

基于相位共轭实现散射成像及光学幻像的双功能散射光调控方法（特邀）

和河向 黎永耀 黄锦圣

Bifunctional scattering light modulation method based on phase conjugation for scattering imaging and optical illusion *invited*

He Hexiang, Li Yongyao, Kam Sing Wong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220266>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

计算光学成像在散射中的应用

Application of computational optical imaging in scattering

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603005>

基于多距离相位恢复的无透镜计算成像技术

Lensfree computational imaging based on multi-distance phase retrieval

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1002002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1002002>

激光反射层析成像相位恢复算法研究

Research of phase retrieval algorithm in laser reflective tomography imaging

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1005005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1005005>

基于光强传输方程与SLM的快速相位恢复

Rapid phase retrieval using SLM based on transport of intensity equation

红外与激光工程. 2018, 47(7): 722003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0722003>

透镜模型下基于色散和强度传输方程的相位恢复技术

Phase retrieval technology based on chromatic dispersion and transport of intensity equation in lens model

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603018 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603018>

单透镜系统中与色散融合的混合相位恢复方法

Hybrid phase retrieval with chromatic dispersion in single-lens system

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200017 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200017>

基于相位共轭实现散射成像及光学幻像的 双功能散射光调控方法 (特邀)

和河向^{1,2}, 黎永耀^{1,2*}, 黄锦圣³

- (1. 佛山科学技术学院 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528225;
2. 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528225;
3. 香港科技大学 物理学系, 香港 九龙)

摘要: 近年来,人们对散射光调控的研究取得了极大的进展,产生了许多有趣的应用。其中透过散射介质的成像和光学幻像是两个极为引人注目的方向,但它们不经常同时被研究。文中将深入探索散射光成像和光学幻像的内在联系,在此基础上提出一种新颖的双功能散射光调控方法以在同一实验装置中根据需求实现散射成像和光学幻像。通过优化光路,结合相位恢复技术检测散射波前,利用相位共轭技术和高分辨率的纯相位液晶空间光调制器可以实现补偿散射的影响或实现特定衍射波前的产生。该系统只需要数秒即可完成散射光调控,因此可以对变化缓慢的散射环境实现动态散射成像或对缓慢变化的物体实现稳定的动态光学幻像。理论分析和实验演示证实了该调控方法的可行性。这一散射光调控方法有望在浑浊介质中的光学成像、光学伪装、反侦察、复杂光场调控等领域找到潜在的应用。

关键词: 散射光调控; 散射成像; 光学幻像; 相位恢复; 相位共轭

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220266

Bifunctional scattering light modulation method based on phase conjugation for scattering imaging and optical illusion (*invited*)

He Hexiang^{1,2}, Li Yongyao^{1,2*}, Kam Sing Wong³

- (1. School of Physics and Optoelectronic, Foshan University, Foshan 528225, China;
2. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology, Foshan 528225, China;
3. Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: The rapid development of scattering light modulation has led to many interesting applications in recent years. Imaging through a scattering medium and optical illusion are two of the most attractive examples, while they usually do not appear together on the same topic. Here, the inner relation between them will be further discussed, and a bifunctional scattering light modulation method that can realize scattering imaging and optical illusion is introduced. With the help of a high-resolution spatial light modulator, a highly efficient phase retrieval

收稿日期:2022-04-20; 修订日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金(61705035, 11874112, 62005044); 广东省普通高校特色创新项目(广东省教育厅)(2018 KTSCX241); 香港研究资助局 GRF 项目(16306214)及 AoE 计划(AoE/P-02/12); 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室(2020 B1212030010)

作者简介:和河向,男,讲师,博士,主要从事散射成像和信息光学等方面的研究。

通讯作者:黎永耀,男,教授,博士,主要从事光场调控和非线性光学等方面的研究。

process and phase conjugation technique, well-designed modulation patterns are found to manipulate the scattering wavefront and realize the function of imaging through a scattering medium or optical illusion. The whole system can be completed in several seconds. Therefore, it can be done with a slow varied scattering environment for scattering imaging or a slow varied scene for dynamic optical illusion. The theory and proof of concept experiment prove the feasibility of the proposed method. The potential applications will be found in the area of imaging through turbid environments, camouflage, anti-detection, complex light modulation and so on.

Key words: scattering light modulation; imaging through turbid layer; optical illusion; phase retrieval; phase conjugation

0 引言

光的散射是一种很常见的物理现象。人们在对于光散射的长期研究中总结了大量的物理规律并发展出了许多重要的应用。除了对散射的基础理论研究^[1], 研究者发现通过调控散射光的空间、时间、频率、相位或偏振等信息, 能让携带在散射光中的信息在很大程度上被提取并重新利用。尤其在近几年, 随着科技的进步, 散射光调控引起了越来越多人的关注, 其中最为热门的话题之一就是散射成像^[2-3]。研究人员通过波前调控^[4]、飞行时间成像^[5]、时间反演或相位共轭^[6]、传输矩阵测量^[7]、全息术^[8]、关联成像^[9]、散斑相关^[10-13]等技术, 能够克服光路中散射的影响实现成像。因此散射不再成为成像过程中的阻碍, 甚至可以挖掘出一些新的应用, 例如非视域成像^[5]等。除此之外, 散射光调控另一个引人注目的应用方向是隐身或幻像^[14-15]。通过将物体所发射或反射的散射光转化为与背景光一样或者将其转化为其他物体的散射波前, 则人们可以在光学领域实现隐身或幻像。一般来说, 隐身可以看作是幻像的一个特殊的情况, 因此这里主要讨论幻像。利用变换光学^[16]、光线光学^[17]或傅里叶光学^[18]的理论, 幻像器件可以通过超材料^[19]、超表面^[20]、主动偶极子辐射^[21]、双折射晶体^[17]、4f系统^[22]或全息图^[23]来实现。幻像(隐身)器件不单可以应用在光学领域, 也可以在声学、热学、微波^[24]等领域推广。成像、透过散射介质成像、隐身或幻像等领域都可以利用散射光调控的原理来实现。但以往报过导的文献中, 这几个研究对象很少同时出现在一个研究问题中。它们具有类似的原理, 必然有某些内在联系且可以用一种方法来统一描述以及解决。实际上, 已经有研究者注意到了这个问题并做出了具有启发性的讨论。赖耘等人提出了

幻像光学的概念^[25]: 使得一个具有某种形状和材质的物体的散射波前表现为另一个形状和材质不同的物体的光波。与此同时, 这种幻像器件还包含了另一个有趣的应用: 可以在墙壁或障碍物上制造一个虚拟的洞, 通过这个虚拟的洞可以看到障碍物后的物体。这一应用在本质上与散射成像是一致的。汪国平小组提出了将隐身或幻像器件看作是一个成像系统的研究方法, 并引入傅里叶光学的手段进行分析^[18]。这种傅里叶分析方法利用了相位共轭技术, 通过调控相位共轭的目标, 可以实现隐身、幻像或透过散射介质的成像。由此可见, 散射成像和幻像是有望通过一种方法实现的。但以上提及的方法依赖于特殊设计的复杂的超材料, 或者需要通过实际光波的干涉获得全息图, 因此这些器件通常存在制造困难或器件调整的灵活性欠缺等不足。而在散射成像领域广泛采用的基于空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 实现的波前调控技术^[26-27], 能够利用 SLM 数目众多的像素单元对散射光进行精准的调控, 有望将其功能延伸至光学幻像领域。

