

6-5-2020

## Performance Analysis of Digital Refocusing Process Based on Light Field Imaging

Suping You

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;; 2. School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018;

Yucheng Lu

2. School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018;

Zhang Wei

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;;

Yang Bo

1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Performance Analysis of Digital Refocusing Process Based on Light Field Imaging

## Abstract

**Abstract:** Digital refocusing is one of the important properties of light field imaging, and the analysis of its performance has important reference value for the study of light field imaging. *In this paper, two different digital refocusing algorithms based on the microlens array light field camera (LFC) in spatial and frequency domain are presented. We study the influences of different domains, interpolation methods and sample radius in digital refocusing algorithm on image quality and computation speed. And we yield a tradeoff between image quality and time consumption in two domains.* Experiment results suggest that the two algorithms can achieve digital refocusing with fine image quality and less time consumption.

## Keywords

light field imaging, digital refocusing, microlens array, light field camera

## Recommended Citation

You Suping, LuYucheng, ZhangWei, YangBo. Performance Analysis of Digital Refocusing Process Based on Light Field Imaging[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2875-2881.

# 基于光场成像数字重聚焦过程的性能分析

尤素萍<sup>1,2</sup>, 卢昱丞<sup>2</sup>, 张薇<sup>1</sup>, 杨波<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 杭州电子科技大学理学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 数字重聚焦是光场成像的一个重要特性, 其性能的分析对光场成像研究具有重要的参考价值。本文基于微透镜阵列型光场成像时域与频域的两种不同重聚焦算法进行推导, 分析了数字重聚焦算法中不同域、插值方法、采样半径对图像像质和计算运行速度的影响, 得到在图像像质和处理速度之间的最佳值, 实验结果表明利用该方案都能在较快的处理速度下实现较好的图像像质。

**关键词:** 光场成像; 数字重聚焦; 微透镜阵列; 光场相机

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)11-2875-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711037

## Performance Analysis of Digital Refocusing Process Based on Light Field Imaging

You Suping<sup>1,2</sup>, LuYucheng<sup>2</sup>, ZhangWei<sup>1</sup>, YangBo<sup>1</sup>

(1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai200093;

2.School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou,Zhejiang310018)

**Abstract:** Digital refocusing is one of the important properties of light field imaging, and the analysis of its performance has important reference value for the study of light field imaging. In this paper, two different digital refocusing algorithms based on the microlens array light field camera (LFC) in spatial and frequency domain are presented. We study the influences of different domains, interpolation methods and sample radius in digital refocusing algorithm on image quality and computation speed. And we yield a tradeoff between image quality and time consumption in two domains. Experiment results suggest that the two algorithms can achieve digital refocusing with fine image quality and less time consumption.

**Keywords:** light field imaging; digital refocusing; microlens array; light field camera

## 引言

光场成像是计算成像的一个分支, 是近年成像研究的一个热点问题。传统相机的成像过程, 是对于三维空间景物采取了二维投影的方式, 只是将光线的强度在探测器像元上进行累加, 丢弃掉了光线的传播方向信息, 并限制了图像的重塑性。事实上物体发出的连续分布辐射, 可以用一个七维全光函

数来完整的表达<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的发展和微加工制造能力地提高, 使得对光场信息的记录与复现成为可能。1992年 Adelson 将光场理论成功运用到计算机视觉, 提出全光场理论<sup>[2]</sup>。1996年 Levoy 提出光场渲染理论<sup>[3]</sup>, 将光场进行参数化表示, 并提出了计算成像公式, 使得光场成像理论进一步完善。结合计算成像技术, 产生了许多新的光场记录与复现的方法。2005年美国斯坦福大学的 Ren NG 提出了光场相机方案<sup>[4]</sup>, 用一台手持式相机就能够方便地获得光场信息, 使光场成像技术更加接近于实用化。2006年 Levoy 将光场理论运用于显微成像<sup>[5]</sup>, 并研制出光场显微镜, 能够一次曝光得到多



