

基于视角补偿的双层液晶显示图像分割算法研究

冯奇斌¹, 苏凯², 王梓¹, 吕国强^{2*}¹合肥工业大学特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 液晶显示存在对比度不高的固有问题, 已受到 OLED 显示技术的巨大冲击。双层液晶显示能有效降低漏光, 提高对比度, 但由于存在两块液晶面板, 显示两层图像, 倾斜观看时双层液晶会出现伪影, 影响显示质量。为解决这一问题, 提出一种基于视角补偿的图像分割算法, 记录不同视角下光线通过前后液晶面板的位置, 建立相应的映射矩阵, 通过计算优化两层屏幕的透过率, 使得所有设定视角下重构图像和原图像的误差最小。仿真结果表明, 在 5 个不同的视角下, 基于本文算法处理后的图像峰值信噪比 (PSNR) 均高于现有模糊算法, 由此说明本文算法能够较好地权衡双屏液晶显示的显示质量和视角。

关键词 衍射; 液晶显示; 双屏; 图像分割; 视角; 算法

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1005001

Viewing-Angle-Compensation-Based Image Segmentation Algorithm for Dual-Layer LCDs

Feng Qibin¹, Su Kai², Wang Zi¹, Lü Guoqiang^{2*}¹ National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;² School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract Due to its low contrast ratio (CR), liquid crystal display (LCD) is greatly challenged by OLED. Dual-layer LCD can effectively reduce the light leakage and improve the CR. However, its two LC panels can display two layers of images, and displayed ghosts may appear in the case of oblique view, which deteriorates the display quality. To this end, we proposed a viewing-angle-compensation-based image segmentation algorithm. Then, the positions of light at different viewing angles that passed through the two LC panels were recorded and the mapping matrix was therefore established. The transmittance of the dual-layer LCDs was optimized to obtain the minimum error between the initial image and the reconstructed image at all the set viewing angles. The simulation results show that at five viewing angles, the proposed algorithm presents larger peak signal to noise ratio (PSNR) than the other existing algorithms, which proves that this algorithm can achieve a better tradeoff between image quality and viewing angles.

Key words diffraction; liquid crystal display; dual-layer; image segmentation; viewing angle; algorithm**OCIS codes** 050.7330; 090.2890; 220.4610

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-12-01; 录用日期: 2020-12-06

基金项目: 安徽省科技重大专项 (2019b05050001)

* E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

1 引言

液晶显示经过多年的发展,已经成为主流平板显示技术。但由于液晶分子不能完全闭合、上下偏振片不能完全正交等,液晶器件在显示黑场时存在漏光现象,对比度不高,受到了 OLED 显示技术的巨大冲击。为了提高对比度,研究人员提出动态调光技术。动态调光技术可以根据显示图像动态调整背光亮度和液晶像素开度^[1-6]。要实现背光亮度的实时调节,需要对背光进行分区设计,形成能够独立控制亮度的多个分区。对于采用 LED 作为发光光源的背光模块,由于每个分区至少包括一个或多个 LED 光源,分区面积不可能达到像素级别,最终的调光效果受到影响。随着半导体技术的发展,LED 芯片尺寸缩小到几百个微米级别,称为 mini-LED。Mini-LED 直下式背光为实现像素级调光提供了可能性^[7],但极大地增加了电路控制难度和成本。

另外一种提高对比度的技术是双层液晶显示^[8-10]。双层液晶显示器是将两块液晶面板用高透过率的光学胶绑定在一起,能有效降低漏光,提高对比度。但由于存在两块液晶面板,如果将显示图像直接输送到两块液晶面板上,将导致倾斜观看时出现像素错位,影响显示质量。为了提高倾斜观看时的显示质量,目前存在的图像分割算法基本上是将

送到后面一层液晶面板(靠近背光)的图像进行模糊处理,形成亮度一样的小分区,当倾斜观看时,此方式能够保证后面一层液晶面板的显示亮度是一样的^[11-15]。基于模糊处理的图像分割算法简单,但会造成图像的细节损失,从而影响显示质量。本文拟借鉴光场成像的方法,提出基于视角补偿的图像分割算法,通过平衡显示质量和视角之间的矛盾,达到更好的显示效果。

