

## 利用液晶透镜实现扩展景深成像

孙嘉林, 刘志强, 叶茂\*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

**摘要** 针对现有利用液晶透镜获取扩展景深图像的方法需要较长时间的问题, 提出一种提升液晶透镜扩展景深融合效率的方法, 该方法可以缩短获取扩展景深图像的时间。利用液晶透镜在正负状态之间切换时保持透镜效果的特性, 获取图像进行计算。通过考虑每个图像的景深, 减少融合所需要的图像数量, 从而缩短图像处理的时间。所提方法的图像使用数量减少至现有基于液晶透镜的景深扩展技术的 31.2%, 计算时间减少至 34.38%, 合成效率显著提升。所提扩展景深图像质量的方法在主观评价与客观评价上均获得了较好的实验效果。

**关键词** 液晶透镜; 景深扩展; 景深计算; 图像融合

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222039

## 1 引言

在成像领域, 景深受限是一常见问题, 图片景深与光圈大小互相制约, 影响最终拍摄效果, 而人们常常希望获得大景深的图像。对此, 已经有多种解决方法被提出。波前编码<sup>[1]</sup>使用一个环形孔来减小像面弥散斑尺寸, 增大系统景深; 光学切趾<sup>[2]</sup>使用编码孔来产生一个对离焦不敏感的大景深图像。然而, 孔径的变化会导致图像质量的下降和曝光时间的增加, 降低系统性能。对焦扫描法<sup>[3]</sup>通过在快门时间内改变传感器的位置, 获得大景深, 但传感器的移动会降低图像的清晰度, 并引入更多的后续图像处理步骤。此外, 扩展景深图像也可以通过利用小波<sup>[4-6]</sup>、轮廓波<sup>[7-8]</sup>和焦点区域检测<sup>[9-10]</sup>等方法融合不同焦距拍摄的图像来实现。在成像系统中, 焦距的变化通常是通过镜头模块的机械移动实现的。然而, 机械运动可能会缩短成像系统的生命周期并增加系统的体积和重量。针对该问题, Bai 等<sup>[11]</sup>提出了一种使用具有电控变焦能力的液晶透镜<sup>[12]</sup>来获得扩展景深图像的方法。

Sato<sup>[13]</sup>于 1979 年首次报道了具有电控变焦特性的液晶透镜。经几十年的发展演变, 其结构与性能逐渐被开发优化<sup>[14-17]</sup>, 并已经用于光学成像系统, 已实现调焦<sup>[18]</sup>、变焦<sup>[19-20]</sup>、无偏振片成像<sup>[21]</sup>和自动对焦<sup>[22]</sup>等功能。以此设计的成像系统具有光轴固定、放大率不变等优点。Bai 等<sup>[11]</sup>证实, 液晶透镜在正负透镜状态的切换过程中能保持透镜效果。利用该特性, 在其切换过程中获取视频帧, 从而构建高质量的扩展景深图像。

然而, 图像融合计算需要较长时间, 且该时间随输入图像数量呈近似线性变化。此方法采集的每一帧图像都有相应的景深, 在空间上相互重叠, 因此没有必要使用所有的图像进行计算, 就可以获得扩展景深图像。

本文利用液晶透镜的特性, 在一次状态切换过程中采集视频, 缩减采图时间, 每张视频帧的景深都被考虑在内, 舍弃景深重叠范围内的部分图片。所提方法减少了用于融合的图像数量, 计算时间缩短, 获得了较好的实验效果, 提升了液晶透镜扩展景深图像的获取效率。

## 2 基本原理

## 2.1 液晶透镜成像系统

液晶透镜成像系统的结构如图 1 所示, 由 1 个偏振片、1 个液晶透镜、1 个镜头模块和 1 个 CMOS 图像传感器组成。液晶透镜被放置在镜头模块的前面来调节系统焦距, 并作为系统的光阑。液晶透镜不工作时, 系统对焦在物体 B 处。当液晶透镜工作在负透镜状态时, 与镜头模块的组合焦距将被延长, 根据物像关系, 物方的对焦位置会移动到更远的物体 C 处。同理, 当液晶透镜工作在正透镜状态时, 组合焦距会缩短, 对应的物方对焦位置移动到更近的物体 A 处。

该系统的组合镜头由透镜模块和液晶透镜构成。液晶透镜紧靠透镜模块, 组合镜头的焦距是

$$f = (f_g \times f_{lc}) / (f_g + f_{lc}), \quad (1)$$

式中:  $f_g$  和  $f_{lc}$  分别是镜头模块和液晶透镜的焦距。该系统的前后景深分别是

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2022-12-22; 录用日期: 2023-01-16; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: \*mao\_ye@uestc.edu.cn

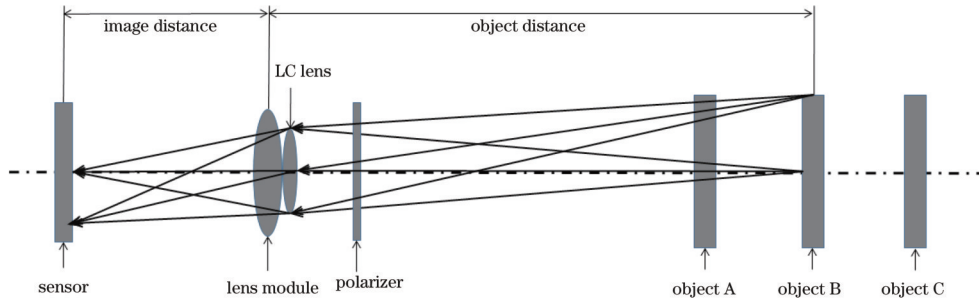


图 1 液晶透镜成像系统

Fig. 1 Optical imaging system with the liquid crystal lens

$$L_1 = (F \times \delta \times L^2) / (f^2 + F \times \delta \times L), \quad (2)$$

$$L_2 = (F \times \delta \times L^2) / (f^2 - F \times \delta \times L), \quad (3)$$

