

微透镜阵列式光场成像模型及其标定方法

张 旭^{1,2} 李 晨¹

(¹ 上海大学机电工程与自动化学院上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200072)
(² 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 对空间复用的光场成像技术进行了建模,从光学器件对光场变换的角度阐释了光场复用的机制,建立了标准光场和像素光场的关系,并提出了基于多频相移的光场标定方法。在 Lytro 光场相机的标定实验中,确定了微透镜中心位置,像素与微透镜的所属关系,恢复了光场信息,并将光场信息应用于重聚焦和全聚焦。实验结果验证了光场模型的正确性和标定方法的可行性。

关键词 成像系统;光场成像;标定;多频相移;重聚焦;全聚焦

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1211005

Calibration and Imaging Model of Light Field Camera with Microlens Array

Zhang Xu^{1,2} Li Chen¹

¹ Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

² State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The light field imaging with microlens array is modeled through analyzing three fundamental factors, such as space, lens, and sensor. The spatial multiplexing is explained and the relationship between the light field and the pixel in raw image is described. Based on the phase shifting, a calibration method is proposed to determine the centers of microlens, the corresponding relationship between the pixel and the microlens, and the character of the microlens vignetting. The experiment is conducted on a commercial light field camera, Lytro. The light field is decoded from the raw image and the refocus image and all-focus image is created from the obtained light field. The experiment results confirm the proposed model and calibration method is valid.

Key words imaging systems; light field imaging; calibration; multi-frequency phase shift; refocus; all-focus

OCIS codes 110.1758; 110.2650; 150.1488; 110.2990

1 引 言

传统相机的二维图片是对三维场景的映射,图像上每一点是对该点光线半球的积分,因而丢失了光线的方向信息。与之相对的,光场成像技术不仅记录空间位置的亮度,而且可以分辨光线的方向^[1-2]。依据光场信息可以实现重聚焦^[3-4],视点变换^[5],深度估计^[6-7]等多项应用。

Adelson 等^[8]提出五维全光函数的概念解释图像的生成过程。当光线在空间中自由传播时,则具有一个自由度的冗余性,全光函数可表达为四维光场^[1,9],一般由两个平行平面表示。空间复用是获得光场信

息的一项重要技术^[10-11]。通过在光路中插入微透镜阵列,将光场信息以空间阵列复用的形式蕴藏在一幅图像里。根据微透镜阵列的位置不同,其又分为两类技术。一种是将微透镜阵列放置在主透镜成像面上,电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器在其一倍焦距处^[12]。这一配置形式使得将光线的二维角度信息阵列式保存在一个更大的二维矩阵中,每个二维角度矩阵单元表示具有相同位置信息但角度信息不同的光线。另一种是将微透镜阵列作为中继透镜,将主透镜实像在 CCD 或 CMOS 传感器上二次成像^[13-14]。这一配置形式是对

收稿日期: 2014-06-10; **收到修改稿日期**: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51205244)、数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金(DMETKF2013007)、上海市教育委员会科研创新项目(14YZ006)

作者简介: 张 旭(1982—),男,博士,副教授,主要从事光场成像术、结构光三维测量等方面的研究。

E-mail: xuzhang@shu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

光线二维位置信息的阵列式保存,而非二维角度信息,在更大二维矩阵中的每个二维位置矩阵单元具有不同的方向信息。由于 CCD 或 CMOS 传感器分辨率固定,在高斯成像规律下改变二次成像的放大率,光场信息的空间分辨率和角度分辨率亦会此消彼长。

蕴藏在图像中的光场信息,必须对其复用进行解析才能获得。Dansereau 等^[15]提出了一种解码、标定、校正方法,并在商用的光场相机 Lytro^[16]上实现。他们通过对 Lytro 相机内白图像进行峰值检测确定微透镜中心,从而标定像素光场。Cho 等^[17]则在频域内估计白图像旋转参数,使用形态学腐蚀操作寻找像素级峰值,使用二次曲面拟合方法得到亚像素峰值。上述方法都是使用 Lytro 内部自带的白图像,且假设微透镜渐晕的峰值就是微透镜的中心点。一方面 Lytro 相机的白图像是针对 Lytro 有限个系统参数下获得,并不能表示任何光学参数下的特性,另一方面,由于主镜头制造安装的误差和白图像获取过程中漫反射光的不一致性,都有可能导导致微透镜中心与渐晕光峰值的不一致性。

本文基于光学器件对光场的变换规律,阐释了微透镜阵列式光场成像术空间复用的机理,建立了像素光场与标准光场的转换关系。在此基础上,基于多频相移技术确定了微透镜中心位置,像素与微透镜的隶属关系和渐晕效应特性。在实验中,标定了 Lytro 相机,获得了光场数据,并应用于光场重聚焦和全聚焦。

2 光场成像模型

2.1 光场的定义及变换

三维空间的光线通过各种媒介(空间、光学镜

片、光学器件)最终被光学敏感器感知成像。只有恰当选择器件并合理布置,才能达到获取所需视觉信息的目的。微透镜阵列对光场的复用机理建立在各种光学器件对光线的传播规律基础上。实际上,若光线在自由空间传播,可用四维光场函数 (u, v, s, t) 表示。如图 1 所示,光线穿过的第一个平面记录光线位置信息 $(u, v)^T$,第二个平面记录光线方向信息 $(s, t)^T$ 。光线穿过两个平行平面,分别与其相交于点 o 和 o_d 。两个平行平面的距离为 $d = 1$, ω' 垂直于这两个平面。第一个平面上的点 o 表示为 $[u, v]^T$,向量 $\omega' o_d$ 表示为 $[s, t]^T$,因此光线 ωo_d 表示为 $[u, v, s, t]^T$ 。

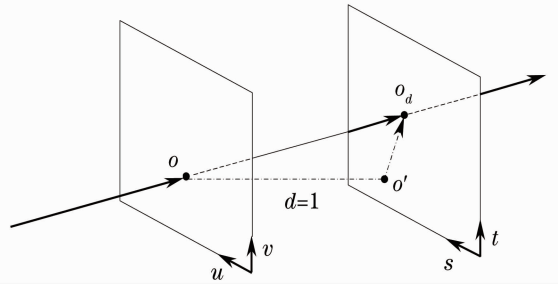


图 1 四维光场参数化描述

Fig. 1 Four dimensional light field parameterization

空间距离对于光场成像技术来说至关重要。一般来说,存在两种情形:共轴空间距离和离轴空间距离。共轴空间距离指:两个光场坐标系完全平行,只存在光轴方向移动距离 d ,其意味着图 1 中的 $[u, v]^T$ 位置平面沿着垂直轴移动。离轴空间距离指:两个光场坐标系完全平行,只存在垂直光轴的移动,其意味着 $[u, v]^T$ 位置平面在其面上移动 (u_0, v_0) 。在齐次坐标下,共轴空间距离和离轴空间引起的光场变换如(1)和(2)式所示。

