

文章编号 1004-924X(2025)03-0377-12

阵列飞行时间实时非视域成像技术

韩 圆¹, 李有治¹, 纪珍辰³, 艾宏旭³, 姚家琦^{1,2}, 王艳秋¹, 郑 福¹, 孙志斌^{1,2*}

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要:为解决现有非视域成像技术存在的成像速度慢、成像范围小和成像系统复杂昂贵的问题,提出了阵列飞行时间实时非视域成像方法,建立面阵飞行时间三次散射非视域成像理论模型,研究了成像距离和光源照射角度对系统重建结果的影响及系统性能,构建飞行时间非视域三维成像的评价指标。该方法利用850 nm的调制激光作为光学信号源,以飞行时间相机作为传感器接收经中介面散射回的三次散射目标信号,通过解调算法获得的深度信息重建出隐藏的非视域场景目标。实验结果表明,该系统在3.5 m距离内,可实现中介面和非视域目标均为近朗伯体情况下对15 cm×19 cm×30 cm的石膏人像等小型目标的实时非视域场景重建,光源的照明角度在60°~90°内可调,非视域实时成像速度为2.056 5 frame/s,像素规模为320×240,目标对应区域的最大像素规模为150×100,横向多个目标图像不发生混叠的最小距离为3.5 cm。本文提出的阵列飞行时间实时非视域成像技术的成像范围大、成像速度快且成像分辨率高、抗干扰能力强。

关键词:非视域成像;实时成像;阵列飞行时间

中图分类号:O439 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253303.0377 CSTR:32169.14.OPE.20253303.0377

Technologies of real-time non-line-of-sight imaging based on time-of-flight array

HAN Yuan¹, LI Youzhi¹, JI Zhenchen³, AI Hongxu³, YAO Jiaqi^{1,2}, WANG Yanqiu¹,
ZHENG Fu¹, SUN Zhibin^{1,2*}

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

* Corresponding author, E-mail: zbsun@nssc.ac.cn

Abstract: To address the challenges associated with slow imaging speed, limited imaging range, and the complexity and high costs of existing non-line-of-sight (NLOS) imaging technologies, a novel real-time NLOS imaging method based on array time-of-flight (ToF) principles was proposed. A theoretical model for three-dimensional (3D) scattering NLOS imaging utilizing a planar array configuration was established, facilitating the investigation of the effects of imaging distance and light source illumination angle on

收稿日期:2024-12-10;修订日期:2024-12-30.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFC2604900, No. 2023YFF0719800)

system reconstruction outcomes and overall performance. An evaluation index for ToF NLOS 3D imaging was developed. This method employs an 850 nm modulated laser as the optical signal source, with a ToF camera functioning as the sensor to capture third-order forward scattering signals from concealed targets illuminated through an intermediate plane. The hidden target is reconstructed using depth information obtained from a demodulation algorithm. Experimental results demonstrate that the system can achieve real-time NLOS reconstruction of small targets, such as a plaster statue measuring $15\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 30\text{ cm}$, when both the intermediate plane and NLOS objects are approximated as Lambertian surfaces within a distance of 3.5 m. The illumination angle of the light source can be adjusted between 60 and 90 degrees, resulting in a real-time imaging speed of 2.056 5 frame/s. The system features a pixel resolution of 320×240 , with a maximum target area pixel size of 150×100 , and a minimum horizontal distance for multiple target images without aliasing of 3.5 cm. This paper introduces key technologies for real-time NLOS imaging using array ToF, highlighting significant advancements in imaging range, speed, resolution, and interference resistance.

Key words: non-line-of-sight imaging; real-time imaging; time-of-flight array

1 引 言

非视域(Non-line-of-sight, NLOS)成像指的是当目标处于“视线”之外,即“非视域”场景下人眼或探测器无法直接观察隐藏目标时的成像。该成像系统于 2008 年由 Ramesh 等提出^[1],其目的是为突破传统成像技术受几何光学成像原理的限制并拓展成像范围。由于传统成像系统只针对视域场景下对可见目标进行成像,当成像目标转移至视域外或被障碍物遮挡时,因不能获取目标的反射光信号而导致无法成像;而 NLOS 成像系统通过主动发射光源照亮中介面,利用其与 NLOS 目标表面多次散射光信号,重新恢复目标图像。因此,该成像系统对传感器的灵敏度、光源的准直度及稳定性要求很高,需尽可能减少传播过程中因光束扩散和散射导致的信号丢失和误差,更需要探测器具有极高的时空分辨力,才能从严重退化的光信号中提取出目标信息,从而恢复 NLOS 目标图像。而随着半导体技术^[2]、光电子学^[3]和纤维光学^[4]等技术的快速发展,单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)和条纹管相机等高灵敏度高分辨率光电探测器的出现,使得 NLOS 光信号时空信息分辨和目标信息提取成为可能。此外,日益先进的激光调制技术为 NLOS 成像提供了更多稳定高功率的激光光源。利用灵敏度极高的光电探测器和稳定的激光光源,结合对 NLOS 场景模型的分

析,利用中介面反射光信号,可在复杂环境下实现对隐蔽目标的探测和成像。

随着快速激光源调制发射和光电探测技术的进步,NLOS 成像技术取得长足发展,它可以分为主动 NLOS 成像和被动 NLOS 成像。主动 NLOS 成像包括^[5]:基于飞行时间的 NLOS 成像、基于强度相干的 NLOS 成像和基于空间相干的 NLOS 成像。被动 NLOS 成像包括基于数据驱动的 NLOS 成像。目前,NLOS 成像主要为使用调制激光光源+单光子雪崩二极管的点扫描式成像,光源功率要稳定且需约束激光扩散;点扫描式成像同一时间只能获得单一位置 NLOS 信息,要获得 NLOS 场景下的成像结果需进行长时间扫描成像和数据融合。另外,为实现对光子时空信息的高精度分辨,需使用高性能光电探测器且成本昂贵。关于 NLOS 成像,国外的研究起步较早,早期研究主要集中在理论探索、光学成像原理及其硬件实现方面,哈佛大学等机构的突破性研究,推动了 NLOS 成像从概念到实际应用的转变,成像精度和分辨率也逐渐提升。随着计算机视觉和机器学习技术的发展,深度学习在 NLOS 成像中的应用逐渐增多,显著提升了图像重建精度和恢复能力。国内的研究尽管起步稍晚,但随着技术的引进与创新,已有多项研究在反向散射成像和多光谱成像方面取得进展。随着量子成像技术的发展和深度学习算法的成熟,NLOS 成像将继续向着高速高精度大范围的方

