DOI:10.19789/j.1004-9398.2016.01.004

基于微透镜阵列的光场成像系统*

张占强 张 岩
(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘 要

传统成像系统在拍摄过程中需要对目标物体准确对焦,这在拍摄快速变化的物体时显得非常无力. 为了克服这一缺陷,本文以 Levoy 的光场渲染理论为基础,利用光学设计软件 ZEMAX 在普通成像系统中加入一个微透镜阵列,设计出一个由成像主镜、微透镜阵列和像面 CCD 探测器三部分组成的光场成像系统,并仿真模拟了光场图像的采集. 这样的设计能够同时记录光线的强度和方向信息,对光场图像的后处理以傅里叶切片理论为基础,通过 Matlab 编程,实现了光场图像的重新聚焦. 本文使用普通相机镜头、微透镜阵列和 CCD 探测器搭建了光场成像实验系统,实验采集光场图像并进行重聚焦处理,实现了三维物体的光场成像,验证了理论及算法的正确性.

关键词: 光场成像,光场渲染理论,ZEMAX,微透镜阵列,傅里叶切片.
中图分类号: O438

0 引 言

1936 年 Gershun 提出光场的概念,将光场定义成光辐射在空间各个位置各个方向的传播[1]. 1996 年 Levoy 进一步完善了光场理论,将光场进行参数化表示,形成四维光场,并给出了相应的计算公式[2]. 目前获取光场的手段主要包括相机阵列、掩膜和微透镜阵列等方法. 相机阵列法是指通过相机在空间的一定排布来同时抓取一系列视角略有差别的图像,从而重构出光场数据[3]. 掩膜法对相机的孔径做相应的处理,即在普通相机光路中插入一个掩膜实现光场图像的获取[4]. 微透镜阵列法是目前最常用的光场采集方法[5-8],该方法是在普通成像系统的一次像面处插入一个微透镜阵列,每个微透镜单元记录的光线对应相同位置不同视角的场景图像,从而得到一个四维光场数据. 由于微透镜阵列体积小、质量轻、造价低、便于集成化,只需对普通成像系统稍做修改便可实现光场信息的采集,因此本文采用该方法进行设计. 在 Levoy 的光场渲染理论的基础上,本文首次利用光学设计软件 ZEMAX 设计了一个由成像主镜、微透镜阵列和像面 CCD 探测器三部分组成的光场成像系统,并仿真模拟了光场图像的采集,为实际光场相机的设计和制作提供了指导. 实验结果进一步验证了设计方案的可行性.

收稿日期: 2015-04-27
* 国家自然科学基金(91233202)资助课题.

1 光场成像技术原理

1.1 光场的参数化表征

光场是指光线强度在空间中的位置和方向分布,可以用光线与两个平行平面的交点坐标来进行参数化表征. 如图 1 所示,$L(u,v,x,y)$ 表示光场的一个采样,其中 L 为光线强度,(u,v) 和 (x,y) 分别为光线与两个平面的交点坐标. 采用双平面参数来表征光场的实用性在于大部分的成像系统都可以简化为相互平行的两个平面,比如传统成像系统中的镜头光瞳面和探测器像面. 如果用探测器像面的坐标 (x,y) 表示光线的位置分布,那么镜头光瞳面坐标 (u,v) 就代表了光线的传播方向.

1.2 光场的采集

与传统成像系统不同的是光场成像系统需要将四维信息转换成二维平面信息并利用探测器像面来记录. 为实现这一转换,需要对四维光场进行重新采样. 通过在传统成像系统的探测器前面置一组微透镜阵列的方式就可以实现对光场的重采样,如图 2 所示. 进入主镜头的光线经过单个微透镜后投影到探测器平面上形成一个子图像,子图像中的一个点

