

非视域成像系统的研究进展

肖 涵

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月10日; 录用日期: 2023年5月10日; 发布日期: 2023年5月16日

摘 要

非视域成像是一种对视线范围外的场景进行成像的技术, 极大地拓展了成像设备的视野范围, 打破了传统光学成像技术的成像局限性。非视域成像系统一般由目标场景、中介面、探测器三部分组成, 通过中介面对视野范围外隐藏的目标场景成像, 是近十几年来的一种新的光学成像技术, 在未来有着巨大的发展前景, 包括无人驾驶、灾难救援、军事反恐和医疗成像等领域。本文针对国内外非视域成像的研究现状进行总结, 根据是否加入调制光将非视域成像分为主动非视域成像和被动非视域成像, 后再根据不同的设备或原理细分, 从成像系统、原理和算法等方向总结分析各个非视域成像技术的特点和发展。

关键词

非视域成像, 光学成像, 图像重建, 计算成像

Research Progress of Non-Line-of-Sight Imaging System

Han Xiao

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 10th, 2023; accepted: May 10th, 2023; published: May 16th, 2023

Abstract

Non-line-of-sight imaging is a technology that can image scenes outside the line of sight, which greatly expands the field of view of imaging equipment and breaks the imaging limitations of traditional optical imaging technologies. The non-line-of-sight imaging system is generally composed of three parts: the target scene, the interface surface, and the detector. Through the intermediary, it faces the hidden target scene imaging outside the field of vision. It is a new optical imaging technology in the past ten years. It has a huge potential in the future. Development prospects in-

clude unmanned driving, disaster relief, military anti-terrorism and medical imaging and other fields. This paper summarizes the research status of non-line-of-sight imaging at home and abroad. According to whether to add modulated light, non-line-of-sight imaging is divided into active and passive, and then subdivided according to different equipment or principles, from imaging systems, principles and algorithms, etc. The direction summarizes and analyzes the characteristics and development trends of various non-line-of-sight imaging technologies.

Keywords

Non-Line-of-Sight Imaging, Optical Imaging, Image Reconstruction, Computational Imaging

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“非视域”的概念最早是在通信领域中运用，它是指发射器和接收器之间非直接的点对点通信。在光学成像领域中，非视域成像的概念首次在 2008 年由 Ramesh 等[1]提出。随着光学成像技术不断地发展和提高，越来越多不同的领域对成像技术的需求也在日益提升，其中非视域成像技术得到了越来越多的关注与研究。传统的光学成像技术利用探测器获取视野范围内的感兴趣场景，但在复杂场景，例如拐角处、烟雾后等，就无法绕过障碍物对视野外的场景成像。非视域成像在本质上是属于一种计算成像，不仅依赖基本的光学原理还包含了相关图像算法。相对于传统成像而言，非视域成像的设备更昂贵且算法更复杂，再加上目标场景位于探测器视野范围外，导致最后的成像效果也要低于传统成像的效果，但对视域范围外的场景进行成像或定位等任务，在未来有着巨大的发展前景，包括无人驾驶、灾难救援、军事反恐和医疗成像等领域。非视域成像可根据是否加入调制光分为主动非视域成像和被动非视域成像，本文将从二者的角度出发介绍其研究现状和进展。

2. 主动非视域成像

自从非视域成像的概念被提出以后，主动非视域成像成为了人们探索和研究最为广泛的领域。在国内外，主要利用不同的成像设备进行研究，包括基于条纹相机(Streak Camera)、单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)、选通增强型电耦合器件(Intensified Charge Device, ICCD)、飞行时间(Time of Flight, ToF)相机等的主动非视域成像。

2.1. 基于条纹相机的主动非视域成像

条纹相机一个同时具有超高时间分辨率和空间(或频谱)分辨率的高性能探测仪器，它得到的光子在一维空间的飞行时间信息能达到亚皮秒甚至百飞秒，同时还能够通过扫描电极对时间以及空间(或频谱)信息进行二维测量。

