

doi: 10. 3788/gzxb20174605. 0510001

基于矩阵变换的光场成像及重聚焦模型仿真

解培月^{1,2,3}, 杨建峰¹, 薛彬¹, 陈国庆^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安电子科技大学, 西安 710071)

摘 要: 基于光场的两平行平面表示方法, 针对光场相机两参考平面间的共轴空间距离变换、离轴空间距离变换、轴旋转和沿轴旋转以及透镜作用等对光线描述方式的影响, 给出了相应的光场矩阵变换方程, 并利用这些方程, 建立了光场相机的成像模型、采样模型及辐射传输模型. 从光场共轴空间距离变换的观点出发推导出可实现不同点清晰成像的数字重聚焦公式, 利用所建立的模型, 计算机仿真生成了目标景物, 并用所建立模型对生成景物进行了数字重聚焦, 验证了数字重聚焦后的图像与直接聚焦图像的一致性.

关键词: 光场相机; 微透镜阵列; 矩阵变换; 数学模型

中图分类号: O439; TP702

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0510001-10

Simulation of Light Field Imaging and Refocusing Models Based on Matrix Transformation

XIE Pei-yue^{1,2,3}, YANG Jian-feng¹, XUE Bin¹, CHEN Guo-qing^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Xi'dian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the double plane representation of the light field, aimed at the effect of light on the way of description influenced by coaxial translation, off-axis translation, coplanar rotation and off-planar rotation, and lens transformation between two reference plane of light field camera, this paper provided the corresponding matrix transformation equations. And using the transformation equations, the imaging model, sampling model, and radiation model of light field camera are established. Besides, on the view of light field coaxial space distance transformation, the digital refocusing process is deduced which can receive clearly imaging in any target scene point after got the imaging by focusing at a point. And moreover, by using the established model, the object is generated by computer simulation, and the model is used for digital refocusing on generation of features, the consistency of digital refocusing image and the directly focused images are verified.

Key words: Light field camera; Micro-lens array; Matrix transformation; Mathematical model

OCIS Codes: 100.2000; 080.2720; 110.6980; 100.3010

0 引言

光场相机作为记录光场信息的一种形式, 受到国内外科学研究人员的青睐. 所谓光场, 实质上是空间中所有光线光辐射函数的总体, 可以用 E. Adelson 等^[1]提出的七维全光函数完整的表达, M. Levoy 等^[2]将七维全光函数降为四维, 减少了光线的色彩信息及在空间中的动态变换, 仅用二维位置信息和二维方向信息来表征. 近几年, 国内外对可同时记录光场四维信息的微透镜阵列式光场相机研究有了不少成果, 例如, Ren

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41427805)和高等学校学科创新引智计划(No. B17035)资助

第一作者: 解培月(1984-), 女, 博士, 主要研究方向为光谱成像技术. Email: pyxie@xidian.edu.cn

导师: 杨建峰(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学工程. Email: yangjf@opt.ac.cn

通讯作者: 薛彬(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学工程. Email: xuebin@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-07-11; 录用日期: 2017-02-22

<http://www.photon.ac.cn>

Ng 等^[3]利用重聚焦分析了每个微透镜下图像分辨率的增加过程; Andrew Lumsdaine 等^[4]特别分析了由光场相机获取的离散数据特征, 以某种方式将传统和聚焦型光场相机在设计上进行了统一; Todor Georgiev^[5-6]分析了光场相机的分辨率, 并给出了获取高质量、高分辨率图像的几种算法; Pitts, Colvin^[7]针对光场相机成像过程中微透镜的位置研究了偏差的补偿; 袁艳^[8-9]等对光场相机中的结构误差及数字对焦成像的清晰度评价进行了研究. 目前, 随着光电技术及器件的发展和光场理论的进一步完善, 光场成像正逐步渗透到航空拍摄、安全监视、科学仪器、立体显示等各个领域, 并朝着集成化、实用化、多元化的方向迈进.

微透镜阵列式光场相机所获取的是四维光场信息, 要恢复出所拍摄图像并通过数字重聚焦过程获取不同部位的清晰图像, 对其成像过程的研究尤为重要. 本文基于双平面表示方法, 基于几种光场的矩阵变换^[10], 给出了由景物所在平面和系统孔径所在平面所描绘的四维光场到微透镜所在平面和探测器所在平面所描绘四维光场的转换过程, 以及探测器所记录四维光场的采样过程, 分别建立了其成像模型、采样模型及该过程中光线传播的辐射模型, 由探测器所记录四维光场到图像的恢复过程与之是互逆的. 另外, 基于坐标平面距离变换的观点推导了可以获取不同位置清晰图像的数字重聚焦过程. 最后, 利用所建立模型计算机仿真出目标景物, 并通过重聚焦得出景物不同位置的清晰成像.

