

光学学报

利用液晶透镜实现的局部变倍成像系统

胡轶瑶¹, 刘志强^{1*}, 孙涛², 陶溢²

¹电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731;

²陆军研究院装甲兵研究所, 北京 100072

摘要 提出了一种液晶透镜与玻璃镜头组合的新型局部变倍成像系统,以解决传统变倍成像系统中机械结构体积较大、非线性运动设计难度较大、变倍数离散等问题。首先对所提出系统进行了说明,给出了系统各参数间的关系。对实验装置进行了介绍,重点介绍了液晶透镜结构及双偏振结构。对所提系统进行了实验验证,通过改变液晶透镜组所加电压调节孔径区域内成像变倍比。这说明在系统组件无机械移动的条件下可通过调节液晶透镜组所加电压实现局部变倍成像,且变倍比连续可调。此系统不仅简化了传统变倍成像系统的机械结构,使变倍系统轻量化、小型化成为可能,还为图像细节信息的获取与分辨提供了新方法。

关键词 成像系统; 液晶透镜; 变倍成像; 焦距可变; 多分辨率

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2311001

Local Zoom Imaging System Using Liquid Crystal Lens

Hu Yiyao¹, Liu Zhiqiang^{1*}, Sun Tao², Tao Yi²

¹*School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;*

²*Institute of Armored Forces, Army Academy of Sciences, Beijing 100072, China*

Abstract In this paper, a new local zoom imaging system is proposed, which contains a liquid crystal lens and a glass lens, so as to solve the problems of large mechanical structure, difficult design of nonlinear motion, and discrete zoom number in the traditional zoom imaging system. Specifically, the proposed system is firstly described, and then the relationship among the parameters of the system is derived. After that, the experimental setup is introduced, and the liquid crystal lens and the dual polarization structures are emphasized. The proposed system is then experimentally validated by changing the voltage applied to the liquid crystal lens group to adjust the imaging zoom ratio in the aperture. Furthermore, the experiment demonstrates that local zoom imaging can be achieved by adjusting the voltage applied to the liquid crystal lens group when system components do not move mechanically, and the zoom ratio is continuously adjustable. This system not only simplifies the mechanical structure of the traditional zoom imaging system, but also makes it possible to lighten and miniaturize the zoom system. In addition, it provides a new method for acquiring and resolving image detail information.

Key words imaging systems; liquid crystal lens; zoom imaging; variable focal length; multi-resolution

1 引言

光学成像系统在如今已经不仅是人们日常生活中获取影像信息的重要途径,而且还在医疗^[1]、民生^[2]等方面发挥着巨大作用。光学成像系统如今的发展趋势为轻量化、大变焦和低功耗等。传统变焦成像系统由玻璃透镜、机械控制模块和图像传感器等部分组

成^[3-4],其工作原理是通过机械调节各透镜组间距离来实现变焦。此类系统的缺陷不仅在于其结构复杂、体积庞大、操作不便,并且其变倍数离散,无法连续可调,而且其像面各处变倍率相同,不利于获取细节信息。这些缺陷与如今的发展趋势相悖。

传统局部成像系统是利用玻璃透镜进行局部变倍成像。2016年,Qin等^[5]提出了一种多分辨率凹状腹腔

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: *646372219@qq.com

镜,其由一个广角探头和一个高倍放大探头,及其共享的物镜组、多杆透镜继电器组和扫描透镜组组成,它可以同时为外科医生提供高分辨率视图和广角全景视图,这说明局部变倍成像系统在生物医学方面有着一定的应用前景。此系统的缺点在于高倍放大探头体积较大,系统机械结构复杂,且需要利用机械移动透镜组来实现局部变倍,在实际应用方向有一定的局限性。2017年,Niu等^[6]设计了一种低成本的动态实时小凹成像仪,此系统由成像部分、扫描微透镜、中继镜组和像面组成,可实现局部变倍成像。此类成像系统的优点在于成本较低,缺陷在于其变倍比固定且系统体积较大。若要改变系统变倍比,则需要更换系统中的扫描微透镜,这为实际使用带来了麻烦。