在此基础上, 文中提出一种能实现散射成像及光学幻像的双功能散射光调控方法。通过优化设计的光路, 利用高分辨率的纯相位型液晶空间光调制器和相位恢复技术检测散射波前, 进而使用相位共轭技术补偿散射效应的影响或人为制造出一个所需的衍射波前, 在同一个装置中实现了无散射介质时能够直接成像, 有散射介质时能够克服散射影响继续成像, 并且能够实现光学幻像的功能。整个散射光调控过程只需要数秒即可完成, 因此可以对变化缓慢的散射环境实现动态散射成像, 或对缓慢变化的物体实现稳定的动态光学幻像。理论分析和实验演示证实了该方法的可行性。该方法能够为实现光学幻像提供另一

种新颖的选择,并能够有助于理解散射光调控的物理和应用。此外,所提出的散射光调控方法在浑浊介质中的光学成像、光学伪装、反侦察、复杂光场调控等领域具有潜在的应用价值。

1 基本原理

应用于散射成像和光学幻像的散射光调控方法的基本原理如图 1 所示。应用于散射成像时,如图 1(a) 所示,复振幅为 $U_0(x,y)$ 的物体 (小狗图标) 在自由空间衍射一段距离 d_1 后遇到了一个散射介质。在散射介质前表面的光波波前可以用菲涅耳衍射来计算:

$$U_1(x,y) = Fr\{U_0(x,y), d_1\} = \frac{e^{ikd_1}}{i\lambda d_1} \int \int_{-\infty}^{\infty} U_0(\xi,\eta) \exp\left\{i\frac{k}{2d_1} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta \quad (1)$$

式中: λ 为入射光波长; k 表示入射光的波数; $Fr\{U_0(x,y), d_1\}$ 表示一个菲涅耳衍射积分用于计算波前 $U_0(x,y)$ 自由传播距离 d_1 后衍射光的复振幅。在通过散射介质的散射后,观察者一般只能看到一个混乱的图像。假设散射介质是一个薄散射层 (例如毛玻璃), 它的透射特性可以用一个复传输函数 $M(x,y)$ 来表示, 一个透射特性为 $T(x,y)$ 的 SLM 附着在散射介质后用于调控散射光。观察者能够接收到的光波复振幅为 $U_2 = Fr\{U_1MT, d_2\}$ 。为了能够实现透过散射介质的成像, 需要满足以下要求:

$$U_1MT = CU_1 \quad (2)$$

式中: C 为一个实常数。此时, SLM 可以完全抵消介质对光波的散射影响。因此, 就像光路中没有存在散射介质一样, 观察者能够看到物体的像 (小狗图标的像)。整个过程可以表示为:

$$U_2 = Fr\{U_1MT, d_2\} = C Fr\{U_0, d_1 + d_2\} \quad (3)$$

总的来说, 通过这个方法可以将一个散射系统转变成为一个成像系统。如果忽略散射介质对光的吸收, 则薄散射层的 $M(x,y)$ 是一个纯相位函数, 即 $M(x,y) = \exp[i\varphi(x,y)]$, 其中 $\varphi(x,y)$ 表示因为散射介质表面起伏而引起的相位分布。根据公式 (2), 则 $T(x,y)$ 等于 $M(x,y)$ 的相位共轭:

$$T(x,y) = M^*(x,y) \quad (4)$$

因此, 如果能够测得散射波前的相位, 则利用相位共轭技术即可实现透过散射介质的成像。在实验中, 对散射波前的测量将采用相位恢复技术来实现。

类似的装置同样可以用于实现光学幻像。如图 1(b) 所示, 如果能够找到一个合适的调制函数 $T(x,y)$ 将物体的散射光 (小狗图标) 转换为目标波前 $U(x,y)$ (如熊猫图标的波前), 则观察者接收到的则是另一个物体的像 (例如熊猫图标)。此时 T 应满足:

$$U = Fr\{U_1T, d_2\} \quad (5)$$

因此, 整个系统构成了一个幻像的装置。但是, 绝大部分的图像探测器 (电荷耦合器件

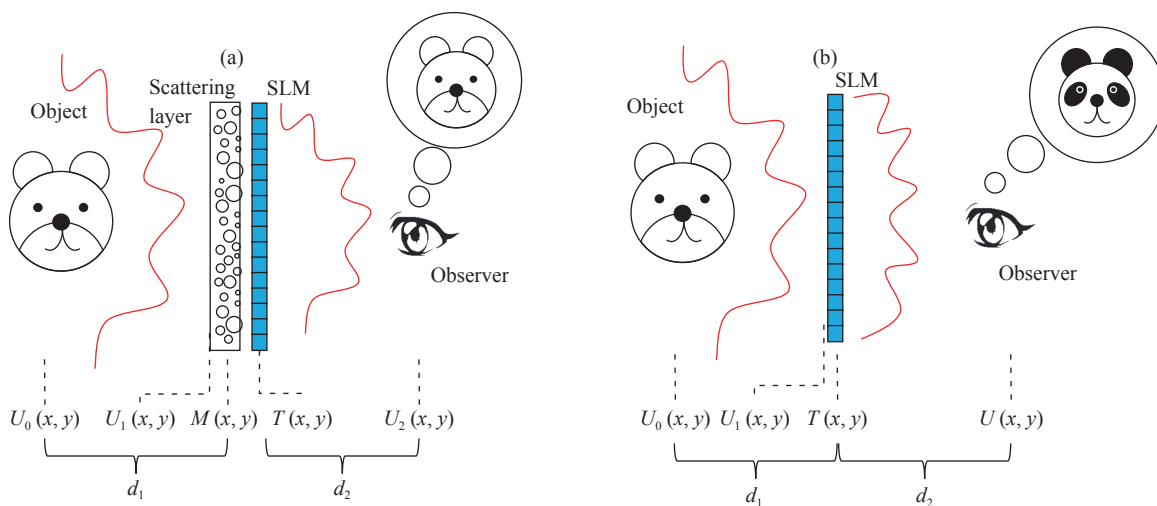


图 1 双功能散射光调控方法的基本原理。(a) 散射光成像原理图; (b) 光学幻像原理图

Fig.1 Principle of bifunctional scattering light modulation method applied on (a) scattering imaging and (b) optical illusion

