

强散射体内部目标的实时高分辨率成像方法

文政博^{1,2} 吴雨霖^{1,2} 张秀达^{1,2*} 严惠民^{1,2} 魏少鹏^{1,2}

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²浙江大学国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027

摘要 由于强散射介质的散射作用,使得传统光学成像系统难以有效探测其内部目标。针对这一难点,提出了一种对强散射介质内部目标进行高分辨率实时成像的方法。基于强散射介质波前校正原理,采用汇聚照明方式,通过纯相位型空间光调制器,对散射介质表面点目标进行校正,使其清晰成像。在此基础上,保持调制图样不变,将汇聚照明改为扩展照明,即可实现对校正点附近较大视场和景深范围内目标的实时清晰成像。基于此方法搭建的实验系统很好地实现了强散射介质内部目标的实时成像,通过比较传统光学系统在无散射介质条件下和散射成像系统在有强散射介质条件下的成像质量,结果表明,散射成像系统具有更高的成像锐度。

关键词 成像系统;散射介质成像;波前校正;高分辨率;空间光调制器

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0211006

A Real Time Imaging Method for Internal Targets of Strongly Scattering Media with High Resolution

Wen Zhengbo^{1,2} Wu Yulin^{1,2} Zhang Xiuda^{1,2} Yan Huimin^{1,2} Wei Shaopeng^{1,2}

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

²National Engineering and Technology Research Center for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The scattering effect of strongly scattering medium makes the traditional optical imaging system can not detect the internal targets of scattering medium. To resolve this problem, a method is proposed to real-time detect the object locates in the strongly scattering medium with high resolution. According to the principle of wave front shaping theory, in condition of convergent lighting, pure phase spatial light modulator is employed to obtain a clear image of a spot target on the surface of the scattering medium. After the illumination is expanded, objects near the pre-corrected point can be clear imaged with a large field of view and a long depth of field with the modulation pattern unchanged. The experimental results prove this method can achieve high acuity real-time imaging. The imaging quality of the traditional optical imaging system without scattering medium and the scattering imaging system with scattering medium is compared. The experimental results show that the scattering imaging system has a better imaging acuity than the conventional optical imaging system.

Key words imaging systems; imaging through turbid media; wave front shaping; high resolution; spatial light modulator

OCIS codes 110.0113; 110.3200; 110.2990

1 引言

对散射介质内部的物体进行高分辨率探测具有重要的科学与应用价值。例如:在生物学中观察活体内部的细胞组织、早期诊断人体内部的病变细胞、透过云雾进行遥感测绘等。为了获得散射介质内目标的高

收稿日期: 2014-06-27; 收到修改稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA022302)

作者简介: 文政博(1990—),男,硕士研究生,主要从事光电检测与图像处理方面的研究。E-mail: wenzb@zju.edu.cn

导师简介: 严惠民(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测、图像处理、激光雷达等方面的研究。

E-mail: yhm@zju.edu.cn

*通讯联系人。E-mail: zhangxd@zju.edu.cn

分辨率图像,近年来提出了许多方法,如:自适应光学技术^[1],光学相干断层成像技术^[2-4]，“鬼成像”技术^[5-7],计算层析技术^[8]等。然而自适应光学、光学相干断层成像技术和计算层析技术只适合于弱散射介质成像。“鬼成像”技术需要在目标表面形成清晰(或可测)光斑才能恢复在成像路径上被破坏的目标信息。此外,还有一些其他的技术,比如 Bertolotti 等^[9]用激光从散射介质前对其后的荧光物体进行高精度的角度扫描,并在散射介质前采集相应的散射图像,通过分析各图像之间的相关性最终重构了原始图像,但是该方法需要采用特殊的荧光物质,而且需要长时间的扫描,对活体或运动物体的适用性不强。