收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2017-07-19;  
基金项目: 国家自然科学基金(61205015), 浙江省自然科学基金(LQ16F050003), 浙江省教育厅科研项目(Y201430970);  
作者简介: 尤素萍(1978-), 女, 江西玉山, 博士生, 高级实验师, 研究方向为光学, 光场成像等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2875 •

个视角多组焦平面图像,从而得到大景深的显微图片,并可进行三维重建。光场成像保留了对图像重塑的可能性,能够得到更加灵活化、多元化的图像信息,具有非常广泛的应用前景。如可以通过对光场图片的数字重聚焦技术,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;提高聚焦能力,摆脱失焦、跑焦困扰;增加对图片处理的灵活性;通过光场数据合成视角图像实现 3D 显示;通过对光场数据的反演,数字化校正光学系统像差,降低光学系统设计和加工难度等。可以说,大到航空航天,小到显微成像,光场成像技术能够延伸到目前所有应用到光学成像的领域,扩展现有光学成像技术能够获得的信息量。

目前,光场成像已经成为科研的一个热点问题并被广泛研究: Christopher Hahne 等人研究了它的几何模型并评估了标准光场相机的一些特性<sup>[6]</sup>。Donald G. Dansereau 等人给出了关于解码、标定和校正的一些技术细节并使用一种四维滤波器实现图像降噪<sup>[7]</sup>。Fernando Pérez Nava 等人将随机变换应用到时域的数字重聚焦算法上并另辟蹊径地使用分数阶傅里叶变换处理光场数据<sup>[8]</sup>。此外, Todor Georgiev 等人研究了硬件设计,他们更改了微透镜阵列到图像传感器的距离并提出了“全光相机 2.0”,从而提高了重聚焦图像的分辨率<sup>[9]</sup>。Chih-Chieh Chen 等人使用一个针孔阵列掩模板替换了微透镜阵列简化了硬件设计<sup>[10]</sup>。Ashok Veeraraghavan 等人使用衰减掩模板来简化硬件设计并插入一个宽带掩模板来获得全分辨率的重聚焦图像<sup>[11]</sup>。近年来,我国一些单位,如北京理工大学、中国科技大学、中国科学院光电研究院等也在此方面开展了一些基础性的研究<sup>[12-18]</sup>,在光场成像的提取和分辨率的改善方面都获得一定的成果。

以上的这些研究成果对于光场相机软硬件上已经有很大改进,但事实上,数字重聚焦过程本身对图像和运算过程造成的一定影响,可是这一方面的影响却很少有研究。因此,本文对微透镜阵列的光场相机的数字重聚焦的两种算法进行模拟分析,

并比较了几种不同参数下的图像质量和运算速度,得到了一组较好的实验效果值,这个结果可以为后续的光场成像数字重聚焦算法研究提供借鉴方案。

## 1 光场相机简化模型

光场相机的成像装置,主要由三部分构成:较大数值孔径的主透镜、与主透镜光圈匹配的微透镜阵列和图像传感器。如图 1 所示,主透镜的焦平面与微透镜阵列重合,而图像传感器平面又与微透镜阵列焦平面重合。每一个微透镜可看作是传统相机的一个“像素”,透镜阵列作用是将入射至该“像素”的光线分开,微透镜后端的图像传感器能对这些分开的光束进行采样。

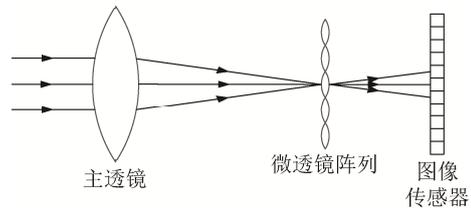


图 1 光场相机基本结构  
Fig.1 Structure of light field camera

定义  $L_F(x', u)$  为由  $ux'$  面决定的记录光场。如图 2 所示,入射光可转换为由  $ux$  面决定的光场  $L_{F'}(x, u)$ , 其缩放因子为  $\alpha = f / f'$ 。则扩展到四维的光场的转换由下式给出:

$$L_{F'}(x', y', u, v) = L_F\left(u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x'}{\alpha}, v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y'}{\alpha}, u, v\right) \quad (1)$$

