

基于有效视区分析的快速全息图生成方法

杨羽晨, 胡安康, 李移隆, 王琼华, 王迪

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 全息 3D 显示能够完整记录并再现物体的振幅和相位信息, 被认为是最具发展前景的 3D 显示技术之一。针对当前全息图生成过程中存在的计算复杂度高、实时性差等问题, 提出了一种基于有效视区分析的快速全息图生成方法。通过构建有效视区的几何模型, 定量分析全息图中对重建像有实际贡献的区域, 在计算过程中压缩冗余视区, 从而提升计算效率。进一步地, 通过引入虚拟的波前记录平面, 并结合新型查找表法, 优化了衍射传播过程。实验结果表明, 相比于新型查找表法, 所提方法在保证重建像质量的前提下, 将全息图计算速度提升了 49% 以上。同时, 随着物体分辨率的增加, 计算速度提升更明显。此外, 该有效视区分析方法具有良好的通用性, 可拓展应用于所有点元算法, 为全息图的高效计算提供了一种新的解决思路。

关键词: 全息 3D 显示; 全息图; 有效视区; 计算时间; 光强分布

中图分类号: O 438.1

文献标志码: A

A fast hologram generation method based on effective viewing zone analysis

YANG Yuchen, HU Ankang, LI Yilong, WANG Qionghua, WANG Di

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Holographic 3D display, capable of recording and reconstructing both the amplitude and phase information of objects, is regarded as one of the most promising 3D display technologies. To address the challenges of high computational complexity and limited performance in real-time applications in current hologram generation process, a fast hologram generation method based on effective viewing zone analysis was proposed. By constructing a geometric model of the effective viewing zone, the method quantitatively identified the effective regions of the hologram that contribute

收稿日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(623B2008)

第一作者: 杨羽晨(2002—), 女, 硕士研究生。研究方向: 全息 3D 显示。E-mail: yangyuchen445@163.com

通信作者: 王迪(1990—), 女, 副教授。研究方向: 全息 3D 显示。E-mail: diwang18@buaa.edu.cn

引文格式: 杨羽晨, 胡安康, 李移隆, 等. 基于有效视区分析的快速全息图生成方法[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(6): 613-621.

Citation: YANG Yuchen, HU Ankang, LI Yilong, et al. A fast hologram generation method based on effective viewing zone analysis[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(6): 613-621.

to the reconstructed image, enabling the reduction of redundant areas during calculation process and thus improving calculation efficiency. Furthermore, a virtual wavefront recording plane was introduced and combined with the novel look-up table method to optimize the diffraction propagation. Experimental results show that, compared to the novel look-up table method, the proposed method reduces the hologram generation time by more than 49%. Moreover, the computational acceleration becomes more significant as the object resolution increases. In addition, this effective viewing zone analysis method also exhibits strong generalizability and can be extended to all point-based algorithms, providing a new solution for efficient hologram generation.

Keywords: *holographic 3D display; hologram; effective viewing zone; calculation time; light intensity distribution*

随着信息技术和显示设备的发展，3D 显示已成为信息传递的重要方式^[1-2]。3D 显示能够真实还原物体的立体结构，为用户带来沉浸式的视觉体验，广泛应用于虚拟现实、增强现实、医疗影像等多个领域，展现出巨大发展潜力^[3-5]。全息 3D 显示能够完整记录并再现物体的振幅和相位信息，被认为是最具发展前景的 3D 显示技术之一^[6-8]。随着计算机技术的进步，计算全息术摆脱了传统全息显示技术对光学记录环境的依赖，为数字化、高效率的 3D 重建提供了可行路径^[9-10]。尽管近年来计算全息术取得了显著进展，但其在实际应用中仍面临诸多挑战。一方面，全息图生成过程计算量巨大，难以满足实时动态重建需求^[11-12]；另一方面，图像数据中存在大量冗余信息，导致计算效率低^[13-14]。如何在保证成像质量的前提下提升全息图的计算速度，是全息 3D 显示领域长期关注的重点和亟待解决的问题。

为提高全息图的计算效率，研究者提出了多种加速方法，依据 3D 物体的数学建模方式，可大致分为点元法、面元法和分层法^[15-16]。其中：点元法将 3D 物体离散为若干点光源，以简化光波传播的计算；面元法依据物体表面特征，采用三角形或多边形网格描述其几何结构；分层法则利用物体的深度信息，将其划分为多个平行于全息面的 2D 切片进行处理。本文聚焦于点元法的进一步优化和提升。在现有的点元法中，查找表法通过预先计算并存储与 3D 物体每个点元对应的条纹图案，显著提升了全息图的生成速度。然而，该方法对存储空间需求极高，占用大量硬件资源^[17]。为进一步提高计算效率，研究者提出了多种改进算法。新型查找表(novel look-up table, NLUT)法将

处于同一深度平面的点元划分为一组，共享一个中心衍射图(principal fringe pattern, PFP)^[18-19]。波前记录平面(wavefront recording plane, WRP)法将物体到全息面的衍射过程划分为两个子过程以减少计算量^[20]。尽管上述方法在一定程度上提升了计算效率，但在处理复杂 3D 场景时仍难以满足实时性要求^[21]。全息图生成过程中，大量冗余信息的参与造成了计算资源浪费，增加了不必要的计算负担，是制约效率提升的重要因素。为了减少不必要的计算量，研究人员通过分析点元法的衍射机制与重建像视角的制约关系，对有效视区与冗余视区进行建模与量化，有效提升了计算效率^[22-23]。然而，现有方法在面对高分辨率 3D 场景时，仍存在视区划分精度不足、冗余视区计算开销较大的问题。

