

非视域成像系统的研究现状与进展

王雪峰^{1,2}, 陈兴稣¹, 苏金善^{1,2}, 王元庆²

(1. 伊犁师范学院 电子与信息工程学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 传统的光学成像技术是通过探测器对视线区域内的场景成像, 而非视域成像技术是对观察者视线之外的区域进行成像, 它通过一个中介面, 对被其他物体遮挡住的隐藏物体成像(如拐角处、烟雾后等), 是近年来刚发展起来的一种新的光学探测技术。该项技术对于反恐、灾难救援、城市交通等都有重要意义。本文针对国内外非视域成像系统的特点进行总结分析, 根据成像系统的成像机制不同, 将目前非视域成像系统分为4种主要类型, 分析其应用的优缺点, 并从成像装置、成像分辨率和重建算法几个方面分析其研究趋势。

关键词: 非视域成像; 激光距离选通; 超快激光成像; 单光子雪崩二极管; 数字全息

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2017)01-0008-06

Research Status and Progress of the Non-line-of-sight Vision Imaging System

WANG Xuefeng^{1,2}, CHEN Xingsu¹, SU Jinshan^{1,2}, WANG Yuanqing²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Yili Normal University, Yining Xinjiang 83500, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstracts: The non-line-of-sight vision imaging technology is different from the traditional optical imaging technology, which can go through an intermediary and imaging hidden objects (such as around the corner, behind the smoke, etc.) which are blocked by other objects. The non-line-of-sight vision imaging technology is a kind of newly developed technologies in recent years, which can detect the areas outside the sight of observer. The technology has important significances for counterterrorism, disaster relief, city traffic and so on. The paper summarized and analyzed the characteristics of the non-line-of-sight vision imaging system at home and abroad according to the imaging mechanism of the system. The imaging system can be divided into four main types, then the advantages and disadvantages in application of which were analyzed. And the development trend of imaging device, imaging resolution and reconstruction algorithm were also analyzed.

Key words: non-line-of-sight vision imaging, laser range-gated, ultra-fast laser imaging, single-photon avalanche diode, digital holography

0 引言

随着激光成像技术的快速发展和探测器精度的提高, 出现了一种新的光学成像模式, 即非视域成像(Non-line-of vision imaging)技术。它是专门针对探测器视线以外的区域成像, 如墙体拐角后面、烟雾后面的物体。与传统的光学成像技术最大的不同在于: 它是对光线不能直接到达的区域, 或者说人眼看不到的区域的隐藏物体成像。传统的光学成像技术是通过探测器对于能够看到的物体进行成像, 而非视域成像是专门针对于隐藏物体进行成像。这项技术的关

键技术是利用激光照射到中介面上, 进行漫反射, 光经过漫反射后二次传输到隐藏物体上, 从而间接获取隐藏物体的信息, 最终对隐藏物体进行成像。

非视域成像技术主要用于探测城市街道拐角处、房屋内的隐藏物体, 能够绕过拐角或障碍物对隐藏目标物体成像, 实现视线以外区域定位目标。可以有效防止城市交通事故、定位灾难救援(火灾等)中生命体的位置、提升军队的作战能力等。近10多年来, 随着激光成像技术和探测器技术的不断成熟, 非视域成像技术也得到了快速的发展。本文根据国内外成像系统的特点, 将目前国内外的非视域成像系统大致分

收稿日期: 2016-08-24; 修订日期: 2016-12-28.

作者简介: 王雪峰(1983-), 女, 副教授, 主要从事激光光电成像应用及信号处理研究。

基金项目: 伊犁师范学院校级科研项目(2016YSZD05, 2016YSYB10)。

为 4 种主要类型,并分析了其优缺点,以及非视域成像的发展趋势。

1 基于激光距离选通成像技术

激光距离选通成像系统一般分为两个阶段,第一个阶段是选通门关闭状态,首先激光器发射激光脉冲进行照射,在激光传输到目标区域,并被目标区域进行反射后到达探测器的这一段时间,选通门处于关闭状态。这是为了不让大气后向散射及其他的背景杂波进入到探测器中。第二个阶段是选通门打开状态,当目标区域反射回来的回波信号到达探测器时,系统选通门打开,接收目标回波信息,对目标区域进行成像,接收信息后选通门重新关闭。