2007年,Vellekoop 等^[10]首次以实验方式实现了对被强散射介质破坏后光波的汇聚,开创了强散射体波前校正的新理论与新技术。并由此引发了后续一系列的强散射体波前校正相关研究工作,取得了许多重要的研究成果^[11-12]。2010年,Popoff 等^[11-12]通过波前校正技术获取了散射介质的传输矩阵并通过其逆矩阵重获待测物体图像;2012年,Katz 等^[13]利用预置点光源信息获得了所需的波前校正相位阵列并利用记忆效应^[14-15]实现对点光源附近物体的实时成像;2013年,中山大学的 He 等^[16]利用物体先验信息和强散射波前校正获得了散射介质后的待测物体图像。另外波前校正技术还被用于高分辨成像领域:如2010,Vellekoop 等^[17]在实验中通过波前校正技术使点光源通过散射介质后的像达到原系统所成像尺寸的1/10;2011年,Putten 等^[18]通过波前校正技术实现对生物组织内100 nm量级结构的超分辨探测等。

提出了一种基于强散射体的波前校正原理来实现对散射介质内部目标实时高分辨成像的方法,相比于现有的研究工作,或者依赖于复杂耗时的恢复算法需要后期图像的离线重构^[4,9,11];或者需要有目标的先验知识^[15-16],普适性较低。而此方法不需要目标的任何先验知识即可对散射体内部目标进行实时清晰成像,更接近实际应用。

2 原理介绍

虽然扩散理论能够比较好地描述波在散射介质中的传播,然而它却没有考虑到波的干涉作用。而波前校正技术则充分利用了波的干涉作用。光波在散射介质中的传播借助于惠更斯原理能够更好地理解:散射介质内部包含着大量尺寸和分布极不均匀的小颗粒,光波入射散射介质后与这些颗粒多次碰撞,使形成的次级子波发生一定程度相位延迟,导致出射波面极其不规则[如图1(a)所示]。一般情况下,由于散射介质内多次碰撞的复杂性导致干涉子波之间相位的随机性,使光束在前进方向形成亮度较暗的散斑图样。对于阵列式相位型空间光调制器(SLM),当对其中某个像素施加一定的灰度时,可使入射到该像素的光的相位也发生一定程度的相位延迟。利用这一特性,通过对 SLM 加载一定的灰度图像,可以实现对光波随机相位延迟的补偿,从而校正被破坏的波面,如图1(b)所示。SLM既可以放在散射体的后方,也可以放在前方进行相位补偿^[10,15]。

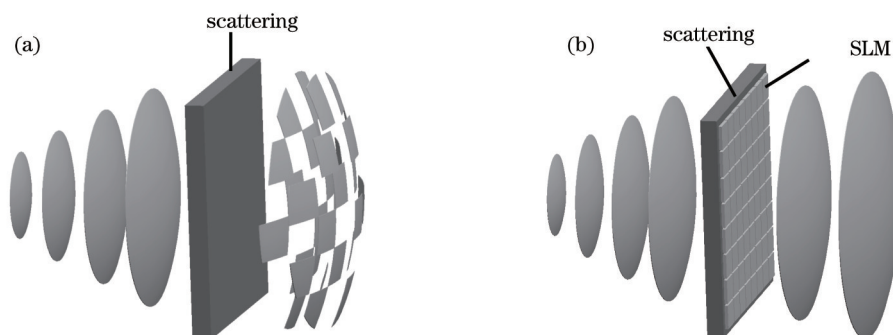


图1 强散射体波前校正原理图。(a)散射介质干扰的球形波前;(b)SLM校正的被破坏的波前

Fig.1 Principle diagram of wave front shaping through strongly scattering media. (a) A spherical wave front is disturbed by the scattering media; (b) SLM restores the spoiled wave front

若使用空间光调制器的 N 个像素,则像面某点 m 处的强度 E_m 是这 N 个通道中光复振幅的线性叠加^[10](假设所有的调制通道相互独立):

$$E_m = \sum_{n=1}^N t_{mn} A_n \exp(i\phi_n), \quad (1)$$

式中 A_n 和 ϕ_n 分别是来自第 n 个通道光的振幅和相位, t_{mn} 是未加调制相位时 SLM 上第 n 个通道的光传播至电荷耦合器件(CCD)像面上第 m 个通道的传输系数,为一实数。