可调焦透镜与玻璃透镜的组合使用为局部变倍成像系统轻量化及图像细节信息的获取提供了新思路。可调焦透镜主要分为液晶透镜、液体透镜等。2004年,法国 Varioptic 公司首先提出液体变焦透镜^[7],用于成像^[8]等领域。液晶透镜的概念由日本学者 Sato^[9]在 1979 年首次提出,液晶透镜是一种电控调焦液晶器件。Ye 等^[10-11]在扩大液晶透镜口径、提高液晶透镜性能等方面进行了许多研究;2019 年 Sova 等^[12]通过优化液晶透镜的电极控制方式来增大透镜光焦距的动态变化范围。液晶透镜自被发明起,一直都受到广泛的关注,至今仍是一个活跃的研究领域^[13]。

液晶透镜具有电控调焦的特点,将其与玻璃透镜进行组合可实现变倍成像。2015 年,陈明璿等^[14]利用三片复合式液晶透镜与玻璃镜头实现了变倍比为 6.5:1 的光学变倍系统。该系统的优势在于变倍比较大,缺陷在于此系统中的液晶透镜数量较多;而复合式液晶透镜结构较为复杂,成像质量较差,且只能应用于实验室条件。2017 年,Yang 等^[15]设计了带球面微透镜电极的液晶透镜,实现了无机械结构的变倍成像系统,通过改变两液晶透镜电压调节变倍比,仿真得到系统的变倍比约为 3:1。所设计的液晶透镜的优点为变倍比较大,但缺陷在于带球面微透镜电极的液晶透镜制

作复杂、成本较高且系统对焦物距很短,不适用于外场环境。

由生物学^[16]可知,鹰的眼睛主要有两个视凹:浅视凹主要提供大视野;深视凹的作用为放大图像,提供非常高的分辨率。本文在上述工作的基础上,利用液晶透镜可电控调焦的特点,设计了一种液晶透镜与玻璃透镜组合的局部变倍成像系统,以实现类鹰眼成像效果。所提系统主要由两个小尺寸液晶透镜、玻璃镜头及中继系统组成,可以在无机械移动的条件下改变液晶透镜组所加电压,实现大、小视场同时清晰成像,且小视场变倍比连续可调。此系统通过引入液晶透镜克服了传统局部变倍成像系统中变倍组镜头体积较大、非线性运动设计难度较大、机械结构复杂、变倍数离散等缺点。在利用液晶透镜实现局部变倍系统方面,此系统通过提出新的结构实现了同一物面上的局部变倍成像,在一定变倍比的基础上提高了成像质量,并且可以应用于外场环境。

2 光学系统结构

所提系统是由物面、玻璃镜头、液晶负透镜、液晶正透镜、中继系统和像面组成,其结构与光路如图 1 所示。物面某些区域发出的光线首先经过主透镜,主透镜对其有一定的会聚作用;随后光线经过液晶负透镜的调制后会聚在液晶负透镜和液晶正透镜之间,且此位置在液晶正透镜的一倍焦距之内;光线再经过液晶正透镜的调制会聚于中间像面处,被液晶透镜调制的区域定义为系统小视场区域;物面上其他区域发出的光线仅被单光学镜组调制,同样将其会聚于中间像面处,定义此类区域为大视场区域。大、小视场可以同时清晰对焦于中间像面处,再由中继系统将中间像面成像在最终像面上。中继系统的作用仅为转置像面,对系统变倍没有影响。相对于单光学镜组成像,组合系统同一像面的大视场区域可清晰对焦,且小视场区域可通过改变液晶负、正透镜所加电压使其变倍比连续可调。

