

光场表征及其分辨率提升技术：文献综述及最新进展(特邀)

张润南 周宁 周子豪 杜和恒 陈钱 左超

Light field representation and its resolution improvement techniques: an overview (*invited*)

ZHANG Runnan, ZHOU Ning, ZHOU Zihao, DU Heheng, CHEN Qian, ZUO Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20240347>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

显微成像系统分辨率问题讨论 (特邀)

Discussion on spatial resolution of microscopic imaging system (*invited*)

红外与激光工程. 2022, 51(11): 20220735 <https://doi.org/10.3788/IRLA20220735>

斜模超分辨率成像最佳角度

Optimal angle in tilting mode super resolution imaging

红外与激光工程. 2019, 48(8): 826001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0826001>

大视场微球透镜超分辨显微成像技术的研究进展

Progress in microspheric lens based super-resolution microscopic imaging technology with large field of view

红外与激光工程. 2022, 51(6): 20210438 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210438>

自适应光学在超分辨显微成像技术中的应用 (内封面文章·特邀)

Application of adaptive optics in super-resolution microscopic imaging techniques (*inner cover paper · invited*)

红外与激光工程. 2024, 53(5): 20240011 <https://doi.org/10.3788/IRLA20240011>

新型深空高光谱衍射计算成像探测技术 (特约)

A new deep space hyperspectral diffraction computational imaging detection technology(*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(5): 20201005 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201005>

红外光场成像中的辐射定标与校正

Radiation calibration and correction in infrared light field imaging

红外与激光工程. 2022, 51(7): 20210646 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210646>

光场表征及其分辨率提升技术: 文献综述及最新进展 (特邀)

张润南^{1,2,3}, 周宁^{1,2,3}, 周子豪^{1,2,3}, 杜和恒^{1,2,3}, 陈钱^{2*}, 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 (SCILab), 江苏南京 210094;
2. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏南京 210094;
3. 南京理工大学 智能计算成像研究院 (SCIRI), 江苏南京 210019

摘要: 自高斯时代以来, 成像系统的设计和开发便始终致力于透镜的持续迭代和优化, 以收集来自物平面上某点向不同方向发射的光线, 并尽可能完美地将其汇聚到像平面上的一个点。然而, 成像传感器仅能捕捉并记录下光线的空间位置信息, 导致角度信息的丢失, 并完全丧失了对三维场景的视角变换与深度感知能力。为了弥补这一缺陷, 计算光场成像技术应运而生, 它能够记录空间光辐射场的完整分布, 联合记录空间位置和角度信息, 突破了经典成像的局限性, 正逐渐被应用于生命科学、国防安全、虚拟现实/增强现实、环境监测等领域, 具有重要的学术研究价值和广阔的应用潜力。然而, 光场成像技术仍然受到数字成像器件和图像传感器的联合制约, 成像系统的有限空间带宽积致使光场成像在实际应用中往往需要在空间分辨率和角度分辨率之间做出权衡, 导致难以达到传统成像技术的高空间分辨率。自光场成像技术诞生以来, 如何赋予其更高的自由度, 即在保持高分辨率成像的前提下, 提高时间分辨率和角度分辨率, 从而实现更清晰、更立体的成像性能是光场成像技术亟需解决的关键问题, 也一直是该领域的研究热点。该综述全面回顾了光场成像技术的发展历程, 阐述了全光函数和四维光场的基本概念, 并总结了在时间、空间和角度这三个维度上实现高分辨率成像的关键方法, 最后还对光场成像技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 光场成像; 计算成像; 超分辨率成像; 显微成像

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240347

0 引言

人眼作为人类最为重要的感官之一, 扮演者帮助人们感知客观世界、获取外部信息的关键角色。它提供了人类最重要的感觉系统——视觉, 使客观世界变成一张张生动鲜明的影像。受到人眼视觉系统“所见即所得”成像特性的启发, 现代光电成像技术在模拟这一自然机制方面取得了显著进展。传统的光电成像器件通过精密的光学系统和感光元件, 实现了对现

实场景的点对点映射, 将客观世界的物体转化为二维平面上的图像。然而, 这种点对点的成像方式记录了场景的二维投影, 丢失了客观世界的丰富信息, 在时间、空间、维度、分辨率等信息获取方面均存在局限性。光作为人们感知世界的重要媒介, 本质上是一种于空间中传播的电磁场, 具有波长、振幅、相位、偏振、位置和方向等多维属性。光场成像技术, 通过将先进的数字处理技术与创新的光学设计紧密结合, 开辟了成像领域的新天地。这种成像与计算的融合, 不

收稿日期: 2024-06-04; 修订日期: 2024-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62105151, 62175109, U21B2033, 62227818, 62361136588); 国家重点研发计划项目 (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项目 (JSGP202105, JSGP202201)

作者简介: 张润南, 女, 博士生, 主要从事计算光学显微成像方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 陈钱, 男, 教授, 博士, 主要从事红外与微光夜视、计算光学成像等方面的研究。

左超, 男, 教授, 博士, 主要从事计算光学成像与光信息处理技术等方面的研究。

仅为人们对成像系统的光学特性提供了全新的视角,同时也为传统的信号和图像处理领域带来了前所未有的挑战^[1-10]。

光场成像技术的发展经历了一个漫长的时期,最早可以追溯到 20 世纪初。1903 年,IVES 将针孔成像技术运用在双目视差系统中是最早的光场成像的雏形^[11]。1908 年,LIPPMAN 发明集成照相术^[12](Integral photography, IP)。1936 年,GERSHUN 首次提出“光场(Light Field)”这一术语,将其定义为沿直线传播的光线在均匀介质中所携带的辐射能分布^[13]。1960~1970 年,OKOSHI^[14]、DUDNIKOV^[15]、DUDLEY^[16]和 MONTEBELLO^[17]等学者改进了集成照相技术,同时微透镜阵列在成像方面的作用也逐渐得以突显。1991 年,ADELSON^[18]建立七维全光函数,即 $L(x,y,z,\theta,\varphi,\lambda,t)$,表示在 t 时刻波长为 λ 的光线以角度 (θ,φ) 入射到三维空间点 (x,y,z) 。通过对光场进行观测,可以直观地理解全光函数。七维全光函数的完整记录、存储以及处理等方面在实际操作中具有极大的难度,研究人员通过纹理、结构、维度、频域等特性分析^[19-20],尝试对全光函数进行了简化。在实际应用中,光线在传感器上的响应时间通常较短,可以忽略波长和时间维度变化,将七维全光函数简化为五维^[21]。1996 年,LEVOY 等^[22]进一步忽略了光线在自由空间中传播的衰减,建立了“双平面”四维光场参数化模型。同年,GORTLER 等^[23]构建了“流明图”模型来表征四维光场。上述几种光场的定义都将光辐射近似为几何光线,而忽略了其衍射和干涉等波动特性。作为一种对光场相干性进行定量表征的重要工具,“相空间光学”(phase space optics)是一个人为构造的多维空间,能够同时描述光信号的空间位置和空间频率(角谱)^[24]。维格纳分布函数(Wigner distribution function, WDF)和模糊函数(ambiguity function, AF)是两种常用的相空间中表征形式,其最早可追溯到 1932 年 WIGNER^[25]针对热力学体系的量子修正研究而提出的一个描述粒子动力学状态的准概率分布函数。20 世纪 60 年代,DOLIN^[26]和 WALTHER^[27-29]在辐射计量学领域中引入维格纳分布函数,并定义其为“广义辐亮度(generalized radiance)”。与传统辐亮度概念有所区别的是,广义辐亮度可以取负值,它不仅涵盖了光线的直线传播现象,还能够精确描述光的

波动光学效应,如干涉与衍射现象。1979 年,BASTIAANS^[30-36]正式将维格纳分布函数引入到傅里叶光学领域,系统地分析和总结了维格纳分布函数在光学成像与光信息处理中的应用,并论述了维格纳分布函数在描述部分相干光场的独特优势。由于维格纳分布函数能够同时表示信号的空间位置和空间频率特性,其既可满足对部分相干光场空域和频域信息关联特性的分析和处理的需求,又能够以近似光线的形式对部分相干光场分布的表征与传输进行直观的可视化^[37],从而建立了波动光学和几何光学的桥梁,并为部分相干理论和应用研究提供了崭新的视角。2009 年,ZHANG 和 LEVOY^[37]提出用维格纳分布函数来表示光辐射的波动场分布。在傅里叶光学中维格纳分布函数及其傅里叶变换——模糊函数用于代替复杂的菲涅尔衍射积分来计算光辐射在光学系统中的传播和变换^[24,34,38]。光辐射在任一位置的维格纳分布函数反映了其关于空间位置和空间频率的联合分布特性。

传统光学成像系统涉及到复杂的光学计算和精密的物理设计,旨在减少光学系统像差,提高成像的清晰度和精确度。在传统的摄影中,这种对透镜系统的优化是至关重要的,它影响着照片的分辨率、对比度和色彩的准确性,直接关系到成像系统的整体性能。随着技术的发展,光学设计已经从简单的单透镜系统,进化到了由多个透镜元件组成的复杂镜头系统,如变焦镜头和微距镜头,以满足不同的成像需求。尽管传统的光学设计在图像质量上取得了显著成就,但它仍然面临着物理限制,如光学畸变、色差以及光线在通过透镜时的损失等问题。这些问题往往需要通过更为复杂的镜头设计和后期图像处理来补偿。光场成像技术为光学系统带来了新的视角。它不再单纯追求单个完美焦点的成像,而是通过记录场景中光线的丰富信息,包括光的方向和强度,来获得一个完整的光场。这种技术允许在成像后的后处理中,对焦点、曝光、像差和其他视觉参数进行调整,并可以与计算成像技术结合衍生出新的成像机制,从而突破了传统光学成像的局限,为成像技术的发展开辟了新的可能性。2005 年,LEVOY 课题组的博士生 REN Ng(吴义仁)研制出第一台手持式光场相机^[39]所采用的“微透镜阵列”的结构将进入相机的光线分为

不同的方向,从而可以获得当前场景具有一定范围视角差异的多幅图像。吴义仁开创了 Lytro 公司,先后推出了 Lytro I、Lytro II 两款商业级手持式微透镜型光场相机,光场成像从此进入了大众的视野。Lytro 的技术允许用户在拍摄后调整照片的焦点,使得相机无需传统对焦系统,从而简化了摄影过程,并且可以捕捉更多光线方向的信息,为后续的图像处理提供了更多可能性。此外,Lytro 的光场技术在高端虚拟现实市场也有应用,其 Immerge 光场相机为专业级市场设计,最近还推出了升级版 Immerge 2.0,进一步提升了效率和画质。光场成像技术随后在计算摄影、生命科学、国防安全、虚拟现实/增强现实、光谱成像等领域得到了广泛应用。鉴于光场技术的广阔应用前景以及尚待解决的技术挑战,光场技术已经成为国内外研究团队的热点关注领域。

尽管光场成像技术在近年来取得了显著的进展,并在多个领域展现出了其独特的价值和潜力,但它在实现广泛应用的道路上仍然面临着诸多挑战。一个最主要的技术难题是如何有效地获取和处理高维度的光场信息^[8,40-41]。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、角动量、相干性等,在成像系统有限空间带宽积的限制下,在“得”与“失”之间作出符合规律的权衡与选择。为了获取场景的高维度信息,光场成像系统往往在空间分辨率、角度分辨率和时间分辨率等方面做出折衷,这种权衡往往导致各个维度的分辨率都不尽如人意。另一方面,虽然光场数据提供了丰富的信息,但是如何充分利用这些额外的信息以更好实现新的应用功能,如深度估计、合成孔径、像差校正等,还需要进一步的探索和创新。总之,光场成像技术虽然前景广阔,但在实现其全部潜力的过程中,还需要克服一系列技术和应用上的挑战。未来的研究需要在光学设计、数据采集、信号处理、算法开发和应用创新等多个方面进行深入探索,以推动光场成像技术向更高分辨率、更快速、更便携和更广泛应用的方向发展。

该综述旨在深入探讨光场成像的基本原理以及对其分辨率突破方法,同时也指出了目前存在的挑战以及未来发展方向。文中首先回顾了光场成像技术的发展历程,详细阐述了七维全光函数及简化的四维光场的基本概念。随后,文中深入探讨了光场成像技

术在提升时间、空间和角度分辨率方面的最新研究进展,包括微透镜阵列、相位散射片、外差式编码、相机阵列等方法在高速动态三维场景记录中的应用;传递函数反卷积、先验信息约束、多帧扫描、孔径编码、共聚焦、混合高/低光场成像等技术在提升空间分辨率方面的成果以及通过深度约束、稀疏先验约束等方式提升角度分辨率的方法。此外,文中还展望了光场成像技术未来的发展方向,包括光场高维度相干性调控、人工智能与光场成像技术的结合、小型化和便携式光场成像设备、新型成像机理以及光场成像与光场显示技术结合的发展前景,以及光场成像在特殊领域的应用潜力。最后,文中强调了光场成像技术在实现最优成像性能方面的挑战,尤其是在时间、空间和角度分辨率三个关键维度之间找到高效平衡点的重要性。随着技术的不断进步和创新,光场成像技术有望进一步突破传统光学成像的局限性,为成像技术的进步注入新的动力,并在生命科学、空间遥感、计算摄影、光谱成像等多个领域开拓新的应用前景。