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ s' \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ s \\ t \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ s' \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -u_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ s \\ t \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}(u_0, v_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -u_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

透镜是光线变换的重要器件,主要作用是改变光线方向。在齐次坐标下,其引起光场的变换可用(3)式表示。

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ s' \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{f} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{f} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ s \\ t \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{f} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{f} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 f 表示透镜的焦距。

光学敏感器 (CCD 或 CMOS 传感器) 对在同一位置不同方向的光线进行收集, 并转换成电信号。其过程可表达为 (4) 式:

$$I(u, v) = \iint_{s, t} r(u, v, s, t) ds dt, \quad (4)$$

式中 $r(u, v, s, t)$ 表示光线 $[u, v, s, t]^T$ 的辐射度, $I(u, v)$ 表示像素坐标 (u, v) 下的图像亮度。

2.2 微透镜阵列的空间复用

光场空间复用是通过将微透镜阵列安置在传统相机主透镜的成像面上, 光学敏感器 (CCD 或 CMOS 传感器) 与微透镜阵列平行, 且在其后一倍焦距处, 光线通过微透镜并在传感器相应区域上成像。

如图 2 所示, 微透镜阵列平面和 CCD 平面共同构成描述四维光场的两个平行平面, 光线穿过微透镜中

心的坐标为 (x_i, x_j) , 在 CCD 上的坐标为 (x_k, x_l) 。光线的位置信息为 (x_i, x_j) , 光线的方向信息为 $(x_k - x_i, x_l - x_j)$ 。微透镜的焦距为 f_m , 微透镜阵列与 CCD 的距离为 f_m , 像素的尺寸为 w_{pix} 。坐标轴 z 表示主透镜的光轴, 方向指向内部敏感器。在微透镜阵列处的光场设为 \mathbf{L}_c , 其 z 轴与主透镜的光轴重合, 指向内部光学敏感器 (CCD 或 CMOS 传感器), 其 x 轴、 y 轴平行于 CCD 像素坐标系。第 i 行第 j 列个微透镜的光场设为 $\mathbf{L}_{\text{mic_cell}}(x_i, y_j)$, 其 Z 轴与自身光轴重合, 其 x 轴、 y 轴平行于微透镜阵列处的光场坐标系。光场 \mathbf{L}_c 与光场 $\mathbf{L}_{\text{mic_cell}}$ 坐标系平行, 只是存在离轴空间距离 (x_i, y_j) 。由 (2) 式可知

$$\mathbf{L}_{\text{mic_cell}}(x_i, y_j) = \mathbf{V}(x_i, y_j) \otimes \mathbf{L}_c, \quad (5)$$

式中 (x_i, y_j) 表示该微透镜中心坐标, 符号 \otimes 表示光场变换。

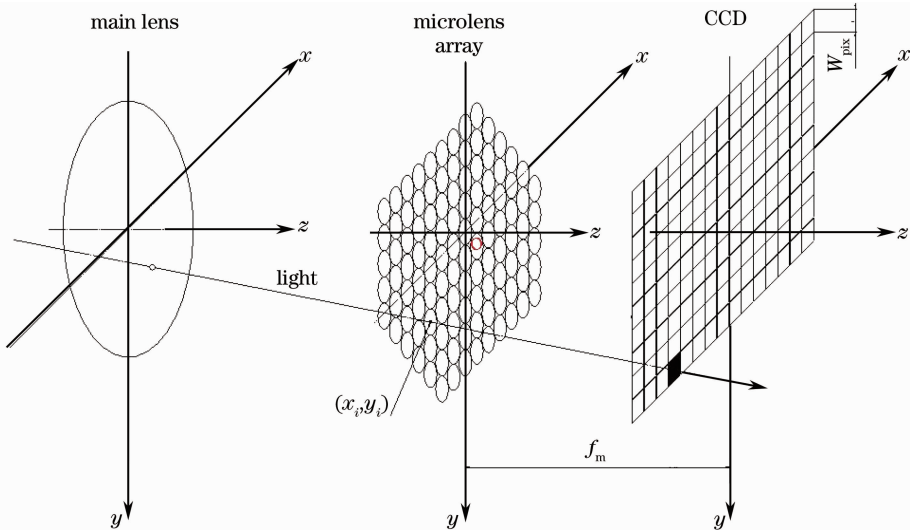


图 2 微透镜阵列的空间复用

Fig. 2 Principle of spatial multiplexing

经过该微透镜的折射作用, 根据 (3) 式折射后的光场 $\mathbf{L}_{m1}(x_i, y_j)$ 可表示为

$$\mathbf{L}_{m1}(x_i, y_j) = \mathbf{L}(f_m) \otimes \mathbf{L}_{\text{mic_cell}}(x_i, y_j), \quad (6)$$

微透镜阵列与 CCD 平面距离为 f_m , 此为共轴空间距离。根据 (1) 式则 CCD 处的光场 $\mathbf{L}_{\text{ccd}}(x_i, y_j)$ 表示

为

$$\mathbf{L}_{\text{ccd}}(x_i, y_j) = \mathbf{T}(f_m) \otimes \mathbf{L}_{m1}(x_i, y_j). \quad (7)$$

联立 (5) ~ (7) 式, 则微透镜阵列光场到 CCD 平面光场的变换表示为

$$\mathbf{L}_{\text{ccd}}(x_i, y_j) = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ s' \\ t' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}(f_m) \otimes \mathbf{L}(f_m) \otimes \mathbf{V}(x_i, y_j) \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ s \\ t \\ 1 \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} f_m s \\ f_m t \\ s - \frac{u}{f_m} + \frac{x_i}{f_m} \\ t - \frac{v}{f_m} + \frac{y_j}{f_m} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{T}(f_m) \otimes \mathbf{L}(f_m) \otimes \mathbf{T}_i(x_i, y_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & f_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_m & 0 \\ -\frac{1}{f_m} & 0 & 1 & 0 & \frac{x_i}{f_m} \\ 0 & -\frac{1}{f_m} & 0 & 1 & \frac{y_j}{f_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

CCD 对接收到的光线进行积分, (8)式代入到 (4)式中, CCD 的成像公式为

$$I_{\text{mic_cell}(x_i, y_j)}(u', v') = \iint_{s, t} r(u', v', s', t') ds' dt' = I(f_m s, f_m t). \quad (9)$$

由(9)式可知, 微透镜 $m_{\text{mic_cell}}(x_i, y_j)$ 像素值是由通过光心位置 (x_i, y_j) 方向为 $(f_m s, f_m t)$ 的光线决定的, 即 CCD 像素坐标蕴含了光线的方向信息。

