

文章编号:1004-4213(2010)06-1094-5

# 数字对焦光场成像清晰度评价方法研究\*

周宇,袁艳,胡煌华,张修宝

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京 100191)

**摘要:**结合光场成像数字对焦空间域算法和频率域算法的区别,分别提出了适用的图像清晰度评价方式,并进行了仿真实验分析.空间域评价方法根据评价区域缩小图像重构数据量,频率域评价方法则将评价函数嵌入到图像重构过程中,改进后的方法相对传统方法提高了速度.

**关键词:**光场成像;数字对焦;对焦清晰度评价

**中图分类号:**TP391.41

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103906.1094

## 0 引言

光场成像的概念由 Marc Levoy 和 Ren Ng 等人提出并发展<sup>[1]</sup>.主要是指通过在传统光学成像系统中利用孔径分割或加入调制掩模<sup>[2]</sup>的方法来获得目标光辐射的空间分布和辐射传输的方向信息,即相机内的四维光场<sup>[3]</sup>.通过对光场数据进行计算处理,得到对焦在指定深度的合成图像,实现数字对焦.和传统成像中自动对焦技术相同,对焦清晰度评价在数字对焦光场成像中也是十分重要的工作.本文介绍了光场成像技术的基本原理,分析了数字对焦技术的特点,并分别结合空间域和频率域的数字对焦方法提出了评价对焦清晰度并找到对焦目标所在深度的方法,进行了 MATLAB 软件仿真实验.结果表明本文提出的方法对试验数据效果准确有效.

## 1 光场成像原理

图 1 为利用微透镜阵列实现孔径分割法的光场成像系统基本原理结构<sup>[4]</sup>.

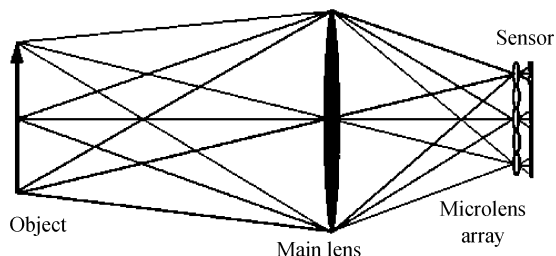


图 1 光场成像原理

Fig. 1 Conceptual schematic of light field photography

图中所示微透镜的作用是将主镜的光瞳成像在

探测器上并覆盖若干个探测器像元,相当于将整个光瞳分割成若干个子孔径.假设微透镜阵列中含有  $N \times N$  个微透镜单元,每个微透镜又覆盖了  $M \times M$  个探测器像元,那么主镜光瞳则被分割为  $M \times M$  个子孔径.

这样探测器像元输出信号就对应目标点通过主镜光瞳的某个子孔径的能量变换.成像系统内的光场分布由于微透镜的作用而转化为探测器像元的输出信号,且与微透镜位置反映的两维空间位置信息和微透镜覆盖的探测器像元位置反映的两维方向信息分别相对应,实现了四维光场的解析.这时成像系统空间分辨率即最终合成图像分辨率为  $N \times N$ ,方向分辨率为  $M \times M$ ,得到的四维光场为  $N \times N \times M \times M$ .对光场数据进行后处理能获得不同深度截面的清晰图像,并重建相对传统相机覆盖更大深度范围的锐化图像,突破相对孔径和景深的制约关系.

## 2 数字对焦与图像重构

### 2.1 相机内的光场

相机内的光场可以用两个平面间的光流来表示,如图 2.

