

## 一种梯度阈值自动调焦算法

莫春红<sup>1,2</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 丁璐<sup>1</sup>, 陈二瑞<sup>1</sup>, 郭高<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 传统的梯度自动调焦算法计算量大, 抗噪声能力弱, 影响调焦的实时性及调焦曲线的单峰性和灵敏度, 因此提出一种梯度阈值自动调焦算法, 提高调焦性能, 满足光电跟踪系统能实时、准确地进行自动调焦的要求。该算法先以图像的局部方差作为局部阈值区分边缘像素与非边缘像素, 再计算整幅图像的一种新的标准差作为全局阈值来削弱噪声和背景的影响, 最后对阈值预处理后的图像采用梯度调焦算法计算其调焦值, 进行清晰度评价。大量实验结果表明, 该算法具有实时性好, 单峰性强, 灵敏度高的特点和良好的抗噪性能。该算法用于光电跟踪系统的自动调焦中时, 依然保持上述良好的性能, 明显优于传统梯度自动调焦算法。

**关键词:** 自动调焦; 梯度; 阈值; 评价函数; 图像处理

**中图分类号:** TP391    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0323-05

## A gradient threshold auto-focus algorithm

Mo Chunhong<sup>1,2</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Ding Lu<sup>1</sup>, Chen Errui<sup>1</sup>, Guo Gao<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Traditional gradient auto-focus algorithms have large amount of calculation which will cause the reduction of real-time performance. These algorithms are also weak in anti-noise capability which will result in the decline of unimodality and sensitivity. So a gradient threshold auto-focus algorithm was proposed to improve the focusing performance to meet the requirements of real time and accuracy in auto-focusing subsystem of photoelectric tracking system. The proposed algorithm took the local variance as a local threshold to distinguish the edge pixels from non-edge pixels. Then it used a kind of new standard deviation of the whole image as a global threshold to weaken the effects of noise and background. At last, it used one of traditional gradient auto-focus algorithms to calculate the focusing value of the pre-processed image for clarity-evaluation. The results of lots of experiments show that the proposed algorithm has good real-time performance, strong unimodality, high sensitivity and powerful anti-noise capability. When the proposed algorithm is used in the auto-focusing subsystem of photoelectric tracking system, all the attractive performances remain, which traditional gradient auto-focus algorithm can't achieve.

**Key words:** auto-focus; gradient; threshold; evaluation function; image processing

收稿日期: 2013-04-02; 修订日期: 2013-05-01

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划(2010AA7080302)

作者简介: 莫春红(1990-), 女, 硕士生, 主要从事图像处理方面的研究。Email: flora8820@163.com

导师简介: 刘波(1968-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光电跟踪与测量技术方面的研究。Email: LB3L@sina.com

## 0 引言

在光电跟踪系统中,目标的运动速度常使目标与相机之间的距离发生较大变化,因离焦导致成像模糊。视场内目标成像的质量对能否继续准确地跟踪、识别目标有着重大的影响。为获取视场内目标的清晰图像,必须进行实时调焦,以满足实时跟踪的要求。

基于图像处理的自动调焦技术较传统的自动调焦技术有很大的优势,近年来,很多学者对数字图像自动调焦算法颇有研究。数字图像自动调焦算法大致可分为灰度梯度函数、灰度熵函数、和频域类函数<sup>[1-5]</sup>。这些算法基本上是对原图像或者是对图像进行一定的预处理(比如滤波,灰度变换等)后进行运算的。这些算法中有的算法对噪声敏感,当图像不含噪声时,这些算法能保持一定的灵敏度和单峰性,但当图像含有噪声时,算法可能失效;有的算法易受图像对比度的影响,处理低对比度图像时,算法的灵敏度大大下降;有的算法对调焦区域的选择条件苛刻,当调焦区域中背景像素较多时,算法灵敏度下降;有的算法处理一帧图像的平均时间过长,不利于实时性的实现。

为了找到适合于光电跟踪系统中自动调焦的评价函数,对计算简单易于实现的灰度梯度函数进行研究,提出以梯度阈值函数作为调焦函数,提高调焦的实时性,有效性和可靠性。

## 1 图像清晰度评价函数

### 1.1 熵函数

图像的灰度熵作为一种图像清晰度评价标准,反映图像信息量丰富程度。但是图像的熵函数对图像的对比度有一定的要求,使用范围窄,且易受外界环境的影响,灵敏度低,易引起焦点的误判<sup>[1-2]</sup>。