针对当前点元法中存在的冗余计算问题，本文提出了一种基于有效视区分析的快速全息图生成方法。在 NLUT 算法的基础上，通过分析有效视区，降低了 PFP 的分辨率，减少了冗余计算，从而提升了全息图的生成速度。同时，在衍射传播中引入虚拟的 WRP 以优化波前传播，进一步缩短了全息图的生成时间。为验证所提方法的可行性，本文搭建了全息显示系统，将仿真生成的全息图加载至光学系统中，完成了光学重建实验。实验结果表明，所提方法能有效提升全息图的计算速度，并且物体分辨率越高，计算速度提升效果越明显。

1 研究方法

1.1 基于有效视区分析的快速全息图生成方法

针对现有全息图生成方法中存在的冗余计算

和低效问题, 本文提出了一种基于有效视区分析的快速全息图生成方法, 其流程如图 1 所示。首先, 将 3D 物体离散为独立的点元, 将同一深度平面内的物点视为一组, 基于菲涅尔衍射理论和全息重建像的视区特性, 计算每个深度平面的 PFP, 通过平移 PFP 得到相同深度平面上其他物点的子全息图, 再通过相加所有物点的子全息图得到 3D 物体在 WRP 上的全息图; 其次, 基于角谱衍

射理论计算 WRP 至全息面的衍射传播, 得到 3D 物体在全息面上的全息图; 最后, 通过计算机将全息图加载到空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 上, 得到物体重建像。所提方法主要在有效视区分析与衍射传播机制两个方面进行了创新性改进: 其一, 通过引入有效视区分析, 减少了冗余信息的计算; 其二, 通过优化衍射传播过程, 降低了整体计算复杂度。

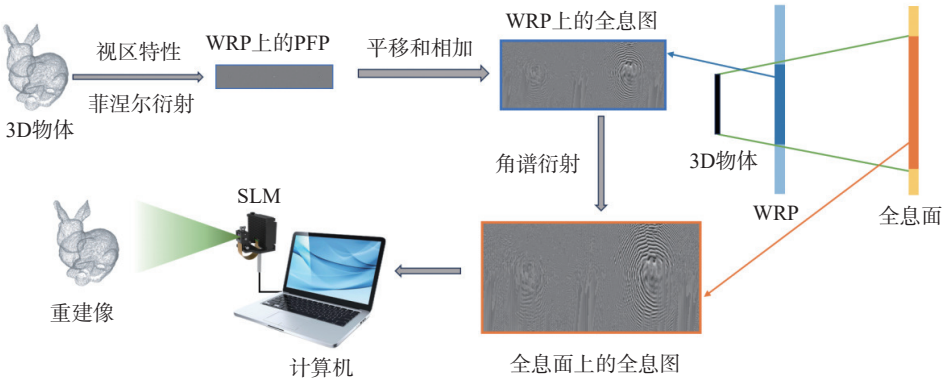


图 1 基于有效视区分析的快速全息图生成方法流程图

Fig.1 Flowchart of the fast hologram generation method based on the effective viewing zone analysis

1.2 有效视区分析方法

有效视区分析通过对 3D 物体上各物点对应的子全息图进行优化分割, 剔除冗余的衍射信息, 仅保留对重建像有实际贡献的有效信息, 从而提升全息图的计算效率。图 2(a) 和图 2(b) 分别展示了采用传统点元法的全息重建原理和基于有效视区分析的全息重建原理。图 2 中, 3D 物体为三棱锥, 点 A 和点 B 为 3D 物体底部的两个端点, 橙色线段和绿色线段分别表示点 A 和点 B 的衍射光边界, 点 A' 和 B' 分别为点 A 和点 B 的重建像。在传

统点元法中, 点 A 和点 B 的子全息图的分辨率与 SLM 的分辨率相同, 其信息被记录在整个 SLM 平面上。 V_A 和 V_B 区域分别表示点 A' 和点 B' 的可观察范围, 二者的重叠区域 V_E 为能够完整呈现物体信息的有效区域。经过有效视区分析后, 可在保持有效区域 V_E 不变的前提下, 将冗余视区缩小至 V'_A 和 V'_B , 从而在不影响重建质量的前提下提升了计算效率。

