

文章编号 1004-924X(2018)03-0708-07

基于光场相机的深度面光场计算重构

陈 琦, 徐熙平*, 姜肇国, 尹 鹏, 王鹤程
(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:光场相机与传统相机不同,通过在主镜组和传感器间特定位置设置微透镜阵列,实现在采集物方光强的同时记录光线方向。为了重构物方光场,研究了基于光场相机的深度面计算重构算法,对该算法所采用的焦点堆栈、投影切片定理进行研究。首先,对四维光场定义及光场相机工作原理进行分析;建立了相机内部深度面重构模型,分析了投影切片定理在深度面获取的应用,并推导出不同深度面图像表达式;根据得到不同深度位置图像,研究了计算重构算法,搭建了含有微透镜阵列的微型单相机光场采集系统,采集原始光场,利用本文方法实现了物方光场的逆向重构。实验结果表明:利用本文重构算法,光场相机采集的物方光场可通过滤波计算方法逆向重构,通过重构光场数据可获得物方场景深度信息。本文深度面获取算法较其他算法节省 30% 以上的时间,各深度面图像峰值信噪比在 25~30 dB 之间,实现了高精度、稳定可靠的计算光场重构。

关键词:光场;计算光学;投影切片定理;逆向重构

中图分类号:O438 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182603.0708

Light field computational reconstruction from focal planes based on light field camera

CHEN Qi, XU Xi-ping*, JIANG Zhao-guo, YIN peng, WANG He-cheng

(College of photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail:1551497786@qq.com

Abstract: Different from traditional cameras, light field camera sets a lenslet array between the main lens and the sensor at a specific position, which makes it possible to record the light intensity and the direction of light rays at the same time. In order to reconstruct the object-side light field, the reconstruction algorithm of the focal planes based on the light field camera was studied. Focal stack and projection slice theorem used in the algorithm was researched. Firstly, parameterized 4D light field definition and the working principle of light field camera were analyzed. Secondly, the depth reconstruction model of the camera was established and research the application of the projection slice theorem in getting the focal planes and then Derived the expression of the different focal planes images. Finally, according to the different focal planes images, the computational reconstruction

收稿日期:2017-05-23;修订日期:2017-07-18.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发重点专项资助项目(No. 2012YQ130125);国家自然科学基金资助项目(No. 11375227, No. 61605016)

algorithm was studied to realize the reverse reconstruction of the object-side light field. A micro light field camera was built contains lenslet array, collected the original light field, reconstructed the object light field by the method in this paper. The results show that the light field collected by light field camera can be filtered reverse reconstruction of the method proposed in this paper, the depth and the surface of object can be further reconstruction via the light field data. The focal planes images acquisition algorithm in this paper saves more than 30% time compared with other algorithms, and the Peak Signal to Noise Ratio of each focal plane image is between 25 – 30 dB, which meets the requirements of high precision, stability, reliability and fast speed of light field reconstruction.

Key words: light field; computational optical; projection slice theorem; inverse reconstruction

1 引言

光场(Light field)的含义最早由 Gershun 等人于 1939 年提出^[1]。光场采集方法主要分为直接采集和简介采集两类,直接采集方法包含相机阵列积分成像^[2]光场相机成像^[3]。间接光场采集方法包含单相机分时成像^[4]和掩膜编码成像。随着微纳光学的不断发展,微透镜阵列的加工水平不断提升^[5-7],光场相机的成像质量不断提升。由于光场相机抗干扰能力强、轻巧便携且操作简便,这种新型光场采集系统愈发引起了研究人员的关注。在传统相机成像中,物方场景光线的方向和强度信息被压缩到二维成像平面上,丢失了光线的方向信息。光场相机通过在主镜组和传感器间特定位置插入微透镜阵列,实现在采集物方光强的同时记录光线方向信息。光场相机作为计算光学领域一项革命性的光场采集系统^[8],通过计算机图像处理,可实现拍摄后焦距和视角变换功能,打破了传统相机对焦距、视角和孔径的束缚^[9-11],也解决了相机阵列和可控相机成本高昂及操作复杂的问题。相比于其他方法,光场相机光场采集有两个优点:第一,光场采集的四维光场信息通过后期计算处理可实现连续深度和视角变换;第二,操作便捷,不需要高昂的相机阵列或者高精度可控相机。

