

文章编号:1004-4213(2010)06-1104-7

基于掩膜的光场成像仿真及采样研究*

常雷,袁艳,张修宝,周志良

(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:从原理上分析了掩膜的光场成像特点,通过建立光场成像的计算机仿真模型,模拟四维光场的获取,并通过数字对焦算法获得离焦物体的清晰图像.同时利用采样定理分析了孔径采样密度对数字对焦图像的影响,计算出合适的采样间隔对仿真模型的复杂度进行优化.

关键词:掩膜;光场成像;采样;仿真

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103906.1104

0 引言

传统成像方法由于只是将光线的强度在探测器像元上进行累加,丢失了光线的传播方向信息,因此只能对焦在场景的某个特定物面上.而光场成像作为一种新的计算成像技术,可以在一次曝光中,同时记录下入射光线的空间分布信息和传播方向信息^[1],从而比传统成像获得信息更丰富的四维图像.通过计算机软件对光场图像进行后期处理,可以计算出对焦在不同深度的二维图像,即实现“先拍照后对焦”的功能.

Adelson 等人^[2]于 1992 年设计了“全光相机”方案,提出在单镜头光学系统像面处放置一组柱面镜或球面镜的方法来记录目标的深度信息. Ren Ng 等人^[3]于 2005 年设计了“光场相机”,其特别之处在于在传统相机的探测器阵列前面耦合一个微透镜阵列,实现了一次曝光获取全部光场信息的目的. Veeraraghavan 等人^[4]在 2007 年提出的基于掩膜的光场成像,创造性地将编码孔成像的思想引入了光场成像理论.编码孔成像是一种高分辨率、高信噪比、高集光效率和大视场的成像技术.早在上世纪 60 年代, Mertz^[5]等人就提出了编码孔成像,而后又由 Fenimore^[6], Yamanaka^[7]和 Busboom 等人^[8]将其不断发展完善,提出阿达玛编码(Hadamard)、菲涅耳波带片(FZP)、均匀重复阵列(URA)等多种孔型,并得到了广泛的应用.基于掩膜的光场成像是在透镜和探测器之间的特定位置放置一个编码掩膜,对入射光线的强度进行调制,使探测器上获得的光

照度是入射光线强度线性独立加权的累加.通过对调制后的图像进行解调,能够获取光线的传播方向信息,得到傅里叶域的四维光场,再进行数字对焦和图像重构.这种基于掩膜的光场成像方法结构更加简单和易于实现,成本较低.此外,与基于微透镜阵列的光场成像系统最终只能获得低分辨率图像相比,这种新的光场成像技术能够在原对焦物面上处理得到相当于探测器本身分辨率的图像.

本文在理论分析的基础上,通过计算机仿真对基于掩膜的光场成像过程进行模拟.在仿真过程中,采用光线追迹的方法.由于不可能对实际中的无穷多条光线进行追迹,因此需要进行离散采样处理,采样密度的大小直接影响程序的计算量和光场信息的完整度.降低采样密度能够减少运算量,提高运行效率,但是同时也可能导致光场信息的缺失,从而影响到整个实验效果.本文通过对掩膜光场成像原理进行深入分析,创造性地提出在保证足够光场信息的前提下,根据采样定理推导出所需要的最小采样密度的方法,并在计算机仿真实验中对理论推导进行验证.

1 掩膜光场成像原理

1996 年,Levoy 和 Gortler 提出了光场的概念.所谓的光场,就是指自由空间中光在任一点沿给定方向上光线的辐射度,即光场是光线的一种辐射函数^[9].后来光场理论由 Marc Levoy^[10]和 Ren Ng^[3]等人发展并应用,他们通过传统光学成像系统中利用孔径分割或加入调制掩膜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.获得的光场图像可以看作是一个四维的光场数据阵列,包括二维空间信息和二维方向信息.

