

激光与光电子学进展

基于频域平移的高分辨率光场显示仿真研究

余毅^{1,2}, 李晖^{1,2,3*}, 许明慧¹, 吴云韬^{1,2}

¹武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;

²智能机器人湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

³华中科技大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对光场显示中分辨率偏低的问题, 提出了一种基于频域平移的仿真方法。通过搭建虚拟相机阵列对三维物体的光场信息进行采集, 获得元素图像集合; 在频域中通过平移, 生成元素图像集合的位移信息; 采用时分复用的方法, 将原始的元素图像集合与频率平移后的信息进行融合, 得到高分辨率光场显示结果。相较于传统方法, 所提出的方法实现过程相对简单, 计算速度快, 并具有较高的显示质量, 在光场显示仿真领域, 具有较大的应用潜力。

关键词 光场显示; 仿真; 元素图像集合; 频域平移; 时分复用

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0107001

High-Resolution Light Field Display Simulation Based on Frequency Domain Translation

Yu Yi^{1,2}, Li Hui^{1,2,3*}, Xu Minghui¹, Wu Yuntao^{1,2}

¹*School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China;*

²*Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan, Hubei 430205, China;*

³*School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract In order to alleviate the low-resolution issue, a three-dimensional (3D) display simulation method based on frequency domain translation has been proposed. A virtual camera array has been built to collect the light field information of 3D objects to obtain the element array image (EIA). The shifted information of simulation EIA of 3D object can be generated by translation. The simulation EIA has fused with the shifted data. The final 3D display result can be obtained by time division multiplexing. Compared with the traditional methods, the proposed method is relatively simple, which has faster calculation speed and better display quality. And it has great development potential in the prediction and optimization of the light field display.

Key words light field display; simulation; elemental image array; frequency domain translation; time division multiplexing

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51703071, 61771353)、湖北省自然科学基金面上项目(2019CFB553)、湖北省教育厅科研重点项目(D20171504)、智能机器人湖北省重点实验室开放基金项目(HBIR202001)、教育部新一代信息技术创新项目(2020ITA05049)

通信作者: lihui00317@163.com

1 引言

人类身处于三维空间,人眼观察到的现实世界都是由三维物体所构成。然而,传统的平面显示技术只能提供二维图像,无法让观众体验到相应的深度信息。这种三维深度信息的缺失感,不仅严重背离了人眼感知世界的视觉习惯,而且还给现有的平面显示技术提出了极大的挑战。当前,光场显示作为一种新兴三维显示技术,能让观众感受到具有深度信息的三维图像,展现了立体显示的特性。该技术受到众多国内外研究人员的重点关注,已广泛应用于许多领域,如娱乐(电视、视频、电影)、工业检查、安全与国防,以及生物医学等^[1-4]。

在大多数情况下,构建一个光场显示系统是一件极为复杂的工作。在没有模拟仿真结果的条件下,研究人员很难直观设计出高性能的光场显示系统。因此,如何有效模拟高分辨率的三维显示结果,成为了当前光场领域最热门的研究课题之一。Park等^[5]提出了一种立体显示中交互式三维模型的仿真方法:该方法可就立体显示系统的多项参数,如光强分布、噪声、双目距离等,分别进行仿真模拟;但随着三维物体细节信息的增加,该方法的计算量也会大幅提高。针对计算量大的问题,Jung等^[6]使用蒙特卡洛积分算法进行模拟计算,实现了快速的光场显示仿真,但其结果的分辨率仍有待提升。Jeong等^[7]提出了一种新型光场显示的仿真方法:将一个像素划分为若干个子像素进行分析,解决了仿真过程中的三维串扰问题;但该方法在像素校准上仍旧存在较大误差,并且时间消耗较大。Guan等^[8]提出了一种基于向后光线追踪的视觉仿真算法:该算法可快速生成光场显示结果,拥有显示分辨率高、视场大等优点;但该方法对硬件系统有较高的要求,在实际应用方面仍存在瓶颈。Yao等^[9]提出了一种基于矩阵光学的近眼显示系统:建立了微透镜阵列的参数化模型,该模型可模拟微透镜阵列的成像过程,该方法可以快速获得仿真的三维图像;但该方法需要使用二维样本进行仿真测试,无法实现复杂三维模型的显示仿真。Wang等^[10]提出了一种合成孔径的光场显示方法:在空间域对微透镜阵列进行平移以提升显示分辨率,并通过仿真呈现了光场显示结果;但该方法在移动微透镜阵列时,获取的图像易受光线影响,同时会产生动态串扰。由此可见,光场显示仿真中仍旧存在串扰较多、计算量较大、显示结果分辨率

