

文章编号:1007-2780(2011)05-0677-06

## 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法

杨 权<sup>1,2</sup>, 刘晶红<sup>3\*</sup>, 马晓飞<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室,

吉林 长春 130033, E-mail: yquanquany@163.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

4. 总装备部沈阳军事代表局驻长春地区军事代表室, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 研究了图像处理的自动调焦方法在机载光电成像设备中的应用。提出了基于图像斜边、水平和垂直边缘检测的调焦评价算子——Bevel 算子和 Mix 算子。选取边缘检测算子和卷积算子分别作为调焦粗搜索和精搜索阶段的清晰度评价算子, 设计了适合自动调焦的隔行隔列调焦区域选择方法。采用了变步长爬山搜索法、局部全局搜索法和综合搜索法 3 种调焦控制策略, 使用调焦行程为 131 步, 焦深为 2 步的变焦镜头, 其调焦时间分别从全局搜索法的 37 s 缩短至 3~4 s、4~6 s 和 3~5 s。实验结果表明, 该方法能够满足机载光电成像设备的调焦实时性和精确性要求。

**关 键 词:** 机载光电成像设备; 清晰度评价函数; 边缘检测; 调焦区域; 调焦控制策略

中图分类号: TP391; TH761 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20112605.0677

## Auto-Focusing Method Based on Image Processing for Airborne Electro-Optical Imaging Platform

YANG Quan<sup>1,2</sup>, LIU Jing-hong<sup>3\*</sup>, MA Xiao-fei<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: yquanquany@163.com;

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

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

4. Military Representative Office Stationed in Changchun Area by Shenyang Military Representative Bureau, General Armament Department, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Two new focus measure methods (Bevel and Mix operators) derived from gradient edge detection were proposed. The Bevel and Mix operators and correlation operator were respectively chosen as the focus measure method of coarse search and fine search. A new method of selecting suitable focusing region was presented. Then, mountain climbing search strategy with variable step (MCS), local-global search strategy (LGS) and general search strategy (GES) were proposed. Using a lens with focus length of 130 steps and focus depth of 2 steps, the three search strategies can shorten the focusing time from the full search's 37 s to 3~4 s, 4~6 s and 3~5 s respectively. The experimental results show that, the method can meet the real-time and accurate requirements of airborne electro-optical imaging device.

**Key words:** airborne electro-optical imaging device; focus measure function; image edge detection; focus areas; search strategy

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-04-06

基金项目: 国家 973 基金资助项目 (No. 2009CB72400105)

作者简介: 杨权 (1987-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事机载光电平台成像设备自动调焦方面的研究。

\* 通讯联系人, E-mail: liu1577@126.com

## 1 引 言

机载光电平台数码相机焦距长,焦深短,飞行期间由于受空间环境温度、气压的变化以及起飞过程中冲击、振动的影响,导致相机焦面的变化超过允许的范围,即产生离焦,导致相机分辨率降低,目标识别能力大大下降。因此有效的自动调焦方法是保证机载光电平台数码相机拍摄出高质量图像的关键技术之一。

多数成像设备采用光学设计或光学补偿的方法,保证足够的焦深,但长焦情况下,对光学设计、机械设计和光机加工要求很高,成本也很高。机载光电平台装有可见光面阵 CCD 相机、红外相机和激光器等光电设备,剩余扩展空间有限,无法装载体积较大的光学自动调焦机构。因此本文研究了基于图像处理的方法来实现机载光电平台的自动调焦。此方法是一种直接调焦方法,通过对成像质量进行图像处理实现自动调焦,把实际拍摄的景物作为评价依据,最符合实际使用时的状态,是 CCD 实时传输型相机比较理想的自动调焦方法。该方法与传统的自动调焦方法相比,具有高度集成化、智能化、低功耗和高速处理,占用体积和重量小,成本低等优点,在民用相机、显微镜成像和机器视觉等领域有着广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。

