ISSN 1003-501X CN 51-1346/O4

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊

Scopus CSCD

基于空间复用检测的共焦非视域成像

郑海洋，罗一涵，李泰霖，唐佳瑶，刘雅卿，夏诗烨，吴琼雁，谢宗良

引用本文:

郑海洋，罗一涵，李泰霖，等. 基于空间复用检测的共焦非视域成像[J]. 光电工程，2023， **50**(5): 220256.

Zheng H Y, Luo Y H, Li T L, et al. Confocal non-line-of-sight imaging based on spatial multiplexing detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220256.

https://doi.org/10.12086/oee.2023.220256

收稿日期: 2022-10-11; 修改日期: 2023-01-09; 录用日期: 2023-01-11

相关论文

非视域定位中光子飞行时间提取方法对比研究

任禹，罗一涵，徐少雄，马浩统，谭毅

光电工程 2021, **48**(1): 200124 doi: 10.12086/oee.2021.200124

更多相关论文见光电期刊集群网站

OEE 光电工程 Opto-Electronic Engineering

http://cn.oejournal.org/oee

OE_Journal

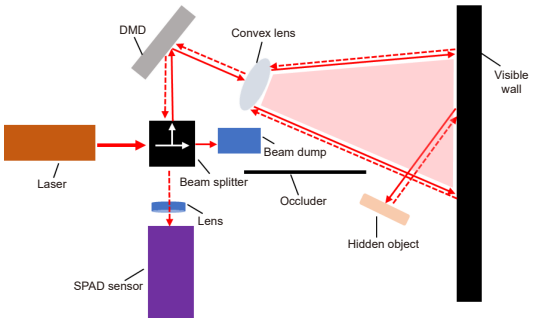
Website

Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程
中科院青促会专刊

Article
2023 年, 第 50 卷, 第 5 期

DOI: 10.12086/oee.2023.220256

基于空间复用检测的共焦非视域成像



郑海洋[1,2,4]，罗一涵[1,2,3*]，李泰霖[1,2,3]，唐佳瑶[1,2,4]，刘雅卿[1,2]，夏诗烨[1,2]，吴琼雁[1,2,3]，谢宗良[1,2,3]

[1]中国科学院光束控制重点实验室，四川 成都 610209；
[2]中国科学院光电技术研究所，四川 成都 610209；
[3]中国科学院大学，北京 100049；
[4]中国科学院大学电子电气与通信工程学院，北京 100049

摘要：非视域成像技术可以对视线外的物体成像，具有广泛的应用前景。为了解决基于数字微镜器件 (DMD) 在共焦非视域光路探测中，由于 DMD 的分光作用导致回波信号弱的问题，本文提出将空间复用检测 (SMD) 的采集方式引入到共焦光路中，将 SMD 的采集方式与光锥变换 (LCT) 的重建算法结合，从而提高回波信号的信噪比。基于共焦非视域成像光路，首先通过激光器发射激光脉冲，然后使用 SMD 的方式采集隐藏物体的回波，最后通过 LCT 算法完成了重建。实验结果表明，单像素相机在共焦非视域光路中采用 SMD 的采集方式，可以提高信噪比，提高重建质量。

关键词：共焦非视域成像；空间复用检测；光锥变换

中图分类号：TN911.23；O439　　**文献标志码：**A

郑海洋，罗一涵，李泰霖，等. 基于空间复用检测的共焦非视域成像 [J]. 光电工程，2023，**50**(5): 220256
Zheng H Y, Luo Y H, Li T L, et al. Confocal non-line-of-sight imaging based on spatial multiplexing detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220256

Confocal non-line-of-sight imaging based on spatial multiplexing detection

Zheng Haiyang[1,2,4], Luo Yihan[1,2,3*], Li Tailin[1,2,3], Tang Jiayao[1,2,4], Liu Yaqing[1,2], Xia Shiye[1,2], Wu Qiongyan[1,2,3], Xie Zongliang[1,2,3]

[1]Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;
[2]Institutue of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;
[3]University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
[4]School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Non-line-of-sight imaging techniques can be used to capture images of objects that are hidden away in corners, and this technology has many useful applications. The captured signal is insufficient when the laser sends laser light to the intermediate surface, which is a problem when utilizing a digital micromirror device (DMD) in a confocal non-line-of-sight optical route because of the spectroscopic impact of the DMD. In order to increase the

收稿日期：2022-10-11；修回日期：2023-01-09；录用日期：2023-01-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (62271468)
*通信作者：罗一涵，luo.yihan@foxmail.com。
版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

signal-to-noise ratio of the echo signal, the acquisition method of spatial multiplexing detection (SMD) is introduced into the confocal optical path in this study. SMD is integrated with the reconstruction algorithm of the light-cone transform (LCT). Based on the confocal non-line-of-sight imaging optical path, the laser initially emits laser pulses, followed by SMD collecting concealed object echoes, and the LCT algorithm concludes the reconstruction. The experimental results demonstrate that the single-pixel camera can complete the reconstruction using the LCT algorithm after employing the SMD acquisition method in the confocal non-line-of-sight optical route, which may improve the signal-to-noise ratio and the reconstruction quality.

Keywords: confocal non-line-of-sight imaging; spatial multiplexing detection; light-cone transform

1 引　言

非视域成像可以对视线外的物体成像，通过向中介面发射激光，激光经过中介面的反射到达隐藏物体，由隐藏物体的反射到达中介面后，探测器收集由中介面返回的三次反射回波光子，提取回波光子携带的信息并通过成像算法对隐藏目标进行重建[1]。非视域成像技术在自动驾驶、反恐和救援行动等方面有很大的应用前景。例如，看到隐藏障碍的能力可以为自动驾驶汽车提供一种避免碰撞的方法，达到更有效地驾驶，并提前计划驾驶行动。