较低等共性问题,亟待深入研究。

时至今日,光场显示的仿真除了空间域的方法外,还有频率域的仿真方法。Inoue等^[11]提出了一种基于傅里叶域体素计算重建的方法:在傅里叶域,通过重聚焦来加工像素信息,以提高三维图像在横向和纵向的分辨率;但该方法没有充分利用采集到的光场信息,图像分辨率仍有提升空间。Ale等^[12]提出了频域平移(FDT)理论,对光线数据进行多路复用;通过实验发现,使用该方法后,光场显示结果中的图像角谱分辨率得以提升。这表明频域平移方法是解决光场显示分辨率偏低等共性问题的一个突破口。但将频率平移、时分复用相结合以提升光场显示分辨率的研究,还亟待进一步深入、详细的探讨。

本研究针对现有光场显示仿真研究中存在的串扰较多、计算量较大、显示结果分辨率较低等共性问题,拟采用频率平移、时分复用方法相结合一并解决。所提出的仿真算法无需昂贵的硬件支持,也无需大计算量;可在较短时间内,获得高质量的光场显示仿真结果。这对发展新型高分辨率光场显示方法具有重要意义。

2 基本原理

首先使用虚拟相机阵列采集三维物体的光场信息,获得元素图像集合(EIA);通过四维傅里叶变换获得元素图像集合的频域信号,并在频域空间内对元素图像集合实现平移,获得若干新的元素图像集合;最后,通过时分复用的方法,将得到的元素图像集合高速刷新显示在屏幕上,利用人眼的生理暂存特性,将平移后的元素图像集合与原始数据进行融合,获得高分辨率的光场显示结果。具体流程如图1所示。

2.1 光场的采集

采用双平面参数来表征光场的分布情况,如图2所示。假设 $L(u, v, s, t)$ 表示光场的一个采样, L 为光线强度, (u, v) 和 (s, t) 分别为光线与两个平面 U 面、 S 面的交点坐标,微透镜阵列单个单元的孔径大小为 d ^[13]。CCD面所接收到的光照强度可表示为

$$I(x, y) = \iint L(x, y, s, t) ds dt. \quad (1)$$

以虚拟相机阵列代替微透镜阵列采集的子图像构成元素图像集合。为便于分析说明,将采集过程简化为二维情形,具体过程如图3所示。

2.2 基于频率域平移重构元素图像集合的方法

经过频域平移处理重构单幅元素图像集合的具体过程如图4所示。

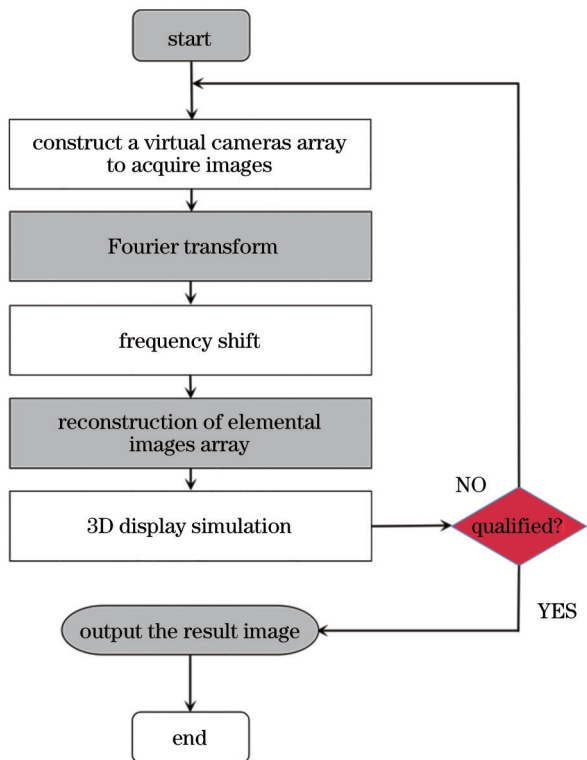


图 1 光场显示仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of light field display simulation