微透镜阵列平面的标准光场如图 2 所示, 将标准光场的坐标系按照像素进行采样, 并将坐标原点平移到左上点, 则为像素坐标系。设微透镜光心位置的像素坐标为 (x_i, y_j) , 其中 i, j 是微透镜阵列的行列坐标。对于任意属于此微透镜成像区域的像素 $(x_k, y_l) \in m_{\text{mic_cel}}(x_i, y_j)$, 像素光场表示为 $\mathbf{L}_p = [x_i \ y_j \ x_k - x_i \ y_l - y_j \ 1]^T$ 。标准光场可由像素光场转换得到:

$$\mathbf{L}_c = \mathbf{H}_{\text{pix2met}} \otimes \mathbf{L}_p, \quad (10)$$

$$\text{式中 } \mathbf{H}_{\text{pix2met}} = \begin{bmatrix} \omega_{\text{pix}} & 0 & 0 & 0 & -\omega_{\text{pix}} \cdot O_x \\ 0 & \omega_{\text{pix}} & 0 & 0 & -\omega_{\text{pix}} \cdot O_y \\ 0 & 0 & \frac{\omega_{\text{pix}}}{f_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_{\text{pix}}}{f_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中 O_x, O_y 为主点位置, 即光轴与图像的交点在像素坐标系下的表示。 ω_{pix} 是单位像素的长度。由 (10)式可知, CCD 上的任意像素 $(x_k, y_l) \in m_{\text{mic_cel}}(x_i, y_j)$ 唯一确定了光场中的一条光线。

由几何光学角度看, CCD 上的任意一个像素来

自于透过微透镜的光线成像所致。由于 CCD 与微透镜的距离为一倍焦距, 根据高斯成像公式 CCD 上的像点来源于通过微透镜中心和像点的平行光束。以过像点和微透镜中心的主光线来代替这一平行光束, 微透镜中心是这一光线的空间位置坐标, 而 CCD 的像素位置决定了这个光线方向。

2.3 光场的重聚焦和全聚焦

对微透镜阵列处的标准光场 \mathbf{L}_c 进行共轴空间变换即可实现光场的重聚焦。将(10)式代入(1)式, 可得

$$\mathbf{L}'_c = \mathbf{T}(d) \otimes \mathbf{H}_{\text{pix2met}} \otimes \mathbf{L}_p = \mathbf{H}_{\text{pix2met}} \otimes \mathbf{T}_{\text{pix}}(d) \otimes \mathbf{L}_p = \mathbf{H}_{\text{pix2met}} \otimes \mathbf{L}'_p, \quad (11)$$

其中,

$$\mathbf{T}_{\text{pix}}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{d}{f_m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{d}{f_m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}'_p = \mathbf{T}_{\text{pix}}(d) \otimes \mathbf{L}_p.$$

由(11)式可知, 像素光场具有标准光场类似的同轴空间变换, 只是变换参数由 $T(d)$ 变成 $T_{\text{pix}}(d)$ 实现。通过此公式可实现像素光场的重聚焦和全聚焦, 生成对于任意所需物距点的清晰成像, 而不必将像素光场转换到标准光场之后再行重聚焦和全聚焦。像素光场重聚焦和全聚焦相对于标准光场重聚焦和全聚焦不仅减轻了计算量, 更重要的是其直接方便, 无需知道光场相机参数。值得强调的是, 在对

像素光场进行同轴变换时,光场相机的微透镜焦距 f_m 和同轴变换距离 d ,无需知道,使用 $\alpha = d/f_m$ 这一无量纲的数值即可。

根据光场信息可生成重聚焦图片。光场重聚焦是无需镜头移动无需重新拍摄图像仅通过一幅光场图像即可变化聚焦位置的数字图像技术。光场重聚焦算法如下:

- 1) 获得光场数据 $L_p = [x_i \ y_j \ x_k - x_i \ y_l - y_j \ 1]^T$ 。 α 初始为 0,设置其步长为 α_{step} ;
- 2) 采用爬山算法寻找某一物点最清晰的图像:
 - ① 沿着增大清晰度的方向更新参数值 ($\alpha \leftarrow \alpha + \alpha_{step}$);
 - ② 根据公式 $L'_p = T_{pix}(d) \otimes L_p$ 计算当前参数下的光场数据,并根据(9)式生成重聚焦图片;
 - ③ 对此重聚焦图片进行清晰度评价;
 - ④ 更新搜索步长。如果清晰度下降,步长减小一半 $\alpha_{step} \leftarrow 0.5\alpha_{step}$,否则步长不改变;
 - ⑤ 结束条件。如果搜索次数达到最大次数,或

者步长 α_{step} 小于设定阈值,则程序结束。否则程序跳转到①。

光场重聚焦是对图像中某一物点实现清晰聚焦的技术。进一步的,可以对图像中的所有物点都清晰成像,即为全聚焦图片。光场全聚焦是仅通过光场图像而非多幅多焦点图像实现场景全聚焦的数字图像技术。

根据光场位置信息 $[u, v]^T$,将光场划分为子光场(图 3)。当光场变换参数为 α 时,可由(11)式计算新光场。以子光场下标为横坐标,以光场变换参数 α 为纵坐标,可建立二维网格图。全聚焦问题转化为在二维网格图中寻找最优路径问题,该路径满足网格图每列只选择一个节点的约束。采用分治算法,在网格图中的每一列选择最清晰子图的节点,并将所有最清醒子图的节点连接成最优路径。根据这一路径重新构造光场,并使用此光场根据(9)式计算全聚焦图片。



(a)

| | S_1 | S_2 | | $S_{m \times n - 1}$ | $S_{m \times n}$ | |
|----------------|----------|----------|----|----------------------|------------------|----------|
| α_1 | 10 | 16 | 10 | ... | 2 | 1 |
| α_2 | 15 | 20 | 17 | ... | 4 | 5 |
| α_3 | 17 | 17 | 23 | ... | 5 | 8 |
| α_4 | 14 | 14 | 14 | ... | 7 | 10 |
| \vdots | \vdots | \vdots | | | \vdots | \vdots |
| α_{k-1} | 2 | 2 | 2 | | 18 | 15 |
| α_k | 1 | 1 | 1 | | 21 | 12 |

(b)

图 3 全聚焦算法。(a)将光场分割为 $m \times n$ 子光场,每个子光场具有唯一的下标 s_i ; (b) 网格图及最优路径示意图
Fig. 3 Method of all-focus. (a) Dividing the light field to sub light field with $m \times n$, each sub light field has a only index s_i ; (b) schematic diagram of the grid model and the optimal path

3 像素光场标定

由光学敏感器(CCD 或 CMOS 传感器)图像中恢复出光场信息,称之为像素光场标定问题。其包括三个方面:1)确定像素和微透镜的对应关系;2)确定微透镜的中心位置 (x_i, y_j) ;3)亮度校正,因为微透镜具有渐晕效应,微透镜下像素亮度的响应具有不均衡特性。