1 结构原理

光场相机主要由前置镜系统、微透镜阵列和光电探测器三部分构成(如图 1). 其中前置镜系统相当于传统相机的物镜, 微透镜阵列位于前置镜系统的一次像面处, 探测器位于微透镜的焦平面处. 其成像原理是, 目标物体上一点发出的不同方向光线, 经过主透镜系统的折射作用, 聚焦于微透镜阵列上, 经单个微透镜发散成不同方向的分量, 到达探测器的不同像元处并被探测器所记录.

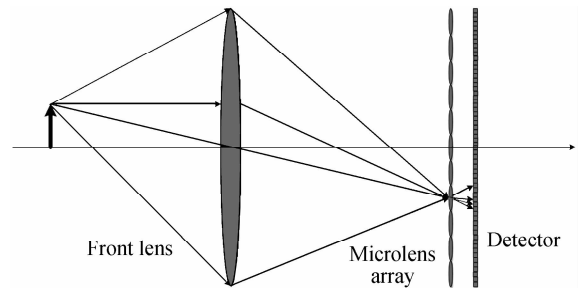


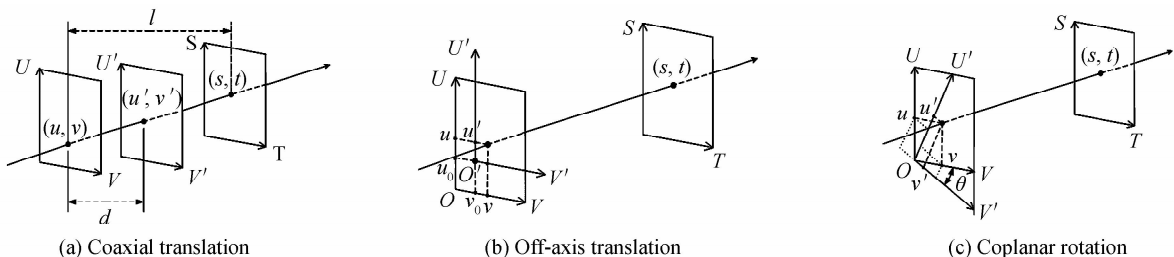
图 1 光场相机的结构示意图

Fig. 1 The structure of the light field camera

在保证前置镜和微透镜阵列 F 数相等的条件下^[11-12], 可以确保到达探测器平面上的点只来自一个微透镜单元, 并且彼此之间无混叠现象又使探测器得到充分利用. 虽然光场相机与传统相机所使用探测器是一样的, 从宏观来看, 二者所获得的二维原始数据基本相同, 但是从微观来看, 传统相机记录的只是景物的位置信息, 丢失了其方向信息的记录, 而光场相机由于微透镜阵列的存在, 每个微透镜获取前置镜孔径的子像, 所有的微透镜成像获得整个光场的结构, 探测器所记录的部分信息可以分析出光线的角度, 即一部分位置分辨率让位于方向分辨率. 假设光场相机中微透镜的个数为 $M \times M$, 每个微透镜覆盖的探测器像元数为 $N \times N$, 那么微透镜个数决定的目标的空间位置分辨率为 $M \times M$; 每个微透镜对应的探测器像元数所决定的目标方向分辨率为 $N \times N$.

2 光场坐标平面间的矩阵变换

M. Levoy^[2]指出, 可以用两个平行平面来记录四维光场信息, 光线与第一个平面的交点记录光线的二维位置信息, 与第二个平面的交点用于记录光线的二维方向信息. 光场的矩阵变换^[10]是指光线在传输过程中, 由于所选参考平面间的平移、旋转或透镜作用等而产生的空间坐标描述方式的改变, 即坐标向量的改变. 本文在考虑两参考平面间存在误差的情况下, 首先给出光线传播过程中的光场矩阵变换方程. 常见的坐标轴变换方式见图 2.



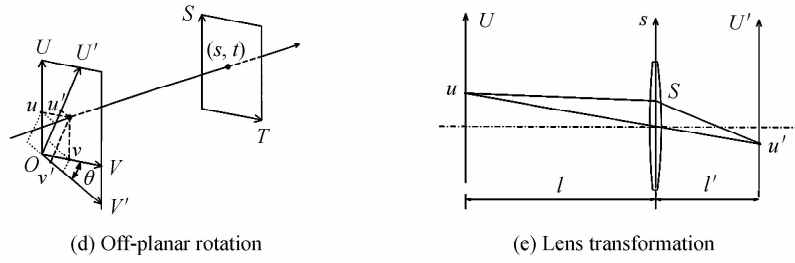


图 2 几种坐标轴变换方式
Fig. 2 Kinds of coordinate transformations

2.1 共轴空间距离变换

共轴空间距离变换是指移动后的坐标平面与原坐标平面互相平行,只发生光轴方向移动的情况(如图 2(a)). 设原位置坐标平面 UV 与方向坐标平面 ST 间的距离为 1,取移动后光场坐标系的坐标原点为光轴与该坐标平面的交点,假设两光场坐标平面中 ST 平面不变, UV 平面沿着光轴移动了距离 d 变为 $U'V'$,或者 UV 平面不变, ST 平面移动了距离 d' 变为 $S'T'$,亦或两种情况同时发生,那么综合给出光场变换矩阵方程为