若散射介质在某段时间内基本保持稳定^[10],则传输矩阵不变。由(1)式可知,当所有参与叠加的光相位 ϕ_n 完全相同时, E_m 的值达到最大。

由于散射介质的干扰, ϕ_n 不可能完全相同而是等效在 $0\sim 2\pi$ 范围内随机分布,导致相当多的通道电场相互抵消,仅剩下少量通道电场起作用,电场强度 E_m 比较小。因此,在通常情况下光被散射介质散射后光强一般总体偏暗。如果加入空间光调制器对每个通道的相位进行补偿,设空间光调制器对第 n 个通道的附加相位为 $\Delta\phi_n$,则新的光强为

$$E'_m = \sum_{n=1}^N t_{mn} A_n \exp(i\phi'_n), \quad (2)$$

式中 $\phi'_n = \phi_n + \Delta\phi_n$ 。

很显然只需要使得 ϕ'_n 相同即可获得最大光强。而实际上散射介质不但会改变光的相位,还会改变其偏振方向。干涉增强不仅与相位有关,还与偏振方向有关,且单个纯相位 SLM 不能调整偏振方向,因此,有些像素的调相对最终校正无贡献,同理可知,采用窄带光源会比宽带光源得到更好的校正效果。这几点是强散射波前校正方法与传统自适应方法的不同之处。

为了使得补偿后的相位一致,目前主要有两种补偿方法,一种是局部匹配追踪法^[19],另外一种为相位测量法^[20],两者的补偿效果是类似的。由于前者的实验装置的集光效率比后者要高 1 倍,本文采用了局部匹配追踪法。局部匹配追踪法的思想是逐个改变空间光调制器通道的附加相位,使测得的光强最大,即:

$$\phi_n = \max[E'_m(\Delta\phi_{n,j})], \quad (3)$$

式中 $\Delta\phi_{n,j} \in \left\{ \frac{2j\pi}{N} \right\}, j=0,1,2,\dots,N-1$,改变通道附加相位的顺序可以任意选择进行。

3 实验过程与结果分析

本文采用的实验装置如图 2 所示,光源为赝热光源,赝热光经过准直、汇聚后被强散射介质 1 散射,散射光透过待测目标后再次被散射介质 2 所散射,散射光被显微物镜收集后再由透镜 2 照射到空间光调制器上,经空间光调制器反射后经透镜 2 被电荷耦合器件(CCD)相机探测。其中:赝热光源由波长 632.8 nm 的激光加前置的旋转毛玻璃组成(图 2 中未画出);散射介质 1 和 2 均为 30° 散射角的毛玻璃;显微物镜的放大率为 10 倍、数值孔径为 0.25;透镜 2 的焦距为 120 mm,口径为 25 cm;透镜 3 的焦距为 200 mm,口径为 25 cm;空间光调制器是 Holoeye 公司的纯相位反射式的 Pluto-VIS,像素阵列为 1920 pixel×1080 pixel,对 632.8 nm 光的最大调制相位为 3π ,帧率

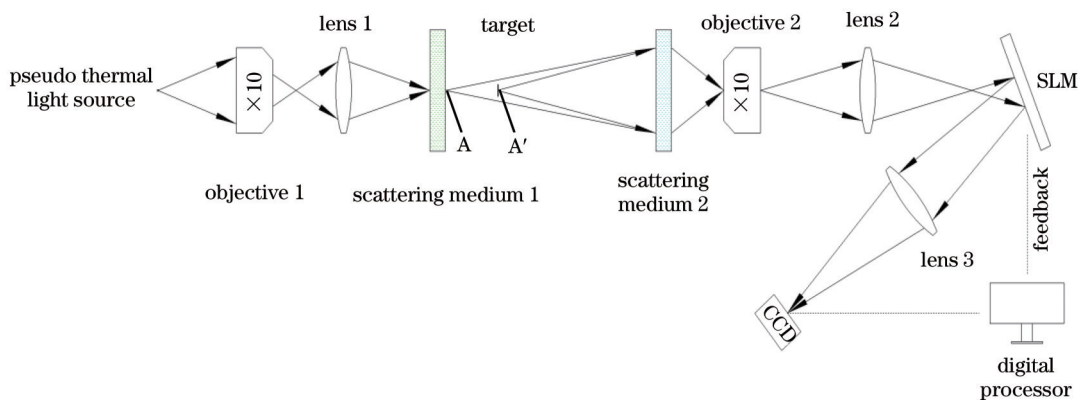


图 2 强散射成像实验装置图

Fig.2 Schematic of apparatus for detecting the unknown object in strongly scattering medium