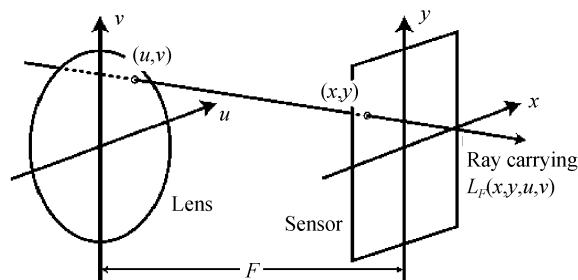


图 2 相机内光场参量表示

Fig. 2 Parameterization of 4D light field in camera

平面  $(u, v)$  是成像系统的光瞳面,平面  $(x, y)$  是探测器面,两平面间的距离为  $F$ ,则  $L(x, y, u, v)$  就代表成像系统内的光场,且与物空间的目标光场存

\*国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金(60972088)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助

Tel:010-82339421

Email:zhouyu0408@hotmail.com

收稿日期:2008-09-27

修回日期:2008-12-16

在对应关系.由积分成像可得,探测器面成像公式为

$$E_F(x,y)=\frac{1}{F^2}\iint L_F(x,y,u,v)dudv \quad (1)$$

式中, $E_F(x,y)$ 是探测器面上的辐照强度.光场分布包含的信息量远远大于单纯几何影像所包含的信息量.利用光场传播的可追踪性,对光场分布信息进行重采样和适当计算处理能够合成获得景象中某一深度目标的清晰图像,其效果等价于普通成像系统准确调焦后拍摄的图像.这一合成图像过程可以称之为“数字对焦”.不同的是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.

目前,数字对焦光场图像重构技术分为空间域和频率域两种方法.

## 2.2 空间域数字对焦图像重构

文献[5]中分析了数字对焦的原理,推导出了源于积分成像的数字对焦公式

$$E_{F'}(x,y)=\frac{1}{\alpha^2 F'^2}\iint L_{F'}(x,y,u,v)dudv \quad (2)$$

$L_{F'}(x,y,u,v)=L_F(u(1-1/\alpha)+x/\alpha,v(1-1/\alpha)+y/\alpha,u,v)$ 是重对焦像面的光场分布,且 $F'=\alpha F$ , $L_F$ 是对光场进行追踪得出的探测器面上的光场分布, $\alpha$ 是表征不同对焦深度的参量,改变其值就可以得到不同对焦深度的图像.

## 2.3 频率域数字对焦图像重构

频域算法基于傅里叶切片成像定理<sup>[5]</sup>:一幅对焦重构图像的二维傅里叶变换是所得光场的四维傅里叶变换中的一个二维切片,不同对焦深度的图像频谱对应着不同的切片.计算公式为

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

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

式中, $F^4$ 为四维傅里叶变换算子, $F^{-2}$ 是二维傅里叶逆变换. $\beta_\alpha$ 为切片成像算子, $I(k_x,k_y,k_u,k_v)$ 为 $L(x,y,u,v)$ 的四维傅里叶变换, $\alpha$ 为表征不同对焦深度的参量.

## 3 对焦图像清晰度评价

根据数字对焦光场成像的两种算法可以相应的运用不同方法来实现对焦清晰度评价,帮助获得预想对焦深度的清晰图像.

实验中利用 MATLAB 软件仿真孔径分割方法建立光场相机理想成像模型来得到光场图像,并进行数字对焦图像重构及评价.光场相机的模型参量包括:主透镜孔径 $D=50$  mm,焦距 $F=100$  mm,微

透镜孔径 $d=50$   $\mu\text{m}$ ,微透镜焦距 $f=0.2$  mm,微透镜阵列为 $300\times 300$ ,每个微透镜覆盖 $10\times 10$ 个探测器像元.

图3为一组仿真效果图.(a)是仿真成像目标,(b)是目标在离焦条件下通过光场相机模型获得的光场图像( $3\ 000\times 3\ 000$ ).



(a) Single object

(b) Misfocused light field

图3 仿真效果图

Fig. 3 Simulation

数字对焦图像清晰度评价的关键内容是应用合理的对焦评价函数.现有的对焦评价函数主要分为四大类:灰度梯度函数、图像变换、信息学函数和统计学函数<sup>[6-8]</sup>.