### 1.2 频谱类函数

频谱类函数将图像先变换到频域,然后提取高频分量作为评判离焦程度的标准。频谱类函数灵敏度高,但计算量大,难以满足实时性要求<sup>[1-2]</sup>。

### 1.3 灰度梯度函数

清晰的图像比模糊的图像具有更丰富的边缘,而正焦的图像比离焦的图像清晰,因此可用灰度梯度函数来提取图像的边缘。梯度函数易于实现,实时性比前两者好,可根据不同的调焦范围选择不同的

梯度函数,故其应用较为广泛。文中对以下几种常见的灰度梯度函数进行研究<sup>[1-5]</sup>。

以下公式中, $I(x,y)$ 表示图像  $I$  的像素  $(x,y)$  位置处的灰度值,图像的大小为  $M \times N$ 。

(1) 梯度向量平方函数(也称能量梯度函数)

$$F_{\text{Energy}} = \sum_x \sum_y \{ [I(x+1,y) - I(x,y)]^2 + [I(x,y+1) - I(x,y)]^2 \} \quad (1)$$

(2) Roberts 函数

$$F_{\text{Rob}} = \sum_x \sum_y \{ [I(x+1,y+1) - I(x,y)]^2 + [I(x+1,y) - I(x,y+1)]^2 \} \quad (2)$$

(3) Sobel 函数(基于 Sobel 的 Tenengrad 函数)

$$F_{\text{Ten}} = \sum_x \sum_y [I_x^2(x,y) + I_y^2(x,y)] \quad (3)$$

$I_x(x,y)$  和  $I_y(x,y)$  分别表示图像与垂直方向和水平方向 Sobel 算子的卷积。

(4) Brenner 函数

$$F_{\text{Bren}} = \sum_x \sum_y [I(x+2,y) - I(x,y)]^2 \quad (4)$$

(5) Variance 函数

$$F_{\text{Var}} = \sum_x \sum_y [I(x,y) - \mu]^2, \mu = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y I(x,y) \quad (5)$$

## 2 梯度阈值函数

图像成像过程中引入的噪声经过预处理后可被削弱但不能完全清除,残余的噪声对调焦函数有一定的影响。而且,图像的背景像素会增加图像梯度和调焦值的计算量,还会使调焦曲线灵敏度下降,导致调焦精度变低。此外,图像对比度低也会给调焦曲线的灵敏度带来影响。因此提出一种梯度阈值函数,即先对待调焦图像进行自适应阈值处理来减少噪声和背景像素的影响,然后对预处理后的图像采用梯度函数提取边缘,进行图像清晰度评价,提高自动调焦的实时性,灵敏度和抗噪声能力。

### 2.1 阈值的选择

图像局部方差  $\sigma^2(x,y)$  的分布突出表征了图像的边缘信息,边缘尖锐的区域方差大,平滑区域方差小,因此可以用局部方差区分图像的边缘像素与非边缘像素。在判断图像的某一像素  $(x,y)$  是否为边缘

像素时,采用该像素为中心的  $3 \times 3$  邻域内的图像局部方差  $\sigma^2(x,y)$  作为判断阈值。

$$\sigma^2(x,y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 [I(x+i,y+j) - \mu]^2 \quad (6)$$

$$\mu(x,y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 I(x+i,y+j) \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为  $3 \times 3$  邻域内的图像局部均值。

仅当该像素的灰度值  $I(x,y)$  大于局部阈值  $\sigma^2(x,y)$  时,才认为该像素为边缘像素。由于  $\sigma^2(x,y)$  仅考虑了  $3 \times 3$  邻域,对噪声敏感,而且,噪声会引起局部灰度值变大,导致对边缘像素的误判。因此应再选取一个阈值来抑制噪声的影响。

图像的标准差  $S$  可以区分图像的边缘区域,其本身也具有一定的滤波效果。图像的标准差  $S$  描述图像各像素偏离图像均值  $E$  的程度,反映了图像灰度的变化<sup>[6]</sup>。 $S$  越大表示图像灰度变化快,出现边缘的概率大, $S$  越小表示图像灰度变化缓慢,出现边缘的概率小。

$$S = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x,y) - E)^2} \quad (8)$$

文中以 Otsu 算法得到的、目标和背景分割的最佳阈值  $T$  代替图像均值  $E$  来计算新的标准差  $V$ 。阈值  $T$  求取公式详见参考文献[7]。

$$V = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x,y) - T)^2} \quad (9)$$

