

基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息

王 祺^{1,2}, 张启明^{1,2*}, 蔚浩义^{1,2*}

¹上海理工大学智能科技学院, 上海

²上海理工大学光子芯片研究院, 上海

收稿日期: 2024年6月15日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月15日

摘 要

光学全息对显微镜、光学信息存储、激光加工、光学防伪等领域的应用, 具有重要的研究价值。传统的计算光学全息相位的方法主要基于(Gerchberg-Saxton)算法, 利用这种方法可以实现多种多样的优化的光学全息, 实现对光场的自由操控。然而, 这种方法利用光学快速傅里叶变换, 不可避免地会出现零级衍射, 极大地降低了全息的光强度, 也影响了全息成像的质量。本文提出并实现了基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息的方法。针对全息计算目标, 本文定义了特殊的损失函数, 从理论上实现了具有高衍射效率的离散光场和非离散光场的全息计算。本文的研究成果对逆向设计在光学全息的应用, 如光学信息存储、激光加工等领域具有重要的研究价值。

关键词

逆向设计, 光学全息, 瑞丽索末菲衍射

Realization of Optical Holography by Reverse Design Based on Riley-Sommerfeld Diffraction

Qi Wang^{1,2}, Qiming Zhang^{1,2*}, Haoyi Yu^{1,2*}

¹School of Artificial Intelligence Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 15th, 2024; accepted: Jul. 8th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

Optical holography is of great significance for applications in microscopy, optical information

*通讯作者。

文章引用: 王祺, 张启明, 蔚浩义. 基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4373-4380. DOI: 10.12677/mos.2024.134395

storage, laser processing, optical anti-counterfeiting, and other fields. The traditional method of calculating the phase of optical holography is mainly based on the (Gerchberg-Saxton) algorithm, using which a wide variety of optimized optical holography can be realized to achieve free manipulation of the light field. However, this method utilizes the optical fast Fourier transform, which inevitably results in zero-level diffraction, which greatly reduces the optical intensity of the holography and also affects the quality of the holographic imaging. In this paper, we propose and implement a method to achieve optical holography based on the inverse design of Riley-Sommerfeld diffraction. For the holographic computation objective, this paper defines a special loss function and theoretically realizes the holographic computation of discrete and non-discrete optical fields with high diffraction efficiency. The research results of this paper have important research value for the application of inverse design in optical holography, such as optical information storage, laser processing, and other fields.

Keywords

Inverse Design, Optical Holography, Riley-Sommerfeld Diffraction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光学全息, 作为现代光学技术的重要分支, 其意义深远且广泛。它不仅在科技领域揭示了物体光波的全部信息, 包括振幅和相位, 还提供了一种全新的成像方式[1]。在物理学中, 它有助于深入研究光的波动性和粒子性; 在生物学中, 通过全息显微镜, 可以无损伤地观察生物样本的三维结构, 为生命科学的研究提供了极大的便利[2] [3]。此外, 光学全息技术在实际应用中也具有巨大的潜力。在医疗领域, 全息技术可用于三维医学图像的获取和处理, 提高疾病的诊断准确性[4]; 在通信领域, 全息技术可实现大容量、高速率的三维数据传输和存储[5]; 在安全领域, 光学全息技术为防伪和识别提供了强有力的手段[6]。传统的计算全息(computer generated hologram)的方法主要基于(Gerchberg-Saxton)提出的算法, 基于快速傅里叶变换算法[7] [8], 通过对初始相位的傅里叶变换结果使用约束优化, 经过傅里叶逆变换回到空域中迭代更新相位, 使得最终的光场能够在特定的衍射条件下复原目标图像。然而, 传统的基于 GS 算法的全息成像的劣势就是衍射效率比较低, 能量大多集中在 0 级衍射, 导致全息无法高效地显示, 不利于全息技术在如微纳激光加工和高效的全息显示技术中的实际应用[9] [10]。也因此诞生了许多优化 GS 全息计算算法的研究[10]-[12]。

近年来, 逆向设计与纳米光子学的结合, 代表着现代光学研究的一大飞跃, 为光子器件的精细设计与创新应用提供了前所未有的可能性[13]-[16]。逆向设计, 作为一种由目标结果逆向推导设计过程的方法, 其核心理念在于通过预先设定器件的性能指标, 利用计算算法和优化手段, 反向求解出所需的结构参数[17] [18]。