为 60 Hz;相机是 ImageSource 公司的 DMK-21BU04,其 CCD 像素阵列为 640 pixel×480 pixel,帧率为 60 Hz;待测目标是刻穿在钢板上的字母“E”和字符串“ZJU”两个样品,其中字母“E”的高为 2.2 mm,宽为 0.7 mm,“ZJU”上单个字母都是 1.35 mm 高,0.7 mm 宽,笔画平均宽度约为 0.2 mm。其位置关系为:散射介质 2 经过显微物镜、透镜 1 后与 SLM 液晶面共轭;探测物体经过由散射介质 2、显微物镜、透镜 1、SLM、透镜 2 组成的“散射系统”后成像于 CCD 相面上;散射介质 1 到散射介质 2 的距离为 175 mm;散射介质 1 放于未加散射介质时成像系统的景深内,使其在 CCD 上也能够成清晰的像。

由于待测目标的前后都有散射介质,照射光被强散射介质 1 所散射,无论采用何种方式的光照射到待测物体表面时都无法形成有规律的光强分布。并且由待测物体发出的光也被强散射介质 2 所破坏,此装置能够比较好地模拟待测目标位于散射介质内部的情况。以传统成像方法、点扫描成像或最近出现的“鬼成像”技术^[9]等光学探测方法都无法获取该待测目标的图像。

但是利用本文的实验装置(图 2)可以获得目标的清晰图像。散射介质 1 的作用是使照明光无法在空间上形成有规律的分布,使得“鬼成像”等技术无法探测其后的物体,而散射介质 2 的存在使得必须要对光波相位补偿才能对物体成清晰的像。从(2)式可以知道,如果使得光强最强也就是光经过散射介质和空间光调制器共同作用以后的各通道附加相位完全一致。附加相位一致也就意味着光几乎没有被散射而是沿着“原有”方向传播。

根据以上讨论,本文进行的获取散射介质内部目标图像过程如下:

1) 将散射介质 1、散射介质 2 和透镜 1 去除,对 SLM 上各个像素施加的灰度都为 0,直接用 CCD 采集待测目标图像如图 3(a)、(b)所示;

2) 加入散射介质 1 和散射介质 2 后图像如图 3(c)、(d)所示,由于信号光被散射介质散射,探测到的图像是杂乱无章的散斑;

3) 在散射介质 1 前加入汇聚透镜 1,使光在散射介质 1 的后表面(毛面)汇聚一个光点,由于毛面的后向散射光容易被观测故而这一步骤是容易完成的;接着对空间光调制器的某个通道施加不同的灰度图像,使该通道上的光依次产生 $0\sim 2\pi$ 的相位延迟,并分别记录控制区域(即 A' 点)的光强,最后将使 A' 获得最大光强时所对应的灰度图像赋予该通道^[10],按照同样的方法遍历每个通道寻找其最优灰度,生成的调制图样如图 3(e)所示,最终使散射介质 1 表面某个物点(设为 A ,如图 2 所示)对应的像点位置出现了一个明亮的小光斑,如图 3(f)所示,其直径为 $33\ \mu\text{m}$ 左右,该像点可以认为是物点 A 经过“散射成像系统”所成的像。由于散射介质 1 位于成像系统的景深内且 A 点与待测目标上的实际物点 A' 共轴,因此可以认为此时空间光调制器基本恢复了 A' 发出的被散射介质扰乱的波面;