2009 年 Kirmari 等人[2]用钛蓝宝石雷射激光器(中心波长为 810 nm, 50 fs 长脉冲)和条纹相机(250 fs)建立主动非视域实验场景，利用条纹相机图像的多路径分析来推断感兴趣场景的三维几何信息。2012 年 Velten 等人[3]利用钛蓝宝石雷射激光器(中心波长为 795 nm, 50 fs 长脉冲)和条纹相机(2 fs)首次实现了对隐藏场景的 3D 成像，实验系统装置如图 1 所示。该研究将飞行时间技术和反投影重建算法相结合，以解决漫反射包含的混合复杂图像信息，并通过滤波的方法提高分辨率，重建后的精度可达厘米级。

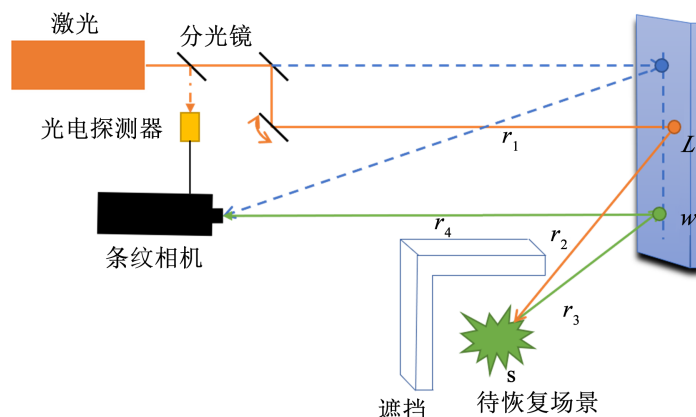


Figure 1. Optical path diagram of Velten *et al.*'s non field of view imaging experimental setup
图 1. Velten 等人非视域成像实验装置光路图

2014 年 Naki 等人[4]利用钛蓝宝石雷射激光器(中心波长为 795 nm, 50 fs 长脉冲)和条纹相机(2 fs)实现了对透射介质的非视域成像, 恢复了毛玻璃后感兴趣场景的三维成像, 如图 2 所示。在同一年, Raviv 等人[5]利用同样的装置, 实现了对透射介质后感兴趣场景的方向和位置的估计。

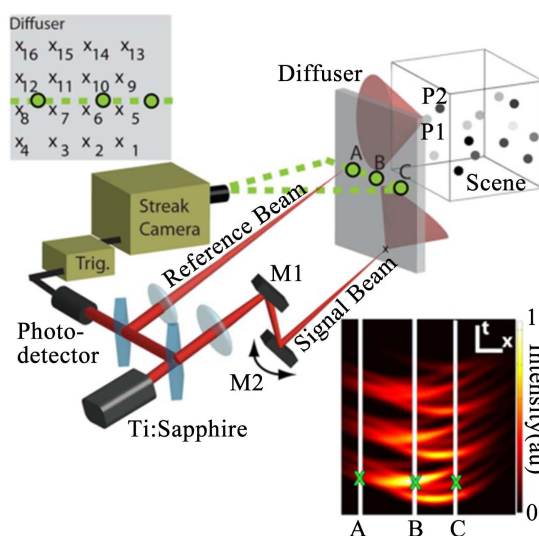


Figure 2. Naki *et al.* [4] Non field of view imaging experimental setup diagram
图 2. Naki 等人[4]非视域成像实验装置图

2.2. 基于单光子雪崩二极管的主动非视域成像

SPAD 是一种利用雪崩击穿实现单光子探测能力的光电探测器, 将它与时间相关的计数器件相结合, 对单光子的飞行时间进行检测和采集, 测量时间大致为 20 ps~100 ps, 对应 6 mm~30 mm 的时间分辨率, 虽然 SPAD 的时间分辨率比 ToF 相机差, 但光子效率和信噪比更好[6], 还具有宽光谱响应范围、极高灵敏度和低功耗等特性。随后 Buttafava 等人[7]将 SPAD 与单像素结合, 利用反投影算法对感兴趣场景进行重建, 由于实验场景的限制, 无法对远距离范围内的场景进行重建。Genevieve 等人[8] [9]提出一种基于激光雷达和 SPAD 的追踪定位系统, 该方法精度可达 ± 1 cm。Laurenzis 等人[10] [11]将盖革模式雪崩光电二极管阵列和人眼安全红外激光器相配合, 实现非视域成像的重建和定位。在 2017 年, Susan 等人[12]提出了一个基于单激光照明和单像素单光子探测的远程跟踪系统, 该系统能追踪、定位和重建一个或多个

