

散射成像研究现状及展望

金欣^{1*}, 王枭宇¹, 杜东宇¹, 范逸辉¹, 季向阳²

¹清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

²清华大学自动化系, 北京 100084

摘要 散射介质广泛存在于自然界中, 透过散射介质成像在医学、自动驾驶、国家安全等领域具有重要的科学意义和应用价值。简要综述了散射成像技术的发展, 从弹道光 and 散射光的角度出发分析介质的散射特性, 将现有散射成像技术分为利用散射光和分离散射光两大类, 同时总结出散射介质空域特性分析和散射传输过程建模两种利用散射光的方法, 并介绍了弹道光 and 散射光在空域或时域上存在的可分离性。从光照方式、成像装置复杂度、先验信息依赖度、适用散射介质类型及强弱和视场范围等方面分析比较了各类散射成像技术, 并展望了其发展趋势。

关键词 成像系统; 散射光; 散射成像; 散射介质

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811002

Progress and Prospect of Scattering Imaging

Jin Xin^{1*}, Wang Xiaoyu¹, Du Dongyu¹, Fan Yihui¹, Ji Xiangyang²

¹Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Scattering media exist widely in our daily life. Imaging through the scattering media presents important scientific significance and large application value in medicine, autonomous driving, national security, and other fields. Here, we briefly review the current progress in scattering imaging and analyze the scattering characteristics of media via distinguishing the ballistic light and the scattered light. Existing scattering imaging techniques are divided into two categories: methods that utilize the scattered light and approaches that separate the scattered light from the ballistic light. Two groups of methods that exploit scattered light are summarized. They analyze the spatial characteristics of scattering media and model the light propagation in the scattering media, respectively. Also, the spatial or temporal separability between the scattered light and the ballistic light is introduced. The scattering imaging techniques are compared in terms of illumination, complexity of imaging devices, prior information dependency, type and strength of scattering media, and field of view. Finally, the development trend is forecasted.

Key words imaging systems; scattered light; scattering imaging; scattering media

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 290.1310; 290.4210

1 引言

传统光学成像基于待观测目标、透镜组及传感器之间稳定的“一一对应”关系, 即“所见即所得”^[1], 可以将待观测对象的形状、颜色及相对深度等信息

有效反映在传感器平面上。但散射介质的存在阻碍了从传统光学系统中直接解析场景信息^[2]。散射介质内部复杂的折射率及反射率分布, 使光线在经过散射介质时会改变其原有的传播方向^[3], 导致光电成像系统在散射环境下往往无法正常工作^[4]。散射

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-26; 录用日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61827804, 61991451)、广东省自然科学基金(2020A1515010345)

通信作者: *jin.xin@sz.tsinghua.edu.cn

介质广泛存在于自然界中,例如生物组织、雨雾天、火灾烟雾、浑浊深海等,这给医疗诊断、复杂环境驾驶、火灾救援及深海探测等领域带来挑战。从2011年开始,散射成像逐渐开始成为国内国际的研究热点,受到中国自然科学基金委、美国自然科学基金委、欧洲研究理事会等组织的广泛关注。在2012年,英国物理学会的《物理世界》杂志更将“非透明材料观测”工作评为当年物理学的十大突破之一^[5]。散射成像在医学、国家安全、军事与民生应用中具有重要的科学意义和技术价值,如何克服散射影响实现清晰成像依然是限制人类社会活动的重要科学问题^[6]。

在实际散射场景下,传感器接收到的散射信号由两类光子产生:一类为弹道光,即光线在传播过程中未经散射而直接到达传感器平面的光子;一类为散射光子,即光线在传播过程中受到散射多路径的影响,导致传播方向、传播时间和相干性等出现变化的光子。这两类光子的产生原因主要和光在经过散射介质时所发生的吸收和散射有关^[7]。其中,吸收会将光能转化为其他形式的能量,导致光的总能量降低,而散射虽然会保持光的总能量不变,但会导致经过散射后光的传播方向发生变化,能量的分布发生改变。本领域以平均吸收程 l_{ab} 定量描述吸收过程,表示光子在介质的吸收作用下所经过的平均距离,吸收系数定义为平均吸收程的倒数,即 $\beta_{ab} = 1/l_{ab}$;以散射平均自由程 l_{sc} 定量描述散射过程,表示光在介质中发生相邻两次散射事件所需要传播的平均距离,散射系数定义为散射平均自由程的倒数,即 $\beta_{sc} = 1/l_{sc}$ 。在实际的散射介质中,散射和吸收同时存在,以衰减系数(消光系数或传输系数)同时描述介质的散射和吸收作用,即衰减系数 $\beta_t = \beta_{ab} + \beta_{sc}$,以衰减系数的倒数描述平均自由程 $l_t = 1/\beta_t$ ^[8]。光在散射介质中传播 x 距离后,未被吸收或散射的弹道光的比例会下降到 $e^{-\beta_t x} = e^{-(\beta_{ab} + \beta_{sc})x}$,这类光子单独被传感器采集时,能直接反映目标物或场景的有效信息。剩余 $1 - e^{-\beta_t x}$ 比例的光子中,除了被吸收的部分无法被传感器采集外,散射光子由于在传播过程中受到多次散射碰撞,传播路径随机改变且难以估计,该部分光子作用在传感器上破坏了弹道光子的有效信息,是导致散射图像降质的主要原因。在散射效应越强的场景(散射系数 β_{sc} 越大或散射介质中传播距离 x 越长),传感器采集图像中弹道光子的占比越低,而散射光子的占比越高,因此图像

的模糊程度及降质程度越大,恢复重建越难。现有散射介质根据光线传播过程中发生散射事件的次数,分为面散射介质和体散射介质,其中面散射介质用于描述仅发生一次散射事件的传输过程,常见于薄散射介质,如磨砂毛玻璃、纸和墙面等。体散射介质用于描述光子被多次散射的情景,常见于厚散射介质,如雾气、生物组织和浑浊的水等。而现有的散射成像方法根据重建目标物时利用光子类型的差异,可以分为利用散射光子重建的方法和分离散射光子重建的方法。

利用散射光子重建目标物的方法分析由目标物经散射介质到传感器平面的成像响应,将弹道光子和散射光子综合在一起考虑。虽然散射介质的成像响应复杂且难以完整获取,但在一定视场范围内存在空域平移不变性,可用于对成像响应的局部解析,这可称为散射介质的“记忆效应”理论,并由此发展出基于散射介质空域特性的相关成像技术。除此之外,还可以对成像响应进行完整建模,在已知部分散射介质参数的情况下对成像响应进行估计,再利用估计得到成像响应,求解成像逆问题,比如大气传输方程。也可以直接对散射成像响应进行先验标定,如散射传输矩阵标定,再利用标定得到的成像响应进行更准确的目标物重建。

分离散射光重建目标物的思想是实现弹道光和散射光的分离,并从分离后的弹道光中直接获取目标物及场景的信息。弹道光和散射光的差异性表现在空域和时域两个不同的维度,对二者的分离方法可分为空域散射光分离法和时域散射光分离法。其中空域散射光分离法将散射图像看作是弹道光和散射光的空域线性叠加,特别是在面向散射系数均匀的场景,弹道光和散射光的分布仅与场景的深度信息有关,即弹道光子的占比随场景深度信息的增加而减小,而散射光子的占比随场景深度信息的增加而增大。这类方法对输入图像的要求很低,可在单帧图像下实现散射光空域分离,也可以通过增加输入信息的维度,在更高维的光场数据上实现分离;时域分离方法则利用散射多路径效应引起的弹道光子和散射光子在传播时间上的差异,对弹道光子和散射光子从时间维度进行区分,其实现途径包含基于光学相干断层扫描(OCT)的相关技术和超高时间分辨成像技术,而超高时间分辨技术又具有区分到达时间、建模弹道光飞行路径和分析幅度调制光相位三种实现方式。

本文基于上述分类,总结散射成像技术的最新

进展,分析各类方法之间的优劣性,并展望散射成像技术的发展方向和应用前景。

2 利用散射光的重建方法

2.1 利用散射介质空域特性的重建方法

在一定视场范围 $[\Delta\theta \ll \lambda/(\pi L)]$,其中 $\Delta\theta$ 表示视场角, λ 表示入射光的波长, L 表示散射介质的有效厚度内,散射介质由物面到像面的点扩展函数(PSF,可用 F_{PSF} 表示)存在空域平移不变性,因此传感器采集到的二维强度图像 I 可以表示为二维待观测目标物 O 与PSF的卷积:

$$I = O * F_{\text{PSF}}, \quad (1)$$

称之为散射介质的“记忆效应”^[9-12]。散射成像系统的PSF不是几何光学系统中的艾里斑,而是以空间散斑形式分布,这直接导致强度图像 I 失真。现主要有波前调制、反卷积成像和相关成像三种方法可以从卷积形态的失真散斑图中恢复目标物。

2.1.1 波前调制

波前调制(WFS)的理论最早由以色列巴伊兰大学 Freund 等^[10]基于散斑相关特性推导得出,并最先由荷兰 Vellekoop 和 Mosk 等^[13-16]通过实验证实,将散射介质 PSF 由散斑形态校正为脉冲函数 δ 形态,进而直接在记忆效应范围内实现透过散射介质的成像:

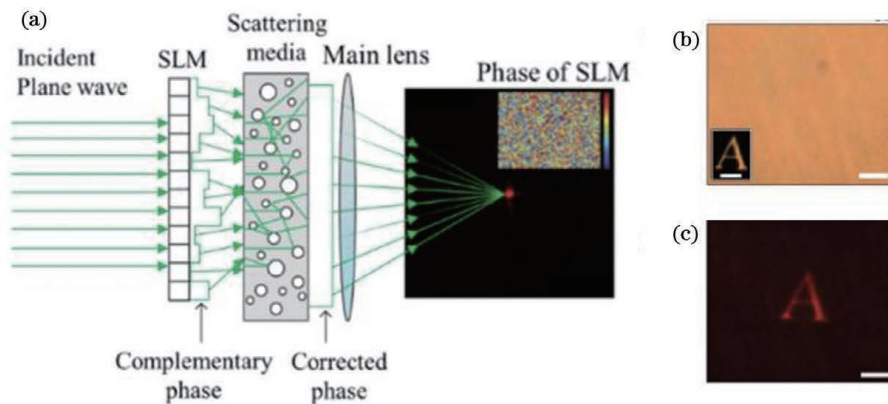


图1 波前调制散射成像技术^[15]。(a)利用 SLM 对非相干光源经过散射介质的波前进行调制,散射介质为 $10 \times 20^\circ$ 扩散片(Newport);(b)传统彩色相机拍摄到的目标物经过散射介质的图像(插图为目标物未经散射介质时的图像);(c)相同目标物经过散射介质和 SLM 相位调制之后的结果,比例尺为 3 mm

Fig. 1 Scattering imaging based on wave-front shaping^[15]. (a) Images of incoherent light source behind diffuser after optimizing the SLM phase pattern (scattering medium was $10 \times 20^\circ$ Newport light shaping diffuser); (b) image obtained by conventional imaging through diffuser with a color camera (inset: image of object before diffuser); (c) result of the same object through the diffuser using the optimized SLM phase pattern (scale bar: 3 mm)

2.1.2 反卷积成像

基于 PSF 反卷积的散射成像方案与波前调制的思想不同,Zhuang 等^[29-30]将目标物替换为点光

$$I = O * \delta = O. \quad (2).$$

对于入射到散射层的光束来说,由于散射的存在,其波前的各个区域在穿过散射层的过程中会经过不同的距离,相当于给各部分波前附加了随机相位,导致相干叠加后的图像失真,且 PSF 呈散斑形态分布。波前调制是在光路中插入空间光调制器(SLM)或其他相位补偿装置,抵消散射层随机相位的影响,最终将散射成像系统校正为一个传统的几何透镜成像系统。波前调制的成像方法需要对系统进行侵入式标定(在成像系统中移动或改变目标物的位置以完成标定),以非相干点光源^[15]或相干光^[13, 17-24]入射系统,以感光平面的强度水平^[13, 15, 17-21, 24]、散斑特性^[22-23]、生物荧光信号^[14]等作为反馈信号,利用连续调制算法^[13, 17-18, 24]、遗传算法^[15, 19-21]及和声搜索算法^[25]等方式不断补偿相位,最终将入射光透过散射介质聚焦成感光平面的一个点,即 PSF 校正为脉冲函数 δ 时停止补偿,如图 1 所示,相位补偿后的系统可近似为“透镜”成像系统,可在记忆效应范围内对目标物实现成像,但成像视场相对受限,同时反馈优化过程也受时效性的限制。除成像外,结合超声标签技术^[26-28],波前调制的聚焦能力可由透过散射介质形成聚焦提升至在散射介质内部任意一点形成聚焦,这在生物医学、光遗传等方面展现出更大的应用前景。

源,替换过程中目标物和点光源的深度及空间位置信息需保证相同,侵入式标定来自系统某特定空间位置的 PSF,如图 2 所示,再利用反卷积算法从散射

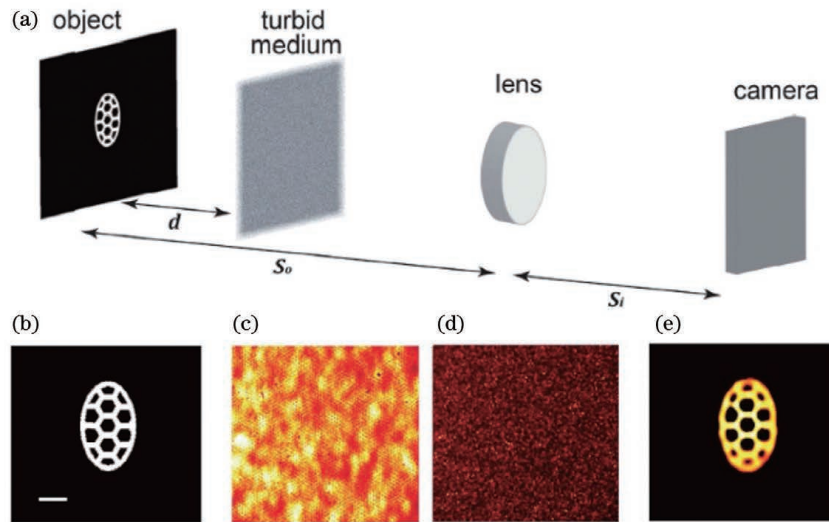


图2 基于PSF反卷积的散射成像方法^[30]。(a)光路图,作为目标物的掩模透过120 grit 磨砂毛玻璃(Thorlabs)后成像在CMOS相机上;(b)未加入散射介质时的成像结果;(c)加入散射介质后相机采集到的失真图像;(d)将目标物替换为针孔后标定得到的系统PSF;(e)反卷积重构结果,比例尺为200 μm

Fig. 2 Scattering imaging based on PSF deconvolution^[30]. (a) Optical setup (a mask used as the target is placed behind a 120 grit Thorlabs ground glass diffuser, and the plane of the object is imaged onto a CMOS camera); (b) image of the object without scattering medium; (c) scrambled image recorded by camera through scattering medium; (d) PSF of overall setup recorded by replacing the object with an iris; (e) reconstructed object after deconvolution (scale bar: 200 μm)

强度图像 I 中高分辨率地重构目标物^[29-30]:

$$O = \text{Deconv}(I, F_{\text{PSF}}), \quad (3)$$

式中: O 为重构的目标物图像强度; Deconv 为反卷积函数。常见的反卷积算法包括RL算法^[31-32]和winner滤波算法^[33]等。此外,散射介质的特性导致深度间隔较远的PSF间存在独立性^[34],美国Waller等发现三维多深度目标物形成的散射强度

图像 I 经过不同标定深度的PSF反卷积重建,即可恢复三维物体在各自不同标定深度下的信息,并据此发布了一款无透镜3D相机DiffuserCam,以预标定的散射介质作为成像器件,实现单次曝光下的目标物三维重建^[35]和彩色三维重建^[36],如图3所示。后续研究人员发现不同标定深度的PSF之间存在变换关系,极大减少了三维重建所需的标定次数,同