非视域成像的概念最早是由美国麻省理工学院的 Raskar 和 Davis 在 2008 年提出的[1]。在 2009 年美国麻省理工学院的多媒体实验室基于 TOF 飞行时间技术提出了瞬态成像的概念和理论[2]。2012 年，MIT 的 Velten 等人利用条纹管相机对隐藏场景进行空间测量和时间测量，通过反投影算法 (back projection，BP) 成功重建了隐藏目标物[3]，首次在实验层面上完成非视域成像，提出了反投影算法。之后又有研究人员提出快速反投影算法[4]、迭代误差反投影算法[5]、光锥变换算法 (light-cone transform，LCT)[6]、曲面法线算法[7-8]、基于虚拟波[9-10] 等非视域重建算法。皮秒脉冲激光器具有皮秒级超短脉宽、重复频率可调、脉冲能量高等特点，在国内的量子通信领域得到了广泛的应用[11-12]，作为非视域成像中主要使用的光源可以收集不同种类的信息，包括强度、时间和相干性，也用在了深度学习的样本采集中[13]。研究人员也使用多类探测器完成了非视域重建，提出了 TOF 相机[14-15]、传统相机[16-18] 和干涉仪[8,19-20] 作为探测器对非视域目标进行成像。激光雷达领域中，单光子探测器可以通过光子飞行时间得到物体的距离信息完成远距离的探测[21] 和三维扫描的成像[22]。此外单光子探测器光子可用于非视域成像的场景，但是由于非视域成像中有三次散射，回波信号信噪比远低于激光雷达，为了增强三次反射回波信号，可以通过在探测器前放置望远镜提高探测效率[23]，也可以使用一些滤波方法从探测的信号中提取隐藏物体的信息[24]。然而目前使用激光通过振镜对中介面进行扫描的采集方式会导致数据的采集时间长，阻碍了非视域成像的实时应用。所以近期有研究人员使用单光子雪崩二极管阵列实现无扫描式非视域成像[25]，通过数字微镜装置 (DMD) 的翻转将回波信号收集到单光子探测器，不需要机械扫描部件也可以完成对信号的采集[26-27]。

2019 年研究人员将单像素相机采集到的数据利用 BP 重建算法完成三维隐藏物体的重建[26]。他们通过 DMD 光栅扫描采集数据，接着利用单光子探测器完成收集，之后使用 BP 算法完成了重建。在 2022 年，孙宝清团队使用 DMD 元件将空间复用检测 (SMD) 采集方式引入到非视域成像中，得到了 SMD 采集方式可以提高数据的探测效率，比逐点扫描获取的信号具有更高的信噪比[27]，使用的重建算法是 BP 重建算法。但是 BP 重建方法存在算法复杂、需要内存大和重建质量不佳等问题。

相对于 BP 算法，目前的 LCT 是另一种更好的重建算法。LCT 是基于共焦非视域光路下的重建算法，将成像模型转化为卷积的形式，利用傅里叶卷积变换的重建过程比传统的反投影重建算法快几个数量级。此外，有助于推导出非视域成像的封闭解，提高重建的质量。最后，对于隐藏物体是回射物质 (如路标、自行车反光镜和高可见度安全服) 通过将光以最小散射反射回其光源，大大增加了间接信号，这种回射特性只能利用在共焦系统，增加了探测隐藏物体材质的种类。但是目前在共焦光路中采集非视域信号都是通过振镜逐点扫描的方式，单次收集一个像素点的信号，这样的采集效率比较低，并且受检流计扫描速度和每次采集最小光子数的限制，信号采集时间长。

DMD 元件的翻转速度上限高，每次可以收集多

个像素信息，但是如果将 DMD 放在共焦光路中使用光栅扫描的方式逐个像素采集，激光器发射的激光经过 DMD 的翻转，只有单个像素点的光强打在中介面上，所以到达中介面的激光强度急剧下降，隐藏物体的回波信号探测器难以检测出来。由于 SMD 的扫描方式与逐个像素扫描在相同的采集时间下拥有更高的信噪比[26]，本文通过引入 SMD 的采集方式，即多像素结构扫描，一次收集多个像素点的组合信息，经过求解逆问题得到每个像素对应隐藏物体的回波光子信息，最后使用 LCT 算法完成重建。

2 方　法

我们首先搭建具有时间分辨单像素相机作为探测器的共焦光路，激光经过 DMD 的翻转到达中介面，DMD 的翻转区域通过凸透镜成像到中介面对应的观测区域，之后使用 SMD 完成对隐藏物体信号的采集，实现了单像素相机结合 LCT 算法完成共焦非视域成像。此外，使用实验获取的数据完成了 BP 算法的重建，并通过图像质量评估指标对两个算法的重建质量进行对比。

2.1 采集方式

SMD 的采集方式是利用 DMD 的翻转一次收集多个像素区域的组合信号，之后通过逆问题求解的方法，得到每一个像素位置对应的回波信号。非视域成像的实验装置如图 1 所示，激光器首先通过分束器的分光到达 DMD 微镜上，之后通过控制微镜翻转透过凸透镜打到中介面对应的区域，激光经过中介面的反射到达隐藏物体，隐藏物体反射到中介面的光子通过 DMD 的收集，经过透镜聚焦到单光子探测器的探测区域。共焦光路中探测点和激光照射点在中介面上的位置相同，通过分束器完成共焦设置。与以往非视域成像假设相同，在这里的成像模式假设墙后面只有单次散射和满足各向同性反射 (即在模型中忽略了朗伯特余弦项)。实验在平整的中介面上涂抹的是内墙乳胶漆，从而尽可能模拟建筑内墙表面的材质。墙面近似能够满足朗伯体的要求，从而在模型中不考虑朗伯特余弦项，另外把墙面作为中介面也更为常见。

光学系统包括一个脉冲激光器 (峰值波长 1550 nm，重复频率 40 MHz，脉冲宽度约 100 ps，平均功率约 750 mW，平均功率根据实验要求是可以调整的)，一个时间相关单光子计数 (TCSPC) 模块 (qutools-quTAG，时间抖动小于 9.9 ps，时间分辨率 1 ps，最大计数率 33 MHz)，SNSPD (SINGLE_QUANTUM，检测效率在 70% 到 80% 之间，时间抖动 33~79 ps，死区时间小于 30 ns，暗计数率小于 300 Hz)。使用激光器与探测器进行共焦，通过 30 mm 焦距的消色差双胶合凸透镜将大小为 0.6 cm×0.6 cm 的 DMD 翻转区域成像到中介面为 22 cm×22 cm 的面积处。DMD 通过翻转微镜可以采集相应位置返回的信号，镜面与中介面的距离为 110 cm，刷新速率最高可达到 12.5 kHz，对于在 1550 nm 波长处的反射率在 70% 到 80% 之间。单光子探测器完成采集后，经过单光子计数器生成光子直方图，需要得到中介面的每个像素对应的光子直方图，然后进行算法重建。光子直方图中设置每一个时间仓为 10 ps，时间仓的深度为 256。