2 基于视角补偿的图像分割算法

2.1 双屏显示原理介绍

双屏液晶显示器主要包括背光模块和前后两块液晶面板,如图 1 所示,从下到上分别是背光模块(Backlight)、液晶面板 1(LCD panel-1)、光学胶(OCA)和液晶面板 2(LCD panel-2)。液晶面板 1 包括偏光片 1(Polarizer-1)、薄膜晶体管(TFT)基板 1(TFT-1)、液晶层 1(LC-1)、滤色膜(CF)的基板 1(CF-1)、偏光片 2(Polarizer-2),液晶面板 2 包括偏光片 3(Polarizer-3)、TFT 基板 2(TFT-2)、液晶层 2(LC-2)、CF 基板 2(CF-2)、偏光片 4(Polarizer-4)。液晶面板 1 靠近背光,液晶面板 2 面对观看者。液晶面板 1 的 CF 基板通常没有彩色滤色膜,也没有遮光膜,这样可以允许较多的背光光线通过,保证屏前亮度。

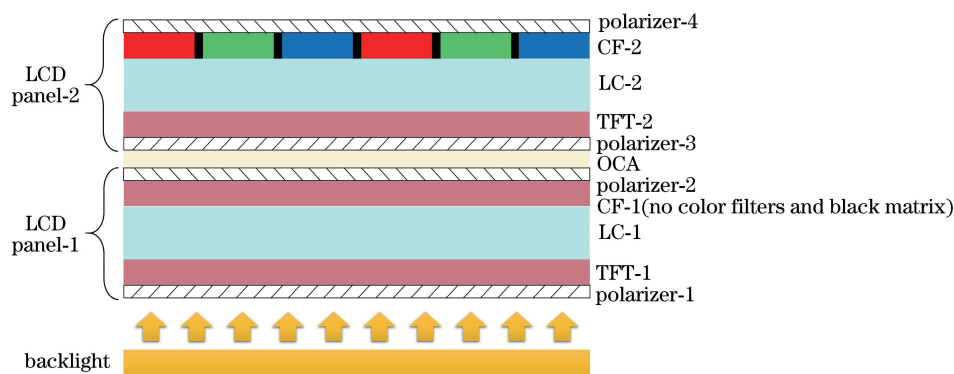


图 1 双层液晶显示器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a dual-layer LCD

背光模块发出的光线经过偏光片 1 后由自然光变成线偏光,经过液晶面板 1 后形成没有颜色的灰度图像,经过液晶面板 2 后形成彩色图像,经过偏光片 4 后这两幅图像都进入人眼。从图 2 可以看出,当显示图像同时送入两块液晶面板时(前后液晶面板显示同样的图像,但 Panel-1 由于没有滤色膜,显示的是灰度图像),观看者倾斜观看时,液晶面板 1 和液晶面板 2 的像素出现错位,造成图像伪影。

2.2 基于模糊处理的图像分割算法

为了消除伪影,文献[11]提出一种基于模糊处理的图像分割算法(简称模糊算法),即将靠近背光一侧的液晶面板(panel-1)的像素亮度进行模糊处理。如图 3 所示,当观看者在一定角度内观看显示图像时,panel-1 显示的像素亮度是一样的,可以在一定程度上减少由于前后液晶面板像素错位导致的伪影现象的发生。如果前后两块液晶面板的分辨率

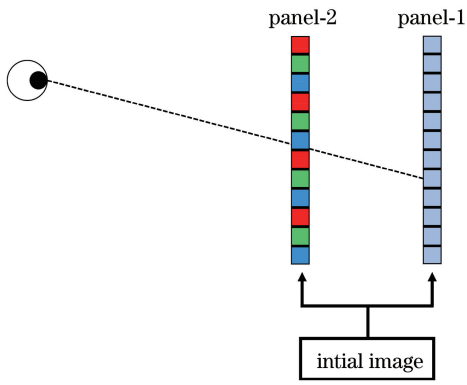


图 2 倾斜观看双层液晶显示器出现像素错位现象
Fig. 2 Pixel mismatch of a dual-layer LCD initial image in the case of oblique view

