

# 光学学报

## 一种基于非锐化掩蔽模型的无偏振片成像技术

高畅, 刘志强, 刘豪, 马嘉成, 叶茂\*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

**摘要** 液晶透镜是一种新兴的可以电控调焦的液晶器件, 无需机械移动就可以实现对焦、变焦和深度测量, 因此被广泛应用于摄影摄像、显微成像、虚拟现实等领域。提出一种优化的液晶透镜无偏振片成像技术。该技术结合非锐化掩蔽模型, 通过分析图像像素值的变化, 估算得到环境光中寻常光分量的占比, 并使用非对焦图像和对焦图像进行处理, 获得高质量图像。实验结果表明, 优化后的技术能够有效增强图像对比度, 获得优质图像。

**关键词** 成像系统; 液晶透镜; 无偏振片成像; 非锐化掩蔽模型

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231513

### 1 引言

液晶透镜是一种具有电控调焦特性的光学器件, 具有轻薄、易于集成、功耗低、寿命长等优势, 可应用在成像领域。目前已经报道了液晶透镜在自动对焦<sup>[1-2]</sup>、扩展景深成像<sup>[3-4]</sup>以及3D成像<sup>[5-7]</sup>等领域的应用。由于液晶材料的各向异性, 液晶透镜仅能调制非寻常光(e光), 寻常光(o光)不被调制, 这就导致图像对比度降低。液晶透镜光学成像系统可以通过加装偏振器件来去除入射光中的o光分量。然而, 偏振片的使用会大幅减少光通量, 降低成像质量。因此, 不使用偏振器件的液晶透镜成像技术成为液晶透镜研究领域的方向。

目前, 无偏振片成像(PFI)技术主要有以下三种: 第一种是使用蓝相液晶<sup>[8]</sup>代替向列相液晶制备液晶透镜, 但是蓝相液晶双折射效应弱、温度范围窄、驱动电压高<sup>[9-10]</sup>, 尚未达到实用水平; 第二种是使用多层液晶代替单层液晶<sup>[11-13]</sup>调制入射光的两个分量, 但多层液晶结构增加了器件的厚度及制作成本<sup>[8]</sup>; 第三种是采用PFI算法<sup>[14-16]</sup>, 通过使用无偏振片装置的液晶透镜光学成像系统分别采集一幅对焦图像和一幅非对焦图像, 并对对焦图像和非对焦图像进行图像处理, 有效减少未调制寻常光引入的非理想低频分量, 提高图像的对比度。

迄今报道的方法都是假定自然光照明, 即o光分量占50%, 而在实际应用中, 光的偏振态未知。本文提出一种针对任意偏振态照明光的PFI算法。该算法在现有的PFI算法的基础上, 结合数字图像处理方法提出PFI的非锐化掩蔽模型。利用非锐化掩蔽模型分

析图像像素值的变化, 估算环境光中o光分量的占比, 再通过非对焦图像和对焦图像获得高对比度图像。

### 2 非锐化掩蔽模型的PFI算法及原理

#### 2.1 PFI算法

由于液晶分子结构具有各向异性, 光在液晶中传播会发生双折射现象, 产生o光和e光。e光的有效折射率为

$$n = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中:  $n_o$ 和 $n_e$ 分别为o光折射率与e光折射率;  $\theta$ 为液晶分子倾角。当作用于液晶层的电场改变时,  $\theta$ 及 $n$ 随之改变, 且e光受到调制而o光未被调制。

液晶无偏振片光学成像系统如图1所示。当未施加驱动电压时, 液晶透镜处于未工作状态, 入射光的o光分量与e光分量均不被调制, 在图像传感器上形成弥散斑。定义此时采集的图像为非对焦图像 $I_r$ ,  $I_r$ 可视为由o光和e光叠加的图像, 即

$$I_r = I_r^o + I_r^e, \quad (2)$$

式中:  $I_r^o$ 和 $I_r^e$ 分别表示 $I_r$ 中o光和e光分量形成的图像。

当施加驱动电压时, 液晶透镜处于工作状态, 入射光的e光分量被调制, 在图像传感器上形成一点像, 而o光分量仍呈弥散斑。定义此时采集的图像为对焦图像 $I_t$ , 仍可视为由o光和e光叠加的图像, 即

$$I_t = I_t^o + I_t^e, \quad (3)$$

式中:  $I_t^o$ 和 $I_t^e$ 分别表示 $I_t$ 中o光和e光分量形成的图像。因为o光分量未被调制, 所以 $I_t^o = I_r^o$ , 则

$$I_t = I_r^o + I_t^e. \quad (4)$$

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-06; 录用日期: 2023-10-27; 网络首发日期: 2023-12-12