式中： $F$ 、 $\delta$ 和 $L$ 分别是镜头的F数、允许的弥散斑半径和物体与图像之间的距离。已知液晶透镜在状态切换过程中的焦距是关于时间的函数，由此就可以得到系统的对焦位置和景深随时间的变化关系，为融合所需图像提供选择依据。

### 2.2 图像选择

利用所提成像系统，在液晶透镜状态切换过程中采集视频。某时刻视频的每一帧都与系统该时刻焦距、场景中对焦物体的距离一一对应。如图 2 所示， $P_i$ 代表第  $i$  帧图像相应对焦物体的位置， $H_i$ 代表第  $i$  帧的景深范围。每一帧图像的景深与相邻帧的景深互相重叠，在融合图像时的贡献是重复的。

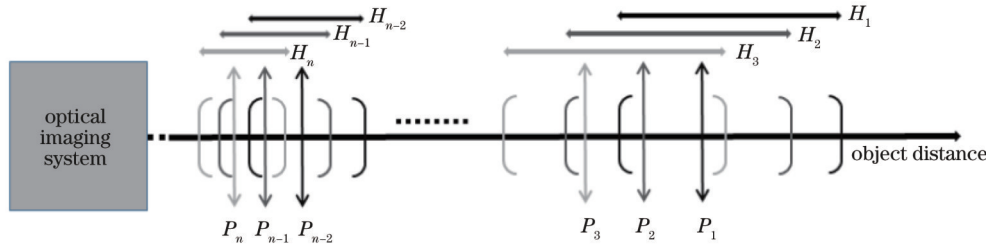


图 2 液晶透镜切换过程中系统对焦位置和对应该景深范围

Fig. 2 Focus position of system and corresponding depth of field during the switching of liquid crystal lenses

如图 3 所示，根据液晶透镜切换时焦距和时间的关系，可以选择某些视频帧，使每个选定的帧对应的景深互相不重叠。 $P_{kj}$ 和 $H_{kj}$ 分别是某帧图像的物体对焦

位置和景深范围。这样可以用最少的图像来融合图像，减少计算所需时间。

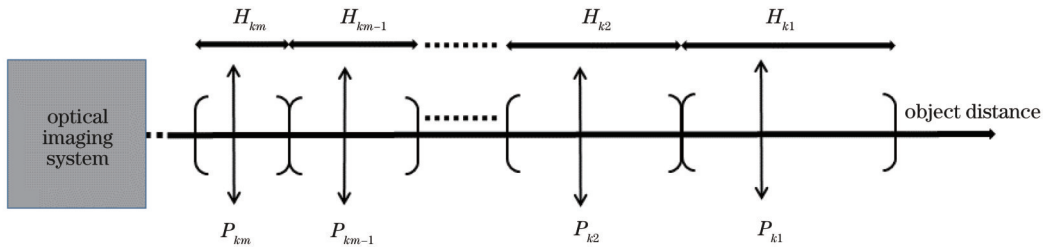


图 3 图像选择

Fig. 3 Image selection

由该思路，可以总结出所提图像选择算法，以物距由远及近计算为例，具体描述如下：

- 1) 记最远处的一帧图像  $P_1$  为  $P_{k1}$ ，其物距和前景深分别为  $U(P_{k1})$ 和 $L_1(P_{k1})$ ；
- 2) 从第二帧图像  $P_2$  开始，计算每一帧图像对应的物距  $U$  和后景深  $L_2$ ，计算  $U + L_2 - [U(P_{k1}) - L_1(P_{k1})]$ ，找到该式大于 0 且为最小的值时，记该帧图像为  $P_{k2}$ ；

- 3) 从  $P_{k2}$  下一张开始再继续计算每帧图像的物距和后景深，以同样的判据确定  $P_{k3}$ ；
- 4) 依次类推，直到计算至最后一帧图像，即获得图片序列  $P_{k1}, P_{k2}, P_{k3}, \dots, P_{km}$ ，此  $m$  张图像每张之间的景深重合最小，图像数量最少。

### 2.3 液晶透镜的结构和工作模式

本实验所用的液晶透镜结构如图 4 所示，为单层

向列项液晶圆孔结构。将厚度为 30  $\mu\text{m}$  的 HTW109100-100 液晶(各向异性折射率  $\Delta n=0.25$ )密封在两块玻璃基板之间,上面分别有 1 个圆孔图案电极和 1 个平面氧化铟锡(ITO)电极,二者间电压为  $V_1$ 。

圆孔电极的孔径直径为 2.0 mm,带有孔图案的电极的基底厚度为 0.7 mm。另一个平面 ITO 电极基板被放置在厚度为 50  $\mu\text{m}$  的孔图案电极上方,两 ITO 电极之间的电压为  $V_2$ 。