为便于描述, 选取横截面进行计算分析, 图 3 展示了传统方法中 3D 物体、SLM、全息重建

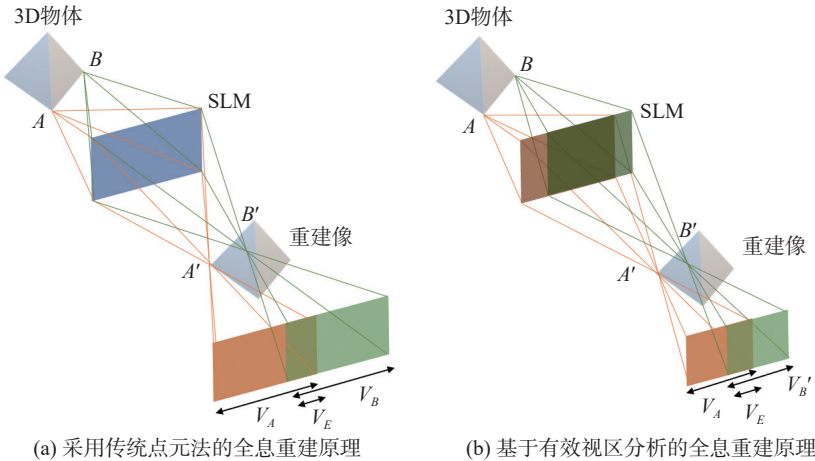


图 2 全息重建原理

Fig.2 Principle of the holographic reconstruction

像以及观察区域之间的空间位置关系。3D物体尺寸为 D ，SLM的尺寸为 H 。全息重建像的位置与3D物体的位置关于 y 轴对称，到 y 轴的距离均为 L 。观察区域位于全息重建像之后，距离 y 轴为观察距离 R 。在SLM上加载与3D物体相对应的全息图。SLM的像素间隔为 p ，衍射光场的最大衍射角 θ 被 p 所限制，这一制约关系表达为

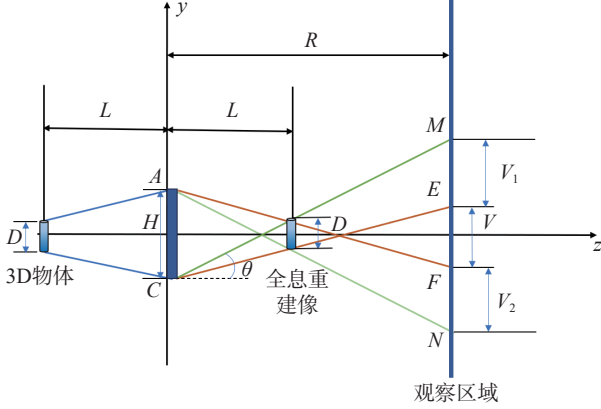


图3 传统方法中3D物体、SLM、全息重建像以及观察区域之间的空间位置关系

Fig.3 Spatial relationship between the 3D object, SLM, reconstructed image and viewing zone of the traditional method

$$\theta \leq \sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (1)$$

式中， λ 代表激光光源的波长。根据几何关系，衍射角 θ 表达为

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D+H}{2L}\right) \quad (2)$$

结合式(1)与式(2)，可得：

$$D \leq \lambda L/p - H \quad (3)$$

当3D物体的尺寸 D 确定时，衍射距离 L 需遵循的条件为

$$L \geq \frac{p(D+H)}{\lambda} \quad (4)$$

式(4)描述了一个固定参数的光路中衍射距离 L 的极限值。在满足上述条件的情况下，讨论3D物体的有效视区。在包含3D物体的完整光学信息的有效视区中，必须涵盖3D物体的上下顶点的衍射传播范围。如图3所示，全息重建像的上下衍射边界与观察区域的交点分别为点 M 和点 F (上边界)、点 E 和点 N (下边界)，其重叠区域 EF 包含了3D物体的完整衍射信息，定义该区域为全息重建像的有效视区 V 。在区域 ME 和 FN 内，仅能观察到物体的部分衍射信息，分别记作

冗余视区 V_1 和 V_2 。根据几何关系， V 、 V_1 和 V_2 的尺寸分别表达为

$$V = \frac{H(R-L)-RD}{L} \quad (5)$$

$$V_1 = V_2 = RD/L \quad (6)$$

根据式(5)，全息重建像的有效视区的尺寸反比于衍射距离 L 。根据式(6)，传统方法中冗余视区的尺寸与全息重建像的尺寸 D 、观察距离 R 以及衍射距离 L 有关，该区域虽不参与有效重建，却占用了计算资源。

基于上述分析，本文提出一种减少冗余视区的有效视区建模方法，其几何模型如图4所示。图4中， V 仍表示全息重建像的有效视区，SLM的上下边界点分别为点 A 和点 C 。在全息再现过程中，3D物体上任意物点 $m(-L, y_0)$ 的衍射光传播边界由图中紫色表示。为确保在有效视区 V 内的任意位置均能完整接收来自物点 m 的衍射信息，该点衍射光的上、下边界应分别与线段 AF 和 CE 平行。同理，3D物体上所有物点衍射光的边界均需满足此平行条件，以保证全息重建像的完整性。根据上述边界条件，衍射光场的最大衍射角 α 表达为

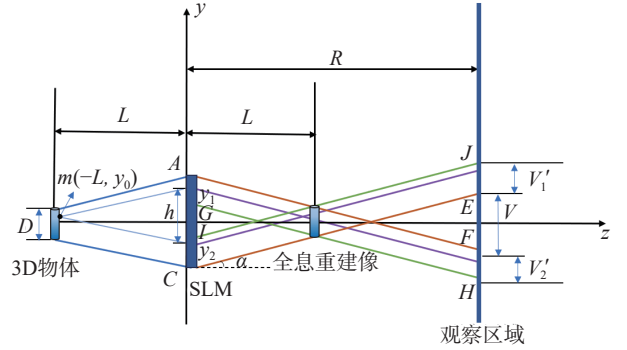


图4 所提方法中3D物体、SLM、全息重建像以及观察区域之间的空间位置关系

Fig.4 Spatial relationship between the 3D object, SLM, reconstructed image and viewing zone of the proposed method

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{H-D}{2L}\right) \quad (7)$$