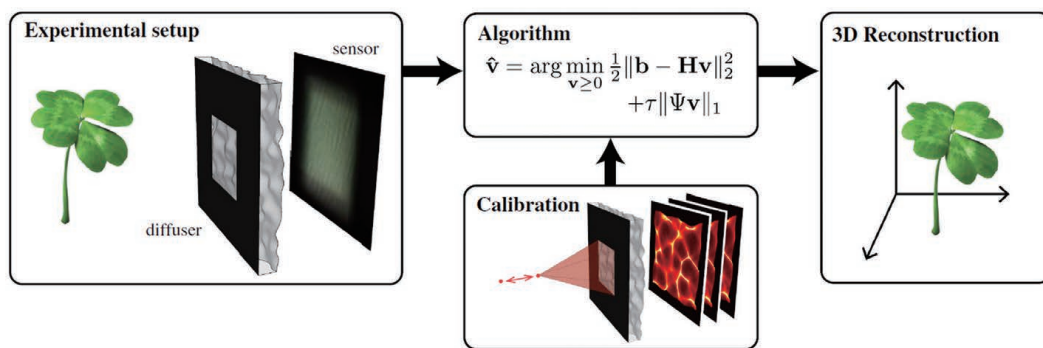


图3 DiffuserCam的装置图和重建原理^[35]。无透镜系统由传感器和传感器前插入的散射介质(0.5° Limit扩散片)组成。系统将三维场景信息编码在传感器的二维图像中,并预标定不同深度位置的点光源经过散射介质后的图像,最后结合场景的稀疏性先验求解非线性逆问题,实现从单帧二维图像到三维场景的计算重构

Fig. 3 DiffuserCam setup and reconstruction principle^[35]. Lensless system consists of a sensor and a diffuser (a 0.5° off-the-shelf Luminit diffuser) placed in front of the sensor. The system encodes a 3D scene into a 2D image on the sensor. A one-time calibration consists of scanning a point source axially while capturing images through scattering media. Images are reconstructed computationally by solving a nonlinear inverse problem with a sparsity prior. The result is a 3D scene reconstructed from a single 2D image

时扩大了反卷积成像算法的有效深度范围,也可应用于散射下的目标物追踪^[37]。中山大学 Xie 等^[34]对这种不同标定深度 PSF 间的变换关系用缩放变换来描述,而本课题组用散射光场传播模型来描述^[38]。此外,PSF 的分布也受标定光波长的影响,新加坡 Sahoo 等^[39]将波长间隔较远的 PSF 间的独立性引入到反卷积算法中,通过标定不同波段的 PSF,在单色相机下实现目标物彩色重建,而中山大学 Xu 等^[40]将不同波长 PSF 之间的联系用缩放变换描述,减少了彩色重建所需的独立波长标定次数。

上述反卷积的方法能够高分辨率地重构目标的结构信息,并且相对较快,整个采集以及计算过程只需要几秒钟,且在三维重建及彩色重建方面表现出一定的优势。但是标定 PSF 的方案是侵入式的,无法应用于未知场景,同时无法适应动态散射介质下的成像要求。

2.1.3 相关成像

荷兰 Bertolotti 等^[5]和法国 Katz 等^[41]发现 PSF 的强度随机分布导致 PSF 自相关为尖峰函数,这提供了一种目标物幅值谱获取的新思路^[5, 41]。

$$\mathcal{F}\{I \otimes I\} = \mathcal{F}\{(O \otimes O) * (F_{\text{PSF}} \otimes F_{\text{PSF}})\} = \mathcal{F}\{(O \otimes O) * \delta\} = \mathcal{F}\{O \otimes O\} = |\mathcal{F}\{O\}|^2, \quad (4)$$

式中: \otimes 表示自相关运算; $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换; δ 表示二维脉冲函数。对于获取到的目标物幅值谱信号,可利用 Fienup 等^[5, 41-43]提出的 Hybrid Input-

Output (HIO) 与 Error Reduction (ER) 相位恢复算法重构成像目标的结构,成像装置如图 4 和 5 所示。成像过程仅利用了相机采集的散射图像,提升了成像速度,属于非侵入式成像,但相位恢复算法具有不稳定性,导致基于散斑相关的方法在有噪声情况下的重构效果随成像目标复杂度的增大快速变差,无法应用于相对复杂的目标物,也无法获得目标的位置和方向信息。除此之外,由于散斑 PSF 的自相关并不是一个理想的脉冲函数^[44],因此其对成像目标的幅值谱有低通滤波作用,导致最终的重构结果丢失高频信息,影响成像质量。后续,基于散斑相关的成像方案不断被改进,吴腾飞等^[45]通过对散斑图像 I 作双谱分析,确定性恢复目标物的相位谱信号,再结合通过自相关运算获得的幅值谱信息,以傅里叶逆变换恢复原始目标物,增加了重建稳定性。美国加州理工学院 Cua 等^[46]将散斑相关技术应用在运动目标物的逐帧散

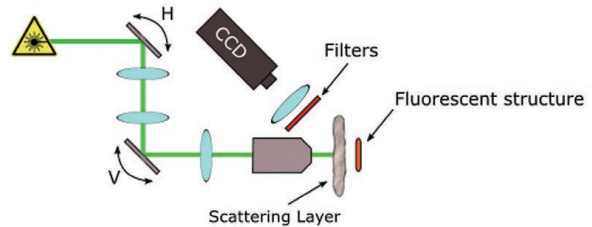


图 4 扫描式散斑相关法的成像装置示意图^[5]
Fig. 4 Imaging setup of scanning speckle correlation technique^[5]

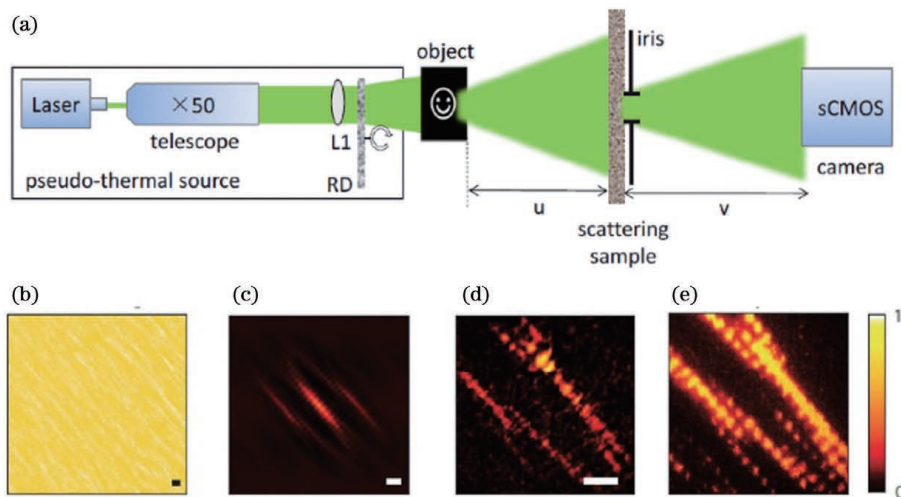


图 5 单次曝光散斑相关技术^[41]。(a) 成像装置图;(b) 经过 300 μm 厚鸡胸组织的散射原图;(c) 散射原图的自相关;
(d) 基于相位恢复算法并利用图 5(c) 自相关得到的重建结果;(e) 无散射时的原始目标物,比例尺为 200 μm

Fig. 5 Single-shot speckle correlation technique^[41]. (a) Setup used for scattering imaging; (b) raw camera image of scattered light with 300- μm -thick chicken breast tissue as the scattering media; (c) corresponding autocorrelation of scattered image; (d) object reconstructed from autocorrelation of Fig. 5(c) by phase-retrieval algorithm; (e) object imaged directly without scattering medium (scale bar: 200 μm)

斑差值分析上,实现了对于动态散射目标物的采集和捕捉,后续也有其他运动重建方法被提出^[47]。美国杜克大学 Li 等^[48]提出的多路复用相关成像的光路,利用信息编解码从单色散斑中解耦不同波长下的成分,基于相关成像实现单色相机下的彩色目标物散射重建。中国科学院上海光学精密机械研究所王歆等^[49]也利用多波长信息抑制自相关中的统计噪声改善重建质量。

上述三种方法均适用于强散射介质下的散射成像,但记忆效应仅在一定的视场(FOV)范围内有效,这导致基于记忆效应的散射成像方案的视场范围受限,无法广泛应用于实际生产生活中。为此,研究人员不断拓展记忆效应算法的视场范围,面向多目标构成的大视场(FOV)进行散射重建。德国 Singh 等^[50]首先在物体平面人工置入一个和物体相互远离的小孔,利用小孔和物体的互相关直接成像,其成像视场范围略大于记忆效应成像的范围,同时算法对于干扰具有更好的鲁棒性,但人工置入小孔的方式属于侵入式成像,应用受限;新加坡南洋理工大学课题组 Tang 等^[51]预先标定不同空间区域的 PSF,如图 6 所示,通过 PSF 反卷积重建各自区域的物体,最终将各区域的重建物体加权融合成一个完整的空域大视场图像。利用该系统采集到的多目标物形成的散斑 I_{total} 为

$$I_{\text{total}} = \sum_{k=1}^n O_k * F_{\text{PSF},k}, \quad (5)$$

式中: $F_{\text{PSF},k}$ 表示位于物体 O_k 附近的散射介质的点扩展函数。在非相干光源的照射下,将多个相互分离的目标物形成的散斑线性叠加,构成了最终相机所采集到的散斑。这其中,每个物体的尺寸位于记忆效应范围内,而相邻两物体之间的间距大于记忆效应范围,同时多物体构成的完整大视场范围远大于记忆效应视场范围。利用 PSF 仅在记忆效应范围内保持平移不变性的特性,即^[51]

$$F_{\text{PSF},j} \otimes F_{\text{PSF},k} = \begin{cases} 0 & j \neq k \\ \delta & j = k \end{cases}, \quad (6)$$

从 I_{total} 中解耦重建不同位置的目标物, $I_{\text{total}} \otimes F_{\text{PSF},j} = \sum_{k=1}^n [(O_k * F_{\text{PSF},k}) \otimes F_{\text{PSF},j}] = O_j * \delta = O_j$, 有效实

$$I \otimes I = O_1 \otimes O_1 + O_2 \otimes O_2 + (O_1 \otimes O_2) * (F_{\text{PSF},1} \otimes F_{\text{PSF},2}) + (O_2 \otimes O_1) * (F_{\text{PSF},2} \otimes F_{\text{PSF},1}) = O_1 \otimes O_1 + O_2 \otimes O_2, \quad (7)$$

并结合相位恢复算法重建双目标物各自的空域分布。

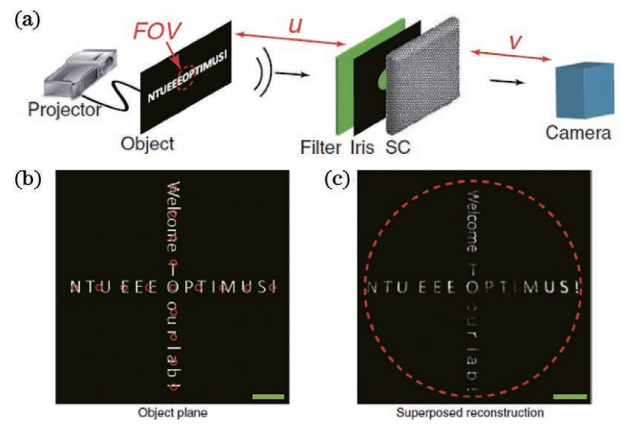


图 6 以 PSF 多次标定实现透过磨砂毛玻璃的记忆效应视场扩展^[51]。(a)实验装置图;(b)目标物平面的空域分布;(c)叠加的重建结果(比例尺为 1 mm)

Fig. 6 Expanding the memory effect through ground glass via multiple PSF calibration^[51]. (a) Experimental setup; (b) spatial distribution of object plane; (c) superposed reconstruction image (scale bar: 1 mm)

现多目标重建的同时也增加侵入式预标定的次数。国防科技大学 Li 等^[52]改进了多区域 PSF 预标定的装置,以时间换空间,通过多帧采集一次性侵入式标定不同空间区域的 PSF,极大简化了标定过程。在扩大相关成像的视场范围方面,西安电子科技大学 Guo 等^[53]在已知某一参考物形状的前提下,实现了双物体超记忆效应范围的散射成像,恢复了双物体中未知物体的形状。此外,光学低通滤波技术^[54]和傅里叶叠层成像技术^[55]也被用于记忆效应成像技术的视场拓展。但上述视场拓展方法均需要额外的先验信息或侵入式成像技术的辅助,如何无先验地实现大视场范围下的多目标散射解耦重建,依然是基于记忆效应的成像技术中亟待解决的难题。

为解决无先验多目标大视场散射重建的难题,本课题组提出一种基于目标物频域分析的视场扩展方案^[56],如图 7 所示,在双目标物组成的视场远大于记忆效应范围的前提下,针对单曝光散斑图像 I ,利用基于目标物的频谱猜测和能量限制的迭代优化算法,实现线性叠加的自相关信号的无先验分离解耦:

后续,本课题组通过引入轴向光场数据将成像目标物数量提升至任意多个^[57]。从图 8 可以看出:

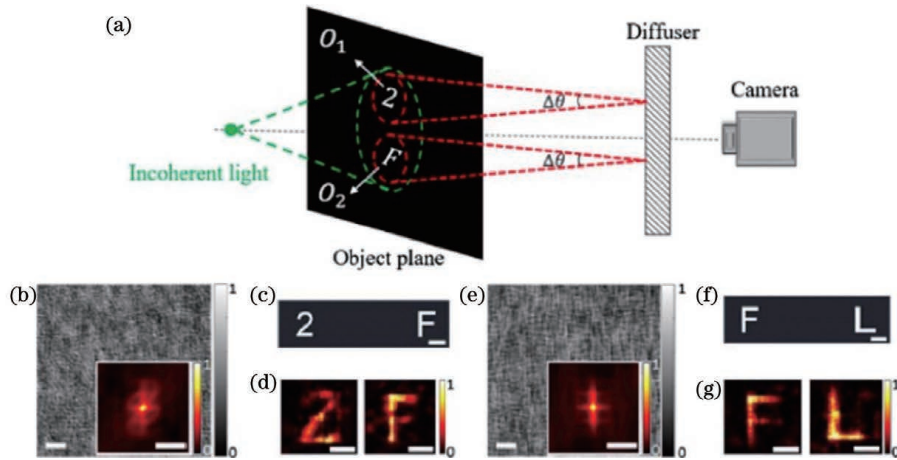


图7 双目标大视场无先验散射成像实验^[56]。(a)实验装置图;(b)(e)经过散射介质(220 grit 磨砂毛玻璃, Thorlabs)后形成的散斑及对应的散斑自相关;(c)(f)真实双物体“2F”掩模和“FL”掩模;(d)(g)由自相关分离重建的最终结果(比例尺为 96 μm)

Fig. 7 Dual-target large FOV prior-free scattering imaging^[56]. (a) Experimental setup; (b)(e) speckles and corresponding speckle autocorrelations through scattering media (220 grit frosted glass, Thorlabs); (c)(f) real dual-target masks “2F” and “FL”; (d)(g) final reconstructed objects from autocorrelation separation (scale bar: 96 μm)

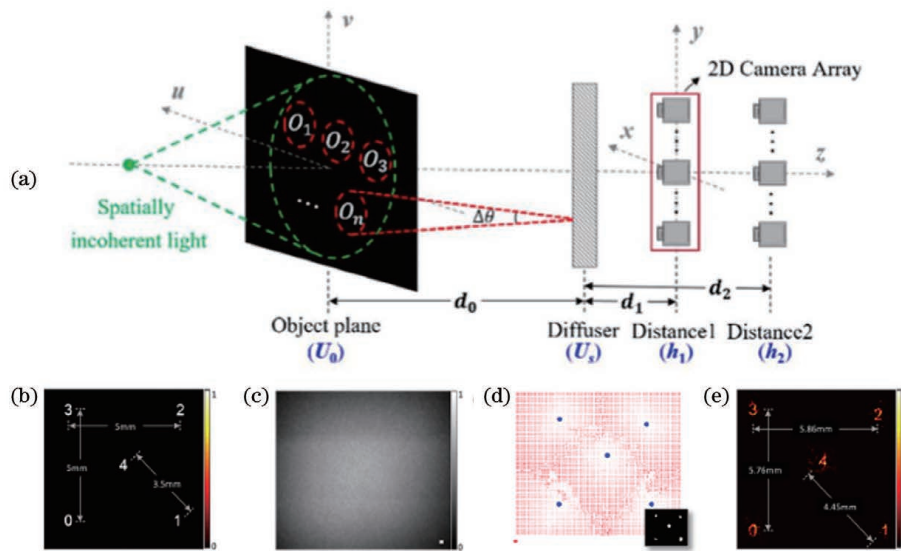


图8 多目标大视场无先验散射成像实验^[57]。(a)实验装置图;(b)以多目标物掩模作为成像目标物;(c)多目标物形成的散射图,散射介质为 220 grit 磨砂毛玻璃(Thorlabs);(d)利用尺度缩放矢量定位的目标物位置;(e)大视场重建结果(比例尺度为 240 mm)

Fig. 8 Multi-target large FOV prior-free scattering imaging^[57]. (a) Experimental setup; (b) multi-target mask as imaging target; (c) captured multi-target speckle (220 grit Thorlabs ground glass is used as scattering medium); (d) target locations obtained by using scaling vectors; (e) large FOV reconstruction result (scale bar: 240 mm)

