



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目： 散射成像研究现状及展望
作者： 金欣, 王泉宇, 杜东宇, 范逸辉, 季向阳
收稿日期： 2021-06-02
网络首发日期： 2021-08-05
引用格式： 金欣, 王泉宇, 杜东宇, 范逸辉, 季向阳. 散射成像研究现状及展望[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210804.1202.036.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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。本文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, 并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。本文从光照方式、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维度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 0436 **文献标志码** A

Progress and Prospect of Imaging through Scattering Media

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

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

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

Abstract Scattering media exists widely in our daily life. Imaging through the scattering media presents important scientific significance and strong application value in medical imaging, autonomous driving, national security, and other fields. Here, we briefly review the current progress in scattering imaging and analyze the scattering characteristics of the medium 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 methods of exploiting scattered light are summarized, which analyze the spatial characteristics of scattering media and model the light propagation in the scattering media. Also, the spatial or temporal separability between the scattered light and the ballistic light are introduced. The scattering imaging techniques are compared in terms of illumination, complexity of the imaging device, prior information dependency, type and strength of the scattering media, and field of view. Finally, the development trend is forecasted.

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

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 290.1310; 290.4210

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

*E-mail: jin.xin@sz.tsinghua.edu.cn

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,散射成像开始逐渐成为国内国际研究热点,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,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,表示光子在介质中被吸收所传播的平均距离,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,并以衰减系数(消光系数或传输系数)同时描述介质的散射和吸收作用,即 $\beta_t = \beta_{ab} + \beta_{sc}$,以衰减系数的倒数描述平均传输自由程 $l_t = 1/\beta_t$ ^[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,能直接反应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更低,而散射光子的占比更高,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,实现对成像响应的局部解析,称之为散射介质的“记忆效应”理论,并由此产生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 and 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 and 散射光的差异性可以表现在空域和时域两个不同的维度,分为空域弹道光分离法和时域弹道光分离法。其中空域分离方法将散射图像看作是弹道光 and 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时,弹道光 and 散射光的分布仅和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少,而散射光子的占比随场景深度信息的增加而增加。

这类方法对输入图像的要求很简单，可在单帧图像下实现散射光空域分离，也可以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，建模弹道光子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

在一定视场范围内 $\Delta\theta \ll \lambda/\pi L$ （其中 λ 表示入射光的波长， L 表示散射介质的有效厚度），散射介质由物面到像面的点扩散函数虽然强度分布完全随机，但在空域范围内却存在平移不变性，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 与点扩散函数 (PSF) 的卷积形态，称之为散射介质的“记忆效应”^[9-12]，如公式(1)所示。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。

$$I = O * PSF \quad (1)$$

2.1.1 波前调制

波前调制(wavefront shaping technique, WFS)的理论最早由以色列巴伊兰大学 Freund 等人基于散斑相关特性推导得出^[10]，并最先由荷兰 Vellekoop 和 Mosk 等人通过实验证实^[13-16]，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，如公式(2)所示。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做侵入式标定（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]、和声搜索算法^[25]等方式不断补偿相位，最终在将入射光透过散射介质聚焦成感光平面的一个点，即脉冲函数时停止补偿，如图 1 所示，相位补偿后的系统近似“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存在时效性的限制。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，在生物医学，光遗传等方面展现出更大的应用前景。

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

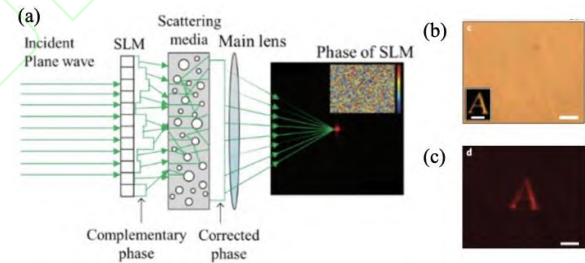


图1 波前调制散射成像技术^[15]。(a)利用SLM对非相干光源经过散射介质的波前进行调制，散射介质为 $10 \times 20^\circ$ 扩散片(Newport)；(b)传统彩色相机拍摄到的目标物经过散射介质的图像(插图为目标物未经散射介质时的图像)；(c)相同目标物经过散射介质和SLM 相位调制之后的结果，比例尺为3mm

Fig. 1 Imaging through the scattering diffuser via wavefront shaping^[15]. (a)Images of an incoherent light source behind he diffuser after optimizing the SLM phase pattern, the scattering samples were a $10 \times 20^\circ$ Newport light shaping diffuser; (b)Conventional imaging through the diffuser with a color camera(inset: direct imaging without

the diffuser); (c) Imaging of the same object through the diffuser using the optimized SLM phase-pattern. Scale bars, 3mm

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, 中山大学 Zhuang^[29]和美国 Edrei 等人^[30]将目标物替换为点光源, 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强度图像 I 中高分辨率地重构目标物, 如公式(3)所示^[29, 30],

$$O = Deconv(I, PSF) \quad (3)$$

其中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 等人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, 同时提升了反卷积成像算法的有效深度范围, 也可被应用于散射下的目标物追踪^[37]。这种不同标定深度 PSF 间的变换关系, 中山大学 Xie 等人用缩放变换来描述^[34], 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 等人将波长间隔较远的 PSF 间的独立性引入到反卷积算法中^[39], 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 等人将不同波长 PSF 之间的联系用缩放变换描述^[40], 减小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的重构目标的结构信息, 并且相对快速, 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。

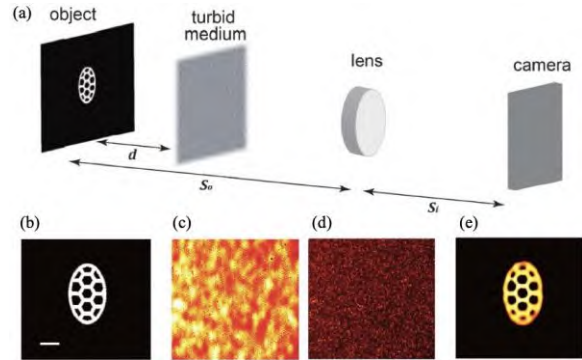


图2 基于PSF反卷积的散射成像方法^[30]。(a) 光路图, 作为目标物的掩膜透过120 grit磨砂毛玻璃 (Thorlabs)后成像在CMOS相机上; (b) 未加入散射介质时的成像结果; (c) 加入散射介质后相机采集到的失真图像; (d) 将目标物替换为针孔后标定得到的系统点扩散函数; (e) 反卷积重构结果, 比例尺为 200 μ m

Fig. 2 Scattering imaging based on the PSF deconvolution^[30]. (a) Optical setup. A mask is placed behind a 120 grit Thorlabs ground glass diffuser. The plane of the object was imaged onto a CMOS camera; (b) Images of the object without turbid; (c) Scrambled images as recorded through the ground glass; (d) PSF of the overall setup recorded by placing the object with an iris; (e) Reconstructed object after deconvolution. Scale bars, 200 μ m

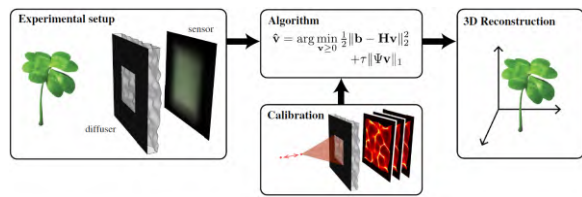


图3 Diffusercam的原理图和重建原理^[35]: 无透镜系统由传感器和传感器前插入的散射介质 (0.5° Liminit扩散片) 组成。系统将三维场景信息编码在传感器的二维图像中, 并预标定不同深度位置的点光源经过散射介质后的图像, 最后结合场景的稀疏性先验求解非线性逆问题, 实现从单帧二维图像到三维场景的计算重构