与传统成像模型不同的是,掩膜光场成像模型

*长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)、国家 863 计划项目和国家自然科学基金(60972088)资助

Tel:010-82339421 Email:changleibeyond@yahoo.com.cn

收稿日期:2009-09-12

修回日期:2009-11-10

在透镜与探测器之间加入了一片具有特殊编码的掩膜,掩膜不同位置具有不同的光线透射率,从而起到了对入射光进行强度调制的作用.在通信领域中,将基带信号加载在高频的载波信号上,进行远距离传输,可以减少传输过程中的能量损失,然后接收装置再进行解调获取基带信号.基于掩膜的调制原理与此有一定的相似之处.图 1 所示为基于掩膜的光场成像示意图,掩膜在这里起到的作用就是提供调制信号,只不过这里加载了频率远高于其频率的入射光信号进行传输.通过将光场的方向变化信息叠加在调制信号上,从而让探测器获取该叠加信号.

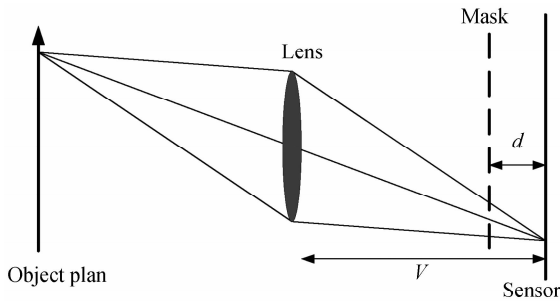


图 1 掩膜光场成像结构模型

Fig. 1 Light field camera with attenuating mask

根据调制理论,当一个基带信号 $s(x)$ 乘以一个频率为 f_0 的余弦信号后,其乘积的傅里叶变换是该基带信号的傅里叶变换在频域中的频率搬移,即

$$F[\cos(2\pi f_0 x)s(x)](f_x) = \frac{1}{2}(F(f_x - f_0) + F(f_x + f_0)) \quad (1)$$

式中, $F[s(x)](f_x) = F(f_x)$ 表示 $s(x)$ 的傅里叶变换.

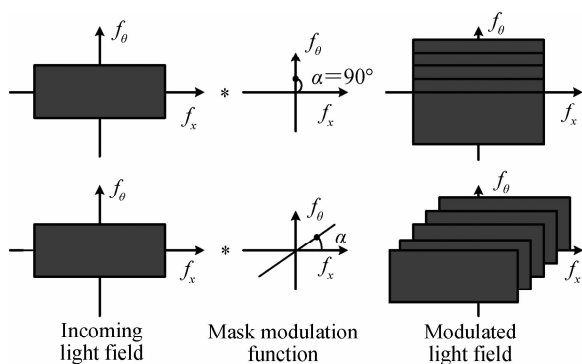


图 2 掩膜调制光场示意图

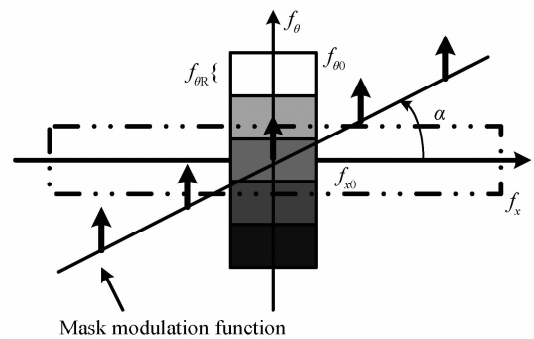
Fig. 2 Sketch map of mask modulation

在图 2 中,光场的频谱(左边部分)与掩膜的调制函数(中间部分)进行卷积,得到一组频谱冲击响应序列(右边部分).