图4中，3D物体顶部点的衍射边界由 AF 和 IJ 围成的区域与观察区域的交集决定，底部点的衍射边界由 CE 和 GH 围成的区域与观察区域的交集决定，其重叠区域 EF 能够覆盖3D物体的最高点和最低点的有效衍射区域，从而限制了有效视区的范围。通过该建模方法，冗余视区被压缩至

V_1' 和 V_2' 。根据几何关系, 可计算出物点 m 的衍射图在 y 轴上的坐标范围 y_1 和 y_2 , 衍射图的尺寸 h 和分辨率 $f(h)$ 分别为

$$y_1 = y_0 + L \tan \alpha = y_0 + H/2 - D/2 \quad (8)$$

$$y_2 = y_0 - L \tan \alpha = y_0 - H/2 + D/2 \quad (9)$$

$$h = y_1 - y_2 = H - D \quad (10)$$

$$f(h) = \text{int}(h/p) \quad (11)$$

式中, $\text{int}(\cdot)$ 代表取整操作。根据式(8)和式(9), 物点的衍射图位置由3D物体的位置决定。通过对PFP进行平移可以得到同一深度平面内其他物点的衍射图。在同一深度平面上, 物点间的距离与其衍射图间的距离成正比。相邻两物点的衍射图的距离 l 表达为

$$l = (y'_2 - y'_1)p = \frac{R}{R-L}p \quad (12)$$

式中, y'_2 为相邻点的纵坐标。

根据式(10), PFP的尺寸受到SLM尺寸和3D物体尺寸的限制, 即PFP的尺寸为SLM的尺寸与3D物体的尺寸之差。新定义的冗余视区 V_1' 和 V_2' 的尺寸为

$$V_1' = V_2' = D \quad (13)$$

比较式(13)和式(6), 由于观察距离 R 通常大于衍射距离 L , 因此, 所提方法所产生的冗余视区的尺寸较传统方法有所减小。所提方法在保持有效视区不变的前提下减小了冗余视区, 进而缩小了PFP的分辨率, 实现了计算效率的提高。

1.3 衍射传播优化方法

为进一步减小PFP的分辨率, 提升计算速度, 本文引入了虚拟的WRP来优化衍射传播过程, 如图5所示。首先, 将3D物体离散为分布在不同深度平面上的一系列点光源。其中, 物点 P 发出的衍射光传播至全息面上衍射图边界的过程如虚线箭头所示。物点 P 与WRP之间的深度距离为 z_1 , WRP与全息面之间的深度距离为 z_2 。根据标量衍射理论, WRP上PFP的复振幅分布 $C(x, y)$ 表达为:

$$C(x, y) = \exp(-jkz_1) \cdot \frac{jk}{2\pi z_1} \exp\left[\frac{-jk(x^2 + y^2)}{2z_1}\right] \quad (14)$$

式中: x 和 y 表示PFP上的空间坐标; k 为波数, $k=2\pi/\lambda$ 。通过对PFP在空间中进行平移, 可得到该深度平面内所有物点的衍射图。位于同一深度平

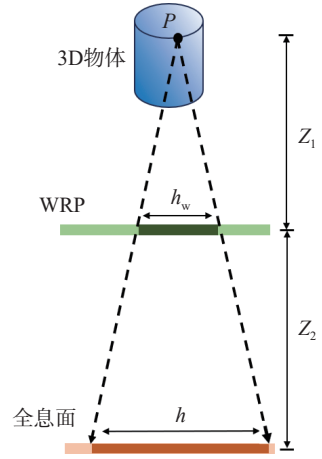


图5 通过WRP改进的NLUT方法

Fig.5 The NLUT method improved by the WRP

面上的各物点, 其衍射图的尺寸与该深度平面对应的PFP尺寸相同, WRP上衍射图的尺寸 h_w 与全息面上衍射图的尺寸 h 存在以下关系:

$$h_w = \frac{z_1 h}{z_1 + z_2} \quad (15)$$

WRP上相邻物点的衍射图的距离 l_w 与全息面上相邻物点的衍射图距离 l 的关系为

$$l_w = \frac{z_1 l}{z_1 + z_2} \quad (16)$$

基于以上步骤, 可以计算出WRP上的全息图。

接下来, 基于角谱衍射理论, 将WRP上的全息图衍射至全息面上, 得到全息面上的复振幅分布 $U(x, y)$, 表达为

$$U(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[C(x_w, y_w)] \cdot \mathcal{F}[H(f_x, f_y)]] \quad (17)$$

式中: $\mathcal{F}[\cdot]$ 和 $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$ 分别代表傅里叶变换和逆傅里叶变换; $C(x_w, y_w)$ 为WRP上坐标 (x_w, y_w) 的物点复振幅分布; (f_x, f_y) 为频域坐标。传递函数 $H(f_x, f_y)$ 的计算式为

$$H(f_x, f_y) = \exp\left(j2\pi z_2 \sqrt{1/\lambda^2 - f_x^2 - f_y^2}\right) \quad (18)$$

2 实验与结果分析

2.1 全息图的计算与加速验证

为验证所提方法对全息图计算速度的提升效果, 通过仿真实验对比了所提方法与NLUT方法在生成全息图时的总计算时间、生成单个物点的时间和计算过程中PFP的分辨率差异。仿真实验中选取了一组分辨率分别为 100×100 、 200×200 、

300×300 和 400×400 的物体，物体的衍射距离被固定为 20 cm，光源为波长 532 nm 的绿色激光。SLM 的分辨率为 1920×1080，像素间隔为 6.4 μm。仿真实验在配备了 8 GB 内存和 Intel Core i7 处