数字图像处理方法自动调焦的关键在于图像清晰度评价函数(对焦评价函数)的选取。理想的自动调焦评价函数应该满足无偏性、单峰型、灵敏度高,对光强波动、图像噪声等不过敏感,并具有较小的计算量,以满足实时性<sup>[2]</sup>。但是在实际调焦过程中发现,要满足上面的这些要求,仅靠选择对焦评价函数远远不够。本文针对机载光电平台的特点,对多种自动对焦评价函数和搜索算法以及调焦区域的选择进行了大量的研究试验,提出了基于数字图像处理的机载光电平台数码相机自动调焦方法,该方法在实时性和精确性方面都有所提高。

## 2 清晰度评价函数

### 2.1 常用的清晰度评价函数

图像清晰度评价函数大体分为两类:

#### (1) 基于空间域的评价方法

主要取用各种锐化算子处理图像后的数据和值作为评价依据,如比较常见的梯度评价算子、Laplacian 评价算子、Sobel 评价算子等;

#### (2) 基于频域的评价方法

主要采用不同的频域变换,根据某段频域区域值来评判对焦的准确度,如 Fourier 变换、DCT 变换、小波变换等<sup>[3-7]</sup>。但基于频域的评价方法计算量相对较大,难以满足机载光电平台成像设备的实时性要求。

### 2.2 边缘检测算子

图像的主要信息是由边缘轮廓提供的,边缘的提取与检测在图像处理中占很重要的地位,其算法的优劣直接影响到图像的处理效果。经典的边缘检测算法有 Sobel 算子和 Laplacian 算子,两者都是计算  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向上像素灰度的差值,而拉普拉斯 8 邻域微分算子在 8 个方向上都计算了像素灰度差值,但其运算量太大。文献<sup>[8]</sup>以实际自然图像中斜图像边缘多于水平和垂直的图像边缘为依据,提出了 Sobel 算子的改进算子——Lean 斜边缘检测算子,如式(1)所示:

$$L = \sum_M \sum_N (|I_x| + |I_y|), |I_x| + |I_y| > T,$$

$$h_x = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

上述 Lean 算子中,距离中心像素较远的对角线上的像素比重大于距离中心像素较近的相邻像素比重,而实际图像中,较近像素之间的灰度差比较远像素之间的灰度差更能表征图像的边缘轮廓,因此本文提出了一种 Sobel 算子的改进算子:斜边缘检测算子(Bevel),如式(2)所示:

$$B = \sum_M \sum_N (|I_x| + |I_y|), |I_x| + |I_y| > T,$$

$$h_x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \\ 0 & -2 & -1 \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & -2 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

若将上述模板除以 2,则此算子的计算量与 Sobel 算子相当,即为

$$h_x = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -0.5 \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0.5 \\ -1 & 0 & 1 \\ -0.5 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

另外,针对斜图像边缘与水平和垂直的图像边缘相当的图像内容,提出了另一种基于 Sobel 算子的改进算子。此算子结合 Sobel 算子和 Lean 斜边

缘检测算子的特点,为了保证其计算量与 Sobel 算子相当,分别取 Lean 算子中两个模板的任一个和 Sobel 算子中两个模板的任一个,作为新算子(取名为 Mix 算子)的两个模板,则 Mix 算子为:

$$M = \sum_M \sum_N (|I_x| + |I_y|), |I_x| + |I_y| > T,$$

$$h_x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

此算子计算的是 0°和 +45°方向上像素灰度的差值。

分别用 Sobel 算子、Lean 算子、Bevel 算子和 Mix 算子对标准 lena 图和 fish 图进行处理,如图 1、图 2 所示。通过对比可以看出,Lean 算子、Bevel 算子和 Mix 算子都比 Sobel 算子检测到更多的边缘,边缘检测效果从优到次依次为 Bevel 算子、Lean 算子、Mix 算子、Sobel 算子。