个隐藏在视野范围外的目标且距离可超过 50 米。Tsai 等人[13]发现并证明了第一次返回光子的飞行时间只依赖于 NLOS 场景的几何形状，并且每次观测几乎总是从单个 NLOS 场景点生成，由此提出“空间雕刻算法”，如图 3 所示。随后在 2018 年，哈尔滨工业大学的靳辰飞等人[14]，在反投影重建算法的基础上利用“椭球模式分解”，然后分别通过滤波和阈值，从椭球模式中重新构建对象，该方法可以有效地消除多个隐藏物体之间的混叠影响，在几乎没有形状畸变的情况下获得良好的重建质量。

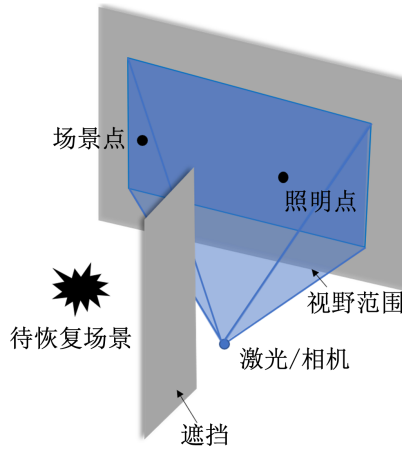


Figure 3. Tsai *et al.* Non visual imaging based on spatial carving algorithm
图 3. Tsai 等人基于空间雕刻算法的非视域成像

2.3. 基于选通 ICCD 的主动非视域成像

Repasi 等人[15]在 2009 年利用短红外激光器和选通 ICCD 实现了非视域成像。随后在 2013 年，Laurenzis 等人[16][17]将高分辨率的 ICCD 和激光作为成像设备，利用计算光学技术可以分析散射光子的时空分布，并还原其场景信息，实现了较短时间内的米量级尺度的三维非视域成像，实验装置图如图 4 所示。

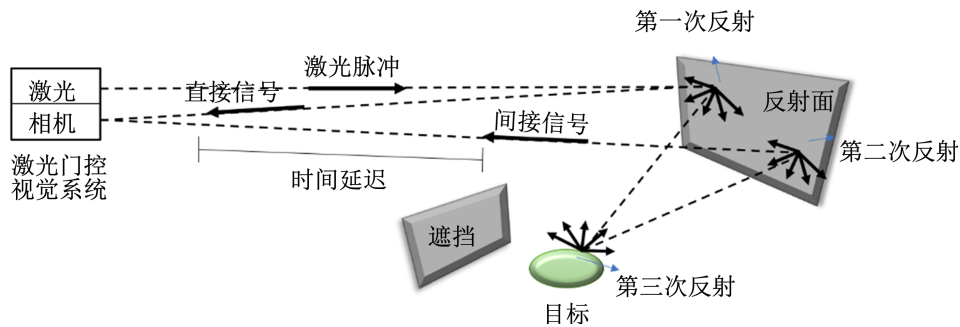


Figure 4. Laurenzis *et al.* non field of view imaging principle diagram
图 4. Laurenzis 等人的非视域成像原理图

之后，北京理工大学的许凯达等人[18]提出了一种基于激光距离选通技术的非视域成像系统，将干净玻璃、落灰玻璃和瓷砖作为中介面，在封闭的黑暗空间中进行实验，结果证明非视域成像的重建结果与中介面的材料(反射特性)有关。

2.4. 基于选通 ICCD 的主动非视域成像

相对于其他探测器来说 ToF 相机操作系统更简单，速度也更快精度可达毫米量级。2014 年 Hullin 等

人[19]使用振幅连续波调制(Amplitude Modulated Continuous Wave, AMCW)的 ToF 相机进行瞬态成像, 将非视域成像简化成线性逆问题求解, 对视野范围外隐藏的感兴趣场景进行重建, 如图 5 所示。随后 Heide 等人[20]在此基础上, 提出了一种从漫反射瞬态图像中重建隐藏几何和低对比度反照率值的方法, 对不同反照率物体的重建。Kadamb 等人[21]提出虚拟传感器阵列(VSA), 将 ToF 相机距离测量与阵列信号处理连接起来, 进行非视域场景下的遮挡成像, 实现对隐藏场景的定位和成像。

