

文章编号 1004-924X(2013)03-0767-07

# 对数功率谱离焦深度法在多光谱成像仪的应用

张艳超<sup>1,2</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 赵 建<sup>1\*</sup>

- (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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**结合多光谱成像仪的成像特点,提出了一种基于对数功率谱的离焦深度自动对焦方法。以 CCD 相机为图像传感器,通过主控计算机进行调焦控制与图像处理来实现多光谱成像仪的快速自动对焦。首先,将相机探测器依次处于 3 个等距位置各采集一幅图像,结合三点判位法判断第二幅图片与准确对焦位置的位置关系。然后,以第二幅图片为参考图片,通过对其对数功率谱的相关计算得到准确的对焦位置。最后,将探测器移动到该计算位置,完成自动对焦过程。实验结果表明,系统对焦位置标准差为 $\pm 0.1599$  mm,最大偏差值控制在 0.4 mm 以内,能够较好地满足系统的实时自动对焦要求。该调焦算法只需 3 幅图片即可完成自动对焦过程,具有调焦迅速,准确度高等特点。

**关键词:**多光谱成像仪;自动调焦;离焦深度法;对数功率谱;点扩散函数

**中图分类号:**TP73; TP391. 41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0767

## Application of depth from defocusing based on logarithmic power spectrum to multi-spectral imager

ZHANG Yan-chao<sup>1,2</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>1\*</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: zhaojian6789@126.com*

**Abstract:** According to the characteristics of a multi-spectral imager, an auto-focusing method was proposed based on the depth from defocusing of logarithmic power spectrum. By making use a CCD as the image sensor, the auto-focusing of the multi-spectral imager was quickly implemented by using a host computer for focusing controlling and data processing. Firstly, the sensor was placed in three equally spaced positions in turn, and it was used to acquire an image in each position. Then, according to the three-point location judgment method, the positional relationship between the second image and accurate focus position was determined. By using the second image as the reference, the related calculation with logarithmic power spectrum of the image was carried out to get the value of accurate focus position. Finally, the sensor was placed to the calculated position, and the auto-focusing process was finished. Experimental results indicate that the standard deviations of the focus position value are  $\pm 0.1599$  mm, and the maximum deviation is 0.4 mm or less. The method can meet the real-time au-

收稿日期:2012-10-19;修订日期:2012-11-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 09553JN100);吉林省科技厅资助项目(No. 20106015)

to-focusing requirement better. With the advantages of fast focusing and high accuracy, the auto-focusing process can be realized just by making use of three images.

**Key words:** multi-spectral imager; auto-focusing; depth from defocusing; logarithmic power spectrum; point spread function

## 1 引言

多光谱成像仪需要在不同场景下对检测目标进行多个光谱波段成像、识别和跟踪,目标检测范围常常从几十米到几千米不等。为了使处于不同位置的检测目标能够清晰成像,必须基于共轭成像原理,对成像系统实时地进行光学参数或成像位置调整。目前应用于多光谱成像仪的自动调焦方法主要有 2 种:(1)测距法,即首先利用激光测距仪等测距设备对目标距离进行测量,再根据当前的环境温度信息,结合牛顿公式进行调焦。这种方法虽然简单、快速,但是激光测距往往由于天气状况(如大雾)等影响造成测距误差较大,引起调焦失败<sup>[1]</sup>。此外,激光测距设备的引入也增大了设备成本及系统复杂度。(2)图像法,即根据数字图像在不同对焦程度下的灰度梯度、频谱特性等参数变化进行自动对焦。基于图像法的自动对焦结构简单,无需其他辅助测距设备,仅从图像信息中即可实现对对焦特性的提取。近年来,数字图像自动对焦法渐已成为研究热点<sup>[2-10]</sup>。数字图像自动对焦法又可进一步划分为对焦深度法(Depth From Focusing, DFF)和离焦深度法(Depth From Defocusing, DFD)两大类。对焦深度法通常是对同一场景下不同对焦程度的连续十几幅图片按照特定的清晰度评价函数进行一系列搜索比较,最后将清晰度评价值的极值处视为最佳对焦位置,常用的清晰度评价函数有 Tenengrad 函数、能量梯度函数、Brenner 函数、方差函数、频谱函数及熵函数等<sup>[6]</sup>。对焦深度法运算简单、准确度较高,但是由于需要的图片多,搜索时间较长,不利于系统的实时性。离焦深度法,通常是根据同一场景下的 2~3 张图片进行深度提取,实现系统自动对焦。离焦深度法虽然省去了繁琐的搜索过程,但对目标响应特性有一定限制<sup>[2]</sup>。针对多光谱成像仪的成像特点及目前自动调焦技术存在的不足,本文提出了基于对数功率谱的离