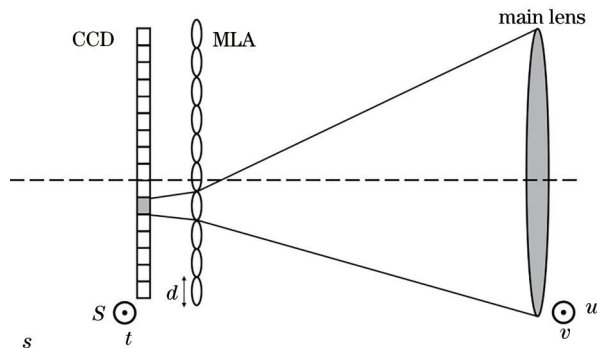


图 2 基于微透镜阵列的光场采集

Fig. 2 Light field collection based on micro-lens array

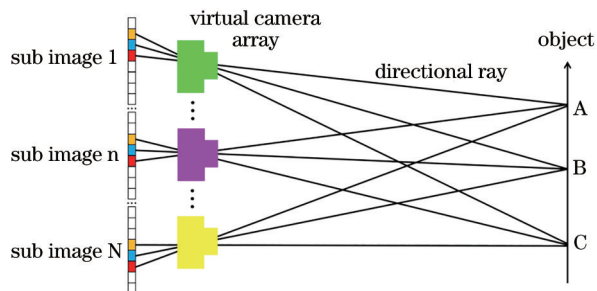


图 3 基于虚拟相机阵列的光场采集

Fig. 3 Light field collection based on virtual camera array

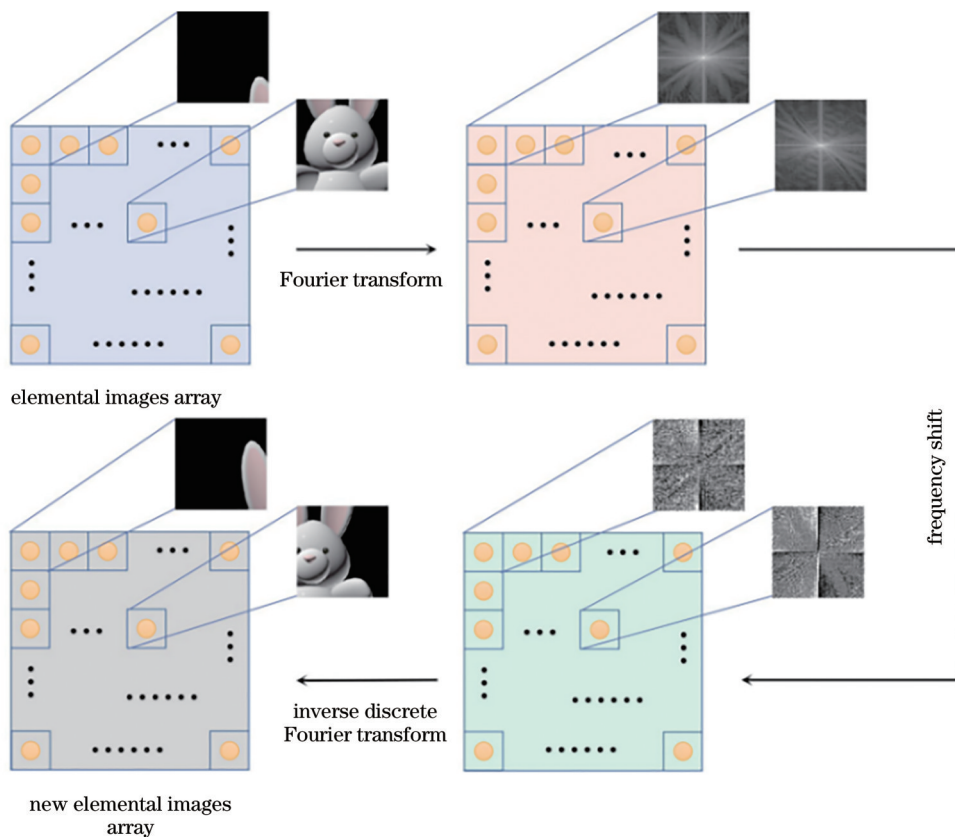


图 4 频域平移法获得新元素图像集合的过程

Fig. 4 Processing steps of producing the new EIA by the FDT theory

在频域平移 (u_0, v_0) 后,根据四维傅里叶变换的特性知:

$$L(u, v, s, t) \exp [j2\pi(u_0s/N_s + v_0t/N_t)] \Leftrightarrow \mathcal{F}(u - u_0, v - v_0, s, t), \quad (2)$$

式中,

$$\mathcal{F}(u - u_0, v - v_0, s, t) = \frac{1}{N_s N_t} \sum_{u=0}^{N_s-1} \sum_{v=0}^{N_t-1} L^{u,v}(s, t) \exp[-j2\pi(\omega_s u/N_s + \omega_t v/N_t + u_0s/N_s + v_0t/N_t)]. \quad (3)$$

2.3 时分复用

在光场显示的实现过程中,元素图像集合的采样率是由微透镜阵列间隔(或虚拟相机阵列间隔)所决定。图像成像分辨率的上限^[14]由奈奎斯特采样定理决定:

$$\beta_{nyq} \approx z_a/2p_a, \quad (4)$$

式中: β_{nyq} 表示分辨率, p_a 表示相机阵列间隔, z_a 表示相机物镜与传感器之间的距离。在频域内对元素图像集合进行平移,实际上改变了微透镜阵列的采样点,这样会明显提高空间采样率。随即可对获取的光场信息进行时分多路复用,具体过程如图 5 所示。