(Charge-Couple-Device, CCD) 或互补式金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor(CMOS)) 都只能探测光强信号,而不能直接探测相位信息。因此对调制函数 $T(x, y)$ 的要求可以放松。此外,目前纯相位型的 SLM 或纯振幅型的 SLM 能够获得较高的调制效率。同时 SLM 是一种被动式的器件,它不能提供光学增益。一般来说,最好要求入射到 SLM 的光波呈现出均匀的强度分布。为此,类似于图 1(a) 的模型也可以用于实现光学幻像:一块毛玻璃放置于 SLM 前,利用它的散射作用将物光波进行波扰乱并均匀化,而后再用一个纯相位型的 SLM 重构波前并最终在观察者处形成目标图像。因此, T 应满足:

$$|U| = |Fr\{U_1MT, d_2\}| \quad (6)$$

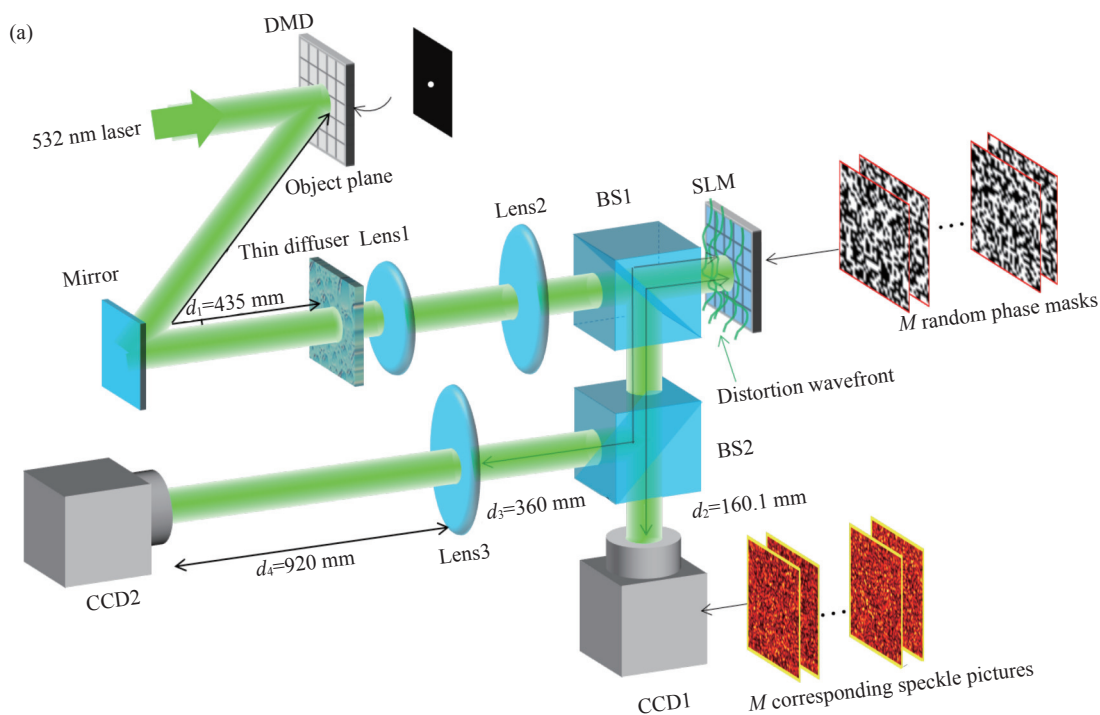
T 的生成可以分成以下两步进行:首先产生一个可以抵消散射影响的调控相位,即 $T_1=M^*$,然后产生一个相位型的全息图用以在观察者处制造出一个纯强度分布的幻像图像。这样的相位分布可以通过 $T_2=Fr^{-1}\{U, d_2\}$ 来计算,其中 Fr^{-1} 代表反方向的菲涅耳衍射。最终,SLM 处所需要的调控相位为: $T = T_1T_2$ 。

综上所述,同一模型可以用于实现散射成像及光学幻像。两个不同应用的关键在于如何找到用于调控散射光的合适的相位 $T(x, y)$ 。

2 实验结果与分析

2.1 实验装置简介

验证性的实验装置如图 2 所示。实验使用波长为 532 nm 的半导体激光器 (LE-LS-532-50 TLMA, LEOPTICS) 作为光源;一个数字微镜器件 (DMD, DLP 6500 EVM, Texas Instruments) 放置在物平面,通过加载不同的二值化的纯振幅型图像用以模拟自发光的物体;使用一个 5° 全息扩散片 (DIFFUSER HOLO 5.0 DEG, Edmund Optics) 作为散射介质;透镜 1 和透镜 2 构成一个 4f 系统,用于将散射片后表面的波前放大后成像在 SLM (Pluto, Holoeye) 的表面; SLM 和 CCD1 (MER130-30-UM, Daheng) 构成一个波前检测系统,用以进行相位恢复测量散射光的复振幅。最终,经调制后的散射光经分光棱镜 BS1 和 BS2 后被透镜 3 收集并成像在工业相机 CCD2 (MER130-30-UM, Daheng) 上。透镜 1、透镜 2 和透镜 3 的焦距分别为 50 m、180 m 和 800 m。DMD 到散射片的距离 $d_1=435$ mm, SLM 到 CCD1 的距离 $d_2=160.1$ mm, SLM 到透镜 3 的距离 $d_3=360$ mm, 透镜 3 到 CCD2 的距离 $d_4=920$ mm。这些距离均由光学设计软件 Zemax 的计算得到,可以保证在光路中没有散射介质时,物平面上的物体能够清晰地成像在 CCD2 上。图 3(a)~(c) 为



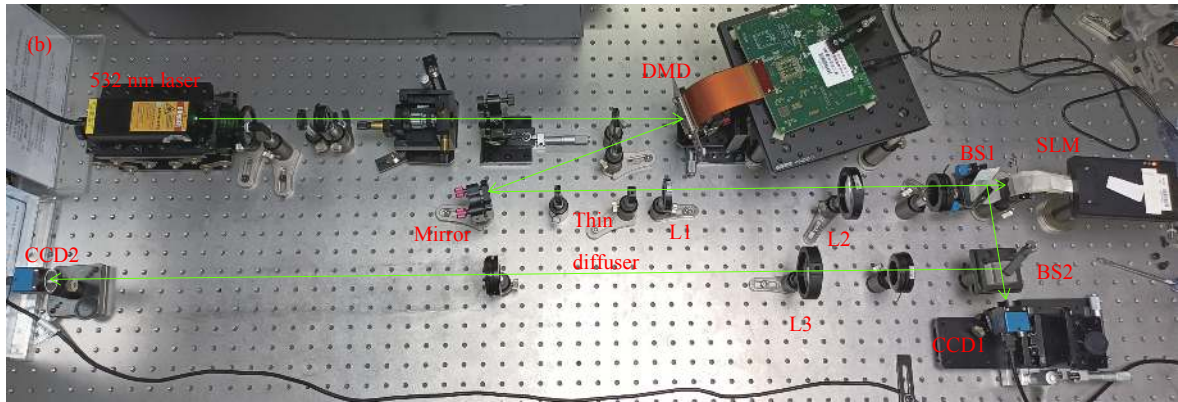


图 2 散射光调控实验装置图。(a) 实验示意图; (b) 实验系统

Fig.2 Experimental setup of scattering light modulation. (a) Schematic diagram of the experiment; (b) Picture of the experimental system

分别加载在 DMD 上的物体 (字符“F”, “S”, “U”, 约 1.5 mm 高), 图 3(d)~(f) 为对应的物体在光路中没有散射介质的情况下在 CCD2 直接探测所得的像。由于系统 SLM 等器件的有限孔径, 光路直接成像的图略有变形, 但仍然保持较高成像质量。整个系统的放大率约为 0.6。