$$\mathbf{L}(u', v', s', t') = \mathbf{T}(d, d') \odot \mathbf{L}(u, v, s, t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{L}(u, v, s, t)$ 为光线在坐标平面 UV 和 ST 下的光场; $\mathbf{L}(u', v', s', t')$ 为光线在坐标平面 $U'V'$ 和 $S'T'$ 下的光场, \odot 为矩阵的乘积运算, $\mathbf{T}(d, d')$ 为变换矩阵,其中有

$$\mathbf{T}(d, d') = \begin{pmatrix} (l-d)/l & 0 & d/l & 0 & 0 \\ 0 & (l-d)/l & 0 & d/l & 0 \\ d'/l & 0 & (l-d')/l & 0 & 0 \\ 0 & d'/l & 0 & (l-d')/l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 离轴空间距离变换

离轴空间距离变换是指转换光场坐标系与原光场坐标系共平面、不共轴,坐标轴只在垂直光轴方向有移动(如图 2(b)). 若转换光场 $U'V'$ 相对原光场 UV 共方向但原点平移了 (u_0, v_0) ,或转换光场 $S'T'$ 相对原光场 ST 共方向但原点平移了 (s_0, t_0) ,亦或两者同时发生,综合给出光场变换矩阵方程为

$$\mathbf{L}(u', v', s', t') = \mathbf{V}(u_0, v_0, s_0, t_0) \odot \mathbf{L}(u, v, s, t) \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{V}(u_0, v_0, s_0, t_0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -u_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -s_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -t_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.3 沿轴旋转变换

沿轴旋转变换是指转换光场坐标系与原光场坐标系共平面、共轴,两坐标轴间存在一个夹角(如图 2(c)). 若转换光场 $U'V'$ 与原光场坐标系 UV 共原点,方向存在夹角 θ ,或转换光场 $S'T'$ 与原转换光场坐标系 ST 共原点,方向存在夹角 θ' ,亦或两者同时发生,综合给出光场变换矩阵方程为

$$\mathbf{L}(u', v', s', t') = \mathbf{Z}(\theta, \theta') \odot \mathbf{L}(u, v, s, t) \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{Z}(\theta, \theta') = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta' & -\sin\theta' & 0 \\ 0 & 0 & \sin\theta' & \cos\theta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.4 轴旋转变换

轴旋转变换是指转换光场坐标平面与原光场坐标不共面、不同轴,两坐标轴间存在一个夹角(如图 2(d)).设转换光场 $U'V'$ 与 ST 坐标面平行,与原 UV 坐标面共原点但与 u 轴偏离夹角为 φ , v 轴偏离夹角为 ϕ ;或光场面 $S'T'$ 与原光场坐标 ST 共原点, s 轴偏离夹角为 φ' , t 轴偏离夹角为 ϕ' ,亦或两者同时发生,综合给出光场变换矩阵方程为

$$\mathbf{L}(u',v',s',t') = \mathbf{P}(\varphi, \phi, \varphi', \phi') \odot \mathbf{L}(u, v, s, t) \quad (7)$$

式中,

$$\mathbf{P}(\varphi, \phi, \varphi', \phi') = \begin{pmatrix} P_{11} & 0 & P_{13} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & 0 & P_{24} & 0 \\ P_{31} & 0 & P_{33} & 0 & 0 \\ 0 & P_{42} & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, $P_{11} = (l - u \cdot \tan(\varphi)) / l$, $P_{13} = u \cdot \tan(\varphi) / l$, $P_{22} = (l - v \cdot \tan(\varphi)) / l$, $P_{24} = v \cdot \tan(\varphi) / l$, $P_{31} = u \cdot \tan(\varphi') / l$, $P_{33} = (l - u \cdot \tan(\varphi')) / l$, $P_{42} = v \cdot \tan(\varphi') / l$, $P_{44} = (l - v \cdot \tan(\varphi')) / l$.

2.5 透镜变换

透镜变换是由于透镜的会聚(或发散)作用而引起的光线方向的改变(如图 2(e)).设 UV 平面与 ST 平面的距离为 l ,当焦距为 F 的透镜位于 ST 平面处,或者焦距为 f 的透镜位于 UV 处时,或二者同时发生,结合成像及平移关系可得光场的变换矩阵方程

$$\mathbf{L}(u',v',s',t') = \mathbf{N}(F, f) \odot \mathbf{L}(u, v, s, t) \quad (9)$$

式中,

$$\mathbf{N}(F, f) = \begin{pmatrix} \frac{F}{F-l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{F}{F-l} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f}{f-l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{f}{f-l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

特别地,当 UV 面为平面时 $F = \infty$; ST 面为平面时 $f = \infty$.

