

基于双模成像的液晶微透镜阵列

雷宇^{1,2} 佟庆¹ 张新宇¹

¹华中科技大学多谱信息处理技术国家级重点实验室, 湖北 武汉 430074

²石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 河北 石家庄 050043

摘要 利用向列相液晶材料的各向异性和双折射特点,采用紫外光刻和湿法刻蚀技术,设计并制作了透明的圆孔图案梯度折射率液晶微透镜阵列。搭建了光学测试系统,测试了该阵列的聚焦性能和焦距,并给出了焦距与加载电压之间的关系。将该阵列与主镜头和图像传感器进行耦合,构成一个双模成像相机原型,通过开启或关闭加载电压实现光场成像模式和普通成像模式的快速切换。在两种工作模式下对目标物采集双模原始图像,结果表明该相机既可在光场工作模式下采集三维光场图像,也可在普通工作模式下采集普通图像。

关键词 成像系统; 液晶微透镜阵列; 双模成像; 梯度折射率透镜; 光场成像

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0511004

Liquid Crystal Microlens Array for Dual Mode Imaging

Lei Yu^{1,2} Tong Qing¹ Zhang Xinyu¹

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Multispectral Information Processing,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang, Hebei 050043, China

Abstract A transparent hole patterned liquid crystal microlens array is designed and fabricated via ultraviolet photolithography and wet etching based on nematic liquid crystal materials for its anisotropy and birefringence. An optical testing system is set up to evaluate its focusing performance and focal length, and the relationship between the focal length and the applied voltage is given. The array is coupled with a main lens and an image sensor to constitute a prototype of dual mode imaging camera, which can switch instantly between plenoptic imaging and normal imaging by turning on or off the applied voltage signals. Raw images are acquired in the two modes. It is obvious that the camera can capture three-dimensional plenoptic images in the plenoptic mode, as well as normal images in the normal mode.

Key words imaging systems; liquid crystal microlens array; dual mode imaging; gradient refractive index lens; plenoptic imaging

OCIS codes 110.6880; 120.4570; 230.3720

1 引 言

光场成像技术是一种全新的三维成像方式,不仅可以记录入射光线的强度,还可以记录入射光线的方向。目前获取光场的方式主要有三种:微透镜阵列、相机阵列和掩模相机^[1]。其中,微透镜阵列实现方法简单,是当前最常用的光场获取方式,这种方式通过在传统相机的主镜头与图像传感器之间的合适位置插入微透镜阵列来采集原始光场图像。通过计算,可以获得不同深度、不同角度的图像。Adelson等^[2]在1992年制作了一台光场成像设备原型。2005年,Ng等^[3]制作了一部便携式光场相机,由于该相机的图像传感器位

收稿日期: 2015-12-23; 收到修改稿日期: 2016-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61176052,61432007)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014CG008)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130142110007)、中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(CAEP THZ201402)

作者简介: 雷宇(1977—),男,博士研究生,讲师,主要从事光场成像方面的研究。E-mail: leiyu4983@126.com

导师简介: 张新宇(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳光学器件方面的研究。E-mail: x_yzhang@hust.edu.cn

于微透镜阵列的焦面上,空间分辨率较低。2009年,Lumsdaine等^[4]通过修改微透镜阵列的位置,提出了一种聚焦式光场相机,极大地提高了光场相机的空间分辨率。为了提高光场相机的焦深,Perwass等^[5]提出了一种新的微透镜阵列结构的光场相机,该阵列拥有三种不同焦距的微透镜。由于方向信息占用了大量的图像传感器空间,所以光场相机的空间分辨率远小于相同配置和普通相机。

