

# 透过散射介质对运动物体的成像与追踪

韩伟, 张也, 辛煜\*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 由于散射介质的强散射作用,传统光学成像系统无法对散射介质后的物体进行成像与运动追踪。针对这一问题,提出了一种透过散射介质对运动物体进行追踪与重建的方法。基于散射介质的光学记忆效应理论,通过先验信息解算散射成像系统的点扩展函数,利用点扩展函数的轴向缩放关系确定轴向位移,利用重建物体的互相关确定横向偏移。基于此方法搭建的实验系统也很好实现了散射介质后物体的快速重建与运动追踪。所提方法仅需采集移位物体的连续散斑图像即可追踪物体位移,无需特定装置且效果优异,有利于透过散射介质成像在生物医学领域的应用。

**关键词** 成像系统; 透过散射介质成像; 运动目标追踪; 反卷积; 点扩展函数

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1211001

## Imaging and Tracking Moving Objects Through Scattering Medium

Han Wei, Zhang Ye, Xin Yu\*

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** Because of the strong scattering effect of scattering media, the traditional optical imaging systems cannot be used to image and track objects behind these media. To address this problem, this paper proposes a method for tracking and reconstructing the moving objects behind a scattering medium. Based on the theory of optical memory effect of scattering media, the point spread function of a scattering imaging system is solved using prior information. The axial scaling relationship of this point spread function is used to determine the axial displacement and the cross-correlation of the reconstructed moving objects is used to determine the lateral offset. An experimental system based on the proposed method also achieve the fast reconstruction and motion tracking of an object behind the scattering medium. The proposed method can track object displacement by collecting only continuous speckle images of the displaced object. Thus, this approach does not require specific devices but provides excellent results, which is helpful in the application of imaging moving objects through scattering media in the field of biomedicine.

**Key words** imaging systems; imaging through scattering medium; moving object tracking; deconvolution; point spread function

**OCIS codes** 110.0113; 100.1830; 100.4999

## 1 引 言

光学成像是一种人类收集宏观和微观世界信息的重要手段,传统光学成像系统遵循着“所见即所得”的成像规律对被观测物体进行成像。但是,当光束经过雾气、浊水、毛玻璃等强散射介质时,散射介质中细小的微粒(波长量级)会扰乱入射光的波前,从而形成无序的出射光场,最终在像面上接收到随机的散斑图像<sup>[1]</sup>。因此,传统光学成像系统无法实

现透过强散射介质的成像。

近年来,随着计算机技术和图像处理技术的发展,计算成像技术在解决透过散射介质成像的问题上脱颖而出。经过各国科学家的不懈努力,目前透过散射介质成像技术主要发展为波前整形与基于光学记忆效应(ME)的散射成像技术<sup>[2-3]</sup>。波前整形分为光学相位共轭、反馈调节及光学传输矩阵三个方面。该项技术主要研究光束在介质中的传播特性及散射光场的操控,使用相位共轭的方法,利用导星辅

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-02-22; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(61107011,61675098)

\* E-mail: yxin@njjust.edu.cn

助可以实现透过散射介质的光束聚焦<sup>[4-8]</sup>,通过测量散射介质的传输矩阵,可以实现对出射光场的操控<sup>[9]</sup>。基于光学记忆效应的散射成像技术主要分为散斑自相关技术和点扩展函数(PSF)技术,该项技术利用散斑的自相关特性可以实现未知物体的高分辨成像<sup>[10-12]</sup>,利用精心设计的光学系统采集系统点扩展函数之后,再配合压缩感知算法能实现三维(3D)成像<sup>[13]</sup>,也可直接进行大视场的高速成像<sup>[14]</sup>。然而基于光学记忆效应的技术受限于光学记忆效应的范围,同时需要提前测量成像系统的点扩展函数,因此不利于透过散射介质成像的应用。

在透过散射介质对运动物体进行追踪的研究方面,研究人员提出两种方法:第一种方法,使用飞秒脉冲激光照亮物体,用单光子雪崩二极管相机接收被隐藏物体散射返回的信号<sup>[15]</sup>,但这种方法严重受制于成像环境中环境光的强弱;第二种方法,结合散斑自相关技术,当物体移动后,从散斑中计算物体的自相关来跟踪物体的运动情况<sup>[16]</sup>,该方法的缺陷在于不能精确重建移动后的物体,且严重受制于系统光源,对成像系统要求较为苛刻,实用性不大。

本文提出一种透过散射介质对运动物体进行跟踪与成像的方法,该方法无需测量散射成像系统的点扩展函数,且成像效果优异,能在追踪物体的同时清晰重建物体。在薄散射介质中,由于光学记忆效应的存在,可将记忆效应范围内的散射成像系统视作拥有移位不变点扩展函数的线性成像系统。基于

