

一种双层散射介质中间目标单像素成像系统研究

韩建辉 田勇志 范晓杭 辛昊毅 胡杨明 刘晓旻 臧华平 梁二军

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 在对散射介质散射特性进行分析的基础上,提出了一种对散射介质中物体进行单像素成像的方法,基于数字微镜阵列和单点探测器,设计并搭建了相应的单像素成像系统。通过对数字微镜阵列加载一系列具有不同相位的条纹图案,采集对应的光强信息,结合图像恢复算法,实现了对位于散射介质中的物体成像。为了去除噪声,分析了噪声的来源,设计了滤波器对所拍摄的物体图像进行滤波处理,图像质量得到了显著提高。与传统散射介质成像系统相比,该系统结构简单,无需复杂的标定过程,在多个领域具有应用前景。

关键词 成像系统;单像素成像;散射介质;四步相移;数字微镜阵列

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0611001

A Single-Pixel Imaging System with a Target in the Middle of Double Scattering Medium

Han Jianhui Tian Yongzhi Fan Xiaohang Xin Haoyi Hu Yangming

Liu Xiaomin Zang Huaping Liang Erjun

School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract On the basis of the analysis of scattering media scattering characteristics, a single pixel imaging method is proposed to capture the image of the objects in scattering media. Based on the digital micro mirror array and a single point detector, the corresponding single-pixel imaging system is designed and built. Series of stripe patterns with different phases are loaded on the digital micro mirror array and the intensity informations are recorded by the detector. Then the image restoration algorithm is used to get the reconstructed image of the objects in the scattering media. In order to remove the noise, the source of noise is analyzed, a filter is designed for filtering, and the image quality is significantly improved. Compared with the traditional scattering medium imaging systems, this system is simple and without complex calibration process, so it can apply to many fields.

Key words imaging systems; single pixel imaging; scattering medium; four-step phase-shifting; digital micro mirror array

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 110.3010

1 引 言

由于大气湍流、烟雾、浑浊液体等对光具有非常强的散射作用,当光通过这些散射介质传播时被散射到各个不同方向,给散射介质中的物体成像带来很大的挑战,严重时甚至无法完全获得物体的图像。获得散射介质环境下物体的清晰图像在许多方面都具有重要的意义,如穿透云层和战场硝烟对敌我双方的飞行器或战场状况进行成像分辨、穿过磨花玻璃对另一侧物体成像、穿透皮肤等对人体内部组织结构成像^[1-3]等。因此,如何获得散射介质环境下物体的清晰图像一直备受人们关注。针对散射介质成像这一难题,近年来人们提出了许多方法,如自适应光学技术^[4]、光学相干断层成像技术^[5-7]、鬼成像技术^[8-9]、计算层析技术^[10]等。

收稿日期: 2015-11-16; **收到修改稿日期:** 2015-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11574276, 61505178, 61307019)、河南省教育厅科学技术重点研究项目(14A140004, 14A140005)

作者简介: 韩建辉(1989—),男,硕士研究生,主要从事单像素成像方面的研究。E-mail: ruruoyixinzhu@163.com

导师简介: 梁二军(1956—),男,博士,教授,主要从事成像物理与器件方面的研究。

E-mail: ejliang@zzu.edu.cn(通信联系人)

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用于弱散射介质成像。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。

对于散射介质内部成像,金浩强等^[11]和唐文哲等^[12]采用关联算法,分别实现了街角成像和后视成像,但是这两种方法都是实现了单层散射介质(即物体透射或反射的光通过散射介质)成像,而现实场景中更多的是物体被散射介质包裹。2015年,文文博等^[13]通过空间光调制器加载掩膜,利用波前相位校正,使光通过散射介质以后重聚焦,从而实现对散射介质中的物体成像,但该方法需要进行复杂的扫描过程来完成波前校正,而且一种校正只适用于一种场景。Bertolotti等^[14]采用激光穿过散射介质对其后的荧光物体进行高精度的角度扫描,分析各图像之间的相关性最终重构了原始图像,该方法仅适合于对荧光物体成像。Durán等^[15]采用关联算法,实现了对薄鸡肉片中的荧光物质的成像,但是由于该方法需要生成庞大的Hadamard矩阵,不能进行大尺寸图像的拍摄,同时为了减少测量时间,采用了压缩传感理论,这样就会耗费大量的时间。

