

# 基于微透镜型光场成像的高分辨率数字对焦技术研究

赵青青<sup>1,2</sup> 张涛<sup>1</sup> 郑伟波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用计算成像的方法得到不同方向、位置、景深处的图像以满足不同需求, 实现先拍照后对焦的功能, 克服了传统相机机械式调焦带来的缺陷, 但其子光圈图像空间分辨率受微透镜数目的限制, 成像质量相比传统相机有所下降。为此提出了一种高分辨率数字对焦方法, 即先提取子光圈图像, 然后采用小波和插值相结合的算法把每个子光圈图像的分辨率提高一倍, 组成高分辨率子光圈图像阵列, 再对该子光圈图像阵列做傅里叶切片变换重聚焦处理。通过对比处理结果发现, 图像清晰度和分辨率均得到了提高。

**关键词** 图像处理; 高分辨率重聚焦图像; 小波和插值相结合的算法; 傅里叶切片变换; 数字对焦; 子光圈图像  
**中图分类号** TN2      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.101001

## Research on High Resolution Digital Refocusing of Light Field Imaging Based on Microlens Array

Zhao Qingqing<sup>1,2</sup> Zhang Tao<sup>1</sup> Zheng Weibo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The pictures in different directions, locations and depths of focus are obtained using the method of computational imaging to satisfy the different requirements and to achieve the function of taking the picture before focusing the camera, and overcoming the drawbacks of mechanical focusing in traditional camera. However, its image quality is lower than the traditional camera because its resolution is restricted by the number of microlens. The high resolution digital autofocus method is proposed, that is extracting the sub aperture pictures firstly, and then doubling the resolution of every sub aperture pictures by the method of the combination of wavelet transformation and interpolation. So, the sub aperture picture array with high resolution can be formed. The refocus processing on this array by Fourier slice transformation is done, and the processed results show that the definition and resolution of the refocused images increase greatly.

**Key words** image processing; high resolution refocused image; combination algorithm of wavelet transformation and interpolation; Fourier slice transformation; digital focus; sub aperture picture

**OCIS codes** 100.2000; 100.2550; 110.1220; 200.4560

## 1 引言

光场成像系统<sup>[1]</sup>包括一个主镜头、一个微透镜阵列和一个图像探测器, 显然, 与传统成像系统的区别是镜头与图像传感器中间插入了一个微透镜阵列, 每个微透镜对应一个宏像素, 每个宏像素覆盖探测器上的若干像素, 每个宏像素对应光场的一个位置采样, 而宏像素内的每一个像素对应于光场在该位置的一个方向采

**收稿日期:** 2016-05-10; **收到修改稿日期:** 2016-05-30; **网络出版日期:** 2016-09-20

**基金项目:** 中国科学院上海技术物理研究所导向性基础研究项目(CX-52)

**作者简介:** 赵青青(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事生物光信息处理方面的研究。

E-mail: shengwuzhaoqing@163.com

**导师简介:** 张涛(1967—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间生命科学仪器方面的研究。

E-mail: haozzh@sina.com

样,所有宏像素共同组成了光场在镜头孔径上每一点和每一个微透镜位置的采样。因此,光场成像系统能够获取空间四维(4D)光场信息,通过计算成像的方式可以实现先拍照后对焦的功能,即数字对焦功能。

不足之处在于,由于受到成像系统硬件设备、微透镜阵列的大小限制,阵列中微透镜的个数不宜太多,这就影响了图像的分辨率,所获子光圈图像的分辨率比传统图像还要低,重聚焦图像的分辨率也相应较低。为了克服这种缺陷,长春理工大学的朴燕<sup>[2]</sup>提出基于立体像素匹配的图像重构技术,所提取出的子图像的分辨率得到了很大提高;西安电子科技大学的徐茵等<sup>[3]</sup>提出高分辨率计算集成成像自由视点光场重构方法,把单元图像阵列投影到微透镜阵列面上的重构平面上;燕山大学的丁伟利等<sup>[4]</sup>提出基于先验似然的高分辨光场图像深度重建算法,虽然提高了重构图像的分辨率,但重聚焦图像的分辨率并未提高。中国科学技术大学的周志良<sup>[5]</sup>提出图像配准图像重建的超分辨率图像重建方法,该方法需要先计算不同深度处的亚像素位移量然后图像配准,最后重建超分辨率图像。Lumsdaine 等<sup>[6-7]</sup>提出了一种聚焦型光场相机 Plenoptic 2.0,该类型的相机是对主光学系统所成的像进行二次成像,利用距离微透镜阵列前面  $a$  处的平面上的方向采样来获取光场信息,继而展开了许多基于此类型光场相机的高分辨率光场重构技术的研究<sup>[8-9]</sup>,通过硬件设备上的改进来降低软件算法处理上的难度,重聚焦图像的分辨率能够较容易地得到提高。