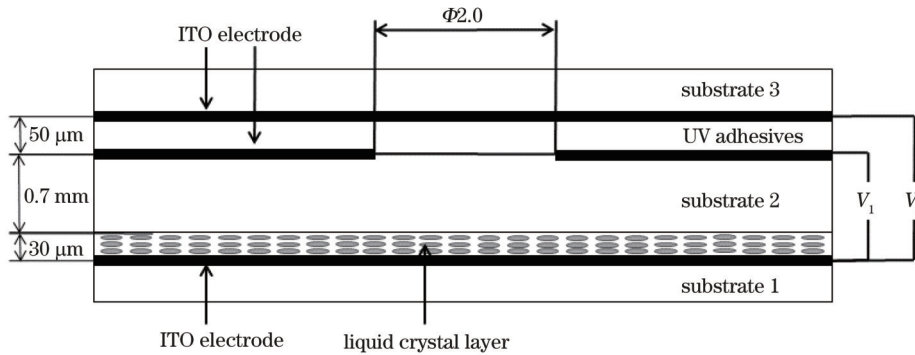


图 4 液晶透镜结构

Fig. 4 Structure of the LC lens

在液晶透镜上施加频率为 1 kHz 的交流电压  $V_1$  和  $V_2$ 。二者在液晶层产生一个空间上不均匀的、轴向对称的电场,它改变了液晶分子的方向矢量分布,形成了类似透镜的折射率分布。当  $V_1 > V_2$  时,液晶透镜为正透镜;  $V_1 < V_2$  时,液晶透镜为负透镜。调节电压,液晶透镜可以在正透镜与负透镜之间连续切换。记录透镜状态切换过程中各个时刻对应的液晶透镜的焦距,即可建立其与时间的关系。为了保证良好的图像质量,在切换过程中,液晶透镜的均方根(RMS)像差应始终小于  $0.1\lambda$ ,并且变焦能力尽可能大。

利用马赫-曾德尔干涉仪对液晶透镜的特性进行测量,如图 5 所示。①是波长为 532 nm 的固体激光器,由于液晶透镜只对 e 光进行调制,在光路②处插入偏振片,液晶透镜放置在③处。穿过液晶透镜的光束与参考光进行干涉,④是焦距为 85 mm 的镜头,将无穷远处的干涉条纹拉近至 CCD。分析干涉条纹,可以重建穿过液晶透镜的光束波前。将重建的光波前拟合到 Zernike 多项式,通过多项式系数,可推导出该液晶透镜的光焦度(power)和 RMS 像差<sup>[23]</sup>。

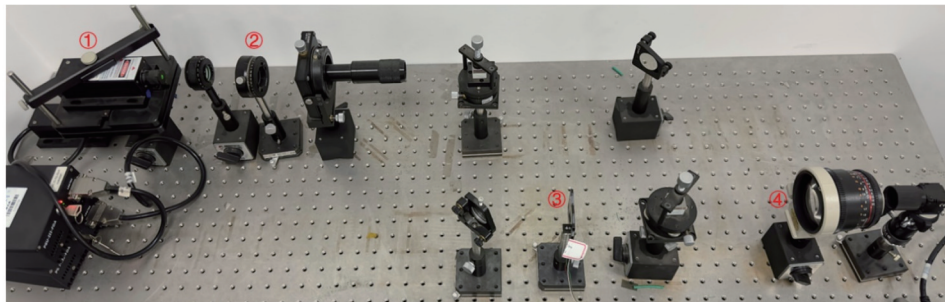


图 5 液晶透镜测试光路(马赫-曾德尔干涉仪)

Fig. 5 Test path of liquid crystal lenses (Mach-Zehnder interferometer)

对液晶透镜在不同工作电压下的工作状态进行扫描测量。频率固定为 1 kHz,  $V_2$  固定为 100 V,  $V_1$  从 5 V 扫描到 100 V;  $V_1$  固定为 90 V,  $V_2$  从 5 V 扫描到 90 V,测量不同电压下的液晶透镜的光焦度和 RMS 像差,如图 6 所示。在负透镜状态下, power 的绝对值和 RMS 像差随着  $V_1$  的增大而减小。为了满足像差和 RMS 的要求,选择  $V_1=40$  V 和  $V_2=100$  V 作为负透镜的工作电压。同样,在正透镜状态下,随着  $V_2$  的增加,透镜的 power 逐渐减小, RMS 像差也随之减小,但始终小于  $0.1\lambda$ ,因此选择  $V_1=90$  V 和  $V_2=35$  V 作为正

透镜的电压。

图 7 为电压在  $t=0$  s 时发生跳变后,液晶透镜在两个状态之间切换过程中的 power 和 RMS 像差随时间的变化。液晶透镜在由负转正的过程中,像差整体较小,即透镜状态保持较好。因此所提液晶透镜在采用过程中的加压情况:负透镜状态  $V_1=40$  V,  $V_2=100$  V,正透镜状态  $V_1=90$  V,  $V_2=35$  V,由负到正切换。Power 范围为  $-3.18\sim 4.07$   $\text{m}^{-1}$ ,切换过程中像差始终小于  $0.09\lambda$ 。

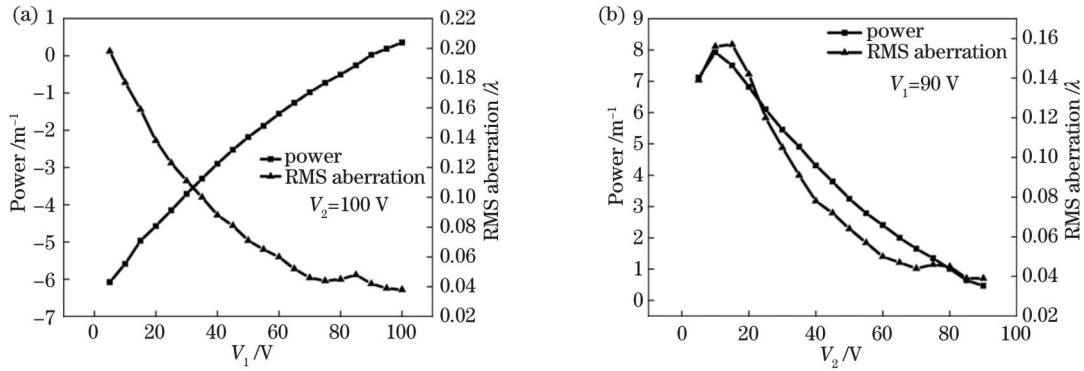


图 6 液晶透镜的驱动电压扫描。(a)固定  $V_2$  为 100 V,  $V_1$  由 5 V 到 100 V, 以 5 V 步长扫描; (b) 固定  $V_1$  为 90 V,  $V_2$  由 5 V 到 100 V, 以 5 V 步长扫描