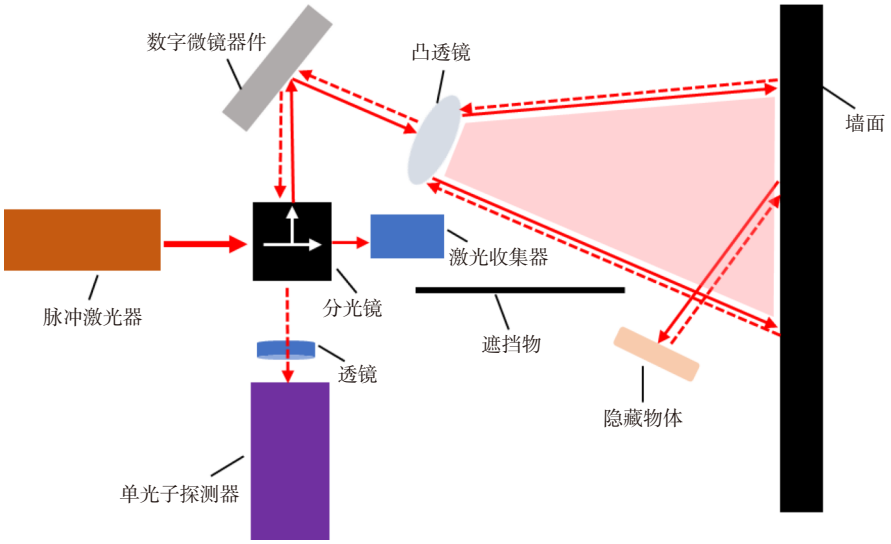


图 1　非视域成像的实验装置示意图

Fig. 1　Schematics of the experimental set-up for non-line-of-sight imaging

正交哈达玛矩阵作为测量矩阵控制 DMD 的翻转，收集中介面上多个检测点的光子信号组合，之后解决逆问题得到每个采样点的光子直方图。通过正交哈达玛矩阵每一行元素控制 DMD 的每一次翻转，采集相应元素为 1 处的位置，每次采集的信号是多个像素光子直方图的组合，如下式所示：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}, \tag{1}$$

其中：$\boldsymbol{Y}$ 矩阵大小为 $M\times N_{\mathrm{t}}$，M 为采集的次数，也是重建图像的像素数，N_{t} 表示光子直方图时间仓的总数。使用 SMD 采集方法，$\boldsymbol{A}$ 矩阵为 M 阶的哈达玛矩阵，元素为 1 表示接受该位置的信号，0 则表示放弃该位置的信号收集，当采集阵列为 8×8，像素值为 64 时需要选取 64 阶的哈达玛矩阵，将该矩阵的每一行的元素构成一个 8×8 矩阵，哈达玛矩阵中有±1 元素，为了能在 DMD 的元件中实现调制，这里使用差分测量的方式，通过将哈达玛矩阵的元素 1 和元素−1 分别提取到两个矩阵中，一次测量的信号是两个非负直方图的差分。图 2 为 64 阶哈达玛矩阵中的一行矩阵通过分离控制 DMD 显示的图案，探测器收集白色区域反射回来的多像素信号。其中 $\boldsymbol{X}$ 大小为 $M\times N_{\mathrm{t}}$，表示 M 个像素中，每一个像素对应一个单光子直方图。通过下面的式子可以从组合信号中恢复每一个像素位置表示的光子直方图：

$$\boldsymbol{O}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}. \tag{2}$$

SMD 的检测和恢复过程如下图 3 所示。假设将检测阵列设置为 2 pixels×2 pixels，并使用四阶哈达玛矩阵作为采样基。将四阶哈达玛矩阵的每一行当做一次探测模式进行采集，在不同的探测模式下探测到四个光子直方图，此时采集的是多个像素点信号组合构成的，通过哈达玛矩阵的映射关系，通过式 (2) 恢复出单个像素对应的光子直方图。

2.2 LCT 重建算法

传统的非视域成像的成像模型如下式，探测点和激光点在中介面上的位置是不同的，检测点(x',y')和激光点$(x_{\mathrm{l}},y_{\mathrm{l}})$在中介面$z=0$的平面上。

$$\tau(x',y',t)=\iiint_{\Omega}\frac{1}{r_{\mathrm{l}}^{2}r^{2}}\rho(x,y,z)\delta(r_{\mathrm{l}}+r-tc)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z, \tag{3}$$

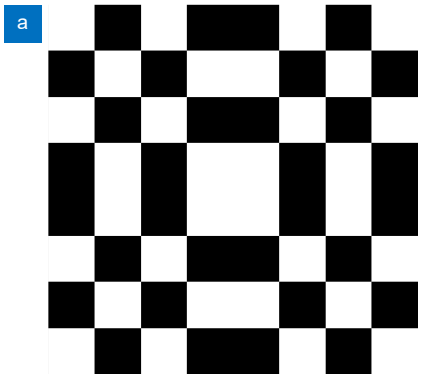
式中：c 表示光速，$\rho(x,y,z)$ 表示隐藏物体未知反照率，探测点到隐藏物体上某一点的距离表示 $r=\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z^2}$，激光点到隐藏物体上某一点的距离表示 $r_{\mathrm{l}}=\sqrt{(x_{\mathrm{l}}-x)^2+(y_{\mathrm{l}}-y)^2+z^2}$，其中 $1/r_{\mathrm{l}}^{2}r^{2}$ 表示强度在传播过程中的衰减过程，冲激函数约束了光子的飞行距离 $r+r_{\mathrm{l}}=t\cdot c$。隐藏物体的位置可以根据几何关系确定在以 r_{l} 和 r 为焦点的椭圆位置上，通过 BP 重建算法完成重建[3]。如前所述，为了提高重建质量，我们改用共焦光路和 LCT 算法重建。通过搭建共焦光路，使用共焦光路采集的数据使用 LCT 算法完成重建。因为共焦光路的探测点和激光点位置相同，所以将式 (3) 转换为式 (4)，表示共焦非视域成像的前向模型[6]：

$$\tau(x',y',t)=\iiint_{\Omega}\frac{1}{r^{4}}\rho(x,y,z)\delta\left(2\sqrt{(x'-x)^2+(y'-y)^2+z^2}-tc\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z, \tag{4}$$

