

靶场光学测量中的变焦距光学系统

李零印^{1,2}, 王一凡¹, 王 骥³

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

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130031)

摘要: 变焦距光学系统通过调整光学系统参数, 改变光学系统的焦距来保证光学系统动态成像的需求。本文从变焦距光学系统的基本原理出发, 简单描述了光学补偿与机械补偿变焦距光学系统的设计, 阐述了常见变焦距光学系统的类型与结构。指出了传统变焦距光学系统存在的问题, 结合 DSP 和步进电机在变焦距光学系统中的最新应用, 概述了靶场光测设备的变焦距光学系统的最新动态, 分析了电机直传技术在靶场光测设备应用的可行性, 意在为新一代数字变焦距光学系统提供理论参考。

关键词: 变焦距光学系统; 靶场; DSP; 步进电机

中图分类号: TB851; TH745 **文献标识码:** A

Varifocal optical system to optical measurement of shooting range

LI Ling-yin^{1,2}, WANG Yi-fan¹, WANG Ji³

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;*

3. *Changchun UP Optotech Co., Ltd., Changchun 130033, China*)

Abstract: Varifocal optical system can meet the requirements of dynamic optical systems by changing optical parameters of optical components to adjust optical paths. This paper firstly introduces the fundamentals of varifocal optical system, and describes the design of the varifocal optical systems based on optical compensation and mechanical compensation. Then, it elaborates the type and structures of common focusing mechanisms and analyzes their advantages and disadvantages. It points out that along with the DSP control technology and stepping motor development, the varifocal optical mechanism has entered a new prospect. By making a reference to domestic and international engineering applications, the research shows that the numerical control technology based on stepping motors and DSP has an extensive forecast on varifocal optical mechanisms in the range equipment.

Key words: varifocal optical system; range; DSP; stepping motor

1 引言

靶场光测设备主要用于弹道和航天设备运行轨迹的实时跟踪与测量,记录其有效的图像及跟踪数据。随着我国国防与航天技术的飞速发展,靶场光测设备的发展^[1]也在稳步地向前迈进。靶场光测设备是以光学成像理论为基础,综合运用了光学、精密机械、控制理论、图像处理等技术的现代化测量设备。靶场光学测量对象多为动态目标^[2],其运动速度快、运动距离也较长、成像设备的调焦系统很难全程捕获其清晰的图像。另外,设备工作环境的改变(温度、压力)对光学成像系统的成像质量也有影响,极易造成像点离散,从而降低目标和背景的对比度,影响设备作用距离,使靶场光测设备无法发挥其效能。为了快速得到稳定、清晰的成像数据^[3],使靶场光测设备发挥其优良性能,光学系统焦距必须实时调整。目前,国内外相关学者都在致力于设计与研究体积小、控制灵活、精度高的变焦距光学系统^[4]。

本文介绍了变距光学系统的变焦光学,分析了光学补偿与机械补偿式光学系统设计的要点,讨论了手动调焦,干涉自动调焦,智能化聚焦适用的精度和场合,最后,对传统的螺纹传动、涡轮蜗杆传动以及凸轮传动进行分析,构思了新型变焦距光学系统变焦形式。

2 变焦距光学系统的变焦原理

变焦距光学系统的基本原理是利用系光学统中两个或两个以上的透镜组的移动,改变系统的组合焦距,同时保持像面不变,使系统在变焦过程中获得连续清晰的像。

变焦光学系统结构如图1所示,系统由前组物镜、变倍组、补偿组、调光组、后固定组和 CCD 成像器件组成。变倍组与补偿组通过调焦机构控制进行协调运动,以保证像面位置不变,从而保证 CCD 能够接收清晰图像^[5]。

由光学成像理论可知:

$$f_3' \left(\frac{1}{\beta_3^*} + \beta_3^* - \frac{1}{\beta_3} - \beta_3 \right) + f_2' \left(\frac{1}{\beta_2^*} + \beta_2^* - \frac{1}{\beta_2} - \beta_2 \right) = 0, \quad (1)$$