Fig. 3 DiffuserCam setup and reconstruction pipeline^[35]. The lensless system consists of a diffuser (an off-the-shelf diffuser, Luminit 0.5°) placed in front of a 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. Images are reconstructed computationally by solving a nonlinear inverse problem with a sparsity prior. The result is a 3D image reconstructed from a single 2D measurement

2.1.3 相关成像

荷兰 Bertolotti 等人^[5]和法国 Katz 等人^[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, 如公式(4)所示^[5, 41],

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{I \otimes I\} &= \mathcal{F}\{(O \otimes O) * (PSF \otimes PSF)\} \\ &= \mathcal{F}\{(O \otimes O) * \delta\} \\ &= \mathcal{F}\{O \otimes O\} = |\mathcal{F}\{O\}|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \otimes 表示自相关运算, $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换。对于获取到的目标物幅值谱信号, 可利用 Fienup 等人提出的 Hybrid Input-Output (HIO)与 Error Reduction (ER)相位恢复算法^[5, 41-43]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, 但由于相位恢复算法的不稳定性, 导致基于散斑相关的方法在有噪声的情况下重构效果随成像目标复杂度的增加快速衰减, 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, 西电吴腾飞等人通过对散斑图像 I 作双谱分析^[45], 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 等人将散斑相关技术应用在运动目标物的逐帧散斑差值上, 实现了对于动态散射目标物的采集和捕捉^[46], 后续也有其他运动重建方法被提出^[47]。美国杜克大学 Li 等人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^[48], 基于相关成像实现单色相机下的彩色目标物散射重建。中科院上光所王歆等人也利用多波长信息抑制自相关中的统计噪声, 进而改善重建质量^[49]。

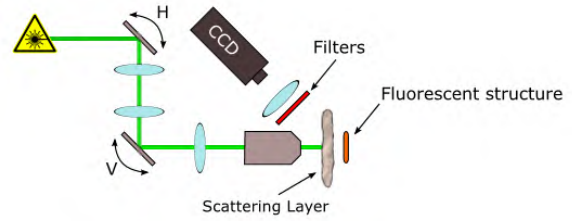


图4 扫描式散斑相关法的成像装置示意图^[5]

Fig. 4 The scanning setup used for speckle correlation technique^[5]

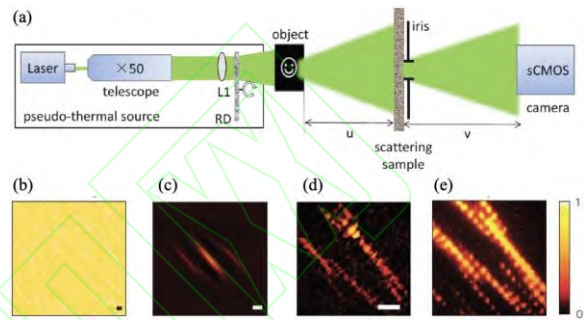


图5 单次曝光散斑相关技术^[41]。(a) 成像装置图; (b) 经过300 μm 厚鸡胸组织的散射原图; (c) 散射原图的自相关; (d) 基于相位恢复算法, 利用图 (c) 自相关的重建结果; (e) 无散射时的原始目标物, 比例尺为200 μm

Fig. 5 The single-shot speckle correlation technique^[41]. (a) The setup used for scattering imaging; (b) The raw camera image of the scattered light with the 300- μm -thick chicken breast tissue as the scattering media; (c) Corresponding autocorrelation of the camera image; (d) Object reconstructed from the autocorrelation of (c) by phase-retrieval; (e) Object as imaged directly without scattering medium. Scale bars, 200 μm

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作散射重建。德国 Singh 等人首先在物体平面上人工置入一个和物体相互远离的小孔^[50], 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结果, 同时能增强算法对于干扰的鲁棒性, 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 等人预先标定不同空间区域的 PSF, 如图 6

所示, 通过 PSF 反卷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^[51]。利用该系统采集到的多目标物形成的散斑 I_{total} 为:

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

其中 PSF_k 表示位于物体 O_k 附近的点扩散函数。在非相干光源的照射下, 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远远大于记忆效应视场范围。再利用 PSF 仅在记忆效应范围内保持平移不变性的特性, 即^[51]

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

从 I_{total} 中解耦重建不同位置的目标物,

$$I_{total} \otimes PSF_j = \sum_{k=1}^n [(O_k * PSF_k) \otimes PSF_j] = O_j * \delta = O_j$$

有效实现多目标重建的同时也增加侵入式预标定的次数。国防科技大学课题组改进了多区域 PSF 预标定的装置^[52], 以时间换空间, 通过多帧采集实现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, 西安电子科大课题组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^[53]。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先验信息或侵入式成像技术的帮助, 如何无先验地实现大视场范围内的多目标散射解耦重建, 依然是基于记忆效应成像技术中亟待解决的难题。

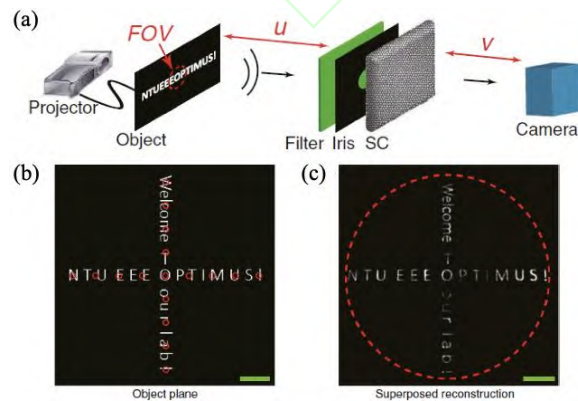


图6: 以PSF多次标定实现透过磨砂毛玻璃的记忆效应

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1mm

Fig. 6 Exceeding the memory effect via calibrating multiple PSF of the ground glass^[51]. (a) The experimental setup; (b) Spatial distribution of the object plane; (c) Superposed reconstruction image. Scale bars, 1mm

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, 针对超记忆效应范围的双目标物形成的散斑图像 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, 实现对于如公式(7)的线性叠加的自相关信号的无先验分离解耦, 并结合相位恢复算法重建双目标物各自的空域分布。

$$I \otimes I = O_1 \otimes O_1 + O_2 \otimes O_2 + (O_1 \otimes O_2) * (PSF_1 \otimes PSF_2) + (O_2 \otimes O_1) * (PSF_2 \otimes PSF_1) = O_1 \otimes O_1 + O_2 \otimes O_2 \quad (7)$$

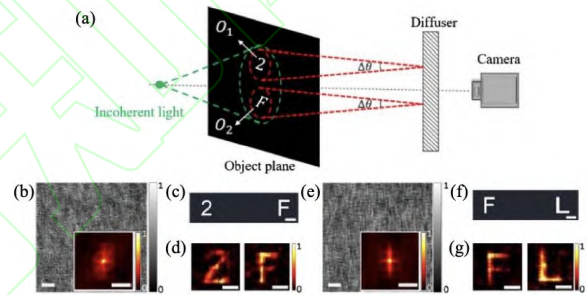


图7 双目标物大视场无先验散射成像实验^[56]。(a) 实验装置图 (b) 真实双物体“2F”掩膜 (c) 经过散射介质(220 grit磨砂毛玻璃, Thorlabs)后形成的散斑及对应的散斑自相关; (d) 由自相关分离重建的最终结果; (e) - (g) 的表述与 (b) - (d) 相同, 面向另一个真实双物体“FL”, 比例尺为96 μ m

