

## 激光雷达三维成像研究进展(特邀)

韩斌<sup>1</sup>, 曹杰<sup>1,2\*</sup>, 史牟丹<sup>1,2</sup>, 张镐宇<sup>1</sup>, 梁龙<sup>1</sup>, 张凯莉<sup>1,2</sup>, 熊凯鑫<sup>1</sup>, 郝群<sup>1,2,3\*\*</sup><sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;<sup>2</sup>北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314003;<sup>3</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 激光雷达三维成像相比二维成像具有信息丰富、主动性好、抗干扰能力强等优势,已广泛应用于遥感侦察、无人驾驶、航空航天等多领域。近年来,激光雷达三维成像发展迅速,一方面,以 APD 阵列器件为典型核心器件的制造能力增强,激光雷达的成像效率得到明显提升;另一方面,随着三维成像方法(扫描/非扫描)的不断改进,其综合性能也得到突飞猛进的发展。通过总结现有激光雷达三维成像的研究现状,讨论现阶段其面临的问题与解决方法,为推进激光雷达应用提供支撑。

**关键词** 激光雷达; 三维成像; 扫描; 非扫描

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232153

## Progress of Three-Dimensional Imaging LiDAR (Invited)

Han Bin<sup>1</sup>, Cao Jie<sup>1,2\*</sup>, Shi Moudan<sup>1,2</sup>, Zhang Haoyu<sup>1</sup>, Liang Long<sup>1</sup>, Zhang Kaili<sup>1,2</sup>,  
Xiong Kaixin<sup>1</sup>, Hao Qun<sup>1,2,3\*\*</sup><sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;<sup>2</sup>Yangtze Delta Region Academy, Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314003, Zhejiang, China;<sup>3</sup>School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

**Abstract** Compared with two-dimensional imaging, three-dimensional (3D) LiDAR imaging has the advantages of rich information, good initiative, and strong anti-interference ability, and it has been widely used in reconnaissance, unmanned vehicle, aerospace, etc. Recently, 3D LiDAR imaging developed rapidly from two aspects. On the one hand, the manufacturing capability of APD as a typical core device has been improved, and the imaging efficiency of LiDAR has been significantly increased. On the other hand, with the continuous improvement of 3D imaging methods (scanning/non-scanning), their comprehensive performance has also been dramatically improved. This paper provides support for advancing the application of 3D imaging by summarizing the current research status of 3D LiDAR imaging, discussing the problems and proposed solutions faced in the present stage.

**Key words** LiDAR; three-dimensional imaging; scanning; non-scanning

## 1 引言

光电成像作为获取信息的重要方式之一,已深入到人们日常生活、国民经济、相关建设等各个方面,是智慧交通、基础建设等诸多领域研究不可或缺的共性技术,亦是设备智能化的“眼睛”。根据是否包含主动照明,光电成像可以分为主动与被动两种方式。其中,激光雷达三维成像是主动成像的典型技术,相较

CCD/CMOS 图像传感器的二维成像,具有获取信息丰富、抗干扰能力强等优势<sup>[1-3]</sup>,已广泛应用在无人驾驶、机器人导航、地形地貌勘探等方面。

激光雷达以激光光波为载体,发射脉冲激光束,对目标反射或散射的回波进行处理,然后配合一定的成像方式(扫描/非扫描)得到目标的三维信息。目前,激光雷达三维成像有多种分类方式,如图 1 所示,例如:按照测距方式,激光雷达三维成像包括时间飞行法<sup>[3-5]</sup>、调

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-11-11; 录用日期: 2023-11-20; 网络首发日期: 2023-12-04

通信作者: \*caojie@bit.edu.cn; \*\*qhao@bit.edu.cn

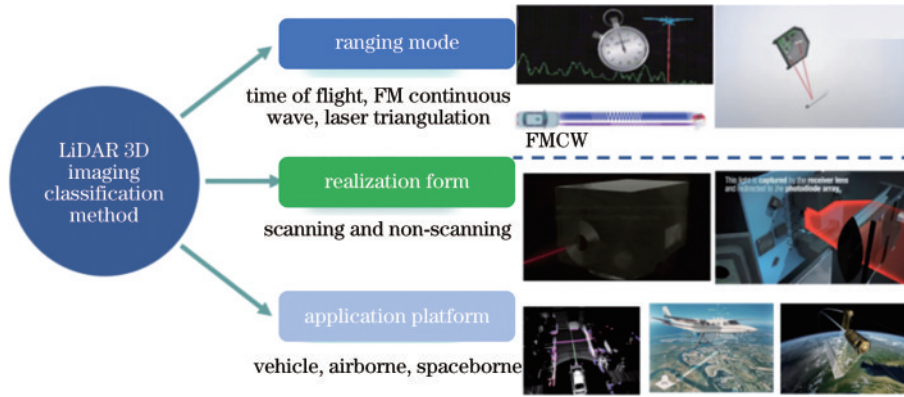


图 1 激光雷达三维成像方法分类  
Fig. 1 Classification of 3D LiDAR imaging methods

频连续波法(FMCW)<sup>[6-8]</sup>和激光三角法<sup>[9-10]</sup>等;按照实现形式,根据是否包含扫描部件,可以分为扫描方式和非扫描方式<sup>[11-13]</sup>;按照应用场景或载荷平台,则可以分为车载<sup>[14-17]</sup>、机载<sup>[18-19]</sup>和星载<sup>[20-22]</sup>等。本文面向激光雷达三维成像的应用,并且兼顾分类方式的简约性,以扫描与非扫描为主线对其进行分类,总结激光雷达三维成像目前面临的主要困难,并且讨论可行的解决方法与途径,为研究高综合性能激光雷达三维成像提供借鉴。

## 2 成像方法分类与现状

按照激光三维成像现有的工作方式进行分类,主要包括扫描与非扫描两类方法,如图 2 所示。扫描方法包括机械扫描、微机电扫描和电子扫描等;非扫描方法包括闪光成像、单像素成像/鬼成像等。不仅如此,围绕实际应用,将扫描与非扫描相互结合,即可实现诸如多点扫描或小面阵扫描等方法。

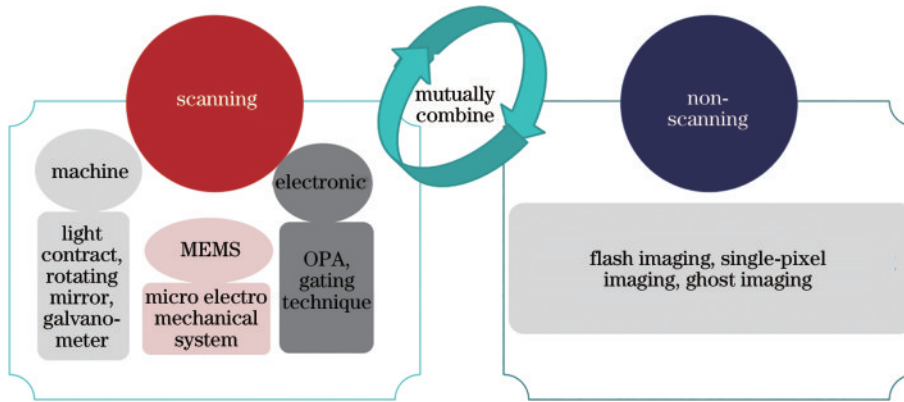


图 2 扫描与非扫描方法分类  
Fig. 2 Classification of scanning and non-scanning methods

### 2.1 扫描式三维成像

#### 2.1.1 光楔扫描

光楔扫描的典型结构如图 3 所示,其核心是通过光楔旋转实现光轴偏转。该方法具有惯性力矩小、位置精度较高、动态性能好的特点。光楔扫描激光三维成像属于折射式扫描成像方式,光学利用率可接近 100%<sup>[14, 23]</sup>。同济大学 Li 等<sup>[24]</sup>提出一种楔镜逆向求解方法,构建了正向和逆向的光束偏转模型。2023 年,该团队<sup>[25]</sup>提出基于楔镜的尺度自适应激光雷达,通过将楔镜的光束偏转模型与调频连续波技术(FMCW)相结合,构建了变分辨率的激光三维成像系统。该系统的扫描视场范围达 60°,500 m 距离下的空间分辨率为 1.1 cm,解决了传统扫描三维成像效率低、目标区域分

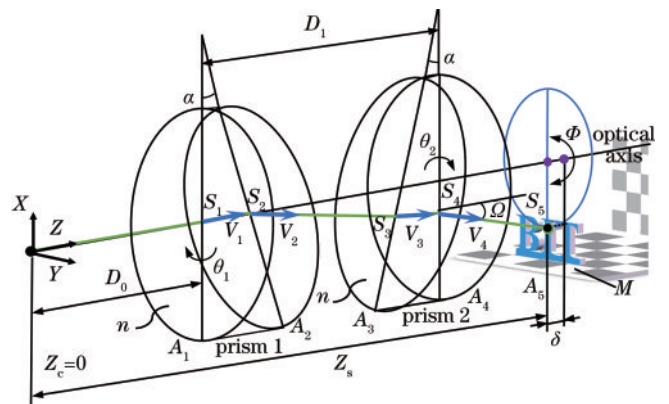


图 3 光楔扫描的典型结构  
Fig. 3 Typical structure of optical wedge scanning

分辨率的问题。韩国标准与科学研究院 Woo 等<sup>[26]</sup>提出一种轻量化扫描系统的基于飞行时间测量的三维轮廓仪,如图 4 所示,构建了菲涅耳型楔镜三维扫描模型。通过将菲涅耳型楔镜与飞行时间法(ToF)相结合,该模型实现了测量误差低于 1 mm@8 m 的高精度

三维重建。此外,美国佛罗里达大学 Brazeal 等<sup>[27]</sup>研究了基于旋转双棱镜的激光三维成像观测模型,分析了基于旋转双棱镜的扫描模型,评估了其扫描角度观测值,并且使用卡尔曼滤波器减小了系统的角度误差。

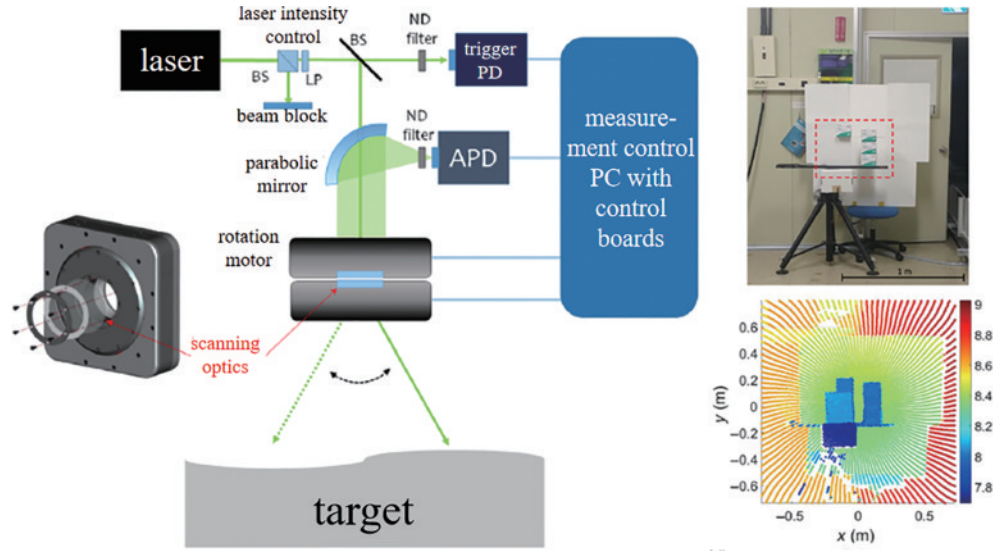


图 4 基于菲涅耳型楔镜的三维成像系统<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Three-dimensional imaging system based on Fresnel wedge mirror<sup>[26]</sup>

### 2.1.2 转镜扫描

转镜扫描的典型结构如图 5 所示,以转镜作为扫描核心部件,通过(多面)转镜改变光束方向,具有扫描速率高、视场角度大、转动惯量较大的特点。转镜扫描激光三维成像属于反射式扫描成像方式,适用于高速扫描成像<sup>[28-33]</sup>。2022 年,武汉大学毛庆洲团队<sup>[28]</sup>提出了一种基于转镜的扫描三维成像系统,构建了反射镜扫描的数学模型。结合转镜扫描三维成像系统与角度误差校准补偿技术,在 300 m 高度的飞行实验中,经内角误差校正后,该模型处理的点云和控制点的高程差的标准差仅为 0.024 m。加拿大魁北克高等技术学院 Gour 等<sup>[29]</sup>提出一种基于静电可变电容微电机的旋转微多边形扫描仪,如图 6 所示,构建了微型转镜扫描结