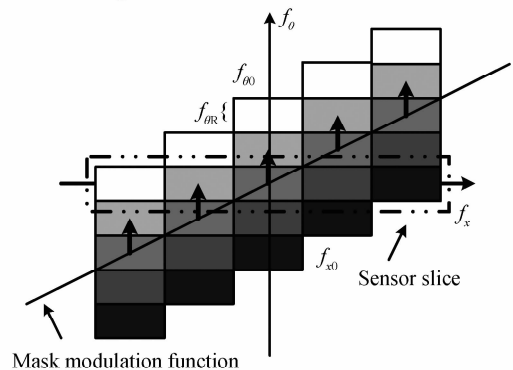
图 3 给出了光场频谱的调制与重构示意图,为简便起见,图中以二维的光场频谱为例.在频域中,探测器只能获得沿水平轴的光场频谱,而不能获得

整个光场.其中掩膜的频谱是一连串脉冲信号,与水平轴的夹角为 α ,如图 3(a).由调制理论可知,光场和掩膜的频谱进行卷积,可得到光场频谱的复制,然后通过探测器记录水平方向上的一维切片,如图 3(b)中虚线框所示.最后将水平切片重新排列到二维空间,获得原光场的频谱,从而实现光场频谱的重构,如图 3(c)所示.

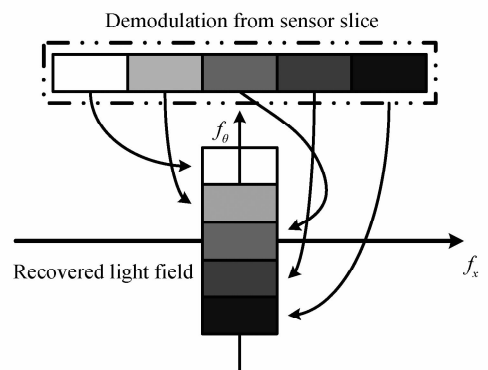
如图 3(b)所示的虚线框设定了水平切片时的截止频率,这就避免了切片时多余频谱的产生.但是如果采用图 3 所示的重构方法,会导致在切片时高频信息的丢失,从而降低重构图像的分辨率.



(a) In fourier domain, the sensor obtain the spectrum along the horizontal axis



(b) Spectral replicas formed by modulated light field, placing along sensor's plane



(c) To re-assemble the light field spectrum, translate segments of sensor spectra back to the original locations

图 3 光场频谱的调制与重构

Fig. 3 Spectral slicing in light field camera

2 系统模型设计与实现方法

2.1 模型参数设置

接下来以二维光场信息的获取为例,介绍相关的计算公式.如图1所示,透镜和探测器的距离为 V ,掩膜和探测器的距离为 d .

掩膜的透射率函数为若干个余弦函数的叠加,本文采用 $2p+1=5$ 个余弦函数的叠加, $p=2$ 为谐波个数:

$$c(f_x, f_y) = \sum_{t_y=-p}^p \sum_{t_x=-p}^p \cos(2\pi t_x f_x x) \cdot \cos(2\pi t_y f_y y) \quad (2)$$

式中 f_x, f_y 分别为掩膜两个维度的基频:

$$f_x = \mu \cdot \sqrt{f_{x_0}^2 + f_{\theta R}^2} \quad (3)$$

$$f_y = \mu \cdot \sqrt{f_{y_0}^2 + f_{\theta R}^2} \quad (4)$$

式中

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(d/V)^2 + (1 - (d/V))^2}} \quad (5)$$

设透镜的孔径为 A ,则光场频谱的角分辨率为

$$f_{\theta R} = \frac{1}{A} \quad (6)$$

空间方向的分辨率为

$$f_{x_0} = \frac{1}{2p+1} \quad (7)$$

$$f_{y_0} = \frac{1}{2p+1} \quad (8)$$

有

$$\tan \alpha = \frac{f_{\theta R}}{f_{x_0}} = \frac{d}{V-d} \quad (9)$$

如图3(a),为经掩膜调制后的光场频谱与水平轴(探测器获得的光场频谱方向)的角度.