薄散射体的光学记忆效应,将运动物体的结构作为已知初始信息,解算散射成像系统的点扩展函数,并对解算的点扩展函数进行变换以计算物体的轴向位移,对重建的物体与中心位置处的原始物体进行互相关运算以计算横向位移。所提方法无需复杂的光路,重建物体的速度快且精度高,为透过散射介质成像技术拓展了应用范围。

## 2 基本原理

### 2.1 在轴向追踪物体

当散射介质被引入到成像系统中后,物面上的点会在像面上产生对应的散斑图像。Feng等<sup>[17]</sup>在计算散射介质传输系数的关联函数时发现:当散射介质的入射光转动一个小角度时,其出射光随之转动相同的角度。这种现象被称为光学记忆效应。随后 Freund等<sup>[18]</sup>在实验上验证了这一结论。当光束偏转一个小角度 $\delta\theta$ 时,偏转前后两幅散斑图的相关函数的表达式为

$$C(qL) = [qL / \sinh(qL)]^2, \quad (1)$$

式中: $q = 2\pi\delta\theta/\lambda$ , $\lambda$ 为入射光波长; $L$ 为散射介质的厚度。可见,记忆效应的范围与散射介质的厚度呈反比关系,最大角度约为 $\lambda/2\pi L$ 。由于散射介质光学记忆效应的存在,可在单个记忆效应范围内的散射介质的成像系统视作一个线性空间移不变的光学成像系统,并且用点扩展函数来描述一定范围内的散斑性质。此时成像系统的点扩展函数不再是艾里斑分布,而是空间弥散的散斑分布。

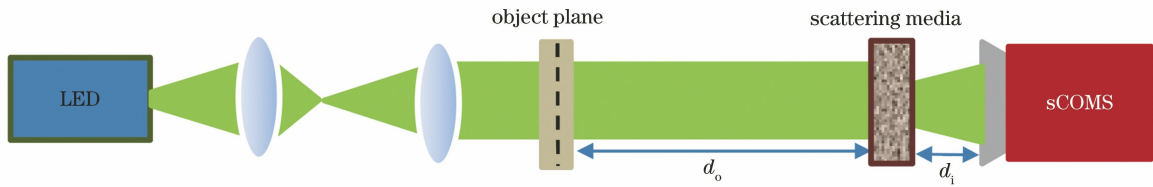


图1 典型的散射成像系统

Fig. 1 Typical scattering imaging system

图1为一个典型的散射成像系统,经过准直的非相干光束照射在物体上,随后光束穿过散射介质,散射介质对光束的波前进行了随机相位调制,最后探测器在像面上接收到了散斑图像,其中 $d_o$ 为物距, $d_i$ 为像距。对于这种非相干照明的成像系统,像面上的图案可以视为物面上所有点产生的随机图案的叠加。探测器接收到的光场的强度分布<sup>[19]</sup>可表示为

$$I = O * F_{\text{PSF}}, \quad (2)$$

式中: $I$ 为像面的光场强度分布; $O$ 为物面的光场强

度分布; $F_{\text{PSF}}$ 为散射成像系统的点扩展函数; $*$ 为卷积操作。从(2)式可以看出,在已知像面和物面的光场强度分布的情况下,可以通过Wiener反卷积算法<sup>[20]</sup>解出 $F_{\text{PSF}}$ ,即

$$F_{\text{PSF}} = F^{-1} \left\{ \frac{F\{O\}^*}{|F\{O\}|^2 + R_{\text{SN}}^{-1}} F\{I\} \right\}, \quad (3)$$

式中: $F\{\cdot\}$ 为傅里叶变换; $F\{\cdot\}^*$ 为傅里叶变换后取共轭; $F^{-1}\{\cdot\}$ 为傅里叶逆变换; $R_{\text{SN}}$ 为信噪比。因此可通过已知物体将已知物体在轴向位置处的PSF解算出来。

### 2.1.1 轴向 PSF 缩放关系

在散射成像系统中,散射介质对入射光的波前进行了随机的相位调制,因此,可将散射介质视为一个随机相位掩模(TM)<sup>[21]</sup>,此时像面的光场分布<sup>[22]</sup>可表示为

$$h(x_i, y_i; x_o, y_o) = Fr\{T_M \cdot Fr\{\delta(x_o, y_o)\}_{d_o}\}_{d_i}, \quad (4)$$

式中:  $Fr\{\cdot\}_{d_o}$  为物面到散射介质的菲涅耳衍射;  $Fr\{\cdot\}_{d_i}$  为散射介质到像面的菲涅耳衍射;  $(x_o, y_o)$  为物面坐标;  $(x_i, y_i)$  为像面坐标;  $\delta(\cdot)$  为点扩展函数的数学表示;  $T_M$  为随机相位掩模。此时非相干照明情况下的 PSF 的光强可以用光场的模的平方来表示,即

$$F_{\text{PSF}}(x_i, y_i; x_o, y_o) = |h(x_i, y_i; x_o, y_o)|^2. \quad (5)$$

根据自相关原理,可以用傅里叶变换的形式将(5)式写成

$$F_{\text{PSF}}(x_i, y_i; x_o, y_o) = F\{F_a^{-1}\{A(\alpha, \beta)\}_{\alpha \rightarrow \frac{x_s}{2\lambda f}, \beta \rightarrow \frac{y_s}{2\lambda f}}\}_{x_s \rightarrow \frac{x_i}{\lambda d_i}, y_s \rightarrow \frac{y_i}{\lambda d_i}}, \quad (6)$$