瑞典国防研究中心 (FOI) 和德国光子学和模式

识别研究中心 (FGAN-FOM) 在 2008 年研究了 Mono 和 Bi-Static 短波近红外 (SWIR) 距离选通非视域成像技术^[1-2]。采用的激光波长为 1.5 μm 和 1.57 μm,探测器也为短波红外相机,并分别进行了室内和室外实验。实验装置如图 1 所示,左侧为实验光传输过程图;中间为建筑物的窗户及白色金属框;右侧是成像装置实物图,1.5 μm 的激光和光圈直径为 9 cm 的接收电子管。实验过程是通过右侧的实验装置,发射激光脉冲到中间建筑物的窗户,激光经过窗户反射到房屋内,并照射到屋内的隐藏目标上,隐藏目标再次将光散射回窗户,最终被接收装置接收并成像。屋内的隐藏目标为一个持枪站立的人。实验中还通过照射墙砖、混凝土和金属窗框进行成像。由于玻璃的反射率比较高,所以成像结果较好。

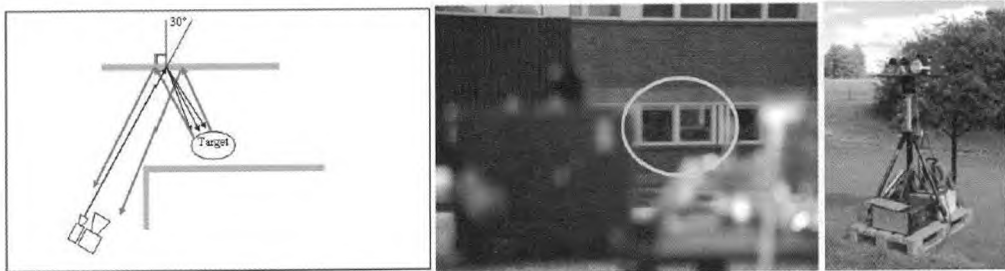


图 1 成像光路图 (左)、成像中介面 (中) 和成像实验装置 (右)

Fig.1 Optical path of imaging process(left), the intermediary of imaging(center) and the experiment setup of system(right)

2011 年北京理工大学^[3-5]开展了基于激光距离选通的非视域成像实验。实验中采用激光波长 532 nm、脉宽 20 ns、频率 20 Hz。探测器为选通 ICCD (选通门宽为 20 ns),实验平台如图 2 所示。中介面分别为干净玻璃、落灰玻璃和瓷砖,目标为 1 m×1 m 的标准靶板。实验结果表明干净玻璃的非视域图像质量要优于落灰玻璃图像,瓷砖作为中介反射面,成像效果较差。其中在 50 m 距离上通过干净玻璃和落灰玻璃刚能分辨出的线对宽度分别为 21.9 mm 和 31.0 mm,通过瓷砖在 20 m 距离上刚能分辨出的线对宽度为 24.6 mm。



图 2 北京理工大学成像系统实验装置

Fig.2 The experiment setup of Beijing Institute of Technology

法德圣路易斯研究中心^[6-8]研究了在更大尺度上 (米级) 的拐角隐藏物体成像。利用门控选通技术研究了不同的照明方式在非视域领域的应用,分别是单点、面和体散射源,并通过层析投影的重建算法进行三维成像。

2 基于超快激光的瞬态成像技术

基于超快激光的瞬态成像技术主要是根据飞行时间的思想,前期的主要研究^[9-14]也都是基于飞行时间的概念来获取图像信息。美国麻省理工学院 (MIT) 多媒体实验室提出了^[15-18]基于超快激光技术的瞬态激光传输的新模式,并在 2012 年完成了对拐角处隐藏物体进行三维成像。成像系统的实验装置如图 3 所示,实验中采用的超快激光脉宽 50 fs,波长 795 nm;条纹管相机为滨松 C5680,分辨率 2 ps。利用超快激光发射脉冲,并使用高分辨率的条纹管相机,将时间信息转换为空间信息。通过照射中介面多个不同的点,获取多个条纹图像,根据图像反演算法,最终重构出隐藏目标的三维信息。