根据光场成像模型,当三维空间物体经光场相机主透镜在微透镜阵列面上清晰成像,即微透镜阵

列上每个位置仅仅来源于物面上同一点的光线。经微透镜的空间复用,CCD 或 CMOS 传感器上像素是来自于此点不同方向的光线信息。从另外一个角度,CCD 或 CMOS 传感器上这些经同一个微透镜成像的像素都是来自空间同一点的光线,不同微透镜来自不同的物点。因此,确定像素与微透镜的对应关系转化成为确定像素与空间物面点的对应关系。采用多频相移的方法确定物面点与像素点的对应关系。在光场相机前方垂直光轴位置放置显示

器,在显示器上分时显示多频相移图片,光场相机依次进行拍摄,计算卷绕相位和绝对相位。对物面的横、纵坐标分别进行相位编码,重复使用多频相移技术,即可确定像素点与物面点的对应关系。当确立了 CCD 或 CMOS 传感器上像素与空间物面的对应关系,根据对应性的不连续性,通过梯度检测算子获得其边缘,对此边缘信息与微透镜模板边缘进行匹配获得最优位置估计,从而确定微透镜的中心位置和各个像素的所属关系。微透镜的渐晕效应导致微透镜中心位置亮度较高,而边缘处较弱。当已知微透镜下的像素来源于同一个物点后,根据各个像素点对此物点的亮度响应即可标定出微透镜的渐晕特性。

采用均匀相位步长算法,投射的第 n 幅亮度图案可表示为

$$I_n^p = A^p + B^p \cos\left(2\pi f y^p - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (12)$$

式中 f 是余弦周期函数的频率, A^p 和 B^p 是预先设定好的常数, y^p 是投影机任意像素的纵坐标值,如果是横坐标,直接将 y^p 代换为 x^p , I_n^p 为此像素对应的投射亮度值, N 表示相移步数。

当不考虑 Gamma 效应时,投影机和摄像机的亮度传递函数为理想线性的情况下,在摄像机图像对应像素上获得的亮度值可表示为

$$I_n^c = A^c + B^c \cos\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (13)$$

式中 A^c 为该摄像机图像像素多幅余弦采样图像的平均亮度, B^c 则为此余弦函数的调制幅值,相位值 ϕ 是 2π 的模数,即 $\phi = 2\pi f y^p [\text{mod}(2\pi)]$ 。根据 N 步相移图像可求得

$$\begin{cases} A^c = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \\ B^c = \frac{2}{N} \left\{ \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 \right\}^{0.5} \\ \phi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \right] \end{cases}, \quad (14)$$

相位值 ϕ 称为卷绕相位,在 0 到 2π 之间,其中包含了位置信息 y 或 x 。

对于 L 个不同频率 $(f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_L)$ 的卷绕相位 $\phi_i, 0 \leq i \leq L$ 相位展开,可表述为

$$2\pi f_i y^p = 2k_i \pi + \phi_i, \quad 0 \leq i \leq L, \quad (15)$$

式中 k_i 是对应频率 f_i 的未知整数,称为折叠整数, $2\pi f_i y^p$ 为绝对相位。(15) 式两边同除以 $2\pi f_i$,可转化为

$$y^p = k_i \lambda_i + r_i, \quad (16)$$

式中 $\lambda_i = \frac{1}{f_i}, r_i = \frac{\phi_i}{2\pi f_i}, 0 \leq i \leq L$,其中 λ_i 是对应频率余弦波的波长, r_i 为 y^p 对 λ_i 的模,也称为余数。由 (16) 式可知,对于同一整数 y^p 在不同除数 λ_i 下,余数 r_i 已知,折叠整数 k_i 未知,求解整数 y^p 。其本质为数论中的同余问题,可通过健壮中国剩余定理获得其封闭解^[18-19]。

4 实验及分析

所有实验在 Lytro 光场相机的原始图片上实现。Lytro 相机使用六边形微透镜阵列进行光场空间复用,拍摄获得的原始图片具有六边形间隔特性,如图 4 所示。使用 Lytro 光场相机进行了像素光场的标定实验[图 5(a)],建立了原始图片像素与光场的对应关系,并运用光场信息进行重聚焦和全聚焦。

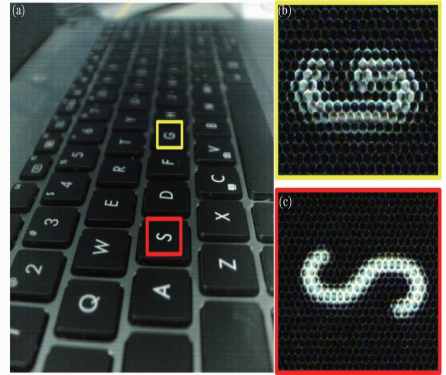


图 4 Lytro 相机拍摄的原始图片

Fig. 4 Raw image captured by Lytro

4.1 像素光场标定实验

在标定过程中相移步数 N 取值为 4,三个频率分别为 $(1/90, 1/120, 1/150)$,显示器投射的图案后光场相机进行拍摄[图 5(a)],获取的原始图片如图 5(b)所示。

光场相机拍摄相移图案后使用相移分析技术确定感知相移条纹的平均值,幅度值和卷绕相位值,继而通过健壮中国剩余定理解卷绕确定光场原始图像像素与投射相移坐标的对应关系。光场相机拍摄条纹的幅度值和平均值如图 6(a)和(c)所示。由其局部放大图[图 6(b)和(d)]可见,同一个微透镜间隔内像素亮度具有中间大周围小渐晕效应。对其特性

进行三维显示,如图 7 所示每个微透镜下中心位置光亮度响应高,随着半径距离的增大光亮度响应逐渐递减。对此响应值以其峰值进行归一化,作为光

场信息的亮度校正因子。对光场数据除以亮度校正因子,即可实现渐晕校正。

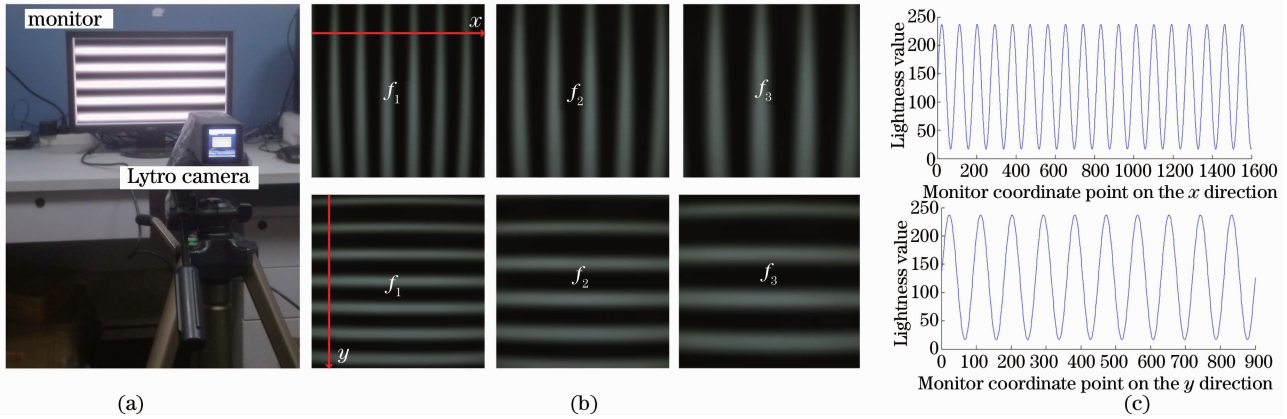


图 5 光场标定。(a)实验现场;(b)获得的相移图片, x,y 表示投射的亮度图案相位变化坐标方向, f_1,f_2,f_3 表示相移图像频率;(c)两幅图片分别表示对应频率为 $1/90$ 的 x 坐标方向相移图片亮度曲线和 y 坐标方向相移图片亮度曲线

