

基于焦平面编码调控的计算成像： 研究现状与发展趋势(特邀)

王博文^{1,2,3}, 张许^{1,2,3}, 管海涛^{1,2,3}, 梁坤瑶^{1,2,3}, 李晟^{1,2,3}, 张润南^{1,2,3}, 曾敏^{1,2,3}, 裴子豪^{1,2,3}, 陈钱^{3**}, 左超^{1,2,3*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院智能计算成像实验室, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学智能计算成像研究院(SCIRI), 江苏 南京 210019;

³江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 基于“所见即所得”的传统光电成像技术本质上是光场二维强度信号在空间维度上的直接均匀采样记录与再现的过程。受光学成像系统与光电探测器件工艺与物理极限制约,传统光电成像技术已难以满足多个领域日益增长的高分辨率、高灵敏度以及多维高速成像的迫切需求。计算成像技术通过将前端物理域的光学调控与后端数字域的信息处理紧密结合,为打破传统成像技术的诸多限制提供了创新的解决方案,成为未来先进光学成像技术的发展趋势。从成像链路组成角度来看,计算光学成像技术的光学调控手段可分为照明调控、光学系统调控、待测物体调控以及探测器调控几大类。本文重点聚焦于探测器调控——通过在成像链路最末端的图像传感器焦平面处引入编码器件(如位移器、掩模版、空间光调制器等)进行高维光场调控,结合后端重建算法实现强度、相位、三维信息、光场、光谱等解耦,从而实现高性能光电成像与探测。该类方法有望突破传统光电成像技术成像维度受限、成像模态单一的固有瓶颈,为实现高分辨率、多维度、高光谱、小型化、超快成像探测等提供新的途径。

关键词 计算成像; 编码调控; 超分辨探测; 光场感知; 光谱成像; 超快探测

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOSOL240452

Computational Imaging Based on Focal Plane-Coded Modulation: A Review (Invited)

Wang Bowen^{1,2,3}, Zhang Xu^{1,2,3}, Guan Haitao^{1,2,3}, Liang Kunyao^{1,2,3}, Li Sheng^{1,2,3},
Zhang Runnan^{1,2,3}, Zeng Min^{1,2,3}, Pei Zihao^{1,2,3}, Chen Qian^{3**}, Zuo Chao^{1,2,3*}

¹Smart Computational Imaging Laboratory, School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

²Smart Computational Imaging Research Institute (SCIRI) of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210019, Jiangsu, China;

³Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, Nanjing 210094, Jiangsu, China

Abstract Traditional optoelectronic imaging technology, based on the principle of direct visual representation, fundamentally involves the direct and uniform sampling and reproduction of two-dimensional light field intensity signals in spatial dimensions. However, constrained by the physical and technological limitations of optical imaging systems and optoelectronic detectors, it has become increasingly insufficient to meet the growing demands for high resolution, high sensitivity, and multidimensional high-speed imaging in many fields. Computational imaging tightly integrates optical control in the physical domain with information processing in the digital domain. It offers innovative solutions to overcome the limitations of traditional imaging technologies, becoming the future direction of advanced optical imaging. From the

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2024-09-24; 录用日期: 2024-09-26; 网络首发日期: 2024-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2033, 62105151, 62175109, 62227818, 62361136588)、国家重点研发计划(2022YFA1205002, 2024YFE0101300)、江苏省基础研究计划前沿引领专项(BK20192003)、江苏省青年基金项目(BK20210338)、江苏省科技计划生物医药竞争类项目(BE2022847)、江苏省科技计划重点国别产业技术研发合作项目(BZ2022039)、中央高校科研专项资助项目(30920032101, 30923010206)、中央高校基础科研业务费专项资金资助项目(2023102001)、江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放基金(JSJP202105, JSJP202201)

通信作者: *zuocho@njust.edu.cn; **chenqian@njust.edu.cn

perspective of the imaging chain, the optical control methods of computational optical imaging can be categorized into illumination control, optical system control, object control, and detector control. We focus on detector control—by introducing encoding devices (such as displacers, masks, and spatial light modulators) at the focal plane of the image sensor at the end of the imaging chain to regulate the high-dimensional light field. Coupled with post-processing reconstruction algorithms, this approach enables the decoupling of intensity, phase, 3D structure, light field information, and spectrum, paving the way for high-performance optoelectronic imaging and detection. These methods have the potential to overcome the inherent bottlenecks of traditional optoelectronic imaging, such as limited imaging dimensions and single-mode imaging, providing new avenues for achieving high resolution, multidimensional, hyperspectral, miniaturized, and ultrafast imaging.

Key words computational imaging; coded modulation; super-resolution detection; light field sensing; spectral imaging; ultrafast detection

1 引言

16 世纪, da Vinci^[1]在其绘画手稿中,以一种诗意的语言描绘了光场的概念(图 1):“空气中充斥着由其中物体所引发的无数辐射金字塔。这些金字塔相互交错,编织成网,却互不干扰。……物体的影像被它们完整地携带至空气的每一个角落,而空气中的

每一个微小部分,都吸纳了由物体所引起的影像。”光学技术的发展、图形处理单元(GPU)及新型电荷耦合器件(CCD)/互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器件的出现、数字信号处理和数据存储的创新,都促使我们去思考一个重要的问题:如何量化光场的复杂特性?换言之:我们所能感知光场的维度有多少?

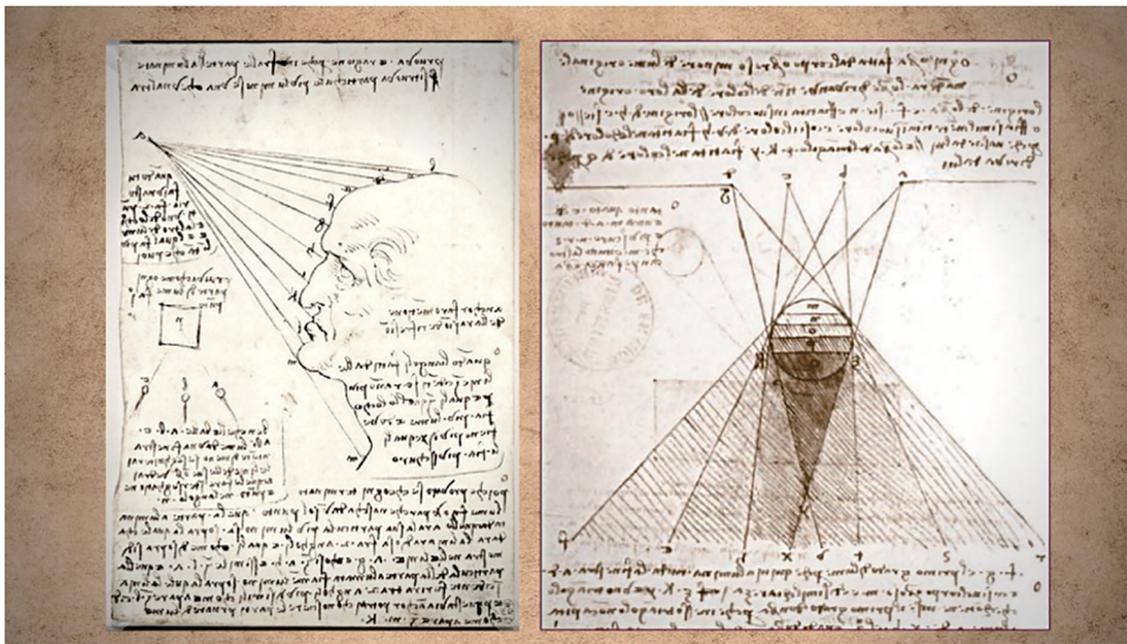


图 1 16 世纪 da Vinci 手绘的辐射金字塔光图^[1]

Fig. 1 Radiation pyramid light diagram drawn by da Vinci in the 16th century^[1]

光场感知技术的发展最早可以追溯到 20 世纪初。1903 年, Ives^[2]将针孔成像技术运用到双目视差系统中,这是最早的光场成像雏形。1908 年, Lippmann^[3]提出了集成摄影技术(IP)。1939 年, Gershun^[4]开创性地定义了“光场”(light field),描述其为光线在均匀介质内沿直线路径传播时所蕴含的辐射能量分布。1991 年, Adelson 与 Bergen^[5]定义了一种描述高维度光场的数学模型——全光函数(plenoptic function),该词源于拉丁语中的“plen”(意为完整或充满)和光学中的“optic”。全光函数可以表示为 $L(x, y, z, \theta, \psi, \lambda, t)$, 其

中 (x, y, z) 表示光的空间维度, (θ, ψ) 表示光的角度维度, λ 表示光的波长维度, t 表示光的时间维度, 如图 2 所示。全光函数的提出标志着人类对高维光场的认知迈入了系统化阶段。然而,基于光电效应的光学成像系统与人眼的视觉系统类似,只能记录二维空间上的光场强度分布,导致振幅、相位、偏振、光谱等多物理维度信息被投影为单一的强度信息。物理上连续的光场信息在采样及量化后变为有限的离散信息,使得高维信息被进一步压缩采样。受限于传统光学系统的固有物理硬件水平,如通光孔径、探测器像元尺寸、灵敏度

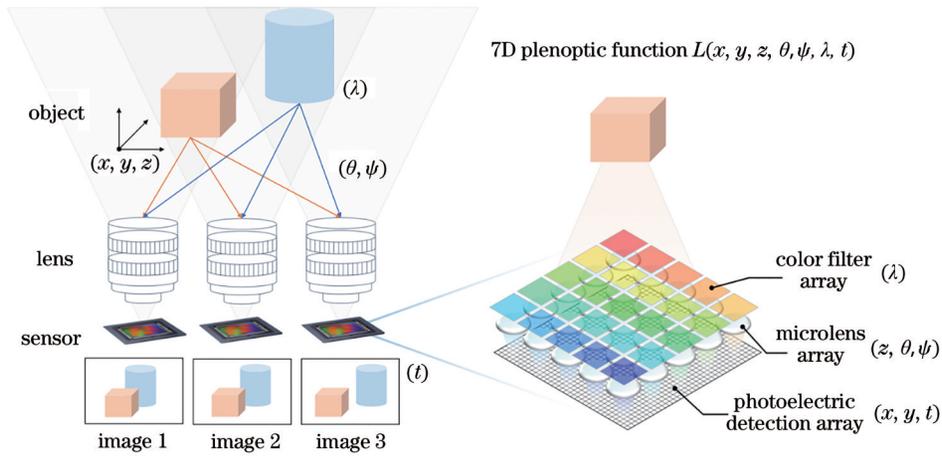


图 2 全光函数示意图,其表达式为 $L(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$,通过在传感器前加入滤色片阵列、微透镜阵列等调控器件获取波长、深度、光线角度等高维光场信息
Fig. 2 Schematic of plenoptic function, denoted as $L(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$, which can obtain high-dimensional light field information such as wavelength, depth, and light angle by adding color filter array and microlens array in front of the sensor

以及曝光时间等,成像物体的多维光场分布信息难以通过传统“点对点”的成像方法直接采样记录。要想提高光学成像系统的成像维度和性能,往往需要大幅增加硬件成本,这在工程化应用中往往难以实现。例如,光学系统的加工成本与孔径尺寸的 2.76 次方成正比,这导致成本急剧上升^[6]。

在过去的十多年里,信息技术的高速发展为光学成像领域注入了新的活力,“计算成像”(computational imaging)技术应运而生^[7],其重新定义了人类与机器感知外界信息的方式。从“所见即所得”的一一映射到对高维光场的耦合编码与计算重构,计算成像将光作为信息载体的一部分,模糊了物理世界与数字世界的边界,从而突破了传统光学成像的物理限制。如图 3 所

示,计算成像将前端光学调控与后端信息处理有机结合,采用“先调制,再拍摄,最后解调”的混合光学数字计算成像方式,重新定义获取高维光场信息的成像机制,为拓展传统光学成像功能与性能提供一种新范式^[8-14]。借助于高维光场的成像特性,可以探测千里之外的光子信息(单光子成像^[15-16]),捕捉光传播的轨迹(超快成像^[17-18]),洞察物质的光谱成分(光谱感知^[19-20]),感知光的深度/角度(光场感知^[21-23]),解译物体的高频细节(超分辨率成像^[24-26])。从毫厘微末间的细胞病毒,到广袤宇宙中的第一缕光,计算成像将不断开拓人类的认知边界;从无人系统与手机摄影,到工业监测与安防监控,计算成像将融入人们生活的方方面面,推动数字经济高质量发展。

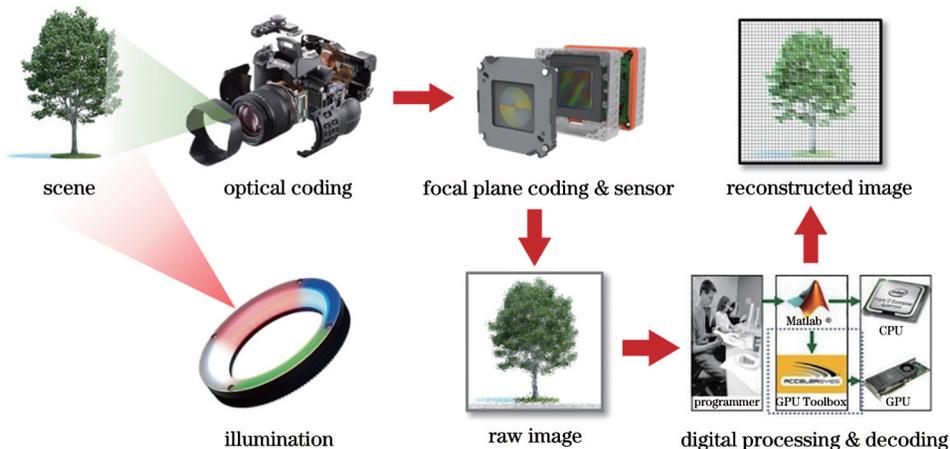


图 3 基于焦平面编码调控的计算成像处理过程
Fig. 3 Computational imaging processing based on focal plane coded modulation

尽管光场感知技术在近年来取得了显著的进展,但是如何有效地获取与处理高维光场信息在计算成像领域仍是一个热点问题^[27-28]。焦平面编码成像技术作

为计算成像“编码调控”理念的典型应用之一,通过在成像系统的焦平面上或在图像传感器前引入特定的光学编码器件,从而捕获到传统成像系统难以获取的高

维光场信息。光学编码器件的核心功能是调控成像系统中的传输矩阵,使得高维光场信息通过编码后的传输矩阵被投影到二维强度图像中^[29]。其中,计算成像重建结果的准确性及有效性同时依赖于前端光学正向建模的准确性及后端逆向重建算法的可靠性。通过对不同传输矩阵所编码的强度图像进行多次测量与迭代求解,将恢复物体高维信息的病态问题转变为多个传输矩阵联合求解的逆向问题,实现对包含波长、振幅、相位等高维光场信息的有效解耦。焦平面编码调控方案聚焦于传感器层面的调制解调,从而在较低硬件复杂度的情况下提升传统成像系统的高维信息获取能力。在基于光电效应强度探测的成像框架下,焦平面编码也同样遵守信息守恒定律,即牺牲某一维度的信息密度去换取另一维度的信息感知。这种维度之间的权衡被称为“信息置换”,同样也是计算成像技术独特的优势之一^[30]。“信息置换”本质上是利用成像系统的可用自由度,如空间、时间、强度、相位、光谱、偏振等,在成像系统有限信息带宽的限制下,在“得”与“失”之间做出相应的权衡与选择。换句话说,计算成像技术通过合理的前端编码调控与后端数字解码,最大限度地挖掘出感兴趣目标的多维光场信息,尽管这意味着在其他低优先级的维度上需要有所取舍。

在此研究背景下,本文概括性地综述焦平面编码调控方法在计算成像领域的发展历史、现状以及未来发展趋势。从全光函数的角度出发,深入探讨了焦平面编码调控技术在实现超分辨率成像(空间维度)、光场感知(深度、角度维度)、光谱感知(波长维度)和超快成像(时间维度)等方面的研究脉络与代表性方法[图 4],进而对基于焦平面编码成像体系中的核心要素及成像思想进行解读与讨论梳理。首先,聚焦于空间分辨维度提升方法的讨论,并对微扫描超分辨与像元级编码调控超分辨相关工作进行总结概述;其次,对光场感知的起源与应用前景进行综述,并从空域编码复用(微透镜阵列等)、频域编码复用(散射片等掩模版),以及宏观无透镜成像(固定掩模版、可编程掩模版)3个角度对焦平面光场感知的实现方法进行总结;再次,对基于焦平面编码的光谱感知技术进行回顾,包括滤光编码与衍射调制编码;从次,对编码快门(全局快门、逐像素快门与卷帘快门)、压缩编码(压缩超快成像)等基于焦平面超快成像的计算成像技术及其在工业测量等领域的应用进行简要概述;最后,对基于焦平面编码调控的计算成像相关工作进行总结,并展望后续的研究方向以及相关技术途径。

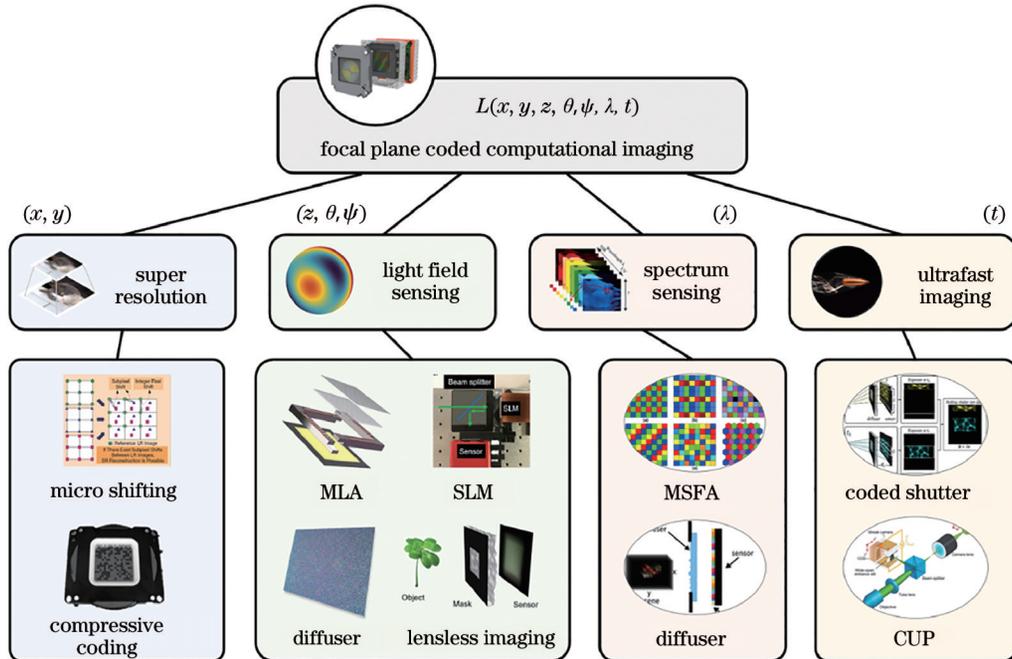


图 4 基于焦平面编码调控的计算成像技术的分类及代表方法

Fig. 4 Classification and representation of computational imaging technology based on focal plane coding modulation

2 焦平面超分辨探测

基于光强直接映射的成像系统是一个简单的串行链路,成像探测器捕获的图像与目标场景形成点对点的强度映射函数。这种“所见即所得”的成像机制本质上可以归纳为目标物体的光强信号在空间维度上的直

接均匀采样记录与再现。因此,成像系统的空间分辨能力由光学分辨率(镜头孔径大小所决定的衍射极限)与光电传感器(由探测器的像元大小所决定的采样频率)综合决定^[13]。自光电传感器问世以来,人们追求“小像元、高分辨、大面阵”探测器的脚步从未停止。从传统光学成像系统的设计角度出发去提升

成像分辨率,将会受光电探测器件固有的物理特性、加工工艺的限制,且目前探测器像元尺寸已经接近物理极限,难以继续突破。随着成像电子学的发展、计算机数据处理能力的提升,研究人员相继探索出新型成像机制,即成像不再依赖于成像链路中的硬件系统上限,而是结合前端物理域的光学调控与后端数字域的信息反演实现高维信息(时域、空域、谱域等)获取,为突破上述传统成像系统中存在的诸多限制提供了新手段与新思路。

通常来讲,夜视成像系统需在成像系统的分辨率(像元大小)与灵敏度(探测效率)之间做出权衡,因此对于该类成像系统,特别是配备了大孔径成像镜头的系统,探测器的像元大小是成像分辨率的关键限制因素,如图 5(a)所示。成像系统的空间分辨能力受限于美国电信工程师 Nyquist^[31]在 1928 年提出的奈奎斯特采样定理,即成像系统的空间采样频率/间距(由像元大小决定)必须高于成像信号中最高频率分量的 2 倍,如图 5(b)所示。通常来说,对于夜视探测器件,如红外、微光成像传感器,其像元尺寸 A_{ps} (像元大小通常在

10 μm 左右)所对应的奈奎斯特采样频率远小于镜头孔径的衍射极限(即采样频率不足),导致图像频谱中高于奈奎斯特频率的高频信息混入低频信息中而不能被完整恢复,在图像上形成“马赛克”效应。在约翰逊准则框架下,这种图像像素化效应成为限制光电探测系统在后续跟踪、探测任务中应用的主要因素,具体表现为:目标探测需要满足覆盖至少 1.5 pixel 的阈值,识别过程则需至少 6 pixel,而辨认过程则要求至少 12 pixel 的覆盖。从图 5(c)可以进一步发现,在长波红外探测系统中随着探测距离的不断加,图像的混叠效应(图像像素化现象)逐渐显著。因此,要想从光学系统硬件层面提升成像空间分辨率,则需要等效缩小探测器像元尺寸,进而满足奈奎斯特采样定理。超像素分辨技术的核心思想是利用电子、光学、探测器阵列和计算机处理的综合设计来实现“亚像元”级调控,获取传统成像无法探测的高频细节成分,进而反演得到高分辨率探测图像。目前,图像(像素)超分辨成像技术大致可分为两类,即单帧图像超分辨和多帧图像超分辨。

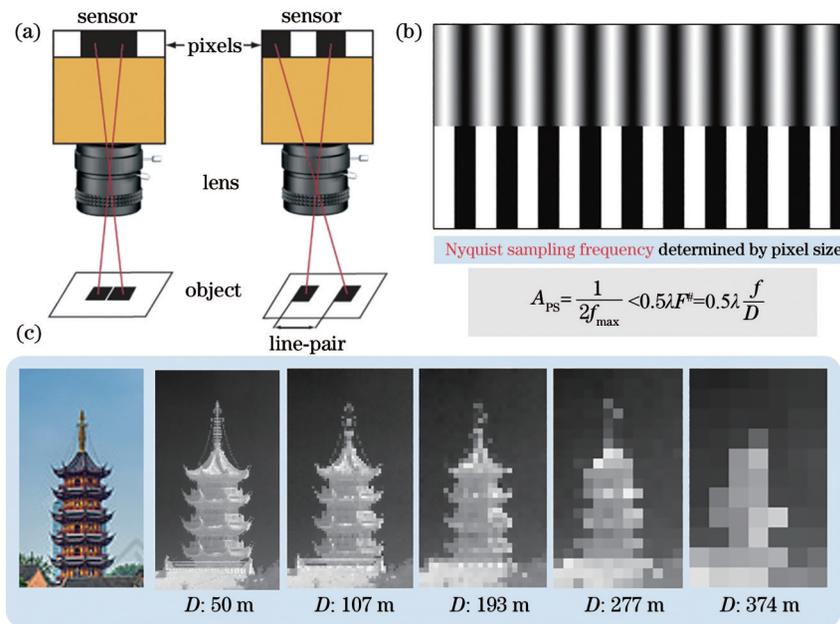


图 5 图像像素分辨率与像元大小(奈奎斯特采样)的对应关系。(a)探测器的像元间距直接关联其最小可分辨线宽的能力;(b)像元大小(奈奎斯特采样)与采样信息的关系,随着采样频率的增加,可获取的成像细节更丰富;(c)采用长波红外探测系统对于建筑目标在不同距离下的探测结果(像元尺寸为 $38 \mu\text{m}$, 像素数为 320×240 , 镜头焦距为 50 mm)

Fig. 5 Correspondence between image pixel resolution and pixel size (Nyquist sampling). (a) Detector's pixel pitch directly related to its minimum resolvable linewidth; (b) relationship between pixel size (Nyquist sampling) and sampling information, as the sampling frequency increases, more imaging details can be obtained; (c) detection results of long-wave infrared detection system for building targets at different imaging distances (pixel size of $38 \mu\text{m}$, pixel resolution of 320×240 , lens focal length of 50 mm)

单帧图像超分辨技术仅依赖一幅低分辨率图像实现高分辨率图像的复原,其也可以看作是图像插值的特例。显然,通过一幅低分辨率图像实现像素超分辨(例如实现 2 倍的分辨率提升,需要从一个像素点恢复出原始高分辨率图像中的 4 个像素点)是一个病态逆问题求解过程。单帧超分辨重建方法一般通过引入先

验模型(稀疏矩阵或点扩散函数)或使用特定的匹配机制在原始图像上进行插值重建,以提升图像的视觉效果,如图 6(a)所示。通过对大量成对数据的学习和超参数项的调整,同样可以得到期望图像与原始图像之间的潜在映射关系/规律^[25,32-35]。但是高维信息不能“从无到有”,单帧超分辨重建技术也不是万能的,所能

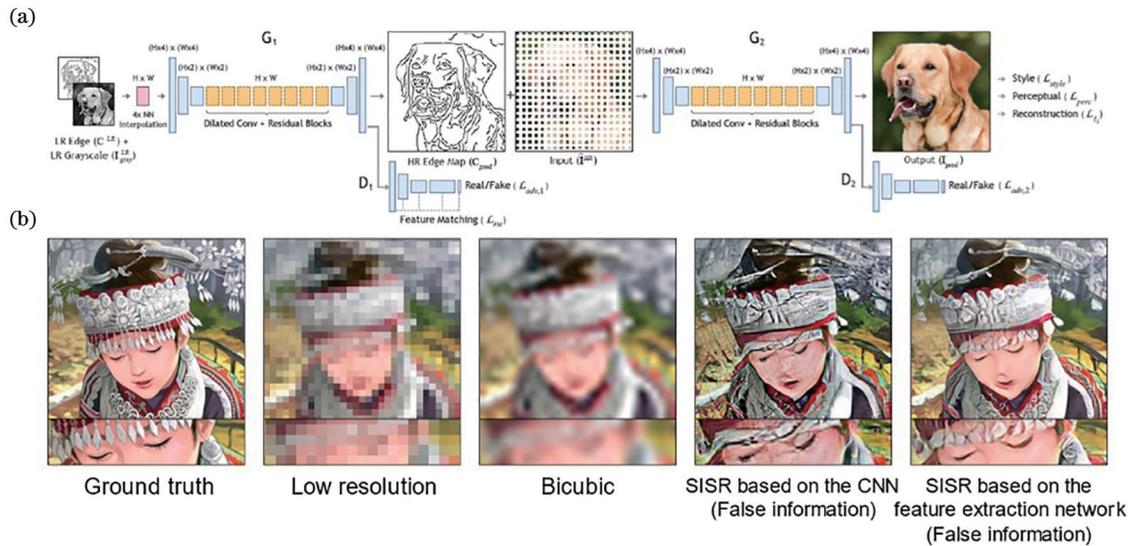


图 6 基于图像特征提取的单帧图像超分辨率重构算法^[36-37]。(a)基于图像特征提取的单帧图像超分辨率神经网络结构;(b)单帧图像神经网络超分辨率重构结果对比

Fig. 6 Single frame image super-resolution reconstruction algorithm based on image feature extraction^[36-37]. (a) Structure of single frame image super-resolution neural network based on image feature extraction; (b) comparison of super-resolution reconstruction results of single frame image neural network

达到的分辨率提升效果存在一定阈值。我们也应该清醒地认识到:在进行欠定逆问题的求解中,高频信息的增强往往依赖于给定的“图像先验”与“样本学习”,因此我们仅能重建得到一幅“最有可能”的高分辨率图像(不能脱离样本学习范围或违背先验条件),只能在视觉上达到较高的清晰度(符合人眼视觉观感),却不能保证提供真实场景的高分辨率细节^[36],如图 6(b)所示。因此,单帧图像超分辨率成像无法应用于监控、安防、军工等对成像结果保真度具有较高要求的应用场合。

多帧图像超分辨率技术是对同一场景中具有相对亚像素位移的低分辨率图像序列恢复出高分辨率图像,从而克服由探测器像元导致的奈奎斯特采样不足的问题,提升原探测器的角分辨率成像能力。因此,多帧图像超分辨率成像的本质是牺牲一定的时间分辨能力去换取空间分辨能力的提升。随着焦平面阵列技术和数据实时处理能力的不断进步,采用混合计算成像机制代替传统光学成像的相关技术已经取得了显著进展,其本质思想是将编码调控引入成像链路中,再结合后端的计算解调,打破了传统光学成像功能与性能过度依赖于硬件的限制,从而实现宽视场、高分辨成像。本节主要讨论基于焦平面编码(即在成像链路的最末端图像传感器焦平面处引入编码器件)超分辨率成像技术实现亚像素级光强调控的成像方案。2.1 节主要对基于微扫描的超分辨率成像技术进行概括性综述,按照亚像素位移产生方式进行分类讨论,分别阐述被动微扫描超分辨率及主动微扫描超分辨率的成像技术原理、特点以及代表性技术;2.2 节主要介绍利用二值掩模版、编码积

分时间等方式实现焦平面编码超分辨率成像技术;2.3 节主要对基于多孔径的像素超分辨率成像系统进行简要综述,与在焦平面调控的方式不同,基于多孔径(多探测单元)探测器的成像系统得益于每个探测单元之间存在微小的成像视角差异,能够采集像素级变化的低分辨率图像序列,但是二者获取到的是同一场景中的亚像素位移信息。

2.1 微扫描超分辨率成像技术

像素超分辨率成像是对一个病态问题进行逆向求解的过程。微扫描可以看作是探测器对目标场景进行多次采样。通过微扫描器件可以对原始低分辨率图像实现亚像素级别的空间位置偏移,对采集到的低分辨率图像系列进行反演迭代,将病态求解问题转换为对正定方程的求解,就能够准确重建出高分辨率图像信息。微扫描是减少焦平面空间抽样频谱混叠的常用方法之一,能有效突破探测器奈奎斯特采样不足的限制。

微扫描超分辨率成像技术可以分为主动微扫描和被动微扫描两类。被动微扫描是通过成像系统与目标场景之间的随机相对运动产生亚像素位移信息,其序列图像之间的相对位移量是随机、无规律的;主动微扫描则是采用精密的扫描器件或位移台控制探测器按照一定的移位规则产生可调控的亚像素位移信息,其序列图像之间的相对位移量是已知、有规律的。

2.1.1 被动多帧图像超分辨率成像

在经典的被动多帧图像超分辨率成像技术中,通常利用成像过程中引入的系统抖动、人为因素所产生的微小偏移来获取原始图像帧^[38],从而实现亚像素级调控。被动多帧图像超分辨率成像技术的关键在于如何准

确获取低分辨率图像帧之间的亚像素位移信息并映射到高分辨率网格中实现插值重建,如图 7 所示。1998 年,代顿大学 Hardie 等^[39]在机载平台实现红外被动超分辨率成像,该方法借助飞机震动导致采集的连续图像帧之

间引入不同程度的亚像素位移,经过配准算法估算出帧间的位移信息后映射到高分辨率网格中,通过非均匀线性插值重建出高分辨率图像,显著提升红外探测器成像性能。

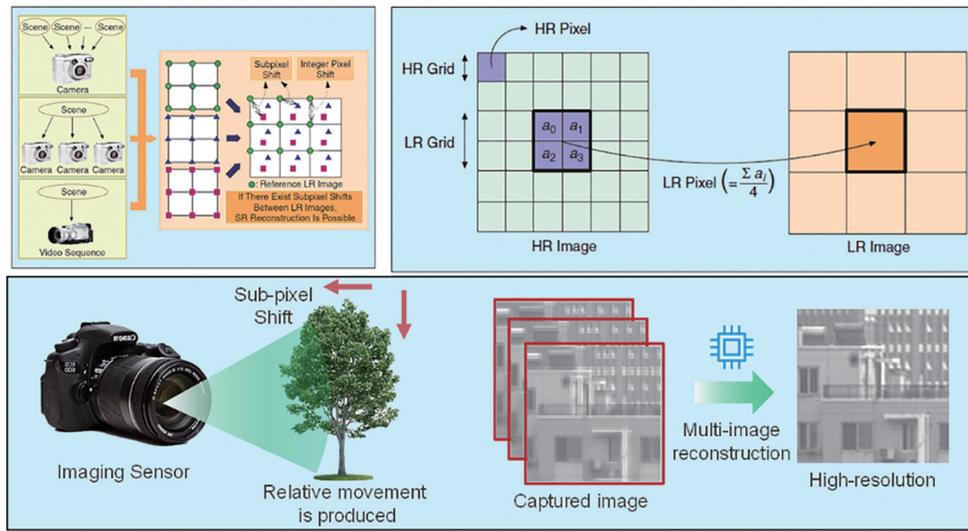


图 7 被动微扫描亚像素位移超分辨率成像的基本原理^[38]

Fig. 7 Basic principle of passive micro scanning sub-pixel displacement super-resolution imaging^[38]