本文提出一种高分辨率图像聚焦方法,该方法不仅适用于传统光场相机,也适用于聚焦型光场相机,即对四维光场矩阵中每个子光圈矩阵进行小波变换和插值相结合的算法处理,然后对处理后的四维光场图像阵列进行傅里叶切片变换<sup>[10]</sup>,通过对比处理结果发现,获取的重聚焦图像的分辨率和清晰度均有所提高。

## 2 高分辨率光场数字对焦原理

### 2.1 子光圈图像

子光圈图像也叫子孔径图像,所有的子孔径图像组成一个主镜头孔径图像,如图 1 所示,在四维光场图像中,从每个宏像素同一位置处提取一个像素可以得到一幅子光圈图像,因此,宏像素中元素的数目和子光圈图像阵列中子光圈图像数目相等,宏像素的个数即微透镜的个数决定了子光圈图像的分辨率。假设四维光场矩阵为  $L_F(s, t, u, v)$ , 其中,  $(s, t)$  代表微透镜位置坐标,  $(u, v)$  代表光线通过每个微透镜的方向坐标,例如,  $L_F(:, :, 1, 2)$  表示取每个宏像素中第一行第二列元素所组成的子光圈图像,  $L_F(:, :, u, v)$  代表子光圈图像阵列。本文中光场图像采用的宏像素个数为  $380 \times 380$ , 每个宏像素中元素的个数为  $15 \times 15$ , 所以  $s = 1:1:625, t = 1:1:434, u = 1:15, v = 1:15$ , 子光圈图像的分辨率为  $380 \text{ pixel} \times 380 \text{ pixel}$ , 子光圈图像阵列中所含子光圈图像的个数为  $15 \times 15$ 。因此,子光圈图像的分辨率与微透镜个数有关。

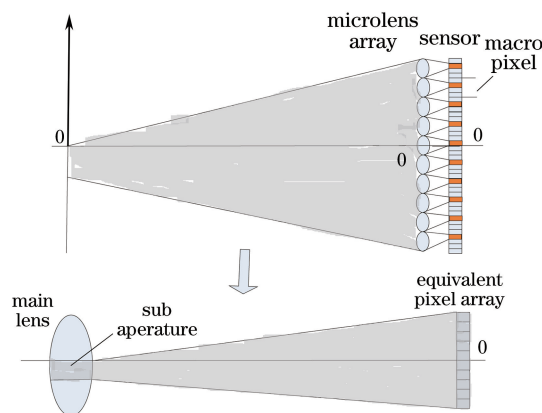


图 1 子光圈图像提取

Fig. 1 Extracting of the sub aperture image

光场图像数字聚焦实质上是光场的同轴空间变换<sup>[11]</sup>,同时 Ng 等<sup>[1]</sup>提出光场图像重聚焦是对子光圈图像阵列中所有子光圈图像叠加和平移的结果。如图 2 所示,红色点对应的光线会聚在深度  $a$  处,黑色点对应的光线会聚在深度  $b$  处。若在  $a$  处建立重建平面,则得到的图像中,红色点聚焦,黑色点离焦。若在  $b$  处建立重建平面,则得到的图像红色点离焦模糊,而黑色点聚焦清晰。因此,若子光圈图像分辨率提高则其重聚

