

# 非视域成像技术研究进展

章镇宇, 石岩\*, 戴晟昕, 占春连, 赵天琦, 金尚忠

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 非视域成像可对视域外场景进行重建成像。与传统成像不同, 其将隐藏场景返回的间接信号导入重建算法实现目标场景重建, 在国防、生物医学、自动驾驶、航空航天及灾后搜救等领域具有重要的应用价值。总结近年来国内外对非视域成像技术的研究进展, 依次介绍 3 种非视域成像模式, 包括基于飞行时间的非视域成像、基于相干信息的非视域成像 (含基于散斑图案和空间相干两种方法)、基于强度信息的非视域成像。基于相干信息和强度信息成像模式的硬件参数、重建算法、重建时间和图像分辨率等的特点和存在的局限性, 分析并讨论非视域成像的发展趋势。

**关键词** 非视域成像; 飞行时间; 相干成像; 强度成像; 散射成像

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223128

## Research Progresses on Non-Line-of-Sight Imaging Technology

Zhang Zhenyu, Shi Yan\*, Dai Shengxin, Zhan Chunlian, Zhao Tianqi, Jin Shangzhong

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

**Abstract** Non-line-of-sight imaging can reconstruct images of scenes outside the line-of-sight. Different from traditional imaging, it imports the indirect signal returned from the hidden scene into the reconstruction algorithm to realize the reconstruction of the target scene, which is important in the fields of national defense, biomedicine, automatic driving, aerospace, and post-disaster search and rescue. This paper summarizes the research progresses of non-line-of-sight imaging technology, and introduces three non-line-of-sight imaging modes, including non-line-of-sight imaging based on time-of-flight, and non-line-of-sight imaging based on coherent information (including speckle pattern and spatial coherence methods), and non-line-of-sight imaging based on intensity information. Focusing on the characteristics and limitations of hardware parameters, reconstruction algorithms, reconstruction time, and image resolution of coherent information and intensity information imaging modes, the development trend of non-line-of-sight imaging is analyzed and discussed.

**Key words** non-line-of-sight imaging; time-of-flight; coherence imaging; intensity imaging; diffraction imaging

## 1 引言

望远和显微技术大大提升了人的图像获取能力, 使人观察到更远或更微小的物体。然而, 人类的观察视域仍受到障碍物的限制, 传统的光学成像技术对此无能为力。非视域成像技术拓展了人类视野, 突破了障碍物的限制<sup>[1]</sup>。2008 年, Ramesh 等<sup>[2]</sup>首次提出了非视域 (NLOS) 成像, 随着超快激光发射和探测技术的不断进步, 其得到了快速发展。国内外学者受激光雷达和散斑成像等技术的启发, 不断提出新的非视域成像方法。

非视域成像利用间接散射光<sup>[3]</sup>携带的有效信号来重建被障碍物遮挡的物体的图像, 探测器采集经多个

表面散射回的携带目标物体信息的光子, 通过计算还原遮蔽场景的三维图像。因可识别障碍物后的人和物<sup>[4-6]</sup>, 非视域成像在军工、生物医学成像、车辆导航及安防等领域具有重要应用价值。非视域成像的主要评价指标包括视场、采集时间、成像景深、重建时间及重建图像的分辨率等。目前非视域成像受物体深度、探测器灵敏度、环境光及中继面大小<sup>[7-8]</sup>等因素限制, 难以快速获得高质量图像, 且存在采样区域受限、视场小的问题。随着探测器灵敏度的提高, 非视域成像的采集时间和重建质量得以提升, 新重建算法可提高计算效率并提升非视域成像系统对环境光的鲁棒性。

近年来, 国内外相关学者对非视域成像技术进行

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2022-12-12; 录用日期: 2023-01-10; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 浙江省重点研发计划资助项目 (2021C01068)

通信作者: \*shiyang@cjlu.edu.cn

了综述。Geng 等<sup>[9]</sup>对传统的和基于深度学习的非视域成像技术进行了全面的概述;金欣等<sup>[10]</sup>论述了现有非视域成像技术的原理及实现的差异,并重点分析了基于光子飞行时间的成像方法;Faccio 等<sup>[11]</sup>概述了非视域的瞬态成像技术。本文总结了基于飞行时间的非视域成像的一些新进展,然后着重介绍了基于相干信息(散斑图案和空间相干)和强度信息(以相机为探测器)的非视域成像的研究现状、面临挑战和发展方向。

## 2 基于飞行时间的非视域成像新进展

2011 年,麻省理工学院 Kirmani 等<sup>[12]</sup>提出一种瞬态成像方法,成像光路如图 1 所示。该方法采用脉冲照明,获取时间序列图像,利用飞行时间和光传输的多路径分析,开创了通过时间图像分析重建场景的算法和系统,将飞行时间应用于非视域成像。

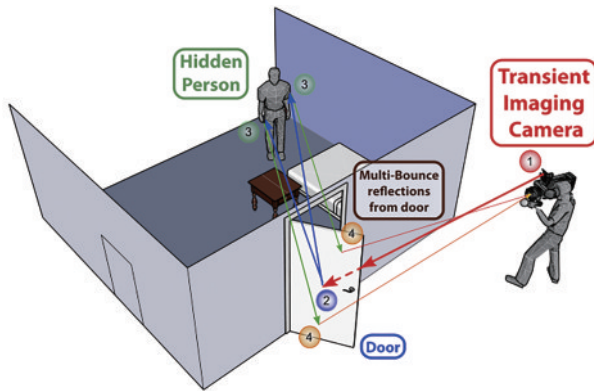


图 1 瞬态成像光路<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Transient imaging optical path<sup>[12]</sup>

基于光子飞行时间(ToF)进行非视域目标物体的重建<sup>[13-14]</sup>利用超窄脉冲激光,扫描可视区域的墙面、门或窗等中继面,以它们为媒介使光传播至物体,最终由条纹相机<sup>[15]</sup>或单光子雪崩二极管(SPAD)<sup>[16]</sup>等高时间分辨率探测器采集自物体返回的 ToF 信号,通过单光子飞行时间和扫描点坐标等信息重建非视域目标表面轮廓。

早期非视域成像使用反投影图像重建算法,利用飞行时间统计直方图和中继面上的采样点坐标等信息,通过迭代相加方式计算得到体素空间的反照率并重建图像,是 ToF 方案的一种主流算法。近年来,越来越多计算成像方法被应用于 ToF 非视域成像,其中遮挡成像<sup>[17-19]</sup>和压缩感知<sup>[20]</sup>技术显著提高了光子利用效率,缩短了信号采集时间。快速反投影<sup>[21]</sup>提升了重建速度;椭球模式分解反投影<sup>[22]</sup>针对多目标场景消除混叠伪影的影响,提高了多目标场景下物体边缘轮廓重建的图像清晰度;迭代反投影<sup>[23]</sup>提升了重建分辨率,但重建时间增加。随着 ToF 非视域成像研究的深入,非视域成像系统及算法也不断发展。小孔成像法<sup>[24]</sup>利用单一光路实现对运动物体的成像和追踪;光波传播

模型<sup>[25-26]</sup>和神经网络<sup>[27]</sup>等方法的应用,使非视域成像能应用于更复杂的场景;阵列 SPAD<sup>[28]</sup>提升了采集速度,结合优化后的快速算法,可实现动态成像追踪<sup>[29]</sup>。