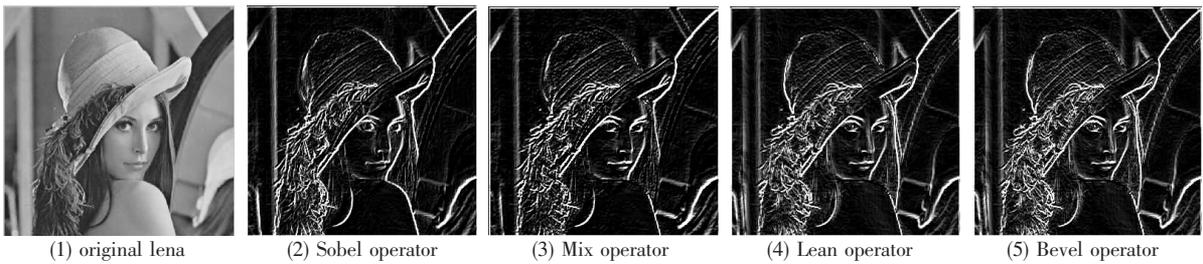


图 1 Soble 算子与其改进算子对 lena 图的边缘检测效果比较

Fig. 1 Performance comparison between Sobel and improved Sobel edge-detect operator for Lean image

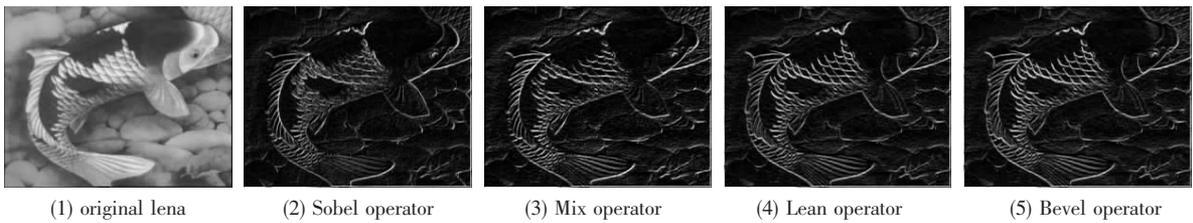


图 2 Soble 算子与其改进算子对 fish 图的边缘检测效果比较

Fig. 2 Performance comparison between Sobel and improved Sobel edge-detect operator for fish image

### 2.3 清晰度评价函数的选择

选取了以下 9 种评价函数进行了效果评估实验:ACM 算子、SMD 算子、Brenner 函数、Sobel 算子、Lean 算子、Bevel 算子、Mix 算子、Laplacian 算子、Correlation 算子。

受条件限制,本文采用 CCD 相机和 Raymax 镜头进行了航拍模拟试验,将镜头的焦距值离散化为 30~160 共 131 步的数字焦距,焦深约为 2 步,和实际的航空成像设备相似。实验分别采集了两组从不清晰到清晰再到不清晰的相同内容的 fish 图像,其中一组图像无干扰和噪声,另一组图像有干扰和噪声。用以上评价函数分别计算两组图像序列的清晰度评价值,并做归一化处理得到的清晰度评价曲线分别如图 3、图 4 所示。

从图 3 可以看出,除 ACM 算子以外,其他对焦评价算子都有很好的无偏性和单峰性,且都在

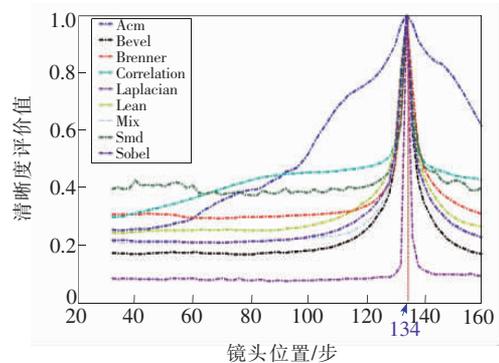


图 3 无干扰和噪声图像的 9 种清晰度评价函数评价曲线  
Fig. 3 Focus measure curves of 9 kinds of focus measure operators without disturbance and noise