2019 年,Google 公司^[40]在旗舰手机中推出 Super-Res Zoom 功能,利用手持拍摄的方式实现多帧像素超分辨率成像,解决在夜间拍摄时由小像素传感器进光量不足导致的图像信噪比低的问题,技术原理概述如图 8 所示。一般而言,成像过程中应该尽可能地避免

人为抖动致使图像出现运动模糊或运动伪影,但 Google 公司巧妙地利用这种无法避免(随机固有产生)的人为误差实现超分辨率成像,不增加额外的编码调控器件,使得多帧超分辨率成像技术得以应用于手机成像模组等小型化系统中。

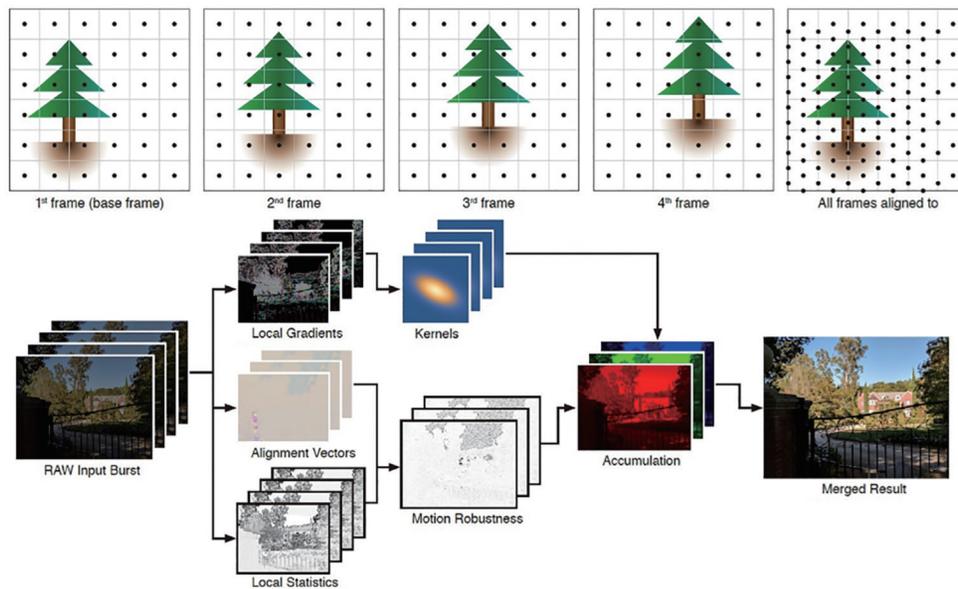


图 8 Google 手持超分辨率成像技术原理^[40]

Fig. 8 Principle of Google handheld super-resolution imaging technology^[40]

虽然被动多帧超分辨率成像技术可在一定程度上提升分辨率,但当成像系统与目标场景中存在非理想的全局平移(例如低分辨率图像间存在旋转、扭曲、局部变形等复杂映射关系,或低分辨率图像间配准时无法

得到可靠的亚像素位移信息,以及在高分辨率网格插值过程中相对运动不充分所导致的非均匀插值时细节信息丢失)时,被动多帧图像超分辨率成像方法无法获得稳定可靠且各向同性的分辨率提升。

2.1.2 主动微扫描图像超分辨成像

由于上述被动微扫描是通过探测器与目标场景之间的运动随机性获得低分辨率图像的亚像素调控,这种方式所带来的分辨率提升往往是不确定的。但是在一些特殊的探测场景如军用光电探测中,需要使用更

加稳定鲁棒的超分辨技术来提升成像质量。主动微扫描超分辨成像技术则通过在成像系统中加入微扫描器件,例如微电子机械系统(MEMS)扫描器件、扫描振镜和压电陶瓷位移台(图9),来精确控制目标光强实现亚像素级偏移,以获取目标场景中更多的高频信息。

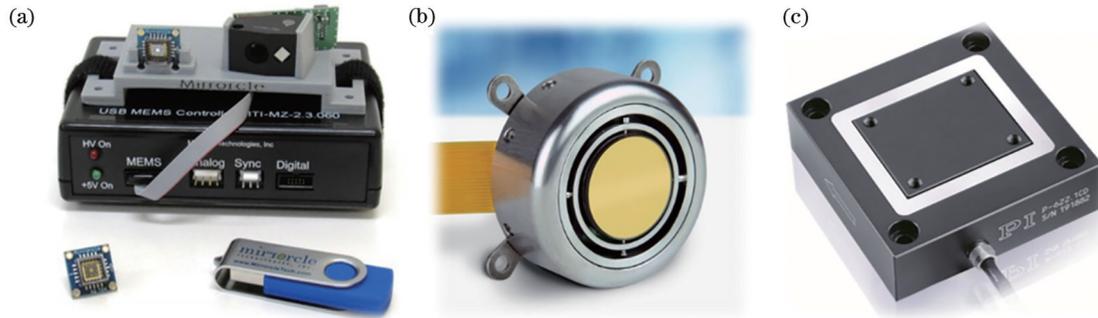


图9 微扫描器件。(a)MEMS微扫描器件;(b)振镜;(c)压电陶瓷微扫描器件

Fig. 9 Micro-scanning devices. (a) MEMS micro-scanning device; (b) galvanometer; (c) piezoelectric ceramic micro-scanning device

基于此,长春理工大学 Zhang 等^[41]设计了一款中波红外透射式微扫描红外成像镜头,该镜头可用于红外成像系统中实现红外波段的超分辨远场探测,如图10(a)所示。但由于在红外镜头中引入复杂的微扫描装置,如图10(b)所示,难以保证扫描器件的长期稳

定性,系统需要经过严格的校准装配,避免由硬件导致的光学系统成像质量下降。重建结果表明,该系统能对于 2×2 的微扫描有较好的重建效果(理论上提升了1.4倍),但难以在复杂的环境中满足更高分辨率成像的需求。

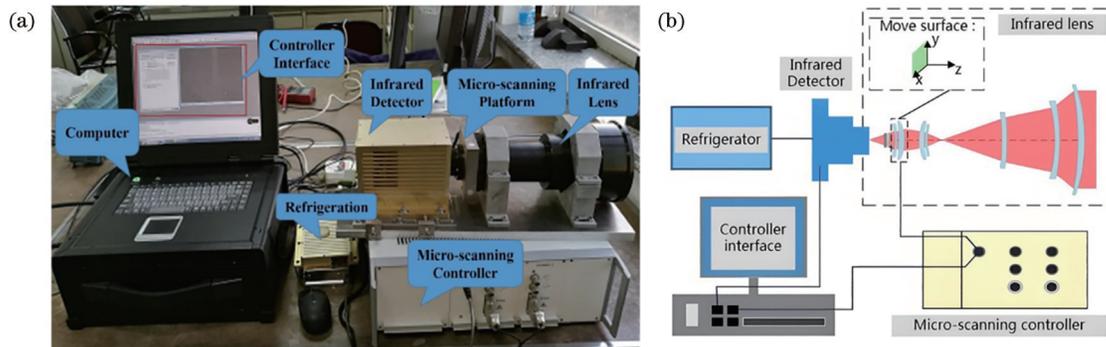


图10 红外微扫描成像系统示意图^[41]。(a)系统实物图;(b)成像原理示意图

Fig. 10 Schematic of infrared micro-scanning imaging system^[41]. (a) Physical system diagram; (b) imaging principle diagram

上述微扫描方式通过对光学成像链路中的成像组件进行可控位移实现亚像素级调制,而在索尼推出的Alpha 7R III型号相机^[42]中新增的像素转换多重拍摄模式则通过控制传感器实现亚像素位移,进而实现高分辨率影像重建。在这种模式下,通过结合五轴防抖稳定器件构建的成像系统可以实现像素级增量位移,串行采集4幅亚像素级调控图像,最终生成约1亿6940万像素数据量(合成一幅约4240万像素的重建图像),如图11(b1)、(b2)所示。

上述主动微扫描成像技术主要应用到静态相机成像中来提升图像空间分辨率,其本质是通过串行调控获取场景中的亚像素高频信息来突破奈奎斯特采样不足的限制,实现成像分辨率的稳定提升。对于视频超分辨成像,其可借用静态图像超分辨串行调控的思想,

将视频流中的低分辨率图像进行超分辨重建后按一定帧频输出,从而实现高分辨率视频成像。2005年, Ben-Ezra 等^[43]结合串行调控的思想提出一种视频超分辨成像方法。该方法将板载相机固定在微扫描位移器件上,通过“抖动”相机传感器在视频流中实现帧间微扫描调控,如图12(a)所示。对采集到的低分辨率视频流进行滑动窗口处理,以每四帧低分辨率图像重建一帧高分辨率图像进行超分辨视频流输出。该方法同样能扩展到彩色视频超分辨成像中,仅需将图12(b1)所示的低分辨率视频流转换至CIE-Lab空间,并对亮度通道图像进行滑动窗口超分辨重建,将色度通道图像线性插值融合到超分辨后的亮度通道图像上,再转换到RGB空间进行彩色超分辨视频输出,重建结果如图12(b2)所示。

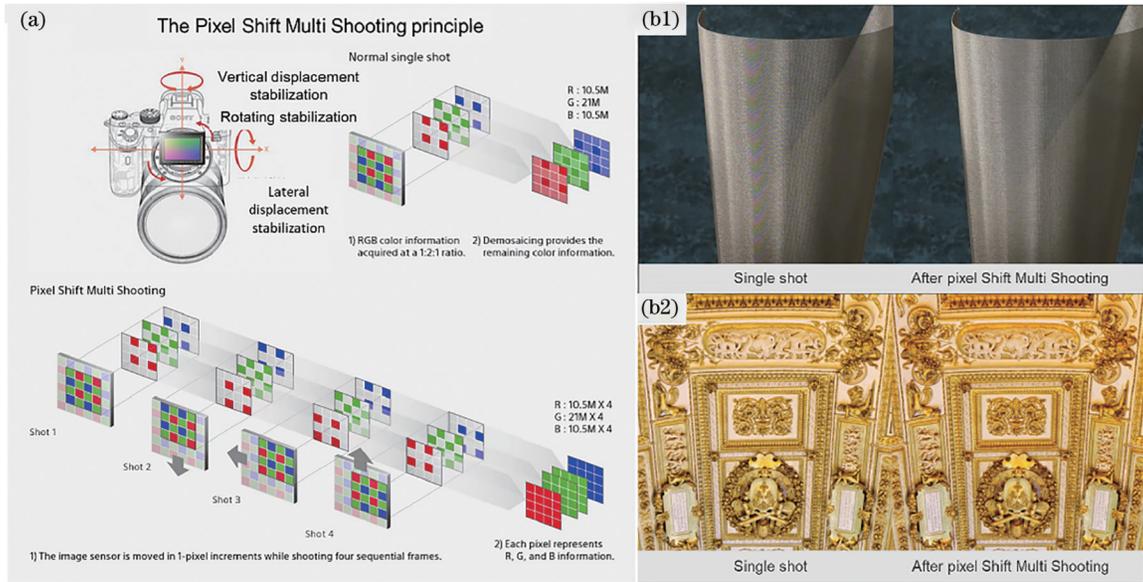


图 11 索尼亚像素超分辨成像技术^[42]。(a)索尼像素转换多重拍摄技术原理；(b1)对纹理细节场景的超分辨成像结果；(b2)对建筑细节场景的超分辨成像结果

Fig. 11 Sony sub-pixel super-resolution imaging technology^[42]. (a) Principle of Sony pixel shift multi-shooting technology; (b1) super-resolution imaging results of texture detail scenes; (b2) super-resolution imaging results of architectural detail scenes

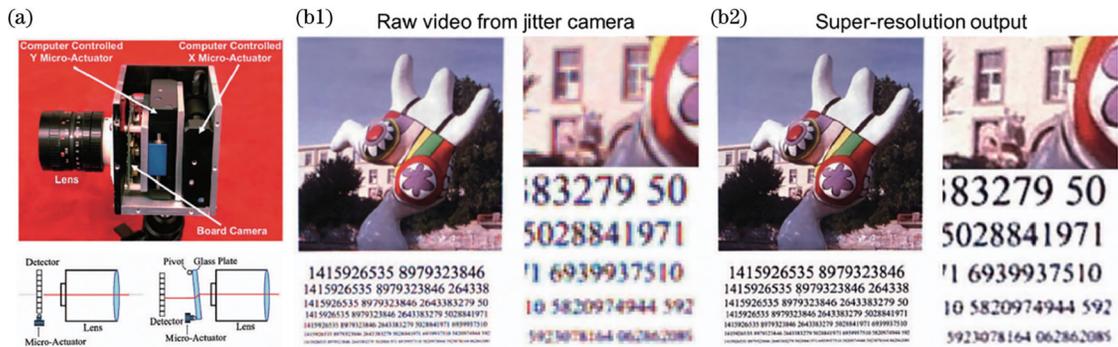


图 12 抖动相机系统^[43]。(a)抖动相机实物图及成像原理；(b1)抖动相机系统采集的某低分辨率视频图像帧；(b2)基于主动微扫描的视频超分辨重建结果

Fig. 12 Jitter camera system^[43]. (a) Physical setup and imaging principle of jitter camera; (b1) a low resolution video image captured by the jitter camera system; (b2) video super-resolution reconstruction results based on active micro-scanning

主动微扫描超分辨成像技术通过额外加入精密的亚像素位移器件来解决被动多帧图像超分辨成像技术中采样不均匀的问题,且通过可控的亚像素位移降低配准计算复杂度以及配准误差,能够更稳定可靠地提升重建图像质量。

2.2 焦平面编码超分辨成像技术

除了借助微扫描器件在探测器上获取亚像素位移之外,还有一种调制方式能够实现亚像素级光强调控,即焦平面编码超分辨。该方法通常对探测器上的像元直接进行编码调控,即在探测器表面覆盖一层特殊的二值掩模版,或控制探测器像元按一定的编码规则进行时间积分以实现亚像素级光强调控。结合超分辨算法对编码图像进行解耦以实现超分辨成像,尤其是压缩感知^[44](CS)理论的出现,为焦平面编码超分辨成像技术的发展提供了理论支撑。

在美国国防部高级研究计划局实施的 LACOSTE 项目的支持下,美国 Northrop Grumman 等公司和英国 QinetiQ 公司提出了超大视场编码孔径成像技术,其核心思想是在成像系统探测器加入编码掩模版,使得每个小孔的图像被同一个焦平面阵列记录。该系统采用多个通道实现并行图像采集。将已知的掩模版结构作为先验知识,通过解卷积运算重建出高分辨率图像。该技术已被应用到机载红外探测中,对广阔的城区和战场内的移动目标进行长时间侦察。

起初, QinetiQ 公司想要借助 γ 射线或者 X 射线中常用的编码无透镜成像方案来实现高分辨率红外探测^[45],如图 13(a)所示。这种方式虽然省去了传统成像系统中的透镜,能够避免镜头带来的像差影响,但是将透镜换成掩模版,本质上是基于小孔成像理论,因此光能量损耗严重,特别在中波红外波段无法

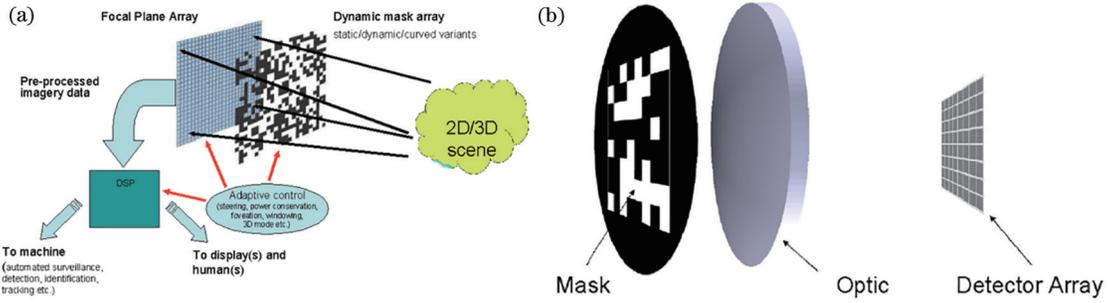


图 13 QinetiQ 研发的两种孔径编码成像方案。(a)无透镜孔径编码成像方案^[45];(b)基于透镜的孔径编码成像方案^[46]

Fig. 13 Two aperture coding imaging schemes developed by QinetiQ. (a) Lensless aperture coding imaging scheme^[45]; (b) lens based on aperture coding imaging scheme^[46]

获得较高的成像信噪比。为了解决能量损耗严重的问题,他们将方案切换到基于透镜的孔径编码成像,提出一个微型光机电系统(MOEMS),在系统中加入一个中波红外波段的二元光学开关器件[图 14(a)]来显示设计的掩模版图案,并将其安置于透镜的前

焦面进行孔径调制,以保证所采集的强度信息随所使用的掩模版图案变化。通过标定系统的点扩散函数来优化重建图像,最后从多幅图 14(c1)所示的低分辨率图像中重建出图 14(c2)所示的高分辨率图像^[48]。

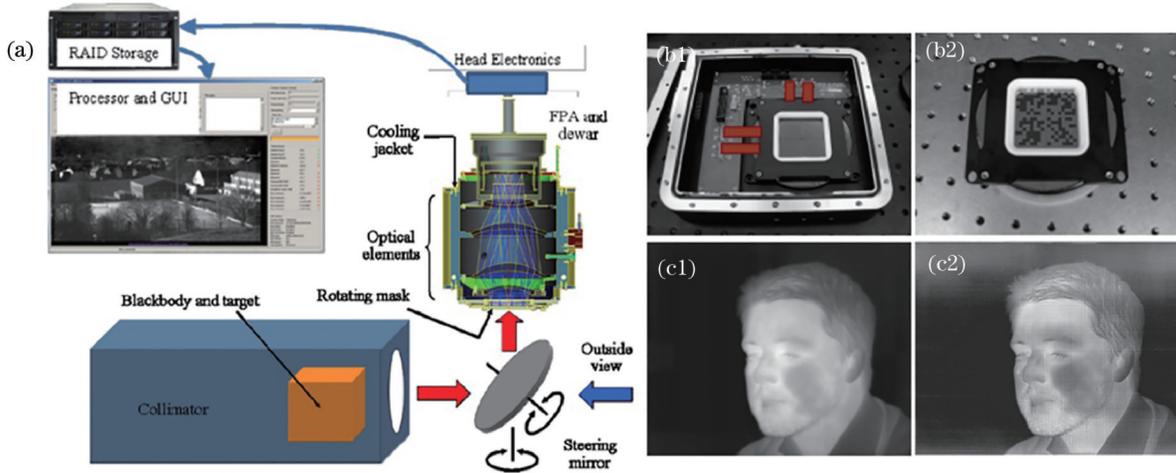


图 14 基于二元光学开关器件的成像系统及相应重建结果。(a)QinetiQ 研发的基于孔径编码的大口径红外监控系统(摆镜的作用是自动切换黑体辐射源与目标场景)^[47];QinetiQ 研发的(b1)基于 MOEMS 的二元光学开关组件及(b2)二元光学开关器件实物图^[47];(c1)低分辨率红外图像及(c2)系统实现的超分辨重构结果^[48]

Fig. 14 Imaging system based on binary optical switching devices and corresponding reconstruction results. (a) Large aperture infrared monitoring system based on aperture coding developed by QinetiQ (the role of swing mirror is to automatically switch between the blackbody radiation source and the target scene)^[47]; (b1) binary optical switch component based on MOEMS and (b2) physical image of the device developed by QinetiQ^[47]; (c1) low resolution infrared image and (c2) super-resolution reconstruction result achieved by the system^[48]

2015 年,美国莱斯大学 Chen 等^[49]基于 CS 理论设计特定的编码规则,对单像素相机进行编码调控,在光路系统中加入数字微镜器件(DMD)并控制 DMD 的反射镜角度来调整入射光线的反射方向,以实现“0”“1”编码的目的;经过多次测量记录不同编码下的数据,并进行超分辨重建。2015 年,他们又将该技术拓展到近红外波段,实现了单像素近红外成像(图 15)。基于 CS 的单像素成像系统的最大缺陷是将原本探测器成像面阵的高要求“转嫁”到空间光调制器件上,要想实现高分辨率探测,则空间光调制器的尺寸就要足够小,这在很多光学波段例如中长波红外波段中是难

以实现的。2008 年, Marcia 等^[50]提出一种基于 CS 的编码孔径成像方法,通过设计一种满足块循环矩阵的伪随机编码的孔径模板,可在一定程度上提高数据采集效率,仅利用一次测量即可实现高分辨率图像重建,但其还是基于无透镜孔径编码结构,成像质量仍有待提升,本文仅给出该方法的仿真结果,如图 16 所示。

2012 年,国防科技大学 Xiao 等^[51]结合焦平面编码掩模版成像思想,通过在成像系统传感器前放置二值掩模版来实现稀疏离散采样,并结合 CS 重建算法完成对红外图像的超分辨重建,如图 17 所示。传感器并不是按照原来的采样间隔方式对场景进行等间距采样,

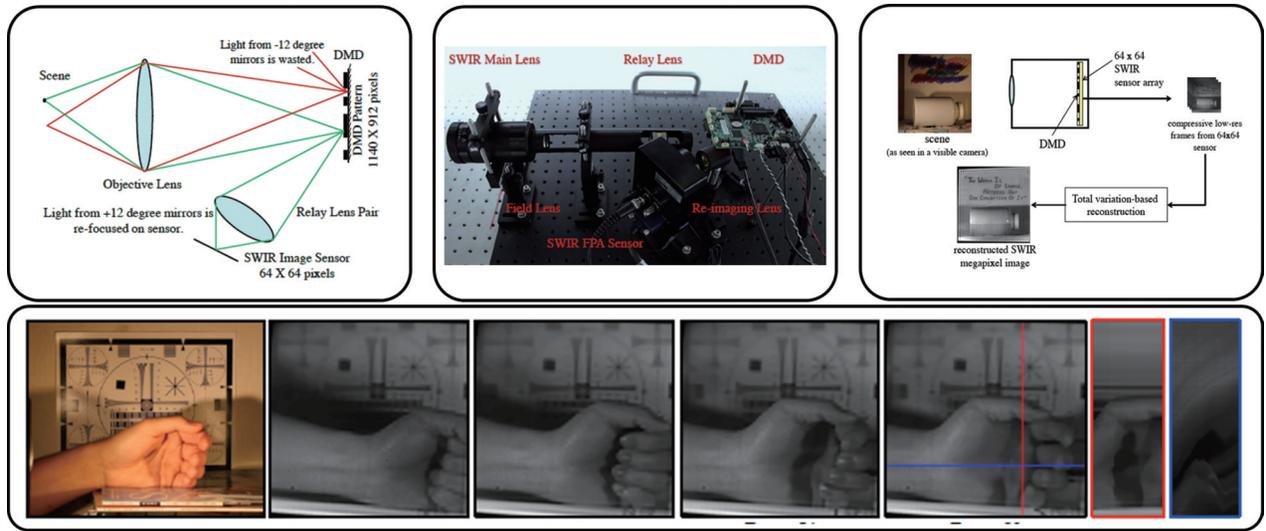


图 15 莱斯大学研制的基于 CS 理论的超分辨近红外成像系统^[49]

Fig. 15 Near-infrared super-resolution imaging system based on CS theory developed by Rice University^[49]

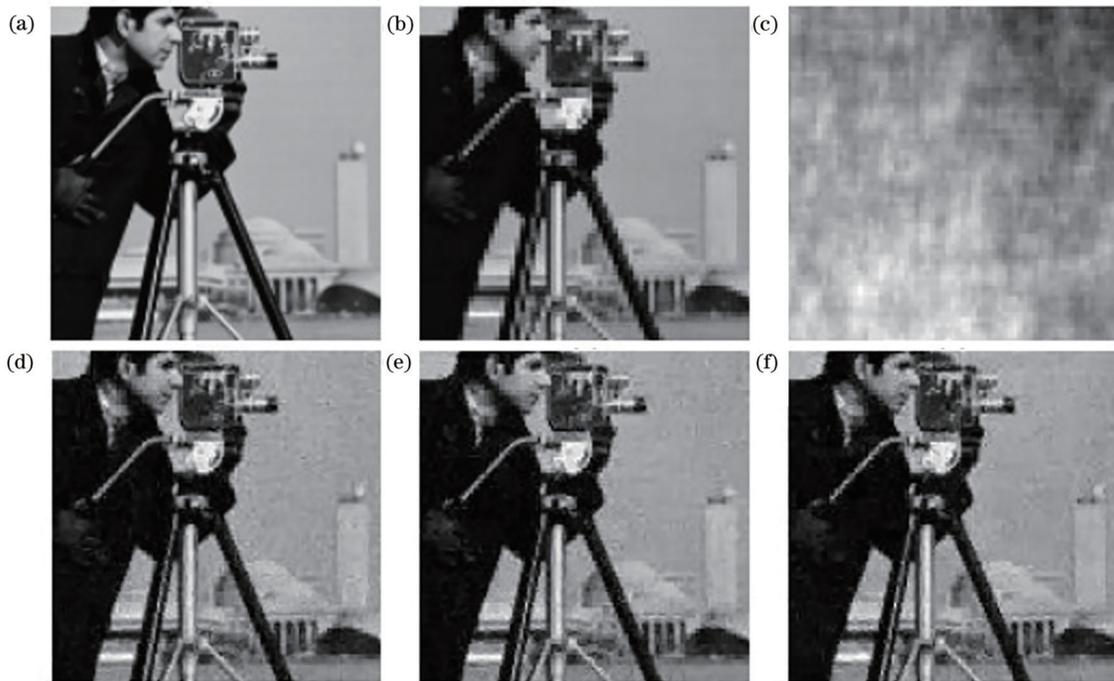


图 16 压缩编码孔径超分辨率成像结果^[36]。(a) 真值图像；(b) 未编码的低分辨率图像，均方根误差(MSE)为 0.1011；(c) 低分辨率调制图像；(d) 对低分辨率调制图像的重建效果，MSE 为 0.0867；(e)(f) 调整 h 、 p 参数后的重建图像，MSE 分别为 0.0897 和 0.0924

Fig. 16 Compressed encoding aperture super-resolution imaging results^[36]. (a) Ground truth image; (b) uncoded low resolution image, with root-mean-square error (MSE) is 0.1011; (c) modulated low resolution image; (d) reconstruction effect of low resolution modulation image with MSE of 0.0867; (e) (f) reconstructed images after adjusting the parameters of h and p , with MSEs of 0.0897 and 0.0924, respectively

而是按照传感器表面的掩模版分布对图像进行压缩采样, 图像信息被稀疏地记录在传感器上, 然后使用梯度投影稀疏重建(GPSR)算法从一系列低分辨率图像中重建出高分辨率图像, 所提出方法可将红外图像成像分辨率提高 33%, 其峰值信噪比(PSNR)大于 26.00。

2023 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Li 等^[52] 提出一种新型高分辨率压缩成像系统, 采

用基于时间延迟积分(TDI)和编码曝光(CECI)相结合的压缩成像技术来实现超越奈奎斯特采样的高分辨率成像。CCD 在不同的读出电路通道和特定的编码曝光时间下接收光子并将其转换成电荷的过程中, 电荷会在像元上产生亚像素位移, 这为亚像素超分辨率成像提供了一种新的调控机制。由于电荷转移只能在单个空间维度上提供亚像素采样, 他们设计了一种双臂

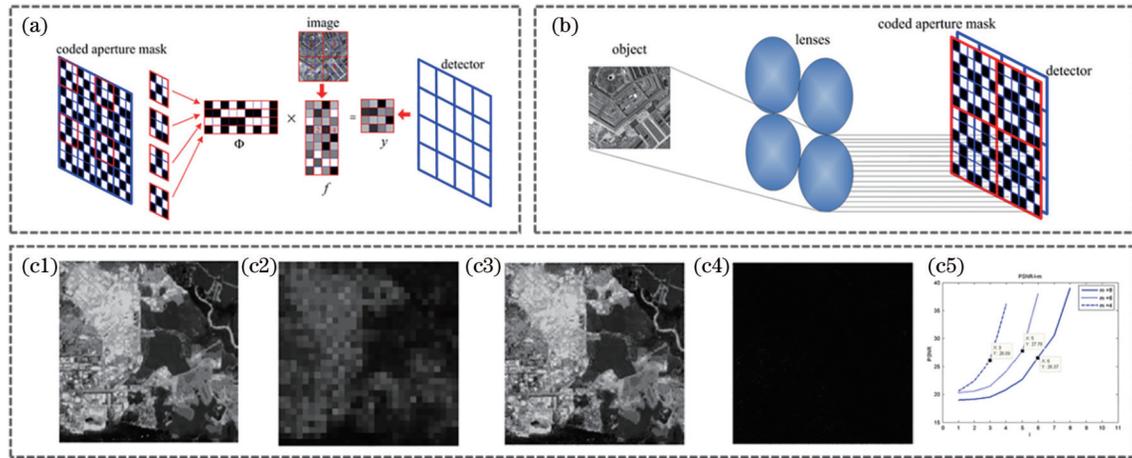


图 17 基于 CS 理论的孔径编码超分辨成像方案^[51]。(a)基于 CS 理论的孔径编码超分辨成像原理;(b)基于 CS 理论的孔径编码超分辨成像正向模型;(c1)原始 240 pixel×240 pixel 红外图像;(c2)编码的低分辨率红外图像;(c3)超分辨重建图像;(c4)真值图像与超分辨图像的误差;(c5)不同重建倍数下的重建图像的 PSNR

Fig. 17 Coded aperture super-resolution imaging scheme based on CS theory^[51]. (a) Principle of coded aperture super-resolution imaging based on CS theory; (b) forward model of coded aperture super-resolution imaging based on CS theory; (c1) original infrared image with 240 pixel×240 pixel; (c2) encoded low resolution infrared-image; (c3) reconstructed super-resolution image; (c4) error between true value image and super-resolution image; (c5) PSNR of reconstructed image at different reconstruction magnifications

架构来同时捕获两个空间维度的亚像素信息,如图 18(a)所示。采用遗传算法优化了曝光序列,如图 18(c)所示,并加入自适应正则化参数调整 (ARPT)

算法对低分辨率图像进行重建,以实现超分辨率成像,如图 18(d)所示。该系统无需额外的编码设备,通过编码曝光的方式即可实现图像分辨率的稳定提升。

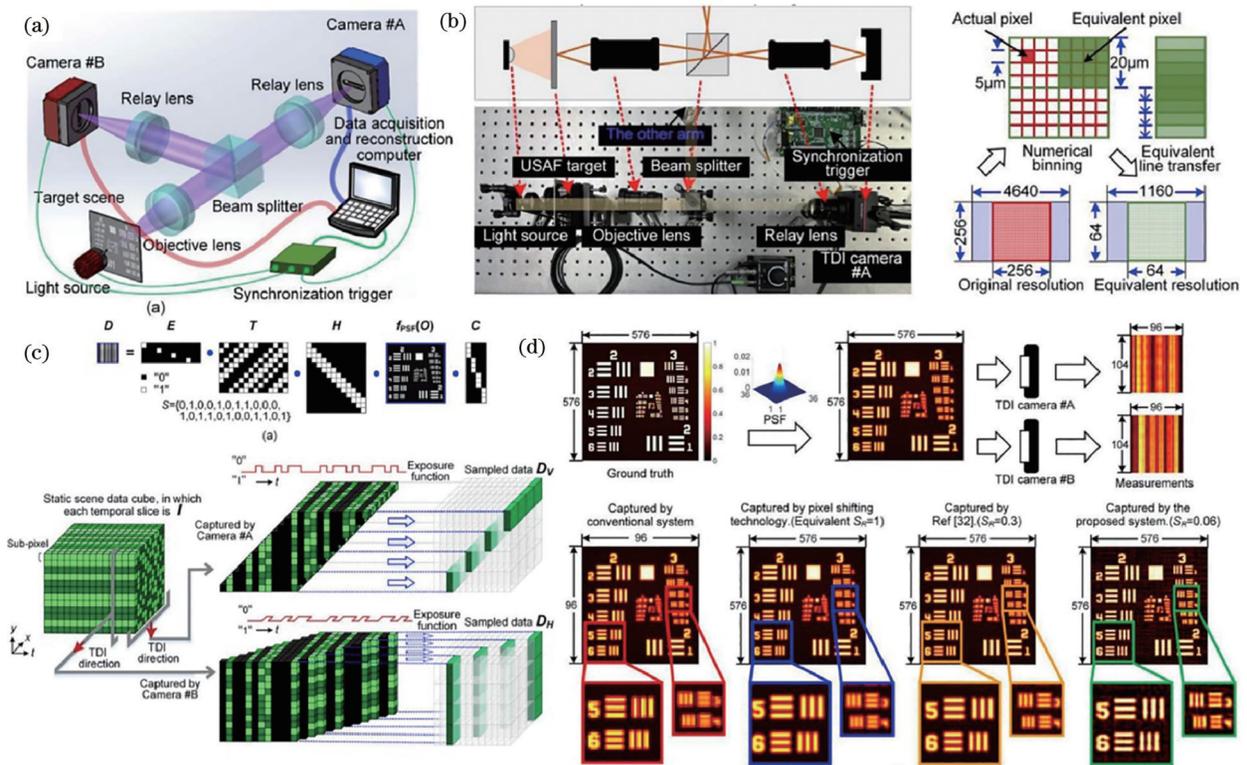


图 18 基于时间延迟和编码曝光的超分辨成像方案^[52]。(a) TDI CECI 系统的架构;(b) TDI CECI 系统实验装置图;(c) 编码曝光和 TDI 线传输之间的定时同步方案;(d) 超分辨成像结果对比

Fig. 18 Super-resolution imaging scheme based on time delay and encoding exposure^[52]. (a) Architecture of TDI CECI system; (b) experimental setup of TDI CECI system; (c) timing synchronization scheme between encoding exposure and TDI line transmission; (d) super-resolution comparison results