2019 年,威斯康星大学 Liu 等<sup>[30-31]</sup>提出一种基于相量场虚拟光波的成像算法,通过求解 Rayleigh-Sommerfeld 衍射(RSD)积分进行隐藏目标的重建,如图 2 所示。该算法对每个扫描点的采集时间仅需 1~10 ms,重建分辨率达 10 cm,使 NLOS 成像系统可应用于存在多个中继面和遮挡物等更复杂的场景,有望不受实验室条件限制。

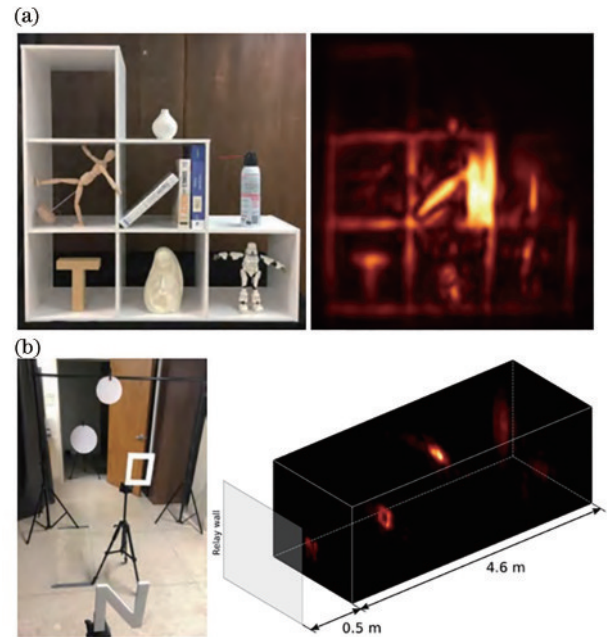


图 2 基于相量场虚拟光波的非视域成像<sup>[31]</sup>。(a)强环境光照明下的重建;(b)大深度范围的重建

Fig. 2 Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual light wave<sup>[31]</sup>. (a) Reconstruction under strong ambient illumination; (b) reconstruction under large depth range

2021 年,加州大学洛杉矶分校的 Feng 等<sup>[32]</sup>提出超快光场层析成像(LIFT),成像原理如图 3(a)和图 3(b)所示,将条纹相机和柱面小透镜阵列组合,开发了一种超快光场层析成像相机,结构如图 3(c)所示,单次即可采集大量二维时间信息的分辨率。该系统通过基于小孔成像和平行于柱面透镜的不变轴的线性点扩散函数进行卷积,将空间点源转换为图像面中的平行线,旋转柱面透镜,记录不同角度的投影,利用足够的投影恢复图像。该系统在平均功率为 2 mW 的光源照明下,能够以 30 Hz 的频率实现动态非视域成像,成像结果如图 3(d)所示,无需扫描,采集速度极快,占用内存小,且可以利用非平面的中继面实现非视域成像,对动态非视域成像具有显著意义。

2022 年,清华大学 Li 等<sup>[33]</sup>提出时间序列首光子(TSFP)成像,利用多时间区的首光子数据进行场景重建,使 NLOS 成像系统能应用于少光子场景和实时

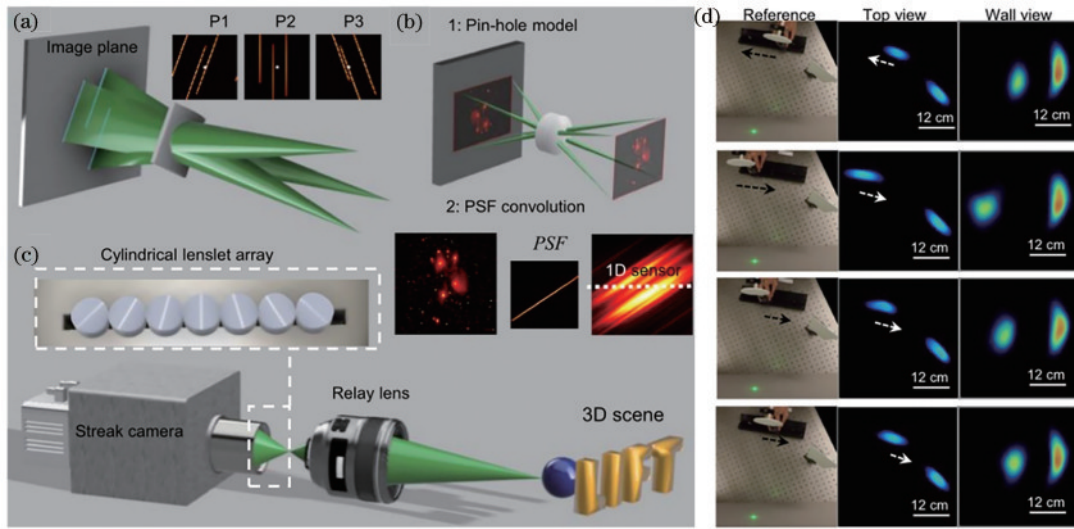


图 3 基于超快光场层析成像的非视域成像<sup>[32]</sup>。(a)柱面透镜阵列成像图解;(b)柱面小透镜成像的两个步骤;(c)LIFT 相机系统装置;(d) 30 Hz 速率对运动物体的重建结果

Fig. 3 Ultrafast light field tomography for non-line-of-sight imaging<sup>[32]</sup>. (a) Illustration of cylindrical lenslet array imaging; (b) two steps of cylindrical small lens imaging; (c) typical system setup of an LIFT camera; (d) reconstruction results for moving objects at 30-Hz rate

非时域成像方面。西安光学精密机械研究所 Xu 等<sup>[34]</sup>提出一种基于低秩逼近算符的成像算法,该算法提高了计算效率,所提出的非聚焦 NLOS 成像系统实现了快速、准确的场景重建。西班牙萨拉戈萨大学 Luesia 等<sup>[35]</sup>提出一种基于相量场的成像算法,该算法实现多个非相干散射光源的鲁棒性重建,在能见度较差的条件下,实现了在不同的散射介质下 NLOS 场景重建。

### 3 基于相干信息的非视域成像

近年来,一些专家学者经研究发现,光线在经过散射后,部分相干信息仍得以保留,因此,他们尝试使用

光线中的相干信息来实现非视域成像。基于相干信息的非视域成像可以分为基于散斑图案和空间相干两类。基于散斑图案的非视域成像使用相机作为探测器,利用散斑图案携带的角度信息来重建图像;基于空间相干的非视域成像需要使用干涉仪来探测相位信息以重建图像。

#### 3.1 基于散斑图案的非视域成像

由于物体表面的不均匀性,经表面反射或散射的相干光波的叠加会产生随机的散斑图案,经中继面散射后获得的散斑图案保留了目标的角度相关信息,即角度“记忆效应”<sup>[36-37]</sup>,原理如图 4 所示。近年来提出的

