

液晶透镜爬山自动对焦算法研究

兰天成¹, 兰荣华², 陈晓西^{1**}, 杜爽¹, 朱学辉², 张俊瑞², 李其昌³, 叶茂^{1*}

¹电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;

²成都京东方光电科技有限公司, 四川 成都 611731;

³微晶景泰科技有限公司, 四川 成都 610051

摘要 提出一种液晶透镜爬山自动对焦算法。液晶透镜是一种可电控调焦透镜,具有良好的透镜性能。传统玻璃透镜成像系统中的爬山法自动对焦功能一般需要音圈马达带动透镜使之不断移动来寻找最佳清晰像面位置。而所提算法的自动对焦则是通过改变电压来完成的,整个对焦过程不需要任何的机械移动即可实现大范围对焦,使对焦系统的小型化成为可能。实验结果表明,液晶透镜的对焦性能良好,成像解析度高。

关键词 成像系统; 液晶透镜; 光焦度; 自动对焦; 对焦评价函数

中图分类号 TN141.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1411003

Research on Liquid Crystal Lens Hill Climbing Autofocus Algorithm

Lan Tiancheng¹, Lan Ronghua², Chen Xiaoxi^{1**}, Du Shuang¹, Zhu Xuehui²,
Zhang Junrui², Li Qichang³, Ye Mao^{1*}

¹ School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

² Chengdu BOE Optoelectronics Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611731, China;

³ Micro LCL Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China

Abstract In this study, we propose the liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm. The liquid crystal lens is an electronically controlled focusing lens, which exhibits good lens performance. In a traditional glass lens imaging system, the hill climbing autofocus function requires the voice coil motor to continuously move the lens for obtaining the optimal clear image plane position. The autofocus function of the proposed algorithm is obtained by varying the voltage. Thus, the entire large-scale focusing process can be realized without any mechanical movement, miniaturizing the focusing system. The experimental results show that the liquid crystal lens exhibits good focusing performance and high imaging resolution.

Key words imaging systems; liquid crystal lens; focal power; autofocusing; focusing evaluation function

OCIS codes 110.3000; 230.3720; 100.2000

1 引 言

光学成像系统广泛应用于医疗、科研、军事等领域,大多数的光学成像系统有自动对焦功能^[1-2]。目前广泛使用的对焦方法有测距法^[3]、反差法及相位法等。测距法是基于激光三角测距法来测量物体距离的,然后实现对焦。最早出现的 Pentax ME-F 单反相机反差检测法利用图像最清晰时成像的反差最大原理实现对焦。应用于 Olympus OM-30 单反相机上的相位检测法通过两组电荷耦合器件上照度的

相位分布来实现对焦。对焦功能多通过系统中个别透镜的机械移动来实现,而在很多小型成像系统中则通过音圈马达的移动来实现。音圈马达及透镜机械移动所需的空间给对焦系统的小型化带来了挑战,同时音圈马达在工作时会给成像系统带来一定的电磁干扰。液晶(LC)透镜是一种采用液晶材料的光学透镜,其焦点距离由驱动电压控制,具有对焦、变焦功能。同其他焦点可变透镜相比,液晶透镜在器件厚度小及功耗低等方面具有优势。Ye等^[4]在 Sato等提出的液晶透镜模型^[5-6]的基础上

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-03-22; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 四川省科技计划应用基础研究重点项目(2017JY0022, 20YYJC4365)、中央高校基本科研业务费(ZYGX2018J048)

* E-mail: mao_ye@uestc.edu.cn; ** E-mail: chenxiaoxi@uestc.edu.cn

进行了改进,研制出了更加轻薄、驱动电压更低的液晶透镜。后续的相关工作表明,液晶透镜的成像原理与动物人类视觉成像机制相似,液晶透镜视觉成像系统可以更好地应用于自动对焦系统中^[4-6]。

为了更有效地解决现阶段传统玻璃透镜自动对焦存在的问题,本文在不同对焦评价函数下对液晶透镜成像调焦过程中的对焦评价曲线进行分析,并进行优化改进。因液晶透镜同时具有正、负两种透镜状态,在经典爬山算法的基础上设计液晶透镜特有的爬山对焦算法。

2 基本原理

2.1 液晶透镜自动对焦成像光学系统

实验所采用的光学成像系统示意图如图 1 所示。系统所采用的图像传感器为彩色互补金属氧化物半导体(CMOS),芯片尺寸为 0.4 inch(1.016 cm),分辨率

