

·信号与信息处理·

## 光场成像数字对焦清晰度评价函数的分析与改进

梁 欣

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

**摘 要:**光场成像数字对焦是图像处理中的重要技术。文中分析了数字对焦的基本原理,不同景深对应的对焦结果不同。针对传统的灰度方差评价函数对光场成像系统引入了过多的梯度信息,从而影响评价函数的灵敏性。就这一缺陷,提出一种改进的图像清晰度评价算法。该方法采用对图像局部区域进行评价,首先利用图像灰度梯度能量函数即Tenengrad函数来提取高频信息来评价图像的清晰度,再加入一个阈值区分边缘点和非边缘点来减少图像对比度不明显的区域对评价函数的影响。与其他几种传统梯度评价算法相比,该算法的优势在于取得了更高的识别精度。通过MATLAB平台进行了仿真,实验结果表明,该算法与传统的梯度算法相比,其灵敏度有很大的改善。

**关键词:**光场成像;数字对焦;微透镜阵列;图像清晰度;评价函数

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0056-04

## Analysis and Improvement on Digital Refocusing Sharpness Evaluation Function of Light Field Photography

LIANG Xin

(National Key Laboratory for Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The basic principle of digital refocusing is analyzed and different depth of field corresponds to different refocusing results. The traditional gray gradient evaluation function introduces too much gradient information in light field photography systems, which affects the sensitivity of the evaluation function. In order to solve the defect, an improved image sharpness evaluation algorithm is proposed. A local area in the image is evaluated by the method. Firstly, image gray gradient energy function named Tenengrad function is used to extract high-frequency information to assess the sharpness of the image. And then, a threshold is added to distinguish the edge and non-edge points to reduce the influence on the evaluation function from the area with low image contrast. Comparing with other traditional gradient evaluation algorithms, the advantages of this algorithm is to obtain higher recognition accuracy. Experimental results show that this algorithm has better sensitivity comparing with traditional gradient algorithm through MATLAB platform simulation.

**Key words:** light field photography; digital refocusing; micro-lens array; image sharpness; evaluation function

随着成像技术的快速发展,光场成像已经在国内外受到越来越多的关注,数字对焦是光场成像中的关键技术之一。数字对焦的好坏则可以采用图像清晰度评价函数进行衡量,因此选取一个准确有效的评价函数是数字对焦系统的核心问题。对一幅图像数字对焦性能的评价,从空域来讲是通过对

图像进行微分运算获得图像的边缘及细节部分,进而看它们是否清晰;从频率域来讲是通过对图像进行频域转换,进而看图像中所包含的高频分量是否丰富,高频信息越多则图像越清楚。一个优良的评价函数一般具备以下几个特征:(1)无偏性。指评价函数是否能够准确的表示出数字对焦的焦点精

确位置,不同的评价函数对同一幅图计算出的焦点位置应该一致。(2)单峰性。评价函数曲线应该呈单峰性,即曲线只有一个最大值,因为只有这样才能反映出正确对焦的位置。(3)灵敏度。是指评价函数曲线的斜率,曲线越陡峭则灵敏度越高。(4)运行时间。是指对图像进行评价时,计算机所需要花费的时间。在系统相同的条件下,对同系列的图像进行评价,运行时间越短说明评价函数选择的越好。文中将采用一种基于Tenengrad梯度图像清晰度评价算法的改进算法对成像数据进行评价。该算法可以有效的提高灵敏度,并且与其他传统算法相比,其效果更好,信噪比更高。

## 1 光场成像原理

图1中只表示了目标物的光线追迹。其中主透镜的作用是将目标物成像在微透镜阵列上,再通过微透镜阵列分割成若干个子孔径分别成像在探测器上并覆盖若干个探测器像元。假设微透镜阵列由 $N \times N$ 个微透镜单元组成,每个微透镜单元又覆盖 $M \times M$ 个探测器像元,那么所获取的图像其分辨率为 $N \times N \times M \times M$ 。

