

doi:10.3788/gzxb20134205.0605

基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法

张来线^a, 孙华燕^b, 郭惠超^a, 范有臣^a

(装备学院 a. 研究生院; b. 光电装备系, 北京 101416)

摘 要:从光学系统出发介绍了基于图像处理的离焦图像成像原理,分析了传统基于灰度梯度的自动调焦算法的缺陷——灰度梯度考虑不全面并且易受噪音影响.针对传统算法不足,提出了基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法.该算法通过计算中心像素的八邻域灰度梯度,以自动聚焦区域内各像素最大灰度梯度与最大灰度与最小梯度差值乘积之和作为新的评价函数,分析了该算法可以抑制噪音影响的原理;介绍了焦点搜索自适应变步长爬山算法原理和实现过程;最后进行算法性能实验验证.首先,利用不同算法对序列图像和加入高斯噪音的图像进行清晰度评价,结果证明该算法对含噪图像的清晰度评价准确,与传统算法相比该算法在抑制噪音方面具有优越性;其次,用不同聚焦算法进行序列图像自动调焦实验,结果显示传统算法会出现错误聚焦的情况,而该算法聚焦准确迅速,相比于传统算法具有明显优势.

关键词:自动调焦;灰度梯度;评价函数;爬山算法

中图分类号:TP274

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)05-0605-6

Auto Focusing Algorithm Based on Largest Gray Gradient Summation

ZHANG Lai-xian^a, SUN Hua-yan^b, GUO Hui-chao^a, FAN You-chen^a

(a. Department of postgraduate; b. Department of Optoelectronics Equipment,
Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The principle of defocused imaging was introduced based on optical system. The defects of classical auto focusing algorithms based on gray gradient were presented, which were not considering all the gray gradient and affected by noise easily. According to the defects of classical algorithms, a new auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation was proposed, which was realized through adding the product of the maximum and the difference of the maximum and the minimum of the eight neighborhood gray gradient of each pixel in the selected auto focusing region. The principle of restraining noise of the new algorithm was discussed. The principle and progress of adaptive variable step climbing algorithm for focusing position searching were introduced. At last, experiments were carried out to test the performance of the new algorithm. Firstly, by calculating the definition value of the original and Gaussian noise added sequences images using new algorithm and classical algorithms, and comparing the results, the advantage of restraining noise of the new algorithm was proved, for using the new algorithm, the definition evaluation of noisy image was calculated better compared to all the other algorithms. Secondly, experiments of auto focusing using different algorithms were carried out, and the results showed that using classical algorithms might focus wrong, while the new algorithm could focus correct and rapidly, which was an obvious advantage comparing to classical algorithms.

Key words: Auto focusing; Gray gradient; Evaluation function; Climbing algorithm

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2011AA7031024A)资助

第一作者:张来线(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为光电信息获取与处理. Email:zhanglaixian@126.com

导师:孙华燕(1963-),女,教授,博士,主要研究方向为光电信息获取与处理. Email:shy221528@vip.sina.com

收稿日期:2012-12-03;录用日期:2013-01-21

0 引言

调焦是成像系统中的重要环节,通过调焦使光学系统对目标准确对焦,从而获得目标清晰像.目前各种成像系统中采用的调焦方法分为三种,即焦点检测方法、测距方法和图像处理方法.图像处理方法是通过对某种数字图像处理算法获取图像清晰度特征值,根据这一特征值控制电机调整传感器位置,直到这一特征满足某一预先约定的条件为止.相比于焦点检测方法和测距法,数字图像处理自动聚焦技术聚焦更加智能,聚焦控制更加方便^[1].在数字图像处理自动聚焦技术中,图像清晰度评价函数是该技术的核心.图像清晰度评价函数决定了聚焦效果.一个好的聚焦系统应该具有性能良好的图像清晰度评价函数.

目前在数字图像清晰度评价函数中常用的评价函数包括三类:灰度梯度评价函数、频域函数和统计学函数,其中灰度梯度评价函数具有计算简单,评价效果好等优点.文献[2-10]分别对经典灰度梯度图像清晰度函数进行归纳分析,并根据具体情况提出了改进算法,获得了比经典算法效果更好的聚焦效果.但是经典清晰度评价函数和大多数改进的图像清晰度评价函数在评价过程中较少考虑噪音影响,从而使图像清晰度评价函数出现评价不准,甚至出现多峰等现象,影响自动聚焦效果.