式中:  $A(\alpha, \beta) = \sqrt{1/4\lambda f} \times e^{-\frac{ik_1}{8f}(a^2 + \beta^2)} \times [T_M(\alpha, \beta) \cdot T_M(\alpha - x_s, \beta - y_s)]$ ,  $(x_s, y_s)$  为散射介质坐标;  $f$  为散射成像系统的焦距,  $k_1$  为波数。

当物距变为  $d'_o$  时, PSF 变为

$$F'_{\text{PSF}}(x_i, y_i) = F\{F_a^{-1}\{A(\alpha, \beta)\}_{\alpha \rightarrow \frac{x_s}{2\lambda f}, \beta \rightarrow \frac{y_s}{2\lambda f}}\}_{x_s \rightarrow \frac{x_i}{\lambda d'_i}, y_s \rightarrow \frac{y_i}{\lambda d'_i}}, \quad (7)$$

可以看出,  $F_{\text{PSF}}$  与  $F'_{\text{PSF}}$  的变化只是变换变量上的比例变化,即

$$F'_{\text{PSF}}(x_i, y_i) = m^2 F_{\text{PSF}}(mx_i, my_i), \quad (8)$$

式中:  $m$  为缩放的比例因子,  $m = f/f'$ 。

### 2.1.2 位置追踪

当物体从已知轴向深度处移动到未知轴向深度处之后,通过用已知物体解算出系统在已知轴向深度处的 PSF,并对 PSF 进行缩放,用不同比例的 PSF 对未知轴向深度处采集的散斑图进行重建,并用结构相似性(SSIM)对重建图像与原图像进行评价。SSIM 公式为

$$S_{\text{SIM}}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (9)$$

式中:  $\mu_x$  为  $x$  的平均值,  $\mu_y$  为  $y$  的平均值;  $\sigma_x^2$  为  $x$  的方差,  $\sigma_y^2$  为  $y$  的方差;  $\sigma_{xy}$  为  $x$  和  $y$  的协方差;  $c_1$  和  $c_2$  是用来维持稳定的常数。

记录下 SSIM 值最大时的缩放比例,即可计算

物体在光轴方向移动后的新轴向位置:

$$d'_o = \frac{d_o d_i}{m(d_o + d_i) - d_o}. \quad (10)$$

此时物体移动的距离为

$$\Delta d = |d_o - d'_o|. \quad (11)$$

从(8)~(12)式可以看出,通过已知物体解算出系统在已知轴向深度处的 PSF,即可通过轴向上不同深度位置处 PSF 的缩放比例关系,对物体移动后的位置进行确认,从而实现在光轴方向上对移动物体的追踪。

### 2.2 在横向追踪物体

在图 1 所示的散射成像系统中,当物体第  $k$  次横向移动后,保持物体移动的距离在单个记忆效应范围之内。假设  $O_k$  为第  $k$  次移位的物体在物面上的强度分布,  $I_k$  为其对应的散斑图像,  $F_{\text{PSF}, k-1}$  为第  $k-1$  次对应的 PSF,则将  $O_k$  从散斑图像中重建出来的公式为

$$O_k = \text{deconv}(I_k, F_{\text{PSF}, k-1}). \quad (12)$$

在第  $k+1$  次移位后物体已不在第  $k-1$  次对应的记忆效应范围内,则需对 PSF 进行更新以实现对横向移位物体的持续跟踪。第  $k+1$  次移位对应的 PSF 的表达式为

$$F_{\text{PSF}, k} = F^{-1}\left\{\frac{F\{O_k\}^*}{|F\{O_k\}|^2 + R_{\text{SN}}^{-1}}F\{I_k\}\right\}. \quad (13)$$

通过在跟踪过程中更新解算的 PSF,即可实现对横向移动物体的持续跟踪。重建的结果能真实反映物体的横向移动距离,对移位后的重建像与原位置像进行互相关运算即可准确跟踪物体在横向上的偏移。两幅图像  $I(x, y)$  和  $M(x, y)$  的互相关可以表示为

$$p(x, y) = \sum_{k=-m/2}^{m/2} \sum_{l=-n/2}^{n/2} [I(x+k, y+l)M(k, l)], \quad (14)$$

式中:  $m$  和  $n$  为跟踪图像的尺寸;  $(k, l)$  为位置;  $I(\cdot)$  和  $M(\cdot)$  分别为基准图像与跟踪图像在各自位置处的灰度值;  $p(x, y)$  为基准图像与跟踪图像计算出的互相关系数。计算出基准图像与跟踪图像的互相关后,对互相关与基准图像的自相关的最大值的偏移量进行比较,即可实现在平面上对物体偏移的跟踪。