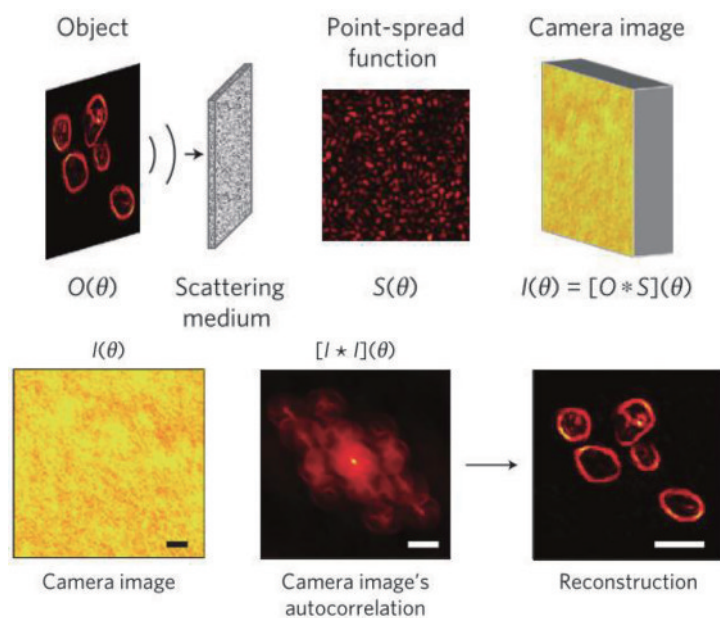


图 4 散斑图案成像原理<sup>[38]</sup>

Fig. 4 Principle of speckle pattern imaging<sup>[38]</sup>



一些诸如全息扫描和光学相干断层扫描等技术均利用这些散斑图案重建物体表面<sup>[39]</sup>。随着非视域成像的发展,一些团队尝试将散斑成像应用于非视域目标物体的图像还原,也有一些团队在点扩散函数或解卷积下实现非视域成像<sup>[40-41]</sup>。

2014年,Katz等<sup>[38]</sup>发现角度“记忆效应”可以应用于空间非相干光源。如图5(a)所示,在实验中,他们采用赝热光源,该光源系统由532 nm波长的连续激光器、50倍望远镜及一个快速旋转的扩束器组成。光源放置在非视域场景中,即非视域成像中的被动照明模式<sup>[42]</sup>,光源直接照射具有一定形状的目标纸板,探测部分则由sCMOS相机和一块用于提高散射光对比度的线性偏振片组成。图5(b)为相机拍摄图,图5(c)为重建图,图5(d)为原始目标,他们重建了分辨率为 $50 \times 50$ 的图像,每一像素对应实际平面距离为1.7 mm。他们的研究结果证明了散斑图案可用于经过一次散射的图像重建的结论,验证了散斑图案成像应用于非视域成像的可行性。

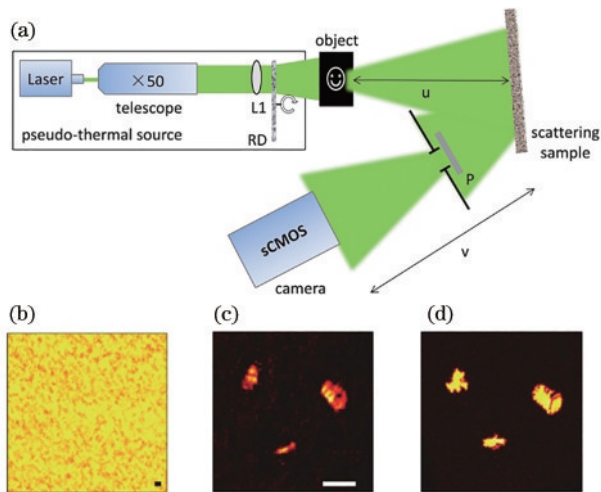


图5 基于单次拍摄散斑相关的非视域成像<sup>[38]</sup>。(a)实验原理图;(b)相机拍摄图;(c)重建图;(d)原始目标

Fig. 5 Single-shot non-line-of-sight imaging based on speckle correlations<sup>[38]</sup>. (a) System schematic; (b) camera image; (c) reconstructed image; (d) original object

2018年,美国南方卫理公会大学的Viswanath等<sup>[43]</sup>提出了一种基于散斑图案的主动式非视域成像系统,该系统利用激光相干性强的特点。激光器发出的光经过中继面间接照明拐角处的物体,相机拍摄中继面上的线性干涉条纹,采用迭代相位检索算法重建物体的图像。同年,美国威斯康星大学和斯坦福大学的Smith等<sup>[44]</sup>基于散斑成像提出了一种追踪非视域目标物体的方法。实验中,使用波长为532 nm、功率为350 mW的准直相干光源照射中继面,使用一台传统相机采集散斑图案,非视域目标物体跟随高精度平移工作台移动。通过分解散斑图案和分析散斑图案随物体运动所发生的变化,该方法实现了非视域多目标追

踪,精度达 $10 \mu\text{m}$ ,但仍无法还原物体的绝对位置,因此还停留在实验室阶段。该研究为动态多目标非视域成像提供了新思路,随着相机帧数的提升,与现有的非视域成像方法结合,或可实现实时高精度非视域追踪。随着深度学习和神经网络等算法的发展,基于散斑图案的非视域成像技术进展明显。2020年,美国的Metzler等<sup>[45]</sup>训练了一个深度卷积神经网络模型,以实现基于散斑的非视域成像。实验装置如图6(a)所示,他们所使用的光源是波长为532 nm、最大功率为500 mW的连续激光,实验中功率设定为300 mW,激光经过一系列透镜、反光镜和一块空间滤波器后可控地间接照明隐藏物体。探测器为拆去玻璃前盖的180 mm焦距的佳能相机。他们重建了距中继面约为0.5 m的隐藏物体的图像,物体的边长仅为1 cm。图6(b)为不同曝光时间下的重建结果,采集两张曝光时间为0.125 s的图像,利用卷积神经网络模型,便可在0.01 s内实现分辨率高达 $300 \mu\text{m}$ 的重建,大大提高了基于散斑图案的非视域成像系统的鲁棒性,并验证了非视域成像的分辨率达亚毫米级别的可能性。

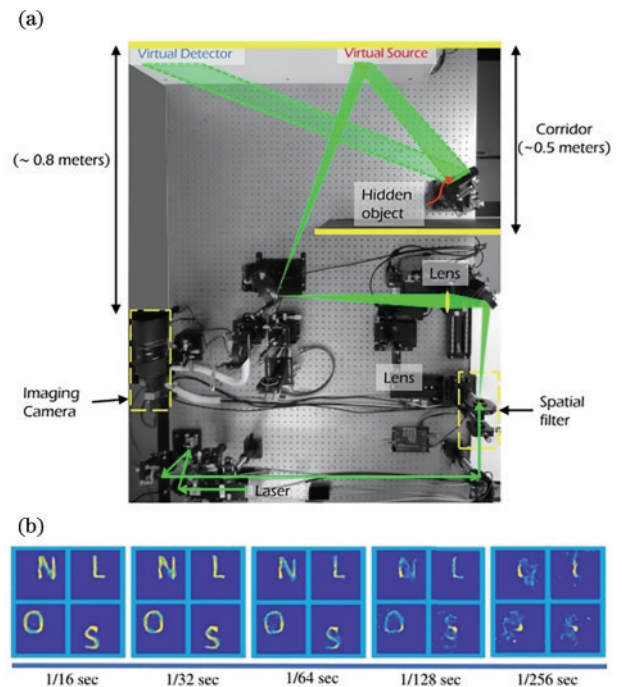


图6 基于深度逆相关的散斑图案非视域成像<sup>[45]</sup>。(a)实验装置图;(b)不同曝光时间下的重建结果

Fig. 6 Non-line-of-sight imaging for speckle patterns based on deep-inverse correlography<sup>[45]</sup>. (a) Experimental setup; (b) reconstructed results under different exposure time