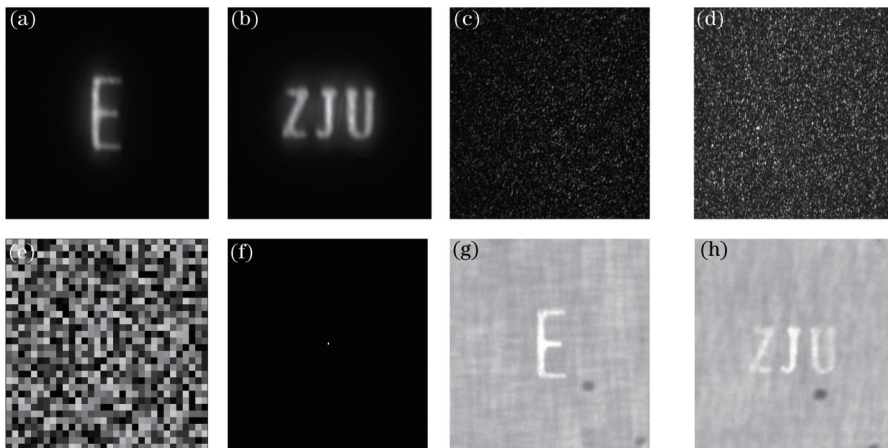


图 3 实验结果。(a)‘E’直接成像;(b)‘ZJU’直接成像;(c)散射介质弄散的 E;(d)散射介质弄散的‘ZJU’;(e)调制图像;(f)调制后斑点 A;(g)校正的图像‘E’;(h)校正后的‘ZJU’

Fig.3 Experimental results. (a) ‘E’ direct imaging; (b) ‘ZJU’ direct imaging; (c) image of ‘E’ is smeared by scattering media; (d) image of ‘ZJU’ is smeared by scattering media; (e) modulation; (f) image of spot A after modulation; (g) restored image of ‘E’; (h) restored image of ‘ZJU’

4) 移除汇聚透镜1,置入待测目标1和2,系统也能得到目标1和目标2清晰的像,如图3(h)和3(i)所示。

从上述实验过程可以看出,系统确实可以在不预先置入已知特征目标的条件下获取散射体内部目标的清晰图像。该过程是利用汇聚照明在散射体表面附近形成一个点状目标,并以获得了散射体的矫正相位矩阵。然后将照明改为扩展照明,根据记忆效应^[13],在位于物点 A' 附近一定区域内的目标也能够通过调制后的“散射系统”在 A 对应的像点附近出现,这样就能获取散射体内部目标的图像了。

上述实验过程为先使用汇聚照明,获得所需要的校正相位。保持校正相位不变,改为扩展光源照明即可用 CCD 直接获得目标的清晰图像。很显然,探测过程几乎和物体的自身特征无关,且可以直接用 CCD 拍摄目标的动态图像。为了进一步了解这一探测方法的有效性,继续进行了下述实验。

对于校正后的散射成像系统,前后移动待测目标,在散射介质1后0~40 mm 的范围内能够清晰成像,即成像景深约为 40 mm,表明该系统具有较好的强散射介质深层探测能力。

此外还对散射介质中运动的物体进行了实时探测实验,结果如图4所示,图4(a)到图4(d)清晰记录了物体从视场的左上角移动到右下角的运动过程。这表明该探测方法良好的实时性。

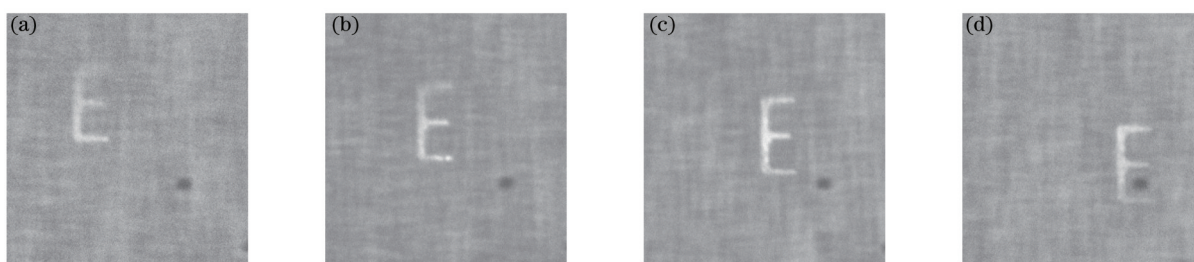


图4 “散射系统”对运动物体的实时探测

Fig.4 Real-time capture of the moving object in the scattering medium

未加入散射介质时原成像系统的视场范围为整个 CCD 像面所对应的物面范围。加入散射介质并进行相位补偿后,系统视场(FOV, F_{ov})的大小与记忆效应中点光源在光轴的横截面上沿径向所能移动的范围有关^[13]:

$$F_{ov} = R\lambda/\pi L, \quad (4)$$

式中 R 为“散射成像”系统的焦距, λ 为光波长, L 为散射介质2的厚度。本实验中, R 约为 233 mm, λ 为 632.8 nm,

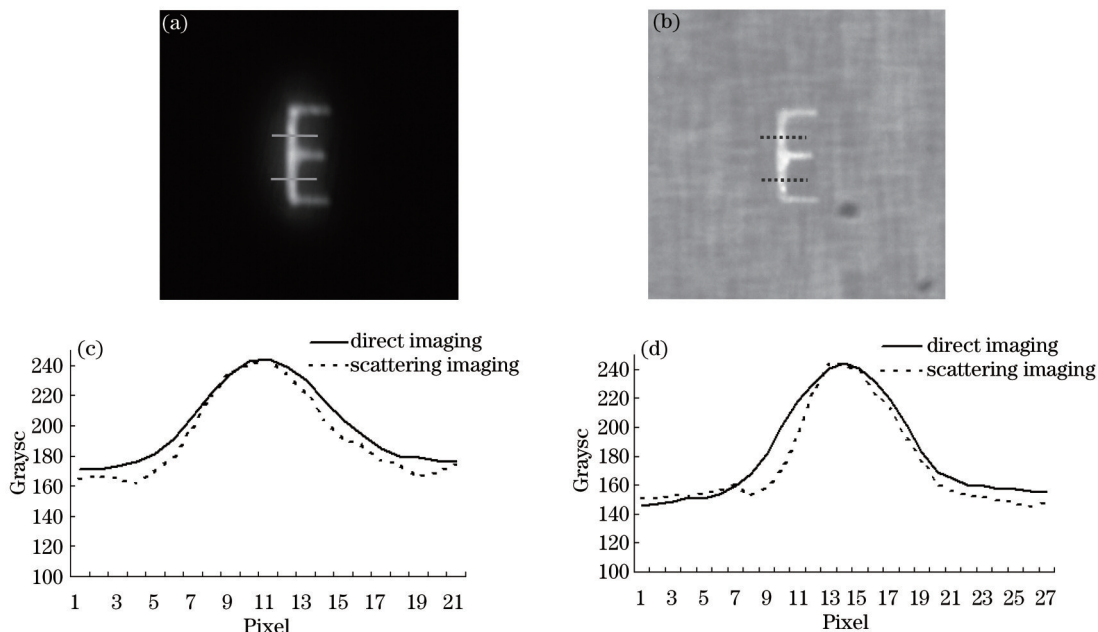


图5 “散射系统”成像质量分析。(a)直接成像;(b)散射成像;(c)距离‘E’顶部15 pixel处的强度分布的强度分布

Fig.5 Imaging quality analysis of the “scattering imaging systems”. (a) Direct imaging; (b) scattering imaging; (c) the intensity distribution of image 15 pixel away from the top of letter ‘E’; (d) the intensity distribution of image 36 pixel away from the top of letter ‘E’

L 约为 1 mm。根据(4)式求得的视场范围为 0.046 rad,实际结果测量所得的角视场范围约为 0.042 rad,与理论预测基本一致。

一般情况下,散射现象会导致成像模糊甚至不能成像。但在本实验中,经散射校正后,系统成像锐度不但没有降低,反而有一定程度提升。图 5(a)是系统未加散射介质时字母“E”所成的像,图 5(b)是通过本实验方法对散射介质内部同一物体探测所得的像,对比图 5(a)和图 5(b),可以看出,虽然图 5(b)有明显的本底,但其中像的轮廓锐度要明显好于图 5(a)。分别在距离字母“E”的顶部 15 pixel 和 36 pixel 两处横向统计“E”的强度分布,由如图 5(c)和 5(d)可以看出,物体经过散射介质后所成图像强度分布(虚线)的半峰全宽要比未加散射介质时直接成像的强度分布(实线)半峰全宽要略小,在距离“E”顶部 15 pixel 处,半峰全宽减小了 14.3%,而在距离“E”顶部 36 pixel 处,半峰全宽减小了 33.3%。这种现象可以根据散射校正过程中目标点的优化来解释,即当物体是点目标,且将其像点校正到一个最清晰点时,校正的不仅是强散射体的散射,也包括了光学系统的像差等因素。