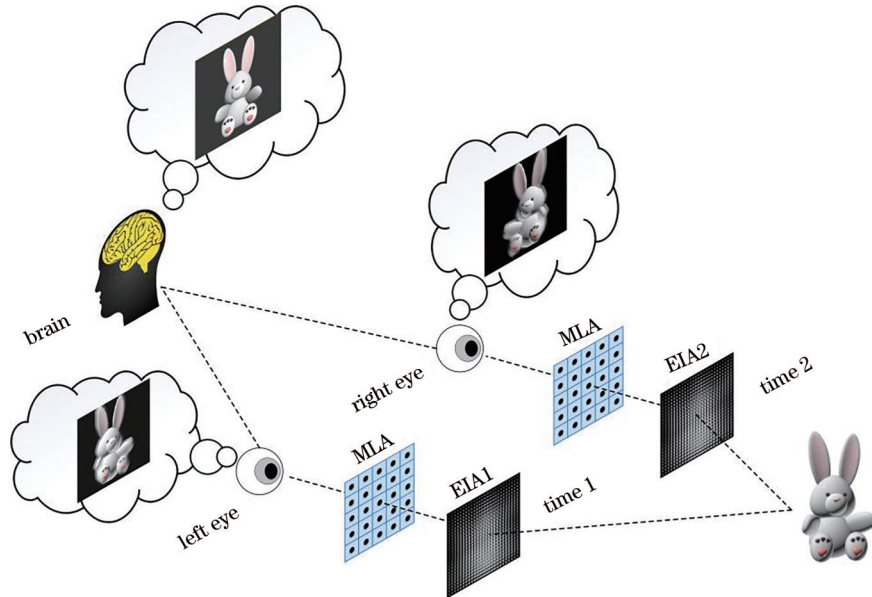


图 5 时分复用过程示意图

Fig. 5 Process of time division multiplexing

3 结果分析与讨论

为了验证所提出方法仿真光场显示的效果,使用 3DMAX2016 软件创建了三个三维模型,依次为“兔子”、“汽车”和“茶壶”,其中三维模型三角面片数量依次为 8368、7443 和 1551。为了采集三维物体的光场信息,在 3DMAX2016 软件中设置了虚拟相机阵列,其中相机阵列数为 45×45 ,相机焦距为 206.55 mm,相机间距 0.1 mm,相机视角为 45° ,相机分辨率为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 。在光场显示端,所设置的仿真微透镜阵列数据为:相邻两个单元微透镜间距为 0.1 mm,微透镜阵列焦距为 206.55 mm,微透镜阵列数为 $45 \text{ pixel} \times 45 \text{ pixel}$,微透镜阵列折射率为 1.5,其散射损耗为 0.01。最终

光场显示仿真结果传输至液晶显示器上,其分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 。此外,用于模拟仿真的计算机软硬件配置为:处理软件为 MATLAB 2018b;处理器为 Intel®Core™-i7-4790 CPU@ 3.6 GHz,显卡为 NVIDIA®GeForce GTX 1050 (4 GB),以及内存为 4 GB RAM。

如图 6(d)~(f)所示,采集到三个物体(“兔子”、“汽车”、“茶壶”)的元素图像集合;运用所提出的频域平移的方法,可以获得相应的仿真结果如图 6(g)~(i)所示。

图 7 展示了不同平移参数值的选择对于实验结果的影响。由于透镜阵列呈周期性排列,为了减少计算量,平移值不大于透镜阵列的单个节距^[7]。如图 7(a)所示,由于静态串扰的存在,当平移值与透镜