对于  $L_F(x', y', u, v)$  和  $L_{F'}(x, y, u, v)$ , 它们的映射不是唯一的。因此,可将  $x'y'$  缩小  $\alpha$  倍,得:

$$L_{F'}(x', y', u, v) = L_F(u(\alpha - 1) + x', v(\alpha - 1) + y', u, v) \quad (2)$$

其中:  $uv$  为二维透镜平面;  $x'y'$  为二维成像平面,  $xy$  为实际传感器成像面。

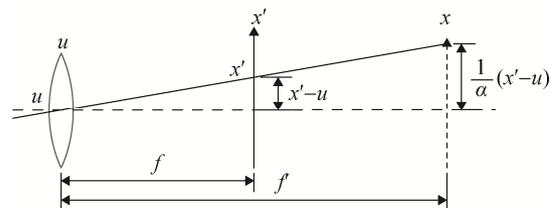


图 2 不同的坐标系下的光场转换  
Fig.2 Light field transformation in different coordinates

## 2 重聚焦算法

### 2.1 时域重聚焦算法

Ng 等人提出了一种在时域中的重聚焦算法, 即“平移叠加法”<sup>[4-5]</sup>。设  $I(x, y)$  为重聚焦后的图像,  $L_F^{(u,v)}$  为一个子孔径图像, 则时域中的重聚焦由下式给出:

$$I(x, y) = \iint L_F^{(u,v)}(u(\alpha - 1) + x, v(\alpha - 1) + y) du dv \quad (3)$$

但是, 我们发现如果直接用上式实现重聚焦仍然是比较困难的, 因为透镜平面  $uv$  上相应的坐标很难得到。本文使用一种较为方便的方法, 将透镜平面  $uv$  和整个图像传感器平面  $xy$  分别转换到每个微透镜下的传感器平面  $ij$  和微透镜阵列平面  $kl$  上。这样每幅子孔径图像可以简单地提取每个微透镜图像中相同位置的像素得到。假设微透镜阵列的尺寸为  $N_1 \times N_2$  ( $N_1$  为水平方向), 微透镜图像的尺寸为  $M_1 \times M_2$  ( $M_1$  为水平方向)。则 3 式可改成:

$$I(k, l) = \frac{1}{M_1 M_2} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} S_{ij} \left( \frac{1}{M_1} i(\alpha - 1) + k, \frac{1}{M_2} j(\alpha - 1) + l \right) \quad (4)$$

其中  $S_{ij}(k, l)$  为一副子孔径图像,  $k = 1, 2, \dots, N_1$ ,  $l = 1, 2, \dots, N_2$ ,  $1/M_1, 1/M_2$  为归一化因子。

从式(4)出发, 时域的重聚焦算法可以表述为:

(1) 保持  $i, j$  不变, 提取每幅微透镜图像上相同位置的像素, 组成一幅子孔径图像  $S_{ij}(k, l)$ ;

(2) 对每一幅子孔径图像, 分别给  $k$  和  $l$  加上一个平移量  $(1/M_1)(C_i - i)(\alpha - 1)$  和  $(1/M_2)(C_j - j)(\alpha - 1)$ , 得到新的子孔径图像  $S_{ij}(k', l')$  的映射坐标图, 其中  $C_i, C_j$  为微透镜图像的中心像素坐标;

(3) 根据映射坐标图在原子孔径图像  $S_{ij}(k, l)$  中提取采样值, 用插值得到新的平移子孔径图  $S_{ij}(k', l')$ ;