Fig. 5 Light field calibration. (a) Experiment; (b) phase shift pictures x and y represent the phase change directions of the lightness pattern, f_1, f_2, f_3 represent phase shift pictures frequencies; (c) two images in the right respectively represent the x direction phase shift image lightness curve and y direction phase shift lightness curve, the frequency is $1/90$

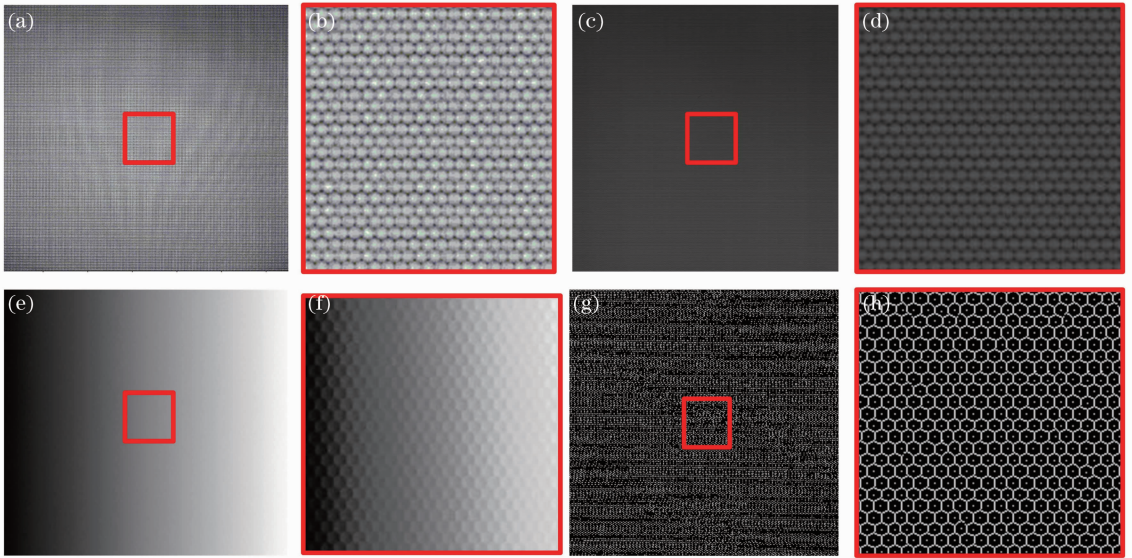


图 6 本文方法标定结果

Fig. 6 Calibration results of the proposed method

根据多频相移技术计算出光场相机 CCD 像素与显示器像素的对应关系,其结果如图 6(e)所示。在对应性结果的局部放大图 6(f)中,可发现对应性具有明显的间断特性。其原因是同一个微透镜代表相同物点位置信息,其背后覆盖的像素则代表该物点的方向信息。根据这一不连续性,使用基于梯度的边缘检测算子,寻找对应性边缘,如图 6(g)所示。在局部放大图[图 6(h)]中,可清晰分辨出六边形网格。这是因为 Lytro 相机使用的是六边形微透镜阵列。使用由粗到精的策略确定像素与微透镜的关系

和微透镜的中心坐标值。1)基于渐晕特性确定峰值点。在幅值亮度图像中进行高斯滤波,寻找局部最大值,作为微透镜中心的初始位置。2)模板匹配对应性边缘。建立六边形网格模板与对应性边缘进行模板匹配,寻找最优匹配位置。六边形网格的中心即为微透镜的中心坐标,六边形的边缘即为微透镜的界限。从而标定出像素与微透镜的关系,得到微透镜的中心坐标。标定结果如图 6(h)所示。由图可见,六边形网格均匀排布,每个像素归属于唯一的微透镜,微透镜中心坐标亦精确确定。

Dansereau^[16]对白图像[图 8(a)]进行峰值检测,得到的微透镜中心结果如图 8(b)所示。Lytro 相机使用的微透镜阵列间距为 $14\ \mu\text{m}$, CCD 像素尺寸为 $1.4\ \mu\text{m}$, 因此,微透镜间距等效于 10 pixel。Dansereau^[16]结果和本文微透镜中心结果都与此标准值进行比较,计算得到距离误差,并计算误差的均值和标准差。两者结果分别如图 8(c)和(d)所示。两种方法得到的分布相似,均值和标准差非常接近。这说明提出的多频相移方法与白图像方法具有相当

的效果。

根据像素光场标定结果,即可将原始图像的像素转化为光场表达。光场中既含有位置信息又具有方向信息。当方向信息固定时,可得到相应方向的图片。如图 9 所示,由同一光场信息通过视点变换可得到不同方向视角的图片信息,光场方向坐标 $(x_i - x_l, x_l - x_j)$ 分别为 $[-3, -3], [-3, 3], [3, -3], [3, 3]$ 。由于进行了渐晕效应校正,不同视角图片具有一致的亮度对比特性。

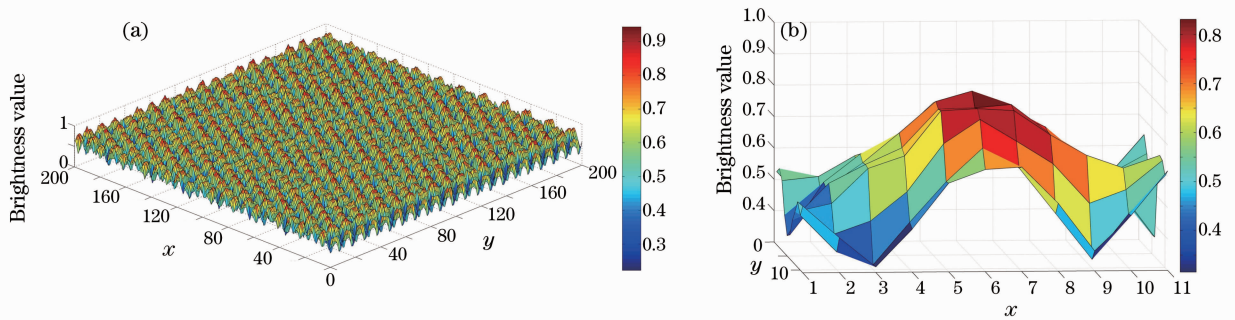


图 7 渐晕特性。(a)微透镜阵列渐晕三维图;(b)微透镜(164,164)渐晕三维图
Fig. 7 Vignetting for the microlens array (a) and one microlens at (164,164) (b)