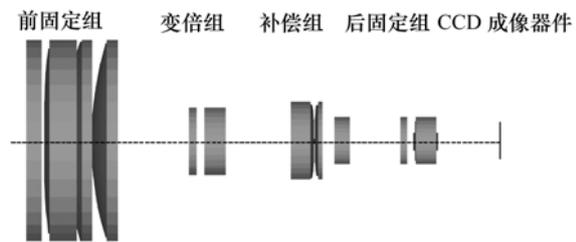


图1 变焦距光学系统结构

Fig. 1 Frame of varifocal optical system

可简化为:

$$\beta_3^{*2} - b\beta_3^* + 1 = 0, \quad (2)$$

其中:

$$b = \frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{\beta_2^*} + \beta_2^* - \frac{1}{\beta_2} - \beta_2 \right) + \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right). \quad (3)$$

由高斯光学成像公式得:

$$\beta_2 = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{s12}}, \quad (4)$$

$$\beta_3 = \frac{f_3'}{f_2' + f_3'(1 - \beta_2) - d_{s23}}, \quad (5)$$

式中, f_1' , f_2' , f_3' 分别为前固定组、变倍组、补偿组的焦距; β_1 , β_2 , β_3 分别为初始位置前固定组、变倍组、补偿组的垂轴放大率; β_2^* , β_3^* 分别为调整后光学系统变倍组与补偿组的垂轴放大率; d_{s12} 为短焦时前固定组与变倍组之间的距离; d_{s23} 为短焦时变倍组与补偿组之间的距离。

通过确定光学系统各个常数,可解出变倍组与补偿组各自的运动曲线,从而指导变焦系统的机械与控制单元设计。

3 变焦距光学系统的设计方法

变焦光学系统的光学设计是个比较复杂的设计过程,本文主要对光学补偿式和机械补偿式变焦光学系统设计的特点进行简要分析。

3.1 光学补偿

光学补偿调焦系统出现于20世纪50年代,其原理^[9]如图2所示,前后镜头组固定,“联动镜头组 I 与 III”同时做线性补偿运动,“中固定组 II”保持位置不变,从而改变焦距和完成焦点补偿。现代变焦镜头的光学结构比较复杂,一个典

型的变焦镜头,一般都是由15片以上(分为若干组)透镜组成。这样复杂的镜头组,在组装上比简单镜头产生差错的可能性要大得多。同时变焦镜头内部存在着为数甚多的空气间隙和镜片接触面,因而非常容易产生料想不到的光晕,但这种弊病随着50年代光学镀膜技术的发展而有所改善。

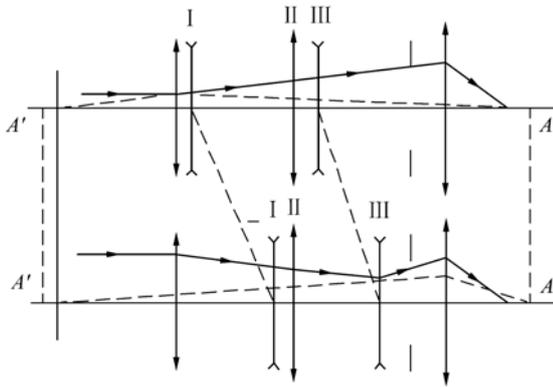


图2 光学补偿原理

Fig. 2 Principle of optical compensation

3.2 机械补偿

机械补偿调焦系统,由德国光学家赫尔穆特于1932年首次提出,但由于当时机械加工水平的限制而发展缓慢。60年代后期,伴随着工业技术的发展,机械补偿逐步登上变焦距调焦舞台,机械补偿系统如图3所示。“前固定组I”和“后固定组IV”位置保持不变,由调焦机构结构驱动“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”的相互运动完成

