10-12]</sup>来控制 PWM 波形.改变占空比有两种调制方法:一种是开关周期恒定,通过改变导通脉冲宽度来改变占空比的方式(即 PWM);另一种方式通过改变开关频率( $f=1/T$ )来改变占空比.目前,直流电动机的控制中,以应用 PWM 控制方式为主.通过设定 TMS320F2812 管理器的计数器寄存器、比较寄存器、周期寄存器、控制寄存器来控制 PWM 波形,控制信号时序图如图 6.

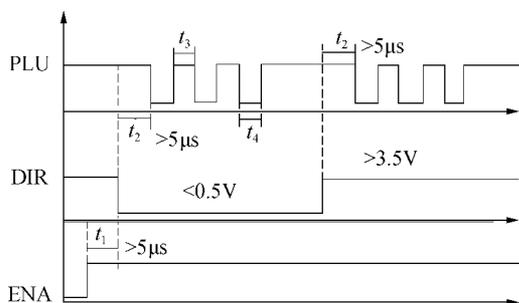


图 6 控制信号时序图

Fig. 6 Sequence diagram of the control signal

$t_1$ :使能信号(ENA)应提前方向信号(DIR)至少  $5 \mu\text{s}$  确定为高; $t_2$ :方向信号应至少提前脉冲信号(PLU)下降沿  $5 \mu\text{s}$  确定其状态高或低; $t_3$ :脉冲宽度至少不小于  $1.5 \mu\text{s}$ ; $t_4$ :低电平宽度不小于  $1.5 \mu\text{s}$ .

### 2.5 步进电机控制系统设计

1)步进电机位移控制:导程  $4 \text{ mm}$ ,步距角  $0.9^\circ$ ,转动一周需要 400 个步进脉冲,可以实现脉冲当量  $D=4/400=0.01 \text{ mm}$ 的精确定位,分辨率  $0.32 \mu\text{m}$ ,可以达到  $0.4 \mu\text{m}$ 的控制准确度.

2)定位与换向控制:对运动行程固定的定位换向,通过准确地控制当量脉冲数,当达到预定值时,用软件改变步进电机的通电顺序实现换向;对定位位置不确定的换向,采用行程开关根据检测到的位置信号确定换向.

3)步进电机速度控制:为了防止突然加减速,引起加速度或者跃度过大,引起震动冲击,导致定位不准确,采用正弦速度曲线,使得整个系统运行平稳.

4)细分驱动的实现:凭借步进电机驱动器 M542 自带细分控制,实现当量脉冲的 200 细分,在理论上可以达到  $0.05 \mu\text{m}$ ,由于步进电机分辨率为  $0.32 \mu\text{m}$ ,因此 200 细分后步进电机的理论精确控制准确度为  $0.4 \mu\text{m}$ .

### 2.6 微调焦系统设计

由于外界环境变化,例如温度、湿度、大气密度的变化都会导致像面离焦,引起成像系统像面模糊,因此必须在 CCD 接收像面设计微位移机构.通过自适应算法,将图像的平均灰度值与峰值相结合,与设定的门限值进行比较,根据差值的大小和正负驱动微调电机<sup>[13]</sup>,调整 CCD 的前后移动,调焦量为  $\pm 5 \text{ mm}$ .在调焦结构设计中本文设计了精密移动导轨(图 7),保证在调焦范围内误差不大于一个像元数.



图 7 CCD 调焦系统

Fig. 7 CCD focusing system

### 2.7 其它模块设计

1)串口通信设计:串口通信是一个采用双线的异步串行通信接口,支持 16 级的接收发送 FIFO,降低 CPU 的使用资源,支持与其它设备间的数字通信,在不使用 FIFO 的情况系,可以设置成独立操作或同时进行的全双工通信模式.

