

四焦距聚焦型光场计算成像系统的设计

王佳华, 杜少军, 张焯喆, 李俊, 王彦, 刘青松

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 光场相机是一种在图像传感器前增加微透镜阵列的新型相机结构, 除了记录不同位置下光的强度及颜色外, 也记录不同位置下光线的方向信息, 从而能够计算目标场景的深度图和高阶相位图。该技术由于景深和分辨率相互制约, 获得大景深时分辨率会降低。分析了其结构特点并推导了景深和分辨率的关系, 并就选定的设计参数绘制了变化曲线。在此基础上, 提出了一种新型光场相机的设计方法, 该结构基于具有四类焦距的微透镜阵列, 可获得超大景深, 同时将分辨率的下降程度控制在可接受范围。仿真结果表明: 相对于三类焦距微透镜阵列, 所设计的四类焦距微透镜阵列景深可提高三倍, 而分辨率达到普通相机的 18.9%。

关键词: 光场相机; 景深; 有效分辨率比率; 多焦距; 微透镜阵列

中图分类号: O435; O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0218003

Design of focused light field computational imaging system with four-types focal lengths

Wang Jiahua, Du Shaojun, Zhang Xuanzhe, Li Jun, Wang Yan, Liu Qingsong

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The light field camera is a new camera structure that put a microlens array in front of image sensor. It can not only record the intensity and color of light at different positions, but also record the direction information of light in different positions, so that the depth map and high-order phase map of the target scene can be calculated. This technology is limited by the depth of field and resolution, and the resolution is reduced when a large depth of field is achieved. Its structural characteristics were analyzed and the relationship between the depth of field and the resolution was derived, and the change curves were plotted for selected design parameters. Based on this, a design method of a novel light field camera based on a microlens array with four types of focal lengths was proposed, which can obtain large depth of field and control the decline degree of resolution in an acceptable range. The simulation results show that compared with the three types of focal length microlens arrays, the depth of field of the four types of focal length microlens arrays designed can be increased three times, and the resolution can reach 18.9% of the ordinary cameras.

Key words: light field camera; depth of field; effective resolution ratio; multi-focus; microlens array

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 装备预研项目(30504050309)

作者简介: 王佳华(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光场成像及光束控制方面的研究。Email: 16694660@qq.com

导师简介: 杜少军(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事高能激光传输及光束控制方面的研究。Email: d_sj@tom.com

0 引言

在新型成像技术领域, 基于光场相机的计算成像将日新月异的计算能力和逐渐成熟的微阵列光学结构加工能力结合在一起, 形成了全新的光场重建方式, 成为近年来的研究热点。根据光场理论, 如果能够获取物点在不同方向上的强度分布就能准确解算出全视场的深度图谱, 而光场相机通过在传统相机的主透镜和图像传感器之间加装微透镜阵列 (Microlens Array, MLA), 实现了这一目标^[1], 尤其是 Lytro 和 Raytrix 等公司发布光场相机产品以来, 光场相机真正走向了普通消费者身边。

光场相机可分为非聚焦型和聚焦型两种: 第一种非聚焦结构微透镜阵列位于主透镜的焦面, 原则上景深无限大, 但是成像分辨率很低, 仅仅等于微透镜数目, 这是其重要缺陷; 第二种聚焦型结构成像元件离开焦平面一定距离, 等效于对主镜头的成像进行二次分孔径成像, 分辨率大大提高, 但是付出的代价是景深急剧缩短, 依旧无法摆脱分辨率和景深之间的相互制约。

文中详细分析了光场相机景深与分辨率之间的关系, 在此基础上提出了一种四焦距微透镜阵列的聚焦型光场相机, 基于不同深度为目标光场匹配不同焦距类型的微透镜阵列, 使四段景深衔接, 极大地扩展了系统的景深范围, 达到三焦距微透镜阵列的光场相机景深的 6 倍, 同时控制成像区域完全覆盖视场区域, 使分辨率仅下降到普通相机的 18.9%, 一定程度上解决了光场相机的技术瓶颈。

1 背景

1.1 传统相机

在介绍光场相机的景深之前, 首先分析一下传统相机的景深。

如图 1 所示, 理想情况下透镜左方 X_0 点发出的所有光线经过透镜后都将汇聚到透镜右方 Y_0 处, 它们之间的关系由薄透镜方程表示^[2]:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式中: f 为透镜焦距。如果在距离透镜 B 的 Y_0 处放置传感器, 那么在光轴上比 X_0 近或远的点发出的所有