构模型,通过将中空的微型多面体反射镜与微电机相结合,构建了尺寸为 1 mm×1 mm×1 mm 的微型扫描仪。该扫描仪在 57.88° 的角度范围内可以进行每分钟 25200 次线扫描,解决了传统转镜转动惯量较大的问题。

### 2.1.3 振镜扫描

振镜扫描的典型结构如图 7 所示,通过利用 2 个转动轴线正交的振镜实现二维扫描,该方法具有扫描角度大、精度高、速度较快的特点。常见的振镜扫描激光三维成像属于反射式扫描成像方式,适用于快速扫描成像<sup>[34-37]</sup>。2013 年,英国赫瑞瓦特大学 McCarthy 等<sup>[34]</sup>提出一种基于振镜扫描的激光三维成像系统,构建了基于振镜的单光子三维成像系统。该系统通过将振镜器件与单光子技术相结合,以 10 frame/s 的速度获得低特征物体的厘米分辨率深度图像(1 km 内),解决了传统单光子系统测量帧率低、分辨率差的问题。在此结构基础上,华东师范大学 Shen 等<sup>[35]</sup>提出一种具有 1550 nm 波长双重复频率激光脉冲的自门控单光子成像激光雷达,如图 8 所示。通过使用 500 kHz 和 600 kHz 的双重复频率激光脉冲,该系统的最大无模糊范围从 250 m 扩大到 1500 m,并且通过去除门控外噪声,有效点云生成率高达  $1.3 \times 10^5$  点/s,解决了传统单光子系统点云生成速率低、测量距离短的问题。在振镜扫描精度上,深圳大学 Huang 等<sup>[38]</sup>提出了一种高精度、简单的激光扫描系统标定方法,通过计算乘积矩阵和旋转角度与电压的比值因子就可以实现三维重

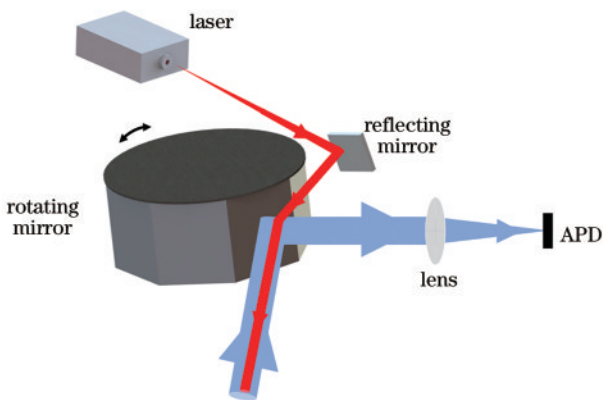


图 5 转镜扫描的典型结构

Fig. 5 Typical structure of the rotating mirror scanning

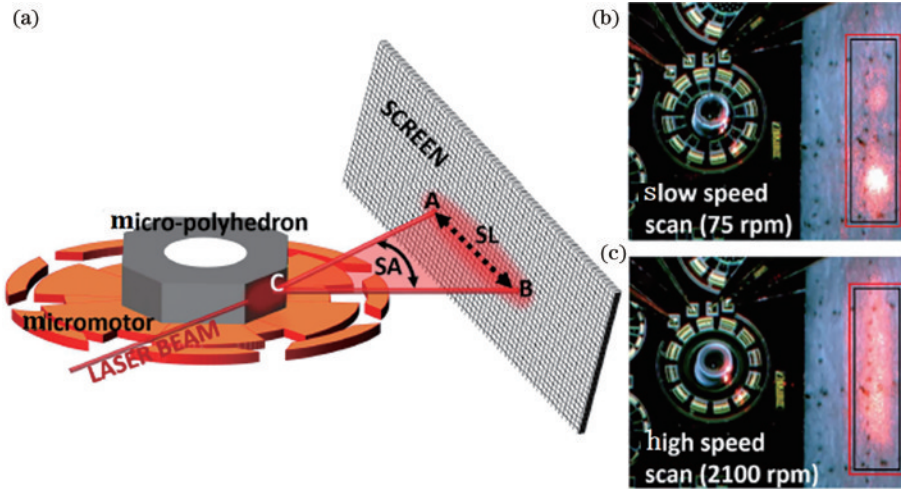


图 6 基于静电可变电容微电机的旋转微多边形扫描仪<sup>[29]</sup>。(a)微型扫描仪工作示意图；(b)慢速(75 r/min)扫描成像；(c)高速(2100 r/min)扫描成像

Fig. 6 Rotating micro-polygon scanner based on electrostatic variable capacitance micromotors<sup>[29]</sup>. (a) Schematic of micro-scanner operation; (b) slow (75 r/min) scanning imaging; (c) high-speed (2100 r/min) scanning imaging

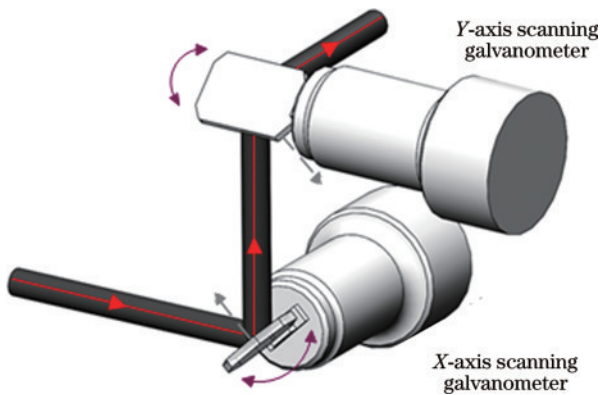


图 7 振镜扫描的典型结构

Fig. 7 Typical structure of galvanometer scanning

建。实验结果表明,该方法精度较高,可以实现对复杂表面物体的三维重建,适用于工业场景的大视场三维测量系统。

#### 2.1.4 MEMS 扫描

Micro electro mechanical systems (MEMS)扫描的典型结构如图 9 所示,以 MEMS 反射镜作为核心扫描

部件,通过控制其一维/二维摆动实现光束偏转,该方法具有体积小、功耗低、扫描频率高和响应速度快的特点。

2009 年,美国陆军研究实验室 (ARL) 开展了 MEMS 扫描成像的研究<sup>[39-41]</sup>,提出了一种面向机器人的小型化、低功耗的 MEMS 扫描激光雷达成像系统,如图 10 所示。该系统采用非同轴光路,以一个直径为 8 mm 的双轴 MEMS 反射镜作为扫描机构,配合高重复频率发射的激光脉冲(重复频率为 200~400 kHz,波长为 1550 nm)和单元 InGaAs 探测器,实现了帧速率为 5~6 Hz、视场范围达 60°(水平)×30°(竖直)、距离为 20 m、分辨率为 40 cm、功耗为 18 W 的激光雷达三维成像系统,该系统已应用在美国陆军 PackBot 系列机器人。日本 Hokuyo 公司<sup>[42]</sup>提出了一种基于单轴 MEMS 镜实现三维扫描的方法,该方法采用同轴光路设计,将单轴 MEMS 谐振镜和驱动电机旋转相结合,在竖直方向上使用 MEMS 镜实现扫描,扫描频率可达 400 Hz,然后在水平方向上使用电机来旋转,控制电机

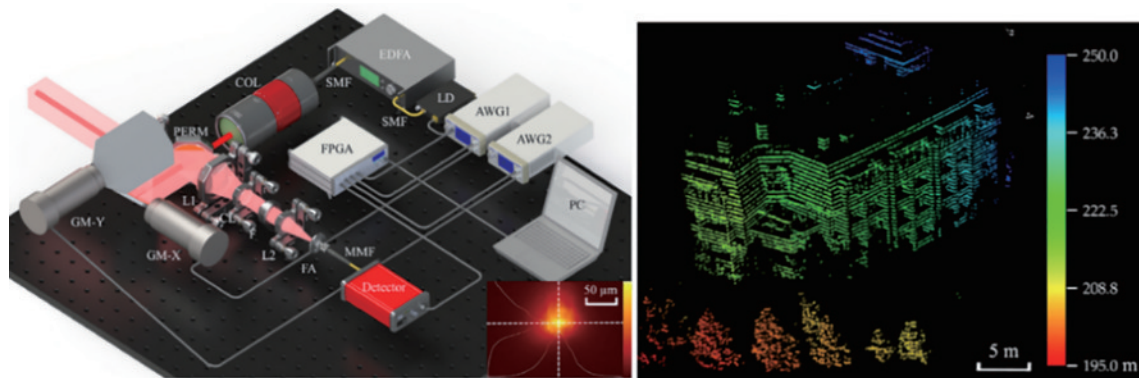


图 8 基于振镜的双重频率激光脉冲单光子成像激光雷达<sup>[35]</sup>

Fig. 8 Double repetition frequency laser pulse single photon imaging LiDAR based on a galvanometer<sup>[35]</sup>

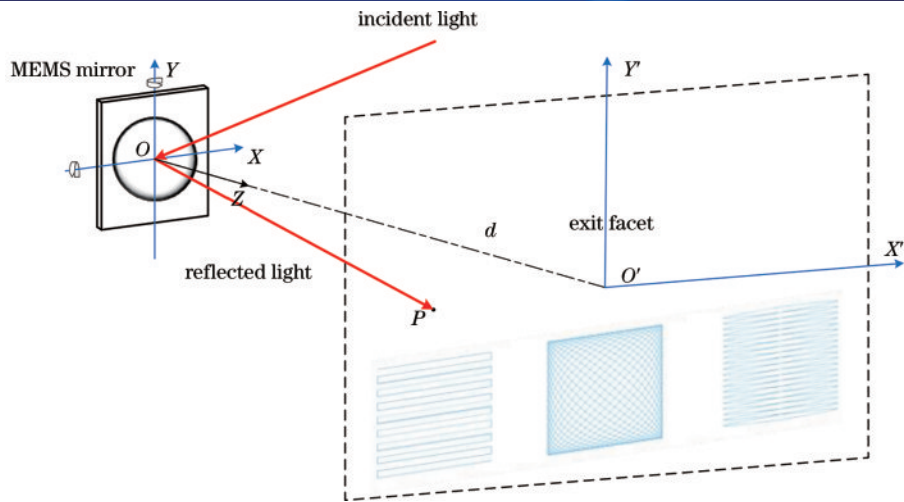
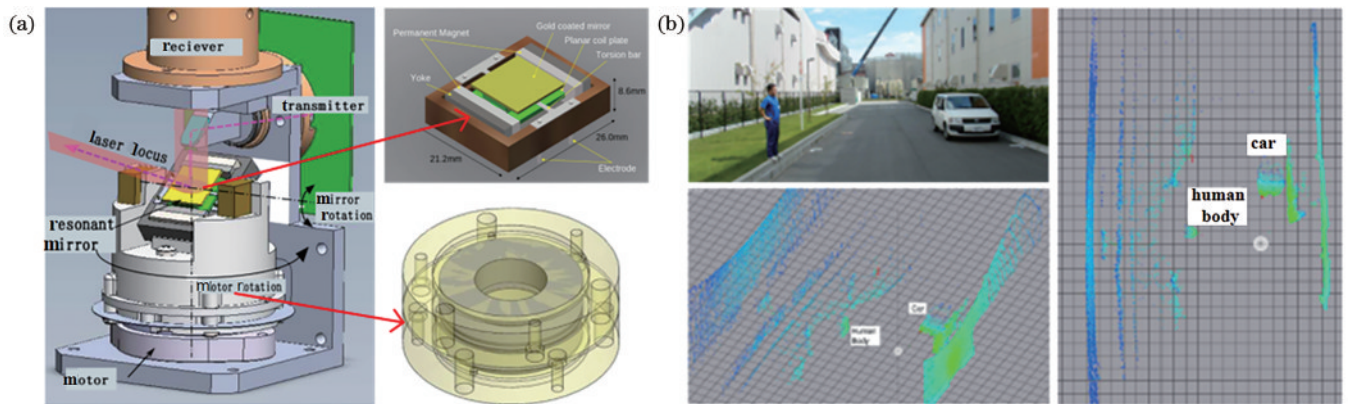