因此, 本文提出并探索了基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息的技术。不同于传统的计算全息的 GS 算法, 本文提出并实现了基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息的方法。针对全息计算目标, 本文定义了特殊的损失函数(混合型的损失函数), 从理论上实现了具有高衍射效率的离散光场和非离散光场的全息计算。本文的研究成果对逆向设计在光学全息的应用, 如光学信息存储、激光加工等领域具有重要的研究价值。随着相关技术的不断发展和完善, 有理由相信, 逆向设计计算全息将在未来发挥更加重要的作用, 推动全息技术的进一步发展和应用。

2. 研究内容

2.1. 基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息模型设计

图 1 为基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息的概念图。平面光(plane wave input)直接照射在全息相位板上, 经过利用瑞丽索末菲衍射理论与逆向设计的前向传播和逆向优化过程, 调制出所需的全息相位分布(目标区域如图所示)。衍射神经网络的工作原理如图 1 所示, 入射光输入到第一层衍射相位层后, 受到所在位置相位改变的影响, 相位信息受到调制, 随后在当前位置, 作为新的波源以衍射的方式进行传播, 从而实现衍射相位单元对于出射光场在指定成像面上的强度调制。这种利用平行光场实现全息的优势是, 在成像的区域中, 没有零级亮斑, 极大地减小了衍射的能量损失, 提高了全息成像的衍射效率。

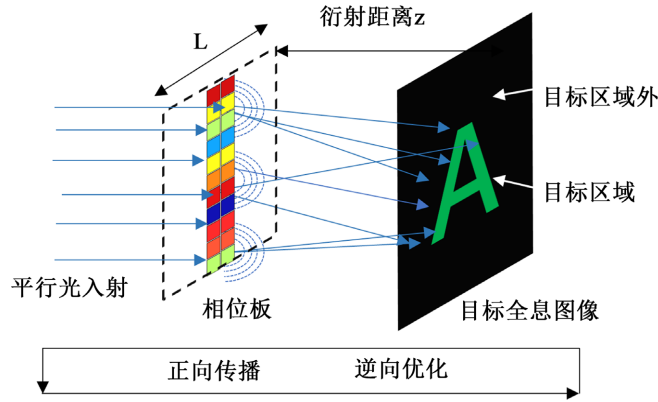


Figure 1. Conceptual diagram of optical holography realized by inverse design based on Riley-Sommerfeld diffraction
图 1. 基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息的概念图

2.2. 瑞丽索末菲衍射理论

在本文的模型中, 平行光场入射到一个长宽为 L , 每一个相位单元都可以独立调节相位, 在传播过程中, 基于瑞丽索末菲公式, 计算出光场在预定的传播距离的成像面上的强度。瑞丽索末菲衍射一般被描述为:

$$w_l^i(x, y, z) = \frac{z - z_i}{r^2} \left(\frac{1}{2\pi r} + \frac{1}{j\lambda} \right) \exp\left(\frac{j2\pi r}{\lambda}\right) \quad (1)$$

其中, l 代表第 l 层衍射层, i 代表在全息相位版上的第 i 个衍射像素单元, 其坐标为 (x_i, y_i, z_i) , λ 代表入射光波长即光学全息的工作波段,

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (2)$$

代表当前衍射单元到目标衍射区域在自由空间中传播的距离, $j = \sqrt{-1}$ 代表虚数单位。根据此式, 可以对成像空间的任意一个点进行积分计算, 得到该处的光强信息。

2.3. 优化损失函数设计和建模

基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计中的一个关键内容, 就是要构建一个合适的优化损失函数(Loss function) [19] [20]。损失函数是一个在机器学习和逆向设计中广泛使用的参数, 主要用于衡量模型预测值与真实值之间的差异或误差。损失函数是一种非负实值函数。在逆向设计中, 通过最小化损失函数来改进模型, 使得模型的预测更加准确。损失函数越小, 通常意味着模型的预测值更接近真实值, 模型的稳