3 光场成像模型

对光场相机而言,光场的成像模型即将景物所在平面和系统孔径面作为两参考平面,到四维光场被二维探测器记录前,以微透镜所在平面和探测器所在平面所描述光场的光线坐标变化过程.首先,对其中所涉及的参考平面进行定义,然后给出光场的成像模型.

3.1 坐标平面的定义

如图 3,对光场相机模型建立中所涉及的参考坐标平面定义如下:

- 1) $X_z Y_z$ 坐标面:目标景物面,特别地, $Z=0$ 所在平面记为 XY 坐标面;
- 2) GH 坐标面:孔径面,光轴与孔径所在平面交点为原点,像面列方向为 G 轴,行方向为 H 轴;
- 3) UV 坐标面:景物像平面,光轴与一次像面交点为原点,像面列方向为 U 轴,行方向为 V 轴;
- 4) ST 坐标面:孔径像平面,光轴与孔径像面交点为原点,像面列方向为 S 轴,行方向为 T 轴;
- 5) $U'V'$ 坐标面:微透镜阵列面,光轴与微透镜阵列交点为原点,微透镜列方向为 U' 轴,行方向为 V' 轴;
- 6) $S'T'$ 坐标面:探测器面,光轴与探测器交点为原点,探测器列方向为 S' 轴,行方向为 T' 轴.

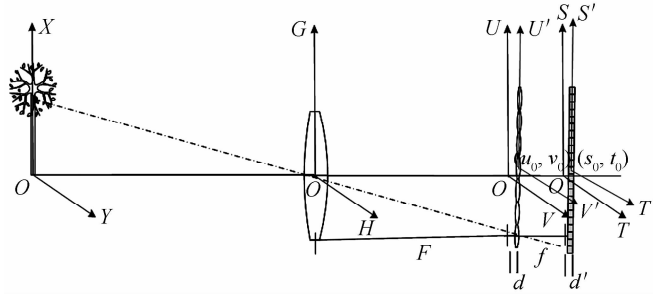


图3 坐标平面图

Fig. 3 Diagram of coordinate planes

3.2 光场成像模型

设景物点 (x_1, y_1) 为 XY 坐标平面上的一点(如图4),所有由该点发出的光线途径孔径平面上不同的 (g_i, h_i) 到达同一微透镜上同一点 (u_1, v_1) ,经微透镜作用后分别到达不同的探测器位置 (s_i, t_i) ,那么微透镜的坐标 (u_1, v_1) 和目标点 (x_1, y_1) 是共轭的,记录了光线的空间信息, (g_i, h_i) 与 (s_i, t_i) 是共轭的,记录了光线的方向信息,故该光线可以记为 $L(x_1, y_1, g_i, h_i)$ 或者 $L(u_1, v_1, s_i, t_i)$,此即为二维探测器对四维光场的记录.

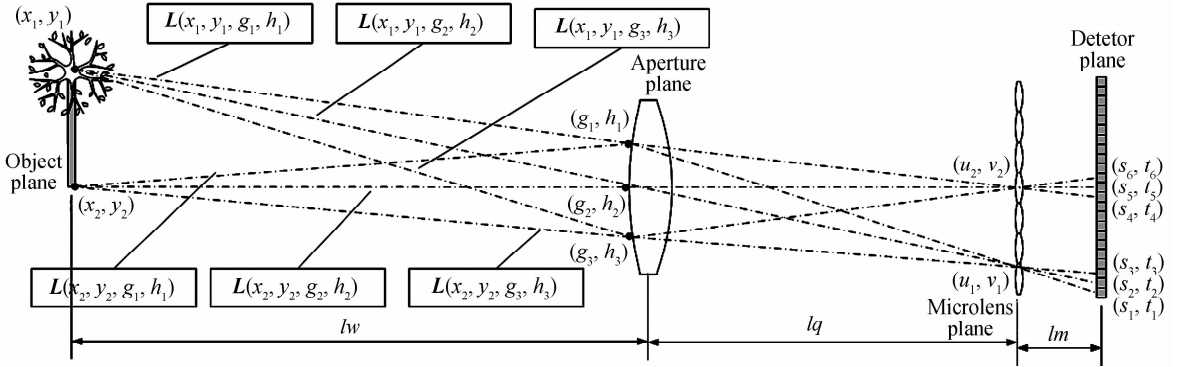


图4 光场的记录

Fig. 4 Records of the light field

由于 X_zY_z 坐标平面与 XY 坐标平面之间存在一个 z 值的平移量,根据共轴空间距离变换公式(1)得

$$L(x, y, g, h) = T(z, 0) \odot L(x_z, y_z, g, h) \quad (11)$$

光线 $L(x, y, g, h)$ 经前置镜成像后会聚在一次焦面 (u, v) 处,定义前置镜焦距为 F ,则根据光场在透镜作用下的变换关系式(9),得

$$L(g, h, u, v) = N(F, \infty) \odot L(x, y, g, h) \quad (12)$$

实际中,假设微透镜阵列与焦平面存在共轴距离 d (离焦量),沿轴方向夹角为 θ ,离轴方向夹角 φ, ϕ ,那么实际达到探测器平面的光场经过共轴空间距离的变换,沿轴旋转以及轴旋转变换后变为

$$L(g, h, u', v') = P(\varphi, \phi, 0, 0) \odot (Z(\theta, 0) \odot (T(d, 0) \odot L(g, h, u, v))) \quad (13)$$