图9 MEMS扫描的典型结构

Fig. 9 Typical structure of MEMS scanning

图10 基于单轴MEMS镜扫描的激光雷达<sup>[39-41]</sup>。(a)结构和原理;(b)成像场景与结果Fig. 10 LiDAR based on single-axis MEMS mirror scanning<sup>[39-41]</sup>. (a) Structure and principle; (b) imaging scene and result

和MEMS镜同步扫描以实现三维扫描。样机尺寸为 $87\text{ mm} \times 118\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ , 帧率可达 $20\text{ frame/s}$ , 扫描范围达 $240^\circ$  (水平) $\times 40^\circ$  (竖直), 最大测距范围达 $30\text{ m}$ 。2019年, 韩国科学技术学院相关研究人员<sup>[43]</sup>提出一种具有高分辨率、高帧率的使用李萨如扫描模式的静电MEMS镜。该MEMS镜在 $x$ 和 $y$ 方向上的谐振扫描频率分别为 $5402\text{ Hz}$ 和 $6702\text{ Hz}$ , 扫描视场达到了 $20^\circ \times 18^\circ$ , 能以 $256 \times 256$ 像素提供每秒5050帧的图像, 适用于各种高分辨率、高帧率的激光扫描成像和显示应用。

我国也有研究MEMS扫描的激光雷达的案例, 尤其是在车载应用方面<sup>[44]</sup>。2020年, 哈尔滨工业大学的Li等<sup>[45]</sup>通过优化PID控制算法, 使MEMS镜能持续以最大频率 $800\text{ Hz}$ 振动工作。结合该方法的MEMS激光雷达样机拥有 $20^\circ$ 的扫描视场角, 能以 $10\text{ frame/s}$ 的速度对 $40\text{ m}$ 外的目标物进行清晰成像, 与传统的64线激光雷达相比, 分辨率提高15倍的同时设备体积大大减小。

### 2.1.5 光学相控阵(OPA)

光学相控阵基本原理如图11所示, 由一光源发射

出光波, 经过双缝的光束在远场合成, 如图11(a)所示。利用此原理, 通过控制发射单元的相位产生固定相位差, 如图11(b)所示, 可以使合成方向按照一定规律偏转。

目前光学相控阵可依靠不同材料实现光束偏转, 包括铌酸锂、砷化铝钾、硅基光波导、液晶等。我国在这些方面做了深入研究, 其中液晶相控研究最为成熟。1) 铌酸锂相控。1972年, Meyer<sup>[46]</sup>研制了一种基于铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )材料的一维光学相控阵, 实现了调制速度媲美微电子调制速度的一维光束偏转。上海光学精密机械研究所设计了一种基于 $\text{LiNbO}_3$ 材料的相控阵, 实现了高速二维激光扫描<sup>[47]</sup>。2) 砷化铝钾相控。Wight等<sup>[48]</sup>于1991年研制出了一种基于砷化铝钾材料的一维光波导相控阵列, 该器件能够以较小尺寸的阵元获得较大偏转角度。这种相控阵光学扫描装置由10个紧密间隔的单模砷化钾/砷化铝钾电光波导组成, 每个波导都单独编址以提供超过 $2\text{ rad}$ 的相位控制, 通过对各个波导进行独立的相位控制, 实现 $2^\circ$ 发散角的光束在远场 $20^\circ$ 视场范围的扫描。由于上述相控器件体积庞大、集成度低, 以硅基光波导以及液晶作为

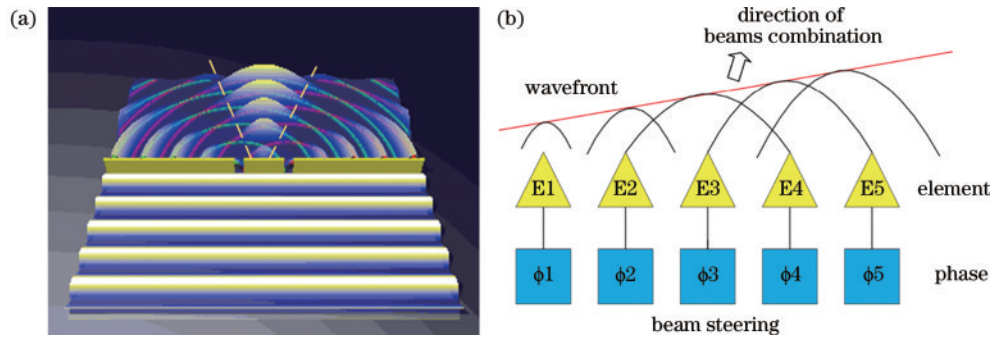
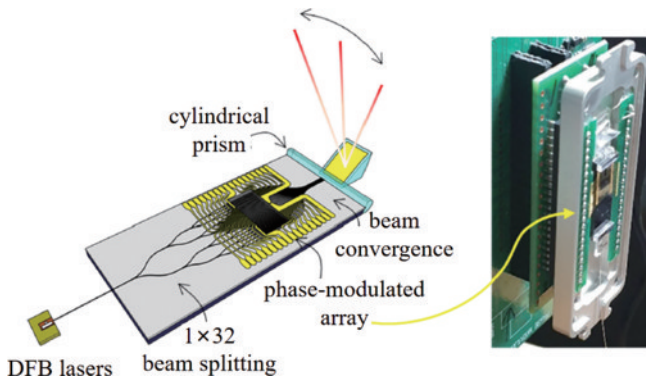


图 11 相控阵扫描原理。(a)双缝干涉原理;(b)相控实现光束

Fig. 11 Phased array scanning principle. (a) Two-slit interference principle; (b) phase-controlled beam realization

相控器件的方式应运而生。3) 硅基光波导相控。Heck<sup>[49]</sup>实现了  $1.55 \mu\text{m}$  波长下超过  $64^\circ$  范围的一维扫描。麻省理工学院的研究人员<sup>[50]</sup>设计出电控光束转向有源相控阵的金属纳米天线,该纳米天线光学相控阵制作在一个兼容硅光子的 CMOS 上,通过光波导反馈与集成欧姆热光相位转向相结合实现  $2\pi$  相位转向,控制电压只有  $15 \text{ mV}$ 。一个  $1 \times 8$  集成移相器大小为  $6 \sim 9 \mu\text{m}$ ,通过控制功率,可实现光束在  $\pm 8^\circ$  内的偏转。2020 年, Bogaerts 等<sup>[51]</sup>在原有的一维光波导相控阵的基础上,加入波长选择结构,分别控制不同波长光束,使光束在与相控阵正交的另一维度上实现光束扫描,从而达到了二维扫描的目的。2022 年, Jin 等<sup>[52]</sup>在一维光波导相控阵的基础上加入了振镜,作为另一维度的光束偏转手段,如图 12 所示,使得系统从 32 通道增加到 1024 通道,以实现更加精确的光束指向控制。

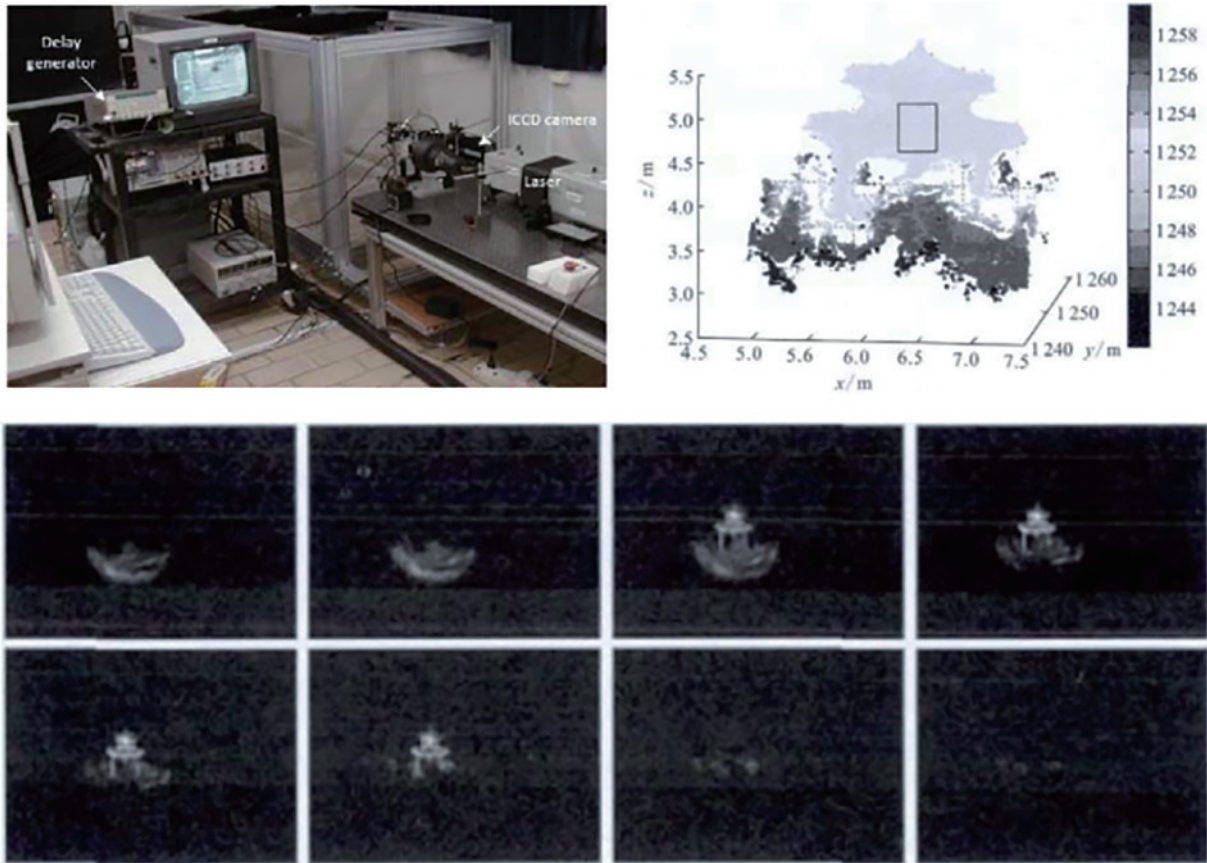
图 12 相控阵光束扫描<sup>[52]</sup>Fig. 12 Phased array beam scanning<sup>[52]</sup>

4) 液晶相控。2003 年起,美国国防部高级研究计划局(DARPA)、雷声公司、Rockwell 公司、欧洲防务局和瑞典国防研究局等纷纷设立了关于激光束灵活扫描的项目,并提出利用液晶光学相控阵作为核心移相器的想法来实现光束偏转。美国 BNS 公司发布了商用反射式液晶空间光调制器<sup>[53]</sup>,通光孔径为  $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ ,零级衍射效率可达  $61.5\%$ ,可独立寻址单元数为  $262144 (512 \times 512)$  个,单元中心间距为  $37.5 \mu\text{m}$ ,尺寸大小为  $23 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ ,驱动电

压低于  $20 \text{ V}$ 。2017 年,我国电子科技大学汪相如研究团队<sup>[54]</sup>采用 2 片一维液晶光学相控阵级联的方式实现光束偏转,在偏转范围  $0.19^\circ$  内,偏转精度优于  $25 \mu\text{rad}$ ,偏转效率可达  $84.7\%$ 。2019 年,长春光学精密机械与物理研究所的所穆全团队<sup>[55]</sup>在现有器件的基础上,通过优化液晶空间光调制器靶面的相位调制方法实现了二维的高精度、高稳定性的光束扫描。2022 年,北京理工大学曹杰团队<sup>[56]</sup>通过利用液晶相控阵技术,结合仿生视网膜成像的思想,实现了具有空间变分辨率的液晶相控阵仿生视网膜扫描方法。该方法在实现环形扫描的同时,对扫描角度进行了放大,同时抑制了中央亮斑,使得液晶相控阵的光束扫描可以和激光雷达更加契合。同年,浙江大学相关研究团队<sup>[57]</sup>展示了一种  $1 \times 64$  硅载流子耗尽的光学相控阵,其带宽和调谐效率分别为  $700 \text{ MHz}$  和  $< 0.45 \text{ nW}/\pi$ ,在相控阵方向上实现了  $\pm 18^\circ$  的无混叠光束转向范围,具有低功耗、高运行速度、可忽略的热串扰和良好的光束质量等优点。2023 年,丹麦科技大学相关研究团队<sup>[58]</sup>为了兼顾光学相控阵的调制速度、插入损耗和占用空间等,通过实验提出并演示了圆形移相器,其在功耗 ( $3.1 \text{ mW}/\pi$ )、调制速度 ( $34 \text{ kHz}$ )、插入损耗 ( $0.6 \text{ dB}$ ) 和占位面积 ( $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ ) 方面实现了良好的平衡。此外,移相器在制造上对波导宽度、节距和加热器宽度具有鲁棒性,非常适合大规模集成。