(4) 叠加所有子孔径图像并除以  $1/(M_1 M_2)$  得到重聚焦图像。

图 3 演示了时域重聚焦过程, 图中水平实线代表子孔径图像, 虚线代表投影方向, 倾斜实线代表

平移斜率。

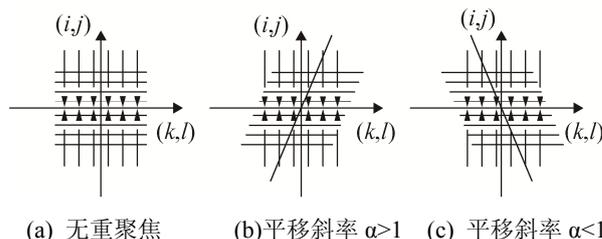


图 3 时域重聚焦  
Fig.3 Time domain focusing

### 2.2 频域重聚焦算法

光场图像的数字重聚焦也可以在频域中完成, 它利用了傅里叶切片成像原理, 其核心为“中心切片理论”。理论上可以证明一幅二维重聚焦图像的频谱是其四维光场频谱的一个切片, 且这个切片平面与时域重聚焦中的投影方向垂直。

令  $F_I(\omega_k, \omega_l)$  为重聚焦图像  $I(k, l)$  的二维频谱,  $F_{L_F}(\omega_i, \omega_j, \omega_k, \omega_l)$  为光场  $L_F(i, j, k, l)$  的四维频谱。从式 2 出发, 通过转换的简化, 将频域的重聚焦公式重写为:

$$F_I(\omega_k, \omega_l) = F_{L_F} \left( \frac{1}{N_1} \omega_k(\alpha - 1), \frac{1}{N_2} \omega_l(\alpha - 1), \omega_k, \omega_l \right) \quad (5)$$

其中  $1/N_1, 1/N_2$  为归一化因子,  $\omega_k = 1, 2, \dots, N_1, \omega_l = 1, 2, \dots, N_2$ 。

注意到在这里使用的是离散傅里叶变换。这种算法仅能变换每个维度的正半轴, 其周期为  $2\pi$ 。这意味着零频分量并不在频谱的中心区域。为了将零频分量移动到频谱中央, 每个维度需要左右反转, 这种方法适用于大部分情况, 但是当应用到光场中时, 它会改变子孔径图像相应的采样序列, 这会导致提取的重聚焦图像不能聚焦在除  $\alpha = 1$  外任何一点上。图 4 演示了离散傅里叶变换的过程, 其中(a)表示频谱的周期为  $2\pi$ , 阴影部分为采样区域, 零频分量位于 0 和  $2\pi$ , 采样中心为  $\pi$ , 采样顺序为  $A \rightarrow B$ ; (b)表示维度反转后, 零频分量移动到了中央  $\pi$  处, 但是相应的采样顺序变成了  $B \rightarrow A$ 。

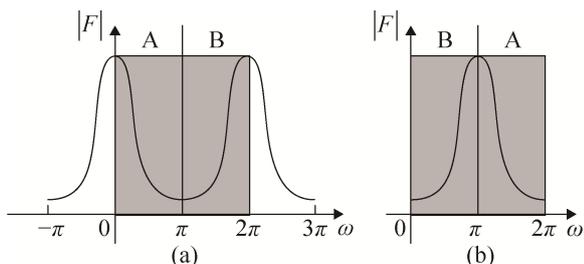


图 4 离散傅里叶变换  
Fig.4 Discrete Fourier transform

为了解决这个问题，在对光场进行频谱转换之前，需要进行一些其他的操作。我们对四维光场中的二维平面  $ij$  进行四象限对角交换操作。在频谱变换之后，其四维频谱的坐标将正确对应于原始的光场。图 5 演示了这个操作：

