

光学学报

累加平均提升点扩散函数信噪比实现 透过散射介质三维成像

李元铖¹, 翟爱平^{1*}, 张腾¹, 赵文静¹, 王东^{1,2}

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 光学三维成像在医学诊断、空间遥感、人工智能等领域具有广泛且重要的应用。然而,在散射环境中,入射光的波前相位会发生严重畸变,导致传统光学三维成像性能劣化,甚至失效。目前,研究透过散射介质成像大多使用的是昂贵的科研相机。为了降低成本,本团队提出了一种采用普通工业相机进行数据采集的透过散射介质的三维成像方法。针对普通工业相机采集的低信噪比图像,本文对代表成像系统点扩散函数的点光源散斑进行多次累加平均,获得了可与科研相机媲美的高信噪比点扩散函数;然后,将该点扩散函数与单次曝光获得的结构光散斑进行反卷积运算,得到受物体面形调制的变形条纹;最后,基于傅里叶变换轮廓术恢复物体的三维信息。实验结果表明,该方法可以获得与科研相机媲美的成像效果,为透过散射介质的三维成像提供了一种可行的低成本方案。

关键词 成像系统; 三维成像; 散射成像; 结构光照明; 累加平均

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1411002

Three-Dimensional Imaging Through Scattering Media by Improving Signal-to-Noise Ratio of Point Spread Function Using Cumulative Average

Li Yuancheng¹, Zhai Aiping^{1*}, Zhang Teng¹, Zhao Wenjing¹, Wang Dong^{1,2}

¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract Optical three-dimensional (3D) imaging has been widely applied in fields such as medical diagnosis, remote sensing, and artificial intelligence. However, in the scattering environment, the wavefront phase of incident light is severely disturbed, which results in deteriorated performance or even failure of traditional optical 3D imaging. Moreover, the studies of imaging through scattering media mainly use expensive scientific cameras for data acquisition. Therefore, we propose a low-cost 3D imaging method through scattering media based on a common industrial camera for data acquisition. To improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the images collected by the common industrial camera, we conduct multiple rounds of accumulative averages on the point light source speckles representing point spread function of the proposed imaging system to obtain a point spread function with an SNR as high as that by scientific cameras. Then, the deconvolution of the point spread function with the structured light speckle obtained by a single exposure is carried out to produce the deformed fringe pattern modulated by the object shape. Finally, the 3D information of the object is recovered by Fourier transform profilometry. The experimental results indicate that the proposed method can achieve an imaging effect comparable to that by scientific cameras, which provides a feasible and low-cost solution for 3D imaging through scattering media.

Key words imaging systems; three-dimensional imaging; scattering imaging; structured light illumination; cumulative average

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-01-30; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 山西省自然科学基金(20210302123169)、山西省回国留学人员科研资助项目(SSCC2021)

通信作者: *zhaiaiping@tyut.edu.cn

1 引言

传统光学成像过程遵循“可见即可得”的原则。然而,当光经过雾霾、云层、生物组织以及浑浊液体等散射介质时,光子在散射介质中与波长量级的粒子发生多次碰撞^[1],导致原本有序的光波前相位发生严重畸变,出射光场变得随机且紊乱,最终在观测面上只能接收到散斑图案,难以实现对目标的监测或成像。因此,散射效应成为制约透过散射介质成像技术发展的瓶颈和关键。与此同时,透过散射介质成像技术在光学显微^[2]、天文观测、航天探测、生物医学^[3-4]等领域具有重要的应用价值。为了消除散射效应对成像效果的影响,在利用散射光成像方面,国内外学者提出了许多散射成像技术,主要包括基于优化迭代的波前反馈调节技术^[5-7]、光学相位共轭法^[8-11]、传输矩阵测量法^[12-15]、基于光学记忆效应的散射成像技术^[16-17]。其中,基于光学记忆效应的散射成像利用的是散斑的平移不变性,即,轻微调整入射角度,所得散斑与之前的散斑有很强的相关性,也就是说散斑的强度分布不会发生明显变化。散斑自相关^[18-25]或散斑解卷积运算不仅可以实现二维目标的单次曝光快速成像,而且在透过散射介质快速三维成像方面具有重要的研究价值。基于光学记忆效应,研究人员已经对散射成像系统中沿光轴纵向排布的多个二维目标的同时成像展开了研究^[26-30]。2017年,南京航空航天大学的刘友文教授^[31]基于双目视差理论和散斑相关技术,实现了纵向不同位置处两个二维目标的重建。2019年,Horisaki研究小组^[32]利用散斑的三维(3D)自相关特性和三维相位恢复算法,通过多次轴向扫描实现了非侵入“三维”成像;同时,他们认为将单帧散斑进行数次缩放来代替轴向扫描,再结合三维相位恢复算法即可实现单次曝光“三维”成像^[33]。2020年,西安电子科技大学邵晓鹏教授带领的团队^[34]利用空间不同位置多个物体所对应的散斑的去相关特性,在超出三维光学记忆效应范围的情况下,实现了横向和纵向位置都不同的三个二维目标的同时成像,为光学记忆效应在透过散射介质的大视场三维成像奠定了基础。本课题组前期采用面结构光照明,实现了透过散射介质对面形连续分布的三维物体的三维成像^[35]。以上这些研究成果都为透过散射介质的三维成像打开了崭新的局面。