### 3.1 空域数字对焦图像清晰度评价及仿真

空间域数字对焦图像重构是将获得的四维光场进行二重积分得到合成图像,对于图像的清晰度评价是在得到对焦重构图像后进行的,这点类似于传统的自动对焦情况.因此传统的对焦评价函数算法都适用于这种情况.

实验中选取灰度梯度函数中的 Tenengrad 函数作为评价函数.

$$F(k)=\sum_x\sum_y[G_x^2(x,y)+G_y^2(x,y)] \quad (5)$$

其梯度幅度 $G_x(x,y)$ , $G_y(x,y)$ 模板分别为

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{和} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Tenengrad 函数作用时先加权平均然后再微分,并分别对水平和垂直方向进行模板运算,对噪音有一定的抑制能力.

实验中对图3(b)所示单目标光场图像进行数字对焦,设定的离焦参量为 $\alpha=0.975\ 24$ .

在数字对焦过程中通过取不同的 $\alpha$ 值得到不同对焦深度的图像( $300\times 300$ ),选取 $\alpha$ 值为 $0.935$ 到 $1.015$ ,间隔为 $0.005$ ,得到对焦图像序列.分别对每一幅重构图像进行清晰度评价计算,得到图4所示的结果,图中横坐标为选取的不同 $\alpha$ 值,纵坐标为该评价函数对重构图像的清晰度评价.可以看出当 $\alpha=0.975$ 时取得最值,和预设参量基本一致.

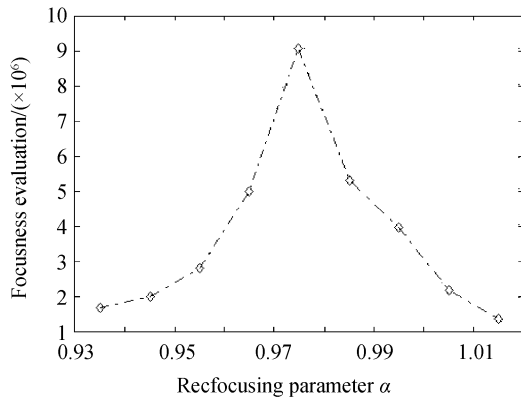


图4 不同对焦深度参量的目标评价函数值

Fig. 4 Evaluation of the images refocused at different depth

进行数字对焦图像清晰度评价时,窗口的选择也很重要<sup>[9]</sup>,选取合适的窗口主要有两个目的:1)减少参加运算的像素数量;2)排除非主要部分(背景)对主要目标评价结果的负面影响.因此当图像中含有多个目标时尤其需要评价窗口位置的选择.

图5为一幅由美国斯坦福大学光场相机拍摄的实际光场图像数据( $256 \times 256 \times 16 \times 16$ ),其中三个目标分别位于不同的深度(分别为门洞  $\alpha=0.97$ 、屋檐  $\alpha=1.00$  和人像  $\alpha=1.04$ ).

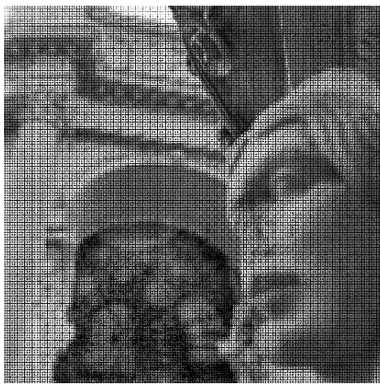


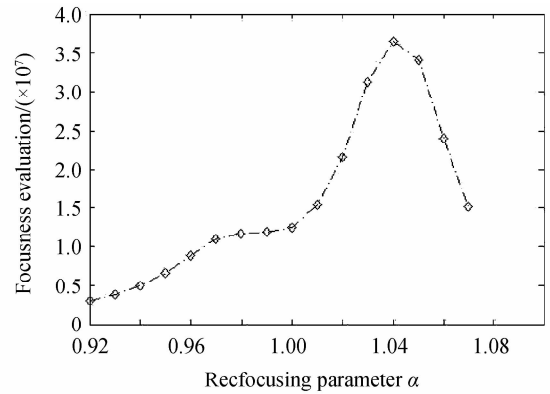
图5 多目标光场图像

Fig. 5 A light field of a scene with three objects

对于如图5的多目标情况,则应当充分利用光场成像的特点来结合窗口选取进行图像清晰度评价.这也是本文方法相对于传统评价方法的改进之处.