设微透镜的焦距为 f ,光线经微透镜后重新聚焦于平面 ST ,光场变为

$$L(u', v', s, t) = N(\infty, f) \odot L(g, h, u', v') \quad (14)$$

理想情况下将探测器置于微透镜焦平面处,但实际中假设二者存在共轴距离 d' ,沿轴方向存在夹角 θ' ,离轴方向夹角为 φ', ϕ' ,则此时光场为

$$L(u', v', s', t') = P(0, 0, \varphi', \phi') \odot (Z(0, \theta') \odot (T(0, d') \odot L(u', v', s, t))) \quad (15)$$

那么, $L(u', v', s', t')$ 即为微透镜和探测器两个参数平面所记录的四维光场信息.

3.3 光场采样模型

针孔阵列式是最简单的一种光场采样模式,但由于能量的利用率非常低而没有得到推广使用.目前的微透镜加工工艺精准,当将微透镜做成方形时,其直径可以与微透镜间隔(相同,能量利用率达到100%).如图

5,设微透镜焦距为 f ,通常 $f \ll F$,根据成像关系有 $l_m = \frac{F \cdot f}{F - f} \approx f$.在“无混叠要求”的前提下,可以确保探测

器划区域使用.

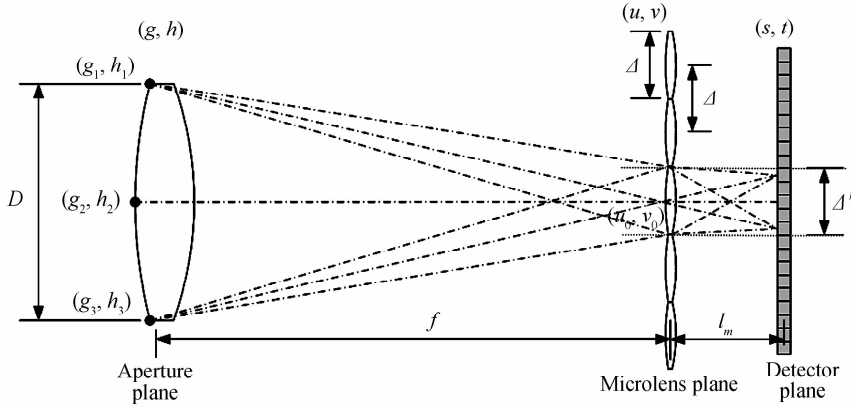


图 5 光场相机的采样模式
Fig. 5 Sampling model of light field camera

而要用两维的探测器来记录四维的光场信息,就要将上述微透镜阵列平面和探测器平面所描绘的四维光场转化为探测器所记录的二维信息,该过程即为光场的采样.

如图 6,设 (s_{i0}, t_{j0}) 为第 i 行第 j 列微透镜的光轴与探测器平面的交点,微透镜的直径为 Δ ,像素尺寸为 σ ,那么光场被转换为二维并离散化采样的模型为

$$\mathbf{L}(i, j) = \mathbf{H}(\Delta, \sigma) \odot \mathbf{L}(u', v', s', t') \quad (16)$$

式中,

$$\mathbf{H}(\Delta, \sigma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 & \frac{s_{i0}}{\sigma} \\ \Delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Delta} & 0 & \frac{1}{\sigma} & \frac{t_{j0}}{\sigma} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

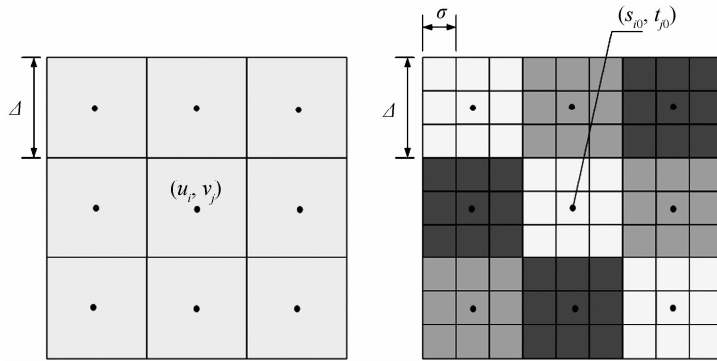


图 6 微透镜与探测器对应关系
Fig. 6 Micro lens corresponding to detector area

3.4 辐射传输模型

光场的矩阵变换模型反映的是光线几何信息的变化,对其辐射值而言光线本身携带的信息不变,故在参考平面的变化始终,有关系

$$\mathbf{L}(u', v', s', t') = \mathbf{L}(u', v', s, t) = \mathbf{L}(u', v', g, h) = \mathbf{L}(u, v, g, h) = \mathbf{L}(x, y, g, h) \quad (18)$$

