视频速全息远程呈现：通过单次拍摄、无参考波前测量

Minwook Kim[1,2,†]、Chansuk Park[1,2,3,†]、Chulmin Oh[1,2,†]、KyeoReh Lee[1,2,4], Herve Hugonnet[1,2], YongKeun Park[1,2,5,*]

[1] 物理系，韩国科学技术院（KAIST），韩国大田市儒城区大学路291号，邮编34141，韩国[2] KAIST健康科学与技术研究所，KAIST，韩国大田市儒城区大学路291号，邮编34141，韩国[3] 现任职单位：三星电机，韩国水原市灵通区梅莲路150号，邮编16674，韩国[4] 现地址：应用物理系，耶鲁大学，美国康涅狄格州纽黑文市，邮编06520，美国[5] Tomocube公司，韩国大田市儒城区竹洞路141号，邮编34109，韩国

[†]这些作者对本文贡献相同。
[*]yk.park@kaist.ac.kr

摘要：我们提出了一种无参考全息远程呈现系统，仅通过一次强度散斑测量即可直接捕获并重放复杂的光学波前。利用预先表征的几何相位扩散器，入射场发生自干涉并形成散斑图案；随后，通过基于散斑相关散射矩阵的方法恢复波前，并使用结合内斯捷罗夫加速的平滑振幅流进行优化。重建相位被直接投影到空间光调制器上，以实现全息重放。我们展示了体积重新聚焦、动态三维重建，以及在适中的通信带宽下以约 28 帧每秒持续进行视频速率运行。结果表明，以测量为驱动的波前采集是实现紧凑且物理保真度高的全息远程呈现的一条实用途径。

关键词：全息远程呈现；全息显示；全息成像

1 引言

临场感旨在通过忠实传递三维（3D）场景[1–3]，使空间上彼此分离的用户共享真实的视觉体验和共在感。自从在科幻小说和虚拟现实中早期提出这一概念以来，临场感已在远程医疗、远程原型设计、广告、沉浸式测绘和娱乐等领域得到实际应用[4–9]。尽管技术已取得重大进展，要实现物理上忠实的临场感——即保留远程场景的光学行为，而非仅在视觉上对其进行近似[10,11]——仍是一项尚未解决的挑战。

典型的临场感处理流程包括成像、流传输、处理和显示阶段[12]。大多数现有系统依赖深度相机或多视角成像来捕获场景几何结构，随后通过数字渲染合成依赖视点的图像[13–15]。尽管这类方法受益于商业技术的成熟和实时运行能力，但其根本上重建的是几何表示（例如深度图、网格和纹理），而非底层的光学波前。因此，显示的视图在视觉上虽合理，却无法忠实再现波前。光场和多视角相机系统进一步编码光线的方向信息，提升视差和视点连续性[16,17], ，但仍需要计算渲染或计算机生成全息术，且通常涉及大量数据、复杂的标定和显著的处理开销[18]。近来，将神经场景表示（例如神经辐射场（NeRF））与全息或非相干成像相结合的数据驱动方法，在全息通信中展现出令人瞩目的视觉保真度[19–21]。这些方法根据学习得到的场景模型推断依赖视点的全息图，是一种强大的渲染全息形式。然而，这些方法仍需大量计算，并依赖对光传播的合成近似，而非直接测量复光场。因此，计算合成的临场感与物理上忠实的波前重现之间仍存在根本性的差距。

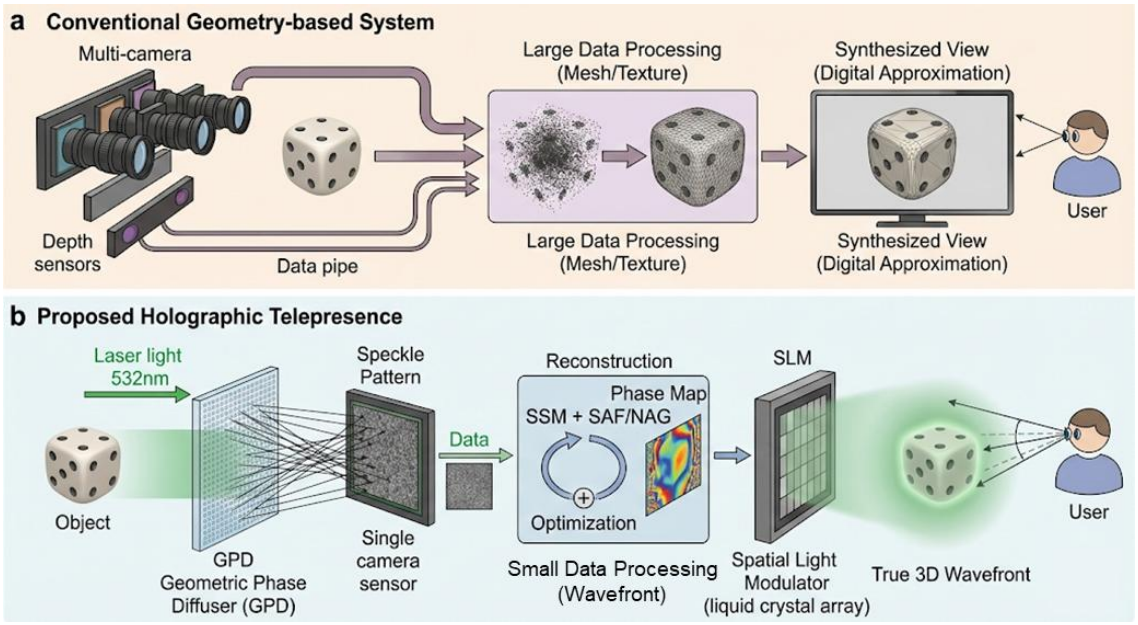


图 1 | 基于几何的远程呈现与基于波前的全息远程呈现的概念比较。 (a) 传统临场感处理流程通过多台深度

从光学角度来看，理想的全息远程呈现需要捕获、传输并重放复光学波前本身。关于复杂介质和散射介质中波前控制的大量研究已证实，利用空间光调制器，传输矩阵和散斑相关方法能够对光场进行确定性重建与重放[22–24]。原则上，传统全息成像可以实现这一目标[25,26], ，但通常依赖干涉参考光束以及庞大且对振动敏感的光学配置，限制了其在紧凑、可扩展临场感系统中的实用性。因此，一个尚未满足的关键需求是构建一种无需参考光束、数据高效且紧凑的波前式临场感架构，并能够以视频帧率运行。