向发展,有望在军事、自动驾驶等高精度需求的领域发挥更大作用。

2011年,Kirmani^[6]利用飞行时间和光传输多路径分析实现NLOS成像,创建了通过时间图像分析重建场景的算法和系统。2012年,Velten^[7]等利用810 nm激光器与条纹管相机搭建的主动NLOS成像系统。2018年,美国Tancik^[8]利用神经网络实现对NLOS目标1.7 cm的高精度定位,但因神经网络需预训练且训练数据集获取难度大而无法大范围应用。2019年,Chen^[9]等基于隐藏物体表面反射率的方向性(BRDF),在无需遮挡物,仅使用连续照明光束和传统RGB相机的条件下实现全彩的NLOS成像。同年,Liu^[10]等提出一种基于向量场虚拟光波的成像算法,可在复杂场景下实现10 cm距离分辨率的NLOS成像。2021年,Feng^[11]等利用超快光场层析成像,实现了利用非平面中介面的NLOS成像。除了开发NLOS成像算法和NLOS成像方案外,提升现有系统的硬件性能,提高光电探测器探测精度也是目前NLOS成像另一个重要的发展方向^[12]。2021年,徐飞虎^[13]等利用脉冲泵浦频率上转换探测技术,开发出时间分辨能力达到1.4 ps的近红外单光子探测器,实现对视域外毫米级字母的高精度NLOS成像。此外,随着越来越多新型神经网络的出现,基于深度学习的NLOS成像技术得到了快速发展^[14-17]。为了加快NLOS成像速度和成像范围,则必须提高从中介面上提取信息的效率,一种方法是继续提高扫描速度,提高机械扫描中控制点扫描的旋转镜的转动速度或是优化电子扫描中调制激光的路径来实现快速扫描,但对成像速度的提升有限;第二种则是改变点扫描为线扫描或阵列扫描,这类方案可以成倍地提升成像速度,扫描速度可达百万点每秒但却引入更多的噪声信号,降低了重建图像的质量。在过去十几年里,对点扫描飞行时间NLOS成像技术的优化方案不断被提出,但直接有关阵列式扫描成像的研究却很少。

阵列飞行时间(Time-of-flight, ToF)相机作为近年来快速发展的一种新型三维成像设备,具有体积小、成本低、成像速度快且对环境噪声稳

定性高等优点,已成为三维成像领域的研究热点。相机发出调制光信号照亮目标,探测反射回的光信号在空间中的传播时间给出目标的深度信息,实现对目标的三维成像。光测距最初由伽利略提出,直到1969年,美国贝尔实验室才提出可实现光信号探测的第一代CCD技术,2004年发展出的第一代ToF相机^[18]立刻受到各大公司的关注,并在之后对其进行了深层次研究,开发出多种工业级ToF相机,如微软公司的Kinect相机,美国德州仪器公司的ToF模块以及MESA, PMD, Canesta和Fotonic等公司的ToF相机^[19-21]。ToF相机可实现对目标场景的连续成像并给出目标三维点云,具有丰富的时空信息,可广泛应用于三维成像系统中^[22-24],如避障^[25-26]、人体识别^[27-29]、机器视觉^[30-31]和位姿监测^[32-34]等,且已有很多研究成果投入实际使用。

本文将面阵ToF相机应用于NLOS成像,提出一种ToF实时NLOS成像系统,实现大视场条件下多目标NLOS场景下的实时图像重建,为NLOS成像系统的大范围应用提供可行性方案。

2 实验原理

2.1 ToF相机成像

面阵ToF相机基于飞行时间测距原理中的iToF原理获取深度图像,通过计算一个周期四相位积分时间内到达探测器的光子数,获得探测器接收的光信号与光源发出的光信号之间的相位差,利用该相位差获得目标深度信息。该成像方法可进一步分为脉冲波调制(pulsed-wave iToF)成像和连续波调制(CW-iToF)成像,前者由光源发射的脉冲方波信号成像,后者由光源发射的固定频率连续调制正弦波信号成像。较dToF测距过程而言,光源在发射调制好的稳定频率光信号外,还需要生成一组与发射光信号同频同相位的解调信号传给传感器。因为在探测器接收到光信号后,无法直接获取目标距离信息,需要与传感器内解调信号卷积后获得多相位光子积分结果,通过光子积分结果计算出发射光信号与接收光信号之间的相移,

结合调制频率获得光子传播时间。

本文使用的 ToF 相机成像基于 iToF 中的连续波调制成像原理。设 T 为积分时间, $s(t)$ 为探测器接收信号, $g(t)$ 为相机光源输出信号, $f(t)$ 为探测器内部解调信号, $i(t)$ 为探测器解调后的输出信号, s_0, g_0 为环境噪声偏移量, s_1, g_1 为光信

$$i(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega_f t + \psi) \cdot (s_1 \cos(\omega_s t + \phi) + s_0) dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{s_1}{2} \cos((\omega_f - \omega_s)t + \psi - \phi) + \frac{s_1}{2} \cos((\omega_f + \omega_s)t + \psi + \phi) + s_0 \cos(\omega_f t + \psi) dt. \quad (4)$$

当 $\omega_f = \omega_s = \omega$ 且 $T \gg \frac{1}{\omega}$ 时, 即解调光信号与光源发出 $\omega_f = \omega_s = \omega$ 的连续调制光信号同频时, 式(4)可化为:

$$i(t) = \frac{s_1}{2} \cos(\psi - \phi), \quad (5)$$

其中: ψ 是 $f(t)$ 中的解调相位, 可自行设置通常四相位解调制方法中使用的解调相位为 $\psi = 0, \psi = \frac{\pi}{2}, \psi = \pi$ 和 $\psi = \frac{3}{2}\pi$ 。

将这些解调相位分别带入式(6)中可以得到:

$$i_1 = i(0) = \frac{s_1}{2} \cos(-\phi) = \frac{s_1}{2} \cos(\phi), \quad (6)$$

$$i_2 = i\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{s_1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \frac{s_1}{2} \sin(\phi), \quad (7)$$

$$i_3 = i(\pi) = \frac{s_1}{2} \cos(\pi - \phi) = -\frac{s_1}{2} \cos(\phi), \quad (8)$$

$$i_4 = i\left(\frac{3}{2}\pi\right) = \frac{s_1}{2} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \phi\right) = -\frac{s_1}{2} \sin(\phi). \quad (9)$$