2019年,华中科技大学Lei等<sup>[46]</sup>搭建了4个不同的非视域场景,使用所训练的深度神经网络模型进行仿真和实验,利用散斑分别对MINIST手写数字和人体姿势进行识别,所有场景下,该模型均能以90%以上的准确率进行重建。但受限于硬件和神经网络模型,系统未能重建出具体的图像。他们所提出的方法使基

于散斑图案的非视域成像不再受视场的限制,为更复杂的非视域场景重建提供了一种新的思路。

2020年,Divitt等<sup>[47]</sup>提出了一种中波红外(MWIR)的非视域成像系统。该系统无须主动照明物体,使用双光谱和相位检索方法对MWIR宽带热物体的散斑图案进行成像。在MWIR中,由于角度“记忆效应”对波长的依赖性,视场角相比可见光波段增加了约1个数量级。另外,他们还在可见光不可透过的材料的遮挡下,使用MWIR光穿过遮挡对物体进行成像,验证了非视域成像在有遮挡物情况下重建图像的可行性。

2021年,西北大学的Willomitzer等<sup>[48]</sup>提出了一种合成波长全息术,并将其应用于非视域成像。合成波长全息术原理如图7(a)所示,两波长十分相近的光传输相同的路径,经过散射后,两束光仍保留了相位信

息,基于多波长干涉理论,两束光波长越接近,可测得的深度越大,根据其“合成光波”的等效波长可计算得到非视域物体表面的全息信息。系统如图7(b)所示,实验中使用波列长度为0.23 nm的两束激光先后照明,使用相机拍摄散斑图案,通过对两波长下散斑图案的处理获取相位信息,实现了对15 mm×20 mm大小物体的重建,分辨率小于1 mm,如图7(c)~(g)所示,重建结果见图7(h)~(l)。基于合成波长全息术的非视域成像系统有效减小了中继面的采样区域面积,仅需采样两次就可重建图像,具有更大的视场角,可实现亚毫米级分辨率的重建,并且可根据散射度调谐光源波长以获得更好的重建效果,在采集速度和重建质量等各方面都极具潜力,可能会成为未来非视域成像的一个重要研究方向。

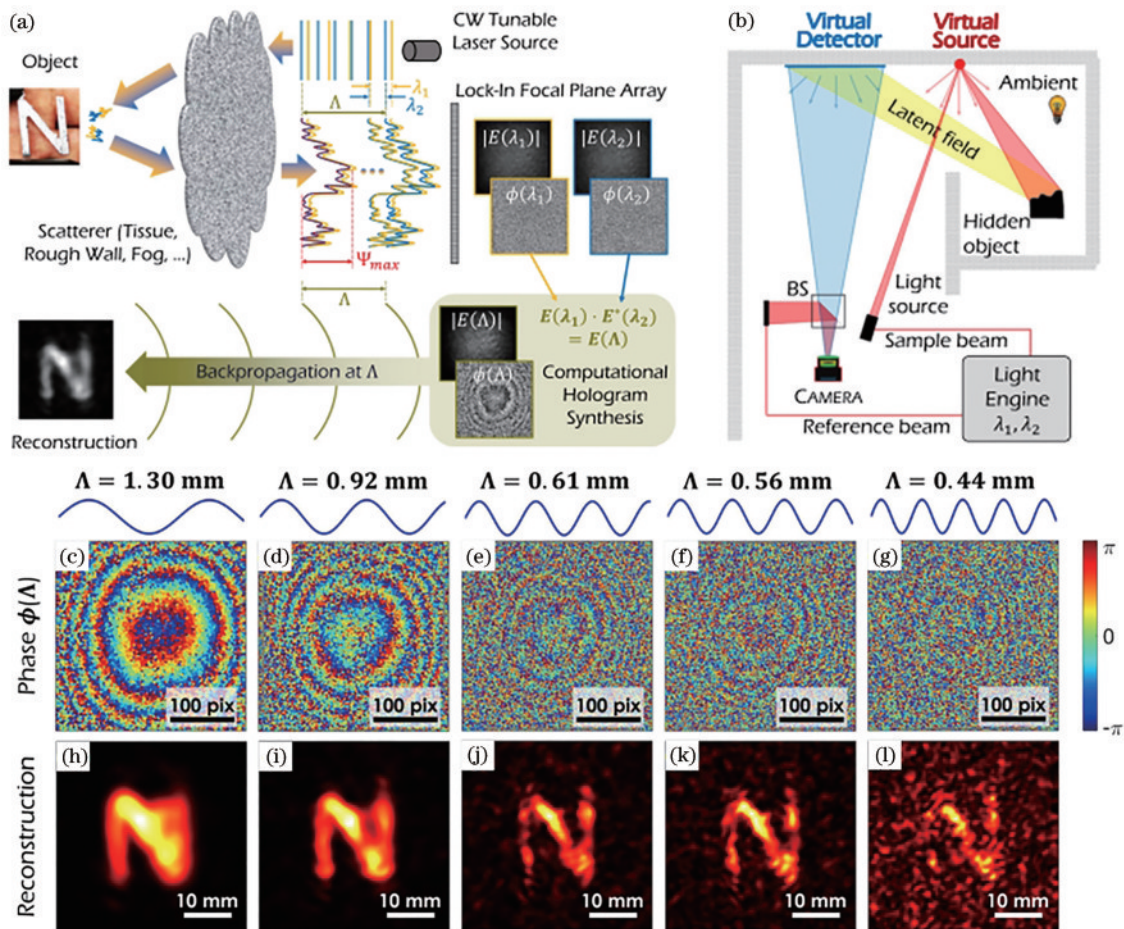


图7 基于合成波长全息术的非视域成像<sup>[48]</sup>。(a)合成波长全息术原理;(b)系统原理图;(c)~(g)合成波长全息采样相位;(h)~(l)重建结果

Fig. 7 Non-line-of-sight imaging using synthetic wavelength holography<sup>[48]</sup>. (a) Synthetic wavelength holography principle; (b) system principle; (c)~(g) sampling phase of the synthetic wavelength holography; (h)~(l) reconstruction results

### 3.2 基于空间相干的非视域成像

干涉仪可以测量光波的相位信息,利用空间相干性可以重建相机视野内的场景,空间相干性是指光波在不同传播位置存在的一定相位关系。在经过漫反射后,光波的空间相干性得以保持,因此使用干涉仪作为

探测器探测光波的相位信息,可以用于非视域成像。

2018年,美国佛罗里达大学的Batarseh等<sup>[49]</sup>基于空间相干性提出了一种被动非视域成像方法,系统原理如图8(a)所示,使用带宽为30 nm、中心波长为525 nm的大功率LED和一个漫射器进行照明,探测器



为望远镜系统和 Sagnac 干涉仪所组成的如图 8(b) 所示的双相 Sagnac 干涉仪 (DuPSaI), 通过两次测量确定复合空间相干函数 (SCF) 的实部和虚部。利用蒙特卡罗方法, 该方法估计 SCF 在多重散射介质中的变化。研究成果验证了光的空间相干性经过散射后不会完全消失的结论, 且该方法在理论上可以在自然光照明下实现完全被动, 获得非视域场景的信息。