定性和性能越好。

根据计算全息优化目标, 本节设计了一种复合型优化损失函数(hybrid loss function)。这一损失函数包含两个部分, 一部分损失函数针对目标区域外, 一部分损失函数针对目标区域内。从数学形式上表达可以定义为:

$$\text{Loss}(\text{outside}) = \sum_0^i w(x, y, z) \quad (3)$$

$$\text{Loss}(\text{inside}) = 1 - \sum_0^i w(x, y, z) \quad (4)$$

$$\text{Loss}(\text{total}) = \text{Loss}(\text{outside}) + \text{Loss}(\text{inside}) \quad (5)$$

特别指出, 采用这种复合型的损失函数的优势是非常明显的。这是因为, 传统的逆向设计的优化函数一般采用一个优化部分, 在仿真中, 本文发现单独使用一个优化函数, 虽然能够让目标区域内的光强实现最大, 但是无法让目标区域外的光强实现最小。而使用这种复合形式的损失函数, 能够极大程度的避免这一现象。

使用复合形式的损失函数能够满足逆向设计在运算过程中对损失函数追求到最小的目标(在接下来的研究中会详细介绍)。本文采用了 python 进行基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计构建和训练, 其中使用 $N \times N$ 的矩阵代表当前相位衍射层的单个衍射单元, 并设置权重网络计算当前衍射层对入射光的调制结果, 并用瑞丽索末菲公式数值模拟光经过相位衍射层的传播, 以此来模拟全息成像的过程。根据分类结果, 反向传播算法会将损失函数结果返回到权重网络, 修改权重网络, 再次计算新的结果, 根据梯度向下算法, 经过多次的训练 - 返回的优化后, 可以得到一定范围内的局部最优解情况。