Fig. 7 Dual-target prior-free scattering imaging beyond the memory effect^[56]. (a) The experimental setup; (b) Captured speckle and its autocorrelation from the dual-target mask “2F” (c) through scattering media (220 grit Thorlabs ground glass); (d) Final reconstructed objects from the autocorrelation of (b); (e)-(g) As in (b)-(d) for different dual targets. Scale bars, 96 μ m

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], 如图8所示, 发现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

$PSF_{d_1}(x) \rightarrow PSF_{d_2}[mx - (m-1)u]$, 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, u 表示缩放系数, 可用于大视场多目标物的无先验散射定位。然后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。

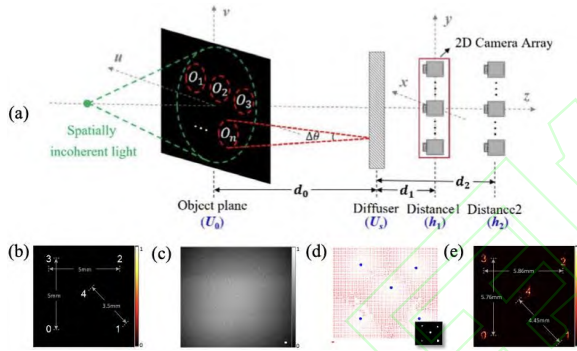


图8 多目标物大视场无先验散射成像实验^[57]。(a) 实验装置图; (b) 以多目标物掩膜作为成像目标物; (c) 多目标物形成的散射图, 散射介质为220 grit磨砂毛玻璃(Thorlabs); (d) 利用尺度缩放定位的目标物位置; (e) 大视场重建结果, 比例尺度为240mm
 Fig. 8 Multi-target prior-free scattering imaging beyond the memory effect^[57]. (a) The experimental setup; (b) The multi-target mask as the imaging target; (c) The captured multi-target speckle (220 grit Thorlabs ground glass as the scattering media); (d) The detected locations using the estimated scaling vectors; (e) The final large FOV reconstruction. Scale bars, 240mm

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。在面向雾气这类体散射介质时, 可通过部分散射物理参数对雾气成像响应作直接估计, 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)的散射点扩散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建模其空域点扩散函数或对应的频域调制传递函数, 最后利用反卷积的方式完成散射重建, 即:

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

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

其中, APSF 和 AMTF 分别代表大气空域点扩散函数及其对应的频域调制传递函数, O 和 I 分别为成像目标和散射图。该类方法最初获取 APSF 或 AMTF 主要依靠对实际场景的标定测量和经验公式计算。1995 年, 以色列 Sado 等人^[58]提出实际的 AMTF 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 等人^[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 等人^[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 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 等人^[61]利用 Henyey-Greenstein 相位函数和辐射传输方程(RTE)建模光在大气散射介质中的多次散射过程。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散函数接近的最优 APSF 估计, 如图 10(b)所示, 该模型适用于雾、霾、雾、雨等多种天气情况, 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, 如图 11(a)和(b)所示, 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散函数进行拟合，逆向估计天气状况。此后，加拿大 Samy 等人通过广义高斯分布拟合勒朗德多项式的最优 APSF 估计^[62]，得到 APSF 的解析形态，如图 10(c)所示，极大简化了求解过程，并和维纳滤波等反卷积算法结合，用于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)所示所示。

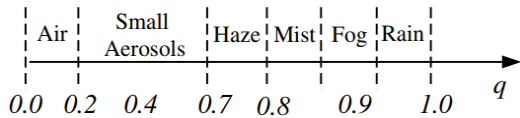


图9 不同天气条件下的近似前向散射系数 q ^[61]

Fig. 9 The approximate forward scattering coefficient q under different weather conditions^[61]

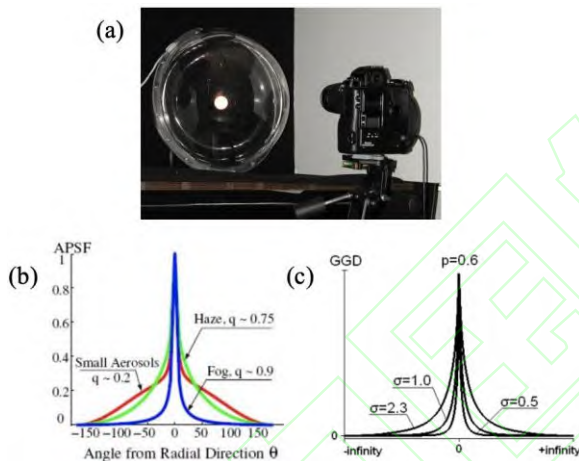


图10 测量装置与APSF。(a) 测量牛奶内散射验证 APSF的仪器。一个小灯泡被放置在一个由塑料制成的球形容器的中心，实验过程中，这个容器装满不同浓度（对应不同光学厚度）的牛奶，相机进行拍摄，验证不同情况下APSF理论与实际的准确性^[64] (b) 不同天气条件下归一化为0-1的勒朗德APSF^[61]；(c) 广义高斯分布APSF的形式^[62]

Fig. 10 Measuring device with APSF. (a) Apparatus for measuring internal scattering of milk to verify APSFA 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 APSF under different conditions^[64]; (b) The form of

Legendre APSF normalized to 0-1 under different weather conditions^[61]; (c) The form of generalized Gaussian distribution APSF^[62]

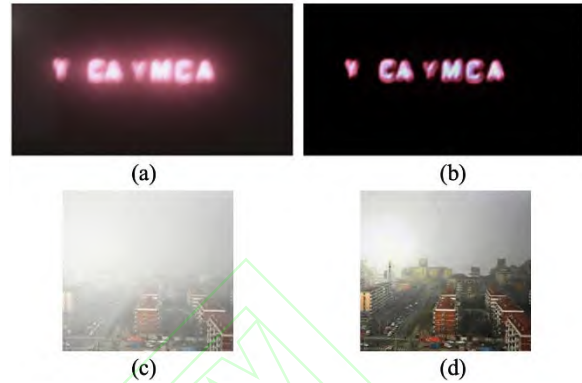


图11 APSF去散射。(a) 带有散射的电子广告牌；(b) 使用勒朗德多项式估计的APSF去除散射的电子广告牌：从(a)中提取出其中某一块亮斑，并拟合出其APSF，将其与(a)进行反卷积，获得(b)^[61]；(c) 雾气原图；(d) 使用广义高斯分布APSF去除散射的结果^[63]

Fig. 11 Use APSF to dehaze. (a) Electronic billboards with scattering; (b) Electronic billboards with scattering removal of APSF estimated by Legendre polynomials: one of the bright spots is extracted from (a), and its APSF is fitted, which is deconvolved with (a) to obtain (b)^[61]; (c) Foggy image; (d) De-hazed image using the APSF generated by the generalized Gaussian distribution ^[63]

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 APSF 的估计需要大气物理参数或预标定等作为先验信息。此外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有勒朗德展开式一种，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 等人^[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式距离为目标,在目标物稀疏性先验的约束下迭代求解,最终在 80 倍散射传输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,只能实现简单二维物体的重建。进一步,美国 Lindell 等人显式地求解了扩散方程在平板状散射介质下的解析解^[66],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 倍散射传输自由程的散射介质的三维物体重建。利用扩散方程建模场景光子传输的过程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,增加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。

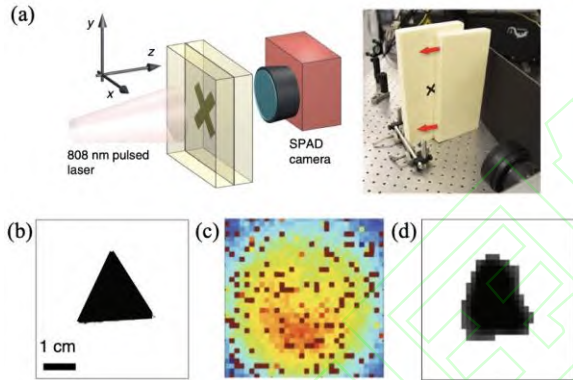


图12: 基于扩散方程的散射成像^[7]。(a) 采集装置原理图; (b) 待重建目标; (c) 采集图像; (d) 重建结果

Fig. 12 Scattering imaging based on diffusion equation^[7]. (a) Set up; (b) Object; (c) Measurement; (d) Reconstruction