在本研究中，我们通过提出一种基于单次曝光、无参考光束散斑相关成像与波前重放的全息远程呈现系统，弥补了这一空白。在物体与相机之间放置预先表征的几何相位扩散器，使入射光场发生自干涉并形成仅强度散斑图样，再通过散斑相关散射矩阵（SSM）方法从中恢复复波前[27–

[29]。随后，采用平滑振幅流与 Nesterov 加速梯度优化对恢复的光场进行精细化处理，并将其直接投射到纯相位空间光调制器上，以实现全息重放。这一端到端的测量驱动流程无需显式几何估计、多视角采集或干涉参考光束，即可实现体积重新聚焦和动态三维全息播放。

我们通过体积重新聚焦、动态场景重建和系统级性能评估，对所提出的框架进行了实验验证。原型系统以适中的通信带宽，实现了约 28 帧每秒的稳定视频速率全息远程呈现。除了沉浸式可视化之外，这项工作还将物理真实的波前临场通信定位为连接计算场景表示与光学全息显示器的缺失环节。

2 方法

2.1 光学装置

如图 2 所示，全息远程呈现系统的整体光学配置由两个功能不同的阶段组成：用于单次波前采集的成像阶段，以及用于全息波前重放的显示阶段。

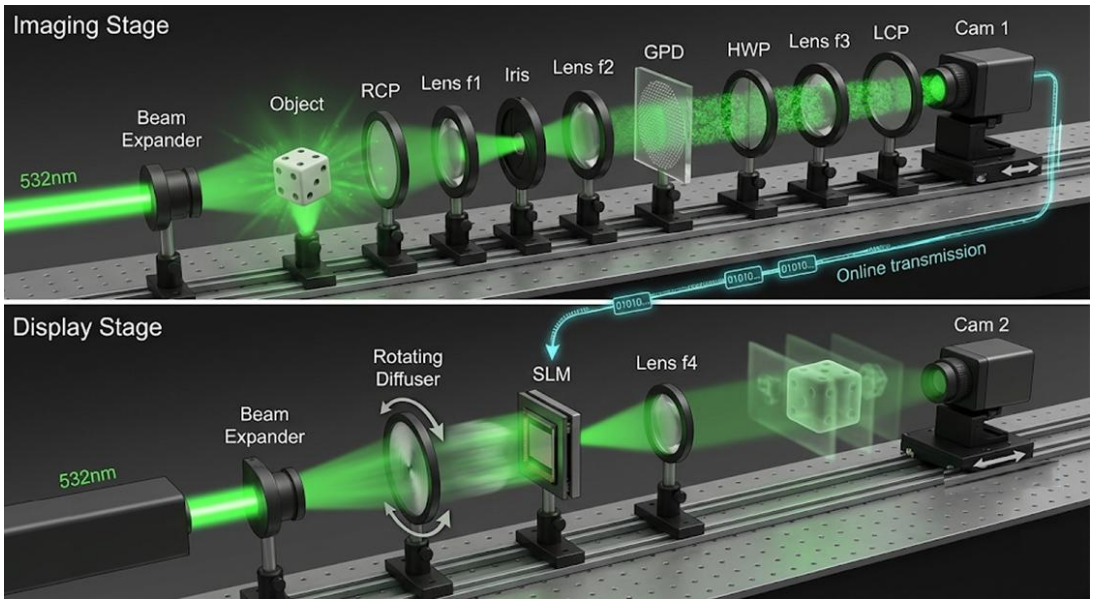


图 2 | 全息远程呈现系统的光学架构。 **统**。该系统由一个成像阶段 f or

单次波前采集（上）和用于全息波前重放的显示阶段（下）。RCP/LCP：右旋/左旋圆偏振片；HWP：半波片。

2.1.1 成像阶段：基于单次曝光散斑的波前采集

在成像阶段，空间相干激光光源（532 nm，Samba，Cobolt AB）照射物体。通过圆形光阑（半径 0.6 mm），在透镜 L1 的傅里叶平面对散射光场进行收集和光谱带限；该光阑定义了系统的空间频率支持域并控制过采样。经过滤波的光场由透镜 L2 中继至预先表征的几何相位扩散器（GPD；Thorlabs, Inc.），后者作为已知的随机相位掩模。扩散器使入射场产生自干涉，从而在传感器平面生成仅强度散斑图样，无需外部参考光束。圆偏振光学器件——包括右旋圆偏振片（RCP）、半波片（HWP）和左旋圆偏振片（LCP）——用于分离几何相位调制，从而实现紧凑的无参考光学配置。

GPD 的像素间距为 30 μm，分辨率为 512 × 512 pixels。由于扩散片的相位轮廓是先验已知的，因此对物理模型和数值模型之间的 GPD 旋转和放大倍率失配进行了校准，得到优化后的旋转角度为 0.667°，放大倍率为 0.999。光线经透镜 L3 传播后，形成的散斑强度由单色相机（Cam1，MD120MU-SY, XIMEA GmbH）记录，其像素尺寸为 3.1 μm。由于 L2 和 L3 的焦距比，重建平面处的有效几何相位扩散片像素尺寸为 20 μm。

2.1.2 显示阶段：全息波前重放

在显示阶段，将数值重建得到的相位分布加载到纯相位空间光调制器（空间光调制器；LC2012, Holoeye；像素间距为 36 μm）上。为抑制光学再现过程中的相干散斑伪影，在空间光调制器上游放置一片旋转扩散片。随后，透镜 L4 将调制波前投射出来，从而在自由空间中形成三维全息图像。

为实验验证投射波前，将第二台相机（Cam2；像素尺寸为 4。8 μm，Flea3 FL3-U3- 13Y3M，FLIR）安装在电动平移台上。沿光轴扫描相机位置，以对体积波前再现进行深度分辨验证。

2.2 重建算法

为了从单次、仅强度的散斑测量中恢复光阑平面上的复光场，我们采用两阶段重建框架，将散斑相关散射矩阵（SSM）方法与使用平滑振幅流（SAF）[27] 和 Nesterov 加速梯度（NAG）优化[30,31]的迭代细化相结合。SSM方法基于物理原理提供复场的初始估计，而后续的 SAF + NAG 细化则提升了重建保真度和时间稳定性，这对动态全息远程呈现至关重要。