2015年,Zhang等^[16]将四步相移理论应用到频谱获取方法中,该方法通过空间光调制器和投影仪向物体投射一系列具有相位差的明暗条纹图案,通过桶探测器收集光强信息,然后根据相应的算法得到物体的频谱图,再经过一次傅里叶变换恢复出目标物体。在对图像细节信息要求不高的情况下,该方法可以通过少量的测量,得到图像的部分频谱,从而恢复出物体的信息。

本文应用上述频谱获取方法,并对散射介质中光传播特性进行分析的基础上,提出了一种针对散射介质中物体成像的方法,基于数字微镜阵列(DMD)和单点探测器搭建了单像素成像系统,对位于双层毛玻璃之间的物体进行了成像实验,取得了较好效果。与现有散射介质内部成像研究工作相比,本文方法不需要波前校准等前期工作,也不需要所拍物体具有荧光特性,而且可以进行大尺寸图像的拍摄,单像素成像系统结构还可以扩展到非可见光波段散射介质中物体的成像。因此该方法具有更广泛的适用性和较好的应用前景。

2 成像系统原理与方法

2.1 系统设计原理图

所设计的成像系统示意图如图1所示。以双层毛玻璃构成散射介质,物体位于双层毛玻璃之间。整个实验系统包括计算机、激光器、透镜、DMD、双层毛玻璃、单点探测器以及数据采集卡。由激光器发出的光经过透镜 L_1 和透镜 L_2 进行准直和扩束,之后光线照射在DMD上面,DMD由电脑控制按顺序连续加载事先生成的条纹图,经DMD反射的条纹图照射位于散射介质中的目标物体,透过物体的光被透镜 L_3 和透镜 L_4 收集以后会聚在单点探测器上,总的光强信息以电压值的形式通过数据采集卡被记录下来,由此就完成了数据的同步采集,最后再结合恢复算法,即可实现对散射介质中的物体成像。

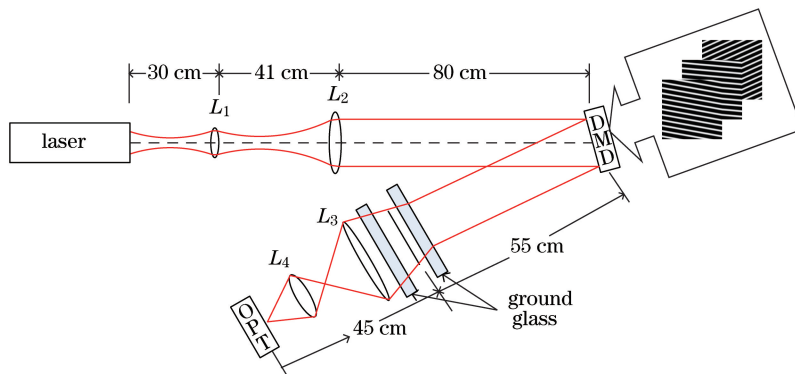


图1 成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging system

通常情况下,当光束被散射介质散射以后,将不再沿原来的方向传播,会在散射介质后面形成散斑,因而传统的成像设备将会受到影响,甚至成像失败。但是并不是所有的光子都会如此,一部分光子将会沿原来的方向传播,或者呈“之”字型传播,即弹道光子和蛇形光子,这部分光子基本上保持了原来条纹图的信息。具

体如图 2 所示,红色代表入射光线,黑色代表被严重散射的光线,绿色代表弹道光子和蛇形光子。可以利用这部分光子来成像,但是现有的方法需要复杂的时间门等装置来区分这些光子,实验复杂且成本高;而本文方法需要探测的只是加载不同条纹图时引起的光强变化。因此,虽然加载的条纹图经过散射介质后打在目标物体上时已经被破坏,但是对于具有同一空间坐标不同相位的 4 张条纹图来说,条纹图的形式基本相同,只是入射角度发生了很小的偏移。由散射介质的记忆效应^[17-19]可知,所对应的散斑也发生了一个小位移的移动,散斑的形式基本保持不变,当进行后期算法处理时,散射严重的光子形成的散斑可以近似的当作背景噪声被消除,而真正引起光强变化的恰恰是那些携带条纹图信息的弹道光子和蛇形光子。利用该系统不需要额外的时间门等装置来区分这些光子,却可以利用这些光子来实现成像,因此,该方法与现有的方法相比具有明显的优越性。