式中：通过换元，令 $z=\sqrt{u}$，$\mathrm{d}z/\mathrm{d}u=1/\left(2\sqrt{u}\right)$ 和 $v=(tc/2)^2$ 可以将上式转化为等式

$$v^{3/2}\tau(x',y',t)=\iiint_{\Omega}\frac{1}{2\sqrt{u}}\rho(x,y,\sqrt{u})\delta((x'-x)^2+(y'-y)^2+u+v)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}u. \tag{5}$$

将式 (5) 表示为一个三维卷积的形式，$R_t\{\tau\}=h*R_z\{\rho\}$，$h$ 为三维卷积核，隐藏物体的反照率 ρ_* 可以表示为



b

1	0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1

图 2 哈达玛观测图样和矩阵。(a) 哈达玛观测图样；(b) 哈达玛观测矩阵

Fig. 2 Hadamard observation pattern and matrix. (a) Hadamard observation pattern; (b) Hadamard observation matrix

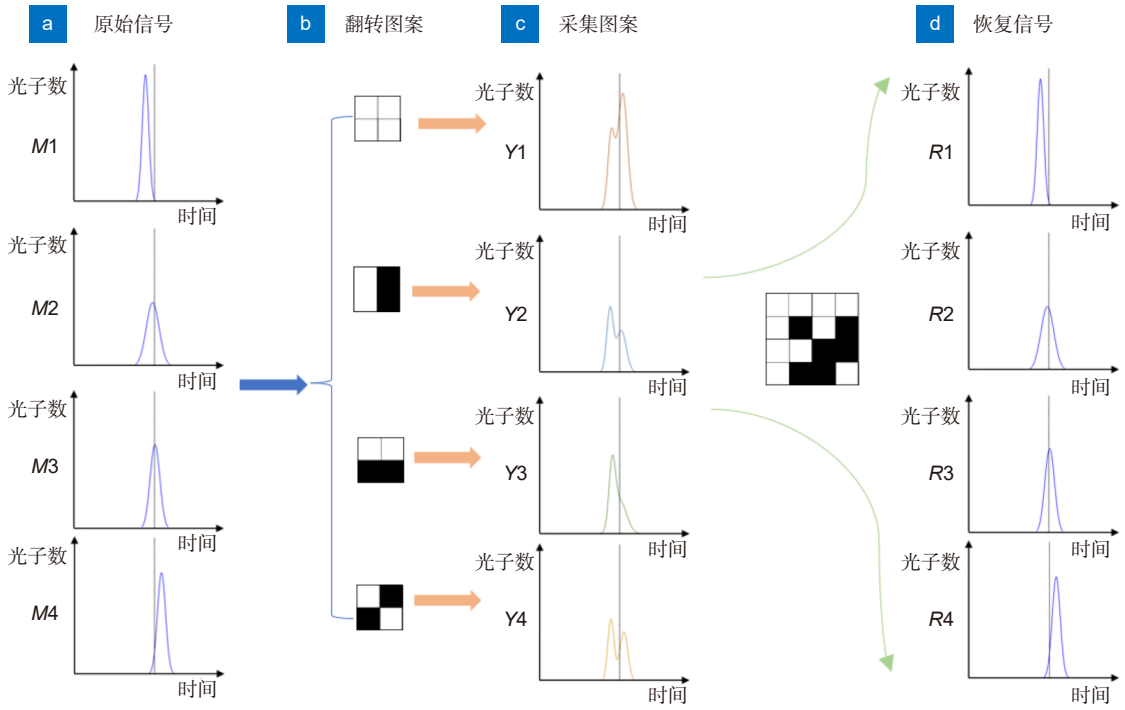


图 3 空间复用检测非视域成像原理。(a) 每个探测点的原始信号；(b) 从哈达玛矩阵得到的 4 种测量图案；(c) 在每种测量模式下的时间光子直方图；(d) 恢复出来每个探测点的信号

Fig. 3 Principle of spatial multiplexing detection non-line-of-sight imaging. (a) Original signal of each detection point; (b) Four kinds of measurement patterns obtained from Hadamard matrix; (c) Time photon histogram in each measurement mode; (d) Recover the signal of each detection point

$$\rho_{*}=R_z^{-1}F^{-1}\left[\frac{1}{\widehat{H}}\cdot\frac{\left|\widehat{H}\right|^2}{\left|\widehat{H}\right|^2+\dfrac{1}{\alpha}}\right]FR_tT, \tag{6}$$

其中：H 是 h 的频域表示，F 是 3D 离散傅里叶变换，F^{-1}表示 3D 离散傅里叶逆变换，R_z 是沿着 z 轴深度方向对 ρ 进行重采样，R_t 代表沿着时间轴进行对 τ 进行重采样，α 代表信噪比，使用维纳滤波[28] 的方法求解隐藏物体。

3 实验结果

为了评估基于 SMD 采集方式下，使用 LCT 和 BP 算法的重建质量，我们通过构建共焦光路完成对隐藏物体信号的收集，之后使用算法完成重建，再通过拉普拉斯算子对图像进行锐化，使用均值滤波的方式去除图像噪声。

图 4 是搭建的实验光路图，通过算法完成重建之后，选取结构相似性 (SSIM，简写为 S_{SSIM}) 和峰值信噪比 (PSNR，简写为 S_{PSNR}) 两个方法来对重建的结果进行质量评估，PSNR 表示两幅图对应像素点之间的误差，可以表示为

$$S_{\mathrm{PSNR}}=10\log_{10}\frac{L}{E_{\mathrm{MSE}}}, \tag{7}$$

式中：E_{MSE} 表示为当前图像和原始图像的均方误差，$E_{\mathrm{MSE}}=\dfrac{1}{N}\sum_{i}^{N}(x_i-y_i)^2$，$x_i$和$y_i$为对应位置上的像素值，

图 4 实验光路图

Fig. 4 Experimental light path diagram

N 表示图像的像素个数，L 表示是根据图像类型确定的常数，这里的 L 为 255。SSIM 用来衡量两幅图像相似性的指标，可以表示为

$$S_{\mathrm{SSIM}}(x,y)=\frac{(2\mu_x\mu_y+C_1)(2\sigma_{xy}+C_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+C_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+C)}, \quad (8)$$

式中：μ_x，μ_y分别表示图像 X 和 Y 的均值，σ_x和σ_y分别表示图像 X 和 Y 的标准差，σ_{xy}表示图像 X 和 Y 的协方差，$C_1=(K_1L)^2$，$C_2=(K_2L)^2$，K_1和K_2为常数，选取经验值 $K_1=0.01$和 $K_2=0.03$，其中 L 为 255。