2.2.2 传输矩阵的标定方法

2010 年,法国 Popoff 等人首次提出测量散射介质传输矩阵的技术^[67],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} ,传输矩阵即表示为由输入场到输出场的映射复系数 k_{mn} 组成的矩阵(transmission matrix, TM),如公式(10)所示。Popoff 等人以单臂干涉装置,如图 13(a)

所示,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 $80 \mu\text{m}$ 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 等人也利用记忆效应理论,对传输矩阵的标定过程做改进^[70],将传输矩阵在参考场振幅较低点丢失的相位值使用邻近振幅较高点的相位来代替,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。

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

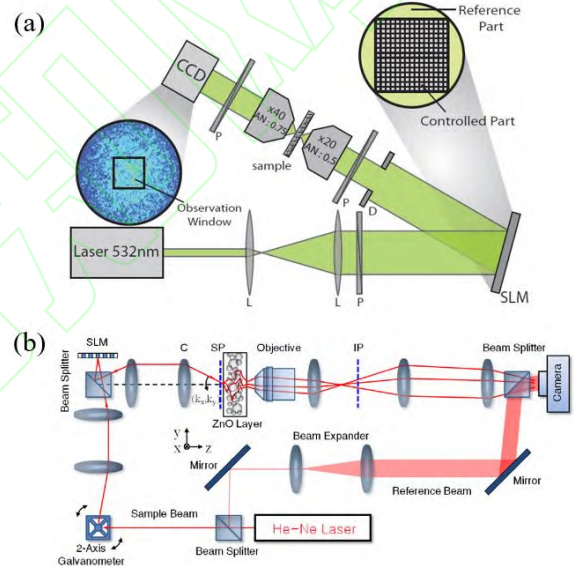


图13 传输矩阵空域和频域测量光路。(a) 传输矩阵的空域测量光路(将SLM分为参考场和信号场两部分)^[67]; (b) 传输矩阵的频域测量光路^[71]

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

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

与公式(10)的传输矩阵表达形态不同,韩国 Choi 等人以角谱成像方式,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, 如公式 (11) 所示^[71], 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]。

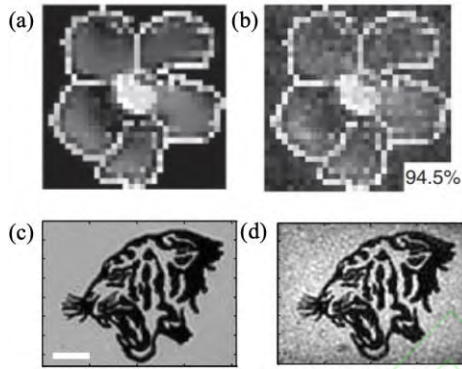


图14 空域和频域传输矩阵重建结果。(a)初始灰度图像; (b)使用散射图重建的图像^[68]; (c)插入散射介质前的老虎图案图像, 比例尺: $10 \mu\text{m}$; (d)使用散射图重建的老虎图像^[71]

Fig. 14 Results of spatial and frequency domain transmission matrix reconstruction. (a) initial grayscale image; (b) reconstructed images using scatter diagrams^[68]; (c) Image of tiger pattern before inserting scattering medium, scale: $10 \mu\text{m}$; (d) A reconstructed image of a tiger using a scatter map^[71]

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, 因此对于不同波长和经过散射介质不同传输时间的传输矩阵需进行独立标定, 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实现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, 实现对于经过散射介质不同传输时间光束的空间聚焦^[75, 76], 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 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$, 频域标定下一般可达 $\text{NA}=0.85$ 以上。但该方法标定得到的传输复矩阵能够很好的反应散射介质的特性, 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, 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, 建模传输过程去散射的方法都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), 三部分之间在强度上呈线性叠加的关系^[77-79], 可以用以下 Jaffe-McGlamery 成像模型表述^[77]:

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

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

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

其中, $I_c(x)$ 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; $t_c(x)$ 表示场景透射率图, 具体表达式为 $t_c(x) = \exp[-\beta_c Z(x)]$, 其中 $Z(x)$ 为场景深度, β_c

为依赖于波长的衰减系数,在不同颜色通道中取值不同。从公式(13)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降低而散射光的比例不断增加,因此如何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、基于 Retinex 模型的估计方法。

(a) 基于像素的估计方法:

在公式(13)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 等人^[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,形成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,并基于公式(14)完成重建:

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

最小通道图的计算复杂度仅与图像的像素数量线性相关,实现效率高,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 等人^[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 等人^[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也用于在分段平滑的先验知识下估计场景的透射率图^[91, 92],并在去雾效果及鲁棒性上表现出优势。

(b) 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年香港中文大学何凯明等人提出的暗通道先验(DCP)去雾算法^[82]利用了无散射自然图像的局部区域特征,即

$$J^{dark}(x) = \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} J_c(y) \right) \approx 0 \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} I^{dark}(x) &= \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in R, G, B} I_c(y) \right) \\ &= \overline{A_c} (1 - t_c(x)) \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\Omega(x)$ 表示以像素点 x 为中心的附近区域; $\overline{A_c}$ 表示对于环境光照 A_c 的估计, $\overline{t_c(x)}$ 表示对于实际场景透射率 $t_c(x)$ 的估计,其实验结果图如图15所示。

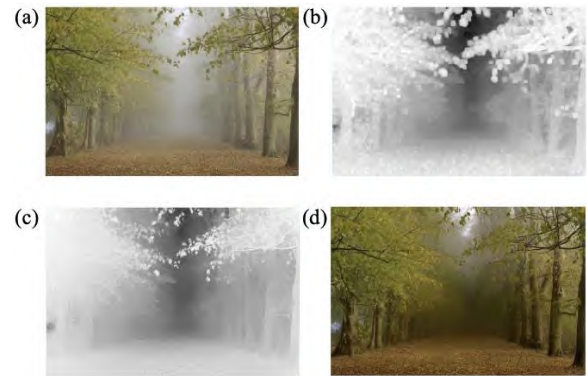


图15 基于暗通道先验的图像去雾效果^[82]。(a)输入雾天图像;(b)估计的透射率图;(c)经过软抠图优化的透射率图;(d)最终重建结果

Fig. 15 Haze removal result using dark channel prior^[82]. (a) input haze image; (b) estimated transmission map; (c) refined transmission map after soft matting; (d) final haze-free image

在暗通道先验理论提出以后,越来越多的去雾工作也都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(Color Line)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。

在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,透射率图的估计方法也做相应调整。美国密歇根大学 Carlevaris-Bianco 等人^[100]利用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 等人^[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性能。

(c) 基于全局特征的估计方法:

以色列特拉维夫大学 Berman 等人^[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(Haze-lines),在场景透射率 $t_c(x)$ 趋近于 0 时,所有雾线会汇聚到环境光照的对应点 A_c ,如图 16 所示。场景透射率 $t_c(x)$ 可由雾线各像素点到环境光照汇聚点 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完善优化^[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,但计算复杂度会升高。此外,南京大学 Ju 等人^[115]将伽马校正与 JM 模型结合去散射的工作也属于基于全局特征的估计方法。