光线经过透镜后将在传感器上呈扩散圆, 这意味着为了确保图像的锐利程度, 使图像看起来清晰, 传统相机只能将物空间一定深度范围最佳成像到像空间。这一深度范围称之为景深 (Depth of Field, DoF)。

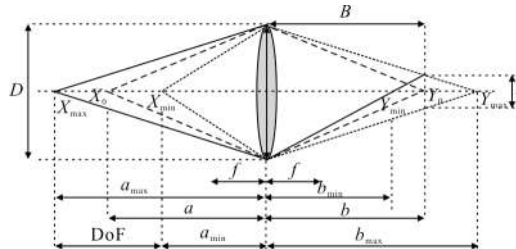


图 1 传统相机景深示意图

Fig.1 Schematic diagram of a conventional camera's depth of field

实际上由于衍射效应的作用, 点光源经过透镜后并不能汇聚到一个点, 而是具有一定的强度分布, 称之为艾里斑^[3]。描述其大小的一个近似公式是:

$$s_\lambda = 1.22 \frac{\lambda}{D} B \quad (2)$$

式中: s_λ 为艾里斑半径; λ 为光波长; D 为透镜直径; B 为透镜到传感器的距离。由瑞利准则可知, 如果拍摄的两个物体之间的距离足够小, 以至于相机传感器上的艾里斑开始重叠, 将无法清晰分辨物体。当两个艾里斑变得比其宽度的一半更近时, 它们就不能再分辨了。定义 $F\# = B/D$ 为工作 F 数^[4], 当 B 增大时, 艾里斑半径也随之增大。因此像元密度决定了成像系统的分辨率, 艾里斑限制了能够达到的极限分辨率。

透镜左方 X_0 点发出的所有光线经过透镜后都将汇聚到透镜右方 Y_0 处, 而透镜左方 $X_{\min} \sim X_{\max}$ 之间的点发出的光线将在距离透镜 B 处的传感器上扩散成一定范围, 因此 s 表示扩散圆直径。由图 1 中几何关系易得:

$$s = \pm D \left(B \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{a} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

式中: 正负号分别对应着 $B > b$ 和 $B < b$ 的情况。一维情况下, 有效分辨率 R_e 和 R_t 总分辨率定义为:

$$R_e = \frac{L_{\text{CCD}}}{\max(|s|, p, s_\lambda)}, R_t = \frac{L_{\text{CCD}}}{p} \quad (4)$$

式中: L_{CCD} 为传感器长度; p 为每个像元尺寸。实际上有效分辨率比率 (Effective Resolution Ratio, ERR) 是评价相机设计更有说服力的参数^[5], 它定义为:

$$ERR = \frac{R_e}{R_l} = \frac{p}{\max(|s_l|, p, s_\lambda)} \quad (5)$$

选取一组参数, 透镜直径 $D=0.3 \text{ mm}$, 焦距 $f=1.8 \text{ mm}$, 传感器像元尺寸 $p=5.5 \mu\text{m}$, 光波长 $\lambda=550 \text{ nm}$, 分别在 $B=2.4 \text{ mm}$ 和 $B=4 \text{ mm}$ 时绘制有效分辨率比率 ERR 随着物距 a 的变化示意图, 如图 2 所示。

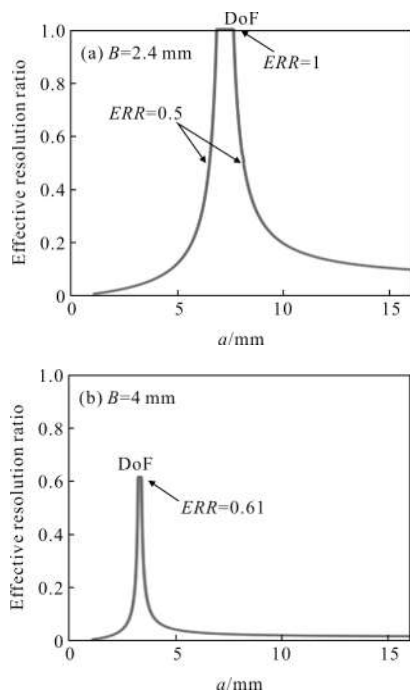


图 2 有效分辨率比率示意图

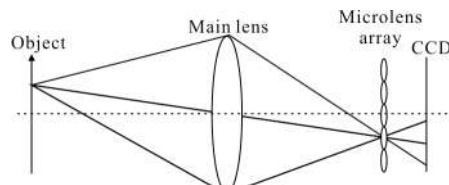
Fig.2 Effective resolution ratio diagram