同一镜头位置(134)处达到最大的清晰度评价值,此处即为最佳成像位置。说明 Bevel 算子、Mix 算子和 Sobel 算子具有较好的灵敏度和有效调焦

区域,适合在大步长搜索过程中使用。从图 4 可以看出,在有干扰噪声的情况下,Correlation 算子和 Laplacian 算子表现出很好的灵敏度,有利于准确定位最佳成像位置,适合在精搜索过程中使用;Correlation 算子相对 Laplacian 算子的有效调焦区域更宽,且 Laplacian 算子每个像素点运算量为 9 次乘法和 9 次加法,Correlation 算子仅为 2 次乘法和 2 次加法,运算量更小,综合考虑调焦的实时性和精确性,本文在精搜索过程中使用 Correlation 算子。

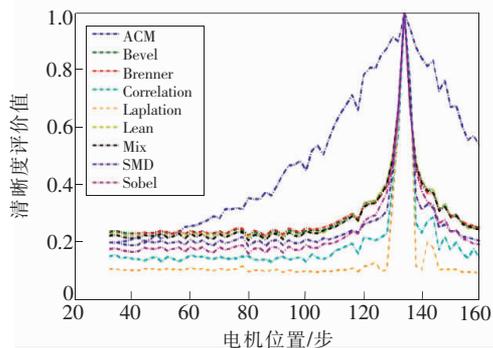


图 4 有干扰和噪声图像的 9 种清晰度评价函数评价曲线

Fig. 4 Focus measure curves of 9 kinds of focus measure operators with disturbance and noise

### 3 调焦区域选择

航空数码相机的图像传感器为 CCD 传感器,分辨率高达数千万像素,图像数据量大,如果采用整幅图像处理的方法,计算量将会很大,严重影响系统的实时性,因此在调焦过程中有必要进行调焦区域选择<sup>[9]</sup>。常用的方法是选择图像中某一块纹理清晰的区域作为调焦区域,但是在自动调焦中,识别纹理清晰的区域需要对整幅图像的像素点进行某种处理,会增加一定的计算量。针对上述方法的局限性,提出了一种新的隔行隔列区域选择方法,设图像大小为  $M \times N$ ,  $M$  和  $N$  分别代表图像的宽度和高度,选择所有奇数行、奇数列的像素点作为调焦区域,计算量为处理整幅图像的  $1/4$ 。同理,如果均匀选择  $1/S$  行、 $1/T$  列的像素点作为调焦区域,计算量为处理整幅图像的  $1/ST$ 。  $S$ 、 $T$  越大,计算量越小,调焦精度越低,  $S$ 、 $T$  越小,计算量越大,调焦精度越高,所以选择合适大小的  $S$ 、 $T$  值很重要。这种方法尤其适合纹理分布比较均匀的图像。

## 4 调焦控制策略

调焦评价函数具有单峰性,调焦的最终目的是确定此峰值的位置。相应的,调焦控制策略可以分为判定调焦方向和搜索评价函数特性曲线峰值两个步骤。特性曲线峰值定位的准确性是决定调焦控制策略优劣的关键,理想的策略应该满足:

- (1)采集尽量少的图像;
- (2)电机往返运行的次数少;
- (3)评价函数特性曲线峰值定位精确。

经典的调焦搜索算法有爬山法、斐波纳契(Fibonacci)法、黄金分割法和曲线拟合法等,本文根据机载光电平台的特点,采用自己设计的调焦搜索算法。

从图 3 和图 4 可以看出,除了 ACM 算法,其他算法的清晰度评价函数曲线在准确对焦位置附近以外的区域都很平坦,不能有效地反映出调焦方向。但实验结果表明对于不同的成像目标,使用 ACM 算法有时会严重离焦,这是由于 ACM 是基于平均值统计,而其统计值随图像内容发生很大波动。为了提高调焦速度,应该最大限度地减少采样点数和电机移动步数。本文将搜索算法分为粗搜索和精搜索两个阶段,粗搜索阶段可以确定有效调焦区域,精搜索阶段可在有效调焦区域内确定最佳对焦位置。