通信作者: \*mao\_ye@uestc.edu.cn

假设入射光中 o 光分量在入射光中的占比为  $\alpha$ , 则  $I_r^o = \alpha I_r$ , 满足  $0 < \alpha < 1$ 。对焦的 e 光分量形成的图像为

$$I_f^e = I_f - \alpha I_r^o \quad (5)$$

当入射光中只含有 e 光分量时,  $\alpha = 0$ ; 当入射光中只含有 o 光分量时,  $\alpha = 1$ ; 当入射光中 o 光分量与 e 光分量的占比为 1:1 时,  $\alpha = 0.5$ 。

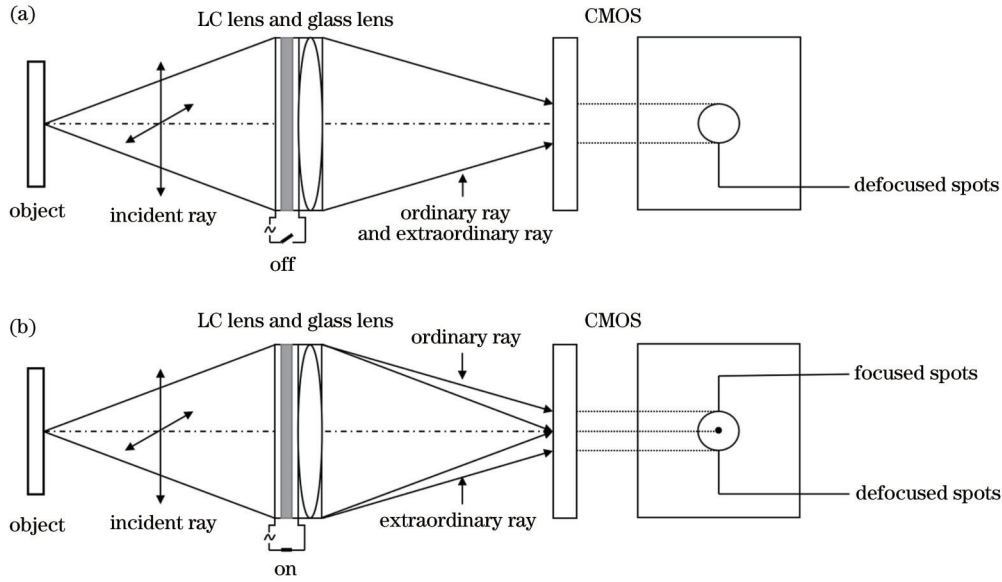


图 1 液晶无偏振光学成像实验原理图。(a)未施加驱动电压;(b)施加驱动电压

Fig. 1 Experimental schematic of liquid crystal lens polarizer-free imaging. (a) Voltage is off; (b) voltage is on

用因子  $1 - \alpha$  调节亮度, 使图像亮度不变, 从而获得高对比度图像。

$$I_s = \frac{I_f - \alpha I_r}{1 - \alpha} \quad (6)$$

式中:  $I_s$  表示从高频图像中减去经过低通滤波处理后的原图像, 这一过程类似于非锐化掩蔽模型<sup>[17]</sup>。

### 2.2 非锐化掩蔽模型

非锐化掩蔽模型(USM)主要包括 3 个步骤: 1) 对原图像进行低通滤波, 获取模糊图像; 2) 从原图像中减去模糊图像, 产生的差值图像称为非锐化模板; 3) 将非锐化模板加到原图像上, 提高图像对比度。

式(6)中对图像处理的过程类似于非锐化掩蔽模型, 但当  $\alpha$  过大时, 会产生如图 2(b)所示的边缘缺陷问题。

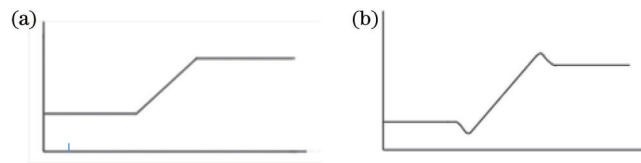


图 2 信号。(a)原始信号;(b)锐化信号

Fig. 2 Signals. (a) Original signal; (b) sharpening signal

由于通常情况下照明光的偏振态未知, 可假定 o 光分量占比为  $\alpha'$ , 并进行图像处理。当  $\alpha' < \alpha$  时, 图像  $I_s$  仍然存在 o 光分量, 未达到最大对比度; 当  $\alpha' = \alpha$  时, o 光分量被完全去除,  $I_s$  对比度达到最大; 当  $\alpha' > \alpha$  时, o 光分量虽然被完全去除, 但是引入了 USM 处理, 分析图像会出现图 2(b)所示的边缘缺陷。

基于非锐化掩蔽模型的 PFI 算法可描述为: 随着  $\alpha'$  值的增加, 图像中的 o 光分量对应的模糊图像成分逐渐减少, 图像对比度逐渐增加; 当  $\alpha'$  值达到实际  $\alpha$  值时, 调制图像中 o 光分量对应的模糊图像成分完全消失, 此时得到的图像应为 PFI 算法计算得到的高对比度图像; 当  $\alpha'$  值继续增加, 高对比度图像中引入 USM 处理, 图像发生失真。