2.2.1 散斑相关散射矩阵（SSM）

SSM方法利用散斑图案固有的统计相关性，仅凭一幅强度散斑图像即可重建光场的相位和振幅[27]。复光学通道的时空相关性对于在动态条件下保持重建保真度起着关键作用[32–34]。与依赖外部参考光束或干涉配置的传统全息方法不同，SSM能够通过紧凑的光学装置实现无参考复场恢复。在所提出的系统中，SSM 算法重建光阑平面处的复场，该复场是入射波前定义明确的中间表示。随后，对重建的光阑平面场应用二维傅里叶变换，即可得到物平面波前，这与系统的傅里叶光学几何相符。基于SSM的这种初始化为迭代细化提供了可靠的起点，从而降低后续相位恢复优化陷入较差局部极小值的风险。下文将详细介绍SSM方法的数学推导和实现步骤。

2.2.2. 结合 SAF 与 NAG 算法的迭代

采用平滑振幅流（SAF）算法，通过最小化预测散斑场与测量散斑场之间经过平滑处理的振幅差异，来细化初始复场估计[30]。相位恢复问题本质上是非凸的，因此算法策略需要着重确保收敛稳定性和鲁棒性，而非追求严格的最优性[35]。近期研究将计算机生成全息术表述为一个非凸逆问题，凸显了优化策略在平衡收敛稳定性、重建保真度与计算效率方面的核心作用[36]。由于底层损失函数具有非凸性，要实现可靠收敛，就需要有物理意义的初始化，而上述SSM重建正好提供了这种初始化。

为加快收敛并提高数值稳健性，我们将 Nesterov 加速梯度（NAG）优化[31] 融入 SAF 框架。该基于动量的更新方案不仅能加快收敛，更重要的是能抑制迭代重建过程中的帧间波动，这对于动态场景的时间稳定全息重放至关重要（见结果 3.2）。

为进行基准测试，我们还评估了 Wirtinger流（WF）算法，这是一种广泛用于复场重建[37]的相位恢复方法。为确保比较公平，WF 和 SAF + NAG 均使用由 SSM 得到的相同复场进行初始化。

2.2.3 符号说明

我们将测量散斑场的形成建模为入射光场与传感器平面之间已知的线性映射。令 $\mathbf{x} \in C^N$ 表示以输入模式基表示的复值入射场，令 $\mathbf{T} \in C^{M \times N}$ 表示将输入模式映射到传感器像素[38,39]的已知传输矩阵。测量平面上的复散斑场可表示为

$$\boldsymbol{y} = \sum_{a=1}^{N} x_a t_a = \mathbf{T}\mathbf{x}, \tag{1}$$

其中，$\mathbf{T} = [t_1, \ldots, t_N]$ 且 t_a 表示传感器平面上第a个输入模式的响应。相机

仅记录复场的强度,

$$I(r) = |y(r)|^2,\ r \in \{1, \dots, M\}, \tag{2}$$

其中r表示传感器像素。传感器坐标上的空间平均记为

$$\langle \cdot \rangle_r = \frac{1}{M}\sum_{r=1}^{M}(\cdot). \tag{3}$$

过采样比记为 γ，定义为测量输出模式数与未知输入模式数之比，即 $\gamma = N_{out}/N_{in}$ ，其中N_{out} 对应独立相机采样模式的数量，而N_{in} 表示入射光场中可分辨输入模式的数量。在我们的系统中，N_{out} 由裁剪后的有效相机采样区域决定，而N_{in} 则由扩散器视场和光学放大率所支持的空间模式最大数量决定。随着 γ 增大，散斑统计中的高阶相关项会衰减，从而能够采用秩一近似，这是 SSM 重建有效性的基础。由此得到的过采样比 $\gamma > 1$ 可确保足够的冗余度，从而可靠地基于散斑相关恢复相位和振幅。

2.2.4 通过幂迭代进行 SSM计算

SSM方法通过根据二阶强度统计构建散斑相关散射矩阵来重建入射场。使用上文引入的符号，相关矩阵 $\mathbf{Z} \in \mathrm{C}^{N\times N}$ 定义为

$$\mathrm{Z}_{pq} = \frac{1}{\Sigma_p \Sigma_q}\left[\langle t_p^* t_q y^* y\rangle_r - \langle t_p^* t_q\rangle_r \langle y^* y\rangle_r\right], \tag{4}$$

其中 t_p 表示第 p 个输入模式的传感器平面响应， $\Sigma_p = \langle |t_p|^2 \rangle_r$。

U在随机（漫射）光场的假设下，应用维克定理[40] 可得

$$\mathrm{Z}_{pq} = \alpha_p \alpha_q^* + \frac{1}{\Sigma_p \Sigma_q}\langle t_p^* y^*\rangle_r \langle t_q y\rangle_r, \tag{5}$$

其中，向量 α 与入射场系数 x_a成正比。

随着过采样比 γ 增大，式（5）中的第二项逐渐衰减，$\mathbf{Z}$ 因而近似为秩一矩阵。因此，$\mathbf{Z}$ 的主特征向量收敛至 α，进而在相差一个全局相位因子的意义下收敛至入射场 $\mathbf{x}$。

直接构造 $C^{N\times N}$ 并进行本征模分解在计算上难以实现。我们改用幂迭代恢复主特征向量，该方法只需反复计算矩阵–向量乘积 $\mathbf{Zv}$。

令 $t_p(r)$ 表示第 p 个传输向量的第 r 个元素，并定义强度涨落 $\Delta I(r) = I(r) - \langle I \rangle_r$。利用恒等式 $y^* y = \boldsymbol{I}$，式 (5) 可改写为

$$Z_{pq} = \frac{1}{\Sigma_p \Sigma_q} \langle t_p^* t_q \Delta \boldsymbol{I} \rangle_r \,. \tag{6}$$

展开空间平均后可得

$$\langle t_p^* t_q \Delta I \rangle_r = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^{M} t_p^*(r) \Delta I(r) t_q(r) = \left(\mathbf{T}^\dagger \mathrm{diag}(\Delta \boldsymbol{I}) \mathbf{T} \right)_{pq}, \tag{7}$$

由此可将相关矩阵简洁地表示为

$$Z = \frac{1}{M} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{T}^\dagger \mathrm{diag}(\Delta \boldsymbol{I}) \mathbf{T} \mathbf{D}^{-1}, \tag{8}$$

其中 $\mathbf{D} = \mathrm{diag}(\Sigma_1, \ldots, \Sigma_N)$，$\Sigma_p = \langle |t_p(r)|^2 \rangle_r$ 表示第 p 个传输模式在传感器平面上的平均能量，而通过 D^{-1} 进行对角归一化可消除模式相关的功率变化。

