

文章编号: 0258-7025(2009)11-2989-08

# 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法

刘长庚 王大勇 张亦卓 赵 洁 万玉红 江竹青

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

**摘要** 在数字全息成像自动对焦算法实现中引入适用的导数计算方法, 形成了 4 种基于导数的对焦判据函数。通过分析在相移数字全息中记录全息图时引入的噪声在提取物光波复振幅过程中的传递, 研究了噪声对基于导数的自动对焦算法的影响, 给出了不同算法的综合评价。数值仿真和光学实验处理结果表明, Prewitt 梯度判据函数 (PRG), Tenebaum 梯度判据函数 (TEG) 与角谱再现算法结合可以形成快速可靠的自动对焦算法。

**关键词** 数字全息; 自动对焦; 导数判据; 角谱再现; 噪声

**中图分类号** TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2989

## Derivatives-Based Autofocus Algorithms for the Digital Holographic Imaging

Liu Changgeng Wang Dayong Zhang Yizhuo Zhao Jie Wan Yuhong Jiang Zhuqing

(College of Applied Mathematics & Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Four derivatives-based autofocus criteria functions are proposed through bringing several applicable computational methods of derivatives into the study of autofocus algorithms for the digital holographic imaging. By analyzing the transfer of noise produced during recording in phase shifting digital holography, the impact of noise on the derivatives-based autofocus algorithms is investigated. The results from the simulation and experiment indicate Prewitt gradient (PRG) and Tenebaum gradient (TEG) criteria functions, together with the angular spectrum reconstruction routine can form two types of efficient and reliable autofocus algorithms.

**Key words** digital holography; autofocus; derivatives-based criteria; angular spectrum reconstruction; noise

### 1 引 言

数字全息成像是随着计算机和 CCD 技术发展而产生的一种新的全息成像技术, 通过 CCD 记录全息图、用数字再现的方法代替传统光学再现物光波, 实现了全息的记录、存储和再现全过程的数字化。在力学测量、形貌和变形测量、细胞培养观测、微电路检测、信息加密等方面, 数字全息能够充分发挥其特点和优势, 有着广泛的应用前景<sup>[1~9]</sup>。

虽然数字全息成像中再现过程都是由计算机完成的, 但是对于再现距离, 传统的方法是根据测量距

离不断尝试来确定的。而自动对焦方法只需知道大致的距离就可以利用对焦算法由计算机寻找最佳再现距离。不仅大大节省了时间, 降低了对实际测量精度的要求, 同时也为利用数字全息成像实现实时三维观测和显示提供了有效途径, 成为数字全息技术的重要研究内容。

要实现自动对焦, 关键是要寻找合适的像质评价函数, 也就是对焦判据函数。在光学显微成像领域中, 已经形成了多种基于导数的对焦判据函数, 受到了广泛的研究。其中平方梯度判据函数 (SQG)

收稿日期: 2008-12-26; 收到修改稿日期: 2009-02-09

基金项目: 北京市市属市管高校人才强教计划 (KZ200910005001) 和北京市教育委员会科技发展计划重点项目资助课题。

作者简介: 刘长庚 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学信息处理与数字全息技术等方面的研究。

E-mail: liuchanggeng34@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王大勇 (1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学存储和光学信息处理等方面的研究。

E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

对焦效果比较好<sup>[10]</sup>, Tenebaum 梯度判据在再抽样的条件下非常适合对焦算法<sup>[8]</sup>。Yu 等<sup>[11]</sup>研究了噪声对判据函数的影响,发现平方梯度判据函数和 Tenebaum 梯度判据函数(TEG)的抗噪能力比较强,而平方拉普拉斯判据函数的抗噪能力较差。在对这类判据函数的研究中,发现不同的判据函数都可归纳为是由一阶或二阶偏导数的计算方法不同所致。那么用其他一些适用的导数计算方法可能会形成具有优越性能的判据。

同时,数字全息成像中的自动对焦与光学显微成像自动对焦相比有不同的特点,它不是通过机械装置扫描实现对焦的,而是利用算法再现出不同位置的像,该像包含物体振幅和相位信息,然后用判据函数评价这些像,最后确定最佳再现像。因此在光学显微成像自动对焦中得出的结论不一定会适用数字全息成像中的自动对焦。Ferraro 等<sup>[12]</sup>提出通过测量全息图条纹移动量对再现距离进行调整,但这种方法一开始就需要通过手工或机械装置比较精确地聚焦。Liebling 等<sup>[13]</sup>将小波变换的方法引入到数字全息成像中,提出了菲涅耳小波变换聚焦判据函数。这种判据具有较高的抗噪声能力,然而计算复杂而且耗时较长。虽然 Dubois 等<sup>[14]</sup>提出并从理论上证明了振幅模判据,但是这种判据对噪声敏感。目前也有学者将基于导数的对焦判据函数引入到了数字全息成像中的自动对焦的研究中,比如 Langehanenberg 等<sup>[15]</sup>将平方梯度与平方拉普拉斯判据函数应用到细胞的自动对焦中,然而噪声对这类判据函数的影响有待进一步研究。