散斑自相关成像法和散斑解卷积成像法^[19,36]的核心在于对散斑能量的利用,根据散斑的分布特点实现透过散射介质成像及相关工作。其中的散斑解卷积成像法利用散斑在空间上的退相关特性,实现透过散射的大视场、多光谱成像^[37-38]以及三维成像。由于该方法具有成像质量高、计算速度快等优势,因而得到了众多研究人员的关注。目前,透过散射介质的三维成像需要使用专业的科研相机来获取具有较高信噪比的散斑,成本较高^[35],不利于散射成像技术在实际应用中的推广。因此,利用低成本的普通工业相机实现透过散射介质的三维成像是十分必要的。

基于散射介质的光学记忆效应,本团队提出了一种采用非相干结构光照明的低成本的透过散射介质三维成像方法,该方法无须参考光束和序列扫描,其成像质量可与科研级相机相媲美。该方法首先利用累加平均获取高信噪比的点光源散斑,并将其作为成像系统的点扩散函数(PSF),然后通过维纳反卷积恢复受物体面形调制的条纹图案,接着采用傅里叶变换轮廓术(FTP)从条纹中获得截断相位,最后应用基于质量图导向的相位展开算法得到物体的三维相位信息。

2 原理

传统的三维结构光成像技术在投影正弦条纹至目标物体后,直接拍摄带有目标信息的变形条纹,然后采用相关算法即可重建目标的三维图像;然而,当目标物体和相机之间存在散射介质时,便无法直接获取变形条纹,传统的三维结构光成像技术完全失效。Zhai等^[35]通过维纳反卷积算法从散斑中高质量地恢复出了隐藏在散射介质后面的变形条纹,并利用傅里叶变换轮廓术实现了单目标、多目标和动态目标的单次曝光三维成像。实验中通常选用的是针对弱光环境的科研级相机,以采集散斑图像。该相机具有较高的动态范围、较高的量子转换效率以及较低的暗电流噪声,其缺点是价格昂贵,实际应用成本较高。为了降低成本,推动散射三维成像技术在实际环境中的应用,本研究尝试改用普通工业相机采集单帧点光源的散斑[如图1(a)所示],将其作为成像系统的PSF。为了获得三维物体的面形信息,将以上所得PSF分别与文献^[35]描述的物平面条纹、受物体面形调制的变形条纹对应的散斑作反卷积运算,得到图1(b)和图1(c)所示的结果。由图可见,物平面条纹和变形条纹的对比度较差,且均具有很高的噪声。利用该条纹恢复的物体的三维数据具有较大的形变,如图1(d)所示,难以分辨散射介质后面物体的形貌。