则掩膜和探测器的距离为

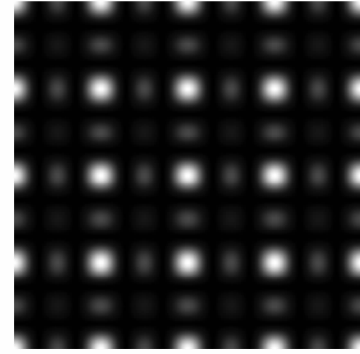
$$d = \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha} \cdot V \quad (10)$$

则掩膜的透射率函数为

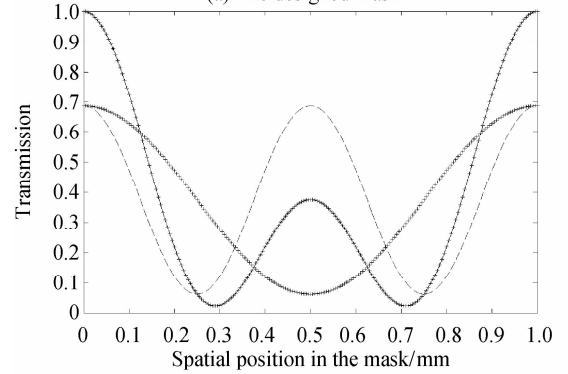
$$M(x, y) = \sum_{t_y=-p}^p \sum_{t_x=-p}^p C \cdot \cos(2\pi t_x f_x x) \cdot \cos(2\pi t_y f_y y) \quad (11)$$

x, y 为掩膜上各点的坐标, C 为常数.由于实际的掩膜不可能出现负值透射率,故而对掩膜透射率函数进行归一化处理到 $[0, 1]$ 区间.

如图4,图4(a)为本文所设计的掩膜,图4(b)为掩膜的两个谐波函数及二者叠加后的函数,其中“ \times ”曲线代表函数 $f_1 = \cos(2\pi f_x x)$,” $-$ ”曲线代表函数 $f_2 = \cos(4\pi f_x x)$,” $+$ ”曲线代表函数 $f = f_1 + f_2$.



(a) The designed mask



(b) The 1D mask function composed of 2 cosine functions

图4 本文所设计的掩膜

Fig. 4 The mask designed in this paper

2.2 光场成像仿真实现

本文采用光线追迹的算法模拟光场成像的过程,如图5所示,具体描述为:从探测器上像素点开始,对探测器接收到的光线进行反方向追迹,计算光线与物平面的交点,根据相应的物点信息得出探测器上像点的像素值.在仿真过程中,无法对所有光线进行全部追迹计算,因此需要对透镜孔径进行采样,从而选取有限数量的光线进行追迹.

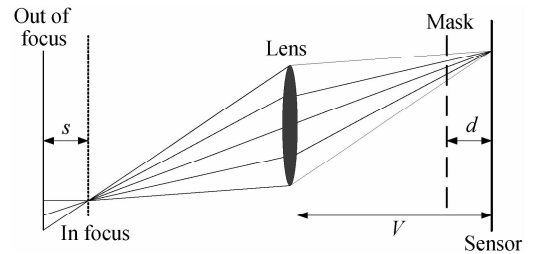


图5 仿真算法示意图

Fig. 5 Sketch map of emulation arithmetic

理论上讲,减小采样间隔,能够获取更多的信息,成像越接近实际情况,但同时也大大增加仿真的计算量,降低了运行效率.增大采样间隔能够减少运算量,但同时也可能导致部分光场信息的丢失,无法完整复原出原始的图像.因而提出一个理论依据来指导孔径采样的密度显得尤为重要.

2.3 图像重构

对于二维成像,设 $c_1 = 2p_1 + 1$ 和 $c_2 = 2p_2 + 1$ 分别为光场水平和垂直方向上入射光线角度的采样

数,其中 p_1, p_2 分别为二维方向上的余弦谐波个数, $M \times N$ 为探测器的像素数. 获取光场图像后,首先对图像进行二维傅里叶变换,然后将二维频谱中的 $c_1 \times c_2$ 个切片重新排列到四维空间,得到频域的 $(M/c_1) \times (N/c_2) \times c_1 \times c_2$ 的四维光场. 对频域的四维光场进行切片,可获得二维图像频谱,再对此作傅里叶变换即可计算出大小为 $(M/c_1) \times (N/c_2)$ 的对焦图像^[11-12],处理流程如图 6 所示.