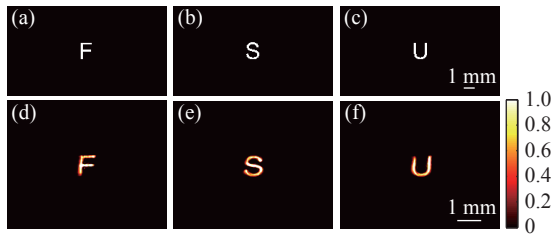


图 3 当光路中不存在散射介质时实验系统直接成像的结果。(a)~(c) 分别加载在 DMD 上的物体 (字符“F”、“S”、“U”); (d)~(f) 对应于 (a)~(c) 的直接成像的结果

Fig.3 Directly imaging results of the whole system when there is no scattering medium on the imaging pathway. (a)~(c) Objects uploaded on DMD (letters of “F”, “S”, “U” respectively); (d)~(f) Directly imaging results corresponding to (a)~(c), respectively

2.2 散射成像

当成像光路中存在散射介质时, 物体一般不能透过散射介质直接成像。如图 4(a) 所示, 当存在散射介质的, 物体 (字符“F”) 在 CCD2 上只能形成散斑状图样。此时需要对散射波前进行调制, 以抵消介质的散射影响恢复成像。由前文关于散射成像的理论分析可知, 散射成像的处理流程为: 首先利用参考点光源测量散射波前, 其次利用相位共轭技术补偿散射波前并形成物像共轭关系, 最后将参考物体替换成其他任

意待测物体即可实现散射成像。实验中, 利用一个直径约 200 μm 的小孔物体 (图 4(b) 的子图) 作为散射成像波前调控相位的求解参考。如图 4(b) 所示, 在没有任何调制的情况下, 小孔在图 2 所示的有散射的光路中是不能直接透过散射介质成像的, 只能得到一个散斑图样。此时, 利用 SLM 和 CCD1 的组合, 结合相位恢复算法可获得散射光在 SLM 处的复振幅分布。相位恢复算法的过程简述如下: 如图 2 所示, 在 SLM 上加载一系列二值化的随机相位分布 (其中一幅如图 4(c) 所示), 并在 CCD1 上测量对应的散射光强度 (其中一幅如图 4(d) 所示), 利用相位恢复迭代算法 (算法流程详见参考文献 [27], 迭代收敛曲线如图 4(e) 所示) 则可获得 SLM 表面上散射光的振幅 (图 4(f)) 和相位 (图 4(g))。

为了能够在 CCD2 上获得参考点源的像, 除了在 SLM 上加载图 4(g) 的共轭相位以外, 还需加上一个二次相位。根据实验所选取的光路参数, 所需加载的二次相位等效于焦距为 $f'=351.9 \text{ mm}$ 的凸透镜, 相位分布如图 4(h) 所示。因此, 将探测得到的散射波前的相位 (图 4(g)) 的复共轭叠加上二次相位 (图 4(h)) 得到一个调制相位 (图 4(i))。将该调制相位加载至 SLM 上, 则可补偿散射介质对点光源的散射影响, 使得在观察平面 CCD2 上重新获得点源的像 (图 4(j))。利用获得的散射光调制相位 (图 4(i)) 可将散射系统变成一个具有物像共轭关系的成像系统。最后利用散射介质的记忆效应, 当物平面上的小孔换成其他任意未知的待测物体时, CCD2 上都可以实时获得原物体的像。如图 4(k)~(o) 所示, 分别为字符“F”、“S”、

“U”和图形“天鹅”、“跑步”透过散射介质后所成的像。散射成像结果均具有较高的对比度,图像清晰可辨。但图 4(o)的成像结果中,“跑步”形状的物体的像只有中心部分可见,是因为该物体在横向上分布较大

(约 2 mm),超出了散射介质的记忆效应范围的部分不能准确成像。实验中所采用的散射介质记忆效应的视场角(Field-of-View, FOV)约为 3 mrad^[26-27],在对应的物距上可以对约 1.5 mm 内的物体成像。

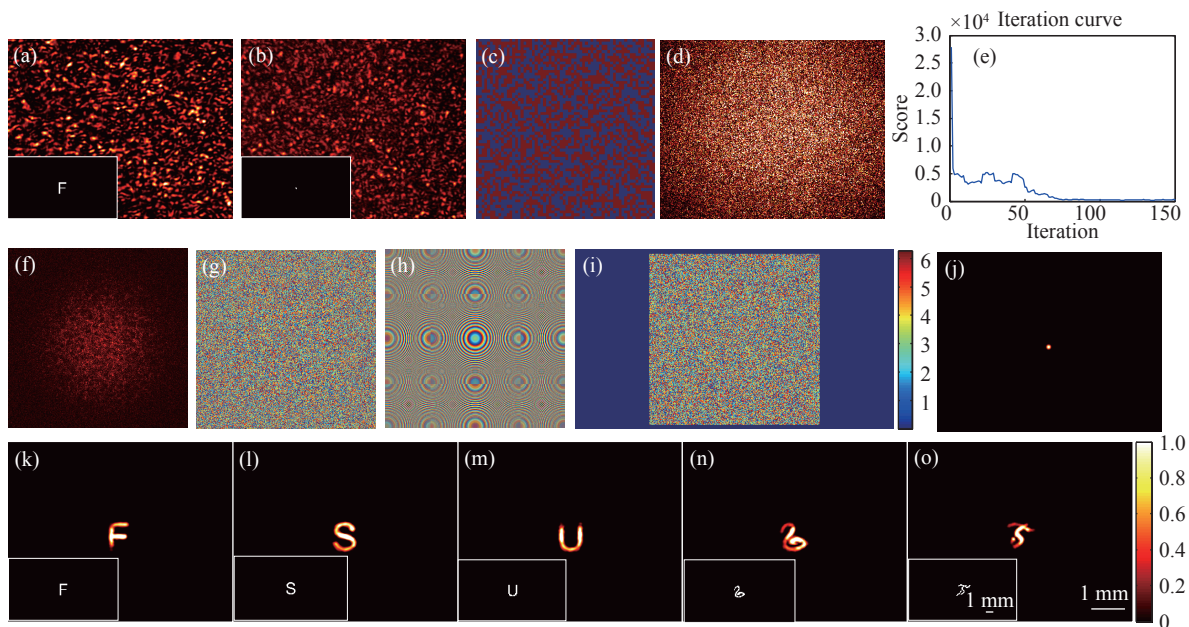


图 4 利用相位共轭和散射光场调控实现散射成像。(a) 物体 F 在有散射介质时的成像结果;(b) 参考物小孔通过散射介质后的散斑图;(c) 相位恢复随机相位模板;(d) 随机相位模板对应的散斑图;(e) 相位恢复迭代过程收敛曲线;相位恢复得到的振幅(f)和相位(g);(h) 二次相位分布;(i) 散射成像所需的调控相位;(j) 点光源的散射成像结果;(k)-(o) 其他待测物体字符“F”、“S”、“U”和图形“天鹅”、“跑步”的散射成像结果
Fig.4 Imaging through a thin scattering layer with phase conjugation. (a) Imaging result of object "F" (inset) with scattering medium; (b) Speckle patterns of a pinhole (subset) through scattering medium; (c) A random binary phase mask for phase retrieval; (d) Speckle patterns corresponding to random binary phase mask; (e) Iteration curve; Amplitude (f) and phase (g) of the phase retrieval result; (h) Quadratic phase distribution; (i) Modulation phase for scattering imaging; (j) Scattering imaging result of the point source; (k)-(o) Scattering imaging results of letters "F", "S", "U" and pattern of "Swan", "Running man"