不同像距下的多目标大视场散斑间存在与目标物位置及数量信息相关的尺度放缩变换 $F_{\text{PSF},d_1}(x) \rightarrow F_{\text{PSF},d_2}[mx - (m-1)u]$, 其中 d_1 与 d_2 表示 PSF 所处的不同像距, x 表示二维空域坐标系, u 表示目标物所在的位置, m 表示放缩系数, 可用于大视场多目标物的无先验散射定位。在目标物位置信息的指导下, 利用低串扰的区域分配策略实现各目标物

自相关信息的解耦, 并利用所提出的面向带干扰自相关信号的相位恢复改进算法重建各个目标物的空域分布, 最后将重建得到的各目标物按位摆放, 完成无先验多目标大视场图像的完整重构。成像目标物个数及多目标物构成的视场范围无理论限制。但上述多目标散射解耦重建工作带来的视场扩展仅建立在两两相互远离的多目标物上, 并不能应用在连续

大物体上,这也是当前记忆效应技术发展所面临的困境,有待于进一步研究与创新。

2.2 建模传输过程的重建方法

除了在特定视场范围内利用散射介质的空域特性实现成像外,也可以通过建模光线在散射介质中的传输过程,获取散射介质成像响应的方式,实现目标物重建。在面向雾气这类散射介质时,可通过部分散射物理参数对雾气成像响应进行直接估计,也可以在面向其他各类复杂散射介质时以先验标定的方式获取成像响应,再利用成像响应和散射图像进行更准确的目标物重建。

2.2.1 基于大气传输方程的重建方法

基于大气传输方程的成像方法以雾气作为主要散射介质,在目标物自发光的前提下,将散射图像看作空域不变(或频域恒定)的散射点扩展函数与目标物卷积的结果,然后利用大气散射的经验公式或物理特性对其空域点扩展函数或对应的频域调制传递函数进行建模,最后利用反卷积的方式完成散射重建,即

$$O = F^{-1} \{F\{I\} \cdot F\{F_{\text{APSF}}\}^{-1}\}, \quad (8)$$

$$O = F^{-1} \{F\{I\} \cdot M_{\text{AMTF}}^{-1}\}, \quad (9)$$

式中: F_{APSF} 和 M_{AMTF} 分别代表大气空域点扩展函数及其对应的频域调制传递函数; O 和 I 分别为成像目标物和散射图。该类方法最初主要依靠对实际场景的标定测量和经验公式计算获取 F_{APSF} 和 M_{AMTF} 。1995年,以色列Sadot等^[58]提出实际的 A_{MTF} 为相似大气场景下的平均MTF加上期望为0的随机噪声,而平均MTF则需要通过测量大量的大气湍流MTF和气溶胶MTF得到。为了免去标定测量的复杂过程,以色列Yitzhaky等^[59]使用标准气象站测量的气象参数结合经验模型计算出湍流MTF和气溶胶的MTF,实现平均MTF的获取,而美国Cong^[60]以大气类型、波长、散射体光学厚度和高度信息为输入,通过训练的多层非线性神经网络来仿真生成 F_{APSF} 。但上述依靠标定测量和经验公式计算的大气传输方程的普适性较差,难以适用于不同区域或极端气候下的大气环境。为了提高其普适性,物理模型被用来代替经验模型,美国Narasimhan等^[61]利用Henyey-Greenstein相位函数和辐射传输方程(RTE)对光在大气散射介质中的多次散射过程进行建模。当已知光学厚度 T 和前向散射系数 q 时,如图9所示,利用勒朗德多项式得到和实际点扩展函数接近的最优 F_{APSF} 估计,如图10(b)所示,该模型适用于雾、霾、雨等多种天气

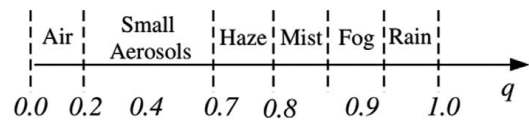


图9 不同天气条件下的近似前向散射系数 q ^[61]
Fig. 9 Approximate forward scattering coefficient q under different weather conditions^[61]

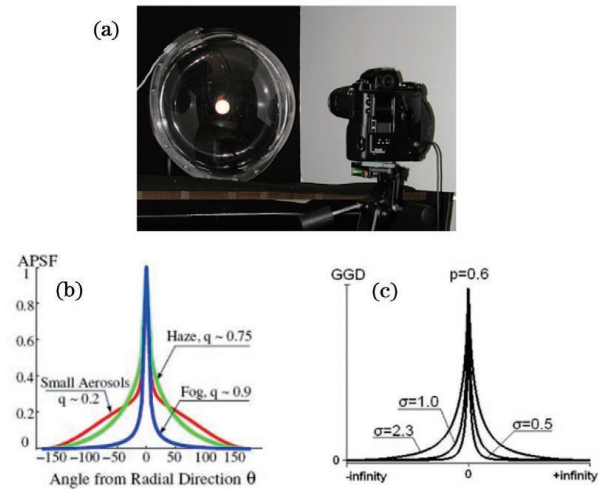


图10 测量装置与 F_{APSF} 。(a)通过测量牛奶内散射验证 F_{APSF} 的仪器,一个小灯泡被放置在一个由塑料制成的球形容器的中心,实验过程中,这个容器装满不同浓度(对应不同光学厚度)的牛奶,用相机进行拍摄,以验证不同情况下 F_{APSF} 理论与实际的准确性^[62]; (b)不同天气条件下归一化为0~1的勒朗德 F_{APSF} ^[61]; (c)广义高斯分布 F_{APSF} 的形式^[63]

Fig. 10 Measuring device and F_{APSF} . (a) Apparatus for measuring internal scattering of milk to verify F_{APSF} [small bulb is placed in the center of a spherical container made of plastic. During the experiment, the container is filled with milk of different concentrations (corresponding to different optical thicknesses), and the camera takes pictures to verify the theoretical and practical accuracy of F_{APSF} under different conditions^[62]; (b) Legendre F_{APSF} normalized to 0~1 under different weather conditions^[61]; (c) form of generalized Gaussian distribution

$$F_{\text{APSF}}^{[63]}$$

情况,不仅能在已知 T 和 q 的条件下从相机拍摄的散射图中恢复场景的形状[图11(a)和(b)],还可以通过将在真实环境下相机拍摄的点光源散射图与不同参数下计算的大气点扩展函数进行拟合,逆向估计天气状况。此后,Metari等^[62]通过广义高斯分布拟合勒朗德多项式的最优 F_{APSF} 估计,得到 F_{APSF} 的

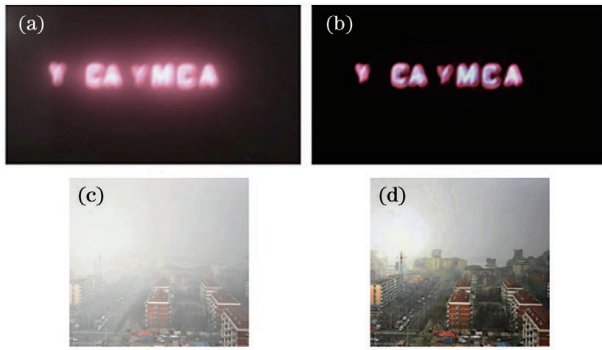


图 11 利用 F_{APSF} 去散射。(a)带有散射的电子广告牌；(b)使用勒朗德多项式估计的 F_{APSF} 去除散射的电子广告牌[从图 11(a)中提取出其中某一块亮斑,并拟合出其 F_{APSF} ,将其与图 11(a)进行反卷积,获得图 11(b)^[61]];(c)雾气原图;(d)使用广义高斯分布 F_{APSF} 去除散射的结果^[63]

Fig. 11 Use F_{APSF} for dehazing. (a) Electronic billboard with scattering; (b) electronic billboard after scattering removal using F_{APSF} estimated by Legendre polynomials [One of the bright spots is extracted from Fig. 11 (a), and its F_{APSF} is fitted, which is deconvolved with Fig. 11 (a) to obtain Fig. 11 (b)^[61]]; (c) foggy image; (d) dehazed image obtained by using generalized Gaussian distribution F_{APSF} ^[63]

解析形态[图 10(c)],极大简化了求解过程,并结合维纳滤波等反卷积算法以去除真实散射场景中物体反射光经散射传播带来的模糊效应^[63],如图 11(c)和(d)所示。

基于大气传输方程的散射成像方法仅需要普通相机直接采集云雾天气下的散射图,成像视场无理论限制,但该模型中只考虑了目标物自发光时的成像响应,因此理论上不适用于自然光场景或包含其他环境光的场景,环境鲁棒性差,同时 F_{APSF} 的估计需要大气物理参数或预标定等作为先验信息。大气传输方程不适用于生物组织等大气之外的散射介质,同时对强散射环境下的重建还存在较大困难。

此外,对辐射传输方程的近似求解不仅可利用勒朗德展开式,通过对 RTE 方程进行一阶球谐展开近似,可以得到建模强散射场景光子传输过程的扩散方程,对扩散方程的有效求解可以明确光在散射介质中的传播过程。2019 年,英国 Lyons 等^[65]利用脉冲光源和单光子雪崩二极管阵列记录光子传播的空时信息,在已知介质散射系数和吸收系数的前提下,以最小化基于扩散方程生成的光子空时信息和实测光子空时信息的欧氏距离为目标,在目标

物稀疏性先验的约束下进行迭代求解,最终在 80 倍传输平均自由程的体散射介质中实现了散射成像,如图 12 所示,但该方法受限于复杂的迭代优化求解,只能实现简单的二维物体的重建。进一步地,美国 Lindell 等^[66]显式地求解了扩散方程在平板状散射介质下的解析解,并将解析结果视作光在自由空间传播结果的模糊,最终通过去模糊实现目标物恢复,该工作实现了透过 6 倍传输平均自由程的散射介质的三维物体重建。基于扩散方程的方法对强散射介质具有更高的适用性,但对扩散方程的描述需要时空数据的配合,这增大了成像装置的复杂性,需要高时间分辨率的采集装置和窄带脉冲光源对场景进行主动照明,同时重建结果精度较差。

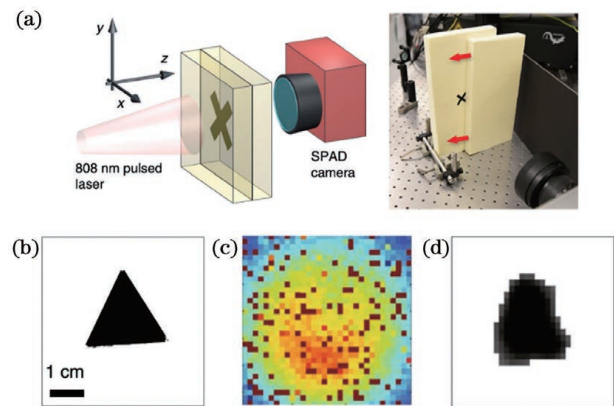


图 12 基于扩散方程的散射成像^[65]。(a)采集装置原理图;(b)原始目标物;(c)采集图像;(d)重建结果

Fig. 12 Scattering imaging based on diffusion equation^[65]. (a) Diagram of acquisition device; (b) original target; (c) captured image; (d) reconstruction result

2.2.2 传输矩阵的标定方法

2010 年,法国 Popoff 等^[67]首次提出测量散射介质传输矩阵的技术,在相干光照射下,将输入复数场划分成 N 个单元,将输出复数场划分成 M 个单元,预先标定入射光对应波长下第 n ($n=1,2,\dots,N$) 个输入场单元与第 m ($m=1,2,\dots,M$) 个输出场单元的映射复系数 k_{mn} ,传输矩阵(TM)表示为由输入场到输出场的映射复系数 k_{mn} 组成的矩阵,则有

$$E_m^{\text{out}} = \sum_n k_{mn} E_n^{\text{in}}, \quad (10)$$

式中: E_m^{out} 为输出复数场的第 m 个单元; E_n^{in} 为输入复数场的第 n 个单元。

Popoff 等以单臂干涉装置[图 13(a)]实现对入射复数场和出射复数场的采集,并利用 Hadamard 基完成对传输矩阵各映射复系数 k_{mn} 的标定,最后

将传输矩阵的共轭转置与带目标物的输出矩阵相乘,实现透过 80 μm 厚的 ZnO 样本的成像,如图 14 所示^[68],其中传输矩阵的维度为 256 × 256。此后, Tikhonov 正则化方法^[68]和基于增广拉格朗日法和交替方向法的全变分最小化方法(TVAL3 算法)^[69]相继被用于传输矩阵重建算法中,以提升重建质量和边缘清晰度。法国 Hofer 等^[70]也利用记忆效应理论,对传输矩阵的标定过程进行改进,使用邻近振幅较大点的相位来代替传输矩阵在参考场振幅较小点丢失的相位值,再附加一个对应于两点间位移的相位斜坡,从而获得更加准确的传输矩阵:

$$E_d(x, y) = \sum_{k_x, k_y} A_S(k_x, k_y) E_{\text{trans}}(x, y; k_x, k_y). \quad (11)$$

与(10)式的传输矩阵表达形式不同,韩国 Choi 等基于角谱成像方式,认为散射介质的传输矩阵可以依不同的入射光空间频率 k_x, k_y 来测定,如(11)式所示^[71],其中 $A_S(k_x, k_y)$ 为输入场的角谱分布, $E_d(x, y)$ 为输出场的空域分布, E_{trans} 表示频域

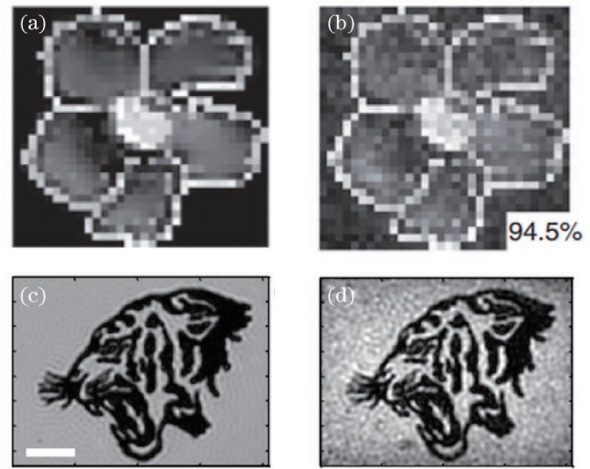


图 14 空域和频域传输矩阵重建结果。(a) 初始灰度图像;(b) 使用散射图重建的图像^[68];(c) 插入散射介质前的老虎图案图像(比例尺: 10 μm);(d) 使用散射图重建的老虎图像^[71]

Fig. 14 Reconstruction results obtained by using spatial and frequency domain transmission matrices. (a) Initial grayscale image; (b) reconstructed image using scattered input^[68]; (c) image of tiger pattern before inserting scattering medium (scale bar: 10 μm); (d) reconstructed image of tiger using scattered input^[71]

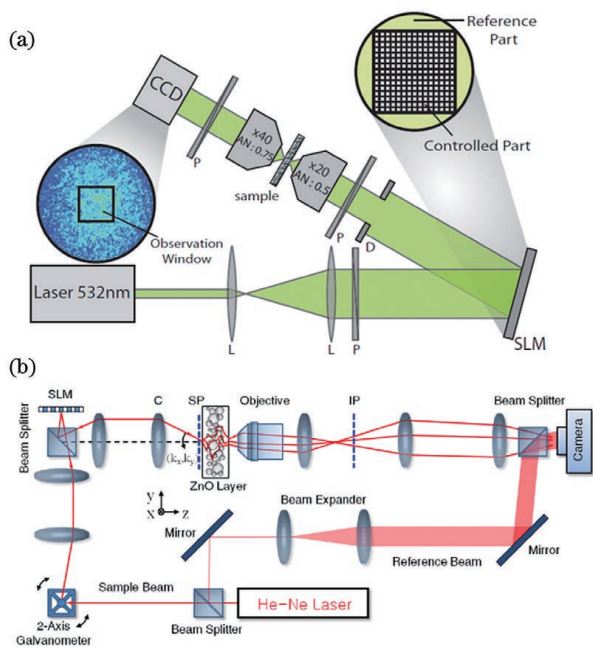


图 13 传输矩阵空域和频域测量光路。(a) 传输矩阵的空域测量光路(将 SLM 分为参考场和信号场两部分)^[67];(b) 传输矩阵的频域测量光路^[71]

Fig. 13 Optical paths for measuring transmission matrix in spatial and frequency domains. (a) Optical path for measuring spatial transmission matrix (SLM is divided into reference field and signal field)^[67]; (b) optical path for measuring transmission matrix in frequency domain^[71]