3.1 光锥变换和反投影的重建结果对比

实验使用了两个不同形状的反光材料进行实验，分别为长 12 cm、宽 5.5 cm 的矩形，和直角边为 10 cm 的等腰直角三角形。这两个物体都放在距离中介面 16 cm 处，中介面上的探测区域为 22 cm×22 cm，使用 16×16 个位置进行采样，每一个位置上的采样时间为 1 s，将包含对象的空间划分为 16×16×256 个体素。

图 5 中显示的结果是从三个方向完成对隐藏物体重建，正视图的坐标代表中介面观察区域的大小，图像中灰度值通过与求解隐藏物体的反照率是对应的，反照率越大重建后的隐藏物体在这个位置上概率越大，对应图像区域的灰度值也就越大。从三个图中都可以看出通过 LCT 完成的重建产生的噪声更小，定位更加准确。接下来使用正视图的重建结果对两个重建方法进行图像质量的评估，选取两个不同的隐藏物体使用相同的成像像素结果如图 6 所示。

图 6 通过共焦光路收集隐藏物体的信号后使用 LCT 和 BP 重建算法完成重建，成像图案像素为 16×16。使用 DMD 进行捕获收集，在单光子探测器上采集隐藏物体的信号，之后利用 LCT 算法对隐藏物体完成恢复。通过两种算法分别重建出隐藏物体的形状，计算两者的 SSIM 和 PSNR 数值。SSIM 越大，表示图形相似性越好；PSNR 越大，图像质量越好。从计算结果可以看出使用 LCT 算法的重建效果更好。接下来，将通过改变成像像素研究对两种算法重建质量的影响。

图 7 表示两个算法重建后得到像素值为 8×8 的图像，通过 SSIM 和 PSNR 两种图像质量评估的结果得到在低分辨率的情况下，LCT 重建质量仍然更高。

3.2 激光光强对 LCT 重建质量的影响

当隐藏物体为矩形的时候，将激光的平均功率降低后调整为 500 mW 时，采集隐藏物体的信号。在激光强度不同时，通过 LCT 算法对隐藏物体完成重建。

图 8 的重建结果表明通过提高激光功率，从隐藏物体返回到中介面后到达探测器的光子数更多，可以

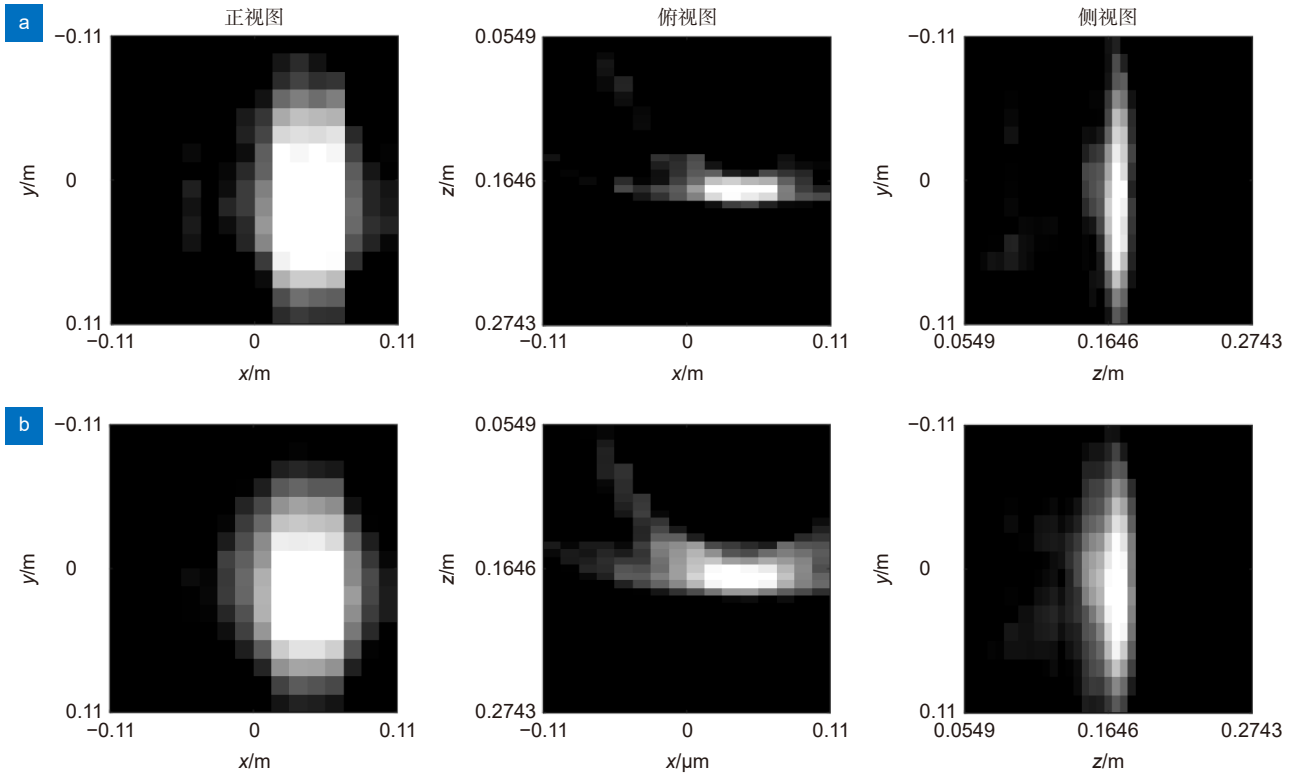


图 5 重建结果对比。(a) LCT 算法重建结果; (b) BP 算法重建结果

Fig. 5 Comparison of reconstruction results. (a) LCT algorithm reconstruction results; (b) BP algorithm reconstruction results