PSF描述了成像系统对一个点光源的响应,是评价成像系统性能的重要参数。在通过散斑解卷积运算恢复物体过程中,精确测量系统的PSF最为关键。为有效改善本文所采用的成像系统的PSF,对100帧点光源散斑作累加平均运算,得到图1(e)所示的系统PSF,其锐度相比单帧散斑的锐度更高。反卷积运算恢复的物平面条纹和物体面形调制条纹如图1(f)和图1(g)所示,可以看出条纹的对比度和信噪比大大提高。最后恢复的物体的三维信息如图1(h)所示,整体轮廓清晰,能很好恢复散射介质后面物体的三维信息。这是因为相机成像过程中的光子噪声、暗电流噪声和读出噪声的来源互不相关,对于既定的拍摄系统,读出噪声和暗电流噪声基本保持不变,累加平均可削弱散粒噪声,提高信噪比^[39-41]。

在弱光环境下,加性噪声占主导,此时相机采集图像的模式^[42]可以表示为

$$s(u, v) = s_0(u, v) + \eta(u, v), \quad (1)$$

式中: $s(u, v)$ 为相机实际采集的图像; $s_0(u, v)$ 表示不

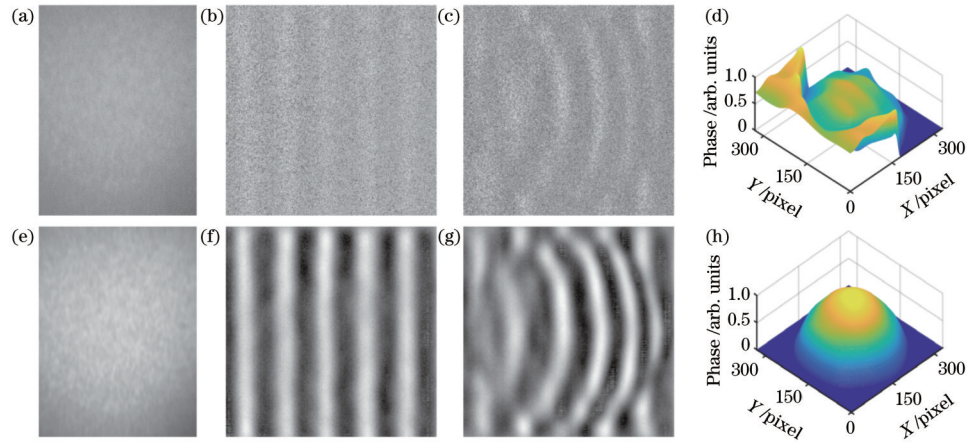


图 1 透过散射介质的成像结果。(a)单帧点光源散斑(作为成像系统的PSF);(b)重建的物平面条纹;(c)重建的受物体面形调制的变形条纹;(d)利用傅里叶变换轮廓术恢复的物体三维信息;(e)累加平均后的PSF;(f)(g)反卷积运算恢复的物平面条纹和物体面形调制条纹;(h)恢复的物体的三维信息

Fig. 1 Experimental results of imaging through scattering medium. (a) Single-frame point source speckle (regarding it as point spread function); (b) reconstructed fringes of object plane; (c) reconstructed deformation fringe modulated by surface shape of the object; (d) three-dimensional information of the object obtained by performing Fourier transform profilometry (FTP); (e) accumulated average point spread function (PSF) of system; (f)(g) recovered object plane fringes and surface shape fringes of the object by deconvolution operation; (h) recovered three-dimensional information of the object

含噪声的理想图像; $\eta(u, v)$ 为图像噪声。相机噪声是独立分布的,且均值为 $\mu(u, v)$,因而 $s(u, v)$ 的期望值为

$$E[s(u, v)] = s_0(u, v) + \mu(u, v), \quad (2)$$

式中: $E[\]$ 为求期望运算。累加平均个数为 M 时,输出的图像为

$$\bar{s}(u, v) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M s_i(u, v), \quad (3)$$

输出图像的方差为

$$\sigma^2(u, v) = \frac{1}{M} \sigma_{\eta}^2(u, v), \quad (4)$$

式中: $\sigma_{\eta}^2(u, v)$ 为原始单幅图像的方差。在透过散射介质成像过程中,累加平均 M 幅散斑的方差是单帧散斑方差的 $1/M$,因此,随着 M 增大,噪声的抑制作用增强,信噪比提高。