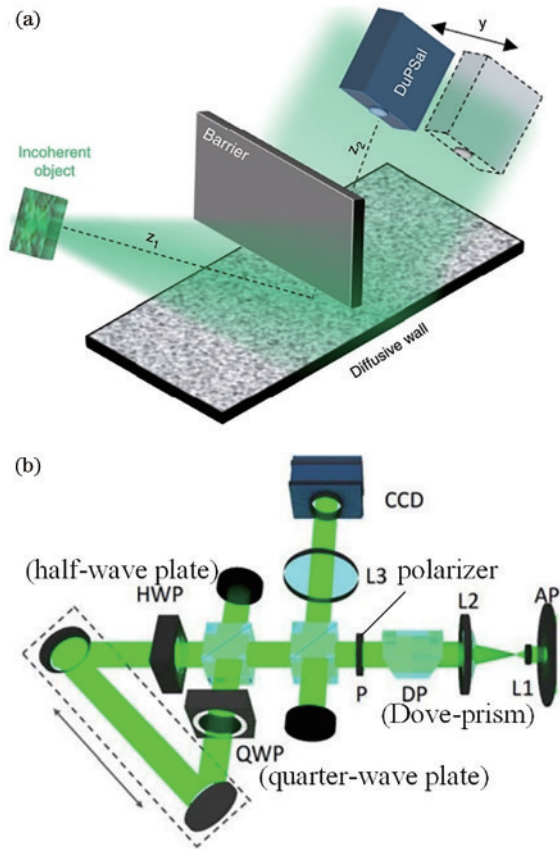


图 8 基于空间相干的非视域成像<sup>[49]</sup>。(a) 系统原理图;  
(b) DuPSaI 实验装置图

Fig. 8 Non-line-of-sight imaging based on spatial coherence<sup>[49]</sup>.  
(a) System principle; (b) experimental setup of DuPSaI

2019 年, 美国 Beckus 等<sup>[50]</sup> 提出了一种基于多模态数据融合的非视域成像方法, 系统原理如图 9(a) 所示。该方法将非视域场景中的强度和空间相干性信息结合起来, 构造一个多准则凸优化问题, 利用光传播和散射模型以及多种条件下图像的稀疏性, 针对凸优化问题提出了一种基于乘子交替方向法的解法。实验中使用 CCD 相机测量场景中的强度信息, 由 DuPSaI 测量散射光的 SCF, 最后通过图像融合技术重建非视域场景。图 9(b) 为采集的强度图, 图 9(c) 为仅使用强度信息重建的图像, 图 9(d) 为散射相干信息测量结果, 图 9(e) 为融合两种信息重建的结果。多模式信息融合框架为未来基于多种模式信息结合以提高非视域成像的重建质量提供了一种新思路。

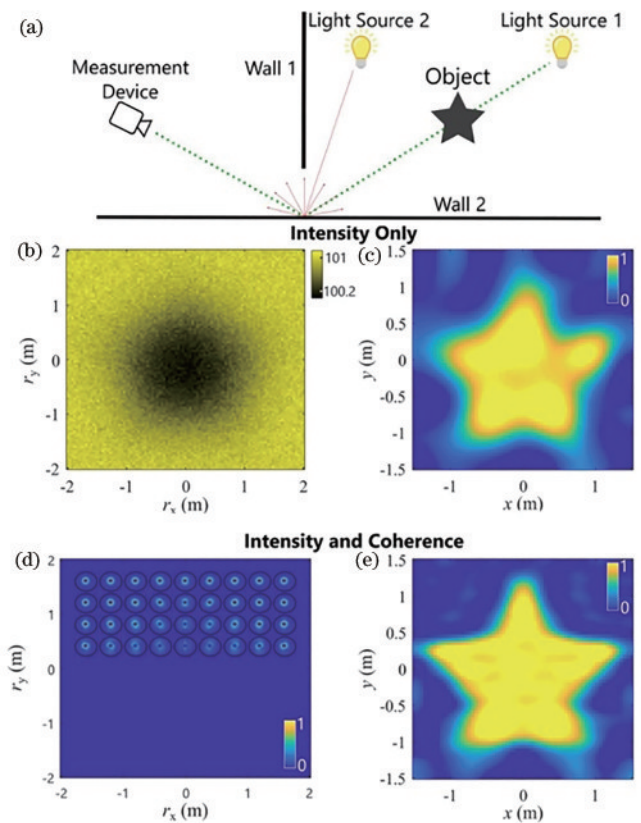


图 9 多模态非视域成像<sup>[50]</sup>。(a) 系统原理图; (b) 强度图; (c) 仅使用强度的重建; (d) 散射相干测量; (e) 融合重建  
Fig. 9 Multi-modal non-line-of-sight imaging<sup>[50]</sup>. (a) System principle; (b) intensity measurement; (c) reconstruction only using intensity; (d) scattered coherence measurement; (e) fusion reconstruction

#### 4 基于强度信息的非视域成像

基于强度信息的非视域成像<sup>[51]</sup> 使用传统相机作为探测器, 其成像方法主要有两种: 一种是在非视域空间放置大小和形状已知的遮挡物, 使用半影成像技术重建图像; 另一种是直接获取非视域场景的光强度信息, 将信息导入训练后的模型恢复图像。Velten 等<sup>[52]</sup> 最先研究了光强在非视域成像的应用, 发现对于漫反射面, 需要相机具有很高的灵敏度。由于灵敏度限制, 一般通过遮挡物<sup>[53-54]</sup> 实现被动非视域成像。另外一些学者提出可利用中继面和物体的双向反射分布函数 (BRDF), 实现基于强度信息的非视域图像重建。

近年来, 随着深度学习和神经网络等算法的普及, 一些团队致力于研究基于强度信息的非视域成像, 主要方向为利用遮挡物和非视域场景直接返回的光线进行被动照明, 实现成像; 也可利用一些生活中常见的诸如手电筒以及车灯等光源, 这些光源通过中继面主动照明非视域场景, 实现成像<sup>[55]</sup>。

2018 年, 美国的 Tancik 等<sup>[56]</sup> 基于训练后的数据库, 使用相机自带的闪光灯作为光源, 使用传统相机进行拍摄。实验中, 光源照射相机方向的墙面, 相机拍摄

地面,通过拍摄有无目标物体前后两组图像,并将其导入经过训练的数据库中,最终得到隐藏目标图像。他们的方法可对 12 cm 宽的二维物体进行定位,定位精度可达 1.7 cm,最高具有 87.7% 的准确率识别隐藏对象的类别,验证了相机作为探测器在非视域成像中的可行性。但这个方法仍存在一定的局限性:需要提前预知隐藏对象的几何类别并加以训练。

2019 年,美国波士顿大学的 Saunders 等<sup>[57]</sup>使用半影成像技术,在非视域空间放置大小和形状已知的遮挡物,使用数码相机对隐藏目标进行图像重建。实验中使用了 1 个 400 万像素的数码相机、1 个 20 inch