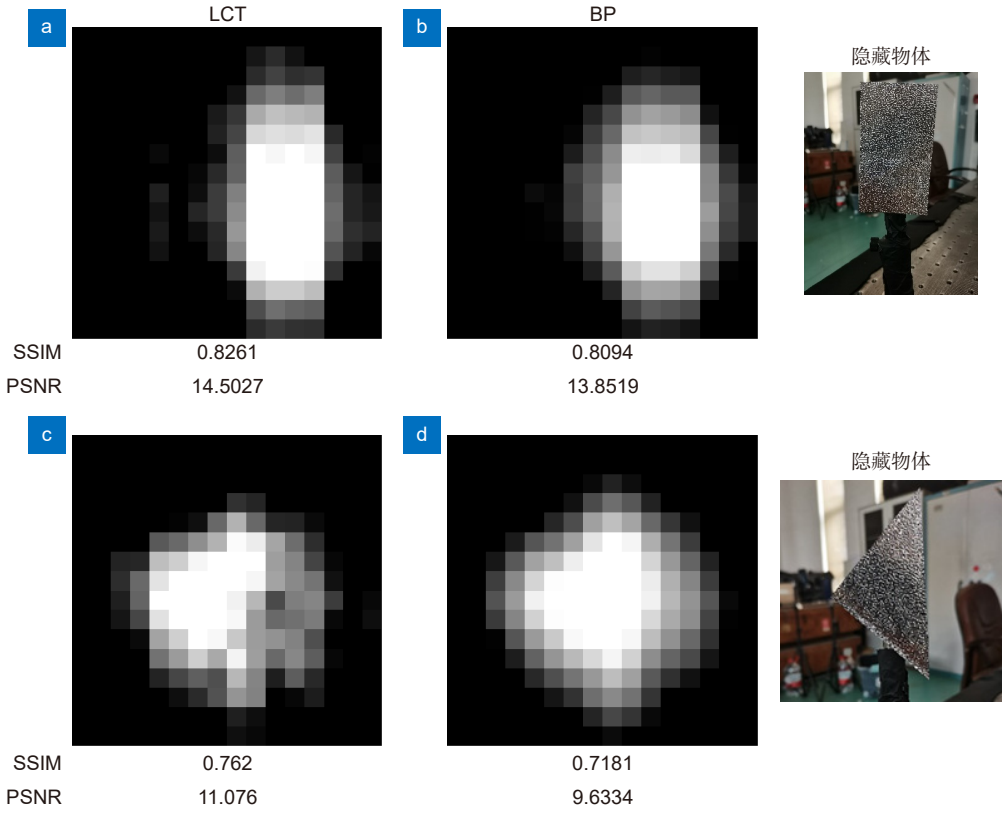


图 6 不同隐藏物体 16×16 像素值的重建结果。(a) LCT 算法重建的长方形结果；(b) BP 算法重建的长方形结果；(c) LCT 算法重建的三角形结果；(d) BP 算法重建的三角形结果

Fig. 6 Reconstruction results of 16×16 pixel values for different hidden objects. (a) Rectangle result reconstructed by LCT algorithm; (b) Rectangle result reconstructed by BP algorithm; (c) Triangle result reconstructed by LCT algorithm; (d) Triangle result reconstructed by BP algorithm

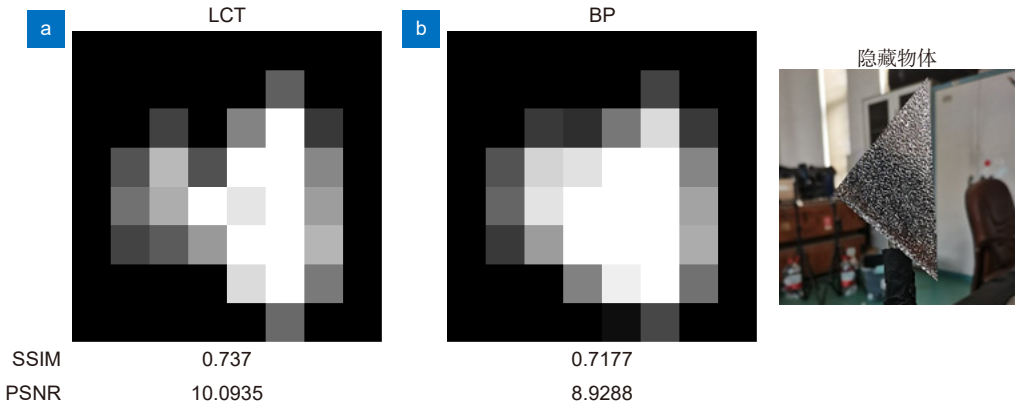


图 7 三角形物体 8×8 像素值的重建结果。(a) LCT 算法重建的三角形结果；(b) BP 算法重建的三角形结果

Fig. 7 The reconstruction result of the 8×8 pixel value of the triangular object. (a) Triangle result reconstructed by LCT algorithm; (b) Triangle result reconstructed by BP algorithm

得到更多关于隐藏物体的信号。通过 SMD 的反解得到每一个像素的直方图，直方图对应的隐藏物体的光子数目更多，恢复出的效果也更好。

3.3 像素点对 LCT 重建质量的影响

在假设激光强度相同，隐藏物体位置不变的情况下，我们使用 16×16 和 8×8 两种阵列进行采样，每一次的采集时间为 1 s，分别采集的次数为 256 和 64 次，采集后通过 SMD 的求解得到各个位置的直方图之后，使用 LCT 算法完成重建。

图 9 的重建结果表明，通过增加采样点可以提高

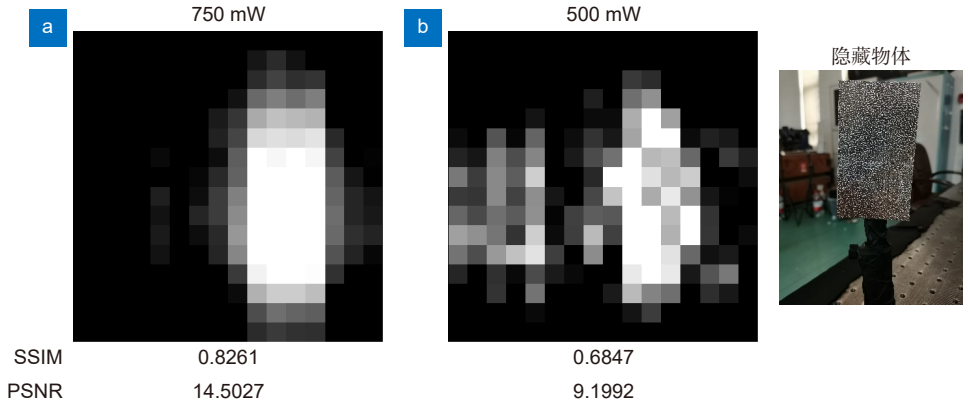


图 8 不同激光强度得到的 LCT 算法重建结果。(a) 激光平均功率为 750 mW 的重建结果; (b) 激光平均功率为 500 mW 重建结果

Fig. 8 The reconstruction results of the LCT algorithm obtained with different laser intensities. (a) Reconstruction results with an average laser power of 750 mW; (b) Reconstruction results with an average laser power of 500 mW