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

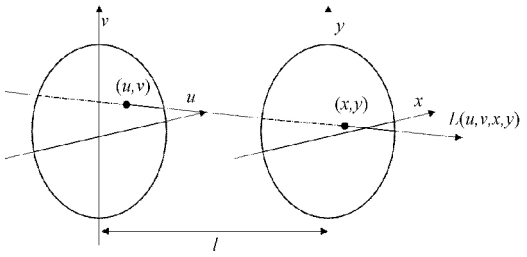


图 1 光场的参数化表征

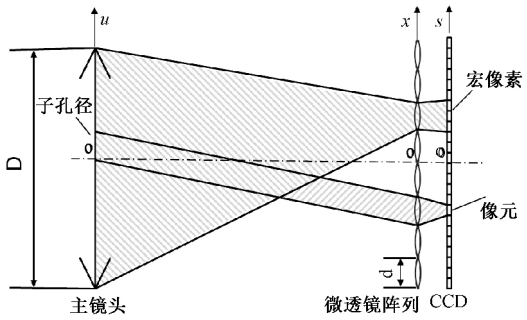


图 2 基于微透镜阵列的光场采样

对应于镜头光瞳发出的一条光线. 若将每个子图像整体看做一个宏像素,则每个宏像素对应于光场的一个位置采样,而宏像素内的每一点对应于光场在该位置的一个方向采样. 系统对光场的位置分辨率由微透镜的孔径大小 d 所决定,而光场的方向分辨率则取决于每个宏像素内所包含的像元数目.

为最大程度利用探测器像元,需使相邻微透镜的子图像在边界处相切,即满足

$$\frac{a}{D} = \frac{f}{d}, \tag{1}$$

其中,f/d 为微透镜的焦距除以其孔径直径,即微透镜的 F 数. a/D 可理解为主镜头的像距除以主镜头光瞳直径,即主镜头的像方 F 数. 也就是说,当微透镜和主镜头的 F 数相等时能最大程度的利用探测器的像元数[9]. 理想情况下,若微透镜阵列的数量是 M1 × M2,每个微透镜所覆盖的像元数为 N1 × N2,则探测器的像元数应为 M1 × N1 × M2 × N2.

1.3 光场的处理

在微透镜阵列型光场成像系统中,探测器记录得到的二维图像是四维光场的二元积分

$$I(x,y) = \iint L(u,v,x,y)\,dudv, \tag{2}$$

数字重聚焦则是将采集到的四维光场重新投影到新的像平面上后再进行积分. 为简单起见,下面以二维为例进行说明. 在图 3 中,$L(u,x)$ 为采集到的光场信息,u 和 x 分别表示主镜头光瞳所在平面和微透镜阵列所在平面,两个平面之间的距离为 l. 选择新的对焦平面 X',与 U 面之间的距离为 l',令 $l' = al$. X'面上的像等于 UX'之间光场的积分,即

$$I(x') = \int L'(u,x')\,du. \tag{3}$$

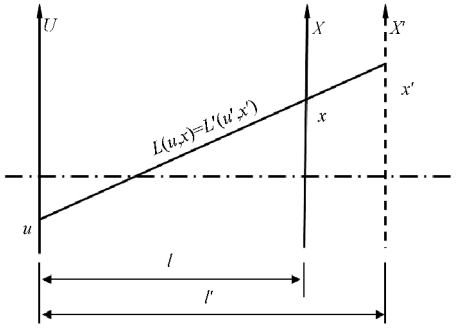


图 3 数字重聚焦的光场重采样

对于同一条光线而言,应有

$$L(u,x) = L'(u,x'), \tag{4}$$

根据光线与各平面的交点坐标间的几何关系可得

$$\frac{x'-u}{l'} = \frac{x-u}{l}, \tag{5}$$

变化后为

$$x = \frac{x'}{a} + u\left(1 - \frac{1}{a}\right), \tag{6}$$

将其带入(3)式,得到

$$I(x') = \int L\left(u, \frac{x'}{a} + U\left(1 - \frac{1}{a}\right)\right)du, \tag{7}$$

即为光场投影到新对焦面上的成像公式. 从上式可以看出,光场重聚焦实质上是对记录光场现在位置上进行平移后在方向上进行积分的过程.