液晶微透镜阵列(LCMLA)是近年来出现的一种基于液晶(LC)材料的微透镜阵列。液晶是一种良好的光电材料,具有较大的光电各向异性和双折射性,近年来广泛应用于光开关^[6]、波前探测^[7]、相位延迟^[8]、光纤传感^[9]等领域。将液晶材料置于一个电场或磁场中,其分子指向会随着所处位置的电场或磁场强度发生一定角度的偏转。利用该特性,通过施加不均匀电场,形成梯度折射率透镜,从而对入射光进行会聚、发散以及摆焦等操作。1979年,Sato^[10]制作了一片可变焦距的液晶透镜。随后,Nose等^[11]改进并制作了一种新型的液晶微透镜,该透镜包含一个圆孔电极和一个氧化铟锡(ITO)电极,通过在电极之间施加不均匀电场,可以进行聚焦操作。之后,多种电极结构的液晶透镜相继被研制,例如,对称电极^[12]、双同心环电极^[13]、多环电极^[14]和层叠电极^[15]等。具有摆焦^[16]、大范围调焦^[17]、从负焦距到正焦距调焦^[18]等不同功能的液晶微透镜也相继出现。不同制作工艺、不同材料的液晶微透镜阵列也得到广泛研究^[19-24]。

本文使用向列相液晶材料,采用紫外光刻和湿法刻蚀技术,制作了一种透可见光、具有两个电极的圆孔图案液晶微透镜阵列;搭建了光学测试系统,测试了该阵列的聚焦特性和焦距;利用该阵列制作了一个具有光场成像和普通成像两种工作模式的相机原型,并使用该相机在光场成像模式下记录入射光的三维信息,在普通成像模式下获取清晰的目标物图像。

2 液晶微透镜阵列

2.1 单个液晶透镜成像原理

液晶材料是一种单轴介电各向异性材料,依照分子排列方式可分为向列相、层列相、胆甾相和蓝相液晶。液晶微透镜中通常采用向列相液晶材料,其分子形状为长棒状结构,光轴方向与液晶分子长轴的方向一致。在外界电场作用下,液晶分子的光轴方向具有沿电场方向取向的趋势,并且指向矢偏转的角度随着电场强度的增强而增大。

液晶材料也是一种双折射材料。当入射光的振动方向垂直于光轴方向(寻常光)时,其折射率为 n_o ;当入射光线振动方向平行于光轴方向(非寻常光)时折射率为 n_e ,一般情况下 $n_e > n_o$ 。当入射光方向与光轴的夹角为 θ 时,对寻常光的折射率仍为 n_o ,但对非寻常光的折射率 n_{eff} 为

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

基于上述原理,可以制作包含一个圆孔图案电极和一个平板电极的液晶透镜,在电极之间加入向列相液晶材料,其三维结构如图1(a)所示。当在两个电极之间加载特定的电压信号时,过圆孔电极圆心垂直截面的电势等势线如图1(b)所示。可以看出,圆孔电极中心的电场强度很弱,从中心到圆孔边缘,电场强度逐渐增加,即在电极之间圆孔电极部分生成了一个不均匀的圆形电场。从圆孔边缘到透镜边缘的电场强度可以看作是均匀分布的。电场方向与等势线垂直,电场驱动液晶分子,使其指向随着所处位置的电场方向发生偏转,过圆孔电极圆心的垂直截面的液晶分子在电场中的指向如图1(c)所示。可以看出,居于圆孔中心的液晶分子偏转角度较小,从圆心到圆孔边缘偏转角度逐渐增大。对于非寻常光,折射率从圆心处的 n_e 逐渐减小到边缘的 n_o ,形成梯度折射率分布。入射光通过透镜时,会有一个抛物线状的相位延迟,从而在穿过透镜后产生近似球面的波前,达到聚光效果。不同的加载电压生成的电场强度分布不同,所以可以通过改变加载电压调节液晶微透镜阵列的焦距。

2.2 微透镜阵列结构

所制作的液晶微透镜阵列由圆孔阵列图案电极和平板电极组成,三维结构如图2(a)所示。电极原材料为两块加镀ITO薄膜的玻璃基底。玻璃基底的厚度为 $500 \mu\text{m}$,ITO薄膜的厚度为 200 nm ,方块电阻约为 200Ω ,可见光透射率为 89% 。采用紫外光刻和湿法刻蚀技术,在上电极的ITO膜上刻出一个圆孔阵列,圆孔直径为 $112 \mu\text{m}$,孔心间距为 $140 \mu\text{m}$,图案如图2(b)所示。为了使自然状态下液晶分子并行排列,在上下