## 3 实验与结果

### 3.1 液晶透镜的光学特性

本实验利用冯文斌等<sup>[18]</sup>提出的液晶透镜结构。如图 3 所示, 液晶透镜主要由玻璃基板、氧化铟锡(ITO)层、聚酰亚胺(PI)层、间隔子和液晶分子组成。PI 层使用摩擦机进行反向摩擦以控制液晶分子的初始排列方向。ITO 层为电极层, 其电极结构如图 4 所示, ITO

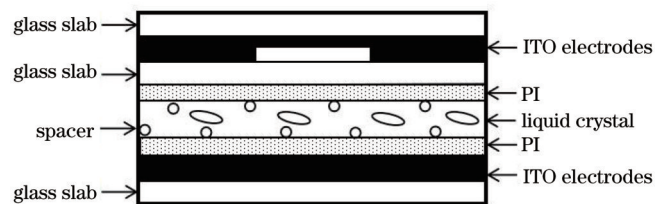


图 3 液晶透镜结构

Fig. 3 Liquid crystal lens structure

螺旋电极为同心圆结构, 同心圆的间隔相等, 且相邻的同心圆首尾相连, 形成一根整体电极。该液晶透镜由两个电压  $V_1$  和  $V_2$  驱动, 焦距正负可调。实验中液晶



图 4 实验中使用的电极结构  
Fig. 4 Electrode structure used in the experiment

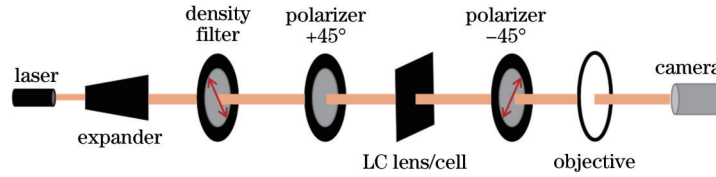


图 5 干涉装置图  
Fig. 5 Interference device

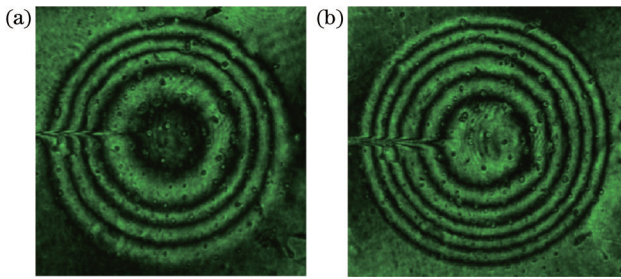


图 6 不同透镜下采集的干涉条纹。(a) 正透镜; (b) 负透镜  
Fig. 6 Interference fringes under different lenses. (a) Positive lens; (b) negative lens

设置电压工作频率  $f=1000$  Hz。对于负透镜,  $V_1$  固定在 2.4 V,  $V_2$  从 1.3 V 增加到 2.4 V; 对于正透镜,  $V_2$  固定在 2.4 V,  $V_1$  从 1.3 V 增加到 2.4 V。分析得到的液晶透镜光焦度和像差随驱动电压的变化关系如图 7 所示。令  $U = V_1 - V_2$ , 当  $|U|$  从 1.1 V 变为 0 V 时, 液晶透镜的光焦度从约  $7 \text{ m}^{-1}$  减小到约  $0.2 \text{ m}^{-1}$ 。可以看出, 光焦度与  $U$  呈线性关系, 在变焦范围内液晶透镜可实现较高的成像质量, 其像差低于  $0.06\lambda$ , 接近理想玻璃透镜的光学像差, 因此液晶透镜可以作为调焦单元用于成像系统中<sup>[19-21]</sup>。

### 3.2 实验结果分析

无偏振片液晶透镜光学成像系统由液晶透镜和相机模组组成, 相机模组由 CMOS 感光元件和玻璃镜头组成。CMOS 的像素为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ , 像元尺寸为  $5.6 \mu\text{m}$ , 配有焦距为 8 mm 的玻璃镜头, 在主镜头上贴有 2 mm 圆形孔径的遮光片, 用于消除液晶透镜口径对系统相对孔径的影响。液晶透镜的口径为

透镜液晶盒的厚度为  $30 \mu\text{m}$ , 液晶材料是由江苏和成有限公司生产的 HSG28800-100, 光学双折射  $\Delta n = 0.199$ ,  $n_o = 1.698$ ,  $n_e = 1.499$ , 介电各向异性值  $\Delta\epsilon = 4.9$ , 平行折射率  $n_{\parallel} = 8.0$ , 垂直折射率  $n_{\perp} = 3.1$ 。