#### 2.1.6 选通成像

选通成像以 ICCD 阵列器件为核心探测器件,通过距离门形成不同时刻的纵向切片(时域)。与上述扫描方式不同,选通成像在空域上并不扫描,在时域上进行扫描形成三维成像,具有较高的抗后向散射能力和分辨率。中国人民解放军陆军炮兵防空学院胡春生教授团队<sup>[59]</sup>提出了一种结合阈值法和互相关法的高精度三维重建算法。采用阈值法消除被测灰度曲线中的零点,利用每个像素点处相关峰对应的时延计算每个像素点处的距离值,根据成像系统参数计算出各像素点的三维坐标,对切片图像进行处理,得到三维图像。该方法可以高精度地凸显目标表面凹凸细节,如图 13 所示,从而实现对远程目标的高精度三维重建。

图 13 实验装置及实验结果<sup>[59]</sup>Fig. 13 Experimental equipment and experimental results<sup>[59]</sup>

2021年,美国普林斯顿大学 Julca-Aguilar 等<sup>[60]</sup>提出了一种新的深度检测器架构(Gated3D),如图 14 所示,选通相机用粗时间分辨率来权衡密集的空间分辨率和信噪比。该方法能够以超过 80 m 的高精度检测目标,提供了一个新的 3D 选通数据集。2021年,哈尔滨工业技术学院威海海洋光电设备研究所<sup>[61]</sup>利用相邻帧差(AFD)方法来重建目标的三维图像。该方法中,目标的范围信息是通过对 ICCD 的相邻帧的强度差进行阈值化得到的。采用基于 AFD 方法的距离门控闪光成像激光雷达对 2.4 km 处的目标进行探测,分别在距离门的前边缘和后边缘重建目标的实时三维图像。与其他方法相比,该方法在距离门与激光脉冲宽度之间没有严格的相关性,具有成像速度快、成像范围大、数据处理简单等优点。

## 2.2 非扫描三维成像

### 2.2.1 闪光式成像

闪光式成像的典型结构如图 15 所示,以 avalanche photo diode (APD) 阵列为核心探测器件,通过大光斑形成泛光照射,该系统具有高时间分辨率、高帧频的特点。2003年,麻省理工学院林肯实验室 Marino 等<sup>[62]</sup>提出了 GEN-III 激光雷达,如图 16 所示,构建了激光雷达收发光路,通过集成  $32 \times 32$  的 APD 阵列与  $32 \times 32$  的 CMOS 计时电路阵列,距离分辨率达 15 cm,实现了

每秒对 5000 到 10000 个点成像,解决了传统激光雷达成像速率低的问题,为多像素盖革模式 APD 探测器阵列的实现提供了支撑。

2018年,西南技术物理研究所李潇等<sup>[63]</sup>提出一种  $64 \times 64$  像素的线性模式雪崩焦平面阵列,搭建了基于 1064 nm 激光波长的无扫描成像实验平台,通过将单脉冲能量为 100 mJ 的激光与 APD 阵列相结合,得到了 1 km 外目标的成像。2019年,荷兰代尔夫特理工大学相关研究团队<sup>[64]</sup>演示了一种闪光激光雷达,该系统通过使用  $252 \times 144$  像素的 SPAD 阵列和 1728 个 12 位时间数字转换器(TDC),以 30 frame/s 的帧率对 0.7 m 距离处的目标进行成像,对 50 m 处反射率为 60% 的目标进行测距时误差不超过 1.4 mm。同年,中国电子科技集团公司第三十八研究所葛鹏等<sup>[65]</sup>利用波长为 1064 nm 的激光进行泛光照明,将  $64 \times 64$  像素的 InGaAs 盖革 APD 阵列作为探测器,对 300 m 外的目标进行成像,如图 17 所示,实现了 2 ns 的时间测量精度,解决了噪声来源复杂的问题。2022年,芬兰奥卢大学相关研究团队<sup>[66]</sup>提出一种基于块的分段照明的闪光激光雷达系统,发射部分由 16 个激光二极管组成,其中任意一个发射激光后,目标对应位置被照亮。接收器芯片由  $32 \times 128$  像素的 SPAD 探测器和 1 个具有 257 通道的 TDC 组成。该系统能够对 15 m 内的目标成像,成像帧率同样可达 30 frame/s。

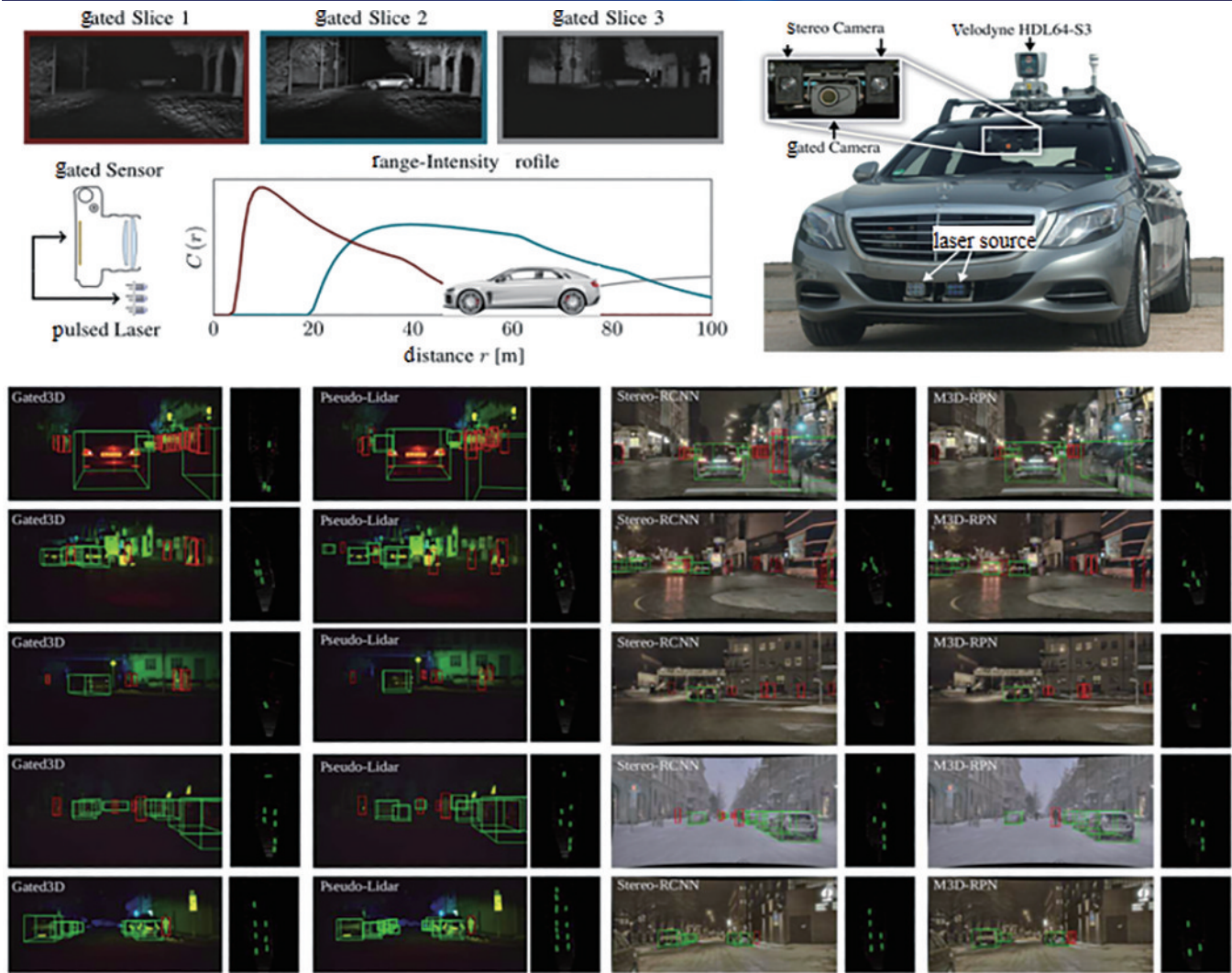


图 14 深度检测器架构 Gated3D 与成像结果<sup>[60]</sup>

Fig. 14 Depth detector architecture Gated3D and imaging results<sup>[60]</sup>

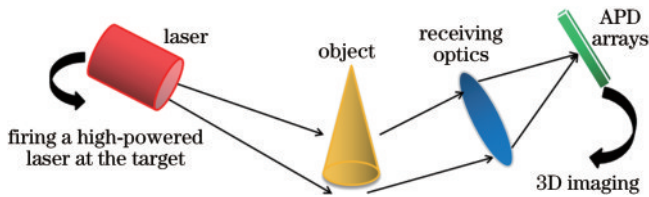


图 15 闪光式成像的典型结构

Fig. 15 Typical structure of flash imaging

### 2.2.2 三维鬼成像

三维鬼成像将单点探测器与关联计算相结合,通过对脉冲切片进行关联重构计算,实现 3D 建模,具有分辨率高、抗干扰性强、灵敏度高、成本低的特点。2016 年北京航空航天大学 Sun 等<sup>[67]</sup>提出一种飞行时间单像素三维成像系统,通过使用模拟光电二极管来记录背散射光的完整时间形式和原始的 3D 重建算法,重建 128×128 像素分辨率的三维场景,如图 18 所示。该系统在 5 m 范围内精度达 3 mm,实现了帧率高达 12 Hz 的连续实时三维成像,解决了传统的飞行时间三维成像系统采样时间长的问题,为远距离红外三维

成像提供了技术支撑。

2020 年美国斯坦福大学的 Lindell 等<sup>[68]</sup>提出一种联合单光子雪崩二极管和超快脉冲激光器的技术,通过建模和反演散射过程,共焦弥散层析成像(CDT)将散射光子整合到重建过程中,实现了在宏观尺度下对隐藏在厚扩散器(≈6 个传输平均自由路径)后面的物体的形状和位置的获取。2023 年英国拉夫堡大学相关研究团队<sup>[69]</sup>提出一种时间分辨非线性鬼成像(TNGI)方法,如图 19 所示,他们研究了时间分辨非线性鬼成像通过平面分解实现场敏感微体积测量的能力。该方法可以区分和分离来自不同深度的不同平面的信息,特别适用于具有稀疏微观细节的对象,使得定位由不同材料组成并放置在复杂 3D 样本内部的物体成为可能。

激光雷达三维成像大致可以分为扫描和非扫描方法,扫描成像方法主要包括机械类和电子类,非扫描方法则包含闪光成像和单像素成像。常见的机械类方法一般使用转镜或 MEMS 反射镜。转镜扫描范围较大,并且易于实现远距离成像,但是使用寿命比