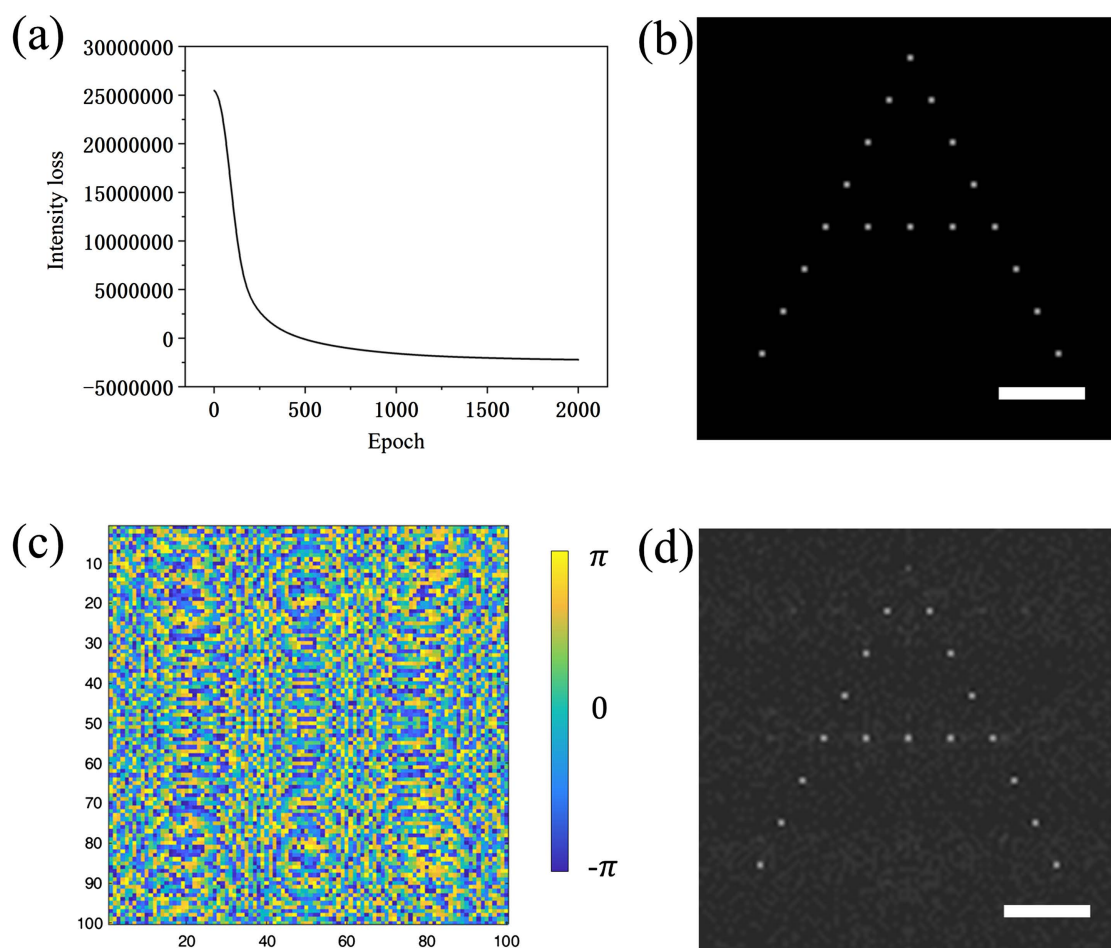
2.4. 逆向设计离散光场全息

基于上述算法, 本节首先探索并实现了利用瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现离散光场的全息。离散点全息实现的意义在于, 离散点全息光场可以被用来实现多焦点的光场控制[21], 对于全息多焦点的激光加工(holographic multi-focus laser fabrication)、光信息存储(optical data storage)等领域都具有重要的研究价值[22] [23]。因为人眼对于图像的识别并不需要图像具有很强的连续性, 即通过点阵的方式也能表现出图像的形状。本研究首先探索实现具有固定光点组成的离散光场全息。如图 2 所示, 使用了 18 个点组成的字母 A, 这样在能表示图形形状的同时, 还减少了探测区域的成像面积, 有助于提高成像效果。

针对单个字母的离散光场全息计算结果如图 2 所示。可以看到, 经过逆向设计的算法的 loss 函数随着训练次数 epoch 的增加而逐渐降低, 在训练次数超过 250 次左右, 损失函数的数值接近于 0。在训练超过 250 次之后, 损失函数的值几乎保持不变, 体现了逆向设计的方法具有超强的拟合能力。图 1(c)展示了训练得到的全息相位板的相位分布。逆向设计程序是在一台内存为 128G (NVIDIA QUADRO P4000 GPU)的工作站上运行。训练时间约为 5 分钟, 训练好的逆向设计程序对全息图计算的逻辑推理时间大约是 5.2 ms。

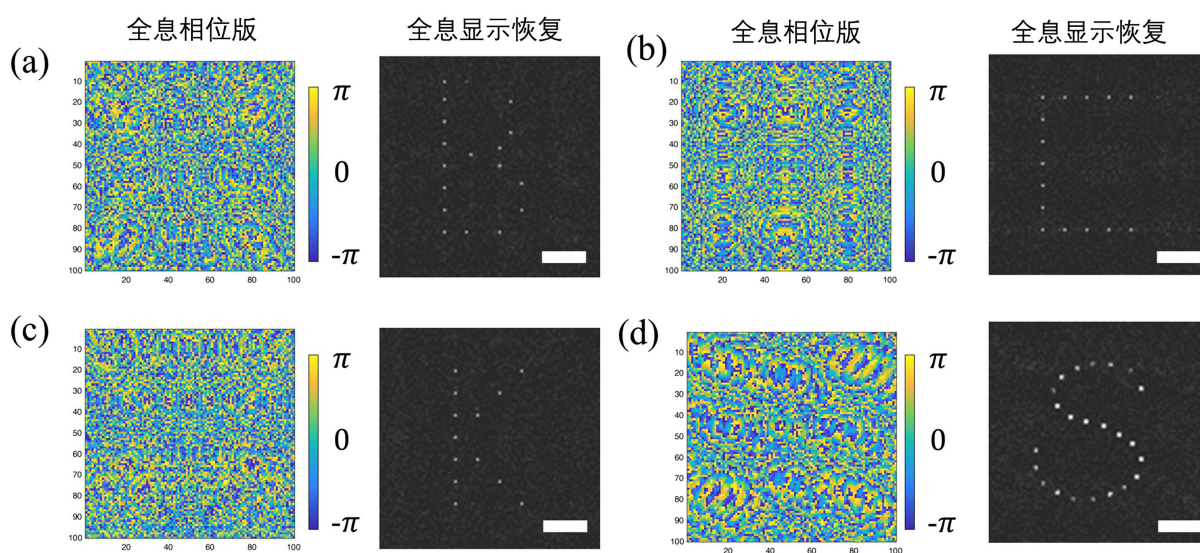
同时, 根据瑞丽索末菲衍射仿真得到了平行光场经过全息相位板的全息成像结果, 在复合损失函数的作用下, 全息成像的字母 A 的目标区域以内的区域光强非常均匀, 且强度比目标区域以外的区域强很多。本文定义了一个全息衍射效率作为衡量全息成像的标准。全息衍射效率定义为目标区域内的光强与目标区域以外的光强的比值。通过计算得到全息衍射效率为 91.8%, 对应于极低的全息成像噪声。