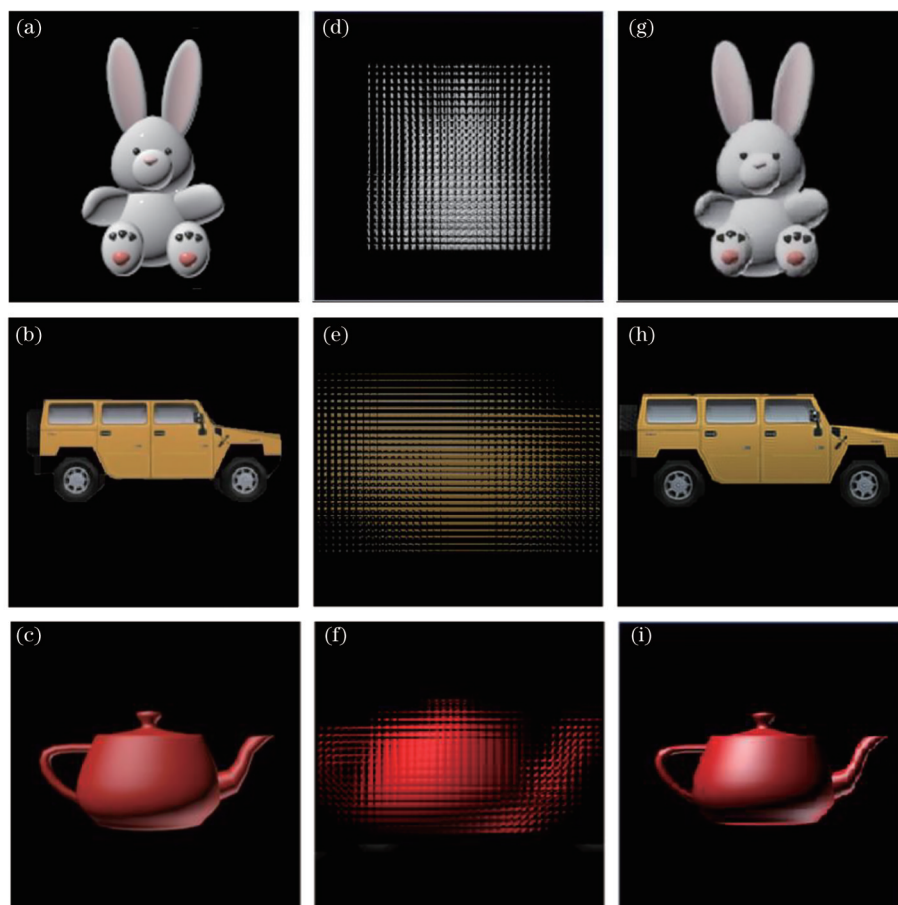


图 6 频域平移法获得的在屏幕上的仿真结果。(a)~(c)为渲染的三维物体图;(d)~(f)为元素图像集合;(g)~(i)为频域平移法得到的显示结果图

Fig. 6 Simulation images with the proposed FDT technique shown in the display screen. (a)~(c) Renders of original 3D objects; (d)~(f) elemental image array; (g)~(i) display results obtained by FDT method

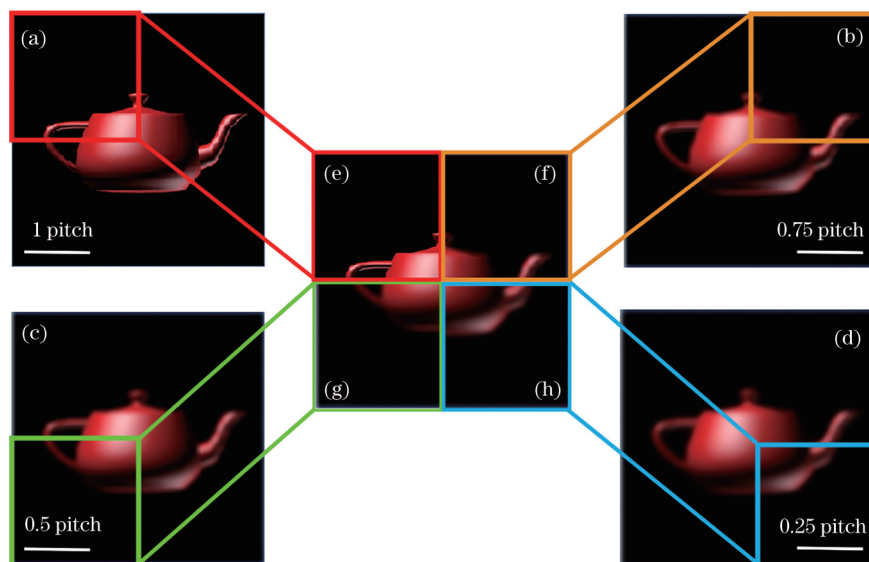


图 7 不同平移值的实验结果比较。(a) 1倍节距的显示结果;(b) 0.75倍节距的显示结果;(c) 0.5倍节距的显示结果;(d) 0.25倍节距的显示结果;(e)~(h)为(a)~(d)的4种不同情况

Fig. 7 Comparative result images with different values of shift. (a) 1 pitch; (b) 0.75 pitch; (c) 0.5 pitch; (d) 0.25 pitch; (e)~(h) four different cases of (a)~(d)

节距相等时,显示图像分辨率最佳。图 7(b)~(d) 分别展示了平移值为透镜阵列节距的 0.75, 0.5 和 0.25 倍时获得的显示结果,模型的边界均出现了不同程度的模糊情况。

图 8(a)~(l) 中展示的是,使用在第二部分提出的频域平移的方法,分步骤获得高分辨率光场显示的结果。其中,图 8(a) 是通过虚拟相机阵列所采集到的元素图像集合;图 8(b) 是通过频域平移得到元素图像集合之一;为了更加清晰地呈现

两幅图像之间的差异,两幅元素图像集合的局部放大图如图 8(c) 和图 8(d) 所示;求得图 8(c) 和图 8(d) 的视差如图 8(e) 所示,通过对比,在频域平移后,元素图像集合的分辨率没有太大变化;图 7(a) 和图 7(b) 经过四维傅里叶变换后,如图 8(f) 和图 8(g) 所示;图 8(h) 和图 8(i) 是图 8(f) 和图 8(g) 的局部放大图像;利用相位相关谱可以计算图 8(h) 和图 8(i) 的相位信息和差异关系,如图 8(j) 所示。