1 光场理论

该章节简要介绍光场的定义以及光场的参数化表征方式,为该综述的后续内容提供基本的背景知识。

1.1 光场的定义

光,作为电磁场的一种表现形式,具备波长、振幅、相位等一系列物理属性。在传统的成像技术中,仅能捕捉到光辐射场在二维平面上的投影强度,而无法获取光线角度等多维度的光学信息。相较之下,光场成像技术的理论基础源于全光函数(plenoptic function)^[42-43],该概念属于射线光学的范畴,其核心在于为物理空间中传播的光线赋予相应的辐射量度(radiance)。光场成像技术认为,在三维空间中,光线会向各个方向传播并穿透物体,期间可能会遭遇阻挡、衰减或散射等现象。通过捕捉这些复杂的光学行为,光场成像技术能够提供更为全面和深入的光学信息,从而极大地扩展了人们对光与物质相互作用的理解。与计算视觉等领域通过建模来模拟这种光的复杂的行为所不同的是,全光函数提供了一种非物理的、摒弃模型依赖的、纯粹基于光现象学描述的光分布方式。为了适应光的所有可能变化而不依赖于某

个基础模型,它采用了一种高维度的描述方式:在空间的任意位置、针对任意可能的传播方向、覆盖所有波长,并且在时间的每一刻,都能够赋予不同的辐射亮度值。如图 1(a) 所示,通常该函数被表示为 $L(x,y,z,\theta,\varphi,\lambda,t)$, L (单位: $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{nm}/\text{s}$) 表示单位时间内的光谱辐射亮度, (x,y,z) 表示空间坐标位置, (θ,φ) 表示光线的入射方向, λ 表示光的波长,而 t 代表特定的时间点。全光函数在理论上为人们提供了一种全新的视角来理解和描述光的传播和交互作用。然而,在物理现实中,全光函数并不能完全被视为一个自由定义的七维函数。例如,辐射通量实际上是通过光子(即量子化的光单元)来传递能量的,这在理论上促使我们必须引入时间平均的概念以更准确地描述光的行为。此外,理想中的无限细光线束(即理想化的方向性)是无法实现的,并且在尝试精确测量空间光分布时,波动效应也是不可忽视的因素。因此,假定实际可测量的光函数是带限的(band-limited),并且研究通常局限于宏观尺度,在这个尺度下,关注的结构尺寸远远超过光的波长。光场的概念来源于全光函数,通过引入特定的约束条件而形成:1) 假设动态光场将随着离散时间序列 t 记录在光场视频的不同

帧中,即认为光线不随时间变化,可以去除时间 t 维度;2) 光场在理论上通常被设定为单色光场,这一假设也适用于彩色通道的独立分析。通过对相机像素对光谱的敏感性进行积分处理,全光函数中的光谱维度波长 λ 被有效地简化。在这样的假设下,可以从全光函数中去除波长 λ 和时间 t 维度,从而将模型从七维降到五维。空间中的光线可以通过坐标 (x,y,z) 和角度 (θ,φ) 进行参数化,如图 1(c) 所示;3) 最关键的“自由空间”假设,即在无介质、无遮挡的环境中,光线在空间外部区域内沿其路径的辐射亮度保持恒定,这就导致了全光函数的冗余,如图 1(d) 所示。实际上,这种重复的信息恰好对应一个维度,从而可以进一步将光场简化为一个四维函数。MOON^[44] 将其称为光场(photoc field),LEVOY 和 HANRAHAN^[1,22,45] 称之为四维光场(4D light field)。在形式上,四维光场被定义为空间中沿光线的辐射亮度分布。通过这些简化和约束,光场表征得以从全光函数这一更广泛的描述中提炼出来,为光学成像和计算提供了一个更为精确和实用的理论框架,推动光场成像技术从理论走向了实际应用。

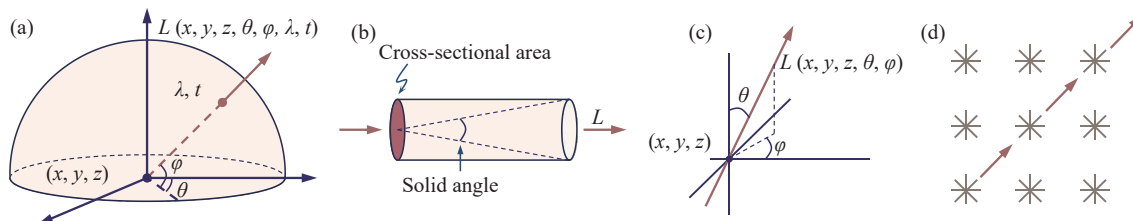


图 1 全光函数及其简化的光场定义示意图。(a) 七维全光函数; (b) 沿着光线的辐射亮度 L 可以被认为是沿着所有可能的通过一个管子的直线上的光量,该管子的大小由其立体角和横截面积决定; (c) 通过坐标 (x,y,z) 和角度 (θ,φ) 来参数化一条光线; (d) 如果没有遮挡物,沿着光线的辐射亮度保持不变,这导致了全光函数的冗余

Fig.1 Schematic diagram of the plenoptic function and its simplified light field definition. (a) The 7D plenoptic function; (b) Radiance L along a ray can be considered as the amount of light traveling along all possible straight lines through a tube, the size of which is determined by its solid angle and cross-sectional area; (c) Parameterizing a ray with coordinates (x,y,z) and angles (θ,φ) ; (d) If there are no occlusions, the radiance along a ray remains constant, leading to redundancy in the plenoptic function

上述的定义都将光辐射近似为几何光线,而忽略了其波动特性。维格纳分布函数和模糊函数是两种常用的相空间中表征形式。维格纳分布函数及其傅里叶变换—模糊函数可以用于代替复杂的菲涅尔衍射积分来计算光辐射在光学系统中的传播和变

换^[24,34,38]。2009年,ZHANG 和 LEVOY^[37]指出,光场实际上等同于经过平滑处理的维格纳分布函数,并且在几何光学近似的条件下,与原始的维格纳分布函数是等价的。实际光场的观测值等于光辐射之维格纳分布函数与光学系统孔径函数之维格纳分布函数的

卷积。相比于几何光场的定义,这一观测光场(observable light field)更精确地描述了衍射受限的光辐射分布特性。于此同时,与观测光场类似,OH等^[46]也提出增强光场(augmented light field, ALF)的概念来将光场推广到波动光学中进行解释。图2展示了光场、维格纳分布函数以及增强光场之间的关联。如图2(a)所示,波前的相位与相应光线的角度相关。在维格纳分布函数表示中,相位被表示为局部空间频率,图2(a)展示了一个球面波前和光线的示意图,光线垂直于波前。维格纳分布函数代表局部空间频率。在维格纳坐标空间中,给定的 z 处的球面波的维格纳分布函数与位置-角度坐标空间中的光场相似。光线的传播角

度可以由局部空间频率表示。与光场不同,维格纳分布函数和增强光场能够支持衍射和干涉现象。考虑经典的双缝实验,如图2(b)所示,在针孔处的衍射波前传播到屏幕上形成正弦波图案。用光场表示针孔平面,在传播之后,沿着 x 方向对光场进行剪切,并通过取垂直投影来形成图像,计算出的强度并不是正弦波图案。而增强光场表示引入了一个位于双缝中点的“虚负光源”(由蓝色表示),在剪切和投影之后,可以成功地产生正弦波干涉条纹,准确地表示了干涉现象。这种“虚负光源”的引入与维格纳分布函数中的负值相呼应,揭示了干涉相消的物理本质。

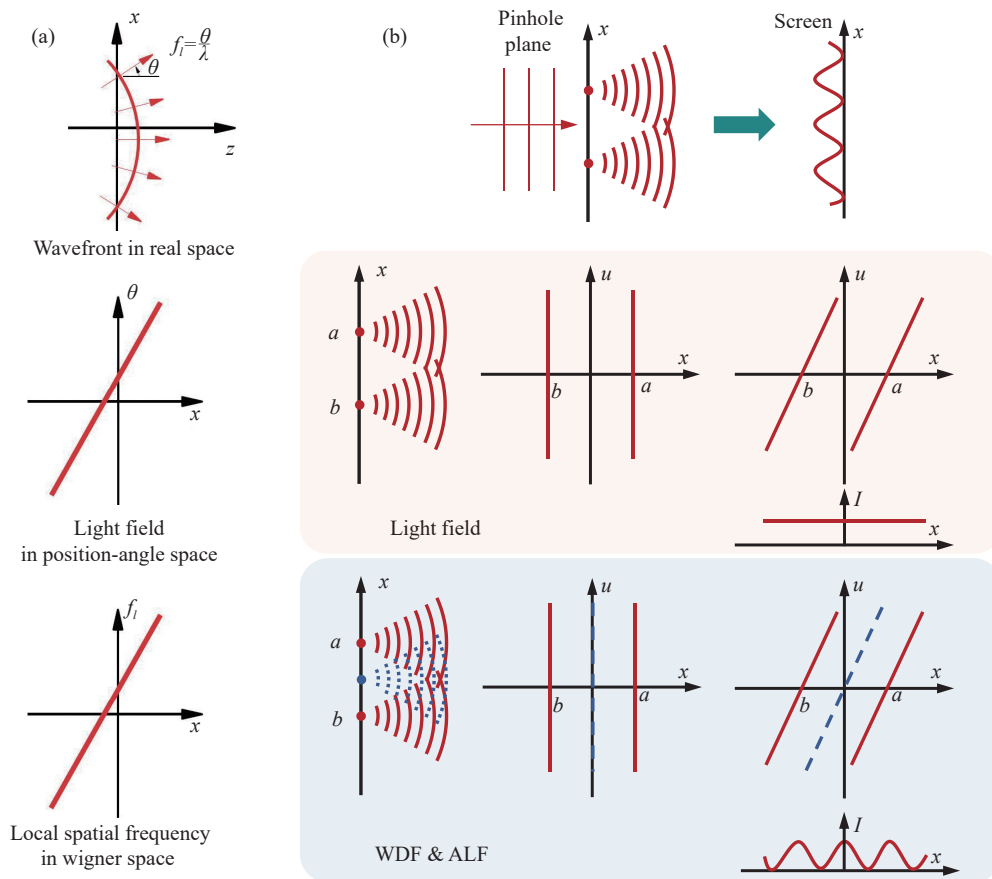


图2 光场、维格纳分布函数与增强光场。(a) 波前的相位与相应光线的角度相关。在维格纳坐标空间中,给定 z 处的球面波的维格纳分布函数类似于位置-角度坐标空间中的光场。光线的传播角度被编码在局部空间频率中;(b) 维格纳分布函数与增强光场通过引入“虚负光源”支持表示衍射和干涉现象^[46]

Fig.2 Light field, WDF and ALF. (a) The phase of a wavefront is related to the angle of corresponding rays. The WDF of the spherical wave at a given z in Wigner coordinate space is similar to the LF in the position-angle coordinate space. Propagation angles of rays are encoded in the local spatial frequency; (b) The WDF and ALF support the representation of diffraction and interference phenomena by introducing a virtual negative projector^[46]

1.2 四维光场表征模型

1.2.1 空域光场表征模型

在 1.1 小节提到,对七维全光函数 $L(x,y,z,\theta,\varphi,\lambda,t)$ 进行一定的假设和简化后,LEVOY 和 HANRAHAN^[1,22,45] 等将其简化为四维光场,该小节中将介绍 4D 光场的表达模型。四维光线集合可以通过多种方法进行参数化,如图 3 所示。LEVOY^[22]、GORTLER^[23] 和 CAMAHORT^[47] 等均提出了 4D 光场的基本表达模型 $L(u,v,s,t)$ 。构建两个平行平面,并利用光线与这两个平面交点的坐标来对其进行参数化是一种广泛采用的表征方式,正如图 3(c) 所描绘的那样。对于最接近观察者的平面,采用 (u,v) 坐标系进行描述;而对于另一个平面,则使用 (s,t) 坐标系来表示。在一个给定的坐标系统中,一条定向光线首先在 (u,v) 坐标点与第一个平面相交,随后在 (s,t) 坐标点与

第二个平面相交,这样的光线可以表示为 $L(u,v,s,t)$ 。在双平面光场模型 $L(u,v,s,t)$ 的框架下, (s,t) 平面可以被视为一组虚拟摄像机的位置,其焦平面恰好与 (u,v) 平面重合。这种双平面表示法可以从不同的视角进行阐释:每个虚拟摄像机收集的是从 (s,t) 平面发射并汇聚于 (u,v) 平面焦点的光线集合,这代表了某一特定视点所接收到的光线束。尽管这种参数化方法无法涵盖所有情况(例如,如果两个平面互相平行,那么与这些平面平行的光线就无法被表示),但它与透视成像的分析几何学有着紧密的联系。简而言之,可以将双平面光场视作是从 (u,v) 平面上的观察点拍摄的 (s,t) 平面(及其后方可能存在的物体)的一系列透视图像的集合。这样的解释将人们引入了摄影的领域,进而促使人们思考通过摄影技术捕获的光场的多种潜在应用。