传输矩阵,并利用二维振镜实现采集,如图 13(b)所示,构建频域 TM,相比于 Popoff 使用自参考散斑波重建的空域 TM,Choi 利用独立参考臂形成干涉条纹的测量结果更加清晰且真实,如图 14(c)和(d)所示。此后,全场干涉显微镜与旋转电流计镜结合的波前调制技术也被应用于频域 TM 的标定,极大提升频域 TM 的维度,最高可达 21078 × 21078,同时可额外实现不同偏振态传输矩阵的测量^[72]。而经过标定的散射介质也作为一种成像器件用于扩大传感器的视场范围和生成全息图^[73]。

由于来自散射介质不同深度或不同波长下的成像响应具有特异性,因此需对不同波长和经过散射介质不同传输时间的传输矩阵进行独立标定,其中多光谱传输矩阵 MSTM 的测量及标定工作已被应用于透过散射介质的不同光谱的空间聚焦^[74],而时间分辨传输矩阵 TRTM 也通过改变独立参考臂的光程完成测量,实现对于在散射介质中不同传输时间下光束的空间聚焦^[75-76],从而验证了传输矩阵测量的正确性。

传输矩阵的测量属于侵入式的标定,并且其矩阵的维度与标定用的 SLM 分辨率、相机分辨率等因素相关,这使得其视场范围受限,现有方法中空域

标定的最大视场范围约为 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, 频域标定下数值孔径 NA 一般可达 0.85 以上。该方法标定得到的传输复矩阵能够很好地反映散射介质的特性, 便于进一步分析求解, 同时重建目标物复杂且清晰度高。但由于标定时间较长, 基于 SLM 的标定时间达到分钟量级, 这使得该方法仅适用于静态散射介质, 不适用于动态的散射场景。

从整体来看, 利用建模传输过程去散射的方法需要一定的场景先验信息辅助, 同时要求在特定光源或自发光物体下实现成像, 环境鲁棒性低, 但成像效果和去散射能力较好。另外通过建模传输过程也可逆向分析散射介质的特性, 便于进一步理解散射成像机理。

3 分离散射光的重建方法

3.1 空域散射光分离

在雾霾、浑浊水体等散射系数分布均匀的自然场景中, 被动光照下相机传感器采集到的光线 E_T 主要由三部分组成: 直接反射光 E_d (由物体反射后未被散射介质所干扰的光线)、前向散射光 E_f (由物体反射后并被散射介质所干扰的光线) 和后向散射光 E_b (未经过物体而到达传感器的光线), 这三部分在强度上呈线性叠加的关系^[77-79], 可以用 Jaffe-McGlamery 成像模型表示^[77]:

$$E_T = E_d + E_f + E_b. \quad (12)$$

考虑到前向散射光 E_f 在 E_T 中占很小的比例, 可以忽略不计^[80-83], Jaffe-McGlamery 成像模型可被进一步简化为^[84-85]

$$I_c(x) = t_c(x)J_c(x) + [1 - t_c(x)] \cdot A_c, \quad (13)$$

式中: $I_c(x)$ 表示相机传感器采集到的散射图像; $J_c(x)$ 表示未经散射的目标物原始图像, 属于散射图像中的弹道光成分; A_c 表示环境光照; $c = \{R, G, B\}$ 对应于相机不同的颜色通道; $t_c(x)$ 表示场景透射率, $t_c(x) = \exp[-\beta_c Z(x)]$, 其中 $Z(x)$ 为场景深度, β_c 为依赖于波长的衰减系数, 在不同颜色通道中其取值不同。从(13)式可以看出, 随着场景深度的增加, 散射图像中弹道光的比例不断减小而散射光的比例不断增加, 因此有效获取场景深度信息(透射率图)是空域分离散射光与弹道光的关键, 这类方法的输入数据分单帧图像和光场数据两大类。

3.1.1 基于单帧图像的分离方法

基于单帧图像的分离法主要利用散射二维图像的内部特征或统计信息来估计 $t_c(x)$, 图像的获取

无需介质的先验信息, 且视场范围无理论限制, 同时单曝光的采集方式对动/静态散射介质及动/静态目标物都适用。依据透射率图 $t_c(x)$ 估计方法间的差异, 可进一步将估计方法细分为基于像素的估计方法、基于局部区域特征的估计方法、基于全局特征的估计方法和基于 Retinex 模型的估计方法。

1) 基于像素的估计方法

在(13)式中, 环境光照 A_c 为恒定常数, 不随场景位置 x 的变化而变化, 在雾霾等衰减系数 β_c 与波长无关的场景下, A_c 常利用二维图像中的强度最大点代替^[86-87], 而 β_c 的波长一致性意味着 $A_c [1 - t_c(x)]$ 在不同颜色通道的强度值是一致的, 散射图颜色上的差异主要体现在 $J_c(x)$ 上。法国 Tarel 等^[88] 据此提出最小通道图概念, 即散射图像在不同颜色通道下的最小值构成的图像。最小通道图忽略了颜色的差异性, 是对后向散射光的一种估计, 再结合对于 A_c 的估计过程, 便可实现对于场景透射率图 $t_c(x)$ 的获取。

$$J_c(x) = \frac{I_c(x) - A_c}{t_c(x)} + A_c. \quad (14)$$

最小通道图的计算复杂度仅与图像的像素数量线性相关, 但利用最小通道图估计得到的场景透射率图含有很多不合理的纹理细节, 无法满足实际透射率图分段平滑的特性^[79]。后续, 潍坊大学 Wang 等^[89] 通过将不同滤波器用于透射率图的平滑处理, 武汉大学 Xiao 等^[90] 通过改进最小通道图的提取方式, 都实现了去散射效果的增强。除最小通道图外, 基于贝叶斯优化的参数估计模型并利用分段平滑的先验知识估计场景的透射率图^[91-92], 该方法在去雾效果及鲁棒性上表现出优势。

2) 基于局部区域特征的估计方法

场景的深度信息往往在小块邻域内保持一致, 这与场景透射率图的分段平滑特性相吻合, 因此在估计透射率图时要考虑每一个像素邻域间的信息。2009年香港中文大学 He 等^[82] 提出的暗通道先验(DCP)去雾算法利用了无散射自然图像的局部区域特征, 即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_c [\min_{y \in \Omega(x)} J_c(y)] \approx 0, \quad (15)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x)$ 为无散射图像的暗通道。

在非天空区域中, 无散射图像的暗通道 $J^{\text{dark}}(x)$ 可近似为 0, 故散射图像的暗通道 $I^{\text{dark}}(x)$ 主要反映场景的透射率信息^[82]:

$$I^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in R, G, B} I_c(y)] = \bar{A}_c [1 - \bar{t}_c(x)], \quad (16)$$

式中： $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的附近区域； \bar{A}_c 表示对于环境光照 A_c 的估计； $\bar{t}_c(x)$ 表示对于实际

场景透射率 $t_c(x)$ 的估计。实验结果图如图 15 所示。

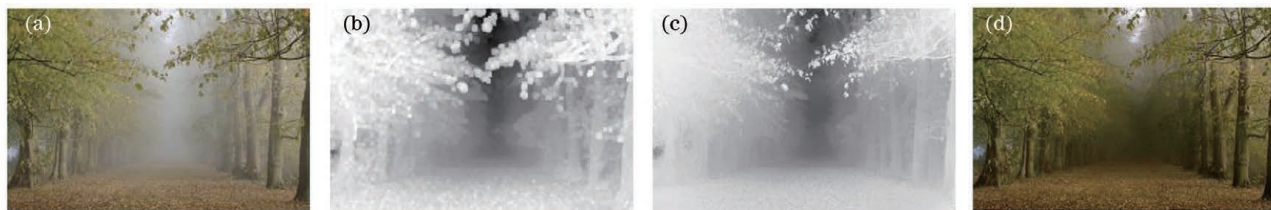


图 15 基于暗通道先验的图像去雾效果^[82]。(a)输入雾天图像；(b)估计的透射率图；(c)经过软抠图优化的透射率图；(d)最终重建结果

Fig. 15 Haze removal results obtained based on dark channel prior^[82]. (a) Input haze image; (b) estimated transmission map; (c) refined transmission map after soft matting; (d) final reconstructed image

在暗通道先验理论被提出后,越来越多的去雾工作利用单帧散射图的局部区域特征,将研究重点转移到单帧图像的 RGB 颜色通道间,散射图像的颜色线先验^[93]、颜色衰减先验^[94]、颜色椭球先验(CEP)^[95]等相继被提出。RGB 通道的梯度变化信息^[96]、饱和度信息^[97-98]、最小颜色通道信息^[99]等也被应用于去雾研究。

针对深海等不同颜色通道间衰减系数 β_c 存在较大差异的特异性场景,需对透射率图的估计方法进行相应的调整。美国密歇根大学 Carlevaris-Bianco 等^[100]基于水下红色通道衰减程度较大的特性,利用红色通道和蓝绿通道的最大差异估计透射率图;巴西 Drews 等^[101-102]提出水下 DCP 方案,仅利用蓝绿通道进行透射率图估计。此外,其他水下

成像优化^[103-106]、面向夜间散射场景及光照不均衡情况下的去散射优化^[107-108]、环境光照估计策略的优化^[109]、不同颜色通道透射率图的差异性分析^[110]、考虑光吸收系数的 JM 成像模型优化^[111]等工作也在扩大基于局部特征的单帧去散射算法的适用范围并提升其性能。

3) 基于全局特征的估计方法

以色列特拉维夫大学 Berman 等^[112]发现自然图像各像素点的颜色在 RGB 颜色空间中可以聚类为数百个紧密的簇,簇中像素的颜色相近,而雾霾等散射介质的存在会将簇内的像素点依据深度拉伸成 RGB 空间内的一条线,称之为雾线,在场景透射率 $t_c(x)$ 趋近于 0 时,所有雾线会会聚到环境光照的对应点 A_c ,如图 16 所示。场景透射率 $t_c(x)$ 可由雾

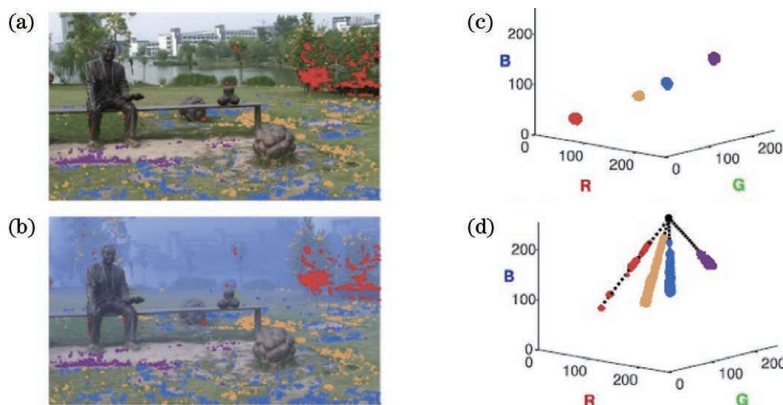


图 16 对于雾线的解释(以人造雾气图像为例)^[112]。(a)对无雾彩色图像的像素依据颜色进行 K-means 聚类的结果,图中的标记点对应 4 个不同的颜色类;(b)无雾图像中 4 个不同颜色类的各个像素点在 RGB 颜色空间的表示;(c)在场景中加入人造雾后的图像;(d)带雾图像中属于同一颜色类的像素在 RGB 颜色空间呈线性分布(各条雾线都经过环境光照的对应点,即标记的黑点)

Fig. 16 Haze-line demonstration (take the artificial haze image as the example)^[112]. (a) Pixels of haze free color image are clustered using K-means according to color (pixels belonging to four colors are marked); (b) four color clusters in haze free image depicted in RGB space; (c) image after adding artificial fog into scene; (d) hazy pixels of the same color in hazy image depicted in RGB color space are distributed along lines (haze-lines pass through corresponding points of atmospheric light, marked in black)

线各像素点到环境光照会聚点 A_c 的距离间接表示,并结合 $t_c(x)$ 分段平滑的特性进一步进行优化^[113-114]。相比于局部特征估计的方法,雾线的建立及求解过程避免了取块的操作,也不需要考虑取块大小、取块是否交叠等因素的影响,属于全局优化算法,鲁棒性及实用性更强,但计算复杂度会增大。此外,南京大学 Ju 等^[115]提出的将 Gamma 校正与 JM 模型相结合去散射的工作也属于基于全局特征的估计方法。

4) 基于 Retinex 模型的估计方法

Retinex 成像模型将传感器采集图像 S 看作场景反射率图像 R 与入射光照图像 L 的乘积,即 $S = R \cdot L$,其中,Retinex 模型^[116-120]一般假设 L 分段平滑,反映目标场景信息的反射率分量 R 的分段常数。在采集图像 S 中估计并去除入射光照 L 的影响,以还原场景反射率分量 R ,该方法适用于光照不均、低光照等自然环境的图像增强。葡萄牙和西班牙团队的 Galdran 等^[116]发现 JM 成像模型与 Retinex 模型之间存在如下联系:

$$1 - \frac{I_c(x)}{A_c} = t_c(x) \cdot \left[1 - \frac{J_c(x)}{A_c} \right], \quad (17)$$

其中 $t_c(x)$ 具有分段光滑特性,可对应于 Retinex 模型中的入射光照图像 L ,而 $1 - \frac{J_c(x)}{A_c}$ 存在着场景的复杂纹理信息,可对应于 Retinex 模型中的场景反射率图像 R ,JM 模型针对 $I_c(x)$ 求解 $J_c(x)$ 的过程和 Retinex 模型针对 $1 - \frac{I_c(x)}{A_c}$ 求解 $1 - \frac{J_c(x)}{A_c}$ 的过

程可以相互转化,即^[116]

$$\frac{JM[I_c(x)]}{A_c} = 1 - \text{Retinex} \left[1 - \frac{I_c(x)}{A_c} \right], \quad (18)$$

也就是说经过简单的图像变换后,基于 Retinex 模型求解场景反射率图的方法可全部应用于单帧图像去散射,如单尺度 Retinex 法^[121]、多尺度 Retinex 法^[122],还有近年来最广泛使用的 Retinex 优化方法^[117, 123-129]等。

上述 4 类方法基于单帧图像,从物理模型的角度实现了弹道光线的提取与目标物重建,也有研究者从非物理模型的角度出发,认为散射介质直接造成图像退化,从而将图像增强或图像复原的方法应用于单帧图像去散射或者作为物理模型重建结果的后处理手段,实现图像的对比度提升及细节纹理的增强,这些方法包括直方图均衡^[130-131]、直方图拉伸^[132-135]、反锐化掩模^[136]、白平衡校正^[137-139]、图像融合^[140-145]等。基于单帧图像的空域分离算法适用于自然光照或日常光照(被动光照)条件下,应用前景广,同时建立场景丰富的各类散射数据库,包括仿真雾^[146-150]、人工造雾^[151-153]和自然雾^[154]等,利用带参考^[154-155]和无参考^[156-159]两类散射图像质量评价方法测试不同散射重建算法的优劣。

为了便于单帧分离方法间的比较分析,首先在公开数据及文献中直接提取不同方法针对同一雾天散射场景的重建结果,如图 17 所示。进一步地,面向更复杂的浑浊水体散射场景,比较 UDCP^[102]、Robust Retinex^[117]和 Multi-scale Fusion^[105]三类最

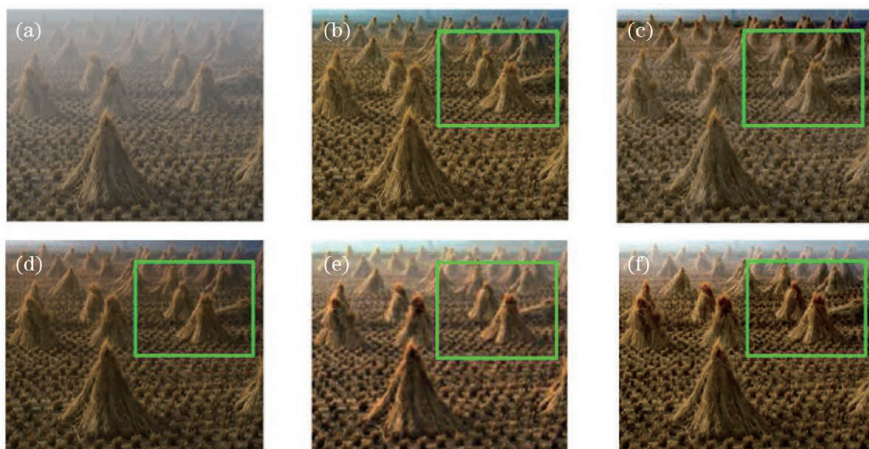


图 17 基于单帧图像的去散射结果对比,散射介质为雾气。(a)散射原图;(b)Tarel 等^[88]得到的实验结果;(c)Fattal 等^[93]得到的实验结果;(d)He 等^[82]得到的实验结果;(e)Galdran 等^[116]得到的实验结果;(f)Berman 等^[112]得到的实验结果