用数值模拟来验证互相关跟踪横向物体偏移的能力。将字母“H”作为目标,图 2(a)为基准图片,“H”在中心位置;图 2(b)为偏移图片,“H”向右下偏

移,偏移量为向右偏移 26 pixel,向下偏移 39 pixel;图 2(c)为对基准图片作自相关;图 2(d)为基准图片与偏移图片的互相关;将自相关与互相关两幅图中的最大值所在行和列置于同一坐标系中,如图2(e)、

(f)所示。可以看出,互相关在水平方向偏移了 26 pixel,在竖直方向向下偏移了 39 pixel,与实际结果相同。

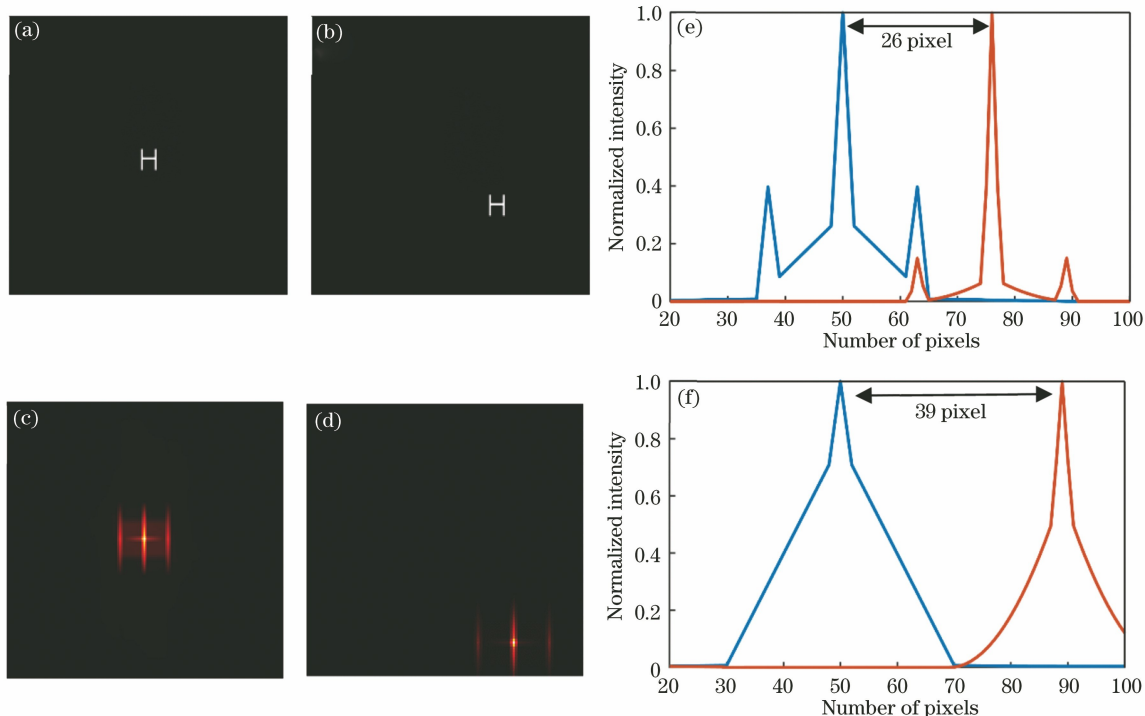


图 2 物体偏移模拟结果。(a)基准图像;(b)偏移图像;(c)自相关处理后的基准图像;(d)基准图像与偏移图像的互相关;(e)基准图像与偏移图像的水平偏移;(f)基准图像与偏移图像的竖直偏移

Fig. 2 Simulation results of object offset. (a) Reference image; (b) offset image; (c) reference image after autocorrelation; (d) cross-correlation between offset image and reference image; (e) horizontal offset between offset image and reference image; (f) vertical offset between offset image and reference image

### 3 实验结果

实验光路如图 3 所示,成像系统的照明光源为非相干的 LED 光源(GCI-060403,北京大恒光电技术公司),光束经两片透镜被准直扩束为平行光。成像系统中使用的散射介质是毛玻璃。探测器使用单

色科研级相机 sCMOS(CS2100M,索雷博光电科技上海有限公司),其放置在散射介质之后接收散斑图像。被测物体为用激光蚀刻的定制图案,尺寸为 0.8 mm。初始物距为 235 mm,像距为 120 mm。用滑轨控制物体在轴向上的运动,用夹具控制物体在横向上的移位。