离散化采样后,所有平面被 i 或 j 离散,式(18)变为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}(i, j) &= \mathbf{L}(u'_i, v'_j, s'_i, t'_j) = \mathbf{L}(u'_i, v'_j, s_i, t_j) = \mathbf{L}(u'_i, v'_j, g_i, h_j) = \mathbf{L}(u_i, v_j, g_i, h_j) \\ &= \mathbf{L}(u_i, v_j, g_i, h_j) = \mathbf{L}(x_i, y_j, g_i, h_j) \end{aligned} \quad (19)$$

单从辐射角度考虑,每个子孔径相当于一个小 F 数的普通相机,若光场相机可分辨的方向单元为 $N \times N$,亦即光场相机相当于由 $N \times N$ 个小 F 数相机组成,如图 7 所示.

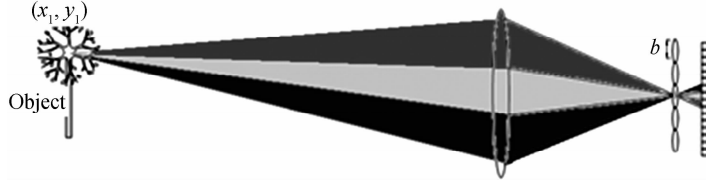


图7 光场相机的辐射模型

Fig.7 The radiation model of light field camera

设系统相对孔径为 D/F , 可分辨子孔径为 dD , 即子孔径相机 F 数为 dD/F , 由于边孔径孔径角为 θ ,

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{g_i^2 + h_j^2}}{F}\right) \quad (20)$$

设系统总的透过率为 τ_{system} , 则某一像元进入系统的有效光谱辐照度为

$$E(i, j) = L(x_i, y_j, g_i, h_j) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{dD}{F}\right)^2 \cdot \tau_{\text{system}} \cdot \cos^4(\theta) \quad (21)$$

定义参数 CCD 输出 1 个 DN 值需要的照度为 δE , 设 CCD 归一化光谱响应为 $\tau_{\text{CCD}(\sigma)}$, 则对应于每个 CCD 像元, 其 DN 值输出为

$$\text{DN}(i, j) = \frac{E(i, j) \cdot \tau_{\text{CCD}(\sigma)}}{\delta E} + e(i, j) \quad (22)$$

根据卷积性质, $\tau_{\text{CCD}(\sigma)}$ 可以看作是滤光片透过率相似性质的分量。

3.4 辐射传输模型

由于光场是可追迹的, 光场相机的优点就在于可先拍照再获取任意点的清晰图像, 通过所获得光场数据得到指定目标清晰图像的过程, 称为数字图像重建(或重聚焦), 其效果等价于普通的成像系统经准确调焦后所拍摄的图像。

如图 8, 到达微透镜平面上点 U'_1 的光线角度信息被记录在探测器像素 S'_1, S'_2 处, 将该点的所有角度信息量积分, 可以得到 U' 平面的清晰成像; 对于距离主透镜 αF 处的平面 U 上的点 U_1 , 其探测器平面记录的角度信息为 S'_1, S'_4 。因此要恢复 U_1 所在平面 U 所对应物面的清晰成像, 关键是需要找到由 U_1 发出的所有到达探测器并被探测器记录的光线的角度信息, U_1 的照度即为这些光线的积分。

设微透镜平面 $U'V'$ 与孔径平面的距离为 F , 与孔径平面 GH 描述的光场记为 $\mathbf{L}_F(u', v', g, h)$, 若要得到距离孔径平面 αF 处的清晰成像, 需得到光场 $\mathbf{L}_{\alpha F}(u, v, g, h)$ 。令 $l = \alpha F, d = (1 - \alpha)F$, 则由共轴空间距离变换公式(1)可知

$$\mathbf{L}_F(u', v', g, h) = \mathbf{T}((1 - \alpha)F, 0) \odot \mathbf{L}_{\alpha F}(u, v, g, h) \quad (23)$$

即

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ g \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\alpha & 0 & 1-1/\alpha & 0 \\ 0 & 1/\alpha & 0 & 1-1/\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ g \\ h \end{pmatrix} \quad (24)$$

所以距离主透镜 αF 的平面 UV 上所获得的重聚焦后的图像表达式为

$$E_{\alpha F}(u, v) = \frac{1}{F^2} \iint L_{\alpha F}(u, v, g, h) dg dh = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F\left[\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)g + \frac{1}{\alpha}u, \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)h + \frac{1}{\alpha}v, g, h\right] dg dh \quad (25)$$