本文在数字全息成像自动对焦算法实现中引入适用的导数计算方法,形成了 4 种基于导数的对焦判据函数。分析了在相移数字全息中记录全息图时引入的噪声在提取物光波复振幅过程中的传递。通过数值仿真和光学实验,研究了噪声对基于导数的自动对焦算法的影响,并给出了算法的综合评价。

## 2 数字全息成像中的数值再现

在数字全息成像过程中,激光束照射到物体上,经物体透射或反射的光场传播到 CCD 平面,与引入的参考光在 CCD 平面干涉,并被 CCD 采集到,如图 1 左侧虚线框所示。这是记录过程。CCD 平面上的光场强度可以表示为

$$I(x, y; 0) = |O(x, y; 0) + R(x, y; 0)|^2, \quad (1)$$

其中  $O(x, y; 0)$  与  $R(x, y; 0)$  分别是物光波和参考光波在 CCD 平面上的复振幅分布,实际应用中参考

光多为平面光波。图 1 中  $O(x, y; d)$  为像平面上的物光场的复振幅分布。

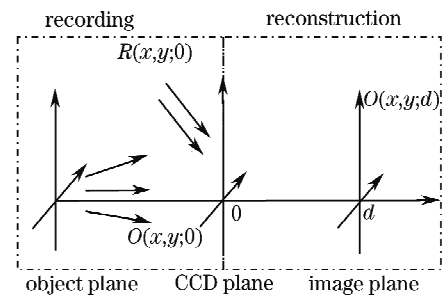


图 1 数字全息中记录与再现过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of recording and reconstruction in the digital holography

$O(x, y; d)$  的数值再现分为两步。第一步通过参数相位提取程序或相移技术<sup>[16,17]</sup>,从(1)式中提取出物光场的复振幅  $O(x, y; d)$ 。第二步则是通过计算瑞利-索末菲衍射积分公式将像平面上的物光场的复振幅  $O(x, y; d)$  再现出来,如图 1 右侧虚线框所示。这是数值再现过程。采用角谱再现算法再现的  $O(x, y; d)$  为:

$$O(x, y; d) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} d [1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2]^{1/2} \right\} \mathcal{F} [O(x, y; 0)] \right\}, \quad (2)$$

其中  $f_x$  与  $f_y$  代表空间频率,  $d$  为再现距离,  $\lambda$  为使用的激光波长,  $\mathcal{F}$  与  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示离散傅里叶变换与逆变换。这种算法能保证不同再现距离的再现像的像素间隔不变,因而适合自动对焦。对于再现距离  $d$  的确定,传统的方法是根据测量值,不断地尝试再现,通过肉眼观察再现像的质量来确定最佳再现距离。数字全息的数值再现使通过算法寻找最佳再现距离成为可能。要实现自动对焦,首先必须寻找评价像质的量化函数,也即对焦判据函数。当像质最好时,判据函数达到全局最大值或最小值,计算机依此来确定最佳再现距离。

## 3 基于导数的对焦判据函数

这类判据函数的依据是图像像质越好,含有的高频成分越丰富。高频成分对应着图像的边缘,高频成分越丰富,图像边缘越锐利。通过适当的方法提取这些边缘,对这些边缘求和所得的值在图像像质越好时应该越大。为了加强边缘的作用,通常是求边缘的平方和。提取边缘主要是通过对图像求一阶导数或二阶导数实现的,因此对焦判据函数可以分为基于一阶导数的判据函数与基于二阶导数的判

据函数。判据函数处理的对象都是不同位置的再现像的强度。为了行文的方便,不同位置的再现像的强度都表示为

$$I(x, y) = |O(x, y; d)|^2, \quad (3)$$

约定图像的大小为  $M\text{pixel} \times N\text{pixel}$ 。

### 3.1 基于一阶导数的判据函数

由于图像是二维矩阵,需要先分别求出  $x$  方向与  $y$  方向上的一阶偏导数,然后再取平方和。这种方法类似于求梯度再取平方和。因此这类算法一般又称为梯度判据函数。常用的梯度判据有平方梯度判据函数和 Tenebaum 梯度判据函数。SQG 判据函数先计算相邻像素灰度差来求水平和垂直方向的