根据(7)~式(10)可以推出相位变化为:

$$\phi = \arctan\left(\frac{i_2 - i_4}{i_1 - i_3}\right). \quad (10)$$

同时相位变化 ϕ 由光子传播过程产生, 因此满足:

$$\phi = -\frac{4\pi d\omega}{c}. \quad (11)$$

结合式(11)与式(12)可计算出光子飞行距离 d , 这里 c 代表光速。

2.2 非视域成像模型

光传播时会发生扩散, 为避免光源照明范围

号振幅, 即:

$$s(t) = s_1 \cos(\omega_s t + \phi) + s_0, \quad (1)$$

$$g(t) = g_1 \cos(\omega_g t) + g_0, \quad (2)$$

$$f(t) = \cos(\omega_f t + \psi). \quad (3)$$

将解调光信号与探测器接收光信号进行卷积, 计算出积分时间内到达探测器的光子数。

与相机观测范围重合所带来的一次散射干扰, 需要了解 NLOS 成像过程中的照明范围, 本文设计的 NLOS 成像系统光路包括发生在中介面上的两次散射过程和发生在目标表面的一次散射过程。为研究影响阵列实时飞行时间 NLOS 成像系统的主要因素, 以中介面为 xy 平面, 以平行地面向右为 x 轴正方向, 垂直地面向上为 y 轴正方向, 中介面垂直指向光源的方向为 z 轴正方向, 建立三维笛卡尔坐标系, 结合光源传播扩散函数和反射定律, 建立阵列实时飞行时间 NLOS 成像系统的理论模型。

2.2.1 光信号传播模型

根据光源传播扩散函数, 假设实验所用的光源为一初始半径为 d_1 , 发散角为 α_1 的光束, 其宽度随传播距离 l_1 的变化如下:

$$D_1 = d_1 + \alpha_1 l_1. \quad (12)$$

NLOS 成像过程共分为光源到中介面、中介面到目标、目标到中介面以及从中介面回到探测器这 4 个部分。鉴于光源通过中介面照明 NLOS 场景和相机通过中介面探测 NLOS 场景的过程具有一致性, 这里分别从光源和相机两个方向研究其照明范围和探测范围。由于光束传播过程中的宽度随传播距离的增加而发散, 因而其照明范围为一个圆台形区域, 而当相机垂直和水平视场角相同时, 将其视场角视作发散角, 其探测宽度随传播距离的变化可由式(13)定义。探测范围也可视为一个圆台形区域, 光源对应照明圆台区域在中介面上的投影范围由下式定义:

$$f(x, y) = \left[x - x_1 - \left(2 \frac{d_1}{d_1 - D_1} + 1 \right) (x_2 - x_1) \right]^2 + \left[y - y_1 - \left(2 \frac{d_1}{d_1 - D_1} + 1 \right) (y_2 - y_1) \right]^2, \quad (13)$$

$$\begin{cases} f(x, y) \leq D_1^2, (x, y) \text{ 在照明区域内} \\ f(x, y) \geq D_1^2, (x, y) \text{ 在照明区域外} \end{cases}, \quad (14)$$

其中: (x_1, y_1, z_1) 代表光源坐标, (x_2, y_2, z_2) 代表中介面上的第一次入射点坐标。其中, 坐标参数需要满足如下条件:

$$\begin{cases} x_2 < x_1 \& y_2 < y_1, \text{ 自上而下斜入射} \\ x_2 < x_1 \& y_2 > y_1, \text{ 自下而上斜入射} \end{cases} \& z > 0. \quad (15)$$

而对于NLOS场景的照明范围, 考虑光源在中介面上的反射, 按照反射的几何关系, 只需考虑该圆台区域沿原方向继续拓展后, 以 xy 平面为对称平面, 将 $z < 0$ 的部分对称到 $z > 0$ 的区域内即可得到。对于相机在中介面上的探测区域以及在NLOS场景下的探测范围, 在确定相机位置 (x_4, y_4, z_4) 及相机镜头光轴与中介面交点坐标 (x_3, y_3, z_3) 后也可按同样的方法求得。

2.2.2 非视域成像的几何描述

为实现NLOS成像, 避免一次散射干扰, 在获得3次散射共4次传播过程所对应的照明范围和探测范围后, 需满足中介面上照明区域与探测区域无重合, 且在NLOS场景下照明区域与探测区域相交。简化的照明范围和探测范围定义如下:

$$\begin{cases} a_i = -x_i - \left(2\frac{d_i}{d_i - D_i} + 1\right)(x_{i+1} - x_i) \\ b_i = -y_i - \left(2\frac{d_i}{d_i - D_i} + 1\right)(y_{i+1} - y_i), \\ (x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 = D_i^2 \end{cases}, \quad (16)$$

$$\tau_m(x_n, y_n, z_n) = \iiint_{\Omega} \frac{1}{l_{m+1}} \rho_s(x_s, y_s, 0) \cdot \delta \left\{ \left[x - x_i - \left(2\frac{d_i}{d_i - D_i} + 1\right)(x_{i+1} - x_i) \right]^2 + \left[y - y_i - \left(2\frac{d_i}{d_i - D_i} + 1\right)(y_{i+1} - y_i) \right]^2 \leq D_i^2 \right\} dx_s dy_s dz_s (m, s, i = 1, 2, 3; n = 4, 5, 6). \quad (18)$$

第一次散射前激光发出的光束具有准直性, 其能量在到达中介面前几乎不受传播距离的影响, 在经过3次漫反射后其能量有较大损耗。漫反射区域由上述光信号的照明范围和相机探测范围定义给出, 在考虑反射率为 ρ_s 的中介面第一次散射、目标表面第二次散射、中介面第三次散

其中: d_i 与 D_i 代表每个过程对应的圆台上下底面半径, $i = 1, 2, 3, 4$ 。根据NLOS成像的几何约束条件, 应满足:

$$\begin{cases} (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 \geq D_1 + D_2 \\ (a_3 - a_4)^2 + (b_3 - b_4)^2 < D_3 + D_4 \end{cases}. \quad (17)$$

相机与光源在中介面上的照明范围和探测范围分别以圆心为 (a_1, b_1) 和 (a_2, b_2) 的两圆表示, 其区域分别为 S_1 和 S_2 , 当 $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ 时, 代表两区域无重叠部分, 一次散射干扰达到最小。相机与光源在NLOS场景下的照明范围和探测范围分别以圆心为 (a_3, b_3) 和 (a_4, b_4) 的两圆表示, 其区域分别为 S_3 和 S_4 , 当 $S_3 \subseteq S_4$ 时, NLOS目标被照明部分全部在探测范围内, 此时探测器获取NLOS目标信息的效率达到最高。