(1 inch=2.54 cm) 的彩色液晶显示器及 1 个大小为 7.7 cm×7.5 cm 的黑色矩形遮挡板。相机拍摄显示器上所放映图案经遮挡板在墙面上的阴影和半影,在 3.5 s 的采集时间下,得到如图 10(a)所示相机拍摄图片,通过计算得到如图 10(b)所示的分辨率为 35×35、像素大小为 1.12 cm×1.05 cm 的彩色图像,并且估算得到遮挡板的位置,如图 10(b)所示。遮挡物的估计计算约为 18 min,隐藏场景的恢复需要 48 s。他们所提出的方法使非视域成像不再受光源及扫描采集的限制,并且重建出了彩色二维图像。

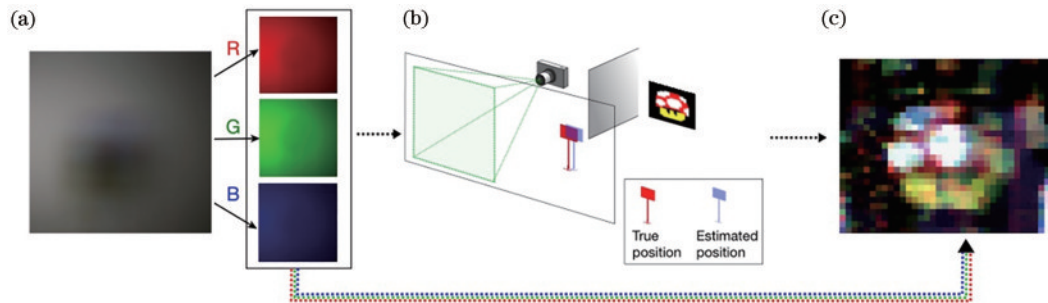


图 10 基于数码相机的非视域成像<sup>[57]</sup>。(a) 相机拍摄图片;(b) 遮挡物位置的估计;(c) 重建结果

Fig. 10 Non-line-of-sight imaging based on digital camera<sup>[57]</sup>. (a) Picture taken by camera; (b) estimation of the position of the obstruction; (c) reconstruction result

随着单像素相机的发展,基于压缩感知的单像素成像近年来也受到越来越多的关注。2018 年,Chen 等<sup>[58]</sup>将基于压缩传感的单像素成像技术应用于非视域成像中,实验装置如图 11(a)所示。该系统使用扩束的准直脉冲激光作为光源,从目标返回的光线经数字微镜(DMD)处理后反射聚焦于单像素相机,单像素相机与 DMD 需同步以记录每个掩模下所探测的强度信

号,在 20 s 时间内可重建隐藏场景,图 11(b)中上行为使用随机矩阵作为掩模的重建结果,下行为使用 Hadamard 矩阵所重建的结果。2019 年,英国格拉斯哥大学 Musarra 等<sup>[59]</sup>基于单像素相机还原了物体的颜色信息,基于压缩感知的非视域成像的采集速度由 DMD 投影掩模的速度决定,结合 DMD 和单像素相机对非视域成像采集速度的提高具有广阔的前景。

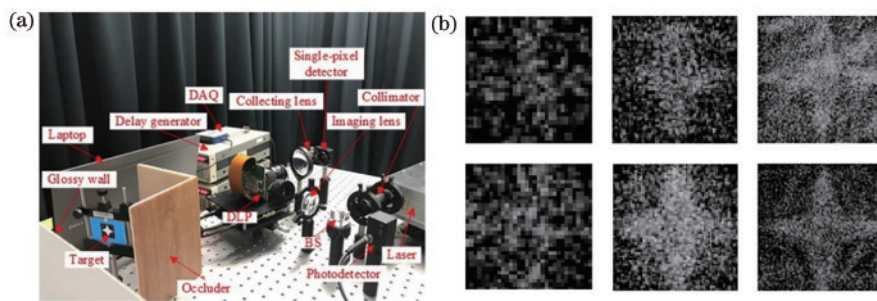


图 11 基于压缩传感的非视域成像<sup>[58]</sup>。(a) 系统装置;(b) 重建结果,上行使用随机矩阵,下行使用 Hadamard 矩阵

Fig. 11 Non-line-of-sight imaging based on compressive sensing<sup>[58]</sup>. (a) System setup; (b) reconstruction results, the first row uses random pattern, the second row uses Hadamard pattern

在基于强度的非视域成像中,可以利用中继面和物体等的 BRDF 来重建隐藏场景,但该研究需要特定的环境,易受环境光的影响。Klein 等<sup>[60]</sup>使用激光作为光源,用一台分辨率为 320×256 的相机作为探测器,通过反复模拟光线传输分布,得到最接近隐藏场景强度分布的结果,证明了可通过模拟光传输来定位非视域场景中的物体并追踪被定位物体的结论。多伦多大

学 Chen 等<sup>[61]</sup>于 2019 年基于隐藏物体表面反射率的方向性,即 BRDF,提出一种可训练的将间接漫反射映射到场景直接反射的模型,其实验装置如图 12(a)所示,该模型无需遮挡物,仅使用连续照明光束和传统 RGB 相机可实现全彩的非视域成像,目标图像、采集图像和重建结果如图 12(b)所示。

2019 年,日本奈良科学技术研究所的 Kaga 等<sup>[62]</sup>提



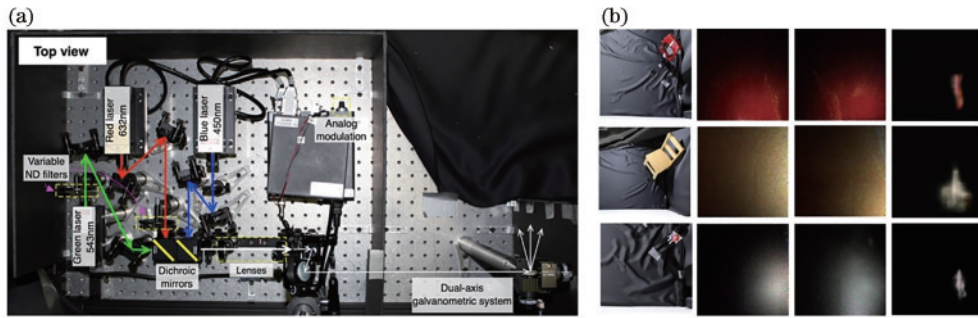


图 12 稳态非视域成像<sup>[61]</sup>。(a)实验装置;(b)目标图像、采集图像和重建结果

Fig. 12 Steady non-line-of-sight imaging<sup>[61]</sup>. (a) Experimental setup; (b) object images, captured images, and reconstruction results

出了一种基于热像仪的非视域成像系统,成像装置和实验结果如图 13 所示。他们所提出的系统利用热辐射的特性将物体作为光源,收集物体所发出的远红外光。实验中使用热像仪采集烙铁和暖手器所发出的红外信号,将其分解为镜面 BRDF 和漫反射 BRDF,利用其中的镜面 BRDF 较准确地还原了物体的位置并计算出了物体的温度。由于远红外光在空气中的衰减,该系统仅能探测至多 200 mm 内的物体,且只能探测到高温物体,但他们的研究为需要探测火灾等视域外场

景温度的一些特殊场景提供了一定的研究价值。

## 5 总结和展望

表 1 总结了非视域成像系统,其中每一行列出了不同 NLOS 成像技术的光源、探测器、采集信息和任务。目前,针对非视域成像,从硬件结构和算法上已发展出多种模式,不同模式的非视域成像系统存在各自优势,也面临一些问题。