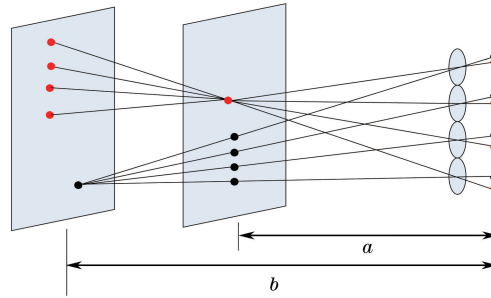


图 2 基于微透镜阵列的计算成像原理图

Fig. 2 Schematics of image computing based on microlens array

焦图像的分辨率也会相应提高。

因此,本文算法流程如图 3 所示,红色标号 1 表示原始低分辨率光场数字聚焦处理步骤,红色标号 2 表示改进后的光场数字聚焦处理步骤。

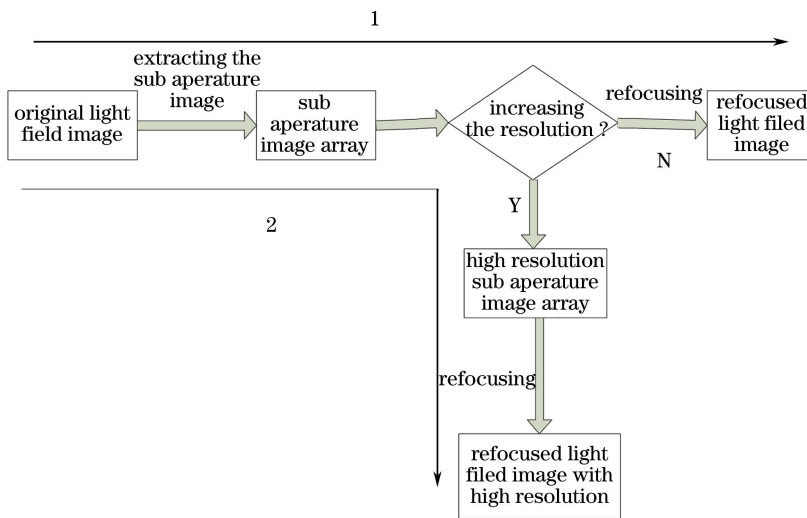


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

## 2.2 提高子光圈图像分辨率处理

目前提高分辨率的方法主要有建立退化模型方法、基于学习的方法、基于插值及其改进的算法。本文采用基于插值及其改进的算法,复杂度较低,处理效果较好,现有的针对单帧图像的插值算法有近邻插值算法、双线性插值算法、三次样条插值算法,最邻近插值会产生块状和锯齿,而双线性插值和双三次插值则会使图像的边缘变得模糊。利用小波变换可以将图像的高低频信息很好地分离,单独地对高频信息进行处理,然后再与原始图像叠加,就能够得到边缘效果较好的图像。本文采用西安电子科技大学林虹<sup>[12]</sup>的小波与插值相结合的算法,算法处理流程如图 4 所示,其中,  $X_{a1}$ 、 $X_{a2}$  表示小波分解后的近似分量,即低频分量;  $X_{h1}$ 、 $X_{h2}$  表示小波分解后的水平高频分量;  $X_{v1}$ 、 $X_{v2}$  表示小波分解后的垂直高频分量;  $X_{d1}$ 、 $X_{d2}$  表示小波分解后的对角高频分量。原始图像为较低分辨率的子光圈图像  $L_F(s, t, :, :)$ ,  $s=1:15, t=1:15$ , 对每个子光圈图像进行该算法处理,得到较高分辨率的子光圈图像阵列  $L'_F(s, t, :, :)$ 。下文的  $L_F$  在重对焦算法处理中,不作特别说明,均为本文提高子光圈阵列分辨率算法处理后的光场矩阵  $L'_F$ 。

## 2.3 光场数字对焦原理

目前,关于光场数字聚焦技术的研究主要是基于空域和频域的,基于空域的方法主要是积分运算,基于频域的方法是以傅里叶切片定理<sup>[13]</sup>为依据的四维傅里叶变换。

采用图示的方式介绍光场重聚焦的算法原理。如图 5 所示,采用双平面表示四维光场矩阵,其中  $\mathbf{X}=(x, y)$  为重对焦平面,  $\mathbf{U}=(u, v)$  为主透镜平面,  $\mathbf{S}=(s, t)$  为探测器平面,假定沿某一方向传播的一条光