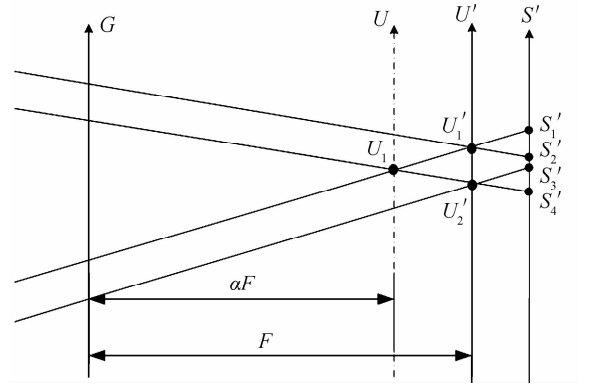


图8 光场相机的重聚焦模型

Fig.8 The refocusing model of light field camera

4 计算机仿真

利用计算机仿真生成一个目标“XIE Pei yue”,如图 9,将目标分成“XIE”,“Pei”、“yue”三部分,分别处于三个平行平面上且各部分尺寸均为 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$,距离相机分别为 2 m 、 4 m 和 8 m 。

设光场相机前置镜焦距为 40 mm ,相对孔径为 $F/4$,微透镜尺寸为 0.02 mm ,焦距为 0.08 mm ,探测器像元尺寸为 $2\text{ }\mu\text{m}$,像元数为 $400\text{ 元}\times 1\text{ 200 元}$,探测器位于微透镜焦平面上.利用所建立模型,分别以各目标所在平面为聚焦面得到光场图像,然后利用数字重聚焦原理得到其它目标所在平面的清晰图像。

XIE Pei yue

图 9 目标景物

Fig. 9 The target and scene

以“Xie”所在平面为聚焦面,直接由相机获取的光场图像为图 10(a),图 10(b)为将其方向变量求均值处理后的合成图像.根据各目标与相机的距离,利用物像关系: $\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f}$,求出三个不同点的像距分别为: 40.816 mm 、 40.404 mm 、 40.201 mm ,利用数字重聚焦模型对其进行重聚焦,分别得到“Pei”和“yue”清晰的图像,如图 10(c)和图 10(d)。

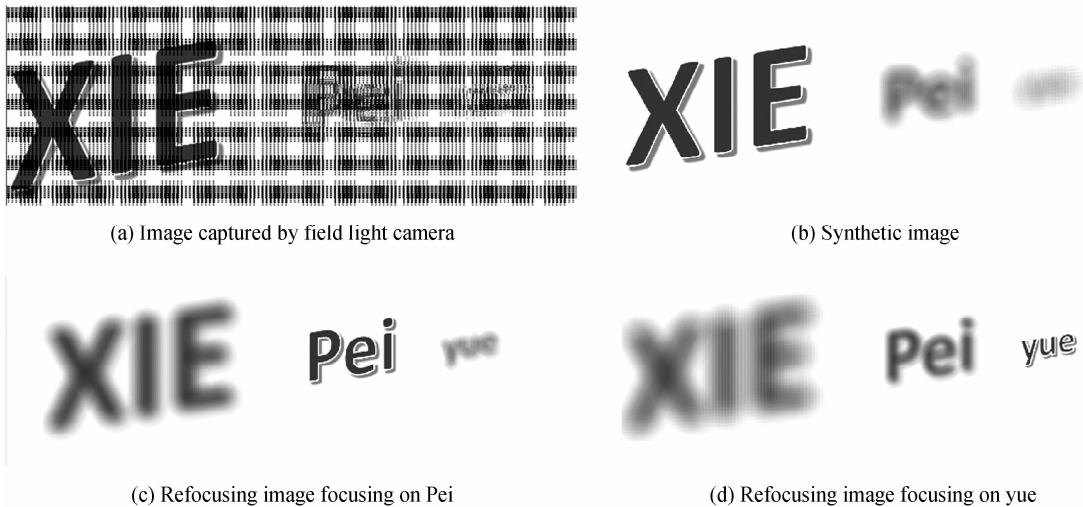
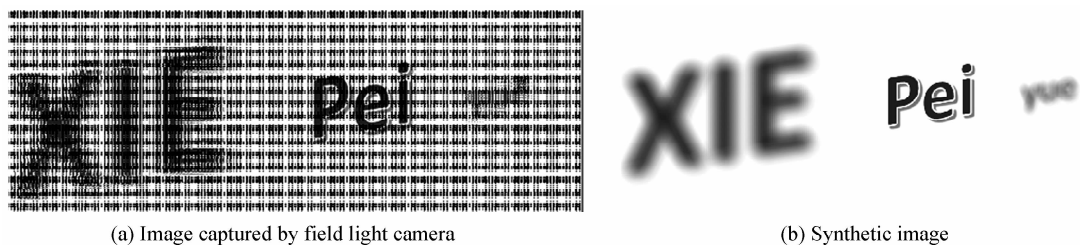


图 10 对焦在 2 m 处获得光场数据及其重聚焦结果

Fig. 10 The light field data at 2 m and refocusing Results

同理,以“Pei”所在平面为聚焦面,在探测器上得到的光场二维投影图为图 11(a),均值后的合成图像如图 11(b),在该图基础上进行重聚焦得到其它目标清晰的效果图,如图 11(c)和图 11(d)。



(a) Image captured by field light camera

(b) Synthetic image



图 11 对焦在 4 m 处获得光场数据及其重聚焦结果
Fig. 11 The light field data at 4 m and refocusing Results

以“yue”所在平面为聚焦面,其距离相机 8 m,在探测器上得到光场二维投影图 12(a),均值后的合成图像如图 12(b),在该图基础上进行重聚焦得到其它目标清晰的效果图,如图 12(c)和图 12(d).