焦深度自动对焦法,该方法不仅对目标形状特性无特殊要求限制,而且同一场景下仅需 3 幅图像即可实现系统的快速对焦。

## 2 基于对数功率谱离焦深度法的自动对焦算法原理

### 2.1 对焦算法原理

在系统成像过程中,成像系统的非共轭性是造成图像边缘模糊、图像退化的主要原因,因此需要通过对焦过程实现系统的清晰成像。由几何光学的高斯公式(如式(1)所示)可知,要使系统满足共轭性,根据调节方式的不同有 3 种对焦方法:(1)调节成像目标与镜头的相对位置,即改变物距  $u$ ; (2)调节图像传感器的位置,即改变像距  $v$ ; (3)调节镜头焦距  $f$ 。

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

对于多光谱成像仪的光学系统,为了保证各波段的视场一致性,各波段光束是由同一光路采集,经分光棱镜分光后入射到各自的探测器中。因此,对于某一特定场景,是通过分别调整各波段探测器的位置进行调焦的,即改变像距  $v$ 。本文将以其中一个波段的光路为例,进行详细阐述。其示意图如图 1 所示。

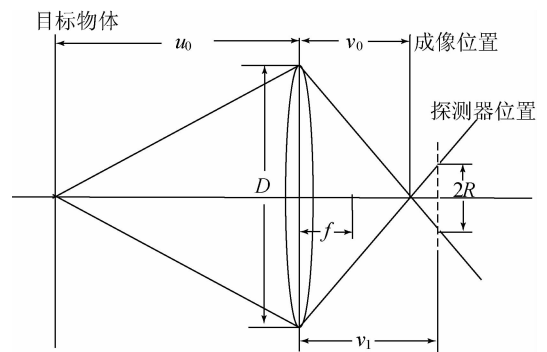


图 1 光学成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical imaging system

其中:  $u_0$  为观测目标物距,  $v_0$  为正确对焦时像距,  $v_1$  为探测器位置,  $f$  为焦距,  $D$  为孔径光阑直径,  $R$  为弥散斑半径。

根据几何光学成像原理, 当  $v_1 > v_0$  时, 有如下关系:

$$\frac{v_1 - v_0}{v_0} = \frac{2R}{D}, \quad (2)$$

由式(2)可进一步求得对焦位置  $v_0$ :

$$v_0 = \frac{v_1 D}{D + 2R}. \quad (3)$$

同理, 当  $v_1 < v_0$  时, 各变量之间的关系如式(4)所示:

$$\frac{v_0 - v_1}{v_0} = \frac{2R}{D}. \quad (4)$$

可进一步求得  $v_0$ :

$$v_0 = \frac{v_1 D}{D - 2R}. \quad (5)$$

综上推导, 可以得到正确对焦时像距  $v_0$  表达式如式(6)所示:

$$v_0 = \begin{cases} \frac{v_1 D}{D + 2R}, & v_1 > v_0 \\ \frac{v_1 D}{D - 2R}, & v_1 < v_0 \end{cases}. \quad (6)$$

由于  $D$  已知,  $v_1$  可测, 只要求得弥散斑半径  $R$ , 即可求出  $v_0$ 。

## 2.2 离焦图像弥散斑半径的求解

当探测器处于非对焦位置时(即  $v_1 \neq v_0$  时), 图像处于离焦状态, 此时点源目标将退化为一个圆斑。因此, 图像的离焦过程可以理解为图像的退化过程, 其退化模型可由式(7)表示:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (7)$$

其中:  $f(x, y)$  为处于对焦位置时清晰图像的空间分布函数,  $h(x, y)$  为成像系统空间点扩散函数 PSF,  $g(x, y)$  为处于离焦位置时的空间分布函数。

由于光的衍射效应和透镜成像的非理想化, 焦斑中的光强分布可用二维高斯函数来近似<sup>[11]</sup>:

$$h(x, y) = \frac{1}{pR^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{R^2}}, \quad (8)$$

其中:  $R$  为弥散斑半径, 表征其模糊程度。  $p$  为待定常数, 可通过实验标定得到。

将式(7)两端进行傅里叶变换后, 如式(9)所示:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v). \quad (9)$$