本文在分析经典灰度梯度图像清晰度评价函数的基础上,针对其不足,通过分析孤立点噪音影响,提出了最大灰度梯度累加图像清晰度评价算法,并从原理和实验证明了该算法的优越性.

1 离焦图像成像原理

物体可以看作是由无数个光源组成的分布,这些光源通过光学系统映射为图像.光学系统为线性平移不变系统,成像过程可以描述为物体光源与光学系统点扩散函数的卷积,即

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中 $g(x,y)$ 为图像, $f(x,y)$ 为物体, $h(x,y)$ 为光学系统的点扩散函数, $n(x,y)$ 为加性噪音.对于衍射受限成像系统,点扩散函数反映了系统的衍射效应,对于有像差的系统则反映了衍射和像差的共同效应.当光学系统聚焦时,物方点光源映射为像方点光源,而离焦时,则在像平面上形成一个光斑^[2].如图1,点光源置于物平面原点,聚焦时在像平面B形成点像,而离焦时则在像平面A和像平面形成光斑,如果物平面放置平面物体,则物体各点的像在像平面B仍聚焦为点,各点组合从而形成完美的像;而

在像平面A和C各点成像为光斑,光斑互相重叠,图像细节丢失,成像模糊.

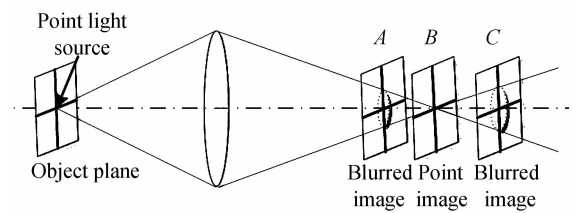


图1 点光源成像原理图

Fig. 1 Diagram of point light source imaging principle

实际光学成像系统相当于一个低通滤波器,其截止频率与离焦程度有关,离焦越严重,截止频率越低,反之越高.对应到图像清晰度表现为图像高频成分越高,图像细节越清楚,图像清晰度越高,反之则图像越模糊,图像清晰度越低^[11].图像高频成分对应到空域上为图像灰度梯度,所以灰度梯度与图像清晰度正相关.

2 灰度梯度图像清晰度评价函数

图像清晰度评价函数是用来描述图像清晰度的一个数学描述.图像清晰度评价函数应该具有:无偏性、单峰性、能反映离焦特性、较高的信噪比、计算量小,同时在对焦位置附近,调焦特性曲线较窄,更陡峭^[7].理想的图像清晰度评价函数随离焦程度的变化曲线如图2.

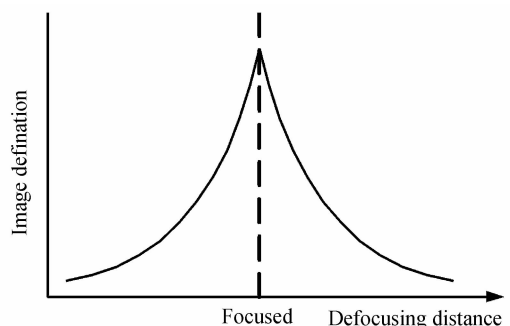


图2 理想的图像清晰度评价函数

Fig. 2 Ideal image definition evaluation function

灰度梯度函数是常用的图像清晰度评价函数之一,对于图像中的一个像素 $f(x,y)$,与其周围的八邻域像素具体位置关系如式(2).

$$\begin{bmatrix} f(x-1,y-1) & f(x-1,y) & f(x-1,y+1) \\ f(x,y-1) & f(x,y) & f(x,y+1) \\ f(x+1,y-1) & f(x+1,y) & f(x+1,y+1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于邻域像素与像素 $f(x,y)$ 的关系,常用的灰度梯度函数包括以下常见形式:

1) 绝对方差函数

$$F(k) = \sum \sum |f(x,y) - f(x+1,y)| \quad (3)$$

2) Roberts 梯度和函数

$$F(k) = \sum_x \sum_y [|f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)|] \quad (4)$$

3) 梯度向量平方函数

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \} \quad (5)$$

4) Brenner 函数

$$F(k) = \sum_x \sum_y [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 \quad (6)$$

5) Laplacian 函数

$$F(k) = \sum_x \sum_y [4f(x, y) - f(x, y+1) - f(x, y-1) - f(x+1, y) - f(x-1, y)] \quad (7)$$