2.2.3 非视域成像的强度描述

iToF方法是通过计算一个周期内不同时间段累计光子数的比值获取该位置的深度信息, 而强度信息同样是由统计一定时间段内累计光子数得到。与强度信息相同的是, NLOS成像获取的深度信息及重建后的图像质量也与光信号强度相关, 而在NLOS成像系统中影响信号强度的主要因素是中介面和目标表面的反射率以及信号的传播距离。考虑中介面与目标表面都是朗伯体, 光沿主光轴传播路径最短, 强度最小值由主光轴路径决定, 到达探测器表面的光束能量为:

射带来的能量损耗后, 到达目标表面 (x_n, y_n, z_n) 位置的光束能量分别由 τ_1, τ_2 和 τ_3 给出, 三次散射后到达目标表面的光束能量由 τ_{total} 给出, 即:

$$\tau_{\text{total}} = \tau_1 \tau_2 \tau_3. \quad (19)$$

引入ToF相机测量时自身深度信息约束如下:

$$\tau_{\text{total}}(x_p, y_p, \phi_p) = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \iiint_{\Omega} \delta \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2} - \frac{\phi c}{4\pi\omega} \right\} dx_6 dy_6 dz_6, \quad (20)$$

其中 (x_p, y_p, ϕ_p) 代表相机各像素坐标及其相位信息。

3 实 验

实验中,对激光二极管发出的 850 nm 激光进行强度调制并作为系统光源,光源以合适角度倾斜入射到 80 cm×80 cm 的白瓷中介面上,待发生第一次散射后照亮 NLOS 场景下的目标,用于成像的 NLOS 目标依次为 60 cm 头围的摩托头盔目标、15 cm×19 cm×30 cm 的石膏人像目标和 30 cm×27 cm×23 cm 的棱锥目标,如图 1 所示。在 NLOS 目标表面发生第二次散射后光信号第二次回到中介面上,经中介面发生第三次散射回到视域场景,三次散射回的部分光子被阵列飞行时间相机聚焦镜头接收后传递给 320 pixel×240 pixel 的 CMOS 探测阵列,经其内部解调获取深度信息,解调信号与光源的发射信号被控制为同频同相信号,阵列飞行时间相机的光轴方向与地面平行,相机深度信息的获取过程如图 2 所示。

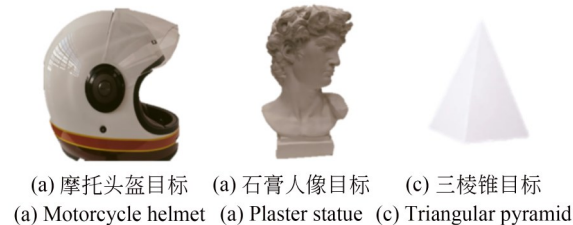


图 1 非视域成像目标

Fig. 1 Non-line-of-sight imaging targets

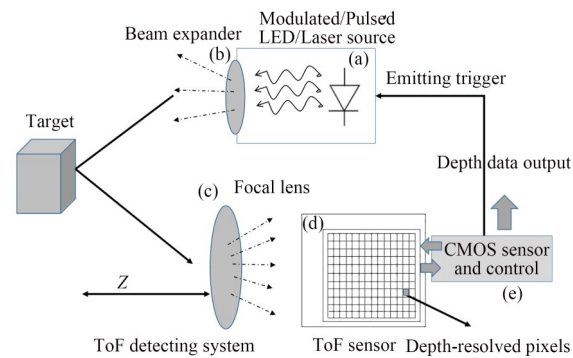


图 2 阵列飞行时间相机获取深度图像流程

Fig. 2 Flow chart of depth image acquisition by array time-of-flight camera

探测器和目标的所在区域由非透光隔板分开。从光源到中介面,再从中介面到 NLOS 目标,接着从 NLOS 目标传输到中介面,最后从中介面传输到探测器,每次传播过程对应光路由 L_1, L_2, L_3, L_4 代表,文中定义的成像距离为 $L_3 + L_4$,实验中成像距离设置在 5 m 内,NLOS 成像场景如图 3 所示。依据实验原理中给出的 NLOS 成像几何约束,为避免一次散射回波信号干扰,实验中需要保证相机在中介面上的探测范围与光源的在中介面上的照明区域处于不同区域,从而降低散射光的干扰。解调后获得的 NLOS 成像原始深度数据传输到计算机,通过峰值滤波对获取深度图像处理,所使用的计算机环境为 NVIDIA GeForce GTX 1080Ti,内存 32 GB,处理器为 Intel (R) Core(TM) i9-10900X。NLOS 原始深度图像处理包括图像去噪、区域划分的预处理以及峰值滤波提取目标有效深度信息的过程。

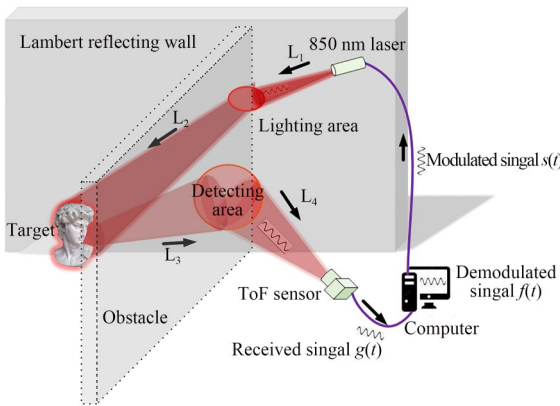


图 3 阵列飞行时间的非视域成像系统

Fig. 3 Array time-of-flight non-line-of-sight imaging system

4 实验结果及分析

为验证本文设计的 NLOS 成像系统的有效性,对实验中 NLOS 目标在不同成像距离和光源照射角度的 NLOS 场景下进行原始深度数据采集与图像重建。ToF 相机在处理深度信息时,超出成像距离的场景深度被统一设置到最大成像距离,因此,目标外 NLOS 背景对应的深度涨落不大,且与 NLOS 目标深度信息有明显差异。对重建后的图像质量使用标准差(Standard Deviation,STD)进行评估。标准差反映图像真实值与均值的离散度,标准差越大说明图像边缘越清

晰,重建图像质量越好。标准差的计算公式为:

$$\delta_{\text{STD}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_{ij} - \bar{I})^2, \quad (21)$$

其中 $\bar{I}$ 表示图像的像素均值,其定义式为:

$$\bar{I} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_{ij}). \quad (22)$$