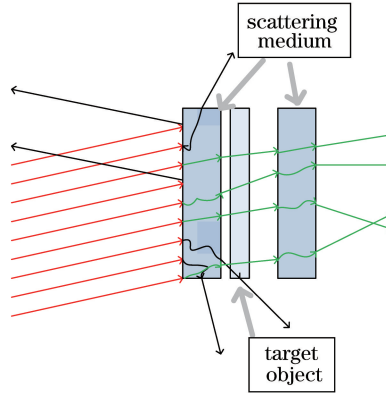


图 2 光通过散射介质的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light through scattering medium

2.2 背景噪声去除方法

由上述分析可知,利用该系统成像的关键是从被毛玻璃散射的散斑中区分出弹道光子和蛇形光子,同时又要有效地消除背景噪声的影响。实验中所用探测器为单点探测器,探测到的是光强的信息,具体形式为

$$D_{\phi}(f_x, f_y) = D_n + k \cdot I_{\phi}(f_x, f_y), \quad (1)$$

式中 (f_x, f_y) 代表频域坐标值,而 $D_{\phi}(f_x, f_y)$ 指的是加载不同的条纹图时探测器所探测到的光强值, $I_{\phi}(f_x, f_y)$ 指的是加载的条纹图与目标图像相乘以后的光强值, k 为探测器到物体距离和角度对光强的影响因子, D_n 指的是背景噪声,式中下标 ϕ 代表不同的相位。

由此可以看出,对于探测到的信息,真正有用的是 $k \cdot I_{\phi}(f_x, f_y)$,而背景噪声 D_n 会对结果造成干扰,需要采用合适的方法来消除噪声的干扰,在此基础上,借鉴了 Zhang 等^[16]改进的四步相移理论,对于同一个频域坐标,加载 4 张具有不同相位的正弦条纹图,即(1)式中 ϕ 的值分别取 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$,并作如下处理:

$$E(f_x, f_y) = [D_0(f_x, f_y) - D_{\pi}(f_x, f_y)] + j \cdot [D_{\pi/2}(f_x, f_y) - D_{3\pi/2}(f_x, f_y)], \quad (2)$$

式中 $E(f_x, f_y)$ 是通过加载 4 张不同相位的条纹图而得到的频域中对应点的频谱值。由上面对散射介质的分析可以看出,利用该方法可以有效地消除背景噪声的影响,同时保留加载不同条纹图时引起的光强变化,而加载的条纹图具体形式为

$$P_{\phi}(x, y; f_x, f_y) = a + b \cdot \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi), \quad (3)$$

式中 a 代表直流项,可以保证生成的条纹图灰度值全部为正值, b 是系数。设物函数为 $R(x, y)$,那么 $I_{\phi}(f_x, f_y)$ 形式为

$$I_{\phi}(f_x, f_y) = \iint_{\Omega} R(x, y) \cdot P_{\phi}(x, y; f_x, f_y) dx dy, \quad (4)$$

将(1)、(3)和(4)式代入(2)式并进行化简可得

$$E(f_x, f_y) = 2bk \iint_{\Omega} R(x, y) \cdot \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (5)$$

由上述分析可以看出,该方法可以有效地消除背景噪声的干扰,同时实现了图像从空域到频域的转换,因此,

通过对采集到的数据进行一次傅里叶变换即可实现散射介质中物体成像。

此重建算法是根据明确的数学解析式反演得到,因此不会像压缩传感算法一样,因算法不确定性而引入新的噪声,从而影响重建图像的信噪比。

3 系统设计分析

3.1 系统装置

实验中所用激光器为大恒光电生产的氦氖激光器,型号为 DH-HN250,波长为 632.8 nm;用于准直和扩束的透镜 L_1 和透镜 L_2 焦距分别为 10 mm 和 400 mm;所用 DMD 为上海辛同信息科技有限公司生产的,阵列大小为 1024×768 ,对角线长度为 0.7 英寸(1.78 cm),微镜尺寸为 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,微镜间隙非常小,可实现 $\pm 12^\circ$ 的翻转,实时 USB 下载翻转速度最快可以达到每秒 150 次;所用毛玻璃由大恒光电生产,型号为 GCL-200101,规格为 $210 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$;用于会聚的透镜 L_3 和透镜 L_4 焦距分别为 200 mm 和 50.8 mm;所用单点探测器为 OPT101 光电传感器,电源为 $\pm 5 \text{ V}$ 稳压电源;采集卡为北京阿尔泰科技发展有限公司生产的 PCI8211 数据采集卡;DMD 和采集卡由 C 语言编写的程序同步控制,实现图像的加载和数据采集同步进行。