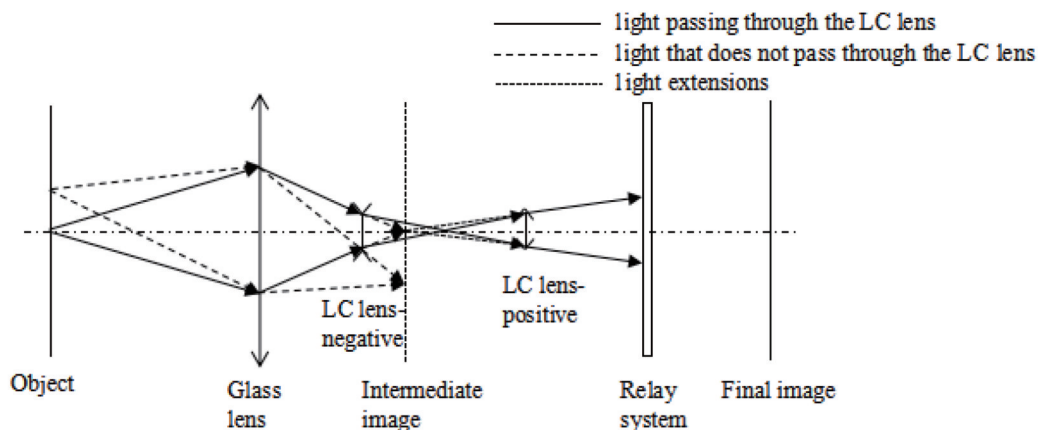


图 1 局部变倍成像系统光路示意图

Fig. 1 Optical path of local zoom imaging system

对所提系统各参数间的关系进行推导,各参数及其含义如图 2 所示。设物面与光学镜组间的距离为 $-l$, 光学镜组与液晶负透镜间的距离为 d_1 , 两液晶透

镜间的距离为 d_2 。光学镜组的焦距为 f_1' , 液晶负透镜的焦距为 f_2' , 液晶正透镜的焦距为 f_3' 。

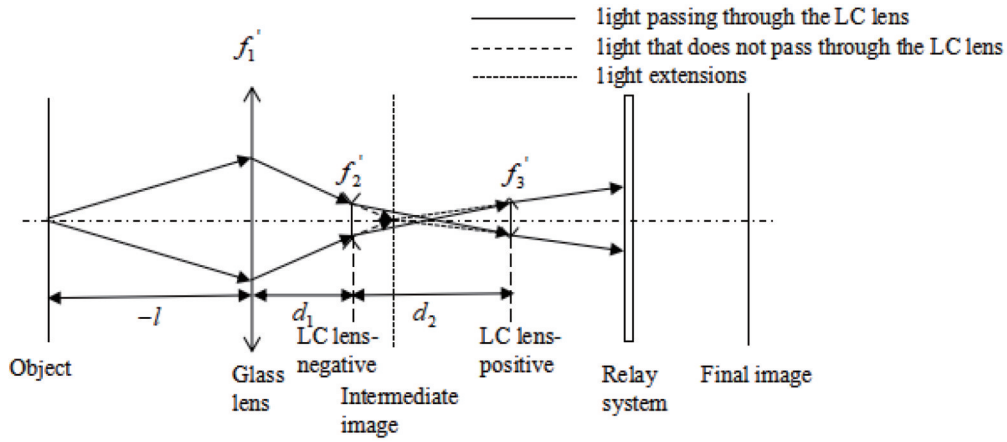


图 2 系统各参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of each parameter of system

根据光线追迹原理及高斯公式,对系统间参数进行推导,得出液晶负透镜焦距 f_2' 和液晶正透镜焦距 f_3' 的关系为

$$f_3' = \frac{(d_1 f_1' + d_2 f_1' + d_1 l + d_2 l - f_1' l)}{(d_1 f_1' + d_1 l - f_1' l)^2} \cdot (d_1 d_2 f_1' - d_1 f_2' f_1' - d_2 f_2' f_1' + d_1 d_2 l - d_2 f_1' l - d_1 f_2' l - d_2 f_2' l + f_2' f_1' l) \quad (1)$$

定义系统变倍比 X 为小视场区域光学镜组与液晶透镜同时工作时系统的垂轴放大率 β_2 与单光学镜组工作时系统的垂轴放大率 β_1 的比值, X 可表示为

$$X = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{l_2'}{f_1' l} \cdot \frac{\frac{f_1' l}{f_1' + l} - d_1 - d_2}{\frac{f_1' l}{f_1' + l} - d_1 - \frac{f_2' (d_1 f_1' + d_1 l - f_1' l)}{-d_1 f_1' + f_2' f_1' - d_1 l + f_1' l + f_2' l} - d_2} = \frac{f_2' [f_1' (d_1 + d_2) + l (d_1 + d_2 - f_1')] [f_1' l - d_1 (f_1' + l)]}{[-f_1' l + d_1 (f_1' + l)] [-f_1' l + (d_1 - f_2') (f_1' + l)]} \cdot \frac{[f_1' l - d_1 (f_1' + l)] [f_2' l - d_1 (f_1' + l) + f_1' (f_2' + l)]}{[d_2 f_1' f_2' - f_1' f_2' l + d_2 l (f_1' + f_2') - d_1 (d_2 - f_2') (f_1' + s_1)]} \quad (2)$$