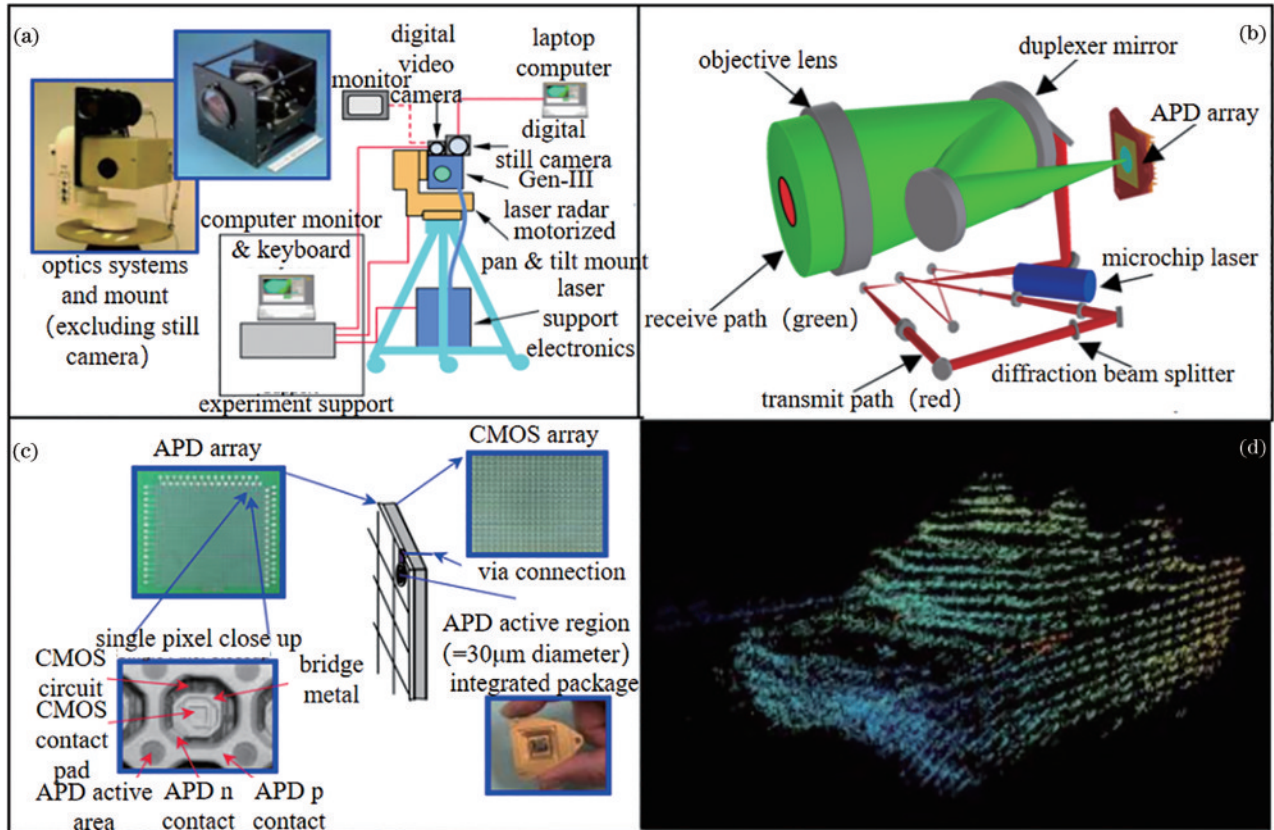


图 16 GEN-III 激光雷达<sup>[62]</sup>。(a)GEN-III 激光雷达实验系统；(b)GEN-III 激光雷达光路设计的 CAD 模型；(c)32×32 APD/CMOS 焦平面阵列；(d)500 m 范围内的坦克的 3D 图像

Fig. 16 GEN-III LiDAR<sup>[62]</sup>. (a) GEN-III LiDAR experimental system; (b) CAD model of GEN-III LiDAR optical path design; (c) 32×32 APD/CMOS focal plane array; (d) 3D image of a tank within a range of 500 m

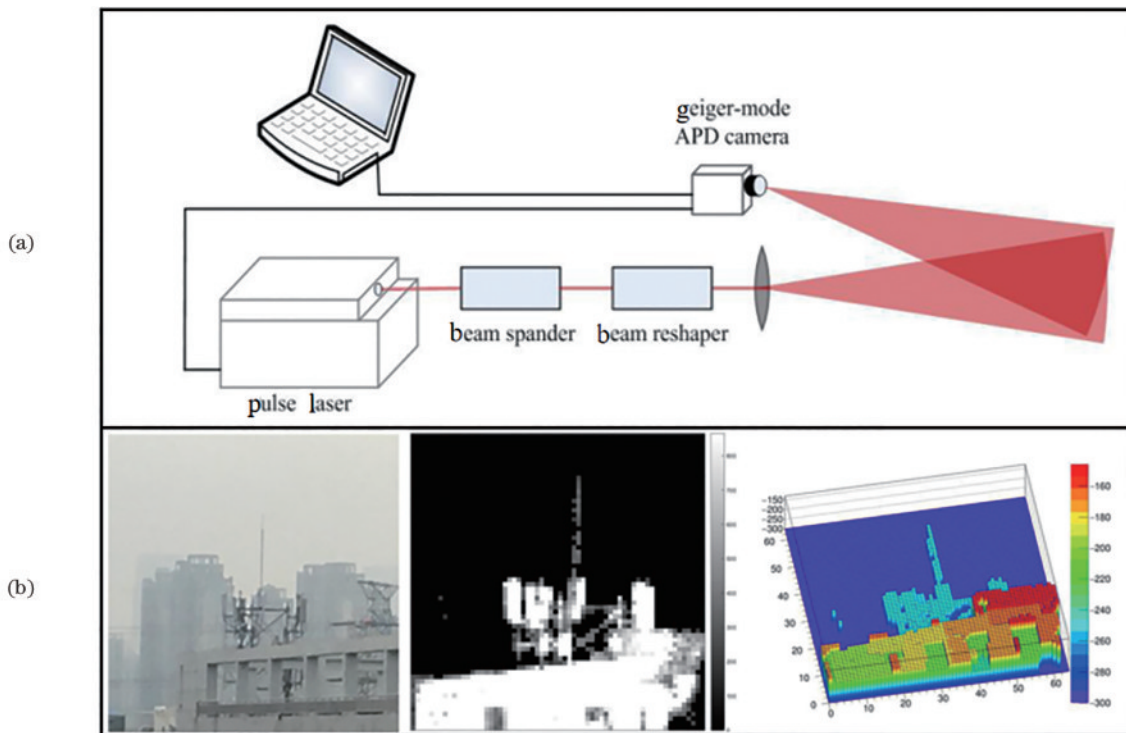


图 17 激光三维成像实验<sup>[65]</sup>。(a)装置原理；(b)300 m 外目标、强度成像、飞行时间距离成像

Fig. 17 Principle of laser 3D imaging experiment<sup>[65]</sup>. (a) Device principle; (b) target 300 m away, intensity imaging, time-of-flight distance imaging

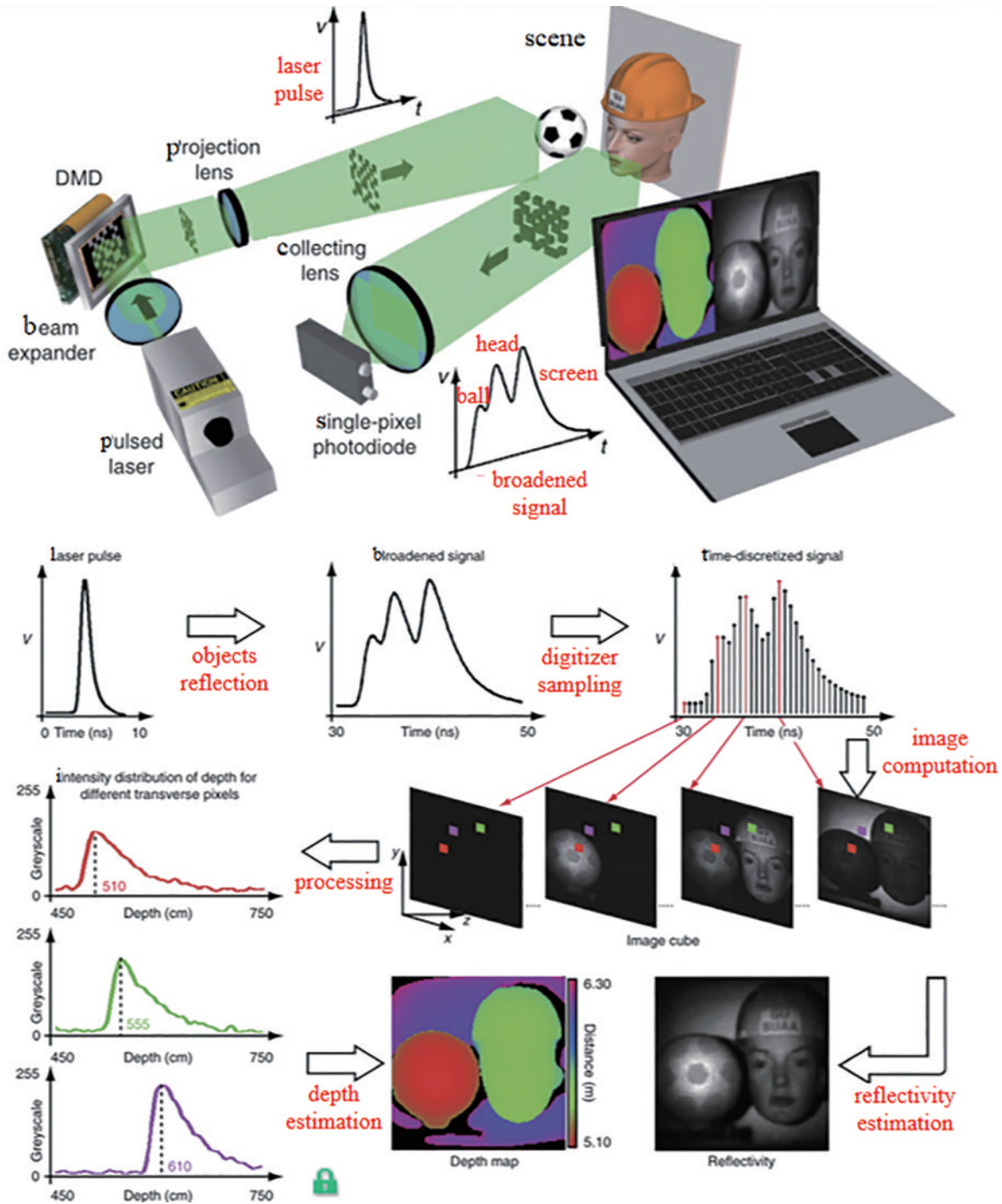


图 18 三维鬼成像原理与实验效果<sup>[67]</sup>

Fig. 18 Principle and experimental effect of 3D ghost imaging<sup>[67]</sup>

较短,主要应用在遥感成像、远距离侦察和无人驾驶等领域,该方法目前基本已经成熟;MEMS反射镜虽然反射面较小,但是具有较高的响应灵敏度,成像效率高,通常应用在无人驾驶、环境感知等领域。选通成像和光学相控成像同属于电子类扫描成像。选通成像具有抗散射能力强的优点,但是成像效率较低,主要用于水下成像;光学相控成像可以任意指向,无惯性扫描,但是栅瓣旁瓣难以有效抑制,常用于激光通信和环境感知。闪光成像通常使用APD阵列进行

泛光照明,具有较高的成像效率,但是激光功耗比较高,在环境感知和无人驾驶领域具有较多应用;单像素成像作为一种新型的非扫描成像方式,使用单像素探测器接收来自物体的反射光,将物体的光强值与调制模式信息关联运算后得到物体的图像,此种方法灵敏度很高,具有抗湍流和抗散射的特性,但是计算量比较大,因而所需时间较长,常用于远距离侦察、拐角成像和水下成像等领域,该方法的成熟度较低。具体的对比情况如表 1 所示。

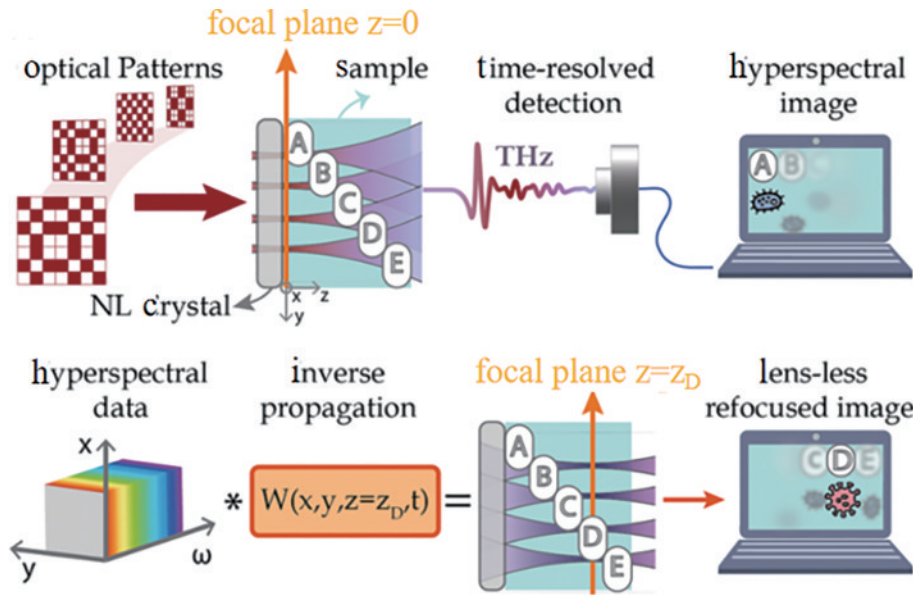


图 19 时间分辨非线性鬼成像(TNGI)方法<sup>[69]</sup>

Fig. 19 Time-resolved nonlinear ghost imaging (TNGI) method<sup>[69]</sup>

表 1 激光雷达三维成像对比分析

Table 1 Comparative analysis of three-dimensional LiDAR imaging

Aspect	Scanning				Non-scanning	
	Machine		Electronic		Flash imaging	Single-pixel imaging/ ghost imaging
Canonical form	Optical wedge/rotating mirror/galvanometer	MEMS mirror	Gate	Optical phased array	APD array, flood illumination	Single point reception, association computation
Core advantages	Large scanning range, easy to achieve long distance	High efficiency, responsive	Strong anti-scattering ability	Arbitrary pointing, no inertial scanning	High imaging efficiency	High sensitivity anti-turbulence, anti-scattering
Major defects	Low life expectancy	Small reflector	Imaging efficiency is low	Grid-lobe sidelobe is difficult to suppress effectively	High laser power consumption	Computationally heavy, time-consuming
Application scenarios	Remote sensing imaging, long-range reconnaissance, driverless	Driverless, environmental awareness	Underwater imaging	Laser communication, environmental awareness	Environmental awareness, driverless	Long-range reconnaissance, corner imaging, underwater imaging
Maturity	High	Middle	Comparatively high	Low	Comparatively high	Low