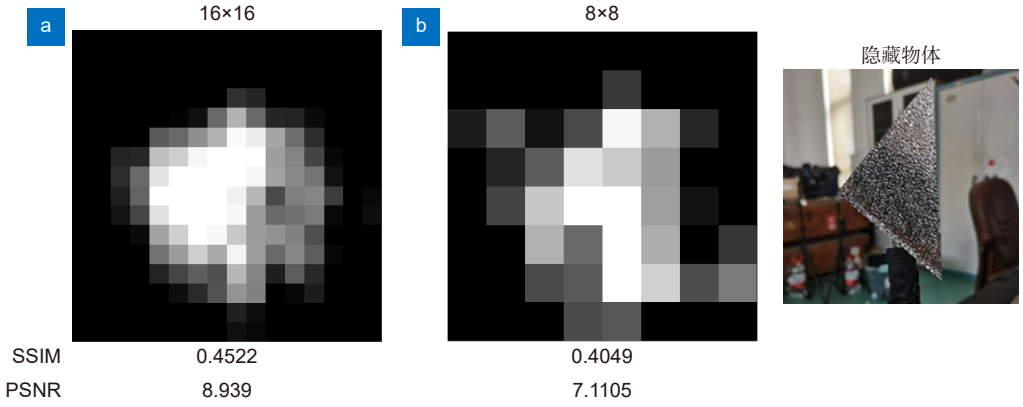


图 9 不同采样阵列得到的 LCT 算法重建结果。(a) 采样阵列为 16×16 的重建结果; (b) 采样阵列为 8×8 的重建结果;

Fig. 9 Reconstruction results of the LCT algorithm obtained by different sampling arrays. (a) Reconstruction result of the sampling array being16×16; (b) Reconstruction result of the sampling array being 8×8;

重建的分辨率，更准确地恢复隐藏物体的形状信息。使用 SMD 的采集方式，提高采样点以增加隐藏物体通过中介面返回探测器的光子信息，每次采集的时候相当于对多个像素点的组合采样，采样次数增多还可提高每个像素曝光时间，每个像素点的回波光子越多，信噪比增加，成像效果也就更好。如果使用逐点扫描完成采集，每个像素点的曝光时间只取决于单个像素的采集时间。

4 结论与展望

本文将 SMD 的信号采集方法引入到共焦光路的非视域成像，基于 DMD 元件构建共焦非视域成像光路，通过微镜的翻转获取隐藏物体信号，并利用 LCT 和 BP 算法完成了非视域成像的重建。通过 SSIM 和 PSNR 两个图像评价指标对 BP 和 LCT 的重建质量进行对比，证明在 SMD 的采集方式下，LCT 可以获得更高的重建质量。通过改变光强和采样点的数目，证明激光强度更大和采样点更多可以获得更高的重建质量，然而目前采样点的数目不够多，LCT 重建算法减少运行内存的优势还没有完全体现出来，后续可以增加采样点，实现更复杂物体的重建。但是采样点数目的增多会增加采集时间，可以通过加入压缩感知的方法减少采样点数目，从而提高采样效率。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Raskar R, Davis J. 5D time-light transport matrix: what can we reason about scene properties?[R/OL]. MIT Technical Report, (2008-03-01). https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/67888.

[2] Kirmani A, Hutchison T, Davis J, et al. Looking around the corner using ultrafast transient imaging[J]. *Int J Comput Vis*,

2011, **95**(1): 13−28.
[3] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging[J]. *Nat Commun*, 2012, **3**: 745.
[4] Arellano V, Gutierrez D, Jarabo A. Fast back-projection for non-line of sight reconstruction[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(10): 11574−11583.
[5] La Manna M, Kine F, Breitbach E, et al. Error backprojection algorithms for non-line-of-sight imaging[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2019, **41**(7): 1615−1626.
[6] 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.
[7] Heide F, O'Toole M, Zang K, et al. Non-line-of-sight Imaging with partial occluders and surface normals[J]. *ACM Trans Graph*, 2019, **38**(3): 22.
[8] Xin S M, Nousias S, Kutulakos K N, et al. A theory of Fermat paths for non-line-of-sight shape reconstruction[C]// *Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019. https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00696.
[9] Lindell D B, Wetzstein G, O'Toole M. Wave-based non-line-of-sight imaging using fast *f-k* migration[J]. *ACM Trans Graph*, 2019, **38**(4): 116.
[10] Liu X C, Bauer S, Velten A. Phasor field diffraction based reconstruction for fast non-line-of-sight imaging systems[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 1645.
[11] Zhou Q, Liu J L, Gu Y H, et al. Gain-switched semiconductor pulsed laser for quantum secure communication[J]. *Chin J Lasers*, 2016, **43**(5): 0502005.
周强, 刘金璐, 谷远辉, 等. 量子保密通信用增益开关半导体脉冲激光器[J]. 中国激光, 2016, **43**(5): 0502005.
[12] Peng B Y, Yuan C Z, Zhang R M, et al. Progress in gain-switched semiconductor lasers for quantum communication[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, **42**(3): 0327007.
彭柏语, 袁晨智, 张瑞明, 等. 用于量子通信的增益开关半导体激光器研究进展[J]. 光学学报, 2022, **42**(3): 0327007.
[13] Chopite J G, Hullin M B, Wand M, et al. Deep non-line-of-sight reconstruction[C]//*Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020.
[14] Heide F, Xiao L, Heidrich W, et al. Diffuse mirrors: 3D reconstruction from diffuse indirect illumination using inexpensive time-of-flight sensors[C]//*Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014: 3222–3229.
[15] Kadambi A, Zhao H, Shi B X, et al. Occluded imaging with time-of-flight sensors[J]. *ACM Trans Graph*, 2016, **35**(2): 15.
[16] Chen W Z, Daneau S, Brosseau C, et al. Steady-state non-line-of-sight imaging[C]//*Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
[17] Klein J, Peters C, Martín J, et al. Tracking objects outside the line of sight using 2D intensity images[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 32491.
[18] Smith B M, O'Toole M, Gupta M. Tracking multiple objects outside the line of sight using speckle imaging[C]//*Proceedings of 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 6258–6266. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00655.
[19] Gkioulekas I, Levin A, Durand F, et al. Micron-scale light transport decomposition using interferometry[J]. *ACM Trans Graph*, 2015, **34**(4): 37.
[20] Willomitzer F, Li F Q, Rangarajan P, et al. Non-line-of-sight imaging using superheterodyne interferometry[C]//*Proceedings of the Imaging and Applied Optics 2018*, 2018. https://doi.org/10.1364/COSI.2018.CM2E.1.
[21] Liu B, Jiang S, Yu Y, et al. Macro/sub-pulse coded photon counting LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200265.
刘博, 姜朔, 于洋, 等. 宏/子脉冲编码光子计数激光雷达[J]. 光电工程, 2020, **47**(10): 200265.
[22] Liu B, Yu Y, Chen Z, et al. True random coded photon counting Lidar[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(2): 190044.
[23] Wu C, Liu J J, Huang X, et al. Non–line-of-sight imaging over 1.43 km[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, **118**(10): e2024468118.
[24] Ren Y, Luo Y H, Xu S X, et al. A comparative study of time of flight extraction methods in non-line-of-sight location[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(1): 200124.
任禹, 罗一涵, 徐少雄, 等. 非视域定位中光子飞行时间提取方法对比研究[J]. 光电工程, 2021, **48**(1): 200124.
[25] Nam J H, Brandt E, Bauer S, et al. Low-latency time-of-flight non-line-of-sight imaging at 5 frames per second[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 6526.
[26] Musarra G, Lyons A, Conca E, et al. Non-line-of-sight three-dimensional imaging with a single-pixel camera[J]. *Phys Rev Appl*, 2019, **12**(1): 011002.
[27] Yang W Q, Zhang C, Jiang W J, et al. None-line-of-sight imaging enhanced with spatial multiplexing[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(4): 5855−5867.
[28] Wiener N. *Extrapolation*, *Interpolation*, *and Smoothing of Stationary Time Series*: *with Engineering Applications*[M].