#### 4.1 粗搜索阶段

考虑到光学镜头的焦距范围为  $30 \sim 160$  步长,在粗搜索阶段使用的搜索步长设为 26,图像采集位置依次为 160,134,108,82,56,30,或者搜索步长设为 20,图像采集位置依次为 155,135,115,95,75,55,35,使用 Bevel 算子或 Mix 算子计算清晰度评价价值,最大评价价值所对应的位置即为有效调焦区域中心。

#### 4.2 精搜索阶段

针对图 3 和图 4 所示调焦曲线的特点,设计了几种精搜索算法:变步长爬山搜索法、局部全局搜索法和综合搜索法。

##### 4.2.1 变步长爬山搜索法

传统的调焦控制策略主要是爬山法。设定调焦方向后,实时计算采集到的图像评价函数值,比较相邻帧的评价函数值,当函数值达到最大时,认为图像达到聚焦。传统爬山法的最大问题是调焦步长的选择,步长过大,则调焦精度过低;步长过

小,则调焦效率低下。根据图 3 和图 4 所示调焦曲线的特点,在粗搜索(步长为 20)得到的有效调焦区域内,先采用 6 步长的爬山式搜索,在有效调焦区域内收敛到最佳对焦位置附近,再采用 2 步长准确定位到最佳对焦位置的焦深范围内。

#### 4.2.2 局部全局搜索法

爬山搜索法虽然收敛性很好,但不同成像位置的搜索情况不同,搜索过程中所经历的步数和时间不确定。为此,设计了两种局部全局算法。

(1)局部全局搜索法 1。首先,对粗搜索(步长为 26)得到的最佳对焦位置为中心的 5 个采样点进行局部的全局搜索,步长为 7;然后,对新的对焦位置为中心的 3 个采样点进行局部全局搜索,步长为 2。

(2)局部全局搜索法 2。对粗搜索(步长为 20)得到的最佳对焦位置为中心的 11 个采样点进行局部全局搜索,步长为 2。

局部全局搜索法能够收敛到最佳对焦位置,总的采样点数和搜索步长确定,因此所消耗的时间基本确定。

#### 4.2.3 综合搜索法

结合局部全局搜索法 1 稳定性好和爬山法速度快的特点,设计了综合搜索法。首先,对粗搜索(步长为 26)得到的最佳对焦位置为中心的 5 个采样点进行爬山搜索,步长为 7;然后,对新的对焦位置为中心的 3 个采样点进行局部全局搜索,步长为 2。

## 5 实验结果

实验采用 CCD 相机和 Raymax 镜头,在 PC 机端使用图像采集卡 MV-600 采集图像,图像清晰度评价值的计算和调焦搜索算法等图像处理部分由基于 TMS320DM642 DSP 和 cyclone III FPGA 为核心的嵌入式自动调焦处理板完成<sup>[10]</sup>。通过 RS232 接口发送电机控制指令到电机控制板,由电机控制板控制电机和采集调焦电位计的数据。

实验中将带 fish 图的标靶依次放置在焦距为 134、101 和 58 步对应的物距位置,以对比各种搜索算法的性能。表 1 所示为在调焦实验中应用以下几种搜索算法得到的实验数据:

(1)全局搜索算法,步长为 2,采用 Mix 算子;

(2)变步长爬山搜索算法,粗搜索步长为 20,评价算子为 Mix 算子,精搜索变步长依次为 6 和 2,评价算子为 Correlation 算子;

(3)局部全局搜索算法 1,粗搜索步长为 26,评价算子为 Mix 算子,精搜索变步长依次为 7 和 2,评价算子为 Correlation 算子;

(4)局部全局搜索算法 2,粗搜索步长为 20,评价算子为 Mix 算子,精搜索步长为 2,评价算子为 Correlation 算子;