一阶偏导数,然后再取平方和<sup>[18]</sup>。而 TEG 判据函数是将图像与 Sobel 算子卷积,然后对计算结果求平方和<sup>[18]</sup>。通过改变一阶偏导数的计算方法,得到了两种不同的判据函数。首先,在数字图像处理中,用 Prewitt 算子与图像卷积也能很好地提取出图像的边缘来。提出用这种方法形成判据函数,称为 Prewitt 梯度判据函数(PRG)。其计算方法是将图像与 Prewitt 算子卷积,将结果平方再求和<sup>[19]</sup>

$$\text{PRG} = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} P_x^2 + P_y^2, \quad (4)$$

其中  $P_x$  与  $P_y$  为图像分别与垂直方向 Prewitt 算子和水平方向 Prewitt 算子卷积的结果

$$P_x = [I(x+1, y-1) + I(x+1, y) + I(x+1, y+1) - I(x-1, y-1) - I(x-1, y) - I(x-1, y+1)]^2, \quad (5)$$

$$P_y = [I(x-1, y+1) + I(x, y+1) + I(x+1, y+1) - I(x-1, y-1) - I(x, y-1) - I(x+1, y-1)]^2. \quad (6)$$

其次,利用傅里叶变换的微分性质可以求函数的导数<sup>[20,21]</sup>,在离散的情况下可以用快速傅里叶变换实现偏导数的数值计算。对于一维函数,用这种方法求导具有良好的抗噪能力<sup>[21]</sup>,将其应用到二维的全息图像中,形成另一种新的基于一阶导数的判据,称之为快速傅里叶梯度判据函数(FFG)。FFG 判据函数是利用傅里叶变换的微分性质计算图像中各点的一阶偏导数,取模的平方再求和

$$\text{FFG} = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} |F_x|^2 + |F_y|^2, \quad (7)$$

其中  $F_x$  与  $F_y$  分别为图像垂直方向和水平方向上的一阶偏导

$$F_x = \mathcal{F}^{-1}\{j2\pi f_x \mathcal{F}[I(x, y)]\}, \quad (8)$$

$$F_y = \mathcal{F}^{-1}\{j2\pi f_y \mathcal{F}[I(x, y)]\}, \quad (9)$$

其中  $f_x$  和  $f_y$  分别为垂直方向和水平方向上的频谱分量。因为求解的结果是复数,所以判据函数先取模再求平方和。

### 3.2 基于二阶导数的判据函数

这类判据需要先分别求出图像  $x$  方向与  $y$  方向上的二阶偏导数。这种方法类似于做拉普拉斯运算。因此这类算法一般又称为拉普拉斯判据函数。常用的拉普拉斯判据有绝对值拉普拉斯判据函数(ASL)和差分拉普拉斯判据函数(D5L)。ASL 判据函数求出图像垂直方向和水平方向上的二阶偏导

数再求平方和<sup>[18]</sup>。D5L 判据函数是将图像与一种拉普拉斯算子卷积,再求平方和<sup>[15]</sup>。通过改变二阶偏导数的计算方法,得到了两种不同的判据函数。首先,在数字图像中提取边缘时经常会用另一种拉普拉斯算子<sup>[19]</sup>,且效果比较好,我们提出用这种方法形成对焦判据,因为计算式中含 9 项,称之为 D9L 判据函数,与 D5L 判据函数区别。计算方法为

$$\begin{aligned} \text{D9L} = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} [ & 8I(x, y) - I(x, y-1) - \\ & I(x, y+1) - I(x-1, y) - I(x+1, y) - \\ & I(x-1, y-1) - I(x-1, y+1) - \\ & I(x+1, y-1) - I(x+1, y+1)]^2. \end{aligned} \quad (10)$$

其次,与 3.1 小节中的 FFG 的形成一样,利用快速傅里叶变换算法计算图像各点的二阶偏导,形成了快速傅里叶变换拉普拉斯判据函数(FFL)。其计算方法为

$$\text{FFL} = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} |E_x|^2 + |E_y|^2, \quad (11)$$

其中  $E_x$  与  $E_y$  分别为图像垂直方向和水平方向上的二阶偏导数

$$E_x = \mathcal{F}^{-1}\{(j2\pi f_x)^2 \mathcal{F}[I(x, y)]\}, \quad (12)$$

$$E_y = \mathcal{F}^{-1}\{(j2\pi f_y)^2 \mathcal{F}[I(x, y)]\}, \quad (13)$$

因为求解的结果是复数,判据函数取模的平方再求和。

#### 4 噪声传递分析

为了研究记录全息图时引入的噪声对判据函数的影响,有必要先研究噪声对从这些全息图提取出的复振幅的影响。本文使用的实验数据是用四步相

移的方法获得的物光场复振幅,以四步相移为例来分析加性噪声对复振幅的影响。设依次记录的 4 张全息图的强度分别为

$$I_1 = |O|^2 + |R|^2 + O^*R + OR^* + n_1, \quad (14)$$

$$I_2 = |O|^2 + |R|^2 + O^*R\exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) + OR^*\exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) + n_2, \quad (15)$$

$$I_3 = |O|^2 + |R|^2 + O^*R\exp(j\pi) + OR^*\exp(-j\pi) + n_3, \quad (16)$$

$$I_4 = |O|^2 + |R|^2 + O^*R\exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) + OR^*\exp\left(-j\frac{3\pi}{2}\right) + n_4, \quad (17)$$