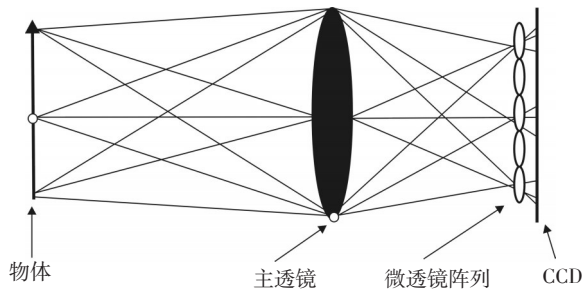


图1 光场成像原理

这样微透镜单元反映的是目标物的二维空间位置信息,每个微透镜单元对应探测器上的若干个像元,每个像元反映该位置上不同的二维方向信息,实现了四维光场信息的解析。对所得光场数据进行数字对焦处理可以获得不同景深的图像。

## 2 数字对焦

### 2.1 光场成像的光场分布

为了表示光场成像的光场分布,可以通过两个

平行平面来进行参数化表示如图2。光线与这两个平面相交于两点,形成一个四维光场 $L_f(u, v, x, y)$ 。探测器面上的辐照度 $E_f(x, y)$ 可以通过积分成像得出,其计算公式为

$$E_f(x, y) = \frac{1}{F^2} \iint L_f(u, v, x, y) du dv \quad (1)$$

光场成像包括两个步骤:光场的采集和与之对应的光场数据处理。数据的处理是通过计算机实现的,无需机械调焦便可以根据自己的喜好进行定焦。这就是所谓与传统相机不同的数字对焦。这种技术可以达到先拍摄后对焦的目的,降低了实现精密对焦的难度和复杂度。

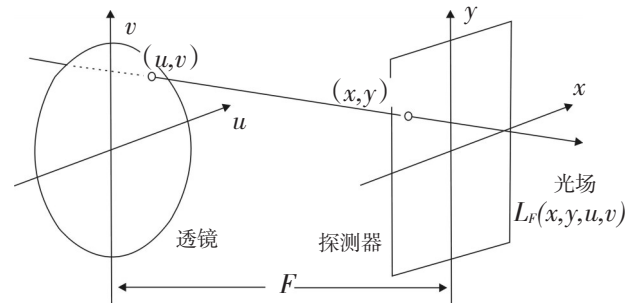


图2 光场的参数化

### 2.2 频域数字对焦

数字对焦的处理在空域和频域中都可实现,文献[2]对数字对焦的原理进行了分析,推导出基于积分成像的数字对焦公式如下

$$E_f[x, y] = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_f(u, v, x, y) du dv \quad (2)$$

假设光场与新焦平面的交点为 $(x, y)$ 且 $F' = \alpha F$ 。探测器与透镜间的距离为 $F$ 。所以根据相似性质,光场在探测器平面上的交点为 $(u(1 - 1/\alpha) + x/\alpha, v(1 - 1/\alpha) + y/\alpha)$ 。 $L_f(u, v, x, y) = L_f(u, v, u(1 - 1/\alpha) + x/\alpha, v(1 - 1/\alpha) + y/\alpha)$ 是重聚焦像面的光场分布, $L_f$ 是原探测器面上的光场分布。 $\alpha$ 表示不同对焦深度的参量,通过改变 $\alpha$ 值就可以得到不同对焦深度的图像。上述是在空域中实现数字对焦,由于积分算法比较复杂,运行速度慢,所以采用在频率域中进行数字对焦。

在频域中是基于傅里叶切片定理<sup>[2]</sup>对所得图像进行数字对焦,二维探测器上所得的投影图像,其傅里叶频谱即为光场傅里叶变换中的某个二维切

片。不同对焦深度的图像频谱对应不同的切片,计算公式为

$$E_{F'}(x,y) \equiv F^{-2} \cdot \beta_{\alpha} \cdot F^4 [L_{F'}(u,v,x,y)] \quad (3)$$

$$\beta_{\alpha}[I](k_x, k_y) = \frac{1}{F^2} I(\alpha \cdot k_x, \alpha \cdot k_y, (1-\alpha) \cdot k_x, (1-\alpha) \cdot k_y) \quad (4)$$