MIT 实验室完成了拐角处隐藏物体的三维重建,重建的精度达到厘米级,并可以对多个不同深度的物体进行三维重建。紧接着他们又实现了透射过毛玻璃

对多个隐藏物体进行三维成像，完成了宽尺度，大角度的三维成像^[19-20]，成像过程如图4所示。

藏目标的三维重建。

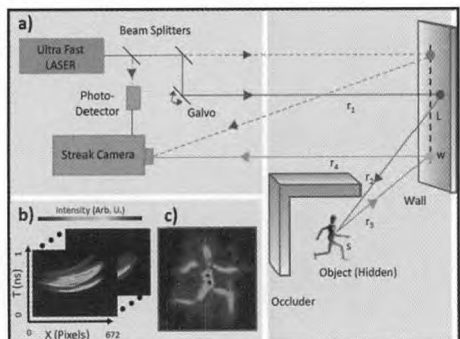


图3 MIT实验室非视域拐角隐藏物体成像示意图
(a.实验光路图 b.条纹图像 c.目标重构图像)

Fig.3 The non-line-of vision imaging sketch map of hidden object around corner in MIT lab (a. optical path, b. streak image, c. reconstruction image of object)

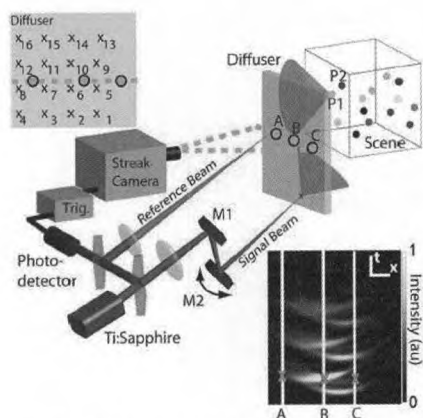


图4 MIT实验室激光透射过毛玻璃的成像示意图

Fig.4 The imaging sketch map of the glass is transmitted by laser in MIT lab

3 基于光子计数探测成像技术

2015年Buttafava等^[21]采用时间单光子雪崩二极管(single photon avalanche diode, SPAD)获取非视域成像中基于飞行时间的隐藏物体信息。使用激光脉宽250 fs、频率55 MHz、波长1030 nm。探测器采用时间门SPAD，直径为20 μm，开关转换时间为110 ps以下，重复频率80 MHz，接通持续时间在2~500 ns可调，实验中采用9.5 ns。探测器集中在单点面积为1 cm²的墙面区域。探测器的视场角在实验中保持不变。实验中采用时间单光子计数单元(time correlated single photon counting, TCSPC)产生光子计数的直方图。实验装置如图5所示，实验中目标物体为两块不同大小的白板和一块38 cm×41 cm的字母T白板，并放置在试验台半径为1.5 m内的球面内。根据得到的信息，通过反投影算法进行图像重建，最终完成隐

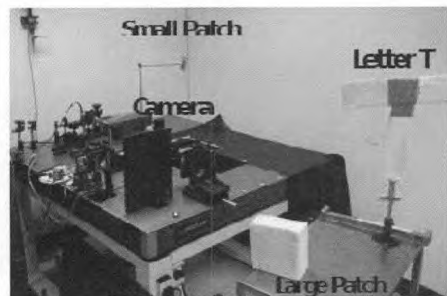


图5 基于SPAD相机探测的非视域成像实验装置

Fig.5 The non-line-of vision imaging setup use SPAD camera

Garipey等人^[22-23]使用单光子相机对隐藏物体的运动轨迹进行追踪。使用飞秒激光脉冲，波长800 nm、频率67 MHz、平均功率0.67 W。单光子相机110ps时间分辨率和32×32像素的空间分辨率。隐藏目标模拟人的大小，在实验室条件下，按照1:5的比例缩小，制作了30 cm高、10 cm宽和4 cm厚的泡沫板。目标距离相机大概1 m。中介反射面为地板，实验中采用白卡纸。激光发射脉冲光照射到地面，再经过地面的漫反射，光子会传输到隐藏目标，并再次漫反射到地板，回波信息被SPAD相机接收。

对于目标跟踪需要能够实时定位目标的位置，目标定位检索方法依赖于SPAD相机的空间和时间信息。相机中的每一个像素对应于视场角中的一个位置。记录单光子到达时间的直方图，对记录的每个像素的时间直方图拟合一个高斯函数。通过计算联合概率密度来恢复目标的位置，实验光路和追踪轨迹如图6所示。