提取的复振幅的表达式为:

$$\begin{aligned} U_1 &= (I_2 - I_1) + (I_3 - I_2)\exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) + (I_4 - I_3)\exp(j\pi) + (I_1 - I_4)\exp\left(j\frac{3\pi}{2}\right) \\ &= OR^*[\exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) - 1] + (n_2 + n_3 - n_1 - n_4) + j(n_3 + n_4 - n_1 - n_2), \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $O$  为 CCD 平面上的物光波的复振幅,而  $R$  与  $R^*$  分别为 CCD 平面上的参考光波的复振幅及其共轭。 $n$  为记录时引入的噪声包括 CCD 量化噪声、寄生噪声等<sup>[22]</sup>。从(18)式可知记录时引入的噪声对提取的物光场的实部和虚部都会造成影响。

#### 5 数值仿真实验

数值模拟实验采用同轴相移光路依次记录 4 张全息图。参考光为平面光波,在 CCD 平面上的相位依次增加  $\pi/2$ 。使用的激光波长为 632.8 nm。模拟的物光的复振幅分布是大小为 3.3 mm×3.3 mm 的标准数字图像,像素数为 512 pixel×512 pixel,如图 2(a)所示。CCD 的像素大小设为 6.45  $\mu\text{m}$ ×6.45  $\mu\text{m}$ ,离物平面的距离为 80 mm。因此再现时

最佳再现像对应的再现距离为 80 mm。图 2(b)是 4 张全息图中的 1 张。应用(18)式得到了在 CCD 平面上的物光波复振幅及其光强分布,如图 2(c)所示。

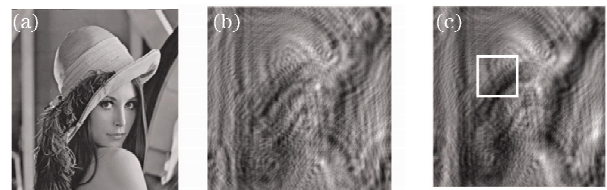


图 2 数值仿真使用的数据。(a)像面复振幅分布;(b)全息图;(c)相移法提取的 CCD 平面上的物光场强度分布  
Fig. 2 Data used in simulation. (a) Amplitude distribution of simulated image; (b) one hologram; (c) intensity distribution of the object wave on CCD plane

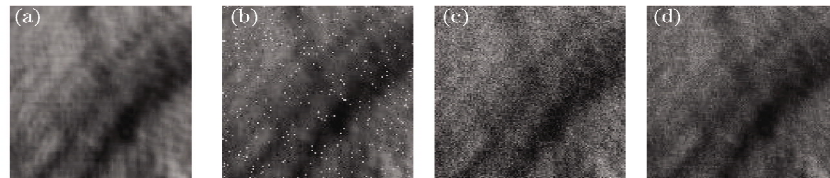


图 3 不加噪声和加入不同噪声后,图 2(c)中白框区域对应的物光场强度分布。

(a)没有噪声;(b)椒盐噪声;(c)高斯噪声;(d)泊松噪声

Fig. 3 Region bounded by the white rectangle in Fig. 2(c) without and with noises. (a) Without noise,

(b) salt and pepper noise; (c) Gaussian noise; (d) Poisson noise

为了模拟记录时噪声对复振幅的影响,根据第 4 节的分析,实部和虚部中都加入随机噪声。研究了椒盐噪声、高斯噪声和泊松噪声对焦算法的影响。图 3(a)是图 2(c)中白框区域的放大图。图 3(b), (c)与(d)分别展示了受椒盐噪声、高斯噪声和泊松

噪声污染的物光场强度分布的一部分。图 4 (a)为没加噪声时再现距离为 80 mm 时的再现像。图 4 (b), (c)与(d)分别为受椒盐噪声、高斯噪声和泊松噪声时再现距离为 80 mm 时的再现像。



图 4 CCD 平面上的物光场不加噪声和加入不同噪声后,再现距离为 80 mm 时的再现像

(a)没有噪声;(b)椒盐噪声;(c)高斯噪声;(d)泊松噪声

Fig. 4 Reconstructed images from the object wave on CCD plane without and with noises when  $d=80$  mm