Fig. 6 Voltage scanning of the LC lens. (a) Fixed  $V_2$  at 100 V and  $V_1$  scanned from 5 V to 100 V in 5 V steps; (b) fixed  $V_1$  at 90 V and  $V_2$  scanned from 5 V to 100 V in 5 V steps

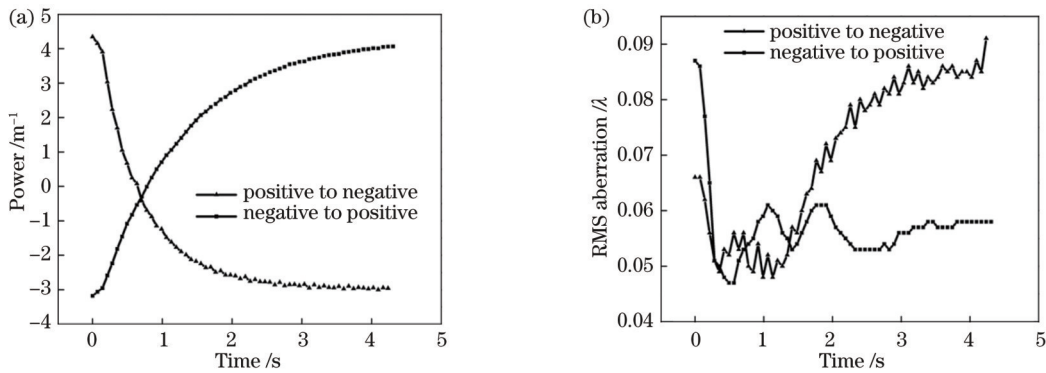


图 7 液晶透镜在切换过程中光焦度和 RMS 像差随时间的变化。(a) 光焦度随时间的变化; (b) RMS 像差随时间的变化

Fig. 7 Power and RMS aberration change with time during switching. (a) Relationship between power and time; (b) relationship between RMS aberration and time

将光焦度与时间的变化关系作为先验理论,二者的关系,对于同一个液晶透镜,在同一种工作模式下是稳定的,可重复的。再将液晶透镜应用于成像系统,根据先验知识,计算出成像系统的焦距与时间的关系。根据采集图像时照相机的采集帧率,推算出每帧图像的采集时刻,从而将图像与时间建立起联系。以时间为桥梁进行映射,即获得了每帧图像对应的系统焦距,根据物像关系,物距也可以与图像一一映射,从而根据所提方法进行图像的筛选。

#### 2.4 扩展景深图片融合方法

采用复值小波扩展景深融合方法<sup>[4]</sup>,将输入图片的彩色通道以方差为依据动态地赋予不同权重,确保贡献较多细节的通道对灰度图的贡献也相对较大。将 Lina 等<sup>[24]</sup>提出的复值多贝基斯小波 (complex Daubechies wavelet bases) 作为所提图像融合算法的复值小波基,提高了融合规则的鲁棒性,具体融合过程如下。

对待融合图像堆栈中的每一张图像  $s_i$  进行二维离散复值小波变换 (CTW), 表达式为

$$\text{CWT}: s_i \rightarrow \{c_j\}, \quad (4)$$

可以获得每张图像的每个尺度  $j$  的复值系数  $c_j$ 。融合

决策规则采取小波分解系数最大值法,每个尺度系数的最大绝对值对应着该尺度下最清晰的内容变化。将各个尺度的最大绝对值作为系数保留下来,从而获取每张图对应对焦区域的高频信息。再对融合后的系数矩阵  $\{d_j\}_j$  进行逆 CWT, 表达式为

$$\text{CWT}^{-1}: \{d_j\}_j \rightarrow p, \quad (5)$$

获得融合图像  $p$ 。在逆变换过程中,像素往往为复数,经验证,选取实部作为融合图像时像素效果更佳<sup>[6]</sup>。最后,对融合灰度图进行多通道重分配,获得多通道的彩色融合图。图 8 为用融合方法获得的扩展景深图像。图 8(a)~(c) 和图 8(e)~(g) 为液晶透镜成像系统拍摄的多聚焦图像。图 8(d) 和图 8(h) 为利用复值小波融合的图像,保留下每张源图像中最清晰的部分,即对焦位置下的输出图像。

### 3 实验与分析

#### 3.1 成像系统物距及景深的计算

成像系统的主透镜焦距为 8 mm, 光圈直径为 2.86 mm, 像距为 8.2 mm。根据物像关系, 结合式 (1) 系统组合焦距公式、式 (2) 和式 (3) 前后景深公式, 可以计算出该成像系统的物距、景深随液晶透镜光焦度的