分别是 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$ 和 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 即 panel-1 的像素尺寸是 panel-2 的 2 倍时, 当观看视角大于 34° 时, 光线将进入另外一个分区, 造成伪影; 而当前后两块液晶面板的分辨率分别是 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$ 和 $960 \text{ pixel} \times 540 \text{ pixel}$, 即 panel-1 的像素尺寸是 panel-2 的 4 倍时, 观看视角为 34° , 进入后面板的光线依然在同一个分区内, 只有观看视角大于 56° 时, 才会出现伪影。可以看出, 后面板的模糊区域越大, 越利于改善伪影, 但对

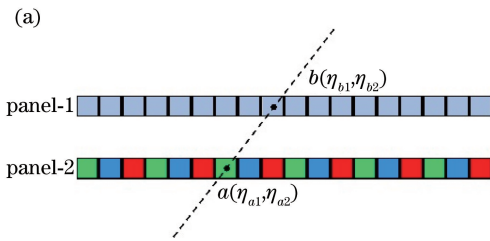


图 4 光线经过两层液晶面板示意图。(a) 光线经过两层液晶面板的位置信息; (b) 在不同视点观看双层屏的所有光线
Fig. 4 Schematic diagrams of light passing through two LCD panels. (a) Position information on two LCD panels; (b) beams from different viewing angles

设背光亮度为 l_B , 点 a 和点 b 的透过率分别为 $T(\eta_{a1}, \eta_{a2})$ 和 $T(\eta_{b1}, \eta_{b2})$, 经过双层液晶面板后的亮度为 $L(\eta_{a1}, \eta_{a2}, \eta_{b1}, \eta_{b2})$, 则有

$$L(\eta_{a1}, \eta_{a2}, \eta_{b1}, \eta_{b2}) = T(\eta_{a1}, \eta_{a2}) \cdot T(\eta_{b1}, \eta_{b2}) \cdot l_B, \quad (1)$$

其中, $\eta_{a1}, \eta_{a2}, \eta_{b1}, \eta_{b2}$ 表示像素坐标值。为方便后续计算, 将亮度归一化后两边取对数, 得

$$\ln[L(\eta_{a1}, \eta_{a2}, \eta_{b1}, \eta_{b2})] = \ln[T(\eta_{a1}, \eta_{a2})] + \ln[T(\eta_{b1}, \eta_{b2})]. \quad (2)$$

在不同视角观看双层屏显示的图像时, 每条光线都需要通过两层液晶面板才能达到人眼。设定显示图像像素总数为 m , 将所有像素沿列方向从上到

于光线的调控越粗糙, 越容易造成细节损失。现有的模糊算法很难兼顾显示质量和观看视角。

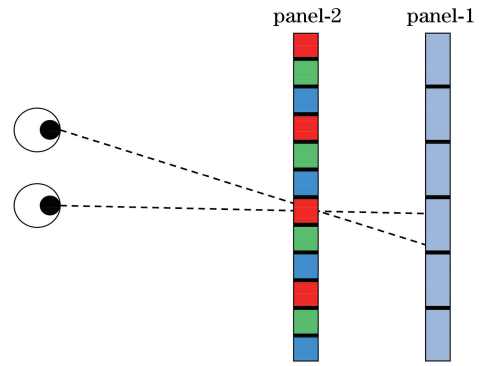
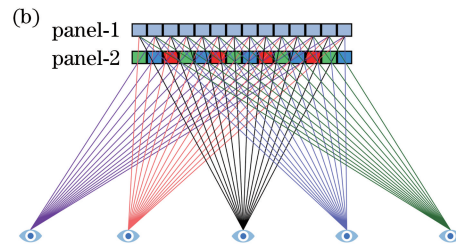