理论上,利用此系统对无限远物体进行成像,设玻璃镜头焦距 f_1' 为 100 mm, 前组液晶透镜与玻璃镜头的距离 d_1 为 73 mm, 两液晶透镜组间的距离 d_2 为 70 mm。系统各参数间关系如图 3 所示。当液晶负透

镜焦距 f_2' 的变化范围为 $-250 \text{ mm} \leq f_2' \leq -88 \text{ mm}$, 液晶正透镜焦距 f_3' 的变化范围为 $109 \text{ mm} \leq f_3' \leq 508 \text{ mm}$ 时,理论变倍比范围为 $1.2 < X < 2.0$ 。

通过上述推导可以看出,所提系统可以在无机机械结构的条件下通过调节液晶正、负透镜所加电压实现小视场区域内变倍比的连续可调。

3 实验

3.1 实验装置

此成像系统的示意图如图 4 所示,由背光板、物面、两偏振片、玻璃镜头、负-正液晶透镜组、中继系统和传感器组成。玻璃镜头选择焦距为 100 mm 的传统玻璃镜头 (Samyang VDSLR ED UMC MACRO)。中继系统使用焦距为 50 mm 的普通工业镜头。

实验系统所用的液晶透镜阵列的基本结构为向列型圆孔电极结构,具体结构如图 5 所示。基板 1 内侧涂有一层氧化铟锡 (ITO) 电极,用 0.03 mm 的间隔子将其与基板 2 隔开;基板 2 不与液晶接触的一侧涂有 ITO

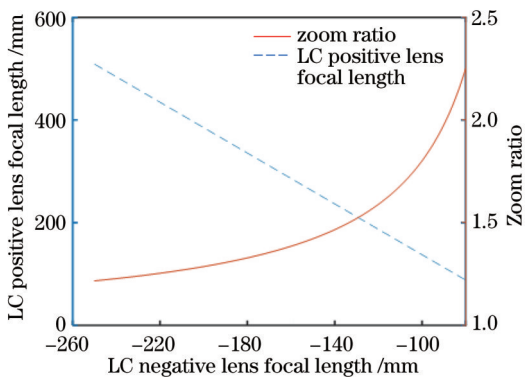


图 3 变倍比及液晶正透镜焦距随液晶负透镜焦距的变化曲线
Fig. 3 Zoom ratio and LC positive lens focal length varying with LC negative lens focal length

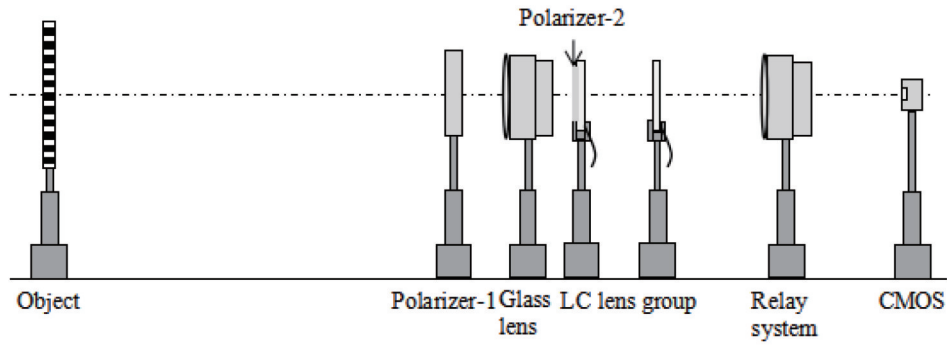


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Diagram of experimental setup