因此，对于任意向量 $\mathbf{v} \in C^N$，$\mathbf{Z}$ 的作用为

$$\mathbf{Zv} = \frac{1}{M} \mathbf{U}^\dagger [\Delta \boldsymbol{I} \odot (\mathbf{Uv})], \tag{9}$$

其中 $\mathbf{U} = \mathbf{TD^{-1}}$ 和 $\odot$ 表示逐元素乘法。

利用这样一个事实，我们避免显式构造 $\mathbf{U} \in C^{N\times N}$ ：在我们的光学配置中，传输算子通过傅里叶传播和一个已知的几何相位扩散器实现。因此，我们定义前向算子

$$\mathcal{O}(\mathbf{X}) = \frac{1}{M} \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\mathbf{X}) \odot \mathbf{G}), \tag{10}$$

其中，F(·) 表示傅里叶变换，$\mathbf{G}$ 是几何相位扩散器已知的传输函数。相应的伴随算子 $\mathcal{O}^\dagger(\cdot)$ 用于 SSM 幂迭代和后续 SAF 精化中的反向传播。SSM 初始化的完整幂迭代过程总结于算法 1。

算法 1：通过幂迭代重建散斑相关散射矩阵（SSM）

输入：测量散斑强度 $\boldsymbol{I}_{meas}$ ，初始随机复场估计 $\mathbf{x}_{SSM}^{(0)}$

输出：初始物体场估计 $\mathbf{x}_{SSM}$

1. 归一化

$$\mathbf{x}_{SSM}^{(0)} \leftarrow \mathbf{x}_{SSM}^{(0)} / \left|\mathbf{x}_{SSM}^{(0)}\right|$$

2. 计算强度涨落

$$\Delta \boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_{meas} - \langle \boldsymbol{I}_{meas} \rangle_r$$

3. **对于** $k = 1$ 到 K_{SSM} **执行**

主特征向量的幂迭代:

4. 更新

$$\mathbf{x}_{SSM}^{(k)} \leftarrow \mathcal{O}^{\dagger}\left(\Delta \boldsymbol{I} \odot \mathcal{O}\left(\mathbf{x}_{SSM}^{(k-1)}\right)\right)$$

5. 归一化

$$\mathbf{x}_{SSM}^{(\boldsymbol{k})} \leftarrow \mathbf{x}_{SSM}^{(\boldsymbol{k})} / \left|\mathbf{x}_{SSM}^{(\boldsymbol{k})}\right|$$

6. **结束**

7. 返回 $\boldsymbol{x}_{SSM}^{(K_{SSM})}$

在本工作中，我们设定 K_{SSM} = 100，这足以确保所有实验中均稳定收敛。虽然 SSM 能快速、直接地初始化复场，但式 (5) 中高阶相关项会产生残余噪声，因此需要进行后续迭代细化。

2.2.5 平滑振幅流（SAF）

采用平滑振幅流（SAF）算法，通过最小化预测散斑场与测量散斑场之间经平滑处理的振幅差异，优化从 SSM 重建中获得的初始复场估计[30]。与基于强度的最小二乘公式不同，SAF 引入平滑参数和向量，对振幅失配进行正则化，从而提高存在测量噪声时的数值稳定性。

测量振幅为 $\boldsymbol{\psi} = \sqrt{I_{meas}}$。SAF 最小化平滑振幅损失函数

$$\mathcal{L}_{SAF}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\left\|\sqrt{|\mathbf{u}|^2 + \epsilon^2} - \sqrt{\boldsymbol{\psi}^2 + \epsilon^2}\right\|_2^2, \tag{11}$$

其中，ϵ 是一个平滑向量，可在预测振幅趋近于零时避免梯度奇异性。本文中，我们将平滑参数隐式设为 2，将平滑向量设为 $\epsilon = \boldsymbol{\psi}$。

由于 SAF 目标函数是非凸的，其收敛性很大程度上取决于具有物理意义的初始化。在本研究中，由 SSM 得到的场估计提供了这样的初始化，使 SAF 能够可靠地收敛到一致的解，而不是陷入较差的局部极小值。这种组合发挥了两种方法的互补优势：SSM 提供了对入射场快速且基于物理原理的近似，而 SAF 则抑制了源自高阶散斑相关性的残余噪声。梯度计算和迭代更新使用伴随算子 $\mathbf{T}^{\dagger}$进行，与上文所述的前向光学模型一致。SAF 代价函数采用 Nesterov 动量进行优化。

除非另有说明，所有运算（包括除法和逐元素乘积 $\odot$）均逐元素进行。算子 $\angle(\cdot)$ 表示提取相位。组合式 SAF + NAG 更新方案详见算法 2。

算法 2：SAF + NAG 实现

1. 初始化 $\boldsymbol{x}^{(0)} = \boldsymbol{x}_{SSM}$。设置 $\delta = 10^{-8}$ 和 $_0t = 1$。
2. **对于** $k = 1$ 到 K **执行：**

3. 前向投影：

$$\boldsymbol{y}^{(\mathrm{k})} = \mathcal{O}(\boldsymbol{x}^{(k)})$$

4. 权重场：

$$\boldsymbol{w}^{(k)} = \frac{|\boldsymbol{y}^{(k)}|}{\psi + \delta}$$

5. 相位校正场：

$$\boldsymbol{p}^{(k)} = \left(\sqrt{(\boldsymbol{w}^{(k)})^2 + 1} - \sqrt{2}\right) \odot \frac{\boldsymbol{w}^{(k)}}{\sqrt{(\boldsymbol{w}^{(k)})^2 + 1}} \odot \psi \odot e^{i \cdot \angle \boldsymbol{y}^{(k)}}$$

6. 梯度（反投影）：

$$\boldsymbol{g}^{(k)} = \mathcal{O}^{\dagger}\left(\boldsymbol{p}^{(k)}\right)$$

7. NAG 更新：

$$\boldsymbol{z}^{(k)} = \boldsymbol{x}^{(k)} - \eta \odot \boldsymbol{g}^{(k)}$$

$$t^{(k+1)} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(t^{(k)})^2}}{2}$$

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \boldsymbol{z}^{(k)} + \left(\frac{t^{(k)} - 1}{t^{(k+1)}}\right)(\boldsymbol{z}^{(k)} - \boldsymbol{z}^{(k-1)})$$