将式(9)两边乘以  $G(u, v)$  的共轭  $G^*(u, v)$ , 得到式(10):

$$|G(u, v)|^2 = |F(u, v)|^2 |H(u, v)|^2. \quad (10)$$

为了进一步分离各影响因素, 将式(10)两边取对数, 使乘积变为加和的关系, 得到式(11):

$$\lg |G(u, v)|^2 = \lg |F(u, v)|^2 + \lg |H(u, v)|^2. \quad (11)$$

由傅里叶变换定义, 求得  $h(x, y)$  傅里叶变换式如式(12)所示:

$$H(u, v) = \frac{\sqrt{\pi}}{pR} e^{-\frac{u^2+v^2}{4}R^2}, \quad (12)$$

则由式(12)可进一步得到式(13):

$$\lg |H(u, v)|^2 = \lg \left( \frac{\sqrt{\pi}}{pR} \right)^2 + \lg \left( e^{-\frac{u^2+v^2}{4}R^2} \right)^2. \quad (13)$$

由于像元尺寸为微米量级, 则弥散半径  $R$  也为微米量级, 所以  $\lg \left( e^{-\frac{u^2+v^2}{4}R^2} \right)^2$  远小于  $\lg \left( \frac{\sqrt{\pi}}{pR} \right)^2$ ,

因此  $\lg \left( e^{-\frac{u^2+v^2}{4}R^2} \right)^2$  可忽略。则:

$$\lg |H(u, v)|^2 = \lg \left( \frac{\sqrt{\pi}}{pR} \right)^2. \quad (14)$$

对于复杂景物, 各信号分量会在对数功率谱的平均过程中被平均掉<sup>[12]</sup>, 即:

$$\frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |F(u, v)|^2 \rightarrow 0. \quad (15)$$

将式(11)两边取平均, 得到式(16)

$$\begin{aligned} \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |G(u, v)|^2 &= \\ \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |F(u, v)|^2 &+ \\ \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |H(u, v)|^2, \end{aligned} \quad (16)$$

将式(14)、式(15)代入式(16), 得到式(17):

$$\begin{aligned} \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |G(u, v)|^2 &= \\ \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg \left( \frac{\sqrt{\pi}}{pR} \right)^2 &= \lg \left( \frac{\sqrt{\pi}}{pR} \right)^2, \end{aligned} \quad (17)$$

令  $a = \frac{\sqrt{\pi}}{p}$ ,  $P = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \lg |G(u, v)|^2$ ,

即可求得弥散斑半径  $R$  的表达式:

$$R = a \times 10^{\frac{P}{2}}. \quad (18)$$

### 3 自动对焦算法实现

#### 3.1 对焦区域选取

对于整幅参考图像而言,参与对焦运算的窗口大小及位置的合理选取对于整个对焦过程的效果至关重要。由对焦原理可知,对焦算法的运算量是与参与运算的像素数成正比的,对焦窗口选取得越大,运算量越大,算法的实时性就越大。此外,对焦窗口选取越大,其包含的目标以外的背景信息就越多,以此为依据进行对焦信息运算,常常会使系统聚焦到背景上,而目标却处于离焦状态。然而,对焦窗口的尺寸也并非越小越好,对焦窗口过小,则可能会丢失部分感兴趣的目标区域而无法准确对焦。

鉴于上述分析,考虑到本系统采用的探测器分辨率为  $1\ 392 \times 1\ 040$ ,同时检测目标一般处于视场中心位置,同时还要保证窗口相对于弥散斑半径足够大等因素,本算法中选择以视场中心位置为中心、256 pixel 宽度大小的矩形区域作为调焦区域。

#### 3.2 对焦算法实现

对于给定的一幅离焦图片,利用式(18)即可求出此图片对应的弥散斑半径  $R$ ,在确定了此离焦图片对应的探测器位置  $v_1$  与对焦时的像距位置  $v_0$  的大小关系后,即可将求得的  $R$  值代入式(6),进而求出  $v_0$  的大小。

为了确定  $v_1$  与  $v_0$  的大小关系,本文采用文献[13]中所述的三点判位法。具体过程为在探测器连续 3 个等间距位置上采集 3 幅图像,此 3 点分别记为 A, B, C, 其中 B 点对应的图像为待计算弥散斑大小的参考图,其位置为  $v_1$ 。分别计算 3 个位置的调焦窗口内的清晰度评价价值,兼顾到运算量和评价效果,本文采用经典的 Tenengrad 函数作为清晰度评价函数。如文献[13]所述, A, B, C 3 点的清晰度评价值的大小关系共有如图 2 所示的 6 种情况。由图可知, B 点位置永远和最小值点在曲线的同一侧,且可得出如下结论:当 A 点值最小时, B 点位于最佳对焦位置左侧,此时  $v_1 < v_0$ ; 反之, C 点最小时,  $v_1 > v_0$ 。