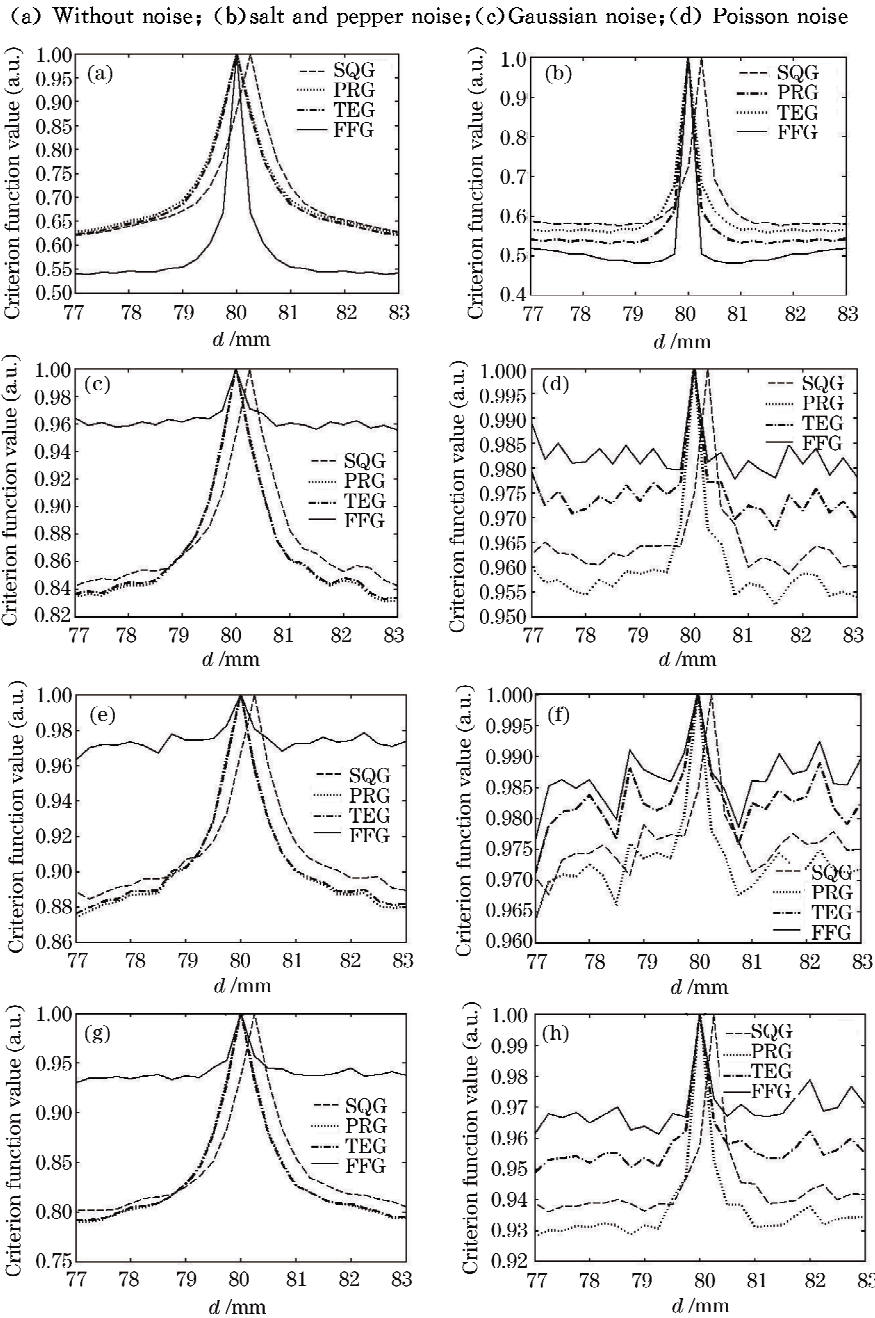


图 5 CCD 平面物光场不加噪声和加入不同噪声后,判据函数随再

现距离变化的曲线(a)和(b)没有噪声;(c)和(d)椒盐噪声;(e)和(f)高斯噪声;(g)和(h)泊松噪声

Fig. 5 Curves of criteria functions dependent on  $d$  when the object wave on CCD plane is and is not subjected to noises

(a) and (b) Without noise;(c) and (d) salt and pepper noise;(e) and (f) Gaussian noise,(g) and (h)Poisson noise

图 5 给出了复振幅不含噪声和含上述 3 种噪声时对焦判据函数随再现距离  $d$  的变化曲线。为了便于比较,这些对焦曲线都做了归一化处理且  $d$  的变化步长都为 0.25 mm。图 5(a)和(b)是未染噪声时画出的对焦曲线,(c)和(d)是椒盐噪声时画出的对焦曲线,(e)和(f)是高斯噪声时画出的对焦曲线,(g)和(h)是有泊松噪声时画出的对焦曲线。