根据这一研究成果, 本文利用训练好的逆向设计程序, 设计了多个字母的全息板, 在图 3 中展示。结果显示, 训练的逆向设计模型均能根据优化目标, 逆向设计出相应的全息相位。这些全息想相位经过瑞丽索末菲衍射数值模拟, 能够得到高于 90%全息衍射效率的全息显示, 这些结果证明了逆向设计的算法的可靠性和强大的逆向设计拟合能力。衍射效率定义为, 目标光场区域的光强与目标区域外光强的比值。



(a) 损失函数随着训练次数 epoch 的变化关系曲线。(b) 设计的目标优化全息图。(c) 经过逆向设计训练并优化得到的全息相位板的相位分布图。(d) 利用瑞利索末菲衍射仿真重构的全息图(计算得到的全息衍射效率为 91.8%)。标尺大小为 20 微米。

Figure 2. Discrete light field holography by inverse design using Riley-Sommerfeld diffraction
图 2. 利用瑞利索末菲衍射的逆向设计实现离散光场全息



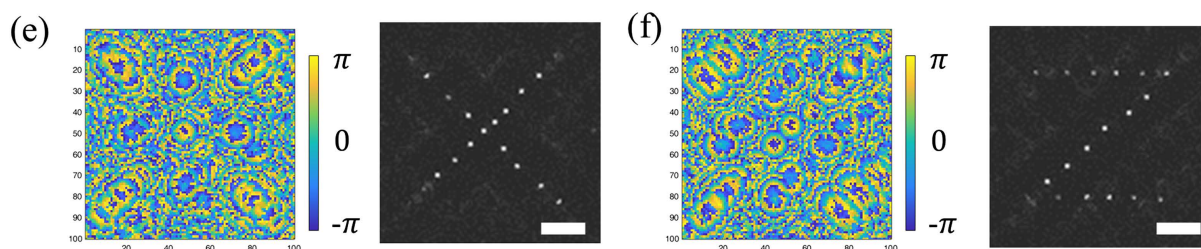


Figure 3. Training simulation imaging and corresponding phase plates for dot matrix with different letters in the detection area. (a)~(f) corresponds to the letters B, C, K, S, X, Z and the calculated holographic phase plates, respectively. The holographic diffraction efficiencies correspond to 91.26%, 95.30%, 89.60%, 96.30%, 95.34% and 90.46%, respectively. The scale bar is 20 μm

图 3. 探测区域为不同字母的点阵时的训练模拟成像及对应相位板。(a)~(f) 分别对应字母 B, C, K, S, X, Z 以及计算得到的全息相位板。其全息衍射效率分别对应为：91.26%，95.30%，89.60%，96.30%，95.34%，90.46%。标尺大小为 20 微米

2.5. 逆向设计实现非离散光场全息显示

在光学全息中的应用中，一个重要的方向是全息显示(holographic display)。全息显示要求全息成像是一个非离散的光场。非离散光场全息的实现要求全息具有较高的全息衍射效率[24]。因此，本文初步探索了利用逆向设计实现非离散光场全息的研究。

首先本文利用提所提出的基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计的方法，对离散的光场图像(手写字母 A)进行逆向设计的计算，计算结果如图 4(a)所示。针对较大的目标函数区域，虽然逆向设计程序可以成功的将损失函数降低到理想的数值范围，但是利用瑞丽索末菲衍射的全息显示的恢复的数据显示，其全息衍射效率只有 78.25%，这一参数远远低于离散光场的全息计算的结果。而且，在恢复的数字 A 的图像中，可以明显地看到其光强的分布并不均匀。