理器的计算机上运行，计算机的软件环境为 MATLAB 2021a，操作系统为 Microsoft Windows 10。仿真图案如图 6(a) 所示，图 6(b) 为仿真图案分辨率为 600×400 时的数值重建结果。

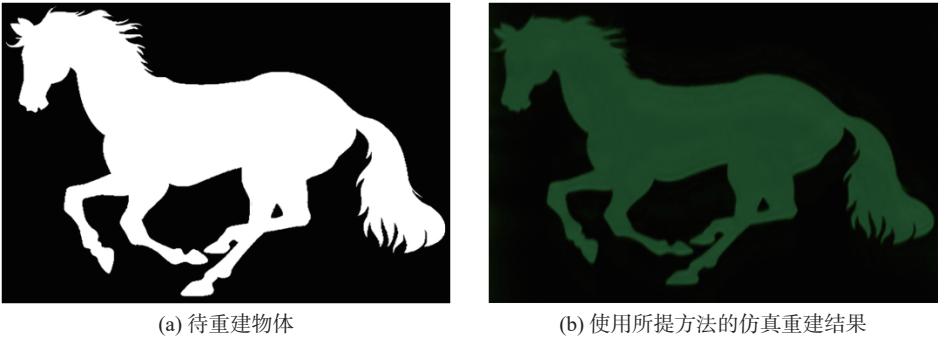


图 6 待重建物体及其仿真重建结果

Fig.6 Recorded object and the corresponding numerical reconstruction results

所提方法与 NLUT 方法的性能数据对比如表 1 所示。在使用 NLUT 方法时，4 个物体的 PFP 的分辨率均为 1 920×1 080，生成单个物点的时间分别为 4.381、4.804、5.204、7.038 ms，计算完整全息图的时间分别为 43.811、192.160、468.306、1126.081 s。相比之下，使用所提方法时，4 个物体的 PFP 分辨率分别降低为 1 092×588、1 032×528、972×468 和 912×408，生成单个物点的时间分别减少到 2.229、2.318、2.471、3.282 ms，计算完整全息图所需的时间也显著减少，分别为 22.294、92.723、222.307、525.121 s。基于仿真结果可知，所提方法显著提高了计算效率。对于分辨率分别为 100×100、200×200、300×300、400×400 的物体，计算速度分别提高了 49.12%、51.74%、52.53%、53.37%。

表 1 所提方法与 NLUT 方法性能数据对比表

Tab.1 Comparison of performance between the proposed method and the NLUT method

方法	物体的分辨率	全息图的计算时间/s	生成单个物点的时间/ ms	PFP的分辨率
所提方法	100×100	22.294	2.229	1 092×588
	200×200	92.723	2.229	1 092×588
	300×300	222.307	2.471	972×468
	400×400	525.121	3.282	912×408
NLUT方法	100×100	43.811	4.381	1 920×1 080
	200×200	192.160	4.804	1 920×1 080
	300×300	468.306	5.204	1 920×1 080
	400×400	1 126.081	7.038	1 920×1 080

图 7 展示了所提方法与 NLUT 方法在生成单个物点时的平均计算时间对比。结果表明，在使用 NLUT 方法时，随着物体像素数量的增加，单个物点的平均计算时间呈显著上升趋势。而使用所提方法时，当物体像素数量增加，单个物点的计算时间增长幅度较小，表现出更优的可扩展性。上述结果表明，所提方法在处理高分辨率物体时，具有更明显的计算效率优势。

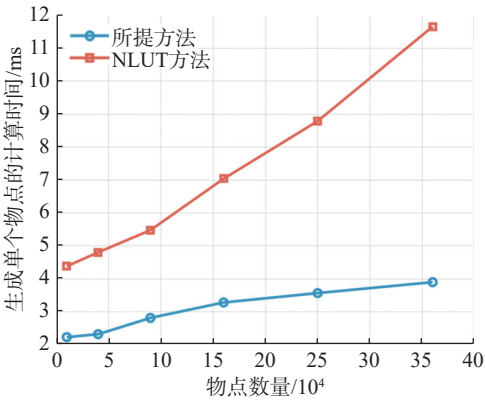


图 7 所提方法与 NLUT 方法生成单个物点时的平均计算时间对比

Fig.7 Comparison of the average calculation time of the proposed method and the NLUT method when a single point is generated

2.2 全息重建

图 8 展示了验证所提方法有效性的全息显示系统。该系统主要由激光器、扩束器、准直透镜、分束镜、SLM、计算机、4f 系统(一组相同焦距的固体透镜和一个孔径光阑)以及 CCD 相机组成。实验中使用绿色激光作为光源，波长为 532 nm。扩束器与准直透镜用于产生均匀的平行光束，计

算机用于生成并加载全息图至 SLM。两个焦距相同的透镜与光阑构成的 $4f$ 滤波系统用于抑制全息重建像中的零级光和高阶衍射光。当全息图加载至 SLM 后, 光束经光路调制和 $4f$ 滤波系统处理, 最终由 CCD 相机接收全息重建像。固体透镜的焦距为 300 mm, SLM 为西安中科微星生产的 FSLM-2K55-P, 其分辨率与像素间距分别为 $1\,920\times1\,080$ 和 $6.4\,\mu\text{m}$ 。