8. **结束**
9. 返回 $\boldsymbol{x}^{(K)}$

其中，$\boldsymbol{x}^{(0)}$ 表示通过SSM重建获得的初始场估计，$\boldsymbol{x}^{(k)}$ 表示第k次迭代细化的输出。向量ψ 对应于测量散斑的平方根

相机记录的强度。 步长 η 定义为 $\eta = \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \psi_i^2}/max(|\boldsymbol{x}^{(0)}|)$，它根据测得的信号能量自适应地缩放梯度更新。为避免除以零导致数值不稳定性，引入一个较小的常数 $\delta = 10^{-8}$。初始 Nesterov 动量参数设为 $t_0 = 1$。迭代总次数设为 $K = 100$，根据相对更新判据 $\|\boldsymbol{x}^{(k)} - \boldsymbol{x}^{(k-1)}\| / \|\boldsymbol{x}^{(k-1)}\| < 10^{-2}$，该次数足以确保所有实验均收敛。

3. 结果

3.1 体积重新聚焦

我们首先通过考察所提出的全息远程呈现系统能否从单次散斑测量中重建三维场景并重新聚焦，验证其物理保真度。作为测试物体，将三个骰子放置在两个不同的轴向平面上，其中两个骰子位于$z = 0$ mm处，一个骰子位于$z = 250$ mm处。使用传统相机拍摄场景的参考图像以作比较（图3(c)上排）。图3(a)显示了经几何相位扩散器在传感器平面记录的原始散斑强度图像；图3(b)则展示了在光阑平面重建的复光场，以及通过傅里叶变换得到的相应物平面光场。利用恢复的复波前，将光场传播至三个轴向距离$z_1 = 0$ mm、$z_2 = 125$ mm和$z_3 = 250$mm处进行数值重新聚焦（图3(c)中排）。

在z_1, 处，两个近处的骰子清晰对焦，而远处的骰子模糊；在 z_3 处，远处的骰子清晰对焦，近处的骰子则失焦。在中间平面z_2 , 处，所有物体都呈现模糊状态。这些深度相关的聚焦转换证实，重建场保留了体积波前传播所需的正确轴向相位关系，而非仅仅表示一种分层深度强度近似。传播自适应全息框架已证明，要实现物理一致的三维成像，必须明确处理跨深度的光传播，而不能仅进行单平面优化[41]。为了进一步验证恢复的波前能够通过物理方式再现，数值重建得到的相位

被投射到空间光调制器上，并经过自由空间中的实际光传播。再现的全息图由安装在平移台上的第二台相机记录，相机焦点经过调整，与相同的轴向位置相匹配z_1, z_2, 和z_3（图3(c)底行）。光学再现的图像呈现出深度相关的聚焦行为，与数值重新聚焦结果和传统参考图像都高度吻合。数值重新聚焦与光学再现结果一致，这表明所提出的系统能够从单次仅强度测量中获取物理一致的三维波前，并实现忠实的体积重建和全息播放。补充影片1展示了相应的动态演示。

