

## 一种基于图像清晰度函数的调焦机构限区间变速控制方法

张怀利 李迎春 张廷华

### Method of variable speed control for focusing mechanism limited interval based on image definition function

ZHANG Huaili, LI Yingchun, ZHANG Tinghua

引用本文:

张怀利, 李迎春, 张廷华. 一种基于图像清晰度函数的调焦机构限区间变速控制方法[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 969–974. DOI: 10.5768/JAO202142.0601004

ZHANG Huaili, LI Yingchun, ZHANG Tinghua. Method of variable speed control for focusing mechanism limited interval based on image definition function[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 969–974. DOI: 10.5768/JAO202142.0601004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 应用于一体化摄像机的自动聚焦搜索算法研究

Study on auto-focusing searching algorithm applied to integrated camera

应用光学. 2018, 39(4): 483–490 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0402001>

#### 基于单次曝光光场成像的全焦图像重建技术

Single exposure light field imaging based all-in-focus image reconstruction technology

应用光学. 2021, 42(1): 71–78 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102004>

#### 基于相移结构光照明的浮雕成像技术研究

Embossed imaging technology based on phase-shifting structured light illumination

应用光学. 2017, 38(3): 392–399 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0302003>

#### 一种新型相位-图像复合被动检测调焦机构设计

Design of novel phase-image hybrid passive focusing mechanism

应用光学. 2019, 40(4): 570–574 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401007>

#### 一种目标遮挡情况下的自动跟踪控制方法

Auto-tracking control method against target occlusion

应用光学. 2017, 38(5): 713–718 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501006>

#### 光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-0969-06

# 一种基于图像清晰度函数的调焦机构 限区间变速控制方法

张怀利, 李迎春, 张廷华

(航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

**摘 要:** 针对自动聚焦耗时长的的问题, 通过对调焦过程中图像清晰度的变化规律进行分析, 在调焦范围内确定了有效区间, 根据清晰度变化斜率调整驱动速率, 改进并实现了一种调焦机构限区间变速控制方法。与常规的控制方法相比, 本文方法具有行程短、速度快和精度高的优点。实测结果表明, 该方法最短聚焦时间小于 1.5 s, 可以作为同类光学镜头通用的自动调焦控制方法。

**关键词:** 自动聚焦; 变速控制; 区间搜索; 清晰度函数; 光学成像

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0601004

## Method of variable speed control for focusing mechanism limited interval based on image definition function

ZHANG Huaili, LI Yingchun, ZHANG Tinghua

(Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of long time-consumption for automatic focus, by analyzing the change rule of image definition during the focusing process, the effective interval was determined within the focusing range. The drive rate was adjusted according to the slope of the definition change, so that a variable speed control method for focusing mechanism limited interval was improved and realized. Compared with the conventional control methods, the proposed method has the advantages of short stroke, fast speed and high precision. The experimental results show that the shortest focus time of the proposed method is less than 1.5 s, which can be used as a common automatic focus control method for similar optical lenses.

**Key words:** autofocus; variable speed control; interval search; definition function; optical imaging

## 引言

目标通过光学系统成像时, 有一个最佳焦面位置, 在这个位置能够获得最清晰的图像, 即所谓的物像共轭关系。当成像位置偏离了最佳焦面位置, 即光学系统产生了离焦时, 成像变得模糊<sup>[1-2]</sup>。一般会在光学系统中设计调焦机构, 对焦面位置进行微调, 再通过对图像的清晰度进行判断, 寻找最佳的调焦位置。在人们刚开始研究自动调焦时, 最直接的方式是通过外部设备对目标的位置和系统的焦距进行测量, 以测量结果作为调焦依据<sup>[3-5]</sup>。这种方案具有不可消除的测量误差, 且有系统体积大、成本高、精度下降等弊端。从上世纪