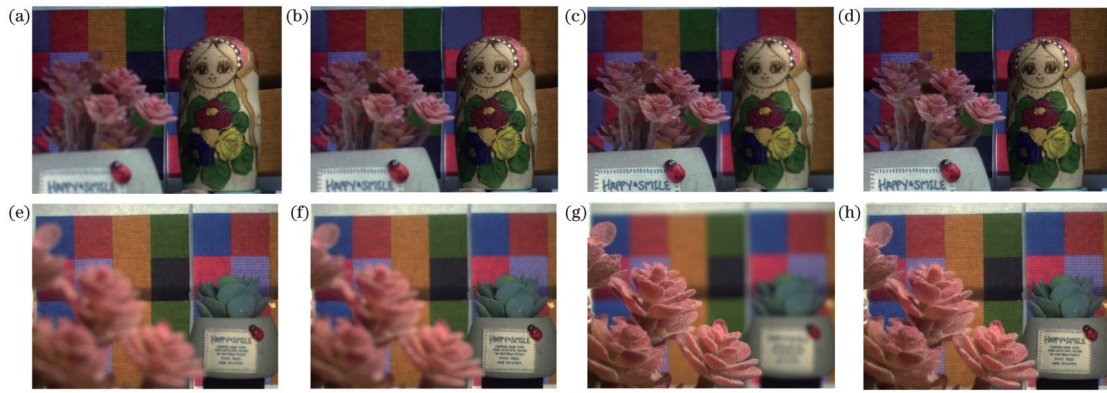


图 8 复值小波方法得到的融合图像。(a)对焦背景;(b)对焦玩偶;(c)对焦花朵;(d)多聚焦图像图 8(a)~(c)融合;(e)对焦背景;(f)对焦叶子;(g)对焦花朵;(h)多聚焦图像图 8(e)~(g)融合  
Fig. 8 Fused images using complex-valued wavelets. (a) Focus on the background; (b) focus on the doll; (c) focus on the flowers; (d) fusion of multi-focus images Fig. 8(a)~(c); (e) focus on the background; (f) focus on the leaves; (g) focus on the flowers; (h) fusion of multi-focused images Fig. 8(e)~(g)

变化关系,如图 9(a)所示。根据图 7(a)中液晶透镜在切换过程中的 power 和时间的关系,以 power 为桥梁,构建出系统物距、景深随时间的变化曲线,如图 9(b)

所示。液晶透镜初始为负透镜状态,对应的物距较远,景深较大,在透镜切换过程中,物距和景深随着 power 或时间的增加而指数减小。

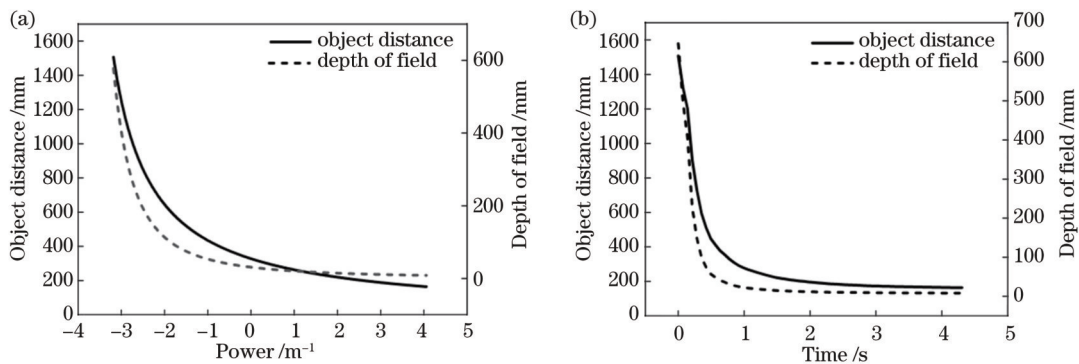


图 9 液晶透镜切换过程中,物距、景深随光焦度、时间的变化。(a)物距、景深随液晶透镜光焦度的变化;(b)物距、景深随时间的变化  
Fig. 9 Change of object distance and depth of field with power and time during the switching of liquid crystal lens. (a) Change of object distance and depth of field with power of liquid crystal lens; (b) change of object distance and depth of field with time

### 3.2 液晶透镜成像系统搭建及图像采集

所用相机模块为明美 MD50-T3,分辨率为  $1920 \times 1080$ ,通过程序调用相机开始拍摄视频,再切换液晶透镜驱动电压,实现状态切换。在透镜由负到正切换过程中,拍得帧率为 13.8 Hz 的视频,相邻帧的间隔为 0.072 s。将拍摄的视频导出为图像,计算每帧图像的平均梯度和前后相邻两帧图像的交叉熵。通过对比相邻帧之间的平均梯度变化和交叉熵,来判断液晶透镜的响应开始与结束。液晶透镜状态切换过程中采集的图像共 77 张。对于同一个液晶透镜,在同一种工作模式下,其电控变焦特性是相对稳定的,因此上述实验过程是可重复的。图 10 展示了视频中分别对焦在各物上的各帧图像。采用所提算法,获取扩展景深图像全部 77 张图像中的 24 张。图 11(a)为全部 77 张图像融合获得的扩展景深图,图 11(b)为对所提算法选出的 24 张

图像进行融合获得的扩展景深图。

### 3.3 融合图像评价

对于融合图像的评价,分为客观与主观两种方式,图 11 中的两图主观差异较小,因此引入客观评价指标平均梯度(AG)来评价扩展景深图像融合效果。如图 12 所示,在融合图像  $S_1$ 、 $S_2$  和相应的源图像中选择相同的感兴趣区域(ROI),用 AG 来评价图像质量。

如表 1 和表 2 所示,用全部图像融合获取的扩展景深图片的清晰度在一定程度上有所牺牲, $S_1$  的平均梯度相比源图像退化 2%~6.5%。虽然融合图清晰程度有所下降,但相较于其扩展景深的显著优势,此退化程度是可以接受的,而在主观感受上融合图与源图像相比并无明显模糊现象。 $S_1$  与  $S_2$  的 AG 相对差异大多为 1%~2%,可以忽略不计。在某些区域,融合图像  $S_1$  的 AG 高于源图像,这可能是图像融合过程中 ROI 的高