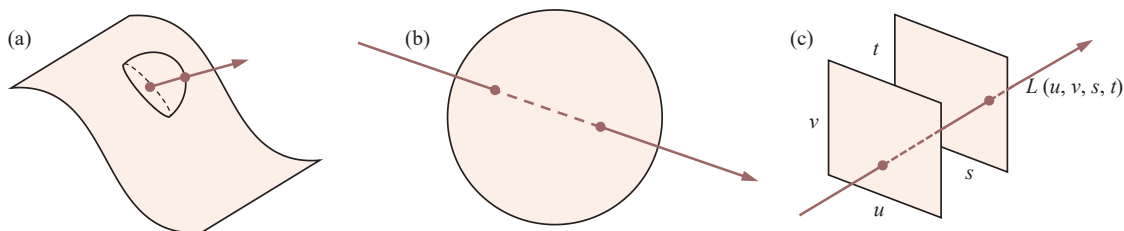


图 3 四维光场的参数化提供了多种描述方法,它们共同表征了光线穿越三维空间中某一空白区域的流动模式。(a) 平面或曲面上的点以及从这些点发出的光线方向;(b) 球面上成对的点;(c) 两个任意位置的平面上的点对

Fig.3 Alternative parameterizations of the 4D light field, which represents the flow of light through an empty region of 3D space. (a) Points on a plane or curved surface and directions leaving each point; (b) Pairs of points on the surface of a sphere; (c) Pairs of points on two planes in general (meaning any) position

光场相机^[39,48]的基本思路是在传统相机的成像传感器前插入一块微透镜阵列,这些微型透镜各自覆盖多个传感器像素,并将穿过它们的光线分离,形成一个微小的图像投射在后方的像素阵列上,该设计使得光场相机能够通过单次摄影曝光记录四维光场。双平面模型能够很好的对光场相机的成像模型进行参数化表征。固定四维光场的一个空间维度和对应的角度维度,即可得到极线平面图(epipolar image),可以联合空间-角度信息对光线进行观察。如图 4 所示,以红色标示出了传统相机汇聚于单个像素点值的光线锥。其极线平面中展示的射线空间图被一系列垂直条带覆盖,每一条条带代表了一组由不同照片像素累积得到的光线。这幅图揭示了一个完整的照片

是如何在射线空间图中通过光场值的垂直投影形成的。这种投影保留了光线的空间位置信息,即 x 坐标,但丢失了关于光线方向的 u 坐标信息。对于光场相机,微透镜阵列放置于成像平面,单个微透镜的大小决定了空间采样分辨率。图 4 展示了一个覆盖在射线空间图上的方格网格,该网格代表了光场的采样情况,即由光传感器像素记录的光场,其中每个方格代表一束汇集于光传感器上一个像素的光线束。为了生成这个采样网格,文中从每个光传感器像素的边界出发,通过其对应的微透镜阵列以及主镜头的玻璃元件,将光线追踪到外部世界。光线在微透镜平面和镜头平面上的截击点确定了它在射线空间图中的 (x,u) 坐标。值得一提的是,射线空间图中的线条并非

完全直线,而是呈现出轻微的弯曲。这种垂直方向的曲率是由镜头光学设计中的像差引起的,已有许多工

作针对这类缺陷矫正展开了研究^[49-52]。

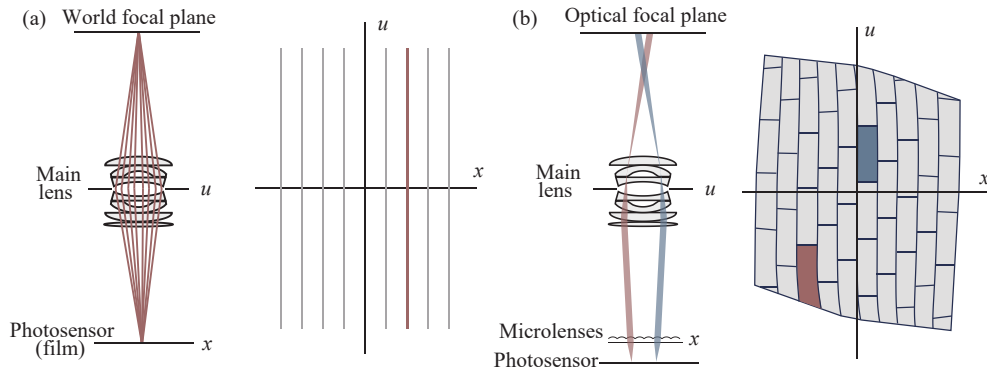


图 4 传统相机与光场相机的采样模型。(a) 光线束汇聚构成照片中单个像素的锥形光束; (b) 光场相机及其采样

Fig.4 Traditional camera and light field camera's sampling models. (a) The cone of rays summed to produce one pixel in a photograph; (b) Sampling of a photograph's light field provided by a plenoptic camera

在对相机内沿所有光线传播的光进行采样时,光场提供了关于成像场景的丰富信息。可以将这些数据视作入射到微透镜阵列上的光照集合。另一种等价的视角是,光场技术能够从覆盖整个镜头光圈范围的众多视点捕捉场景的图像。鉴于镜头光圈的面积是有限的,这些分散的视点提供了关于场景中物体位置的视差信息。这一点进一步突显了光场技术的第三个属性—它能够揭示场景中物体的深度信息。图 5 展示了三种不同的光场可视化技术,每一种可视化技术都将四维光场排列成一个二维图像阵列。遍历这个阵列则经历了光场的两个维度,每一个子图像代表了光场剩余的两个维度。最简单的表征方式是直接从微透镜阵列后方的传感器读取的原始图像,如图 5(a) 所示,从宏观上看,原始图像看起来像是一张传统的图片。放大仔细观察,原始图像实际上是由一系列圆形组成的,每个圆形都是一个在微透镜下方形成的图像。这些微透镜图像之所以呈现圆形,是因为它们是从胶片上的任一点位置观看镜头圆形光圈的图像。换句话说,原始的光场照片是一个 (x,y) 网格的图像,每个图像展示了来自镜头光圈不同 (u,v) 位置的光线到达胶片任一点的光。第二种方式可以称为子孔径图(sub-aperture images),如图 5(b) 所示。这一视图是通过重新排列原始光场照片中的像素而得到的。每个子光圈图像实际上是从每个微透镜正下方

提取的相同像素,这些像素对应于主镜头光圈中所需区域的 (u,v) 坐标。从宏观视角观察,由于镜头光圈本身是圆形的,因此这些图像组成的阵列也呈圆形。确切地说,阵列中的每一幅图像都是从圆形光圈上特定的 (u,v) 位置捕捉到的场景画面。图 5(b) 底部的放大图像揭示了镜头光圈顶部和底部的子光圈图像。虽然这些图像在外观上具有相似性,但仔细比较两者的差异,可以看到两张图之间存在视差。而通过计算使用整个镜头光圈所形成的传统照片,本质上等同于将所有子光圈图像的光线进行叠加,汇总所有透过镜头的光线,从而再现了场景的完整视觉效果。第三种光场的展现形式是最为抽象的概念,它呈现了一组被称为极线图像的数组(参见图 5(c))。在这一数组中,每个极线图像代表了光场的一个二维切片,其中 y 和 v 坐标保持恒定,而 x 和 u 坐标则相应变化。如图 5(c) 所示, y 坐标沿着图像数组的垂直方向变化,而 v 坐标则沿着水平方向变化。在每个极线图像内部, x 坐标沿着水平轴递增,展现出 1024 pixel 的空间分辨率,同时 u 坐标沿着图像的垂直轴变化,呈现出约 1024 pixel 的方向分辨率。因此,图 5(c) 中的放大图像展示了五个垂直排列的 (x,u) 极线图像切片。这些放大图像进一步证实了一个广为人知的观点,即通过极线图像中的直线斜率,可以估计场景中物体的深度^[53-54]。斜率的大小与镜头上 u 坐标方向的视差程度相关联,斜率

越大,表示物体距离世界焦点平面越远。这些极线图像的另一个重要解释在于,它们实际上是光场在二维

射线空间图参数化中的图形表示。

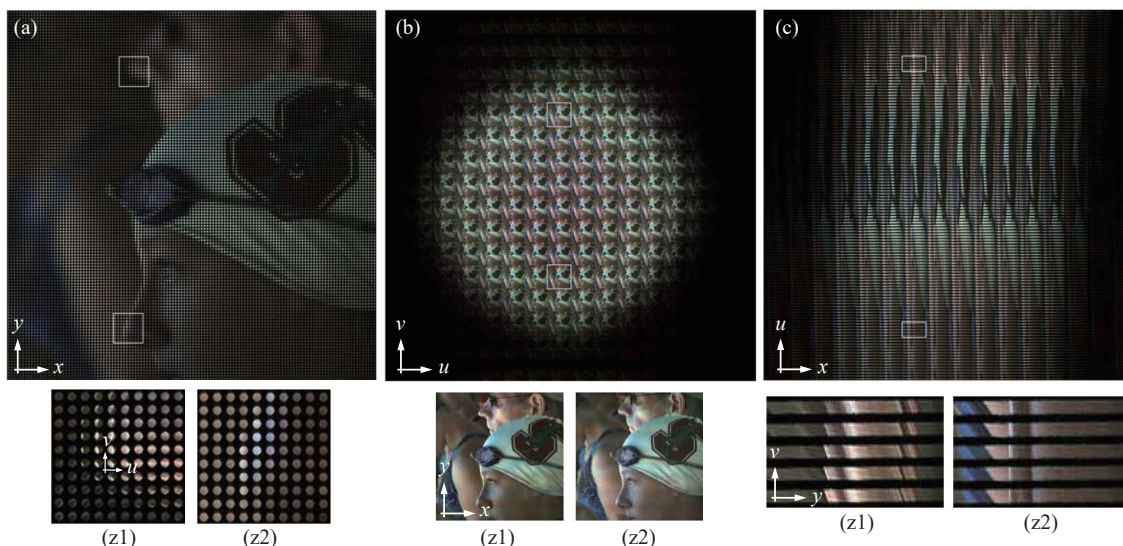


图 5 光场的三种可视化方法。(a) 微透镜阵列后的传感器读取的原始图像; (b) 子孔径图; (c) 极平面图像

Fig.5 Three light field visualization method. (a) The raw image read by the sensor behind the microlens array; (b) The sub-aperture image; (c) The EPI image

1.2.2 光场渲染

光场渲染是一种基于图像的渲染技术 (image-based rendering), 它起源于 20 世纪 90 年代, 旨在通过使用预先捕获的图像而非传统的 3D 几何模型, 在计算机屏幕上呈现物体的形态。如图 6(a) 所示, 设想将一件物体, 例如一件赤土制成的龙雕塑置于一个球体中心。接着, 在球体表面沿着 100 个不同的位置移动相机, 并在每个位置上对龙进行拍摄。只要球体的尺寸足够大, 避免了与龙的凸包 (图中蓝色形状周围的虚线) 重叠, 这些图像合集便构成了一个四维光场, 尽管其采样可能相对粗糙。通过快速切换这些图像, 可以体验到围绕龙旋转的感觉, 或者仿佛站在原地, 而龙却在各个方向上转动。这一概念最初由 Eric CHEN^[55] 在 1995 年提出, 并成了苹果公司 QuickTime VR 系统中物体电影功能 (object-movie function) 的基础。利用这一功能, 用户可以围绕龙飞翔 (但不能朝向龙飞行), 并且可以在不改变透视效果的情况下放大图像。物体特征的相对大小和遮挡关系 (即哪些部分被遮挡) 都保持不变。如果能够更密集地分布拍摄位置, 比如在球体表面均匀地放置一千个点位, 那么就能够生成足够多的像素, 以实现向物体内部的“飞

行”。例如, 在图 6(b) 的黄色点位置, 观察到的龙的中央像素与第二张照片中的中央像素是一致的。更有趣的是, 当前视图中最右侧的像素与第一张照片中的某个像素相同, 而最左侧的像素则与第三张照片中的某个像素一致。因此, 只要原始观察位置足够密集, 就可以通过选择像素, 必要时对邻近像素进行插值, 从而构建出从未曾实际占据的观察点的新的、透视正确的视图。实际上, 只要站在龙的凸包之外, 可以自由选择任何想要的站立位置。

这种概念被称为光场渲染 (light field rendering)^[22]。更准确地说, 光场可以被视为由场景的二维图像组成的二维集合——也就是一个四维的像素阵列, 正如图 6(c) 所展示的那样。计算场景的新视角视图可以理解从这个 4D 阵列中提取一个适当定位和定向的二维切片。如果想完全围绕一个不透明物体行走, 那么就需要拍摄它的背面。如果想要靠近物体, 需要在球体表面的位置密集间隔拍摄图像, 而这些图像需要具有高空间分辨率。图像的数量、排列和每个图像的分辨率统称为四维光场的“采样”。1999 年在佛罗伦萨美第奇礼拜堂捕获的米开朗基罗的《夜》的光场所知道的最大的案例之一, 它包含了 24 000 张 130 万