为 2592×1944 ,像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$;数据接口为 USB 3.0,满分辨率传输速度为 14 frame/s;主透镜位于传感器之前,焦距 $f_g = 8 \text{ mm}$;液晶透镜置于主透镜之前,光焦度 P_{LC} 为 $-3.5 \sim 5.0 \text{ m}^{-1}$ 。在成像过程中进行光焦度微调,即可完成对最前方三个物体的对焦。液晶透镜之前放置偏振片,偏振片透光方向与液晶透镜摩擦方向平行,以去除 o 光对液晶透镜的影响。液晶透镜的结构如图 2 所示^[7-9],采用干涉测量方法对该液晶透镜的光学性能进行分析^[10]。在频率为 1.0 kHz 时,固定 $V_1 = 64 \text{ V}$ (正透镜)或 $V_2 = 60 \text{ V}$ (负透镜),分别改变 V_2 或 V_1 ,可以获得较大的光焦度变化范围同时保持较低的光学像差。当电压频率 $f = 1.0 \text{ kHz}$, $V_1 = 64 \text{ V}$ 时, V_2 从 60 V 降至 5 V,光焦度从 0 增至 5.0 m^{-1} ,呈正透镜状态。当电压频率 $f = 1.0 \text{ kHz}$, $V_2 = 60 \text{ V}$ 时, V_1 从 60 V 降至 5 V,光焦度从 0 降至 -3.5 m^{-1} ,呈负透镜状态。

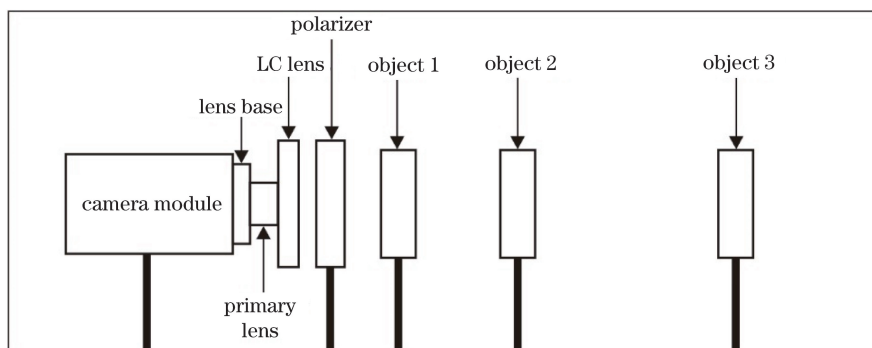


图 1 液晶透镜成像系统示意图
Fig. 1 Schematic of LC lens imaging system

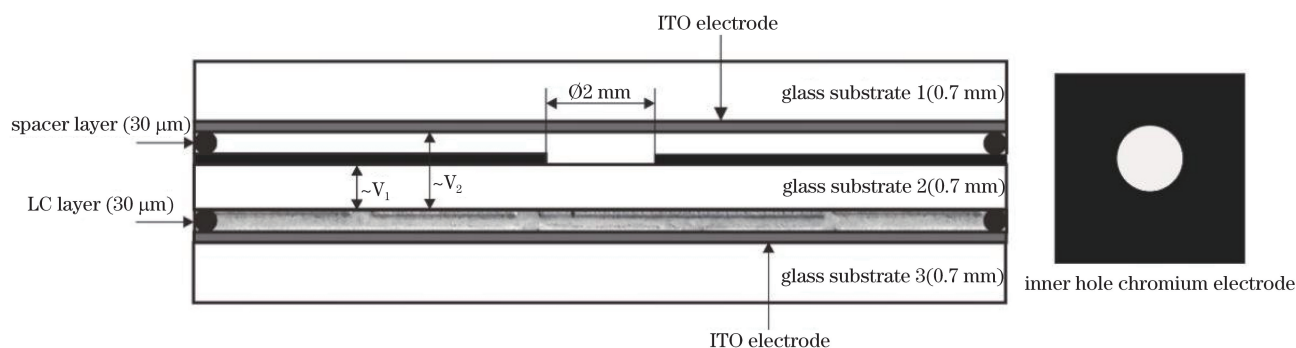


图 2 液晶透镜结构示意图^[8-9]
Fig. 2 Schematic of LC lens structure^[8-9]