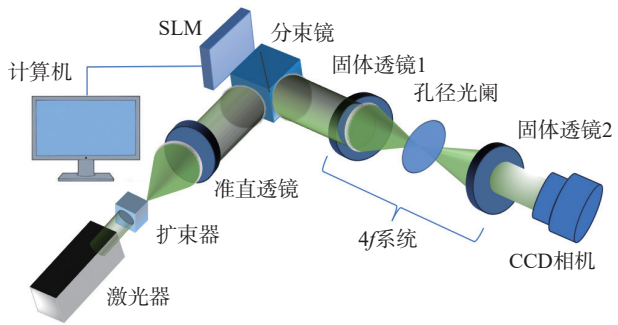


图 8 全息显示系统
Fig.8 Holographic display system

在光学重建实验中, 选取分辨率为 400×400 的字母“A”作为待重建物体, 如图 9(a) 所示。使用所提方法得到的全息图(在实际光学重建时, 将全息图补零至与 SLM 分辨率相同)如图 9(b) 所示。为验证所提方法的成像性能, 使用 NLUT 方法对字母“A”进行全息图计算作为对比。将两种方法所得的全息图加载至图 8 所示的光学系统中,

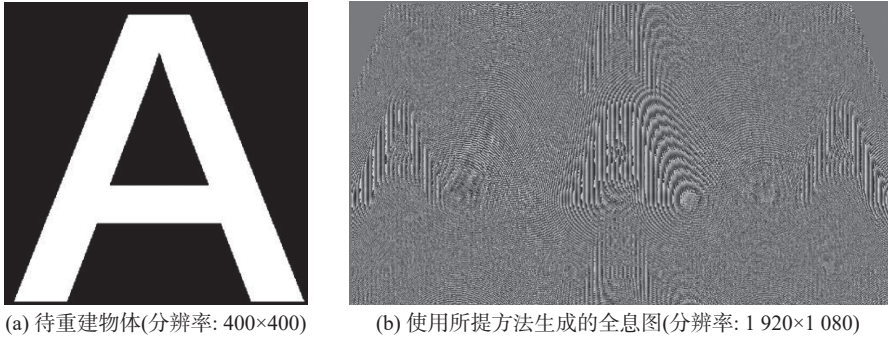


图 9 待重建物体及其生成的全息图
Fig.9 Recorded object and the corresponding hologram

为进一步验证所提方法的重建效果, 对 3D 物体进行了重建实验。实验选取“兔子和萝卜”作为待重建物体, 设置深度分别为 0.1 m 和 0.2 m, 图像分辨率为 800×550 。图 11(a) 和图 11(b) 展示了使用所提方法得到的重建结果, 焦点分别位于“兔子”和“萝卜”; 图 11(c) 和图 11(d) 为使用传统 NLUT 方法的重建结果, 对应的焦点同样分别聚焦于“兔子”和“萝卜”。实验结果表明,

得到的重建结果分别如图 10(a) 和图 10(b) 所示。从重建结果可以看出, 传统 NLUT 方法生成的全息重建像存在明显的条纹伪影和边缘失真, 整体图像清晰度较低。相比之下, 使用所提方法生成的重建像轮廓更加清晰, 结构更加完整, 图像的对比度与还原度均显著提升。这表明所提方法在抑制冗余衍射干扰和提升图像还原度方面具有更优的性能, 能够实现更高质量的重建效果。为进一步分析重建图像的质量, 对图 10(a) 和图 10(b) 所示的重建结果进行了光强分布分析, 其可视化结果如图 10(c) 和图 10(d) 所示。可以观察到, 采用所提方法进行光学重建时, 所得重建像的光强分布更加均匀, 整体成像质量显著优于传统 NLUT 方法。为进一步对比不同算法的客观成像性能, 对两种方法的重建结果在感兴趣区域 (region of interest, ROI) 内的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 和结构相似性指数 (structural similarity index measure, SSIM) 进行了计算。计算结果表明, 传统 NLUT 方法的重建结果在 ROI 内的 PSNR 为 11.67 dB, SSIM 为 0.831; 所提方法 PSNR 提高至 21.16 dB, SSIM 提升至 0.939。与传统方法相比, 所提方法的峰值信噪比提高约 9.5 dB, 对应的均方误差仅为前者的约 11.2%, 重建误差降低约 89%, 表明所提方法在全息重建精度上取得了显著提升。