从图中可以看到, B 值会影响景深的范围和有效分辨率比率的大小。图 2(a)中, B 值较小, 工作 F 数较小, 此时衍射效应不明显, 结合公式(4)可知此时像元尺寸 p 起主导作用, p 较小时, 即像素密时, 景深小; p 较大时像素疏, 景深大。图 2(b)中, B 值较大, 工作 F 数较大, 此时衍射效应使成像系统的 ERR 整体下降, 使峰值小于 1。从图(a)中还可以看到, $ERR=0.5$ 时的景深比 $ERR=1$ 时大, 即通过降低有效分辨率比率, 可以使景深得到扩展。

1.2 光场相机

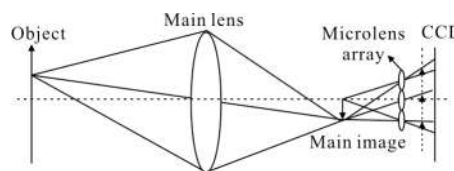
传统相机中传感器上每一个像素捕获的子图像都是对入射到该点的所有光线强度的积分^[6]。通过在传统相机的主透镜和传感器之间插入微透镜阵列, 可以分别捕获每一细束光线, 因此传感器上不同的像素代表着不同角度范围的入射光线, 构成光场相机。

在第 I 代光场相机中, 微透镜阵列放置在主透镜焦平面处, 计算成像后获得图像的分辨率和微透镜数量相等^[1], 如图 3(a)所示。第 II 代光场相机是将微透镜阵列放置在稍微不同的地方, 主透镜成像到微透镜阵列前(成实像, 如图 3(b)所示)或后(成虚像), 然后微透镜阵列对主透镜所成的像进行成像, 即将微透镜阵列看作是微相机阵列, 每个微相机对从主透镜过来的光线成聚焦的微图像, 因此第 II 代光场相机常常称为聚焦光场相机或者全光 2.0。通过这一改进, 使得微透镜可以捕获密集的位置信息, 而不是捕获密集的方向信息, 以牺牲方向分辨率为代价显著提高空间分辨率, 使空间分辨率远高于微透镜数量^[7]。



(a) 第 I 代光场相机成像示意图

(a) Imaging schematic of the first generation light field camera



(b) 第 II 代光场相机成像示意图

(b) Imaging schematic of the second generation light field camera

图 3 第 I 代光场相机和第 II 代光场相机成像示意图

Fig.3 Imaging schematic of the I and II generation light field camera

第 II 代光场相机使用微透镜阵列将主镜头的像二次成像到 CCD 上, 即它可以对微透镜前面的特定平面的 4D 辐射进行采样。景深决定了后期通过计算能够清晰成像的范围, 因此微透镜阵列的景深需要尽可能大。小孔径的微透镜可实现大景深, 但这会导致工作 F 数较大和通光率较低, 工作 F 数大时衍射效应会模糊图像。

为了解决大孔径和大景深不能够同时获得这一矛盾, Todor Georgiev 等人提出了基于具有不同焦距的微透镜阵列的传感器设计^[6], 以便它们聚焦在

两个或更多个不同的平面上,如图 4 所示。

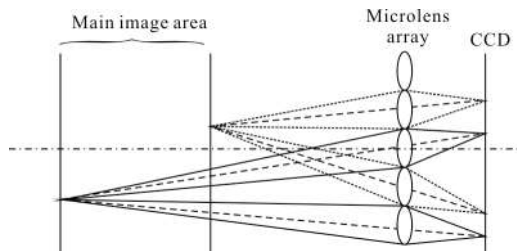


图 4 两种不同焦距交错排布的微透镜阵列捕获不同深度处的图像

Fig.4 Microlens arrays of different focal lengths are focused at different depths

Christian Perwass 等人在 Raytrix 工业级相机中采用三焦距微透镜阵列,通过选择合适的焦距可以使不同焦距的微透镜景深基本上相接,增大了整个光场相机的景深^[5]。

2 新型四焦距微透镜阵列设计

基于以上分析,笔者提出了一种新型多焦距光场相机,基于具有四焦距的微透镜阵列,采用六边形周期性紧密排布方式,理论分析表明,通过选择合适的微透镜焦距,可以扩展景深,对物空间中任意深度处,通过计算成像可以获得接近理论极限分辨率的图像。