为进一步削弱噪声均值,投影一个纯黑图案代替点光源,即理想图像 $s_0(u, v)=0$,同样进行累加平均处理后得到背景散斑,然后将点光源散斑与背景散斑进行差分,得到近似无噪声的系统PSF。

3 实验与分析

本团队采用低成本工业相机对隐藏在散射介质后面的不同目标进行了成像实验,实验装置如图2所示。点光源和正弦条纹由计算机产生,它们通过DLP Lightcrafter 4500数字投影仪(分辨率 $912 \text{ pixel} \times 1140 \text{ pixel}$)投影到物平面,经反射后透过1500细砂的毛玻璃(LBTEK, DW120-1500),最后被分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ (像素大小为 $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$)的相机(IDS UI-3250-M-GL)捕获。本实验验证了在

$10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 视场范围内物体的三维成像。为了满在散射介质记忆效应范围内成像,即小角度转动入射光能够使散射层出射的散斑呈现线性平移不变的效果,将散射介质放置在到物平面距离 $u=230 \text{ mm}$ 的位置处,将相机放置在距散射介质 78 mm 处($v=78 \text{ mm}$),散射介质前的孔径光阑直径设置为 4.5 mm 。相机靶面、散射介质平面与物平面三者保持平行,其中心都位于物平面法线上,可在满足奈奎斯特采样定律的同时,使记忆效应范围内的反射光透过散射介质后尽可能聚焦于相机靶面上,充分利用靶面上的像元。

实验流程如图3所示,可分为以下4个步骤:

步骤1)系统的标定。本研究的系统标定过程与参考文献[35]中的宽带光装置1的标定过程相同,主要包括点光源大小的选择和系统物平面连续相位的获取。在实验过程中,点光源的曝光时间为相机的最大曝光时间 10 s ,相机在最大的曝光时间下连续无间隔地进行采集,拍摄了如图3(a)所示的100帧点光源散斑($\text{PSF}_1, \text{PSF}_2, \dots, \text{PSF}_{100}$)与背景散斑($\text{BG}_1, \text{BG}_2, \dots, \text{BG}_{100}$),对以上散斑分别进行累加平均,得到图3(b)所示的点光源散斑 PSF_CA100 和背景散斑 BG_CA100 ;最后进行差分处理,削弱暗电流噪声,得到了如图3(c)所示的散斑(作为系统PSF)。该过程只需执行一次即可对不同物体进行较高质量成像。由图3可见,累加平均运算后得到的散斑的锐度明显提高。

步骤2)物体散斑的采集。在已标定系统的成像范围内,将正弦条纹投影到固定于物平面的待成像物体上。为了消除正弦条纹图中的零频分量与高频噪声,投影一帧强度为正弦条纹平均灰度值的纯色图至该物体上,在相同的曝光时间(350 ms)下,进行一次采样,记录经物体调制后透过散射介质的变形条纹散斑

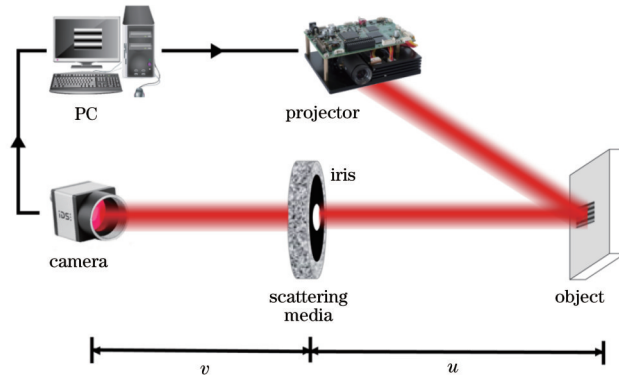


图 2 实验装置结构图

Fig. 2 Structural diagram of experimental setup

(DFS)和纯色图散斑(UGS),如图 3(d)所示。最后依次减去标定过程中获取的物平面背景散斑,得到移除背景的条纹散斑 B_DFS 和纯色图散斑 B_UGS,如图 3(e)所示。