### 3 现状瓶颈与讨论

从目前激光雷达三维成像的研究现状可以看出：一方面，三维成像分辨率仍受限于 APD 阵列器件，高灵敏 APD 阵列是获取目标三维成像的关键器件之一，大面阵 APD 阵列的制造对于电子制造工艺仍然是个严峻的挑战，据公开资料，目前 APD 阵列为  $320 \times 256$ <sup>[70]</sup>，但其分辨率明显低于现有二维图像传感器 (CCD、CMOS)；另一方面，对于现有激光三维成像方法，无论是基于扫描式的成像，还是基于非扫描式的成

像，大视场、高分辨、实时性仍是现有三维成像方法难以调和的矛盾。比如：对于扫描式成像，采用更密集的扫描点云可获得更高的分辨率，但数据量将会限制实时性；非扫描成像尽管效率更高，但现有阵列规模的点云过于稀疏，不适用于大视场成像。围绕上述两方面，国内外研究学者从实际需求出发，分别探讨了以单像素探测器为核心器件的关联成像/鬼成像方法，开展了具有大视场、高分辨、实时性的平衡成像方法的研究。

#### 3.1 突破器件束缚的三维鬼成像/单像素成像技术

鬼成像是一种在量子水平上发展出的光学成像

和量子信息并行的处理技术<sup>[71]</sup>,它的特别之处在于鬼成像的“非定域性”<sup>[72]</sup>,即可以在与物体不接触的光路中获得物体的像,因其采用单像素探测器实现回波的获取,也称为单像素成像。经典鬼成像中,旋转毛玻璃产生的随机涨落光场经过分束镜后一部分被高分辨图像传感器接收,即参考臂,另外一部分照射目标,由目标反射或折射的光被筒探测器接收,即探测臂,通过关联运算可以反演出目标二维或三维图像。相比经典鬼成像,计算鬼成像结构更为简单,通过数字微镜器件(DMD)产生随机光场,从而代替参考臂的功能。1995年,美国马里兰大学相关研究团队<sup>[73]</sup>借助参量下转换得到纠缠光子源,首次通过实验实现了双光子鬼成像。之后,国内外诸多科研机构与研究人员针对鬼成像的特性与关键技术开展了广泛深入的研究。

鬼成像从光源到重构算法已有长足发展,信息维度正朝着多元化发展,从二维到三维、从空域到时域、从单一波段到多波段等。重点介绍三维鬼成像激光雷达的发展现状。英国格拉斯哥大学的 Sun 等<sup>[74]</sup>在 2013 年首次提出了使用多个单像素探测器的三维计算成像方案,该方案通过利用空间分离的 4 个单像素探测器分别从不同的角度恢复出物体的二维信息,然后利用这 4 幅二维图像中的明暗变化信息来还原出物体表面的三维形貌。麻省理工学院的 Hardy 等<sup>[75]</sup>随后分析了单像素三维成像与三维面阵成像激光雷达的联系与区别,明确了单像素三维成像的优点在于

可以实现更高的信噪比与分辨率。上海光学精密机械研究所的韩申生课题组在 2013 年研制出了世界上首台单像素激光三维相机,它可以达到超越瑞利衍射极限 2 倍以上的分辨效果,同时可以减少大气湍流、烟雾等恶劣环境因素的影响。之后该课题组又将压缩感知理论引入单像素成像系统,在 2016 年设计出了一种基于稀疏限制的关联成像雷达<sup>[76]</sup>。该系统采用赝热光源的双臂单像素成像体制,实现 km 量级的单像素三维成像,并在实验中证明了其比三维成像激光雷达具有更高的探测能力。为了提高单像素三维成像的成像速度,北京航空航天大学 Sun 等<sup>[67]</sup>提出了基于压缩感知的计算单像素三维成像方法,利用 Hadamard 矩阵对投射光场进行编码,利用均匀时域切片的方式构建出不同时刻(不同纵向位置)的二维单像素成像,最终合成了分辨率为  $128 \times 128$  的单像素三维成像,其成像帧频可达到 12 Hz,实时性相比以往的单像素三维成像大幅提高,说明了切片单像素成像方法在构建三维成像方面的可行性。上海交通大学和国防科技大学相关研究团队将首达光子成像方法引入激光关联成像,开展了相关的理论分析和实验验证,该方法可以在每像素不到 0.1 个探测光子的情况下重建图像,每像素光子探测值比传统成像技术低 3 个数量级<sup>[77]</sup>。在此基础上,团队研制出基于首达光子的远距离单像素激光成像雷达系统,如图 20 所示,并在青海湖开展了外场实验,实现了探测距离为 100 km、0.01 photon/pixel 的首达光子三维成像<sup>[78]</sup>。

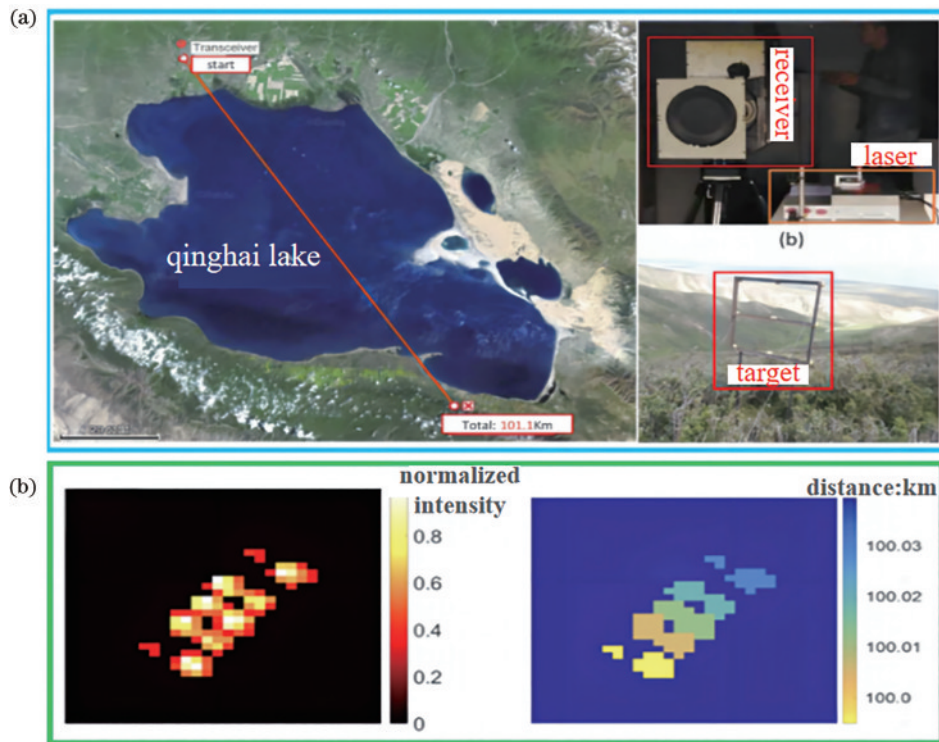


图 20 100 km 首达光子单像素激光成像雷达<sup>[78]</sup>。(a) 实验场景图;(b) 成像结果

Fig. 20 100 km first-reach photon single pixel laser imaging radar<sup>[78]</sup>. (a) Experimental scene diagram; (b) imaging results

中国科学院上海光学精密机械研究所的韩申生团队<sup>[79]</sup>于 2018 年提出了一种基于稀疏约束的机载近红外三维鬼成像激光雷达,并实现了机载高分辨率成像,在约 1.04 km 高度处,获得 0.48 m 水平分辨率和 0.5 m 距离分辨率的图像。2020 年,哈尔滨工业大学的张勇团队<sup>[80]</sup>提出了相位编码调制三维鬼成像方法,利用光子信号处理方法对信号进行编码和解码,解决了探测距离和距离分辨率的矛盾。

### 3.2 非均匀分辨率成像方法

对激光雷达三维成像如何提升视场、分辨率、实时性等综合性能一直是重点研究内容,典型应用场景为“大场景、小目标”场景,例如无人驾驶、遥感目标探测、机器人避障等。这不意味着一定对全视场进行高分辨率成像,而是对感兴趣区域高分辨、周边低分辨率成像,为解决高数据量与实时性的矛盾提供一种技术途径。事实上,关于非均匀分辨率成像已有较早的研

究<sup>[81]</sup>,尤其在二维成像领域<sup>[82]</sup>,受人眼视网膜变分辨率成像的启发,类似人眼视网膜成像的研究已从软件、硬件等多种方式开展。2009 年,北京航空航天大学陈伟海等<sup>[83]</sup>针对目前国内外应用于移动机器人的三维激光扫描系统存在的扫描效率问题,提出了一种仿人眼功能的三维激光扫描算法。该算法模仿人类眼睛的扫描功能,对陌生环境进行分步扫描,根据当前的扫描信息,在线规划出下一步的扫描规律,以减少无用信息的获取;采用分步插补定位的方法来弥补分步扫描带来的时间消耗,从而提高了扫描系统的效率。2015 年,Mundhenk 等<sup>[84]</sup>研制了一种周视非均匀分辨率彩色激光雷达,如图 21 所示,该系统采用了周视全景相机与激光雷达点云相融合,通过 16 线激光雷达与 32 线激光雷达相互配合,实现了 60° 视场内 20° 的更高分辨率成像,达到了对重点区域进行高分辨成像的目的。

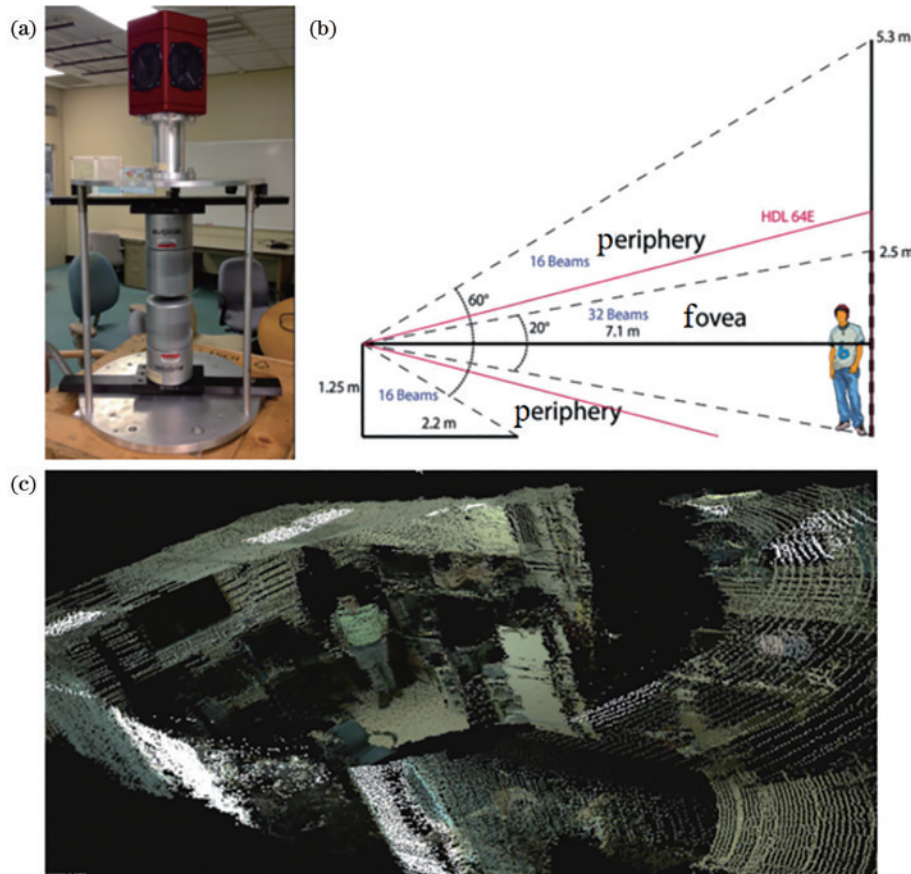


图 21 中央凹周视全彩色激光雷达<sup>[84]</sup>。(a)实物图;(b)原理图;(c)成像效果

Fig. 21 Perifoveal full-color LiDAR<sup>[84]</sup>. (a) Physical drawing; (b) schematic diagram; (c) imaging rendering