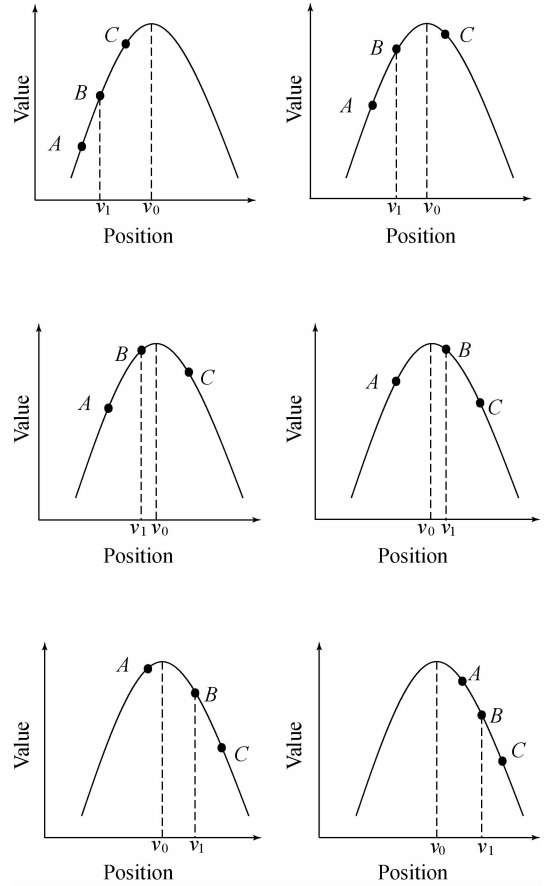


图 2 三点判位法对  $v_1$  与  $v_0$  关系的确定

Fig. 2 Determination of position relationship between  $v_1$  and  $v_0$  with three-point method

### 4 对焦试验及结果

为了评估本文所述的调焦算法性能,组装了一套自动调焦系统。整个系统硬件部分由主控计算机、MVC1450DAM-GE15 相机、探测器可移动的光学镜筒、调焦辅助结构等组成。

#### 4.1 准确性分析

通过指令控制,依次使相机探测器处于等间隔位置,并对每个位置进行图像采集和计算。整个调焦可移动范围为 10 mm,实际的准焦位置在 5.625 mm 附近。表 1 为相机探测器处于不同位置处时根据对应图片计算得到的对焦位置  $v_0$  值。从表中可以看出,  $v_0$  计算值基本分布在 5.625 mm 附近,其均值为 5.577 6 mm,标准差为  $\pm 0.159\ 9$  mm,最大偏差值在 0.4 mm 以内。

表1 探测器不同位置处对焦位置  $v_0$  计算值

Tab. 1 Focusing position values with different sensor positions

序号	探测器位置 $v_1$ (mm)	对焦位置 $v_0$ (mm)
1	1.875	5.819
2	2.500	5.591
3	3.125	5.654
4	3.750	5.463
5	4.375	5.462
6	5.000	5.230
7	5.625	5.494
8	6.250	5.867
9	6.875	5.746
10	7.500	5.534
11	8.125	5.555
12	8.750	5.478
13	9.375	5.668
14	10.000	5.427
15	10.625	5.676

将该算法运用到多光谱成像仪,对于固定场景进行自动对焦实验,对焦前后效果如图3所示。



(a)离焦图像  
(a)Defocusing image



(b)对焦图像  
(b)Focusing image

图3 对焦前后效果图

Fig. 3 Renderings of defocusing and focusing

#### 4.2 与常用经典对焦方法的实时性比较

鉴于观测目标的多样性和复杂性,目前较流行的自动对焦方法是将经典的灰度梯度算子与变步长爬山搜索方法<sup>[14]</sup>结合使用。该方法的对焦时间通常取决于观测目标和探测器当前靶面位置。一般情况下,本系统探测器靶面位置调节次数在14至20次之间。那么,参与运算的图像序列也需要14至20帧不等。本文采用的多光谱成像仪,每个波段视频帧频为16 frame/s,极限情况下,采用基于灰度梯度的对焦深度法所需时间至少在1 s以上,再考虑到探测器靶面位置调节时间(本系统整个靶面行程调节时间约为2.5 s),经过多次实验,该方法的平均调焦时间在3 s左右。

相比之下,基于对数功率谱的离焦深度法只需3帧参考图片,平均调焦时间一般在1 s以内,仅为对焦深度法的1/3,甚至更少。因此,对于运动目标的快速对焦,本方法具有更好的实时性。