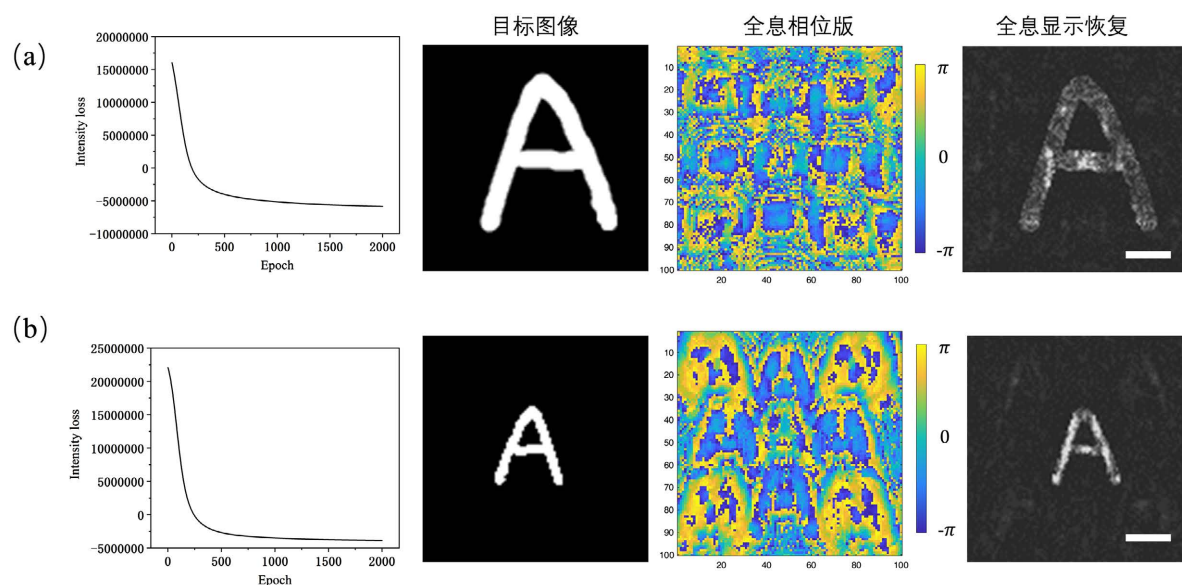


Figure 4. Inverse design for non-discrete light field holographic display. (a) Inverse design holographic computation and image recovery for a larger target function region (holographic diffraction efficiency of 78.25%). (b) Inverse design holographic computation and image recovery for smaller target function regions (holographic diffraction efficiency of 89.65%)

图 4. 逆向设计实现非离散光场全息显示。(a) 针对较大的目标函数区域的逆向设计全息计算和图像恢复(全息衍射效率为 78.25%)。(b) 针对较小的目标函数区域的逆向设计全息计算和图像恢复(全息衍射效率为 89.65%)。标尺大小为 20 微米

为了提高全息衍射效率,本文探索了缩小目标区域的大小对衍射效率的影响。从物理上而言,当全息相位板的像素数目和大小一定时,其能衍射的光强的比例取决于全息计算的目标区域的大小。针对较小的目标区域(较小的字母 A 图像),逆向设计算法能够充分发挥所有全息相位板像素的衍射能力,提高全息衍射效率。计算结果如图 4(b)所示。

当目标区域大小减小到原图的 1/4 时,逆向设计得到的全息相位板通过瑞丽索末菲衍射恢复出的图像的具有明显提高的亮度,其计算得到的全息衍射效率为 92.58%。相比于较大的目标区域,这一数值提高了约 10%。这一发现为逆向设计全息计算在实际中的应用提供了有力的指导方向。

对于字母内部光强分布极度不均的问题,本文猜测,对于执行全息任务的衍射单元,需要经过较大的衍射角实现全息,因此,就要求全息相位版的衍射单元具有较强的相位的调制能力。原有单一的损失函数不足以支撑对衍射单元相位调制能力约束的需求,需要更复杂的损失函数对神经元进行控制。在未来的研究中,将进一步对此进行深度探索和实验上的实现。