步骤 3) 条纹恢复。将移除背景后的散斑分别与系统 PSF 作反卷积运算,获得如图 3(f)所示的变形条纹和纯色图,然后进行差分处理得到如图 3(g)所示的去

除基频的条纹。本文在反卷积之前已对散斑边缘进行模糊处理,抑制了物体散斑图案边界的光强值跳变,进而减弱了反卷积恢复图像中的振铃效应。

步骤 4) 三维形貌获取。采用傅里叶变换轮廓术^[43]从频域中提取基频,再进行傅里叶逆变换得到截断相位,最后基于质量图引导的洪水填充法展开截断相位,得到待测物体的连续相位图,如图 3(h)所示。

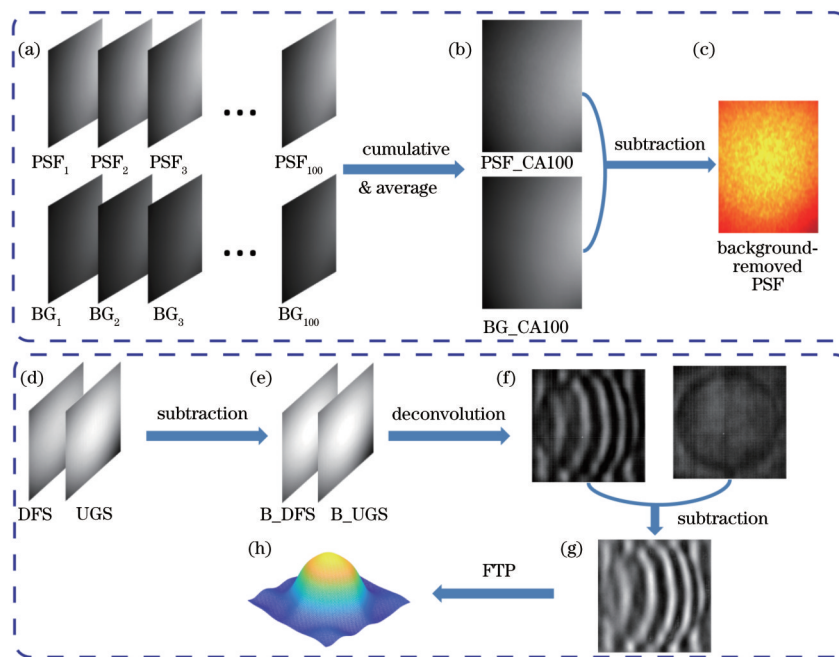


图 3 实验流程图。(a)多帧点光源散斑和背景散斑;(b)累加平均后的点光源散斑和背景散斑;(c)移除背景后的 PSF;(d)变形条纹和均匀灰度的散斑图;(e)移除背景后的散斑图;(f)重建的物体;(g)去掉零频的条纹;(h)物体的归一化相位

Fig. 3 Experimental flow chart. (a) Speckles of multiple point light sources and background; (b) speckles of point source and background after cumulative average; (c) background-removed PSF; (d) speckles of deformed fringe pattern and uniform grayscale pattern; (e) background-removed speckle patterns; (f) reconstructed object; (g) fringe removing zero-frequency; (h) normalized three-dimensional phase distribution

为了定量分析累加平均运算次数对成像结果的影响,本文分别对不同时刻采集到的不同帧点光源散斑进行累加平均运算,将其作为系统的 PSF,然后利用所得 PSF 重建目标图像。计算这些重建目标图像与 100 帧散斑作累加平均运算得到的系统 PSF 重建的目标图像之间的峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似度

(SSIM),计算结果如图 4 所示。图 4(a)是不同累加平均次数下恢复条纹的峰值信噪比,图 4(b)是恢复条纹的结构相似度。少量次数的累加平均即可大幅度抑制噪声,提高重建图像的质量;随着累加平均散斑的数量增多,反卷积运算后恢复的条纹的峰值信噪比和结构相似度明显提高,但随着累加平均散斑数量的进一步

增加,SSIM的增速变缓。即,若想进一步提升结构相似度,需要大量次数的累加平均运算。这与式(4)所示的理论分析结论一致。当点光源散斑累加平均次数接近参考图像所使用的次数时,峰值信噪比曲线出现陡