2.1 虚深度

图 3(b)中,主透镜将物空间成像到微透镜阵列前,这样的结构称为成实像的光场相机,参考文献[4]中称为开普勒结构;相应的,主透镜将物空间成像到微透镜阵列后,称为成虚像的光场相机,称为伽利略结构。不失一般性,笔者仅讨论成虚像的光场相机,即伽利略结构的光场相机。对于成实像的光场相机的讨论也是类似的。

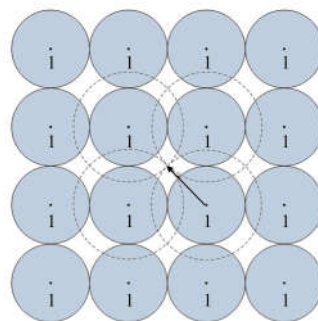
参考文献[5]中一般将主透镜所成的像到微透镜的轴向距离 a 与微透镜阵列到传感器的距离 B 之比称为虚深度,即 $v=a/B$ 。虚深度描述了主透镜像点与微透镜阵列和 CCD 的相对位置关系,即对于成虚像的光场相机(v 是负数), $|v|$ 越小表示在越少的微透镜下成像。考虑一维情况下,例如,虚深度为 -1 时,意味着该平面内的主透镜所成的每一个像点都至少能被一个微透镜二次成像,即 $v=-1$ 时实现了对主透镜所成像的全覆盖。为了能够实现深度估计,主透镜所成的像点至少要被两个微透镜二次成像,即虚

深度从 -2 开始时,可进行深度估计。

2.2 排布方式

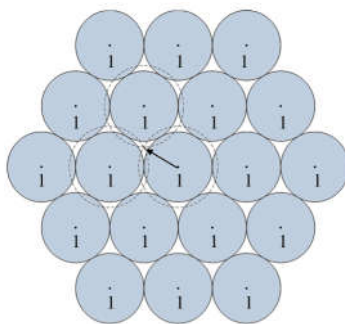
图 5 (a)、(b) 是微透镜阵列两种典型的排布方式。采用六边形排布方式相比于采用正交排布方式可以将填充率从 $\frac{\pi}{4}$ (约 0.79) 提高到 $\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$ (约 0.9),这提高了传感器上的光能利用率。

图 5 也可看做微透镜阵列在虚深度 $|v|=1$ 处的投影截面。如前所述,一维情况下 $|v|=1$ 意味着该平面内每一个主透镜所成像点都只能被一个微透镜成像,即要实现对整个主透镜所成像全覆盖,需要 $|v| \geq 1$ 。



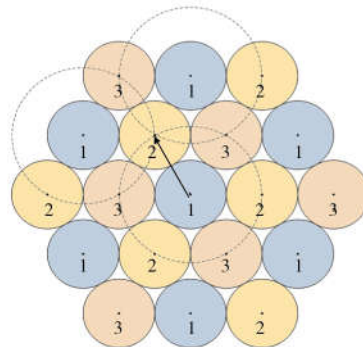
(a) 正交排布,单焦距微透镜阵列

(a) MLA with orthogonal arrangement, one type focal length



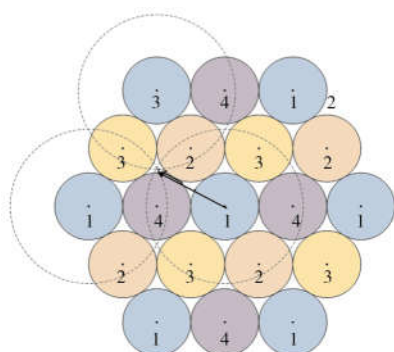
(b) 六边形排布,单焦距微透镜阵列

(b) MLA with hexagonal arrangement, one type focal length



(c) 六边形排布,三焦距微透镜阵列

(c) MLA with hexagonal arrangement, three types focal lengths



(d) 六边形排布,四焦距微透镜阵列

(d) MLA with hexagonal arrangement, four types focal lengths

图 5 不同排布方式和焦距类型的微透镜阵列示意图

Fig.5 Schematic diagram of MLA with different arrangements and different types of focal length

二维情况则不同, $|v|=1$ 时会在投影面留下间隙, 导致微透镜对主透镜所成像点采样有遗漏, 共轭到真实的物空间时信息不全。当虚深度增大时, 每个微透镜的投影圆都将线性增大。图中虚线圆表示同一类焦距微透镜实现主透镜像全覆盖时的最小投影圆, 箭头表示最小投影圆半径。由几何关系可得实现主透镜的像全覆盖时的虚深度范围, 如表 1 所示。