2.3 多孔径像素超分辨成像技术

无论是被动多帧微扫描技术还是主动多帧微扫描技术,都需要捕获一系列亚像素位移低分辨率图像来重建得到高分辨率图像,这种方法的一个缺点是需要牺牲时间来换取空间分辨率,且采集图像效率低,难以实现实时超分辨成像。多孔径像素超分辨成像借助多相机或相机阵列同时捕获同一场景的信息,通过配准多相机视角获得帧间亚像素级变化,有效解决了串行编码系统图像采集效率低的问题。这种方式还能够克

服单相机系统低空间带宽积的问题,实现大视场高分辨成像探测^[14]。

2005年,斯坦福大学 Wilburn 等^[53]针对单相机的光学成像系统难以同时获得大视场高分辨率的高带宽积图像,搭建了一套由 100 台相机组成的大型复眼阵列成像系统,如图 19 所示。使用并行采集目标场景图像的方法,在提高图像采集效率的同时获得目标图像的多视角信息,经过配准对齐后实现亚像素超分辨成像或实现高动态全景视频采集。

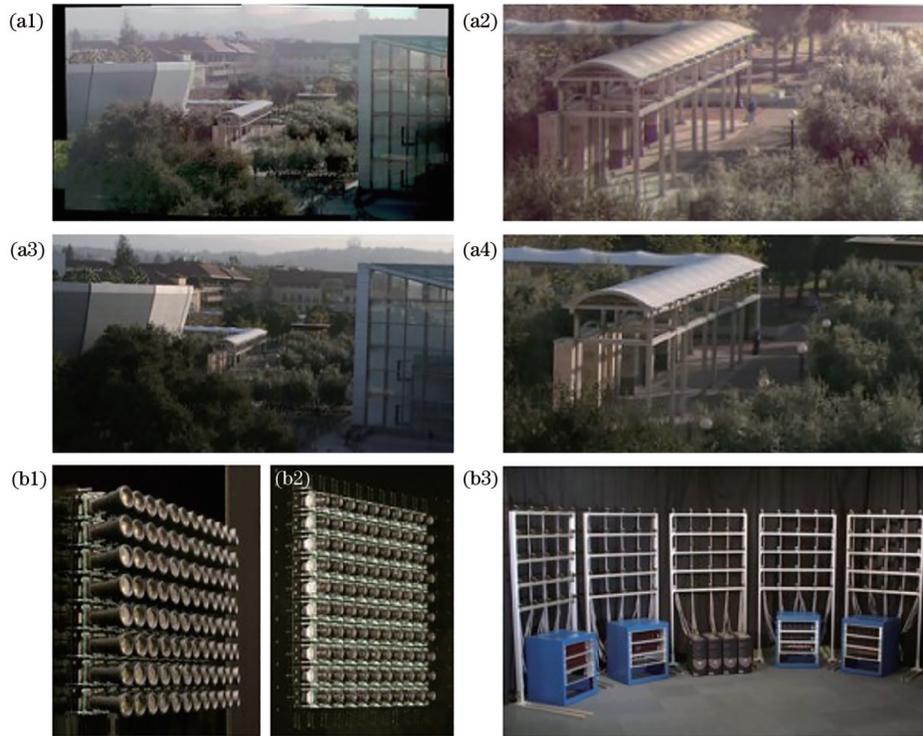


图 19 阵列相机成像方案^[53]。(a1)采用 4 台相机在不同曝光时间下拍摄到的合成图像;(a2)采用 4 台相机拍摄的合成图像局部细节;(a3)采用佳能 20D 拍摄的图像;(a4)采用佳能 20D 放大的局部细节;(b1)装配长焦镜头的相机阵列,这种结构用于高分辨率成像;(b2)装配广角镜头的相机阵列,这种结构用于高速视频成像;(b3)配备独立处理器的复眼阵列系统

Fig. 19 Camera array imaging scheme^[53]. (a1) Synthetic image captured by four cameras at different exposure time; (a2) local detail of synthetic image captured by four cameras; (a3) image captured by Canon 20D; (a4) enlarged local detail of image captured by Canon 20D; (b1) a camera array equipped with a telephoto lens for high-resolution imaging; (b2) a camera array equipped with a wide-angle lens for high-speed video imaging; (b3) a compound eye array system equipped with an independent processor

2007年,新墨西哥大学 Prasad 课题组^[54]结合 Fish 信息理论、光学设计以及计算处理,提出一种光学-数字集成相机阵列系统,即周期性相机阵列系统(PERIODIC)。该系统通过将不同的光学元件(如偏振器、光谱滤色片、中性密度滤色片等)与微透镜阵列相结合集成到探测器表面,即可在单片探测器上捕获到更多的目标场景信息,除了能够实现亚像素超分辨成像,该系统还能够实现偏振去除眩光、高动态范围成像。2023年,清华大学曹良才课题组^[55]将多孔径阵列相机与正则化超分辨算法结合,实现了多帧亚像素位移超分辨重建,该方法在未知亚像素位移的情况下进行多孔径图像采集,经过增强相关系数算法配准得到精确的运动矢量矩阵,再采用正则化权重超分辨算法进行重建恢

复,并在超分辨算法中加入 APRT 方法,如图 20(c)所示,以加快超分辨率算法中正则化参数的更新速率,有效提升重建精度,实现 2 倍速率的像素超分辨成像。

上述提到的多孔径相机阵列本质上是在多个探测器面上并行探测获取目标场景的亚像素位移信息,这种复眼结构虽然能够提升图像采集效率,但是需要使用多个子眼相机构成一个大的阵列系统,导致系统功耗、体积、质量、数据存储处理复杂度明显增加。2007年,香港浸会大学 Chan 等^[56]提出一种微型复眼超分辨率成像系统,如图 21(a)所示。该系统通过在探测器前端放置微透镜阵列,实现单次曝光下,在单个探测器上获得具有亚像素偏移的低分辨率图像,再经过超分辨率重建算法迭代求解出高分辨率图像,重建结果如图 21(b)所示。

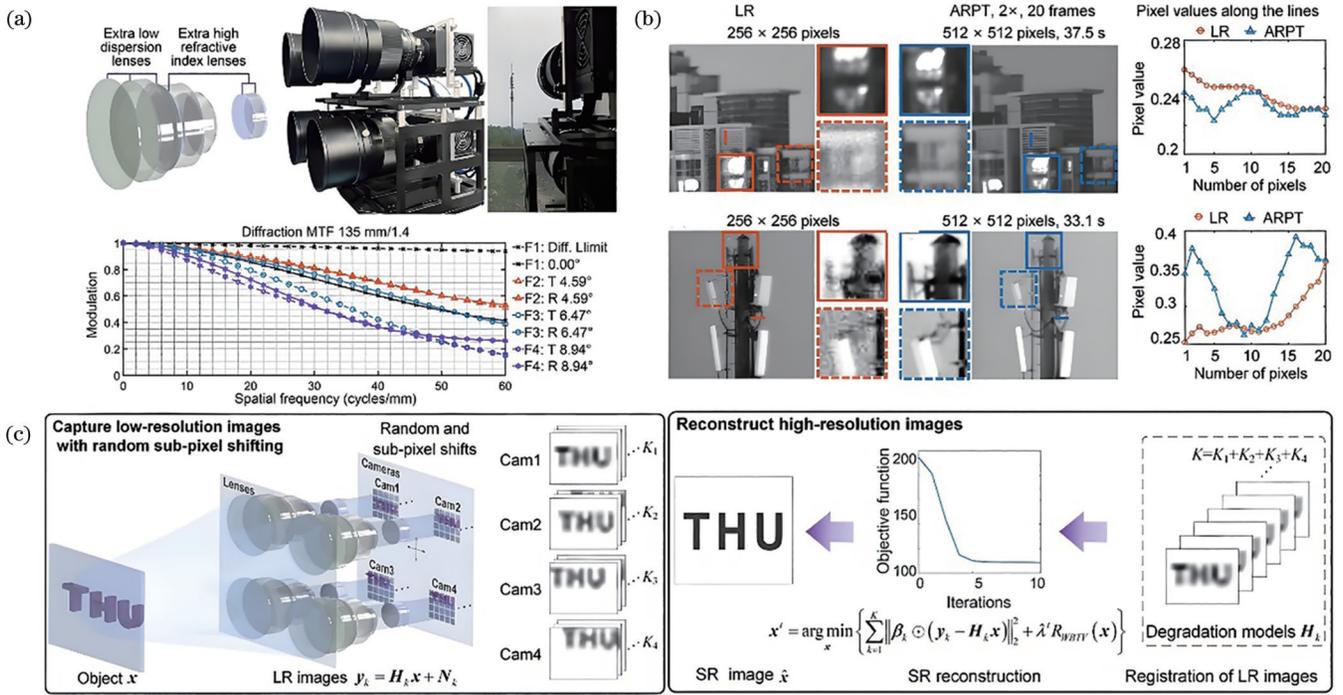


图 20 基于相机阵列的亚像素超分辨率成像方法^[55]。(a)四相机阵列超分辨系统；(b)超分辨重建结果与低分辨率图像的对比；(c)相机阵列成像正向模型以及亚像素超分辨原理示意图

Fig. 20 Sub-pixel super-resolution imaging method based on camera array^[55]. (a) A four camera array super-resolution system; (b) comparison between super-resolution reconstruction results and low resolution images; (c) schematic of forward model and sub-pixel super-resolution principle for camera array imaging

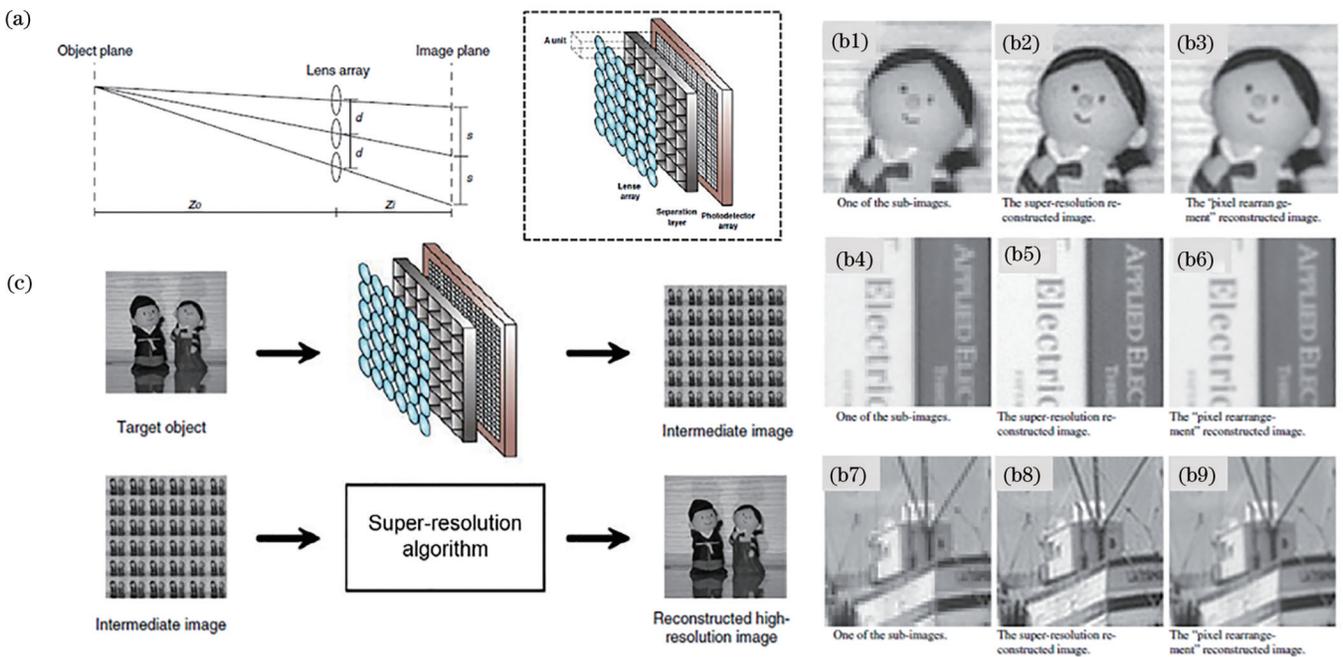


图 21 基于微透镜阵列的超分辨重建结果^[56]。(a)由透镜阵列中各个透镜产生的子图像的相对位移量示意图；(b1)-(b4)-(b7)不同场景的低分辨率图像；(b2)-(b5)-(b8)采用该方法的超分辨重建结果；(b3)-(b6)-(b9)采用像素重排的超分辨结果；(c)微透镜阵列复眼相机亚像素超分辨率成像流程图

Fig. 21 Super-resolution reconstruction results based on micro lens array^[56]. (a) Schematic of relative displacement of sub images generated by each lens in the lens array; (b1)-(b4)-(b7) low resolution images of different scenes; (b2)-(b5)-(b8) super-resolution reconstruction results using the proposed method; (b3)-(b6)-(b9) super-resolution results using pixel rearrangement; (c) sub pixel super-resolution imaging flowchart for micro lens array compound eye camera

2024年,广东工业大学Wu等^[57]为了解决微透镜成像系统中成像分辨率和亮度对比度低的问题,提出一种微透镜超分辨成像算法。该算法使用Otsu-K-means基于重力的中心提取方法将微透镜阵列成像

系统捕获的图像分割成许多子图像,同时采用增强相关系数的方法来对齐子图像后,并结合最大后验概率算法对配准后的子图像进行超分辨重建,实现了1.4倍像素分辨率的提升,如图22所示。

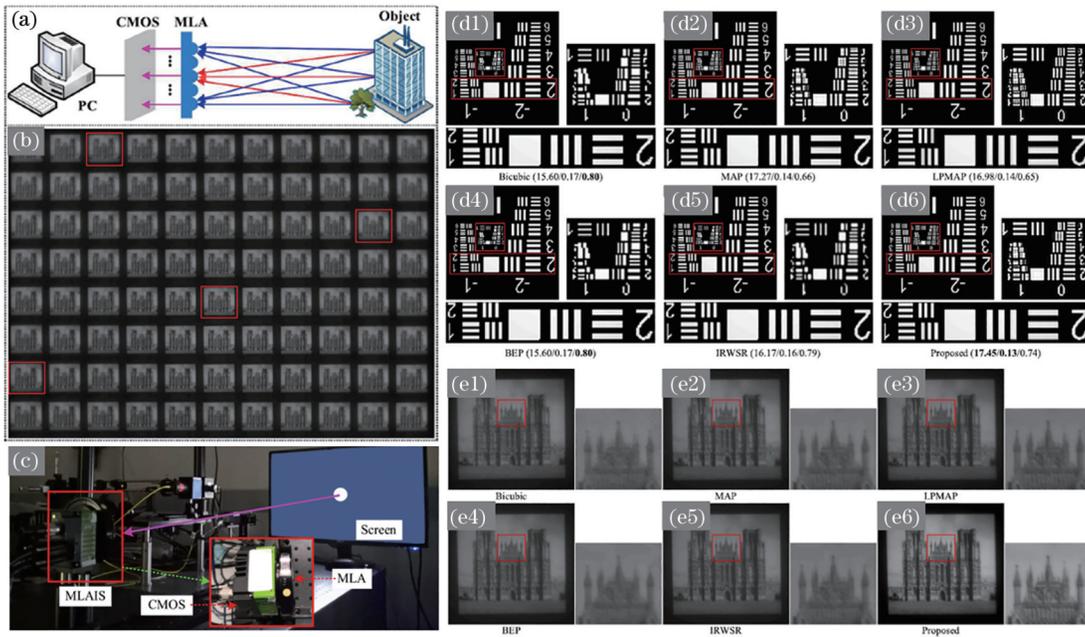


图 22 基于微透镜阵列的超分辨成像方案^[57]。(a)微透镜阵列系统原理;(b)经过微透镜阵列拍摄的低分辨率图像;(c)系统实物图;(d)不同超分辨算法的仿真重建结果;(e)不同超分辨算法的仿真重建结果

Fig. 22 Super-resolution imaging scheme based on micro lens array^[57]. (a) Principle of micro lens array system; (b) low resolution images captured by micro lens array; (c) physical image of the system; (d) simulation reconstruction results of different super-resolution algorithms; (e) simulation reconstruction results of different super-resolution algorithms

3 焦平面光场感知

如前文所述,全光函数所描述的“高维光场”具有7个维度,而本节所描述的焦平面感知“光场”则是大众所熟知的包含位置(z)和方向信息(θ, ψ)的“四维光场”,即具有位置信息(x, y, z)的光线在空间中沿(θ, ψ)方向传播。Levoy等^[58]提出了光场渲染理论,认为只需要两个平行的平面,即可对空间中任意的光线(携带强度的方向信息)进行完整记录。四维光场函数 $L(u, v, s, t)$ 中的(u, v)与(s, t)即为所记录的光线与两个平面相交的空间坐标,如图23(a)所示。

通过在焦平面上加入微透镜阵列或者特殊结构的掩模版,即可对光场信息进行编码调控,从而获得二维强度的光场编码图像堆栈;结合最优化方法及深度学习等重建方法即可实现光场信息的求解与感知,如图23(b)所示。此外,利用获取的光场信息,结合数字重聚焦技术能够实现运动目标的全温全时全聚焦稳定成像;结合图像反卷积技术则能够实现大气湍流与成像系统像差校正,如图23(c)所示。

需要注意的是,对光场(角度/深度)维度进行感知时,需要其他维度做出一定的“牺牲”,例如,微透镜阵列是用空间分辨率的降低去换取角度信息的提升,基

于掩模版的方式则是用空间信息的复用去置换深度信息的有效编码。本节主要对基于微透镜阵列及掩模版调制(透镜成像与无透镜成像)的两种焦平面编码调控光场感知的实现方式进行归纳总结。

3.1 基于微透镜阵列的光场感知技术——空域编码复用

3.1.1 波前传感器

由Hartmann发明的Hartmann传感器是一种重要的斜率检测方法,其结构简单,可精确地获得波前斜率值,并用于望远镜焦点校正。Hartmann板由放置在望远镜孔径位置的一系列小孔组成。当人们观察一颗恒星时,使用照相板(photographic plates)将焦点前后的图像记录下来。将拍摄的两幅图像的小点对应相连,即可测量波前斜率,以校正望远镜在焦平面上形成的图像。

1971年,Shack和Platt^[59]改进了Hartmann板,原始的孔阵列被微透镜阵列取代,以优化受大气层扰动影响的地面望远镜获取的卫星图像。在所提出的设计中,相较于对入射光能量有一定衰减的物理强度掩模版,具有聚光能力的微透镜使得波前传感的光效率得到相应提升。每个微透镜阵列子孔径内的分割波前被微透镜聚焦,形成光斑投射在光电探测器上。通

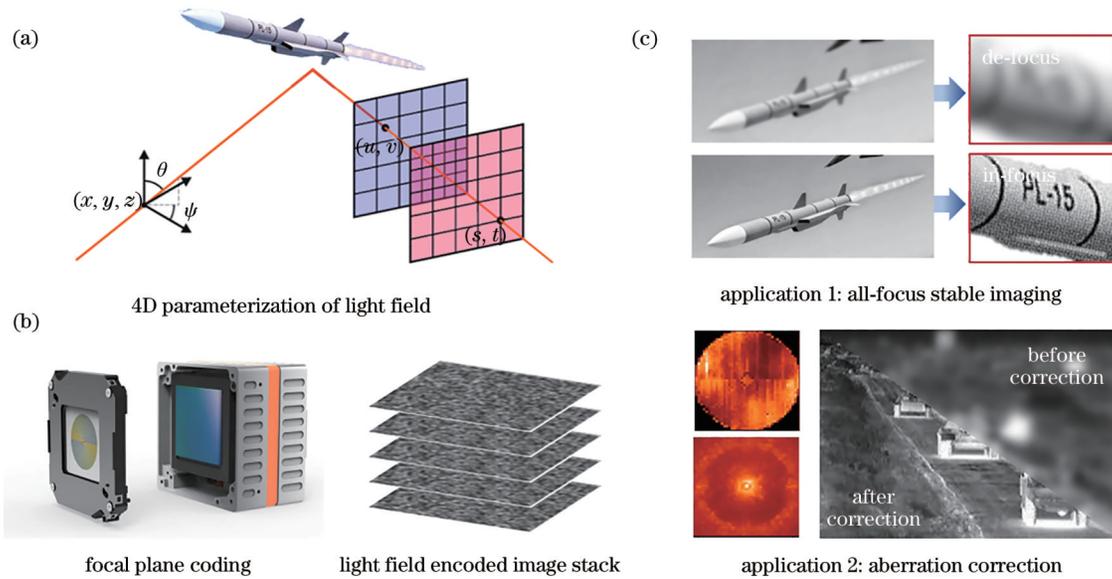


图 23 基于焦平面编码的光场感知技术。(a)光场的四维(4D)参数化;(b)在焦平面位置处进行编码调控,获取光场编码图像堆栈;(c)光场感知在全聚焦成像与像差校正方面的应用

Fig. 23 Light field sensing based on focal plane coding. (a) Four-dimensional (4D) parameterization of light field; (b) light field coded image stack obtained by encoding at the focal plane; (c) application of light field sensing in all-focus imaging and aberration correction

通过对每个子孔径内光斑的质心位置进行精确探测,可以计算出该子孔径波前的局部斜率。结合先进的波前重构算法,这些局部斜率信息被综合起来,以恢复出整个波前形态。这种传感器被命名为 Shack-

Hartmann 波前传感器(SHWFS),它以结构简单、成本效益高而著称,特别适用于波前低阶像差的测量^[59],如图 24 所示。从 1974 年开始,Shack-Hartmann 传感器被用于激光测试,以及自适应光学、角膜轮廓测量、

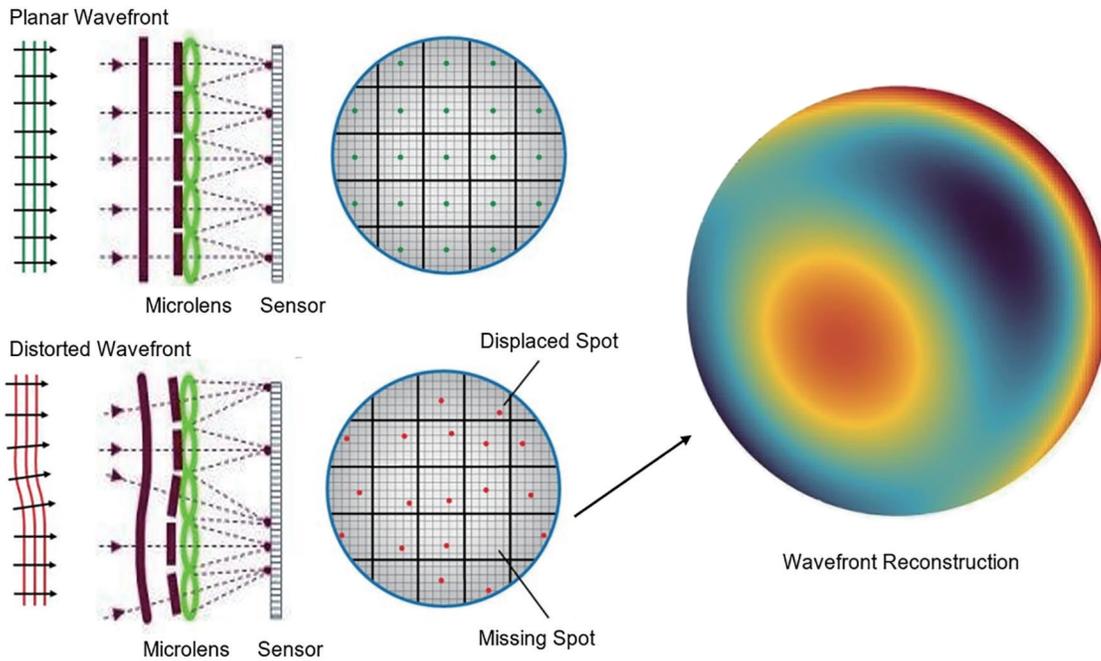


图 24 Shack-Hartmann 波前传感器^[59]。由微透镜阵列分割的不同子孔径波前被反射为像面内不同强度分布的光斑,通过对每个子孔径内光斑的质心位置进行精确探测,可以计算出该子孔径波前的局部斜率,并结合波前重构算法即可恢复出整个波前的形态

Fig. 24 Shack-Hartmann wavefront sensor^[59]. The wavefronts of different sub-apertures segmented by microlens array are reflected as spots with different intensity distributions in the image plane. The local slope of the wavefront of each sub-aperture can be calculated by accurately detecting the centroid position of the spot in each sub-aperture. The wavefront reconstruction algorithm is used to recover the whole wavefront shape

光学系统对准和半导体晶圆表征等。1996年,与可变形镜相结合的 Shack-Hartmann 波前传感器能够在闭环控制中消除眼像差并改善眼底成像质量。此外,通过适当的调整和配置,Shack-Hartmann 波前传感器也能够被应用于精密的表面形状测量。对于小型光学元件,如手机摄像模组中的镜头,Shack-Hartmann 波前传感器仅需要单次测量即可获得所需数据,从而在自动化测试站中实现快速且高效的测量。如今,具有结构简单、测量高效等特性的 Shack-Hartmann 波前传感器成为光学计量与自适应光学中最常用的波前检测和引导工具之一。

随着空间光调制技术的发展,2019年 Wu 等^[60]利用空间光调制器(SLM)实现了一种高分辨率波前成

像传感器(WISH)。整个系统由分束器、空间光调制器与图像传感器构成,如图 25(a)所示。WISH 通过捕获不同 SLM 模式下传感器测量图像堆栈,实现超过 1000 万像素的高分辨率光场信息重建。为了扩大成像深度范围并提高处理深度的不连续性,2020 年 Wu 等^[61]在 WISH 的基础上提出一种结合双波长调控及波前传感的新型三维传感器(WISHED),如图 25(b)所示。该传感器记录两个不同波长的复振幅场的波前,并通过关联这些波前产生合成波长。实验结果表明,WISHED 可解译的深度范围比单一波长测量方法高出 3 个量级,其对于光滑物体的深度精度高达 $9\ \mu\text{m}$,对于粗糙物体的重建深度精度可达到 $69\ \mu\text{m}$ 。

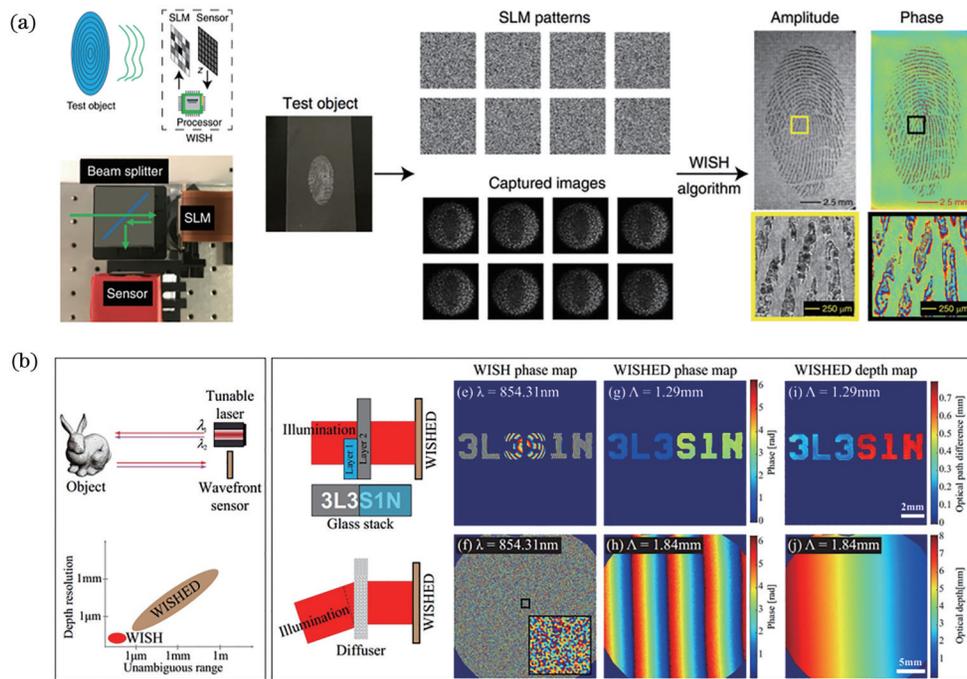


图 25 基于 SLM 的高分辨率波前传感器。(a)WISH 成像系统及其指纹目标重建结果^[60]; (b)WISHED 成像系统,利用双波长关联产生合成波长,实现高精度波前传感^[61]

Fig. 25 High-resolution wavefront sensor based on SLM. (a) WISH imaging system and its fingerprint target reconstruction results^[60]; (b) WISHED imaging system, which uses dual-wavelength correlation to generate synthetic wavelengths for high-precision wavefront sensing^[61]

3.1.2 基于全光相机的宏观成像

1908年,Lippmann^[3]提出了“整体摄影”(integral photography),即使用一组紧密间隔的小球面镜来拍摄场景,记录从不同空间位置观察的场景图像,而结合多个成像镜头或孔径来记录光场的方法也是最早的光场成像方法之一。1992年,Adelson和Wang^[62]提出一种能够捕获 5×5 个角度方向与 100×100 横向分辨率的光场相机,该相机被称为“单镜头立体”(single lens stereo)光场相机。2005年,Levoy课题组^[63]研制出一款手持式光场相机,通过在传感器和主镜头之间插入 296×296 微透镜阵列,对入射的光线信息沿着不同的方向进行调制,最终实现 14×14 个角度方向的光场信

息获取。上述空间多路复用光场成像设备被称为“全光相机”^[64]。全光相机有两种架构:原始的全光相机 1.0^[62-63](又称为“非聚焦全光相机”)和改进的全光相机 2.0^[65-67](又称为“聚焦全光相机”)。全光相机 1.0 和 2.0 的主要差异在于其微透镜阵列的位置不同,进而影响了光场信息的采样方式,如图 26(a)所示。全光相机 1.0 的微透镜阵列与主透镜的像平面重合,而传感器位于微透镜阵列后的一个微透镜焦距处。因此,聚焦在像平面上的光线被重新扩展为传感器上未聚焦的圆形子图像,占据与微透镜相同的面积。Raytrix^[68]和 Lytro^[69]分别生产了用于消费者市场和企业市场的光场相机,它们属于全光相机 1.0 类别。相比之下,

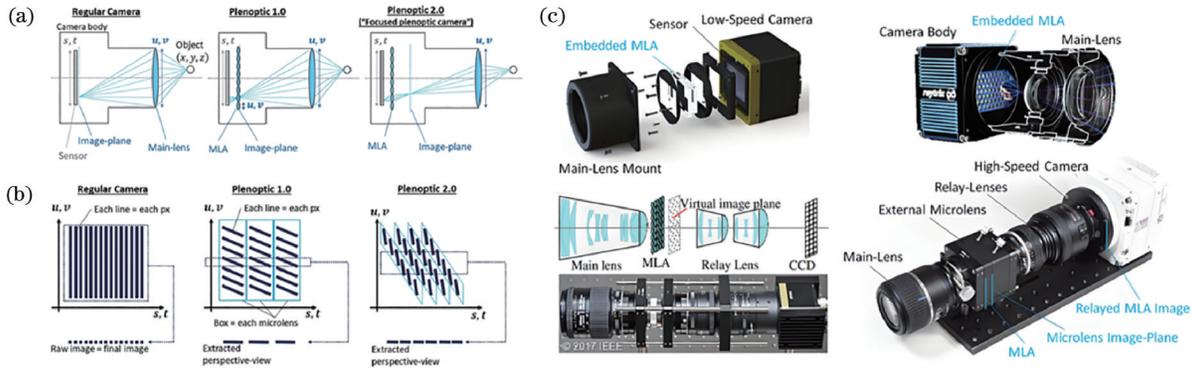


图 26 用于宏观成像的全光相机^[64]。(a)传统相机与全光相机 1.0 和 2.0 的结构比较;(b)传统相机与全光相机 1.0 和 2.0 的记录信息比较,该示意图显示了焦平面物体的采样,当光线来自焦平面以外时会发生剪切;(c)全光相机的不同硬件实施方式
Fig. 26 Plenoptic camera for macroscopic imaging^[64]. (a) Structure comparison between conventional cameras and plenoptic cameras 1.0 and 2.0; (b) comparison of recorded information between conventional cameras and plenoptic cameras 1.0 and 2.0, and the diagram shows the sampling of focal plane object, which is clipped when the light comes from outside the focal plane; (c) different hardware implementations of plenoptic cameras

全光相机 2.0 的微透镜阵列聚焦在像平面上,每个微透镜可认为是一个微型中继透镜^[70]。全光相机 2.0 由于像素跨越更大范围,生成无伪影图像的难度更大,通常需要额外的处理算法来抑制伪影的生成。

上述基于空间复用的全光相机始终存在图像传感器角度分辨率和空间分辨率之间的权衡。为了解决这一问题,Wu 等^[71]提出一种焦平面集成的扫描光场成像传感器,如图 27(a)所示。该传感器也被称为