在相位恢复的计算中,SLM处选取分辨率为 512×512,像素尺寸为 16 μm。CCD1 分辨率选取为 512×512,像素尺寸为 10.4 μm。SLM 与 CCD1 之间的光传播使用菲涅尔衍射积分实现,因此,要求 $d_2 = N\Delta\xi\Delta x/\lambda$,其中 N 、 $\Delta\xi$ 、 Δx 、 λ 分别为像素数目、SLM 像素尺寸、CCD1 像素尺寸、光的波长。实验选取了 20 个随机相位模板进行相位恢复迭代,算法使用 Matlab 编程实现通过普通电脑计算。相位恢复采集及计算的时间约为 8 s,而通过散射波前相位共轭叠加二次相位获得散射光调制相位的过程在毫秒量级,这个操作在整个散射成像过程中只需要进行一次。因此,这种方法实现的散射成像比利用最优化算法实

现的波前调控更加快速高效。

2.3 光学幻像

图 2 的实验装置仍然适用于光学幻像。光学幻像的目标是在观察者所在的 CCD2 处产生一个与物体不一样的目标图形。测量获得散射波前的相位并将其复共轭加载在 SLM 上之后,可以近似认为已经将散射光调制成为一个平面波。在此基础上实现光学幻像则需要解决如何在 SLM 处增加额外的调控,使得波前在 CCD2 处产生一个纯振幅型的目标图形的问题。这一问题可以利用 GS 算法^[28]来解决。如图 5(a)所示,设在 CCD2 处需要产生的幻像目标为字符“L”的像。利用 GS 算法(迭代过程如图 5(b)所示),

可以求得 SLM 所需的相位分布如图 5(c) 所示。当 DMD 上的物体为如图 5(d) 所示的字符“F”时, 如果不对散射光进行任何的调控, 则只能在 CCD2 上看到一些混乱的散斑图(如图 5(d)子图所示)。利用图 2 中的 SLM 和 CCD1 构成的装置进行相位恢复测量, 得到此时 SLM 表面处的散射波前的振幅和相位分别如图 5(e) 和图 5(f) 所示。将图 5(f) 的相位进行共轭并叠加上图 5(c) 的幻像目标相位分布, 则可以产生如图 5(g) 所示的用于实现光学幻像所需的散射光调控相位(相位叠加后居中填充为 1920×1080 的大小, 填充部分补零值)。最后, 利用这一调控相位可在 CCD2 处呈现出与物体表现不一致的图像(如图 5(h) 所示, 字符“L”的像)。此时所得到的散射光调控相位只能适用于对应的物体, 而换成其他物体时, 光学幻像效果将失效。如图 6 所示, 图 6(a) 通过光学幻像调制相位图 6(d) 时, 可以在 CCD2 上获得所需的幻像效果

(图 6(e))。但此时如果将“F”换成其他物体, 如图 6(b) 的字符“S”, 利用同样的调制相位, 图 6(d) 则只能在 CCD2 上得到混乱的图像(图 6(f))。同理, 物体换成字符“U”时, 也得不到想要的幻像结果(图 6(g))。因此, 如果物体发生了变化, 则用于幻像的散射光调控相位需要重新计算。例如当物体从图 5(d) 换成图 5(i) 的字符“S”时, 它在 SLM 表面处的复振幅需要利用相位恢复算法重新测量(图 5(j)~(k))。最终重新获得幻像调控相位(图 5(l))后, 依然可以在观察者 CCD2 处获得所需的幻像结果(图 5(m))。当物体换成其他图形时, 需要重复实施以上过程(图 5(n)~(r))。幻像目标对应的相位分布图 5(c) 只需要计算一次, 并且可以在实施波前检测前预先算得, 因此散射光调控所需相位的主要计算耗时取决于相位恢复的过程。图 2 所示的 SLM-CCD1 所组成的相位恢复计算过程需耗时约 8 s, 幻像系统的刷新率约为 0.125 Hz。在外界变化

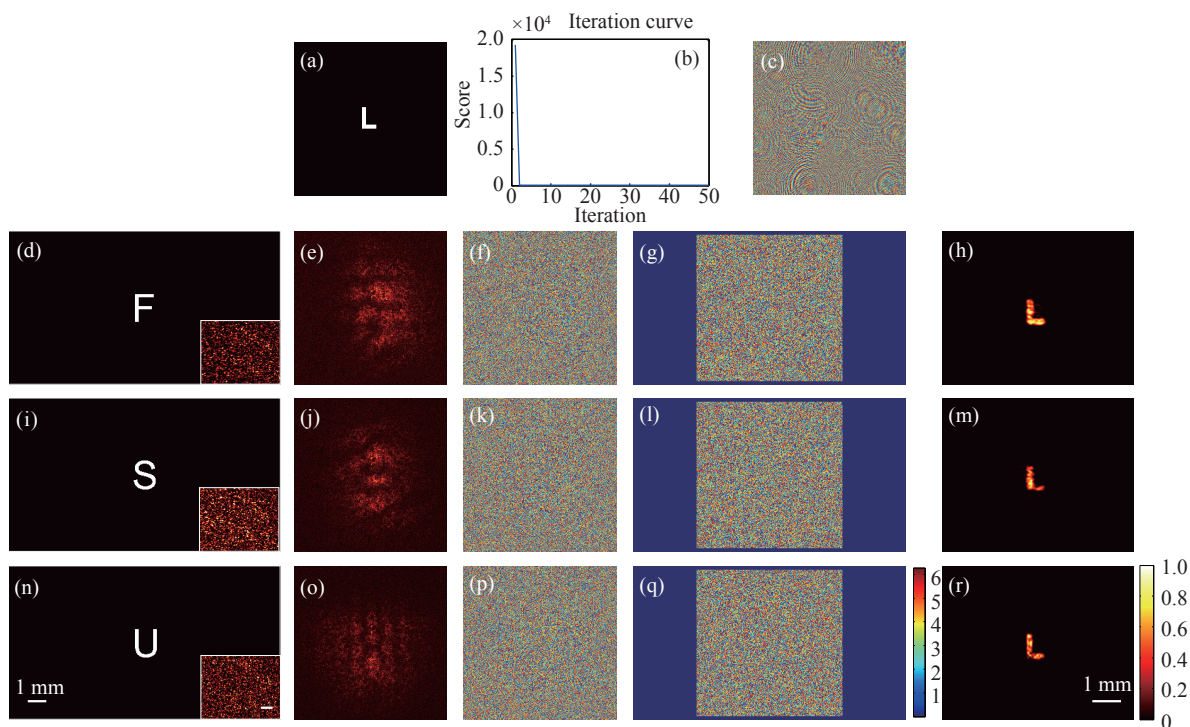


图 5 利用散射光场调控实现光学幻像。(a) 幻像目标; (b) GS 算法迭代曲线; (c) GS 算法所得的相位; (d) 物体字符“F”(子图: 无调制时物体的散斑图); 物体“F”的散射光振幅 (e) 和相位 (f); (g) 光学幻像物体“F”变成“L”所需的调制相位; (h) 幻像结果; (i)~(m) 将物体“S”变成“L”的操作过程; (n)~(r) 将物体“U”变成“L”的操作过程