表 1 不同排布方式和焦距类型下允许的虚深度范围

Tab.1 Virtual depth range of MLA in different arrangements and different types of focal length

Arrangement	Orthogonal	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal
Focal Length	One type	One type	Three types	Four types
Virtual depth range	$ v \geq \sqrt{2}$	$ v \geq \frac{2}{\sqrt{3}}$	$ v \geq 2$	$ v \geq \frac{4}{\sqrt{3}}$

从表 1 中可以看出: 采用六边形排布相比于正交排布可以以较低的虚深度实现对主透镜像的全覆盖, 在后面的分析会指出随着虚深度的增大, ERR 会下降, 相同情况下六边形排布获得的图像分辨率更高, 这是采用六边形排列的另一个优势。在六边形排布的情况下, 考虑三种不同类型焦距, 如图 5(b)~(d) 所示, 在相同的排列方式下, 焦距类型增多时要实现对主透镜像的全覆盖, 虚深度下限随之增大, 即理论最高分辨率会下降, 这是焦距类型增多时的一个劣势。

2.3 有效分辨率比率

仍然考虑一维情况, 虚深度增大时, 主透镜所成

像点将会在更多微透镜下成像, 若不考虑景深的影响因素, 光场相机将达到理论极限 ERR :

$$ERR=1/|v| \tag{6}$$

由公式(6)可得到虚深度 v 与理论极限 ERR 的关系, 如图 6 所示。

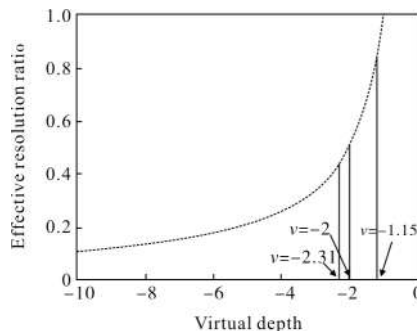


图 6 光场相机中虚深度 v 与理论极限 ERR 关系

Fig.6 Relationship between virtual depth and ideal limit ERR in light field camera

图中点画线表示虚深度 v 与理论极限 ERR 关系。易知随着 $|v|$ 增大, ERR 下降。图中标注箭头的三条虚线分别是单焦距、三焦距、四焦距微透镜阵列六边形排列时的虚深度起始值。通过选取合适的焦距, 可以使实际光场相机的 ERR 在局部虚深度处达到理论极限。结合公式(5), 得到一维情况下光场相机的有效分辨率比率:

$$ERR = \frac{p}{|v| \cdot \max(|s|, p, s_\lambda)} \tag{7}$$

式中: $|v| \geq 1$, 二维情况下的有效分辨率比率近似等于一维情况下有效分辨率比率的平方。前面已经分析过, 工作 F 数增大时, 衍射效应使成像系统的有效分辨率比率整体下降。考虑模糊圆半径不大于像元尺寸, 即 $s_\lambda \leq p$, 由公式(2)可得:

$$F_\# \leq \frac{p}{1.22 \lambda} \tag{8}$$

通常取光波长 $\lambda=550 \text{ nm}$, 由该式可知当像元尺寸 p 较小时, 工作 F 数也要相应减小, 否则会造成像素浪费。当工作 F 数减小时, 景深会变短。为了获得较大的景深, 在设计光场相机参数时希望工作 F 数能够尽量大。

选定一组光场相机参数, 像元尺寸 $p=5.5 \mu\text{m}$, 工作 F 数 $F_\#=8$, 微透镜直径 $D=0.22 \text{ mm}$ 。由工作 F 数的定义, 可以得到微透镜到传感器的距离 $B=1.76 \text{ mm}$ 。由公式(8)可知这组参数满足工作 F 数要求。对于单

焦距微透镜阵列, 虚深度 $v=-1.15$ 时对主透镜像全覆盖, 对于三焦距微透镜阵列, 虚深度 $v=-2$ 时对主透镜像全覆盖, 合理选择三类焦距, 使景深相接, 如图 7 所示。

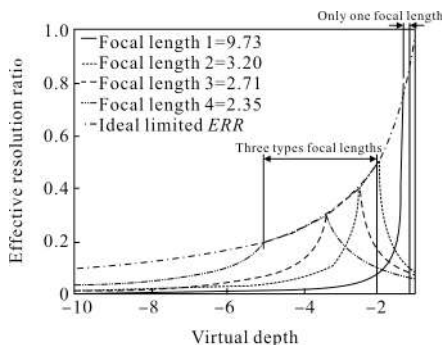


图 7 单焦距微透镜阵列和三焦距微透镜阵列虚深度 v 与 ERR 关系

Fig.7 Relationship between virtual depth and ERR in one type focal length and three types focal lengths in light field camera