图 3 模糊处理与视角的关系
Fig. 3 Relationship between fuzzy processing and viewing angle

2.3 基于视角补偿的图像分割算法

本文借鉴光场成像的原理^[16-18], 提出基于视角补偿的图像分割算法(简称本文算法), 其基本原则是保证不同视角下经两层液晶面板后的叠加图像和输入图像的差异最小。如图 4 所示, 一条光线经过两块液晶面板时, 分别记录下他们的位置信息, 如图 4(a) 所示, a 和 b 两点分别是光线经过 panel-2 和 panel-1 的像素点。



下、从左到右依次排列, 需要显示的目标图像可以表示为 1 维向量 C_{init} , 表达式为

$$C_{\text{init}} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, c_1 是图像最上、最左的像素灰度值的对数, c_m 是图像最下、最右的像素灰度值的对数。

当观看视角为 θ 时, 使用映射矩阵 $S^{(\theta)}$ 记录每条光线穿过两层液晶面板的位置信息, 1 维向量 $C^{(\theta)}$ 表示视角为 θ 时经过两层液晶面板后叠加图像

灰度值的对数, 考虑到存在两层液晶面板, 两层面板所有像素透过率的对数可由包括 $2m$ 个数据的 1 维向量 \mathbf{X} 表示, 三者满足 $\mathbf{C}^{(\theta)} = \mathbf{S}^{(\theta)} \mathbf{X}$, 具体表达式为

$$\begin{pmatrix} c_1^{(\theta)} \\ c_2^{(\theta)} \\ \vdots \\ c_m^{(\theta)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{1,1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{1,m}^{(\theta)} & \delta_{1,m+1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{1,2m}^{(\theta)} \\ \delta_{2,1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{2,m}^{(\theta)} & \delta_{2,m+1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{2,2m}^{(\theta)} \\ \delta_{3,1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{3,m}^{(\theta)} & \delta_{3,m+1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{3,2m}^{(\theta)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{m,1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{m,m}^{(\theta)} & \delta_{m,m+1}^{(\theta)} & \cdots & \delta_{m,2m}^{(\theta)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ x_{2m} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: $c_1^{(\theta)}, c_2^{(\theta)}, \dots, c_m^{(\theta)}$ 为视角为 θ 时图像每个像素灰度的对数值; 映射矩阵 $\mathbf{S}^{(\theta)}$ 的每一行代表一条光线, 如第一行 $\delta_{1,1}^{(\theta)}, \dots, \delta_{1,m}^{(\theta)}$ 与 x_1, \dots, x_m 对应且只有一个元素为 1, 其余元素为 0, $\delta_{1,m+1}^{(\theta)}, \dots, \delta_{1,2m}^{(\theta)}$ 与 x_{m+1}, \dots, x_{2m} 对应且只有一个元素为 1, 其余元素为 0, 以此记录每条光线穿过两层面板的位置信息。

为了达到最佳重构画面, 将所有视角的叠加图像向量 $\mathbf{C}^{(\theta)}$ 和目标图像向量 \mathbf{C}_{init} 代入

$$\min \left\| \sum_{\theta=1}^n (\mathbf{C}^{(\theta)} - \mathbf{C}_{\text{init}}) \right\|_2^2, \quad (5)$$

采用 MATLAB 提供的 LSQLIN 算子, 通过不断迭代对向量 \mathbf{X} 进行优化, 得到重构图像和原图像误差最小时所有像素的透过率。

3 基于视角补偿的图像分割算法仿真及讨论

为了验证本文提出的基于视角补偿的算法, 并与模糊算法进行比较, 对两种算法分别进行了仿真。仿真时, 模糊算法中前后液晶面板的分辨率分别设置为 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$ 和 $960 \text{ pixel} \times 540 \text{ pixel}$; 本文算法选取 $0^\circ, \pm 41^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 共 5 个视角进行计算。图 5 给出了 60° 视角观看下原图像 [图 5(a)]、基于模糊处理算法处理后的图像 [图 5(b)] 和基于视角补偿算法处理后的图像 [图 5(c)]。图中矩形方框是对局部区域的放大图, 可以看出, 采用本文提出的算法能较好地保存图像细节。