6) Tenengrand 函数

$$F(k) = \sum_x \sum_y [S(x, y)]^2 \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} S(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \\ G_x(x, y) = f(x, y) - f(x+1, y) \\ G_y(x, y) = f(x, y) - f(x, y+1) \end{cases} \quad (9)$$

且 $S(x, y) > T$, T 是阈值。

这些评价函数在一定的情况下都具有比较好的效果,但是这些评价函数存在一定的缺陷,首先这些函数仅仅计算了图像中某些方向的灰度梯度,而实际的图像梯度可能是各个方向,并且在图像的不同地方图像梯度方向可能不同;其次,图像中存在各种各样的噪音点,梯度评价函数很容易受到影响。

针对以上评价函数的不足,本文充分考虑灰度梯度的八邻域相关性,通过计算像素 $f(x, y)$ 的八邻域灰度梯度,找出八邻域灰度梯度的最大值,并考虑噪音影响,提出新的改进图像清晰度评价函数。从而有效解决了传统基于灰度梯度的清晰度评价函数不足。

3 最大灰度梯度累加图像清晰度评价算法

像素 $f(x, y)$ 的八邻域灰度梯度为^[5]

$$\begin{cases} T_1 = |f(x-1, y-1) - f(x, y)| \\ T_2 = |f(x-1, y) - f(x, y)| \\ T_3 = |f(x-1, y+1) - f(x, y)| \\ T_4 = |f(x, y-1) - f(x, y)| \\ T_5 = |f(x, y+1) - f(x, y)| \\ T_6 = |f(x+1, y-1) - f(x, y)| \\ T_7 = |f(x+1, y) - f(x, y)| \\ T_8 = |f(x+1, y+1) - f(x, y)| \end{cases} \quad (10)$$

分别代表像素 $f(x, y)$ 灰度与其相邻 8 个像素灰度之间的关系,最大灰度梯度由公式(11)计算。

$$\max(T) = \max(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8) \quad (11)$$

由于在图像中孤立噪音点也与相邻像素之间存

在灰度梯度,如何减小这些灰度梯度的影响是评价函数需要重要考虑的问题。当存在孤立噪音点时,很容易在噪音点位置处获得最大梯度,但是对于噪音点来说,其八邻域素灰度梯度接近

$$\begin{cases} \max(T) \approx \min(T) \\ \max(T) - \min(T) \ll \max(T) \end{cases} \quad (12)$$

式中

$$\min(T) = \min(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8) \quad (13)$$

为像素的八邻域像素灰度梯度最小值。

根据图像边缘分割理论,如果一个像素是图像边缘,那么它的八邻域像素至少还有两个像素是图像边缘,所以其八邻域像素灰度梯度会有较大区别

$$\begin{cases} \min(T) \ll \max(T) \\ \max(T) - \min(T) \approx \max(T) \end{cases} \quad (14)$$

基于此,设计基于灰度梯度最大值累加(LGGS)的清晰度评价函数为

$$F(k) = \sum_1^N \max(T) \times [\max(T) - \min(T)] \quad (15)$$

式中 N 为聚焦区域所有像素数量。

对于孤立噪音点来说

$$\max(T) \times [\max(T) - \min(T)] \leq \max(T) \quad (16)$$

使其对评价函数的影响减弱,而对图像边缘点来说

$$\max(T) \times [\max(T) - \min(T)] \gg \max(T) \quad (17)$$

近似等于最大像素灰度梯度值的平方,增加了其对清晰度评价函数的影响,同时扩大边缘区域灰度像素与噪音点的灰度梯度差别,使评价函数的焦点峰值更加突出。

4 自适应变步长焦点搜索爬山算法

根据清晰度评价函数计算出聚焦区域内每个像素点的清晰度后,需要用搜索算法找出清晰度最好的聚焦点位置。聚焦点搜索算法要求收敛速度快,同时聚焦准确度高^[7]。本文采用自适应变步长爬山算法搜索聚焦点,系统当前位置为 A_i ,当前清晰度评价函数为 $F(i)$,移动一次所处位置为 A_{i+1} ,其清晰度评价函数为 $F(i+1)$,搜索移动步长为 L 。

搜索过程为:

a) 系统起始位置为远离焦点 A_i ,清晰度评价函数为 $F(i)$,以大步长 L 移动一次所处位置为 A_{i+1} ,其清晰度评价函数为 $F(i+1)$,若 $F(i)$ 和 $F(i+1)$ 没有明显区别,即满足式(18)条件,说明本次搜索距离准确焦距较远,搜索对调焦效果影响不大,则保持搜索方向不变,同时加大调焦步长 L 为 $2L$ 。

$$\left| \frac{F(i+1) - F(i)}{\max(F(i), F(i+1))} \right| < \text{threshold} \quad (18)$$