液晶透镜对焦系统不需要任何机械移动,令像距固定,通过电压微调焦距来实现对焦。本实验中的液晶透镜紧贴玻璃主透镜,它们之间的距离可以忽略。液晶透镜光学成像系统的高斯光学成像公式为

$$\frac{1}{f_g} + \frac{1}{f_{\text{LC}}} = \frac{1}{v} + \frac{1}{u}, \quad (1)$$

式中: f_{LC} 为液晶透镜的焦距; v 为像距; u 为对焦物距。实验中,先让液晶透镜处于非透镜状态, $1/f_{\text{LC}}=0$,调整主透镜与 CMOS 的距离,使系统对

物距为 $u = u_0$ 的物体进行对焦, 其中 u_0 为初始对焦物距。将 u_0 代入(1)式, 得

$$\frac{1}{f_g} + 0 = \frac{1}{v} + \frac{1}{u_0}. \quad (2)$$

由(1)、(2)式推导出对焦物距 u 与液晶透镜焦距 f_{LC} 和初始对焦物距 u_0 的关系为

$$u = \frac{u_0}{1 + \frac{u_0}{f_{LC}}} = \frac{u_0}{1 + u_0 P_{LC}}. \quad (3)$$

(2)式的限制条件为 $1 + u_0 P_{LC} > 0$ 。在本系统中, $u_0 = 0.25 \text{ m}$, 液晶透镜的光焦度 P_{LC} 为 $-3.5 \sim 5.0 \text{ m}^{-1}$, 能保证 $1 + u_0 P_{LC} > 0$ 。

2.2 对焦评价函数

对焦评价函数有 Tenengrad (TEN) 函数、Absolute Tenengrad (ATEN) 函数、Laplacian (LAP) 函数、Log-Histogram (LOG) 函数、Variance (VAR) 函数、Discrete Cosine Transform (DCT) 函数等^[11-12]。本文将图像强边缘轮廓的平均梯度能量信息(AOE)作为对焦评价方法, 该方法在边界梯度自动对焦评价函数^[13-14]的基础上增加了图像边缘强度的筛选步骤, 对筛选后的边缘强度进行平均归一化处理。这能减小一些噪声及非目标物体(如背景等)对图像清晰度计算的干扰, 具体算法说明如下。

假设感兴趣对焦区域(ROI)的彩色图像为 I_C^{ROI} , 将彩色图像 I_C^{ROI} 转换成灰度图像 I_G^{ROI} , 采用 Sobel 算法分别提取图像 I_G^{ROI} 的水平梯度图像 $I_{E_H}^{ROI}$ 和垂直梯度图像 $I_{E_V}^{ROI}$, 然后将水平梯度和垂直梯度图像合并成总的梯度图像 I_E^{ROI} , 表达式为

$$I_E^{ROI}(x, y) = \sqrt{I_{E_H}^{ROI}(x, y)^2 + I_{E_V}^{ROI}(x, y)^2}, \quad (4)$$

式中: (x, y) 为图像像素点的坐标; E 为图像的梯度; E_H 为图像沿水平方向的梯度; E_V 为图像沿垂直方向的梯度。

采用大津法令图像 I_E^{ROI} 自动获取二值化阈值 T , 然后获取 I_E^{ROI} 的二值图像 $I_{E_T}^{ROI}$, 表达式为

$$I_{E_T}^{ROI}(x, y) = \begin{cases} 255, & I_E^{ROI}(x, y) \geq T \\ 0, & I_E^{ROI}(x, y) < T \end{cases}, \quad (5)$$

式中: E_T 为图像的二值化。图像 $I_{E_T}^{ROI}$ 保留了边缘梯度的有效点, 则获取边缘梯度有效点数的表达式为

$$N = \frac{1}{255} \sum I_{E_T}^{ROI}(x, y). \quad (6)$$

对图像 I_E^{ROI} 与图像 $I_{E_T}^{ROI}$ 进行运算, 得到有效梯度边缘图像 $I_{E_E}^{ROI}$ 。

边缘有效梯度能量总和的表达式为

$$E_{\text{sum}} = \sum I_{E_E}^{ROI}(x, y). \quad (7)$$

边缘梯度平均能量 $E_{\text{mean}} = E_{\text{sum}} \times N^{-1}$ 。这样处理的结果可以很好地消除噪声带来的影响, 只利用图像强边缘轮廓的梯度能量平均值 F_{AOE} 作为清晰评判标准, 表达式为