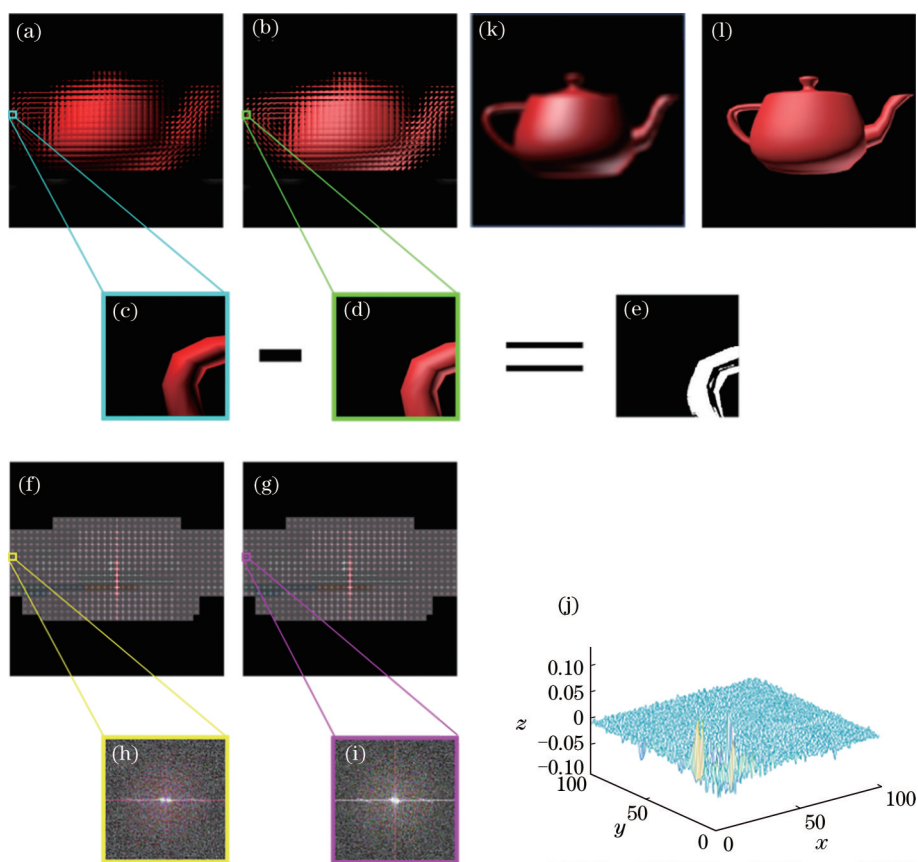


图 8 基于所提出的频率平移理论分步骤仿真结果。(a) 是“茶壶”的元素图像集合;(b) 是使用频率平移理论得到的“茶壶”的新元素图像集合;(c) 和 (d) 是 (a) 和 (b) 的局部放大图像;(e) 是 (c) 和 (d) 的视差;(f) 是 (a) 的 4D 傅里叶变换结果;(g) 是 (b) 的 4D 傅里叶变换结果;(h) 和 (i) 是 (f) 和 (g) 的局部放大图像;(j) 是 (a) 和 (b) 的相位相关谱结果;(k) 和 (l) 是 (a) 和 (b) 的显示结果

Fig. 8 Simulation result based on the FDT theory. (a) EIA of “Teapot”; (b) new EIA of “Teapot” obtained by FDT theory; (c) and (d) local enlarged image of (a) and (b); (e) parallax of (c) and (d); (f) 4D Fourier transform result of (a); (g) 4D Fourier transform result of (b); (h) and (i) local enlarged image of (f) and (g); (j) correlation spectrum phase result of (a) and (b); (k) and (l) displayed results of (a) and (b)

为了进一步证明提出算法的有效性,采用 Yao 等提出的矩阵光学近眼光场显示, Wang 等提出的合成孔径光场显示法和 Inoue 等提出的傅里叶体素计算重建法等三个方法的仿真算法部分作对比实验^[6-8]。具体对比实验过程为:分别采用上述方法对同一个三维物体进行光场显示模拟仿真,并与所提

出的算法得到的显示结果进行直观比较,对比实验结果如图 9 所示。

其中,矩阵光学近眼光场显示法:是通过矩阵光学的原理仿真,重建了一个微透镜阵列的参数化模型,并在该基础上实现了光场显示过程;但该计算方法带来的计算量较大,很难进行实时应