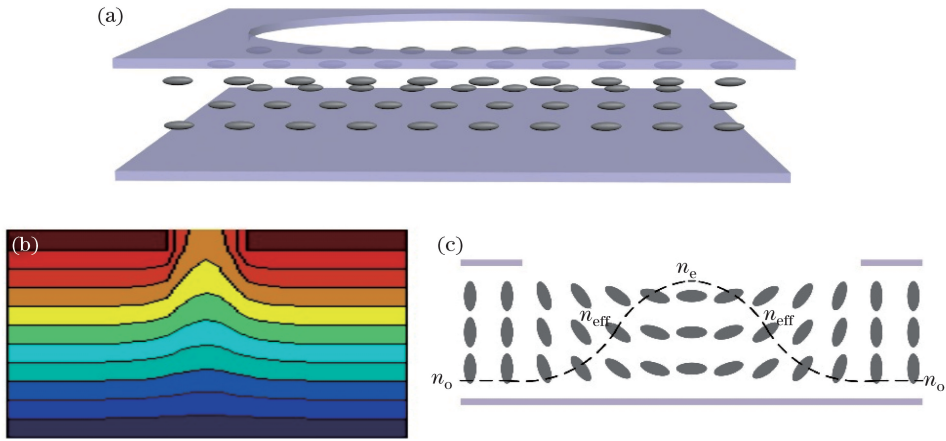


图 1 圆孔图案液晶透镜。(a)三维结构；(b)电场等势线；(c)液晶分子指向

Fig. 1 Liquid crystal lens with a hole pattern. (a) Three-dimensional structure; (b) equipotential curves of electric field; (c) directions of liquid crystal molecules

电极的 ITO 层上使用旋涂法涂覆一层聚酰亚胺 (PI), 其厚度约为 100 nm, 并采用摩擦法在 PI 层上摩擦出平行的 V 型凹槽。上下电极的边缘使用高强度有机化合物粘结剂将两个电极面对面紧粘在一起。粘结剂中掺杂了直径为 20 μm 的玻璃微球, 使得边缘粘合之后两层玻璃之间会形成厚度大约为 20 μm 的空腔, 在空腔中注入液晶材料并密封。使用的液晶材料型号为 E44 (Merck, 德国), 对寻常光折射率为 $n_o = 1.532$, 对非寻常光折射率为 $n_e = 1.778$ 。制作完成的液晶微透镜阵列实物如图 2(c) 所示, 两个电极用导电胶带引出并与电源连接。

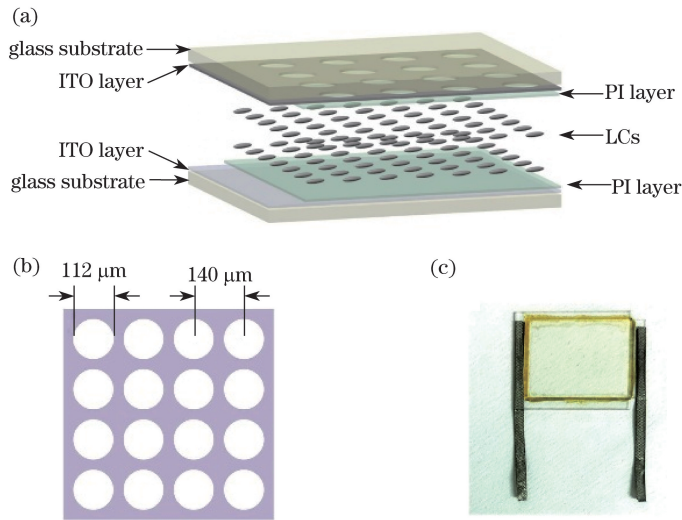


图 2 液晶微透镜阵列。(a)三维结构；(b)圆孔阵列电极图案；(c)实物图

Fig. 2 Liquid crystal microlens array. (a) Three-dimensional structure; (b) pattern of hole array electrode; (c) appearance of an actual component