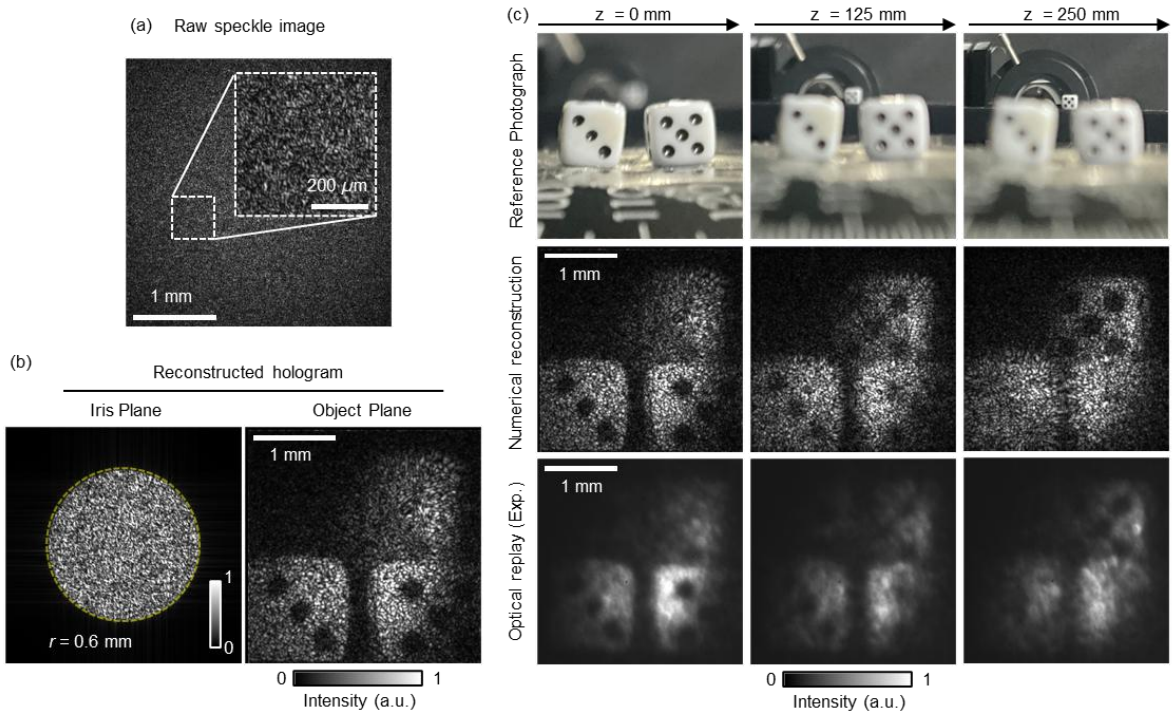


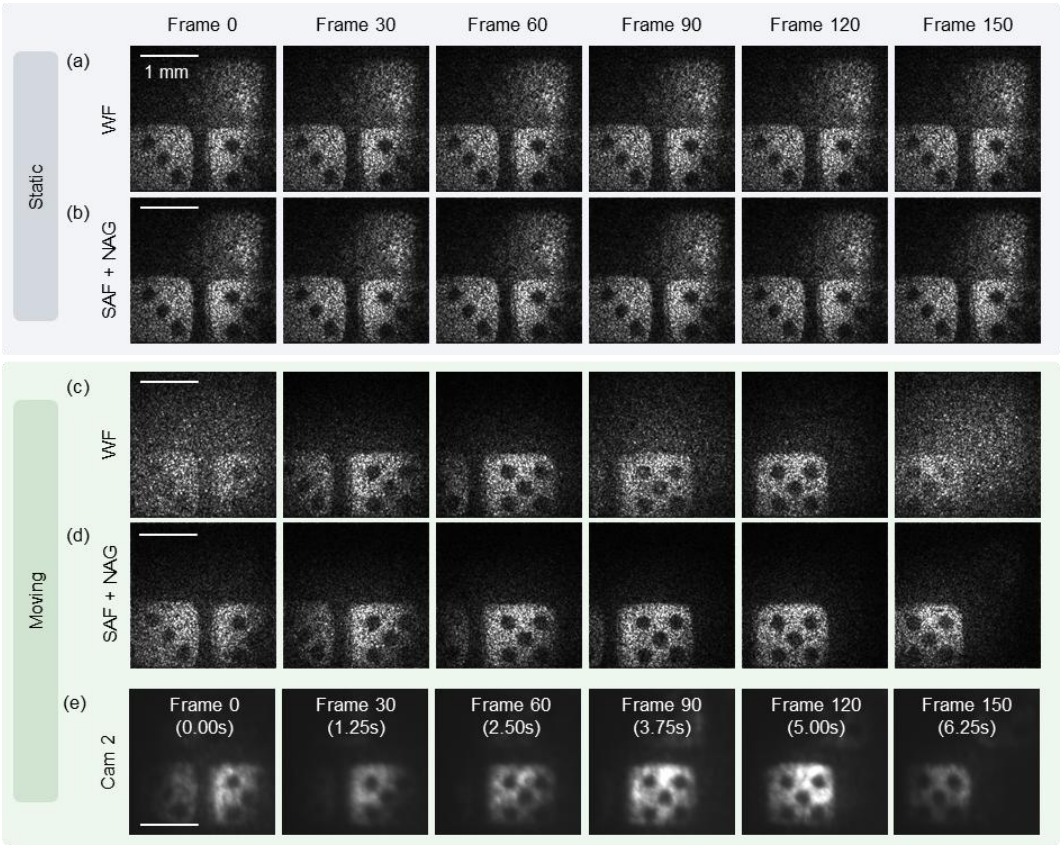
图 3 | 三维场景的体积波前重建与光学再现。 (a) 通过几何相位扩散器在相机平面捕获的单次散斑强度图像。

3.2 算法稳定性测试

为评估重建算法在动态条件下的时间鲁棒性，我们对 Wirtinger Flow（WF）与所提出的 SAF + NAG 求解器进行了比较分析。图4展示了使用各方法重建的 150帧视频序列中每隔 30 帧采样的代表性帧。对于静态场景，其中三个骰子保持静止 [图4(a,b)], ，WF 和 SAF + NAG 的重建质量相当，各帧的对比度相近，时间变化可以忽略不计。这表明两种算法都能够根据单次拍摄测量可靠地重建静止物体。

相比之下，在动态条件下会出现明显差异，此时骰子发生横向平移 [图4(c,d)]。使用 WF 得到的重建结果存在明显的帧间闪烁和亮度不均匀，尤其是在序列的开头和结尾（第 0 帧和第 150 帧）。这些伪影表明其时间一致性不足，反映出 WF 在迭代优化过程中对帧间微小变化较为敏感。比较研究表明，传统的交替投影类求解器在实验噪声下往往不够稳定，因此需要采用更平滑的损失函数和基于动量的优化方案[42]。相比之下，SAF + NAG 求解器在整个序列中保持了稳定的强度和清晰度，尽管物体运动，帧间变化仍极小。这种增强的时间稳定性归因于平滑的基于振幅的损失（可抑制噪声引起的波动）与 Nesterov 动量（可在迭代更新过程中减弱振荡行为）的结合。

总之，这些结果表明，SAF + NAG 提供了一种在运动条件下保持时间一致性的重建框架，满足连续全息远程呈现的一项关键要求，而这一要求超越了单帧重建精度。



图。4 | 静态和动态场景下波前重建的时间鲁棒性。从采用 Wirtinger 流（WF）或所提出的 SAF + NAG 求解

3.3 视频速率远程呈现

接下来，我们将重建的波前直接投射到空间光调制器（SLM）上，并用第二台相机（Cam2）记录光学重放的光场，以展示视频速率全息远程呈现 [图 4(e)]。为简化系统架构，我们使用一台个人计算机（PC1），同时从相机采集原始散斑图像并将计算得到的相位图案传输至空间光调制器。波前重建由一台专用远程服务器完成，该服务器配备四块 RTX A6000 GPU，数据通过 1 Gbps 局域网进行交换 [图 5(a)]。

在此配置下，系统实现了每秒 28 帧（fps）的持续吞吐量，端到端延迟为 1.24 秒，测量范围从散斑采集到空间光调制器投影。成像阶段采集的散斑图像被流式传输至服务器进行多GPU波前重建，随后将生成的相位图案传回显示阶段，以进行全息重放。

为定量评估系统性能和稳定性，我们进行了一系列吞吐量和延迟测量。图 5(a) 总结了端到端数据流，图 5(b) 和图 5(c) 分别展示了测得的延迟和输出速率稳定性。如图 5(b) 所示，在运行范围内，端到端延迟几乎保持恒定；当输入帧率超过系统吞吐量（≈28帧每秒）后，延迟则急剧增加，表明重建流水线已达到饱和。在 28 帧每秒时，测得的延迟始终为 1.24 秒。视频速率运行所需的数据传输总量约为 896 Mbps（28 帧每秒 × 4 MB/帧），低于可用网络带宽。这一结果表明，主要的性能瓶颈来自计算波前重建，而非网络传输。

在恒定输入速率为 28 帧每秒的条件下，通过监测输出帧率进一步评估时间稳定性[图 5(c)]。输出帧率稳定在 28 帧每秒左右，标准差为 2.64 帧每秒，展现了稳定的流传输和全息重放。这些测量结果共同证实，该系统能够持续实现视频速率远程呈现，并具有可预测的延迟，从而验证了所提出的基于波前的远程呈现流水线在实际应用中的可行性。