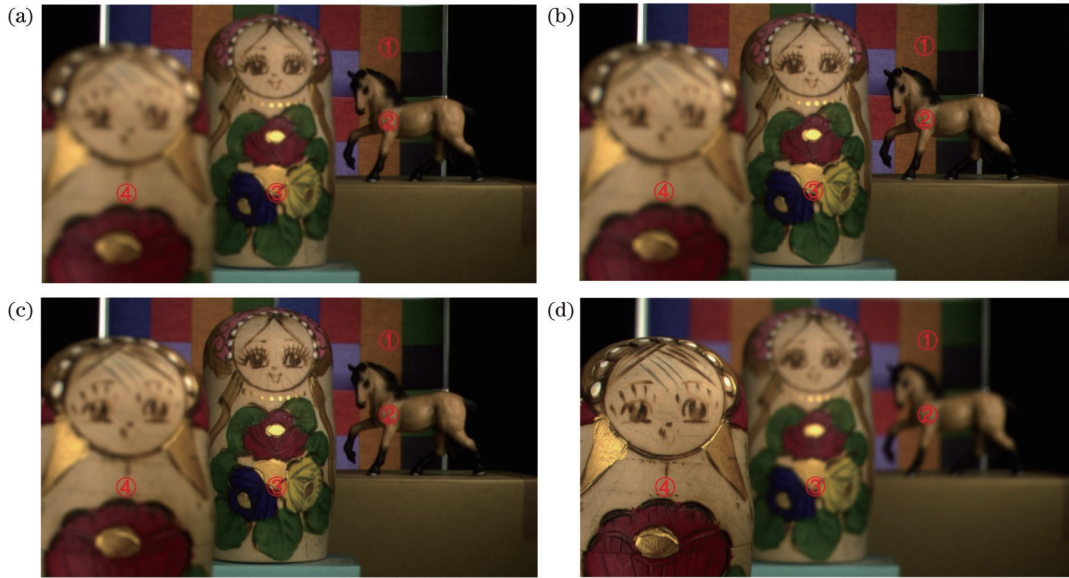


图 10 视频序列中对焦在各物体的图像。(a)对焦①处;(b)对焦②处;(c)对焦③处;(d)对焦④处  
Fig. 10 Frames focus on each object. (a) Focus on the ①; (b) focus on the ②; (c) focus on the ③; (d) focus on the ④

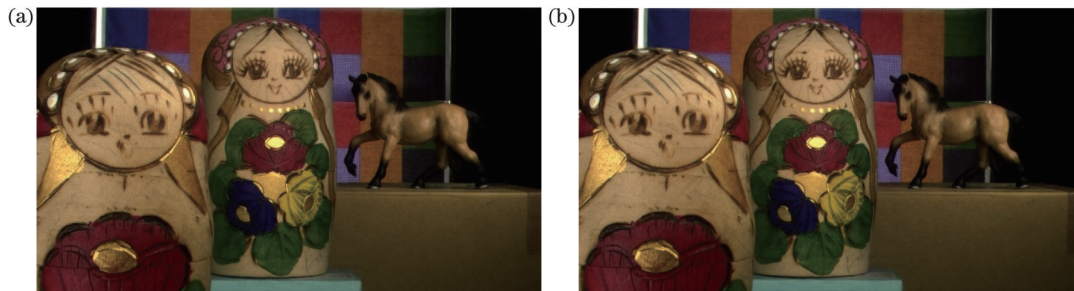


图 11 扩展景深图。(a)全部图片融合图  $S_1$ ; (b)选定图片融合图  $S_2$   
Fig. 11 Extended depth of field images. (a) Fusion of all images,  $S_1$ ; (b) fusion of selected images,  $S_2$

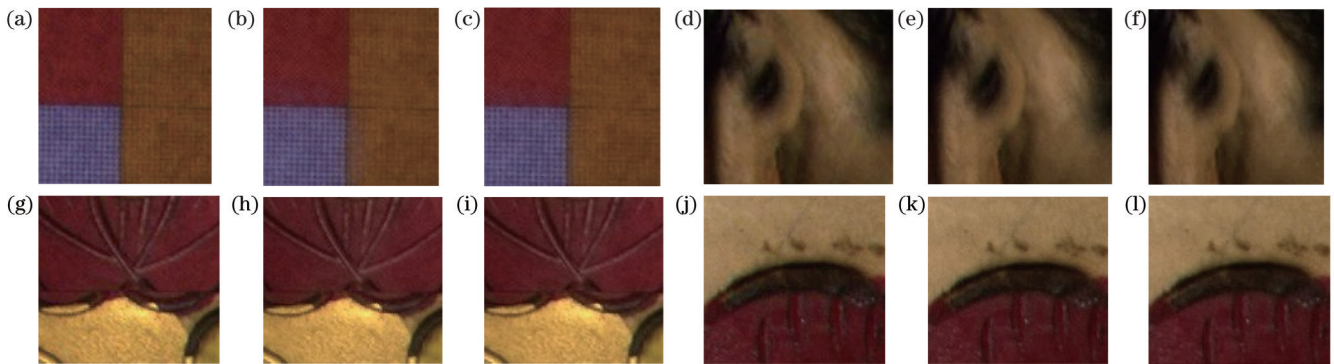


图 12 不同图片的相同 ROI 对比。(a)源图像中的背景;(b)  $S_1$  中的背景;(c)  $S_2$  中的背景;(d)源图像中的马;(e)  $S_1$  中的马;(f)  $S_2$  中的马;(g)源图像中的中间玩偶;(h)  $S_1$  中的中间玩偶;(i)  $S_2$  中的中间玩偶;(j)源图像中的左侧玩偶;(k)  $S_1$  中的左侧玩偶;(l)  $S_2$  中的左侧玩偶  
Fig. 12 Comparison of the same ROI for different images. (a) Background in the source image; (b) background in  $S_1$ ; (c) background in  $S_2$ ; (d) horse in the source image; (e) horse in  $S_1$ ; (f) horse in  $S_2$ ; (g) intermediate doll in the source image; (h) intermediate doll in  $S_1$ ; (i) intermediate doll in  $S_2$ ; (j) left doll in the source image; (k) left doll in  $S_1$ ; (l) left doll in  $S_2$