变,说明大量的累加次数使得重建图像的噪声方差变小,两者的均方误差更小,进一步验证了本文方法的有效性。因此,多次累加平均散斑可以有效提高点光源散斑的信噪比,进而有助于恢复高质量条纹。

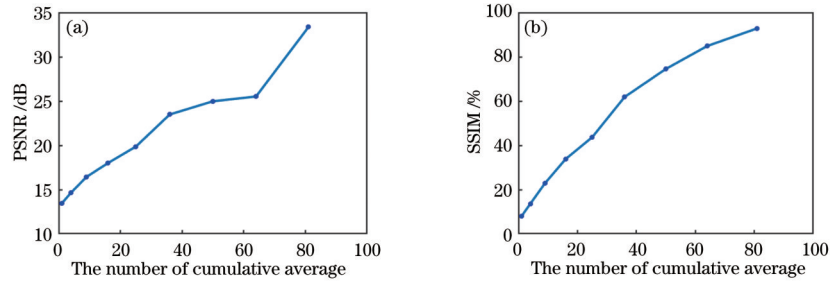


图 4 不同累加平均次数下恢复条纹的峰值信噪比和结构相似度。(a)峰值信噪比;(b)结构相似度

Fig. 4 Peak signal-to-noise (PSNR) and structural similarity (SSIM) of retrieved fringe under different cumulative averages. (a) PSNR; (b) SSIM

本文分别选择一段长约 6 mm 的杜邦线和直径约 2 mm 的半球作为测试目标,如图 5(a)和图 5(e)所示。将倾斜角度为 30° 的条纹投影至待成像物体上,发生形变的条纹透过散射介质后形成散斑并被相机捕获,如图 5(b)和图 5(f)所示,将散斑分别与系统 PSF 作反卷积运算得到如图 5(c)和图 5(g)所示的清晰的变形条纹图案,物体面形调制引起的条纹形变明显且没有断裂、缺失现象。采用傅里叶变换轮廓术对条纹区域进行处理得到相位主值,然后基于质量图引导的洪水填充算法得到物体的归一化连续相位,如图 5(d)和图 5(h)所示。杜邦线重建图像的相位信息整体与面形相

符,半球的连续相位和物体的真实面形基本一致。实验结果验证了低成本相机通过本文所提方法可以透过散射介质实现单个物体的三维成像。本文方法的不足之处是,傅里叶变换轮廓术的滤波处理导致体现物体细节的高频部分丢失,对于非对称三维物体——杜邦线来说,其边缘细节处的相位比较模糊。傅里叶变换轮廓术对不对称物体投影不同角度的条纹,这会对成像效果有一定影响^[44]。同时,在不同条纹的频域下,成像效果同样也会有较大区别^[45]。后期本团队拟通过优化滤波函数来进一步改善成像效果。

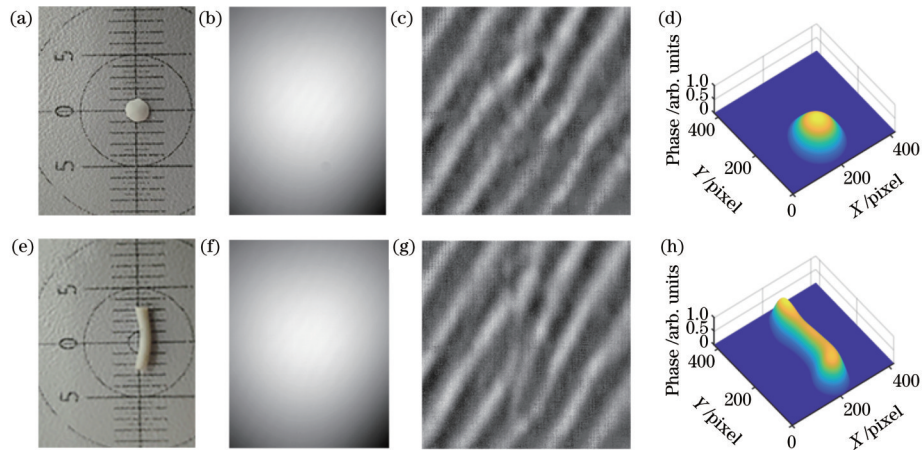


图 5 目标三维重建。(a)待测半球;(b)变形条纹的散斑图;(c)反卷积恢复的变形条纹;(d)采用傅里叶变换轮廓术恢复的半球的三维信息;(e)待测杜邦线;(f)变形条纹的散斑图;(g)反卷积恢复的变形条纹;(h)采用傅里叶变换轮廓术恢复的杜邦线的三维信息