根据傅里叶切片定理,空间域中投影积分的过程等效于傅里叶频域中的切片,由此可推导出傅里叶切片成像定理. 图 4 是光场处理的算法示意图,空间域中四维光场函数 $L_l(u,v,x,y)$ 的投影积分为 $I_{\alpha l}(x,y)$,频率域中 $L_l(u,v,x,y)$ 的四维傅里叶变换为 $G(f_u,f_v,f_x,f_y)$,取 $G(f_u,f_v,f_x,f_y)$ 的一个二维切片 $G_{\alpha l}(f_x,f_y)$,它的二维傅里叶逆变换也是 $I_{\alpha l}(x,y)$,其中频域中切片的角度与投影角度互相垂直. 采用傅里叶切片进行处理使得算法的计算复杂度大大降低[10],尤其是在对同一光场图像多次重聚焦时优势更为明显.

2 光场成像系统的 ZEMAX 设计及模拟

2.1 系统设计

本文设计的光场成像系统由主镜、微透镜阵列

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

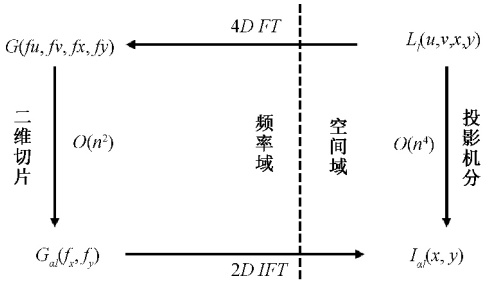


图 4　光场处理算法示意图

和探测器三部分组成,整个系统结构如图 5 所示. 首先设计了系统的主镜,它是一个五片式的普通照相镜头系统,其基本参数设定为 F 数为 4,焦距为 50 mm. 之后,完成微透镜阵列的结构设计,设定单个微透镜的孔径为 150 um,厚度为 300 um,焦距为 600 um,阵列数为 128 × 128. 最后将系统成像面的像元尺寸设定为 18.75 um,成像面大小设为 1 024 × 1 024像元大小. 单个微透镜将会覆盖 8 × 8 的像面像元面积,即该系统的方向分辨率为 8 × 8.

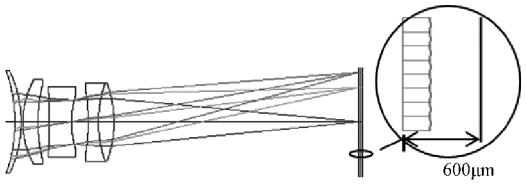


图 5　光场成像系统总体结构

在完成光场成像系统的整体结构过程中,需要找到主镜头的像面位置,并将设计好的微镜阵列结构放置到该位置,像面则置于微透镜后方距离为一个微透镜焦距(300 um) 的位置,而设计的难点在于如何将微透镜阵列与主镜头相组合. 因此本文提出三种将微透镜阵列添加进普通照相成像系统中完成系统总体设计的方法. 分别如下:

1) 混合模式下,在镜头数据编辑器(LDE) 中将指定面的面型修改为用户自定义类型,在表面文件中选择 US-ARRAY. dll,返回 LDE,首先设定好透镜单元的曲率、厚度、材料、孔径大小等信息,再通过设定透镜数量(X 方向上和 Y 方向上) 实现透镜阵列化,以完成添加;

2) 混合模式下,在 LDE 中将指定面的面型修改为非序列器件,并设定非序列的入口大小、入口位置等参数值; 在非序列器件后面相应的填加新的虚拟表面,设定为非序列上的出口,并设定其大小和位置. 打开在非序列器件镜头数据编辑器,修改对象类型为 Lenslet Array,设定材料,单个透镜的孔径大小、面型曲率、透镜数量等基本信息,之后设定阵列的数目完成添加. 该方法所建立的透镜阵列数据量大,内存消耗大,一般用于几个到十几个的阵列数目,对于阵列数目较大的情况,不适宜使用该方法;

3) 混合模式下,使用 Array 方法建立阵列. 该方法与 2 相似,只是在非序列镜头数据编辑器下设定时有些不同,该方法需要设定两个非序列器件. 首先需要建立一个单透镜,并在后边增加新的非序列器件,修改对象类型为 Array,设定阵列起始坐标位置、设定父体为前面的单透镜、设定阵列数量、相邻两透镜间的间隔等. 该方法设计更加灵活多变,可以满足不同要求,但同样具有内存消耗较大的缺点.