式中:  $V$  描述图像各像素偏离  $T$  的程度,反映图像灰度的变化。与  $S$  相比, $V$  更突出了目标灰度的变化。 $V$  越大,则图像出现目标边缘的概率大, $V$  越小,则图像出现目标边缘的概率小。新的标准差  $V$  考虑了整幅图像像素的贡献,对噪声不敏感,所以也具有一定的滤波效果。因此  $V$  作为全局阈值可以表征图像的整体噪声水平。按公式(6)、(9)计算的两种阈值进行比较,当  $\sigma^2(x,y)$  大于  $V$  时,认为该像素为边缘像素,对应的梯度保留,否则认为该像素为非边缘像素,其梯度是由于背景或者噪声干扰引起的,不予以计算。

$$G(x,y) = \begin{cases} \text{Grad}[I(x,y)], & \text{if } \sigma^2(x,y) > V \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $G(x,y)$  为梯度值;  $\text{Grad}[I(x,y)]$  表示计算该像素的灰度梯度。

局部阈值和全局阈值的共同作用可以较好地地区分边缘像素和非边缘像素,减少背景的影响,也可以使因噪声引起的局部变大的灰度值不参加计算,从

而降低噪声的影响。

文中算法对低对比度图像也具有一定的适用性。低对比度图像灰度变化缓慢,若用传统梯度算法直接求取梯度并计算调焦值,模糊图像和清晰图像的调焦值变化不明显,且易受噪声影响,难以进行调焦判断。而局部方差本身就有突出边缘的作用,新的标准差  $V$  中使用了最佳阈值  $T$ ,在突出目标边缘的同时也有抑制噪声的作用,能反映模糊图像和清晰图像边缘的变化,其调焦性能要比传统梯度算法好。

## 2.2 梯度阈值调焦算法计算步骤

(1) 使用 Otsu 算法计算图像的阈值  $T$ ,并按公式(9)计算全局阈值  $V$ 。

(2) 对一帧  $M \times N$  的图像,按从左到右从上到下的顺序依次取像素  $(x,y)$  (图像四周边界的像素除外),分别以  $(x,y)$  为中心,取  $3 \times 3$  邻域窗口,则整幅图像共可取  $(M-2)(N-2)$  个窗口。按公式(6)、(7)分别计算局部阈值  $\sigma_h^2(x,y)$ ,  $h$  的取值范围是  $1 \sim (M-2)(N-2)$ 。

(3) 比较两种阈值,当  $\sigma_h^2(x,y)$  大于  $V$  时,计算第  $h$  个  $3 \times 3$  邻域窗口中心像素  $(x,y)$  对应的梯度  $G_h(x,y)$ 。

(4) 采用灰度梯度调焦算法计算第  $h$  个窗口中心像素的调焦值,整幅图像的调焦值为  $(M-2)(N-2)$  个窗口中心像素的调焦值之和。

## 3 实验结果分析

实验中对几种不同类型的一系列由离焦到聚焦再到离焦的图像进行仿真。实验图像如图 1 所示,其

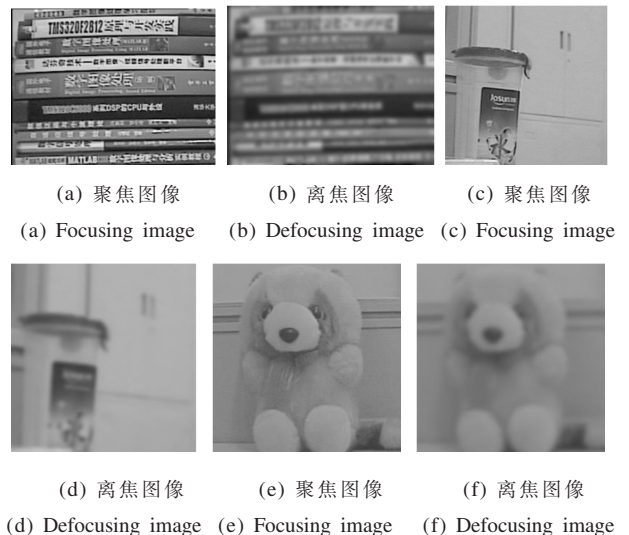


图 1 实验图像

Fig.1 Experiment images

中,(a)和(b)为高对比度图像;(c)和(d)为调焦区域中背景像素较多的图像;(e)和(f)为低对比度图像。以下仿真实验均在 Matlab7.0 环境下进行,为方便比较各调焦曲线的性能,对所有的调焦曲线都进行了归一化处理。