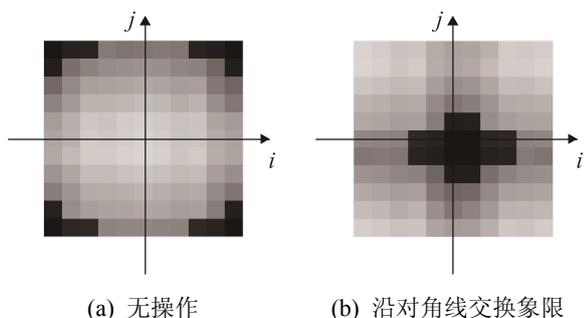


图 5 傅里叶变换操作前  $ij$  平面的象限交换  
Fig.5 Exchange of  $ij$  plane before Fourier transform

频域的重聚焦算法可表述为：

- (1)交换  $i$  和  $j$  的半空间，即将四象限沿着对角线交换；
- (2)用离散傅里叶变换将四维光场转换成四维频谱；
- (3)由式(5)用插值从四维频谱提取每对  $(\omega_k, \omega_l)$  值，得到该四维频谱的一个二维切片；
- (4)将二维切片进行逆傅里叶变换得到重聚焦图像。

### 3 性能分析

本文通过 Lytro 光场相机获得的原始数据，并使用 Donald G. Dansereau 等人提出的处理方法对光场进行解码、标定和校正<sup>[7]</sup>，其大小为  $11 \times 11 \times 380 \times 380$  像素，其中  $11 \times 11$  为微透镜图像的

大小， $380 \times 380$  为微透镜阵列的尺寸。

图 6 比较了两种算法不同聚焦点的重聚焦图像，可以看出，对于同样的  $\alpha$  值，在时域中实现的重聚焦效果相比于频域具有更小的景深。但由于每一幅子孔径图像的平移量，并不是所有的子孔径图像都叠加在了一起，这造成时域重聚焦图像边缘存在暗边。

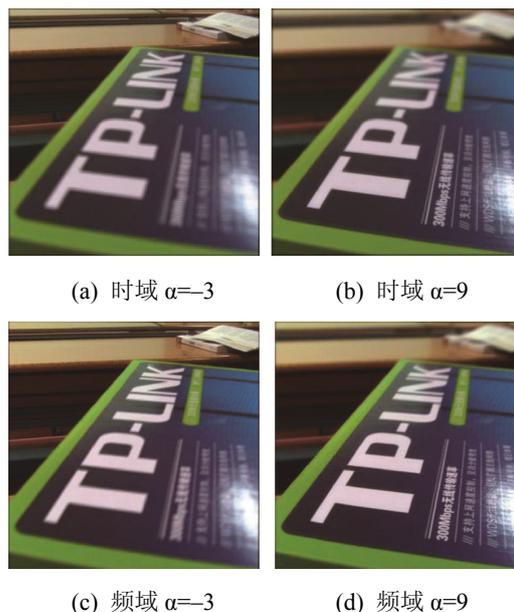


图 6 重聚焦表现能力比较  
Fig.6 Comparison of refocusing ability

实验发现，插值方法对于提升图像质量非常重要。图 7 和图 8 比较了使用不同插值方法得到的重聚焦图像。显然，在时域中，不同的插值方法对于图像像质并无明显影响。但是在频域中插值方法能显著地决定像质。对比图 8 中的小图，可以看出使用插值方法“Cubic”能得到最佳的图像像质。



图 7 时域中不同插值方法得到的重聚焦图像  
Fig.7 Refocusing images obtained by different interpolation methods in time domain



图 8 频域中不同插值方法得到的重聚焦图像  
Fig.8 Refocusing images obtained by different interpolation methods in frequency domain

图 9 为一幅局部放大图。实验表明, 无论使用哪一种现成的插值方法, 一次插值得到的图像都会存在“鬼像”, 且随着  $\alpha$  相对于 1 的偏移会逐渐明显。这可能是因为四维插值算法不完善的原因。普通的插值算法对于低维插值效果较好, 但是用于高维尤其是频域上时, 由于频谱高度对称的分布, 会带来不符合预期的结果。