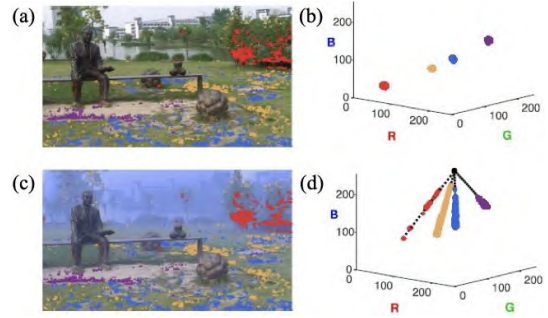


图16 对于雾线的解释 (以仿真生成的雾气图像为例)^[112]。(a) 无雾彩色图像的像素依据颜色,经过K-means聚类的结果,图中的标记点对应四个不同的颜色类;(b) 将无雾图像(a)中四个不同颜色类的各个像素点表示在RGB颜色空间上;(c) 在场景中加入人工造雾后的图像;(d) 带雾图像中属于同一颜色类的像素在RGB颜色空间呈线性排布,称为雾线,各条雾线都经过环境光照的对应点,即标记的黑点

Fig. 16 Haze-lines demonstration (synthetic image)^[112]. (a) Pixels of a haze free color image are clustered using K-means. Pixels belonging to four of the clusters are marked; (b) The four color clusters are depicted in RGB space. Colors of the clusters correspond to the highlighted pixels in (a); (c) Synthetic haze is added to (a). The same clustered pixels are marked; (d) The hazy pixels depicted in RGB color space. They are distributed along lines, termed haze-lines, passing through the atmospheric light, marked in black

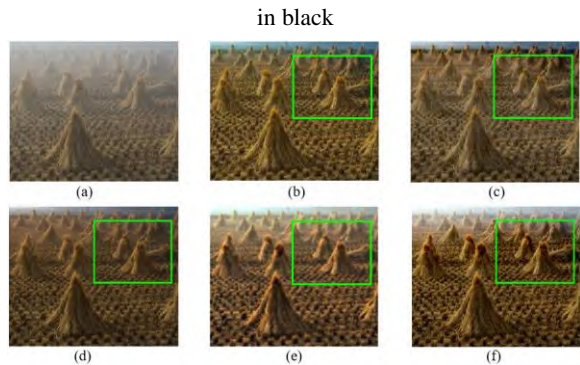


图17 基于单帧图像的去散射结果对比,散射介质为雾气。(a) 散射原图;(b) Tarel等人的去散射结果^[88];(c) Fattal等人的实验结果^[93];(d) He等人的实验结果^[82];(e) Galdran等人的实验结果^[116];(f) Berman等人的实验结果^[112]

Fig. 17 A comparison of several scattering imaging method based on single image (fog as the scattering medium). (a)

Input hazy image; (b) Dehazed reconstruction of Tarel et al^[88]; (c) Dehazed reconstruction of Fattal et al^[93]; (d) Dehazed reconstruction of He et al^[82]; (e) Dehazed reconstruction of Galdran et al^[116]; (f) Dehazed reconstruction of Berman et al^[112]

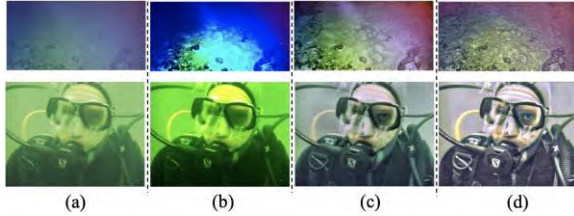


图18 基于单帧图像的去散射结果对比, 散射介质均为浑浊的水。(a) 散射原图, 第一行图像的模糊程度明显高于第二行; (b-d) 经过参数调试后, 运行UDPCP^[102]、Robust Retinex^[117]和Multi-scale Fusion^[105]的实验结果

Fig. 18 A comparison of several scattering imaging method based on single image (turbid water as the scattering medium). (a) Input scattered images. The 1st row image is significantly more blurred than the 2nd row. (b-d) The experimental results of running UDPCP^[102], Robust Retinex^[117], and Multi-scale Fusion^[105], after debugging

(d) 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^[118-120]一般假设光照分量 L 分段平滑, 反映目标场景信息的反射率分量 R 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 , 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 等人^[116]发现 JM 成像模型与 Retinex 模型之间存在联系, 如公式(17)所示:

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

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 R 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提取与目标物重建, 也有研究学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], 反锐化掩膜^[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, 同时建立有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, 也形成了带参考^[154, 155]和无参考^[156-159]两类散射图像质量评价方法, 用于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, 我们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, 面向更复杂的浑浊水体散射场景, 我们比较 UDPCP^[102]、Robust Retinex^[117]和 Multi-scale Fusion^[105]三类最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。从实验结果可以发现, 如图 18 所示, Multi-scale Fusion 在颜色恢复和细节重建上效果最优, 但存在部分重建噪点, Robust Retinex 的重建效果次之, 但具有较强的重建噪声抑制功能, 而 UDPCP 的方法则存在颜色恢复错误的问题, 特别是当水体的浑浊程度不断增强时。总结来说, 单帧去散射的重建过程都需要合理的先验假设, 同时需要散射图中包含一定的图像特征用于参数估计或分析计算, 其重建效果会随着介质散射程度的提高而不断降低, 因此该类算法不能应用于浓雾, 浑浊深海, 厚生物组织等复杂散射场景。

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,并用于重建。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,其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,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,也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。

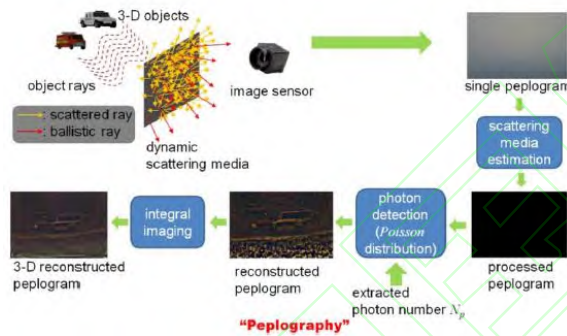


图19 基于光子计数的光场数据去散射流程^[166]

Fig. 19 Diagram to illustrate the concept of photon counting imaging through scattering media based on light field data. ^[166]

光场多视角融合的思想最早由美国康涅狄格大学 Moon 等人引入散射成像领域^[162, 163],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不同方向的弹道光在不同视角上的强度响应一致,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,因此展现出两者的差异性并用于分离。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 等人在光场多视融合的基础上,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做去散射光的预处理^[164],增强算法的去散射性能,实现了目标物灰度重建。在此方法基础上, Cho 等人随后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^[166],将基于光场多视融合的散射多深度灰度重建提升至彩色重建,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 Skin 等人也将 Cho 的方法推广至轴向分布的散射光场数据中^[165],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 等人利用手持式光场相机作为采集装置,将根据光场数据特性^[169]提取到的深度信息和 JM 成像模型相结合^[160],提出一套面向散射场景的光场深度估计模型,如图 20 所示,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。除了以估计获取场景深度信息外,美国 Bajpayee 等人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^[170],并应用于车载真实场景下的实时重建,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,该方法无法应用在雾霾等散射场景中。

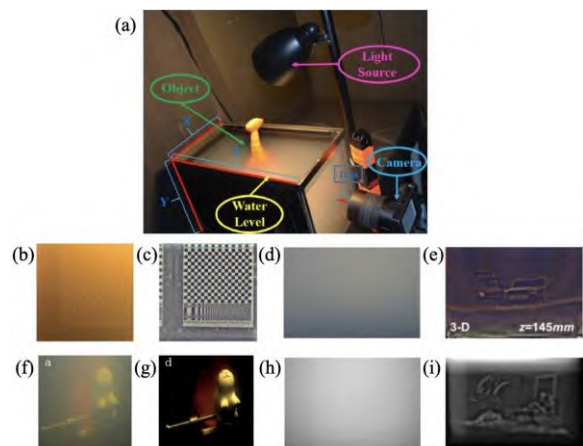


图20 基于光场数据的去散射结果对比,散射介质均为浑浊的水。(a) Tian等人实验装置图^[160]; (b) (c) Dansereau等人的输入散射图和去散射结果^[171]; (d)