Fig. 5 Three-dimensional reconstruction of objects. (a) A hemisphere to be imaged; (b) speckle pattern of deformed fringe; (c) deformed fringe pattern retrieved from deconvolution; (d) three-dimensional information of the hemisphere obtained by performing FTP; (e) DuPont line to be imaged; (f) speckle pattern of deformed fringe; (g) deformed fringe pattern retrieved from deconvolution; (h) three-dimensional information of DuPont line obtained by performing FTP

可见,实验结果与理论分析基本一致。与普通工业相机采集单帧点光源散斑作为系统 PSF 相比,多帧点光源散斑累加平均获得的系统 PSF 的信噪比更高,可以很好地重建被散射介质扰乱的图像光场。利用该

PSF 重建的变形条纹可以更好地恢复散射介质后面物体的三维面形,恢复的效果可以与科研相机相媲美。综上,将低成本、性能受限的相机应用于透过散射介质成像时,可以通过多次累加平均运算来提高成像系统

PSF 的信噪比,进而取得更好的三维重建结果。

4 讨 论

在装置搭建过程中,根据预计视场的大小与散射介质的记忆范围,需要调整散射介质到目标的距离,以获得清晰的像。若距离过远,反射的点光源信号强度衰减就会变大,导致相机采集的图像的信噪比降低,成像质量变差。通过累加平均多幅点光源散斑的方法能够提高成像质量,因此,本文所提方法也能够在一定程度上改善距离对成像质量的影响。

实验中,半球和杜邦线相位重建效果较好,整体相位与物体的面形基本一致,实现了透过散射介质的三维成像。为了获取散射介质后面物体的三维信息,本文采用了傅里叶变换轮廓术,相比需要采集多帧条纹且对条纹正弦性要求更高的相移法,该方法的成像速度更快,并且在滤波过程中降低了噪声,保证了高重建质量,但是由于牺牲了部分高频细节,形状不规则的杜邦线边缘处的三维信息略微模糊。在静态散射介质中,用 N 步相移法代替傅里叶变换轮廓术,可以以牺牲一定的成像时间为代价来换取更高的成像质量。如何在降低成本的同时进一步提高成像质量,是下一步的研究重点。

5 结 论

本文提出了一种采用普通工业相机进行数据采集的透过散射介质的三维成像方法,该方法通过对多帧点光源散斑进行累加平均运算来提高系统 PSF 的信噪比,实现了利用低成本相机透过散射介质对物体的三维成像。与昂贵的科研相机相比,本文所采用的普通工业相机虽然动态范围窄、量子转换效率低、暗电流噪声高、采集图像的信噪比低,但是通过累加平均的方法可以获得信噪比可观的系统 PSF,使得透过散射介质的三维成像质量接近科研相机的成像效果。对于给定的成像系统,只需要一次标定,便可以在记忆效应范围内,透过散射介质对不同的物体进行三维成像。该方法为透过散射介质的低成本三维成像提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [2] Liu C, Chen J B, Zhang Y C, et al. Five-wavelength optical-resolution photoacoustic microscopy of blood and lymphatic vessels[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(1): 016002.
- [3] Lim J, Ayoub A B, Psaltis D. Three-dimensional tomography of red blood cells using deep learning[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(2): 026001.
- [4] Hugonnet H, Kim Y W, Lee M, et al. Multiscale label-free volumetric holographic histopathology of thick-tissue slides with subcellular resolution[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 026004.