频噪声叠加造成的。

综上,可以认为  $S_1$  和  $S_2$  在视觉上效果相当,信息量基本一致,与主观观察的效果相符合。对于通过融

合 24 幅选定的图像获得的扩展景深图像  $S_2$ , 达到了融合全部 77 幅图像的效果。

表 1 源图像、 $S_1$ 与 $S_2$ 对应 ROI 的平均梯度  
Table 1 AG of ROI of source image,  $S_1$ , and  $S_2$

ROI	Background	Horse	Intermediate doll	Left doll
Source	1.0172	0.8745	1.5865	0.8367
$S_1$	0.9534	0.8363	1.5175	0.8543
$S_2$	0.9351	0.8257	1.5011	0.8090

表 2 源图像与  $S_1$ 、 $S_1$ 与 $S_2$ 对应 ROI 的平均梯度差异  
Table 2 AG difference of ROI between source image and  $S_1$ ,  $S_1$  and  $S_2$

ROI	Background	Horse	Intermediate doll	Left doll
Source and $S_1$	6.3%	4.4%	4.3%	2.1%
$S_1$ and $S_2$	1.9%	1.3%	1.1%	5.3%

### 3.4 效率提升分析

图像融合算法的输入为一组待融合图像,输出为一张扩展景深图像,输入图像的数量直接影响了融合算法的计算时间。图 13 为所提图像融合算法的计算时间随输入的图像数量的变化关系,所用的电脑配置为 i5-8400 @ 2.80 GHz, RAM 8 GB。由图 13 可知,计算时间与图像数量近似为线性关系,所提算法通过减少输入图像数量,可以线性缩短图像处理时间,从而缩短获取扩展景深图像的时间,提高获取效率。所提算法将融合所用图像数量减少为现有基于液晶透镜的景深扩展技术的 31.2%,计算时间从 64 s 缩短至 22 s,缩短为现有基于液晶透镜的景深扩展技术的 34.38%,大幅提高了获取扩展景深图像的效率,节省了计算时间。

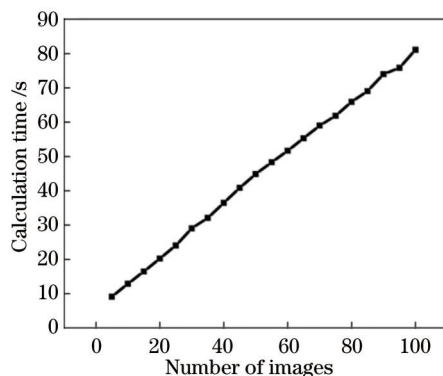


图 13 计算时间随输入图像数量的关系

Fig. 13 Relationship between calculation time and number of images

所提算法的效率的提升不仅与电脑性能有关还与采图时硬盘写入速度相关。前者直接与图像融合的计算时间有关,而后者影响液晶透镜切换过程中采集到的图像数量。对于相机来说,高帧率采图已经是比较常见的功能,但受限于硬盘的写入速度,往往会迫使相机以较低的帧率进行采集。虽然此举会从一定程度上

减少输入图像数量,但会引入景深无法前后相接的风险。因此想要获得较高质量的扩展景深图像,必然需要尽可能高的帧率,这意味着在液晶透镜切换过程中会采集到更多的图像,但经所提算法的筛选,合成所用图像数量不会有较大波动,从而效率提升将更加显著。因此,所提算法获取扩展景深图像的能力会随着硬件性能的增强而得到进一步提升。

## 4 结 论

提出了一种基于液晶透镜的扩展景深的方法。将液晶透镜的电控变焦特性与系统的物距、景深相结合,改善了获取扩展景深图像所需时间较长的缺点。在液晶透镜一次状态切换过程中采集图像,缩短拍摄时间。利用景深、物距和时间之间的关系去除景深重叠的图像,使用较少的图像来获取扩展景深图像,减少图像融合计算所需时间。本文实验的输入图像数量减少至现有基于液晶透镜的景深扩展技术所需图像数量的 31.2%,计算时间缩短至 34.38%。与现有的方法相比,所提方法显著提高了获取扩展景深图像的效率,在主观和客观评价方面,都取得了较好的实验结果。随着硬件性能的提升,所提算法的效率提升效果也会得到进一步增强。

### 参 考 文 献

- [1] Welford W T. Use of annular apertures to increase focal depth [J]. Journal of the Optical Society of America, 1960, 50(8): 749-753.
- [2] Mino M, Okano Y. Improvement in the OTF of a defocused optical system through the use of shaded apertures[J]. Applied Optics, 1971, 10(10): 2219-2225.
- [3] Kuthirummal S, Nagahara H, Zhou C Y, et al. Flexible depth of field photography[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(1): 58-71.
- [4] Forster B, van de Ville D, Berent J, et al. Complex wavelets for extended depth-of-field: a new method for the fusion of multichannel microscopy images[J]. Microscopy Research and Technique, 2004, 65(1/2): 33-42.
- [5] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(3): 235-245.
- [6] Forster B, Van De Ville D, Berent J, et al. Extended depth-of-focus for multi-channel microscopy images: a complex wavelet approach[C]//2004 2nd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Nano to Macro, April 18, 2004, Arlington, VA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 660-663.
- [7] Li X S, Zhou F, Tan H, et al. Multi-focus image fusion based on nonsubsampling contourlet transform and residual removal[J]. Signal Processing, 2021, 184: 108062.
- [8] Selvaraj A, Ganesan P. Infra-red and visible image fusion using multi-scale NSCT and rolling-guidance filter[J]. IET Image Processing, 2020, 14(16): 4210-4219.
- [9] Wang Y, Li X, Zhu R, et al. A multi-focus image fusion framework based on multi-scale sparse representation in the gradient domain[J]. Signal Processing, 2021, 189: 108254.
- [10] Tan J, Zhang T, Zhao L, et al. Multi-focus image fusion with Geometrical Sparse Representation[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 92: 116130.
- [11] Bai Y C, Chen X, Ma J, et al. Transient property of liquid