4.1 重建质量与成像距离的关系

为研究成像距离对NLOS重建图像质量的影响,设置光源与地面夹角为 60° ,光源到入射点的距离为 0.3 m ,到中介面的垂直距离为 0.2 m ,可求得光源到中介面的入射角为 73° ,保持入射角与光源——地面夹角不变,改变成像距离,设计了 $3, 3.5, 4$ 和 4.5 m 4组成像场景,成像距离

主要通过改变 L_3 的值来改变。图4展示了NLOS三维成像结果及其对应的三视图。图5展示了针对三类目标进行NLOS成像后,ToFNLOS成像系统的重建结果, 4 m 和 5 m 的结果没有说明,因为获得的深度数据很少,目标几乎无法辨认。该结果验证了NLOS成像系统的有效性,三类目标的图像均可分辨。通过图6结果对比不同距离下不同目标的成像质量,可发现随成像距离的增加,三类目标的成像质量均下降,当下降到 0.8 左右时,图像STD几乎不再下降,此时重建图像已无法识别目标,本文提出的NLOS成像系统的最大成像距离为 3.5 m 。比较成像距离相同时三类目标的重建图像质量由高至低的

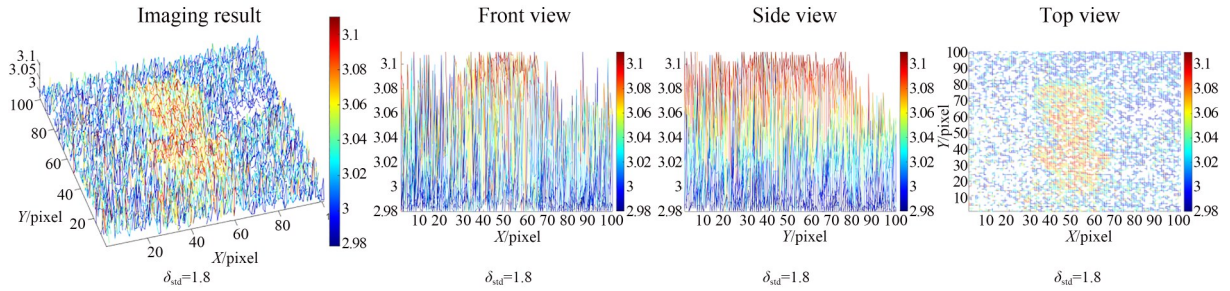


图4 非视域成像三维结果示例(石膏像)

Fig. 4 Example of three-dimensional results of non-line-of-sight imaging (plaster statue)