(e) Cho等人的实验结果^[166]; (f) (g) Tian等人的实验结果^[160]; (h) (i) Cho等人的实验结果^[164]

Fig. 20 A comparison of several scattering imaging method based on light field data (turbid water as the scattering medium). (a) Experimental setups of Tian et al^[160]; (b)(c) Input scattered image and corresponding reconstruction of Dansereau et al^[171]; (d)(e) for Cho et al^[166]; (f)(g) for Tian et al^[160]; (h)(i) for 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 等人利用弹道光 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^[171]，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干扰，但滤波去散射作用不彻底，散射多路径效应会滤波后的散射光残留，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散射光空域分离方法相比于单帧图像，在高维输入信息的帮助下，实现了去散射能力的提升，如图 20 所示，但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与弹道光产生差异，如图 21 所示，时域分离弹道光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。

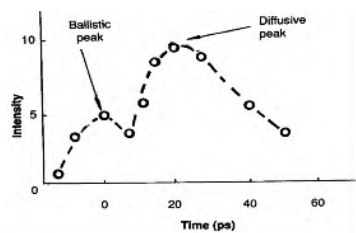


图21 散射光子与弹道光到达时间差异^[173]。(图为直径为 $200\mu\text{m}$ 的点光源透过散射介质的光子飞行时间曲线)

Fig. 21 The difference of arrival time between scattered photons and ballistic photons^[173].(The time-of- flight curve of a point source with $200\mu\text{m}$ diameter through the scattering medium)

3.2.1 基于光学相干断层扫描的成像技术

光学相干断层扫描技术(OCT)由美国 Huang 等人提出^[174, 175]，如图 22 所示，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被加长，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，与参考光束在耦合器处形成干涉图案记录下样本信息。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。

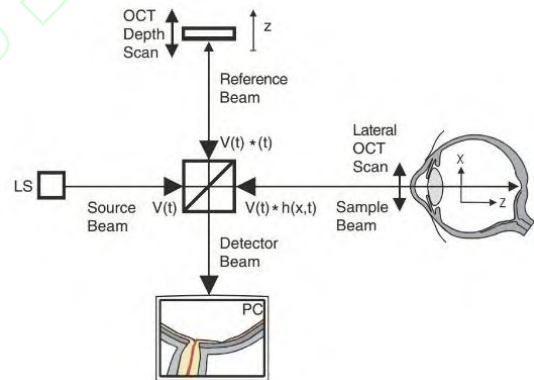


图22 光学相干断层扫描技术原理图^[174, 175]

Fig. 22 The schematic of Optical Coherence Tomography technique ^[174, 175]

后续，韩国 Kang 等人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作用不仅会使无散射时与参考臂光程一致而能形成干涉的弹道光丢失相干性^[176]，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 等人在传统 OCT 技术基础上, 利用弹道光子在经物体反射后其各空间频率分量的变化和目標物频谱分量存在一一对应关系这一特点多帧累加弹道光子, 进一步提高弹道光在 OCT 方法中的占比, 形成弹道光子累积算法 (CASS), 在 11.5 倍于散射自由程的介质中实现空间分辨率 $1.5\mu\text{m}$ 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 等人改进 CASS 算法, 将样本光束沿散射介质弹道光保留比例最高的通道“本征通道”入射^[177]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的被传输到物体表面, 提升反射光强度, 以此实现对对比度及清晰度的进一步提升。另外, 法国 Badon 等人更进一步通过矩阵分析的方式实现了更大成像深度的提升, 但成像目标物的复杂度有所降低^[179]。

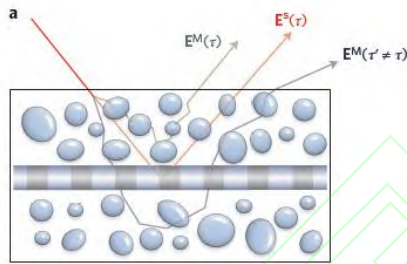


图23 经过散射介质的反射光分类, $E^S(\tau)$ 表示弹道光, 其中 τ 表示光在介质中的传输时间, $E^M(\tau)$ 表示传输时间和 $E^S(\tau)$ 相同的多次散射光, 该部分光可以和参考臂光束形成干涉, $E^M(\tau')$ 表示传输时间和 $E^S(\tau)$ 不同的多次散射光, 该部分光不能和参考臂光束形成干涉^[176]
Fig. 23 Classification of reflected waves. $E^S(\tau)$: electric field of a wave scattered once by a target object where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

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 等人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^[180], 以纠正成像光路上的畸变带来的成像像差, 形成闭环弹

道光子累积算法 (CLASS), 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 600nm , 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分钟量级缩短到 0.22s ^[181], 并成功应用到透过活体小鼠完整头骨的神经活动观测上^[182], 如图 24 所示。此外, 法国 Badon 等人也提出失真矩阵的概念, 从用于厚散射介质在 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^[183]。

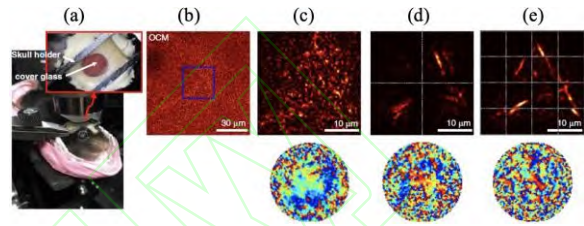


图24 将CLASS算法应用于完整活体鼠脑观测, 鼠脑头骨厚度为 $125\text{-}150\mu\text{m}$ ^[182]: (a) 实验装置图; (b) 利用光学相干显微镜观测鼠脑下方 $200\mu\text{m}$ 有髓神经纤维的图像; (c) 利用CLASS算法的观测结果 (上) 和对应的像差图 (下), 对应于(b)中蓝色虚线框 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 的区域; (d)和(e)分别对应CLASS算法在 2×2 和 4×4 子块下的重建结果

Fig. 24 The CLASS algorithm was applied for in vivo imaging through intact mouse skull. The thickness of the skull was $125\text{-}150\mu\text{m}$ ^[182]. (a) Experimental setup. (b) Optical coherence microscopy intensity image of myelinated fibers at a $200\text{-}\mu\text{m}$ depth from the upper surface of the skull. (c) CLASS intensity image (upper) and the corresponding aberration map(lower) for a $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}^2$ area marked by the blue dotted box in (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, 无法做到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，从区分到达时间，建模弹道光子飞行路径和分析幅度调制光相位三种途径分离散射光。

(a) 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 等人首先证明了区分光子到达时间方法的有效性^[173]，如图 25(a)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光子比例增强了图像对比度，最终实现散射成像。后续法国 Laurenzis 等人^[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。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 Albert 等人^[185]利用太赫兹时域测量技术，如图 25(c)所示，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 等人^[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，重建物体信息，实现了 8 倍平均传输自由度下的图像深度重建。美国 Satat 等人利用 SPAD，逐像素记录光子在经过散射介质后的完整时域信息^[188]，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，全部的光子信息得到记录，成像对比度及三维重建能力得到极大提升。

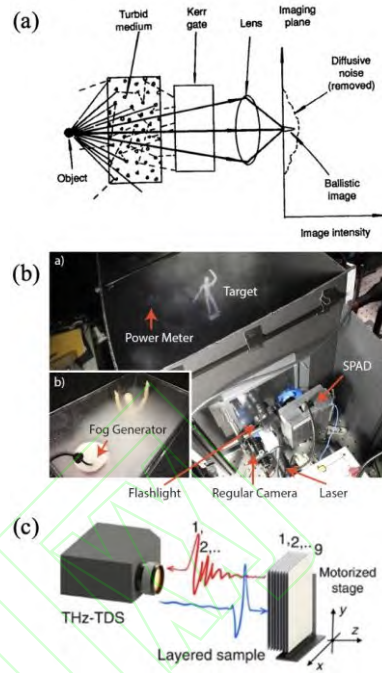


图25 区分光子到达时间的成像装置。(a) 基于超快门的成像装置^[173]；(b) 基于SPAD的成像装置^[185]；(c) 基于太赫兹相机的成像装置^[188]。

Fig. 25 Setup based on distinguishing photons. (a) Set up based on Kerr gate^[173]; (b) Set up based on SPAD^[185]; (c) Set up based on Terahertz spectral imaging^[188].