4 结 论

基于强散射体波前校正技术,提出了利用汇聚照明获取校正相位,对强散射介质内部目标进行实时高分辨率成像的方法。该方法利用了光源的照明形式来获得所需要的补偿相位,不需要图像的离线重构或目标的先验知识。实验结果表明,此方法能够实现对藏匿于散射介质内部目标的实时高分辨率成像。此外,通过对比无散射介质光学系统和散射成像系统二者的成像质量,发现在散射介质存在的情况下反而有更好的成像锐度,表明利用强散射介质能够实现高分辨率成像。

参 考 文 献

- 1 Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Zou Yongchao, *et al.*. Study of aberration correction in light path of adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1214002.
蒋鹏志, 马浩统, 邹永超, 等. 自适应光学系统内光路的像差校正研究[J]. *光学学报*, 2012, 31(12): 1214002.
- 2 D Huang, E A Swanson, C P Lin, *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 3 Li Peng, Huang Run, Gao Wanrong. Experiment research on optical coherence tomography of human skin [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2498-2502.
李 鹏, 黄 润, 高万荣. 光学相干层析术在人体皮肤成像方面的实验研究[J]. *中国激光*, 2009 (10): 2498-2502.
- 4 Y Choi, T D Yang, Y C Fang, *et al.*. Overcoming the diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107(2): 023902.
- 5 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 053840.
- 6 Jin Haoqiang, Shi Jianhong, Peng Jinye, *et al.*. Looking around corners and through turbid media with projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511006.
金浩强, 石剑虹, 彭进业, 等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511006.
- 7 Yinzuo Zhang, Jianhong Shi, Hu Li, *et al.*. Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent light [J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(1): 011102.
- 8 Zhang Lei, Song Wen'ai, Yang Shunming. Review of ultrasonic scattering computer tomography development [J]. *CT Theory and applications*, 2011, 20(3): 415-424.
张 蕾, 宋文爱, 杨顺明. 超声散射 CT 技术发展综述[J]. *CT 理论与应用研究*, 2011, 20(3): 415-424.
- 9 J Bertolotti, P E G Van, C Blum, *et al.*. Non-invasive imaging through opaque scattering layers [J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- 10 I M Vellekoop, A P Mosk. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- 11 S Popoff, G Lerosey, M Fink, *et al.*. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- 12 S M Popoff, G Lerosey, R Carminati, *et al.*. Measuring the transmission matrix in optics: An approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(10): 100601.
- 13 O Katz, E Small, Y Silberberg. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 549-553.

- 14 I Freund, M Rosenbluh, S Feng. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media [J]. Phys Rev Lett, 1988, 61(20): 2328.
- 15 S Feng, C Kane, P A Lee, *et al.*. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media [J]. Phys Rev Lett, 1988, 61(7): 834.
- 16 H He, Y Guan, J Zhou. Image restoration through thin turbid layers by correlation with a known object [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12539–12545.
- 17 I M Vellekoop, A Lagendijk, A P Mosk. Exploiting disorder for perfect focusing [J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 320–322.
- 18 P E G V Putten, D Akbulut, J Bertolotti, *et al.*. Scattering lens resolves sub-100 nm structures with visible light [J]. Phys Rev Lett, 2011, 106(19): 193905.
- 19 I M Vellekoop, A P Mosk. Phase control algorithms for focusing light through turbid media[J]. Opt Commun, 2008, 281(11): 3071–3080.
- 20 C Meng, C H Yang. Implementation of a digital optical phase conjugation system and its application to study the robustness of turbidity suppression by phase conjugation [J]. Opt Express, 2010,18(4): 3444–3455.

栏目编辑: 张浩佳