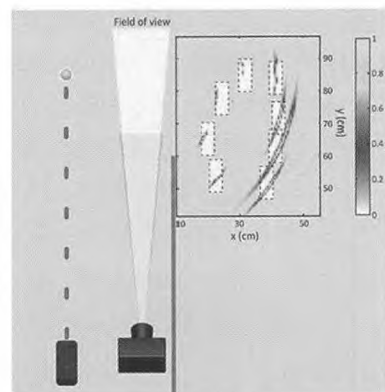


图6 利用单光子相机追踪隐藏物体运动轨迹

Fig.6 Tracking hidden objects with a single-photon camera

2015年Garipey等人^[24]研制了利用SPAD相机单光子探测阵列的超快感应性和高时间分辨率，对激光在空气中的传播过程进行追踪，如图7所示，一束脉冲激光经过多个镜面反射，通过3次穿过SPAD相机

的视场, SPAD 相机获取激光脉冲的散射光子, 通过时间单光子计数分析直方图像素, 并得到激光在空气飞行过程中的轨迹。

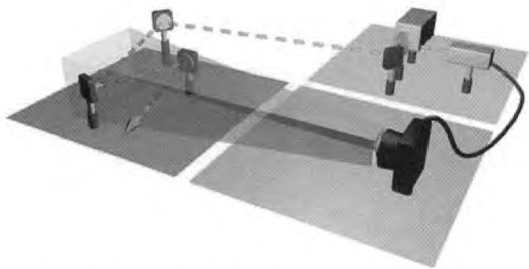


图 7 利用 SPAD 相机记录光子飞行轨迹图
Fig.7 Record the trajectory of photon flight with SPAD camera

法德圣路易斯研究所 Laurenzis 等^[25-26]使用盖革模式 APD 阵列追踪了单光子在非视域下的光子运行轨迹。实验中记录了非视域过程中激光传输的四个重要过程: 第一个过程是激光发射并传输到中介面, 时间为 3~22 ns; 第二个过程是激光通过中介面散射到隐藏目标, 时间为 24~31 ns; 第三个过程为光的二次反射, 从目标反射回中介面, 时间 32 ns 左右; 第四个过程为隐藏目标的信号回到探测器, 完成了一个时间周期, 大概 40 ns 左右; 其中第一和第二过程为直接光传输, 第三和第四过程为间接光传输。4 个过程的光跟踪过程如图 8 所示。

哈尔滨工业大学^[27]利用纳秒激光器和单光子 APD 通过三次激光散射, 经过小孔对遮挡处的物体进行三维成像。

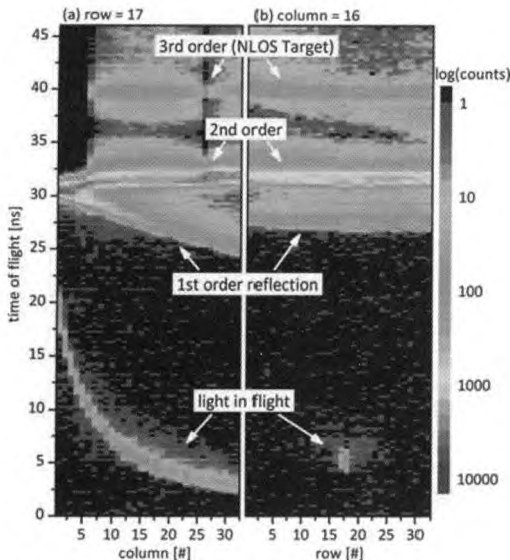


图 8 非视域成像的光子轨迹跟踪的四阶段
Fig.8 The four steps of photon trajectory in non-line-of vision imaging

4 基于数字全息成像技术

2014 年, Singh 等人^[28-30]提出了一种不同的非视域成像方法: 基于数字全息成像技术。实验中激光束被耦合到一束光纤并分成两部分, 一部分照亮物体, 另一部分作为参考光束。图 9 中左侧部分为传统的无透镜傅里叶变换全息技术, 此时在扩散体(毛玻璃)前方形成三维物体的全息图。在扩散体后面, 使用一个 CCD 相机成像物体, 其中的物镜焦距 $f=50\text{ mm}$ 。最后使用逆傅里叶变换来重建物体。成像物体为 5.5 cm, 像素 1500×1500 。