2016 年南京理工大学陈钱团队<sup>[85]</sup>通过将盖革模式雪崩光电二极管与时间相关单光子计数技术相结合,开发了自适应扫描探测三维成像激光雷达。该激光雷达利用背景与目标在深度域中的不连续性来自适应、快速获取目标轮廓信息,通过使用自适应扫描来定位深度边界附近的区域,并对这些区域执行精细扫描。与传统的高分辨率扫描激光雷达相比,其仅对特定区

域进行精细扫描,在保证目标深度信息恢复精度不变的同时,减少了数据采集时间。该方法采用 9559 次扫描,实现了目标区域 256×256 像素的深度图像重建,在不引起目标轮廓畸变的情况下,数据采集时间缩短了 85%。2020 年,美国加利福尼亚大学的 Jiang 等<sup>[86]</sup>将时间延展技术与光谱扫描相结合并应用于激光雷达,实验结果如图 22 所示,可实现对任意区域的高密集扫

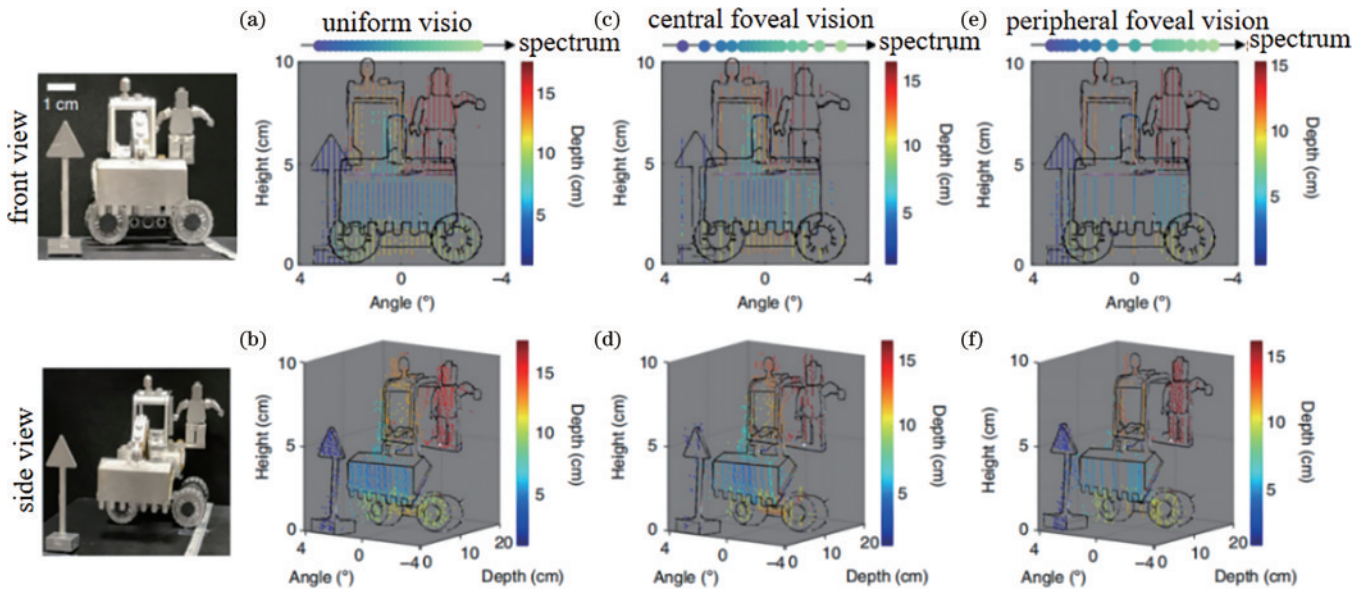


图 22 基于时间延展法的光谱扫描激光雷达结果<sup>[86]</sup>。(a)(b)均匀采样；(c)(d)中央凹密集采样；(e)(f)外围区域密集采样  
 Fig. 22 Results of spectral scanning LiDAR based on time extension method<sup>[86]</sup>. (a) (b) Uniform sampling; (c) (d) intensive sampling of the fovea; (e) (f) intensive sampling of peripheral areas

描,该方法为无惯性扫描,速率可达 1 MHz,最大探测距离为 5 m,视场为 7°。图 22(c)(d)与图 22(e)(f)为对不同区域进行密集扫描的结果,展示了一种面向三维成像应用解决大数据与实时性困难的方法。北京理工大学 Cao 等<sup>[87-89]</sup>长期从事非均匀分辨率激光成像探测研究,

提出了变分辨率激光扫描三维成像方法,实验与结果如图 23 所示,在进行目标深度图像重建时对目标边界区域的像素进行重新分配,从而提高对两个目标边界区域的重建精度,在采样比为均匀采样的 50% 的情况下,重建深度图像的均方根误差由 0.53 m 降低至 0.31 m。

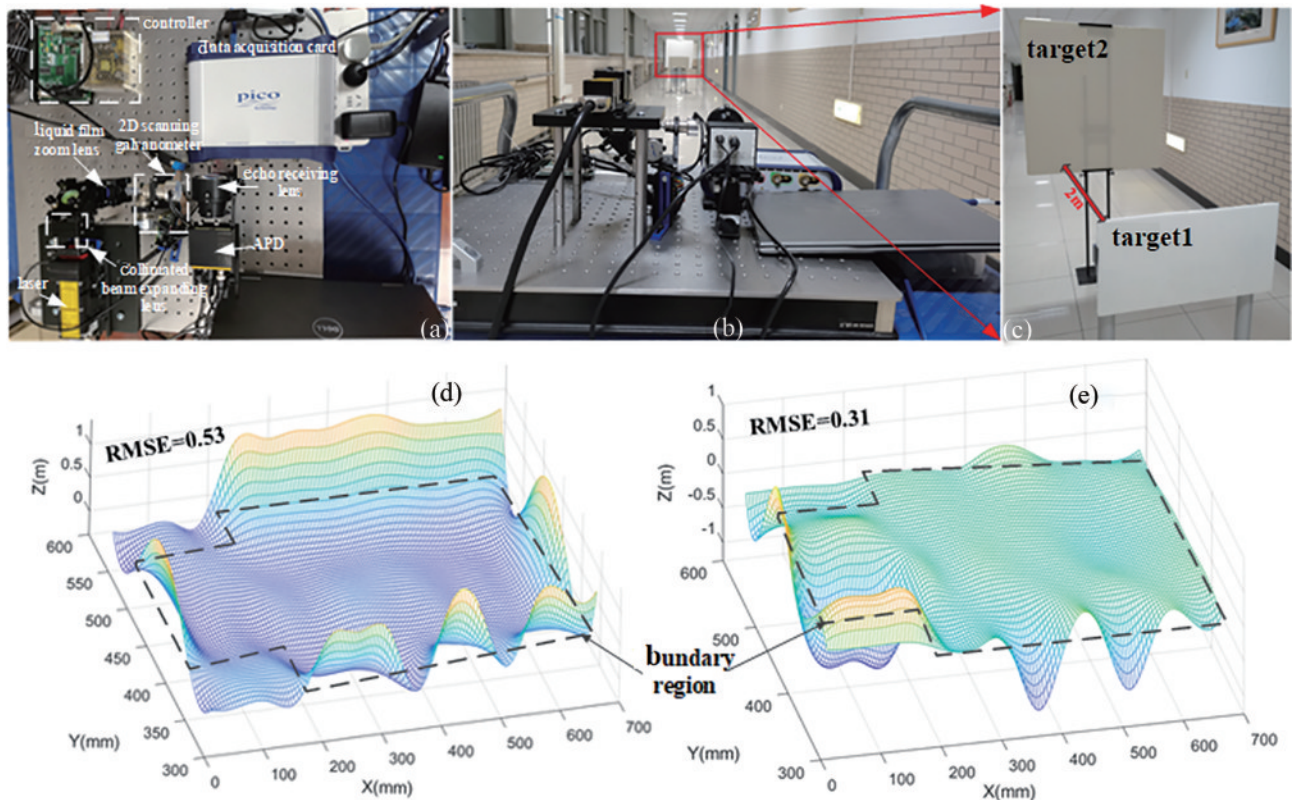


图 23 变分辨率扫描重构实验装置与实验结果<sup>[87-89]</sup>。(a)实验装置；(b)实验场景；(c)实验目标；(d)(e)重建结果  
 Fig. 23 Experimental setup and results of variable resolution scanning reconstruction<sup>[87-89]</sup>. (a) Experimental equipment; (b) experimental scene; (c) experimental objectives; (d) (e) reconstruction results

## 4 总 结

目前,激光雷达三维成像正朝着大视场、高分辨、高精度、实时性、模块化、智能化的方向发展。通过对现有激光雷达三维成像方法进行分类归纳,总结激光雷达三维成像的关键技术与前沿动态,进一步讨论了国内外研究者对激光雷达三维成像面临的两个关键问题的科研攻关情况。一方面,针对核心探测器件问题,国内外学者通过研究突破器件束缚的三维鬼成像技术,逐步实现了从光源调制到图像重构算法的性能提升;另一方面,面向“大视场、小目标”的典型应用场景,通过研究非均匀分辨率成像方法,可以同时兼顾大视场、高分辨和实时性,并将鬼成像与变分辨率成像结合,提升了三维成像的综合性能。总结内容将为进一步开展高性能激光雷达三维成像奠定基础。

### 参 考 文 献

- [1] Omasa K, Hosoi F, Konishi A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(4): 881-898.
- [2] 张子静, 谢佳衡, 黄明维, 等. 量子激光雷达研究综述(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20211102.  
Zhang Z J, Xie J H, Huang M W, et al. Overview of quantum LiDAR (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20211102.
- [3] Yang T, Li Y, Zhao C, et al. 3D ToF LiDAR in mobile robotics: a review[EB/OL]. (2022-02-22) [2023-03-05]. <https://arxiv.org/abs/2202.11025>.
- [4] Saarela J, Toermaenen M, Myllylae R A. Light scattering in thermomechanical pulp (TMP) and talc measured with a time-of-flight (TOF) lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5059: 58-65.
- [5] Xiao J H, Liu M L, Zhu Z M. Low walk error multi-stage cascade comparator for TOF LiDAR application[J]. *Microelectronics Journal*, 2021, 116: 105194.
- [6] Giorgetta F R, Baumann E, Knabe K, et al. High-resolution ranging of a diffuse target at sub-millisecond intervals with a calibrated FMCW Lidar[C]//2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.
- [7] Lu C, Yu Z H, Liu G D. A high-precision range extraction method using an FM nonlinear kernel function for DFB-array-based FMCW lidar[J]. *Optics Communications*, 2022, 504: 127469.
- [8] Sayyah K, Sarkissian R, Patterson P, et al. Fully integrated FMCW LiDAR optical engine on a single silicon chip[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 2763-2772.
- [9] Yang Y, Zhang Y C, Wang Y H, et al. Design of 3D laser radar based on laser triangulation[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2019, 13: 2414-2433.
- [10] 周俞辰. 基于激光三角测距法的激光雷达原理综述[J]. *电子技术与软件工程*, 2016(19): 94-95.
- [11] Zhou Y C. Overview of the principle of lidar based on laser triangulation[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016(19): 94-95.
- [12] Liu B, Peng Z X. Design of A non-scanning lidar for wind velocity and direction measurement[C]//Imaging and Applied Optics 2015, June 7-11, 2015, Arlington, Virginia. Washington, DC: OSA, 2015: LT3D.3.
- [13] 高峰, 杨进华, 姜成昊, 等. 非扫描激光雷达系统的多脉冲积累信噪比分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051401.  
Gao F, Yang J H, Jiang C H, et al. SNR analysis under multi pulse accumulation of non-scanning lidar system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051401.
- [14] Freudenthaler V, Homburg F, Jäger H. Ground-based mobile scanning LIDAR for remote sensing of contrails [J]. *Annales Geophysicae*, 1994, 12(10): 956-961.
- [15] 曾昊旻, 李松, 张智宇, 等. 车载激光雷达 Risley 棱镜光束扫描系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1444-1450.  
Zeng H M, Li S, Zhang Z Y, et al. Risley-prism-based beam scanning system for mobile lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1444-1450.
- [16] Mei X D, Wang C L, Pan L, et al. Experimental demonstration of vehicle-borne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2019: JW2A.7.
- [17] Ito S, Hiratsuka S, Ohta M, et al. Small imaging depth LIDAR and DCNN-based localization for automated guided vehicle[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 177.
- [18] Hollinger J, Kutscher B L, Close R. Resolving ranges of layered objects using ground vehicle LiDAR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9494: 94940D.
- [19] 胡雪晴, 毛庆洲, 胡庆武, 等. 无人机机载激光雷达四面塔镜三维成像方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(14): 1428002.  
Hu X Q, Mao Q Z, Hu Q W, et al. Three-dimensional imaging method of four-sided tower mirror scanning for unmanned aerial vehicle airborne LiDAR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(14): 1428002.
- [20] 朱精果, 李锋, 黄启泰, 等. 机载激光雷达双光楔扫描系统设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0502001.  
Zhu J G, Li F, Huang Q T, et al. Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0502001.
- [21] 万渊, 陈菡, 杜嘉旻, 等. 星载激光雷达激光器热控技术研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(14): 1401005.  
Wan Y, Chen H, Du J M, et al. Research on thermal control technology of spaceborne LiDAR laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(14): 1401005.
- [22] 张文静, 徐赤东. 星载激光雷达光路自动调整技术研究进展[J]. *空间控制技术与应用*, 2023, 49(1): 105-112.  
Zhang W J, Xu C D. Progress on optical self-alignment of space-borne lidar[J]. *Aerospace Control and Application*, 2023, 49(1): 105-112.
- [23] 穆永吉, 万渊, 刘继桥, 等. 星载激光雷达望远镜主镜