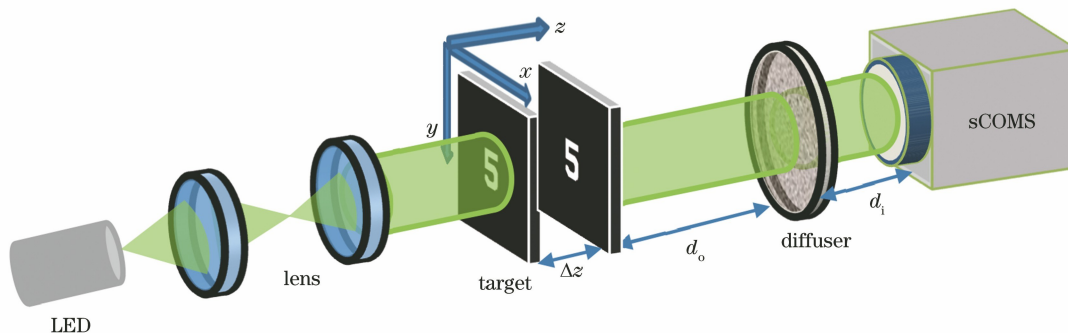


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

### 3.1 在轴向上追踪物体

首先采集物体在初始位置的散斑图像,保持像距不变,以 5 mm 的步长在轴向上将物体向远离散射体的方向移动。图 4(a)~(c)为探测器接收到的散斑图像,其物距分别为初始物距 235 mm、240 mm、255 mm。通过已知物体及初始轴向深度 235 mm 处采集的散斑图像,利用(3)式可解算出系统的 PSF。图 4(d)~(f)为用正确缩放比例缩放的 PSF 与散斑图像经反卷积后所得的重建像。假设图 4(b)、(c)所示的散斑图像物距未知,为了计算物体的移位,对使用不同缩放比例的 PSF 与移位后的

散斑图像进行反卷积运算,对重建结果与真实值进行结构相似性的比较,进而筛选出正确的缩放比例,并以此计算出物体的移位,其结果如图 4(g)、(h)所示。结构相似性值最高时对应的缩放比例为 0.991 与 0.973,从而可计算出移位距离为 241 mm 与 255.4 mm,在误差范围内与实验结果一致。表 1 列出了更多的实验结果,可以看出,实验中的计算结果与实际值存在一定偏差,而引起偏差的原因有两点,其一是使用的评价函数存在一定的优化空间,其二是实验中移位所用的仪器需手动操作,存在一定的操作误差,可通过升级仪器来提高系统精度。