为了对重构后的图像进行客观评价, 引入峰值信噪比 (R_{PSN}) 作为评价指标, 表达式为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \left(\frac{I_{\text{MAX}}^2}{E_{\text{MS}}} \right), \quad (6)$$

$$E_{\text{MS}} = \frac{\sum_{i=1}^{o-1} \sum_{j=1}^{p-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2}{o \times p}, \quad (7)$$

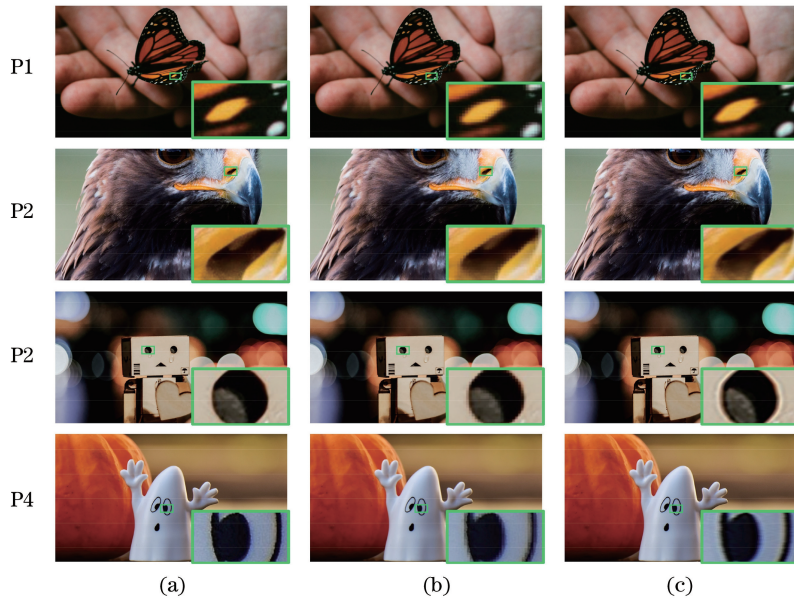


图 5 图像处理效果对比。(a)原图像;(b)基于模糊处理的算法;(c)基于视角补偿的算法
Fig. 5 Comparison images. (a) Original images; (b) images after fuzzy processing algorithm; (c) images after viewing-angle-compensation algorithm

式中, E_{MS} 表示处理后图像和原图像的均方误差, $I(i, j)$ 和 $K(i, j)$ 分别表示处理后图像和原图像在 (i, j) 像素点的灰度值, $o \times p$ 是图像分辨率, I_{MAX} 表示图像的最大灰度值。本文图像的最大灰度值为 255。仿真时采用数据错位的方式模拟不同视角下的观看效果。表 1 给出了 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 等不同视角下模糊算法和本文算法处理后的图像的 R_{PSN} 。可以看出, 在各个视角下由本文算法重构的图像的 R_{PSN} 值都要高于现有的模糊算法, 其中 15° 、 30° 、 45° 的视点并非迭代计算时使用的视点, 而是重建画面时选取的视点, 以此验证了在随机视点上本文算法的有效性。

表 1 两种算法处理的 R_{PSN} 值
Table 1 R_{PSN} of two algorithms

Picture	Angle / ($^\circ$)	R_{PSN}/dB	
		Fuzzy processing algorithm	Viewing-angle-compensation algorithm
P1	0	40.5750	43.0582
	15	40.7679	42.3531
	30	40.6346	42.4001
	45	40.4178	42.4001
	60	38.7866	41.8876
P2	0	32.6357	34.9556
	15	32.8941	33.6000
	30	32.6810	33.8741
	45	32.4335	34.7929
	60	30.1110	33.7586
P3	0	40.1613	45.4237
	15	40.2695	44.3831
	30	40.2360	44.5107
	45	39.9521	45.0299
	60	37.1978	41.2402
P4	0	34.6842	36.9933
	15	34.5368	35.5927
	30	34.4744	35.5844
	45	34.5033	36.3291
	60	32.0409	35.6584

4 结 论

双层液晶显示能有效提高显示对比度, 但由于存在前后两块液晶面板, 倾斜观看时会因像素错位而影响显示质量。本文提出基于视角补偿的图像分割算法, 记录不同视角下光线通过前后液晶面板的位置, 建立相应的映射矩阵, 通过计算优化两层屏幕的透过率, 使得所有设定视角下重构图像和原图像误差最小。仿真结果证明, 本文所提算法即便在大