### 3.1 算法实时性分析

采用传统梯度调焦函数与梯度阈值调焦函数对图 1(a)、图 1(b)(大小为 320×240/帧,共 23 帧)这组图像各进行 10 次实验。表 1 为计算出的处理一帧图像的平均耗时。其中,  $T_{Sob}$  函数,  $T_{Rob}$  函数,  $T_{Bren}$  函数,  $T_{Energy}$  函数和  $T_{Var}$  函数分别表示 Sobel 阈值函数, Roberts 阈值函数, Brenner 阈值函数, Energy 阈值函数和 Variance 阈值函数。

表 1 处理一帧图像平均耗时的比较(单位:ms)

**Tab.1 Comparison of average time consuming for processing a frame of image (Unit:ms)**

Sobel function	Roberts function	Brenner function	Energy function	Variance function
124.57	116.15	105.54	111.41	217.39
$T_{Sob}$ function	$T_{Rob}$ function	$T_{Bren}$ function	$T_{Energy}$ function	$T_{Var}$ function
37.39	33.3	31.26	32.6	38.83

实验结果表明,各梯度阈值调焦函数处理一帧图像的平均耗时还不到它对应的传统梯度调焦函数的 1/3。其原因是,噪声和背景的存在会大大增加计算量,而梯度阈值函数通过引入阈值,区分目标边缘像素,忽略大多数背景像素使其不参加计算,削弱噪声引起的图像局部灰度值的变化,从而减少计算量。图像平均处理时间的大大减少,有利于调焦实时性的实现。

### 3.2 背景对调焦曲线的影响

实验图像采用一组调焦区域中背景像素较多的图像(图 1(c)、图 1(d),大小 256×256/帧,共 16 帧)。

由图 2 和图 3 的实验结果可以看出,在调焦区域中背景像素较多的条件下,传统梯度函数调焦曲线的陡峭度,单峰性和灵敏度均不如梯度阈值函数,特别是 Variance 函数的调焦曲线,几乎趋于一条直线,难以进行调焦的判断。而梯度阈值函数的调焦曲线波峰宽度窄,陡峭度高,具有很强的单峰性和较高的灵敏度。