Fig. 17 Comparison of several de-scattering results based on single frame image (fog as the scattering medium). (a) Input hazy image; (b) experimental result obtained by Tarel *et al.*^[88]; (c) experimental result obtained by Fattal *et al.*^[93]; (d) experimental result obtained by He *et al.*^[82]; (e) experimental result obtained by Galdran *et al.*^[116]; (f) experimental result obtained by Berman *et al.*^[112]

适用于水体散射的方法,同时调节算法内部参数以实现最优的去散射效果。从图18中的实验结果可以发现,Multi-scale Fusion在颜色恢复和细节重建上效果最优,但得到的图像中存在部分重建噪点,Robust Retinex的重建效果次之,具有较强的重建噪声抑制功能,而UDCP的方法存在颜色恢复错误

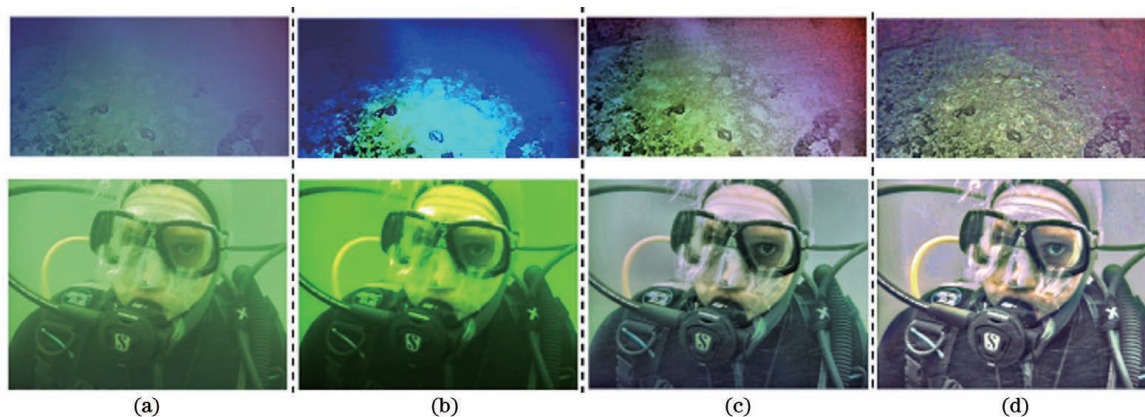


图18 基于单帧图像的去散射结果对比,散射介质均为浑浊的水。(a) 散射原图,第一行图像的模糊程度明显高于第二行;(b)~(d)经过参数调试后,运行UDCP^[102]、Robust Retinex^[117]和Multi-scale Fusion^[105]的实验结果

Fig. 18 Comparison of several de-scattering results obtained based on single frame image (turbid water is used as the scattering medium). (a) Input scattered images (the 1st row images are significantly more blurred than the 2nd row images); (b)-(d) experimental results of running UDCP^[102], Robust Retinex^[117], and Multi-scale Fusion^[105], after debugging

3.1.2 基于光场数据的分离方法

相比于单帧散射图像,基于光场的去散射方法利用光场采集装置实现对于散射光场的空间全记录,并进行重建。光场采集装置在获取二维空域信息的基础上,通过多视角采集获取了输入光线的角度信息,分为手持式光场相机^[160-161]和光场相机阵列^[162-168]两种。光场由于获取到更高维度的输入信息,基于光场的去散射方法的去散射效果相比于基于单帧图像的去散射算法有明显提升,依据其对高维光场输入的利用方式不同,基于光场的去散射方法可分为基于光场多视角融合的去散射方法和基于光场频域分析的去散射方法。但光场多视角融合的视差与场景的深度信息有关,而光场频域分析中频域滤波器的形状也受场景深度信息的影响,因此光场去散射方法与单帧类似,都是以场景的深度信息为桥梁实现的去散射,不过高维光场输入对场景深度的提取能力明显优于单帧图像。

光场多视角融合的思想最早由美国康涅狄格大学 Moon 等^[162-163]引入散射成像领域,利用弹道光 and 散射光在光场多视分辨中的特异性提取有效的弹道光信息,即由目标物上某点发射出的弹道光在不同视角上的强度响应是一致的,而散射光由于散射路

径的随机性,导致由目标物某点发出的沿不同方向传播的散射光在不同视角相机的强度响应不一致,两者的差异性可用于二者的分离。同时光场的多视角融合与场景的深度信息相关,在系统内外参固定的前提下,不同场景深度决定了不同融合视差,可将散射光场数据应用于待观测物的多深度重建。美国 Cho 等^[164]在光场多视点融合的基础上,假定各子视角图像中的散射光成分服从空域高斯分布,利用参数估计的方法先对各子视角进行去散射光的预处理,以增强算法的去散射性能,实现目标物灰度重建。在此方法的基础上,Cho 等^[166]依据光波长和能量的关系,定义不同颜色通道去散射后的信号强度,将基于光场多视融合的散射多深度灰度重建改进为彩色重建,如图19所示,但该方法依旧存在恢复色差。此外,频域滤波^[167]、暗通道先验^[168]等单帧去散射技术也被应用到多视散射光场各视角的预处理上,以提升光场多视角融合的去散射技术。美国 Shin 等^[165]也将 Cho 的方法推广至轴向分布的散射光场数据中,丰富了散射光场数据的采集方式。但上述几类方法并未将光场数据融合中所利用到的深度信息与 JM 模型中的深度信息结合,为有效利用光场数据中的深度先验,美国 Tian

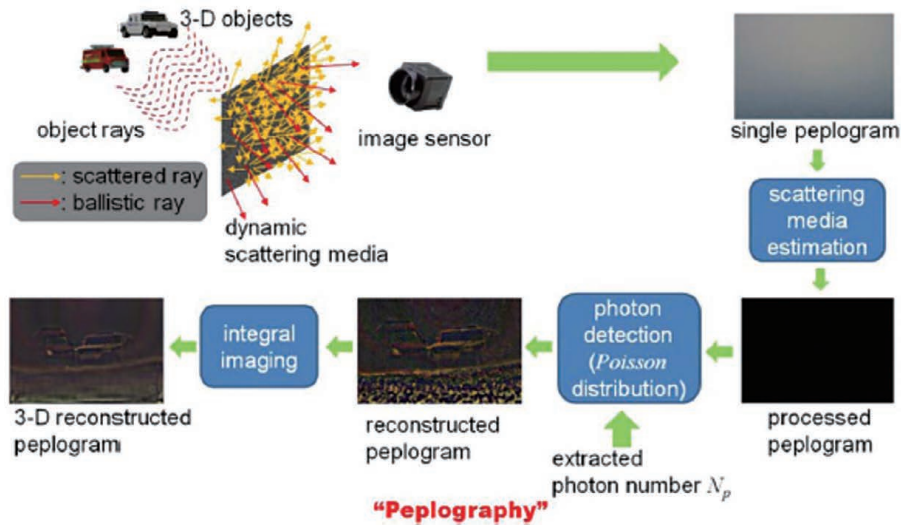


图 19 基于光子计数的光场数据去散射流程^[166]

Fig. 19 Scattering imaging based on photon counting via light field data^[166]

等^[160]利用手持式光场相机作为采集装置,将根据光场数据特性提取到的深度信息和JM成像模型相结合^[169],提出一套面向散射场景的光场深度估计模型,如图20所示,该方法在提升去散射能力的同时,也实现了对于场景深度信息的高质量获取。但该方案对于光源摆放的位置有较强的限定,同时手持式光场相机的高角度分辨率虽然便于深度信息估计,但是限制了成像距离,该方法仅能在目标物与相

机距离较近的情况下展现出好的去散射效果。除了通过估计获取场景深度信息外,美国Bajpayee等^[170]在复杂环境下利用激光雷达(Lidar)的点云数据为光场图像的融合提供深度信息指导,并将其应用于车载真实场景下的实时重建,该方法在面向低光照、遮挡物以及雪天等场景时展现出不错的效果,但受限于激光雷达的波长,无法应用在雾霾等散射场景中。

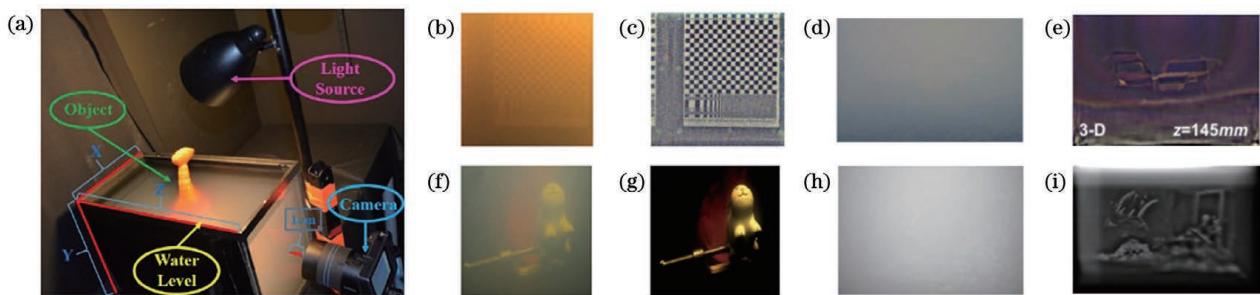


图 20 基于光场数据的去散射结果对比,散射介质均为浑浊的水。(a)Tian 等的实验装置图^[160]; (b)(c)Dansereau 等的输入散射图和去散射结果^[171]; (d)(e)Cho 等的实验结果^[166]; (f)(g)Tian 等的实验结果^[160]; (h)(i)Cho 等的实验结果^[164]

Fig. 20 Comparison of de-scattering removal results based on light field data (turbid water is used as the scattering medium). (a) Experimental setup of Tian *et al.*^[160]; (b)(c) input scattered image and corresponding de-scattering result of Dansereau *et al.*^[171]; (d)(e) experimental results of Cho *et al.*^[166]; (f)(g) experimental results of Tian *et al.*^[160]; (h)(i) experimental results of Cho *et al.*^[164]

对于采集到的光场信号,除利用光场融合技术外,澳大利亚悉尼大学 Dansereau 等^[171]利用弹道光 and 散射光在光场极线图(EPI)频域分布上的差异对两者进行分离,建立基于特定深度范围的弹道光 EPI 频域滤波器,从光场数据中截取来自目标物所在深度的弹道光线,削弱由其他深度层散射光带来的干扰,但滤波去散射作用不彻底,且散射多路径效

应也会导致场景深度可分辨能力下降,同时光场 EPI 频域的建立也需要手持式光场相机下的高角度分辨率作为保障,只适用于短距离散射场景。

以光场数据为输入的空域散射光分离方法相比于以单帧图像为输入的方法,在高维输入信息的辅助下,实现了去散射能力的提升,如图20所示,但该方法缺乏严谨的理论模型来描述光场多视角数据对

去散射的提升作用,特别是缺少能应用于实际场景下的光场去散射系统,同时光场角度分辨率与空间分辨率之间的相互制约关系^[172]也同样存在于光场去散射工作中。

3.2 时域散射光分离

携带有效信息的弹道光在散射介质中不改变传播方向,而散射光复杂的传播路径直接导致其在传播时间上与弹道光产生差异,如图 21 所示,时域散射光分离成像技术正是基于这种时间差异,实现对于散射光的分离和对于弹道光的有效增强,该类方法根据辨别时间的原理差异,可分为基于 OCT 的相关技术和超高时间分辨技术。

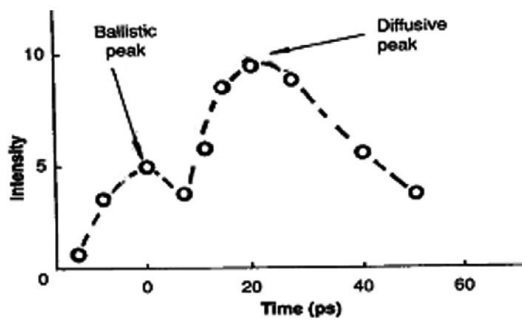


图 21 散射光子与弹道光光子到达时间差异^[173] (直径为 200 μm 的点光源透过散射介质的光子飞行时间曲线)

Fig. 21 Difference of arrival time between scattered photons and ballistic photons^[173] (time-of-flight curve of point source passing through scattering medium with 200 μm diameter)

3.2.1 基于光学相干断层扫描的成像技术

光学相干断层扫描(OCT)技术由美国 Huang 等^[174-175]提出,如图 22 所示,他们使用分光镜将低相干性的光源分成参考光束和经过散射介质的样本光束,样本光束中的散射光子受到散射多路径的影响,传播时间增加,在保证参考光束与样本光束光程差一致的前提下,这部分散射光子在被散射后失去了与参考光束的相干性,而样本光束中另一部分未经散射的弹道光与参考光束的光程差保持在相干范围内,同时携带样本的结构信息,其与参考光束在耦合器处形成干涉图案,记录样本信息。该系统可以通过改变参考光束的光程来调节目标成像层的深度,最终通过计算成像的方法恢复该层的样本信息。

2015 年,韩国 Kang 等^[176]发现干涉图像中也存在散射光的成分,如图 23 所示,当散射介质变厚且复杂时,多路径效应导致的散射光子光程延长不

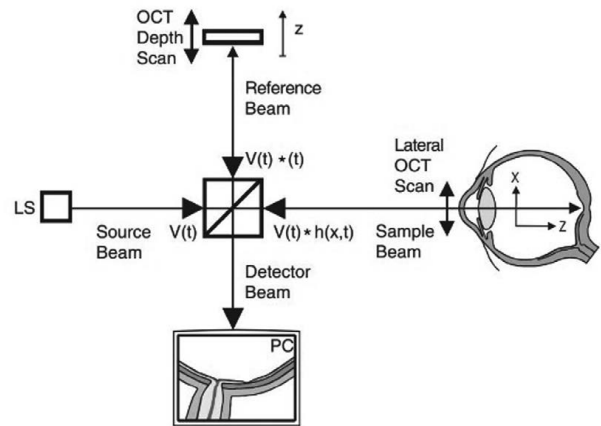


图 22 光学相干断层扫描技术原理图^[174-175]

Fig. 22 Schematic of optical coherence tomography technique^[174-175]

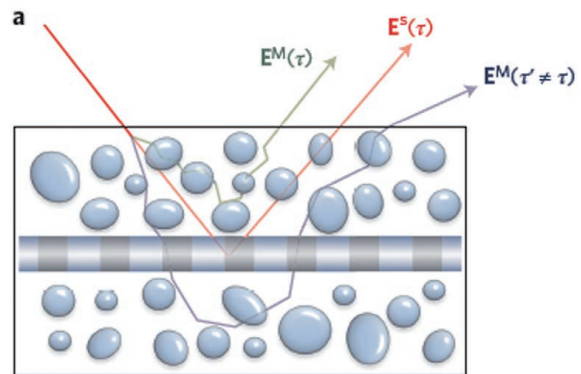


图 23 经过散射介质的反射光分类, $E^S(\tau)$ 表示弹道光,其中 τ 表示光在介质中的传输时间, $E^M(\tau)$ 表示传输时间和 $E^S(\tau)$ 相同的多次散射光,该部分光可以和参考臂光束形成干涉, $E^M(\tau')$ 表示传输时间和 $E^S(\tau)$ 不同的多次散射光,该部分光不能和参考臂光束形成干涉^[176]

Fig. 23 Classification of reflected waves passing through scattering medium. $E^S(\tau)$: electric field of a wave scattered once by a target where τ is the time of flight from the surface. $E^M(\tau)$: multiple-scattered waves with the same time of flight as the single-scattered waves, coherent with the reference beam. $E^M(\tau' \neq \tau)$: multiple-scattered waves with a time of flight that is different from τ , incoherent with the reference beam^[176]

仅会使无散射时光子光程与参考臂光程一致而形成干涉的弹道光丢失相干性,还会作用到部分无散射时小于参考臂光程的光子上,造成原本不相干的光子间形成干涉,引入成像干扰,降低重建目标物的信噪比。为此, Kang 等在传统 OCT 技术基础上,利用弹道光经物体反射后其各空间频率分量的变

化和目标物频谱分量存在一一对应关系的特点多帧累加弹道光,进一步提高弹道光在 OCT 方法中的占比,形成弹道光累积(CASS)算法,在 11.5 倍于散射自由程的介质中实现空间分辨率为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的成像精度(深度分辨率可达 $35\ \mu\text{m}$ 左右)。为了进一步提升成像深度和对厚散射介质的适应性,韩国 Jeong 等^[177]改进 CASS 算法,将样本光束沿散射介质弹道光保留比例最高的“本征通道”入射或利用时间选通的干涉条纹作为反馈信号,指导散射介质的波前调制^[178],使得入射光线的能量尽可能多地被传输到物体表面,提升反射光强度,以此实现对比度及清晰度的进一步提升。另外,法国 Badon 等^[179]进一步通过矩阵分析的方式实现了更大的成像深度,但成像目标物的复杂度有所降低。