2.3 聚焦性能测试

为了测试制作的液晶微透镜加电后的聚焦性能, 搭建如图 3 所示的光学测试系统。入射光源采用波长为 550 nm 的绿色平行激光 (Coherent, 美国)。为了降低激光强度, 使用两个偏振片对入射光进行过滤。过滤后的平行入射光穿过加电的液晶微透镜阵列, 被各个液晶微透镜会聚, 形成一个光斑阵列, 但是焦斑非常小。为了放大焦斑, 使用一个 20 倍的放大物镜, 并使用 WinCamD 系列光束质量分析相机 (DataRay, 美国) 获取放大后的光强分布。液晶微透镜阵列的两个电极接入频率为 1 kHz 的方波交流电源, 其电压调节范围为 0~20V_{rms} (V_{rms} 为均方根电压值)。

在液晶微透镜阵列的两个电极之间加载特定电压值信号后, 液晶分子发生偏摆, 进而对入射的非寻常光

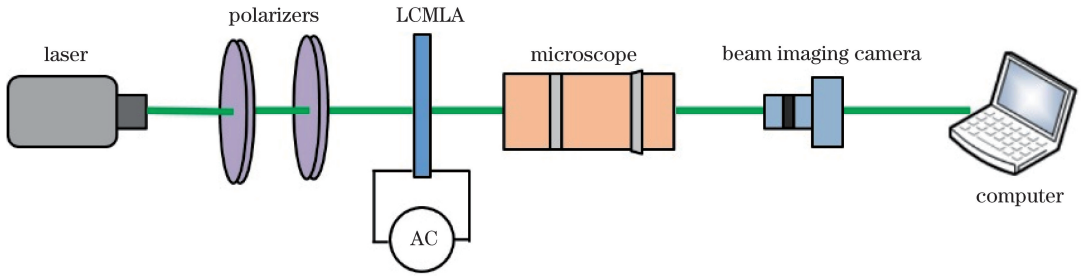


图 3 液晶微透镜阵列聚焦性能测试系统

Fig. 3 Test system for focusing performance of liquid crystal microlens array

产生会聚作用。缓慢调节物镜与微透镜阵列之间的距离,获取不同位置的光强分布,进而测量出液晶微透镜在该电压下的焦距。当加载电压信号为 $8V_{\text{rms}}$,物镜与微透镜阵列的距离为 1.0 mm 时,每个微透镜形成的焦斑最小,观测到的光强分布如图 4(a)所示,其三维分布如图 4(b)所示。可以看出,每个液晶微透镜都对入射的平行光产生了有效的会聚作用。图 4(c)、(d)分别为图 4(a)横向白线和纵向白线位置的能量分布。经测量,焦斑半峰全宽约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,红色焦斑的直径约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。如果加上玻璃基底的厚度,加载电压信号为 $8V_{\text{rms}}$ 时,液晶微透镜阵列的焦距约为 1.5 mm 。由于阵列中每个液晶微透镜都具有相同的材料、结构和加载电压,所以焦距完全一致。图 4 中各微透镜的光强的微小差异由仪器误差造成。