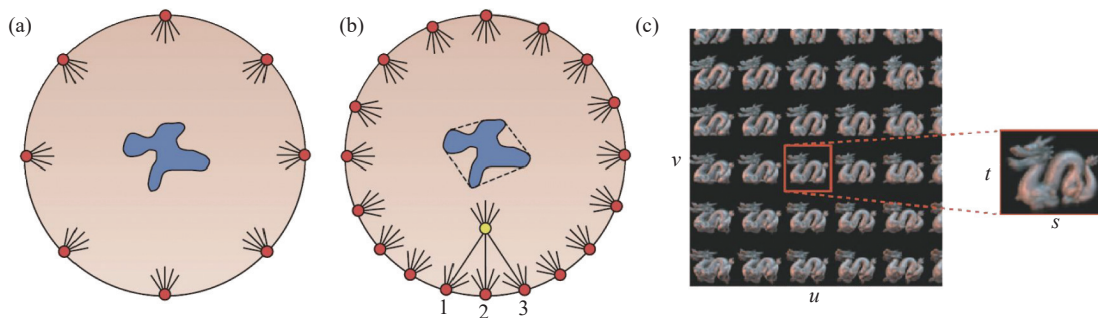


图 6 光场渲染示意图^[1]。(a) QuickTime VR 的“对象电影”功能使用户能够通过快速浏览紧密相邻的照片 (标记为红色点) 围绕物体 (以蓝色形状表示) 进行虚拟飞行; (b) 当这些照片点之间的间隔足够紧凑时, 用户可以通过重新排列像素来创造出全新的透视图, 即便他们并未真实地站在那个观察点上 (以黄色点表示); 这一过程即为光场渲染; (c) 光场渲染可以视为一个二维的图像集合, 其中每一张二维图像都是从一个独特的观察点捕捉而来的

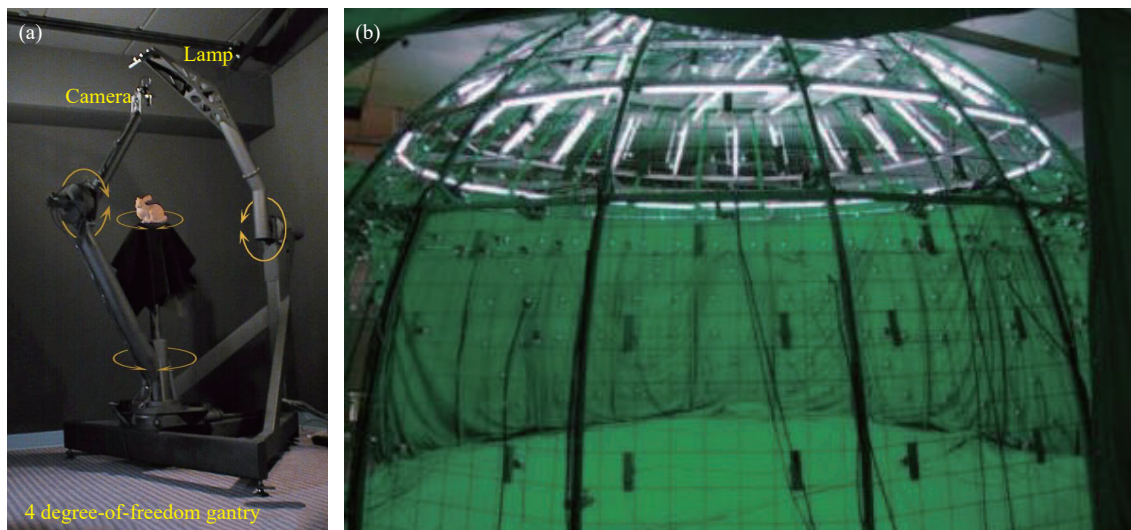
Fig.6 Light field rendering^[1]. (a) The object-movie function of QuickTime VR enables users to virtually navigate around an object (represented by a blue shape) by swiftly flipping through closely spaced photographs of it (indicated by red dots); (b) If the photographs are taken at intervals close enough, users can reorder the pixels to generate novel perspective views without the need to physically occupy those positions (denoted by a yellow dot); this process is known as light field rendering; (c) A light field can be conceptualized as a two-dimensional assembly of two-dimensional images, each captured from a distinct vantage point

像素的图像。

已经有许多研究人员关于光场采样问题进行了研究^[56-57]。如果图像的像素不够多, 光场渲染的图像将会显得模糊, 特别是当远离原始观察位置时。如果没有拍摄足够多的图像, 渲染的图像将会出现由于混合不同视图的物体而产生的重影。然而, 如果将光场与物体的近似三维几何模型结合起来, 所需的图像数量就会大大减少^[23]。如果将该技术发挥到极致, 能够仅凭数张图像便精确地构建出物体的三维模型, 进而通过渲染此模型实现围绕物体飞行的效果^[58]。这种

技术与光场渲染共同构成了渲染连续体的两端, 其连续性则取决于对场景几何信息的了解程度。

典型的光场采集方法是使用安装在机械位移台上的传感器来测量不同位置的光场。图 7(a) 为斯坦福大学计算机图形学实验室设计的移动机械臂^[26], 将相机安装在一个光场采集支架上, 支架可以进行二维平移和二维转动, 共有四个自由度, 凭借支架的平移和转动, 摄像机能够沿着精确的路径移动, 由单个相机完成对目标的四维光场采集。如果取消移动机械臂而直接使用相机阵列以拍摄不同角度的场景, 如



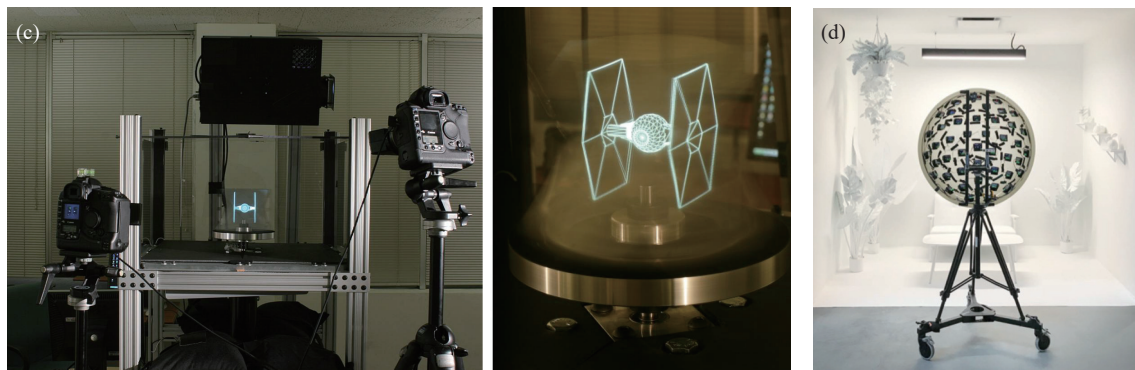


图 7 光场采集和渲染系统。(a) 斯坦福大学于 1996 年搭建的光场龙门架, 可以实现静态光场的采集, 通过物体、相机和光照的全自由度控制能实现高质量静态光场数据的采集; (b) 清华大学多相机多光源穹顶^[59]; (c) 南加州大学 360°光场渲染装置^[60]; (d) 谷歌使用 46 台运动摄像机, 安装在亚克力半球上, 记录沉浸式光场视频^[61]

Fig.7 Light field acquisition and rendering systems. (a) The light field gantry built by Stanford University in 1996 can achieve the acquisition of static light fields, and high-quality static light field data can be collected through full freedom control of objects, cameras, and lighting; (b) The multi-camera and multi-lighting dome from Tsinghua University^[59]; (c) 360° light field rendering device from University of Southern California^[60]; (d) Google record immersive light field video using 46 action sports cameras mounted to an acrylic dome^[61]

图 7(b) 所示的清华大学戴琼海院士课题组研制的鸟笼状相机阵列系统, 可以用于采集场景各个角度的光照变化等^[59]。南加州大学创新技术学院 (University of Southern California Institute for Creative Technologies) 发明了一种自立体光场显示的渲染技术^[60], 该装置由一台高速视频投影仪、一个旋转镜面 (其表面覆盖有全息散射材料) 和两台立体相机组成, 能够精确渲染垂直透视图和视差效果。谷歌提出了一套系统化的解决方案^[61], 旨在捕获、重建、压缩和渲染高质量的沉浸式光场视频。该系统采用自制的 46 台同步运动摄像机构成的低成本半球阵列, 采集光场视频数据。基于这些数据能够生成具有六自由度的体积视频, 具备 70 cm 的宽广观看基线、每度角 10 pixel 的高分辨率以及广阔的视场, 且以 30 frame/s 的速率流畅播放。

1.2.3 频域光场表征模型

在光场的理论上结合傅里叶切片理论^[62-66], REN Ng^[67] 推导了光场的傅里叶域表示, 提出了关于光场的新数学理论, 给出了四维光场的二维傅里叶切片表示。在傅里叶域中, 使用完整镜头光圈形成的图片是四维光场中的一个二维切片。不同焦距的图片对应于四维空间中不同轨迹的切片。这种傅里叶表示在数学上比更常见的基于积分的空间域表示更简单。传统的二维傅里叶切片定理是计算断层扫描

(computed tomography)^[68] 成像的理论基础。经典的傅里叶切片定理表明, 二维函数的傅里叶域的一个一维切片等于该二维函数的垂直积分投影的傅里叶变换。投影和切片的几何关系如图 8 所示。图 8(b) 将二维傅里叶切片定理扩展到 N 维, 分析了 N 维函数 G_N 和其 M 维积分投影 G_M 以及其傅里叶谱 B_N 到 B_M 的变化关系。广义傅里叶切片定理 (generalized Fourier slice) 的数学表达式为:

$$\mathcal{F}^M \circ \mathcal{I}_M^N \circ \mathcal{B} \equiv \mathcal{S}_M^N \circ \frac{\mathcal{B}^{-T}}{|\mathcal{B}^{-T}|} \circ \mathcal{F}^N \quad (1)$$

式中: \mathcal{I}_M^N 为将 N 维函数降为投影到 M 维的积分投影算子, $\mathcal{I}_M^N[f](x_1, \dots, x_M) = \int f(x_1, \dots, x_N) dx_{M+1} \dots dx_N$; \mathcal{S}_M^N 为将 N 维函数剪切到 M 维的剪切算子, $\mathcal{S}_M^N[f](x_1, \dots, x_M) = f(x_1, \dots, x_M, 0, \dots, 0)$, 通过将多余项置零来完成; \mathcal{B} 为变换矩阵, $\mathcal{B}[f](x) = f(\mathcal{B}^{-1}x)$, 其中 x 是一个 N 维的列向量, 指导具体的积分投影和剪切操作过程; \mathcal{B}^{-T} 为 \mathcal{B} 的逆转置; $|\mathcal{B}^{-T}|$ 为 \mathcal{B}^{-T} 的行列式; \circ 为复合运算符; \mathcal{F}^N 为 N 维的傅里叶变换算子。

根据傅里叶切片摄影理论 (Fourier Slice Photograph Theorem), 一张图片是光场的四维傅里叶变换中二维切片的二维逆傅里叶变换结果。其表达式为:

$$\mathcal{P}_\alpha \equiv \mathcal{F}^{-2} \circ \mathcal{B}_\alpha \circ \mathcal{F}^4 \quad (2)$$

式中: \mathcal{P}_α 为成像算子, 其作用是将相机记录的光

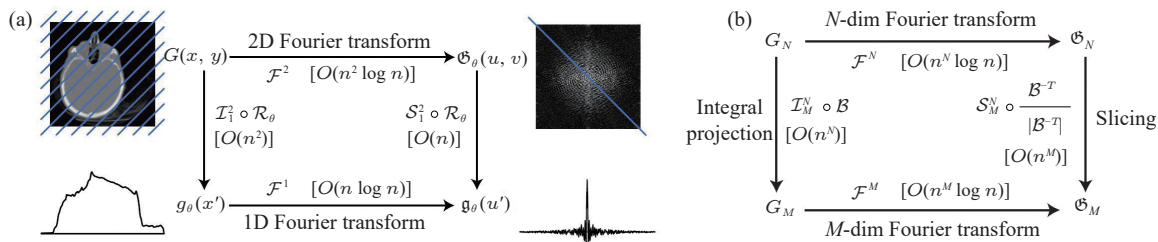


图 8 傅里叶切片定理^[67]。(a) 经典二维傅里叶切片定理；(b) 广义傅里叶切片定理

Fig.8 Fourier slice theorem^[67]. (a) Classical Fourier slice theorem; (b) Generalized Fourier slice theorem

场—通过分离深度 F 来参数化表示—转换成在胶片上特定深度位置 $(\alpha \cdot F)$ 处记录到的图像，表达式为：

$$\mathcal{P}_\alpha [L_F](x', y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F \left(u \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{y'}{\alpha}, u, v \right) dudv \quad (3)$$

\mathcal{B}_α 为傅里叶切片算子，表达式为：

$$\mathcal{B}_\alpha [G](k_x, k_y) = \frac{1}{F^2} G(\alpha \cdot k_x, \alpha \cdot k_y, (1 - \alpha) \cdot k_x, (1 - \alpha) \cdot k_y) \quad (4)$$

这一表征适用于光场相机模型。若成像系统为远心系统，其光学特性将确保成像过程中的透视失真最小化，从而在图像平面上实现均匀的放大率^[69]，光场重聚焦可以表示为：

$$\mathcal{P}_\alpha [L_F](x', y') = \iint L_F(x - zu, y - zu, u, v) dudv \quad (5)$$