综合考虑操作的复杂程度和模拟时的计算效率,本文最终采用了第一种方式. 本系统所采用的结构设计使得微透镜阵列与主镜 F 数相匹配,从而在不造成光场方向信息和空间信息的混叠的前提下得到最大方向分辨率.

2.2　仿真模拟

为了模拟光场图像的采集过程,本文使用 ZEMAX 软件的像模拟功能中的几何位图分析选项,设置像素大小为 18.75 um,像素数目为 1 024 × 1 024,并设置其他基本参数,通过计算便可获取光场图像. 本文将系统聚焦在物距 5 m 处,而将物放在 1 m 的位置,采集到的原始光场图像如图 6 所示. 图 6(a) 给出了像平面的强度分布,图 6(b) 给出了其中的细节部分,图像的传播细节得到了记录.

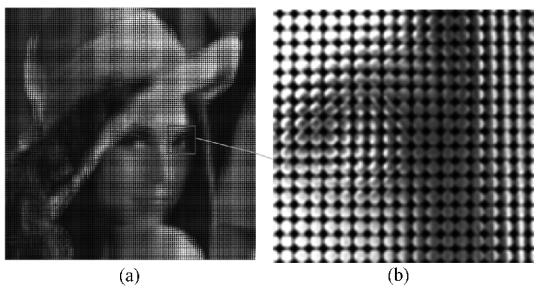


图 6　原始光场图像. (a) 像平面光场分布和(b) 细节部分

采集到的原始光场图像中包含了光线的强度、位置和方向信息等全部信息,为后面的图像重聚焦做好充分的准备. 要对光场图像的重聚焦,首先需要进行光场数据重采样,即从记录的二维光场原始图像中提取出四维的光场矩阵,其中微透镜在阵列中的位置决定了两个维度,单个微透镜覆盖下的像元坐标决定了另外的两个维度. 对光场图像的处理一般分为在空间域处理和在频率域处理. 本文采用后

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

者,即将四维矩阵进行四维傅里叶变换,对傅里叶变换后的频谱进行切片后再反变换到空间域,切片的斜率决定了重聚焦的位置. 处理结果如图 7 所示,图 7(a) 的图像是从采集到的原始光场图像直接提取到的图像,即该图像没有进行重聚焦处理,因此它是模糊的; 图 7(b) 中的图像是经过算法处理后的重聚焦图像. 可以看到图(b) 相对于图(a) 清晰度得到了很大的提高,图像的边界轮廓得到了明显的增强.



(a) (b)

图 7 重聚焦图像

(a) 未重聚焦处理的图像; (b) 重聚焦处理后的图像

3 光场成像实验

根据理论设计,微透镜阵列到 CCD 的距离应为一个微透镜焦距,但由于微透镜的焦距较小(小于几个毫米),很难控制微透镜与 CCD 的距离,因此在二者之间增加一个场镜对微透镜成像进行投影. 实验系统如图 8 所示,其中物与微透镜关于主透镜共轭. 本文利用尼康 AF 50 mm f/1.8D 标头作为主镜头,尼康 AF-S DX 18 ~ 55 mm f/3.5 ~ 5.6G VR II 镜头作为场镜,微透镜阵列则采用德国 AMUS 公司提供的型号为 APO-Q-P150-R1.6 的结构,微透镜孔径为 150 um,焦距为 3.46 mm,阵列数大小为 92 × 92. CCD 采用 Photonfocus 的工业相机 MV1-D2080,搭建的光场成像实验系统如图 8(a) 所示,为了避免环境杂散光的影响,我们将整个系统封闭在黑箱中,只露出主镜头的前端.