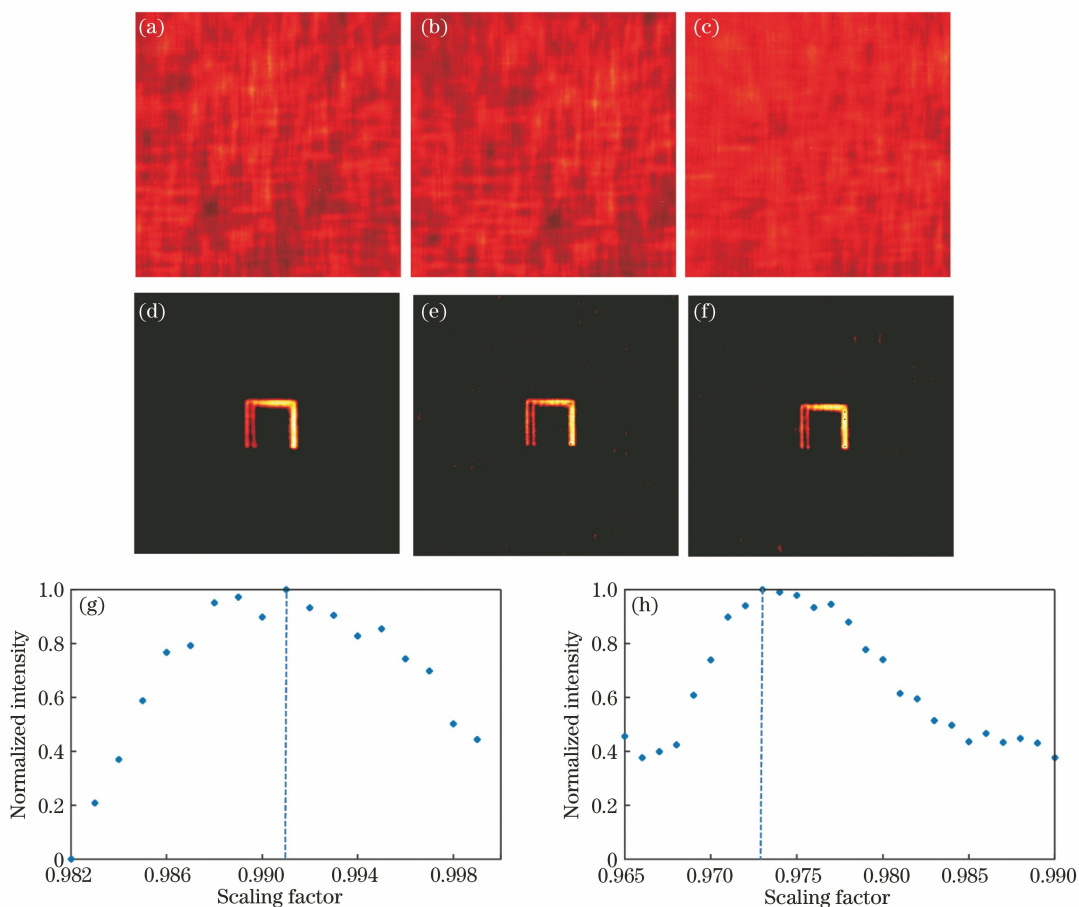


图 4 轴向物体追踪结果。(a)初始位置的散斑图像;(b)轴向深度 240 mm 处的散斑图像;(c)轴向深度 255 mm 处的散斑图像;(d)初始位置散斑图像的重建结果;(e) 240 mm 处的散斑图像的重建结果;(f) 255 mm 处的散斑图像的重建结果;(g)不同缩放比例 PSF 与 240 mm 处散斑重建的结构相似性;(h)不同缩放比例 PSF 与 255 mm 处散斑重建的结构相似性

Fig. 4 Results of axial object tracking. (a) Speckle pattern at initial position; (b) speckle pattern at axial depth of 240 mm; (c) speckle pattern at axial depth of 255 mm; (d) reconstruction result of speckle pattern at initial position; (e) reconstruction result of speckle pattern at depth of 240 mm; (f) reconstruction result of speckle pattern at depth of 255 mm; (g) structural similarity of PSF with different scales at 240 mm; (h) structural similarity of PSF with different scales at 255 mm

为了能够对物体进行持续跟踪,实验中测得单个 PSF 有效的缩放范围为前后 40 mm,当物体运动

至单个 PSF 有效范围边界时,将距边界 10 mm 处作为新的基准点,此时采集新的散斑图像,重新反演

出系统新的 PSF,用新 PSF 持续对轴向上的物体进行追踪。

表 1 轴向追踪结果

Table 1 Results of axial tracking

Axial shift distance / mm	Calculated correct scaling	Calculated distance / mm
5	0.991	6.0
10	0.987	9.4
15	0.981	13.9
20	0.973	20.4
25	0.967	24.5
30	0.961	30.6

### 3.2 在横向上追踪物体

横向追踪的实验与轴向实验相同,保持轴向距离和像距不变,仅在横向上移动物体。在横向移动的过程中,由于需要保持物体单次移动距离在单个记忆效应范围内,测量了实验中毛玻璃在物距为 235 mm 时的记忆效应范围。实验中在物面上放置一个大小为  $100\ \mu\text{m}$  的针孔并以  $0.2\ \text{mm}$  的步长平移针孔,同时采集对应的散斑图像,最后计算针孔位于中心位置时的散斑图像与中心位置左右两边散斑图像的相关系数,其结果如图 5 所示,拟合曲线的半

峰全宽为 15 个移位距离,计算可得记忆效应范围为 3 mm。考虑到物体尺寸为  $0.8\ \text{mm}$ ,因此单次位移需小于  $1.5\ \text{mm}$ 。

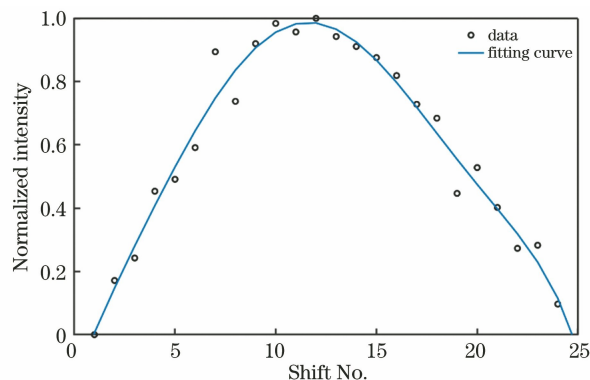


图 5 散射介质光学记忆效应范围

Fig. 5 Optical memory effect range of scattering medium

横向追踪实验中,保持物距 235 mm、像距 120 mm 不变,以  $0.5\ \text{mm}$  的步长在横向上移动物体。图 6(a)为采集到的横向位置序列散斑图像。利用已知的物体信息,计算出物体偏移距离后,用重建的移位物体与散斑图像更新系统的 PSF 以实现持续追踪,图 6(b)为持续更新的 PSF 序列。图 6(c)为对平面移位物体的持续跟踪重建效果,物体的初始位置在最右侧,物体从右向左移位的过程清晰可见。