除了干涉图像上的残余散射光之外,厚散射介

质还会在光线传输过程中引入畸变和成像像差,进而影响成像结果。为了进一步提升 CASS 算法的重建质量和对生物样本的适用性,2017 年,韩国 Kang 等^[180]吸收了波前调制技术的思想,将相位校正因子引入到成像算法中,以纠正成像光路上的畸变带来的成像像差,形成闭环弹道光累积(CLASS)算法,在成像深度 7 倍于散射自由程的情况下实现非侵入式成像,空间分辨率可达 $600\ \text{nm}$,后续通过以扫描振镜(GM)替换空间光调制器(SLM)的方式,将单深度的成像速度从 min 量级缩短到 $0.22\ \text{s}$ ^[181],并将该方法成功应用到透过活体小鼠完整头骨的神活动观测上^[182],如图 24 所示。此外,法国 Badon 等^[183]也提出失真矩阵的概念,用于厚散射介质在 OCT 成像中的相位补偿,在 10 倍于散射平均自由层的介质深度下实现接近衍射极限分辨率的清晰成像。

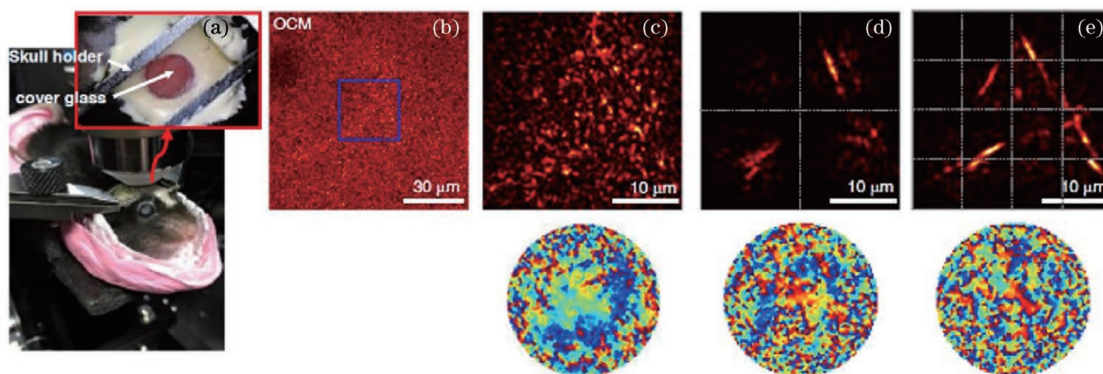


图 24 将 CLASS 算法应用于完整活体鼠脑观测,鼠脑头骨厚度为 $125\sim 150\ \mu\text{m}$ ^[182]。(a) 实验装置图;(b) 利用光学相干显微镜观测鼠脑下方 $200\ \mu\text{m}$ 有髓神经纤维的图像;(c) 利用 CLASS 算法得到的观测结果(上)和对应的像差图(下),对应于图 24(b)中虚线框 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 的区域;(d)(e) 分别对应 CLASS 算法在 2×2 和 4×4 子块下的观测结果及对应的像差图

Fig. 24 CLASS algorithm was applied to *in vivo* imaging through intact mouse skull with thickness of $125\sim 150\ \mu\text{m}$ ^[182].

(a) Experimental setup; (b) intensity image of myelinated fibers at a $200\text{-}\mu\text{m}$ depth from the upper surface of the skull obtained by optical coherence microscopy; (c) CLASS intensity image (upper) and the corresponding aberration map (lower) for a $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ area marked by the dotted box in Fig. 24(b); (d)(e) CLASS intensity images with their representative aberration maps for one of the 2×2 and 4×4 subregions, respectively

总体来说,基于 OCT 技术的成像方法能面向散射效应较强的介质实现非侵入式成像,且在成像速度和分辨率方面满足活体生物观测的需求,是生物散射成像领域里程碑式的新工作,但这类方法也存在装置复杂度较高、操作困难,且对成像光源有低相干性要求等缺点,无法实现轻型化及高环境鲁棒性。

3.2.2 超高时间分辨技术

与 OCT 技术利用光程差辨别时间差异不同,利用超高时间分辨的成像设备同样可以在不引入参考臂光路的情况下记录光子的到达时间或飞行路

径,进而通过解析时间维度信息,从区分光子到达时间、建模弹道光飞行路径和分析幅度调制光相位三种途径分离散射光。

1) 区分光子到达时间的方法

以窄带脉冲光源照射待观测目标,1991 年,美国 Wang 等^[173]首先证明了区分光子到达时间方法的有效性,如图 25(a)和图 26(a)~(c)所示,他们使用皮秒量级的超快门装置采集最早到达传感器的弹道光,通过设置门控来屏蔽散射光,从而通过提升弹道光比例增强了图像对比度,最终实现散射成像。后续法国 Laurenzis 等^[184]依据物体所在深度动态

调整快门系统的门控起点与门控宽度,实现了高深度分辨率的三维散射成像,如图 26(d)~(f)所示。但是该类方法由于屏蔽掉大部分散射光,导致传感器所接收到的光子总数较少,成像对比度低,无法应用到更复杂的散射介质中。

为进一步提升成像对比度,美国 Redo-Sanchez 等^[185]利用太赫兹时域测量技术[图 25(c)和图 26(g)、(h)],获取了更高时间分辨率的瞬态图像(同时包含二维空间和一维时间信息),并利用瞬态图像上空间各位置点的时域脉冲确定深度信息及成像,得益于更高分辨率的数据和更有效的动态门控机制,最终获得更高对比度的重建结果,实现了有遮

挡条件下的文字内容恢复。英国 Maccarone 等^[186]采用单光子雪崩二极管阵列(SPAD)在无物体时采集瞬态图像^[187],然后将其和有物体时采集的瞬态图像进行时域互相关,利用相关性差的区域可表征物体位置信息这一特征重建物体位置,实现了 8 倍传输平均自由程下的图像深度重建。美国 Satat 等^[188]利用 SPAD,逐像素记录光子在经过散射介质后的完整时域信息,如图 25(b)和图 26(i)~(k)所示,并利用参数估计的方法从中提取呈时域 Gaussian 分布的弹道光成分,相比超快门的成像方式,全部的光子信息被记录下来,成像对比度及三维重建能力得到极大提升。

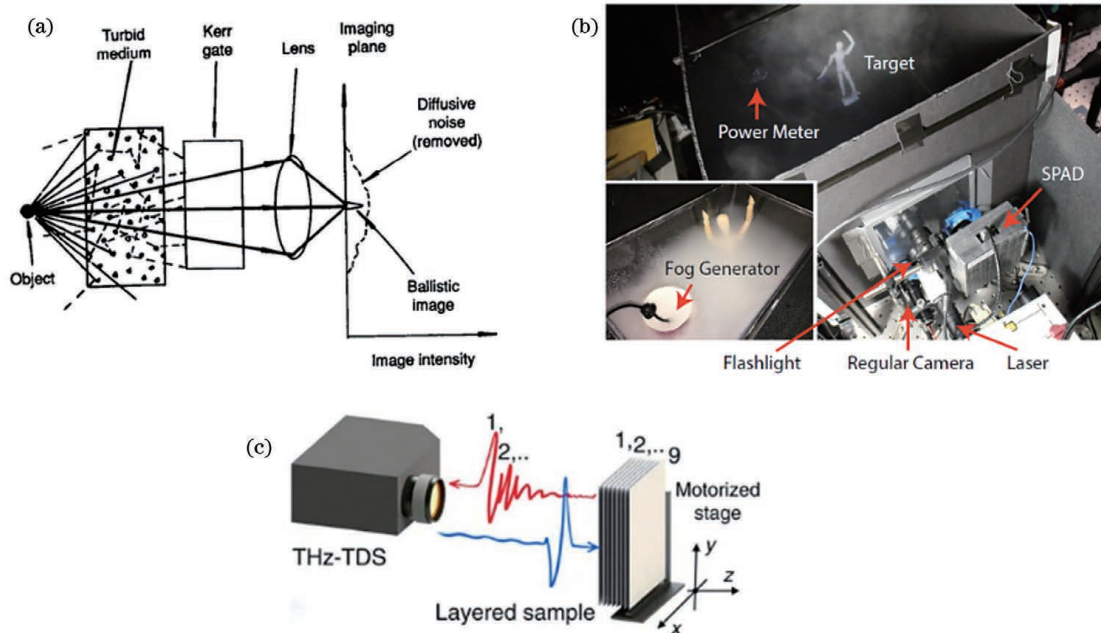


图 25 区分光子到达时间的成像装置。(a)基于超快门的成像装置^[173]; (b)基于 SPAD 的成像装置^[185]; (c)基于太赫兹相机的成像装置^[188]

Fig. 25 Setups for distinguishing arrival time of photons. (a) Setup based on Kerr gate^[173]; (b) setup based on SPAD^[185]; (c) setup based on terahertz camera^[188]

2) 建模弹道光子飞行路径的方法

该类方法以窄带脉冲激光作为场景主动光源,结合超快光子探测器(如条纹相机^[189-190]、单光子雪崩二极管^[191-199])生成时间相关的瞬态数据,如图 27 所示。由于瞬态图像中包含光子的飞行时间信息,可结合场景中特殊的几何特征对光子的飞行路径进行空时建模。根据建模的算法不同,建模弹道光子飞行路径的方法主要分为反投影算法^[189, 191-192]、线型优化算法^[193, 200]、非线性重建算法^[194, 196]、合成分析与几何重建算法^[195, 199]、波传播重建算法^[197-198]。建模弹道光子飞行路径的方法在有效分离弹道光和散射光的同时,也能重建目标的高分辨率三维图像,

但由于重建过程对场景的几何约束依赖性较强,这类方法目前只适用于处理一些特定的简单散射场景,如漫反射墙面,常应用于非视域场景中。

3) 分析幅度调制光相位的方法

在主动幅度调制光源照射的散射场景中,传感器所接收到的信号幅值也随调制光源而不断变化,但散射多径效应会导致传感器接收信号中的弹道光部分和散射光部分具有不同的相位滞后,这种相位延迟对应于光传播时间,可通过对调制信号和接收信号进行互相关操作来估计。如图 28 所示,调制光源为正弦信号 $\sin(\omega + \varphi)$,由于弹道光子和散射光子的传播路径不同,两类光子所对应的采集信号

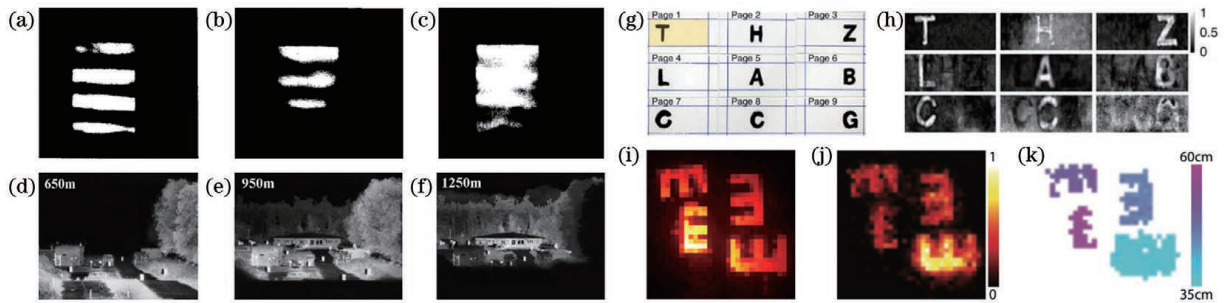


图 26 区分光子到达时间的成像结果。(a)~(c)Wang 等^[173]重建薄生物组织遮挡下的条纹图像时的参考图像、无延时门控重建结果和有延时重建结果;(d)~(f)Laurenzis 等^[184]在宏观雾天不同的深度下的重建结果;Redo-Sanchez 等^[185]重建重叠纸张中的文字时所用的(g)参考图像和(h)重建结果;(i)~(k)Satat 等^[188]在动态散射场景中的参考图像、重建结果和重建深度

Fig. 26 Imaging results obtained by distinguishing arrival time of photons. (a)–(c) Reference image, gating reconstruction results without delay, and reconstruction results with delay when Wang *et al.* ^[173] reconstructed fringe image under thin biological tissue; (d)–(f) reconstructed results at depths in foggy days obtained by Laurenzis *et al.* ^[184]; (g) reference images and (h) reconstruction results used by Redo-Sanchez *et al.* ^[185] for text on overlapping paper; (i)–(k) reference image, reconstruction result, and reconstructed depth map used by Satat *et al.* ^[188] in dynamic scattering scenes

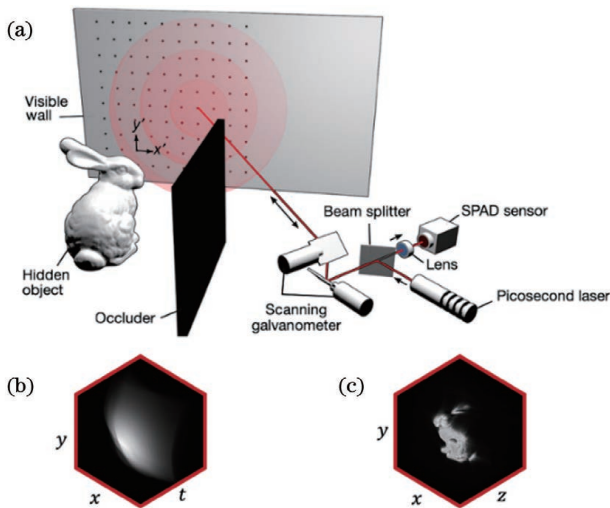


图 27 建模弹道光子飞行路径的成像原理^[194]。(a)瞬态成像系统;(b)瞬态图像;(c)三维重建结果

Fig. 27 Imaging principle for modeling ballistic photon flight paths^[194]. (a) Transient imaging system; (b) transient image; (c) 3D reconstruction result

$[\sin(\omega + \varphi_1)$ 和 $\sin(\omega + \varphi_2)]$ 随时间的变化具有不同的相位延迟,利用这种相位差可实现分离,同时利用多频率多初始相位的调制光重复实验,可消除相位以 2π 为周期造成的相位歧义。基于此原理,2014 年加拿大 Heide 等^[201]在多频率多相位调制光的照射下,利用光子混频器^[200, 202]同样实现了三维瞬态图像的获取,实现了体散射下的目标物重建。虽然多频多相位的采集限制了其对动态场景的分辨能力,且光子混频器配合调制光的时间分辨能力不如

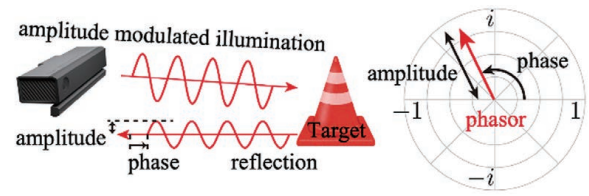


图 28 调制光源照射下,不同光子飞行路径使得接收信号的相位相比参考信号有所延迟^[203]

Fig. 28 Phase of received signal is delayed compared to reference signal due to different time-of-flight paths under modulated light source irradiation^[203]

窄带脉冲配合超快光子探测器,但前者的造价远低于后者,同时前者还具备一定的环境鲁棒性。2019 年,日本 Muraji 等^[203]在采集多频率的数据时发现,如果两个像素的深度相同,则散射介质对其造成的相位差异相对于调制频率是恒定的,否则会随调制频率的变化而变化。根据这一特征,可从测量图像中提取具有相同深度的像素,然后通过像素聚类恢复场景的深度信息,以提升算法在散射场景中的深度重建能力,如图 29 所示。

此外,在特定单一频率调制光源照明的条件下,Ramachandran 课题组采集静态或规则运动目标物经过动态散射场景的视频序列,在视频序列中弹道光成分随时间的变化频率与调制光频率保持一致,而散射光成分因受动态散射介质的影响而产生随机且混乱的时间变化,根据这一差异,以正交解调的方式降低视频序列中散射光子的比重,从而达到去散射的目的^[204],如图 30 所示,并可以针对不同散射介