若以人像雕塑作为目标,则应当选择较准确覆盖目标范围的窗口作为评价区域.通过观察图5选定覆盖人像部分的  $100 \times 100$  的窗口(如图6(b)中白色方框).仍然使用 Tenengrad 函数作为评价函数.

直接应用现有图像清晰度评价方法,步骤为:1)将二维光场图像转化为四维光场数据;2)依照给定的对焦参量,重构一幅二维图像;3)对该二维图像选定窗口部分进行清晰度评价;4)在一定对焦参量范围内,重复2)、3)两步,得到对焦评价曲线.



(a) Focusing evaluation of the sculpture



(b) The refocused photograph

图6 人像目标对焦评价函数值及相应数字对焦图像

Fig. 6 Focusing evaluation of the sculpture and the refocused photograph

图6(a)为指定窗口的评价函数值图,可见在  $\alpha=1.04$  处时取得最大值,与给定条件一致,结果准确.图6(b)为对焦在该深度的重构图像.

光场成像作为一种计算成像技术,使得在拍摄后合成成像的视场范围可以调整大小.因此可以在数字对焦图像重构时减少计算的数据量.对于图5,同样将人像雕塑作为目标.改进的方法是:在确定了对焦目标窗口范围后,直接从获得的光场图像中抽取窗口范围的光场数据( $100 \times 100 \times 16 \times 16$ ),按不同对焦深度进行对焦重构,得到图像序列并进行图像清晰度评价,找到准确对焦深度对应的  $\alpha$  值.将原始大小的光场图像按该  $\alpha$  值进行数字对焦图像重构就可以得到对焦于选定目标的整幅图像.

将两种方法编程实现进行比较,实验平台为CPU:intelP42.8G,内存:2G,matlab7.1,现有方法得到对焦图像序列及评价曲线用时281s,改进后的方法用时75s,评价结果一致.两种方法评价区域是相同的,改进方法由于参与图像重构的数据量小从而节省了时间.

### 3.2 频域数字对焦图像清晰度评价及仿真

空间域光场成像数字对焦虽然直观,但每一次积分计算复杂度都为  $O(n^4)$ ,而频域算法在预先进行四维傅里叶变换后,每一次取切片的计算复杂度只有  $O(n^2)$ ,相对空间域方法大大降低.我们希望找

到结合频域算法的对焦评价方法。

现有的自动对焦技术中有关频率域分析的评价方法中每一次获取新的对焦位置的图像后都要进行傅里叶变换,增加了额外的运算复杂度,与直接应用空间域评价函数相比计算量大很多,而对于光场成像频域数字对焦来说,傅里叶变换是预处理的必要步骤,且根据不同对焦参量抽取的二维切片恰好是频域评价的对象。

本文提出的方法是:1)得到四维光场的傅里叶频谱;2)根据不同对焦参量进行一定范围切片选取,并直接对切片进行频域评价并找到极值点;3)在 $\alpha$ 等于极值点处进行傅里叶逆变换得到对焦图像。

传统成像的对焦算法都是基于二维图像,而光场成像技术可以得到更为完整丰富的四维光场信息,因此可以更精确的得到深度信息。

假设所获得的四维光场是: $I_F(x, y, u, v)$ ,其四维频谱是: $L_F(k_x, k_y, k_u, k_v)$ .取二维切片后,对焦深度参量 $\alpha$ 对应的重构图像频谱为<sup>[5]</sup>

$$I_\alpha(k_x, k_y) = L(\alpha k_x, \alpha k_y, (1-\alpha)k_x, (1-\alpha)k_y) \quad (6)$$