图 9 鬼像  
Fig.9 Ghost image

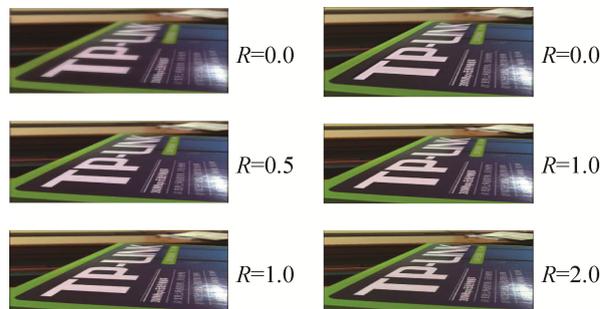
为了解决这个问题, 可以改进现成的插值方法, 在一个球形区域内采样, 并按照距离平方乘上权重因子。理想的权重因子是  $\exp(-Cd)$ , 其中  $C$  是一个常量,  $d$  为插值点和采样点的距离。这个因子并不适用于批量处理, 因为每一个插值点都是独立的。为了降低运算复杂度, 可将权重因子简化为一个常量并对球形区域内所有的插值点做平均处理。在这里, 仍然使用现成的插值方法, 但是每一个插值点均经过多次插值。

这种插值方法可由式(6)给出:

$$F_I(\omega_k, \omega_l) = \iint_D F_{Lr} \left( \frac{1}{N_1} \omega'_k(\alpha - 1), \frac{1}{N_2} \omega'_l(\alpha - 1), \omega_k, \omega_l \right) d\omega'_k d\omega'_l$$

$$D: (\omega'_k - \omega_k)^2 + (\omega'_l - \omega_l)^2 \leq R^2 \quad (6)$$

其中,  $R$  为采样半径, 图 10(a)比较了不同采样半径对“鬼像”消除的影响, (b)比较了不同采样半径对景深的影响。图 11 为一幅全对焦图像。



(a) 不同采样半径对“鬼像”的消除影响  
(b) 不同采样半径对景深的影响

图 10 不同采样半径的影响  
Fig.10 The influence of different sampling radius

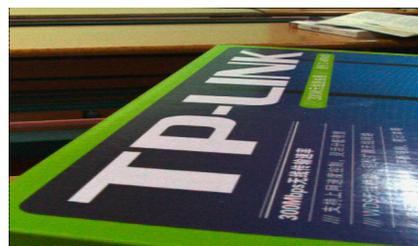


图 11 全对焦图像  
Fig.11 Full focus imag

通过图 10, 可以发现, 随着采样半径的增大, “鬼像”现象逐渐消失而且景深也逐渐变大, 这种插值方法能有效降低“鬼像”。对于任何  $R > 0$ , 每一个点都需要几次插值。这可以理解为做了几次略有倾斜的切片再求均值, 因此高频分量得到加强, 即景深变大。如果采样半径足够大, 将会得到一张全对焦图像, 每一个点都得到对焦, 如图 11 所示。

对于大小为  $N^4$  的四维光场, 时域和频域的重聚焦算法每幅图的计算复杂度分别为  $O(N^4)$  和  $O(N^2 \log N)$ 。实验中发现实际的时间消耗随着上述提到的不同因素的组合而不同。因为时域重聚焦算法较为简单, 所以运算速度主要取决于光场数据的大小, 这样, 使用更快的插值方法能降低运算时间。但在频域上, 它取决于光场数据大小、插值方法和采样半径。问题在于后两个因素也决定着图像

的景深的像质。因此需要找到一个更优化组合。表 1 列出了在集中不同因素组合下的运算时间。可以看到大部分情况下在频域中进行的重聚焦相比时域具有更快的运算速度，此外，使用“Cubic”插值方法或者增大采样半径会显著降低运算速度。