R. Ng 等人于 2005 年提出了针对四维光场的投影切片理论^[12],指出深度面是四维光场的某一二维切片,将传统的投影切片理论延伸到光场成像领域,为深度面计算重构在光场重构的应用奠定理论基础。近年来,光场重构技术在国内外发展很快,国内光场重构研究大多基

于数字掩膜编码后的图像序列,2014 年刘永春等人研究了基于掩膜的光场采集与光场重建^[13]。国外则偏重对图像序列的光场逆向重构,2015 年 Lam 等人将计算光学引入光场成像领域^[14],基于 Lam 的理论, Mousnier 等人于 2015 年利用全清图像和间断深度图像,实现了局部光场重构^[15]。此后,2016 年 Alonson 等人利用间断的深度图通过滤波迭代方法实现了完整光场重构^[16]。本文搭建了轻巧便携、抗干扰能力强的光场相机,利用采集的原始光场信息,应用广义傅里叶投影切片定理获取连续的深度面图像,通过背投的方式实现了原始光场的逆向重构。相比于其他算法,深度面计算重构对原始光场图像质量的要求不高,重构图像质量更优,运算效率更高,算法稳定性更强。利用深度面计算重构的得到的数据可进一步获取物方光场的深度和轮廓信息,在三维测量、逆向工程等领域有较高的理论和实践价值。实验证明,深度面计算重构可应用于光场相机采集的光场信息重构中,并且有较高的稳定性和精度。

2 计算重构原理

2.1 光场成像模型

如图 1 所示,光场相机主要由主透镜组、微透镜阵列和感光元件 3 大部分组成。本文的研究基于 Gortler 1996 年提出的光场双平面参数化表征^[13],设主镜面为 (u, v) , u 为纵坐标,透镜阵列面设为 (s, t) , s 为纵坐标,传感器面为 (x_F, y_F) , x_F 为纵坐标,深度面为 $(x_{F'}, y_{F'})$, $x_{F'}$ 为纵坐标。光场中的所有光线信息可以用 $L_F = (u, v, s, t)$ 这种四维形式表示。

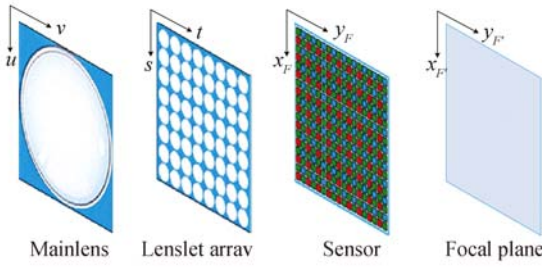


图 1 光场相机成像原理及参数化表征

Fig. 1 Imaging principle and parametric representation of light field camera

2.2 深度面重构模型

如图 2 所示, (x_F, y_F) 为传感器面, 距主光瞳面 F , (x_F, y_F) 处光场可表示为 $L_F(x_F, y_F, u, v)$, 当聚焦在距光瞳面距离 F' 位置时, $(x_{F'}, y_{F'})$ 处光场可表示为 $L_{F'}(x_{F'}, y_{F'}, u, v)$, 重构图像可表示为 $E(F', x_{F'}, y_{F'})$ 。

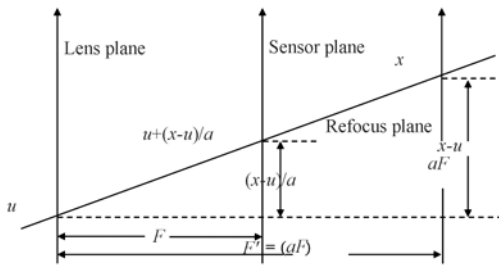


图 2 深度面重构原理

Fig. 2 Reconstruction based on focal stack theorem

由于光线延直线传播, 穿过 (x_F, y_F) 和 $(x_{F'}, y_{F'})$ 平面的为一条光线, 可以得到:

$$L_{F'}(x_{F'}, y_{F'}, u, v) = L_F(x_F, y_F, u, v), \quad (1)$$

(x, u) 和 (x_F, u) 及 (y, v) 和 (y_F, v) 的映射关系可通过式(2)中转换矩阵得到。

$$\begin{cases} x_{F'} \\ u \end{cases} = \begin{pmatrix} \alpha & 1 - \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{cases} x \\ u \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_{F'} \\ v \end{cases} = \begin{pmatrix} \alpha & 1 - \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{cases} y \\ v \end{cases}$$