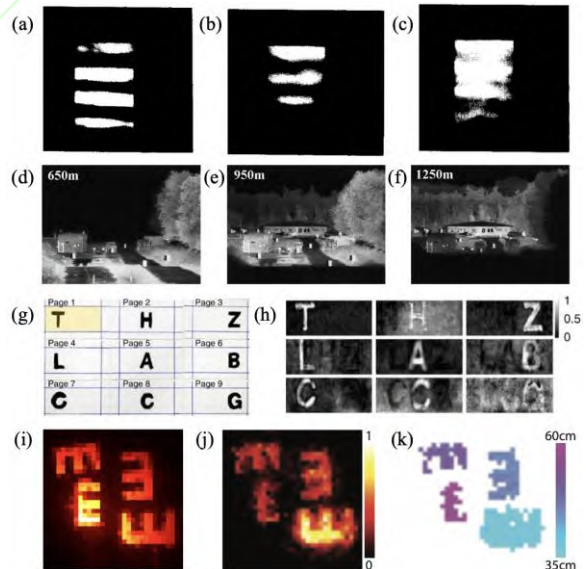


图26 区分光子到达时间的成像结果。(a-c) Wang 等人^[173]重建薄生物组织遮挡下的条纹图像时的参考图像、无延时门控重建结果和有延时重建结果；(d-f) Laurenzis 等人在宏观雾天的深度下的重建结果^[184]；

(g-f) Albert等人重建重叠纸张中的文字时所用的参考图像和重建结果^[185]; (i-k) Satat等人在动态散射场景中的参考图像、重建结果和重建深度^[188]。

Fig. 26 Reconstruction based on distinguishing photons. (a-c) Wang et al. reconstructed the fringe image under the thin biological tissue, the reference image, the gating reconstruction results without delay and the reconstruction results with delay^[173]; (d-f) Laurenzis et al. reconstructed the depths in foggy days^[184]; (g-f) Reference images and reconstruction results used by Albert et al. for the reconstruction of text on overlapping paper^[185]; (i-k) Reference, reconstruction and depth map used by Satat et al. in dynamic scattering scenes^[188].

(b) 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,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 and 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。

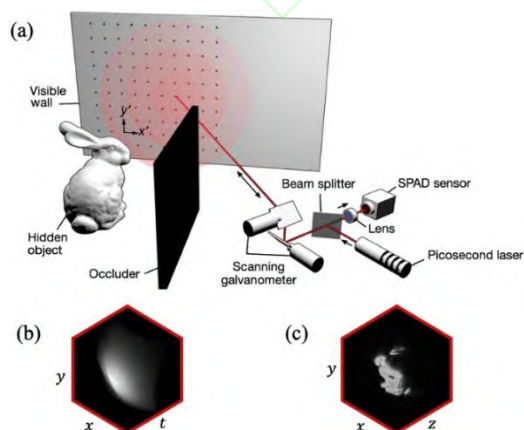


图27 建模弹道光子飞行路径的成像原理^[194]。(a)瞬态成像系统; (b)瞬态图像; (c)三维重建结果

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

(c) 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作互相关操作来估计。如图28所示,调制光源为正弦信号 $\sin(\omega + \phi)$,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随时间的变化具有不同的相位延迟 $\sin(\omega + \phi_1)$ 和

$\sin(\omega + \phi_2)$,从而利用这种相位差实现分离,同时

利用多频率多初始相位的调制光重复实验,来消除相位以 2π 为周期造成的相位歧义。基于此原理,2014年加拿大Heide等人^[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。后续,日本Takeshi等人^[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,提升了算法在散射场景中的深度重建能力,如图29所示。

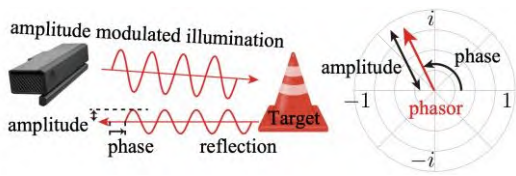


图28 调制光源照射下，光子飞行路径使得接收信号的相位相比参考信号有所延迟^[203]

Fig. 28 The phase of the received signal is delayed compared to the reference signal due to the different time-of-flight paths^[203]

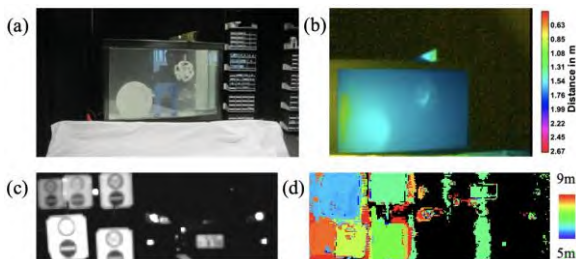


图29 基于幅度调制光的散射成像与深度重建 (a-b) Heide等人的实验场景(散射介质为浑浊水体)和重建结果^[181]; (c-d) Takeshi等人在室外雾天的实验场景和深度重建结果^[203]

Fig. 29 Scattering imaging and depth reconstruction based on amplitude modulated light. (a-b) Heide et al.'s experimental scene (the scattering medium is turbid water) and reconstruction results^[181]; (c-d) Takeshi et al.'s experimental scenes and deep reconstruction results in outdoor foggy days^[203].

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跟调制光频率保持一致，而散射光成分受动态散射介质影响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。

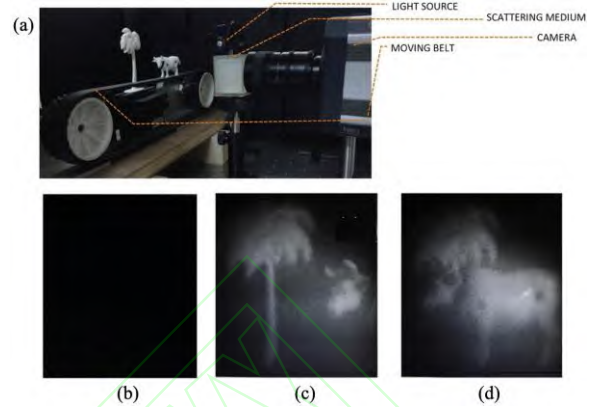


图30 基于正交调制解调的散射成像^[204]。(a) 采集装置原理图：散射介质等效为雾气，物体在传送带上运动，采集帧率为100fps；(b) 采集图像；(c) 重建示例帧1；(d) 重建示例帧2

Fig. 30 Scattering imaging based on quadrature lock-in discrimination^[204]. (a) Setup: the scattering medium equals the fog, the object moves on the conveyor belt, and the acquisition frame rate is 100fps; (b) Measurement; (c) Reconstruction 1; (d) Reconstruction 2.