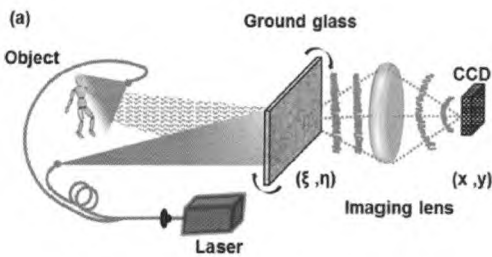


图 9 基于数字全息技术的非视域成像
Fig.9 The non-line-of vision based on digital holography

文中的方法完成了透射过扩散体和拐角处的隐藏物体成像, 这种技术不需要相位校正、扫描隐藏物体和迭代数值计算, 所以具有快速重建的优点。

5 结语

非视域成像技术是最近 10 多年刚发展起来的新技术, 从最初的激光距离选通成像技术, 到后来的瞬时成像技术, 再到单光子成像, 以及数字全息成像技术, 完成了对于拐角处和透射过扩散体的隐藏物体成像。下面对非视域成像的特点进行了总结分析。

非视域成像系统的 3 要素: 激光、中介面和探测器。成像系统的搭建至少需要这 3 种设备, 产生激光的激光器根据需要可以使用脉冲激光或连续激光, 一般如果需要通过飞行时间来获取隐藏物体信息, 都需要采用脉冲激光, 而且需要的脉宽要小, 如 MIT 实验室使用的是飞秒脉冲; 但是基于数字全息技术的方法中使用连续激光, 因为它不是采用飞行时间的思想, 而是光的相干。中介面也是非视域成像得以实现的中介设备, 它需要借助一个中介反射面(漫射面)来完成光的反射和漫射, 使得光能够达到隐藏物体, 才能间接获取其信息。探测器的选择也从初期的 MIT 实验室的皮秒条纹管相机到基于单光子计数的 SPAD 以及一般相机, 探测器的选择主要是为了能够获取高精度的隐藏目标的信息, 对重建算法起到重要的作用。从

发展来看,起初的设备较昂贵,不易运用于实际的应用,后来慢慢发展使用较一般的设备来完成,目前研究的热点都使用 SPAD 相机,由于它能够获取较高精度的单光子信息,而且价格较皮秒条纹管相机低很多,技术也较成熟,能够更好地应用于现实生活。

非视域成像分辨率:探测的目的是为了成像或者追踪。大多数的研究致力于三维成像。MIT 实验室的瞬时成像分辨率可以达到厘米级,并能够进行三维成像,不仅能够对拐角进行成像,还能透射过扩散体对后面的物体进行成像。基于单光子计数的成像方法的成像分辨率也可以达到厘米级,并完成三维成像。基于全息技术的方法可以完成厘米级的强度信息成像。

非视域成像的重建算法:MIT 实验室首先提出了基于椭圆层析的反投影重建算法,其思想与计算机层析类似。其他系统也是采用这种层析重建思想。它的优点是重建分辨率较好,但是需要多次采集数据,采集时间长,重建速度慢。

综上所述,MIT 实验室的瞬时成像技术具有成像分辨率高,能够三维成像的优点,但需要的设备很昂贵(超快激光器和皮秒级条纹管相机),不利用实际应用。MIT 实验室提出了一种基于层析重建的思想,能够较好的完成重建。其他的研究者大多都在改进设备成本上进行了大量的实验,如使用脉宽更大的激光器和单光子计数探测器设备,或成本更小的一般相机。基于数字全息技术的成像方法也从另外一个方向进行了研究,只采用连续激光器和一般的工业相机就获取了隐藏目标的图像。非视域成像的发展正从试验阶段,慢慢向实际应用发展,通过改进重建算法,或提出其他的非视域成像的思想,使其能够更好的发展并应用到现实生活中。非视域成像的发展可以应用到军队作战、反恐、灾难救援以及烟雾天气等不能直接观测的场景中。

参考文献:

[1] Repasi E, Lutzmann P, Steinvall O, et al. Advanced short-wavelength infrared range-gated imaging for ground applications in monostatic and bistatic configurations[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 5956-5969.