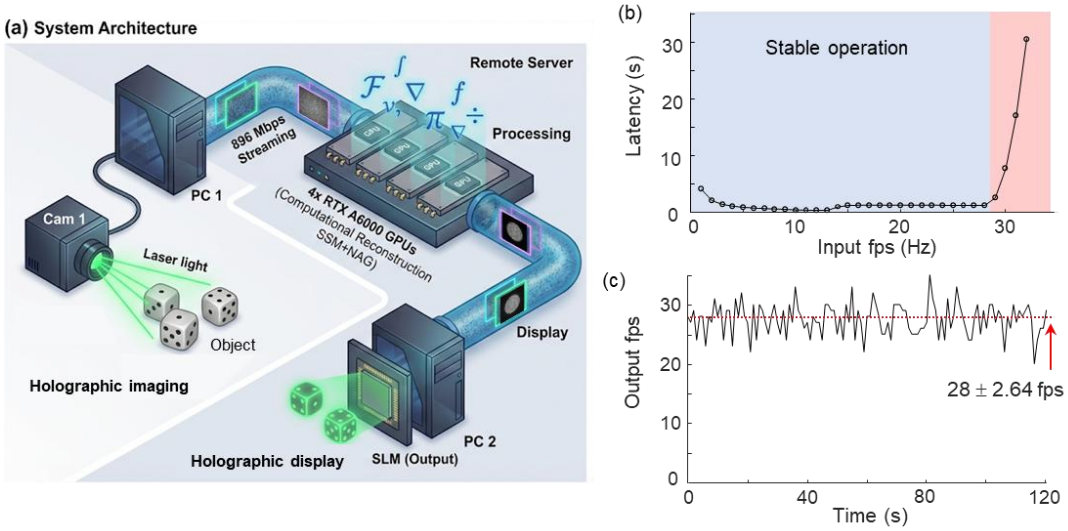


图 5 | 视频速率全息远程呈现的系统架构与性能评估。 (a) 端到端系统架构，展示了从单次散斑采集到全息波

(b) 端到端延迟，即从散斑采集到空间光调制器投影的延迟，随输入帧率的变化。每个数据点代表重复测量所

4. 讨论

本研究展示的结果表明，无需依赖干涉参考光束或基于几何的场景表示，即可通过直接波前测量与重放实现物理上逼真的全息远程呈现。该框架结合无参考散斑相关成像、单次曝光 SSM 初始化以及 SAF + NAG 精化，可稳定恢复复杂的光学波前，并将其直接投射到纯相位空间光调制器上。

实验结果的一项关键发现是，对于全息远程呈现而言，时间一致性比单纯的逐帧重建精度更为重要。尽管 WF 和 SAF + NAG 对静态场景的重建效果相当，但只有 SAF + NAG 求解器能在物体运动时保持稳定，抑制帧间闪烁和亮度波动。

系统级评估进一步表明，所提出的架构能够以 28 帧每秒实现视频速率运行，并保持可预测的延迟。值得注意的是，端到端延迟测量和吞吐量分析显示，主要性能瓶颈在于计算波前重建，而非光学采集或网络传输。这一区分表明，当前的局限并非光学架构的根本缺陷，而是反映了现阶段计算实现的限制。

当前系统仍存在若干局限。重建流水线的计算开销很大，导致端到端延迟约为 1.24 秒。此外，当前实现采用单色照明，并因使用时间相干激光光源而出现残余散斑伪影。显示光学系统的数值孔径也限制了可实现的分辨率和视角。要解决这些局限，需要在计算和光学两方面取得进展，包括更快的优化策略、颜色复用方案、更高吞吐量的光学设计以及更有效的散斑抑制技术。

除了本文展示的具体系统之外，这些发现还将所提出的方法置于新兴全息通信技术的更广阔背景之中。计算全息和神经场景渲染的最新进展，已实现令人瞩目的视觉合成效果[19]，，但这类方法从根本上依赖于对光传播的渲染近似。相比之下，本研究强调一种测量驱动范式，其中光学波前本身被视为用于采集、传输和显示的主要数据对象。

5. 结论

总之，我们提出了一种无参考全息远程呈现系统，仅通过一次强度测量散斑测量，即可捕获并重放复杂的光学波前。所提出的框架在通信带宽适中（<1 Gbps）的情况下实现了视频速率运行（≈28 帧每秒），同时通过直接波前传播而非几何或视角合成近似，保留了符合物理规律的体积线索。

通过将散斑相关散射矩阵重建与基于 SAF + NAG 的迭代细化相结合，该系统能够在静态和动态条件下实现稳定的全息重建与全息重放。实验验证表明，单次波前采集结合基于物理原理的重建和光学再现，为实现实用的全息远程呈现提供了可行途径。

更广泛而言，这项工作表明，测量全息可以作为渲染全息的有力补充，尤其适用于要求物理保真度、深度一致性和传播精确的三维可视化应用。展望未来，全息通信系统很可能会将数据驱动推断与直接波前测量相结合，同时实现计算效率与光学保真度。本文所展示的框架是迈向这类以物理为基础的全息远程呈现技术的重要一步。