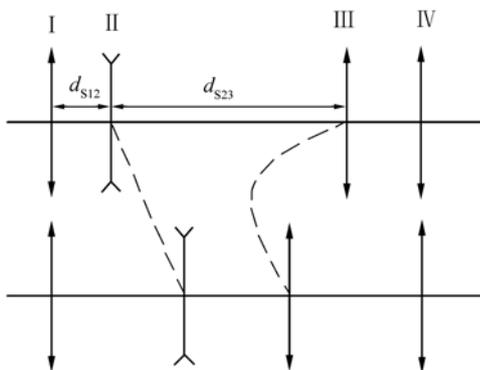


图3 机械补偿原理

Fig. 3 Principle of mechanical compensation

变焦,而成像平面不改变位置。与光学补偿相比,变倍补偿适用于大孔径、长焦距变焦距光学系统^[7,8]。

变焦距光学系统设计在理论上可以保证像面稳定,但是在靶场实际应用过程中,由于变焦距轨迹的实现靠机械与控制部分来完成,而机械和控制部分不可避免地存在误差,同时,由于外部环境的(例如温度,湿度)变化也会造成光学系统焦距的变化。根据实际靶场光测设备光学系统的不同形式^[9](折射式、反射式和折反式)可以采取3种调焦方法:焦面调焦、透镜调焦和反射镜调焦^[10]。焦面调焦,成像面与接收面不重合,因此调整接收平面的位置,使之与成像面重合,但在靶场光测设备中,由于机构运动精度和结构尺寸的限制增加了焦面调焦的难度,所以焦面调焦主要用于简单的光学成像系统;透镜调焦,就是在含有透镜的光学系统通过调整透镜的位置来改变透镜间的距离,调整光学系统内在参数,从而实现调焦;反射镜调焦,适用于反射式系统中。结合上述3种调焦机构与靶场光测设备的使用现状,透镜调焦^[11]用途最广。

4 变焦距光学系统的调焦形式

由于靶场光学设备种类繁多,在变焦距系统应用领域中涉及的调焦方式与需要的调焦精度相关,因此在靶场光测设备中产生了基于变焦距基本理论的各种调焦系统^[12]。

4.1 手动调焦系统

手动调焦是指采用人工补偿方式调整成像面与接受面之间的距离(属于焦面调焦的一种),使二者距离尽量重合或者使二者差距在允许控制范围内。这种调焦方式调焦精度低,且调焦精度受操作人员影响,用于精度等级不高的靶场变焦距光学系统,如在单杆瞄准系统中。

4.2 激光干涉自动调焦系统

自动调焦技术已经进入了数字图像处理时代,运用计算机硬件技术和图像处理技术,可对采集的图像进行边缘检测。

激光干涉自动调焦系统(如图4所示)采用分束器 BS_1, BS_2 以及激光扩束镜和准直镜 L_3, L_4

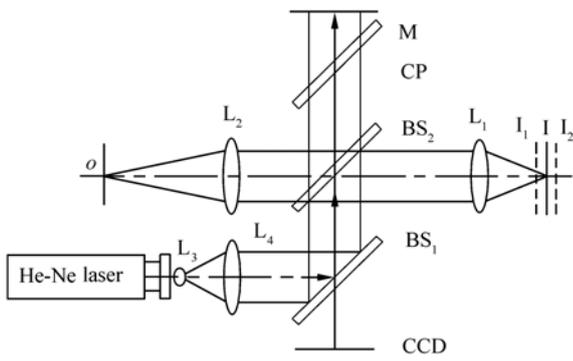


图4 激光干涉自动调焦原理

Fig. 4 Theory of auto-focusing on laser interference

等光学元件组成的干涉系统。He-Ne 激光器为光源, CCD 为接收器件, 调焦时, 激光束经 L_3, L_4 扩束准直, 经过 BS_1 反射后偏转 90° 传播, 在 BS_2 处分为两光束, 一束经 BS_2 和 CP 通过 M 反射后沿原光路返回再经过 BS_1 后入射到 CCD 面上, 成为参考光 E_1 ; 另一束经 BS_2 反射, 偏转 90° 传播, 被

L_1 聚焦呈现在该透镜的焦面上, 该像点可视为光点, 经位于焦面附近或焦面上的像面反射, 成为 L_1 再次成像的物点, 由它发射的光束沿原光路返回作为物光 E_2 , 参考光 E_1 与物光 E_2 相干, 在 CCD 上产生干涉环, 根据干涉图的变化对主光路的调焦状态进行反馈。这种方法在原有的光学系统上, 增加了一套激光干涉光路, 在一定程度上增加了系统的复杂程度。