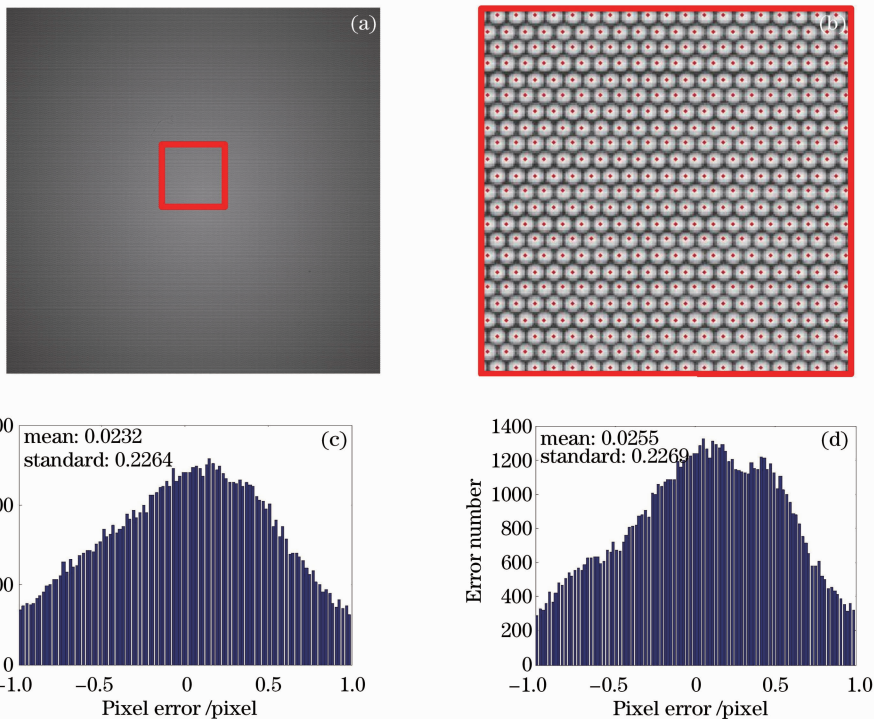


图 8 本文方法与 Dansereau 方法比较图。(a)白图像;(b)放大的局部峰值图;(c)本文方法峰值距离误差分布图;(d) Dansereau 方法峰值距离误差分布图

Fig. 8 Comparing the proposed method with the method from Dansereau. (a) White image; (b) results from the white image, which is been zoomed; (c) error distribution of the proposed method; (d) error distribution of Dansereau