利用搭建的光场成像实验系统进行实验采集光场图像,采集到如图 9 所示的光场图像. 该图中,右侧物在前,左侧物在后,并且将系统聚焦在右侧物上. 图中具有微透镜数目为 90 × 90,图像像素大小为 1 080 × 1 080,即单个微透镜覆盖 12 × 12 的 CCD 像素.

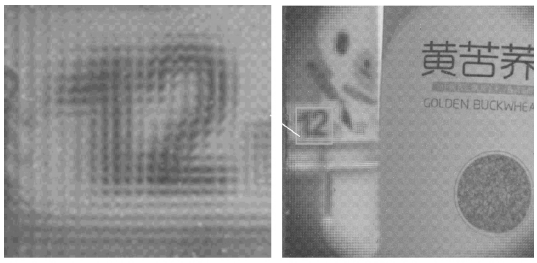
对得到的光场图像进行重聚焦处理可以实现后边物体聚焦,相应的前边物体就会变得模糊. 如图 10 所示,a 图中的图像聚焦在前面物体(右侧物体),是清晰的,而后面物体(左侧物体) 由于处于离焦状态,因此是模糊的; b 图中重聚焦在后面物体(左侧物体),是清晰的,而后面物体(右侧物体) 此时处于离焦状态,故变得模糊了.



(a) (b)

图 8 光场成像实验系统

(a) 系统内部结构; (b) 系统外部结构



(a) (b)

图 9 原始光场图像

(a) 是 CCD 获得图像(b) 中红框部分的细节



(a) (b)

图 10 光场图像处理

(a) 聚焦在前面(右侧) 物体; (b) 聚焦在后面(左侧) 物体

4 结 论

本文在光场渲染理论的基础上,探索性地利用光学设计软件 ZEMAX 将微透镜阵列与传统成像系统相结合成功设计出一个光场成像系统,并模拟采集光场图像. 光场图像的后处理以傅里叶切片理论为理论基础,通过 Matlab 编程,实现了光场图像的重聚焦. 最后搭建了光场成像实验系统,通过实验进一步的验证了光场成像理论. 本文的研究使得光场成像系统设计更加简单、成熟,对于今后光场成像的设计、制作等的研究发展具有一定的参考价值.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] Gershun A. The light field [J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18: 51 – 151.

[2] Levoy M, Hanrahan P. Light field rending [C]. Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, 1996: 31 – 42.

[3] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays [C]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765 – 776.

[4] Veeraraghavan A, Raslar R, Agraval A, et al. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocussing [C]. ACM translation on graphics, 2007, 26(3): 69 – 80.

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

[6] Ng R, Levoy M, Bredif M. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [R]. Computer Science Technical Report, 2005, 2.

[7] Levoy M, Ng R, Adams A. Light field microscopy [C]. Proceedings of ACM Siggraph, 2006, 25(3): 924 – 934.

[8] Georgiev T, Lumsdaine A. High dynamic range image capture with plenoptic 2.0 camera [C]. Signal Recovery and Synthesis, Washington DC: OSA, 2009.

[9] Yuan Y, Zhou Y, Hu H H. Registration error analysis for microlens array and photosensor in light field camera [J]. Acta Photonic Sinica, 2010, 39(1): 123 – 126.

[10] Ng R. Fourier slice photography [C]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 735 – 744.

Light Field Imaging with Micro Lens Array

Zhang Zhanqiang　Zhang Yan

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

For a traditional imaging system, it is necessary to focus accurately to take a picture of a scene. But sometime the system is incompetent when the objects change fast. Based on the light field rending theory, a light field imaging system is designed using a ZEMAX software to overcome the defect. The system consists of three parts: a main lens, a micro lens array, and a CCD. An original light field image is generated and recorded by the system. The system has an ability to record the intensity and direction of light rays. Then the object is refocused with the algorithm which is designed based on the Fourier slice theorem. At last, an experiment system is built up with common camera lens, a micro lens array, and a CCD. Experiment results demonstrate the validity of the theory and algorithm.

Key words: Light field imaging, Light field rending, ZEMAX, Micro lens array, Fourier slice theorem.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net