4.3 智能化自动聚焦系统

智能化自动聚焦系统^[13], 作为现在靶场光学测量中的变焦距调焦系统的主要调焦方法之一, 其原理如图 5 所示, 该方法通过对 CCD 输出的预视频信号的分析, 设定理论比较值。聚焦开始时, 检测视频信号阈值, 与理论设定值相比较, 如果大于误差范围, 自动向某一方向移动, 而不考虑聚焦结果的好坏。运动结束后比较两次的聚焦效果, 如果调焦效果优化, 则继续向同相移动, 否则, 反向移动, 直到找到最佳聚焦点位置, 保持调焦的动态平衡。

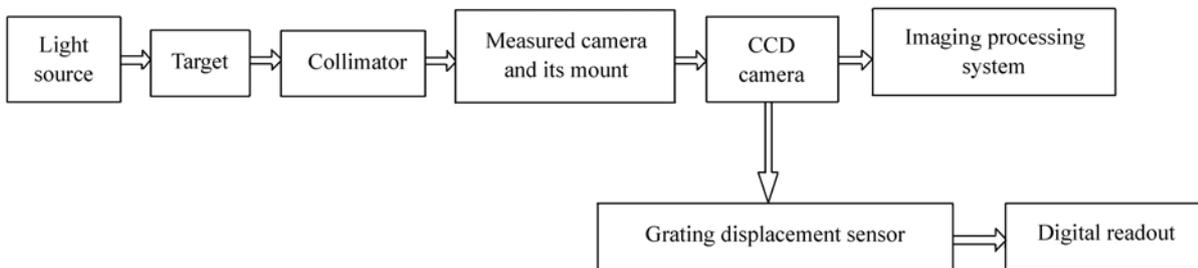


图5 智能化聚焦系统

Fig. 5 System of auto-focusing

5 传统变焦距光学系统中存在的问题

近几十年来, 国内调焦技术在稳步地向前发展, 靶场设备对调焦系统的性能要求也随之提高。在传统的变焦距光学系统中, 调焦机构的实现形式大多凭借螺纹、涡轮、蜗杆、丝杠螺母、或者凸轮作为执行机构(如图 6 所示), 控制部分大多采用单片机作为控制元件, 其特点如下:

(1) 螺纹传动式调焦机构 结构简单, 但对

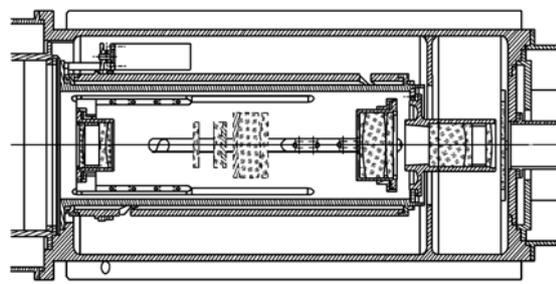


图6 凸轮调焦系统结构图

Fig. 6 Cam focus mechanism structure

机械装配质量要求高,需要对调焦轮与调焦筒进行精确研磨^[14],以达到最佳传动效果。

(2) 涡轮、蜗杆传动调焦方式 大传动比,适合于微调焦机构,而且具有自锁性,但体积大,机械惯性对精度影响很大。

(3) 丝杠螺母调焦方式 结构简单、体积小、重量轻、成本低,但结构装配繁琐,装配精度要求过高,且在恶劣环境下容易发生卡滞现象,抗震动、冲击能力差。

(4) 凸轮传动调焦方式 结构装配工艺简单,工作可靠,经过防冷焊处理后不会产生冷焊、卡滞现象,但对凸轮曲线的加工精度要求高,磨损后无法补偿,可修复性差。

传统调焦机构需要经过驱动元件、传动元件、执行元件3部分,由于传动部分为各种机械结构,从而使得传动过程中不可避免地产生传动误差,降低了调焦系统的精度^[15]。同时单片机作为核心控制单元,数据处理能力弱,控制系统通讯能力和接口性能差。