3.2 系统成像结果分析

采用如上实验装置,对放置在毛玻璃中间的物体进行了拍摄,所用物体为钢尺上的镂空飞机图案,如图 3(a)所示;物体的尺寸约为 $1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$,靠近 DMD 一侧的毛玻璃距离物体 0.8 cm,物体后面毛玻璃距离物体距离为 2 cm;实验中恢复的图像尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,重构图像时总共只采集了图像 4% 的频谱,由于获取一个频率值需要加载 4 张条纹图,所以,总共加载的图像数量为 11236 张。DMD 和数据采集卡由电脑同步控制,DMD 加载频率为 20 ms/frame,因此一次采集所用时间约为 4 min,实验中为了减小随机误差,对于加载的每张图片,采集卡都采集了 10 个数据,最后求平均。具体实验结果如图 3 所示。

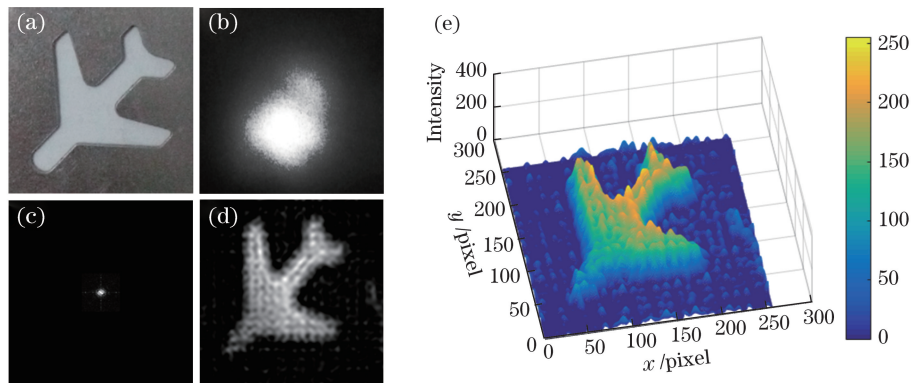


图 3 实验结果图

Fig. 3 Results of experiment

图 3 为实物拍摄结果,其中图 3(a)为实物图;图 3(b)为在毛玻璃后面使用传统相机拍摄的结果,可以看到一片散斑,像已经完全分辨不出来;图 3(c)为实验中采集数据所获得的频谱图,总共采集了 4% 的频谱;图 3(d)为根据频谱图进行快速傅里叶变换以后重建的图像;图 3(e)为图 3(d)的三维显示。从图 3(d)可以看出,虽然只采集到了 4% 的频谱,但是已经很好地恢复目标图像。但是从图 3(d)中可明显地发现重建的图像中存在较严重的噪声。

通过分析发现,上述噪声主要是由以下两个方面产生:1)由于 DMD 本身的性质——衍射效应,对图像产生了干扰;2)由于生成的条纹图是灰度的,但是 DMD 本身只能加载二值图像,所以在进行实验时对所加载的图像进行了二值化处理,引入了新的噪声。针对以上两个原因,对获得的频谱进行了分析,发现上述噪声在频谱中表现为周期性分布的亮点,在此基础上设计滤波器,如(6)式所示。

$$g(f_x, f_y) = \sum_{n=i}^N \delta(f_x + n\Delta f_x, f_y + n\Delta f_y), \quad (6)$$

式中 $\Delta f_x, \Delta f_y$ 根据频谱图中的亮点噪声间隔确定, N 由图像大小和间隔确定。应用滤波器 $g(f_x, f_y)$ 对所得频谱图中亮点噪声值进行了置零, 利用处理后的频谱重建的图像如图 4 所示。