式中,  $F^4$  为四维傅里叶变换操作算子;  $F^{-2}$  为二维傅里叶反变换操作算子;  $\beta_{\alpha}$  为切片成像操作算子;  $I(k_x, k_y, k_x, k_y)$  为  $L(u, v, x, y)$  的四维傅里叶变换;  $\alpha$  为表征不同对焦深度的参量。

### 3 图像清晰度评价函数

在图像数字对焦处理中图像清晰度评价函数起到至关重要的作用。到目前为止大体可以分为两种清晰度评价方法,即空域的评价方法和频率域的评价方法。Sobel算子评价方法、拉普拉斯算子评价方法和基于Tenengrad梯度算子评价方法都属于空域中的评价函数。基于离散小波变换和傅里叶变换的评价函数则属于频域的评价方法。清晰度评价函数的选取直接决定对图像评价的好坏。因此想要对几幅图进行正确的评价就要遵循引言中所提到的一个优良的评价函数所具备所有特征。不应有局部峰值,具有良好的无偏性和较高的灵敏度。

#### 3.1 传统的清晰度评价函数

基于梯度的评价函数是目前常用的对图像进行清晰度评价的方法。基于频率域的评价函数与梯度评价函数相比虽能够对噪声有较好的消除,但是需把图像信息从空域转换到频域,计算量明显比空域复杂,运算量大,并且其系统的实时性很难得到满足。综合考虑光场成像系统,其图像信息所包含的噪声小可忽略不计。由于传统的梯度评价函数曲线比较平坦其灵敏度不高,文中将对基于梯度的评价函数作进一步的改进,从而研究出一种实时性较高,整体性能好的清晰度评价函数。

##### 3.1.1 灰度方差算子

数字对焦后的清晰图像其灰度变化与离焦图像相比必然是明显的,因此图像的对焦好坏可以用灰度变化的程度及方差来进行评价。图像的灰度方差算子的定义如下

$$F(k) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x,y) - u]^2 \quad (5)$$

式中,  $\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x,y)$ ,  $MN$  表示图像区域的大小尺寸。

$$F_0 = \max\{F(k)\} \quad (6)$$

#### 3.1.2 基于梯度的Tenengrad图像清晰度评价函数

在图像评价过程中,对于图像的边缘可以用梯度来提取,最大的图像梯度值应该对应的正确对焦的图像,其边缘最锋利。Tenengrad函数是通过用Sobel算子对水平和垂直方向的梯度值进行提取。评价函数  $F(k)$  定义为梯度的平方和。梯度  $G(x,y)$  要大于一个提前设定的阈值  $T$ , 即

$$F(k) = \sum_x \sum_y [G(x,y)]^2 \quad (G(x,y) > T) \quad (7)$$

式中,  $G(x,y)$  是在点  $(x,y)$  上与Sobel算子的卷积,为

$$G(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \quad (8)$$

#### 3.2 改进后的清晰度评价函数

由于对一整幅图像进行清晰度评价其运算速度会时间长,可以选取一个灰度变化明显的图像区域代替整幅图再进行评价。3.1.2节中已经讲到梯度评价函数需要提前设定一个阈值,选取一个好的阈值会对评价函数曲线的单峰性起到至关重要的作用。这就是文中改进评价函数的思想前提。

采用待选区域的灰度平均值作为阈值  $T$ , 然后进行Tenengrad梯度函数进行评价数字对焦的一系列图像。即对式(7)进行改进如下

$$F(k) = \begin{cases} F(k) + 1 & I(i,j) \geq T \\ F(k) & I(i,j) < T \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $I(i,j)$  是图像坐标  $(i,j)$  所对应的灰度值。

### 4 实验仿真结果

为了验证该评价算法在光场成像应用中的有效性,利用Matlab软件进行仿真,如图3所示。实验采用8幅数字对焦图像,按照离焦-正确对焦-离焦的顺序依次排列,每一幅图对应不同的景深参数值  $\alpha$ 。每一幅对应的  $\alpha$  取值分别为0.8、0.85、0.9、0.95、1.0、1.05、1.1、1.15。  $F(k)$  达到最大时,它所对应的图像最清楚即正确对焦的结果。图3中的第四幅图