电极,此电极使用刻蚀的方法做出如图 5 所示的圆孔 ITO 图形(阴影填充部分为有电极区域,空白部分为无电极区域),圆孔直径为 1 mm;基板 3 内侧涂有一层 ITO 电极,用 0.05 mm 的间隔子将其与基板 2 隔开,并在其中灌入液晶。此系统所用液晶透镜三片玻璃基板的厚度均为 0.2 mm,其灌入的液晶为 HTW137700-100(n_e 是液晶非寻常光折射率, $n_e=1.774$; n_o 是液晶寻常光折射率, $n_o=1.513$)。此类结构的液晶透镜阵列

以两个电压进行驱动,ITO 电极层 1 与 ITO 电极层 3 形成 V_2 ,ITO 电极层 2 与 ITO 电极层 3 形成 V_1 。 V_1 与 V_2 在一般情况下频率相同,且为 1 kHz。假定入射光的线偏振方向与液晶摩擦方向相同。当 $V_1=V_2=0$ 时,液晶器件等效于平板玻璃,不改变入射光波的传播方向。当 $V_1>V_2$ 时,此时液晶透镜为正透镜,通过它的光束将被会聚;当 $V_1<V_2$ 时,此时液晶透镜为负透镜,通过它的光束将被发散。

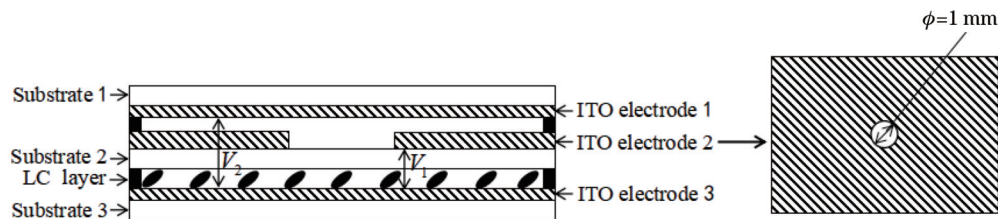


图 5 液晶透镜示意图

Fig. 5 Liquid crystal lens diagram

双偏振片的工作原理如图 6 所示。当物面发出的自然光经过偏振方向与液晶透镜摩擦方向相同的偏振片 1 后被调制为线偏振光,偏振方向与液晶透镜摩擦方向相同。基于液晶透镜的成像特性,光线斜入射时会在一定程度上增大液晶透镜像差,且像差随入射角的增大而增加。为了进一步提高成像质量,实验在靠近玻璃镜头的液晶透镜阵列前加入另一个圆孔偏振

片,其偏振方向与液晶透镜的摩擦方向垂直,如图 6 所示。对于经玻璃镜头调制后在液晶透镜阵列上入射角度过大的光线,在引入偏振片 2 后,其偏振方向与偏振片 2 方向垂直,所以无法透过偏振片 2 入射液晶透镜。此方法在一定程度上减小了斜入射光对于系统孔径区域成像所引入的像差。