按照文献[18]给出的评价方法对不同条件下得到的对焦曲线进行了综合评价。评价指标包括偏差、单峰性、主峰锐度和时间。偏差表示由对焦算法获得的再现距离与准确的再现距离的差距,偏差越小,对焦算法越小。单峰性指对焦曲线在对焦范围内次级峰的多少,越少越好。主峰锐度是指主峰的尖锐程度,越尖锐说明对焦曲线越好,可以通过肉眼看出。而时间则是运行一次对焦程序所花的时间。使用的计算机配置为 1.79 GHz CPU,512 MB 内存,用 Matlab 7.0 编制程序。对于主峰锐度给出了排名,而其他 3 个指标给出具体的数值。

本文给出了不同条件下 8 种对焦判据函数曲线各项指标的值。对比图 5(c)和(d)与图 5(g)和(h)可以看出有椒盐噪声时画出的对焦曲线与泊松噪声时画出的对焦曲线几乎一致,因此只给出其中一种情况下的评价。表 1 给出了无噪声时对焦曲线的各项指标,表 2 给出了含高斯噪声时对焦曲线的各项指标,而表 3 是有泊松噪声时对焦曲线的各项指标。为衡量噪声的影响,在评价的过程中,除了比较各项指标的绝对量外,更重要的是看加噪前后指标量的变化情况。

分别将表 2,表 3 与表 1 对比可知,PRG 与 TEG 在加噪前后不仅毫无偏差,单峰性与主峰锐度基本保持不变,且运行快,因此是最佳的对焦算法。D5L 与 D9L 虽然在加噪前后也毫无偏差,锐度基本不变且运行时间短,但是单峰性受噪声影响比较明

表 1 无噪声时对焦曲线的各项指标的数值  
Table 1 Quantitative appraisal of autofocus curves without noise

Criterion	Aberration /mm	Unimodality	Sharpness	Time /s
SQG	0.25	0	6	10.5
PRG	0	0	6	13.5
TEG	0	0	6	13.7
FFG	0	0	4	49.2
ASL	0.25	0	5	11.2
D5L	0	0	2	14.3
D9L	0	0	2	14.8
FFL	0	0	1	51.2

表 2 含高斯噪声时的对焦曲线各项指标的数值  
Table 2 Quantitative appraisal of autofocus curves with Gaussian noise

Criterion	Aberration /mm	Unimodality	Sharpness	Time /s
SQG	0.25	1	5	10.5
PRG	0	1	5	13.5
TEG	0	1	5	13.7
FFG	0	6	8	49.2
ASL	0.25	5	2	11.2
D5L	0	8	3	14.3
D9L	0	5	1	14.8
FFL	0	10	3	51.2

表 3 有泊松噪声时的对焦曲线各项指标的数值  
Table 3 Quantitative appraisal of autofocus curves with Poisson noise

Criterion	Aberration /mm	Unimodality	Sharpness	Time /s
SQG	0.25	3	5	10.5
PRG	0	1	5	13.5
TEG	0	1	5	13.7
FFG	0	1	8	49.2
ASL	0.25	3	2	11.2
D5L	0	5	3	14.3
D9L	0	5	1	14.8
FFL	0	6	3	51.2

显,因此总体抗噪性能不如 PRG 和 TEG,但仍不失为比较好的判据函数。至于 FFG 与 FFL,虽然单峰性或主峰锐度严重下降,受噪声影响比较严重,且时间较长,但是加噪前后没有偏差,仍可以作为对焦判据使用。而 SQG 和 ASL 虽然在加噪前后锐度基本不变且运行时间短,单峰性受噪声影响比较小,表现出总体抗噪性能非常好,在加噪前后总有 0.25 mm 的偏差。而且由单峰性的变化可以看出,基于二阶导数的判据函数不如基于一阶导数的抗噪声能力强。需要指出的是 Matlab 语言是一种解释语言,程序运行的时间比用 c 或 fortran 慢得多。因此在对时间要求比较高的应用中,可以采用 c 或 fortran 这类比较低层的语言。为验证算法的可行性和模拟实验的结果,可以将这些对焦算法应用到实际全息图的再现中。

## 6 光学实验数据处理

数字全息实验中采用同轴相移光路记录 4 张全息图<sup>[18]</sup>,用压电陶瓷使参考光在 CCD 平面上的相位依次改变  $\pi/2$ 。使用的激光波长为 632.8 nm,物体是尺寸大约为 2 mm×2 mm×2 mm 的金属骰

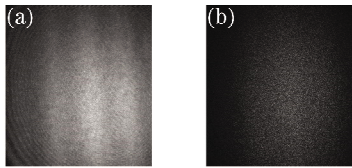


图 6 通过光学实验获得的数据。(a)全息图；  
(b)提取出的物光场的强度分布

Fig. 6 Data from the optical experiment, (a) Hologram grabbed by CCD in phase shifting holography; (b) intensity of the object field on CCD plane