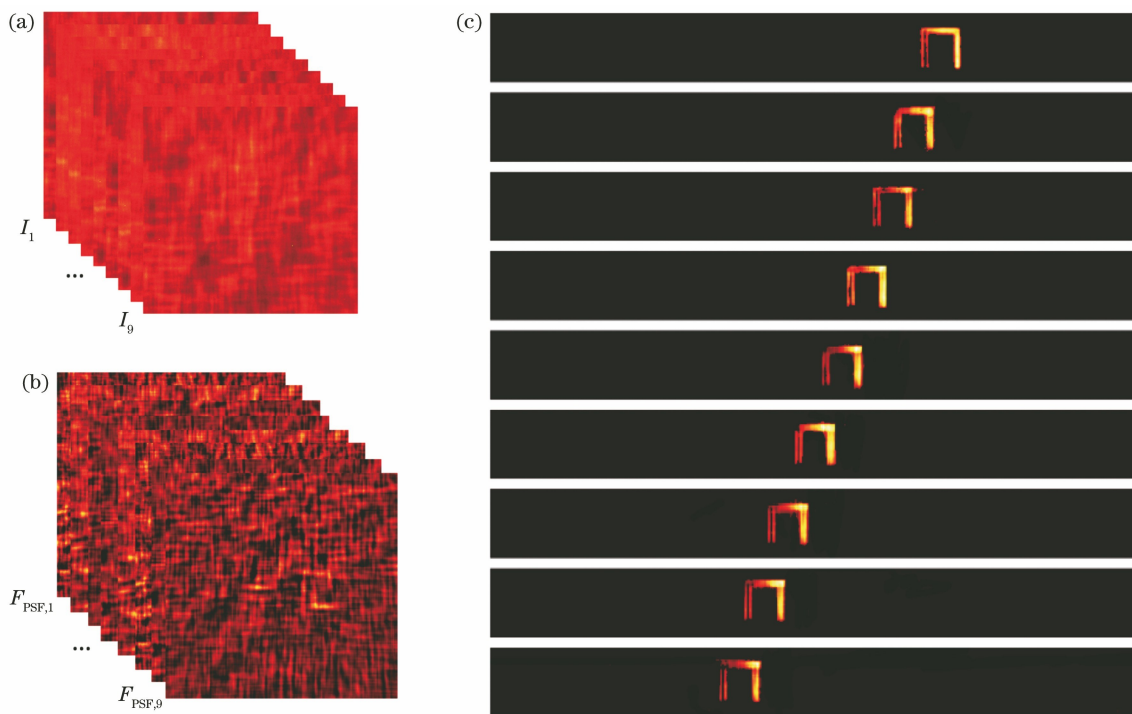


图 6 物体横向追踪结果图。(a)移位序列散斑图;(b)移位序列解算 PSF;(c)移位物体重建示意图

Fig. 6 Results of horizontal object tracking. (a) Speckle pattern of lateral shift; (b) PSF solved by lateral shift; (c) reconstruction of shifted objects

使用互相关法计算物体的实际偏移值,根据物距 235 mm,像距 120 mm,可算出成像系统放大率为 0.51,相机像素尺寸为  $5.04 \mu\text{m}$ 。图 7(a)为第 1 次偏移的计算结果,偏移值为 49 pixel,计算可得物体运动距离为 0.484 mm。图 7(b)为第 3 次偏移的

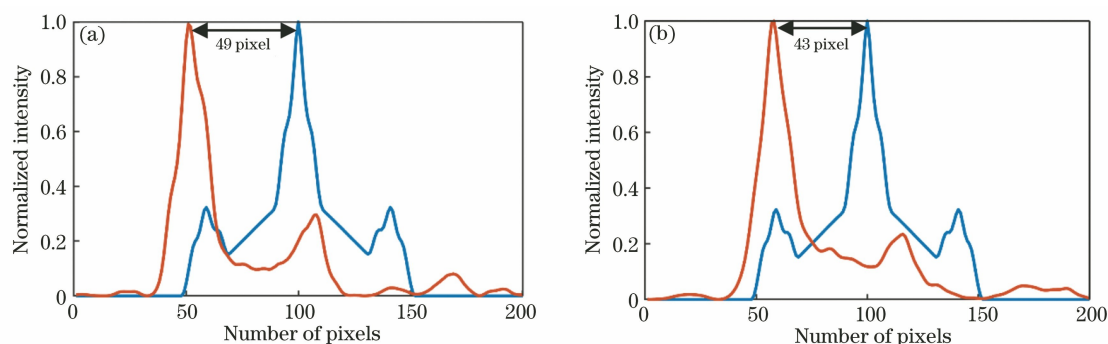


图 7 互相关计算横向偏移示意图。(a)第 1 次偏移;(b)第 3 次偏移

Fig. 7 Cross-correlation calculation of lateral offset. (a) The first offset; (b) the 3rd offset

表 2 横向追踪结果

Table 2 Results of horizontal tracking

Target shift distance / mm	Offset / pixel	Calculated distance / mm
0.5	49	0.484
0.5	51	0.504
0.5	43	0.425
0.5	47	0.464
0.5	40	0.395
0.5	36	0.356

从表 2 可知,第 1~4 次的结果中,实验误差保持在 7%以内,随着移位次数的增多,误差逐渐增大。引起误差增大的原因有两点,其一是实验中使用的移位仪器需手动操作,存在一定的操作误差;其二是算法需要不断更新 PSF,因此存在累积误差的可能性。后续的重复实验结果亦佐证了这一现象。