[2] Repasi E, Lutzmann P, Steinvall O, et al. Advanced short-wavelength infrared range-gated imaging for ground applications in monostatic and bistatic configurations.[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 5956-5969.

[3] 许凯达, 金伟其, 刘敬, 等. 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.

Xu Kai-da, Jin Wei-qi, Liu Jing, et al. Non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging technology[J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2012, 41(8): 2073-2078.

[4] Xu K, Jin W, Zhao S, et al. Image contrast model of non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging[J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(6):167-174.

[5] 许凯达. 基于激光距离选通成像的非视域成像理论与方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

Xu Kai-da. Research on methods and theory for non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

[6] Laurenzis M, Velten A. Non-line-of-sight active imaging of scattered photons[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, 8897: 889706.

[7] Laurenzis M, Christnacher F, Velten A. Study of a dual mode SWIR active imaging system for direct imaging and non-line of sight vision[C]//*Proc. of SPIE*, 2015, 9465: 946509.

[8] Laurenzis M, Velten A. Feature selection and back-projection algorithms for nonlinear-of-sight laser-gated viewing[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, 23(6):063003.

[9] Pandharkar R, Velten A, Bardagjy A, et al. Estimating Motion and size of moving non-line-of-sight objects in cluttered environments[C]// *IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE*, 2011: 265-272.

[10] Naik N, Zhao S, Velten A, et al. Single view reflectance capture using multiplexed scattering and time-of-flight imaging[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2011, 30(6):61-64.

[11] Wu D, Velten A, O'Toole M, et al. Decomposing Global Light Transport Using Time of Flight Imaging[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, 107(2): 123-138.

[12] Velten A, Wu D, Jarabo A, et al. Femto-photography: capturing and visualizing the propagation of light[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 96-96.

[13] 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): 45:1-45:10.

[14] Heide F, Xiao L, Heidrich W, et al. Diffuse Mirrors: 3D Reconstruction from Diffuse Indirect Illumination Using Inexpensive Time-of-Flight Sensors[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014: 3222-3229.

[15] Kirmani A, Hutchison T, Davis J, et al. Looking Around the Corner using Ultrafast Transient Imaging[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 95(95): 13-28.

[16] Gupta O, Velten A, Willwacher T, et al. Reconstruction of hidden 3D shapes using diffuse reflections[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19096-19108.

[17] 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(2):745.

[18] Bhandari A, Kadambi A, Whyte R, et al. Resolving multipath interference in time-of-flight imaging via modulation frequency diversity and sparse regularization[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1705-1708.

[19] Naik N, Barsi C, Velten A, et al. Estimating wide-angle, spatially varying reflectance using time-resolved inversion of backscattered light[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(5): 957-963.

[20] Raviv D, Barsi C, Naik N, et al. Pose estimation using time-resolved inversion of diffuse light[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20164-20176.

[21] Mauro B, Jessica Z, Alberto T, et al. Non-line-of-sight imaging using a time-gated single photon avalanche diode[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20997-21011.

[22] Gariepy G, Tonolini F, Henderson R, et al. Tracking hidden objects with a single-photon camera[J]. *Physics*, 2015.

[23] Gariepy G, Tonolini F, Henderson R, et al. Detection and tracking of moving objects hidden from view[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 23-27.

[24] Gariepy, Genevieve, Krstajic, et al. Single-photon sensitive light-in-flight imaging[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6021

[25] Laurenzis M, Klein J, Bacher E, et al. Multiple-return single-photon counting of light in flight and sensing of non-line-of-sight objects at shortwave infrared wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4815-4818.

[26] Laurenzis M, Christnacher F, Huflin M B, et al. Study of single photon counting for non-line-of-sight vision[C]//*Proc. of SPIE*, 2015, 9492: 94920K.

[27] Jin C, Song Z, Zhang S, et al. Recovering three-dimensional shape through a small hole using three laser scatterings[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 52-55.

[28] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Looking through a diffuser and around an opaque surface: a holographic approach[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7694-7701.

[29] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Looking around the corner and through a diffuser: different approaches[C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2014: DTu3B.3.

[30] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Real-time imaging through thin scattering layer and looking around the opaque surface[C]//*in Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, OSA Technical Digest* (Optical Society of America, 2015), 2015: DTh3A.5.