$$F_{AOE} = \frac{E_{\text{sum}}}{E_{\text{mean}}}. \quad (8)$$

对液晶透镜成像系统进行成像实验, 测得在液晶透镜调焦范围内的对焦评价曲线, 结果如图 3 所示, 横坐标为液晶透镜的光焦度值, 纵坐标为对焦评价函数计算的对焦评价价值(即图像的清晰度), 其中对焦评价方法的运行时间如表 1 所示, 采用的 ROI 大小为 100×100 。

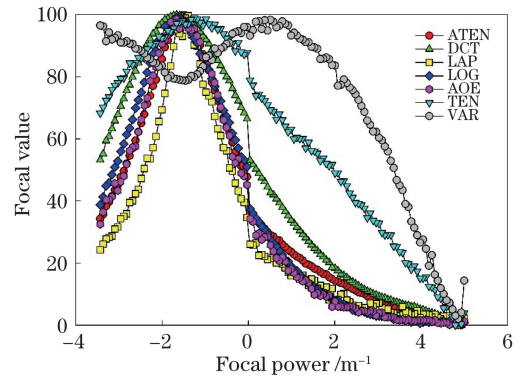


图 3 ROI 的对焦评价曲线

Fig. 3 Focusing evaluation curves of ROI

表 1 对焦评价函数的运行时间与灵敏度

Table 1 Running time and sensitivity of different focusing evaluation functions

Method	Time /ms	Sensitivity
ATEN	1.32	1.09
DCT	912.29	0.49
LAP	0.20	1.85
LOG	1.03	0.91
AOE	1.26	1.15
TEN	1.16	0.10
VAR	0.38	

对焦评价曲线的主要评判标准包括单峰性、无偏性、灵敏度、实时性、通用性等^[15]。根据这些标准, 从图 3 可以看到, 在对焦评价函数中, 除了 VAR 函数, 其他函数基本上都能较好地反映出图像的离焦状态(即单峰性和无偏性良好)。从表 1 可以看出: LAP 函数的灵敏度最大, AOE 函数的灵敏度比 TEN 函数、DCT 函数大; DCT 函数运行时间最长, 这是因为基于频域的方法的计算复杂度高, LAP 函数运行时间最短, 其余函数基本都控制在 1 ms 左

右。考虑到液晶透镜的响应时间及电控对焦微调的准确度,LAP函数和AOE函数的灵敏度差异及实时性差异可以忽略。LAP函数求的是图像的二阶梯度,对噪声敏感,在实际使用过程中对场景的适应性较差,因此综合考虑,AOE函数更加适合应用于液晶透镜成像系统。

3 实验结果

将AOE函数作为对焦评价函数,结合变步长的爬山搜索算法得到自动对焦效果图,结果如图4、5所示。图4为成像系统拍摄的全景图,场景中鹦鹉、老虎、斑马的尺寸约为4 cm、10 cm、18 cm,分别位于距液晶透镜12 cm、25 cm、90 cm处,其中方框代表ROI。此时系统自动对焦在全景的鹦鹉身上,可以看到鹦鹉的像是清晰的,而其他物体都处于模