作者简介

郑海洋 (1996-)，男，硕士研究生，主要从事非视域成像领域的研究。

E-mail: hyzheng_ioe@163.com

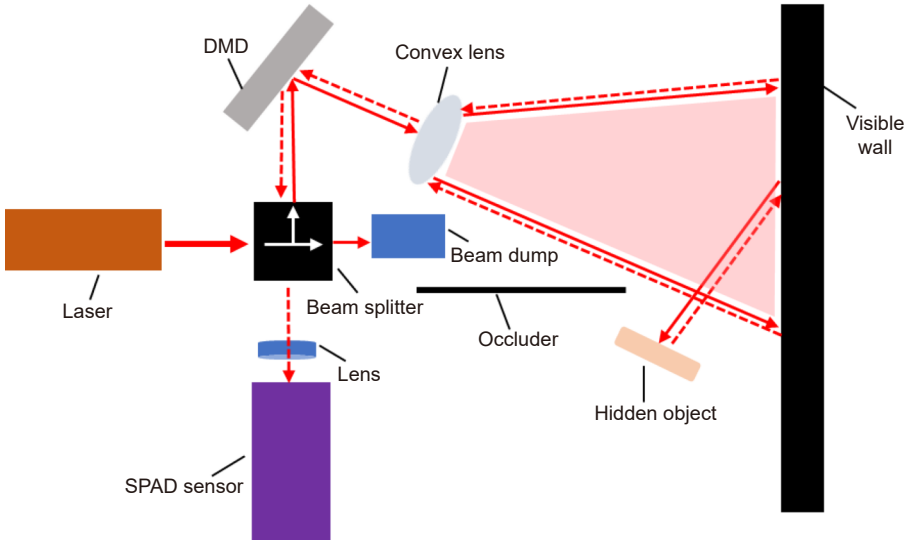
【通信作者】罗一涵 (1982-)，男，研究员，主要从事弱目标探测等领域的研究。中科院青年创新促进会会员。

E-mail: luo.yihan@foxmail.com

扫描二维码，获取PDF全文

Confocal non-line-of-sight imaging based on spatial multiplexing detection

Zheng Haiyang[1,2,4], Luo Yihan[1,2,3*], Li Tailin[1,2,3], Tang Jiayao[1,2,4], Liu Yaqing[1,2], Xia Shiye[1,2], Wu Qiongyan[1,2,3], Xie Zongliang[1,2,3]



Schematics of the experimental set-up for non-line-of-sight imaging

Overview: It is usually challenging to image objects that are beyond sight, yet this technology has many possible applications. In situations like autonomous driving, counterterrorism, and rescue operations, analyzing the object information in the hidden area might help people make better decisions. Ultrafast lasers and detectors with high sensitivity and time resolution have been developed thanks to advances in photoelectric technology. The flight time of photons can be measured with a single photon detector. The intermediary surface receives laser pulses from the laser. Through the reflection of the intervening surface, the laser illuminates the concealed object. The detector gathers the three reflected echo photons that were sent back by the intermediary surface once the hidden object's reflection reaches it, extracts the data from the echo photon, and then uses an image technique to reconstruct the hidden target. In order to complete the reconstruction of hidden objects, the researchers have also successively proposed the reverse projection algorithm (BP), the iterative error anti-projection algorithm, the light-cone transform algorithm (LCT), the surface normal algorithm, and the non-line-of-sight reconstruction algorithm based on virtual waves. However, the scanning of the intermediary surface by the laser can lead to long data acquisition times. Later researchers have used a digital micromirror device (DMD) to flip the echo signals into a single photon detector, which allows the acquisition of signals to be finished without the scanning component. In earlier research, back-projection was used to reconstitute signals obtained with DMDs. In this paper, the spectroscopic effect of the DMD element in the optical route is resolved, and the signal acquisition method of SMD is brought into the non-line-of-sight imaging of the confocal optical path. The hidden object signal is captured by switching the micromirror, and the reconstruction is finished using LCT and BP algorithms, employing a confocal non-line-of-sight imaging optical route with a DMD element. By comparing the reconstruction quality of BP and LCT, SSIM and PSNR demonstrate that LCT can achieve greater reconstruction quality when using the SMD acquisition method. Additionally, research have shown that using this acquisition method will increase the quality of the reconstruction by increasing the laser intensity and the number of sampling points.

Zheng H Y, Luo Y H, Li T L, et al. Confocal non-line-of-sight imaging based on spatial multiplexing detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220256; DOI: 10.12086/oee.2023.220256

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62271468)

[1]Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; [2]Institutue of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; [3]University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; [4]School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: luo.yihan@foxmail.com