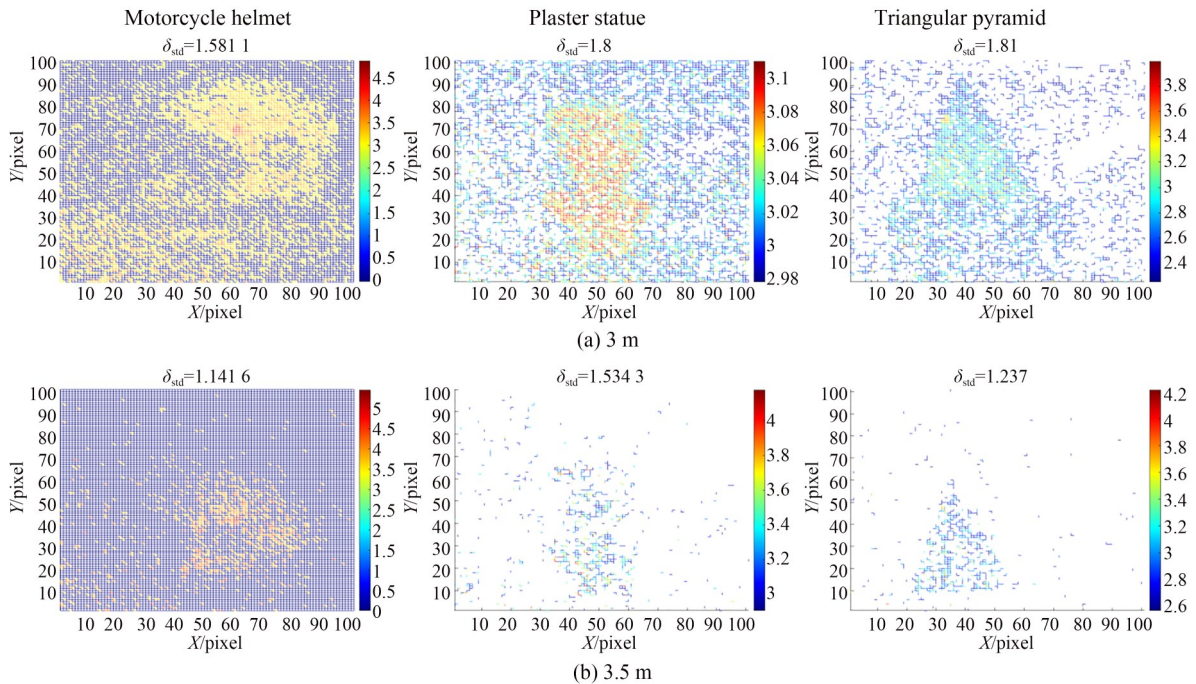


图5 非视域不同距离的成像结果

Fig. 5 Imaging results of different distances in non-line-of-sight imaging

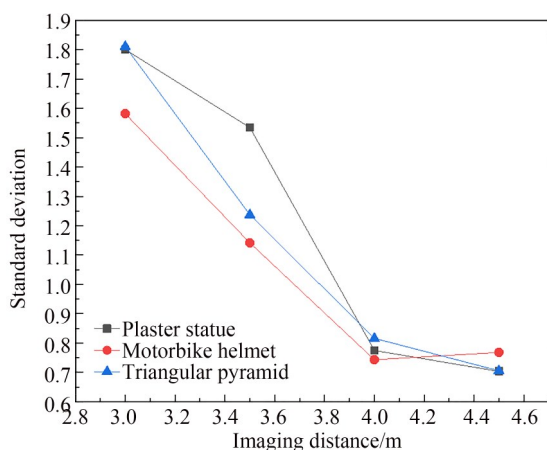


图6 不同目标成像标准差与成像距离的关系

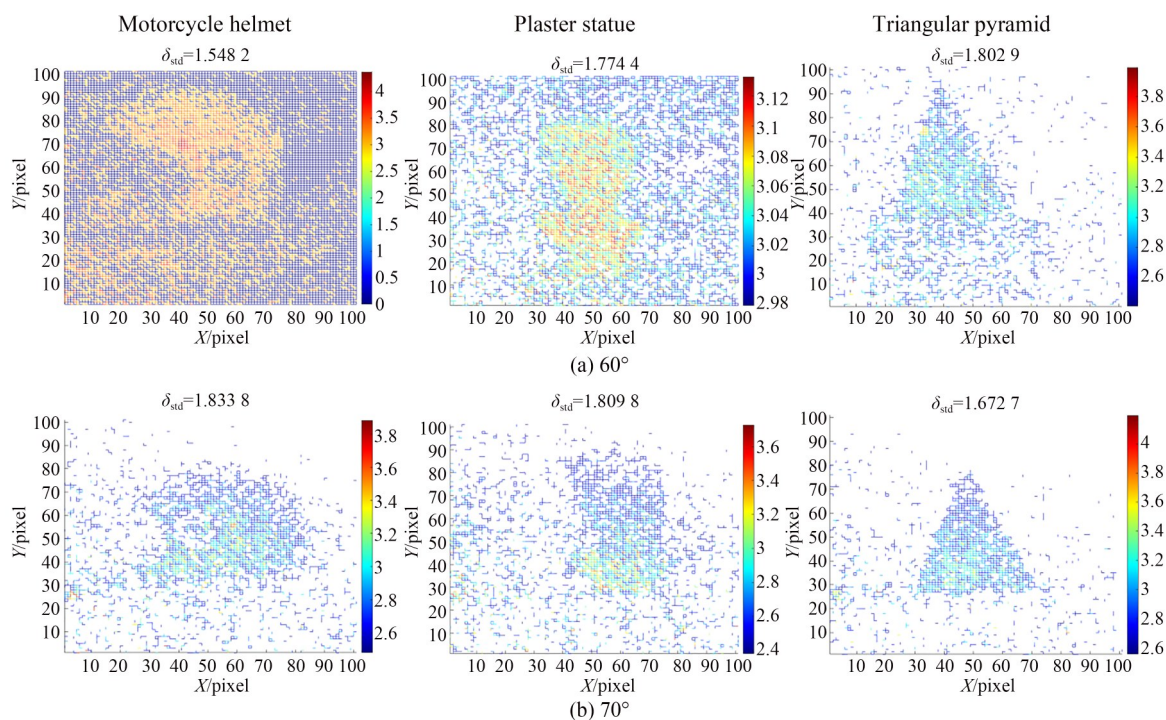
Fig. 6 Relation between imaging standard deviation and imaging distance of different targets

顺序为:石膏人像 $\geq$ 三棱锥 $>$ 头盔,但头盔的反射能力为三者中最强,造成这一现象是因为探测器的探测范围有限。在设计的光源方向条件约束下,通过中介面间接照亮目标时,目标表面反射率过高部分反射的光子方向性较强;而当这些光子的传播方向不在探测范围内时,重建图像中该部分目标表面的深度信息就会丢失,因而头盔重建图像中有部分图像空白造成STD较低,漫反射强的目标更易被探测,对应的重建图像清晰

完整,没有图像空洞且STD较高。该结果表明,本系统NLOS重建质量随成像距离的增加而降低,三类目标重建图像的STD最高为1.58,1.80和1.81。

4.2 光源照射角度与成像质量的关系

为研究光源照射角度对NLOS重建图像质量的影响,设置成像距离为3 m,光源到入射点距离为0.3 m,到中介面垂直距离为0.2 m,到中介面入射角为 73° ,保持入射角与成像距离不变,改变光源与地面间的夹角,设计了 60° 、 70° 、 80° 和 90° 4组成像场景。图7展示了针对三类目标进行NLOS成像后,阵列飞行时间NLOS成像系统的重建结果。图8展示了不同角度下不同目标的成像质量变化,可发现随照射角的增加,石膏人像和三棱锥的STD较稳定;而头盔目标的重建质量受角度影响波动大,STD最大值与最小值的差为1.031 92,远大于石膏像的0.125 6和三棱锥的0.130 2,但在 70° 时头盔目标的NLOS图像重建结果可达到4组场景下的最大值为1.833 8;在所有测试角度下,石膏像目标和三棱锥目标都可成功重建,而头盔目标在 90° 时不能重建目标。对上述现象和三类NLOS目标的反射特性分析表明,在NLOS成像时镜面反射成分较多的NLOS目标对光源照射角度的要求较高,但在角度合适



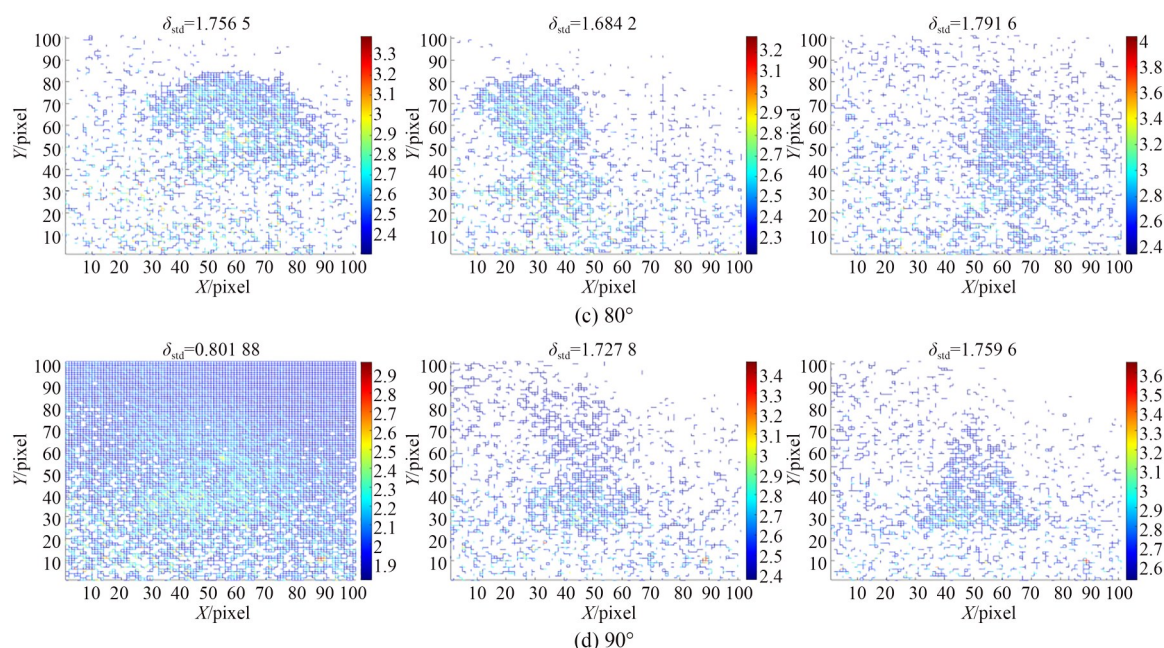


图7 非视域不同角度的成像结果

Fig. 7 Imaging results from different illumination angles of non-line-of-sight imaging