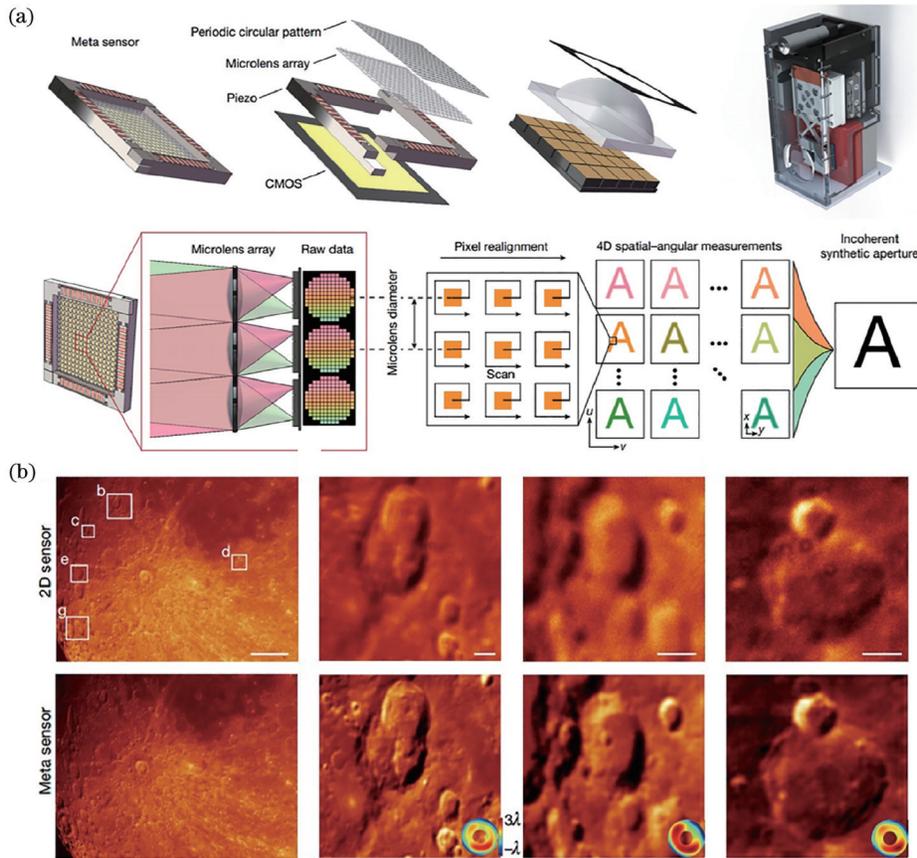


图 27 元成像传感器。(a)由带有圆形强度掩模版的周期性图案、微透镜阵列、压电位移台以及 CMOS 传感器组成的元成像传感器^[71];(b)结合地面望远镜对含有动态湍流的图像进行数字自适应光学重建^[72]
Fig. 27 Meta-imaging sensor. (a) Meta-imaging sensor composed of a periodic circular pattern with a circular intensity mask, a microlens array, a piezo stage, and a conventional CMOS sensor^[71]; (b) digital adaptive optical reconstruction of images containing dynamic turbulence carried out with a ground-based telescope^[72]

元成像传感器(meta-imaging sensor),能够在现有光学成像系统的基础上,实现高速像差校正与三维摄影等应用,而无需额外的硬件修改。元成像传感器通过对微透镜阵列进行高频振动编码来实现具有亚像素精度的四维光场信息捕捉,从而在后处理中实现灵活而精确的光场调制图像合成。利用该传感器,可在没有数据先验的情况下,使用单个塑料镜头实现高达 10 亿像素的宽视场高分辨率成像,从而使光学成像系统的体积与成本降低数个量级。即使在存在动态大气湍流的情况下,元成像传感器也能够 在 80 cm 口径望远镜上实现 1000" 有效视野直径范围内的多区域

动态像差校正,显著提升了成像分辨率与信噪比,有望实现高通量高分辨率地基光学巡天^[72],如图 27(b)所示。

3.1.3 显微成像

2006 年,Levoy 等^[73-74]提出了光场显微镜的概念,其基本结构如图 28 所示。在传统的科勒照明场显微镜中,通过巧妙地插入微透镜阵列实现了对生物样本的光场成像。这一创新成像系统不仅能够捕获样本在多个视点和不同焦平面上的显微图像,还通过应用光强堆栈和点扩散函数,结合三维(3D)反卷积算法,能够从单帧图像中重建出三维体结构。

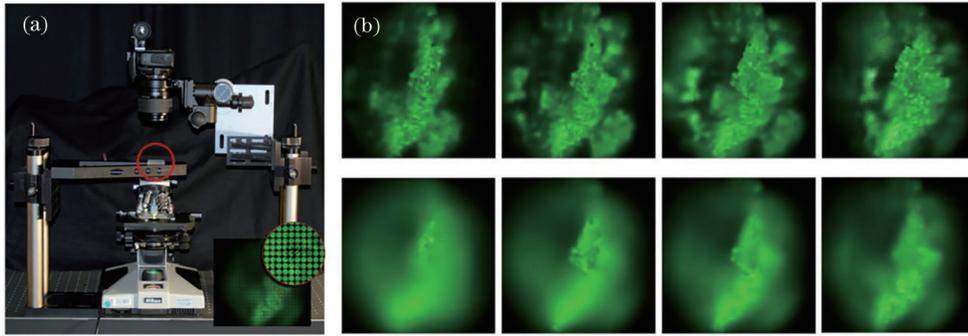


图 28 光场显微镜^[73-74]。(a)由尼康 Optiphot 和定制微透镜阵列(红色圆圈)组成的显微镜原型;(b)通过显微镜物镜和微透镜阵列拍摄的荧光蜡粒光场图像

Fig. 28 Light field microscope^[73-74]. (a) Microscope prototype composed of a Nikon Optiphot and a custom microlens array (red circle); (b) light field images of fluorescent wax particles taken through microscope objective and microlens array

此后,基于微透镜阵列的光场显微镜在生物成像领域发挥着重要的作用。Prevedel 等^[75]使用光场显微成像技术观察动物目标的神经元活动,实现了对秀丽隐杆线虫和斑马鱼幼虫大脑中神经元活动的功能性成

像,且分辨率达到单个神经元尺度,实验结果如图 29(a)所示。Cong 等^[76]使用多焦点微透镜阵列来构建光场显微镜,用于观察自由游动的幼年斑马鱼的全脑神经活动,并在幼年斑马鱼的视觉诱发和捕食期间

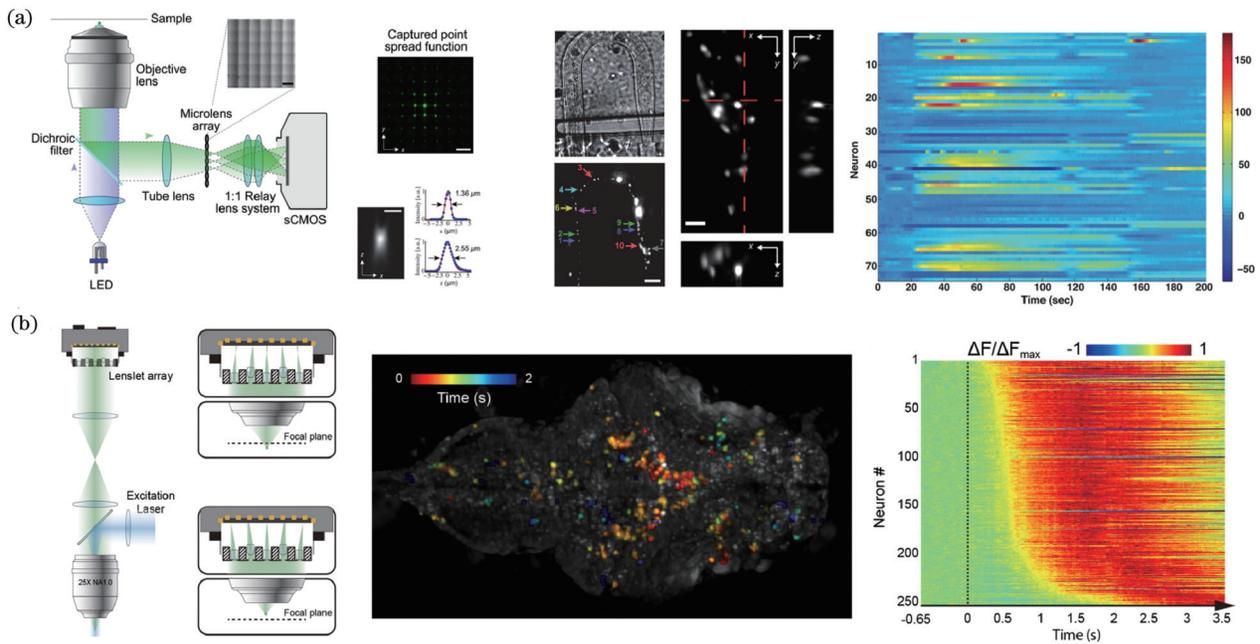


图 29 用于动物脑神经成像的光场显微镜。(a)光场显微成像结构及其实验结果^[75];(b)使用光场显微镜对斑马鱼进行成像^[76]
Fig. 29 Light field microscopy used for neuroimaging of animal brains. (a) Light field microscopic imaging structure and its experimental results^[75]; (b) light field microscopy used to image zebrafish^[76]

进行神经活动的功能性成像,实验结果如图 29(b)所示。

结合自适应光学技术,Wu等^[77]提出了数字自适应光学扫描光场相互迭代层析成像(DAOSLIMIT)方法,具体实现流程包括利用扫描光场显微镜进行三维亚细胞成像,结合数字自适应光学技术进行高速像差校正,并通过光学层析技术实现长期快速活体成像,如

图 30(a)所示。DAOSLIMIT通过同时对整个体积进行扫描成像,实现了 $225\text{ mm}\times 225\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ 的大体积成像,横向分辨率为 220 nm ,轴向分辨率为 400 nm ,有望在不同物种的大规模细胞迁移和神经活动、哺乳动物中性粒细胞迁移和肿瘤细胞循环过程等亚细胞动力学中得到广泛应用,实验结果如图 30(b)所示。

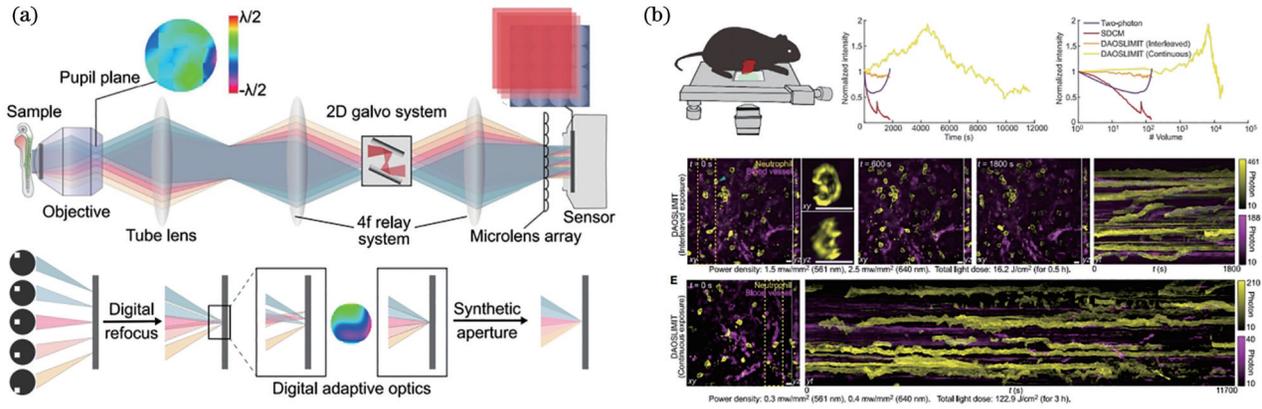


图 30 数字自适应光学扫描光场交替迭代层析(DAOSLIMIT)成像系统^[77]。(a)DAOSLIMIT中扫描光场显微镜的原理与数字自适应光学过程;(b)DAOSLIMIT在小鼠长时间、高速亚细胞成像中的应用

Fig. 30 Digital adaptive optics scanning light-field mutual iterative tomography (DAOSLIMIT) imaging system^[77]. (a) Principle of scanning light field microscopy of DAOSLIMIT and the process of digital adaptive optic; (b) application of DAOSLIMIT in long-term, high-speed subcellular imaging of mice

3.2 基于掩模版的光场感知技术——频域编码复用

与空间复用方法中将二维(2D)光场切片编码到传感器平面的方式不同,频域复用技术通过将光场的二维切片分配至频谱的不同区域,实现了对光场数据编码。这一技术常规采用调制掩模版,以在傅里叶变换域内实现精确的调制效果^[78]。Veeraraghavan等^[79]提出一种创新的4D光场采集方法,名为“斑驳摄影”(dappled photography),该方法通过在传统成像系统中引入衰减掩模版来增强光场数据的采集。在此方法中,窄带二维余弦掩模版负责在图像传感器前方对光线进行衰减和编码。经过傅里叶变换处理后的图像被重新组织成4D平面,并通过傅里叶逆变换的过程实现了原始光场的精确重建,如图 31所示。

受四维空间-角度光场信息编码与记录方式的启发,Antipa等^[80]提出一种新的光场重建方法,即在光路中放置一块相位散射片(diffuser),将空间-角度信息编码到一个散斑场(衍射图样)中,并从单幅测量图像中恢复出四维光场信息,如图 32(a)所示。实验结果表明,该方法能够从分辨率为 2048×2048 的测量值图像中重建出 11×11 的角度采样与 170×170 的横向采样,图 32(b)展示了两张扑克牌放置在距离原始焦平面 $+40\text{ mm}$ 和 -40 mm 处的重建结果。

除此之外,基于散射片的光场显微成像技术也相继被提出。Fourier DiffuserScope将散射片放置在傅里叶平面来编码三维信息,再通过解决稀疏性约束的

逆问题来重建物体^[81],如图 33(a)所示。Miniscope3D在传统二维小型化的显微镜物镜孔径光阑处放置一个优化的多焦点相位掩模版来替代传统的管镜^[82],如图 33(b)所示。与单帧方式相比,该系统具有小型化、轻量化等优势,能够将成像范围内的横向和轴向分辨率提高至2倍以上,实现对生物活体的高分辨宽视场神经体成像。

3.3 基于掩模版的无透镜成像技术

除了上述的基于“传统成像结构”与“焦平面编码调控”的光场感知方式以外,近年来发展的宏观无透镜成像技术将“成像”与“调控”合二为一,颠覆了传统相机的结构,采用轻小的光学编码器件(或掩模版)取代传统相机中的透镜,通过优化的光学系统设计与高效的求解算法重建场景中的光场信息^[83]。一般的无透镜成像过程包括3个阶段(图 34):记录场景信息的入射光传播到入瞳平面;光从入瞳平面传播到出瞳平面,光在这一阶段经过光学编码器件(或掩模版)调制;光从出瞳平面传播到传感器平面,由传感器记录此处的光强信息。传感器采集的图像不再是场景中物体的简单映射,而是经过光学编码后的调制图像。将传感器采集的数据进行计算重建,以恢复出清晰的场景图像。通过在成像系统中引入计算能力,打破了传统成像系统的限制,在成像维度^[80,84-86]、图像尺寸^[87]甚至成像机制^[88-89]方面都有所改进。成像的负担可以从厚重且昂贵的硬件转移到计算上,使得低成本高性能相机成为

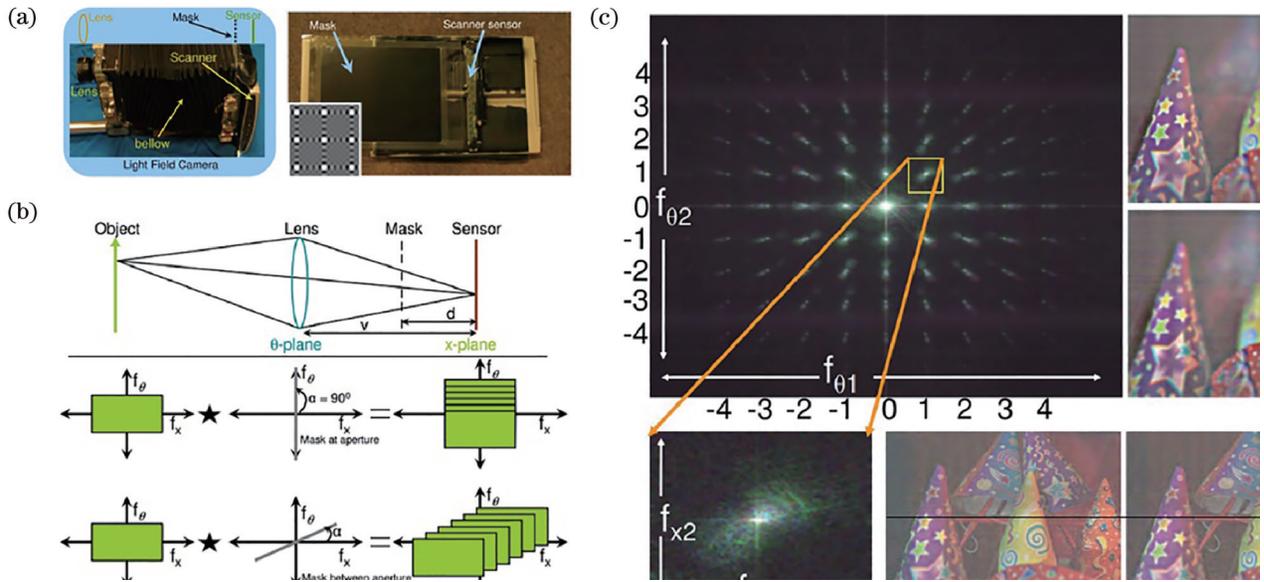


图 31 斑驳摄影光场成像^[79]。(a)光场相机结构,在线扫描传感器附近放置一个窄带二维余弦掩模版(左下角);(b)光场相机原理,在射线空间中 d 处的余弦掩模版在传感器上投射阴影,在傅里叶域中,场景频谱(左侧绿色)与掩模版频谱(中间)卷积产生偏移频谱块(右侧);(c)采集图像的频谱与重建结果,具有 81 个频谱图块,对应于 9×9 的角度分辨率

Fig. 31 Dappled photography light field imaging^[79]. (a) Light field camera structure, and a narrowband two-dimensional cosine mask is placed near the line scanning sensor (as shown in the bottom left corner); (b) light field camera principle, in ray space, a cosine mask at d casts a shadow on the sensor, and in the Fourier domain, the scene spectrum (left green) is convolved with the mask spectrum (middle) to produce offset spectrum blocks (right); (c) spectrum and reconstruction results of acquired image, with 81 spectrum patches corresponding to an angular resolution of 9×9

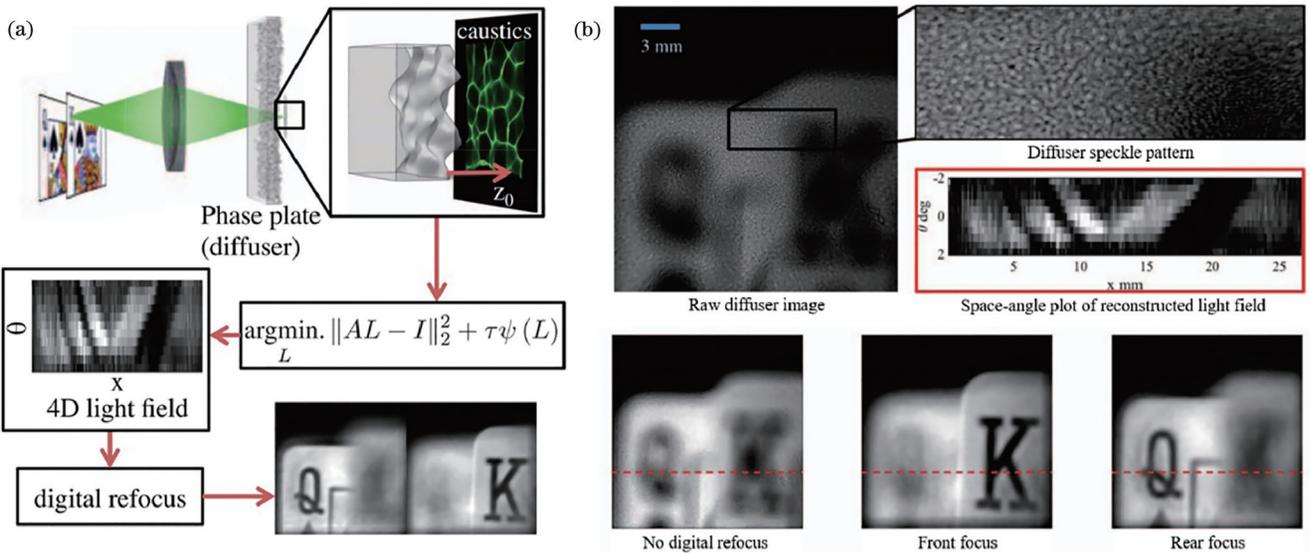


图 32 基于散射片的光场成像^[80]。(a)使用散射片记录和重建光场的流程,物光穿过成像透镜和散射片后传播到传感器,焦散线在焦平面对空间和角度信息进行编码,通过解决线性逆问题来重建包含 3D 信息的光场,从而实现数字重新聚焦等功能;(b)对两张扑克牌进行实验光场重建

Fig. 32 Light field imaging based on diffuser^[80]. (a) Procedure for recording and reconstructing the light field using diffuser, object light propagates to the sensor after passing through the imaging lens and diffuser, caustics encode spatial and angular information in the focal plane, and the light field containing 3D information is reconstructed by solving the linear inverse problem, so as to realize the digital refocusing and other functions; (b) light field reconstruction of two playing cards

可能。此外,掩模版所带来的深度相关特性也使得我们能够从传感器采集的编码测量值中恢复出目标场景的空间三维信息,实现高维光场的有效感知。无透镜成像根据不同的调制方式可以分为基于固定掩模版的

无透镜成像与基于可编程掩模版的无透镜成像,本节将对这两种成像技术展开介绍。

3.3.1 固定掩模版无透镜成像

基于固定掩模版的无透镜成像技术起源于为天文

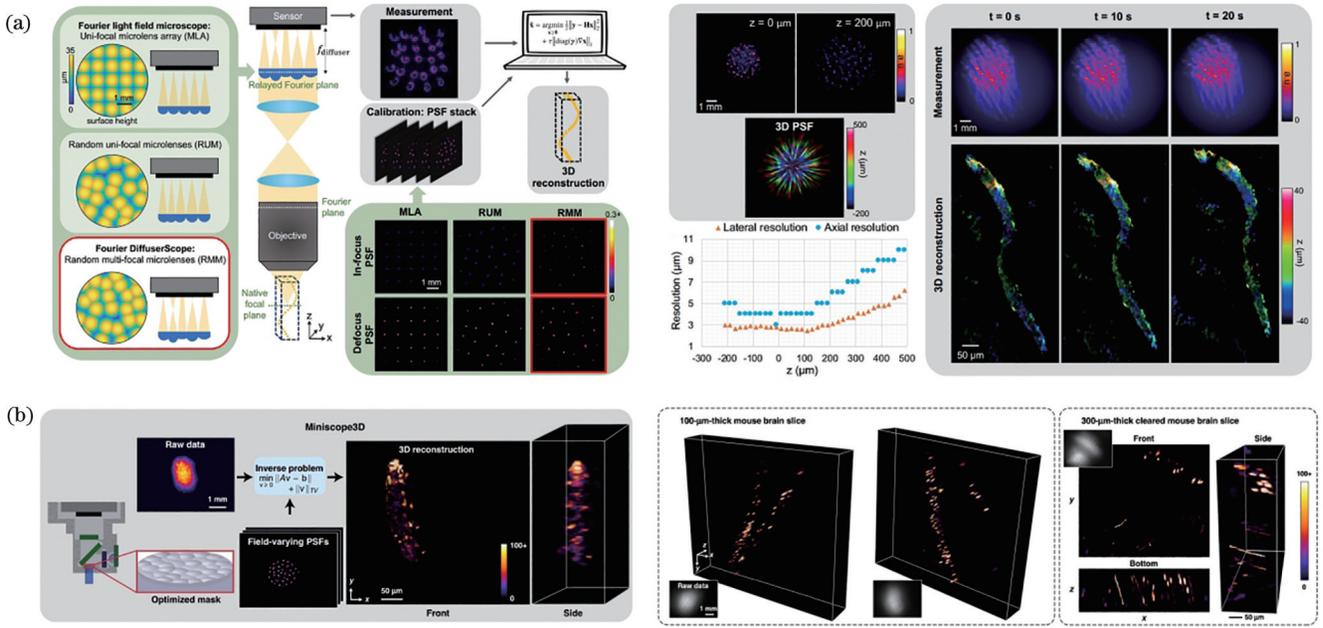


图 33 基于散射片的光场显微成像。(a) Fourier DiffuserScope, 将散射片放置在物镜的傅里叶平面(由 $4f$ 系统中继), 传感器放置在微透镜焦距之后, 通过单个 2D 传感器测量, 结合先前校准的点扩散函数堆栈, 可以通过解决稀疏约束逆问题来重建 3D 对象^[81]; (b) Miniscope3D, 在物镜的孔径光阑(傅里叶平面)处放置一个 $55\ \mu\text{m}$ 厚的优化相位掩模版, 通过扫描整个体积中的 $2.5\ \mu\text{m}$ 绿色荧光珠, 可以采集一组稀疏的校准点扩散函数(每个深度有 64 个函数), 利用此数据集预先计算出一个像差随视场变化的准确正向模型, 实现从单次 2D 测量中重建 3D 体积^[82]

Fig. 33 Light field microscopic imaging based on diffuser. (a) Fourier DiffuserScope, where the diffuser is placed in the Fourier plane of the objective (relayed by the $4f$ system) and the sensor is placed behind a microlens focal length, from a single 2D sensor measurement, combined with a stack of previously calibrated point spread functions, 3D object can be reconstructed by solving a sparse constrained inverse problem^[81]; (b) Miniscope3D, where a $55\ \mu\text{m}$ thick optimized phase mask is placed at the aperture stop (Fourier plane) of the objective, and a sparse set of calibrated point spread functions (64 per depth) can be collected by scanning $2.5\ \mu\text{m}$ green fluorescent beads throughout the volume, utilizing this dataset to pre-calculate an accurate forward model of aberrations varying with the field of view, and enabling the reconstruction of 3D volumes from a single 2D measurement^[82]

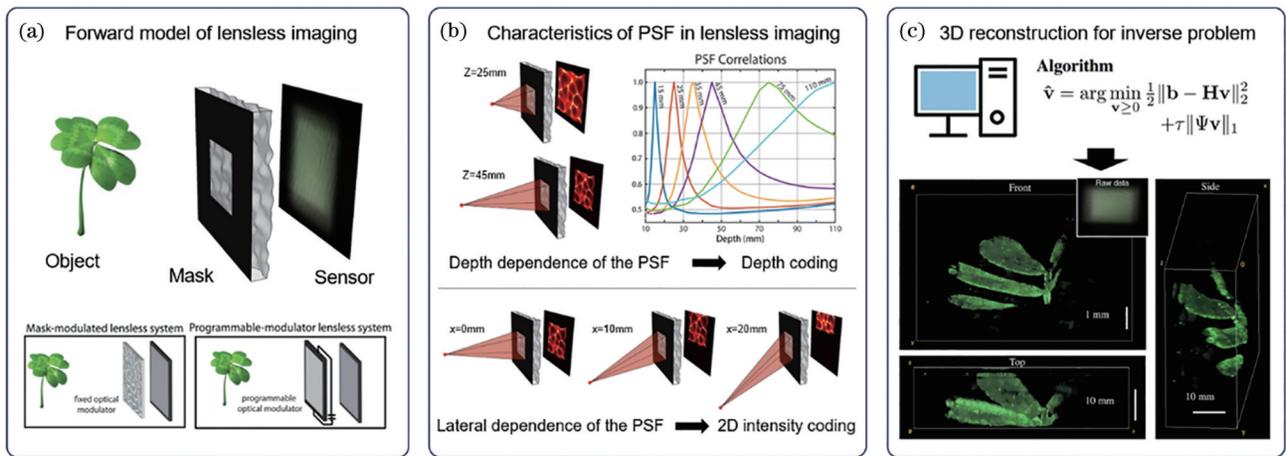


图 34 无透镜成像系统^[90-91]。(a)无透镜成像正向模型与不同的调制方式;(b)点扩散函数特性,包括深度依赖性和横向依赖性,分别为无透镜成像系统提供深度编码和二维强度编码;(c)通过求解逆问题实现三维重建

Fig. 34 Lensless imaging system^[90-91]. (a) Forward model of lensless imaging with different modulation modes; (b) characteristic of point spread function (PSF) in lensless imaging, including depth-dependence and lateral-dependence, which provides depth and 2D intensity encoding for lensless imaging systems respectively; (c) 3D reconstruction by solving the inverse problem

探测(X射线和 γ 射线)设计的编码孔径成像,而这些较短波段的透镜往往难以制造。编码孔径解决了传统小孔成像中孔径受限的问题,大幅扩展了其使用场景,

并为更高分辨率图像的重建奠定了基础。以早期的编码孔径为例,掩模版包含 N 个针孔,那么传感器图像就是场景中 N 幅重叠图像之和,图像的信噪比约为单幅

针孔图像的 \sqrt{N} 倍^[92]。理想的掩模版需要满足以下几个条件:①高通量——提升原始测量的信噪比;②平坦的传递函数——从低频信息到高频信息都有良好的频率响应;③低复杂度重建——降低计算重建的开销。过去的无透镜成像相关工作中已经提出几种较为经典的掩模版设计,包括可分离掩模版、菲涅耳孔径、相位掩模版等。

1) 可分离掩模版

可分离掩模版又被称为可分离双 Toeplitz 掩模

版,其二维形式的掩模版矩阵由两个一维向量外积而来,建模时可将掩模版矩阵分解为两个 Toeplitz 矩阵来分别对目标物体进行变换,从而降低求解重建图像问题时的计算复杂度^[93]。Asif 等^[94-95]提出一种基于可分离掩模版的无透镜相机 FlatCam,如图 35 所示。FlatCam 使用多个不同的可分离掩模版分别进行拍摄重建,通过在拍摄前对所使用的掩模版进行校准,即可根据校准测得的矩阵信息快速重建出图像。

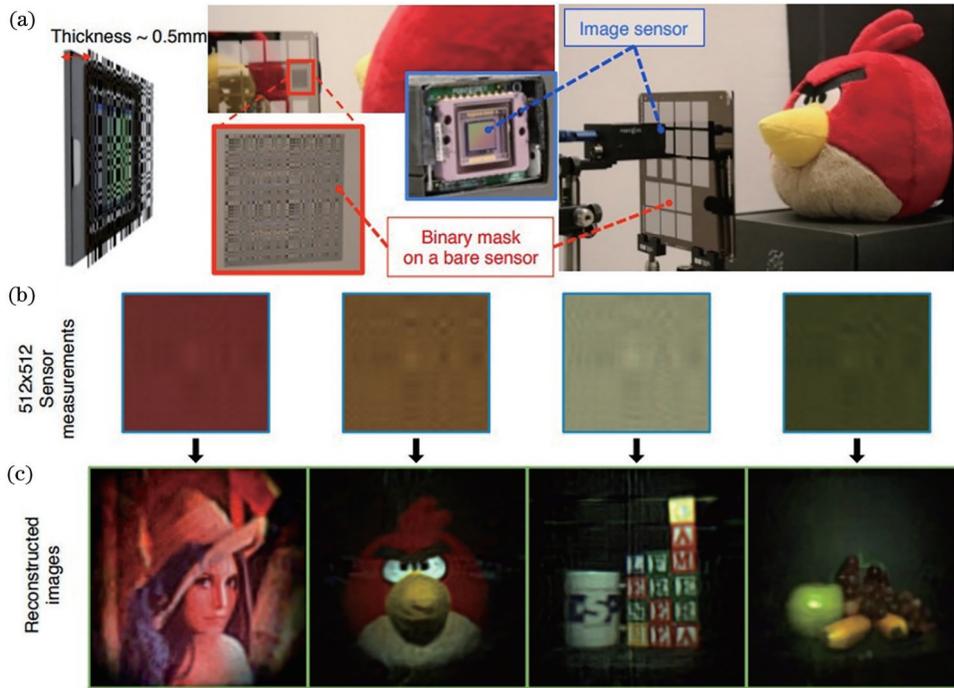


图 35 FlatCam^[94-95]。(a)系统原理样机以及实验场景;传感器在不同场景下的(b)测量值与(c)重建结果

Fig. 35 FlatCam^[94-95]. (a) System prototype and experimental scenario; (b) measurement and (c) reconstruction results of sensor in different scenarios

2017 年,Adams 等^[96]提出一种基于可分离掩模版的新颖荧光无透镜显微镜 FlatScope,图 36(a)展示了其相机原型与设计的掩模版图案。FlatScope 进一步优化了掩模版的设计,使得掩模版到传感器的距

离缩小为 200 μm ,质量仅为 0.2 g,整体厚度不到 1 mm。FlatScope 同样使用可分离掩模版,并通过折射率匹配、系统校准、像差校正、最优化重建等方法,实现深度扫描与 3D 重建,能够在数百微米的深度上