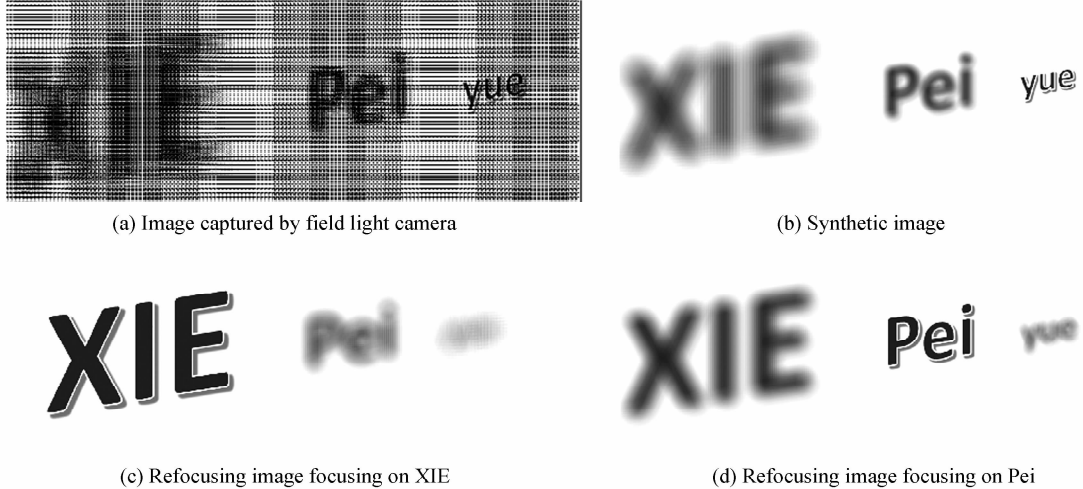


图 12 对焦在 8 m 处获得光场数据及其重聚焦结果
Fig. 12 The light field data at 8 m and refocusing Results

可以看出,上述模拟的三个对焦位置的光场数据记录了光线的位置信息和方位信息,通过重聚焦可获得其他焦面位置的图像,并且通过重聚焦得到的清晰图像与直接聚焦在该平面得到的焦平面图像结果基本一致.

5 结论

光场相机的优点在于可以在充分获取某个场景光场信息的基础上,通过后处理过程计算得到目标方位、深度等信息或者其它位置的清晰成像.本文在引入光场矩阵变换的基础上,分析了光场相机所涉及的各种理论模型并基于光场的矩阵运算推导出了数字重聚焦公式,指出了该过程的实质在于计算通过该点所有光线的积分过程,为光场相机在方位、深度获取以及三维重建方面的研究奠定了理论基础.

参考文献

- [1] ADELSON E H, WANG J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1992, **14**(14): 99-106.
- [2] LEVOY M. Light field rendering[C]. *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996.
- [3] REN N. Digital correction of lens aberrations in light field photography [C]. *SPIE: International Optical Design Conference*, 2006.
- [4] LUMSDAINE A, GEORGIEV T, SYSTEMS A. Full resolution light field rendering [M]. *Pulse*, 2008.
- [5] GEORGIEV T G, CHUNEV G N. Methods and apparatus for rendering focused plenoptic camera data using super-resolved demosaicing [M]. *US*, 2014.
- [6] GEORGIEV T. Plenoptic camera resolution [C]. *Proceedings of the Freeform Optics*, 2015.
- [7] PITTS C, KNIGHT T J, LIANG C K, *et al.* Compensating for variation in microlens position during light-field image processing [M]. 2014.
- [8] YUAN Yan, ZHOU Yu, HU Huang-hua. Registration error analysis for microlens array and photosensor in field camera

- [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1):123-126
袁艳, 周宇, 胡煌华. 光场相机中微透镜阵列与探测器配准误差分析[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 123-126.
- [9] ZHOU Yu, YUAN Yan, HU Huang-hua, *et al.* Focusness evaluation for digital refocusing light field photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1094-1098.
周宇, 袁艳, 胡煌华, 等. 数字对焦光场成像清晰度评价方法研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(6): 1094-1098.
- [10] 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.
- [11] HE Ling-ping, CHEN Bo, ZHANG Hong-ji, *et al.* Radiation calibration of EUV space cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(5): 1036-1041.
何玲平, 陈波, 张宏吉, 等. 极紫外波段空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(5): 1036-1041.
- [12] KIM J, JEONG Y, KIM H, *et al.* F-number matching method in light field microscopy using an elastic micro lens array [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(12):2751-2754.