如果有目标位于这个深度,则频谱中高频分量的比例将大于没有目标存在的其它深度图像的频谱.可以根据高频分量的比例来对图像清晰度进行评价.通常运用功率谱(式7)评价。

$$p(\alpha) = |I_\alpha(k_x, k_y)|^2 \quad (7)$$

和传统频域对焦评价函数一样,直接对每个频谱元素的 $p(\alpha)$ 求和作为功率谱评价函数会遇到两个问题:1)改变 $\alpha$ 值并不能明显改变低频成分变化,只是改变高频分量.2)CCD的噪音和抽样频率造成的混叠现象都会造成部分高频分量.可以采取对频率分量分段加权处理的方法。

将功率谱按带宽分成 $k$ 部分, $E_0, E_1, E_2, \dots, E_k$ ,其中 $E_0$ 为低频成分, $E_k$ 为最高频分量.将 $E_1 - E_{k-1}$ 较高频分量加权求和,略去最高的频率分量段 $E_k$ .最后除以低频分量得到评价函数,即式(8)。

$$F(\alpha) = \frac{1}{E_0(\alpha)} \sum_{i=1}^{k-1} m_i E_i(\alpha) \quad (8)$$

当 $F(\alpha)$ 取最大值时认为图像最清晰. $k$ 值越大越接近于计算每个功率谱元素的加权和,这也是常用的一种评价函数,可根据图像改变参量.实验中选取 $k=10$ ,对于加权函数取 $m_i = i$ 。

对于多目标情况可以充分利用频域光场成像的特点.图像的频谱分布对应了整幅图像的信息,并不能找到其和空间域图像某一部分之间的对应关系.因此和空间域方法针对不同目标区域寻找对焦深度不同,频率域评价方法是在深度方向轴上寻找到那些有目标存在的不同平面。

那么在分析对焦深度分散的多个目标时可以运用局部最大值法来找到各个目标的对焦深度,也就是在一定搜索范围内找到几个局部最大值,而每一个值对应一个对焦目标.对于图5,运用本文提出方法和评价函数来得到局部最大值,评价归一化曲线如图7(a),可以看到分别在三点取得极大值,与预设情况一致。

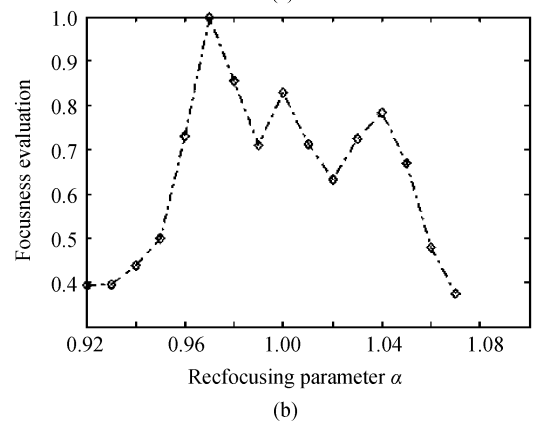
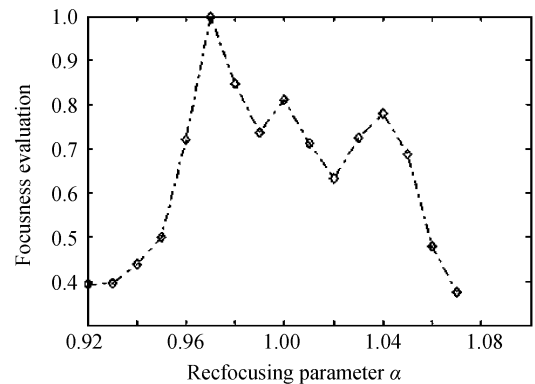