此系统在液晶透镜组不工作时,转动偏振片 1 的偏

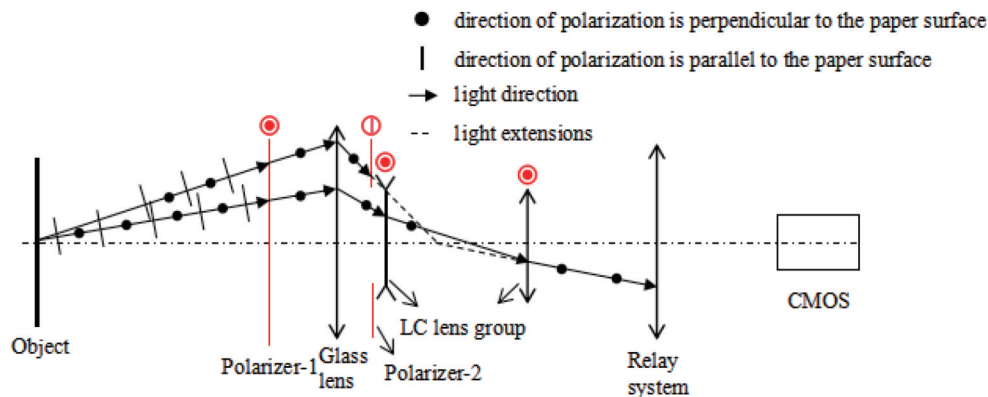


图 6 双偏振片的工作原理

Fig. 6 Working principle of double polarizers

振方向,使其与偏振片 2 相同,此时液晶透镜组相当于平板玻璃,物面只通过玻璃镜头成像在像面上,再由中继系统将像面转置在传感器接收面上。当液晶透镜组工作时,转动偏振片 1 使其偏振方向与偏振片 2 垂直,即与液晶透镜摩擦方向相同。此时物面上小视场通过玻璃镜头及液晶透镜组成像在像面上,再由中继系统转置。而物面上其他区域发出的光线由于在经过玻璃镜头后,其偏振方向与偏振片 2 垂直,因此被阻挡。通过配合调节液晶透镜组所加电压,可以得到不同的小视场变倍比。最后通过算法处理将大视场区域与小视场区域的成像结果进行拼接,得到局部变倍图像。

3.2 实验结果

实验中将前置镜头 F 数设置为 5.6。大视场的视场角为前置镜头视场角,为 24.8° 。对于小视场区域,由于液晶透镜孔径直径较小,其视场角接近于 0° 。实验利用 2 lp/mm 的分辨率测试板来对孔径区域内的变倍情况进行测试。首先在液晶透镜不工作时,将分辨率条纹只通过像方远心镜头成像,再通过中继系统转置,其成像情况如图 7(a)所示。对液晶透镜组所加电压进行调节,使小视场区域变倍成像。对大、小视场进行拼接,不同变倍比下的成像情况如图 7(b)~(d)所示。利用分辨率条纹所占像素数对不同电压条件下的成像变倍比进行了测试,不同变倍比所对应的液晶透镜电压及焦距如表 1 所示。

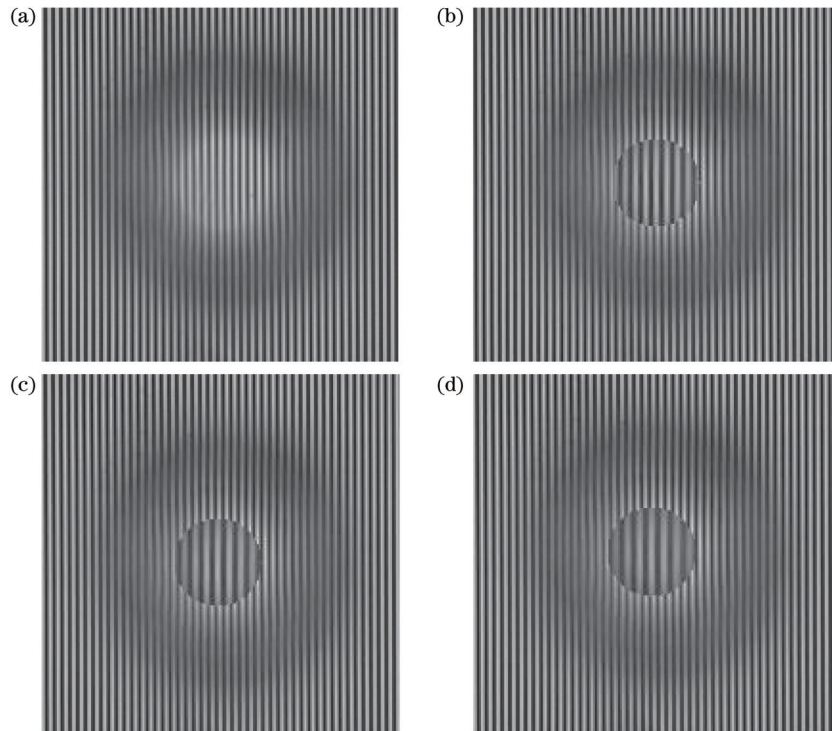


图 7 不同变倍比下的成像情况。(a) $X=1$; (b) $X=1.25$; (c) $X=1.5$; (d) $X=1.75$

Fig. 7 Imaging results for different zoom ratios. (a) $X=1$; (b) $X=1.25$; (c) $X=1.5$; (d) $X=1.75$