子, CCD 像素大小为  $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ 。物体和 CCD 之间插入了一个焦距为 5 cm 的透镜, 测得 CCD 离像面的距离为 59.0 mm。图 6(a) 是 4 张全息图中的一张, 像素数为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。

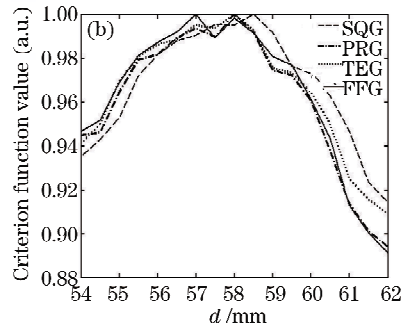
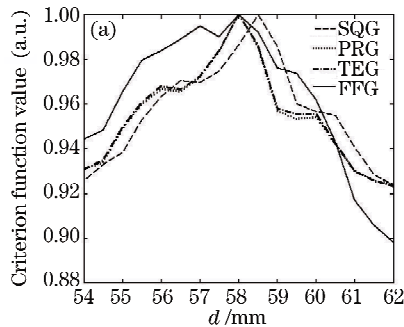


图 8 用实验数据得到判据函数随再现距离变化的曲线。(a)基于一阶导数的判据函数;(b)基于二阶导数的判据函数  
Fig. 8 Curves of criteria functions dependent on  $d$  obtained from the experimental data. (a) Criteria functions based on the first order derivative; (b) criteria functions based on the second order derivative

可以看出图 7(a) 出现了散焦, 图 7(b) 比图 7(c) 聚焦得更好一些。尽管由于成像系统有一定的景深, 无法断定图 7(b) 给出的再现像就一定是最佳的, 但是这至少说明 58.0 mm 比 58.5 mm 更接近最佳再现距离。为了给出偏差的量值, 以 58.0 mm 为最佳再现距离。

表 4 图 8 所示的对焦曲线各项指标的量值

Table 4 Quantitative appraisal of autofocus curves in Fig. 8

Criterion	Aberration /mm	Unimodality	Sharpness	Time /s
SQG	0.5	0	3	41.2
PRG	0	0	1	54.3
TEG	0	0	1	55.5
FFG	0	1	4	190.0
ASL	0.5	0	8	47.2
D5L	0	1	5	55.1
D9L	0	0	5	56.0
FFL	1	0	5	195.0

由表 4 可知, PRG 与 TEG 不仅无偏差, 单峰性与主峰锐度最好, 且运行时间快, 因此是最佳的对焦算法。D5L 和 D9L 虽然主峰锐度不如 PRG 和

图 6(b) 是提取出的物光场的强度分布。图 7(a), (b) 与 (c) 分别是再现距离为 57.0 mm, 58.0 mm 和 58.5 mm 时的再现像。

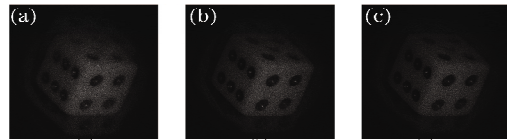


图 7 不同再现距离对应的再现像。(a)57.0 mm;  
(b)58.0 mm;(c)58.5 mm

Fig. 7 Reconstructed images with different reconstruction distances. (a) 57.0 mm; (b) 58.0 mm; (c) 58.5 mm

图 8 给出了用在实验中获得复振幅画出的对焦判据函数随再现距离  $d$  变化的曲线。同样对这些对焦曲线做了归一化处理且  $d$  的变化步长都为 0.25 mm。

TEG, 但是没有偏差且运行时间短, 因此也是比较好的对焦判据函数。FFG 虽然主峰锐度不如 PRG 和 TEG 好, 运行时间长, 但是也没偏差, 因此仍可以作为一种对焦判据函数使用。而 FFL 不仅主峰锐度不如 PRG 和 TEG 好, 运行时间长, 而且出现了比较大的偏差。SQG 与 ASL 都有一定的偏差, 但 SQG 主峰锐度比 ASL 要好。总体上看, 基于一阶导数的判据函数要比基于二阶导数的判据函数抗噪声的性能好。虽然 FFL 出现了比较大的偏差, 而在仿真实验中没有偏差, 但是仿真实验结果表明 FFL 抗噪声能力差, 因此在使用实际数据时噪声使得 FFL 曲线的次峰超过了主峰而出现了偏差。由于光学实验使用的是三维物体, 所有对焦曲线都有不同程度的展宽, 如图 8(a) 和 (b) 所示。因为三维物体的成像可以看成是组成该物体的各层面在成像平面的叠加。在给定的再现距离下, 只有一部分层面的像是聚焦的, 其他层面的像都会出现不同程度的散焦, 也就是会出现三维特性造成的串扰, 从而使得曲线有所展宽。虽然如此, 噪声对从实验数据得到的对焦曲线的影响与仿真结果吻合。因此光学实验