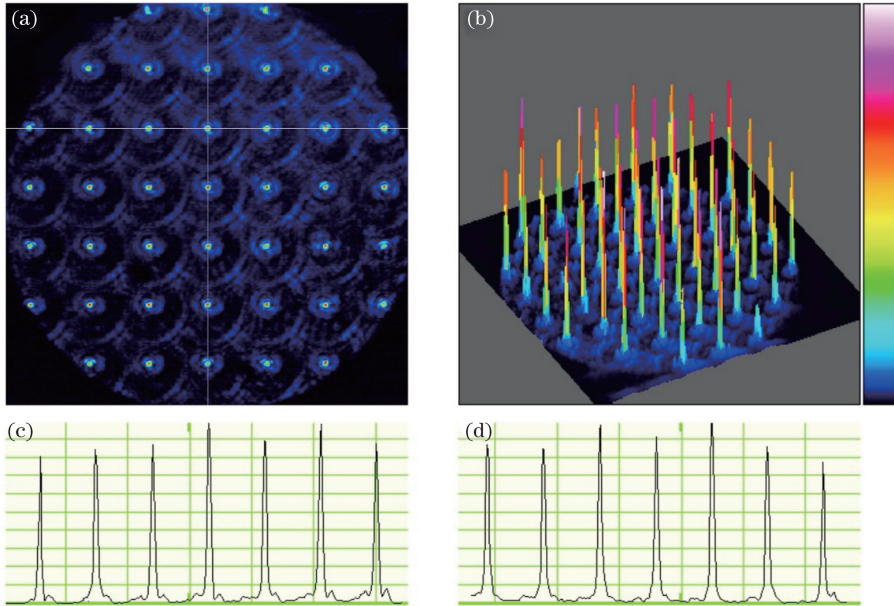


图 4 液晶微透镜阵列对平行入射光的会聚光场。(a)二维分布;(b)三维分布;(c)横向白线位置能量分布;
(d)纵向白线位置能量分布

Fig. 4 Optical fields converged by the liquid crystal microlens array for parallel incident rays. (a) Two-dimensional distribution; (b) three-dimensional distribution; (c) energy distribution along the horizontal white line; (d) energy distribution along the vertical white line

测试得到微透镜焦距和加载电压之间的关系,如图 5 所示。可以看出,当加载电压信号大于 $3V_{\text{rms}}$ 时,液晶微透镜开始对入射光产生明显的会聚,其焦距约为 2.1 mm 。此后,随着加载电压的增大,焦距逐渐变小。当加载电压为 $7V_{\text{rms}}\sim 9V_{\text{rms}}$ 时,焦距最小并稳定在 1.5 mm 左右。随后,如果继续增大加载电压至 $15V_{\text{rms}}$,焦距又逐渐变长至 2.2 mm 左右。加载电压大于 $15V_{\text{rms}}$ 时,中心焦斑明显变大,聚焦性能逐渐消失。可见加载电压在 $5V_{\text{rms}}\sim 11V_{\text{rms}}$ 之间时,中心红色焦斑的直径在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下,此时聚焦效果较好。另外,分别使用红色和蓝色激光进行焦距测量,测得各电压下的观测值与使用绿色激光所得结果基本相等。