图7 光场图像图5的频域评价函数图

Fig.7 Focusness evaluation of the light field in Fig.5 in frequency domain

直接将传统频域清晰度评价方法应用于数字对焦则为:在空间域实现数字对焦后将图像变换到傅里叶域再应用频谱评价函数得到评价曲线图,如图7(b).将本文方法和上述传统方法进行比较,实验平台如3.1节所述,应用式(8)作为评价函数.预先进行四维傅里叶变换后,本文方法用时62s,而传统方法用时282s.准确度一致,而本文提出方法节省了时间.这是由于频域重构方法比空间域重构方法计算量小的结果。

## 4 结论

本文分析了光场成像数字对焦技术的特点,在此基础上结合空间域和频域对焦处理的区别分别提出了对应的对焦清晰度评价方法.其中,空间域评价可以借用传统评价函数,而改变对焦重构的光场数据的范围;频率域评价方法运用分段加权功率谱之

和作为评价函数,并将其嵌入到数字对焦图像重构过程中,从而进一步减少了计算量.仿真实验结果显示,在单目标和多目标的情况下,本文的对焦评价方法都准确有效.

#### 参考文献

- [1] NG R,LEVOY M,BREDIF M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera [R]. California; Stanford University,2005.
- [2] VEERARAGHAVAN A,RASKAR R,AGRAWAL A, *et al.* Dappled photography:mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing [J]. *ACM Transactions on Graphics*,2007,**26**(3):69-78.
- [3] LEVOY M, HANRAHAN. Light field rendering [A] Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques[C]. USA;ACM,1996:31-42.
- [4] ADELSON T, WANG J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1992,**14**(2):99-106.
- [5] NG R. Fourier slice photography[J]. *ACM transactions on Graphics (proceedings of SIGGRAPH 2005)* 2005, **24**(3): 735-744.
- [6] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai. Digital image sharpness evaluation function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 786-788.  
李奇,冯华君,徐之海. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报,2002,**31**(6):786-788.
- [7] LIU Huai, HUANG Jian-xin. Automatic focusing technique based on color image processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005,**34**(9):1434-1437.  
刘怀,黄建新. 基于彩色数字图像处理的自动对焦技术[J]. 光子学报,2005,**34**(9):1434-1437.
- [8] CHEN Guo-jin, ZHU Miao-fen, SHI Hu-li, *et al.* Identification of image Definition based on minimum isotropy wavelet [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008,**37**(2):395-399.  
陈国金,朱妙芬,施洪立,等. 基于最小各向同性小波滤波的图像清晰度识别[J]. 光子学报,2008,**37**(2):395-399.
- [9] QU Yu-fu, PU Zhao-bang, ZHAO Hui-jie. Influence factor analysis of sensitivity of focus criteria function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,**25**(7):902-906.  
屈玉福,浦昭邦,赵慧洁. 调焦评价函数灵敏度的影响因素分析[J]. 光学学报,2005,**25**(7):902-906.

## Focusness Evaluation for Digital Refocusing Light Field Photography

ZHOU Yu, YUAN Yan, HU Huang-hua, ZHANG Xiu-bao

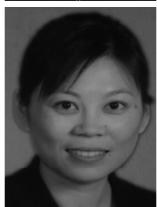
(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The focusness detection methods for digital refocusing both in spatial and frequency domain are presented. The spatial method reduces the data used in image reconstruction according to the selected evaluation area. And the frequency domain method embeds the evaluation functions in image reconstruction. The experimental results show that the improved methods are faster than the conventional.

**Key words:** Light field photography; Digital refocusing; Focusness evaluation



**ZHOU Yu** was born in 1983. He is pursuing his M. S. degree, and his research interests focus on digital refocusing technology.



**YUAN Yan** was born in 1967. She received her Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS in 2005. Now she is a professor at BUAA and her current research interests focus on optical remote sensing, spectral imaging system and digital refocusing imaging technology.