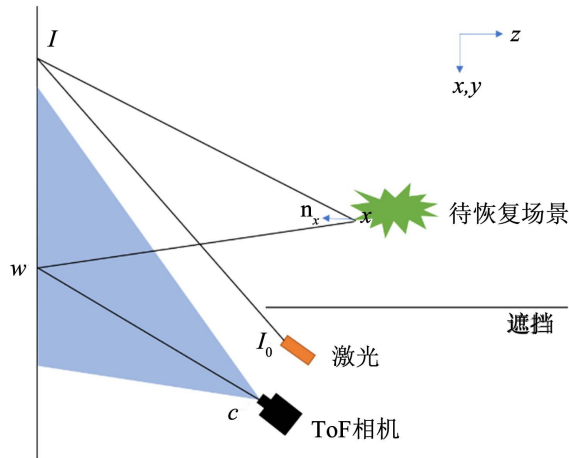


Figure 5. Hullin *et al.*'s non field of view imaging experimental model based on AMCW ToF camera

图 5. Hullin 等人基于 AMCW ToF 相机的非视域成像实验模型图

3. 被动非视域成像

被动非视域成像的出现和发展要晚于主动非视域成像, 从原理上来说二者都需要获取从中介面反射来的光子从而进行重建, 不同之处在于被动非视域成像无需加入主动光调制, 只需在自然光的条件下进行图像重建即可。目前根据不同的工作原理可将被动非视域成像分为: 基于空间相干测量、强度相干测量、光学偏振测量和红外波段测量等原理的被动非视域成像。

3.1. 基于空间相干测量的被动非视域成像

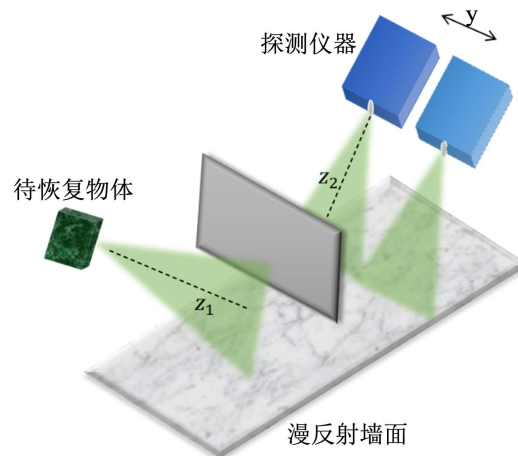


Figure 6. Batarseh *et al.*'s non field of view imaging based on spatial coherence

图 6. Batarseh 等人基于空间相干性的非视域成像

2018年 Batarseh 等人[22]利用 Sagnac 干涉仪进行被动非视域成像实验并验证了在漫射墙反射光时空相干性的转变可以用来检索隐藏在角落的物体的几何信息并评估它们的位置,如图 6 所示。在实际应用中,通过限制探测仪器的视场,可以有效地抑制非相干体散射的影响。Beckus 等人[23]利用四维空间相干函数来重建被遮挡物体的二维投影,提出了一种多模态信息融合框架,求解不同尺度反射场强度和空间相干性信息的多准则凸优化重构问题,从而实现普通照明下的非视域成像。Boger-Lombard 等人[24]将 ToF 相机带入被动非视域成像领域,提出一种光学 ToF 技术,通过干涉测量法从散射光的时间交叉相关性中检索 TOF 信息,提供了比最先进的超快探测器高出三个数量级的时间分辨率,从而实现了对隐藏场景的定位。

3.2. 基于强度相干测量的被动非视域成像

基于强度相干测量的非视域成像是消费级相机最能直接采集的一种方式,也是被动非视域成像中最具有潜力的一种方法。在 2017 年 Bouman 等人[25]利用墙壁边缘拐角处产生的阴影,利用“边缘相机系统”恢复 1-D 视频,揭示在闭塞场景中移动的人的数量和轨迹,如图 7 所示。