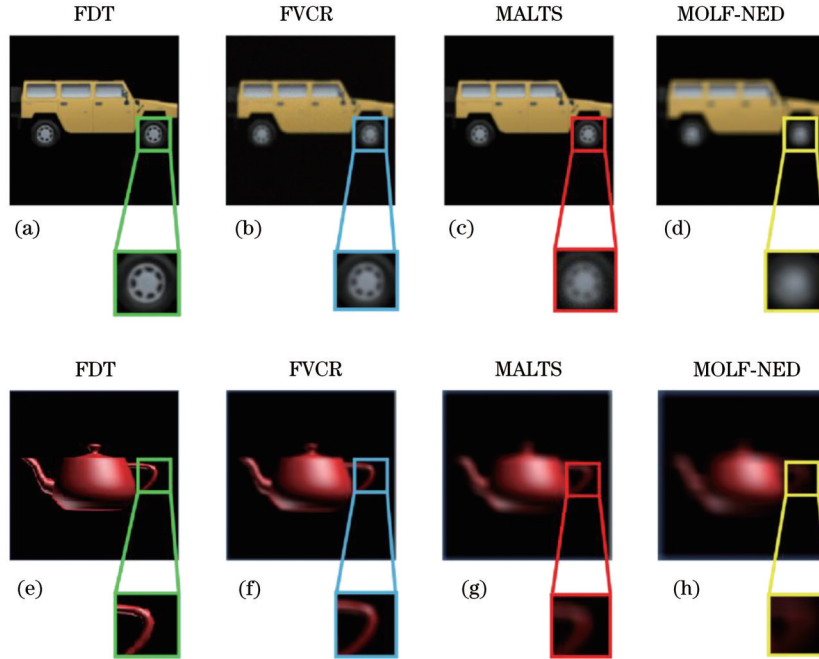


图 9 不同仿真方法下获得的仿真显示结果图比较。(a)和(e)所提出的频域平移方法;(b)和(f)傅里叶体素重建(FVCR);(c)和(g)合成孔径光场显示仿真法;(d)和(h)矩阵光学近眼光场显示仿真法(MOLF-NED)

Fig. 9 Comparative result images of various methods. (a) and (e) frequency domain translation; (b) and (f) Fourier volumetric computational reconstruction (FVCR); (c) and (g) synthetic aperture integral imaging display simulation with moving array lenseslets technique; (d) and (h) matrix optics light field near-eye display(MOLF-NED)

用^[9]。而合成孔径光场显示仿真法(MALTS)是通过在空间域中,移动微透镜阵列以提高采样率,从而提升最终显示结果的分辨率;但在实际调节时,该系统需要一定的响应时间,易于产生动态串扰,相应会使显示质量降低^[10]。使用傅里叶体素计算重建法进行仿真时:仅需对一张元素图像集合进行傅里叶频域处理,算法较为简洁,并可突破衍射极限,图像结果分辨率较高;但是在运算过程中,会丢失部分三维信息,图像质量仍有提升的空间^[11]。

相较于图 9 中呈现的其他三种光场显示仿真方法,提出的方法是在频域中对采集到的元素图像集合进行平移处理,并将处理后得到元素图像集合高速刷新在液晶显示屏幕上,通过人眼的余晖效应将显示的图像进行融合,获得高分辨率的光场显示结

果。所提出的方法等同于,在突破衍射极限的条件下,提高了虚拟微透镜阵列的采样率,充分利用了采集到的光场信息;与此同时,所提出的方法无需要进行大量数据的计算,最终显示的仿真结果,如图 9 所示。与其他三个方法相比,提出的方法可以获得与原始三维场景中几乎一致的三维物体的图像信息,无明显的串扰,并且所呈现的细节部分更加清晰。这表明,提出的方法能够与所呈现的当前先进的光场显示仿真方法相媲美。

由于当前光场显示领域,暂时还没有广泛认可、统一的评价光场显微成像质量的标准或指标。于是,借用传统数字图像处理中的峰值信噪比(PSNR)和结构性相似指数(SSIM)两个量化指标^[15-16],仔细对比评价了所列出的几种仿真方法的光场显示的图像质量。其中,所采用的PSNR和SSIM公式:

$$V_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255}{mn \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [u(x,y) - v(x,y)]^2} \right), \quad (5)$$

$$V_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_u \mu_v + c_1)(2\sigma_{uv} + c_2)}{(\mu_u^2 + \mu_v^2 + c_1)(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + c_2)}, \quad (6)$$

式中, $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 分别为重建后图像和原始图像, 大小均为 $m \times n$; 而 μ_u 和 μ_v 分别为 u 和 v 的均值; σ_u^2 和 σ_v^2 则分别为 u 和 v 的方差; σ_{uv} 则为 u 和 v 的协方差。

经过计算, 得到的图像质量数据, 如表 1 所示。由表 1 可以看出, 相较于傅里叶体素计算重建法、合成孔径光场显示法和矩阵光学近眼光场显示法而言, 所提出的方法计算得到的 PSNR 信噪比更高, 并且相对应的 SSIM 指数数值也更高。这表明使用所提出的方法相较于其他三种所呈现的仿真方法, 具有更高的图像质量, 并可以较为有效地提升光场显示的分辨率。由此可见, 光场显示中结果分辨率偏低的共性问题, 可以通过采用频率平移与时分复用方法进行解决。