6 光测变焦距光学系统最新动态

随着控制电机技术的发展及控制技术的成

熟,基于直线电机^[16]、步进电机为直接驱动源的调焦机构已经有了初步发展。因此,参考国内外最新靶场光测设备,新型电动调焦机构已经在高精尖产品中崭露头角,在设计调焦机构时,可以直接采用驱动元件、执行元件的结构设计。基于DSP的控制系统与高精度导轨的使用,促进了调焦机构向着体积小、传动精密、结构简单和响应速度快的方向发展^[17]。

步进电机的调焦机构^[18,19]在一些光测设备中已经开始使用^[20~22]。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,当步进驱动器接收到一个脉冲信号,它就会驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度,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点击转速和加速度,从而达到调速的目的。利用其没有积累误差的特点,广泛应用于各种开环控制,图7为基于DSP步进电机的数字调焦系统框图^[23~25]。与此同时,DSP为核心的控制单元,有更快的数据处理能力和信息转换功能,能够通过其接口技术,与多台计算机同时通讯,实现远程控制的集成化,使得整个光学、机械、控制、计算机、系统整合在一起,符合光机电一体化发展的新动向。

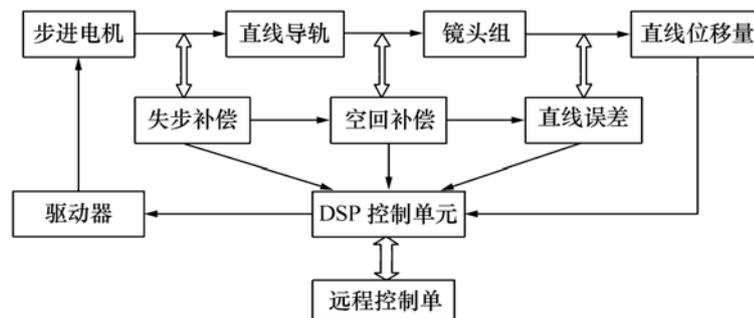


图7 基于DSP的调焦控制系统流程

Fig.7 Process of focusing mechanism based on DSP

7 结束语

靶场光学测量中的变焦距光学系统是一个光、机、电的综合系统。本文着眼于靶场光测设备的实际应用,对变焦调焦机构的现状进行了分析,

针对DSP、步进电机在变焦距光学系统的最新应用,讨论了电机直传技术在靶场光测设备应用的可行性,为新一代数字变焦距光学系统^[26]提供了理论参考。

随着我国光电产业的发展及靶场光学测量设备的进步,变焦距光学系统的应用领域将会广泛

的发展,靶场光测设备对变焦距调焦系统的要求会进一步提高,因此,对新型调焦机构与调焦理论的研究有很重要的现实意义,基于变焦距光学系统的数字调焦系统将成为靶场光测设备的新一代产品。

参考文献:

- [1] 朱华征,范大鹏,张智永,等.精密光路偏转及焦距调整机构的发展[J].激光与红外,2009,39(10):1028-1033.
ZHU H ZH, FAN D P, ZHANG ZH Y, *et al.*. Develop of precise light beam steering and focusing equipments[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10):1028-1033. (in Chinese)
- [2] 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,2007,15(11):1756-1759.
WANG Y F, XUE Y. Design of heavy caliber and precision cam-varifocal mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1756-1759. (in Chinese)
- [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.
SHI G H. Optical compensated step zoom lens[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2009, 36(6):1-3. (in Chinese)
- [4] 陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1988.
TAO CH K. *Zoom Lens Design*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [5] 李永刚,张葆,丁金伟.红外连续变焦镜头的结构设计[J].长春理工大学学报,2009,32(1):60-63.
LI Y G, ZHANG B, DING J W. Mechanism design of continuous zoom lens[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2009, 32(1):60-63. (in Chinese)
- [6] 敖志伟,李亦君.基于DSP的红外双视场调焦系统设计[J].现代电子技术,2009,32(9):140-142.
AO ZH W, LI Y J. Design of infrared optical zoom lens system base on DSP[J]. *Modern Electronic Technique*, 2009, 32(9):140-142. (in Chinese)
- [7] 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.
TIAN H X, YANG J F, MA X L. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9):1797-1799. (in Chinese)
- [8] 邹华,张孟伟.用步进电机实现连续变焦距光学镜头的变焦控制[J].光电工程,2003,30(1):29-31.
ZHOU H, ZHANG M W. Realization of zooming control for a continuous zoom optical lens with step motor[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2003, 30(1):29-31. (in Chinese)
- [9] 王红.光学补偿法的变焦距物镜的光学设计[J].应用光学,1996,17(5):16-18.
WANG H. Optical design of zoom objective with optical compensation method[J]. *J. Appl. Opt.*, 1996, 17(5):16-18. (in Chinese)
- [10] 黄和平,夏寅辉,安成斌,等.大口径、长焦距红外系统调焦机构设计[J].激光与红外,2005,35(10):745-747.
HUANG H P, XIA Y H, AN CH B, *et al.*. Design on the focusing mechanism of long focus IR system[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(10):745-747. (in Chinese)
- [11] 郝道银.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2008.
YU D Y. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 胡际先.长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J].应用光学,2007,28(5):569-573.
HU J X. Design of long focal length large-aperture optical zoom system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, 28(5):569-573. (in Chinese)
- [13] 蒋汉元,李雪雷,张涛,等.光电经纬仪图像测量中的自动调焦系统研究[J].计算机测量与控制,2010,18(1):183-185.
JIANG H Y, LI X L, ZHANG T, *et al.*. Research on automatic focusing system for Theodolite's image measurement[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(1):183-185. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHANG X J, YAN CH X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2757-2761. (in Chinese)