(5)综合搜索法,粗搜索步长为 26,评价算子为 Mix 算子,精搜索变步长依次为 7(爬山法搜索)和 2,评价算子为 Correlation 算子。

表 1 几种调焦搜索算法性能比较

Table 1 Performance comparison of several kinds of auto-focus search algorithms

标靶位置		134 步		101 步		58 步	
		时间/s	误差/steps	时间/s	误差/steps	时间/s	误差/steps
全局搜索算法	整幅图像	37.0	0	37.0	0	37.0	0
	调焦区域	5.0	0	5.2	2	5.1	0
变步长爬山搜索算法	整幅图像	3.7	0	4.1	2	3.6	0
	调焦区域	6.7	0	7.8	0	6.8	0
局部全局搜索算法	整幅图像	5.2	0	6.2	2	5.2	0
	调焦区域	7.1	0	8.0	0	7.3	0
局部全局搜索算法 2	整幅图像	4.1	0	5.7	0	4.2	0
	调焦区域	5.1	0	6.2	0	5.2	0
综合搜索法	整幅图像	3.8	0	4.8	0	4.0	0
	调焦区域						

实验中采集的 fish 图大小为  $720 \times 576$ , 调焦区域为 1/24 行 1/15 列的像素点。图 5 为调焦实验中采集的 fish 图序列中的几幅图像, 从左向右依次从模糊到清晰再到模糊。

从表 1 数据可以看出, 选择调焦区域比处理整幅图像的调焦时间有大幅度减少。变步长爬山

搜索法、局部全局搜索法和综合搜索法相比, 全局搜索算法的调焦时间都大大缩短。变步长爬山搜索法和综合搜索法的调焦时间最短, 实时性最好。但由于爬山搜索法抗干扰能力差, 实验结果相对理论值会有误差。而综合搜索法虽然调焦时间比变步长爬山搜索法略长, 但性能稳定, 抗干扰能力



图 5 调焦实验的图像序列

Fig. 5 Series of images in focus experiment

强, 适合实际应用。

## 6 结 论

对基于数字图像法的自动调焦方法在航空成像设备中的应用进行了研究。针对不同图像的斜边缘与垂直边缘和水平边缘的数量比关系不同的特点, 提出了几种不同的斜边缘检测算子。在长焦距、短焦深的光学镜头上模拟航拍实验, 对多种清晰度评价算法进行了性能测试, 并选取了具有较好有效调焦区域的 Bevel 算子和 Mix 算子作为大步长粗搜索阶段的评价算子, 在

小步长精搜索阶段使用灵敏度很好且计算量相对较小的 Correlation 算子。考虑到高分辨率 CCD 传感器图像数据量大, 图像处理计算量太大, 提出了适合自动调焦的隔行隔列区域选择方法。最后, 针对机载光电平台成像设备的特点设计了几种粗搜索与精搜索相结合的调焦控制策略: 变步长爬山搜索法、局部全局搜索法和综合搜索法, 分别将调焦时间从全局搜索法的 37 s 缩短至 3~4 s、4~6 s 和 3~5 s。实验证明, 所提出的图像自动调焦方法在机载光电成像设备上的应用十分有效。

## 参 考 文 献:

- [1] 孙杰, 袁跃飞, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较 [J]. 光学学报, 2007, 27(1): 35-39.
- [2] 李庆祥. 现代精密仪器设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 395-400.
- [3] 陈国金. 数字图像自动聚焦技术研究及系统实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [4] 杨守旺, 龙科慧, 周磊, 等. 航空相机调焦单元仿真系统的实时显示方法研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(5): 736-740.
- [5] 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): 3016-3020.
- [6] 任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术 [J]. 光电工程, 2003, 30(2): 53-55.
- [7] 郑玉珍, 吴勇, 倪旭翔. 实时自动对焦的研究 [J]. 光电工程, 2004, 31(4): 64-66.
- [8] 赵志彬, 刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(6): 863-868.
- [9] 麻恒阔, 魏国强. 基于图像处理自动调焦方法的稳定性研究 [J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(2): 33-36.
- [10] 张锐, 吴婉兰, 吴庆宪, 等. DM642 在数字图像处理系统中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(1): 211-212.