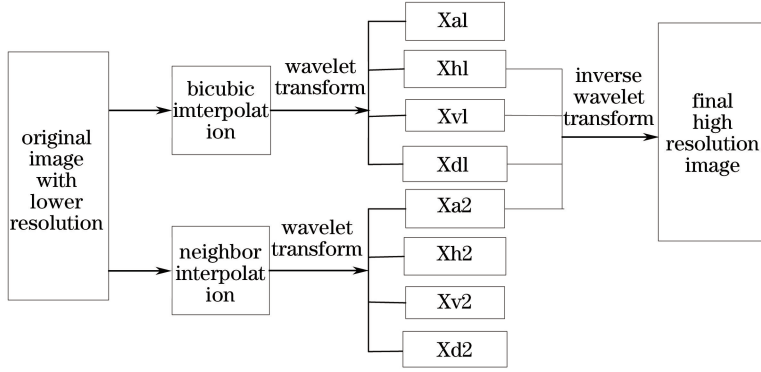


图4 小波与插值相结合的算法处理框图

Fig. 4 Algorithm diagram of the combination of wavelet transformation and interpolation

线在像距为  $\alpha F$  像面上投射点坐标为  $(x, y)$ , 由图 5 的几何关系可知这条光线在像距为  $F$  的像面上的投射点坐标为  $\left(u + \frac{x-u}{\alpha}, \nu + \frac{y-\nu}{\alpha}\right)$ , 所以  $s' = u + \frac{x-u}{\alpha}, t' = \nu + \frac{y-\nu}{\alpha}$ 。

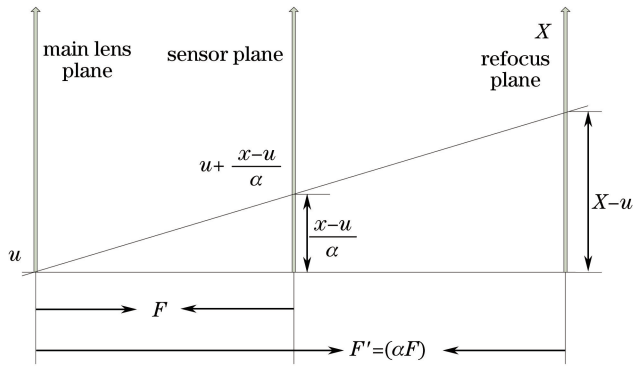


图5 光场数字对焦原理图

Fig. 5 Schematics of light field digital focusing

$L_F$  和  $L_{F'}$  分别表示像距为  $F$  和  $\alpha F$  的光线,  $L_{F'} = L_{\alpha F}, \alpha = \frac{F'}{F}, F'$  和  $F$  分别为主透镜到重对焦成像平面和探测器阵列平面的距离, 所以,

$$L_{F'}(s, t, u, \nu) = L_{\alpha F}(s, t, u, \nu) = L_F(s', t', u, \nu) =$$

$$L_F\left[u + \frac{(x-u)}{\alpha}, \nu + \frac{(y-\nu)}{\alpha}, u, \nu\right] = L_F\left[u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x}{\alpha}, \nu\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y}{\alpha}, u, \nu\right], \quad (1)$$

空间域的重对焦公式为

$$E_{\alpha F}(x, y) = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_{\alpha F}(s, t, u, \nu) du d\nu = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F\left[u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x}{\alpha}, \nu\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y}{\alpha}, u, \nu\right] du d\nu, \quad (2)$$

空域积分计算也是求和运算, 计算的复杂度较高, 耗时较长。

对四维光场进行基于频域的重聚焦计算是目前研究的热点, 斯坦福大学的 Ng<sup>[13]</sup> 提出傅里叶切片摄影理论, Pérez 等<sup>[14]</sup> 提出光场相机的超分辨率傅里叶切片变换, Nava 等<sup>[15-16]</sup> 在此基础上提出了一种离散焦点堆栈变换方法。本文采用 Ng 提出的傅里叶切片定理来实现光场重聚焦的过程。

光场的四维傅里叶变换为

$$\mathcal{F}^4(\omega_s, \omega_U) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L_F(\mathbf{S}, \mathbf{U}) \exp[-2\pi j(\mathbf{S} \cdot \omega_s + \mathbf{U} \cdot \omega_U)] d\mathbf{S} d\mathbf{U}, \quad (3)$$