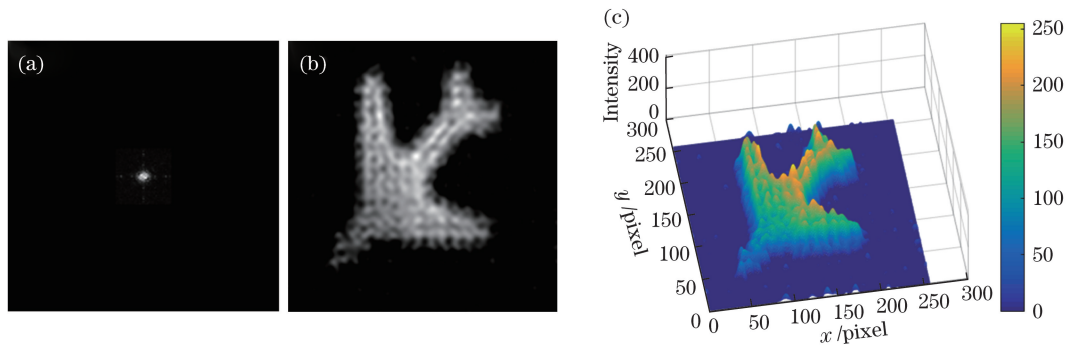


图 4 滤波后图像

Fig. 4 Images after filtering

图 4(a) 为滤波以后的频谱图, 图 4(b) 为滤波以后重建的图像, 图 4(c) 为重建图像的三维显示。通过与图 3 对比可以看出, 滤波后噪声干扰明显减弱, 图像质量显著提高。由于该方法成像条件是探测到光强的起伏, 所以, 探测器的精度对结果影响很大。而实验中所用的 OPT 芯片精度不是很高, 且本身存在较大的暗电流, 因此, 如果采用更灵敏且精度更高的芯片来进行实验, 那么重建出来的图像将会具有更高的信噪比。

4 结 论

在分析散射介质中光子传播特性的基础上, 提出了一种对散射介质中物体进行单像素成像的方法, 设计并搭建了基于 DMD 和单点探测器的单像素成像系统。通过对 DMD 加载一系列具有不同相位的条纹图案, 结合图像恢复算法, 实现了对位于双层毛玻璃之间物体的成像。通过分析噪声的来源, 设计滤波器对所拍摄的物体图像进行滤波处理, 使图像质量得到显著提高。与传统散射介质成像系统相比, 该系统结构简单, 成像效果好, 在多个领域具有应用前景。而对于噪声的分析可以看出, DMD 加载二值图会引入很强的噪声, 则可以选择能够加载灰度条纹图的器件来提高频谱采样的精度, 改进图像的质量, 同时, 可以提高加载图像的速率, 确保在采集同频率 4 幅条纹图的光强时环境没有发生明显改变, 既提高频谱数据的准确性, 也能同步改善图像质量。

参 考 文 献

- 1 Yodh A, Chance B. Spectroscopy and imaging with diffusing light[J]. *Physics Today*, 1995, 48(3): 34-40.
- 2 Gibson A P, Hebden J C, Arridge S R. Recent advances in diffuse optical imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2005, 50(4): R1-R43.
- 3 Wang L V, Wu H I, Masters B R. Biomedical optics: Principles and imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, 13(4): 049902.
- 4 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*, 2011, 31(12): 1214002.
- 5 Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 6 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, 36(10): 2498-2502.
- 7 Choi Y, Yang T D, Fang-Yen C, *et al.*. Overcoming the diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(2): 023902.
- 8 Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- 9 Zhang Y Z, Shi J H, Li H, *et al.*. Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent light[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(1): 011102.

- 10 Zhang Lei, Song Wenai, Yang Shunming. Review of ultrasonic scattering computed 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.
- 11 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.
- 12 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.*. Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0511004.
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0511004.
- 13 Wen Zhengbo, Wu Yulin, Zhang Xiuda, *et al.*. A real time imaging method for internal targets of strongly scattering media with high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211006.
文政博, 吴雨霖, 张秀达, 等. 强散射体内部目标的实时高分辨率成像方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211006.
- 14 Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, *et al.*. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature, 2012, 491(7423): 232-234.
- 15 Durán V, Soldevila F, Irlés E, *et al.*. Compressive imaging in scattering media[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14424-14433.
- 16 Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6225.
- 17 Feng S, Kane C, Lee P A, *et al.*. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media [J]. Physical Review Letters, 1988, 61(7): 834-837.
- 18 Freund I, Rosenbluh M, Feng S. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(20): 2328-2331.
- 19 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): 549-553.