当  $V_1 < V_2$  时, 液晶透镜工作在正透镜状态; 当  $V_1 > V_2$  时, 液晶透镜工作在负透镜状态。为了观察透镜光焦度和光学均方根(RMS)像差随施加电压的变化, 将液晶透镜放到图 5 所示的干涉光路内, 分别给正负透镜施加不同的电压并采集干涉条纹, 部分干涉条纹如图 6 所示。结合 Zernike 多项式对干涉条纹进行波前拟合, 分析得到液晶透镜光焦度和像差随驱动电压变化的数据。

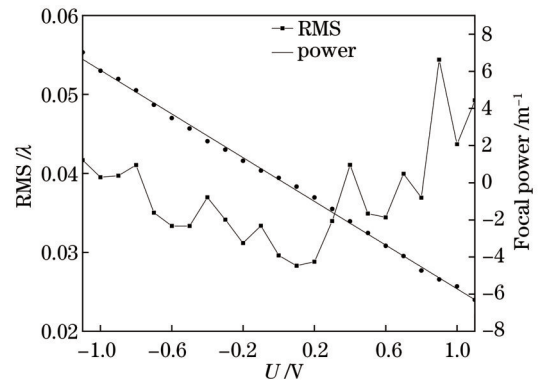


图 7 液晶透镜像差和光焦度随电压变化的特性曲线  
Fig. 7 Characteristic curves of RMS and focal power of liquid crystal lens changed with voltage

2 mm, 紧贴相机镜头。液晶透镜光学成像系统初始对焦平面到液晶透镜的距离  $d_1 = 35 \text{ cm}$ , ISO 12233 图像分辨率测试卡到液晶透镜的距离  $d_2 = 64 \text{ cm}$ 。实验装置如图 8(a) 所示, 当电压开启时, 液晶透镜处于工作状态, 入射光入射到液晶透镜, e 光分量被调制而 o 光分量未被调制, 两分量被 CMOS 接收并成像。

为了在后续实验中获得清晰的聚焦图像, 利用图 8(b) 所示的实验装置, 在液晶透镜前放置偏振片去除入射光中的 o 光分量, 给液晶透镜两端施加不同电压后拍摄 ISO 12233 图像分辨率测试卡, 采集的图像和测量区域如图 9 所示。其中, A 区域用于边缘检测以评估图像质量, B 区域用于后续图像处理, C 区域用于图像对比度分析。从 A 区域倾斜边缘测量相机模组的调制传递函数降低到 50% 所对应的空间频率 ( $f_{\text{MTF50}}$ )。



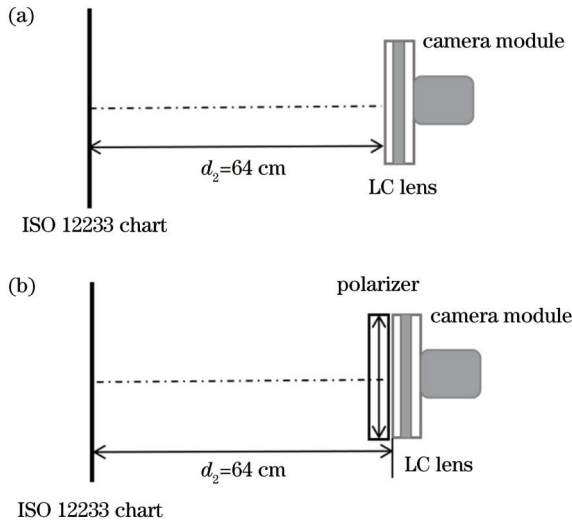


图 8 实验装置示意图。(a)装置未加偏振片;(b)装置添加偏振片

Fig. 8 Schematic of experimental setup. (a) Polarizer-free; (b) polarizer-added

$f_{MTF50}$  值越小,相机分辨能力越差,因此利用  $f_{MTF50}$  值表征系统分辨能力并评估图像质量,进而确定最佳工作电压值。

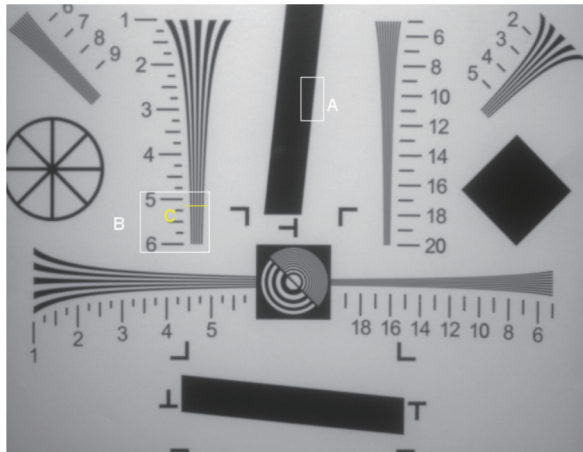


图 9 实验采集图像

Fig. 9 Image collected in the experiment

为了获取清晰图像,改变液晶透镜两端所加电压,分析得到  $f_{MTF50}$  值随液晶透镜驱动电压的变化关系。如图 10 所示,当  $V_1=2.20\text{ V}$ 、 $V_2=1.95\text{ V}$ ,即  $U=0.25\text{ V}$  时,  $f_{MTF50}$  值达到峰值  $0.44\text{ cycle/pixel}$ ,此时图像聚焦。