表 1 不同组合的运算时间

Tab.1 Operation time of different combinations

操作域	插值方法	采样半径	消耗时间/s
时域	Nearest	—	4.54
	Linear	—	5.55
	Cubic	—	7.10
频域	Linear	0.0	0.39
	Cubic	0.0	0.83
	Linear	0.5	0.93
	Cubic	0.5	2.65
	Linear	1.0	1.81
	Cubic	1.0	5.64

数值分析结果表明，在频域中使用“Cubic”插值方法并设置采样半径  $R=0.5$  时可以得到在运算时间、图像像质和景深上的最佳折中。对于时域上的运算，由于插值方法对图像像质影响很小，使用“Nearest”插值方法可以达到最快的运算速度。

## 4 结论

本文根据 Ng 等人提出微透镜阵列型光场相机时域和频域重聚焦算法进行推导分析，将透镜平面和整个图像传感器平面分别转换到每个微透镜下的传感器平面和微透镜阵列平面上，从而更为简单的获得了不同对焦平面的重聚焦图像。针对光场重聚焦过程的计算机运行速度和图像中存在的“鬼像”问题进行研究，分析了不同插值方法及插值半径对于图像质量和运算速度的影响。实验研究结果表明在时域中使用“Nearest”插值方法可以降低运算时间却不影响像质，而在频域中使用“Cubic”插值方法和采样半径  $R=0.5$  可以得到图像像质和运算时间的一个最佳折中值。

## 参考文献:

[1] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the

elements of early vision[M]. Computation models of visual processing(S0262121557),1991:3-20.

[2] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 1992, 14(2): 99-106.

[3] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]//Proc SIGGRAPH. New York:ACM Press, 1996: 31-42.

[4] Ng R, Levoy M, Bredif Ma, et al. Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera[R]. Stanford Tech Report CTSR, 2005.

[5] Levoy M, Ng R, Adams A. Light field microscopy[C]//Proc SIGGRAPH. New York: ACM Press,2006, 25(3):924-934.

[6] Hahne C, Aggoun A, Haxha S, et al. Light field geometry of a standard plenoptic camera[J]. Optics express (S1094-4087), 2014, 22: 26659-26673.

[7] Dansereau D G, Bongiorno D L, Pizarro O, et al. Light field image denoising using a linear 4D frequency-hyperfan all-in-focus filter[C]//Proceedings of the SPIE Conference on Computational Imaging (SPIE'13). 2013, 8657.

[8] Nava F P, Marichal-Hernández J G, Rodríguez-Ramos J M. The discrete focal stack transform[C]//Proceedings of Eusipco. 2008, 8: 25-106.

[9] Georgiev T G, Lumsdaine A, Goma S. High dynamic range image capture with plenoptic 2.0 camera[C]//Signal recovery and synthesis. Optical Society of America, 2009: SWA7P.

[10] Chen C C, Lu Y C, Su M S. Light field based digital refocusing using a DSLR camera with a pinhole array mask[C]//Speech and Signal Processing (ICASSP), 2010 IEEE International Conference on Acoustics, IEEE, 2010.

[11] Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, et al. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing[J]. ACM Trans. Graph.(S0730-0301), 2007, 26(3): 69.155-164.

[12] 聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.

NIE Yun-Feng, XIANGLI Bin, ZHOU Zhi-Liang. Advances in light field photography technique[J]. Journal of graduate university of Chinese academy of sciences, 2011, 28(5): 563-572.

[13] 杨凡, 袁艳, 周志良. 光场相机成像质量评价方法研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34(6): 4-6.

YANG Fan, YUANYan, ZHOUZhi-liang. Study on imaging quality evaluation of light field camera[J]. Modern electronics technique, 2011, 34(6): 4-6.

(下转第 2889 页)

<http://www.china-simulation.com>