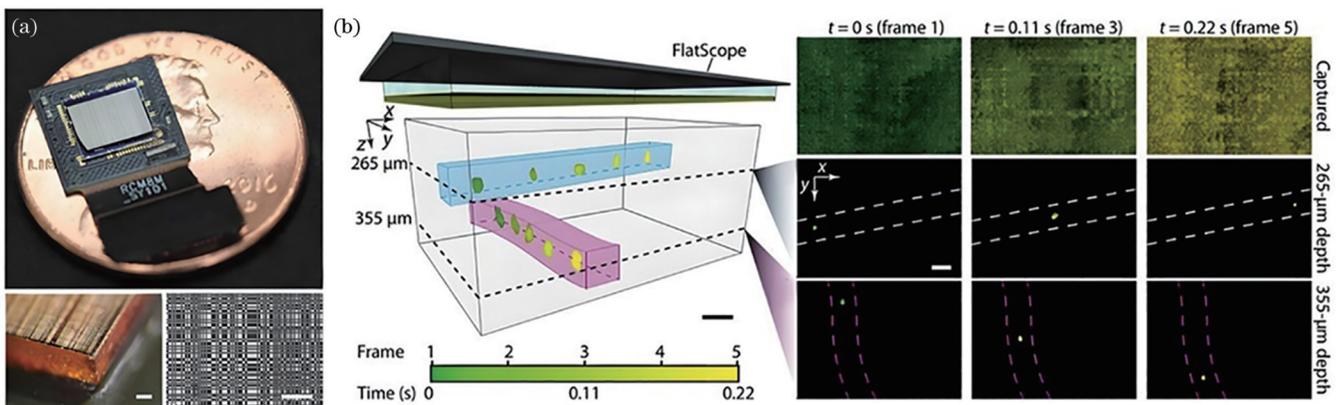


图 36 FlatScope^[96]。(a)原理样机及其掩模版;(b)对移动中的 10 μm 荧光珠进行 3D 体积重建

Fig. 36 FlatScope^[96]. (a) Prototype and its mask; (b) 3D volumetric reconstruction of a moving 10 μm fluorescent bead

进行单帧宽场荧光显微成像,如图 36(b)所示。此外, FlatScope 的设计理念不仅适用于荧光显微镜,还可以拓展到明场、暗场、反射显微镜等传统显微结构中。

2) 菲涅耳孔径

菲涅耳波带片最早是作为一类特殊结构的圆形光栅被提出。1818年, Fresnel 首次提出波带片的概念, 随后 Rayleigh 在 1871 年制作出第一块菲涅耳波带片。菲涅耳波带片由一系列黑白相间的同心圆环[透明环和不透明环(或带)]组成, 并且每一个环带的面积都相等, 其最初被设计用于聚焦光线, 并通过衍射形成图像^[97]。照射到菲涅耳波带片的光在不透明区域附近衍

射并最终在焦点处干涉。

受菲涅耳波带片的启发, Shimano 等^[98-101]提出了基于菲涅耳孔径(FZA)的无透镜相机, 如图 37(a)所示。其核心算法是通过四步相移消除噪声与孪生像, 再利用快速傅里叶变换在频域进行反卷积, 以快速重建图像^[98]。由于基于 FZA 的无透镜相机本质上与全息成像的记录方式相同, 因此该相机可以用于 2D 成像、重聚焦和 3D 成像。为了进一步降低编码数量, Wu 等^[102]利用 CS 算法, 成功在梯度域稀疏约束下实现了孪生像中的伪影抑制, 使得单帧 FZA 编码的高质量重建成为可能, 如图 37(b)所示。

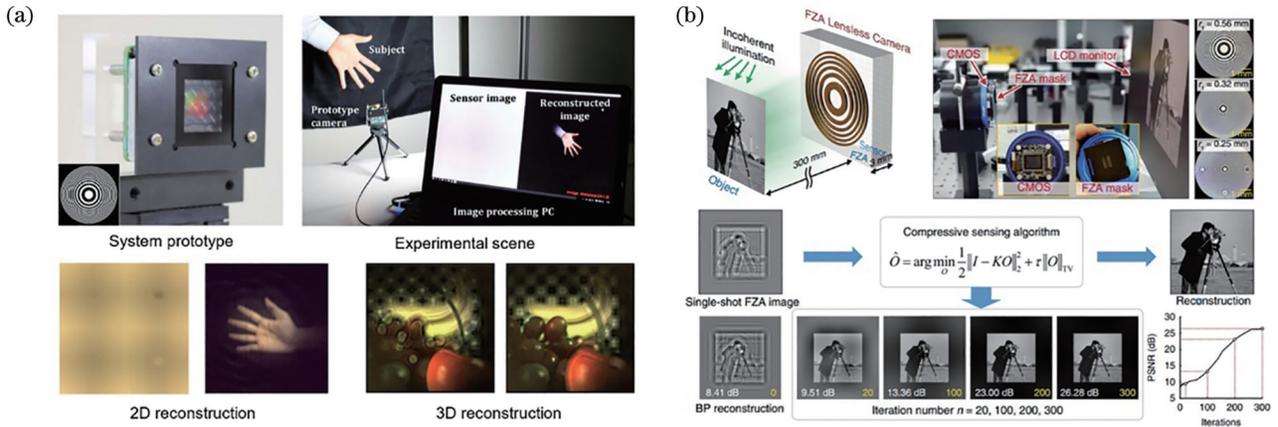


图 37 基于 FZA 的无透镜成像。(a)FZACam^[98-101]; (b)单帧 FZA 重建算法^[102]

Fig. 37 Lensless imaging based on FZA. (a) FZACam^[98-101]; (b) single-shot FZA reconstruction algorithm^[102]

3) 相位掩模版

除了上述广泛使用的振幅掩模版外, 为了进一步提高光通量, 基于相位掩模版的无透镜成像系统被相继提出。2013年, Stork 等^[103-105]提出了螺旋 PSF, 使用

奇对称双层相位光栅控制 PSF 中的零点, 如图 38 所示。使用螺旋 PSF 的好处在于其反卷积等效于 PSF 的傅里叶变换, 同时可以通过设计避免分母出现 0 值所导致的反卷积失效的情况。

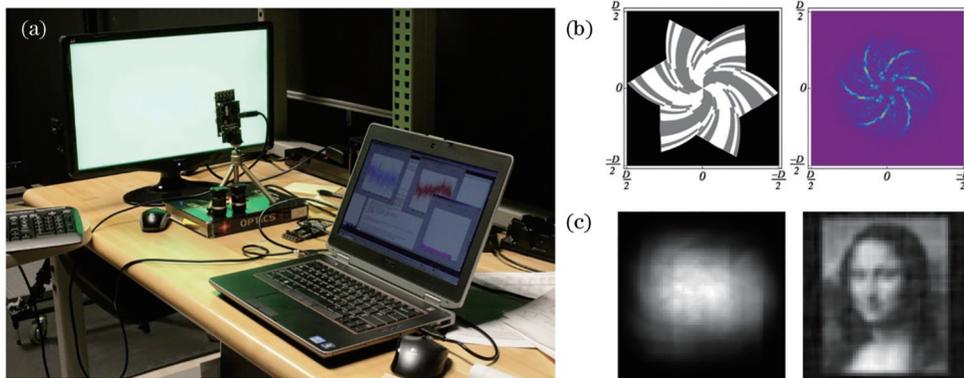


图 38 螺旋 PSF 无透镜成像^[103-105]。(a)成像系统原型; (b)螺旋二元光栅及其点扩散函数; (c)传感器测量值以及重建结果

Fig. 38 Lensless imaging of spiral PSF^[103-105]. (a) Imaging system prototype; (b) spiral binary grating and its point spread function; (c) sensor measurement and reconstruction results

散射片是一种利用其表面特殊的浮雕结构改变波前相位, 从而形成特定形状、特定角度的光束整形元件, 也被称为扩散器或者匀光片。2017年, Antipa 等^[90]提出了基于散射片的无透镜成像系统 DiffuserCam, 其能够从单幅 2D 图像中重建出空间物体的 3D 强度分布, 如

图 39 所示。DiffuserCam 使用基于 CS 的稀疏约束优化方法进行图像重建, 并通过实验从一幅 130 万像素的图像中重建出 1 亿体素(非均匀间隔)网格上的 3D 对象。

2020年, Kuo 等^[106]提出一种基于随机微透镜散射片的片上宽场荧光显微镜, 如图 40 所示。将随机微透

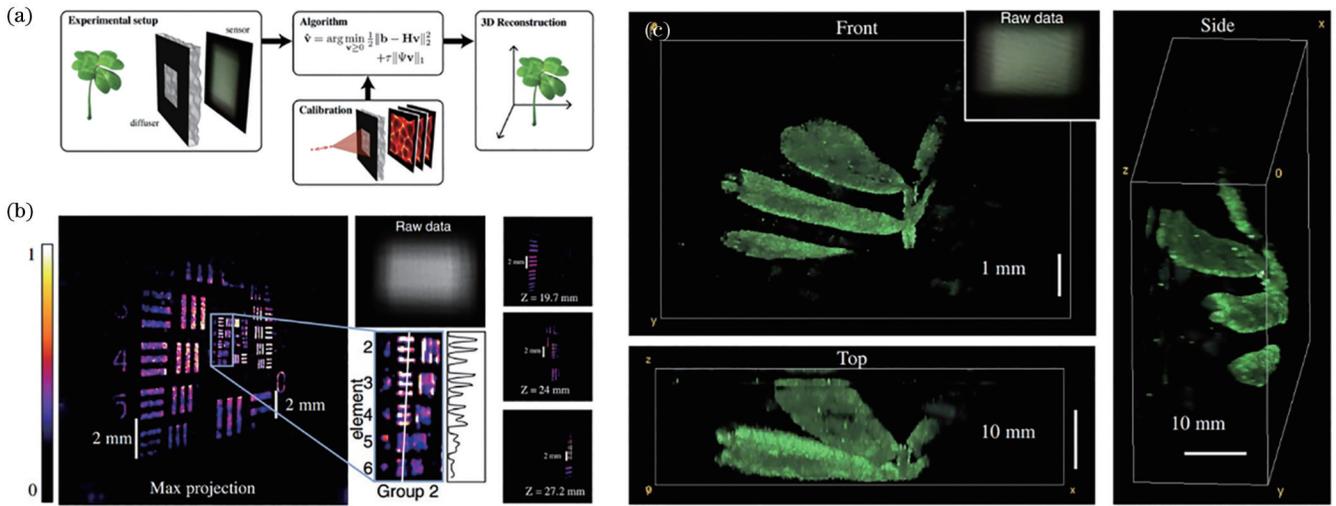


图 39 DiffuserCam^[90]. (a) 系统设置和重建流程; (b) 倾斜分辨率靶标 3D 重建结果, 裁剪为 640 voxel × 640 voxel × 50 voxel; (c) 植物叶片 3D 重建结果, 裁剪为 480 voxel × 320 voxel × 128 voxel

Fig. 39 DiffuserCam^[90]. (a) System setup and reconstruction processes; (b) 3D reconstruction result of slanted resolution target, cropped to 640 voxel × 640 voxel × 50 voxel; (c) 3D reconstruction of plant leaves, cropped to 480 voxel × 320 voxel × 128 voxel

镜散射片放置在距离图像传感器几毫米的地方以代替显微镜的光学器件, 形成一个紧凑且易于组装的无透镜成像系统。与普通散射片不同, 随机微透镜散射片由许多随机放置在掩模版表面的小透镜组成, 产生的点扩散函数具有高对比度、伪随机等特性, 同时不存在周期性模糊性, 因此能够降低对成像噪声的灵敏度, 提升荧光成像的质量。

2020 年, Boominathan 等^[107] 提出一种基于最优化设计相位掩模版的无透镜相机 PhlatCam, 通过波动

光学和相位恢复的方法构建所需的点扩散函数, 实现高分辨率 2D 图像的重建、数字重聚焦和 3D 成像, 如图 41 所示。该方法结合设计的 Contour-PSF 来实现位深受限传感器的最大信息传输。得益于高效的相位编码方式, PhlatCam 除了能够使用快速线性方法进行高效的图像重建, 还能够使用迭代非线性方法进行高质量重建和 3D 成像。此外, 结合数据驱动的方法, 该系统还可以进一步提高重建图像质量^[108]。

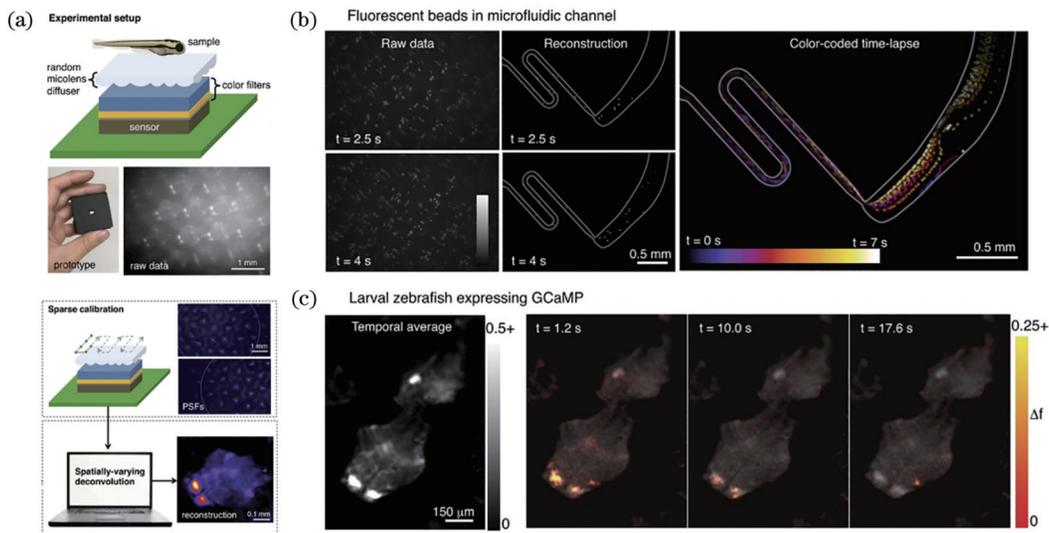


图 40 基于随机微透镜散射的片上宽场荧光显微镜^[106]. (a) 系统架构与稀疏点扩散函数标定方法; (b) 荧光珠在微流体通道中流动; (c) NeuroD:GCaMP6f 幼体斑马鱼

Fig. 40 On-chip wide-field fluorescence microscopy based on random microlens scattering^[106]. (a) System architecture and sparse PSF calibration method; (b) fluorescent beads flow in microfluidic channels; (c) NeuroD:GCaMP6f larval zebrafish

3.3.2 可编程掩模版无透镜成像

通过编程手段改变空间光场分布(振幅、相位、偏振态等)的光学器件被称为空间光调制器(SLM), 其优势

在于能够快速改变掩模版图案, 使每次捕获的图像有不同的光学编码特征^[93]。通过不同的掩模版将场景信息编码到传感器的过程, 相当于经过不同的“滤波器”, 每个

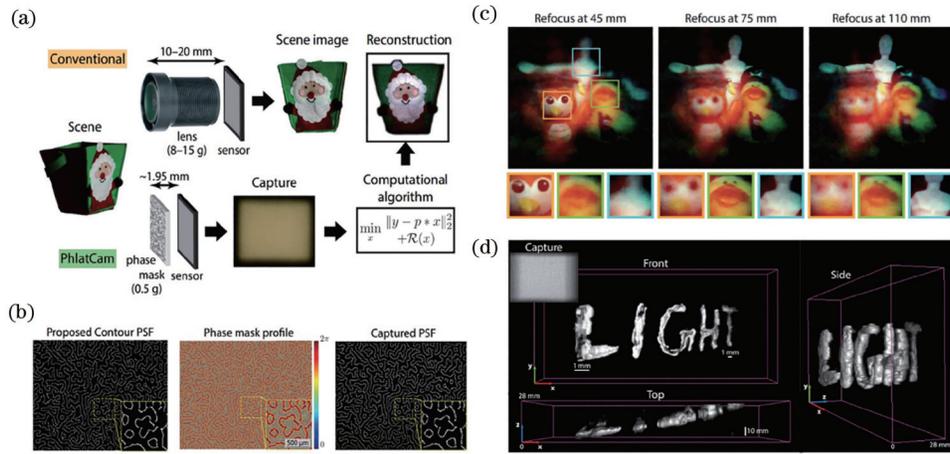


图 41 PhlatCam^[107]。(a)PhlatCam与传统成像系统对比;(b)点扩散函数设计;(c)重聚焦实验结果;(d)3D重建实验结果
Fig. 41 PhlatCam^[107]. (a) Comparison of PhlatCam with conventional imaging system; (b) PSF design; (c) refocusing experimental results; (d) 3D reconstruction experimental results

“滤波器”可以将场景中的特定信息保留,同时抑制其他不被需要的信息。这种掩模版间信息获取的差异性可以通过傅里叶域或类似的变换表示,并且结合不同“滤波器”的图像可以得到更好的效果。对于基于可编程掩模版的无透镜相机,本节将从“扩展成像功能”[图 42(a)~(c)]与“提升成像质量”[图 42(d)、(e)]两方面进行介绍。

在扩展成像功能方面:Zomet等^[109]提出一种由多层可编程空间光调制器组成的无透镜相机,如图 42(a)所示,其透过率在空间和时间上是可控的。通过在每一层上显示不同的图案,入射光可以通过多种方式进行控制。例如,通过移动其中一层的针孔来跟踪运动物体,选择并捕获场景中不相交的区域,或者对场景进行计算并直接在传感器上记录结果。该相机能够采用可编程的方法来调整视角,甚至在拍摄图像的光学过程中完成卷积运算,然而其成像质量受到针孔相机低光通量的限制无法提高。Candès等^[110-111]提出基于CS原理捕获和恢复图像的无透镜相机,该相机仅由一个液晶显示器(LCD)面板和一个像素探测器组成^[112-113],能将场景图像压缩采集到一个或两个像素点上,如图 42(b)所示。通过改变掩模版图案来捕捉场景的多个测量值,再利用求解稀疏恢复程序来重建场景。为了提升深度感知能力,Hua等^[114]提出了对深度敏感的可编程掩模版无透镜相机 SweepCam,如图 42(c)。利用 SLM 改变掩模版的平移量,以增加相机视角的多样性。掩模版平移使得测量图像的深度随之平移,并且可以通过对适当偏移的测量图像求和增强来自特定深度的信息。此外,通过设计偏移量和偏移次数,还能够使聚焦图像受其他深度入射光的影响降到最小。基于此原理,SweepCam将恢复深度优化问题解耦为单独求解每个深度平面,从而实现具有极高深度灵敏度的快速三维重建。

在提升成像质量方面:de Weert等^[93]进行了不同振幅掩模版下的多次重建,发现在结合 2~4 幅掩模版

图案的重建结果后,重建图像中的伪影显著减少。Jiang等^[115]通过将掩模版固定在一个转轴上,通过旋转来改变掩模版图案,经过多次测量可以重建出峰值信噪比(PSNR)更高的图像,如图 42(d)所示。在此基础上,Jiang等^[116]设计了一种使用LCD作为随机编码器件的无透镜相机,称为 NoRDS-CAIC (noise reduced dynamic synthetic coded aperture imaging camera),如图 42(e)所示。与传统单帧随机掩模版方法相比,该相机通过采集 5~36 幅随机编码图的点扩散函数作为特定距离下的先验信息,利用迭代算法重建目标图像,从而实现更好的噪声抑制,并获得更高的重建分辨率。

4 焦平面光谱感知

光谱感知技术可以在记录物体空间分布信息的同时获取其光谱信息,在环境监测、医疗诊断、工业检测等领域有着广泛的应用。在过去的数十年里,随着新兴的计算理论和光学元件的出现,基于焦平面编码的多光谱、高光谱、快照式光谱成像等技术相继问世,并取得了显著的突破。此外,超表面等新技术的引入丰富了空间光谱信息的调制方式,同时赋能系统以更加轻便、紧凑的形式呈现,成为近年来的研究热点,被认为是下一代光谱成像技术的关键。同样基于CS理论,利用空间光谱信息在某些特定变换域中的稀疏性,采用编码孔径调控等技术方案也能够实现准确、高效的空空间光谱信息获取^[117-118],但本节主要聚焦于焦平面编码方式实现光谱感知,具体对基于焦平面光谱滤波与编码衍射调制两类主要技术方案展开介绍。

4.1 光谱滤波编码成像技术

焦平面光谱滤波是实现光谱维度感知最经典也是最直接的方法之一。通过在灰度传感器前放置滤波片阵列,并与下层传感器像素一一对应,赋予像素不同的光谱响应,从而筛选并探测对应波段光信号强度,实现

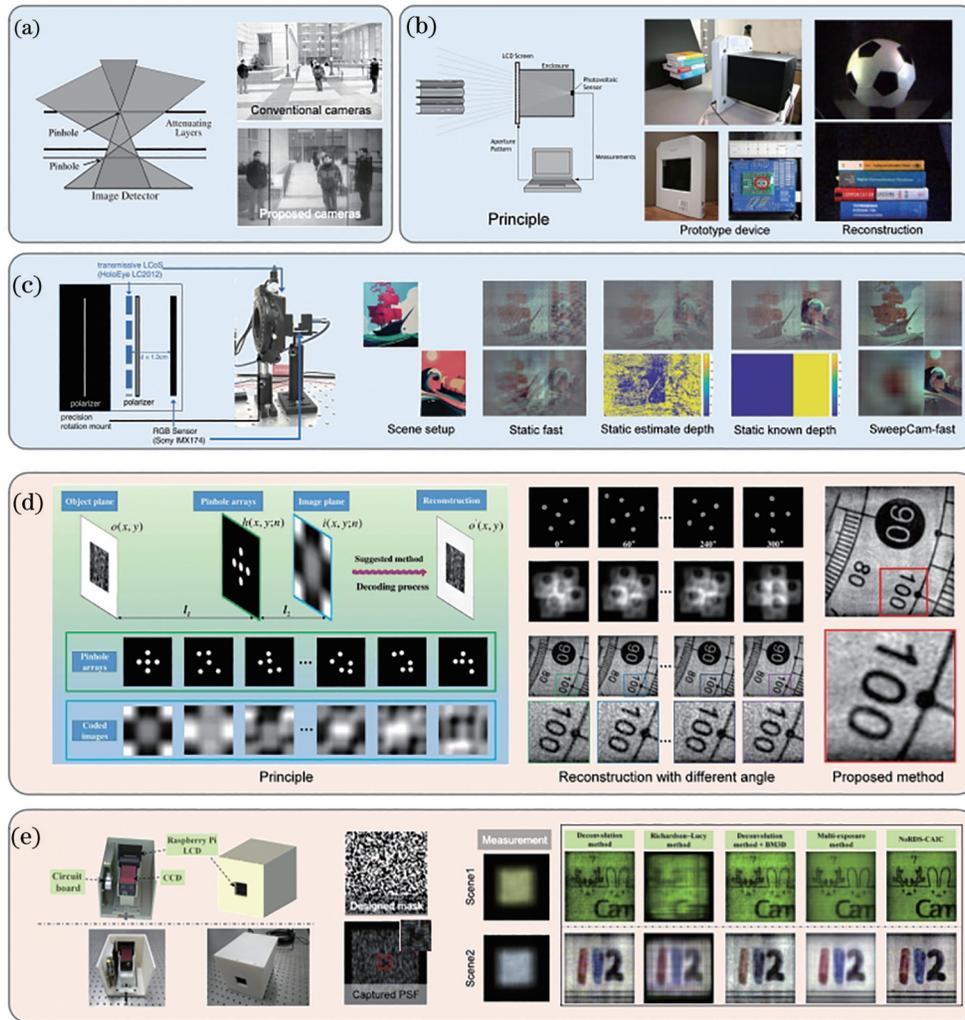


图 42 基于可编程掩模版的无透镜相机,可分为“扩展成像功能”(蓝色背景)与“提升成像质量”(橙色背景)。(a)多层可编程LCD掩模相机结构^[109]; (b)基于CS的相机结构^[112]; (c)SweepCam^[114]; (d)通过旋转改变掩模版图案的编码孔径相机结构^[115]; (e)NoRDS-CAIC^[116]

Fig. 42 Lensless camera based on programmable mask, which can be divided into “expanding imaging function” (blue background) and “improving imaging quality” (orange background). (a) Multi-layer programmable LCD mask camera structure^[109]; (b) camera structure based on CS^[112]; (c) SweepCam^[114]; (d) structure of coded aperture camera with mask pattern changed by rotation^[115]; (e) NoRDS-CAIC^[116]

光谱维度感知。这类基于焦平面分割技术(DoFP)的方法本质上采用空分复用的思想,将光谱细分并分别映射到不同的像素上,从而实现空间维度与光谱维度的信息置换。加工制造工艺的进步,允许我们以更多的通道数量、更窄的光谱带宽对光谱进行划分,并催生出多光谱成像、高光谱成像等光谱成像技术,进一步提升了空间光谱信息获取能力。此外,量子点、超表面、光子晶体阵列等新材料、新器件的光谱响应特性也为焦平面光谱滤波带来了新的可能。

4.1.1 传统焦平面滤波

拜耳编码(Bayer pattern)是实现彩色RGB成像的技术中最为成熟且广泛使用的一种^[119-120]。这种彩色编码方式由柯达公司的工程师Bryce Bayer于1974年提出,基于RGB三通道的彩色滤波片阵列(CFA)记录场景的空间光谱数据,并结合插值算法^[121-122]重建完整

的RGB三通道彩色图像。这种设计能够以较低的成本实现彩色图像记录,同时也能够满足人眼视觉对图像色彩的感知。然而,Bayer编码将实际场景中丰富的光谱信息压缩至RGB 3个颜色通道,不可避免地带来了大量信息丢失,从而出现同色异谱现象等^[123]。如今,随着光谱数据在环境检测、资源勘探等领域中的应用逐渐广泛,三通道RGB图像中有限的光谱信息已无法满足实际应用中,对高光谱分辨率、高光谱灵敏度、连续光谱覆盖范围等方面的需求。增加彩色滤波片阵列通道数量是增大光谱信息获取量最直接有效的方法之一。与RGB相机类似,基于DoFP技术的多光谱相机通常采用4个或更多通道的滤波片组成一个多光谱滤波片阵列(MSFA)^[124],从而在单次曝光下获取更多光谱通道的空间光谱数据^[125-126]。

为了便于数据存储和处理,目前大多数MSFA均

采用方形像素,并将不同波段的滤波片规则排列,使之与像素精确对齐以组合成超像素^[125]。Aggarwal 等^[127]改变了传统的滤波片规则排列方式,提出了均匀分布和随机分布模式,如图 43(d)、(e)所示,其中在随机分

布排列方案下可以借助 CS 思想重建多光谱图像。此外,Ramanath 等^[128]报道了一种六边形像素的焦平面模式,并给出了 3 通道、4 通道以及 7 通道下六边形像素的规则排列方法,如图 43(f)所示。

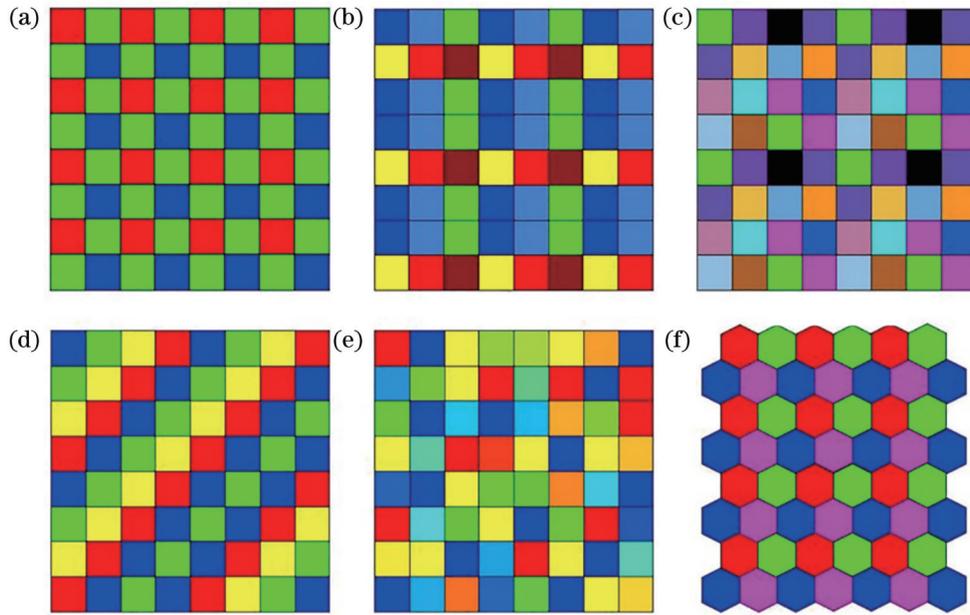


图 43 不同的 MSFA 设计方案。(a) 2×2 Bayer MSFA^[117]; (b) 3×3 和 (c) 4×4 MSFA; (d) 均匀和 (e) 随机分布的 MSFA; (f) 六边形像素的 MSFA^[128]

Fig. 43 Different schemes of MSFA. (a) 2×2 Bayer MSFA^[117]; (b) 3×3 MSFA; (c) 4×4 MSFA; (d) uniform MSFA; (e) random MSFA; (f) hexagonal pixel-based MSFA^[128]

为了更多、更精确地获取目标场景的光谱信息,高光谱成像技术应运而生。一种经典的解决方法是采用扫描形式进行空间光谱数据采集^[129],通过牺牲一定的时间分辨率换取空间光谱维度的更多信息,但这种方式在面对动态目标场景时存在局限性。不难发现,时间分辨率、空间分辨率与光谱分辨率三者的相互制约关系在高光谱成像应用中尤为突出,如何整体提升这三大关键指标成为该领域的研究热点。考虑到光谱滤波阵列给空间和光谱分辨率提升带来的制约,同时窄带滤波器也会带来显著的光通量损失,Bian 等^[130]提出一个具有全空间和高时间分辨率的片上计算高光谱成像框架[图 44],通过在成像传感器上集成不同的宽带调制材料,结合后端重建算法,可以从每帧图像中实时恢复多通道图像,实现 $400 \sim 1700$ nm 范围内的高光谱成像。Verde 公司研发了一款视网膜成像光谱仪,通过将原始空间光谱信息投影到二维传感器上,从而在单帧曝光(约 3 ms)下获得完整的空间光谱数据,具有 50 个光谱通道,覆盖 $450 \sim 700$ nm 的光谱范围^[20]。

4.1.2 新型光电材料调控

超表面元件由大量亚波长尺度单元构成,通过对这些单元结构的几何形状、尺寸、排列方式等进行精确设计,能够实现对光场的幅度、相位、偏振等维度的特定调控。在光谱探测方面,超表面能够以更低的成本

实现几乎所有形式的传统编码孔径光谱成像,特别是使片上光谱成像成为可能。

Yako 等^[131]展示了一种使用单个集成器件实现编码快照光谱成像的方法,如图 45 所示。该方法使用一种优化设计的法布里-珀罗(F-P)编码掩模版,通过改变 F-P 谐振腔的厚度来产生不同的透射光谱。利用掩模版单元光谱透过率可调控这一特性,可以对相应的光谱进行灰度编码,然后利用两步迭代阈值收敛算法(TwIST)从高度压缩后的图像中重构空间光谱信息。同样地,Yang 等^[132]开发了一种基于自由曲面超表面的光谱成像芯片,实现了快速光谱成像,与具有相近的光谱滤波性能的超表面相比,所提出的超表面结构更容易实现。

新型光学超表面在窄带光谱滤波方面具有巨大的潜力。利用微纳结构与电磁波之间的相互作用,已经设计出多种基于超表面的窄带光谱滤波器作为 MSFA。这些微纳结构可以采用全介电谐振器^[133-134]、混合等离子体-介电纳米结构^[135]等形式实现。2018 年,Tittl 等^[133]利用像素化介电超表面构建了一种小型化的中红外光谱仪,并应用于物质的化学鉴定和成分分析,如图 46 所示。Shaltout 等^[136]设计了一种嵌入超表面的紧凑 F-P 谐振腔。通过优化设计超表面结构单元的宽度,可以获得不同的谐振波长,并具有扩展到片上光谱

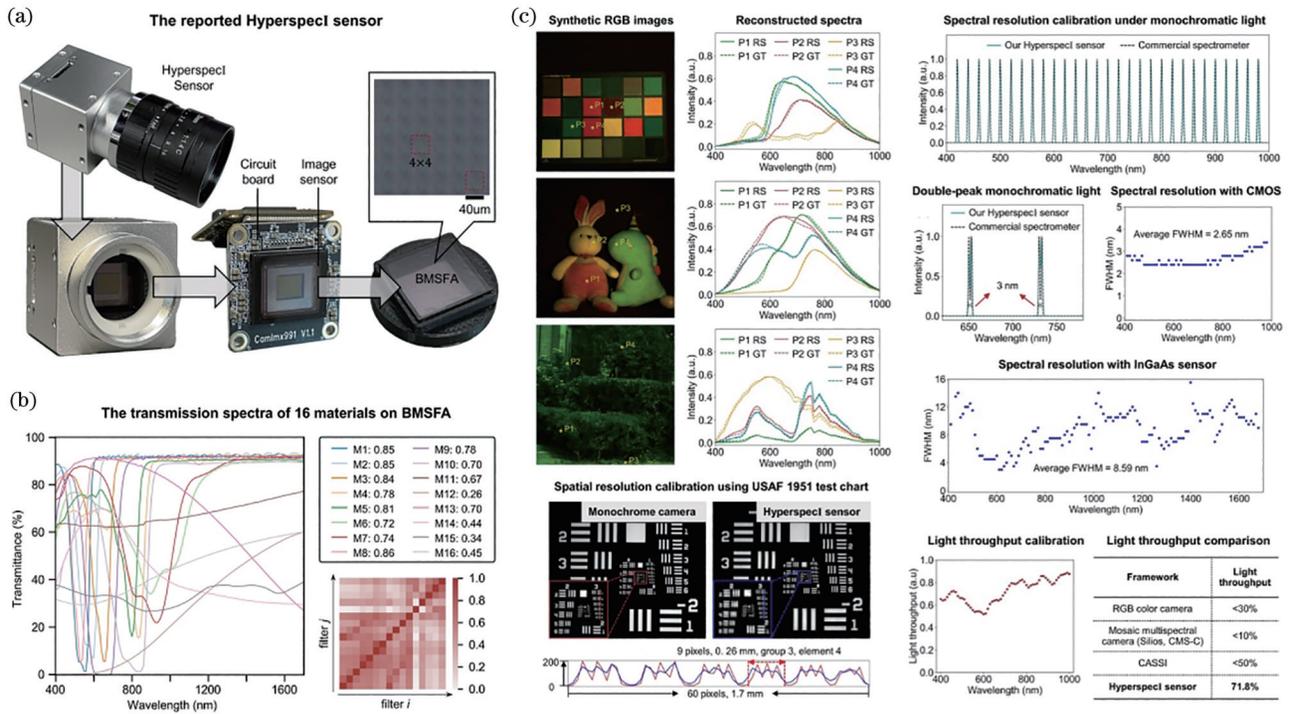


图 44 集成的低成本高光谱成像传感器^[130]。(a)集成高光谱成像传感器的组成与结构;(b)16种材料的透射响应、平均光通量及各光谱响应之间的相关系数矩阵;(c)高光谱性能测试实验结果