- 光机分析与优化[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0718002.
- Mu Y J, Wan Y, Liu J Q, et al. Optomechanical analysis and optimization of spaceborne lidar telescope primary mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 0718002.
- [23] Dimb A L, Duma V F. Symmetries of scan patterns of laser scanners with rotational risley prisms[J]. Symmetry, 2023, 15(2): 336.
- [24] Li A H, Gao X J, Sun W S, et al. Inverse solutions for a Risley prism scanner with iterative refinement by a forward solution[J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9981-9989.
- [25] Liu X S, Li A H, Chen H, et al. Scale-adaptive three-dimensional imaging using Risley-prism-based coherent lidar[J]. Optics Letters, 2023, 48(10): 2587-2590.
- [26] Woo J H, Kang C S, Kim J A, et al. Time-of-flight measurement-based three-dimensional profiler system employing a lightweight Fresnel-type Risley prism scanner[J]. Optical Engineering, 2022, 61(5): 054104.
- [27] Brazeal R G, Wilkinson B E, Hochmair H H. A rigorous observation model for the risley prism-based livox mid-40 lidar sensor[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4722.
- [28] Zhou H, Mao Q Z, Song Y F, et al. Analysis of internal angle error of UAV LiDAR based on rotating mirror scanning[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5260.
- [29] Gour A, Ménard M, Nabki F. A high-speed chip-scale rotary polygon optical scanner based on a micromotor integrated with a micro-polyhedron mirror[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2022, 31(4): 486-499.
- [30] Ji Y Y, So B H, Kim D Y. High-speed time-domain characterization method for polygon scanners[J]. Measurement, 2019, 135: 278-286.
- [31] Mu X J, Zhou G Y, Yu H B, et al. Electrostatic micromachined resonating micro-scanner for circumferential endoscopic bio-imaging[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(8): 749-752.
- [32] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928002.
- Qian L Y, Wu D C, Liu D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928002.
- [33] 纪荣祎, 赵长明, 陈国. 激光扫描转镜扫描轨迹的分析计算[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0408003.
- Ji R Y, Zhao C M, Chen G. Analysis and calculation of scan trace of laser scanning rotation mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0408003.
- [34] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8904-8915.
- [35] Shen G Y, Zheng T X, Li Z H, et al. Self-gating single-photon time-of-flight depth imaging with multiple repetition rates[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106908.
- [36] McCarthy A, Ren X M, Della Frera A, et al. Kilometer-range depth imaging at 1, 550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [37] 徐卫明, 刘军, 姜紫庆, 等. 基于双振镜的多元并扫成像激光雷达的扫描特性分析与系统误差标定[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0214002.
- Xu W M, Liu J, Jiang Z Q, et al. Scanning property analysis and system error calibration of dual galvanometers based multi-points parallel scanning imaging lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0214002.
- [38] Huang Z H, Li D. A 3D reconstruction method based on one-dimensional galvanometer laser scanning system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 170: 107787.
- [39] Stann B L, Dammann J F, Giza M M, et al. MEMS-scanned lidar sensor for small ground robots[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 76841E.
- [40] Moss R, Yuan P, Bai X G, et al. Low-cost compact MEMS scanning lidar system for robotic applications[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8379: 837903.
- [41] Stann B L, Dammann J F, Giza M M. Progress on MEMS-scanned lidar[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9832: 98320L.
- [42] Kimoto K, Asada N, Mori T, et al. Development of small size 3D LIDAR[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 4620-4626.
- [43] Seo Y H, Hwang K, Kim H, et al. Scanning MEMS mirror for high definition and high frame rate lissajous patterns[J]. Micromachines, 2019, 10(1): 67.
- [44] 董光焰, 刘中杰. 光学 MEMS 微镜技术及其在激光雷达中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(1): 36-38.
- Dong G Y, Liu Z J. MEMS microlens technique and its application on lidar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011, 6(1): 36-38.
- [45] Li Y X, Li Q Y, Zhang B, et al. The effect of closed-loop optimization enhances the MEMS lidar for rapid scanning[J]. Optik, 2020, 208: 164097.
- [46] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [47] 万玲玉, 刘立人, 张明丽, 等. 高速电光相控阵二维激光光束扫描器: CN2677961Y[P]. 2005-02-09.
- Wan L Y, Liu L R, Zhang M L, et al. High speed electro-optical phased array two-dimensional laser beam scanner: CN2677961Y[P]. 2005-02-09.
- [48] Wight D R, Heaton J M, Hughes B T, et al. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(8): 899-901.
- [49] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. Nanophotonics, 2017, 6(1): 93-107.
- [50] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431):



- 195-199.
- [51] Bogaerts W, Dwivedi S, Jansen R, et al. A 2D pixelated optical beam scanner controlled by the laser wavelength [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 27(1): 6100512.
- [52] Jin J, Lee E S, Chun K W, et al. Fast-running beamforming algorithm for optical phased array beam scanners comprised of polymeric waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 768-779.
- [53] Buck J, Serati S, Hosting L, et al. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8395: 83950F.
- [54] Wu L A, Wang X R, Xiong C D, et al. Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phased arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(10): 101601.
- [55] Wang C, Peng Z, Liu Y, et al. Radial sub-aperture coherence method used to achieve beam steering with high precision and stability[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6331-6347.
- [56] Tang M Y, Cao J, Hao Q, et al. Wide range retina-like scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106885.
- [57] Zhang Z Y, Yu H, Huang Q K, et al. High-speed and low-power silicon optical phased array based on the carrier-depletion mechanism[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(5): 271-274.
- [58] Qiu H Q, Liu Y, Meng X S, et al. Energy-efficient integrated silicon optical phased array[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2023, 16(1): 23.
- [59] Wang S Y, Yang F, Hu C S, et al. Improved 3D reconstruction method for range-gated laser[EB/OL]. [2023-05-06]. <https://www.atlantispress.com/proceedings/cecs-18/25902481>.
- [60] Julca-Aguilar F, Taylor J, Bijelic M, et al. Gated3D: monocular 3D object detection from temporal illumination cues[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), October 10-17, 2021, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2022: 2918-2928.
- [61] Tian Z S, Yang G, Zhang Y C, et al. A range-gated imaging flash Lidar based on the adjacent frame difference method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106558.
- [62] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5086: 1-15.
- [63] 李潇, 石柱, 代千, 等.  $64 \times 64$  InGaAs/InP 三维成像激光焦平面探测器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0806004.
- Li X, Shi Z, Dai Q, et al.  $64 \times 64$  InGaAs/InP 3D imaging laser focal plane detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0806004.
- [64] Zhang C, Lindner S, Antolović I M, et al. A 30-frames/s,  $252 \times 144$  SPAD flash LiDAR with 1728 dual-clock 48.8-ps TDCs, and pixel-wise integrated histogramming[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(4): 1137-1151.
- [65] 葛鹏, 郭静菁, 尚震. 基于面阵单光子探测器的激光三维成像[J]. *电子技术与软件工程*, 2019(16): 129-130.
- Ge P, Guo J J, Shang Z. Laser three-dimensional imaging based on area array single photon detector[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019(16): 129-130.
- [66] Kostamovaara J, Jahromi S, Hallman L, et al. Solid-state pulsed time-of-flight 3-D range imaging using CMOS SPAD focal plane array receiver and block-based illumination techniques[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 6817911.
- [67] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [68] Lindell D B, Wetzstein G. Three-dimensional imaging through scattering media based on confocal diffuse tomography[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4517.
- [69] Olivieri L, Peters L, Cecconi V, et al. Terahertz nonlinear ghost imaging via plane decomposition: toward near-field micro-volumetry[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(6): 1726-1734.
- [70] 李兵, 杨赞秀, 李潇, 等. APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 310-316.
- Li B, Yang Y X, Li X, et al. Research progress of APD array and its imaging LiDAR system[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(3): 310-316.
- [71] Shapiro J H, Erkmén B I, Lvovsky A. Ghost imaging: from quantum to classical to computational[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2009: 405-50.
- [72] Sivakumar S. An introduction to quantum optics: photon and biphoton physics[J]. *Contemporary Physics*, 2012, 53(1): 72-73.
- [73] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [74] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [75] Hardy N D, Shapiro J H. Computational ghost imaging versus imaging laser radar for three-dimensional imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 023820.
- [76] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [77] Liu X L, Shi J H, Wu X Y, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5012.
- [78] Liu X L, Shi J H, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [79] Wang C L, Mei X D, Pan L, et al. Airborne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR via sparsity constraint[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 732.
- [80] Yang X, Xu L, Jiang M F, et al. Phase-coded modulation 3D ghost imaging[J]. *Optik*, 2020, 220: 165184.

- [81] Schwartz E L. Spatial mapping in the primate sensory projection: analytic structure and relevance to perception[J]. *Biological Cybernetics*, 1977, 25(4): 181-194.
- [82] Sandini G, Questa P, Scheffer D, et al. A retina-like CMOS sensor and its applications[C]//*Proceedings of the 2000 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, March 17, 2000, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 514-519.
- [83] 陈伟海, 宋蔚阳, 荣利霞, 等. 仿人眼功能的三维激光扫描算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(5): 563-566, 571.  
Chen W H, Song W Y, Rong L X, et al. 3D laser scanning algorithm with humanoid-eye function[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(5): 563-566, 571.
- [84] Mundhenk T N, Kim K, Owechko Y. PanDAR: a wide-area, frame-rate, and full color lidar with foveated region using backfilling interpolation upsampling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9406: 94060K.
- [85] Ye L, Gu G H, He W J, et al. Adaptive target profile acquiring method for photon counting 3-D imaging lidar [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 6805510.
- [86] Jiang Y S, Karpf S, Jalali B. Time-stretch LiDAR as a spectrally scanned time-of-flight ranging camera[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(1): 14-18.
- [87] Cao J, Hao Q, Peng Y X, et al. Modeling and simulations of three-dimensional laser imaging based on space-variant structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 62-70.
- [88] Cheng Y, Cao J E, Hao Q, et al. Compound eye and retina-like combination sensor with a large field of view based on a space-variant curved micro lens array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3502.
- [89] 郝群, 韩斌, 杨骛, 等. 空间变分辨率扫描三维重构成像研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 1106017.  
Hao Q, Han B, Yang A, et al. Spatial variable resolution scanning three-dimensional reconstruction imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 1106017.