参考文献

1. Draper, J. V., Kaber, D. B. & Usher, J. M. 临场感。《Human Factors》40, 354–375（1998）。2. Minsky, M. 临场感。（1980）。3. Steuer, J. 虚拟现实的定义：决定临场感的维度。《传播学杂志》42, 73–93（1992）。4. Green, P. S., Hill, J. W., Jensen, J. F. & Shah, A. 远程临场手术。IEEE《医学与生物学工程杂志》14, 324–329（2002）。5. Hughes, C. E., Stapleton, C. B., Hughes, D. E. & Smith, E. M. 教育、娱乐和培训中的混合现实。IEEE《计算机图形学与应用》25, 24–30（2005）。6. Latifi, R., Weinstein, R. S., Porter, J. M., Ziemba, M., Judkins, D., 等。创伤与急诊护理管理中的远程医疗和临场感。《斯堪的纳维亚外科杂志》96, 281–289（2007）。7. Debbabi, S., Daassi, M. & Baile, S. 在线三维广告对消费者反应的影响：临场感的中介作用。《营销管理杂志》26, 967–992（2010）。8. Cooperstock, J. R. 多模态临场系统。IEEE《信号处理杂志》28, 77–86（2010）。9. Blanche, P.-A., Bablumian, A., Voorakaranam, R., Christenson, C., Lin, W., 等。利用大面积光折变聚合物实现全息三维临场。《自然》468, 80–83（2010）。10. Javidi, B. & Tajahuerce, E. 使用数字全息术进行三维物体识别。《光学快报》，OL 25, 610–612（2000）。11. Xiao, X., Javidi, B., Martinez-Corral, M. & Stern, A. 三维积分成像的进展：传感、显示与应用 [特邀稿]。《应用光学》，AO 52, 546–560（2013）。12. Shvetsov, A. V. & Alsamhi, S. H. 当全息通信遇见元宇宙：应用、挑战与未来趋势。IEEE Access（2024）。13. Maimone, A. & Fuchs, H. 使用商用深度相机实现实时三维采集与显示的无负担临场系统。载于2011年第10届IEEE混合与增强现实国际研讨会，137–146（IEEE，2011）；14. Fuchs, H., State, A. & Bazin, J.-C. 沉浸式三维临场。《计算机》47, 46–52（2014）。15. Dufaux, F., Pesquet-Popescu, B. & Cagnazzo, M. 三维视频的新兴技术：创作、编码、传输与渲染。（2013）。16. Cserkaszky, A., Barsi, A., Nagy, Z., Puhr, G., Balogh, T., 等。实时光场三维临场。载于2018年第7届欧洲视觉信息处理研讨会（EUVIP），1–5（IEEE，2018）；17. He, L., Liu, K., He, Z. & Cao, L. 面向元宇宙的三维全息通信系统。《光学通信》526, 128894（2023）。18. Jin, Y., Hu, K., Liu, J., Wang, F. & Liu, X. 从采集到显示：体积视频综述。（2024）doi:10.48550/arXiv.2309.05658。19. Peng, Y., Choi, S., Padmanaban, N. & Wetzstein, G. 通过相机在环训练实现神经全息。《ACM图形学汇刊》39, 185:1-185:14（2020）。20. Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., 等。NeRF：将场景表示为用于视图合成的神经辐射场。《ACM通讯》65, 99–106（2022）。21. Yu, H., Kim, Y., Yang, D., Seo, W., Kim, Y., 等。基于深度学习的非相干全息相机：实现真实世界全息图采集，用于全息流媒体系统。《自然·通讯》14, 3534（2023）。22. Yu, H., Lee, K., Park, J. & Park, Y. 通过主动控制体积散斑场实现超高清动态三维全息显示。《自然·光子学》11, 186–192（2017）。23. Park, J., Lee, K. & Park, Y. 使用非周期性

光子筛。《自然·通讯》10，1304（2019）。24. Cao, H., Čižmár, T., Turtaev, S., Tyc, T. & Rotter, S. 用于成像、光谱学及其他领域的多模光纤光传播控制。《先进光学与光子学》，AOP 15，524–612（2023）。25. Frauel, Y., Naughton, T. J., Matoba, O., Tajahuerce, E. & Javidi, B. 利用计算全息成像进行三维成像与处理。《IEEE会刊》94，636–653（2006）。26. Park, Y., Depeursinge, C. & Popescu, G. 生物医学中的定量相位成像。《自然·光子学》12，578–589（2018）。27. Lee, K. & Park, Y. 利用散斑相关散射矩阵，实现紧凑型无参考全息图像传感器。《自然·通讯》7，13359（2016）。28. Oh, J., Lee, K. & Park, Y. 利用液晶几何相位扩散器进行单次无参考全息成像。《激光与光子学评论》16，2100559（2022）。29. Baek, Y., Lee, K., Oh, J. & Park, Y. 散斑相关散射矩阵方法：用于浑浊介质中的成像与传感。《传感器》20，3147（2020）。30. Xiao, Z., Wang, Y. & Gui, G. 基于平滑振幅流的相位恢复算法。《富兰克林研究所杂志》358，7270–7285（2021）。31. Nesterov, Y. 一种以 O (1/k2) 的收敛速率求解凸规划问题的方法，载于《苏联科学院院刊》第269卷，543页（1983）；32. 用于脉冲传输的多模光纤长程时空相关性 | 《自然·通讯》。https://www.nature.com/articles/s41467-019-10916-4。33. Judkewitz, B., Horstmeyer, R., Vellekoop, I. M., Papadopoulos, I. N. & Yang, C. 各向异性散射介质中的平移相关性。《自然·物理》11，684–689（2015）。34. Oh, C., Hugonnet, H., Lee, M. & Park, Y. 利用光学记忆效应中的像差矩阵和倾斜-倾斜相关性进行数字像差校正，以增强厚组织成像。《自然·通讯》16，1685（2025）。35. Yang, C., Qian, J., Schirotzek, A., Maia, F. & Marchesini, S. 叠层相位恢复迭代算法。（2011）doi:10.48550/arXiv.1105.5628。36. Sui, X., He, Z., Chu, D. & Cao, L. 用于计算机生成全息术逆问题求解的非凸优化。《光：科学与应用》13，158（2024）。37. Candes, E. J., Li, X. & Soltanolkotabi, M. 基于Wirtinger流的相位恢复：理论与算法。《IEEE信息论汇刊》61，1985–2007（2015）。38. Popoff, S. M., Lerosey, G., Carminati, R., Fink, M., Boccara, A. C., 等。光学传输矩阵测量：研究和控制无序介质中光传播的方法。《物理评论快报》104，100601（2010）。39. Yu, H., Hillman, T. R., Choi, W., Lee, J. O., Feld, M. S., 等。测量无序介质的大型光学传输矩阵。《物理评论快报》111，153902（2013）。40. Wick, G. C. 碰撞矩阵的求值。《物理评论》80，268–272（1950）。41. Liu, N., Liu, K., Yang, Y., Peng, Y. & Cao, L. 利用物理约束空间与傅里叶神经算子的传播自适应4K计算机生成全息术。《自然·通讯》16，7761（2025）。42. Yeh, L.-H., Dong, J., Zhong, J., Tian, L., Chen, M., 等。傅里叶叠层成像相位恢复算法的实验鲁棒性。《光学快报》，OE 23，33214–33240（2015）。

致谢

我们感谢韩国国家研究基金会（RS-2024-00442348，2022M3H4A1A02074314）、韩国技术进步研究院（KIAT）（P0028463）、韩国再生医学基金（KFRM）（21A0101L1-12）以及三星电子三星研究资助中心（SRFC-IT1401-08）提供的经费支持。

作者贡献

所有作者均审阅了手稿并提出了意见。Chansuk Park、KyeoReh Lee 和 YongKeun Park 提出了最初的构想，YongKeun Park 负责监督该项目。Chansuk Park 和 Chulmin Oh 完成了测量。Minwook Kim 分析了测量数据并撰写了手稿。Minwook Kim、Chansuk Park 和 Chulmin Oh 对本项工作贡献相同。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。