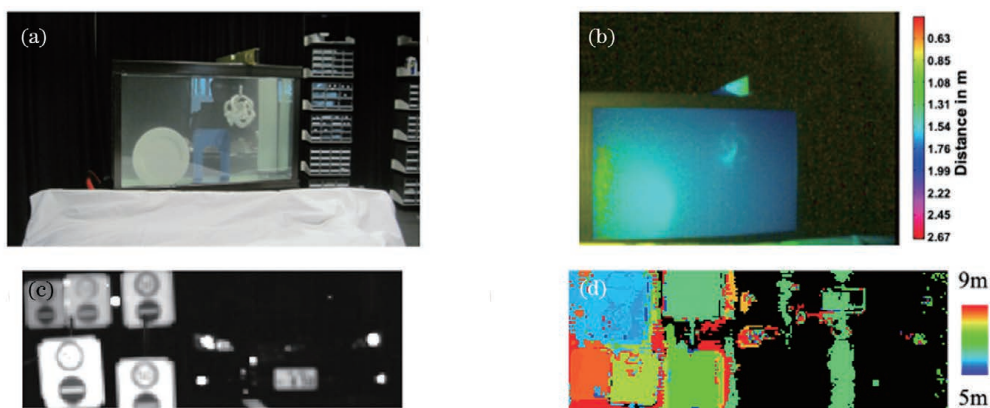


图 29 基于幅度调制光的散射成像与深度重建。(a)(b)Heide 等^[201]的实验场景(散射介质为浑浊水体)和重建结果;
(c)(d)Muraji 等^[203]在室外雾天的实验场景和深度重建结果

Fig. 29 Scattering imaging and depth reconstruction based on amplitude modulated light. (a) (b) Experimental scene (scattering medium is turbid water) and reconstruction result for experiment conducted by Heide *et al.*^[201]; (c)(d) experimental scene and deep reconstruction result in outdoor foggy days for experiment conducted by Muraji *et al.*^[203]

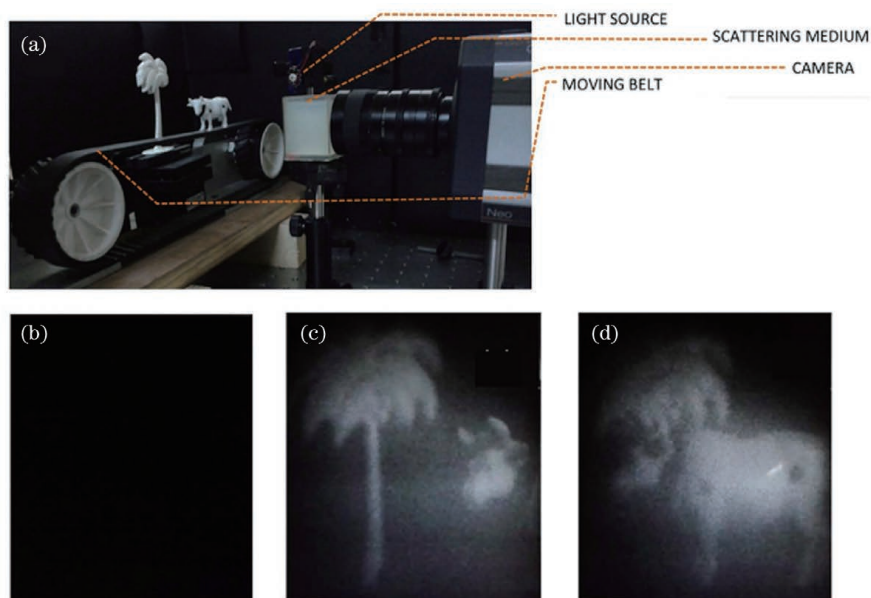


图 30 基于正交调制解调的散射成像^[204]。(a)采集装置原理图(散射介质等效为雾气,物体在传送带上运动,采集帧率为 100 frame/s);(b)采集图像;(c)重建示例帧 1;(d)重建示例帧 2

Fig. 30 Scattering imaging based on quadrature lock-in discrimination^[204]. (a) Schematic diagram of acquisition device (the scattering medium equals the fog, the object moves on the conveyor belt, and the acquisition frame rate is 100 frame/s); (b) captured image; (c) reconstruction 1; (d) reconstruction 2

质改变调制频率,优化成像效果。后续该课题组以电光晶体作为快速正弦光传输门代替了传统电控幅度调制光^[205],用光学方式实现了快速正交解调,提升了成像速度,但该类方法不具有对静态散射介质的成像能力。

区分光子到达时间、建模弹道光子飞行路径和分析幅度调制光相位这三类方法在重建原理上是一致的,都是利用主动光源照射下高分辨空时数据实

现成像和场景深度信息重建,在动态体散射介质中展现出极佳的性能,这其中区分光子到达时间的方法在系统层面实现了弹道光子和散射光子的简单分离,建模飞行路径的方法考虑了更多的场景几何因素,形成了对于光子到达时间差异的进一步解释,而分析幅度调制光相位的方法具有更高的环境鲁棒性。但这三类方法都属于主动成像,其特定的照明方式和相对复杂的时域采集设备都限制了超高时间

分辨技术的有效作用距离和适用范围。

4 展望与总结

将现有散射成像技术在光照方式、采集设备要求、先验信息辅助、散射介质强弱及类型、视场范围及适用场景等方面进行分析比较,如图 31 所示。从

整体来看,利用散射光的方法往往需要额外引入先验信息辅助成像,如成像响应的标定、散射系数的获取等,但成像装置相对简单。而在同等散射强度下,分离散射光的方法却对成像装置的精度和复杂度要求更高,对先验信息的使用则弱于利用散射光的成像方法。

Scattering imaging techniques	Illumination	Imaging device	Prior information	Scattering conditions	Scattering complexity	Photon utilization	Field of view	Application scenarios
Spatial characteristics utilization	Laser or biological fluorescence	Camera	Wave-front shaping: Feedback signal Deconvolution: PSF Correlation: No	Mainly static media	High	Ballistic and scattered	Limited by the memory effect theory, less than $\pm 3^\circ$	Ground glass or tissue
Atmospheric transfer equation	Only glowing target	Camera	Atmospheric scattering coefficients or atmospheric PSF	Dynamic fog	Low	Ballistic and partly scattered	Unlimited	Fog
Transmission matrix calibration	Spatial modulated light	Camera	Complete transmission matrix	Static media	Extremely high	Ballistic and scattered	Limited by the size of transmission matrix	Ground glass, tissue, ...
Spatial separability utilization	Passive light	Camera	No	Static or dynamic media	Medium	Only ballistic	Unlimited	Fog, turbid water, low-light-level conditions
OCT based	Low-coherence light	Camera	No	Static or dynamic media	Extremely high	Accumulated ballistic	Limited by the OCT equipment	Thick tissue, in-vivo measurement
Time-resolved	Pulsed or amplitude modulated light	High-time-resolution camera	No	Static or dynamic media	High	Only ballistic	Limited by the time-resolved light source or camera	Fog, turbid water, paper or diffuse reflection on wall

图 31 各类散射成像技术的性能比较

Fig. 31 Comparison of various scattering imaging techniques

对各类方法进行深入比较分析,空域散射光分离方法对光照方式的限制最小,采集装置最简单,环境鲁棒性最高,适用于自然光照场景,但由于弹道光 and 散射光在空域的差异性不明显,该方法的去散射能力较弱;而大气传输方程的去散射能力虽与空域分离法近似,但一般应用在目标物自发光的散射场景。为了能在更复杂的散射场景实现清晰成像,时域散射光分离的方法牺牲了对装置简易性的要求,OCT 技术、区分光子到达时间、建模光子飞行路径、分析调制光相位 4 种高时间分辨去散射的方式被提出;传输矩阵标定的方法牺牲了无先验性,在获得分析介质散射特性能力的同时,减少了方法适用场景;而利用散射介质空域特性的方法则主要牺牲了视场范围。这些方法在各自的适用场景,包括去雾、透过生物组织成像、在浑浊水体中成像、墙面反射或透过面散射介质成像等方面都展现出优势,但也体现了去散射能力强弱与成像装置复杂性、适用性和先验性之间的矛盾,缺乏统一有效的去散射方法,因此如何在无先验的情况下面向散射效应更强的介质,利用更简易的装置实现清晰成像,是散射成像领域的研究热点。现有成像技术也都在算法和装置等方面

努力提升其普适性,扩大应用范围,同时也向更复杂的散射环境努力,尽力减小对先验信息的依赖。此外,引入其他模态的传感器数据(如红外相机、毫米波雷达、激光雷达等),与相机获取的数据进行融合,也是解决散射成像问题的新思路。

对于散射成像这项研究来说,各类算法各有优劣,但也正是由于缺乏统一且有效的成像方式,无数科研工作者们才能够对各类方法取长补短,融合创新,散射成像领域百花齐放,各类新方法新思路层出不穷,在面向实际应用的前提下不断探索,推陈出新。

参 考 文 献

- [1] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 011005.
朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 011005.
- [2] Ji X Y. Coded photography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111012.
季向阳. 编码摄影[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111012.

- [3] Ntziachristos V. Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology[J]. *Nature Methods*, 2010, 7(8): 603-614.
- [4] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 020001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 020001.
- [5] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [6] 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.
- [7] Li X J, Tang W S, Yi W J, et al. Review of optical scattering imaging technology with wide field of view and long distance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401012.
李修建, 唐武盛, 衣文军, 等. 宽视场远距离光学散射成像技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401012.
- [8] Guy S. All photons imaging time-resolved computational imaging through scattering for vehicles and medical applications with probabilistic and data-driven algorithms[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2019: 43-55.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Freund I. Looking through walls and around corners [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1990, 168(1): 49-65.
- [12] Feng S, Lee P A. Mesoscopic conductors and correlations in laser speckle patterns [J]. *Science*, 1991, 251(4994): 633-639.
- [13] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [14] Katz O, Small E, Bromberg Y, et al. Focusing and compression of ultrashort pulses through scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 372-377.
- [15] 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.
- [16] Mosk A P, Lagendijk A, Leroose G, et al. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(5): 283-292.
- [17] Vellekoop I M, Mosk A P. Phase control algorithms for focusing light through turbid media[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(11): 3071-3080.
- [18] Vellekoop I M, Aegerter C M. Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1245-1247.
- [19] Conkey D B, Brown A N, Caravaca-Aguirre A M, et al. Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4840-4849.
- [20] He H X, Guan Y F, Zhou J Y. Image restoration through thin turbid layers by correlation with a known object [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12539-12545.
- [21] Zhang X L, Kner P. Binary wavefront optimization using a genetic algorithm [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125704.
- [22] Boniface A, Blochet B, Dong J, et al. Noninvasive light focusing in scattering media using speckle variance optimization [J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1381-1385.
- [23] Stern G, Katz O. Noninvasive focusing through scattering layers using speckle correlations [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(1): 143-146.
- [24] Li Q Y, Zhaxi B M, Chen Z Y, et al. Focusing of laser through strong scattering media with different thicknesses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111016.
李琼瑶, 扎西巴毛, 陈子阳, 等. 激光通过不同厚度的强散射介质的聚焦 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111016.
- [25] Wu Y L. The research of focusing and imaging through scattering media [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 64-74.
吴雨霖. 透过强散射介质聚焦与成像方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 64-74.
- [26] Xu X, Liu H, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 154.
- [27] Si K, Fiolka R, Cui M. Fluorescence imaging beyond the ballistic regime by ultrasound pulse guided digital phase conjugation [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6

- (10): 657-661.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Edrei E, Scarcelli G. Memory-effect based deconvolution microscopy for super-resolution imaging through scattering media [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33558.
- [31] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55-59.
- [32] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *The Astronomical Journal*, 1974, 79: 745.
- [33] Chen Q Q, He H X, Xu X Q, et al. Memory effect based filter to improve imaging quality through scattering layers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1-10.
- [34] Xie X S, Zhuang H C, He H X, et al. Extended depth-resolved imaging through a thin scattering medium with PSF manipulation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4585.
- [35] Antipa N, Kuo G, Heckel R, et al. DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging [J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1-9.
- [36] Monakhova K, Yanny K, Aggarwal N, et al. Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array[J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1298-1307.
- [37] Han W, Zhang Y, Xin Y. Imaging and tracking moving objects through scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1211001.
韩伟, 张也, 辛煜. 透过散射介质对运动物体的成像与追踪[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1211001.
- [38] 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.
- [39] Sahoo S K, Tang D L, Dang C. Single-shot multispectral imaging with a monochromatic camera [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1209-1213.
- [40] Xu X Q, Xie X S, Thendiyammal A, et al. Imaging of objects through a thin scattering layer using a spectrally and spatially separated reference [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15073-15083.
- [41] 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.
- [42] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [43] Miao J W, Charalambous P, Kirz J, et al. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens[J]. *Nature*, 1999, 400(6742): 342-344.
- [44] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]//Dainty J C. *Laser speckle and related phenomena*. Heidelberg: Springer, 1975, 9: 9-75.
- [45] Wu T F, Katz O, Shao X P, et al. Single-shot diffraction-limited imaging through scattering layers via bispectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5003-5006.
- [46] Cua M, Zhou E H, Yang C. Imaging moving targets through scattering media[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3935-3945.
- [47] Shi Y Y, Liu Y W, Sheng W, et al. Single-shot video of three-dimensional moving objects through scattering layers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2211003.
施瑶瑶, 刘友文, 盛伟, 等. 透过散射层对运动三维物体的单次曝光录像[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2211003.
- [48] Li X H, Greenberg J A, Gehm M E. Single-shot multispectral imaging through a thin scatterer [J]. *Optica*, 2019, 6(7): 864-871.
- [49] Wang X, Liu H L, Hu C Y, et al. Transmissive imaging through scattering media based on multi-wavelength illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1611002.
王歆, 刘红林, 胡晨昱, 等. 基于多波长照明的透过散射介质成像 [J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1611002.
- [50] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Exploiting scattering media for exploring 3D objects[J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(2): e16219.
- [51] Tang D, Sahoo S K, Tran V, et al. Single-shot large field of view imaging with scattering media by spatial demultiplexing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7533-7538.
- [52] Li L, Li Q, Sun S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial-correlation-achieved point-spread-function[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1670-1673.
- [53] Guo C F, Liu J T, Li W, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range by exploiting prior information[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 203-208.
- [54] Chen M J, Liu H L, Liu Z T, et al. Expansion of the

- FOV in speckle autocorrelation imaging by spatial filtering[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5997-6000.
- [55] Gardner D F, Divitt S, Watnik A T. Ptychographic imaging of incoherently illuminated extended objects using speckle correlations[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): 3564-3569.
- [56] Wang X Y, Jin X, Li J Q, et al. Prior-information-free single-shot scattering imaging beyond the memory effect[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1423-1426.
- [57] Wang X Y, Jin X, Li J Q. Blind position detection for large field-of-view scattering imaging [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 920-928.
- [58] Sadot D, Rosenfeld A, Shuker G, et al. High-resolution restoration of images distorted by the atmosphere, based on an average atmospheric modulation transfer function[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1799-1807.
- [59] Yitzhaky Y, Dror I, Kopeika N S. Restoration of atmospherically blurred images using weather-predicted atmospheric Modulation Transfer Function (MFT)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2828: 386-396.
- [60] Cong B. Encoding neural networks to compute the atmospheric point spread function [C] // *Proceedings International Conference on Information Technology: Coding and Computing (Cat. No. PR00540)*, March 27-29, 2000, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2000: 344-349.
- [61] Narasimhan S G, Nayar S K. Shedding light on the weather[C] // *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003. *Proceedings*, June 18-20, 2003, Madison, WI, USA. New York: IEEE Press, 2003.
- [62] Narasimhan S. Models and algorithms for vision through the atmosphere [D]. New York: Columbia University, 2004: 124-126.
- [63] Metari S, Deschenes F. A new convolution kernel for atmospheric point spread function applied to computer vision [C] // *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, October 14-21, 2007, Rio de Janeiro, Brazil. New York: IEEE Press, 2007: 1-8.
- [64] Wang R, Li R, Sun H Y. Haze removal based on multiple scattering model with superpixel algorithm [J]. *Signal Processing*, 2016, 127: 24-36.
- [65] Lyons A, Tonolini F, Boccolini A, et al. Computational time-of-flight diffuse optical tomography[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(8): 575-579.
- [66] Lindell D B, Wetzstein G. Three-dimensional imaging through scattering media based on confocal diffuse tomography [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4517.
- [67] 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.
- [68] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [69] Gong C M. Research on focusing and image recovery algorithm for random scattering optical system [D]. Xi'an: Xidian University, 2017: 88-94. 龚昌妹. 随机散射光学系统的聚焦与图像恢复算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 88-94.
- [70] Hofer M, Brasselet S. Manipulating the transmission matrix of scattering media for nonlinear imaging beyond the memory effect[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2137-2140.
- [71] 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.
- [72] Yu H, Hillman T R, Choi W, et al. Measuring large optical transmission matrices of disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(15): 153902.
- [73] Lee K R, Park Y K. Exploiting the speckle-correlation scattering matrix for a compact reference-free holographic image sensor[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13359.
- [74] 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.
- [75] Mounaix M, Andreoli D, Defienne H, et al. Spatiotemporal coherent control of light through a multiple scattering medium with the multispectral transmission matrix [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 253901.
- [76] Mounaix M, Defienne H, Gigan S. Deterministic light focusing in space and time through multiple scattering media with a Time-Resolved Transmission Matrix approach[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(4): 041802.
- [77] McGlamery B L. A computer model for underwater camera systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 0208: 221-231.
- [78] Yang M, Hu J T, Li C Y, et al. An in-depth survey of underwater image enhancement and restoration