3. 展望与讨论

本章简要介绍了基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息技术,提出并研究了利用逆向设计实现光学全息的方法。通过引入复合的损失函数(目标区域外和目标区域内),最大程度上提高衍射效率的方法。针对不同的去全息应用,本文研究了利用这一方法实现离散全息显示和非离散全息显示的计算结果。计算结果显示,利用基于瑞丽索末菲衍射的逆向设计实现光学全息能够消除零级衍射,实现具有较高的全息衍射效率的全息。对于离散光场的全息,数值模拟实现了平均高于 90%的全息衍射效率。对于非离散的光场的全息,其全息衍射效率是由目标区域的大小决定的,目标区域的大小越小,全息衍射效率就越高。本文的上述研究和发现,不仅在理论上提出了一个计算全息的新方法,而且有助于推动逆向设计在纳米光子学特别是衍射光学中的应用。本文的研究成果将有助于推动逆向设计全息技术在微纳激光多焦点加工、光信息存储、高效率的全息显示技术领域的应用。

基金项目

本研究得到了国家重点研发计划(2021YFB2802000, 2022YFB2804301)、上海市科学技术委员会(21DZ1100500)、上海市科学技术重大专项、上海市前沿科学中心计划(2021~2025 年第 20 号)、国家自然科学基金(61975123, 62305219, 62205208)、上海市自然科学基金(23ZR1443200)、中国博士后科学基金(2022M712138, 2021M702192)、上海市超级博士后激励计划(5B22904002, 5B22904006)。

参考文献

- [1] Schnell, M., Carney, P.S. and Hillenbrand, R. (2014) Synthetic Optical Holography for Rapid Nanoimaging. *Nature Communications*, 5, Article No. 3499. <https://doi.org/10.1038/ncomms4499>
- [2] Wu, D., Luo, J., Huang, G., Feng, Y., Feng, X., Zhang, R., et al. (2021) Imaging Biological Tissue with High-Throughput Single-Pixel Compressive Holography. *Nature Communications*, 12, Article No. 4712. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24990-0>
- [3] Jiang, Y., Li, H., Pang, Y., Ling, J., Wang, H., Yang, Y., et al. (2022) Cell Image Reconstruction Using Digital Holography with an Improved GS Algorithm. *Frontiers in Physiology*, 13, Article 1040777. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1040777>
- [4] Javaid, M., Haleem, A. and Khan, I. (2020) Holography Applications toward Medical Field: An Overview. *Indian Journal of Radiology and Imaging*, 30, 354-361. https://doi.org/10.4103/ijri.ijri_39_20
- [5] Psaltis, D. and Burr, G.W. (1998) Holographic Data Storage. *Computer*, 31, 52-60. <https://doi.org/10.1109/2.652917>
- [6] Kumar, D. and Nishchal, N.K. (2017) Digital Holography for Recognition and Security of 3D Objects. In: Bhattacharya, I., Chakrabarti, S., Reehal, H. and Lakshminarayanan, V., Eds., *Advances in Optical Science and Engineering*, Springer, 107-115. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3908-9_13