式中 $\alpha = F'/F$ 。

$$\begin{aligned} E(F', x_{F'}, y_{F'}) &= \iiint \iiint L(x, y, u, v) \exp(-2\pi i((\alpha x + (1 - \alpha)u - x_{F'})\omega_1, (\alpha y + (1 - \alpha)v - y_{F'})\omega_2)) d\omega_1 d\omega_2 du dv dx dy, \\ &= \iiint \iiint \iiint L(x, y, u, v) \exp(-2\pi i((\alpha x + (1 - \alpha)u)\omega_1, (\alpha y + (1 - \alpha)v)\omega_2)) du dv dx dy \exp(2\pi i(x_{F'}\omega_1 + y_{F'}\omega_2)) d\omega_1 d\omega_2 \end{aligned} \quad (5)$$

由此可得 F' 位置的光场函数为:

$$L_{F'}(x, y, u, v) = L_F(\alpha x + (1 - \alpha)u, \alpha y + (1 - \alpha)v, u, v). \quad (3)$$

本文定义 P 为从光场传感器深度 F 到深度面 F' 的操作因子, 因此深度面图像可表示为:

$$E(F', x_{F'}, y_{F'}) = P[L(x, y, u, v)] = \iiint \iiint L(x, y, u, v) \delta(\alpha x + (1 - \alpha)u - x_{F'}, \alpha y + (1 - \alpha)v - y_{F'}) du dv dx dy, \quad (4)$$

式(4)中 $E(F', x_{F'}, y_{F'})$ 是光场相机采集四维光场在 F' 位置处的深度面重构, $\delta(\alpha x + (1 - \alpha)u - x_{F'}, \alpha y + (1 - \alpha)v - y_{F'})$ 为投影积分偏移核函数。由于光路的可逆性, 通过获取不同位置的深度面重构信息可以实现物方光场重构。

2.3 投影切片定理

光场重聚焦即深度面重构方法主要分为两类, 一种是计算积分成像, 另一种是基于广义傅里叶投影切片定理的深度面重构, 由于光路可逆性, 通过不同深度面图像, 可以逆向重构物方光场。利用投影切片定理的深度面重构相对于计算积分成像, 有更高的效率, 重构图像具有更高的分辨率, 因此本文应用投影切片定理重构连续不同深度面图像信息。图 3 为投影切片定理原理图。

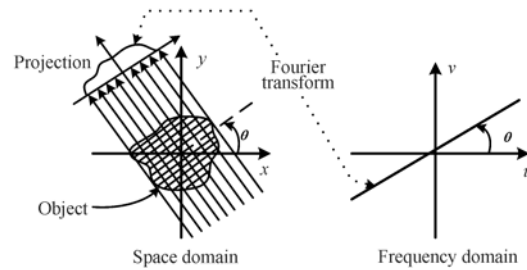


图 3 投影切片定理

Fig. 3 Projection slice theorem

根据广义傅里叶投影切片定理, F' 位置 $E(F', x_{F'}, y_{F'})$ 是四维物方光场 $L(x, y, u, v)$ 沿特定方向的一个二维切片。根据式(4)可得到:

进一步变换可得:

$$E(F', x_{F'}, y_{F'}) = \iiint L(\alpha\omega_1, \alpha\omega_2, (1-\alpha)\omega_1, (1-\alpha)\omega_2) \exp(2\pi i(x_{F'}\omega_1 + y_{F'}\omega_2)) d\omega_1 d\omega_2 \quad (6)$$

对式(6)两侧分别进行傅里叶变换得到:

$$F[E(F', x_{F'}, y_{F'})] = L(\alpha\omega_1, \alpha\omega_2, (1-\alpha)\omega_1, (1-\alpha)\omega_2) \quad (7)$$

式(7)中 $F[E(F', x_{F'}, y_{F'})]$ 代表 $E(F', x_{F'}, y_{F'})$ 的傅里叶变换。可以看出, $F[E(F', x_{F'}, y_{F'})]$ 是 $L(\omega_x, \omega_y, \omega_u, \omega_v)$ 的某一二维切片,其中:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \alpha\omega_1 \\ \omega_y &= \alpha\omega_2 \\ \omega_u &= (1-\alpha)\omega_1 \\ \omega_v &= (1-\alpha)\omega_2 \end{aligned} \quad (8)$$