2)控制键盘设计:采用标准的  $4 \times 4$  矩阵键盘,分别定义开关、复位、锁定系统、解锁系统、长焦标准位置、中焦标准位置、短焦标准位置、快速焦距放大、

快速焦距缩小、焦距放大、焦距缩小、变倍组微调、补偿组等控制按钮。

3) 显示模块设计: 液晶显示模块与 DSP 的 GPIO 口相连接, 通过定义 GPIO 来控制液晶模块, 可以切换显示变倍组与补偿组的位移显示。

### 3 实验平台测试

主控计算机硬件仍使用原有设备, 在原有串口

通信基础上增加通信数据内容, 发送对变焦系统的控制命令, 通过修改主控软件, 实现与新增加的两台图像处理计算机之间的网络通信(串口通信频率为 150 Hz, 标准 RS-232 接口, 网络通信频率为 150 Hz)。选用雷赛公司的 M542V2.0 步进电机驱动器(选择 1.5A 驱动电流), 北光公司的 MTS110 精密型电控平移台, 闻亭 TMS2812EVMB 开发板作实验元件, 现场测试数据如表 2。

表 2 控制系统测试对比

Table 2 The data experiment contrast of control system

Focal length/mm	Mgnifier curve/mm	Compensation curve/mm	Actual displacement of magnifier/mm	Actual displacement of compensation/mm
150.46	34.897 2	-8.8756	34.90	-8.87
200.32	59.823 7	-17.4309	59.82	-17.43
250.98	76.916 2	-24.960 4	76.91	-24.96
299.98	89.023 4	-31.444 2	89.02	-31.44
352.46	98.994 0	-37.747 1	99.00	-37.75
399.23	106.115 9	-42.927 0	106.11	-42.92
450.13	112.525 6	-48.185 6	112.52	-48.18
497.07	117.210 9	-52.743 6	117.21	-52.74
552.10	122.496 2	-57.787 1	122.49	-57.79
597.46	126.057 1	-61.734 6	126.06	-61.73
648.91	129.618 1	-66.013 1	129.61	-66.01
746.95	135.315 6	-73.666 8	135.31	-73.66
853.17	140.300 9	-81.347 9	140.30	-81.35
944.30	143.861 8	-87.525 6	143.86	-87.52
1 051.63	147.422 8	-94.856 3	147.42	-94.85
1 151.95	150.271 5	-100.464	150.27	-100.46

从表 2 可以看出, 控制系统实验准确度在 0.01 mm 以内。由于变焦距系统准确度由机械环节与控制环节共同决定, 直线导轨的自身误差以及步进电机的丢步导致滚珠丝杠的旋转不准确引起的误差, 因此可以通过对机械系统与控制系统的进一步联合开发, 提高控制系统准确度。

### 4 结论

本文参考国内 DSP 为核心的步进电机控制系统, 结合变焦距镜头光学理论, 设计一种新型变焦距控制系统。经调试运行, 控制系统可稳定运行并达到 0.01 mm 控制准确度。基于 DSP 的控制系统与高精度导轨的使用能够促进变焦镜头向着体积小、传动精密、结构简单和响应速度快发展; 基于 DSP 的连续变焦距镜头控制系统可以很方便地通过 SCI 接口与上位机进行通信; DSP 形成的 PWM 信号基频可控, 脉冲宽度可以通过设定比较单元的控制字标定; 系统具有记忆功能, 可以在任意位置启动和停止且操作简单灵活。