从图 7 中可以直观地看到采用多焦距微透镜阵列替代单焦距微透镜阵列的优势。对于单焦距微透镜阵列, 虚深度范围短, ERR 曲线高, 即景深短、分辨率高。当采用三焦距微透镜阵列时, 虚深度范围宽, ERR 曲线下移, 即以牺牲分辨率为代价获得景深的扩展。

从图 7 中还可以看到, 采用三焦距的微透镜阵列在虚深度 $|v|>1$ 时, ERR 曲线快速下降, 低于理想曲线。为了获得更大的景深, 同时使分辨率下降程度可接受, 笔者提出了一种四焦距微透镜阵列。与三焦距微透镜阵列设计相类似, 四焦距微透镜阵列采用六边形周期性紧密排布方式, 虚深度 $v=-2.31$ 时对主透镜像全覆盖, 选择合适的焦距, 使不同焦距的微透镜景深相接, 如图 8 所示。

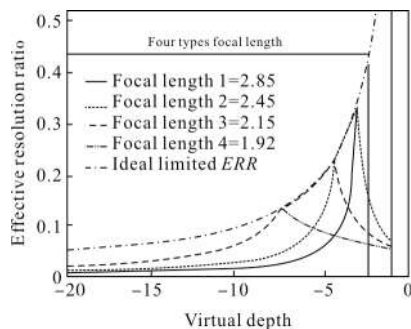


图 8 四焦距微透镜阵列虚深度 v 与 ERR 关系

Fig.8 Relationship between virtual depth and ERR in four types MLA

笔者认为, ERR 下降到 0.05 时是可以接受的值, 从图中可以看到, 通过选择合适的微透镜焦距, 四焦距微透镜阵列可将虚深度扩展到 20, 相比单焦距微透镜阵列和三焦距微透镜阵列, 在虚深度大时, 分辨率更高。取 $ERR \geq 0.05$ 为虚深度范围, 在前面选定的光场相机参数下, 可得表 2。

表 2 虚深度范围和最高分辨率下降比较

Tab.2 Virtual depth range and maximum ERR

Focal length type	Virtual depth range	Maximum ERR (2 Dimension)
One type	$[-1.15, -2.44]$	0.75
Three types	$[-2.00, -7.97]$	0.25
Four types	$[-2.31, -20]$	0.19

从表中可以看到, 三焦距微透镜阵列峰值 ERR 为 $1/4$, 而四焦距微透镜阵列峰值 ERR 约为 $1/5$, 采用四焦距微透镜阵列相对于单焦距和三焦距微透镜阵列, 虚深度分别扩展了 13.7、3 倍, 即虚深度的扩展是以牺牲最高分辨率为代价的。

3 结 论

文中分析并提出了一种新型四焦距微透镜阵列。在传统相机和光场相机研究的基础上, 通过分析景深和分辨率制约的关系, 提出了新型微透镜阵列设计方法。相比于 Raytrix 工业级相机采用三焦距微透镜阵列, 该设计可以将景深扩展三倍。通过该设计, 不同焦距的微透镜的视场深度将覆盖传感器前面的整个空间, 给定场景中任意一点, 至少有一组微透镜将会清晰地聚焦, 为扩展光场相机的景深提供了一种切实可行的方案。

参考文献:

[1] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [J]. *Computer Science Technical Report CSTR*, 2005, 2 (11): 1-11.

[2] Adelson E H, Wang J Y. Single lens stereo with a plenoptic camera [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106.

[3] Goodman J W, Cox M E. Introduction to Fourier Optics

- [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [4] Georgiev T, Lumsdaine A. Depth of field in plenoptic cameras[J]. *Eurographics*, 2009(1): 5-8.
- [5] Perwass C, Wietzke L. Single lens 3D-camera with extended depth-of-field [C]//Human Vision and Electronic Imaging XVII, 2012, 8291: 829108.
- [6] Georgiev T, Lumsdaine A. The multifocus plenoptic camera: IS&T/SPIE Electronic Imaging[C]//SPIE, 2012, 8299: 829908.
- [7] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C]//IEEE International Conference on Computational Photography, 2010.