由此可以证明出,通过光场相机采集的光场信息经过投影切片运算,理论上可以得到连续不同深度面重构图像。

3 深度面光场算重构算法

根据前文光场成像模型和基于广义傅里叶投影切片定理的深度面重构算法,本章推导和证明了深度面光场重构方法。

3.1 光场计算重构原理

根据式(5)中选取的投影切片,我们可以得如式(9)中的积分变量替换关系。

$$\begin{aligned} d\omega_x d\omega_u &= \mathbf{J}_1 d\omega_1 ds \\ d\omega_y d\omega_v &= \mathbf{J}_2 d\omega_2 ds \end{aligned} \quad (9)$$

其中 \mathbf{J}_1 和 \mathbf{J}_2 为雅各比行列式分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \omega_u}{\partial \omega_1} & \frac{\partial \omega_u}{\partial s} \\ \frac{\partial \omega_x}{\partial \omega_1} & \frac{\partial \omega_x}{\partial s} \end{vmatrix} = \frac{1}{F} |\omega_1| \\ \mathbf{J}_2 &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \omega_v}{\partial \omega_2} & \frac{\partial \omega_v}{\partial s} \\ \frac{\partial \omega_y}{\partial \omega_2} & \frac{\partial \omega_y}{\partial s} \end{vmatrix} = \frac{1}{F} |\omega_2| \end{aligned} \quad (10)$$

通过行列式运算可以得出:

$$\begin{aligned} d\omega_x d\omega_u &= \frac{1}{F} |\omega_1| d\omega_1 ds \\ d\omega_y d\omega_v &= \frac{1}{F} |\omega_2| d\omega_2 ds \end{aligned} \quad (11)$$

四维光场 $L(x, y, u, v)$ 的四维傅里叶变换可

表示为 $L(\alpha\omega_1, \alpha\omega_2, (1-\alpha)\omega_1, (1-\alpha)\omega_2)$ 。因此可以得到:

$$\begin{aligned} L(x, y, u, v) &= \iiint L(\omega_x, \omega_y, \omega_u, \omega_v) \exp(2\pi i(x\omega_x + y\omega_y + u\omega_u + v\omega_v)) d\omega_x d\omega_y d\omega_u d\omega_v \\ &= \iiint L(\alpha\omega_1, \alpha\omega_2, (1-\alpha)\omega_1, (1-\alpha)\omega_2) \exp(2\pi i(x\alpha\omega_1 + y\alpha\omega_2 + u(1-\alpha)\omega_1 + v(1-\alpha)\omega_2)) d\omega_x d\omega_y d\omega_u d\omega_v \end{aligned} \quad (12)$$

将式(11)带入得到:

$$\begin{aligned} L(x, y, u, v) &= \iiint L(\alpha\omega_1, \alpha\omega_2, (1-\alpha)\omega_1, (1-\alpha)\omega_2) \exp(2\pi i(x\alpha\omega_1 + y\alpha\omega_2 + u(1-\alpha)\omega_1 + v(1-\alpha)\omega_2)) \frac{1}{F^2} |\omega_1| |\omega_2| d\omega_1 d\omega_2 ds \end{aligned} \quad (13)$$

将投影切片定理中(5)式带入得到:

$$\begin{aligned} L(x, y, u, v) &= \iiint F[E(F', x_{F'}, y_{F'})] \exp(2\pi i(x\alpha\omega_1 + y\alpha\omega_2 + u(1-\alpha)\omega_1 + v(1-\alpha)\omega_2)) \frac{1}{F^2} |\omega_1| |\omega_2| d\omega_1 d\omega_2 ds \end{aligned} \quad (14)$$

带入转换矩阵(2)得到:

$$\begin{aligned} L(x, y, u, v) &= \iiint F[E(F', x_{F'}, y_{F'})] \exp(2\pi i(x_{F'}\omega_1 + y_{F'}\omega_2)) \frac{1}{F^2} |\omega_1| |\omega_2| d\omega_1 d\omega_2 ds \\ &= \frac{1}{F^2} \iiint |\omega_1| |\omega_2| F[E(F', x_{F'}, y_{F'})] \exp(2\pi i(x_{F'}\omega_1 + y_{F'}\omega_2)) d\omega_1 d\omega_2 ds \end{aligned} \quad (15)$$