由于电机的理论精确控制准确度为 0.4  $\mu\text{m}$ , 可以通过提高其他环节准确度方法进一步提高控制系

统准确度, 实验平台测试数据, 充分验证了设计方案的可行性和可靠性, 为新一代数字变焦镜头设计提供了参考。

#### 参考文献

- [1] WANG Yi-fan, XUE Yu. Design of heavy caliber and precision cam-varifocal mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **215**(11): 1756-1759.  
王一凡, 薛育. 一种大口径高精度凸轮变焦机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **215**(11): 1756-1759.
- [2] XING Hui, WANG Hong, WANG Chan-juan. Design of zoom lens control system base on TMS320LF2407A[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2006, **25**(7): 7-14.  
刑辉, 杨洪, 王婵娟. 基于 TMS320LF2407A 的连续变焦镜头控制系统[J]. *国外电子测量技术*, 2006, **25**(7): 7-14.
- [3] LIN Wei-cai, WANG Jing. A design of new focal system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2007, **30**(4): 46-48.  
林为才, 王晶. 一种新型调焦机构的设计[J]. *长春理工大学学报*, 2007, **30**(4): 46-48.
- [4] AN Yuan, QI Ying-chun. Design of straight-line focusing mechanism for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 609-614.  
安源, 齐迎春. 空间相机直线调焦机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 609-614.
- [5] SHI Guang-hui. Optical compensated step zoom lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(6): 1-3.  
史光辉. 光学补偿式步进变焦距物镜[J]. *光电工程*, 2009, **36**

- (6): 1-3.
- [6] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797-1799.  
田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1797-1799.
- [7] WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, XIE Tao, *et al.* Develop of high integration driving module for scanning mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 2997-3000.  
汪逸群, 颜昌翔, 谢涛, 等. 高集成度新型摆镜驱动模块的研制[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 2997-3000.
- [8] SONG Pei, DU Juan, SONG Shi-fang. Design of new open motion controller based on DSP[J]. *EMCA*, 2009, **30**(4): 23-25.  
宋蓓, 杜娟, 宋世芳. 基于 DSP 的开放式运动控制器的设计[J]. *电机与控制应用*, 2009, **30**(4): 23-25.
- [9] ZHAO Li-xia, LIU Wen-ju, SUN Jing. Control system of stepper motor based on MS320LF2407 and L6208[J]. *Electric Drive Automation*, 2009, **31**(1): 32-34.  
赵丽霞, 刘问菊, 孙静静. 基于 MS320LF2407A 和 L6208 的步进电机控制系统[J]. *电气传动自动化*, 2009, **31**(1): 32-34.
- [10] ZHAO Fu-qiang, LIU Yong-qiang, LIN Wei-bin. Application of software synchronous sampling in electric power measurement[J]. *Control & Automation*, 2007, **23**(7-2): 141-143.  
赵富强, 刘永强, 林伟斌. 基于 DSP 的任意波形 PWM 调制技术[J]. *微计算机信息*, 2007, **23**(7-2): 141-143.
- [11] WANG Da-chun, DAI Zuo-xiao, HUA Jian-wen. Design of multi-channel 4-phase step-motors controller [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, **8**(8): 1994-1997.  
万达淳, 代作晓, 华建文. 基于 DSP 的多路四相步进电机控制器的设计与实现[J]. *科学技术与工程*, 2008, **8**(8): 1994-1997.
- [12] CHENG Bin, JI Yun-fei, YANG Fan. Design and implement of laser range finder system based on TMS320F2812 [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(7): 739-741.  
陈斌, 季云飞, 杨帆. 基于 TMS320F2812 的测距机电路系统的设计与实现[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(7): 739-741.
- [13] ZHANG Xin-jie, YAN Chang-xiang, XIE Tao. Design of focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2757-2761.  
张新杰, 颜昌翔, 谢涛. 星载光学遥感调焦机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2757-2761.

## Design of Zoom Lens System Based on Digital Signal Processing

LI Ling-yin<sup>1,2</sup>, WANG Yi-fan<sup>1</sup>, XUE Yu<sup>1</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Aiming at slow response speed and low accuracy of traditional continuous zoom lens control system, the design method of continuous zoom lens and its control system was improved. Magnifier compensation displacement curve was found using mechanical compensation theory. Based on control techniques of digital signal processing (DSP) and stepping motor, a control system was designed including DSP, stepping motor, stepping motor driver, keyboard control, computer communication and LCD block. Meanwhile self-locking blocks were added to promote safety and reliability of the control system. The experimental results show that the control system accuracy is within 0.01 mm and achieves the technical requirement of 0.12 mm.

**Key words:** Zoom lens; Mechanical compensation; Self-locking; Digital Signal Processing (DSP); Integration