式中 threshold 为特定阈值,一般 threshold 取像素灰度的中值或均值,或其他根据特定情况进行计算

的加权数值. 取绝对值是为了抵消由于噪音引起评价函数微小抖动而产生方向误判.

b) 若 $F(i+1)$ 比 $F(i)$ 增大明显, 即满足式(19)条件, 表明上一次的步长 L 对调焦效果影响较大, 则保持聚焦搜索方向不变, 同时减小调焦步长 L 为 $L/2$.

$$\frac{F(i+1)-F(i)}{\max(F(i), F(i+1))} \geq \text{threshold} \quad (19)$$

c) 若 $F(i+1)$ 与 $F(i)$ 相比明显减小, 即满足式(20)条件, 说明聚焦点已经出现, 改变搜索方向, 调焦步长 L 变为 $L/2$.

$$\frac{F(i)-F(i+1)}{\max(F(i), F(i+1))} \geq \text{threshold} \quad (20)$$

重复 b)、c) 步骤, 直到搜索方向改变达到 3 次.

d) 此时搜索点已经在焦点附近, 改变搜索方向, 以最小步进距离 L_{\min} 开始搜索, 直到满足式(21)条件, 即出现拐点为止, 此时 $F(i)$ 为拐点, 即焦点位置.

$$F(i+1) \leq F(i) \quad (21)$$

搜索过程如图 3.

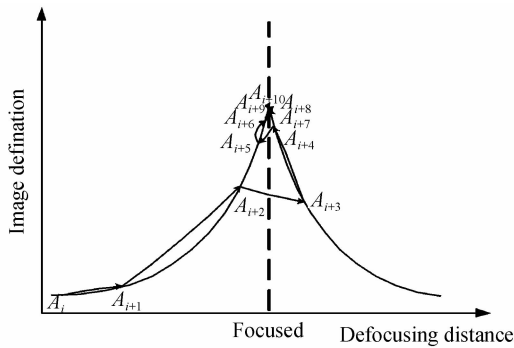


图 3 自适应变步长爬山算法搜索过程

Fig. 3 Focus position searching progress of adaptive variable step climbing method

5 自动调焦实验

采用分辨率为 640×480 的卫星模型序列场景作为实验图片, 如图 4 所示, 其中(a)和(b)分别为离焦图像和聚焦图像. 本实验根据具体实验情况采用图像中心区域 30% 为聚焦区域, 该区域覆盖整个目标且背景较干净.

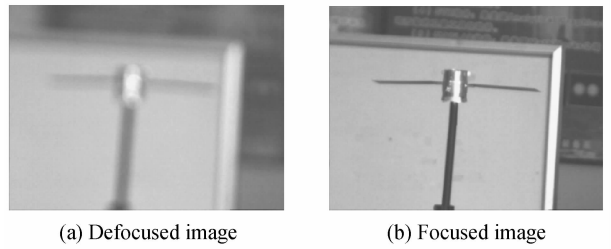


图 4 离焦和正焦时的卫星模型图像

Fig. 4 Defocused and focused images of satellite model

5.1 噪音抑制性能比较实验

为了验证本文算法相对于其他经典算法在清晰度评价过程中对噪音的抑制能力, 用不同清晰度评价函数对一组聚焦过程图像(图 5)和加入高斯噪音(数字图像中最常见的噪音, 这里设置高斯噪音均值为 0, 方差为 0.01)的图像进行清晰度计算.

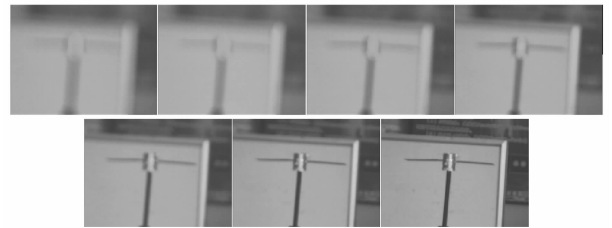


图 5 聚焦过程图片, 离焦量从第一幅图到第七幅图依次减小, 第七幅正焦

Fig. 5 Images of focusing process, the defocus distance becomes smaller from the first image to the last, and the last image is the focused image

计算过程中, Tenengrand 函数与梯度向量平方函数本质相同, 这里只分析梯度向量平方函数. 为了比较算法中对噪音的处理效果, 对直接进行像素八邻域灰度梯度最大值累加算法也进行了计算. 计算结果显示可以正确聚焦的算法有本文算法(LGGS)、直接灰度梯度最大值累加算法(DLGGS)、Roberts 算法、梯度向量平方算法, 计算得到不同离焦量条件下各清晰度评价算法对原始图像清晰度计算结果如表 1, 对加噪图像的清晰度计算结果如表 2.