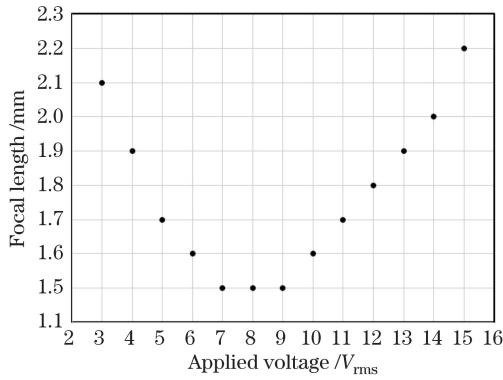


图 5 微透镜阵列焦距和加载电压的关系

Fig. 5 Relationship between focal length and applied voltage of LCMLA

3 双模成像相机

图 6 所示为双模成像相机的结构,包括主镜头、液晶微透镜阵列和图像传感器。液晶微透镜阵列位于主镜头和图像传感器之间。

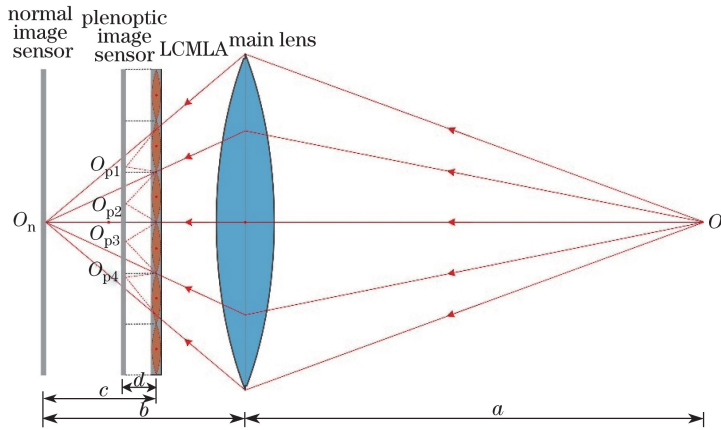


图 6 双模相机结构

Fig. 6 Structure of dual mode camera

3.1 普通成像

不加电时,液晶微透镜阵列的透射率约为 80%,不会影响入射光线的传播方向,其具体位置对成像也几乎没有影响,此时的双模相机相当于一个普通相机。为了获取清晰图像,像点与图像传感器处于相同位置,此时物点 O 、主镜头和像点 O_n 满足薄透镜公式

$$\frac{1}{f_M} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (2)$$

式中 a 为实物距, b 为实像距, f_M 为主透镜的焦距。

3.2 光场成像

加电后,每个微透镜都对入射光线产生会聚。来自目标物点 O 的入射光被主透镜会聚后,由微透镜阵列进行二次成像。此时,原像点 O_n 可以看作是微透镜阵列的虚物点,原本要到达 O_n 的入射光覆盖了微透镜阵列上的多个微透镜,并被各个微透镜成像于 O_{p1}, O_{p2}, \dots 等多个实像点,每个实像点都对到达 O_n 的部分入射光进行成像,形成不同角度的图像。在该工作模式下,为了获取原物点 O 的清晰图像,需要调节图像传感器和微透镜阵列之间的距离。此时虚物点 O_n , 微透镜和 O_{p1}, O_{p2}, \dots 满足薄透镜公式

$$\frac{1}{f_L} = -\frac{1}{c} + \frac{1}{d}, \quad (3)$$

式中 c 为虚像距, d 为实像距, f_L 为液晶微透镜的焦距。相对于每个微透镜生成的图像(单元图像)的边界, O_{p1}, O_{p2}, \dots 有不同的偏移量。由几何关系可知,对于同一个物点,该点通过相邻的微透镜形成的像点相对于

单元图像边界的偏移量差值是相同的。此外, O_{p1}, O_{p2}, \dots 的个数定义为光场成像模式下的方向分辨率, 即同一个像点在不同角度的采样个数。理论上横、纵向的方向分辨率值均为 c/d 。

获取光场图像后, 可以通过计算对场景进行重建。小块图像合成法^[25-26]是一种简单的绘制算法, 其核心是从每个单元图像的不同位置截取同样尺寸的小块图像, 并将其排列在一起还原场景。小块图像尺寸的选择, 决定了重建图像的深度, 因为只有来自同一深度的物点在相邻微透镜的偏移量具有相同的差值, 这样所对应的小块图像才能够完美匹配。而来自深度更远或更近的物点对应的小块图像, 因偏移量不同, 排列后会形成伪影, 重建时可以通过融合算法减弱伪影, 形成散焦或未聚焦效果。重建图像分辨率的理论值为图像传感器分辨率的 d/c 倍。至于多视角还原图像, 可以通过改变每个小块图像在单元图像中的位置来实现, 即对同一个物点, 改变对其成像的微透镜, 从而改变图像还原后的视角。

4 实验结果

按照图 6 所示结构在光学平台上搭建一个双模成像相机原型。主镜头的焦距为 25 mm。液晶微透镜阵列的驱动方波电压信号为 $0 \sim 20V_{\text{rms}}$, 频率为 1 kHz。液晶微透镜阵列的参数如前所述, 将其贴在图像传感器保护玻璃之前, 并和图像传感器牢固结合在一起, 与主镜头的距离可通过手动位移平台动态调节。图像传感器的大小为 1/2 inch (1 inch = 2.54 cm), 有效像素为 4384 pixel \times 3288 pixel, 每个像素的尺寸为 1.4 μm 。