基于飞行时间的非视域成像系统仍是研究的主流,随着重建算法不断改进完善,重建质量和速度得到了显著改善,SPAD 因成本优势逐渐替代了条纹相机。基于飞行时间的非视域成像系统若要投入实际应用,仍存在以下问题:由于采集信号为多重散射光,有效光子信号相对背景噪声较弱,采集时间较长,且会采集到部分更高阶的散射光,从而引入噪声;对于多目标场景,由于材料表面反射率的影响,部分物体被采集到的信号微弱,重建结果受到影响;目前基于飞行时间的非视域成像需要利用到诸如探测器和激光器位置等视域内场景信息,而现有研究假设视域内场景信息已知,实际应用中评估视域内场景信息十分必要;系统所需的超快脉冲激光器和超高时间分辨率探测器等设备增加了成本。

基于相干信息的非视域成像系统根据原理分为散斑图案和空间相干两类。其中,基于散斑图案的非视域成像利用角度“记忆效应”实现对隐藏物体的图像重建,但同时限制了系统的视场角,这使其很难在需要观察大范围场景时得到应用。基于空间相干的非视域成像研究处于起步阶段,尚未实现仅使用空间相干信息进行非视域重建的目标,且所需探测器成本高。无论是基于散斑图案还是空间相干的非视域成像,均需较强信号,而非视域场景的多次散射衰减了光信号,限制了基于相干的非视域图像重建,使其难以用于远距离物体。此外,基于相干信息的非视域成像大都假设隐藏空间的部分几何信息已知,这会限制其应用。

基于光强信息的非视域成像多利用隐藏场景的遮挡物实现图像重建,其与基于相干信息的非视域重建存在相同的问题,需要隐藏空间的部分先验信息,即对

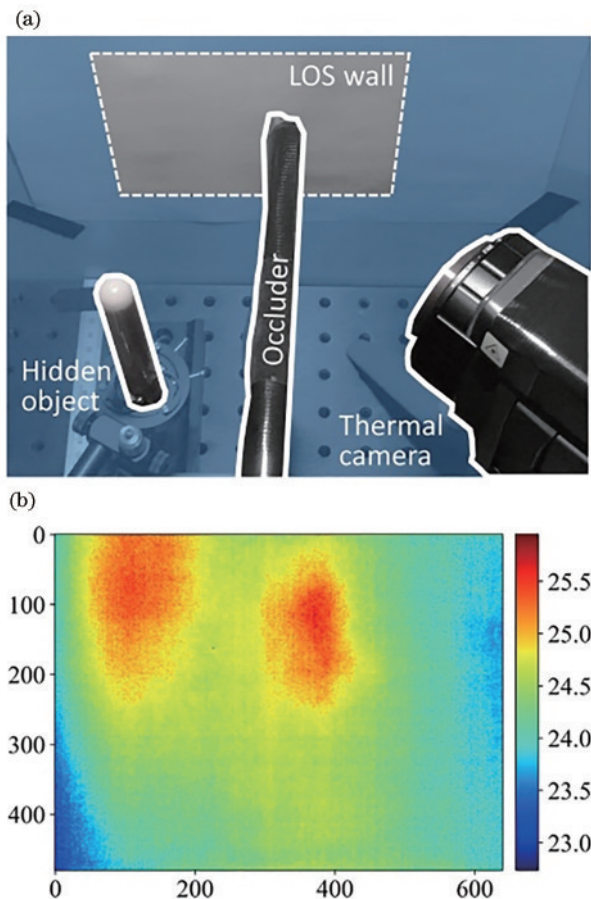


图 13 基于热像仪的非视域成像<sup>[62]</sup>。(a)实验装置;

(b)重建结果

Fig. 13 Non-line-of-sight imaging based on thermal camera<sup>[62]</sup>.

(a) Experimental setup; (b) reconstruction result



表 1 非视域成像系统  
Table 1 NLOS imaging systems

Reference	Illumination	Sensor	Information	Task
[3, 18]	Pulsed laser	Streak camera	Time of flight	3D reconstruction
[5-6, 51]	Pulsed laser	SPAD	Time of flight	Detection/Tracking/ Identification
[8, 16-18, 27-28, 63-64]	Pulsed laser	SPAD	Time of flight	3D reconstruction
[23]	Pulsed laser	Interferometer	Coherence	3D reconstruction
[35, 39]	Continuous laser	Conventional camera	Intensity	Detection/Tracking/ Identification
[42]	Ambient light	Interferometer + Conventional camera	Spatial coherence + Intensity	2D reconstruction
[45, 49]	Ambient light	Conventional camera	Intensity with partial occlude	2D reconstruction
[46]	Ambient light	Conventional camera	Intensity of moving object	2D reconstruction
[46]	Ambient light	Conventional camera	Intensity	Detection/Tracking/ Identification
[48]	Incoherent light source	Conventional camera	Intensity	2D reconstruction
[54]	Continuous laser	Conventional camera	Intensity	3D reconstruction

遮挡物的几何形状的估计,在实际应用中难以实现。此外,基于光强信息的非视域成像方法易受背景噪声的干扰,其算法的鲁棒性有待提高。

基于合成光波全息术的非视域成像极具潜力,但非视域成像要投入使用,仍需经过漫长的发展历程。未来,随着光电探测技术的发展,探测器的灵敏度提升,非视域成像系统探测效率和采集速度会得到改善,计算机性能的提升和非视域算法的优化使得非视域成像的重建时间和重建质量得到提高。多模式非视域成像结合各种模式非视域成像系统的利弊,弥补各自的不足,这将会受到关注,非视域成像终将投入安防、军事及生物医学等领域中,突破人类的视觉限制。

### 参 考 文 献

- [1] Altmann Y, McLaughlin S, Padgett M J, et al. Quantum-inspired computational imaging[J]. *Science*, 2018, 361(6403): eaat2298.
- [2] Ramesh R, Davis J. 5d time-light transport matrix: what can we reason about scene properties? [EB/OL]. [2022-10-22]. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/67888/TransientLightReportRaskarDavis.pdf?sequence=1>.
- [3] Gupta O, Willwacher T, Velten A, et al. Reconstruction of hidden 3D shapes using diffuse reflections[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19096-19108.
- [4] Adib F, Hsu C Y, Mao H Z, et al. Capturing the human figure through a wall[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(6): 1-13.
- [5] Chan S S, Warburton R E, Garipey G, et al. Non-line-of-sight tracking of people at long range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10109-10117.
- [6] Caramazza P, Bocolini A, Buschek D, et al. Neural network identification of people hidden from view with a single-pixel, single-photon detector[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11945.
- [7] Liu X C, Bauer S, Velten A. Analysis of feature visibility in non-line-of-sight measurements[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 10132-10140.
- [8] La Manna M, Nam J H, Reza S A, et al. Non-line-of-sight-imaging using dynamic relay surfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5331-5339.
- [9] Geng R X, Hu Y, Chen Y. Recent advances on non-line-of-sight imaging: conventional physical models, deep learning, and new scenes[J]. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 2022, 11(1): e1.
- [10] 金欣, 杜东宇, 邓儒嘉. 非视域成像技术分析展望[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20220305.
- [11] Jin X, Du D Y, Deng R J. Progress and prospect of non-line-of-sight imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220305.
- [12] Faccio D, Velten A, Wetzstein G. Non-line-of-sight imaging[J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, 2(6): 318-327.
- [13] Kirmani A, Hutchison T, Davis J, et al. Looking around the corner using ultrafast transient imaging[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 95(1): 13-28.
- [14] Kadambi A, Zhao H, Shi B X, et al. Occluded imaging with time-of-flight sensors[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(2): 1-12.
- [15] Jin C F, Tian X R, Tang M, et al. Research advances on non-line-of-sight three-dimensional imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210471.
- [16] Pandharkar R, Velten A, Bardagiy A, et al. Estimating motion and size of moving non-line-of-sight objects in