进一步化简得到:

$$L(x, y, u, v) = \frac{1}{F^2} \int F^{-1} \quad (16)$$

$$[F[E(F', x_{F'}, y_{F'})] |\omega_1| |\omega_2| ds$$

通过式(15)和(16)证明了深度面重构方法可应用于光场相机光场重构中。

3.2 重构光场低通滤波

式(15)和(16)为理想重构公式,由于光场相

机内部微透镜阵列边缘存在衍射现象,传感器接收图像边缘不够清晰,本文采用 sinc 低通滤波的方式,对重构光场进行减噪处理,如式(17)为 sinc 滤波函数。

$$D_{\text{sinc}}(\omega_1, \omega_2) = |\omega_1| |\omega_2| \text{sinc}(\omega_1, \omega_2) \text{Rect}(\omega_1, \omega_2)$$

$$\text{Rect}(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 1 & |\omega_1| < \frac{B_{\omega_1}}{2}, |\omega_2| < \frac{B_{\omega_2}}{2} \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (17)$$

式(17)中 $\text{Rect}(\omega_1, \omega_2)$ 为窗函数, B_{ω_1} 和 B_{ω_2} 分别为 ω_1 和 ω_2 的频谱宽度。滤波后的重构光场表示为:

$$\hat{L}(x, y, u, v) = D_{\text{sinc}}[L(x, y, u, v)]. \quad (18)$$

如图 4 所示,为基于光场相机的深度面光场重构流程图。



图 4 光场重构流程图

Fig. 4 Flow chart of light field reconstruction

4 实验结果与分析

为验证该方法可行性与有效性,搭建了含有微透镜阵列的单相机光场采集系统,如图 5 所示为搭建完成的光场采集系统。

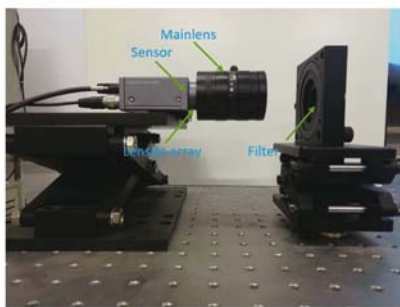


图 5 光场采集系统

Fig. 5 Light field acquisition system

利用搭建的光场采集系统,通过 2.3 节基于广义投影切片定理的深度面求解算法,得到不同深度面图像。以中心视场为例,在 0.5~1.5 值域内选取 12 个不同值,重构深度面图像。通过求解峰值信噪比对不同深度图像进行质量评估。由图 6 可以看出,各深度峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio)在 25~35 dB 之间,重构效果很好。

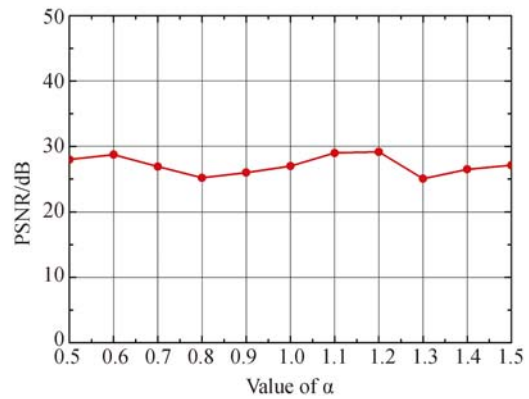


图 6 不同深度面峰值信噪比

Fig. 6 Peak Signal to Noise Ratio value of each focal plane image

根据获取的深度面图像,逆向重构了物方光场。图 7 给出了左上、右上、左下和右下 4 个不同视角的物方光场图像。

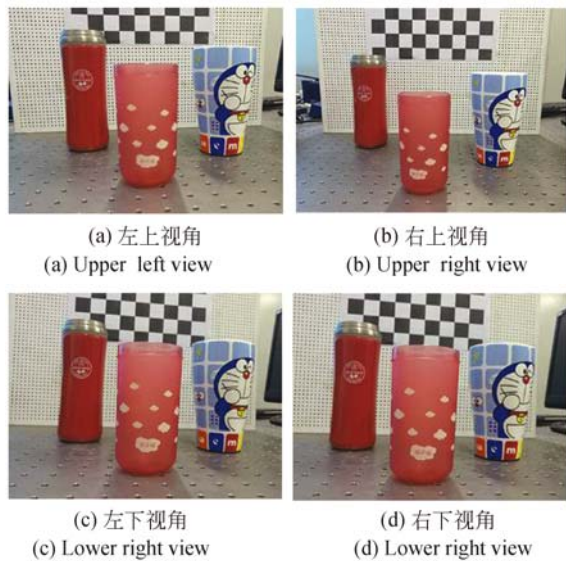


图 7 重构光场不同视角图像

Fig. 7 Different view image of constructed light field

可以看出,滤波后的逆向重构光场拥有较高信噪比,满足实用性需求。根据计算重构获取的光场数据,为验证重构的光场是否有更进一步的利用价值,本文进行了物方场景深度估计实验,获取了中心光场视图的深度信息,如图 8 所示为中心视角的深度图。