移去放置在液晶透镜前的偏振片,继续采集对焦图像和非对焦图像,并利用图 9 中 B 区域进行图像处理。当未加电压时,液晶透镜处于未工作状态,不能调制 o 光分量和 e 光分量,图像传感器采集的图像为非调制图像  $I_i$ ,如图 11(a)所示。当施加电压为  $V_1=2.20\text{ V}$ 、 $V_2=1.95\text{ V}$  时,此时液晶透镜处于工作状态, e 光分量处于聚焦状态。图像传感器采集的图像为调

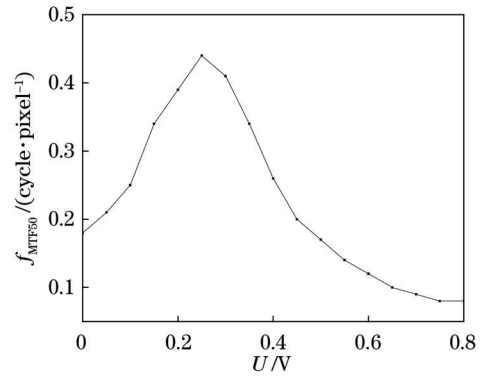


图 10  $f_{MTF50}$  随电压变化的曲线

Fig. 10  $f_{MTF50}$  changed with voltage

制图像  $I_i$ ,如图 11(b)所示,可以看到,调制图像比非调制图像清晰。

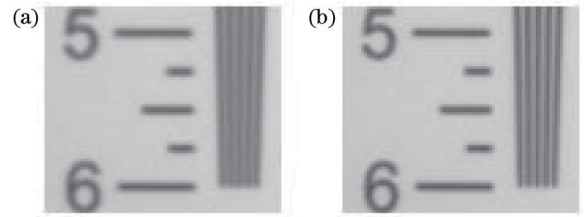


图 11 非调制图像和调制图像。(a)非调制图像  $I_i$ ;(b)调制图像  $I_i$

Fig. 11 Unmodulated and modulated images. (a) Unmodulated image  $I_i$ ; (b) modulated image  $I_i$

拍摄结束后对对焦图像和非对焦图像进行处理。设置  $\alpha$  值为  $[0.4, 0.7]$ ,工作步长为  $0.05$ ,利用式(6)处理非调制图像和调制图像,获取不同  $\alpha$  值时的 PFI 图像。部分 PFI 图像如图 12(b)~(d)所示。由图 12 可知:当  $\alpha$  取一个较小值时,相比未处理图像,PFI 图像的清晰度得到改善;当  $\alpha=0.5$  时,PFI 算法得到的图像为清晰图像;当  $\alpha$  取一个较大值时,PFI 算法得到的图像为失真图像。

对图 9 中 A 区域使用非锐化掩蔽模型进行边缘检测,检测结果如图 13 所示。随着  $\alpha$  值增加,图像对比度增加。当  $0.4 < \alpha < 0.6$  时,图像对比度继续增加,但并未发生失真现象;当  $\alpha > 0.6$  时,随着  $\alpha$  值继续增加,图像边缘检测结果由于非锐化模板的加入分别出现“凹陷”和“凸起”,图像逐渐失真。因此,确定合适的  $\alpha$  值为  $0.6$ 。

### 3.3 入射偏振光偏振方向检测

在非实验室场景中,由于外界条件的影响,如光在不同介质上发生反射、折射等,入射光的偏振状态无法确定。同时,由于大部分相机设备在使用时不加装偏振器件,无法直接确定光的偏振方向。因此,本文利用 PFI 算法的非锐化掩蔽模型,分析入射光发生双折射现象后 o 光分量与 e 光分量的比例,进而确定偏振光入射时的偏振方向。

对于液晶透镜光学成像系统,假设入射光发生双

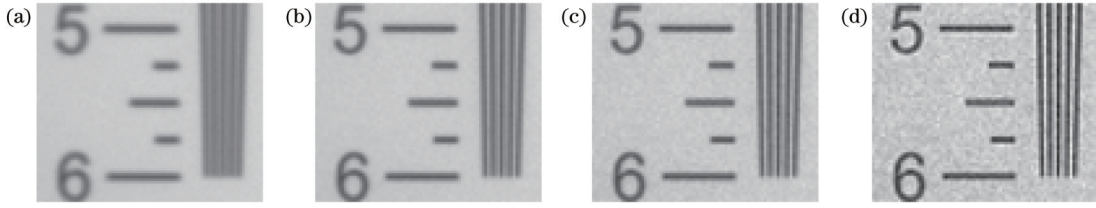


图 12 不同  $\alpha$  时的 PFI 图像。(a) 非调制图像; (b)  $\alpha=0.4$ ; (c)  $\alpha=0.6$ ; (d)  $\alpha=0.7$