即  $\alpha = 0.95$  所对应的图像最为清晰,则认为是准确的数字对焦。与理论推断相一致。

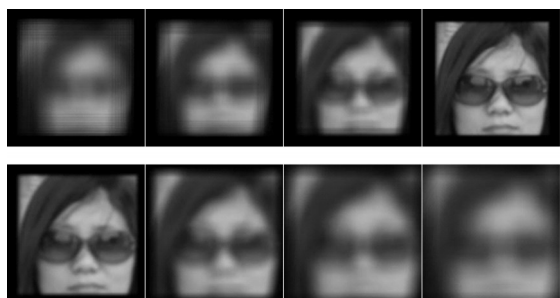


图3 不同景深参数值下的数字对焦图像

图3是光场成像的数字对焦的一系列数据,图像的模糊程度与景深参数  $\alpha$  值有关。利用上述所提到的评价函数对着一系列的图像数据进行评价,从而可很直接的看出哪一幅图像最清晰且它所对应的  $\alpha$  值是多少。图4是传统的梯度评价函数曲线。图5是文中算法仿真出的评价函数曲线图(该图峰值对应的  $\alpha$  值为0.98,这是为了仿真的精确性,采用的  $\alpha$  间隔变小为0.03,与上文提到的  $\alpha = 0.95$  其间隔为0.05对应的最大值是一致的)。

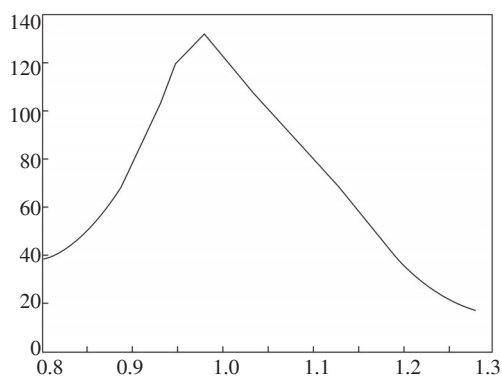


图4 传统的梯度评价函数曲线

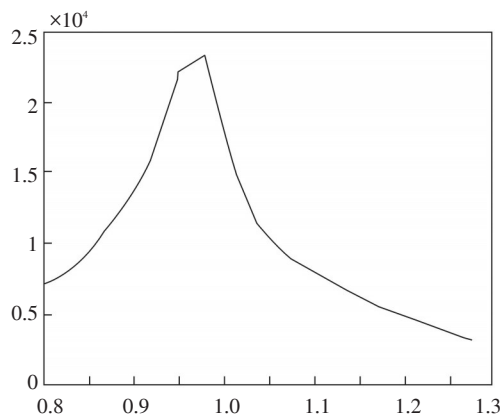


图5 改进后的梯度评价函数曲线

从图中可直观地看到,该算法在光场成像的应用中具有可实用性。采用改进的图像清晰度评价算法进行改善评价曲线,与传统的梯度评价函数相比,其单峰性(只有一个峰值)得到了很好的改善、灵敏度(斜率)也有所提高、其运行速度也有所加快。

为了更好的验证该算法的有效性,可以采用客观的方法计算出算法之间的运行速度。如表1所示。

表1 几种评价函数的计算时间的对比

评价函数方法	运行时间/s
灰度方差算法	34
Tenengrad 梯度算法	55
改进后的梯度算法	43

## 5 结束语

随着图像处理技术的发展需求,光场成像技术也随之发展壮大。光场成像的优势在于不需要在成像之前进行机械式对焦,可在任意景深处成像,然后通过计算机图像处理进行数字对焦,根据自己的需求进行成像出不同景深处的图像。利用图像清晰度评价函数对不同对焦程度的图像进行评价从而找到最佳对焦图像。文中采用改进的梯度评价算法对其灵敏度和单峰性进行改善。图像清晰度评价算法有很多种,在国内外的图像研究领域中已取得了重要的成果。实验证明,所运用的该算法是对传统的梯度评价算法的一种改进。其优势在于灵敏度提高,消除了局部的峰值性且其运行速度加快,并且有较好的峰值信噪比。

## 参考文献

- [1] 周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.
- [2] NG R. Fourier slice photography [J]. ACM transactions on Graphics (proceedings of SIGGRAPH2005), 2005, 24(3): 735-744.
- [3] 刘根君,宋高俊. 显微镜自动对焦评价函数新算法[J]. 微计算机信息,2009,25(12-1).
- [4] 王子维,戎蒙恬. 一种基于高通滤波评价函数的自动对焦方法[J]. 信息技术,2009,24(10).