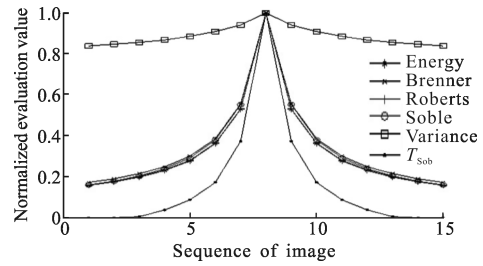


图 2 背景对  $T_{Sob}$  与传统梯度函数的影响

Fig.2  $T_{Sob}$  and traditional gradient functions affected by background

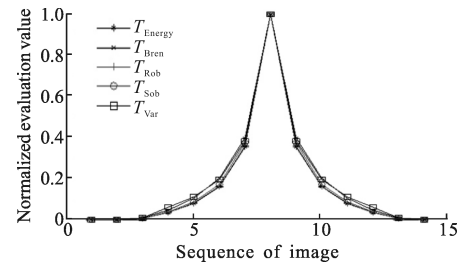


图 3 背景对梯度阈值函数的影响

Fig.3 Gradient threshold functions affected by background

### 3.3 对比度对调焦曲线的影响

实验图像采用一组低对比度图像(图 1(e),图 1(f),大小 256×256/帧,共 16 帧)。

图 4 及图 5 的实验结果表明,在低对比度条件下,传统梯度函数的调焦曲线波峰较宽,陡峭度低,平滑性差,灵敏度大大下降,特别是 Variance 函数的

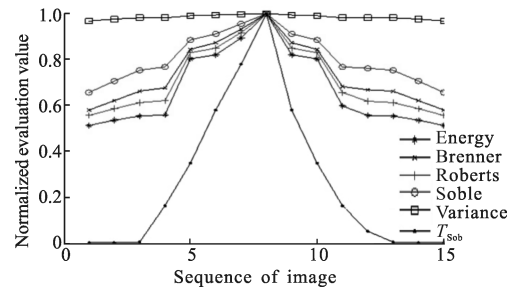


图 4 对比度对  $T_{Sob}$  与传统梯度函数的影响

Fig.4  $T_{Sob}$  and traditional gradient functions affected by contrast

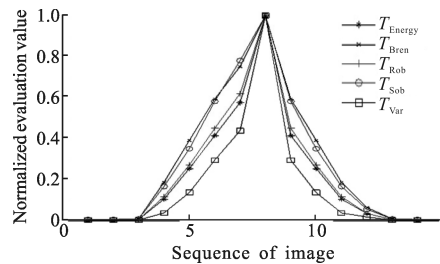


图 5 对比度对梯度阈值函数的影响

Fig.5 Gradient threshold functions affected by contrast

调焦曲线,几乎趋于一条直线,无法进行调焦;而梯度阈值函数的调焦曲线波峰稍宽,但陡峭度高,平滑性好,仍能保持着良好的单峰性和灵敏度。

### 3.4 抗噪性能分析

在 CCD 成像的过程中引入噪声主要是高斯噪声。故在图 1(c)、图 1(d)这组图像中加入均值为 0,方差为 0.01 的高斯噪声。

由图 6 可以看出,在噪声的干扰下,传统梯度函数的调焦曲线的单峰性和灵敏度远远不及  $T_{\text{Sob}}$  函数,尤其是 Energy 函数,Roberts 函数和 Variance 函数的调焦曲线,几乎成为一条直线,难以对图像进行评价。噪声对梯度阈值函数也有一定的干扰,但其干扰程度要比对传统的梯度函数低得多。从图 7 可以看到,在噪声的干扰下,梯度阈值函数的调焦曲线仍具有良好的单峰性和灵敏度。

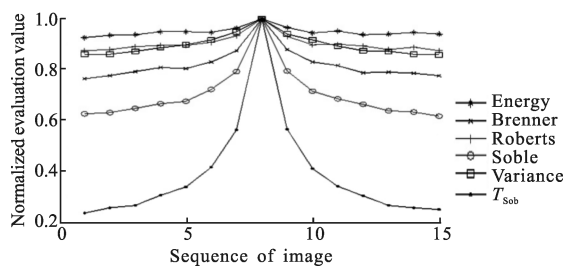


图 6  $T_{\text{Sob}}$  与传统梯度函数抗噪性能的比较

Fig.6 Comparison of anti-noise capability between  $T_{\text{Sob}}$  and traditional gradient functions

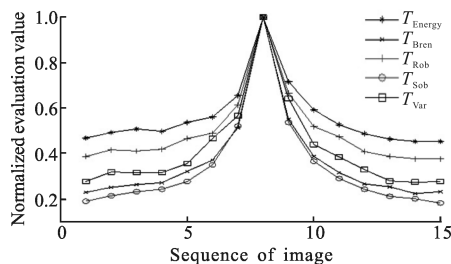


图 7 梯度阈值函数的抗噪性能

Fig.7 Anti-noise capability of gradient threshold functions

## 4 结束语

在光电跟踪系统中,CCD 采集到的图像大多含有噪声,且对比度低,背景像素较多。因此,用于光电跟踪系统中的自动调焦函数应当具有较强的抗噪性能,在对比度低,背景像素较多的情况下也应具有良好的单峰性和灵敏度。此外,为保证跟踪的有效性,自动调焦应尽可能实时进行。实验结果表明,文中提出

的梯度阈值调焦算法实时性好,受对比度和背景的影响小,具有良好的抗噪性能。该算法用于光电跟踪系统的自动调焦中时,其调焦性能优于传统梯度调焦算法。

### 参考文献:

- [1] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Wang Duanfang, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 464-468. (in Chinese)  
朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 464-468.
- [2] Zhao Hui, Bao Getang, Tao Wei. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 531-536. (in Chinese)  
赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 531-536.
- [3] Gao Zan, Jiang Wei, Zhu Kongfeng, et al. Auto-focusing algorithm based on Roberts gradient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 117-121. (in Chinese)  
高赞, 姜威, 朱孔凤, 等. 基于 Roberts 梯度的自动聚焦算法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 117-121.
- [4] Gao Zan. Study on the accuracy and stability of the auto-focus evaluation functions [D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese)  
高赞. 自动聚焦评价函数的精确度和稳定性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [5] Xu Guili, Liu Xiaoxia, Tian Yupeng, et al. Image clarity-evaluation-function method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 180-184. (in Chinese)  
徐贵力, 刘小霞, 田裕鹏, 等. 一种图像清晰度评价方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 180-184.
- [6] Sun Wei, Wang Zhijian. Fuzzy edge detection based on standard deviation gradient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 454-458. (in Chinese)  
孙伟, 王志坚. 基于标准差梯度的模糊边缘检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 454-458.
- [7] Chen Maoyuan, Wu Guoping, Du Zhishun, et al. An improved OTSU image segmentation method based on PSO [J]. *Microcomputer Applications*, 2009, 30(12): 13-17. (in Chinese)  
陈茂源, 吴国平, 杜志顺, 等. 基于 PSO 改进的 OTSU 图像分割方法 [J]. 微计算机应用, 2009, 30(12): 13-17.