90 年代开始, 数字图像处理技术逐渐成熟, 基于图像处理的自动调焦技术成为研究的主要方向, 此技术方案直接处理采集到的图像信息, 再通过某种算法对图像的清晰度评价价值进行计算, 根据计算结果判断系统的成像状况, 并给出调焦指令, 驱动机构根据响应的指令控制调焦机构运动, 如此反复, 直到获得最清晰的图像, 完成系统的自动调焦控制<sup>[6]</sup>。根据这一工作原理, 基于图像清晰度法的调焦控制可以充分利用计算机技术处理数字信号的快速性和灵活性, 不需要对目标位置、光学系统焦距等信息进行测量, 减少了中间环节, 干扰因素少, 具有高效、准确的优点。近年来, 国内对

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-09-05

基金项目: 军队科研试验技术研究项目 (421414322)

作者简介: 张怀利 (1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间光学测量、空间光电信息处理方面的研究。E-mail: 281068290@qq.com

基于图像处理的自动调焦技术的研究取得了一些成果,但是研究方向主要集中在图像清晰度算法和搜索策略研究方面,对自动调焦控制方法的研究和应用却很少<sup>[7-9]</sup>,自动调焦技术的创新性和完善程度还有很大的上升空间。在这样的背景下,开展基于图像清晰度函数的调焦机构控制方法研究具有十分重要的工程意义。

1 常用的清晰度评价函数及特点

对自动调焦的图像进行评价,需要利用某种客观标准对图像清晰度进行计算,从而对控制过程进行反馈,这种图像清晰度客观标准称为图像清晰度评价函数。图像清晰度评价函数根据图像的细节特征和轮廓特征判断图像清晰与否。一幅清晰图像包含丰富的细节和清晰的轮廓,因此可以通过计算图像的细节特征或提取图像的轮廓特征做为评价图像是否清晰的依据。根据图像的处理方法和原理,可以将清晰度评价函数分为空域评价函数、频域评价函数、信息学评价函数和统计学评价函数<sup>[10-11]</sup>,以上 4 种评价函数的特点如表 1 所示。

表 1 清晰度评价函数基本类型和特点  
Table 1 Basic types and characteristics of definition evaluation function

函数		特点
空域评价函数	梯度能量函数	能有效抑制外界噪声对图像的影响,并且计算简单,复杂度低
	Roberts函数	
	Tenengrad函数	
	Brenner函数	
	Variance函数	
	Laplace函数	
频域评价函数	傅里叶变换	灵敏度和抗噪性能优,计算量大,难以实现实时性
	离散余弦变换	
	小波变换	
统计学评价函数	Range函数	容易受到环境和光照的影响,应用较少
	Vollaths函数	
信息熵评价函数		

评价函数能够作为自动调焦过程中图像清晰度的判断标准,应具有以下特点<sup>[12-13]</sup>: 1) 无偏型,即评价函数能够正确反映最佳调焦位置; 2) 单峰型,即评价函数在调焦行程内有且仅有一个峰值,从而避免局部极值的干扰; 3) 高灵敏性,即能

够轻易区分最佳焦面和轻微离焦的差异; 4) 抗噪声性,即评价函数能够抵抗外界环境,如温度变化带来的影响,具有基本不变的趋势和规律,保证调焦的正确性; 5) 实时性,即评价函数的计算量小,计算速度快于图像刷新的速度,能够保证调焦的实时性。

考虑到空域梯度能量函数具有计算简单、复杂度低的特点,在后续工作中,本文不对清晰度评价函数进行研究,直接以空域梯度能量函数作为评价标准,对图像的清晰度进行计算,用以指导控制模块的设计和实现。

2 聚焦控制设计及实现

在某光电系统非制冷长波热像仪设计工作中,要求其具有快速聚焦功能,聚焦时间小于 2 s,传统的控制方法很难实现。针对此工程需求,从样机镜头的清晰度曲线规律入手,以空域梯度能量函数为清晰度评价标准,改进了一种调焦机构限区间变速控制方法,实现了研制目标。

2.1 光学设计及分析

为了研究调焦机构控制方法,设计了一种可调焦的光学镜头,光学参数如表 2 所示。

表 2 光学设计参数  
Table 2 Optical design parameters

参数	指标
工作波段/ $\mu\text{m}$	8 ~ 14
焦距/mm	138
后截距/mm	18.2
入瞳直径/mm	120
$F\#$	1.15
成像范围/m	50 ~ 无穷远
传递函数	大于 0.4
对准平面	无穷远
调焦行程/mm	-2.0 ~ +1.5