4.2 光场重聚焦和全聚焦

实验中,依据光场相机的标定获得光场信息,进而根据(11)式生成任意深度的光场图像,在图像清

晰度评价函数的优选中确定最清晰的图像,或者融合多幅光场图片实现全聚焦图像。

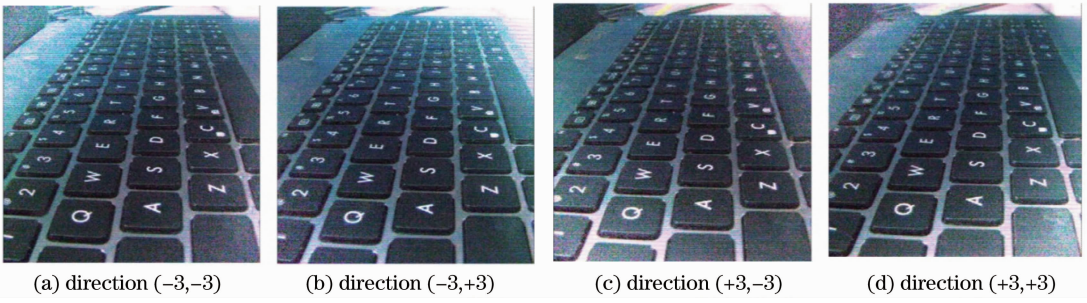


图 9 特定光场方向的图片

Fig. 9 Light field data at different directions

当 $\alpha=0$ 时,由(9)式可生成传统相机拍摄的正常图片[图 10(a)]。选择小块区域[图 10(a)中黄色

矩形框]作为新的聚焦位置,通过光场同轴变换不断生成新成像面位置的图片,并利用图像清晰度评价

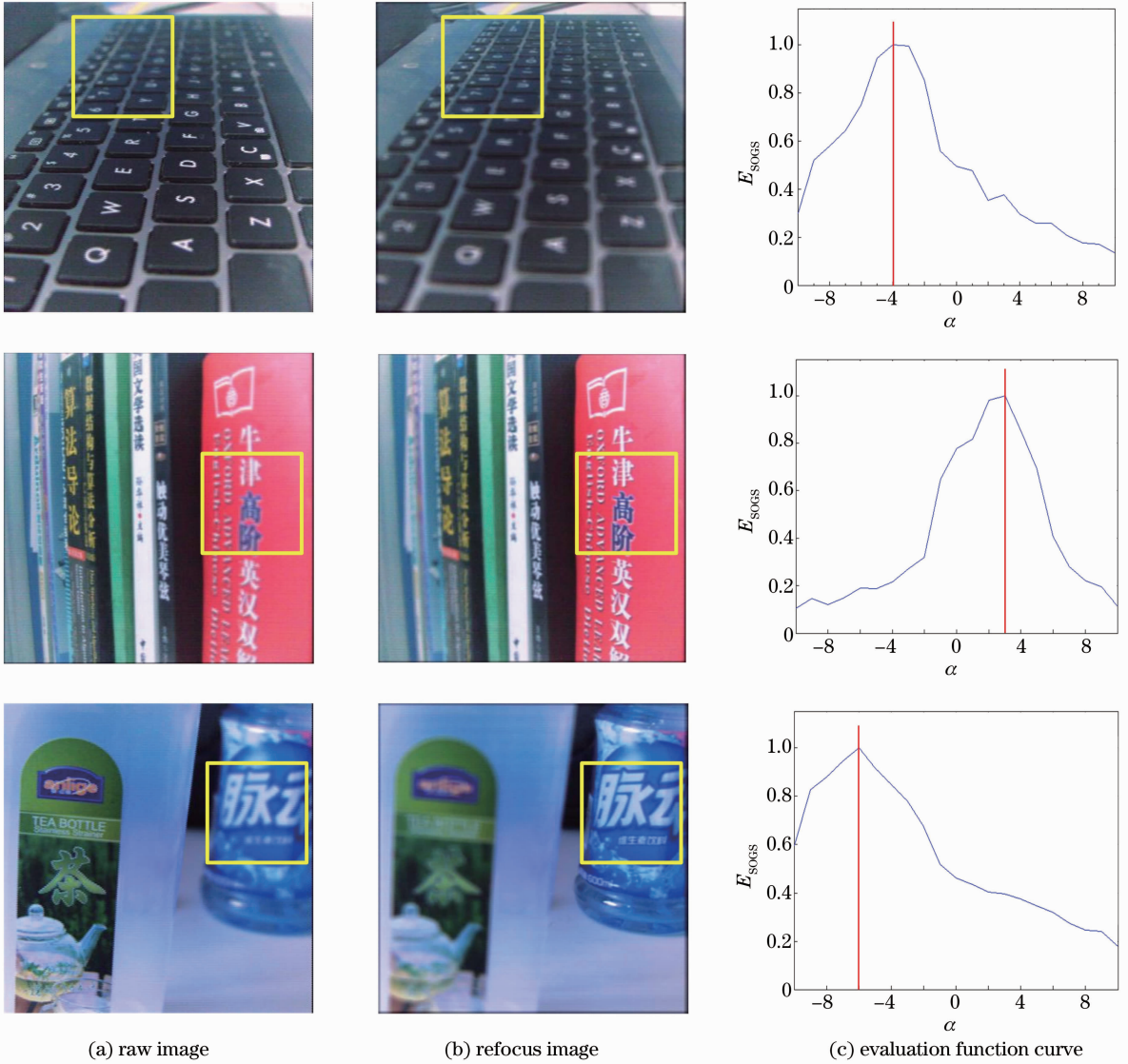


图 10 重聚焦图片和清晰度评价。(a)通过原始光场生成的图片,黄色方框中图片成像模糊;(b)通过对原始光场进行变换得到重聚焦图片,黄色方框中图片成像清晰;(c)评价二阶梯度平方函数的评价值

Fig. 10 Refocus image and the clarity measure values. (a) Images obtained by the matrixLF, the yellow boxes in the image (a) are imaging blur and in the image (b) are imaging clear after refocus; (c) values of the second order gradient square function

算子(二阶梯度平方函数)判断该矩形框区域的清晰度,直到该区域内具有最高的清晰度为止。计算结果如图 10(b)所示。由图 10(c)可以看出,该区域在此时 α 值清晰度评价算子具有最大值,相对于最初的位置($\alpha=0$)清晰度值增加幅度明显。

在光场重聚焦技术中,图像清晰度函数是重要的决策值,其优劣决定了重聚焦效果的好坏。在实验中对多种常见清晰度评价函数在光场重聚焦中的效果进行比较,定量分析各评价函数的性能。对比实验采用相同的光场数据,光场同轴变换和同一框

选区域,只是清晰度评价函数不同。清晰度评价函数的种类和方法见表 1 共有 6 种评价函数,分别为:方差评价函数(Va),梯度向量平方函数(GVS),拉普拉斯函数(La),罗伯特梯度函数(RG),梯度向量横方函数(GVN)和二阶梯度平方函数(SOGs)。函数中 $f(i, j)$ 表示像素灰度值, \bar{f} 表示灰度平均值, I_{sub} 表示 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 以目标像素点为中心的子模块。由图 11 可知, E_{SOGs} 和 E_{GVS} 具有无偏心、单峰性和单调性,在健壮性上优于其他清晰度评价函数。与之相对的, E_{Va} 和 E_{La} 抖动性较大。

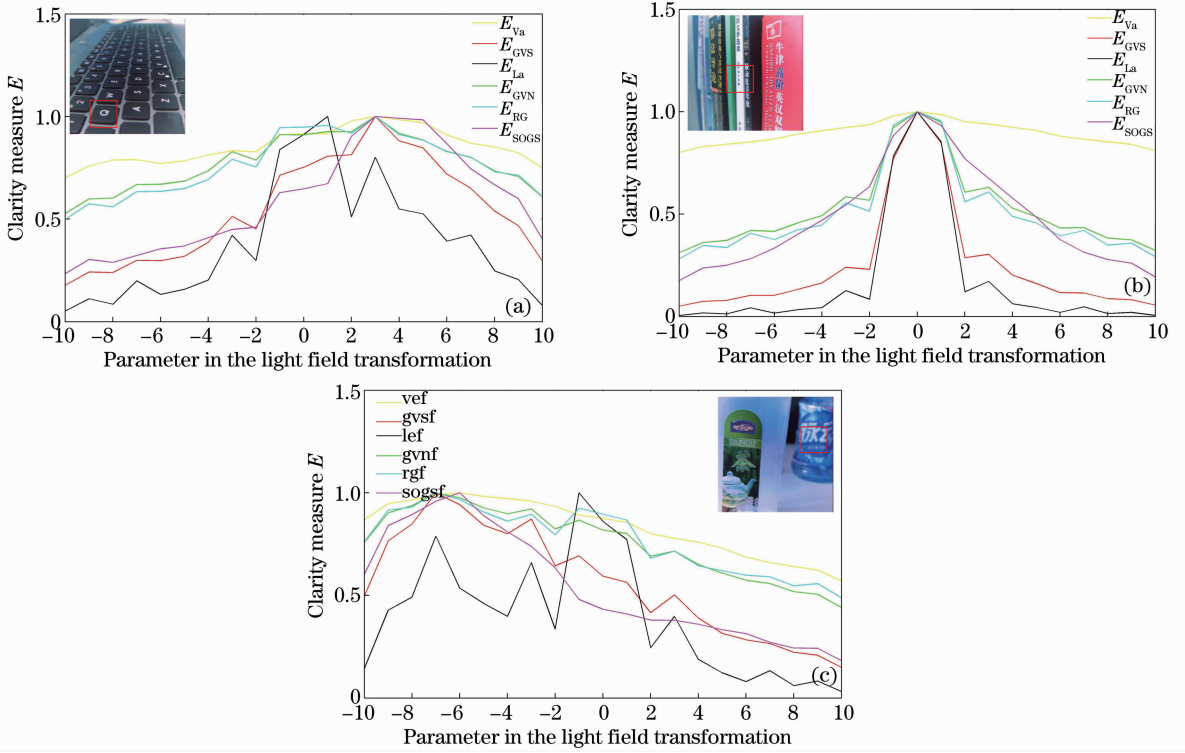


图 11 清晰度评价函数比较。图 3(a)~(c)中插图代表初始光场,红色方框表示评价函数进行评价的区域
Fig. 11 Performance of six clarity evaluation functions in light field refocus. Insets in Fig. 3(a)~(c) represent the initial light field. Red box is the regional of the evaluation function need to evaluate