Fig.5 Optical illusion using scattering light modulation. (a) Illusion target; (b) GS algorithm iteration curve; (c) Phase of GS algorithm; (d) A object of "F" (Subgraph: Speckle pattern without modulation); (e) and (f) Amplitude and phase of the scattering wavefront; (g) Modulation phase for optical illusion turning "F" to "L"; (h) Illusion result; (i)~(m) and (n)~(r) The same process of (d)~(h), but optical illusion of turning "S" to "L" and "U" to "L", respectively

(物体变化、散射介质变化等) 小于 8 s 的情况下, 该系统可以实现动态的幻像。此时即使外界发生变化, 系统可以一直在观察者处制造出稳定不变的光学幻像效果。图 5(c) 是根据平面光入射 SLM 时在 CCD2 上呈现图 5(a) 所需的相位经过 GS 算法计算所得。但实际上物光波经过散射介质后的强度分布并不是均匀的 (图 5(e)、(j)、(o)), 所以通过散射光波前的共轭相位 (图 (f)、(k)、(p) 的共轭) 叠加幻像目标相位 (图 5(c)) 所得的散射光调控相位 (图 5(g)、(l)、(q)) 的幻像结果与目标 (图 5(a)) 相比质量略有下降 (展宽、不均匀等), 但不影响幻像结果的分辨。

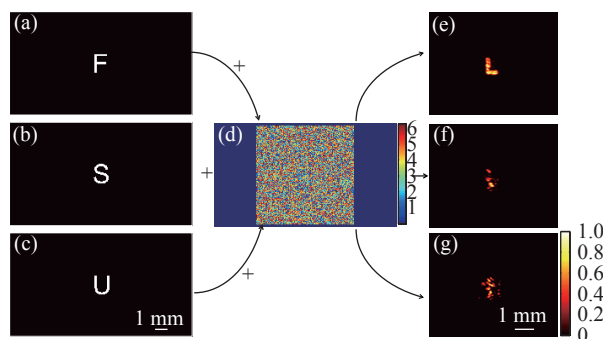


图 6 光学幻像调控相位依赖于物平面上的物体。(a)~(c) 物体“F”、“S”和“U”; (d) 将物体 (a) 在 CCD2 上观察成“L”所需的调制相位; (e) 用 (d) 对 (a) 进行调控后的幻像结果; (f) 在 CCD2 上用 (d) 对 (b) 进行调控的结果; (g) 在 CCD2 上用 (d) 对 (c) 进行调控的结果

Fig.6 Modulation phase for optical illusion depends on the object on the DMD. (a)-(c) Object of letter “F”, “S” and “U”, respectively; (d) Modulation phase pattern for optical illusion of turning “F” to “L”; (e) Illusion result when (d) is modulated the scattering light of (a); (f) Image on CCD2 when (d) is modulated the scattering light of (b); (g) Image on CCD2 when (d) is modulated the scattering light of (c)

2.4 实验结果讨论

合理选取图 2 中透镜的焦距 d_1 、 d_3 和 d_4 , 实验装置在无散射介质的成像、有散射介质的散射成像以及光学幻像的放大率均约为 0.6。三种功能具有相同的放大率, 可以使得三种功能相互切换时保持一致的成像特性。无/有散射介质情况下的成像系统的 FOV 测试实验结果如图 7 所示。在物平面上放置 200 μm 的小孔, 并沿水平方向移动, 移动间隔为 0.25 mm, 得

到其成像结果并将其强度分布进行高斯拟合, 所得半高宽定义为系统的 FOV。无散射介质时, FOV 约为 3 mm; 而有散射介质时, FOV 约为 1.5 mm。由于散射介质的影响, 实现了散射成像后系统的 FOV 都发生了明显的降低。这是因为散射成像主要依赖散射介质的记忆效应^[26]。在超出了记忆效应的尺寸更大的物体则只有中心部分能清晰成像 (如图 4(o))。如果待测物体超出该范围, 则可使用角度扫描或 FOV 合成的方法来解决大场景的散射成像的需求。记忆效应的视场角反比于散射介质的等效厚度, 因此这一方法仅适用于薄散射介质或弱散射环境。理论上, 该系统中散射成像和光学幻像的分辨率主要取决于散斑尺寸。一般来说, 散斑尺寸正比于散斑传播的距离, 反比于入射散射介质的光斑面积。它的大小可以用公式 $\delta x = \lambda d / \pi w$ 来近似计算, 其中 d 为散射介质和 CCD2 之间的距离, w 为入射散射介质的光斑直径。按照实验的参数, 散斑尺寸约为 80 μm 。无/有散射介质情况下成像系统的分辨率测试实验结果如图 8 所示。分别将不同空间周期的条纹加载在 DMD 上并观察其在无/有散射情况下的成像结果。如图 8 (a)、(e)、(m)、(q) 是周期分别为 10、20、40、80 pixel 的条纹。无散射时 10、20 pixel 周期的条纹的成像结果、横向强度分布及其频谱分别如图 8 (b)~(d)、(f)~(g) 所示。有散射时 10、20、40、80 pixel 周期的条纹的成像结果、横向强度分布及其频谱分别如图 8 (i)~(j)、(k)~(l)、(n)~(p) 和 (r)~(t) 所示。结果表明, 无散射介质时, 成像系统可以对大于 38 μm 的细节成像; 而有散射介质时, 散射成像系统只能对大于 152 μm 的细节成像, 比起理论值要大一倍左右。散射成像系统的分辨率较低, 原因可能在于对细微物体成像时物点散斑背景之间的相干叠加而引起的。因此, 该系统应选取线条简单且线条之间不宜太密集物体作为成像对象。

尽管文中只是对二维物体进行了散射成像的演示, 但原理上该方法对于三维物体的散射成像也可以实现。在对于三维物体的散射成像时, 一旦利用参考点源建立起物像平面的共轭的成像关系后, 利用散射介质纵向的记忆效应, 也可以在 z 方向实现不同深度的物体的散射成像。系统应用在散射成像或光学幻像上耗时均约为 8 s。最为耗时的部分是散射光的波前检测, 占计算量的 80% 以上。从图 4(e) 可见, 相位