光路图如图 1 所示,透镜二作为调焦物镜,在驱动电机、曲线套筒等调焦机构的驱动下,沿着光轴方向前后移动,调焦行程为 -2.0 mm ~ +1.5 mm,能够补偿物距从 50 m 变化到无穷远的离焦量。

对调焦过程的成像质量进行仿真,分析物距为无限远、3 km 和 50 m 三种情况,考虑在整个调焦行程中,调焦物镜的位置对光学传递函数的影响,得到的曲线如图 2 所示。纵坐标为传递函数,仿真

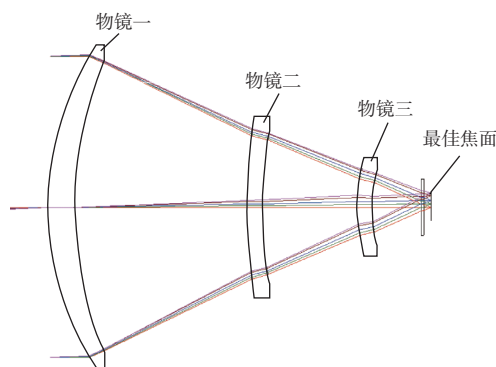


图1 光路图

Fig. 1 Optical path diagram

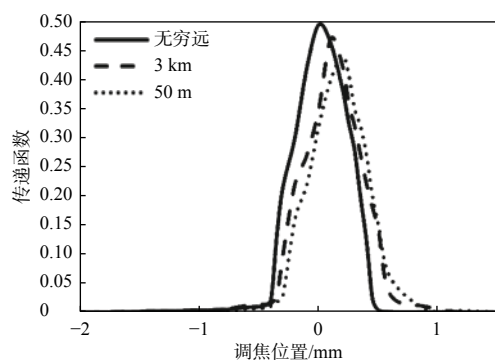


图2 光学传递函数变化曲线

Fig. 2 Variation curves of optical transfer function

的空间频率为 42 lp/mm, 横坐标为调焦位置, 以无穷远物距对应的调焦位置为零位。

从仿真曲线可以看出, 对于不同的物距, 光学传递函数随调焦量变化存在相同的规律: 曲线存在唯一的峰值, 对应最佳调焦位置; 在最佳调焦位置附近, 传递函数变化剧烈, 在远离最佳调焦位置处, 传递函数变换缓慢。对于成像镜头, 认为光学传递函数和图像清晰度函数具有相同的变化规律。基于这种规律, 考虑采用有针对性的调焦控制方式, 在保证调焦精度的前提下, 缩短自动调焦的行程, 提高自动调焦的效率。

## 2.2 聚焦策略优化

无论是基于何种清晰度评价函数, 自动调焦的控制原理都是电机驱动控制调焦物镜在调焦行程内运动, 获取各位置清晰度评价函数值, 寻找函数峰值, 将调焦物镜定位在最佳位置处, 得到最清晰的图像<sup>[14-15]</sup>。在长期的工程实践中, 发展出了诸多控制方法, 最简单的方式是控制调焦物镜单向匀速运动。这种方式虽然实现简单, 但是效率比较低, 整个调焦过程花费的时间较长, 占用的资源较多, 在工程应用中存在限制。为了解决上述问题,

需要寻找一种改进的变速控制方法, 满足工程化应用。

从仿真分析的结果来看, 在最佳调焦位置附近, 曲线的斜率很大, 在图像上表现出清晰度变化剧烈; 在远离最佳调焦位置处, 曲线的斜率很小, 在图像上表现出清晰度变化缓慢。基于这种特征, 在图像清晰度变化缓慢时, 加快驱动电机的速度, 使之快速进入有效的搜索区间, 并锁定在该区间内, 从而有效缩短调焦行程和提高调焦效率。在锁定区间内, 在图像清晰度变换剧烈时, 降低驱动电机的速度, 以提高调焦的精度。从整个调焦过程来看, 限区间变速控制能缩短调焦时间。