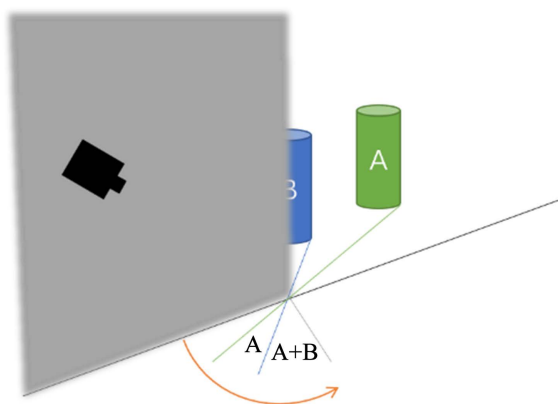


Figure 7. Model diagram of Bouman *et al.*'s non field of view imaging system based on edge camera system

图 7. Bouman 等人基于边缘相机系统的非视域成像系统模型图

2018年 Tancik 等人[26] [27] [28]结合传统几何理解和数据驱动技术的方法实现普通消费级相机的被动非视域成像,用于在 2D 中识别、定位和跟踪拐角处的隐藏对象。Baradad 等人[29]将光传输建模为线性系统,并结合关于光场结构的先验知识,通过已知形状和位置的遮挡物,重建场景的二维表示。随后在 2019 年 Saunders [30]等人在此基础上,提出一种基于计算潜望镜的被动非视域成像技术,该技术在遮挡物形状和大小已知的情况下,实现隐藏场景的彩色二维重建。Yedidia 等人[31]扩展了基于遮挡物的被动非视域成像的应用范围,利用盲解卷积重建未知场景和估计未知遮挡物的形状和大小。2021 年 Geng 等人[32]提出一种基于流形嵌入和最优传输的无源 NLOS 成像框架 NLOS-OT,用于重建高质量的复杂隐藏场景。还创建了第一个大规模的无源 NLOS 成像数据集 NLOS-passive。随后 Wang [33]等人利用深度学习实现 NLOS 识别系统,用不到 1 秒的时间对普通相机拍摄的手写数字、手势、人体姿势和时尚产品在墙面的模糊图像(81.58%至 98.26%)进行了高精度识别。

3.3. 基于光学偏振测量的被动非视域成像

Hassan 等人[34]于 2019 年将偏振与 Cook-Torrance 着色器结合在一起,为光传输矩阵(LTM)引入了稀疏性,使被粗糙表面遮挡的场景能够被动恢复。偏振信息 NLOS 成像具有从环境中提取更多信息的优点,

同时还具有稀疏传输矩阵，利用穆勒矩阵将强度下的转换映射到偏振下的转换。Tanaka 等人[35]将偏光器的有效角度理论引入计算成像领域，把与偏振相关的漏光效应系数加入光传输矩阵中以改善矩阵的条件数，该技术可作为一般非视域成像的增强技术，如图 8 所示。

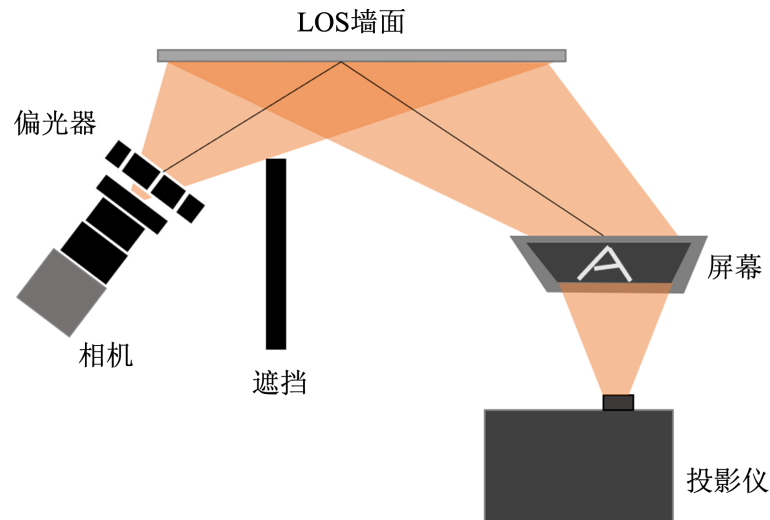


Figure 8. Tanaka *et al.* Non field of view imaging based on polarization information
图 8. Tanaka 等人基于偏振信息的非视域成像