- [5] 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.
- [6] Horstmeyer R, Ruan H, Yang C. Guidestar-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(9): 563-571.
- [7] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [8] Xu X, Liu H, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 154-157.
- [9] 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: 928.
- [10] Liu Y, Lai P, Ma C, et al. Optical focusing deep inside dynamic scattering media with near-infrared time-reversed ultrasonically encoded (TRUE) light[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5904.
- [11] Zhu T F, Huang J Y, Ruan Z C. Optical phase mining by adjustable spatial differentiator[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 016001.
- [12] Gianani I, Suprano A, Giordani T, et al. Transmission of vector vortex beams in dispersive media[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036003.
- [13] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [14] Chaigne T, Katz O, Boccara A C, et al. Controlling light in scattering media non-invasively using the photoacoustic transmission matrix[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(1): 58-64.
- [15] Andreoli D, Volpe G, Popoff S, et al. Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10347.
- [16] 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.
- [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] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [19] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 784-790.
- [20] Guo C F, Liu J T, Wu T F, et al. Tracking moving targets behind a scattering medium via speckle correlation [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 905-913.
- [21] Cua M, Zhou E H, Yang C. Imaging moving targets

- through scattering media[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3935-3945.
- [22] 谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004. Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.
- [23] 朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111005. Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111005.
- [24] Stern G, Katz O. Noninvasive focusing through scattering layers using speckle correlations[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 143-146.
- [25] Wang D, Sahoo S K, Zhu X, et al. Non-invasive super-resolution imaging through dynamic scattering media[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3150.
- [26] Ruan H W, Haber T, Liu Y, et al. Focusing light inside scattering media with magnetic-particle-guided wavefront shaping[J]. *Optica*, 2017, 4(11): 1337-1343.
- [27] 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: 4585.
- [28] Jin X, Wang Z P, Wang X Y, et al. Depth of field extended scattering imaging by light field estimation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4871-4874.
- [29] Salhov O, Weinberg G, Katz O. Depth-resolved speckle-correlations imaging through scattering layers via coherence gating[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5528-5531.
- [30] Mukherjee S, Vijayakumar A, Kumar M, et al. 3D imaging through scatterers with interferenceless optical system[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1134.
- [31] Shi Y Y, Liu Y W, Wang J M, et al. Non-invasive depth-resolved imaging through scattering layers via speckle correlations and parallax[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(23): 231101.
- [32] Okamoto Y, Horisaki R, Tanida J. Noninvasive three-dimensional imaging through scattering media by three-dimensional speckle correlation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2526-2529.
- [33] Horisaki R, Okamoto Y, Tanida J. Single-shot noninvasive three-dimensional imaging through scattering media[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(16): 4032-4035.
- [34] Li W, Liu J T, He S F, et al. Multitarget imaging through scattering media beyond the 3D optical memory effect[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2692-2695.
- [35] Zhai A P, Li Y C, Zhao W J, et al. Single-shot fast 3D imaging through scattering media using structured illumination[EB/OL]. (2021-10-23)[2022-01-02]. <https://arxiv.org/abs/2110.12103>.
- [36] Edrei E, Scarcelli G. Memory-effect based deconvolution microscopy for super-resolution imaging through scattering media[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33558.
- [37] Park H, Crozier K B. Multispectral imaging with vertical silicon nanowires[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2460.
- [38] Stewart J W, Akselrod G M, Smith D R, et al. Toward multispectral imaging with colloidal metasurface pixels [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(6): 1602971.
- [39] Murphy D B. *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*[M]. Singapore: John Wiley & Sons, 2002: 448-452.
- [40] Martinec E. Noise, dynamic range and bit depth in digital SLRs[EB/OL]. (2008-05-22) [2022-01-01]. <https://homes.psd.uchicago.edu/~ejmartin/pix/20d/tests/noise/>.
- [41] Healey G E, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(3): 267-276.
- [42] Buades A, Lou Y, Morel J, et al. Multi image noise estimation and denoising[EB/OL]. (2010-08-22) [2022-01-01]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00510866>.
- [43] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [44] Wang Y J, Zhang S. Optimal fringe angle selection for digital fringe projection technique[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29): 7094-7098.
- [45] Chen L C, Ho H W, Nguyen X L. Fourier transform profilometry (FTP) using an innovative band-pass filter for accurate 3-D surface reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 182-190.