所提方法在 3D 重建中同样表现出更高的成像质量, 重建像轮廓清晰、结构完整, 光强分布均匀, 实现了更精确的 3D 重建。

3 结 语

本文针对当前全息图生成过程中存在的实时性差、冗余视区计算开销较大的问题, 提出了一

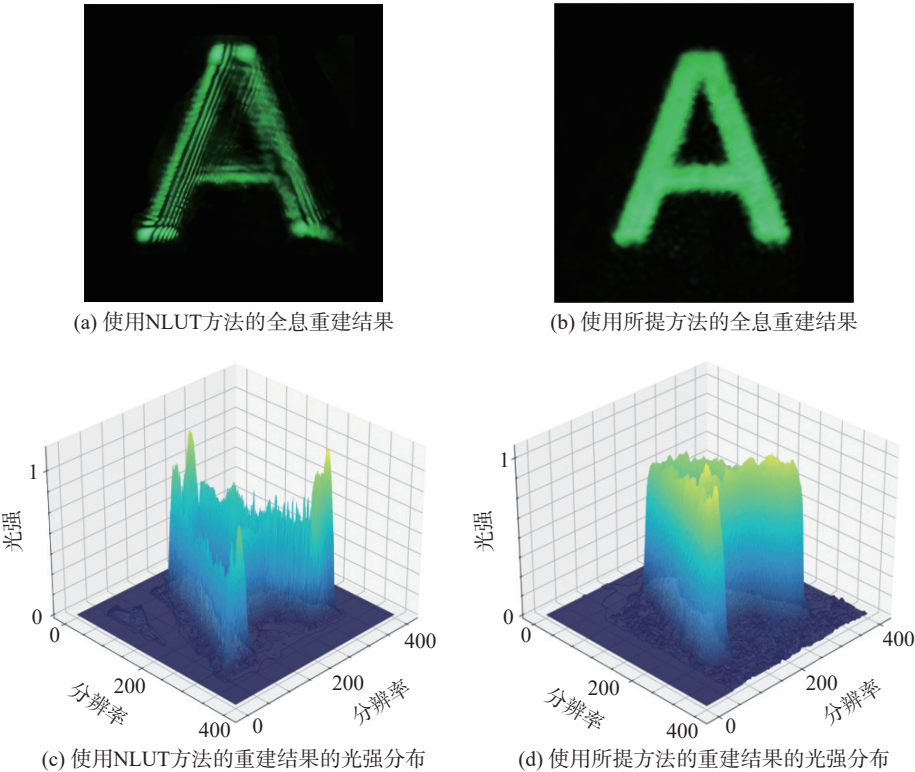


图 10 全息重建结果及光强分布对比图

Fig.10 Holographic reconstruction results and their light intensity distribution

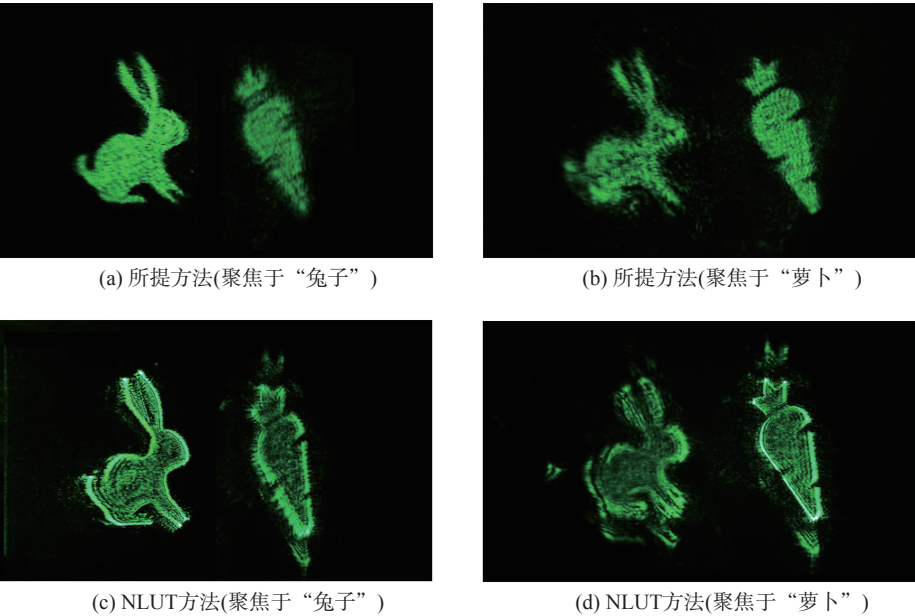


图 11 全息 3D 重建结果

Fig.11 Holographic 3D reconstruction results

种基于有效视区分析的快速全息图生成方法。所提方法首先构建有效视区的几何模型，分析衍射过程中的有效信息与冗余信息，以此降低 PFP 的分辨率；进一步结合 WRP 与 NLUT 算法，最终实现了不同物体分辨率下全息图的快速生成。仿真实验结果表明，所提方法可显著提高全息图计算

速度，在高分辨率物体场景下，效率提升更加明显。同时，在光学重建实验中，所提方法的成像质量优于 NLUT 方法。此外，本文提出的有效视区分析方法具有良好的通用性，可广泛应用于各类点元法计算模型，为实现快速全息显示提供了可行的技术路径。

基于本文提出的有效视区分析方法的核心优势及当前点元算法的发展需求,未来研究可以将有效视区分析与点元法的优化算法相结合。例如,采用WRP方法及其相关优化算法时,重建质量对WRP的深度位置高度敏感。在仅引入单个WRP时,3D物体上不同深度层的物点与WRP的相对位置存在差异,导致重建质量不均。针对这一问题,可根据深度信息将物点划分为不同物点组,分别计算各物点组的独立点元在对应WRP上的衍射图^[24-25]。随后,结合有效视区分析方法,对各衍射图进行优化分割以提取对应的有效衍射区,从而提升整体重建质量。此外,所提的有效视区分析法同样适用于彩色全息场景^[26-27]。针对RGB三通道的全色全息图生成,可分别对不同波长通道进行有效视区分析,并将各通道WRP置于合适的深度位置,以在保证重建质量一致性的前提下提高全色全息图的计算效率。进一步地,可以结合GPU加速框架,为有效视区计算模块设计并行化加速策略,例如将不同深度层的物点有效视区计算任务分配至独立GPU线程,推动其在实时3D显示(如VR/AR近眼显示)领域的应用。

参考文献:

- [1] 刘娟,皮大普,王涌天.实时全息三维显示技术研究进展[J].光学学报,2023,43(15):128-141.
- [2] 王琼华,王爱红,梁栋,等.裸视3D显示技术概述[J].真空电子技术,2011,24(5):1-6.
- [3] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [4] JANG C, BANG K, CHAE M, et al. Waveguide holography for 3D augmented reality glasses[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 66.
- [5] YIN K, HE Z Q, XIONG J H, et al. Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(2): 022010.
- [6] PAN Y J, LIU J, LI X, et al. A review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1599-1610.
- [7] PI D P, LIU J, WANG Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 231.