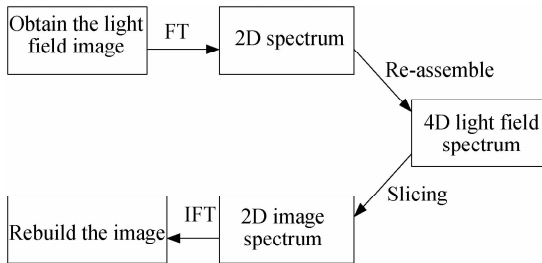


图 6 数字重对焦流程

Fig. 6 Flow chart of digital refocusing

3 成像仿真中的采样分析及实验

3.1 采样分析

在仿真过程中,由于不可能对连续光场进行处理,实际中也无法得到连续的掩膜函数,故而需要进行离散采样.

采样是将连续信号(即时间或空间上的连续函数)转换成离散序列(即时间或空间上的离散函数). 奈奎斯特采样定理指出:在模拟信号向数字信号进行转换的过程中,当采样频率 f_s 大于原信号最高频率 f_{\max} 的二倍,即 $f_s \geq 2f_{\max}$ 时,则可以保证采样后的数字信号可以完整保留原始信号中的信息.

为了减小孔径采样的密度,降低计算量,需要在保证获得完整信息的前提下,适当降低孔径采样的密度. 实际上对透镜孔径的采样也就是对掩膜的采样,二者是相互对应的. 因此,掩膜透射率函数的最高频率决定了采样的频率.

仿真实验中,选择的掩膜透射率函数为(这里只分析一维的情况,因为互相独立)

$$M(x) = \sum_{t_x=-p}^{t_x=p} C \cdot \cos(2\pi t_x f_x x) \quad (12)$$

这里的最高频率为

$$f_{\max} = (2\pi f_x \times 2) / 2\pi \quad (13)$$

因此最低的采样频率为

$$f_s = 2f_{\max} \quad (14)$$

在物理光学中,空间频率所指的是在一定方向上单位长度波动的周期数,我们这里所涉及到的 f_s 即为空间频率. 其对应的空间周期为

$$l = 1/f_s \quad (15)$$

l 就是在掩膜上采样的最大间隔,那么对应透镜孔径上的采样间隔为

$$\Delta = l \cdot V/d \quad (16)$$

也就是说,只要在孔径上采样间隔大小不超过 Δ ,就可以保证获得的信息是完整的.

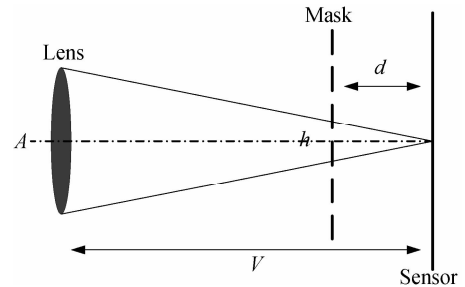


图 7 采样示意图

Fig. 7 Sampling

如图 7,从光轴上一点发出来的光线,经透镜后汇聚于探测器上一点,那么这个时候出射光线在掩膜上所覆盖的大小为

$$h = A \cdot d/V \quad (17)$$

因为空间频率就是单位长度采样样本个数,所以在掩膜上的采样次数

$$n = h \cdot f_s \quad (18)$$

即在掩膜或者透镜孔径上采样次数不小于 n 时,即可保证不丢失信息.

经过验证, $A = n \cdot \Delta$,即采样次数与采样间隔的乘积等于于孔径大小,表明了上述推导的合理性.

3.2 仿真实验

实验中利用 Matlab 软件建立光场相机理想成像模型,仿真得到光场图像,并进行数字对焦图像重构. 仿真实验设置参数为:孔径 $A = 12.50$ mm,焦距 $F = 50$ mm,探测器与透镜距离 $V = 100$ mm,共轭物面到透镜的距离 $V' = V = 100$ mm,探测器大小为 655×655 ,像元 $s = 10 \mu\text{m}$. 图 8 为实验采用的原始目标图像,所处位置为物距 $L = 102$ mm,离焦量 $c = L - V = 2$ mm.