- [7] Sinclair, G., Leach, J., Jordan, P., Gibson, G., Yao, E., Laczik, Z.J., *et al.* (2004) Interactive Application in Holographic Optical Tweezers of a Multi-Plane Gerchberg-Saxton Algorithm for Three-Dimensional Light Shaping. *Optics Express*, **12**, 1665-1670. <https://doi.org/10.1364/opeex.12.001665>
- [8] Haist, T., Schönleber, M. and Tiziani, H.J. (1997) Computer-generated Holograms from 3D-Objects Written on Twisted-Nematic Liquid Crystal Displays. *Optics Communications*, **140**, 299-308. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(97\)00192-2](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(97)00192-2)
- [9] Masuda, K., Saita, Y., Toritani, R., Xia, P., Nitta, K. and Matoba, O. (2016) Improvement of Image Quality of 3D Display by Using Optimized Binary Phase Modulation and Intensity Accumulation. *Journal of Display Technology*, **12**, 472-477. <https://doi.org/10.1109/jdt.2015.2502255>
- [10] Leonardo, R.D., Ianni, F. and Ruocco, G. (2007) Computer Generation of Optimal Holograms for Optical Trap Arrays. *Optics Express*, **15**, 1913-1922. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001913>
- [11] Basu, D., Chejarla, S., Maji, S., Bhattacharya, S. and Srinivasan, B. (2024) An Adaptive Optical Technique for Structured Beam Generation Based on Phase Retrieval Using Modified Gerchberg-Saxton Algorithm. *Optics & Laser Technology*, **170**, Article ID: 110244. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110244>
- [12] Christopher, P.J., Mouthaan, R., Wetherfield, B., Medcalf, E.J. and Wilkinson, T.D. (2022) Computer-Generated Holography in the Intermediate Domain. *Journal of the Optical Society of America A*, **39**, 392-400. <https://doi.org/10.1364/josaa.442492>
- [13] Moon, S., Kang, J. and Yeo, J. (2023) Review of Generative Models for the Inverse Design of Nanophotonic Metasurfaces. *Applied Science and Convergence Technology*, **32**, 141-150. <https://doi.org/10.5757/asct.2023.32.6.141>
- [14] Khaireh-Walieh, A., Langevin, D., Bennet, P., Teytaud, O., Moreau, A. and Wiecha, P.R. (2023) A Newcomer's Guide to Deep Learning for Inverse Design in Nano-Photonics. *Nanophotonics*, **12**, 4387-4414. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0527>
- [15] Molesky, S., Lin, Z., Piggott, A.Y., Jin, W., Vucković, J. and Rodriguez, A.W. (2018) Inverse Design in Nanophotonics. *Nature Photonics*, **12**, 659-670. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0246-9>
- [16] Fung, V., Zhang, J., Hu, G., Ganesh, P. and Sumpter, B.G. (2021) Inverse Design of Two-Dimensional Materials with Invertible Neural Networks. *NPJ Computational Materials*, **7**, Article No. 200. <https://doi.org/10.1038/s41524-021-00670-x>
- [17] Wang, Z., Wang, B., Liu, J. and Wang, R. (2021) Method to Obtain the Initial Value for the Inverse Design in Nanophotonics Based on a Time-Reversal Technique. *Optics Letters*, **46**, 2815-2818. <https://doi.org/10.1364/ol.428068>
- [18] Sanchez-Lengeling, B. and Aspuru-Guzik, A. (2018) Inverse Molecular Design Using Machine Learning: Generative Models for Matter Engineering. *Science*, **361**, 360-365. <https://doi.org/10.1126/science.aat2663>
- [19] Rivera, J.A., Pardo, D. and Alberdi, E. (2020) Design of Loss Functions for Solving Inverse Problems Using Deep Learning. *Lecture Notes in Computer Science*, **12139**, 158-171. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50420-5_12
- [20] Bai, Y., Chen, W., Chen, J. and Guo, W. (2020) Deep Learning Methods for Solving Linear Inverse Problems: Research Directions and Paradigms. *Signal Processing*, **177**, Article ID: 107729. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107729>
- [21] Bakhtiari-Nejad, M. (2022) Multi-Focal Transmission Acoustic Phase Holograms in Contactless Ultrasonic Power Transfer Systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, **340**, Article ID: 113551. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113551>
- [22] Ouyang, W., Xu, X., Lu, W., Zhao, N., Han, F. and Chen, S. (2023) Ultrafast 3D Nanofabrication via Digital Holography. *Nature Communications*, **14**, Article No. 1716. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37163-y>
- [23] Ren, M., Lu, W., Shao, Q., Han, F., Ouyang, W., Zhang, T., *et al.* (2021) Aberration-Free Large-Area Stitch-Free 3D Nano-Printing Based on Binary Holography. *Optics Express*, **29**, 44250-44263. <https://doi.org/10.1364/oe.446503>
- [24] Latychevskaya, T., Longchamp, J., Escher, C. and Fink, H. (2015) Holography and Coherent Diffraction with Low-Energy Electrons: A Route towards Structural Biology at the Single Molecule Level. *Ultramicroscopy*, **159**, 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2014.11.024>