首先, 透镜阵列不加电, 在普通成像模式下使用相机原型对目标物进行拍摄。获取的原始图像大小为 4384 pixel \times 3288 pixel, 如图 7 所示。此时, 目标物在主透镜的前方, 距离约为 50 cm, 微透镜阵列和图像传感器整体在主透镜后方约 2.4 cm 处。



图 7 普通成像模式下获取的原始图像

Fig. 7 Raw image captured under the normal imaging mode

随后, 加载 $8V_{\text{rms}}$ 的电压信号, 双模成像相机进入光场成像模式。目标物和主透镜位置不变, 为了采集到清晰的图像, 微透镜阵列和图像传感器整体向前移动约 5 mm。光场原始图像大小与图像传感器一致, 如图 8 所示。为了更清晰地展示光场原始图像的细节, 截取目标小车车牌处的图像, 如图 9 所示。可以看出, 每个液晶微透镜都对入射光进行会聚成像, 且成像质量较高。每个微透镜所成的单元图像为圆形, 其直径约为 100 pixel, 有效工作的液晶微透镜单元为 43×32 个。此时, 处于小车深度位置的像点的方向分辨率为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。对每个微透镜单元截取 $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$ 的小块图像, 还原场景, 获得的目标图像如图 10 所示, 其分辨率为 $1290 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ 。

5 结 论

使用溅镀 ITO 薄膜的玻璃基底和向列相液晶材料制作了液晶微透镜阵列, 并将其用于双模成像相机, 实现了普通成像模式和光场成像模式的快速切换。该相机操作方便, 成像效果好。在进一步研究中可通过光场图像计算场景中各个像点的深度, 并将光场图像的像点与同一场景的普通图像进行匹配, 有效地利用光场成像包含深度信息和普通成像分辨率高的优点, 重建高分辨率的三维场景图像。另外, 使

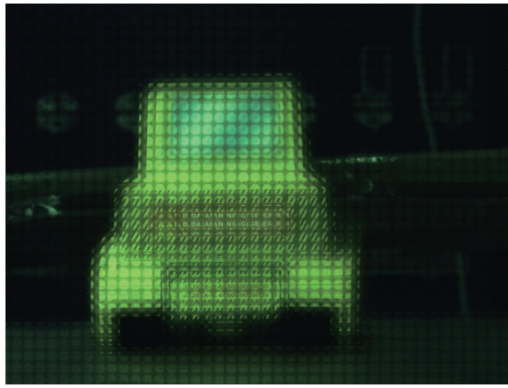


图 8 光场成像模式下获取的原始图像

Fig. 8 Raw image captured under the plenoptic imaging mode

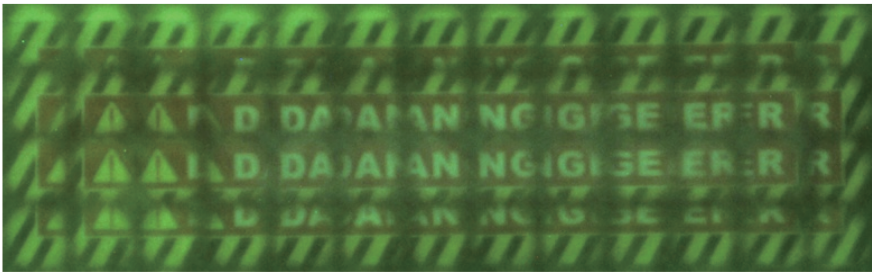


图 9 光场成像模式下获取的原始图像局部细节

Fig. 9 Local details of raw image captured under the plenoptic imaging mode



图 10 从光场图像还原的绘制图像

Fig. 10 Rendered image recovered from the plenoptic image

用液晶微透镜阵列在光场成像模式下的图像清晰度还有提升空间,液晶微透镜阵列的聚焦性能也有待于进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Nie Yunfeng, Xiangli Bin, Zhou Zhiliang. Advances in light field photography technique [J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(5): 563-572.
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.
- 2 Adelson E H, Wang J Y. Single lens stereo with a plenoptic camera [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- 3 Ng R, Levoy M, Brédif M, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [J]. Stanford Tech Report CSTR, 2005, 2(11): 1-11.
- 4 Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C]. IEEE International Conference on Computational Photography, 2009.