3.4. 基于红外波段测量的被动非视域成像

Kaga 等人[36]在 2019 年用热成像技术来估计隐藏场景的位置和温度，对两个组件沿所有可能光路的路径进行投票，可以得到位置的概率分布。一旦物体与墙壁之间的距离被估计出来，隐藏物体的温度就可以由扩散强度逆估计出来。同年，Maede 等人[37]提出了一种新的长波红外非视距成像框架，由于表面反射率在长波红外光谱中具有比在可见光谱中强得多的镜面反射，建立具有长波红外特性的光传输模型，实现对隐藏物体的二维形状恢复和三维定位。2020 年 Divitt 等人[38]使用双谱和相位检索方法，利用中红外探测器通过扩散器和周围角落的散斑相关成像，分辨率接近衍射极限。还首次实现了通过对在可见光中真正不透明材料(例如粗糙的硅)遮挡下的非视域成像，其系统如图 9 所示。

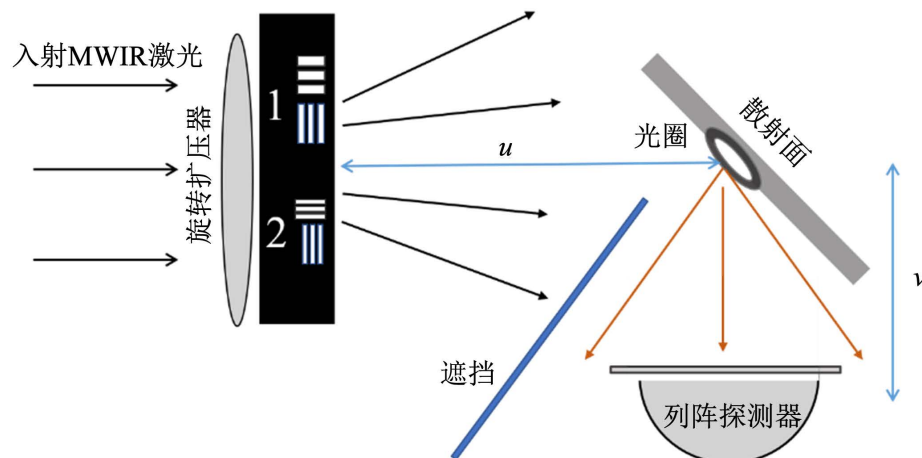


Figure 9. Divitt *et al.* Non field of view imaging based on mid infrared bands
图 9. Divitt 等人基于中红外波段的非视域成像

4. 总结与展望

非视域成像极大地拓展了传统成像的视野范围,使更多复杂场景成像成为可能。主动非视域成像具有精度高、分辨率高、对环境鲁棒性强和能够进行三维重建等优势。主动非视域成像使用的成像设备大多都具备很高的时间分辨率,甚至能够达到飞秒级别,可获得时间和维度上的信息从而实现对隐藏物体的重建。利用具有较高时间分辨率的光子探测器对目标场景三次反射光中时间维度和强度信息的接收处理,对获得的具有时间分辨率的数据进行算法处理,从而达到跟踪、重建和识别等工作。但由于精确时间分辨率的探测器过于昂贵而且需要大量且复杂的计算,导致主动非视域成像应用场景具有一定的局限性。而被动非视域成像则具有设备廉价,光路简单易操作,应用场景更广泛的特点。被动非视域成像使用消费级成像设备采集中介面上的光学信息,输入算法即可恢复出隐藏物体的信息,操作更简便快捷。由于被动非视域成像相对于主动非视域成像,缺失了维度上的信息,这也是导致被动非视域成像重建图像质量低的原因之一。同时,被动非视域成像容易受到环境光的干扰,从而对重建效果造成一定的影响。在实际应用中,可以根据不同场景的特点选用不同方式的非视域成像以达到良好的重建效果。毫无疑问,非视域成像在未来的计算光学和计算成像等领域有着广阔前景,提高非视域成像重建的准确性和基于更加恶劣的环境下非视域成像将称为未来的研究方向,更多技术和设备与非视域成像的结合将成为未来前景的关键一步。