Fig. 12 PFI images with different  $\alpha$ . (a) Unmodulated image; (b)  $\alpha=0.4$ ; (c)  $\alpha=0.6$ ; (d)  $\alpha=0.7$

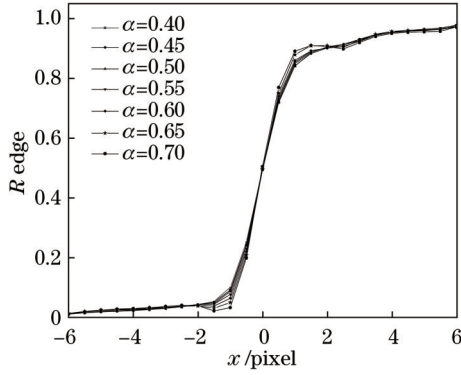


图 13 边缘检测结果

Fig. 13 Edge detection results

折射现象后, e 光分量的占比为 o 光分量的  $\beta$  倍, 如式 (7) 所示:

$$I_e = \beta I_o. \quad (7)$$

由于入射光中 o 光分量在入射光中的占比为  $\alpha$ , 根据式 (7) 可得到

$$\alpha = \frac{1}{1 + \beta}. \quad (8)$$

表 1 入射光偏振方向检测实验参数

Table 1 Parameters in the detection experiment of incident light polarization direction

Angle of polarization $\theta / (^\circ)$	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
Ratio of e ray and o ray	1:0	9:1	4:1	7:3	3:2	1:1	2:3	3:7	1:4	1:9	0:1
Ideal $\alpha$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Real $\alpha$	0	0.07	0.17	0.27	0.38	0.52	0.60	0.71	0.81	0.88	1.00

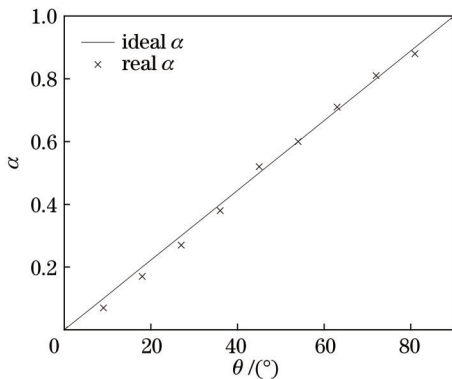


图 14 理想  $\alpha$  值与实际  $\alpha$  值对比图

Fig. 14 Plot of ideal  $\alpha$  vs. real  $\alpha$

假设入射光的偏振方向与液晶透镜摩擦方向的夹角(以下简称“偏振夹角”)为  $\theta, \theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ 。当  $\theta = 0^\circ$  时, 入射光经过液晶透镜发生双折射后, 仅存在 e 光分量; 当  $\theta = 45^\circ$  时, 入射光经过液晶透镜发生双折射后, o 光分量与 e 光分量的比例为 1:1; 当  $\theta = 90^\circ$  时, 入射光经过液晶透镜发生双折射后, 仅存在 o 光分量。根据式 (8), 计算得到入射光偏振夹角、e 光与 o 光比例、 $\alpha$  理论值。

为模拟偏振方向不同的环境光入射条件, 通过旋转图 8(b) 中偏振镜可任意调节入射光, 使其成为偏振方向不同的线偏振光。设置偏振夹角  $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ , 工作步长为  $9^\circ$ , 旋转偏振镜以改变入射光的偏振方向, 拍摄自然环境光条件下一系列不同偏振夹角状态下的图像。对非调制图像和调制图像进行 PFI 算法处理, 并利用上述非锐化掩蔽模型得到实际  $\alpha$  值。最终记录的入射光偏振夹角、e 光与 o 光比例、 $\alpha$  理论值、 $\alpha$  实际值如表 1 所示。同时绘制各偏振夹角与理想  $\alpha$  值、实际  $\alpha$  值的关系曲线, 如图 14 所示。通过实验测量得到的  $\alpha$  值在理想  $\alpha$  值曲线附近, 表明该实验方法能够较为准确地得到实际  $\alpha$  值并对图像进行处理, 具有较高的可信度。

为检验所提出的无偏振片液晶透镜成像方法是否可以应用到实际测量工作中, 选取的拍摄实际场景及后续处理区域如图 15 所示。

拍摄的液晶透镜非调制图像和调制图像分别如



图 15 自然实物布景

Fig. 15 Physical set

图 16(a)、(b)所示,同时选取  $\alpha=0.60$ ,得到处理后的实验结果。将图 16(c)与液晶透镜调制图像对比,发现利用无偏振片液晶透镜成像方法处理得到的图像