表 1 不同变倍比 X 所对应的液晶透镜电压及焦距
Table 1 Voltage and focal length of liquid crystal lens corresponding to different zoom ratios

LC negtive lens			LC positive lens			X
V_1/V	V_2/V	f'/mm	V_1/V	V_2/V	f'/mm	
0	0	—	0	0	—	1.00
5	40	-104.6	14	5	171.1	1.25
5	50	-67.4	17	3	102.6	1.50
5	60	-55.7	20	3	73.4	1.75

通过上述实验可以看出,所提系统可以在对组件无机械移动的条件下通过调节液晶透镜组所加电压实现小视场内的变倍成像,且变倍比连续可调。

实验还利用斜边调制传递函数(MTF)测试靶对

于大视场及变倍比为 1.6 时的小视场 MTF 曲线进行了测试,其结果如图 8 所示。可以看出,变倍后小视场区域的 MTF 较大视场区域有一定提升,并且相对的 MTF50(调制传递函数下降到 50% 所对应的空间频率)值也有所提升,即变倍后小视场分辨率相对于大视场有所提升。但液晶透镜工作时在系统中引入像差,这对成像效果有一定影响,降低成像质量,因此 MTF 提升效果较为有限。

利用所提系统对约 150 m 外的路牌进行成像,在液晶透镜组不工作时,其成像情况如图 9(a)所示。对液晶透镜施加合适的电压,其大、小视场拼接后的成像情况如图 9(b)所示。通过变倍前后的成像情况可以看出,小视场区域具有明显的放大成像效果。这说明此系统对于外场环境仍然适用。

所提系统不仅使同一像面拥有了不同的变倍比,

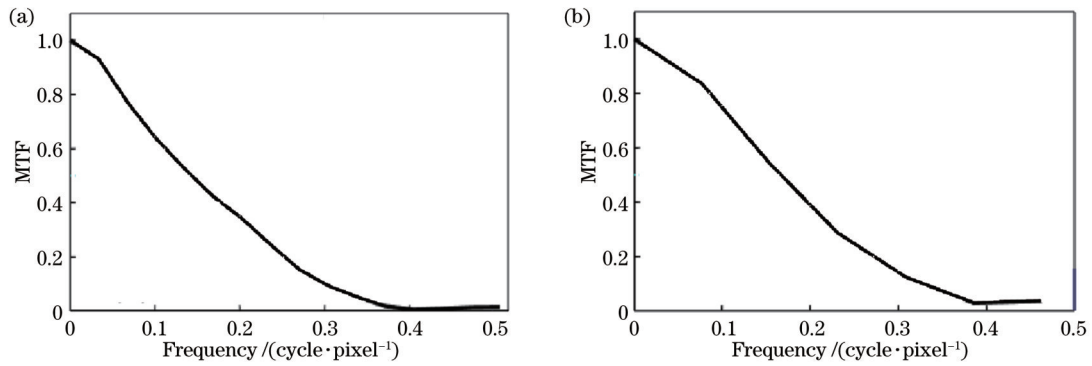


图 8 MTF 曲线。(a)大视场MTF曲线;(b)变倍后小视场MTF曲线

Fig. 8 MTF curves. (a) MTF curve for large field of view; (b) MTF curve for small field of view after zooming

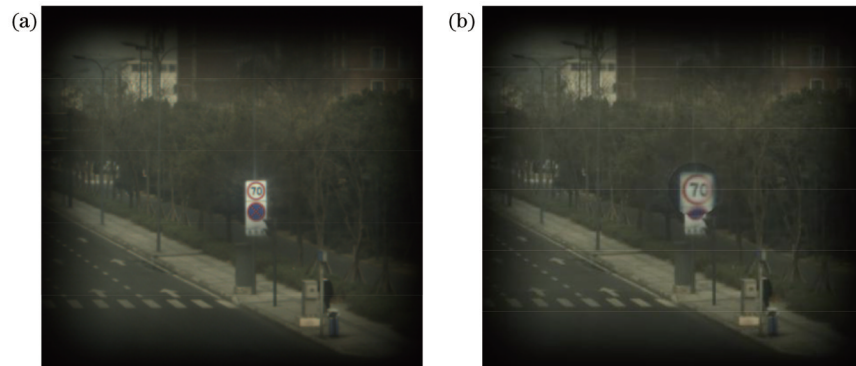


图 9 远处物体成像情况。(a)液晶透镜不工作时的成像结果;(b)液晶透镜工作时的成像结果

Fig. 9 Imaging results of distant objects. (a) Imaging result when liquid crystal lens is not working; (b) imaging result when liquid crystal lens is working