参考文献

- [1] Ramesh, R. and Davis, J. (2008) 5D Time-Light Transport Matrix: What Can We Reason about Scene Properties? Technical Report, Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 United States.
- [2] Kirmani, A., Hutchison, T., Davis, J., *et al.* (2009) Looking around the Corner Using Transient Imaging. *Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, Kyoto, 29 September-2 October 2009, 159-166. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2009.5459160>
- [3] Velten, A., Willwacher, T., Gupta, O., Veeraraghavan, A., Bawendi, M.G. and Raskar, R. (2012) Recovering Three-Dimensional Shape around a Corner Using Ultrafast Time-of-Flight Imaging. *Nature Communications*, **3**, Article No. 745. <https://doi.org/10.1038/ncomms1747>
- [4] Naik, N., Barsi, C., Velten, A. and Raskar, R. (2014) Estimating Wide-Angle, Spatially Varying Reflectance Using Time-Resolved Inversion of Backscattered Light. *Journal of the Optical Society of America A*, **31**, 957-963. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.000957>
- [5] Raviv, D., Barsi, C., Naik, N., Feigin, M. and Raskar, R. (2014) Pose Estimation Using Time-Resolved Inversion of Diffuse Light. *Optics Express*, **22**, 20164-20176. <https://doi.org/10.1364/OE.22.020164>
- [6] Maeda, T., Satat, G., Swedish, T., *et al.* (2019) Recent Advances in Imaging around Corners. (Preprint)
- [7] Buttafava, M., Zeman, J., Tosi, A., Eliceiri, K. and Velten, A. (2015) Non-Line-of-Sight Imaging Using a Time-Gated Single Photon Avalanche Diode. *Optics Express*, **23**, 20997-21011. <https://doi.org/10.1364/OE.23.020997>
- [8] Gariepy, G., Tonolini, F., Henderson, R., *et al.* (2016) Detection and Tracking of Moving Objects Hidden from View. *Nature Photonics*, **10**, 23-26. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.234>
- [9] Gariepy G, Tonolini, F., Henderson, R., *et al.* (2015) Tracking Hidden Objects with a Single-Photon Camera. (Preprint)
- [10] Laurenzis, M., Klein, J., Bacher, E. and Metzger, N. (2015) Multiple-Return Single-Photon Counting of Light in Flight and Sensing of Non-Line-of-Sight Objects at Shortwave Infrared Wavelengths. *Optics Letters*, **40**, 4815-4818. <https://doi.org/10.1364/OL.40.004815>
- [11] Laurenzis, M., Christnacher, F., Klein, J., *et al.* (2015) Study of Single Photon Counting for Non-Line-of-Sight Vision. *Proceedings of SPIE*, **9492**, 31-38. <https://doi.org/10.1117/12.2179559>
- [12] Chan, S., Warburton, R.E., Gariepy, G., *et al.* (2017) Non-Line-of-Sight Tracking of People at Long Range. *Optics Express*, **25**, 10109-10117. <https://doi.org/10.1364/OE.25.010109>
- [13] Tsai, C.Y., Kutulakos, K.N., Narasimhan, S.G., *et al.* (2017) The Geometry of First-Returning Photons for Non-Line-of-Sight Imaging. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Honolulu,