的结果与仿真的结果是基本一致的。

## 7 结 论

将一些比较适用的导数计算方法引入到数字全息成像自动对焦算法的研究中,形成了4种基于导数的对焦判据函数。并将提出的判据函数和常用的几种判据函数,在数字全息成像中进行了系统的研究。数值仿真模拟和实验结果表明,PRG和TEG与角谱再现算法结合,不仅抗噪能力强,且时间开销小,因此是可靠且高效的对焦算法。D5L和D9L尽管抗噪能力不如PRG与TEG,但是没有偏差且运行时间短,因此也是比较好的对焦判据函数。SQG与ASL始终有一定的偏差,而SQG抗噪声能力比较强。FFG和FFL尽管无噪声时效果最好,但易受噪声影响,运行时间都比较长。总体上看,基于一阶导数的判据函数抗噪声的性能要比基于二阶导数的判据函数好。

致谢 感谢英国谢菲尔德大学张福才博士提供的实验数据。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Caojin, Zhai Hongchen, Wang Xiaolei *et al.*. Three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object by digital holography with short-coherence light source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 218~223  
袁操今,翟宏琛,王晓雷等.采用短相干光数字全息术实现反射型微小物体的三维形貌测量[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 218~223
- 2 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 570~574  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等.数字全息图再现像的分析计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 570~574
- 3 Zhang Yan, Wei Gongxiang, Guo Chengshan. Digital reconstruction of off-axis Fresnel holograms [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(11): 1384~1387  
张燕,魏功祥,国承山.离轴菲涅尔全息图的数字再现[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(11): 1383~1387
- 4 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. On improving implementation of layered reconstruction of 3D field by digital holography[J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 2002, **20**(4): 519~523  
赵建林,谭海蕴.电子学全息术用于三维物场分层再现的实验实现[J]. *西北工业大学学报*, 2002, **20**(4): 519~523
- 5 Liu Cheng, Li Yinzhu, Li Liangyu *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1024~1026  
刘诚,李银柱,李良钰等.数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 1024~1026
- 6 Ji Jin, Huang Fei, Wang Liang *et al.*. Information encryption based on digital holography and phase retrieve algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1408~1412  
季瑾,黄飞,王亮等.利用全息和相位恢复算法实现信息加密[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1408~1412
- 7 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 56~61  
邸江磊,赵建林,范琦等.数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 56~61
- 8 Feng Zhongyao, Jia Fang, Zhou Jinghui *et al.*. Three-dimensional surface shape measurement of big objects by image splicing in digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2017~2021  
冯忠耀,贾昉,周景会等.数字全息中利用图像拼接测量大物体的三维形貌[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2017~2021
- 9 E. Cuche, P. Ruffieux, P. Poscio *et al.*. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 10 F. C. Groen, I. T. Young, G. Lighthart. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. *Cytometry*, 1985, **6**(2): 81~91
- 11 Yu Chao, Wang Boxiong, Zheng Hanqing *et al.*. Study of the effect of CCD noise on microscopic autofocus criteria functions [C]. *SPIE*, 2006, **6375**: 291~296
- 12 Pietro Ferraro, Giuseppe Coppola, Sergio De Nicola *et al.*. Digital holographic microscope with automatic focus tracking by detecting sample displacement in real time[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1257~1259
- 13 Michael Liebling, Michael Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(12): 2424~2430
- 14 Frank Dubois, Cedric Schockaert, Natacha Callens. Focus plane detection in digital holography microscopy by amplitude analysis [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 5895~5908
- 15 P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen *et al.*. Autofocus algorithms for digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for lives cell imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): 176~182
- 16 M. Liebling, T. Blu, M. Unser. Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(3): 367~377
- 17 I. Yamaguchi, J. I. Kato, S. Otha *et al.*. Image formation in phase-shifting digital holography and application to microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6177~6186
- 18 Y. Sun, S. Duthaler, B. J. Nelson *et al.*. Autofocusing in computer microscopy; selecting the optimal focus algorithm [J]. *Microsc. Res. Techniq.*, 2004, **65**(3): 139~149
- 19 Rafael Gonzalez, Richard Woods. *Digital Image Processing* [M]. 2<sup>nd</sup> ed., Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi transl., Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2003  
Rafael Gonzalez, Richard Woods. *数字图像处理* [M]. 第2版,阮秋奇,阮宇智译.北京:电子工业出版社, 2003
- 20 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Second Edition. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2006. 27~29
- 21 Zhi Qian, Chuli Fu, Xiangtuan Xiong *et al.*. Fourier truncation method for high order numerical derivatives [J]. *Appl. Math. Comput.*, 2006, **181**(2): 940~948
- 22 M. Gross, M. Atlan, E. Absil. Noise and aliases in off-axis and phase-shifting holography [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**: 1757~1766