式中： z 为离焦距离。从理论层面上讲，该定理的重要性在于，作为切片算子的 \mathcal{B}_α 在概念上比作为积分算子

的 \mathcal{P}_α 来得更为简洁。这一点在比较两者的具体定义时表现得尤为明显。定理通过提供一种基于频率的解释，为理解成像过程的物理本质提供了深刻的见解，并且通过两种等效但截然不同的视角展示了成像原理。在这方面，傅里叶切片照相定理与傅里叶卷积定理有着异曲同工之妙，后者同样在两个不同的域中为卷积提供了等效但视角独特的解释。在实际应用层面，该定理为特定类型的光场处理提供了一条更为高效的计算途径。图 9 阐释了该定理所揭示的光场与拍摄图像之间的内在联系。从图中可以直观地看出， \mathcal{B}_α 与 \mathcal{P}_α 互为傅里叶对偶，图的左侧部分展示了空域的变量，而右侧部分对应于傅里叶域的变量。图中还展示了每种变换的计算复杂度，通过 \mathcal{B}_α 进行的切片操作 ($O(n^2)$) 在计算效率上优于通过 \mathcal{P}_α 进行的积分操作 ($O(n^4)$)。该定理的推导过程基于几何光学和辐射度学的基本原理，并且与这些光学模型所描述的成像物理过程保持一致。

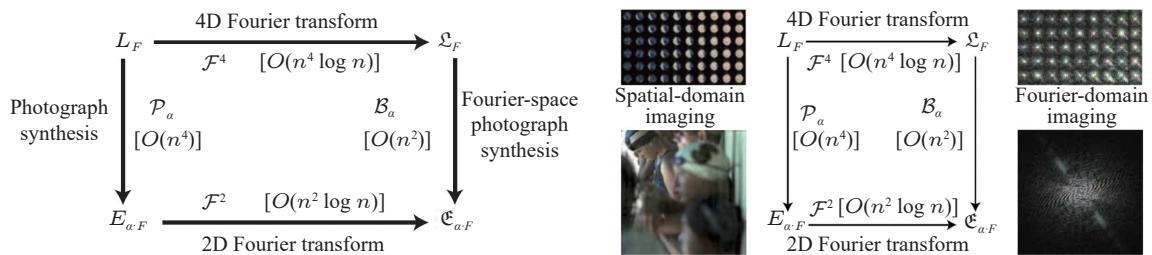


图 9 傅里叶切片摄影定理^[67]。四维光场 L_F 与由透镜形成的二维图像 $E_{\alpha,F}$ 及其各自的傅里叶谱 \mathcal{Q}_F 和 $\mathcal{C}_{\alpha,F}$ 之间的变换关系

Fig.9 Fourier slice photograph theorem^[67]. Transform relationships between the 4D light field L_F , a lens-formed 2D photograph $E_{\alpha,F}$, and their respective Fourier spectra, \mathcal{Q}_F and $\mathcal{C}_{\alpha,F}$

滤波光场成像定理 (Filtered light field photography theorem) 描述了一个重要概念：当对一个四维光场进行卷积操作时，其结果等同于对构成该光场的每张图像独立进行卷积。简单地来说，二维滤波核就

是将四维滤波核的图像聚焦在相同深度上的图片。用算子的方式简洁地表达，即：

$$\mathcal{P}_\alpha \circ \mathcal{C}_k^4 \equiv \mathcal{C}_{\mathcal{P}_\alpha[k]}^2 \circ \mathcal{P}_\alpha \quad (6)$$

其中使用以下算子来表示卷积： C_k^N 是一个 N 维卷积算子，它具有滤波核 k ，满足 $C_k^N[F](x) = \int F(x-u) \cdot k(u)du$ ，其中 x 和 u 是 N 维向量坐标，而 F 和 k 是 N 维函数。图 10 以直观的图解形式阐释了这一定理。图 10 中展示了输入的四维光场 L_F ，以及通过四维核 k 进行滤波后得到的 \bar{L}_F 。分别由这两个光场形成的图片为 $E_{\alpha,F}$ 和 $\bar{E}_{\alpha,F}$ 。定理表明， $\bar{E}_{\alpha,F}$ 实际上是由 $E_{\alpha,F}$ 经过二维滤波得到的，这里的二维核正是四维核 k 所对应

的图片。虽然这个定理看似合情合理，但其实它并不显而易见，要在空间域中对其进行证明是颇具挑战的，文献 [67] 给出了详细的推导过程，证明方法主要是运用傅里叶切片摄影定理和卷积定理，将问题转换到傅里叶域中进行分析。在傅里叶域中，图片的形成过程可以简化为一个切片操作，而卷积则转化为更为直接的乘法运算。这种方法不仅简化了分析过程，也为理解和应用该定理提供了更为清晰的视角。

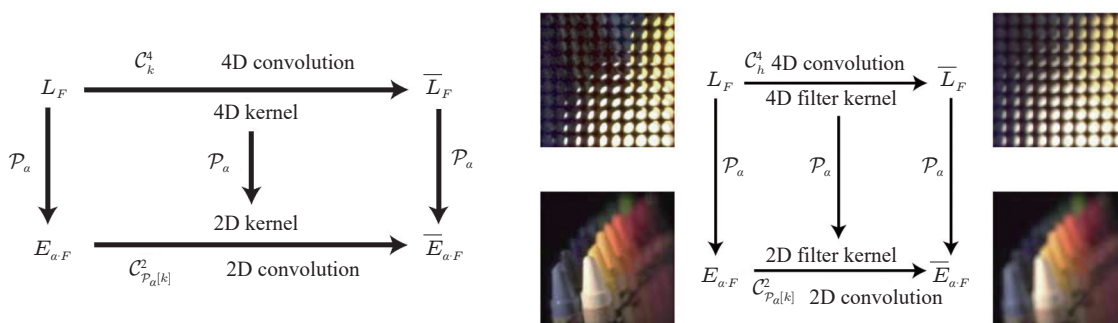


图 10 滤波光场摄影定理。四维光场 L_F 经过滤波处理的光场 \bar{L}_F 以及所得到的图像 $E_{\alpha,F}$ 和 $\bar{E}_{\alpha,F}$ 之间存在的变换关系^[67]

Fig.10 Filtered light field photography theorem. Transform relationships between a 4D light field L_F , a filtered version of the light field \bar{L}_F , and photographs $E_{\alpha,F}$ and $\bar{E}_{\alpha,F}$.^[67]

LEVIN 等^[70]研究了离焦核在四维光场频域的特征，如图 11(a) 所示，在四维光场频域内，仅有一个三维线性区域对焦点的形成具有决定性影响。基于此发现，为了最大化失焦的频率响应，成像系统的设计应集中其有限的能量于这一焦点区域上。DANSEREAU

等^[71]也发现了光场图像中的冗余信息，推导出四维光场在频率域的支持区域为一个超锥体 (hypercone)，并据此设计了具有相应形状通带的滤波器。二者的研究不谋而合，揭示了光场在表征三维物体时的冗余性。

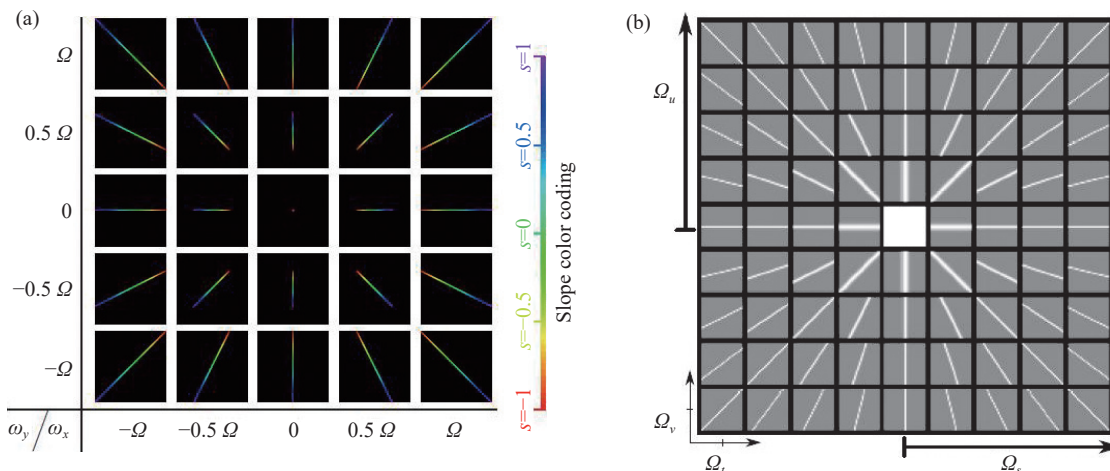


图 11 离焦核在四维光场频域的特征。(a) 四维透镜频谱的显示，高亮标注了聚焦区域^[70]；(b) 三维体四维频域支持域为一个超锥体^[71]

Fig.11 Defocus kernels in the 4D light field space. (a) Layout of the 4D lens spectrum, highlighting the focal manifold^[70]; (b) 4D frequency hypercone for volumetric focus^[71]

2 高时间分辨率光场成像

在传统相机成像光路中插入一块微透镜阵列,使得相机能够单帧记录四维光场^[39]。这一特性使得高速动态三维场景记录成为可能,并很快在显微成像领域得到了广泛应用^[45,72-78]。光场显微成像技术,作为一种新颖的高速体成像方法,迅速在生命科学界占据了一席之地,并开拓了其独特的应用领域。该技术在很大程度上突破了传统显微成像技术,如共聚焦显微成像、光片显微成像以及双光子显微成像等,在成像速度方面的局限性,为生命科学研究者提供了更为丰富和精确的三维成像数据,极大地推动了生命科学研究的进展和深入。该章节将介绍动态光场数据的捕获方法。

2.1 基于微透镜阵列的光场成像

2006年,LEVOY等^[45,72]搭建了光场显微成像系统,在基于传统科勒照明的明场显微镜的原始成像面插入一块微透镜阵列,图像传感器放置于微透镜阵列后焦面处,类似于基于微透镜阵列的光场相机,该成像系统能够获得样本在不同视点和不同焦面处的显微图像。通过光强堆栈和点扩散函数进行3D反卷

积,可以实现单帧体成像,图12(a)展示了光场显微镜的基本结构。2014年,PREVEDEL等^[74]使用光场显微成像技术进行全动物三维成像以观察神经元活动,展示了对整个秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)和斑马鱼幼虫(*zebrafish larvae*)大脑中的神经元活动进行功能性成像,且分辨率达到单个神经元级别,实验结果如图12(b)所示。由于其操作简便,这项技术为高速体钙成像提供了一个极具吸引力的选项。2017年,CONG等^[76]使用多焦点的微透镜阵列结构,观察自由游动的幼年斑马鱼(*Danio rerio*)的全脑神经活动,在幼年斑马鱼的视觉诱发行和捕食行为期间进行神经活动的功能性成像,结果如图12(c)所示。尽管该技术已被用于在半透明的样本中进行全脑Ca²⁺成像,但组织散射现象限制了其在啮齿类动物大脑研究中的应用范围。为了克服这一难题,NÖBAUER等^[77]引入了一种名为种子迭代解混(seeded iterative demixing)的计算源提取技术,将光场显微成像的应用扩展到哺乳动物的大脑皮层,对小鼠皮层的钙离子成像结果如图12(d)所示。2024年,HUA等^[78]提出了一种新型的成像流式细胞术系统,名为光场流式细胞仪。该技术结合了流式细胞术和光场显微技

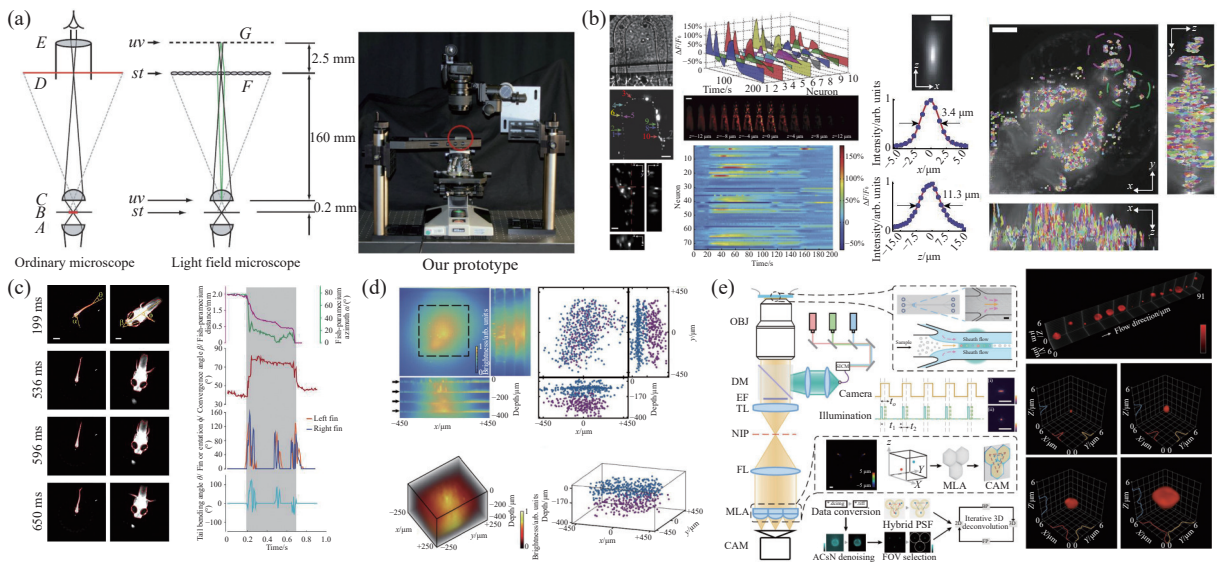


图 12 基于微透镜阵列的高速光场显微成像技术。(a) 传统显微光路和光场显微光路结构^[72];(b) 整个秀丽隐杆线虫和斑马鱼幼虫大脑中的神经元活动进行功能性成像^[74];(c) 对幼年斑马鱼的视觉诱发行和捕食行为期间进行神经活动的功能性成像^[76];(d) 对小鼠皮层进行高达 380 μm 深度的视频速率体量钙离子成像^[77];(e) 使用荧光微球对光场流式细胞仪进行表征^[78]