- [15] 邢启江,吴绍勇,陈娟,等.脱靶量累加前馈补偿电视跟踪器的跟踪误差[J].光电工程,2006,33(12):5-8.
XING Q J, WU SH Y, CHEN J, *et al.*. Accumulation feed-forward of the off-axis value to increase the precision for TV tracker[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(12):5-8. (in Chinese)
- [16] 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.
AN Y, QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):609-614. (in Chinese)
- [17] 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.
LIN W C, WANG J. A design of new focal system[J]. *J. Changchun University of Science and Technol.*, 2007, 30(4):46-48. (in Chinese)
- [18] 高飞,张葆,刘大禹.一种空间相机调焦机构的设计研究[J].长春理工大学学报,2008,31(04):74-76.
GAO F, ZHANG B, LIU D Y. Design for a kind of space camera's focusing structure[J]. *J. Changchun University of Science and Technology.*, 2008, 31(04):74-76. (in Chinese)
- [19] TIMM U, OKUBO A. A plume model for self-focusing micro-organisms[J]. *Bull. Mathematical Biology*, 1994, 56(2):187-206.
- [20] KOGA A K, SUZUMORI K. Electrostatic linear microactuator mechanism for focusing a CCD camera[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(1):0733-8724.
- [21] 刘峰,徐熙平,孙向阳,等.高变倍比红外变焦光学设计[J].应用光学,2009,30(6):1020-1023.
LIU F, XU X P, SUN X Y, *et al.*. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, 30(6):1020-1023. (in Chinese)
- [22] 史亚莉,王一凡,宋春鹏,等.连续变焦距镜头焦距实时输出问题研究[J].仪器仪表学报,2006,27(6):50-52.
SHI Y L, WANG Y F, SONG CH P, *et al.*. Active focal length output of zoom lens[J]. *Chinese J. Sci. Instrument*, 2006, 27(6):50-52. (in Chinese)
- [23] 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.
XING H, YANG H, WANG CH J. Design of zoom lens control system base on TMS320LF2407A[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2006, 25(7):7-14. (in Chinese)
- [24] ZHOU L. Relaxation mechanisms in three-dimensional metamaterial lens focusing[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(14):1812-1814.
- [25] LU W T, HUANG Y J, VODO P, *et al.*. A new mechanism for negative refraction and focusing using selective diffraction from surface corrugation[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(15):9166-9175.
- [26] 周九飞,翟林培,周刚,等.航空成像设备自动调教方法[J].光子学报,2010,30(1):105-108.
ZHOU J F, ZHAI L P, ZHOU P, *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 30(1):105-108. (in Chinese)

作者简介:李零印(1988—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事变焦距调焦系统方面的研究。

E-mail:lilingyin_02@163.com

王一凡(1958—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光机电总体设计方面的研究。

E-mail:wangyifan1958@163.com