清晰自然,具有高对比度。因此,可将非锐化掩蔽模型计算得到的  $\alpha$  值应用到实际测量工作中。

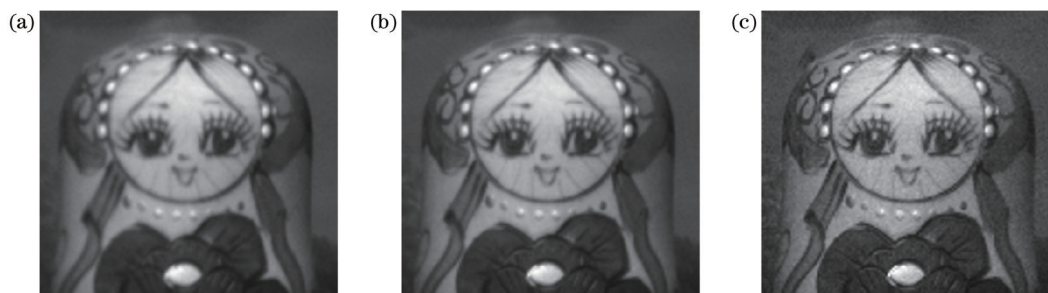


图 16 实物图。(a)非调制图像;(b)调制图像;(c) $\alpha=0.60$ 时的PFI图像

Fig. 16 Actual images. (a) Unmodulated image; (b) modulated image; (c) PFI image when  $\alpha = 0.60$

## 4 结 论

提出一种基于非锐化掩蔽模型的液晶透镜PFI技术,且通过实验验证了该技术的可行性。该技术结合图像处理中的非锐化掩蔽模型,通过分析图像像素值的变化,估算得到环境光中o光分量的占比,并利用该值对对焦图像和非对焦图像进行处理,减少非调制寻常光引入的非理想低频分量,得到自然高品质图像。此外,通过模拟偏振方向不同的环境光入射条件得到一系列o光分量的占比,实验结果与理论分析结果一致。

### 参 考 文 献

- [1] 兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411003.  
Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411003.
- [2] Onaka J, Iwase T, Emoto A, et al. Ultrasound liquid crystal lens with a variable focus in the radial direction for image stabilization[J]. Applied Optics, 2021, 60(33): 10365-10371.
- [3] 刘志强, 胡轶瑶, 叶茂. 液晶轴棱锥[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0823001.  
Liu Z Q, Hu Y Y, Ye M. Liquid crystal axicon[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0823001.
- [4] Bai Y C, Chen X X, Ma J C, et al. Transient property of liquid crystal lens and its application in extended depth of field imaging[J]. Optics Communications, 2020, 473: 125974.
- [5] Peng Y Y, Zhou X T, Zhang Y A, et al. Fabrication of a microlens array for improving depth-of-field of integral imaging 3D display[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9104-9107.
- [6] Tian L L, Chu F, Zhao W X, et al. Fast responsive 2D/3D switchable display using a liquid crystal microlens array[J]. Optics Letters, 2021, 46(23): 5870-5873.
- [7] Chu F, Guo Y Q, Zhang Y X, et al. Four-mode 2D/3D switchable display with a 1D/2D convertible liquid crystal lens array[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37464-37475.
- [8] Lin Y H, Chen H S, Lin H C, et al. Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 113505.
- [9] Li Y, Wu S T. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8045-8050.
- [10] Lin C H, Wang Y Y, Hsieh C W. Polarization-independent and high-diffraction-efficiency Fresnel lenses based on blue phase liquid crystals[J]. Optics Letters, 2011, 36(4): 502-504.
- [11] Li G Q, Mathine D L, Valley P, et al. Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(16): 6100-6104.
- [12] Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with insulator layers for focusing light waves of arbitrary polarizations[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(10): 6439-6440.
- [13] Ren H W, Lin Y H, Wu S T. Polarization-independent and fast-response phase modulators using double-layered liquid crystal gels[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(6): 061123.
- [14] Cui C H, Bao R, Yu S D, et al. Polarizer-free imaging using reference image for liquid crystal lens[J]. Optics Communications, 2015, 342: 214-217.
- [15] Bao R, Cui C H, Yu S D, et al. Polarizer-free imaging of liquid crystal lens[J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19824-19830.
- [16] 白一晨, 陈晓西, 曾俊, 等. 液晶透镜无偏振片成像的优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815015.  
Bai Y C, Chen X X, Zeng J, et al. An optimization algorithm for polarizer-free imaging of liquid crystal lens[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815015.
- [17] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2017: 100-101.  
Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. Ruan Q Q, Ruan Y Z, Transl. 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 100-101.
- [18] 冯文斌, 刘志强, 徐律涵, 等. 一种高性能液晶透镜的设计方法[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 0223001.  
Feng W B, Liu Z Q, Xu L H, et al. Design method for high-performance liquid crystal lens[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 0223001.
- [19] 赖文杰, 刘志强, 孙涛, 等. 无偏振片液晶透镜深度估计[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1415002.  
Lai W J, Liu Z Q, Sun T, et al. Depth estimation using polarizer-free liquid crystal lens[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1415002.
- [20] 黄振豪, 刘志强, 林弘峻, 等. 大口径光焦度可调调菲涅耳液晶透镜[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 1923002.  
Huang Z H, Liu Z Q, Lin H J, et al. Tunable Fresnel liquid crystal lens with large aperture[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 1923002.
- [21] 刘天, 刘志强, 叶茂. 液晶微透镜阵列直接成像[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(20): 2011004.  
Liu T, Liu Z Q, Ye M. Direct imaging with liquid crystal microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(20): 2011004.