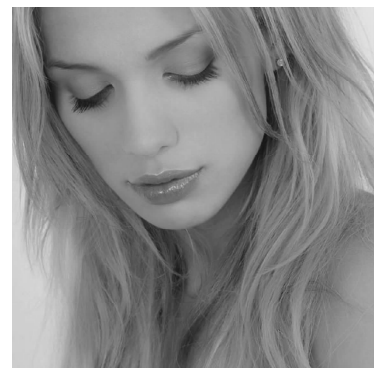


图 8 原始图像

Fig. 8 Original image

根据式(16),得出在透镜孔径上一维的最大采样间隔为 3.12 mm. 图 9 分别列出了采样间隔为 0.1 mm, 1.25 mm, 2.7 mm, 3.6 mm, 6.2 mm 时的

数字光场图像和对焦序列图像. 其中每组数字对焦序列图由远及近依次改变对焦位置, 每组的第三幅图像最为清晰, 即对焦面图像.

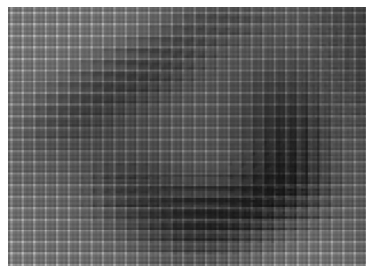


图 9 采样间隔为 0.1 mm、1.25 mm、2.7 mm、3.6 mm 和 6.2 mm 时的光场图像

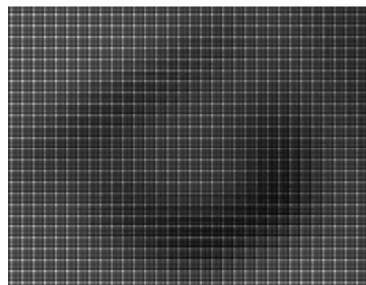
Fig. 9 Light field image at sampling interval of 0.1 mm, 1.25 mm, 2.7 mm, 3.6 mm and 6.2 mm

取出采样间隔分别为 2.7 mm 和 3.6 mm 的两幅光场图像的局部放大图进行对比.

可以发现,图 10 中像元之间的过渡相对图 11 更为柔和,网格效应较弱.



(a)The sampling interval is 2.7 mm



(b)The sampling interval is 3.6 mm

图 10 采样间隔为 2.7 mm 和 3.6 mm 时的光场图像
Fig. 10 Light field image at sampling interval of 2.7 mm and 3.6 mm



图 11 不同采样间隔的对焦面图像
Fig. 11 Refocused images at different sampling intervals

取出每组数字对焦序列图的第三幅图像,即对焦面图像进行对比.

很显然,前三幅图像(采样间隔分别为 0.1 mm, 1.25 mm, 2.7 mm)的清晰度相当,而后两幅图像(采样间隔为 3.6 mm 和 6.2 mm)的清晰度有不同程度的下降.

观察图 12 和图 13,可以发现采样间隔为 3.6 mm 时的对焦面图像的清晰度下降明显,细节部分变得模糊,信息有所丢失,导致不能完全还原出原始图像.此结果基本验证了最大采样间隔 3.12 mm 的正确性.