将清晰度变化曲线分为 Q1、Q2 和 Q3 三个区间, 如图 3 所示。

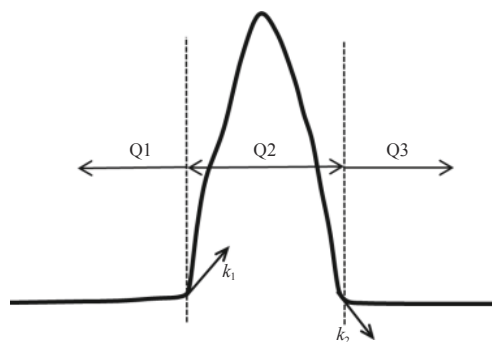


图3 限区间变速原理图

Fig. 3 Schematic diagram of limited interval variable speed

Q2 区间显然是有效的搜索区间, 调焦机构处于该区间内时, 进行低速控制, 调焦机构处于该区间外时, 进行高速控制。三个区间以曲线的斜率  $k_1$  和  $k_2$  为分界, 在控制过程中, 需要对曲线的斜率进行计算, 计算公式为

$$k = \frac{F(x_1) - F(x_2)}{x_1 - x_2} \quad (1)$$

式中  $F(x_1)$  和  $F(x_2)$  分别为  $x_1$  和  $x_2$  位置的清晰度函数值对于预设的斜率阈值。当清晰度评价函数的斜率小于该值时, 认为调焦机构处于有效搜索区间外, 控制调焦机构快速进入有效搜索区间; 当清晰度评价函数的斜率大于该值时, 认为调焦机构进入了有效搜索区间, 从而可以利用成熟的爬山搜索法在该区域内确定最佳调焦位置。