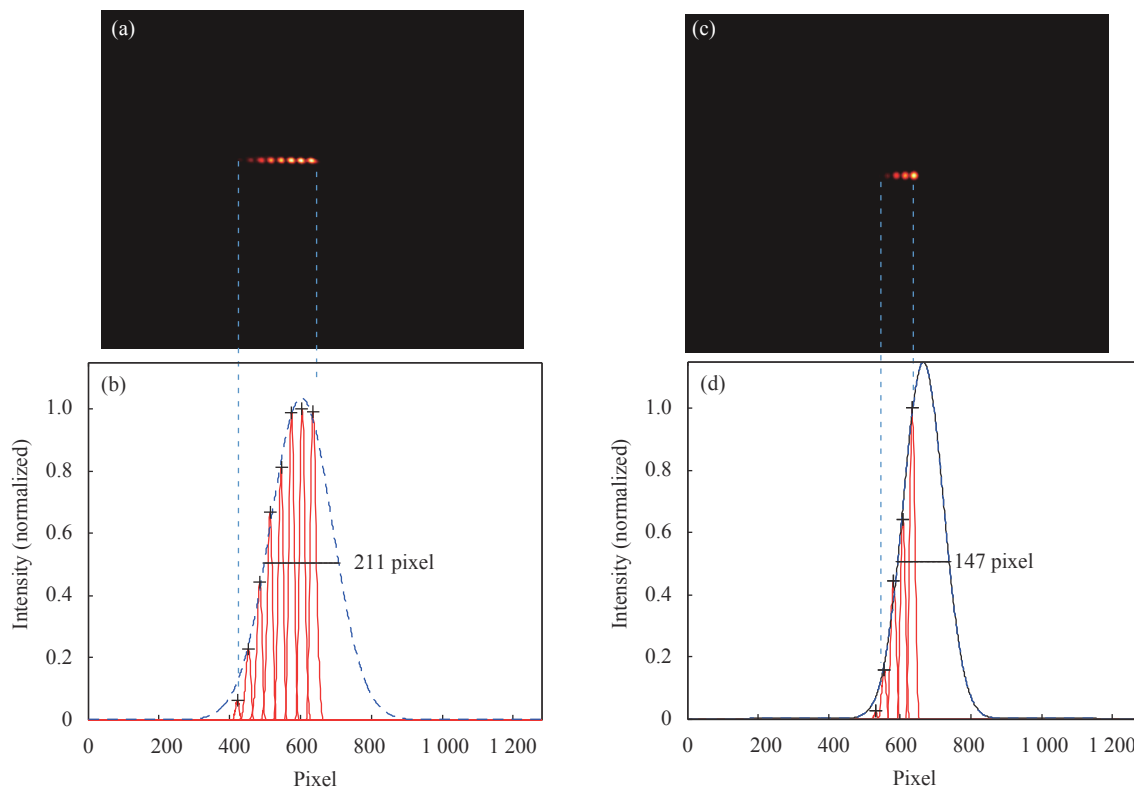


图 7 成像系统 FOV 测试实验结果。(a) 无散射时系统成像结果;(b) 是 (a) 的强度分布曲线;(c) 有散射时系统成像结果;(d) 是 (c) 强度分布曲线
Fig.7 FOV test result of the imaging system. (a) Imaging results of the pinholes without scattering; (b) Intensity distribution of (a); (c)-(d) Results when there is scattering medium on the imaging system

恢复迭代的收敛速度较快,可以通过减少迭代次数的方法获得更快的计算速度。同时在实验中,相位恢复利用了 20 个随机相位模板对散射光波前进行调控并采集了对应的散斑图。后续可以通过减少随机相位模板进一步提高计算的速度。此外,也可以利用离轴全息或专门的波前检测器件的方法替代相位恢复进行波前检测,以进一步提高效率。通过这些方法可以有效解决该方法应对动态散射场景(如雨、雾、大气扰动、生物组织)下散射成像或光学幻像的适应性。

上述方法也可以实现对于三维物体的光学幻像。对于三维物体的光学幻像,可在获得散射波前的复振幅分布的基础上利用计算全息的方法获得一个全息图,使得衍射光在目标区域形成一个三维图像,但这一计算过程往往较为复杂。基于波前调控技术的光学幻像的方法对比以往利用变换光学设计的互补材料或全息技术实现的相位共轭具有设计灵活、调整方便的优点,并且能够直接在可见光波段实施。实现幻像的过程中,散射介质用于将物光波进行均匀化,而 SLM 用于调控散射光产生目标图景所需波

前。综合起来,散射介质加 SLM 的组合类似文献所提到的地毯式隐身/幻像器件,将物体通过这一组合即可实现光学幻像的效果。随着技术的进步,散射介质和 SLM 的组合若能够实现超薄化、大面积、柔性化,则可以直接覆盖于目标物体上实现隐身/幻像的效果。综上所述,成像/幻像系统的参数及其影响因素如表 1 所示。

所提出的方法在对散射光场的相位调控方面可以根据不同的用途和不同的光路结构而进行修改。通过对 SLM 加以不同的调制相位可以消除光路中的散射影响,重新获得清晰的成像,或者利用散射效益将物体的信息进行隐藏并转换为其他的设定的事物。在系统速度足够快的情况下,可以实现物体透过动态散射场景的成像以及动态物体的光学幻像。该方法只在普通的成像光路上增加了 SLM 和 CCD1 的组合作为波前检测模块和调控模块,并且在光路中不存在散射介质时仍能正常成像。因此,该方法可以应用在绝大多数现成的光路中,对已有光路的改动较小即可实现散射成像和光学幻像的功能,具