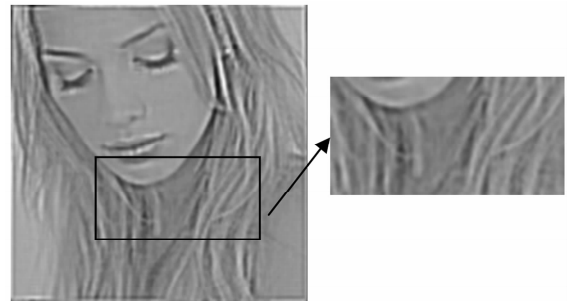


图 12 采样间隔为 2.7 mm 时的对焦面图像
Fig. 12 Refocused image at sampling interval of 2.7 mm

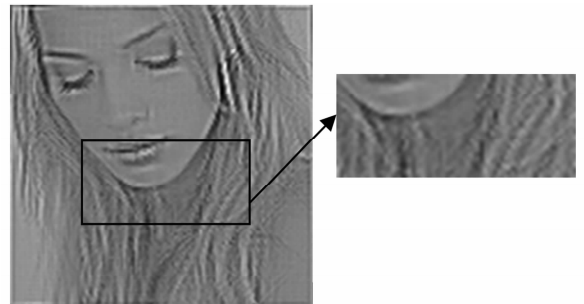


图 13 采样间隔为 3.6 mm 时的对焦面图像
Fig. 13 Refocused image at sampling interval of 3.6 mm

4 结论

本文分析了基于掩膜的光场成像特点,通过模拟光场的获取,计算获得离焦物体的清晰图像.利用采样定理,分析了孔径采样密度对数字重对焦图像的影响,进而选取合适的采样间隔来优化仿真模型.仿真实验的结果证明了采样分析的正确性,并为今后仿真实验的进一步改进提供了理论基础.

参考文献

- [1] GEORGEIV T Z, CURLESS B. Spatio-angular resolution tradeoff in integral photography [C]. In Eurographics Symposium on Rendering, 2006, 263-272.
- [2] ADELSON E, WANG J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera [C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 99-106.
- [3] NG R, LEVOY M B. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [R]. Tech Rep, CSTR 2005-02, Stanford Computer Science.
- [4] VEERARAGHAVAN A, RASKAR R, AGRAWAL A. Dappled photography: mask enhanced camera for heterodyned light field and coded aperture refocusing [C]. ACM Trans Graph, 2007, 26(3).
- [5] MERTZ L, YOUNG N. Fresnel transformations of images [C]. International Conference on Optical Instruments and Techniques, London, 1961, 305-310.
- [6] FENIMORE E, CANNON T. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays [J]. Appl Opt, 1978, 17(3): 337-347.
- [7] YAMANAKA C, YAMANAKA M. A URA coded aperture camera for the inertial confinement fusion experiments [J]. IEEE Trans on Nuclear Science, 1984, 31(1): 490-494.
- [8] BUSBOOM A, ELDERS-BOLL H, SCHOTTEN H. Combinatorial design of near-optimum masks for coded aperture imaging [J]. IEEE International Conference on

- Acoustics, Speech, and Signal Processing. ICASSP, 1997, 4: 2817.
- [9] XIAO Xiang-guo, WANG Zhong-hou, SUN Chuan-dong, *et al.* A range focusing measurement technology based on light field photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2539-2543.
肖相国, 王忠厚, 孙传东, 等. 基于光场摄像技术的对焦测距方法的研究[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2539-2543.
- [10] LEVOY M, HANRAHAN P. Light field rendering[J]. In SIGGRAPH 1996, 31-42.
- [11] NG R. Fourier slice photography[C]. *ACM Trans Graph* 24, 2005, 735-744.
- [12] GEORGIEV T, INTWALA C, BABACAN D. Light field capture by multiplexing in the frequency domain[R]. Adobe Technical Report, Adobe Systems Incorporated. 2007.

Research on Sampling and Computer Simulation of Mask-based Light Field Photography

CHANG Lei, YUAN Yan, ZHANG Xiu-bao, ZHOU Zhi-liang

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

Abstract: Light field photography is a new imaging technology with a patterned mask inserted between lens and sensor in a conventional camera. The mask attenuates the incident light rays and the sensor records both 2D spatial and 2D directional information. Sharp images at different depths could be calculated from reconstructed 4D light field. This paper establishes computer modeling of light field camera, and proposes a method of reducing computational amount due to sampling theorem on the premise of image quality assurance. It is proved in the computer simulation.

Key words: Mask; Light Field image; Sampling; Simulation



CHANG Lei was born in 1985. He is pursuing his M. S. degree at optical engineering in Beijing University of Aeronautics & Astronautics. His research focuses on mask-based light field photography.



YUAN Yan was born in 1967. She received her Ph. D. degree from Graduate University of Chinese Academy of Sciences in 2005. Now she is a professor at Beijing University of Aeronautics & Astronautics, and her current research interests focus on light field imaging technology, modeling and measuring on optical characteristics of space target, spectral imaging technology, etc.