Fig. 44 Low-cost integrated hyperspectral imaging sensor^[130]. (a) Composition and structure of integrated hyperspectral imaging sensor; (b) transmission response of 16 materials, average light throughput of each material, and correlation coefficients matrix between each spectral response; (c) experimental results of this hyperspectral imaging sensor

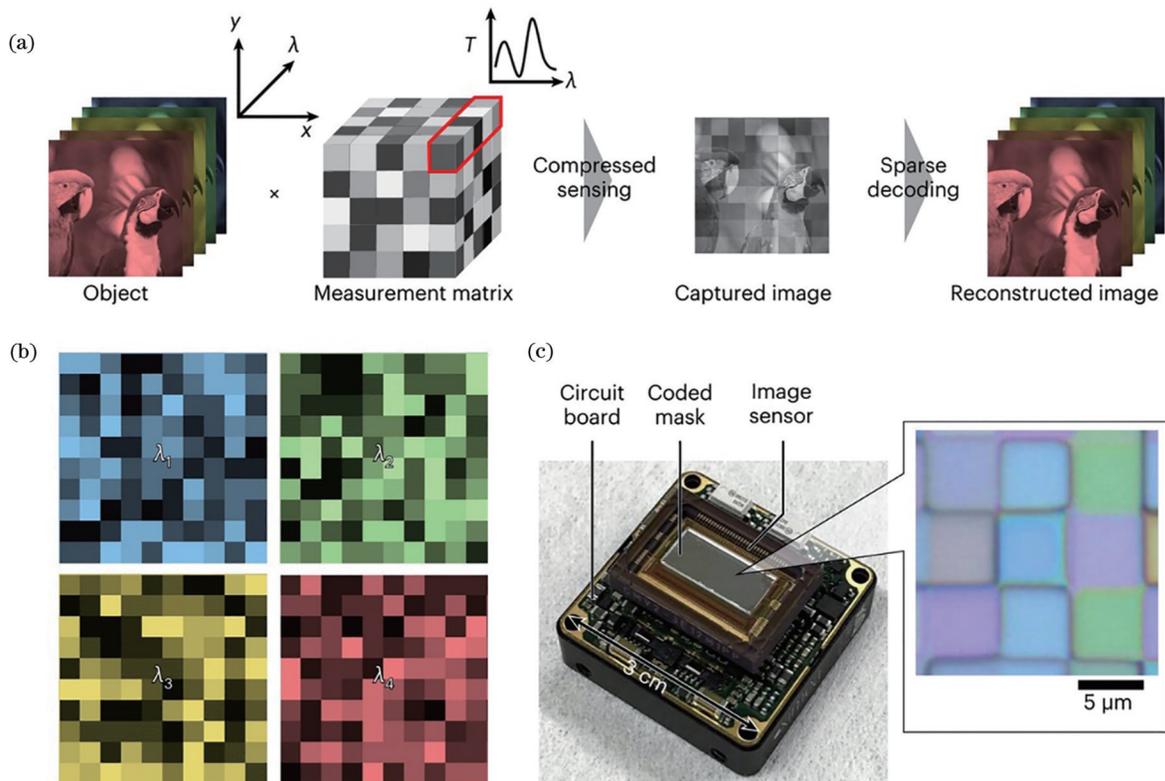


图 45 实时高光谱成像原理图^[131]。(a)压缩光谱感知的概念方案;(b)4种不同波长下编码掩模版的透射图;(c)编码掩模高光谱传感器结构

Fig. 45 Scheme of real-time hyperspectral imaging^[131]. (a) Conceptual scheme of compressive hyperspectral sensing; (b) transmittance patterns of a coded mask at four different wavelengths; (c) structure of coded masked hyperspectral sensor

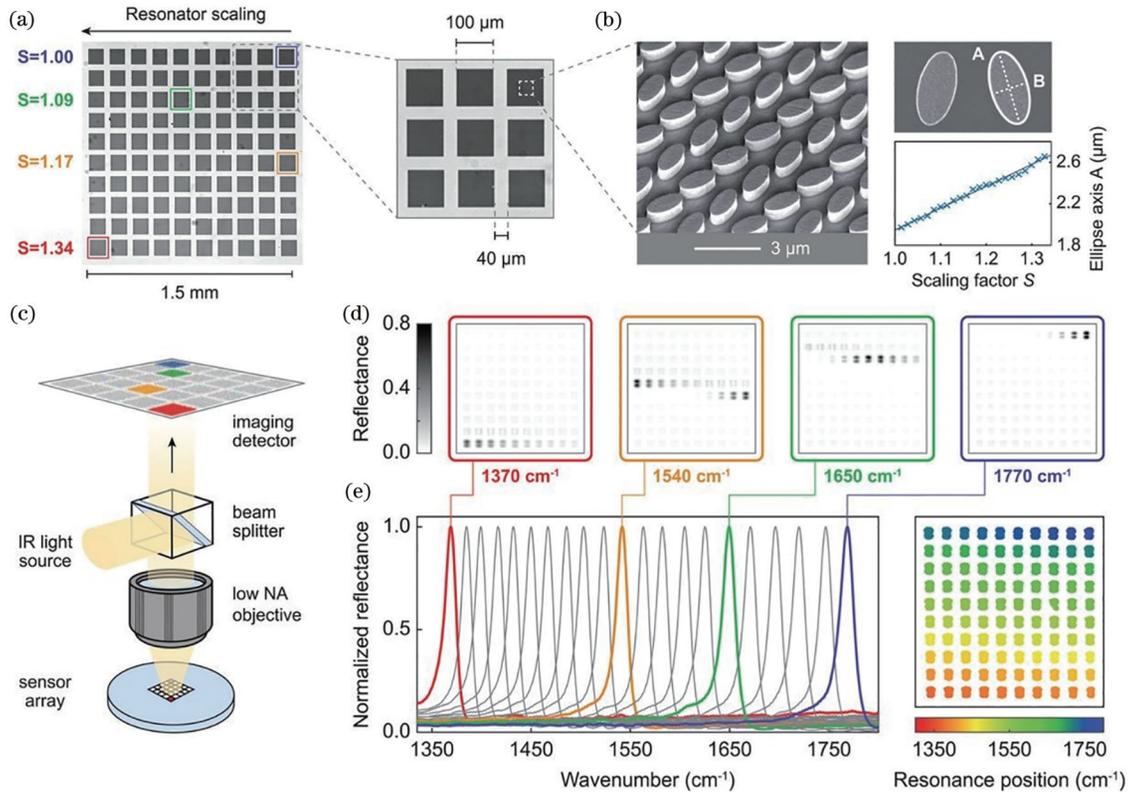


图 46 超表面窄带滤波原理图^[133]。(a)所制备的 100 pixel 超表面的光学图像；(b)利用 SEM 图像证实比例因子与椭圆特征尺寸之间的线性关系；(c)成像系统示意图；(d)(e) 4 个特定波数下记录的像素化超表面反射图像
 Fig. 46 Scheme of metasurface-based narrowband filter^[133]. (a) Optical image of fabricated 100 pixel metasurface; (b) linear relationship between scaling factor and ellipse feature size confirmed by SEM images; (c) scheme of imaging system; (d)(e) reflectance images of pixelated metasurface recorded at four specific wavenumbers

成像的潜力。Lee 等^[137]将介电多层薄膜滤波器集成到 CMOS 图像传感器中,并通过改变嵌入相应像素层谐振腔的 Si 纳米柱阵列的尺寸和位置来调整相应光谱通道的透射波长。值得注意的是,该设计无需光学元件对准,具有 20 个光谱通道,覆盖范围为 700~950 nm,每个光谱通道的半峰全宽(FWHM)为 2.0 nm。

超表面上的微纳结构使其在宽光谱范围内具有一定的波长响应,同样适合于制造宽带 MSFA。Hu 等^[138]提出一种随机宽带滤波器阵列,其中每个像素的超表面重复单元具有不同的形状,从而产生不同的光谱响应。Yang 等^[139]和 Xiong 等^[140]设计了一种结构更加多样化的超表面宽带滤波器阵列,随后使用基于深度学习的重建算法开发了一种实时高光谱成像芯片,在 450~750 nm 范围内光谱分辨率达到 0.8 nm,空间分辨率达到 356 pixel×436 pixel^[132]。基于这项成果,该团队实现了小鼠脑血流检测^[140]、人脸识别^[141]和自动驾驶^[132]等应用场景的高精度光谱重建。

与超表面类似,光子晶体阵列作为另一种利用人工构造的周期性结构进行光场调控的器件,同样能够应用于焦平面光谱滤波。Zhu 等^[142]提出一种紧凑的单帧 CMOS 光谱传感器,用于可见光范围光谱成像,如图 47 所示。其中,核心器件为二维氮化硅光子晶体

(PC)掩模版,采用光刻技术制造,可集成到 CMOS 图像传感器中。该传感器尺寸小巧(300 μm×350 μm),可以用于 400~700 nm 范围内的光谱测量,最佳分辨率为 1 nm。2019 年,Wang 等^[143]提出一种基于光子晶体阵列的片上光谱传感器,并演示了其快照光谱成像能力。通过改变光子晶体上微结构的周期、尺寸等参数,得到 36 种不同的透射光谱,在 550~750 nm 范围内光谱重构分辨率达到 1 nm。

量子点是一种新型的半导体纳米材料,其光学特性备受关注,在光学领域具有较大的应用潜力。Bao 等^[144]提出了量子点光谱仪的概念,使用由胶体量子点组成的二维吸收滤光片阵列取代传统滤光片阵列。所构建的光谱仪由 195 种不同类型的量子点组成,具有覆盖 300 nm 光谱范围的吸收特征。Ma 等^[145]提出一种新的光谱重建算法——TKVA 算法,结合量子点滤光编码,开发了一款具有亚纳米光谱分辨精度的量子点光谱传感芯片及微型光谱仪,如图 48 所示。该算法结合了 Tikhonov 正则化、全变分(TV)正则化和交替方向乘法(ADMM),显著提高了光谱传感芯片的抗噪能力和光谱分辨精度;利用插值算法,在 400~800 nm 范围内光谱分辨率达到 2 nm,光谱分辨精度达到 0.1 nm。

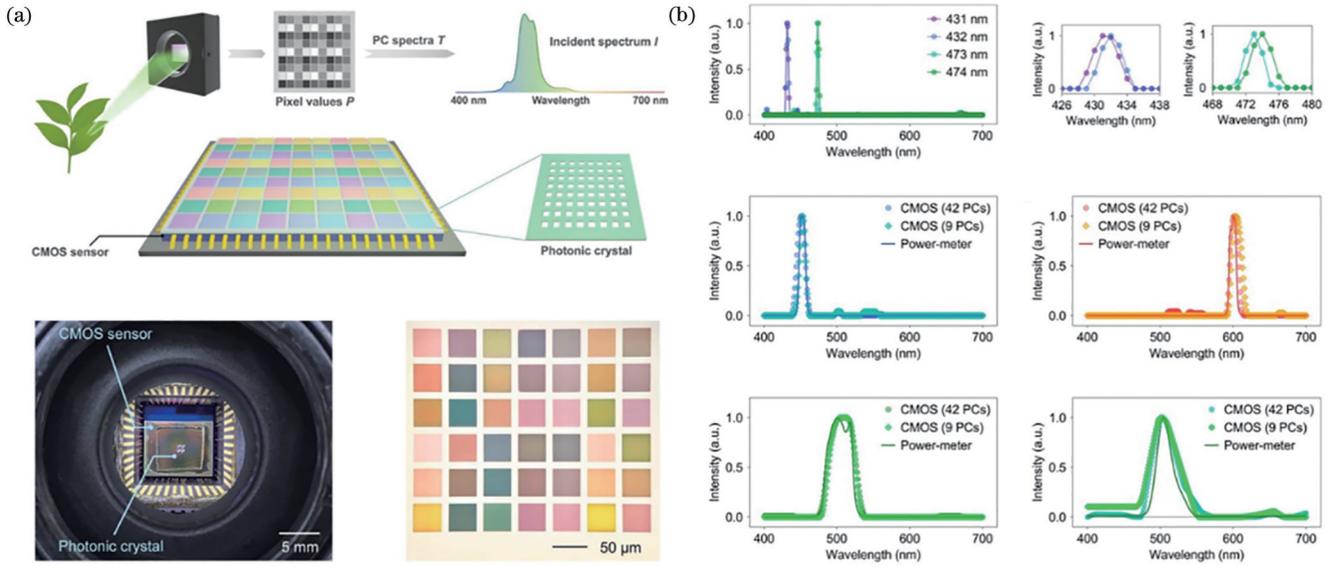


图 47 基于光子晶体滤波的光谱传感器^[142]。(a)传感器工作原理及器件图像;(b)光谱成像实验结果

Fig. 47 Spectral sensor based on photonic crystal filter^[142]. (a) Sensor principle and device image; (b) experimental results of spectral imaging

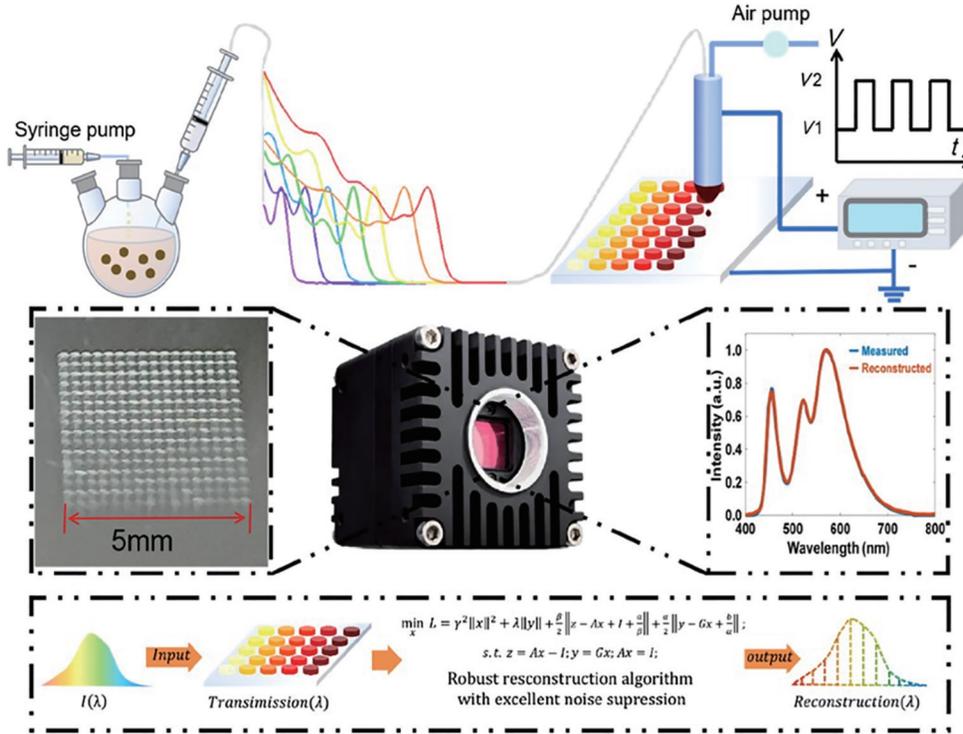


图 48 量子点光谱传感芯片及其光谱重构算法^[145]

Fig. 48 Spectral sensor chip based on quantum dot filter and its spectral reconstruction algorithm^[145]

4.2 衍射调制编码成像技术

衍射光学元件(DOE)是光谱成像中常用的相位调制器件,通过改变DOE的面形结构在光场中引入额外的相位变化。这种调制可以获得随波长变化的点扩散函数,从而区分不同波长的光分量。Malone等^[146]提出一种简化的计算光谱仪DiffuserSpec,通过在给定的传感器区域内复用光谱数据,打破了传统光谱仪固有的一对一空间-光谱像素映射,如图49所示。

DiffuserSpec采用透明胶带作为散射器件,借助其固有的光谱色散来生成每个波长独有的散斑图案,在近红外光谱波段实现了2 nm的光谱分辨率。

基于DiffuserCam的结构,Monakhova等^[147]设计了一种快照式高光谱成像相机Spectral DiffuserCam,该仪器具有结构紧凑、成本低等特点。图50所示为Spectral DiffuserCam的系统结构与原理示意图,成像系统主要由系统前端的散射片、图像传感器及直接

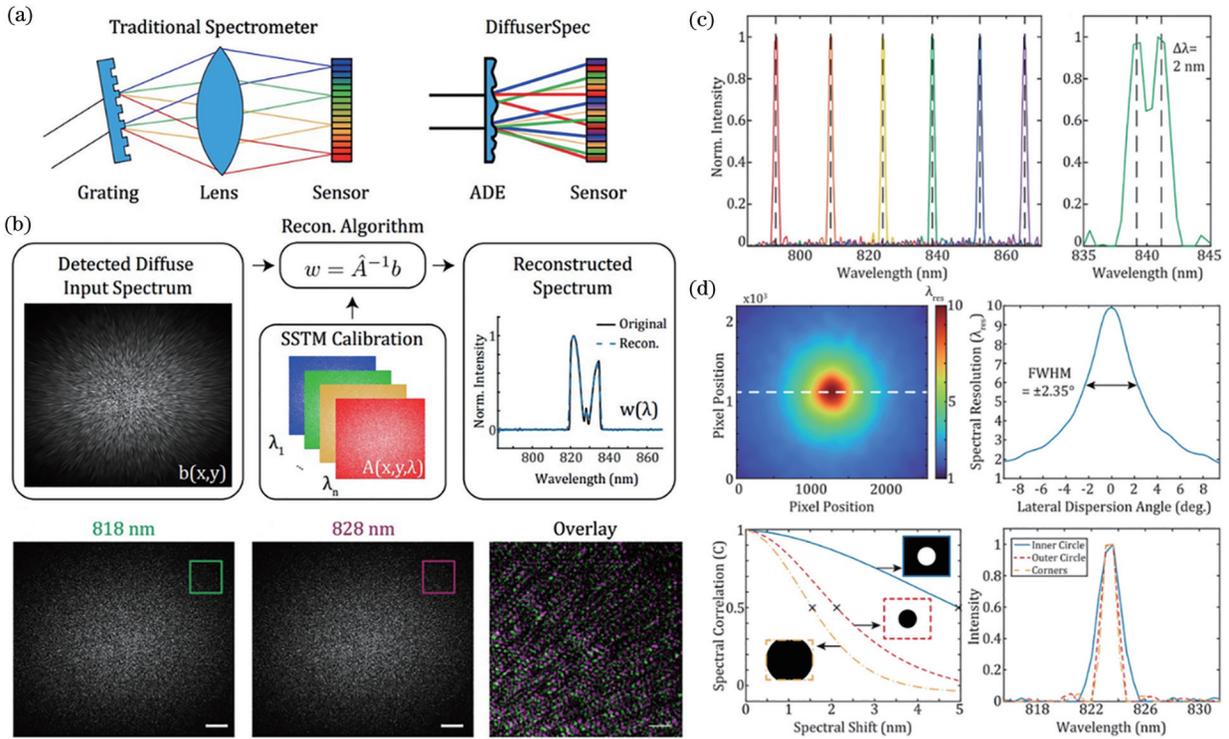


图 49 DiffuserSpec^[146]。(a)传统光谱仪和DiffuserSpec计算光谱仪示意图；(b)光谱重建算法及818 nm和828 nm波长下的编码图案对比；(c)窄带光谱重建结果；(d)光谱分辨率分析

Fig. 49 DiffuserSpec^[146]. (a) Schematic of conventional spectrometer and DiffuserSpec; (b) reconstruction algorithm and comparison of coding patterns at 818 nm and 828 nm; (c) reconstruction results of narrowband spectral; (d) analysis of spectral resolution

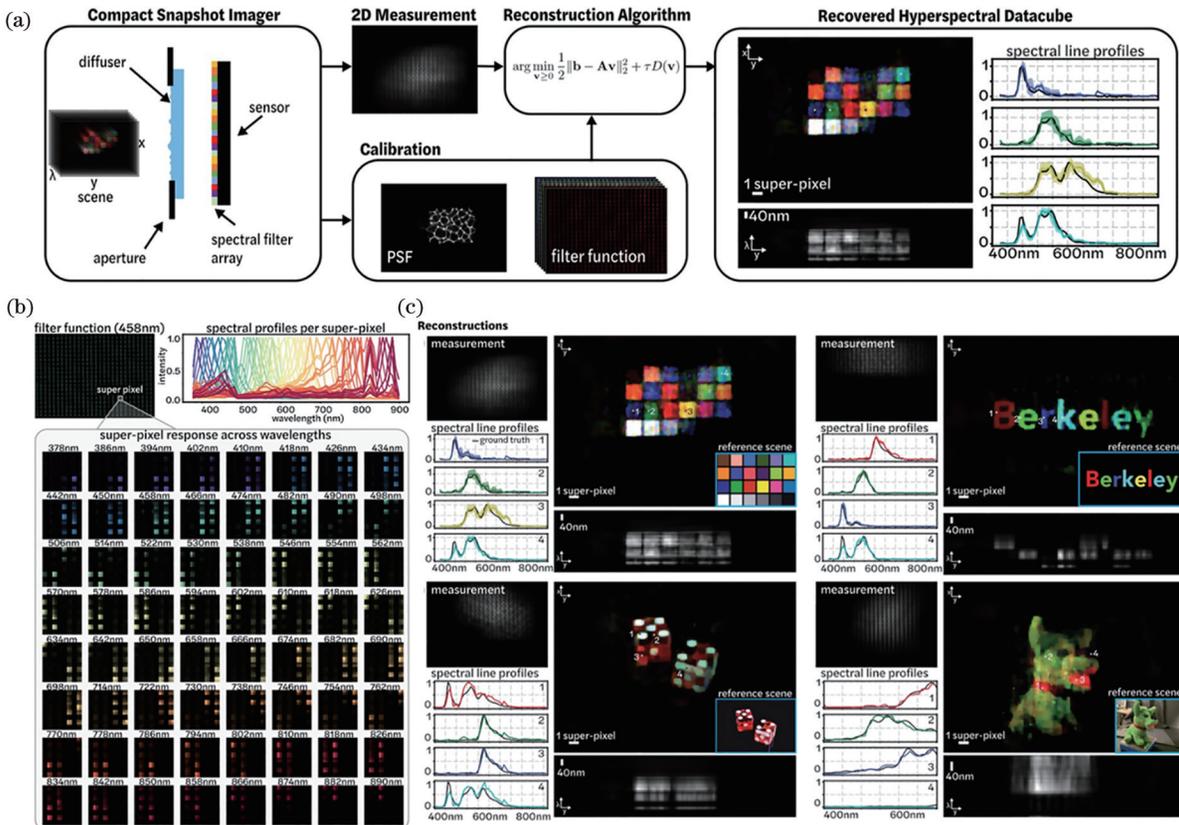


图 50 Spectral DiffuserCam^[147]。(a)Spectral DiffuserCam 成像原理概述；(b)不同波长的点扩散函数校准；(c)高光谱图像重建结果

Fig. 50 Spectral DiffuserCam^[147]. (a) Overview of the Spectral DiffuserCam imaging; (b) PSF calibration under different wavelengths; (c) reconstruction results of hyperspectral image

放置在传感器表面的光谱滤波器阵列组成。入射光经过散射片和光谱滤波阵列后被编码为一个具有唯一性的伪随机图案。结合后端算法逆向求解,能够在恢复出高光谱数据的同时将图像分辨率提升至亚超像素(sub-super-pixel resolution)量级。

Chen 等^[148]提出并研制了一种极简的部分相干衍射计算光谱仪,如图 51 所示。该光谱仪架构精简,核心元件仅需一个任意形状微孔作为衍射色散器件,通过采集待测光谱入射微孔后的衍射信号,并对其进行相干衍射

模式分解,即可精确重构出入射光谱信息。实验结果表明,所提光谱仪单次测量光谱带宽可达 FWHM 的 28%,双峰光谱测量分辨率优于 3 nm,光谱峰峰测量精度优于 1 nm。在此基础上,结合相干衍射成像(CDI)提出一种超宽带衍射成像(UDI)技术^[149],该技术打破了传统 CDI 对光源相干性与探针光谱先验的高度依赖,在未知光谱探针作用下实现了衍射光谱信息恢复。与现有技术相比,成像带宽限制提高了近 4 倍,图像相干性显著增强,重建结果具有更高的保真度。

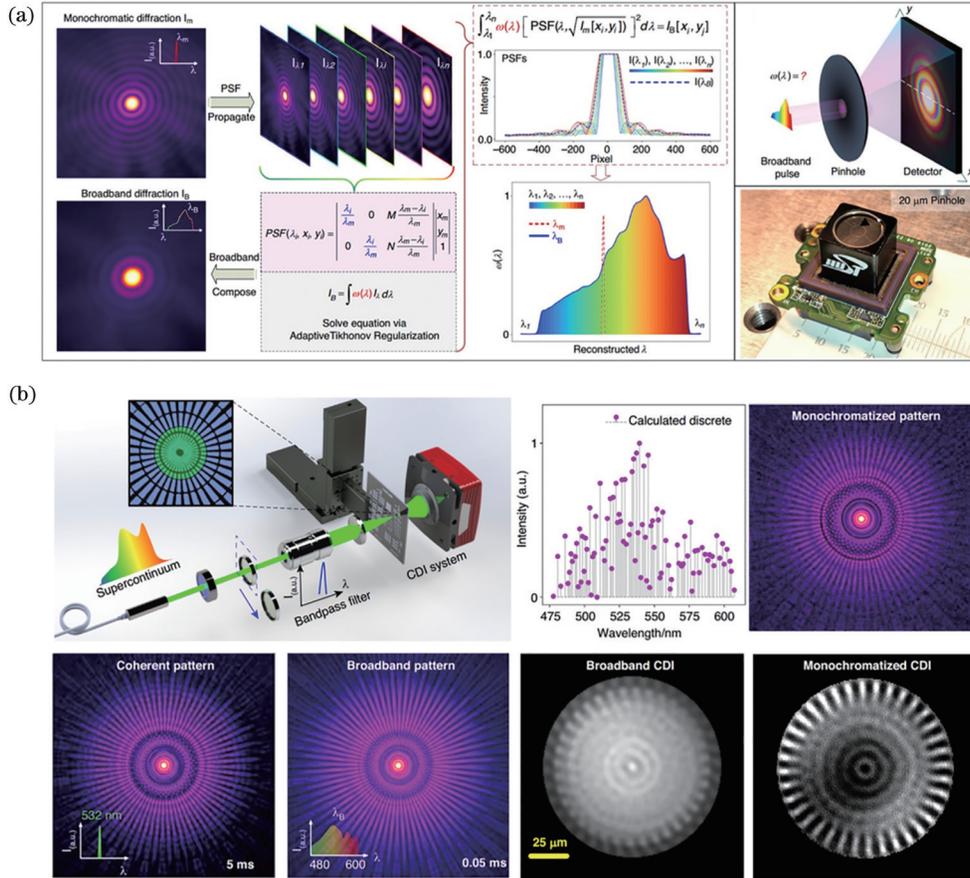


图 51 极简计算光谱仪^[148]。(a)算法原理与系统结构;(b)光谱图像重建结果

Fig. 51 Ultra-simplified computational spectrometer^[148]. (a) Principle and structure of the system; (b) reconstruction results of spectral image

Zhang 等^[150]构建了一种数十兆像素的手持式多光谱相机(THETA),如图 52 所示,实现了可见光范围内 12 个波段、6500 万像素的实时成像,并通过实验证明了 THETA 在户外大型宏观场景成像中的优势和广泛应用能力。

5 焦平面超快成像

超快成像技术历经逾 140 年的发展,科研人员和工程师们不断追求高速成像的极限,以期在极短的时间尺度内捕捉瞬态事件的动态变化。最早快速成像技术可以追溯到 19 世纪,Eadward Muybridge 利用多台胶片相机记录了马的奔跑过程^[151]。此后随着摄影学的发展以及 CCD 与 CMOS 的发明,借助亚飞秒

(10^{-15} s)激光器^[152-153]和高相干电子源^[154-155],可以同时实现阿秒(10^{-18} s)时间分辨率和亚纳米(10^{-9} m)空间分辨率成像^[156-157]。超快成像技术凭借其独特的时间分辨能力,已成为推动科学发现和工业创新的重要手段。它在许多领域的广泛应用,不仅加速了对复杂物理现象的深入研究,还为高精度制造和先进技术开发提供了有力支持^[18]。基于单镜头的超快成像技术一般分为两类:一类是探测器直接探测方法,如超快分幅/采样相机成像^[158]、飞秒时间分辨光学偏振法成像^[159]和顺序定时全光映射摄影(STAMP)^[160];另一类是计算反演成像方法,其基本思想是联合前端的编码调控与后端的信息反演,包括全息摄影^[161]、断层扫描^[162]和基于 CS 的摄影^[163-164]。对实时捕获瞬态事件而言,尽管直接探测方法

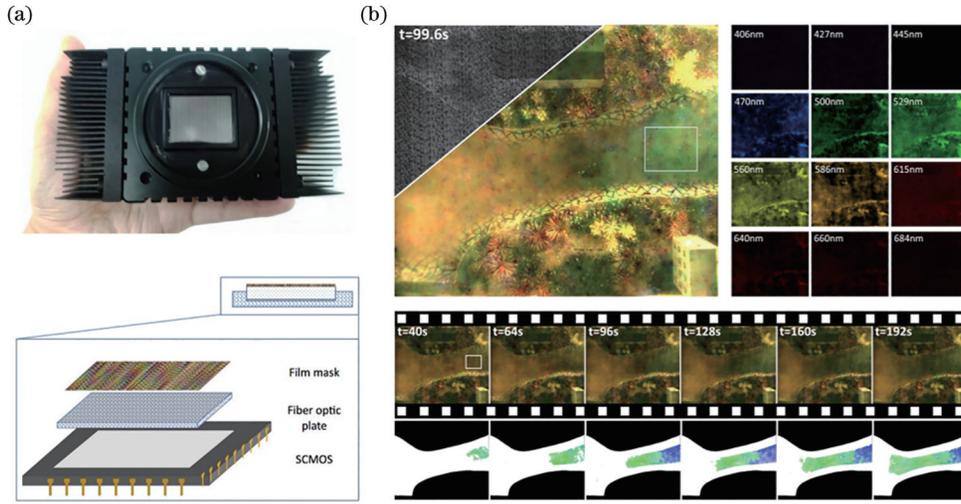


图 52 THETA 多光谱相机^[150]。(a)系统结构示意图;(b)河流微型景观中污水扩散过程的多光谱成像结果

Fig. 52 THETA multi-spectral camera^[150]. (a) Scheme of the system; (b) multi-spectral imaging of diffusion process of sewage in a miniature landscape of a river

能够直接或通过简单处理获得高帧频图像,但是基于计算成像的超快成像方法在成像速度、每帧图像像素数和序列深度(每次快门的帧数)的优势愈发明显,通过借助编码调控降低数据传输需求的同时,降低对昂贵的高速成像传感器的依赖,因此在未来拥有巨大的发展潜力。

本节所聚焦的基于焦平面编码调控的超快成像技术一般分为两类:一类是在空间维度进行二维编码调控,利用传感器自身的快门特性或者由光学编码器件引入的快门特性,实现单一测量图像与多时刻时空切片的映射,例如全局快门^[165]、逐像素快门^[166]、卷帘快门^[167]等;另一类是在二维快门编码调控的基础上,增加焦平面超分辨中的CS编码,进一步提升空间维度的利用率以获得更高精度的时空切片,例如压缩超快摄影(CUP)^[164]等。接下来对上述两类实现方式进行归纳总结。

5.1 编码快门

5.1.1 全局快门

Veeraraghavan 等^[168]通过全局快门^[165]实现了周期性场景的极高时间分辨率成像,帧频可以达到

2000 frame/s,如图 53 所示。全局快门成像通过在选定的曝光时间内使用二进制伪随机序列“抖动”相机快门(打开和关闭),再结合抖动将盒式滤波器更改为宽带滤波器,从而保留模糊图像中的高频空间细节,将相应的不适定问题反卷积为一个适定问题。Hitomi 等^[169]将这一想法扩展到非周期性场景,通过学习视频块上的过完备词典来实现视频的稀疏表示,同时通过对控制单元进行直接修改,实现在图像传感器上从单幅图像重建视频的同时保持高空间分辨率。然而,全局快门从根本上受限于仅提供视频的空间不变编码,这可能不足以提供足够丰富的高速视频编码,因此全局快门难以广泛应用于具有复杂运动模式的场景。