- 5 Perwass C, Wietzke L. Single lens 3D-camera with extended depth-of-field[C]. SPIE, 2012, 8291: 829108.
- 6 Li Xueying, Cao Fengmei, Sun Yunfeng. Preparation of miniature PDLC film optical switch[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022304.
李雪莹, 曹峰梅, 孙云峰. 小型聚合物分散液晶薄膜光开关的研制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022304.
- 7 Cai Dongmei, Ti Peipei, Jia Peng, *et al.*. Research of a dynamic Hartmann sensor using liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s112001.
蔡冬梅, 童培培, 贾 鹏, 等. 基于液晶空间光调制器的动态哈特曼传感器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s112001.
- 8 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.*. Study of birefringence dispersion based on liquid crystal variable retarder[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108001.
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 液晶可变延迟器的双折射色散研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108001.
- 9 Han Yuqi, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. Side-polished fiber sensing for measurement of nematic liquid crystal orientation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206006.
韩玉琪, 陈 哲, 余健辉, 等. 用于向列相液晶取向测量的侧边抛磨光纤传感特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206006.
- 10 Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.
- 11 Nose T, Sato S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field[J]. Liquid Crystals, 1989, 5(5): 1425-1433.
- 12 Nose T, Masuda S, Sato S. Optical properties of a liquid crystal microlens with a symmetric electrode structure[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(12B): L2110.
- 13 Kulishov M. Adjustable electro-optic microlens with two concentric ring electrodes[J]. Optics Letters, 1998, 23(24): 1936-1938.
- 14 Kao Y Y, Chao P C P, Hsueh C W. A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18506-18518.
- 15 Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with stacked structure of liquid-crystal layers[J]. Optics Communications, 2005, 250(4): 266-273.
- 16 Kang S W, Zhang X Y, Xie C S, *et al.*. Liquid-crystal microlens with focus swing and low driving voltage[J]. Applied Optics, 2013, 52(3): 381-387.
- 17 Ye M, Wang B, Sato S. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range[J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6407-6412.
- 18 Fan Y H, Ren H, Liang X, *et al.*. Liquid crystal microlens arrays with switchable positive and negative focal lengths[J]. Journal of Display Technology, 2005, 1(1): 151-156.
- 19 Ren H, Fan Y H, Wu S T. Liquid-crystal microlens arrays using patterned polymer networks[J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1608-1610.
- 20 Zhao X J, Liu C L, Zhang D Y, *et al.*. Tunable liquid crystal microlens array using hole patterned electrode structure with ultrathin glass slab[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 3024-3030.
- 21 Kang S W, Tong Q, Sang H S, *et al.*. Ommatidia structure based on double layers of liquid crystal microlens array[J]. Applied Optics, 2013, 52(33): 7912-7918.
- 22 Kim J H, Kumar S. Fabrication of electrically controllable microlens array using liquid crystals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 628-632.
- 23 Wang X, Wilkinson T D, Mann M, *et al.*. Characterization of a liquid crystal microlens array using multiwalled carbon nanotube electrodes[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3311-3315.
- 24 Ren H, Xu S, Wu S T. Polymer-stabilized liquid crystal microlens array with large dynamic range and fast response time [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3144-3147.
- 25 Georgiev T, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 021106.
- 26 Lei Y, Tong Q, Zhang X Y, *et al.*. An electrically tunable plenoptic camera using a liquid crystal microlens array[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(5): 053101.