- cluttered environments[C]//CVPR, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 265-272.
- [16] O'Toole M, Heide F, Lindell D B, et al. Reconstructing transient images from single-photon sensors[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 2289-2297.
- [17] Xu F H, Shulkind G, Thrampoulidis C, et al. Revealing hidden scenes by photon-efficient occlusion-based opportunistic active imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9945-9962.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Ye J T, Huang X, Li Z P, et al. Compressed sensing for active non-line-of-sight imaging[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1749-1763.
- [21] Arellano V, Gutierrez D, Jarabo A. Fast back-projection for non-line of sight reconstruction[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11574-11583.
- [22] Jin C F, Xie J H, Zhang S Q, et al. Reconstruction of multiple non-line-of-sight objects using back projection based on ellipsoid mode decomposition[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20089-20101.
- [23] 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.
- [24] Metzler C A, Lindell D B, Wetzstein G. Keyhole imaging: non-line-of-sight imaging and tracking of moving objects along a single optical path[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2021, 7: 1-12.
- [25] Pediredla A K, Buttafava M, Tosi A, et al. Reconstructing rooms using photon echoes: a plane based model and reconstruction algorithm for looking around the corner[C]//2017 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 12-14, 2017, Stanford, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [26] Reza S A, la Manna M, Bauer S, et al. Phasor field waves: a Huygens-like light transport model for non-line-of-sight imaging applications[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29380-29400.
- [27] Shen S Y, Wang Z, Liu P, et al. Non-line-of-sight imaging via neural transient fields[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, 43(7): 2257-2268.
- [28] Renna M, Nam J H, Buttafava M, et al. Fast-gated 16 × 1 SPAD array for non-line-of-sight imaging applications[J]. *Instruments*, 2020, 4(2): 14.
- [29] Pei C Q, Zhang A K, Deng Y, et al. Dynamic non-line-of-sight imaging system based on the optimization of point spread functions[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32349-32364.
- [30] Liu X C, Guillén I, la Manna M, et al. Virtual wave optics for non-line-of-sight imaging[EB/OL]. (2018-10-17)[2022-10-02]. <https://arxiv.org/abs/1810.07535>.
- [31] Liu X C, 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.
- [32] Feng X H, Gao L. Ultrafast light field tomography for snapshot transient and non-line-of-sight imaging[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2179.
- [33] Li Z P, Liu X T, Wang J Y, et al. Fast non-line-of-sight imaging based on first photon event stamping[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(8): 1928-1931.
- [34] Xu W H, Chen S M, Tian Y Y, et al. Fast non-line-of-sight imaging based on product-convolution expansions [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4680-4683.
- [35] Luesia P, Crespo M, Jarabo A, et al. Non-line-of-sight imaging in the presence of scattering media using phasor fields[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3796-3799.
- [36] 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.
- [37] Freund I, Rosenbluh M, Feng S C. Memory effects in propagation of optical waves through disordered media[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(20): 2328-2331.
- [38] 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.
- [39] Smith B M, Desai P, Agarwal V, et al. CoLux: multi-object 3D micro-motion analysis using speckle imaging [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-12.
- [40] 谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004.
- Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.
- [41] 裴湘灿, 罗诗淇, 单浩铭, 等. 浴帘效应的模型发展及应用扩展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20220299.
- Pei X C, Luo S Q, Shan H M, et al. Model development and applications extension of the shower-curtain effect(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220299.
- [42] 吴术孔, 张宇宁. 被动非视域成像方法的研究进展[J]. *光电子技术*, 2021, 41(2): 87-93.
- Wu S K, Zhang Y N. Research progress of passive non-line-of-sight imaging methods[J]. *Optoelectronic Technology*, 2021, 41(2): 87-93.
- [43] Viswanath A, Rangarajan P, MacFarlane D, et al. Indirect imaging using correlography[C]//Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP), June 25-28, 2018, Orlando, Florida. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: CM2E.3.
- [44] Smith B M, O'Toole M, Gupta M. Tracking multiple



- objects outside the line of sight using speckle imaging [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: 6258-6266.
- [45] Metzler C A, Heide F, Rangarajan P, et al. Deep-inverse correlography: towards real-time high-resolution non-line-of-sight imaging[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 63-71.
- [46] Lei X, He L Y, Tan Y X, et al. Direct object recognition without line-of-sight using optical coherence [C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 11729-11738.
- [47] Divitt S, Gardner D F, Watnik A T. Imaging around corners in the mid-infrared using speckle correlations[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11051-11064.
- [48] Willomitzer F, Rangarajan P V, Li F Q, et al. Fast non-line-of-sight imaging with high-resolution and wide field of view using synthetic wavelength holography[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6647.
- [49] Batarseh M, Sukhov S, Shen Z, et al. Passive sensing around the corner using spatial coherence[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3629.
- [50] Beckus A, Tamasan A, Atia G K. Multi-modal non-line-of-sight passive imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 28(7): 3372-3382.
- [51] Seidel S W, Ma Y T, Murray-Bruce J, et al. Corner occluder computational periscopy: estimating a hidden scene from a single photograph[C]//2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 15-17, 2019, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [52] 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.
- [53] Baradad M, Ye V, Yedidia A B, et al. Inferring light fields from shadows[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: 6267-6275.
- [54] Yedidia A B, Baradad M, Thrampoulidis C, et al. Using unknown occluders to recover hidden scenes[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 12223-12231.
- [55] Bouman K L, Ye V, Yedidia A B, et al. Turning corners into cameras: principles and methods[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2017: 2289-2297.
- [56] Tancik M, Swedish T, Satat G, et al. Data-driven non-line-of-sight imaging with a traditional camera[C]// *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, June 15-20, 2018, Orlando, Florida. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2018: IW2B.6.
- [57] Saunders C, Murray-Bruce J, Goyal V K. Computational periscopy with an ordinary digital camera[J]. *Nature*, 2019, 565(7740): 472-475.
- [58] Chen Q, Chamoli S K, Yin P, et al. Imaging of hidden object using passive mode single pixel imaging with compressive sensing[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15 (12): 126201.
- [59] Musarra G, Lyons A, Conca E, et al. Non-line-of-sight three-dimensional imaging with a single-pixel camera[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12: 011002.
- [60] Klein J, Peters C, Martín J, et al. Tracking objects outside the line of sight using 2D intensity images[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32491.
- [61] Chen W Z, Daneau S, Brosseau C, et al. Steady-state 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, 2020: 6783-6792.
- [62] Kaga M, Kushida T, Takatani T, et al. Thermal non-line-of-sight imaging from specular and diffuse reflections [J]. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, 2019, 11(1): 8.
- [63] 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.
- [64] 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.