表中归一化清晰度计算结果每行从左至右依次与图 5 中的图片对应. 对比表 1 和表 2 可以看出, 未加高斯噪音时各算法计算的清晰度与图像离焦情况严格一致, 当加入高斯噪音时, 其他三种清晰度评价

表 1 不同离焦情况下各评价函数对原始图像的清晰度计算结果

Table 1 Normalized definition value of original images at different defocus position using different evaluation functions

Evaluation function	Normalized definition value of different defocus position images						
LGGS	0.080535	0.088671	0.1188	0.154029	0.279842	0.500437	1
DLGGS	0.432665	0.454033	0.513898	0.566384	0.710209	0.864105	1
Roberts	0.392751	0.400949	0.463179	0.517845	0.667481	0.843076	1
Gradient vector	0.158805	0.168263	0.222486	0.283502	0.514669	0.856857	1

表 2 不同离焦情况下各评价函数对加噪图像的清晰度计算结果

Table 2 Normalized definition value of noisy images at different defocus position using different evaluation functions

Evaluation function	Normalized definition evaluation value of different defocus position images						
LGGS	0.746712	0.757907	0.76137	0.803294	0.822293	0.881553	1
DLGGS	0.874967	0.883238	0.882968	0.908802	0.920465	0.951626	1
Roberts	0.881743	0.880837	0.88447	0.910774	0.922635	0.956379	1
Gradient vector	0.916809	0.924884	0.916488	0.951976	0.955113	0.981176	1

算法在离焦情况下都出现不一致即评价错误的情况,而本文算法则与未加噪音时严格一致,证明本文算法较其他经典算法具有一定的噪音抑制能力。

5.2 聚焦性能实验

为了验证新评价算法的可靠性,在其他条件都相同,只改变算法的情况下对序列图像进行聚焦实验,每个序列为 120 张图片. 实验环境为 CPU: Pentium Dual-Core E5700@3.0 GHz, 内存 2 GB, 软件平台: Matlab R2011. 分别用不同的图像清晰度评价函数对序列图像进行评价,得到曲线如图 6 所示. 按照图例顺序依次为本文算法(LGGS)、Brenner 评价函数、绝对方差函数、Roberts 评价函数、梯度向量平方评价函数、Laplace 评价函数、直接灰度梯度最大值累加算法(DLGGS). 从结果可以看出绝对方差函数和 Laplace 评价函数完全无效, Brenner 评价函数呈鞍马状,最大清晰度点与焦点位置不符,灰度梯度函数聚焦点偏差较大,且焦点附近位置多峰现象严重,DLGGS 和 Roberts 评价函数聚焦点附近较宽且不够陡峭,导致爬升过程要慢的多,LGGS 评价函数则克服了这些缺点,评价函数严格单峰,且在焦点附近曲线陡峭,焦点附近图像清晰度差别较大,有利于迅速准确聚焦。

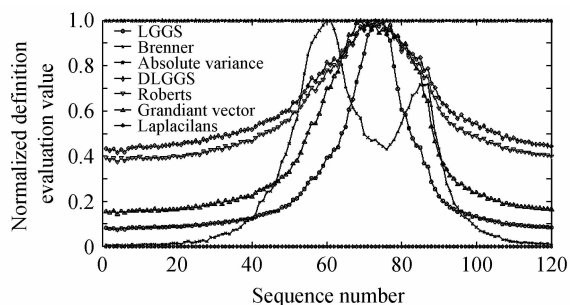


图 6 不同评价函数实测曲线

Fig. 6 Experiment curves of different evaluation functions

对 10 组序列图像进行聚焦,结果如表 3 所示,结果表明本文算法聚焦准确率要高于其他评价函数聚焦算法. 需要指出的是由于在评价算法中有最大值和最小值判断,增加了排序算法消耗,程序运行时间要高于其他评价算法,但是由于采用自适应变步长焦点搜索爬山算法,对 120 张序列图片序列进行聚焦平均搜索次数为 11 次,所需时间小于 5 s.