(下转第79页)



- tion, 2005:311-312.
- [6] Katoh, Ryuzi, Furube A. Electron injection efficiency in dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology C Photochemistry Reviews*, 2014, 20(9):1-16.
- [7] Myers R A, Mukherjee N, Brueck S R. Large second-order nonlinearity in poled fused silica[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(22):1732-1734.
- [8] Alley T G, Brueck S, Myers R A. Space charge dynamics in thermally poled fused silica[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 242(2):165-176.
- [9] Alley, Thomas G, Brueck S R J, et al. Secondary ion mass spectrometry study of space-charge formation in thermally poled fused silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(12):6634-6640.
- [10] Kudlinski A, Quiquempois Y, Martinelli G. Modeling of the  $\phi(2)$  susceptibility time- evolution in thermally poled fused silica[J]. *Optics Express*, 2005, 13.
- [11] Alexandre, Kudlinski, Gilbert M, et al. Time evolution of second-order nonlinear profiles induced within thermally poled silica samples[J]. *Optics Letters*, 2009, 30(9):1039-1041.
- [12] Tarasenko O, Margulis W. Electro-optical fiber modulation in a Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11):1356-1358.
- [13] Malmström, Tarasenko M O, Margulis W. Pulse selection at 1 MHz with electrooptic fiber switch[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9465-70.
- [14] Michie A. Electric field and voltage sensing at 50 Hz using a thermally poled silica optical fibre[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(10):3219-3222.
- [15] Helt L G. Proposal for in-fiber generation of telecom-band polarization- entangled photon pairs using a periodically poled fiberP[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14):2138-2140.
- [16] 鲍吉龙. 光纤光栅传感器及其应用[J]. *激光技术*, 2004, 24(3):174-179.
- [17] YUAN, Cheng-wei. A novel TEM-TE<sub>11</sub> mode converter [J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2005, 15(8):513-515.
- [18] Campbell, George A. Physical theory of the electric wave-filter[J]. *Bell System Technical Journal*, 1922, 1(2):1-32.
- [19] Akers, Francis I, Balatoni N A, et al. Plug-in multiplexer[J]. WO1996029841 A1, 1996.
- [20] Srinivasan B, Jain R K. First demonstration of thermally poled electrooptically tunable fiber Bragg gratings[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2000, 12(2):170-172.
- [21] Honglin An, Min S S, Fleming S. Periodically erasing the second-order optical nonlinearity in thermally poled optical fibers with UV light[J]. *Photonics Asia 2010 International Society for Optics and Photonics*, 2010:199-283.
- [22] Mizunami, Toru, Miyazaki R, et al. Quasi-phase-matched second-harmonic generation in thermally poled twin-hole silica-glass optical fiber by mercury-lamp exposure[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 5(59):14-17.
- [23] Huang L, Ren G, Sun X M. Evolution of two-dimensional electric field in poled twin-hole optical fiber[J]. *International Photonics and Optoelectronics Meetings*, 2014, 5.
- [24] Petrov M I, Lepenkin Y A, Lipovskii A A. Polarization of glass containing fast and slow ions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(4):043101-043101-8.

~~~~~

(上接第59页)

- [5] 翟永平,周东翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 1-11.
- [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.
- [7] 李奇,冯华君,徐之海,等. 数字图像清晰度评价研究[J]. *光子学报*, 2002, 31(6):736-738.
- [8] 王鸿南,钟文,汪静. 图像清晰度评价方法研究[J]. *中国图像图形学报*, 2004, 9(7): 828-831.
- [9] 张起贵,张雪梅. 基于小波提升的自动聚焦评价函数[J]. *太原理工大学学报*, 2009, 40(3): 243-245.
- [10] 吴小翠,郭斯羽,易国. 基于边界梯度的自动调焦评价函数[J]. *计算机系统应用*, 2010, 19(3).