区分光子到达时间，建模弹道光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长时间分辨技术的有效作用距离和适用范围。

4 展望与总结

散射成像方法	光照方式	采集设备	所需的先验信息	散射介质类型	散射介质强弱 (数字越大, 表示越强)	成像利用到的光子	视场范围	适用场景
利用散射介质空域特性	单波长主动光或生物荧光等被动光	相机	相关成像: 无 反卷积成像: PSF 波前调制: 反馈信号	静态介质为主	3	弹道光 and 散射光	受限于成像方法, 一般不超过 $\pm 3^\circ$	生物观测或毛玻璃
大气传输方程	仅存在目标物自发光	相机	大气散射系数或大气PSF	动态大气	1	弹道光 and 部分散射光	无理论限制	雾天
传输矩阵标定	空间调制光	相机	完整的介质传输矩阵	静态	4	弹道光 and 散射光	受限于标定视场范围	毛玻璃, 生物组织等
空域分离散射光	自然光照或其他被动光照	相机	无	动态/静态	2	仅弹道光	无理论限制	雾霾, 深海, 低光照场景等
基于OCT的相关技术	带参考臂的低时间相干性激光	相机	无	动态/静态	5	经过累积的弹道光	受限于OCT成像装置	厚生物组织, 活体观测
超高时间分辨技术	主动脉冲光源 (或幅度调制主动光)	高时间分辨率相机 (或高帧率相机)	无	动态/静态	3	仅弹道光	受限于主动光照的有效作用范围或采集设备的视场	雾气, 浑浊水体及墙面漫反射等

图31 各类散射成像技术的性能比较

Fig. 31 A comparison of various scattering imaging techniques

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, 例如成像响应的标定, 散射系数的获取等等, 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。

从各类方法角度看, 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, 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, 提出了 OCT 技术、区分光子到达时间、建模光子飞行路径、分析调制光相位四种高时间分辨去散射的方式; 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, 压缩了方法适用场景; 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维度努力提升其普适性, 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 (比如红外相机, 毫米波雷达, 激光雷达等), 与相机获取的数据间进行融合, 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算法取长补短, 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): 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.
- [2]Ji X Y. Coded Photography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111012.
季向阳. 编码摄像[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): 020000.

[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: 从点扩散函数到光场全要素[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(1): 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 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, Guan Y, Zhou J. 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):

[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 Commun*, 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.

[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*, 2017, 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]Statistical Properties of Laser Speckle Patterns[M]. Goodman J W, *Statistical Properties of Laser Speckle Patterns*, 1963.

[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.
- [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 Sci Appl*, 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]. *Appl Opt*, 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 G, 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)[C]//Image Propagation through the Atmosphere, 1996, International Society for Optics and Photonics, 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), 2000, IEEE, 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, IEEE, 1:1-8.
- [62]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, 2007, IEEE, 1-8.
- [63]Wang R, Li R, Sun H Y. Haze removal based on multiple scattering model with superpixel algorithm[J]. *Signal Processing*, 2016, 127: 24-36.
- [64]Narasimhan S. Models and Algorithms for Vision Through the Atmosphere[D]. New York: Columbia University, 2004: 124-126.
- [65]Lyons A, Tonolini F, Bocolini 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(1): 4517.
- [67]Popoff S, 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(1): 1-5.
- [69]Gong C M. Research on focusing and image recovery algorithm for random scattering optical system[D]. Xian: 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: 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(1): 1-7.
- [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(1): 1-8.
- [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, 208(208):
- [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, 2010, IEEE, 2:35-39.
- [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*, 2010, 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), 2013, IEEE, 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), 2000, IEEE, 1:598-605.
- [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 (TOG), 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, 2008, IEEE, 1-8.
- [88]Tarel J-P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, 2009, IEEE, 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): 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, 2018, 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 (TOG), 2014, 34(1): 1-14.
- [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, 2017, 27(2): 999-1009.
- [96]Peng Y-T, Cao K, 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, 2019, 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, 2010, IEEE, 1-8.
- [101]Drewns P, Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops, 2013, 825-830.
- [102]Drewns P L, Nascimento E R, Botelho S S, 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, 2011, 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]. IEEE transactions on ISSN, 2014: 2275-0181.
- [105]Ancuti C, Ancuti C O, De Vleeschouwer C, et al. Multi-scale underwater descattering[C]//2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2016, IEEE, 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, Albu A B. L2uwe: A framework for the efficient enhancement of low-light underwater images using local contrast and multi-scale fusion[C]//*Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2020, 538-539.
- [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. Local proximity for enhanced visibility in haze[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 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, Avidan S. Non-local image dehazing[C]//*Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 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*, 2018, 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*, 2019, 29: 3104-3118.
- [116]Galdran A, Alvarez-Gila A, Bria A, et al. On the duality between retinex and image dehazing[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 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]. *Josa*, 1971, 61(1): 1-11.
- [120]Horn B K. Determining lightness from an image[J]. *Computer graphics and image processing*, 1974, 3(4): 277-299.
- [121]Jobson D J, Rahman Z-u, 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-u, 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), 2018, IEEE, 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*, 2019, 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]. Unknown, 1975:
- [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):
- [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, 2010, IEEE, 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]. SpringerPlus, 2014, 3(1): 1-14.
- [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, 2010, 20(5): 1249-1261.
- [137]Land E H. The retinex theory of color vision[J]. Scientific american, 1977, 237(6): 108-129.
- [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), 2005, IEEE, 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, 2012, IEEE, 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, 2017, 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, Hautiere N, Cord A, et al. Improved visibility of road scene images under heterogeneous fog[C]//2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010, IEEE, 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), 2016, IEEE, 2226-2230.
- [149]Li B, Ren W, Fu D, et al. Benchmarking single-image dehazing and beyond[J]. IEEE Transactions on

- Image Processing, 2018, 28(1): 492-505.
- [150]Sakaridis C, Dai D, 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[C]//International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, 2018, Springer, 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]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops, 2018, 754-762.
- [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]//CVPR Workshops, 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, Jiang T, Tian Y. Quality assessment for comparing image enhancement algorithms[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 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, 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, 2017, 29(4): 1301-1313.
- [159]Min X, Zhai G, Gu K, et al. Objective quality evaluation of dehazed images[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(8): 2879-2892.
- [160]Tian J, 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), 22-29 Oct. 2017, 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): 710001.
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), 7-12 June 2015, 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), 1-5 Oct. 2018, 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, Tong X, Chan S-C, et al. Plenoptic sampling[C]//Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 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, Lerosey G, et al. Smart optical coherence tomography for ultra-deep imaging through highly scattering media[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1600370.
- [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, 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, et al. Towards

- Photography Through Realistic Fog[C]//2018 IEEE International Conference on Computational Photography, 2018, Carnegie Mellon Univ, Pittsburgh, PA:IEEE, 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]Marco L M, Fiona K, Eric B, et al. Error Backprojection Algorithms for Non-Line-of-Sight Imaging[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2018, 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, et al. Exploiting Occlusion in Non-Line-of-Sight Active Imaging[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2018, 4(3): 419-431.
- [195]Chia-Yin T, 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, June 16-20, 2019, Long Beach, CA, USA:IEEE, 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):
- [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.
- [198]Liu X, Guillen 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, 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, Jun 16-20, 2019, Long Beach, CA, USA:IEEE, 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, Jun 23-28, 2014, Columbus, OH:IEEE, 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):
- [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.

网络首发：

标题： 散射成像研究现状及展望

作者： 金欣, 王泉宇, 杜东宇, 范逸辉, 季向阳

收稿日期： 2021-06-02

录用日期： 2021-07-29

DOI： 10.3788/lop58.1811022

引用格式：

金欣, 王泉宇, 杜东宇, 范逸辉, 季向阳. 散射成像研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811022.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别，请以正式出版文件为准！