Fig.12 Video-rate light-field microscopy imaging technology based on a microlens array. (a) Conventional microscopy and light field microscopy structure^[72]; (b) Functional imaging of neuronal activity in the entire *Caenorhabditis elegans* and zebrafish larval brain^[74]; (c) Functional imaging of neural activity during visually evoked and predatory behaviors in larval zebrafish^[76]; (d) Video-rate volumetric Ca²⁺ imaging to 380-μm depth in mouse cortex^[77]; (e) Characterization of light-field flow cytometry using fluorescent microspheres^[78]

术,能够进行高通量、多参数的单细胞分析,同时提供丰富的空间细节。该系统能够以接近衍射极限的分辨率(400~600 nm)在所有三个维度上捕获高达每秒 5 750 个细胞的高速、三维、多参数成像,结构和实验结果如图 12(e) 所示。2024 年, GUO 等^[79]将事件相机与傅里叶光场显微镜结合,提出了 EventLFM。事件相机采用一种新颖的异步读出架构运行,从而绕过了传统 CMOS 系统固有的帧率限制,可以稳健地以千

帧率重建快速移动和快速闪烁的三维荧光样本。

2.2 基于不规则相位掩膜的场光成像

受到四维空间-角度光场信息编码与记录方式的启发, ANTIPA 等^[80-81]提出了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(即衍射图样)中,并从单张散焦图像中解调出四维光场数据。图 13(a)展示了该方法的原理,即光线经过成像透镜和散射片,

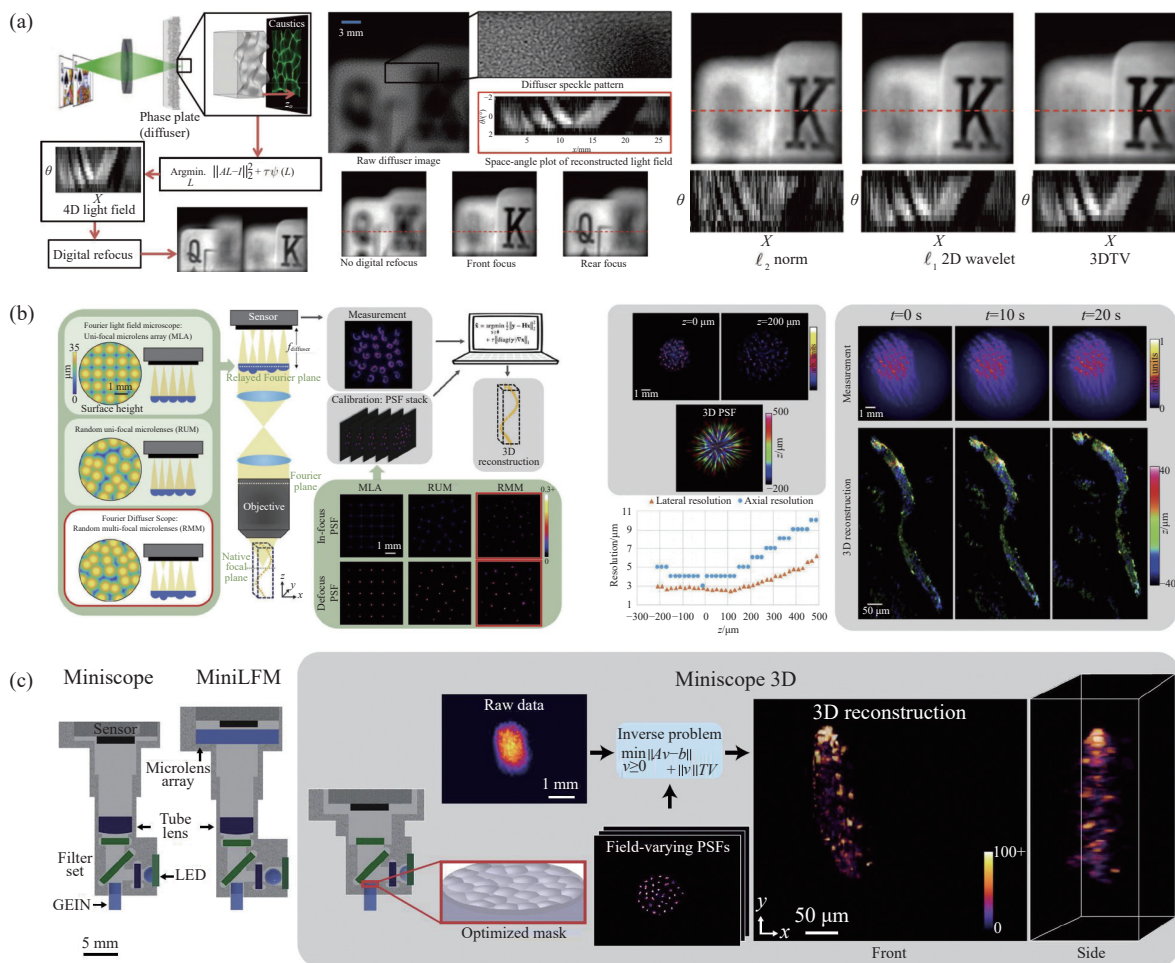


图 13 基于散射片的光场成像。(a) DiffuserCam: 使用散射片记录和重建光场。物体光通过透镜和相位板,然后传播到传感器,焦散图编码了空间和角度信息。通过解决一个线性逆问题来重建包含三维信息的光场,使得光场可以进行数字重新聚焦等^[80]; (b) Fourier DiffuserScope: 将散射片放置于傅里叶平面,并在微透镜焦距之后放置一个传感器^[82]; (c) MiniScope3D: 移除了显微镜的管镜,一个厚的相位掩膜放置在物镜的傅里叶平面^[83]

Fig.13 Light field imaging with a phase diffuser. (a) DiffuserCam: Pipeline for recording and reconstructing light fields with phase plates (a diffuser). The object light passes through an imaging lens and the phase plate, then propagates to the sensor, where caustics encode spatial and angular information. A linear inverse problem is solved to reconstruct the light field, which contains 3D information, enabling digital refocus, among other benefits^[80]; (b) Fourier DiffuserScope: A diffuser or microlens array is placed in the Fourier plane of the objective (relayed by a 4f system) and a sensor is placed after one microlens focal length^[82]; (c) MiniScope3D: the Miniscope's tube lens is removed and a thick optimized phase mask at the aperture stop (Fourier plane) of the objective lens^[83]

其中散焦对光场空间和角度信息进行编码,再传播至图像传感器,进而计算重构出光场信号。除此之外,如图 13(b) 所示,可以将散射片放置于傅里叶平面以编码三维信息 (Fourier Diffuser Scope), 然后再通过解决稀疏性约束的逆问题来重建物体^[82]。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,来替代传统的管镜,如图 13(c) 所示,将相位掩模放置在孔径光阑处显著减小了设备的尺寸 (Miniscope3D)^[83], 而变化的焦距能够在广泛的深度范围内实现均匀的分辨率。与现有的单帧体积获取方式相比,该系统更小更轻,在整个可用深度范围内的横向和轴向分辨率提高了两倍以上,能够在自由移动动物中对神经体成像,以及在孵化器和芯片实验室设备中对动态样本进行三维运动研究。

2.3 基于频域调制的外差式光场成像

另一种获取光场的结构还包括 VEERARAG-

HAVAN 等^[84-85] 提出的外差式光场相机 (Heterodyne light field camera)。与基于微透镜阵列的光场成像方法在空间域对光场进行调制不同,图 14 展示了外差式光场相机对四维光场在傅里叶域中进行调制和解调的过程。从傅里叶域来看,某个深度位置所成的像就是四维光场沿相应角度的二维切片。如果在这个深度平面放置一片具有特定透过率函数的编码掩膜,则光线经过掩膜滤光的过程在傅里叶域表现为光场频谱与透过率函数傅里叶变换的卷积。将掩膜透过率函数设计为余弦函数、其傅里叶变换为脉冲函数,就可以实现光场频谱沿角度的复制和搬移。调制后的光场再会聚到探测器上,即沿零度角重新作切片采样 (虚线方框内所示) 后的图像频谱中已经包含了光场方向维度的频谱信息。对光场进行解调时将探测器图像的频谱依序重新排列,即可得到四维光场的频谱。

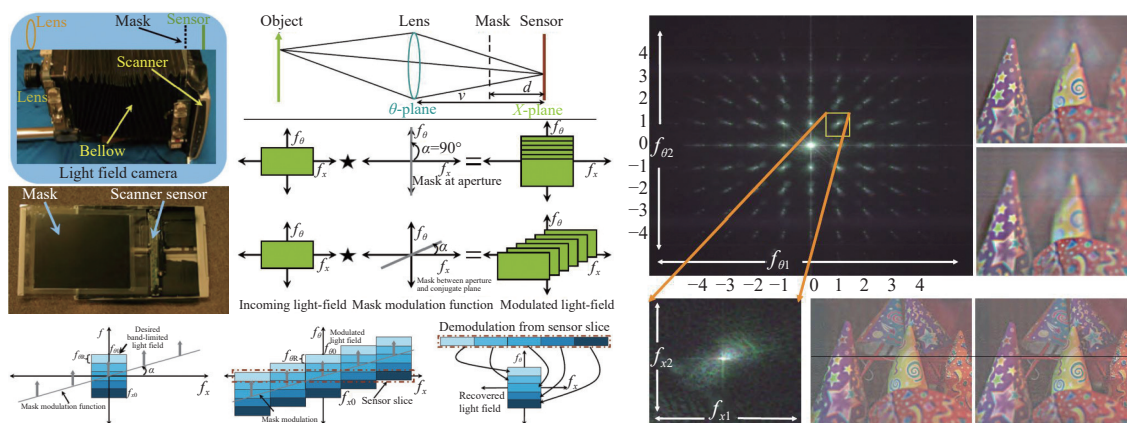


图 14 外差式光场相机在傅里叶域中的调制和解调过程^[84]

Fig.14 The modulation and demodulation process of the light field in the Fourier domain for a heterodyne light field camera^[84]

2.4 基于相机阵列的光场成像

通过微透镜阵列、相位散射片等方式,能够动态记录和重建光场的空间-角度信息。然而,这些方法仍然依赖于传统的二维相机传感器,不可避免的会存在空间分辨率和角度分辨率的权衡。为了克服这一局限,除了增加和优化硬件设施,例如采用更高密度的微透镜阵列或更高分辨率的传感器之外,使用相机阵列也是一种高速光场获取方式^[86]。2001年, WILBURN 等^[87] 搭建了光场视频摄像机,结构如图 15(a) 所示。该设备能够将超过一百个摄像机的同

步视频数据集记录到硬盘阵列上。2002年, YANG 等^[88] 搭建了世界首套近实时相机阵列,如图 15(b) 所示。该系统由 8×8 个传统相机构成,可用于动态场景光场信息的实时记录。然而,该系统所有相机均固定在一块有机玻璃上,使得相机的姿态无法独立调节。ZHANG 和 CHEN^[89] 在 YANG 等^[88] 设计的相机阵列上加入了调节器和控制器,使得每个相机可以在水平及二维旋转方向上进行独立调节,如此能够显著提升光场图像渲染的质量。斯坦福大学 WILBURN 等^[90] 对相机阵列的光场采集与处理进行了系统性研究。

图 15(c) 展示了 WILBURN 等搭建的不同类型相机阵列, 其中, 左图为配备长焦镜头的紧凑型相机阵列, 这种结构视野开阔, 适用于高分辨率成像; 右图为布局稀疏的相机阵列。不同的相机阵列系统可以满足不同的应用需求。对相机阵列中的每个相机进行预标定可以提高光场记录和处理的准确性。当相邻相机具有相邻或部分重叠视场时, 根据合成孔径成像机

制, 相机阵列可以等效创建一个具有高时空分辨率的相机, 获得单相机难以实现的成像效果。ZITNICK 等^[58]将相机数量简化为八个 (见图 15(d)), 使用相对较少数量的视频摄像机渲染高质量动态场景。Lytro 公司的 Immerge 光场摄像机是专为专业的高端虚拟现实 (virtual reality) 制作而设计的。虽然体积庞大, 但是能捕获体三维视频。