5.1.2 逐像素快门

Reddy 等^[166]提出了可编程像素压缩相机(P2C2),该相机通过逐像素快门扩展了全局快门的思想,如图 54 所示。在 P2C2 中,每个像素都有唯一编码(通常是二进制值和伪随机编码),通过优化来自 P2C2 的数据以及有关视频的其他先验信息来实现时间超分辨

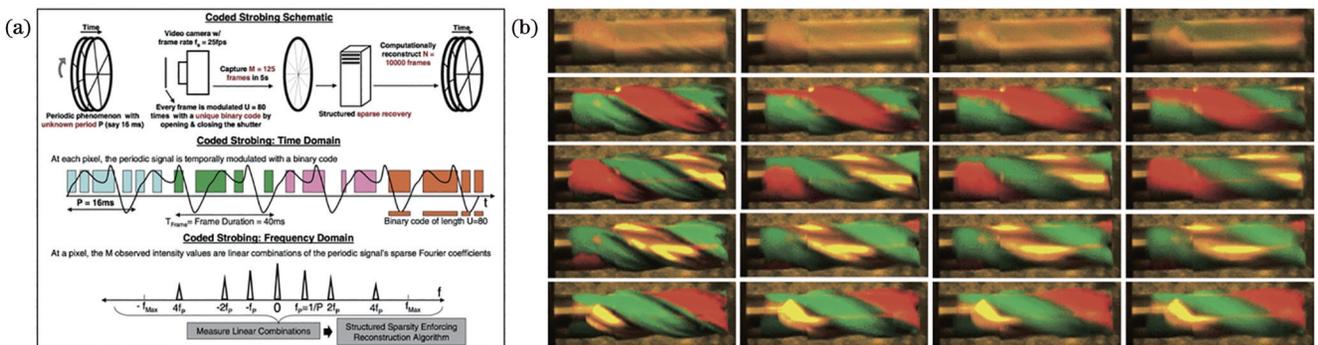


图 53 全局快门周期性场景成像^[165]。(a)系统原理图;(b)不同转速的工具头重建结果

Fig. 53 Global shutter periodic scene imaging^[165]. (a) System principle; (b) reconstruction results of tool head at different rotation speeds

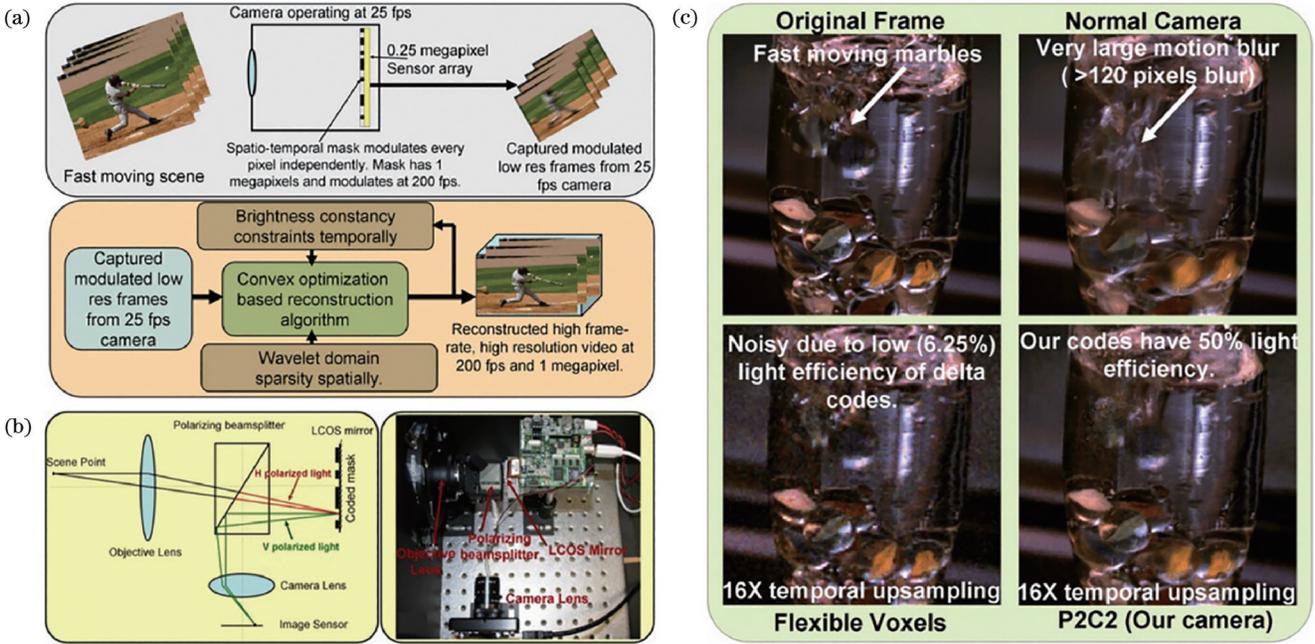


图 54 可编程像素压缩相机(P2C2)^[166]。(a)P2C2原理示意图;(b)光学系统示意图及实际搭建系统;(c)大理石掉入水中的视频序列重建结果对比

Fig. 54 Programmable pixel compressive camera (P2C2)^[166]. (a) Schematic of P2C2 principle; (b) optical system diagram and actual setup; (c) comparison of reconstructed results from a video sequence showing a marble dropping into water

率。同时,他们还使用稀疏表示对视频的空间冗余进行建模。使用光流推断出的亮度恒定约束对时间冗余进行建模,可以从观测到的低帧频编码视频中准确还原出底层的高速视频帧。P2C2架构使用液晶光学相位调制器(LCoS)作为空间光调制器,在传感器平面上进行光学放置后,与高分辨率的二维传感器精确对准。P2C2原型实现了16倍的时间分辨率提升(帧频

为184 frame/s),即使对于复杂的运动模式也能够实现时间超分辨率成像。

Hitomi等^[169]使用逐像素编码扩展了P2C2相机,如图55所示,该编码更适合在具有逐像素电子快门的图像传感器中实现。通过学习视频块上的过完备词典,可以实现视频的稀疏表示,同时遵循当前图像传感器设备架构中的采样限制原则。通过使用硅基液晶

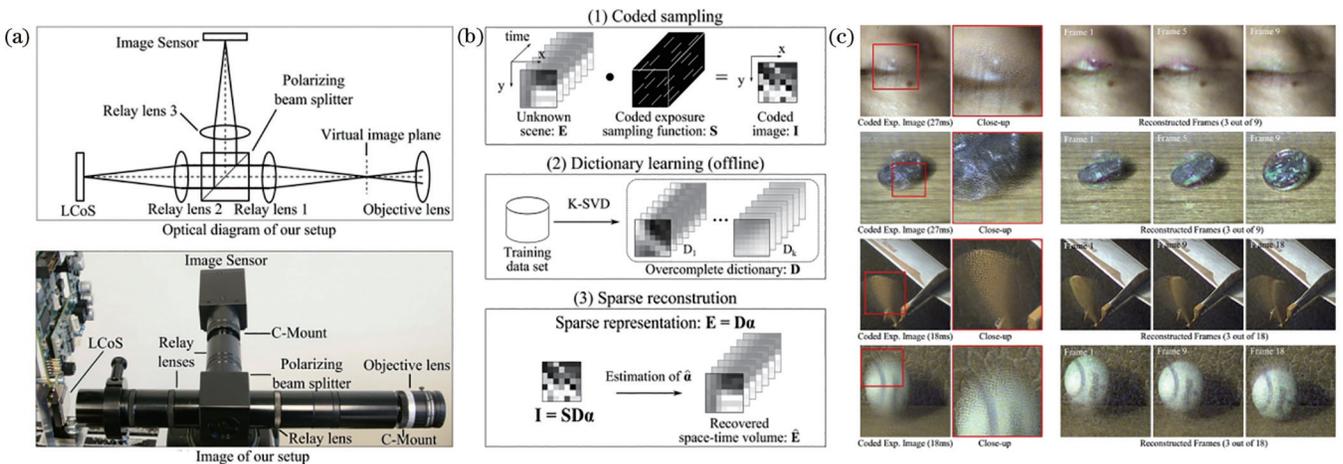


图 55 通过学习过完备词典从单幅编码曝光照片中获取视频^[169]。(a)系统原理样机,通过LCoS模拟传感器表面像素的单独曝光;(b)所提方法的3个组成部分,即编码曝光采样和将时空体积投影到图像中,从训练视频数据中学习过完备字典,以及从单幅编码图像中稀疏重建时空信息;(c)重建实验结果

Fig. 55 Video extraction from a single encoded exposure photo using a learned over-complete dictionary^[169]. (a) Prototype of the system, simulating individual pixel exposure on the sensor surface via LCoS; (b) proposed method consists of three parts, i. e., encoded exposure sampling and projection of the spatiotemporal volume onto the image, learning an over-complete dictionary from training video data, and sparsely reconstructed spatio-temporal information from a single coded image; (c) experimental reconstruction results

(LCoS)设备,搭建了一个具有逐像素编码曝光控制的原理样机。相应的模拟和实验结果表明,该方法能够有效地从单帧图像中重建视频流(333 frame/s),并保持较高的空间分辨率。然而,逐像素编码的方法需要事先确定过完备词典的最大时间分辨率。如果需要以不同的时间分辨率重建视频,则必须重新训练不同的字典。此外,硬件设置方面要求逐像素编码精确对准相机和 LCoS,否则产生的对准误差将会导致伪影出现,影响 P2C2 相机的成像质量。

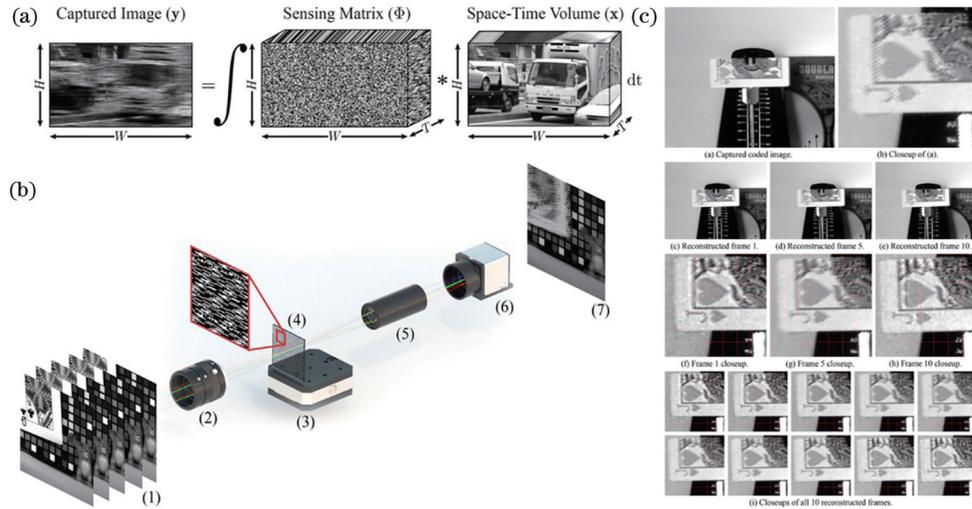


图 56 平移掩模版时间多路复用编码成像^[171]。(a) 平移掩模版时间多路复用编码成像前向传感模型;(b) 系统设计示意图;(c) 结合具有高通滤波器的最小二乘约束方法重建一张牌的任意运动场景

Fig. 56 Translation mask temporal multiplexing coded imaging^[171]. (a) Forward sensing model for translation mask temporal multiplexing coded imaging; (b) schematic of system design; (c) reconstruction of a card in a scene with arbitrary motion using constrained least squares method with a high-pass filter

5.1.3 卷帘快门

卷帘快门传感器逐行曝光而非同时曝光的成像系统,通常会导致图像中快速移动的物体出现倾斜或变形的伪影,这种现象被称为“卷帘快门效应”。Gu 等^[167]提出一种用于 CMOS 图像传感器的新型读出架构,称为编码卷帘快门,如图 57 所示。该方案将传感器中每一行的读出时间和曝光长度进行独立控制,再结合行曝光差异实现场景的三维时空采样。通过编码滚动快门能够实现更少的偏斜伪影(子图像内的时间滞后)、更高的时间分辨率(两幅连续子图像之间的时间滞后)以及更大的动态范围。

Antipa 等^[172]使用多路复用光学器件对场景信息进行空间压缩,实现场景信息的快速采样,如图 58 所示;通过所提的稀疏恢复算法,实现了滚动快门传感器捕获图像的解译,以超过 4500 frame/s 的速度重建视频帧。此外,该团队构建了一个概念验证系统,可以 4545 frame/s 的速度解析 1500 Hz 的动态场景。同时,根据前向模型推导理论时间分辨率界限,并通过实验证实了理论预测,成功地观察到时空带宽积远超直接采样方法的样本。

Llull 等^[170]使用可机械转换的编码孔径对视频进行码分多址压缩;Koller 等^[171]提出一种通过传感器平面中的平移掩模版实现时间多路复用的方法,如图 56 所示。结合光路中的平移二进制光掩模版对场景运动进行编码。通过解译所记录的编码信息,可从捕获的每幅图像重建得到多帧图像,从而有效地合成高速视频(能够实现 2 Mpixel、743 frame/s 的重建结果),避免了 DMD 和 LCoS SLM 所涉及的硬件复杂性。

5.2 CUP

在超快成像技术的众多创新方法中,CUP 以其卓越的性能脱颖而出。2008 年,杜克大学的 Brady 课题组^[173-174]提出了利用 CS 技术的多光谱成像(CASSI)系统,通过收集少量(相对于数据立方体的大小)编码测量值,并使用稀疏重建方法从嘈杂的投影中估计数据立方体。随后,Gao 等^[164]将 CASSI 系统引入到超快摄影领域并实现 CUP 技术。CUP 技术巧妙地融合了 CS 与条纹相机技术,实现了 10 Tframe/s 的成像速度。在这一过程中,条纹相机负责在二维空间维度上实现类似卷帘快门编码,而 CS 技术则进一步提升了空间维度的利用率,从而获得更高精度的时空切片。这两种技术的结合使得 CUP 技术能够在单次拍摄中捕捉到数百帧的序列深度,展现了其在高动态范围成像领域的强大潜力。

尽管 CUP 成像系统的体积和结构可能与传统的焦平面编码技术有所不同,但是其核心原理仍然是对焦平面上获取的图像进行编码。例如,通过空间光调制器对像面进行编码,并将编码后的图像在焦平面处进行成像,这在效果上等同于在传感器前进行编码。

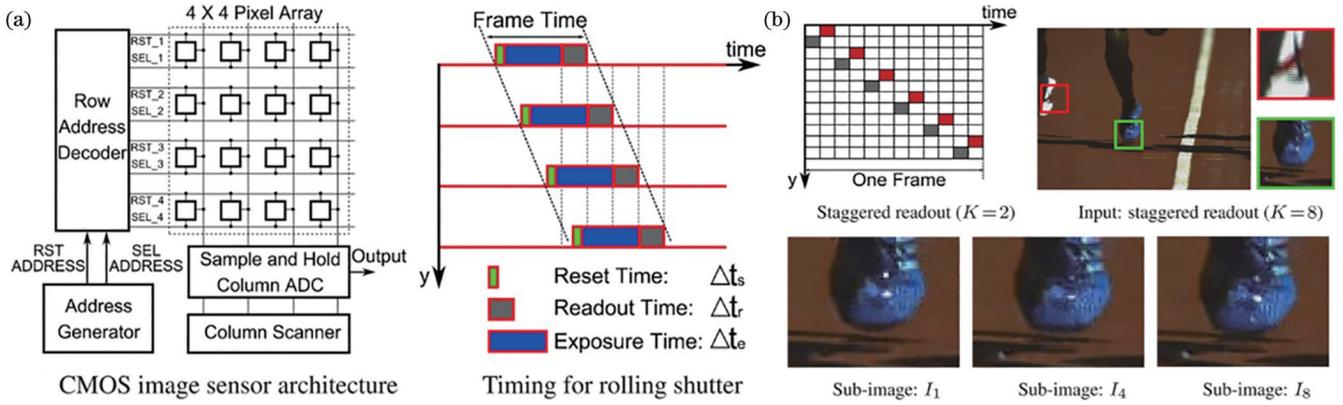


图 57 编码卷帘快门^[167]。(a)CMOS 图像传感器中的地址生成器用于实现所需的行重置和行选择模式的编码滚动快门,以实现灵活的时空采样;(b)用于高速摄影的交错读出

Fig. 57 Coded rolling shutter^[167]. (a) Address generator in the CMOS image sensor is used to implement a coded rolling shutter with the desired row reset and row selection patterns for flexible spatiotemporal sampling; (b) interlaced readout for high-speed photography

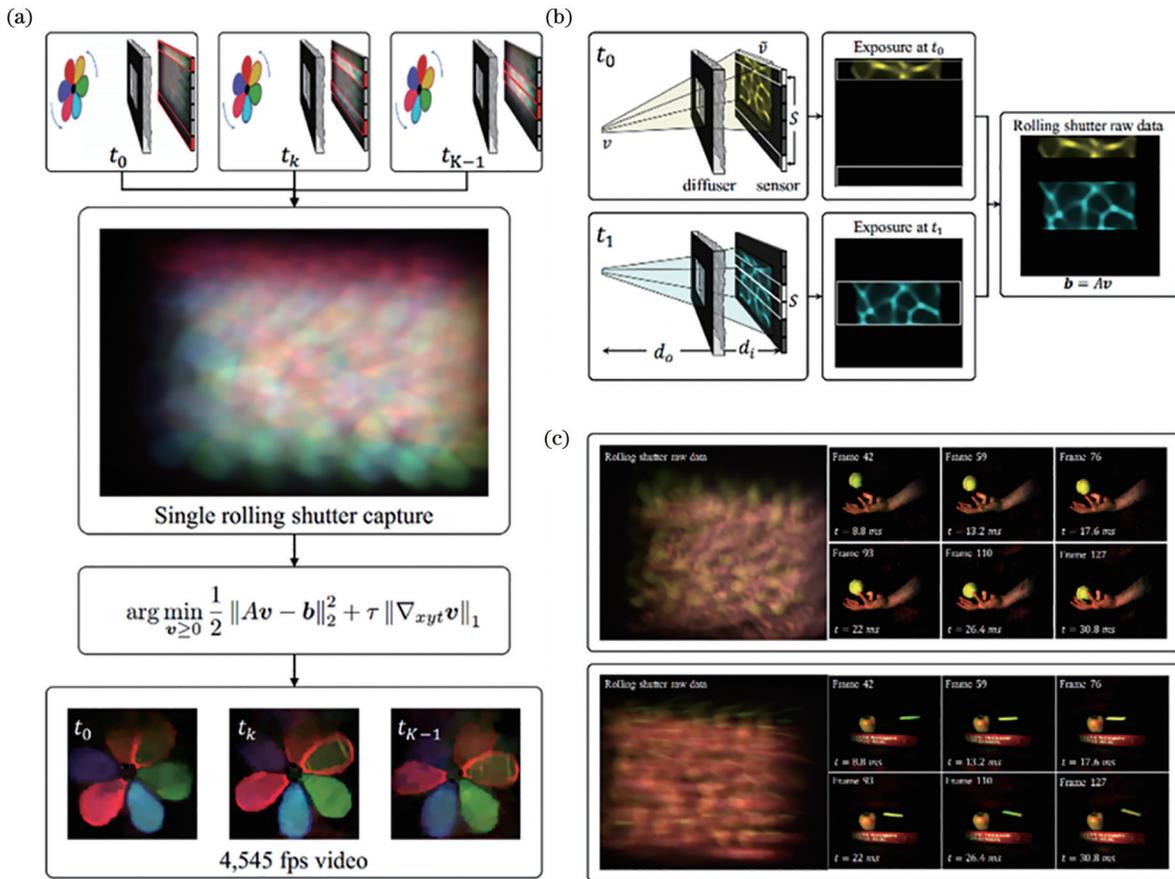


图 58 利用无透镜计算相机拍摄的单次滚动快门图像的高速视频^[172]。(a)算法原理;(b)对于随时间变化的场景形成的图像,其中两个点源(一个黄色、一个蓝色)在独特的 y 位置以及时间 t_0 和 t_1 处闪烁;(c)从单次拍摄图像(曝光时间为 $660 \mu\text{s}$)重建的实验视频

同样地,条纹相机的高速偏转功能,可以看作是拥有极快速卷帘快门的传感器,进一步提升了成像速度。因此,在本节“焦平面超快成像”的讨论中,将 CUP 技术纳入讨论范围。随着制造工艺的不断进步,预计

CUP 系统将能够在焦平面上实现更直接的调控,无需中继,这将打破传统成像系统在速度和分辨率方面的限制。这样的技术进步将为研究人员提供一个强大的工具,使他们能够在极短的时间尺度内进行精确

的观测和分析。

利用 CUP 进行实验通常分为数据采集和图像重建两个步骤。数据采集的实验系统示意图^[164]如图 59(a)所示:动态场景首先在 DMD 上进行成像;然后,由 DMD 在空间域中进行编码;最后,经过编码的动态场景再通过成像系统收集。在不同时刻,条纹相机的

描控制模块提供扫描电压,使产生的电子束沿着电压方向进行偏移后击中荧光屏,生成可见光图像。编码图像由不同时刻的图像叠加而成,因此通过 CS 图像重构算法对图像进行解码,以重建图像序列。通过单次操作的数据采集和图像重建流程,能够实现高达 1×10^{11} frame/s 的成像速度,实验结果如图 59(b)所示。

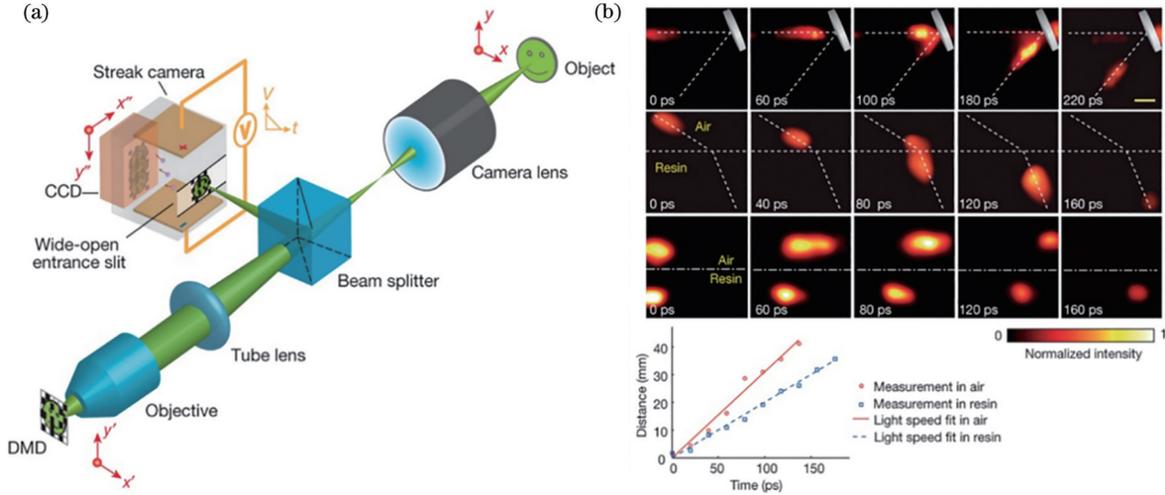


图 59 压缩超快摄影^[164]。(a)系统示意图;(b)代表性时间帧,展示了激光脉冲在空气中从镜面反射、在空气-树脂界面处的折射以及两束激光脉冲的竞速过程

Fig. 59 Compressed ultrafast photography^[164]. (a) Schematic of the system; (b) representative time frames showing the laser pulse being reflected by a mirror in the air, refracted at the air-resin interface, and the race between two laser pulses

Yang 等^[175]采用多组随机码同时对动态场景进行编码,这种方法称为多重编码 CUP,如图 60 所示。通过将一个超快的动态场景分成多个副本,每个副本使用一个独立的掩码进行编码。图像信息模型通常包含信号和噪声两部分,其中信号在每次测量中具有相关

性,而噪声则是随机且无关的。因此,采用多重编码成像技术可以有效抑制噪声,从而提升动态场景的成像质量。

Liang 等^[176]提出一种无损编码 CUP(LLE-CUP)方法。LLE-CUP 有 3 种视图,其中:两种视图的动态

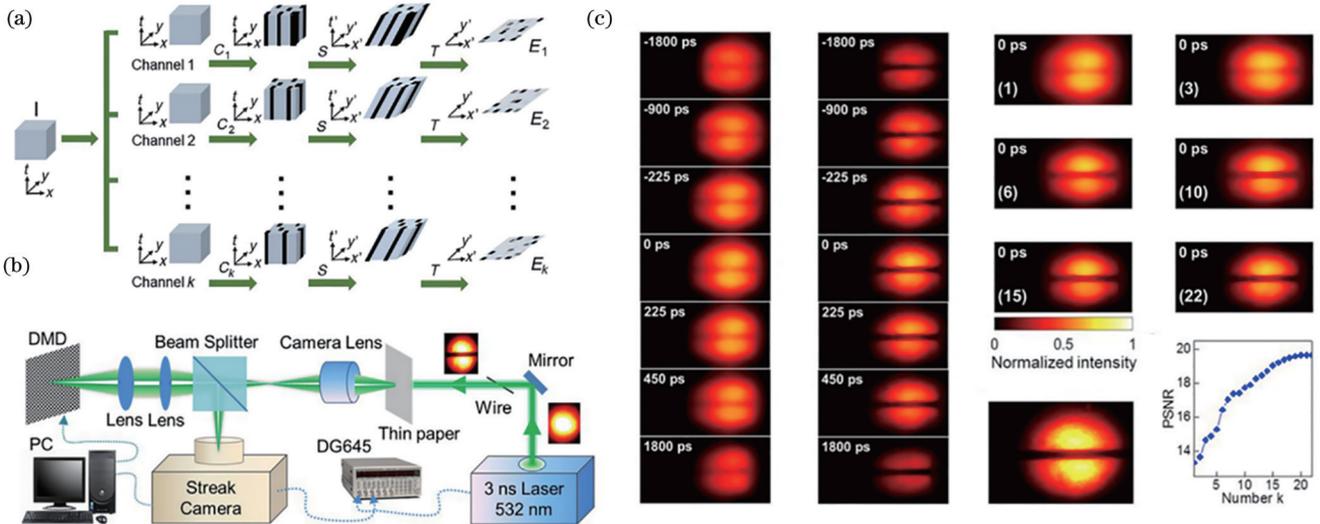


图 60 多重编码 CUP 方法以及成像结果^[175]。(a)数据采集示意图,其中 t 是时间, C_k 为空间编码算子, S 为时间剪切算子, T 为时空积分算子;(b)系统示意图;(c)不同编码数量下空间调制激光脉冲的实验结果

Fig. 60 Multi-encoding CUP and corresponding imaging results^[175]. (a) Schematic of data acquisition, where t represents time, C_k denotes spatial encoding operators, S is the temporal shearing operator, and T is the spatiotemporal integration operator; (b) schematic of the system; (c) experimental results of spatially modulated laser pulses under different encoding numbers

场景通过互补编码进行处理,随后由条纹相机进行剪切和集成,这两种动态场景结果称为剪切视图;第三种视图的动态场景则通过外部 CCD 直接集成,称为未剪切视图。只有剪切视图对从压缩的二维图像中提取三维数据立方体具有关键作用,而未剪切视图则用于约束重建图像的空间分布和强度。在 LLE-CUP 方法中,剪切视图为每个采集通道提供不同的编码,同时每幅图像结合其对应的编码方式进行重建。在某些情况下,未剪切视图仍然有助于提高图像重建质量,并且一些方法也利用了这种特性^[177-178]。值得注意的是,这两种方案都可以通过提高采样率有效提升 CUP 的性能。

基于 CUP 原型, Liang 等^[177] 提出了可实现 10^{13} frame/s 帧频的压缩超快摄影 (T-CUP) 系统。该系统在单次相机曝光中以 100 fs 的帧间隔实现了

时间聚焦的实时、超快、被动成像,如图 61(a) 所示。与第一代 CUP 系统类似, T-CUP 通过两步分别执行数据采集和图像重建。不同之处在于, T-CUP 在分束器的另一侧安装了一个外部 CCD 来提供空间域强度约束作为图像重建算法的先验条件。在 T-CUP 系统中,三维时空场景首先通过光束分束器形成两幅复制图像。第一幅复制图像通过外部 CCD 在曝光期间进行时间积分并直接记录;第二幅复制图像则由 DMD 进行空间编码,然后送入飞秒条纹相机,该相机具有最高 200 fs 的时间分辨率。在相机内部,场景沿着一个空间轴被剪切并由探测器记录。通过调整条纹相机的时间剪切速度, T-CUP 的帧频可以在 0.5~10 T frame/s 的范围内变化,相应的时间分辨率为 6.34~0.58 ps,实验结果如图 61(b) 所示。

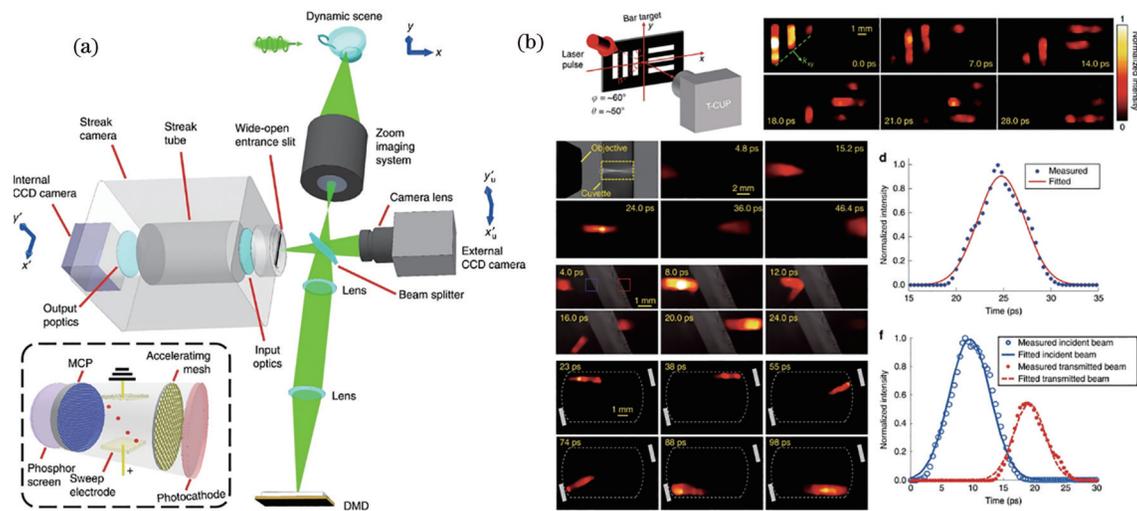


图 61 帧频为 10^{13} frame/s 的压缩超快摄影^[177]。(a) 系统示意图; (b) T-CUP 对激光脉冲扫描、空间聚焦、反射和分裂 4 种基本光学现象进行实时成像
Fig. 61 Compressed ultrafast photography with frame rate of 10^{13} frame/s^[177]. (a) Schematic of the system. (b) T-CUP performs real-time imaging of fundamental optical phenomena of laser pulse scanning, spatial focusing, reflection, and splitting

Wang 等^[179] 提出了压缩超快光谱摄影 (CUSP) 技术,如图 62 所示。作为一项突破性的成像方法, CUSP 能够在超短时间尺度上实现高精度的光谱与

动态信息捕获。CUSP 技术通过有机结合光学调控与信号反解方法,使其在主动和被动模式下均展现出卓越的成像能力。在主动模式下, CUSP 通过协同

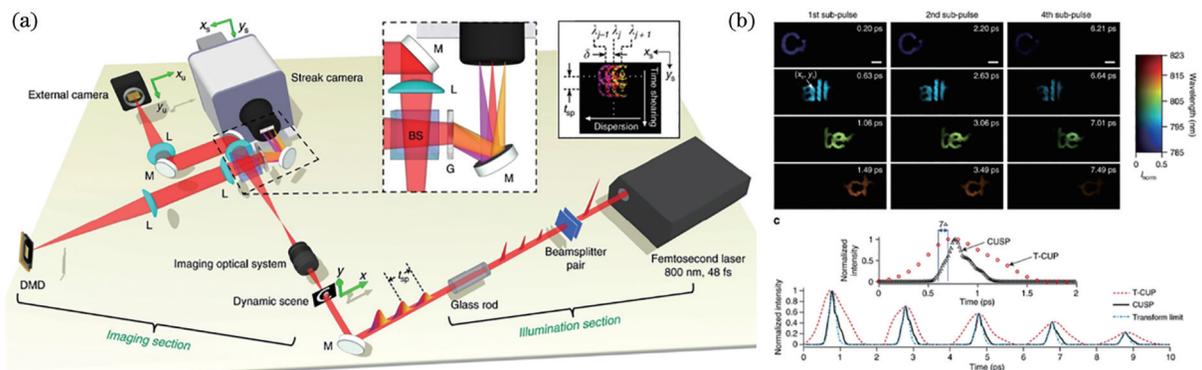


图 62 压缩超快光谱摄影^[179]。(a) 用于 70 Tframe/s 成像的主动 CUSP 系统示意图; (b) 超快线性光学现象的 CUSP 成像
Fig. 62 Compressed ultrafast spectral photography^[179]. (a) Schematic of active CUSP system for 70 Tframe/s imaging; (b) CUSP imaging of ultrafast linear optical phenomena

使用光谱编码、脉冲空间分散、时间剪切和基于CS的图像重建算法后,能够在超高帧频(7×10^{13} frame/s)及相对高帧频(1×10^3 frame/s)的条件下捕捉到前所未有的复杂动态过程,实现了啁啾脉冲序列斜入射字母后的时空演化过程捕获。在被动模式下,CUSP提供 0.5×10^{12} frame/s的4D光谱成像,并首次应用于单次光谱分辨荧光寿命成像显微镜(SR-FLIM)。