视角下观看, 依然能更好地保存图像细节, 很好地平衡了显示质量和观看视角之间的矛盾。

参 考 文 献

- [1] He H J, Feng Q B, Zhang L, et al. Global dimming algorithm based on image classification [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823002.
何会杰, 冯奇斌, 张磊, 等. 基于图像分类的全局动态调光算法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823002.
- [2] Feng Q B, He H J, Han D, et al. Image-classification-based global dimming algorithm for LED backlights in LCDs [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 70: 106-111.
- [3] Zhang T, Hu M Y, Du W L, et al. Adjustable adaptive local dimming method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121017.
张涛, 胡孟阳, 杜文丽, 等. 一种新型可调节的自适应区域调光方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121017.
- [4] Feng Q B, He H J, Zhang W W, et al. Global dimming algorithm for side-lit LED backlights [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1455-1462.
冯奇斌, 何会杰, 张伟伟, 等. 用于侧出式发光二极管背光的全局动态调光算法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1455-1462.
- [5] Zhang T, Zeng Q, Du W L, et al. Regional backlight brightness extraction algorithm based on deep learning [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2210003.
张涛, 曾琴, 杜文丽, 等. 基于深度学习的区域背光亮亮度提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2210003.
- [6] Yoo O, Nam S, Choi J, et al. P-108: contrast enhancement based on advanced local dimming system for high dynamic range LCDs [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 1667-1669.
- [7] Guan E H, Cheng X Y, Zhang X, et al. 17-3: a novel pixel-level local dimming backlight system for HDR display based on mini-LED [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 51(1): 231-234.
- [8] Chen H W, Zhu R D, Li M C, et al. Pixel-by-pixel local dimming for high-dynamic-range liquid crystal displays [J]. Optics Express, 2017, 25(3): 1973-1984.
- [9] Liu W D, Mu L J, Xu A C, et al. 17-6: invited paper: 4K HDR "stacked-panel" TV based on dual-cell LCD [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 51(1): 243-245.
- [10] Guo L, Shao X B, Liao Y P, et al. 10-2: invited paper: development of dual-cell LCD with mega

- contrast [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 51(1): 119-121.
- [11] Xiao Z L, Chen H B. Double-layer liquid crystal screen, backlight brightness control method and device and electronic device: CN108877694A [P]. 2018-11-23 [2020-10-02]. <https://zhuanli.tianyancha.com/d15ecb9f572d2fa634a16541c365e339>. 肖志林, 陈洪波. 一种双层液晶屏、背光亮度控制方法、装置及电子设备: CN108877694A [P]. 2018-11-23 [2020-10-02]. <https://zhuanli.tianyancha.com/d15ecb9f572d2fa634a16541c365e339>.
- [12] Guarnieri G, Albani L, Ramponi G, et al. Minimum-error splitting algorithm for a dual layer LCD display: part I: background and theory [J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(4): 383-390.
- [13] Guarnieri G, Albani L, Ramponi G, et al. Minimum-error splitting algorithm for a dual layer LCD display: part II: background and theory [J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(4): 383-390.
- [14] Guarnieri G, Albani L, Ramponi G, et al. Image splitting techniques for a dual layer high dynamic range LCD display [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6917: 69170M.
- [15] Jiang J, Chen C, Marcu G, et al. Devices and methods of image-splitting for dual-layer high dynamic range displays: US14/836645 [P]. 2016-06-16 [2020-10-02]. <https://www.freepatentsonline.com/y2016/0170702.html>.
- [16] Ma Q G, Cao L C, He Z H, et al. Progress of three-dimensional light-field display [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111001.
- [17] Fang L, Dai Q H. Computational light field imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111001. 方璐, 戴琼海. 计算光场成像 [J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111001.
- [18] Coleman T F, Li Y Y. A reflective Newton method for minimizing a quadratic function subject to bounds on some of the variables [J]. SIAM Journal on Optimization, 1996, 6(4): 1040-1058.