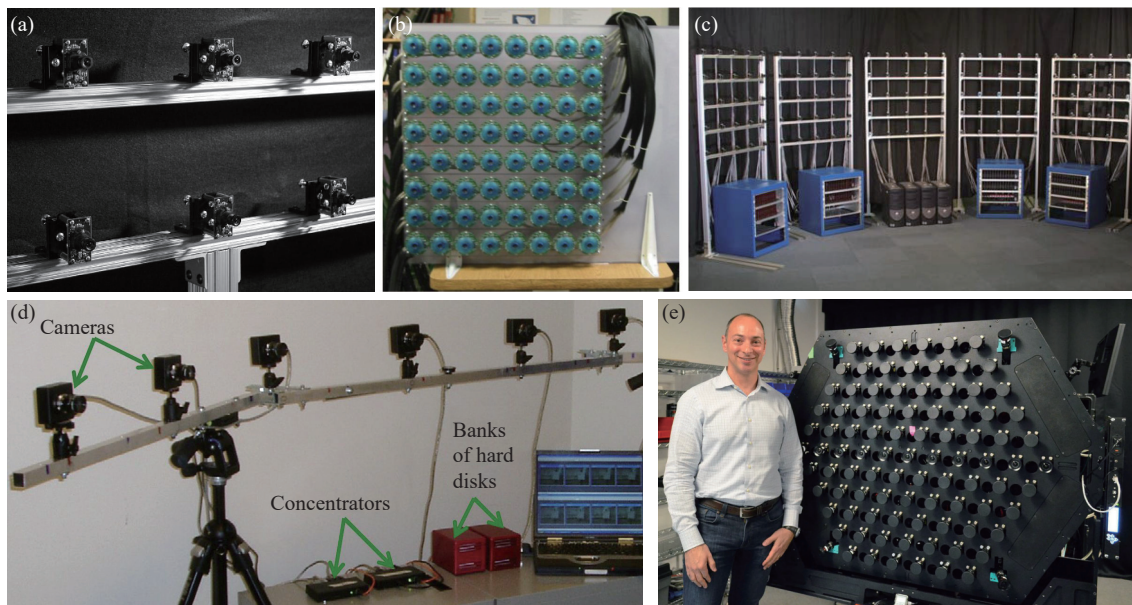


图 15 相机阵列设计结构。(a) 光场视频摄像机^[87]; (b) YANG 设计的相机阵列结构^[88]; (c) WILBURN 和 JOSHI 设计的大规模相机阵列^[90]; (d) 使用八个相机渲染高质量动态场景^[58]; (e) Lytro 公司最新推出的虚拟现实光场相机 Immerge 2.0

Fig.15 Different configuration of camera array. (a) Light field video camera^[87]; (b) Camera array structure designed by YANG^[88]; (c) The large-scale camera array designed by WILBURN and JOSHI^[90]; (d) Rendering high-quality dynamic scenes with eight cameras^[58]; (e) Lytro's latest VR light-field camera Immerge 2.0

在此基础上, WILBURN 等^[90-91]还对高速动态场景的拍摄进行了研究。他们采用的滚动快门 (rolling shutter) 相机的电子设计较为简单, 但也带来了需要进行曝光导致的畸变, 即图像中位置较低的像素与图像顶部的像素相比, 开始和结束接收光线的几乎要晚一帧。WILBURN 等^[91]提出了可以将所拍摄图片堆叠为一个三维时空矩阵, 通过对采集图片进行时空联合分析, 考虑了滚动快门与图像对齐过程之间的相互影响, 去除了滚动快门畸变以实现时间上的超分辨率效果, 其原理如图 16(a) 所示。图 16(b)~(c) 分别展示了实现时间超分辨率的风扇高速成像以及以 1 560 frame/s 捕捉的气球爆炸视频。WILBURN 等进

一步讨论了混合合成孔径成像效果^[90]。一般的合成孔径成像只能实现空间上的合成, 若想要同时完成时间上的合成, 则需要将整个相机阵列切分为若干个子阵列, 并设置各个子阵列不同的曝光时间。想要通过相机捕获场景中全景深范围内的清晰目标, 必须使用小光圈, 同时为了避免图像整体太暗, 就需要延长曝光时间来增加光通量, 其成像效果如图 16(d) 所示, 高速旋转的风扇产生了严重的运动模糊。通过控制子阵列不同的曝光时间拍摄到风扇不同的图像, 如图 16(e)~(f) 所示, 再对三幅图像进行运算, 得到图 16(g)。该运算减小了图像的运动模糊, 但因为子阵列是从略有不同的位置进行采样的, 导致图像具有

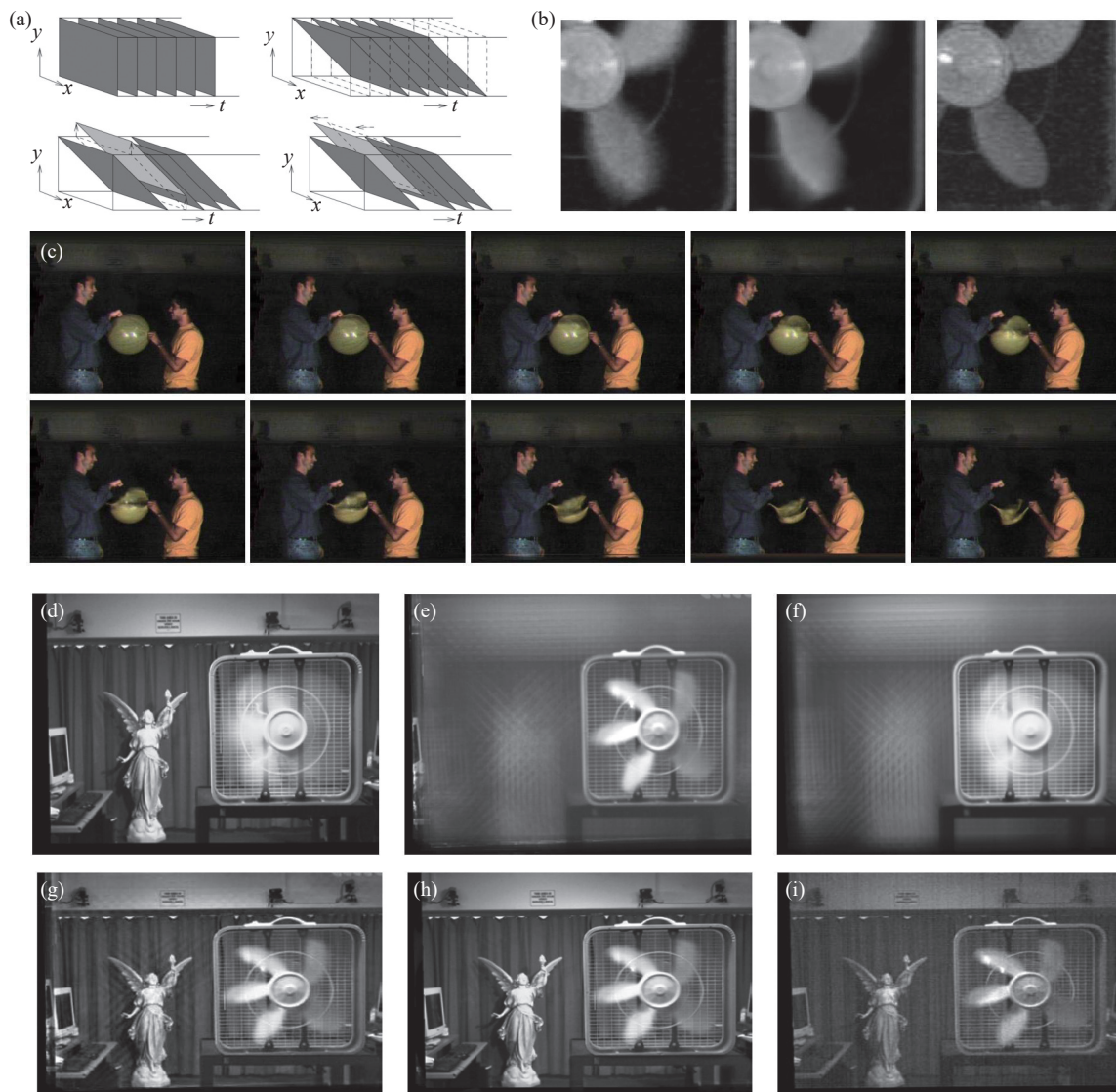


图 16 使用相机阵列进行高速视频序列捕获。(a) 对时空数据体进行切片处理,以校正滚动快门引起的畸变,并调整滚动快门图像在时空数据体中的位置; (b) 实现时间超分辨率技术的重叠曝光效果; (c) 一段以 1 560 frame/s 捕捉的气球爆炸视频,经过校正处理,消除了滚动快门引起的畸变^[91]; (d)~(i) 采用混合合成孔径摄影技术,结合了大景深和低运动模糊的特点。具体到不同阵列同时捕获的场景图像: (d) 单台相机,使用较长的曝光时间拍摄的图像 I_a ; (e) 一个大型合成孔径相机,配备较短的曝光时间 I_b ; (f) 一个大型合成孔径相机,配备较长的曝光时间 I_c ; (g) 通过计算 $I_a + I_b - I_c$ 合成得到的图像; (h) 去除了混叠效应的图像; (i) 使用小光圈和短曝光时间的相机拍摄的图像^[90]

Fig.16 High-speed video sequence capture using camera arrays. (a) Slicing the spatiotemporal volume to correct rolling shutter distortion and alignment of rolling shutter images in the spatiotemporal volume; (b) Overlapped exposures with temporal superresolution; (c) 1 560 frame/s video of a popping balloon, corrected to eliminate rolling shutter distortions^[91]; (d)-(i) Hybrid synthetic aperture photography for combining high depth of field and low motion blur^[90]. Images of a scene captured simultaneously by three different arrays: (d) A single camera with a long exposure time I_a ; (e) A large synthetic aperture with a short exposure time I_b ; (f) A large synthetic aperture with a long exposure time I_c ; (g) Image obtained by computation ($I_a + I_b - I_c$); (h) Image with aliasing removed; (i) Image taken by a camera with a small aperture and a short exposure time

混叠伪影。为此,在运算前去除合成孔径图像中未聚焦的像素(见图 16(h)),相比于使用小光圈短曝光时间的相机拍摄的图像(见图 16(i)),通过混合型合成孔径成像得到的图像在具有大景深的同时还具有更高的

信噪比。2015 年, LIN 等^[92]将基于相机阵列的光场采样应用到显微领域,通过专有的光路组合和设计可实现显微视场下的光场采集,能够实现高分辨率的光场显微成像。然而,基于相机阵列的光场成像系统规

模较为庞大,硬件成本较高,因而难以广泛应用。

2.5 基于集成透镜阵列的光场成像

基于相机阵列的光场采集系统不仅解决了时效问题,还大大增加了成像视场范围。然而,由于相机之间的空间排列限制,相机阵列的角度采样是不连续的。此外,受限于自身庞大的体积以及较高的造价成本,相机阵列难以获得广泛应用。Adobe Systems 公司研究了视点分辨率与角度分辨率之间的互相平衡关系^[93],提出了一种光场相机仿射光路理论并提高光场分辨率。该公司设计的光场相机如图 17(a) 所示,

用透镜和棱镜阵列外接在主镜头前捕获光场,并且透镜的位置距离主镜头更近。它将透镜和棱镜合为一体变成一个光学元件,可移植性更强,放置在普通相机前即可实现对光场的采集。VENKATARAMAN 等^[94]提出了一种超薄的单片相机阵列,称之为 PiCam(Pelican Imaging Camera-Array)。PiCam 是一个 4×4 相机阵列,每个相机均能够捕获 $1000 \text{ pixel} \times 750 \text{ pixel}$ 的图片。如图 17(b) 所示,整个设备比硬币还小,可集成到手机中。相比于大规模相机阵列,集成透镜阵列提供了更高的便携性和易用性。

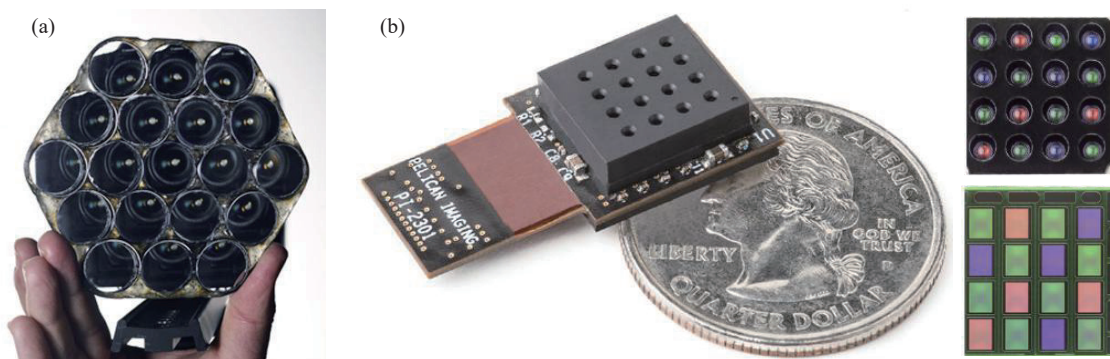


图 17 小型化光场成像系统。(a) Adobe Systems Inc.设计的可移植光场镜头^[93];(b) PiCam: 超薄的单片相机阵列^[94]

Fig.17 Miniaturized light field imaging system. (a) Portable light field lenses designed by Adobe Systems Inc.^[93]; (b) PiCam: ultra-thin monolithic camera array^[94]

3 高空间分辨率光场成像

第 2 章总结了光场成像技术因其能够动态捕获场景的四维信息而获得了广泛应用,为观察者提供了对场景深度和视角变换的全新感知。然而,如何提升其空间分辨率,从而实现更清晰的成像效果,进一步拓宽其潜在用途,仍是研究者们追求的目标。在这一章节中,文中将介绍光场成像的空间分辨率提升方法。

3.1 基于传递函数的光场反卷积

光场相机能够从单次拍摄中获取场景的四维空间-角度信息。然而,这种方式是以牺牲空间分辨率为代价来换取角度分辨率。REN Ng^[39]认为光场相机的空间分辨率取决于微透镜阵列的尺寸,即光场相机的空间分辨率采样远低于传感器的像素采样,导致了空间采样的混叠。2008 年,LEVIN 等^[48]提出了一个