- [J]. IEEE Access, 2019, 7: 123638-123657.
- [79] Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(2): 101-111.
- [80] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 570-587.
- [81] Chao L, Wang M. Removal of water scattering[C]// 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, April 16-18, 2010, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2010: V2-35-V2-39.
- [82] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [83] Wu X J, Li H S. A simple and comprehensive model for underwater image restoration [C] // 2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), August 26-28, 2013, Yinchuan, China. New York: IEEE Press, 2013: 699-704.
- [84] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C] // Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662), June 15, 2000, Hilton Head, SC, USA. New York: IEEE Press, 2000: 598-605.
- [85] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [86] Fattal R. Single image dehazing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [87] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C] // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [88] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [89] Wang W C, Yuan X H, Wu X J, et al. Fast image dehazing method based on linear transformation[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(6): 1142-1155.
- [90] Xiao C X, Gan J J. Fast image dehazing using guided joint bilateral filter[J]. The Visual Computer, 2012, 28(6/7/8): 713-721.
- [91] Ju M Y, Ding C, Zhang D Y, et al. BDPK: Bayesian dehazing using prior knowledge[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(8): 2349-2362.
- [92] Ju M Y, Ding C, Zhang D Y, et al. Gamma-correction-based visibility restoration for single hazy images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(7): 1084-1088.
- [93] Fattal R. Dehazing using color-lines [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 34(1): 13.
- [94] Zhu Q S, Mai J M, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [95] Bui T M, Kim W. Single image dehazing using color ellipsoid prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(2): 999-1009.
- [96] Peng Y T, Cao K M, Cosman P C. Generalization of the dark channel prior for single image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2856-2868.
- [97] Kim S E, Park T H, Eom I K. Fast single image dehazing using saturation based transmission map estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 1985-1998.
- [98] Lu Z W, Long B Y, Yang S Q. Saturation based iterative approach for single image dehazing [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020, 27: 665-669.
- [99] Raikwar S C, Tapaswi S. Lower bound on transmission using non-linear bounding function in single image dehazing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 4832-4847.
- [100] Carlevaris-Bianco N, Mohan A, Eustice R M. Initial results in underwater single image dehazing [C] // OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE, September 20-23, 2010, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [101] Drews P, Jr, do Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, December 2-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 825-830.
- [102] Drews P L J, Nascimento E R, Botelho S S C, et al. Underwater depth estimation and image restoration based on single images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2016, 36(2): 24-35.
- [103] Chiang J Y, Chen Y C. Underwater image enhancement by wavelength compensation and dehazing[J]. IEEE Transactions on Image

- Processing, 2012, 21(4): 1756-1769.
- [104] Raju D, Babu J S. Removal of artificial light source and image de-hazing in under water images using WCID algorithm[J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2014, 3(3): 715-717.
- [105] Ancuti C, Ancuti C O, de Vleeschouwer C, et al. Multi-scale underwater descattering [C] // 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), December 4-8, 2016, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2016: 4202-4207.
- [106] Lin J Q, Yu M, Xu H Y, et al. Underwater image restoration based on light attenuation prior and background light fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810013.
林继强, 郁梅, 徐海勇, 等. 基于光衰减先验和背景光融合的水下图像复原[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810013.
- [107] Ancuti C, Ancuti C O, de Vleeschouwer C, et al. Day and night-time dehazing by local airlight estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 6264-6275.
- [108] Marques T P, Branzan Albu A. L2UWE: a framework for the efficient enhancement of low-light underwater images using local contrast and multi-scale fusion [C] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 14-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 2286-2295.
- [109] Song W, Wang Y, Huang D M, et al. Enhancement of underwater images with statistical model of background light and optimization of transmission map[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(1): 153-169.
- [110] Mandal S, Rajagopalan A N. Local proximity for enhanced visibility in haze[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 2478-2491.
- [111] Ju M Y, Ding C, Ren W Q, et al. IDE: image dehazing and exposure using an enhanced atmospheric scattering model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 2180-2192.
- [112] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing [C] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1674-1682.
- [113] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Single image dehazing using haze-lines [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(3): 720-734.
- [114] Berman D, Levy D, Avidan S, et al. Underwater single image color restoration using haze-lines and a new quantitative dataset [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(8): 2822-2837.
- [115] Ju M Y, Ding C, Guo Y J, et al. IDGCP: image dehazing based on gamma correction prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 3104-3118.
- [116] Galdran A, Bria A, Alvarez-Gila A, et al. On the duality between retinex and image dehazing [C] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 8212-8221.
- [117] Li M D, Liu J Y, Yang W H, et al. Structure-revealing low-light image enhancement via robust retinex model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2828-2841.
- [118] Land E H. The retinex [J]. American Scientist, 1964, 52(2): 247-264.
- [119] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [120] Horn B K P. Determining lightness from an image [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1974, 3(4): 277-299.
- [121] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [122] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [123] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [124] Fu X Y, Liao Y H, Zeng D L, et al. A probabilistic method for image enhancement with simultaneous illumination and reflectance estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 4965-4977.
- [125] Ren X T, Li M D, Cheng W H, et al. Joint enhancement and denoising method via sequential decomposition [C] // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 27-30, 2018, Florence, Italy. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [126] Gu Z H, Li F, Fang F M, et al. A novel retinex-based fractional-order variational model for images

- with severely low light [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 3239-3253.
- [127] Ren X T, Yang W H, Cheng W H, et al. LR3M: robust low-light enhancement via low-rank regularized retinex model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 5862-5876.
- [128] Tang M, Xie F Y, Zhang R, et al. A local flatness based variational approach to retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 7217-7232.
- [129] Xu J, Hou Y K, Ren D W, et al. STAR: a structure and texture aware retinex model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 5022-5037.
- [130] Hummel R. Image enhancement by histogram transformation [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1977, 6(2): 184-195.
- [131] Reza A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement [J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1): 35-44.
- [132] Iqbal K, Salam R A, Osman A, et al. Underwater image enhancement using an integrated colour model [J]. *IAENG International Journal of computer science*, 2007, 34(2): 239-244.
- [133] Iqbal K, Odetayo M, James A, et al. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method [C] // 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 10-13, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 1703-1709.
- [134] Ghani A S A, Isa N A M. Underwater image quality enhancement through composition of dual-intensity images and Rayleigh-stretching [J]. 2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), 2014: 219-220.
- [135] Ghani A S A, Isa N A M. Underwater image quality enhancement through integrated color model with Rayleigh distribution [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 27: 219-230.
- [136] Deng G. A generalized unsharp masking algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1249-1261.
- [137] Land E H. The retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108-128.
- [138] Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1980, 310(1): 1-26.
- [139] Weng C C, Chen H, Fuh C S. A novel automatic white balance method for digital still cameras [C] // 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 23-26, 2005, Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2005: 3801-3804.
- [140] Ancuti C, Ancuti C O, Haber T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion [C] // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 81-88.
- [141] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(8): 3271-3282.
- [142] Ancuti C O, Ancuti C, de Vleeschouwer C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(1): 379-393.
- [143] Galdran A. Image dehazing by artificial multiple-exposure image fusion [J]. *Signal Processing*, 2018, 149: 135-147.
- [144] Gao S B, Zhang M, Zhao Q, et al. Underwater image enhancement using adaptive retinal mechanisms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(11): 5580-5595.
- [145] Zheng M Y, Qi G Q, Zhu Z Q, et al. Image dehazing by an artificial image fusion method based on adaptive structure decomposition [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 8062-8072.
- [146] Tarel J P, Hautière N, Cord A, et al. Improved visibility of road scene images under heterogeneous fog [C] // 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 21-24, 2010, La Jolla, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 478-485.
- [147] Tarel J P, Hautiere N, Caraffa L, et al. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2012, 4(2): 6-20.
- [148] Ancuti C, Ancuti C O, de Vleeschouwer C. D-HAZY: a dataset to evaluate quantitatively dehazing algorithms [C] // 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 25-28, 2016, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2016: 2226-2230.
- [149] Li B Y, Ren W Q, Fu D P, et al. Benchmarking single-image dehazing and beyond [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(1): 492-505.
- [150] Sakaridis C, Dai D X, van Gool L. Semantic foggy scene understanding with synthetic data [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2018, 126(9): 973-992.
- [151] Ancuti C, Ancuti C O, Timofte R, et al. I-HAZE: a dehazing benchmark with real hazy and haze-free

- indoor images [M] // Talon J B, Helbert D, Philips W, et al. Advanced concepts for intelligent vision systems. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2018, 11182: 620-631.
- [152] Ancuti C O, Ancuti C, Timofte R, et al. O-HAZE: a dehazing benchmark with real hazy and haze-free outdoor images [C] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 18-22, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 867-8678.
- [153] Bijelic M, Kysela P, Gruber T, et al. Recovering the unseen: benchmarking the generalization of enhancement methods to real world data in heavy fog [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, CVPR Workshops 2019, June 16-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 11-21.
- [154] Zhao S Y, Zhang L, Huang S Y, et al. Dehazing evaluation: real-world benchmark datasets, criteria, and baselines [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 6947-6962.
- [155] Min X K, Zhai G T, Gu K, et al. Quality evaluation of image dehazing methods using synthetic hazy images [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 21(9): 2319-2333.
- [156] Chen Z Y, Jiang T T, Tian Y H. Quality assessment for comparing image enhancement algorithms [C] // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 3003-3010.
- [157] Choi L K, You J, Bovik A C. Referenceless prediction of perceptual fog density and perceptual image defogging [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(11): 3888-3901.
- [158] Gu K, Tao D C, Qiao J F, et al. Learning a no-reference quality assessment model of enhanced images with big data [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(4): 1301-1313.
- [159] Min X K, Zhai G T, Gu K, et al. Objective quality evaluation of dehazed images [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 2879-2892.
- [160] Tian J D, Murez Z, Cui T, et al. Depth and image restoration from light field in a scattering medium [C] // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 2420-2429.
- [161] Gao J, Chu Q T, Zhang X D, et al. Image dehazing method based on light field depth estimation and atmospheric scattering model [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0710001.
- 高隽, 褚擎天, 张旭东, 等. 结合光场深度估计和大气散射模型的图像去雾方法 [J]. 光子学报, 2020, 49(7): 0710001.
- [162] Moon I, Javidi B. Three-dimensional visualization of objects in scattering medium by use of computational integral imaging [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13080-13089.
- [163] Tavakoli B, Javidi B, Watson E. Three dimensional visualization by photon counting computational integral imaging [J]. Optics Express, 2008, 16(7): 4426-4436.
- [164] Cho M, Javidi B. Three-dimensional visualization of objects in turbid water using integral imaging [J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(10): 544-547.
- [165] Shin D, Javidi B. Visualization of 3D objects in scattering medium using axially distributed sensing [J]. Journal of Display Technology, 2012, 8(6): 317-320.
- [166] Cho M, Javidi B. Peplography: a passive 3D photon counting imaging through scattering media [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5401-5404.
- [167] Lee Y, Yoo H. Three-dimensional visualization of objects in scattering medium using integral imaging and spectral analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 31-38.
- [168] Joshi R, O'Connor T, Shen X, et al. Optical 4D signal detection in turbid water by multi-dimensional integral imaging using spatially distributed and temporally encoded multiple light sources [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 10477-10490.
- [169] Tao M W, Srinivasan P P, Malik J, et al. Depth from shading, defocus, and correspondence using light-field angular coherence [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1940-1948.
- [170] Bajpayee A, Techet A H, Singh H. Real-time light field processing for autonomous robotics [C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 1-5, 2018, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 2018: 4218-4225.
- [171] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B. Linear volumetric focus for light field cameras [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(2): 1-20.
- [172] Chai J X, Chan S C, Shum H Y, et al. Plenoptic

- sampling [C] // Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH'00, July 23-28, 2000, New Orleans, LA, USA. New York: ACM Press, 2000: 307-318.
- [173] Wang L, Ho P P, Liu C, et al. Ballistic 2-D imaging through scattering walls using an ultrafast optical Kerr gate[J]. *Science*, 1991, 253(5021): 769-771.
- [174] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [175] Nasr M B, Saleh B E, Sergienko A V, et al. Demonstration of dispersion-canceled quantum-optical coherence tomography[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(8): 083601.
- [176] Kang S, Jeong S, Choi W, et al. Imaging deep within a scattering medium using collective accumulation of single-scattered waves [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 253-258.
- [177] Jeong S, Lee Y R, Choi W, et al. Focusing of light energy inside a scattering medium by controlling the time-gated multiple light scattering [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(5): 277-283.
- [178] Jeong S, Kim D Y, Lee Y R, et al. Iterative optimization of time-gated reflectance for the efficient light energy delivery within scattering media [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10936-10945.
- [179] Badon A, Li D Y, Lerosey G, et al. Smart optical coherence tomography for ultra-deep imaging through highly scattering media [C] // Imaging and Applied Optics 2017 (3D, AIO, COSI, IS, MATH, pcAOP), June 26-29, 2017, San Francisco, California. Washington, D. C.: OSA, 2017: MW3C.1.
- [180] Kang S, Kang P, Jeong S, et al. High-resolution adaptive optical imaging within thick scattering media using closed-loop accumulation of single scattering [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2157.
- [181] Kim M, Jo Y, Hong J H, et al. Label-free neuroimaging *in vivo* using synchronous angular scanning microscopy with single-scattering accumulation algorithm[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3152.
- [182] Yoon S, Lee H, Hong J H, et al. Laser scanning reflection-matrix microscopy for aberration-free imaging through intact mouse skull [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5721.
- [183] Badon A, Barolle V, Irsch K, et al. Distortion matrix concept for deep optical imaging in scattering media [J]. *Science Advances*, 2020, 6(30): eaay7170.
- [184] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3146-3148.
- [185] Redo-Sanchez A, Heshmat B, Aghasi A, et al. Terahertz time-gated spectral imaging for content extraction through layered structures [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12665.
- [186] Maccarone A, McCarthy A, Ren X M, et al. Underwater depth imaging using time-correlated single photon counting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33911-33926.
- [187] Jarabo A, Masia B, Marco J, et al. Recent advances in transient imaging: a computer graphics and vision perspective[J]. *Visual Informatics*, 2017, 1(1): 65-79.
- [188] Satat G, Tancik M, Raskar R. Towards photography through realistic fog [C] // 2018 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 4-6, 2018, Pittsburgh, PA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-10.
- [189] Gupta O, Willwacher T, Velten A, et al. Reconstruction of hidden 3D shapes using diffuse reflections [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19096-19108.
- [190] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 745.
- [191] Arellano V, Gutierrez D, Jarabo A. Fast back-projection for non-line of sight reconstruction [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11574-11583.
- [192] la Manna M, Kine F, Breitbach E, et al. Error backprojection algorithms for non-line-of-sight imaging[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(7): 1615-1626.
- [193] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338-341.
- [194] Thrampoulidis C, Shulkind G, Xu F H, et al. Exploiting occlusion in non-line-of-sight active imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2018, 4(3): 419-431.
- [195] Tsai C Y, Sankaranarayanan A C, Gkioulekas I. Beyond volumetric albedo: a surface optimization framework for non-line-of-sight imaging [C] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1545-1555.
- [196] Heide F, O'Toole M, Zang K, et al. Non-line-of-

- sight imaging with partial occluders and surface normals[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(3): 1-10.
- [197] Lindell D B, Wetzstein G, O'Toole M. Wave-based non-line-of-sight imaging using fast f-k migration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): 1-13.
- [198] Liu X, Guillén I, La Manna M, et al. Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics [J]. *Nature*, 2019, 572(7771): 620-623.
- [199] Xin S M, Nousias S, Kutulakos K N, et al. A theory of Fermat paths for non-line-of-sight shape reconstruction[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 6793-6802.
- [200] Heide F, Xiao L, Heidrich W, et al. Diffuse mirrors: 3D reconstruction from diffuse indirect illumination using inexpensive time-of-flight sensors [C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 3222-3229.
- [201] Heide F, Xiao L, Kolb A, et al. Imaging in scattering media using correlation image sensors and sparse convolutional coding [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26338-26350.
- [202] Heide F, Hullin M B, Gregson J, et al. Low-budget transient imaging using photonic mixer devices [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 1-10.
- [203] Muraji T, Tanaka K, Funatomi T, et al. Depth from phasor distortions in fog [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18858-18868.
- [204] Panigrahi S, Fade J, Ramachandran H, et al. Theoretical optimal modulation frequencies for scattering parameter estimation and ballistic photon filtering in diffusing media [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 16066-16083.
- [205] Panigrahi S, Fade J, Agaisse R, et al. An all-optical technique enables instantaneous single-shot demodulation of images at high frequency[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 549.