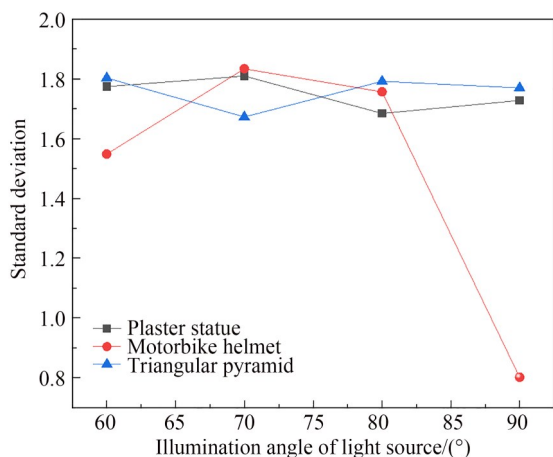


图8 不同目标成像标准差与光源照射角度的关系

Fig. 8 Relation between imaging standard deviation of different targets and light source illumination angle

时其获取的图像质量更好;而对于漫反射成分更多的NLOS目标,其重建图像质量受光源照射角度的影响和光源照射角度约束更小。除此之外,根据图3中第一次散射后的光路 L_2 ,当相机照射角度增大时,相同成像距离下 L_2 的光路更短,照明范围也更小,这体现在图7的成像结果中。60°时三类目标的图像均最完整,当角度增加后,三类目标均有不同程度图像缺失,如头盔下半部分减少,石膏人像底座图像消失,三棱锥高度减少。

4.3 非视域成像横向距离分辨率与成像速度

为实验验证实时NLOS重建及其横向分辨能力,设置成像距离为3 m,光源到入射点距离为0.3 m、到中介面垂直距离为0.2 m、到中介面入射角为73°、与地面夹角为60°,设计了三棱锥+石膏人像、三棱锥+头盔和头盔+石膏人像3组多目标成像场景,3组场景下两目标间距设置为4,3.5和3 cm。图9展示了3组场景下NLOS成像结果。第一组与第二组两目标边缘无重叠,可清晰分辨两目标,第三组三棱锥和头盔图像的底部边缘出现重叠,该实验结果表明本系统的横向分辨距离至少为3.5 cm。每组场景下记录重建每帧图像所用的时间,其倒数即为NLOS成像的帧速,每组数据随机取3帧,记录其重建速度,结果如表1所示。结果表明,该NLOS成像系统在多目标场景下图像处理的平均成像速度为2.056 5 frame/s,实验所使用的阵列飞行时间相机采集原始深度数据的速度为8 frame/s,远超过图像的处理速度,而原始数据采集与图像处理在系统中并行进行,因此,最终系统的真实平均成像速度由图像处理速度决定,即为2.056 5 frame/s,可实现实时NLOS成像。

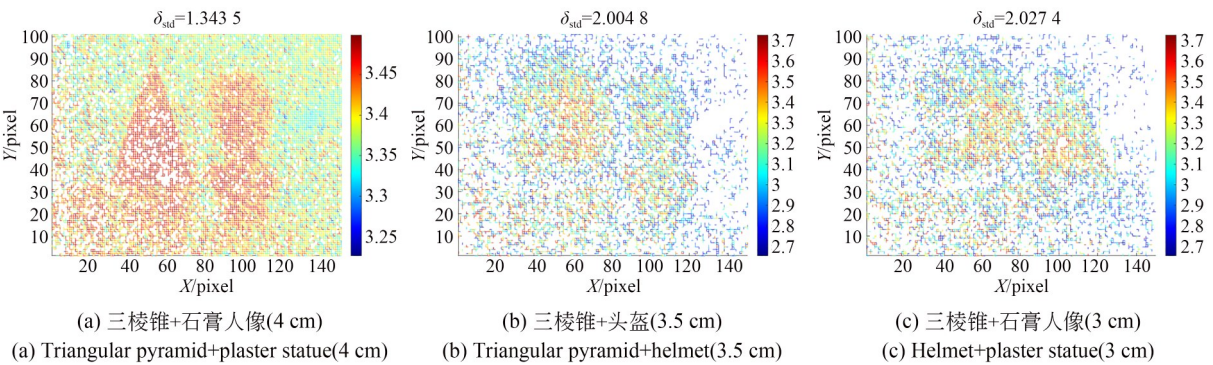


图 9 多目标非视域成像结果

Fig. 9 Multi-object non-line-of-sight imaging results

表 1 非视域系统的成像速度			
Tab. 1 Imaging speed of non-line-of-sight system			(frame/s)
成像目标	成像速度	每组平均成像速度	系统平均成像速度
三棱锥+石膏人像(4 cm)	2.099 9	2.060 2	2.056 5
	1.845 3		
	2.235 3		
三棱锥+头盔(3.5 cm)	1.998 1	2.016 1	
	1.973 3		
	2.076 8		
头盔+石膏人像(3 cm)	2.001 3	2.093 1	
	2.082 2		
	2.195 7		

5 结 论

本文利用 ToF 相机可快速获取大场景深度图像的优点,研究三次散射 NLOS 成像光路的特点,对 NLOS 成像中影响最大的一次散射问题进行光路优化。建立三次散射 NLOS 成像理论模型,研究成像距离和光源照射角度对系统重建结果的影响和系统性能。实验结果表明,本系统可在 3.5 m 内的 NLOS 场景下对大视场以 2. 056 5 frame/s 的平均速度生成 320×240 像素的 NLOS 重建图像,对多目标场景重建的最小横向分辨率距离为 3.5 cm。本方案不仅提高了 NLOS 成像系统在大视场应用场景下的成像速度,还简化了 NLOS 成像系统搭建时对光路的几何约束,本系统光源照射角度可在 60°~90°内自由调节以实现 NLOS 成像。而相较使用条纹管相机或单光子

探测器等高分辨率高性能光电探测器的传统 NLOS 成像系统,本文提出的 NLOS 成像系统成本更低,为该技术的大范围应用提供了一种可行方案。

作者贡献声明:

- 韩 圆:改进方案的提出,模型搭建及论文撰写;
- 李有治:测量实验的设计与实验系统搭建;
- 纪珍辰:实验系统搭建及数据采集;
- 艾宏旭:测量实验数据分析;
- 姚家琦:论文的编辑写作;
- 王艳秋:论文审核;
- 郑福:实验人员的协调和实验设备的管理;
- 孙志斌:提供场地、实验资源与论文指导。

参考文献:

- [1] RAMESH R, DAVIS J. 5d time-light transport matrix: what can we reason about scene properties? [R]. 1970.
- [2] BEALE J A. Modern developments in semiconductor devices[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1(10): 1229-1240.
- [3] SHILTSEV V. Electron lenses: historical overview and outlook[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16(3): P03039.
- [4] SCHUSTER K, UNGER S, AICHELE C, *et al.* Material and technology trends in fiber optics [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3 (4) : 447-468.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] KIRMANI A, HUTCHISON T, DAVIS J, *et al.* Looking around the corner using transient imaging [C]. 2009 *IEEE 12th International Conference on Computer Vision. September 29-October 2*, 2009. Kyoto. IEEE, 2009: 159.
- [7] 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.
- [8] 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)*. Orlando, Florida. OSA, 2018: IW2B. 6.
- [9] 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. IEEE, 2019: 6790.
- [10] LIU X, 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.
- [11] FENG X, GAO L. Ultrafast light field tomography for snapshot transient and non-line-of-sight imaging[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 2179.
- [12] KANG Y, XUE R, WANG X, *et al.* High-resolution depth imaging with a small-scale SPAD array based on the temporal-spatial filter and intensity image guidance[J]. *Opt Express*, 2022, 30(19) : 33994-34011.
- [13] WANG B, ZHENG M Y, HAN J J, *et al.* Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution [J]. *Phys Rev Lett*, 2021, 127 (5) : 053602.
- [14] YANG X, TONG Z, JIANG P, *et al.* Deep-learning based photon-efficient 3D and reflectivity imaging with a 64×64 single-photon avalanche detector array [J]. *Opt Express*, 2022, 30 (18) : 32948-32964.
- [15] LIAO Z P, JIANG D Y, LIU X C, *et al.* FPGA accelerator for real-time non-line-of-sight imaging [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 69(2): 721-734.
- [16] JIANG D Y, LIU X C, LUO J W, *et al.* Ring and radius sampling based phasor field diffraction algorithm for non-line-of-sight reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(11): 7841-7853.
- [17] MU F Z, MO S C, PENG J Y, *et al.* Physics to the rescue: deep non-line-of-sight reconstruction for high-speed imaging[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024: 1-12.
- [18] OGGIER T, LEHMANN M, KAUFMANN R, *et al.* An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger)[C]. *Optical Design and Engineering. St. Etienne, France*. SPIE, 2004, 5249: 534.
- [19] 丁津津. 基于TOF技术的3D相机应用研究综述 [C]. 中国仪器仪表学会第十二届青年学术会议论文集, 2010: 76.
DING J J. Application research overview of the 3D camera based on TOF Technology [C]. *Proceedings of the 12th Youth Academic Conference of China Instrumentation Society*, 2010: 76. (in Chinese)
- [20] 侯飞, 韩丰泽, 李国栋, 等. 基于飞行时间的三维成像研究进展和发展趋势[J]. *导航与控制*, 2018, 17(5): 1-7, 48.
HOU F, HAN F Z, LI G D, *et al.* Research progress and development trend of three dimensional im-

- aging cameras based on light flight time technique [J]. *Navigation and Control*, 2018, 17(5): 1-7, 48. (in Chinese)
- [21] KAUFMANN R, LEHMANN M, SCHWEIZER M, *et al.* A time-of-flight line sensor: development and application[C]. *Optical Sensing. Strasbourg, France*. SPIE, 2004, 5459: 192.
- [22] XU Y J, LIU X, CAO X, *et al.* Artificial intelligence: a powerful paradigm for scientific research [J]. *The Innovation*, 2021, 2(4): 100179.
- [23] WANG T L, AO L, HAN N, *et al.* Time-of-flight camera intensity image reconstruction based on an untrained convolutional neural network [J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 821.
- [24] WANG T L, AO L, ZHENG J, *et al.* Reconstructing depth images for time-of-flight cameras based on second-order correlation functions [J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 1223.
- [25] FUCHS S, HIRZINGER G. Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras[C]. 2008 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. June 23-28, 2008. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2008: 1.
- [26] WEINGARTEN J W, GRUENER G, SIEGWART R. A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation [C]. 2004 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (IEEE Cat. No. 04CH37566). Sendai, Japan. IEEE, 2004, 3: 2155.
- [27] LIU X, FUJIMURA K. Hand gesture recognition using depth data [C]. *Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2004. *Proceedings*. Seoul, Korea. IEEE, 2004: 529.
- [28] GOKTURK S B, TOMASI C. 3D head tracking based on recognition and interpolation using a time-of-flight depth sensor[C]. *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004. CVPR 2004. Washington, DC, USA. IEEE, 2004, 2: II-II.
- [29] NANDA H, FUJIMURA K. Visual tracking using depth data[C]. 2004 *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*. Washington, DC, USA. IEEE, 2004: 37.
- [30] ALENYA G, FOIX S, TORRAS C, *et al.* 3d object reconstruction from swissranger sensor data using a spring-mass model[C]. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. February 5-8, 2009. Lisboa, Portugal. SciTePress-Science and Technology Publications, 2009: 368.
- [31] FOIX S, ALENYA G, ANDRADE-CETTO J, *et al.* Object modeling using a ToF camera under an uncertainty reduction approach[C]. 2010 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. May 3-7, 2010. Anchorage, AK. IEEE, 2010: 1306.
- [32] MAY S, DROESCHEL D, HOLZ D, *et al.* 3D pose estimation and mapping with time-of-flight cameras [C]. *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3D Mapping workshop, Nice, France. 2008.
- [33] PRUSAK A, MELNYCHUK O, ROTH H, *et al.* Pose estimation and map building with a Time-Of-Flight-camera for robot navigation [J]. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 2008, 5(3/4): 355-364.
- [34] HUSSMANN S, LIEPERT T. Robot vision system based on a 3D-ToF camera[C]. 2007 *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*. IEEE, 2007: 1.

作者简介:



韩 圆(1998—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,主要研究方向为非视域成像与点云三维成像。E-mail: 980603yuanhan@gmail.com

通讯作者:



孙志斌(1978—),男,山西运城人,研究员,博士生导师,主要研究方向为信息光子学与空间科学仪器技术。E-mail: zbsun@nssc.ac.cn