式中  $\omega_s, \omega_U$  分别为矢量  $\mathbf{S}, \mathbf{U}$  的频域矢量。

根据傅里叶切片摄影定理, 重对焦图像还可以表示为四维光场的二维傅里叶切片的反变换, 如图 6 所示。因此,  $\mathbf{X}$  面上的重聚焦图像  $\mathbf{P}_\alpha[L_F](\mathbf{X})$  可以表示为

$$\mathbf{P}_\alpha[L_F](\mathbf{X}) = \mathcal{F}^{-2} \cdot \mathcal{F}_\alpha \mathcal{F}^4, \quad (4)$$

式中  $\mathcal{F}^{-2}$  表示二维傅里叶变换的反变换,  $\mathcal{F}_\alpha$  是四维光场傅里叶切片变换,  $\mathcal{F}^4$  为光场数据的四维傅里叶变换。

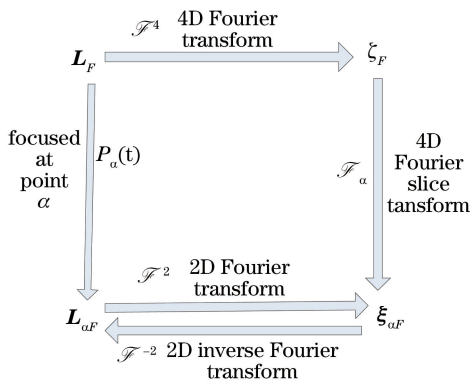


图 6 四维光场图像的傅里叶切片变换

Fig. 6 4D Fourier slice transform of light field image

### 3 实验结果与分析

为了更充分地说明本文算法的处理效果,把前后放置的标有“中国地图”的图书和分辨率板作为成像目标,重聚焦算法中聚焦在后方的分辨率板上。利用三种处理方法与本文算法作对比,现简要说明图 7 所采用的处理方法。

图 7 是直接重聚焦算法处理结果,即图 3 中的红色标号 1 的算法处理结果;图 8(a)是本文算法处理结果;图 8(b)是采用 Pérez 等提出的算法处理结果<sup>[14]</sup>;图 8(c)是直接重聚焦算法处理然后再提高分辨率的处理结果,其中提高分辨率方法与本文方法一样。



图 7 直接重聚焦算法

Fig. 7 Directly refocusing algorithm

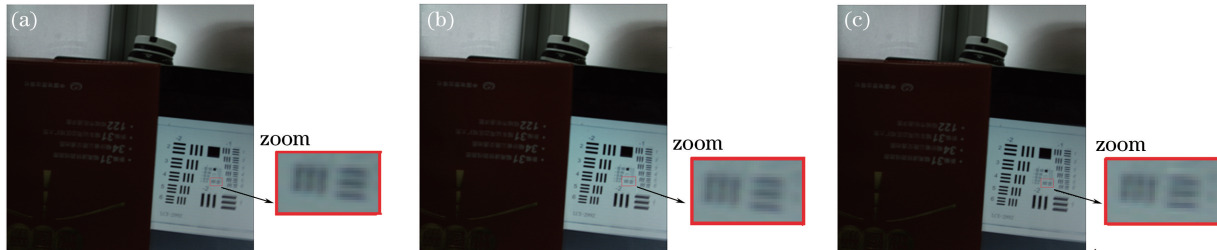


图 8 聚焦于分辨率板上的不同算法处理结果。(a)本文算法;(b)超分辨率焦点堆栈算法;(c)提高重对焦图像分辨率算法

Fig. 8 Results obtained by different algorithms of focused at resolution board. (a) Proposed method; (b) super resolution focal-stack method; (c) increasing resolution after refocusing

图 7 的像素数为  $380 \text{ pixel} \times 380 \text{ pixel}$ ,图 8 像素数为  $760 \text{ pixel} \times 760 \text{ pixel}$ ,显然,图 7 分辨率较低,很难满足应用需求,因此,本文分别对图 8(a)~(c)中采用提高分辨率算法的处理结果作对比,分析各种算法提高分辨率的能力和效果。

从图 8 的实验结果可以看出,图 8(a)和(b)放大的红色矩形中 E 的轮廓可以辨别,朝向分别是向下和向

左,图 8(c)放大的红色矩形中 E 的轮廓比较模糊,基本分辨不清,朝向一个是向下,另一个难以辨别。

为了更客观地说明本文算法的处理效果,采用清晰度评价函数来评价图像的清晰度,对图 8(a)~(c)中的图像采用清晰度评价函数来评价清晰度。表 1 为评价结果,清晰度评价函数选用基于锐度的清晰度评价算法,该方法的操作原理为计算某像素点 8 邻域像素与该像素点灰度值之差的绝对值,差值进行距离加权,对水平和垂直方向的权重选为 1,其他方向的权重选为  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ,值越大代表图像越清晰。