## 5 结 论

本文结合多光谱成像仪的成像特点提出了一种基于图像对数功率谱的离焦深度自动调焦方法,结合三点判位法,该方法仅需3幅图片就可完成系统的快速自动对焦。实验表明:系统对焦位置标准差为 $\pm 0.1599$  mm,最大偏差值控制在0.4 mm以内,能够较好地满足系统的实时自动对焦要求。此外,还可将本文算法与对焦深度法结合使用,粗调与精调结合,以进一步提高对焦精度。

## 参考文献:

- [1] 秦来贵,霍玉晶,何淑芳.基于数字极性相关算法的激光脉冲测距[J].中国激光,2006,33(7):941-944.  
QIN L G, HUO Y J, HE S F. Study on pulsed laser range finder based on digital polarity correlation algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7): 941-944. (in Chinese)
- [2] 刘一鹏,裴锡宇,冯华君,等.一种基于 DFD 的自动对焦算法[J].光学仪器,2005,27(4):39-44.  
LIU Y P, PEI X Y, FENG H J, *et al.*. Autofocus algorithm based on depth from defocus [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(4): 39-44. (in Chinese)
- [3] 符冉迪,易文娟,郝梅,等.基于 Hadamard 变换的数字显微成像自动对焦新方法[J].光电子·激光,2008,19(12):1690-1693.  
FU R D, YI W J, YU M, *et al.*. Anovel auto-focusing method based on hadamard transformation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(12): 1690-1693. (in Chinese)
- [4] 梁敏华,吴志勇,陈涛.采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J].光学精密工程,2009,17(12):3016-3021.  
LIANG M H, WU Z Y, CHEN T. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3016-3021. (in Chinese)
- [5] 吴小翠,郭斯羽,易国.基于便捷梯度的自动调焦评价函数[J].计算机系统应用,2010,19(3):45-48.  
WU X C, GUO S Y, YI G. Evaluation function for automatic focusing based on boundary gradients [J]. *Computer Systems & Applications*, 2010, 19(3): 45-48. (in Chinese)
- [6] 冯精武,喻擎苍,芦宁,等.调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J].机电工程,2011,28(3):354-368.  
FENG J W, YU Q C, LU N, *et al.*. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(3): 354-368. (in Chinese)
- [7] 罗钧,孙力,闵志胜.变焦跟踪曲线在对焦应用中的应用[J].光学精密工程,2011,19(10):2326-2332.  
LUO J, SUN L, MIN Z S. Application of zoom tracking curves in focusing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2326-2332. (in Chinese)
- [8] 王昕.含噪声图像的多聚焦融合算法[J].光学精密工程,2011,19(12):2977-2984.  
WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)
- [9] 范媛媛,沈湘衡,桑英军.基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J].光学精密工程,2011,19(10):2485-2493.  
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [10] 陈立国,王明月,杨治亮,等.显微视觉快速自动调焦方法及实验[J].光学精密工程,2010,18(6):1361-1366.  
CHEN L G, WANG M Y, YANG Z L, *et al.*. Fast autofocus method for microscopic computer vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1361-1366. (in Chinese)
- [11] 杨晓洁,杨宇红,王蕊.多聚焦离散图像复原算法[J].计算机工程,2011,37(18):211-213.  
YANG X J, YANG Y H, WANG C. Multi-focus defocus image restoration algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2011, 37(18): 211-213. (in Chinese)
- [12] 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 2版.北京:人民邮电出版社,2002.  
HE B, MA T Y, WANG Y J, *et al.*. *Visual C++ Digital Image Processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 张振久,胡泓,李天利.透镜检测中复合自动对焦技术的研究及应用[J].光学学报,2011,31(2):03120051-03120057.  
ZHANG Z J, HU H, LI T L. Application and research of composite autofocusing technique in optical-lens measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 03120051-03120057. (in Chinese)
- [14] 谢小甫,周进,吴钦章.基于无参考结构清晰度的自适应自动对焦方法[J].光电工程,2011,38(2):84-89.  
XIE X F, ZHOU J, WU Q Z. An adaptive autofocus method using no-reference structural sharpness [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 84-89. (in Chinese)

## 作者简介:



**张艳超**(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2007年于天津大学获得学士学位,2009年于天津大学获得硕士学位,主要从事数字图像处理及调焦控制方面的研究。E-mail: zhangyanchaomn@126.com



**孙强**(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于长春光机所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn



**赵建**(1967—),女,吉林长春人,硕士,副研究员,硕士生导师,1991年于吉林工业大学获学士学位,2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事数字图像处理、目标识别与跟踪、视频编解码等方面的研究。E-mail: zhaojian6789@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)