## 2.3 自动调焦控制模块实现和评测

根据上述聚焦策略优化结果, 聚焦模块的控制流程如图 4 所示。

为实现图 4 所述控制流程, 设计了基于单片



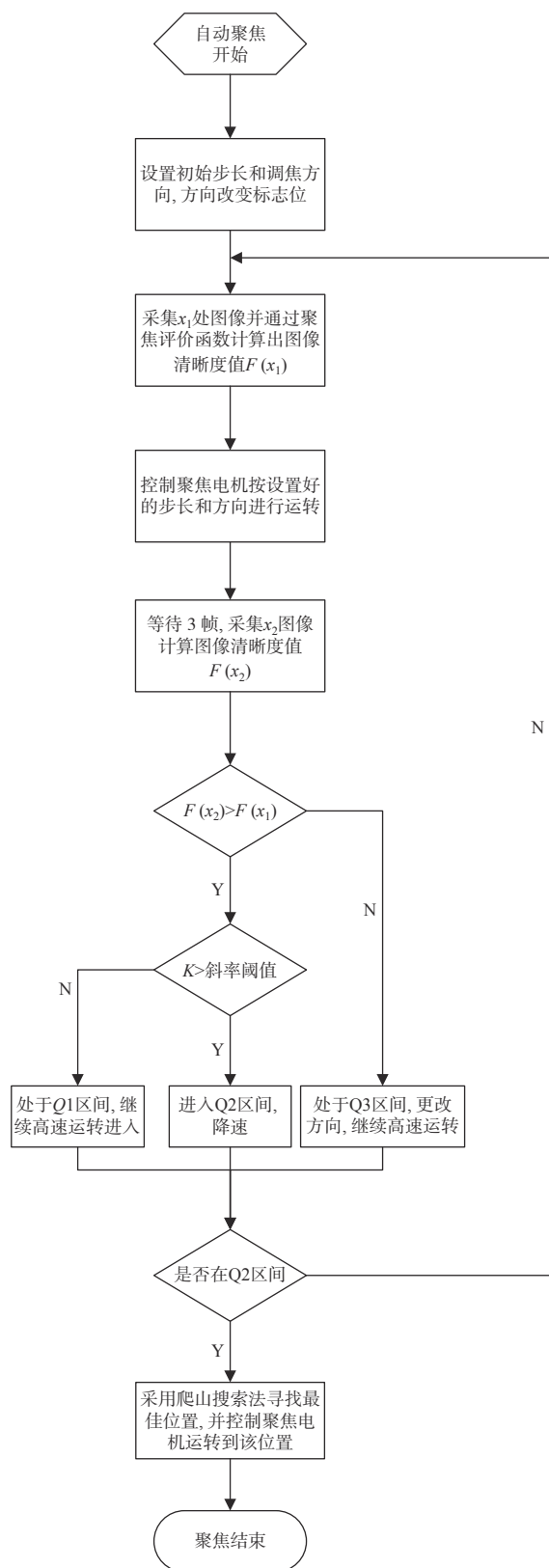


图 4 限区间变速控制流程图

Fig. 4 Flow chart of limited interval variable speed control

机的电路控制板。如图 5 所示, 电路控制板分为控制模块、驱动模块和通讯模块, 其中控制模块

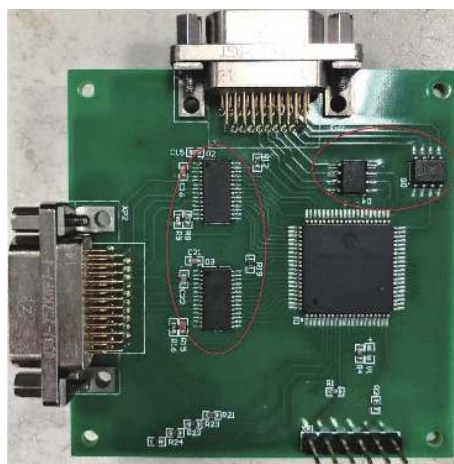


图 5 电路控制板结构图

Fig. 5 Structure diagram of circuit control panel

中的单片机选用 Microchip 公司的 Dspic30f6010a, 驱动模块中的驱动芯片选用 TI 公司的 DRV8825, 通讯模块中的通讯芯片选用 Maxim 公司的 max488。当通讯模块接收到控制指令后, 控制模块进行指令分解判断, 然后输出相应的脉冲宽度调制 (PWM) 波, 通过驱动模块来控制相应的电机来完成指令。

该控制板不涉及清晰度评价函数算法和搜索策略的研究, 通过借用成熟的技术, 实现自动聚焦功能。该控制模块的优势在于通过限区间变速控制, 能够有效缩短自动调焦的行程和时间, 利用试制的光学镜头对 7 个不同的场景进行成像。对控制板的自动调焦时间进行了测试, 测试结果如表 3 所示。

表 3 控制板自动聚焦时间

Table 3 Automatic focus time of control panel

测试序号	聚焦时间1/s	聚焦时间2/s
1	4.63	1.16
2	4.71	1.41
3	5.12	1.54
4	4.55	1.29
5	4.16	1.27
6	3.83	1.42
7	4.74	1.57

表 3 中: 聚焦时间 1 为采用常规控制方法的测试结果, 平均为 4.53 s; 聚焦时间 2 为采用限区间变速控制方法的测试结果, 平均为 1.38 s。可以看出, 采用限区间变速的控制方法后, 调焦时间大幅度缩短, 调焦效率明显提高。

在测试过程中发现, 预设的曲线斜率阈值是一个极其重要的参数, 直接关系到有效搜索区间的大小, 进而影响了调焦时间的长短。目前的斜率阈值为预设, 经过反复测试和迭代, 得到了斜率阈值的最优解, 这种方式设计效率低下, 只能做为限区间变速控制方法的验证方案。在接下来的工程化过程中, 计划探索一种自适应算法, 能自动计算曲线斜率阈值的最优化值, 确定最合适的有效搜索区间大小, 进一步提高自动调焦的效率。