- 21-26 July 2017, 7216-7224. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.251>
- [14] Jin, C., Xie, J., Zhang, S., Zhang, Z. and Zhao, Y. (2018) Reconstruction of Multiple Non-Line-of-Sight Objects Using back Projection Based on Ellipsoid Mode Decomposition. *Optics Express*, **26**, 20089-20101. <https://doi.org/10.1364/OE.26.020089>
- [15] Repasi, E., Lutzmann, P., Steinvall, O., *et al.* (2009) Advanced Short-Wavelength Infrared Range-Gated Imaging for Ground Applications in Monostatic and Bistatic Configurations. *Applied Optics*, **48**, 5956-5969. <https://doi.org/10.1364/AO.48.005956>
- [16] Laurenzis, M. and Velten, A. (2013) Non-Line-of-Sight Active Imaging of Scattered Photons. *Proceedings of SPIE*, **8897**, 47-53. <https://doi.org/10.1117/12.2028776>
- [17] Laurenzis, M. and Velten, A. (2014) Nonline-of-Sight Laser Gated Viewing of Scattered Photons. *Optical Engineering*, **53**, 023102-023102. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.2.023102>
- [18] 许凯达, 金伟其, 刘敬, 裘溯, 田训卿. 基于激光距离选通成像的非视域成像应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2073-2078.
- [19] Hullin, M.B. (2014) Computational Imaging of Light in Flight. *Proceedings of SPIE*, **9273**, 197-204. <https://doi.org/10.1117/12.2074695>
- [20] Heide, F., Xiao, L., Heidrich, W., *et al.* (2014) Diffuse Mirrors: 3D Reconstruction from Diffuse Indirect Illumination Using Inexpensive Time-of-Flight Sensors. *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Columbus, 23-28 June 2014, 3222-3229. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.418>
- [21] Kadambi, A., Zhao, H., Shi, B. and Raskar, R. (2016) Occluded Imaging with Time-of-Flight Sensors. *ACM Transactions on Graphics*, **35**, 1-12. <https://doi.org/10.1145/2836164>
- [22] Batareseh, M., Sukhov, S., Shen, Z., *et al.* (2018) Passive Sensing around the Corner Using Spatial Coherence. *Nature Communications*, **9**, Article No. 3629. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05985-w>
- [23] Beckus, A., Tamasan, A. and Atia, G.K. (2019) Multi-Modal Non-Line-of-Sight Passive Imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, **28**, 3372-3382. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2896517>
- [24] Boger-Lombard, J. and Katz, O. (2019) Passive Optical Time-of-Flight for Non Line-of-Sight Localization. *Nature Communications*, **10**, Article No. 3343. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11279-6>
- [25] Bouman, K.L., Ye, V., Yedidia, A.B., *et al.* (2017) Turning Corners into Cameras: Principles and Methods. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision*, Venice, 22-29 October 2017, 2270-2278. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.249>
- [26] Tancik, M. (2018) Non-Line-of-Sight Imaging Using Data-Driven Approaches. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [27] Tancik, M., Swedish, T., Satat, G., *et al.* (2018) Data-Driven Non-Line-of-Sight Imaging with a Traditional Camera. *Proceedings Imaging and Applied Optics 2018*, Orlando, 25-28 June 2018. <https://doi.org/10.1364/ISA.2018.IW2B.6>
- [28] Tancik, M., Satat, G. and Raskar, R. (2018) Flash Photography for Data-Driven Hidden Scene Recovery. (Preprint)
- [29] Baradad, M., Ye, V., Yedidia, A.B., *et al.* (2018) Inferring Light Fields from Shadows. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, 18-23 June 2018, 6267-6275. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00656>
- [30] Saunders, C., Murray-Bruce, J. and Goyal, V.K. (2019) Computational Periscopy with an Ordinary Digital Camera. *Nature*, **565**, 472-475. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0868-6>
- [31] Yedidia, A.B., Baradad, M., Thrampoulidis, C., *et al.* (2019) Using Unknown Occluders to Recover Hidden Scenes. *Proceedings of the 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Long Beach, 15-20 June 2019, 12231-12239. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.01251>
- [32] Geng, R., Hu, Y., Lu, Z., *et al.* (2021) Passive Non-Line-of-Sight Imaging Using Optimal Transport. *IEEE Transactions on Image Processing*, **31**, 110-124. <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3128312>
- [33] Wang, Y., Zhang, Y., Huang, M., *et al.* (2021) Accurate but Fragile Passive Non-Line-of-Sight Recognition. *Communications Physics*, **4**, Article No. 88. <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00588-2>
- [34] Hassan, B. (2019) Polarization-Informed Non-Line-of-Sight Imaging on Diffuse Surfaces. Master's Thesis, University of California, Los Angeles.
- [35] Tanaka, K., Mukaigawa, Y. and Kadambi, A. (2020) Polarized Non-Line-of-Sight Imaging. *Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, 13-19 June 2020, 2136-2145. <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00221>
- [36] Kaga, M., Kushida, T., Takatani, T., *et al.* (2019) Thermal Non-Line-of-Sight Imaging from Specular and Diffuse Reflections. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications*, **11**, Article No. 8.

- <https://doi.org/10.1186/s41074-019-0060-4>
- [37] Maeda, T., Wang, Y., Raskar, R., *et al.* (2019) Thermal Non-Line-of-Sight Imaging. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, Tokyo, 15-17 May 2019, 1-11. <https://doi.org/10.1109/ICCPHOT.2019.8747343>
- [38] Divitt, S., Gardner, D.F. and Watnik, A.T. (2020) Imaging around Corners in the Mid-Infrared Using Speckle Correlations. *Optics Express*, **28**, 11051-11064. <https://doi.org/10.1364/OE.388260>