表 1 灰度评价函数

Table 1 Gray-scale evaluation function

| Evaluation function | Formula expression |
|---------------------|--|
| Va | $E = \frac{1}{M \times N} \sum_i \sum_j [f(i, j) - \bar{f}]^2$ |
| GVS | $E = \sum_i \sum_j \{ [f(i+1, j) - f(i, j)]^2 + [f(i, j+1) - f(i, j)]^2 \}$ |
| La | $E = \sum \sum [\nabla^2 f(i, j)]^2$ |
| RG | $E = \sum \sum [f(i, j) - f(i+1, j) + f(i+1, j) - f(i, j+1)]$ |
| GVN | $E = \sum_i \sum_j \sqrt{ [f(i+1, j) - f(i, j)]^2 + [f(i, j+1) - f(i, j)]^2 }$ |
| SOGs | $E = \sum_i \sum_j [f_i^2(i, j) + f_j^2(i, j)], \text{ Where, } s_i = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, s_j = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix},$ $\begin{cases} f_i = I_{\text{sub}}(i, j) * s_i \\ f_j = I_{\text{sub}}(i, j) * s_j \end{cases}$ |

重聚焦算法可针对任意 α 值进行光场变换后，生成聚焦图片。如图 12(b)所示，在 $(-8.0, 8.1)$ 范

围内间隔 0.7 生成了 24 张对应的重聚焦图片，而 Lytro 相机内部解压出的重聚焦图片只有 12 个，如



(a)



(b)

图 12 与 Lytro 重聚焦对比实验。(a) Lytro 重聚焦的图片结果；(b) 本文方法重聚焦结果

Fig. 12 Comparing the Lytro method (a) with proposed method (b)

图 12(a)所示。两者都可以实现聚焦的远近变化,只是本文可以实现任意需要的重聚焦图像。

在全聚焦实验中遍历光场变换参数 α , 可生成不同的聚焦图片(如图 13 所示), 针对图片每个微小区域进行清晰度评价, 确定最清晰的 α 值, 融合成全聚焦的光场数据, 并根据(9)式计算此全聚焦光场数据的对应图片即全聚焦图片。计算结果如图 14(a)所

示。其与图 13 对比可以发现, 全聚焦图片对前景、中景和背景都实现了清晰成像。由于微透镜阵列具有渐晕效应, 周边数据的信噪比较低, 在全聚焦图片中容易产生融合瑕疵。因此, 减少角度信息, 只选择中心区域的光场信息而舍弃周边区域的光场信息, 重新对全聚焦光场进行图片生成, 如图 14(b)所示。全聚焦图片相对图 14(a)减少了块状效应, 更真实自然。



图 13 重聚焦图片。(a)背景聚焦及光场变换 α 的参数值;(b)中间聚焦及光场变换 α 的参数值;
(c)前景聚焦及光场变换 α 的参数值

Fig. 13 Refocus images generated by light field transformation. (a) Image focus back and α value;
(b) image focus middle and α value; (c) image focus forward and α value

5 结 论

光场用光线代替亮度对三维场景进行建模, 为数字摄影技术提供了一个新契机。对空间复用的光场成像技术进行了建模, 从光学器件对光场变换的角度阐释了光场复用的机制, 建立了标准光场和像素光场的关系, 并提出了基于多频相移的光场标定方法。通过对 Lytro 光场相机的实际标定, 确定了微透镜中心位置, 像素与微透镜的所属关系, 恢复了光场信息, 并

将光场信息应用于重聚焦和全聚焦。实验结果验证了光场模型的正确性和标定方法的可行性。

在标定结果中, 光场像素的对应性具有明显的不连续性。利用边缘检测和模板匹配的方法标定了光场参数, 继而恢复出光场数据。在光场重聚焦实验中, 对多种清晰度函数进行了分析比较, 发现二阶梯度平方函数在光场重聚焦中具有优良特性; 对全聚焦图片进行了对比研究, 发现低信噪比的光场方向数据易降低全聚焦质量。



图 14 全聚焦图片结果。(a)使用所有方向信息的全聚焦图片；(b)减少方向信息的全聚焦图片

Fig. 14 Contrast between all-focus image and the all-focus image of reducing direction resolution. (a) Represents the all-focus image and (b) represents the all-focus image after reducing the direction resolution of light field

参 考 文 献

- 1 S J Gortler, R Grzeszczuk, R Szeliski, *et al.*. The lumigraph [C]. Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996. 43–54.
- 2 L Mcmillan, G Bishop. Plenoptic modeling: An image-based rendering system [C]. Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995. 39–46.
- 3 F P Nava, J P Luke. Simultaneous estimation of super-resolved depth and all-in-focus images from a plenoptic camera [C]. The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video, 2009. 1–4
- 4 R Ng, M Levoy, M Brédif, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [C]. Computer Science Technical Report, 2005.
- 5 A Levin, F Durand. Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2010.
- 6 S Wanner, B Goldlucke. Globally consistent depth labeling of 4d light fields [C]. Computer vision and Pattern Recognition, 2012. 41–48.
- 7 Xiao Xiangguo, Wang Zhonghou, Sun Chuandong, *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.
- 8 E H Adelson, J R Bergen. The plenoptic function and the elements of early vision [C]. Computational Models of Visual Processing, 1991. 3–20.
- 9 M Levoy, P Hanrahan. Light field rendering [C]. ACM Transactions of the 23rd annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996. 31–42.

- 10 I Ihrke, G Wetzstein, W Heidrich. A theory of plenoptic multiplexing [C]. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010. 483–490.
- 11 C Zhou, S K Nayar. Computational cameras convergence of optics and processing [J]. Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3322–3340.
- 12 R Ng. Fourier slice photography [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 735–744.
- 13 T Georgiev, C Zheng, B Curless, *et al.*. Spatio-angular resolution tradeoffs in integral photography [J]. Eurographics Symposium on Rendering, 2006. 263–272.
- 14 K Ueda, T Koike, K Takahashi, *et al.*. Adaptive integral photography imaging with variable-focus lens array [C]. SPIE, 2008, 6803: 68031A.
- 15 D G Dansereau, O Pizarro, S B Williams. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras [C]. Computer vision and Pattern Recognition, 2013.
- 16 Lytro. The lytro camera [OL]. [2014–08–28], <https://www.lytro.com>.
- 17 D Cho, M L S Kim, Y W Tai. Modeling the calibration pipeline of the Lytro camera for high quality light-field image reconstruction [C]. Computer Vision, 2013. 3280–3287.
- 18 W J Wang, X G Xia. A closed-form robust Chinese remainder theorem and its performance analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(11): 5655–5666.
- 19 Zhang Xu, Zhu Limin, Tu Dawei, *et al.*. Frequency selection rule based robust Chinese remainder theorem and its application in phase unwrapping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108009.
- 张 旭, 朱利民, 屠大维, 等. 基于健壮中国剩余定理的频率选择准则及其在相位解卷绕中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108009.

栏目编辑：张浩佳