表 1 清晰度评价结果

Table 1 Evaluation results of the clarity

Image sequence number	Result
Fig. 8(a)	$2.8863 \times 10^6$
Fig. 8(b)	$2.8891 \times 10^6$
Fig. 8(c)	$2.4960 \times 10^6$

从上述实验结果可以看出,图 8(a)与(b)中的值相差不大,图 8(c)的清晰度值较小。因此,本文算法与 Pérez 等提出的算法处理效果差不多,重聚焦图像的分辨率均有所提高;先重聚焦处理再提高重聚焦后图像的分辨率的处理效果略差。主要原因是,光场重聚焦实质上是子光圈图像的平移和叠加,子光圈图像阵列的分辨率提高了,图像的细节更丰富,重聚焦准确度也更精确,对焦后的图像质量会有很大提高。因此,本文算法是得到高分辨率重聚焦图像的有效方法。

## 4 结 论

针对目前光场重聚焦图像分辨率低的问题提出了一种高分辨率光场图像重聚焦方法,即利用小波变换和插值相结合的算法来提高子光圈图像分辨率,然后对处理后的四维光场数据进行重对焦处理,该算法取得了一定的效果,但重聚焦图像清晰度还不是特别高,后续工作将集中在更高效的超分辨率图像重构算法的研究上。

## 参 考 文 献

- Ng R, Levoy M, Brédif M, *et al.* Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science Technical Report CSTR, 2005: 1-11.
- Piao Yan. Imaging reconstruction technique based on tridimensional pixel mapping[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2560-2563.  
朴 燕. 基于立体像素匹配的图像重构技术研究[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2560-2563.
- Xu Yin, Wang Xiaorui, Hao Jinbo, *et al.* High resolution free view intergral imaging reconstruction using the light field model[J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(1): 81-86.  
徐 茵, 王晓蕊, 郝劲波, 等. 高分辨率计算集成成像自由视点光场重构方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2013, 40(1): 81-86.
- Ding Weili, Ma Pengcheng, Lu Ming, *et al.* High resolution light field depth reconstruction algorithm based on priori likelihood[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715002.  
丁伟利, 马鹏程, 陆 鸣, 等. 基于先验似然的高分辨光场图像深度重建算法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715002.
- Zhou Zhiliang. Research on light field imaging technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 36-39.  
周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 36-39.
- Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C]. IEEE International Conference on Computational Photography(ICCP), 2009: 1-8.
- Georgiev T. Focused plenoptic camera and rendering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2), 021106.
- Georgiev T, Chuneva G, Lumsdaine A. Superresolution with the focused plenoptic camera[C]. SPIE, 2011. 7873: 78730X.

- 9 Georgiev T G, Lumsdaine A. Superresolution with plenoptic 2.0 cameras [J]. *Signal Recovery & Synthesis*, 2009: STuA6.
- 10 Bracewell R N. Strip integration in radio astronomy [J]. *Aust J Phys*, 1956, 9(2): 198-217.
- 11 Zhang Xu, Li Chen. Calibration and imaging model of light field camera with microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1211005.  
张旭, 李晨. 微透镜阵列式光场成像模型及其标定方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1211005.
- 12 Lin Hong. Research on the algorithms of superresolution image reconstruction with wavelet and interpolation [D]. Xi'an: Xidian University, 2005: 11-22.  
林虹, 基于小波和插值的超分辨率图像重建算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005: 11-22.
- 13 Ng R. Fourier slice photography [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735-744.
- 14 Perez F, Perez A, Rodríguez M, *et al.* Fourier slice super-resolution in plenoptic cameras [J]. *IEEE International Conference on Computational Photography*, 2012: 1-11.
- 15 Nava F P, Marichal-Hernández J G, Rodríguez-Ramos J M. The discrete focal stack transform [C]. *16th European Signal Processing Conference*, 2008: 1-5.
- 16 Nava F P, Lüke J P. Simultaneous estimation of super-resolved depth and all-in-focus images from a plenoptic camera [C]. *3D TV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 2009: 1-4.