表 3 不同评价函数聚焦结果

Table 3 Focusing result of different evaluation functions

Evaluation Function	Correct focus time/s	Elapse time/s
LGGS	10	4.708
DLGGS	5	2.449
Roberts	5	1.803
Gradient vector	4	1.940

6 结论

基于图像灰度梯度最大值累加的图像清晰度评价函数可以有效反映图像清晰度,评价效果优于其他传统算法,利用本文算法结合自适应变步长爬山算法可以有效减少聚焦点搜索时间. 本文研究为下一部设计实现基于图像处理的自动聚焦系统提供了理论支撑。

参考文献

- [1] CHEN Guo-jin. Study on the auto-focusing technology of digital image and realization for an auto-focusing system[D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 10-12.
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: 10-12.
- [2] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai. Auto-focus apparatus with digital signal processor[C]. SPIE, 2005, **5633**: 416-423.
- [3] GAO Zan, JIANG Wei, ZHU Kong-feng, et al. An auto-adaptive algorithm to auto-aocusing[J]. Acta Optica Sinica, 2006, **26**(10): 1474-1478.
高赞, 姜威, 朱孔凤, 等. 一种自适应的自动聚焦算法[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1474-1478.
- [4] SUN Jie, YUAN Yue-hui, WANG Chuan-yong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion[J]. Acta Optica Sinica, 2007, **27**(1): 35-39.
孙杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动聚焦算法的分析与比较[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 35-39.
- [5] NI Jun, WEI Min, YUAN Jia-hu, et al. Efficient auto-focus algorithm for optical measurement system[C]. SPIE, 2009, **7283**: 728344.
- [6] HAN Rui-yu, WANG Jin-jiang, NIE Kai, et al. Adaptive autofocus technique under different contrast [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, **41**(2): 222-227.
韩瑞雨, 王晋僵, 聂凯, 等. 不同对比度下自适应的自动调焦新算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 222-227.
- [7] JIN Xue, MA Wei-hong. Study on image definition evaluation function in auto-focusing process[J]. Optical Instruments, 2012, **34**(1): 59-64.
金雪, 马卫红. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 光学仪器, 2012, **34**(1): 59-64.

- [8] WANG Chao, JIANG Yuan-da, ZHAI Guang-jie, *et al.* Study on auto focusing algorithm for microscope base on digital image processing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(6): 1290-1294.
王超, 蒋远大, 翟光杰, 等. 基于数字图像处理的自控显微聚焦算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(6): 1290-1294.
- [9] LIANG Min-hua, WU Zhi-yong, CHEN Tao. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest gradient method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 3016-3021.
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.
- [10] HU Feng-ping, CHANG Yi-lin, MA Yan-zhuo, *et al.* Development of video automatic focus method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1901-1906.
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.
- [11] GOODMAN J W. Introduction to fourier optics [M]. QIN Ke-cheng, LIU Pei-sen, CHEN Jia-bi, *et al.* transl, 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2006, 9: 114-116.
Joseph W. Goodman, 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧等译. 第3版 [M]北京: 电子工业出版社. 2006, 9: 114-116.

• 下期预告 •

斯托克斯矢量法在全光纤电流传感器中的应用

黄爱显¹, 张昊^{1,2}, 邱怡申¹, 王宁³, 李高明¹, 陈书明², 宋磊²

(1 福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室; 福建省光子技术重点实验室, 福州 350007)

(2 福建江夏学院, 福州 350007)

(3 威海教育教学研究中心, 山东 威海 264200)

摘要:针对目前全光纤电流传感器中光信号检测环节多是采用双路光强分析偏振度这一现状, 提出将斯托克斯矢量法应用于光纤电流传感器信号偏振度的演变分析, 在近似条件下, 推导得到基于穆勒矩阵的光纤电流传感器简化传输矩阵. 从琼斯矢量法和实验结果比较可知, 斯托克斯矢量法与琼斯矢量法的模拟效果十分接近, 此外它还具有传输矩阵中不存在复数、容易简化为稀疏矩阵以及最终偏振度只需计算总传输矩阵的第2个对角元即可等运算优势. 这些优势使得该方法不仅可以很好地进行理论分析, 还可以有效地简化分析过程和运算过程.

关键词:斯托克斯矢量法; 全光纤电流传感器; 穆勒矩阵; 琼斯矩阵; 偏振度