深度图中,黄色到紫色的渐变代表距离由近及远的变换。由图 8 可知,左侧杯子前表面前端距离主镜光瞳最远,约为 359 mm,中间杯子前表

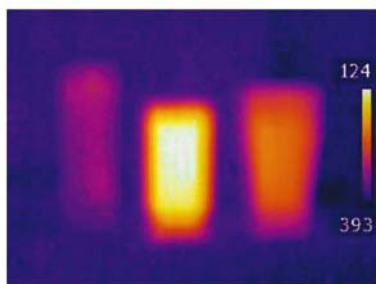


图8 中心视角光场视图深度图

Fig. 8 Depth map of central view of constructed light field

面前端距离主镜光瞳最近,约为 124 mm,右侧杯子介于二者深度之间。

5 结 论

本文研究了基于光场相机的深度面光场计算

参考文献:

- [1] GERSHUN A, MOON P H, TIMOSHENKO G. *The Light Field*[M]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1939.
- [2] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, *et al.*. High performance imaging using large camera arrays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765-776.
- [3] NG R, LEVOY M, BRÉDIF M, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[R]. Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005.
- [4] BOLLES R C, BAKER H H, MARIMONT D H. Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(1): 7-55.
- [5] 朱晓阳, 侯丽雅, 郑悦, 等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 360-368.
ZHU X Y, HOU L Y, ZHENG Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 360-368. (in Chinese)
- [6] 刘民哲, 王泰升, 李和福, 等. 静电场辅助的微压印光刻技术[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 663-671.
LIU M ZH, WANG T SH, LI H F, *et al.*. Electrostatic field assisted micro imprint lithography technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 663-671. (in Chinese)
- [7] 李以贵, 颜平, 黄远, 等. 基于 X 光移动光刻技术的 PMMA 微透镜阵列制备[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0620001.
LI Y G, YAN P, HUANG Y, *et al.*. Fabrication of PMMA micro lens array based on X-ray moving lithography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0620001. (in Chinese)
- [8] ZHOU CH Y, NAYAR S K. Computational cameras: Convergence of optics and processing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3322-3340.
- [9] KLUG M, BURNETT T, FANCELLO A, *et al.*. A scalable, collaborative, interactive light-field display system[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 412-415.
- [10] LÜKE J P, ROSA F, MARICHAL-HERNÁNDEZ J G, *et al.*. Depth from light fields analyzing 4D local structure[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(11): 900-907.
- [11] KIM C, ZIMMER H, PRITCH Y, *et al.*. Scene reconstruction from high spatio-angular resolution light fields[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 73.
- [12] NG R. Fourier slice photography[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 735-744.

- [13] 刘永春, 龚华军, 沈春林. 基于掩膜的光场采集与重建的研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810001.
LIU Y CH, GONG H J, SHEN CH L. Research of lightfield acquisition and reconstruction based on mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0810001. (in Chinese)
- [14] LAM E Y. Computational photography with plenoptic camera and light field capture: Tutorial [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(11): 2021-2032.
- [15] MOUSNIER A, VURAL E, GUILLEMOT C. *Partial light field tomographic reconstruction from a fixed-camera focal stack* [Z]. arXiv: 1503.01903, 2015.
- [16] YIN X W, WANG G J, LI W T, *et al.*. Iteratively reconstructing 4D light fields from focal stacks [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8457-8463.

作者简介:



陈琦(1991—),男,河北唐山人,博士在读,2014年河北地质大学获得学士学位,现为长春理工大学光电工程学院在读博士生,主要从事光场成像,计算光学等方面的研究。
E-mail:1551497786@qq.com



徐熙平(1969—),男,吉林长春人,博士,1993年、1999年、2004年于长春理工大学分别获得学士、硕士、博士学位。现为长春理工大学仪器科学与技术专业教授,博士生导师。E-mail: xxp@cust.edu.cn