- [8] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 446-459.
- [9] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].4版.北京:机械工业出版社,2016:354-416.
- [10] DORRAH A H, BORDOLOI P, DE ANGELIS V S, et al. Light sheets for continuous-depth holography and three-dimensional volumetric displays[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(5): 427-434.
- [11] GAO H, FAN X H, XIONG W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(11): 210030.
- [12] BLINDER D, BIRNBAUM T, ITO T, et al. The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 572-600.
- [13] TSANG P W M, POON T C, WU Y M. Review of fast methods for point-based computer-generated holography [Invited][J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 837-846.
- [14] PARK J H. Recent progress in computer-generated holography for three-dimensional scenes[J]. *Journal of Information Display*, 2017, 18(1): 1-12.
- [15] 王迪,李赵松,黄倩,等.计算全息图的快速生成技术[J].信号处理,2022,38(9):1863-1871.
- [16] 金国藩,张浩,苏萍,等.计算机制全息图[M].北京:科学出版社,2020.
- [17] LUCENTE M E. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 28-34.
- [18] KWON M W, KIM S C, KIM E S. Three-directional motion-compensation mask-based novel look-up table on graphics processing units for video-rate generation of digital holographic videos of three-dimensional scenes[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A22-A31.
- [19] KIM S C, KIM E S. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D55-D62.
- [20] SHIMOBABA T, MASUDA N, ITO T. Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3133-3135.
- [21] ZHU J Y, BI Y, SUN M Y, et al. Rapid hologram generation through backward ray tracing and adaptive-resolution wavefront recording plane[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(11): 114204.
- [22] LI N N, WANG D, LIU C, et al. Large-size holographic display method based on effective utilization of two spatial light modulators[J]. *Optics Communications*, 2019, 453: 124311.

[3] 崔敏. 炼钢转炉汽化冷却烟道热力性能模拟与计算 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[4] 周涛, 侯祥松, 谢建, 等. 转炉烟气中低温余热回收工艺研究 [C]//第十二届中国钢铁年会论文集——8. 能源、环保与资源利用. 北京: 中国金属学会, 2019: 194–198.

[5] 宋全刚, 王琦, 张承, 等. 基于 ANSYS 分析的水冷散热器多目标优化 [J]. [流体机械](#), 2022, 50(4): 65–70.

[6] GÓMEZ A, FUEYO N, DíEZ L I. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5/6): 532–546.

[7] 凌桂龙. *Fluent 2020 流体计算从入门到精通* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.

[8] 龚红兰, 李凌. 某发动机喷管内流动与换热的瞬态模拟 [J]. *上海理工大学学报*, 2020, 42(4): 320–325.

[9] JIANG Z, CHEN P, LIU P, et al. Numerical simulation and structure optimization of converter gas evaporative cooler[C]//*Proceedings of Heat Transfer Summer Conference*. Minneapolis: ASME, 2013: V002T07A030.

[10] 史光梅, 刘朝. 工业炉内辐射换热模型研究进展 [J]. [工业加热](#), 2004, 33(5): 9–12.

[11] 王彦刚, 王洪利, 梁精龙, 等. 转炉汽化冷却烟道数值模拟 [J]. *化学工程*, 2022, 50(10): 69–73.

[12] 赵浩然, 黄嗣罗, 林梅. 余热锅炉入口管箱底面沉积特性 [J]. *化工学报*, 2024, 75(10): 3464–3476.

[13] 李榕. 转炉余热锅炉炉内工况的数值模拟 [D]. 辽宁: 东北大学, 2011: 21–22.

[14] 王猛. 转炉烟道式余热锅炉热力计算及数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 39–40.

(编辑：董 伟)



(上接第 621 页)

[23] LI Y L, WANG D, LI N N, et al. Fast hologram generation method based on the optimal segmentation of a sub-CGH[J]. [Optics Express](#), 2020, 28(21): 32185–32198.

[24] HASEGAWA N, SHIMOBABA T, KAKUE T, et al. Acceleration of hologram generation by optimizing the arrangement of wavefront recording planes[J]. [Applied Optics](#), 2017, 56(1): A97–A103.

[25] PHAN A H, ALAM M A, JEON S H, et al. Fast hologram generation of long-depth object using multiple wavefront recording planes[C]//*Practical Holography XXVIII: Materials and Applications*. San Francisco: SPIE, 2014: 223–230.

[26] OKADA N, SHIMOBABA T, ICHIHASHI Y, et al. Fast calculation of computer-generated hologram for RGB and depth images using wavefront recording plane method[J]. *Photonics Letters of Poland*, 2014, 6(3): 90–92.

[27] SIFATUL ISLAM M, PIAO Y L, ZHAO Y, et al. Max-depth-range technique for faster full-color hologram generation[J]. [Applied Optics](#), 2020, 59(10): 3156–3164.

(编辑：董 伟)