6 总结与展望

光电成像技术本质上是一种二维强度探测技术,在传统基于“所见即所得”的框架下,光电传感器成像维度受限,难以实现对目标物体光场信息获取,从而出现远观物体“看不清”、伪装目标“探不精”以及高速物体“测不快”等问题,其根本原因在于现有的光电探测器件仍然停留在对二维光场强度的积分探测难以突破传统光电器件成像维度单一的瓶颈问题。因此,要进一步提升光电探测系统的功能、性能,无论是在理论层面还是在工程实现层面都面临着严峻的挑战。

近年来出现的计算成像技术赋予传统成像系统高维度信息获取能力,颠覆了传统点对点一一映射的线性成像关系,演变为一种间接反演的成像范式(线性或非线性),其本质也是“物理域”和“计算域”的相辅相成,使得成像调控形式更加多样,充分发挥成像元件(光学镜头、调控器件、探测单元)的应用潜力,并平衡成像端和处理端之间对图像获取和信息反演所依赖的资源。

本文重点围绕“基于焦平面编码的计算成像”这一科学问题,深入挖掘物函数及其耦合场的高维度信息在不同空间尺度、不同光场特性的物理内涵。以实现“高分辨、多维度、宽波段、快帧频”为技术脉络,概括性地综述了基于焦平面编码调控的新型计算反演成像方式。通过在成像链路最末端的图像传感器焦平面处引入编码器件(如位移器、掩模版、空间光调制器等)进行高维光场调控,将原本耦合在一起的高维信息在成像焦平面上进行降维展开与投影映射。这意味着传统点对点的空间映射能够在额外的维度进行编码调控,通过施加一个维度的调控手段,传输矩阵相应增加两个自由度,使得高维光场信息在二维强度维度投影与探测成为可能。通过信息复用/置换的成像思想,显著提升传统光电传感器的成像性能/维度,降低对硬件系统的过度依赖,突破传统光电器件所能够达到的功能/性能疆界,并在空间、深度/角度、波长及时间等维度上提供多方面拓展延伸的可能性。

1) 在焦平面超分辨探测中,每个像素可在时间(微扫描超分辨)或空间(焦平面编码掩模版超分辨)维度加以调控,以实现亚像素光强变化信息的获取(频域中即为高频信号的搬移),结合反演重建算法则可实现超像素分辨率(突破采样极限)探测,重建传统探测器所混叠的高频信息;

2) 在焦平面光场成像中,一般通过微透镜阵列与掩模版在空间维度进行编码,牺牲 x - y 维度换取光场的 θ - ψ 维度的角度信息,将原本难以直接感知的光场信息在空域或者频域进行复用,结合计算光场重建算法则可实现光场感知与波前传感;

3) 在焦平面光谱感知中,通过带通滤波片、超表面滤波片与量子点滤波片等滤波编码手段,将连续的耦合光谱信息映射到离散的空间强度分布中,实现多光谱、高光谱计算反演成像;

4) 在焦平面超快成像中,时间(编码快门)与空间(条纹相机)维度的编码调控可将精细的时空切片映射到二维强度传感器上,大幅超越探测器的读出极限(针对观测目标的多次测量会导致时间成本上升、数据负荷增加等问题,对物理模型及校准标定的性能提出了更高要求)。

从这些典型的案例可以看出,虽然计算光学成像的研究内容是相对发散的(聚焦于某一项功能/性能的提升),但最终的目标是一致的:让成像系统捕捉到客观物体更高维度/丰富的信息,延伸并扩展人眼的视觉感知。俗话说,有得必有失。计算成像技术的发展同样面临着机遇和挑战。例如,空间光调制器的引入虽然能够提供更强的光场调控能力,但也会存在一定的衍射效应,系统成本急剧增加,并且大量的数据采集和存储也会增加系统的硬件需求和能耗;无透镜相机虽然在理论上提供了一种新颖的成像方式,能够避免传统光学透镜的一些限制,如有限的成像分辨能力与像差问题,但在实际应用中,其成像质量还无法与传统的高质量光学透镜媲美。因此,以更高效的成像方法、更小的数据负载、更优的计算效能获得精准的重构结果是今后要探索的方向。未来,我们可以期待基于焦平面编码的编码调控计算成像方法在以下3个方面取得进一步发展:

1) 新型光学调控器件。近年来,超表面和量子点等相关领域的研究取得了显著的进展,推动了新型超表面器件的快速发展。这些技术不仅为解决传统光学系统在体积、质量和集成度方面的局限性提供了创新的解决方案,还为计算成像技术带来了新的光学调控自由度,拓宽了其应用范围和成像潜力。

2) 多维编码调控机制。进一步探索焦平面编码调控手段,通过照明端(波长复用、合成波长)与成像端(非对称编码、相位编码、旋转编码)的联合调控方式,建立光场调控模型,将物理现象的核心机制转换为数学模型,在成像分辨率、信噪比、灵敏度之间取得最优平衡关系,实现病态逆向高效信息反解。

3) 新兴的数字域反演算法。目前,深度学习/人工智能相关技术已被广泛应用到计算成像的各个领域中,其充分利用了“隐藏”在观测图像中的“统计特性”,通过海量数据的学习映射,实现高维特征提取。通过建立物理域的光场调控信息与后端统计模型关联信

息,实现智能化的光场调控反演模型,这可能会是人工智能时代下的计算编码领域的重要发展方向。当然,对于某些特殊的应用环境,普适性应用也是一个值得思考的问题。

最后,我们也要认识到在计算光学编码调控反演华丽的外衣下,其本质仍围绕“信息置换”思想,通过牺牲某一维度的分辨率或信息密度来换取另一维度的成像带宽。这种高度定制化且紧密耦合的设计依赖光电探测器与光学系统的联合设计,导致成像系统功能一旦确定,难以在同一系统上依据不同场景需求实现多种功能的重配置、小型化与高集成。因此,若能在成像链路最末端——图像传感器焦平面处引入编码器件来完成像元级光场信息的调控与集成,实现“光场”替代“光强”的新型成像探测机理,则有望打破传统光电探测器件的固有瓶颈,实现其普适性原位替代,并推动光电成像系统的批量化迭代升级革新。

参 考 文 献

- [1] da Vinci L. The notebooks of Leonardo da Vinci: Volume 1[M]. Gloucester: Courier Corporation, 2012.
- [2] Ives F E. Parallax stereogram and process of making same[EB/OL]. [2024-07-20]. <https://patents.google.com/patent/US725567A/en>.
- [3] Lippmann G. La photographie integrale[J]. Comptes-Rendus, 1908, 146: 446-451.
- [4] Gershun A. The light field[J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18(1/2/3/4): 51-151.
- [5] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[M]//Computational models of visual processing. Cambridge: The MIT Press, 1991.
- [6] Meinel A B. Cost-scaling laws applicable to very large optical telescopes[J]. Optical Engineering, 1979, 18(6): 186645.
- [7] Computational imaging[EB/OL]. (2019-03-15)[2024-07-20]. https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_imaging.
- [8] Kubala K, Dowski E, Cathey W. Reducing complexity in computational imaging systems[J]. Optics Express, 2003, 11(18): 2102-2108.
- [9] Mait J, Athale R, van der Gracht J. Evolutionary paths in imaging and recent trends[J]. Optics Express, 2003, 11(18): 2093-2101.
- [10] Bimber O. Guest editor's introduction: computational photography-the next big step[J]. Computer, 2006, 39(8): 28-29.
- [11] Raskar R. Computational photography[C]//Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, October 13-15, 2009, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2009: CTuA1.
- [12] Mait J N, Euliss G W, Athale R A. Computational imaging[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(2): 409-483.
- [13] 李晟, 王博文, 管海涛, 等. 远场合成孔径计算光学成像技术: 文献综述与最新进展[J]. 光电工程, 2023, 50(10): 230090.
- [14] Li S, Wang B W, Guan H T, et al. Far-field computational optical imaging techniques based on synthetic aperture: a review[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(10): 230090.
- [15] 曹铭智, 王博文, 齐静雅, 等. 复眼相机阵列动态全景图像合成技术(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(16): 1611016.
- [16] Cao M Z, Wang B W, Qi J Y, et al. Dynamic panoramic image synthesis technology using compound eye camera array(invited) [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(16): 1611016.
- [17] Jiang P Y, Li Z P, Ye W L, et al. High-resolution 3D imaging through dense camouflage nets using single-photon LiDAR[J]. Advanced Imaging, 2024, 1(1): 011003.
- [18] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. Optica, 2021, 8(3): 344-349.
- [19] Baraniuk R G, Goldstein T, Sankaranarayanan A C, et al. Compressive video sensing: algorithms, architectures, and applications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2017, 34(1): 52-66.
- [20] Qi D L, Zhang S A, Yang C S, et al. Single-shot compressed ultrafast photography: a review[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(1): 014003.
- [21] Tran M H, Fei B W. Compact and ultracompact spectral imagers: technology and applications in biomedical imaging[J]. Journal of Biomedical Optics, 2023, 28(4): 040901.
- [22] Johnson W R, Wilson D W, Fink W, et al. Snapshot hyperspectral imaging in ophthalmology[J]. Journal of Biomedical Optics, 2007, 12(1): 014036.
- [23] 聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.
- [24] Nie Y F, Xiangli B, Zhou Z L. Advances in light field photography technique[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(5): 563-572.
- [25] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303001.
- [26] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303001.
- [27] Zhang R N, Zhou N, Tang H C, et al. High-speed multi-modal extended depth-of-field microscopy with an electrically tunable lens[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(4): 2300770.
- [28] Li S, Wang B W, Guan H T, et al. Snapshot macroscopic Fourier ptychography: far-field synthetic aperture imaging via illumination multiplexing and camera array acquisition[J]. Advanced Imaging, 2024, 1(1): 011005.
- [29] Wang B W, Li S, Chen Q, et al. Learning-based single-shot long-range synthetic aperture Fourier ptychographic imaging with a camera array[J]. Optics Letters, 2023, 48(2): 263-266.
- [30] Li S, Wang B W, Liang K Y, et al. Far-field synthetic aperture imaging via Fourier ptychography with quasi-

- plane wave illumination[J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(10): 2370024.
- [27] 张润南, 蔡泽伟, 孙佳嵩, 等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811003.
- Zhang R N, Cai Z W, Sun J S, et al. Optical-field coherence measurement and its applications in computational imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811003.
- [28] 张润南, 周宁, 周子豪, 等. 光场表征及其分辨率提升技术: 文献综述及最新进展[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(9): 20240347.
- Zhang R N, Zhou N, Zhou Z H, et al. Light field representation and its resolution improvement techniques: an overview[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(9): 20240347.
- [29] Brady D J. *Optical imaging and spectroscopy*[M]. Hoboken: Wiley, 2009.
- [30] 左超, 陈钱. 计算光学成像: 何来, 何处, 何去, 何从? [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 20220110.
- Zuo C, Chen Q. Computational optical imaging: an overview[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20220110.
- [31] Nyquist H. *Certain topics in telegraph transmission theory* [J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, 47(2): 617-644.
- [32] Kamiadakis G E, Kevrekidis I G, Lu L, et al. *Physics-informed machine learning*[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3: 422-440.
- [33] Wang F, Wang C L, Chen M L, et al. *Far-field super-resolution ghost imaging with a deep neural network constraint*[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1.
- [34] Guo Y, Chen J, Wang J D, et al. *Closed-loop matters: dual regression networks for single image super-resolution* [C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 5406-5415.
- [35] Wang B W, Zou Y, Zhang L F, et al. *Multimodal super-resolution reconstruction of infrared and visible images via deep learning*[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 156: 107078.
- [36] Huang J B, Singh A, Ahuja N. *Single image super-resolution from transformed self-exemplars*[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 5197-5206.
- [37] Nazeri K, Thasarathan H, Ebrahimi M. *Edge-informed single image super-resolution*[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW), October 27-28, 2019, Seoul, Republic of Korea. New York: IEEE Press, 2019: 3275-3284.
- [38] Park S C, Park M K, Kang M G. *Super-resolution image reconstruction: a technical overview*[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, 20(3): 21-36.
- [39] Hardie R C, Barnard K J, Bognar J G, et al. *High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system*[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(1): 247-260.
- [40] Wronski B, Garcia-Dorado I, Ernst M, et al. *Handheld multi-frame super-resolution*[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(4): 28.
- [41] Zhang X F, Huang W, Xu M F, et al. *Super-resolution imaging for infrared micro-scanning optical system*[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7719-7737.
- [42] Sony. *Alpha 7R III with 35 mm full-frame image sensor* [EB/OL]. [2024-09-21]. <https://www.sony.com.sg/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-7rm3a>.
- [43] Ben-Ezra M, Zomet A, Nayar S K. *Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts*[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(6): 977-987.
- [44] Donoho D L. *Compressed sensing*[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [45] Slinger C W, Bennett C R, Dyer G, et al. *An adaptive coded aperture imager: building, testing and trialing a super-resolving terrestrial demonstrator*[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8165: 816511.
- [46] Gordon N. *Adaptive coded-aperture imaging and tracking in the IR*[R]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [47] Slinger C, Bennett H, Dyer G, et al. *Adaptive coded-aperture imaging with subpixel superresolution*[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 854-856.
- [48] Gordon N T, de Villiers G D, Ridley K D, et al. *An experimental infrared sensor using adaptive coded apertures for enhanced resolution*[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7818: 781806.
- [49] Chen H J, Asif M S, Sankaranarayanan A C, et al. *FPA-CS: focal plane array-based compressive imaging in short-wave infrared*[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA. New York: IEEE Press, 2015: 2358-2366.
- [50] Marcia R F, Willett R M. *Compressive coded aperture superresolution image reconstruction*[C]//2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, March 31-April 4, 2008, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2008: 833-836.
- [51] Xiao L L, Liu K, Han D P, et al. *A compressed sensing approach for enhancing infrared imaging resolution*[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(8): 2354-2360.
- [52] Li Y H, Wang X D. *Compressive imaging beyond the sensor's physical resolution via coded exposure combined with time-delay integration*[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107491.
- [53] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. *High performance imaging using large camera arrays*[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765-776.
- [54] Plemmons R, Prasad S, Mathews S, et al. *PERIODIC: integrated computational array imaging technology*[C]//Adaptive Optics: Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-

- ROM, June 18-20, 2007, Vancouver. Washington, DC: OSA, 2007: CMA1.
- [55] Yang F, Wu J C, Gao Y H, et al. [A four-aperture super-resolution camera based on adaptive regularization parameter tuning](#)[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 165: 107562.
- [56] Chan W S, Lam E Y, Ng M K, et al. [Super-resolution reconstruction in a computational compound-eye imaging system](#)[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2007, 18(2): 83-101.
- [57] Wu H, Luo S J, Chen M Y, et al. [Super-resolution image restoration for microlens array imaging system](#)[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 170: 110139.
- [58] Levoy M, Hanrahan P. [Light field rendering](#)[M]//Whitton M C. *Seminal graphics papers: pushing the boundaries*, volume 2. New York: ACM Press, 2023: 441-452.
- [59] Shack R V, Platt B C. [Production and use of a lenticular hartmann screen](#)[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(5): 656-661.
- [60] Wu Y C, Sharma M K, Veeraraghavan A. [WISH: wavefront imaging sensor with high resolution](#)[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 44.
- [61] Wu Y C, Li F Q, Willomitzer F, et al. [WISHED: wavefront imaging sensor with high resolution and depth ranging](#)[C]//2020 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 24-26, 2020, St. Louis, MO, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [62] Adelson E H, Wang J Y A. [Single lens stereo with a plenoptic camera](#)[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106.
- [63] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. [Light field photography with a hand-held plenoptic camera](#)[D]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [64] Tan Z P, Thurow B S. [Perspective on the development and application of light-field cameras in flow diagnostics](#) [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 101001.
- [65] Strobl K H, Lingenauber M. [Stepwise calibration of focused plenoptic cameras](#)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, 145: 140-147.
- [66] Georgiev T, Lumsdaine A. [Reducing plenoptic camera artifacts](#)[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(6): 1955-1968.
- [67] Lumsdaine A, Georgiev T. [The focused plenoptic camera](#) [C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 16-17, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009.
- [68] Raytrix 3D light field camera technologyraytrix. [3D Light-Field Vision Plenoptic Metrology](#)[EB/OL]. [2024-08-09]. <https://raytrix.de/home-3-2-2/>.
- [69] [Lytro](#)[EB/OL]. (2024-06-28) [2024-07-20]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Lytro>.
- [70] Todor G, Andrew L. [Superresolution with plenoptic camera 2.0](#)[C]//Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group), 2009: STuA6.
- [71] Wu J M, Guo Y D, Deng C, et al. [An integrated imaging sensor for aberration-corrected 3D photography](#) [J]. *Nature*, 2022, 612(7938): 62-71.
- [72] Guo Y D, Hao Y H, Wan S, et al. [Direct observation of atmospheric turbulence with a video-rate wide-field wavefront sensor](#)[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18: 935-943.
- [73] Levoy M, Ng R, Adams A, et al. [Light field microscopy](#) [C]//ACM SIGGRAPH 2006 Papers on - SIGGRAPH '06, July 30-August 3, 2006, Boston, Massachusetts. New York: ACM Press, 2006: 924-934.
- [74] Levoy M, Zhang Z, McDowall I. [Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays](#)[J]. *Journal of Microscopy*, 2009, 235(2): 144-162.
- [75] Prevedel R, Yoon Y G, Hoffmann M, et al. [Simultaneous whole-animal 3D imaging of neuronal activity using light-field microscopy](#)[J]. *Nature Methods*, 2014, 11(7): 727-730.
- [76] Cong L, Wang Z G, Chai Y M, et al. [Rapid whole brain imaging of neural activity in freely behaving larval zebrafish \(danio rerio\)](#)[J]. *eLife*, 2017, 6: 28158.
- [77] Wu J, Lu Z, Jiang D, et al. [Iterative tomography with digital adaptive optics permits hour-long intravital observation of 3D subcellular dynamics at millisecond scale](#)[J]. *Cell*, 2021, 184(12): 3318-3332.
- [78] Ihrke I, Wetzstein G, Heidrich W. [A theory of plenoptic multiplexing](#)[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 483-490.
- [79] Veeraraghavan A, Raskar R, Agrawal A, et al. [Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing](#)[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 69.
- [80] Antipa N, Necula S, Ng R, et al. [Single-shot diffuser-encoded light field imaging](#)[C]//2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 13-15, 2016, Evanston, IL, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [81] Liu F L, Kuo G, Antipa N, et al. [Fourier DiffuserScope: single-shot 3D Fourier light field microscopy with a diffuser](#)[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28969-28986.
- [82] Yanny K, Antipa N, Liberti W, et al. [Miniscope3D: optimized single-shot miniature 3D fluorescence microscopy](#) [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 171.
- [83] Sicairos M G. [Methods for coherent lensless imaging and X-ray wavefront measurements](#)[D]. Rochester: University of Rochester, 2010.
- [84] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. [3D computational imaging with single-pixel detectors](#)[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [85] Xiao X, Javidi B, Martinez-Corral M, et al. [Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and](#)

- applications[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 546-560.
- [86] Schwarz A, Wang J G, Shemer A, et al. [Lensless three-dimensional integral imaging using variable and time multiplexed pinhole array](#)[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1814-1817.
- [87] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. [Multiscale gigapixel photography](#)[J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386-389.
- [88] Shapiro J H. [Computational ghost imaging](#)[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [89] Torralba A, Freeman W T. [Accidental pinhole and pinspeck cameras: revealing the scene outside the picture](#)[C]//2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 374-381.
- [90] Antipa N, Kuo G, Heckel R, et al. [DiffuserCam: lensless single-exposure 3D imaging](#)[J]. *Optica*, 2017, 5(1): 1-9.
- [91] Boominathan V, Robinson J T, Waller L, et al. [Recent advances in lensless imaging](#)[J]. *Optica*, 2022, 9(1): 1-16.
- [92] Fenimore E E, Cannon T M. [Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays](#)[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 337-347.
- [93] de Weert M J, Farm B P. [Lensless coded-aperture imaging with separable Doubly-Toeplitz masks](#)[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 023102.
- [94] Asif M S, Ayremlou A, Sankaranarayanan A, et al. [FlatCam: thin, lensless cameras using coded aperture and computation](#)[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(3): 384-397.
- [95] Boominathan V, Adams J K, Asif M S, et al. [Lensless imaging: a computational renaissance](#)[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(5): 23-35.
- [96] Adams J K, Boominathan V, Avants B W, et al. [Single-frame 3D fluorescence microscopy with ultraminiature lensless FlatScope](#)[J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): e1701548.
- [97] Barrett H H. [Fresnel zone plate imaging in nuclear medicine](#)[J]. *Journal of Nuclear Medicine*, 1972, 13(6): 382-385.
- [98] Shimano T, Nakamura Y, Tajima K, et al. [Lensless light-field imaging with Fresnel zone aperture: quasi-coherent coding](#)[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(11): 2841-2850.
- [99] Nakamura T, Watanabe T, Igarashi S, et al. [Superresolved image reconstruction in FZA lensless camera by color-channel synthesis](#)[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39137-39155.
- [100] Nakamura Y, Shimano T, Tajima K, et al. [Lensless light-field imaging with Fresnel zone aperture](#)[C]//ITE Technical Report 40.40 Information Sensing Technologies (IST). The Institute of Image Information and Television Engineers, 2016: 7-8.
- [101] Tajima K, Nakamura Y, Yamaguchi K, et al. [Improving resolution of lensless imaging with higher harmonics of Fresnel zone aperture](#)[J]. *Optical Review*, 2022, 29(2): 153-158.
- [102] Wu J C, Zhang H, Zhang W H, et al. [Single-shot lensless imaging with Fresnel zone aperture and incoherent illumination](#)[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 53.
- [103] Stork D G, Gill P R. [Optical, mathematical, and computational foundations of lensless ultra-miniature diffractive imagers and sensors](#)[J]. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 2014, 7(3): 4.
- [104] Gill P R, Stork D G. [Lensless ultra-miniature imagers using odd-symmetry spiral phase gratings](#)[C]//Imaging and Applied Optics, June 23-27, 2013, Arlington, Virginia. Washington, DC: OSA, 2013: CW4C.3.
- [105] Stork D G, Gill P R. [Lensless ultra-miniature CMOS computational imagers and sensors](#)[J]. *Proceedings of Sensorcomm*, 2013: 186-190.
- [106] Kuo G, Liu F L, Grossrubatscher I, et al. [On-chip fluorescence microscopy with a random microlens diffuser](#)[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8384-8399.
- [107] Boominathan V, Adams J K, Robinson J T, et al. [PhlatCam: designed phase-mask based thin lensless camera](#)[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 42(7): 1618-1629.
- [108] Monakhova K, Yurtsever J, Kuo G, et al. [Learned reconstructions for practical mask-based lensless imaging](#)[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28075-28090.
- [109] Zomet A, Nayar S K. [Lensless imaging with a controllable aperture](#)[C]//2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), June 17-22, 2006, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2006: 339-346.
- [110] Candès E J, Wakin M B. [An introduction to compressive sampling](#)[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [111] Candès E J. [Compressive sampling](#)[M]//Proceedings of the international congress of mathematicians Madrid. Pasadena: EMS Press, 2007: 1433-1452.
- [112] Huang G, Jiang H, Matthews K, et al. [Lensless imaging by compressive sensing](#)[C]//2013 IEEE International Conference on Image Processing, September 15-18, 2013, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 2101-2105.
- [113] Jiang H, Huang G, Wilford P. [Multi-view in lensless compressive imaging](#)[J]. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 2014, 3(1): e15.
- [114] Hua Y, Nakamura S, Asif M S, et al. [SweepCam: depth-aware lensless imaging using programmable masks](#)[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, 42(7): 1606-1617.
- [115] Jiang Z L, Kong Y, Qian W Y, et al. [Resolution and signal-to-noise ratio enhancement for synthetic coded aperture imaging via varying pinhole array](#)[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(22): 6157-6164.
- [116] Jiang Z L, Yang S W, Huang H C, et al. [Programmable liquid crystal display based noise reduced dynamic synthetic coded aperture imaging camera \(NoRDS-CAIC\)](#)[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5221-5238.
- [117] Yuan X. [Generalized alternating projection based total variation minimization for compressive sensing](#)[C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing

- (ICIP), September 25-28, 2016, Phoenix, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2016: 2539-2543.
- [118] Liu Y, Yuan X, Suo J L, et al. Rank minimization for snapshot compressive imaging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(12): 2990-3006.
- [119] Bayer B E. Color imaging array: US3971065[P]. 1976-07-20.
- [120] Cheremkhin P A, Lesnichii V V, Petrov N V. Use of spectral characteristics of DSLR cameras with Bayer filter sensors[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 536: 012021.
- [121] Adams J, Parulski K, Spaulding K. Color processing in digital cameras[J]. IEEE Micro, 1998, 18(6): 20-30.
- [122] Arad B, Timofte R, Yahel R, et al. NTIRE 2022 spectral demosaicing challenge and data set[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 19-20, 2022, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2022: 881-895.
- [123] Wu J L, Wei M C, Fu Y, et al. Color mismatch and observer metamerism between conventional liquid crystal displays and organic light emitting diode displays[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12292-12306.
- [124] Miao L D, Qi H R, Ramanath R, et al. Binary tree-based generic demosaicking algorithm for multispectral filter arrays[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3550-3558.
- [125] Lapray P J, Wang X B, Thomas J B, et al. Multispectral filter arrays: recent advances and practical implementation[J]. Sensors, 2014, 14(11): 21626-21659.
- [126] Hagen N, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. Optical Engineering, 2013, 52(9): 090901.
- [127] Aggarwal H K, Majumdar A. Compressive sensing multi-spectral demosaicing from single sensor architecture [C]//2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), July 9-13, 2014, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2014: 334-338.
- [128] Ramanath R, Snyder W E, Qi H R. Mosaic multispectral focal plane array cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5406: 701-702.
- [129] Gasser C, González-Cabrera M, Ayora-Cañada M J, et al. Comparing mapping and direct hyperspectral imaging in stand-off Raman spectroscopy for remote material identification[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2019, 50(7): 1034-1043.
- [130] Bian L H, Wang Z, Zhang Y Z, et al. A low-cost integrated hyperspectral imaging sensor with full temporal and spatial resolution at VIS-NIR wide range [EB/OL]. (2023-06-20)[2024-05-06]. <https://arxiv.org/abs/2306.11583>.
- [131] Yako M, Yamaoka Y, Kiyohara T, et al. Video-rate hyperspectral camera based on a CMOS-compatible random array of Fabry-Pérot filters[J]. Nature Photonics, 2023, 17: 218-223.
- [132] Yang J W, Cui K Y, Huang Y D, et al. Deep-learning based on-chip rapid spectral imaging with high spatial resolution[J]. Chip, 2023, 2(2): 100045.
- [133] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces [J]. Science, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [134] Vashistha V, Vaidya G, Hegde R S, et al. All-dielectric metasurfaces based on cross-shaped resonators for color pixels with extended gamut[J]. ACS Photonics, 2017, 4(5): 1076-1082.
- [135] De Proft A, Lodewijks K, Figeys B, et al. Highly selective color filters based on hybrid plasmonic-dielectric nanostructures[J]. ACS Photonics, 2022, 9(4): 1349-1357.
- [136] Shaltout A M, Kim J, Boltasseva A, et al. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2673.
- [137] Lee J, Park Y, Kim H, et al. Compact meta-spectral image sensor for mobile applications[J]. Nanophotonics, 2022, 11(11): 2563-2569.
- [138] Hu C, Zheng S N, Zhong Q Z, et al. Design of a computational microspectrometer based on metasurfaces and multilayer thin films[C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 5-8, 2022, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2022: 1537-1542.
- [139] Yang J W, Cui K Y, Cai X S, et al. Ultraspectral imaging based on metasurfaces with freeform shaped meta-atoms[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(7): 2100663.
- [140] Xiong J, Cai X S, Cui K Y, et al. Dynamic brain spectrum acquired by a real-time ultraspectral imaging chip with reconfigurable metasurfaces[J]. Optica, 2022, 9(5): 461-468.
- [141] Rao S J, Huang Y D, Cui K Y, et al. Anti-spoofing face recognition using a metasurface-based snapshot hyperspectral image sensor[J]. Optica, 2022, 9(11): 1253-1259.
- [142] Zhu Y B, Lei X, Wang K X, et al. Compact CMOS spectral sensor for the visible spectrum[J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 961-966.
- [143] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1020.
- [144] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. Nature, 2015, 523(7558): 67-70.
- [145] Ma W K, Xue Q, Yang Y, et al. Robust spectral reconstruction algorithm enables quantum dot spectrometers with subnanometer spectral accuracy[J]. Advanced Photonics Nexus, 2024, 3(4): 046009.
- [146] Malone J D, Aggarwal N, Waller L, et al. DiffuserSpec: spectroscopy with Scotch tape[J]. Optics Letters, 2023, 48(2): 323-326.
- [147] Monakhova K, Yanny K, Aggarwal N, et al. Spectral DiffuserCam: lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array[J]. Optica, 2020, 7(10): 1298-1307.
- [148] Chen C C, Gu H G, Liu S Y. Ultra-simplified diffraction-based computational spectrometer[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 9.

- [149] Chen C C, Gu H G, Liu S Y. Ultra-broadband diffractive imaging with unknown probe spectrum[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 213.
- [150] Zhang W H, Suo J L, Dong K M, et al. Handheld snapshot multi-spectral camera at tens-of-megapixel resolution[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 5043.
- [151] 栗星, 柏晨, 李润泽, 等. 超高速和极高速光学成像技术研究进展(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(2): 0211020.
Li X, Bai C, Li R Z, et al. Review of ultra-and extreme-high-speed optical imaging technologies (invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(2): 0211020.
- [152] Hauri C P, Kornelis W, Helbing F W, et al. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(6): 673-677.
- [153] Gaumnitz T, Jain A, Pertot Y, et al. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27506-27518.
- [154] Weathersby S P, Brown G, Centurion M, et al. Mega-electron-volt ultrafast electron diffraction at SLAC National Accelerator Laboratory[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073702.
- [155] Hilbert S A, Uiterwaal C, Barwick B, et al. Temporal lenses for attosecond and femtosecond electron pulses[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(26): 10558-10563.
- [156] Hassan M T. Attomicroscopy: from femtosecond to attosecond electron microscopy[J]. *Journal of Physics B*, 2018, 51(3): 032005.
- [157] Morimoto Y, Baum P. Diffraction and microscopy with attosecond electron pulse trains[J]. *Nature Physics*, 2018, 14: 252-256.
- [158] Tiwari V, Sutton M A, McNeill S R. Assessment of high speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: methodology development and validation [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(4): 561-579.
- [159] Wang X F, Yan L H, Si J H, et al. High-frame-rate observation of single femtosecond laser pulse propagation in fused silica using an echelon and optical polarigraphy technique[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(36): 8395-8399.
- [160] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 695-700.
- [161] Kakue T, Tosa K, Yuasa J, et al. Digital light-in-flight recording by holography by use of a femtosecond pulsed laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(1): 479-485.
- [162] Matlis N H, Axley A, Leemans W P. Single-shot ultrafast tomographic imaging by spectral multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1111.
- [163] Mochizuki F, Kagawa K, Okihara S I, et al. Single-event transient imaging with an ultra-high-speed temporally compressive multi-aperture CMOS image sensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4155-4176.
- [164] Gao L, Liang J Y, Li C Y, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 74-77.
- [165] Raskar R, Agrawal A, Tumblin J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 795-804.
- [166] Reddy D, Veeraraghavan A, Chellappa R. P2C2: Programmable pixel compressive camera for high speed imaging[C]//CVPR, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE Press, 2011: 329-336.
- [167] Gu J W, Hitomi Y, Mitsunaga T, et al. Coded rolling shutter photography: flexible space-time sampling[C]//2010 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), March 29-30, 2010, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [168] Veeraraghavan A, Reddy D, Raskar R. Coded strobing photography: compressive sensing of high speed periodic videos[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(4): 671-686.
- [169] Hitomi Y, Gu J W, Gupta M, et al. Video from a single coded exposure photograph using a learned over-complete dictionary[C]//2011 International Conference on Computer Vision, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 287-294.
- [170] Llull P, Liao X J, Yuan X, et al. Coded aperture compressive temporal imaging[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10526-10545.
- [171] Koller R, Schmid L, Matsuda N, et al. High spatio-temporal resolution video with compressed sensing[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15992-16007.
- [172] Antipa N, Oare P, Bostan E, et al. Video from stills: lensless imaging with rolling shutter[C]//2019 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), May 15-17, 2019, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [173] Wagadarikar A, John R, Willett R, et al. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): B44-B51.
- [174] Gao L, Smith R T. Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy: a review of data acquisition [J]. *Journal of Biophotonics*, 2015, 8(6): 441-456.
- [175] Yang C S, Qi D L, Liang J Y, et al. Compressed ultrafast photography by multi-encoding imaging[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(11): 116202.
- [176] Liang J Y, Ma C, Zhu L R, et al. Single-shot real-time video recording of a photonic Mach cone induced by a scattered light pulse[J]. *Science Advances*, 2017, 3(1): e1601814.
- [177] Liang J Y, Zhu L R, Wang L V. Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 42.
- [178] Liang J Y, Gao L, Hai P F, et al. Encrypted three-dimensional dynamic imaging using snapshot time-of-flight compressed ultrafast photography[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15504.
- [179] Wang P, Liang J Y, Wang L V. Single-shot ultrafast imaging attaining 70 trillion frames per second[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2091.