- crystal lens and its application in extended depth of field imaging [J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125974.
- [12] Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with a focal length variable from negative to positive values[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 79-81.
- [13] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [14] Wang B, Ye M, Honma M, et al. Liquid crystal lens with spherical electrode[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(11A): L1232-L1233.
- [15] Ye M, Sato S. Optical properties of liquid crystal lens of any size [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41(5B): L571-L573.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 胡轶瑶, 刘志强, 孙涛, 等. 利用液晶透镜实现的局部变倍成像系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2311001.  
Hu Y Y, Liu Z Q, Sun T, et al. The local zoom imaging system using liquid crystal lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2311001.
- [21] 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 polariser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0711004.
- [22] Schrag J F, Sanderson A C, Neuman C P, et al. The implementation of automatic focussing algorithms for a computer vision system with camera control[EB/OL]. [2022-10-09]. [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub3/schlag\\_john\\_f\\_1983\\_1/schlag\\_john\\_f\\_1983\\_1.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/schlag_john_f_1983_1/schlag_john_f_1983_1.pdf).
- [23] Chen X, Li G Y, Li P W, et al. Driving method for liquid crystal lens to increase focus range[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(6): 336-337.
- [24] Lina J M, Mayrand M. Complex daubechies wavelets[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 1995, 2(3): 219-229.

## Extended Depth of Field Imaging Using Liquid Crystal Lenses

Sun Jialin, Liu zhiqiang, Ye Mao\*

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

### Abstract

**Objective** The limited depth of field (DOF) is a common problem in imaging. It is typically desired to obtain images with a large DOF, and many methods have been reported in this regard, for example, wavefront coding, optical toe cutting, and focus scanning. However, changes in the aperture of a lens degrade image quality and increase the exposure time, and movements of detectors reduce the sharpness of the obtained images. Extended DOF images can also be realized by wavelet, contour wave, and focus area fusions of images captured with different focal lengths. The focus change is typically realized by the position changes of lenses. However, mechanical movements may shorten the life cycle and increase the volume and weight of an imaging system. Bai *et al.* found that a liquid crystal (LC) lens preserves their properties during state switching, which has been used to acquire video frames during the switching process to obtain high-quality extended DOF images. In this process, images can be easily acquired, but it takes a long time to calculate the DOF. Each frame in a video has a corresponding DOF that overlaps with other DOFs of the same video. It is not necessary to use all images for fusion, providing us with an idea to improve image acquisition efficiency by extending the DOF. In this study, aiming at the disadvantage that the existing method of acquiring extended DOF images by LC lenses requires a long time, a method for improving the efficiency of extended DOF imaging using the focus tuning property of LC lenses is proposed, which can significantly reduce the image acquiring time of extended DOF imaging.

**Methods** The imaging system consists of a polarizer, an LC lens, a lens module, and a CMOS sensor. The DOF of the system can be calculated using the focal length of the main lens, the focal length of the LC lens, the F-number of the lens, the allowable speckle radius, and the object distance. First, the structure of the LC lens used in our experiment is described. The preservation of the lens property of the LC lens when it is driven to switch between positive and negative states is used to acquire images for the calculation. The voltage of the LC lens was scanned and measured. The power of the Lens is a function of time, and then, the relationship between the focus position of the system, DOF, and calculation time can be obtained. Then, by considering the DOF of each image, the DOF corresponding to each selected frame does not overlap. The number of images used can be significantly reduced, and the image processing time can be shortened. In



this study, the complex value wavelet extended DOF fusion method is used to adaptively map the input image stack from color scalar and variance to a single-channel grayscale image, ensuring that channels with more details contribute more to the grayscale image. Finally, the difference between the images obtained using the proposed method and existing methods is compared in terms of the average gradient (AG), and the efficiency improvement performance of our algorithm is analyzed.

**Results and Discussions** The camera module used in this study is Ming Mei MD50-T3, and the acquisition resolution is  $1920 \times 1080$ . 77 images were acquired during the state switching of the LC lens. Fig. 10 shows the images focused on each object. With the proposed method, the number of images required for expanding the DOF is 24. Fig. 11 shows the expanded DOF images fused with all 77 images and 24 images. There are a few subjective differences between the two image types. AG is used to evaluate the fusion effect of expanded DOF images. As shown in Fig. 12, the same region of interest was selected for the fusion of the two image types and the corresponding source images. Image sharpness is sacrificed in the expanded DOF images obtained by fusing all images, and the AG of  $S_1$  degrades by approximately 2%–6.5% relative to the source image. Although the clarity of the fusion image is reduced, the degree of degradation is acceptable compared with its significant advantage of DOF, and there is no obvious ambiguity phenomenon compared with the source image. The AG difference between  $S_1$  and  $S_2$  is mostly between 1% and 2%, which can be ignored.  $S_1$  and  $S_2$  can be thought to be equivalent to the visual effect. Image  $S_2$ , acquired by the fusion of the 24 selected images, achieves the same effect as the fusion of the 77 images. In this experiment, the number of images used for fusion is reduced to 31.2% of the original method, and the calculation time is reduced to 34.38% of the original method. This significantly improves the efficiency of image fusion and reduces the computation time.

**Conclusions** A method of extending the DOF of images is proposed based on an LC lens. The preservation of the lens property of the LC lens when it is driven to switch between positive and negative states is used to acquire images for computation. The number of images used is significantly reduced by considering the DOF of each image, which shortens the image calculation time. Compared with existing DOF fusion methods based on LC lenses, the number of images used in this experiment is reduced to 31.2%, the calculation time is reduced to 34.38%, and the fusion efficiency is significantly improved. According to the experimental results in both subjective and objective evaluations, the extended DOF images have high quality.

**Key words** liquid crystal lens; extended depth of field; depth of field calculation; image fusion