## 4 讨 论

所提方法有以下三点值得讨论。

首先,本实验中重建物体的分辨率与初始已知物体的空间频率相关,初始物体越精细,则基于反演的 PSF 重建出的物体的分辨率越高。同时,实验中设置不同的像距会带来分辨率的变化。要保持良好的系统放大率,使得 CCD 接收到的散斑拥有良好的散斑对比度,并且使计算平面位移时用到的散斑自相关拥有良好的信噪比。

计算结果,偏移值为 43 pixel,计算可得物体运动距离为 0.425 mm,在误差范围内与实验结果一致。表 2 列出了更多的实验数据,本实验过程中仅对  $x$  轴方向的情况进行了验证,平面上其余方向结果与  $x$  轴方向情况类似。

其次,所提方法能持续追踪并重建被隐藏在散射介质之后的物体,但是不能绕过障碍物对物体进行运动追踪。所提方法的优势在于其光路的简便性和追踪物体时的高速度,在 Intel i5-7300HQ 的电脑上基于 MATLAB 程序对单次移动后的物体进行位置运算,所需要的时间约为 1.2 s。所提方法适用性广且在多种光源下均能实现物体重建,例如单色 LED、激光光源等。所提方法的局限性在于所使用的物体重建及 PSF 解算是基于散射体的光学记忆效应的,因此所追踪的运动物体的尺寸必须处于单个记忆效应范围之内。另外,在采集连续两张散斑图的间隔时间内,物体轴向移动的距离需在 4 cm 以内,物体平面移动的距离不得超出单个记忆效应范围,否则无法在平面上追踪物体,通过将 CCD 采集散斑图的时间间隔缩短,即可解决上述问题。

最后,本实验的先决条件在于物体形状已知和物体的初始位置已知,利用已知条件实现 PSF 解算从而开展了后续工作。同时在轴上和横向上由于需要对 PSF 进行解算而不是直接测量,可能存在累积误差,从而引起计算结果的误差。另一方面,为了进一步实现无需先验信息而对未知物体的追踪,尝试使用 Katz 等<sup>[10]</sup>提出的 Fienup 型相位恢复算法对未知物体进行物体重建,但是实验中发现,使用 LED 作为光源进行实验时,获得的散斑对比度不高,重建出的物体精度很低,因此无法作为初始条件进行实验,若能在任何光源下实现高精度重建,则能实现无需先验信息的物体追踪。

## 5 结 论

实现了透过散射介质对移动物体的运动追踪,利用 CCD 持续采集移动物体产生的散斑,即可计算出移动物体的位置同时将物体重建出来。所提方法在轴向上利用轴向 PSF 的缩放关系追踪物体位置,当重建出的物体与初始物体结构相似性最高时即为物体新位置;在横向上,利用重建结果之间的互相关结果对横向移动物体进行追踪,并更新 PSF 进行物体重建。所提方法易于实现,无需特定的光路设计,物体位移计算速度快,物体重建质量高。所提方法可对特定运动的微小物体进行追踪,例如生物医学领域中特定的大细胞,同时利用记忆效应,在更新 PSF 之后能对跟踪物体的周边进行重建。

## 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] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111005.  
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.
- [3] 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.  
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.
- [4] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [5] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1245-1247.
- [6] Vellekoop I M, Lagendijk A, Mosk A P. Exploiting disorder for perfect focusing[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 320-322.
- [7] Chaigne T, Gateau J, Katz O, et al. Light focusing and two-dimensional imaging through scattering media using the photoacoustic transmission matrix with an ultrasound array[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2664-2667.
- [8] 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.
- [9] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [10] 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.
- [11] Judkewitz B, Horstmeyer R, Vellekoop I M, et al. Translation correlations in anisotropically scattering media[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 684-689.
- [12] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [13] Antipa N, Kuo G, Heckel R, et al. DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging [J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1-9.
- [14] Zhuang H C, He H X, Xie X S, et al. High speed color imaging through scattering media with a large field of view[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32696.
- [15] Gariépy G, Tonolini F, Henderson R, et al. Detection and tracking of moving objects hidden from view[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 23-26.
- [16] 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.
- [17] Feng S C, 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.
- [18] Freund I, Rosenbluh M, Feng S C. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328.
- [19] Edrei E, Scarcelli G. Memory-effect based deconvolution microscopy for super-resolution imaging through scattering media [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33558.
- [20] Liang J B, Cai J F, Xie J P, et al. Depth-resolved and auto-focus imaging through scattering layer with wavelength compensation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(6): 944-949.
- [21] Schott S, Bertolotti J, Léger J F, et al. Characterization of the angular memory effect of scattered light in biological tissues [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13505-13516.
- [22] Freund I. Looking through walls and around corners [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1990, 168(1): 49-65.