糊状态。图5分别显示三个ROI对焦的效果图,在成像区域内系统对鹦鹉、老虎及斑马都实现了清晰对焦。

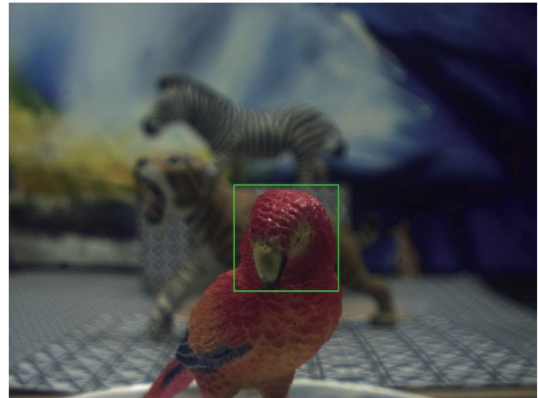


图4 自动对焦效果全景图

Fig. 4 Autofocus effect panorama

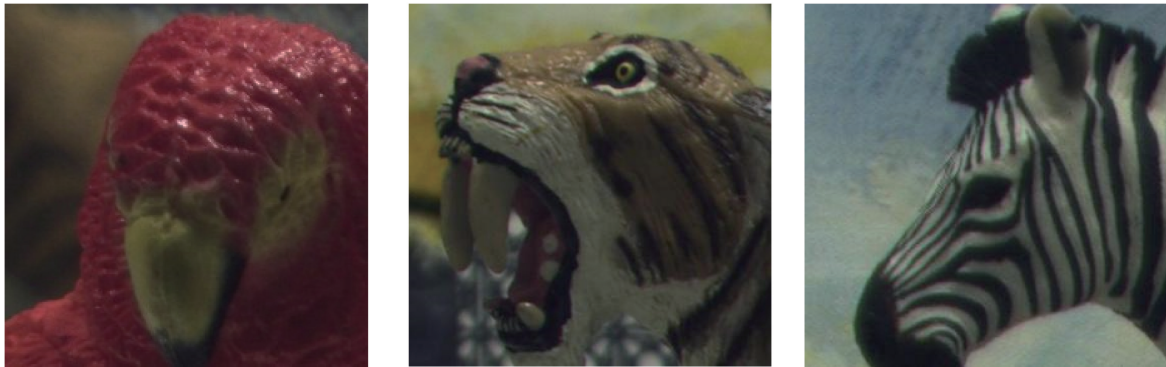


图5 ROI对焦状态效果图

Fig. 5 Autofocus results in ROI

4 结 论

提出了一种液晶透镜爬山自动对焦算法,在液晶透镜调焦范围内,对各种对焦评价函数进行比较,并提出了一种适用于液晶透镜的对焦评价方法。与传统的基于玻璃透镜的爬山对焦系统相比,液晶透镜爬山自动对焦系统不需要任何的机械移动,功耗更低,且透镜调焦范围内的各种对焦评价曲线性能良好。

参 考 文 献

- [1] Lüthi B S, Thomas N, Hviid S F, et al. An efficient autofocus algorithm for a visible microscope on a Mars lander[J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(10): 1258-1264.
- [2] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm[J]. Microscopy Research and Technique, 2004, 65(3): 139-149.
- [3] Xiao L. The research and development of the autofocus system based on the laser-triangulation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011: 20-24. 肖磊. 基于激光三角测距法的自动对焦系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011: 20-24.
- [4] Ye M, Wang B, Uchida M, et al. Low-voltage-driving liquid crystal lens[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(10): 100204.
- [5] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [6] Wang B, Ye M, Sato S. Lens of electrically controllable focal length made by a glass lens and liquid-crystal layers [J]. Applied Optics, 2004, 43(17): 3420-3425.
- [7] Ye M, Wang B, Uchida M, et al. Focus tuning by liquid crystal lens in imaging system[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7630-7635.
- [8] 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.

- [9] Ye M, Noguchi M, Wang B, et al. Zoom lens system without moving elements realised using liquid crystal lenses[J]. Electronics Letters, 2009, 45(12): 646-647.
- [10] Chen X X, Bai Y C, Chao C, et al. Driving liquid crystal lens to extend focus range[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(7): 072601.
- [11] Wang Y R, Feng H J, Xu Z H, et al. Autofocus evaluation function based on saturate pixels removing [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1210001.
王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1210001.
- [12] Qiu S G, Zhou J, Liu X, et al. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto-focusing system [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 460-464.
邱胜根, 周杰, 刘旭, 等. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究 [J]. 光学学报, 2004, 24(4): 460-464.
- [13] Wu X C, Guo S Y, Yi G. Evaluation function for automatic focusing based on boundary gradients [J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(3): 45-48, 170.
吴小翠, 郭斯羽, 易国. 基于边界梯度的自动调焦评价函数 [J]. 计算机系统应用, 2010, 19(3): 45-48, 170.
- [14] Cao M Y, Sun N L, Yu D Y. Digital image evaluation function based on gray gradient [J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(4): 69-72.
曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数 [J]. 光电工程, 2003, 30(4): 69-72.
- [15] Zhang Z J, Hu H, Li T L. Application and research of composite autofocusing technique in optical-lens measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312005.
张振久, 胡泓, 李天利. 透镜检测中复合自动对焦技术的研究及应用 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312005.