### 3 结论

以工程实现为目标, 本文完成了以下工作: 1) 提出了一种通用的自动调焦仿真方法, 从样机镜头的清晰度曲线规律入手, 针对性地提出了控制方案, 完善了自动调焦分析和设计流程; 2) 改进并实现了一种调焦机构的变速控制方法, 与传统的匀速控制方法相比, 缩短了聚焦时间, 且能够减少调焦电机往复运转的次数, 便于工程实现; 3) 完成了在调焦行程中锁定搜索区间工作, 有效缩短了调焦行程, 进一步提高了自动调焦的效率。在某光电系统非制冷长波热像仪的研制过程中, 采用以上3种方法对自动调焦控制进行优化, 该热像仪的平均聚焦时间从4.53 s缩短到1.38 s, 聚焦速度明显提升。基于现有的清晰度评价函数和调焦搜索策略, 本文提出的对光学系统进行仿真分析以指导自动调焦控制的方法, 以及在变速控制过程中锁定搜索区间的改进方法, 具备一定的通用性, 能够解决同类光学镜头的自动聚焦分析和设计问题。

#### 参考文献:

- [1] 张晶. 基于图像处理的自动调焦技术[D]. 北京: 中国科学院光电技术研究所, 2016.  
ZHANG Jing. Image processing based auto-focus technology[D]. Beijing: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [2] 黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 1-5  
HUANG Detian. Study on auto-focusing method using image technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, 2013.
- [3] 陈东. 一体化摄像机的数字图像自动聚焦技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
CHEN Dong. Research on digital image auto-focus technology for zoom camera[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- [4] 曹永鹏, 辛春辉, 潘青松. 应用于一体化摄像机的自动聚焦搜索算法研究[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 483-490.  
CAO Yongpeng, XIN Chunhui, PAN Qingsong. Study on auto-focusing searching algorithm applied to integrated camera[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 483-490.
- [5] 陶金有. 基于图像处理的自动调焦算法研究及系统实现[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.  
TAO Jinyou. Study on the auto-focus algorithms based on image processing and its system realization[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics), 2014.
- [6] 林兆华. 基于图像处理自动调焦技术在经纬仪中应用的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.  
LIN Zhaohua. Study on the application of the autofocus technology based on the image processing in the theodolite[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, 2012.
- [7] 侯茂盛, 杨帆, 孙明利, 等. 应用于激光扫描投影仪器的动态聚焦技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 605-606.  
HOU Maosheng, YANG Fan, SUN Mingli, et al. Research on dynamic focusing system of laser scanning projection instrument[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 605-606.
- [8] 田海霞. 一种可见光变焦电视系统研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2008.  
TIAN Haixia. One of visible zoom system research[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2008.
- [9] 王安科, 徐宏斌, 杨建峰, 等. 变焦距光学系统在电视制导中的应用[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(3): 41-43.  
WANG Anke, XU Hongbin, YANG Jianfeng, et al. Application of visible video zoom system in the television-guided system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 41-43.
- [10] 陈健, 王灵阳, 陈德全, 等. 基于对焦深度法的显微镜系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 979-984.  
CHEN Jian, WANG Lingyang, CHEN Dequan, et al. Design of microscope system based on depth from focus[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 979-984.

- [11] 庞胜利. 图像模糊度评价研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
PANG Shengli. The research on image blur assessment[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [12] 苏振伟. SMP一体化高清机芯的设计与实现[J]. 电子产品世界, 2014(7): 15-17.  
SU Zhenwei. Design and implement of SMP HD camera[J]. Electronic Engineering & Product World, 2014(7): 15-17.
- [13] 胡凤萍, 常义林, 马彦卓, 等. 视频自动聚焦的实现研究[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1901-1906.  
HU Fengping, CHANG Yilin, MA Yanzhuo, et al. Development of the video automatic focus method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1901-1906.
- [14] 谢琦, 张广. 基于差分方程预测模型的自动聚焦算法[J]. 计算机应用与软件, 2015(12): 270-273.  
XIE Qi, ZHANG Guang. Automatic focusing algorithm based on difference equation prediction model[J]. *Computer Applications & Software*, 2015(12): 270-273.
- [15] 林忠, 黄陈蓉, 卢阿丽. 应用于大变倍监控摄像机的电动变焦跟踪[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 684-690.  
LIN Zhong, HUANG Chenrong, LU Ali. Zoom tracking for big magnification surveillance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 684-690.