# A Polarization-Free Imaging Technique Based on Unsharp Masking Model

Gao Chang, Liu Zhiqiang, Liu Hao, Ma Jiacheng, Ye Mao\*

*School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,  
Chengdu 611731, Sichuan, China*

## Abstract

**Objective** Liquid crystal lens is an emerging liquid crystal device that can be electrically controlled to modulate the focus, zoom, and depth measurement without mechanical movement, and thus it is widely employed in many fields such as photographic camera, microscopic imaging, and virtual reality. Due to the anisotropy of the liquid crystal material, the liquid crystal lens can only modulate the extraordinary ray, and the ordinary ray is not modulated, which causes reduced image contrast. Optical imaging systems of liquid crystal lens can be retrofitted with polarizing devices to remove the ordinary ray component of the incident light. However, the utilization of polarizers drastically reduces the optical flux and degrades the imaging quality. Additionally, there are three main polarizer-free imaging techniques. The first one is to adopt blue-phase liquid crystals instead of nematic-phase liquid crystals to prepare liquid crystal lenses. However, the blue-phase liquid crystal features small birefringence effect, narrow temperature range, and high voltage, and has not yet reached the practical level. The second is to leverage multilayer liquid crystals instead of single-layer liquid crystals to modulate the two components of incident light. However, the multilayer liquid crystal structure increases the thickness and fabrication cost of the device. The third one is to apply a polarizer-free imaging algorithm and an innovative combination of unsharp masking models to acquire high-quality images.

**Methods** The non-ideal low-frequency component introduced by the unmodulated extraordinary ray is decreased by utilizing an optical imaging system of liquid crystal lens with a polarizer-free device to acquire one focused image and one unfocused image respectively and perform image processing on the two images. Meanwhile, the unsharp masking model for polarizer-free imaging is proposed to analyze pixel value changes of the images to estimate the percentage of the ordinary ray component, and then the unfocused and focused images are adopted to obtain a high-contrast image.

**Results and Discussions** The optical properties of the liquid crystal lens in the experiment are examined. The experimental results show that the optical focal length is linearly related to the optical aberration of an ideal glass lens. Additionally, the liquid crystal lens is close to the ideal optical aberration of a glass lens with high imaging quality, and can be adopted as a focusing unit in the imaging system (Fig. 7). A polarizer is placed in front of the liquid crystal lens to remove the ordinary ray component in the incident light, and different voltages are applied to the ends of the liquid crystal lens to capture the ISO 12233 chart. The  $f_{\text{MTF50}}$  is to characterize the resolution capability of the system and evaluate the image quality to determine the optimal operating voltage value (Fig. 10). Meanwhile, we adopt  $f_{\text{MTF50}}$  to characterize the system's resolving power, evaluate the image quality, and then determine the optimal operating voltage value (Fig. 10). Focus and non-focus images are captured, the values are set to process the two images, and the unsharp masking model is adopted for edge detection, with observations conducted on whether there is any abnormal "depression" and "bulge". The polarization direction of the incident polarized light is detected and recorded (Table 1). The relationship between the polarization angle and the ideal and actual values is plotted, and the values obtained by experimental measurements are near the ideal value curve, which indicates that the experimental method can obtain the actual values more accurately and process the images (Fig. 14). Meanwhile, we photograph the actual scene and process the image, and the image obtained by the imaging method of polarizer-free liquid crystal lens is clear and natural with high contrast. The value calculated by the unsharp masking model can be applied to the actual measurement (Fig. 16).

**Conclusions** We propose a polarizer-free imaging technique of liquid crystal lens based on the unsharp masking model and experimentally verify the feasibility of the technique. The technique combines the unsharp masking model in image processing to estimate the proportion of the ordinary ray component in ambient light by analyzing the changes of the image pixel. Then, this value is employed to process the focused and unfocused images to reduce the non-ideal low-frequency component introduced by non-modulated unusual light and obtain a natural high-quality image. Additionally, values of the ratio of the o-light component are obtained by simulating the ambient light incidence conditions with different polarization directions, and the experimental results are consistent with the theoretical analysis.

**Key words** imaging system; liquid crystal lens; polarizer-free imaging; unsharp masking model