并且小视场区域的放大成像使物面细节信息的获取及分辨能力得到提升。但液晶透镜边缘部分成像像差较大及大、小视场拼接时边缘不匹配导致像面某些区域的成像质量下降及信息丢失。

4 结 论

本文提出了一种新型无机械移动的利用液晶透镜组实现的局部变倍成像系统。首先对于所提系统进行了说明,并给出了系统关键参数间的关系。从理论方面说明了所提系统的可行性。对实验装置进行了介绍,重点说明了系统核心器件——液晶透镜的结构及工作原理,其最大优势在于可电控调焦。最后利用所提系统对分辨率测试板、MTF斜边测试靶及150 m远路牌进行了成像,并给出了成像结果及分析。通过实验可以说明,在对组件无机械移动的条件下可通过调节液晶透镜组所加电压实现小视场内的变倍成像,且变倍比连续可调。利用液晶透镜实现的无机械移动的局部变倍成像不仅简化了传统变倍成像系统的机械结构,使变倍系统轻量化、小型化成为可能,而且还为图像细节信息获取与分辨提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] Qin Y, Zheng Z R, Hua H. Multi-resolution foveated laparoscope[C]//Frontiers in Optics 2012, October 14-

18, 2012, Rochester, New York, USA. Washington: OSA, 2012: FTh1F.4.

- [2] Dou K H, Xie X, Pu M B, et al. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(4): 190005.

- [3] 闫阿奇, 崔雯, 董森. 大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0422001.

Yan A Q, Cui W, Dong S. Optical design of optical passive half-athermalization zoom lens with high zoom ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422001.

- [4] 沈志娟, 林海峰, 曹一青. 多组元全动型大孔径及超大视场变焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0708001.

Shen Z J, Lin H F, Cao Y Q. Design of zoom lens system with movable components including large aperture and with ultra-wide field of view[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0708001.

- [5] Qin Y, Hua H. Continuously zoom imaging probe for the multi-resolution foveated laparoscope[J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(4): 1175-1182.

- [6] Niu Y J, Chang J, Lv F X, et al. Low-cost dynamic real-time foveated imager[J]. Applied Optics, 2017, 56(28): 7915-7920.

- [7] Koretz J F, Cook C A, Kaufman P L. Aging of the human lens: changes in lens shape upon accommodation

- and with accommodative loss[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, 19(1): 144-151.
- [8] Li L, Xiao L, Wang J H, et al. Movable electrowetting optofluidic lens for optical axial scanning in microscopy [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019(2): 180025.
- [9] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [10] Ye M, Wang B, Uchida M, et al. Low-voltage-driving liquid crystal lens[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(10): 100204.
- [11] Lin H C, Lin Y H. An electrically tunable-focusing liquid crystal lens with a low voltage and simple electrodes[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2045-2052.
- [12] Sova O, Galstian T. Liquid crystal lens with optimized wavefront across the entire clear aperture[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 290-296.
- [13] 李鹏伟, 陈信慈, 陈晓西, 等. 用 90° 扭曲向列相液晶盒代替偏振片的液晶透镜成像方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0711004.
- Li P W, Chen X C, Chen X X, et al. Liquid crystal lens imaging method using 90° twisted nematic liquid crystal cell instead of polarizer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0711004.
- [14] 陈明璿, 陈柏儒, 林怡欣. 基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(3): 375-380.
- Chen M X, Chen B R, Lin Y X. Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 375-380.
- [15] Yang R K, Lin C P, Su G D J. Zoom system without moving element by using two liquid crystal lenses with spherical electrode[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10375: 111-119.
- [16] Michael F L, Nilsson D E. *Animal eyes*[M]. London: Oxford University Press, 2012: 109-122.