表 1 图像质量对比表

Table 1 Image quality comparison

	MOLF-NED ^[9]	MALTS ^[10]	FVCR ^[11]	Ours
PSNR /dB	146.82	147.59	148.69	149.67
SSIM	0.9310	0.9460	0.9530	0.9783

此外, 响应时间是评价实时仿真系统中的一个重要指标^[17]。在渲染分辨率不同的条件下, 傅里叶体素计算重建法、合成孔径光场显示法、矩阵光学近眼光场显示法和提出的仿真方法, 所需要的响应时间, 如图 10 所示。该实验结果表明, 在相同软硬件配置下, 提出的方法在不同渲染分辨率下的响应时间均小于 0.04 ms, 即所提出的方法可以大幅降低所需的响应时间, 能够满足实际运用中实时仿真要求。不难看出, 所提出的方法可以解决当前光场显示计算量偏大的问题。

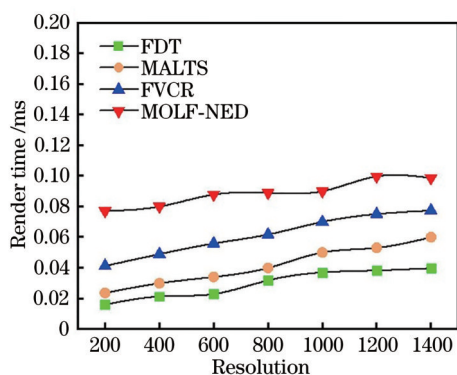


图 10 不同仿真方法的响应时间

Fig. 10 Render time consuming of various simulation results

4 结 论

从频域的理论出发, 提出了一种较简单的方法

来解决光场三维显示串扰偏多、计算量偏大、结果分辨率偏低等共性问题。与所呈现的三种现有的先进光场显示仿真技术相比, 所提出的方法不依赖复杂的硬件条件, 在较短时间内即可获得高分辨率的仿真结果。经过一系列的实验结果对比表明, 无论是在图像分辨率、还是在仿真速度方面, 所提出的方法都具有较好的效果, 可以与当前先进的光场显示技术相媲美。与此同时, 所提出的方法在光场三维显示系统的预测和结果优化方面, 也具有良好发展潜力。但是, 研究工作还存在一些不足之处, 由于受模拟仿真硬件显卡所限制, 未使用具有大量细节信息的三维模型进行模拟仿真实验。在后期的工作中, 可以考虑使用更多复杂的三维物体进行实验, 进一步增加仿真图像的细节纹理信息以提升图像分辨率。

参 考 文 献

- [1] Huang H, Hua H. Effects of ray position sampling on the visual responses of 3D light field displays[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9343-9360.
- [2] Liu Z M, Yao J Y, Xu F Y, et al. Computer generated integral color rainbow holography three-dimensional display[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1009002.
刘子陌, 姚建云, 许富洋, 等. 计算机集成彩色彩虹全息三维显示[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1009002.
- [3] Shi X, Ai L Y, Yu M, et al. Full-parallax three dimensional display based on light field camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711005.
石肖, 艾灵玉, 于森, 等. 基于光场相机的全视差三维显示[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711005.
- [4] Li M, Piao Y, Deng L J. Spatial resolution of naked eye three-dimensional integral imaging display based on LED screen[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061004.
李敏, 朴燕, 邓莉巾. 基于LED屏裸眼三维集成成像显示技术的空间分辨率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061004.
- [5] Park M C, Lee H D, et al. Interactive 3D simulator for autostereoscopic display systems[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8384: 83840I.
- [6] Jung S M, Jang J H, Kang H Y, et al. Optical modeling of lenticular array for autostereoscopic displays[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8648: 864805.
- [7] Jeong H I, Kim B, Ku M, et al. P-86: light field

- simulation for 3D displays with various pixel structures[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 1557-1560.
- [8] Guan Y X, Sang X Z, Xing S J, et al. Backward ray tracing based high-speed visual simulation for light field display and experimental verification[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 29309-29318.
- [9] Yao C, Cheng D W, Wang Y T. Matrix optics representation and imaging analysis of a light-field near-eye display[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 39976.
- [10] Wang J G, Xiao X, Yao G, et al. Synthetic aperture integral imaging display with moving array lenslet technique[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(10): 827-833.
- [11] Inoue K, Cho M. Fourier focusing in integral imaging with optimum visualization pixels[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105952.
- [12] Alekseyev L, Narimanov E, Khurgin J. Super-resolution imaging via spatiotemporal frequency shifting and coherent detection[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22350-22357.
- [13] Fu W, Yan F, Chen K, et al. Scene distance measurement method based on light field imaging[J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6237-6243.
- [14] Bracewell R N. The Fourier transform and its applications[M]. Columbus: McGraw-Hill, 1978.
- [15] Hoshino H, Okano F, Isono H, et al. Analysis of resolution limitation of integral photography[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(8): 2059-2065.
- [16] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[J]. Proceedings of International Display Workshops, 1981: 1849-1851.
- [17] Tomasi C, Kanade T. Detection and tracking of point features[J]. Carnegie Mellon University Technical Report, 1991, CMU-CS-91-132.