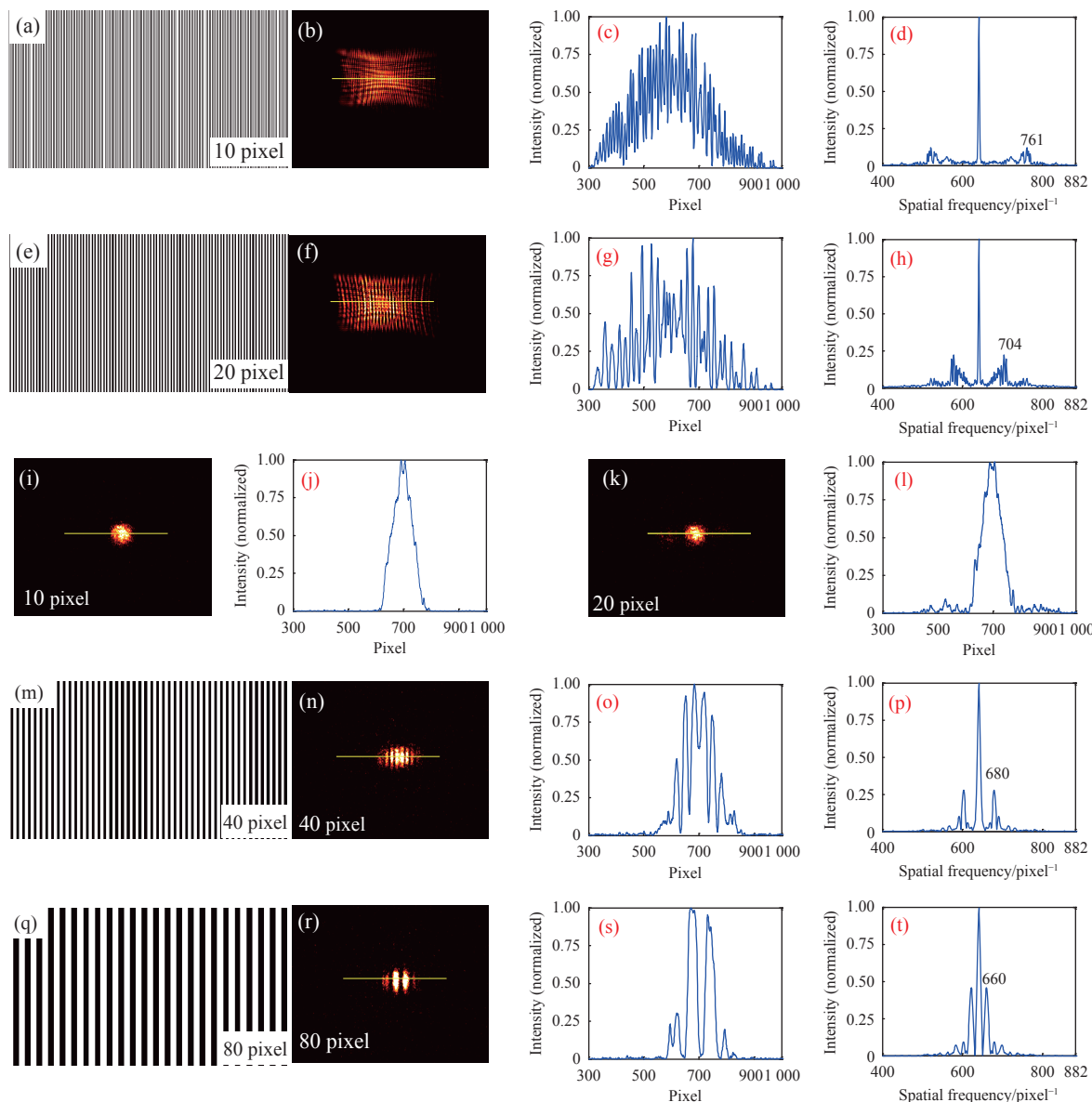


图 8 成像系统分辨率测试实验结果

Fig.8 Resolution testing results of the imaging system

表 1 成像/幻像系统参数及其影响因素

Tab.1 Parameters of the imaging/illusion system and their influencing factors

		Magnification	FOV	Resolution
Imaging without scattering	Values	0.6	3 mm	38 μm
	Influencing factors	Focal length, d_1 , d_2 and d_3	Size of the SLM	Focal length, d_1 , d_2 and d_3
Scattering imaging	Values	0.6	1.5 mm	152 μm (theoretically 80 μm)
	Influencing factors	Focal length, d_1 , d_2 and d_3	Memory effect	Interference of the speckles, speckle size
Optical illusion	Values	0.6	1.5 mm	80 μm (theoretically)
	Influencing factors	Focal length, d_1 , d_2 and d_3	Memory effect	Speckle size

有较强的适用性。所采用的光场调控需要依靠散射光的相干叠加,所以该方法在相干光,尤其是单色相

干光的条件下最为有效。此外,成像/幻像都只是关注光强的信息,所以该技术目前主要应用于视觉成

像领域。

3 结 论

综上所述,文中提出了一种能实现散射成像及光学幻像的双功能散射光调控方法。借助参考点源通过相位恢复技术测量散射光波前,采用相位共轭的方法建立物像平面共轭的成像关系,在散射体的记忆效应范围内实现了任意物体透过薄散射介质的成像;利用相位共轭和 GS 算法产生特定相位对散射光进行调控,在观察者处制造出了幻像图景。理论分析和实验结果都验证了该方法的有效性。散射光调控系统能在数秒内完成,因而拥有动态散射成像及动态光学幻像的能力。该系统在无散射介质的情况下可以直接成像,在有散射介质的情况下能够透过散射介质成像,在物体需要隐藏或伪装时可以实现光学幻像。该方法能够为实现光学幻像提供另一种新颖的选择,且能够有助于加深对散射光调控的理解并推广其应用。所提出的散射光调控方法在浑浊介质中的光学成像、反侦察、光学伪装、复杂光场调控等领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] Hod S. Propagation and scattering of waves in inhomogeneous optical media [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(10): 105702.
- [2] Yoon S, Kim M, Jang M, et al. Deep optical imaging within complex scattering media [J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, 2(3): 141-158.
- [3] Zheng Shanshan, Yang Wanqin, Situ Guohai. Application of computational optical imaging in scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603005. (in Chinese)
- [4] Katz O, Small E, Silberberg Y. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 549-53.
- [5] Wu C, Liu J, Huang X, et al. Non-line-of-sight imaging over 1.43 km [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(10): e2024468118.
- [6] Wang Y M, Judkewitz B, DiMarzio C A, et al. Deep-tissue focal fluorescence imaging with digitally time-reversed ultrasound-encoded light [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 928.
- [7] Ruan H, Xu J, Yang C. Optical information transmission through complex scattering media with optical-channel-based intensity streaming [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2411.
- [8] Wu K, Cheng Q, Shi Y, et al. Hiding scattering layers for noninvasive imaging of hidden objects [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8375.
- [9] Tan W, Huang X, Jiang T, et al. Research on the effect of noise-containing signal light on correlated imaging in complex environment (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210657. (in Chinese)
- [10] He H, Xie X, Liu Y, et al. Exploiting the point spread function for optical imaging through a scattering medium based on deconvolution method [J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2019, 12(4): 1930005.
- [11] Zhuang H, He H, Xie X, et al. High speed color imaging through scattering media with a large field of view [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 632696.
- [12] Xie X, Zhuang H, He H, et al. Extended depth-resolved imaging through a thin scattering medium with PSF manipulation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4585.
- [13] Zhu S, Guo E, Bai L, et al. Efficient learning-based phase retrieval method through unknown scattering media [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20210889. (in Chinese)
- [14] Lai Y, Ng J, Chen H Y, et al. Illusion optics [J]. *Frontiers of Physics in China*, 2010, 5(3): 308-318.
- [15] Lai Y, Hang Z, Huang X, et al. Cloaking materials [J]. *Physics*, 2012, 41(9): 589-594. (in Chinese)
- [16] Zhang J, Pendry J B, Luo Y. Transformation optics from macroscopic to nanoscale regimes: A review [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 014001.
- [17] Chen H, Zheng B, Shen L, et al. Ray-optics cloaking devices for large objects in incoherent natural light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2652.
- [18] Wu K, Cheng Q, Wang G P. Fourier analysis: From cloaking to imaging [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(4): 044001.
- [19] Sun F, Zheng B, Chen H, et al. Transformation optics: From classic theory and applications to its new branches [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(6): 1700034.
- [20] Chu H, Lai Y. Ultrathin invisibility cloaks based on metasurfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201038. (in Chinese)
- [21] Ang P, Eleftheriades G V. Active cloaking of a non-uniform scatterer [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 2021.
- [22] Vellucci S, Monti A, Toscano A, et al. Scattering manipulation and camouflage of electrically small objects through

- metasurfaces [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(3): 034032.
- [23] Cheng Q, Wu K, Shi Y, et al. Directionally hiding objects and creating illusions above a carpet-like device by reflection holography [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8581.
- [24] Qian C, Zheng B, Shen Y, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 383-90.
- [25] Lai Y, Ng J, Chen H, et al. Illusion optics: The optical transformation of an object into another object [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 253902.
- [26] He H, Guan Y, Zhou J. Image restoration through thin turbid layers by correlation with a known object [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12539-12545.
- [27] He Hexiang, Kam Sing Wong. An improved wavefront determination method based on phase conjugation for imaging through thin scattering medium [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085604.
- [28] Gerchberg R, Saxton W. Reconstructing light field by two intensities in Fourier plane [J]. *Optik*, 1972, 35(1): 23-30.