用于分析计算成像方法的统一框架。在这个框架中,每个感光元件都被视为在四维光场上进行内积运算。可以把成像过程构建为一个贝叶斯推断问题:基于观测到的带噪声的光场投影和一个关于光场信号的先验知识,来估计原始的光场。这个框架使我们能够更深入地理解每种相机设计的选择所带来的权衡,并分析它们的潜在限制。随后,BISHOP 等^[95-96]指出,尽管现有光场成像技术生成的图像分辨率通常低于传统成像技术,但通过明确地模拟成像过程(如图 18(a) 所示),并结合 Lambertian 反射和纹理统计等先验信息,可以以更高的分辨率重建这些图像,消除混叠的影响;并在变分贝叶斯框架内提出了一种超分辨率光场成像方法,对场景表面及超分辨率光场进行了重建,其重建结果如图 18(b) 所示。

2013 年,BROXTON 等^[73]提出一种光场显微成

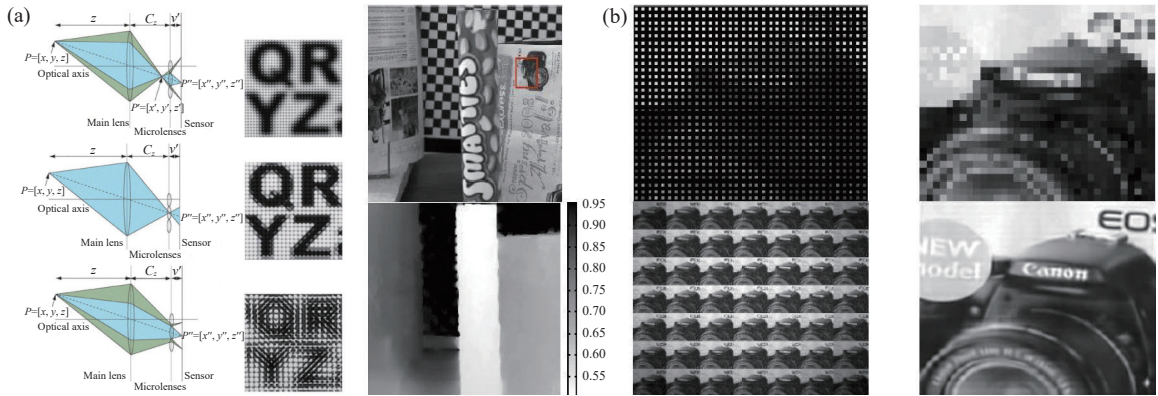


图 18 光场超分辨率。(a) 光场相机二维截面的图解；(b) 第一行：从光场图像中提取的一个视图，以及对对应光场图像和中心视图的局部细节（每个微透镜对应一个像素点，类似于传统成像技术）；第二行：估计得到的深度图（单位为 m），将上述光场图像重新组织成多个视图，以及通过超分辨率算法增强后的中心视图

Fig.18 Light field superresolution. (a) Schematic of a 2D section of a light field camera; (b) Top row: One view from our LF image, detail of corresponding LF image and detail of central view (one pixel per microlens, as in a traditional rendering). Bottom row: Estimated depth map (scale in m), above LF image rearranged as views, superresolved central view

像的波动光学模型，并通过三维 Richardson-Lucy 反卷积对光场进行超分辨率重建。图 19(a) 所示为光场显微镜的波动光学模型。文中指出光场的点扩散函数 (point spread function) 是一个空变的五维矩阵，需要计算三维物空间中每一个点的点扩散函数，导致成像的

计算过程非常复杂。最终成像分辨率受限于微透镜阵列的数值孔径，其反卷积三维成像结果如图 19(a) 所示。该技术能够获得比以往更高的空间分辨率和更佳的光学断层效果，但也存在一些问题尚未解决。放置于原始成像面的微透镜阵列造成了原始物面上

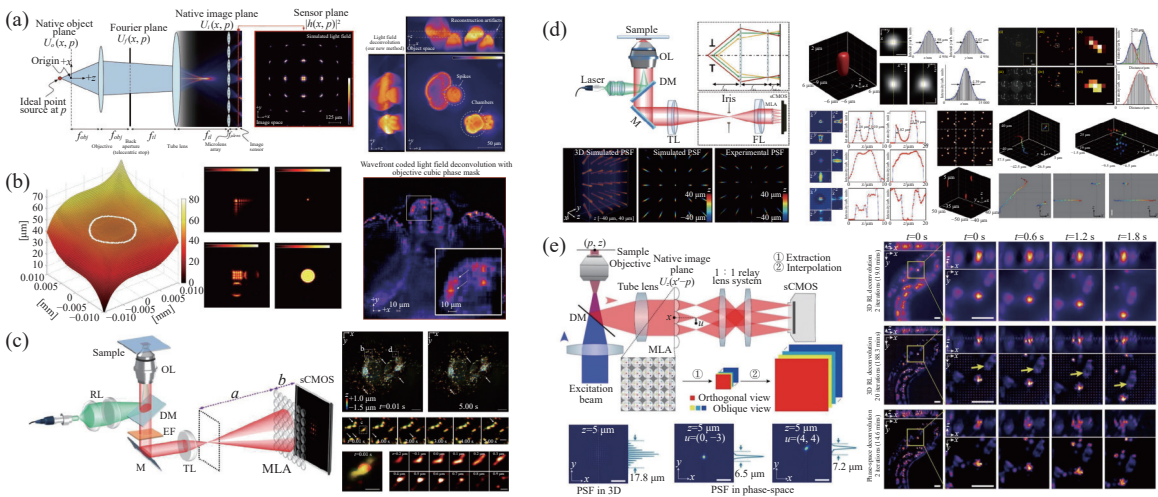


图 19 基于波动光学的光场反卷积成像。(a) 基于波动光学模型的光场反卷积及其对花粉颗粒的三维体成像实验结果^[73]；(b) 加入三次相位掩膜以及对斑马鱼的三维体成像结果^[97]；(c) 改变微透镜阵列与传感器的相对位置光路结构以及对 COS-7 细胞的动态三维体成像结果^[98]；(d) 傅里叶光场显微镜的光路结构以及成像结果^[99]；(e) 相空间反卷积原理以及对秀丽隐线虫的三维体成像结果^[100]

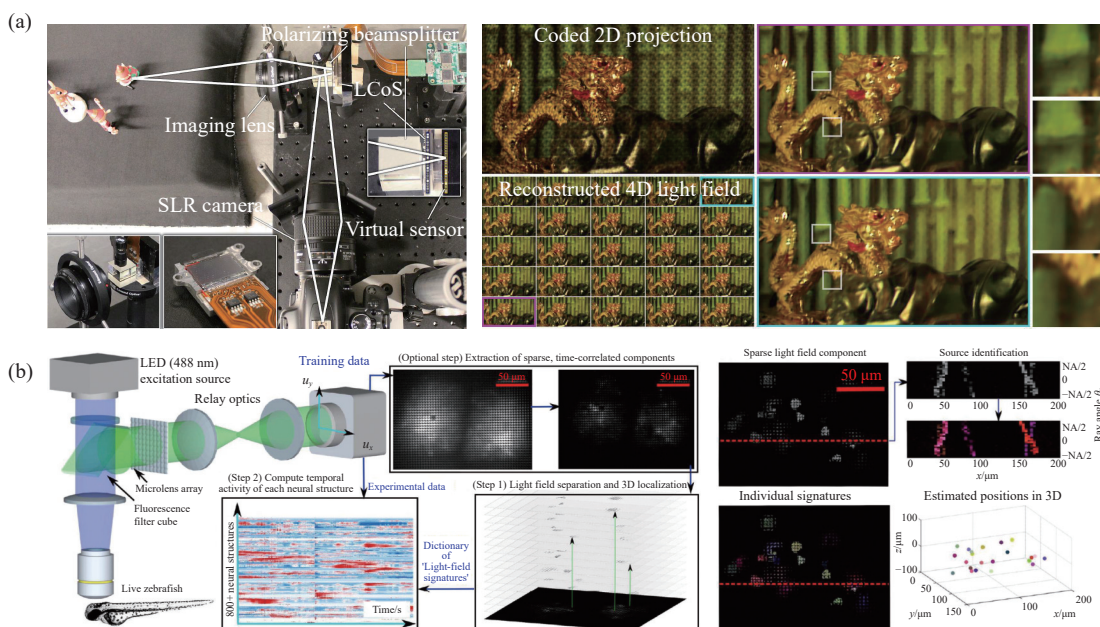
Fig.19 Light field deconvolution imaging based on wave optics theory. (a) Light field deconvolution based on the wave optics model and experimental results of volumetric imaging of pollen grains^[73]; (b) In vivo volumetric calcium imaging of a larval zebrafish with the addition of a cubic phase mask^[97]; (c) Dynamic volumetric imaging results of COS-7 cells by altering the optical path structure between the microlens array and the sensor^[98]; (d) Optical path structure of Fourier light field microscopy and the imaging results^[99]; (e) Principle of phase-space deconvolution and three-dimensional volumetric imaging results of *Caenorhabditis elegans*^[100]

角度信息的高度冗余,以至于原始物面上反卷积重建结果失真。为了克服这一局限,2014年,COHEN等^[97]提出了利用波前编码技术来提升光场显微镜的性能。通过在显微镜的光路中引入一块三次相位掩模(cubic phase mask),能够有效地解决分辨率的非均匀性问题,相位掩膜和成像结果如图19(c)所示。2019年,LI等^[98]通过改变微透镜阵列或图像传感器的相对位置,能够同时对空间和角度信息进行密集采样,一定程度上消除了物面上角度信息的高度冗余性,提高了物面重建结果的空间分辨率。另一方面,空变的成像系统点扩散函数是一个五维矩阵,其计算非常复杂繁琐。2019年,GUO等^[99]在传统光场显微成像光路中加入一块傅里叶透镜,提出傅里叶光场显微成像(Fourier light-field microscopy),将微透镜阵列放置于透镜的傅里叶面上,等效于对物镜光瞳面的分割成像,在较大的深度范围内获得了轴向和横向分辨率较为均匀分布的结果,其光路结构和成像结果如图19(d)所示。2019年,LU等^[100]提出了一种针对光场显微镜的相空间反卷积方法(phase space deconvolution),该方法利用了叠层成像的思想^[101-107],每一个角度下的三维传递函数是空不变的,并且充分利用了相空间域中的平滑性先验。通过在相空间域中对成像过程进行建模,将空间非均匀的点扩散函数转换为空间均匀的、尺寸更小的点扩散函数。通过在多种生物样本和分辨率图上的实验,证明了该方法在

无需任何硬件修改的情况下,能够显著提高图像对比度,大幅减少伪影,并且计算成本降低了10倍。通过对成像系统进行精确建模,可以将光场成像的空间分辨率从最初受到微透镜阵列尺寸,提升至成像系统本身的衍射极限,但仍然受到微透镜阵列数值孔径的制约。

3.2 压缩光场成像

尽管通过精确地对成像系统建模并计算传递函数/点扩散函数,随后运用反卷积等算法能够在一定程度上提升三维物体的空间分辨率,但成像系统的极限分辨率仍然受到微透镜阵列尺寸的限制。由低维度数据重建高维度光场本质上是一个不适定(ill posed problem)逆问题(inverse problem)的求解,解决不适定性的有效途径是在图像处理中引入关于图像的先验信息,将不适定性问题正定化,从而获得重建问题的最优解。2013年,MARWAH等^[108]提出了一种压缩光场相机架构(compressive light field photography),突破了传统限制,能够从单次拍摄中恢复出更高分辨率的光场。所提出的架构包括三个关键组成部分:作为自然光场稀疏表示的光场原子(light field atoms)、一种优化的获取二维光场投影的光学设计,以及用于从二维光场投影中恢复四维光场的鲁棒稀疏重建方法,其系统结构和实验结果如图20(a)所示。2016年,PÉGARD等^[109]提出了一种新的压缩光场显微镜方法,该技术依托于荧光信号在空间和时间



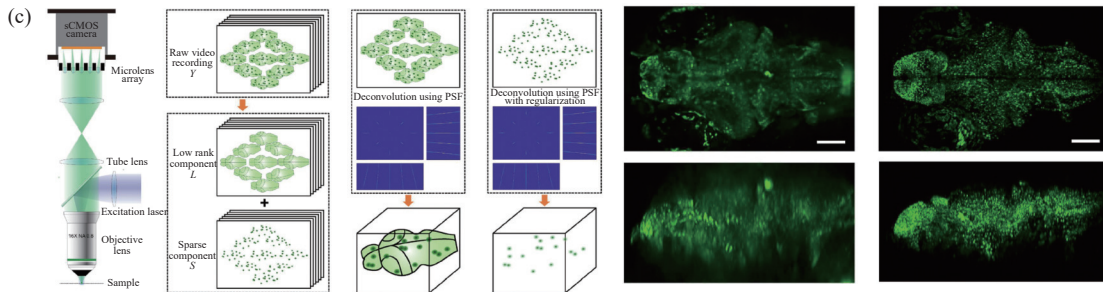


图 20 基于先验条件约束的光场成像。(a) 压缩光场相机架构以及利用光场原子作为自然光场的基本构建块, 从优化的二维投影中稀疏重建四维光场^[108]; (b) 压缩光场显微镜的原理以及提取单个神经结构的三维位置^[109]; (c) 稀疏分解光场显微镜的原理以及对斑马鱼幼鱼的全脑成像^[110]

Fig.20 Light field imaging based on prior knowledge constraint. (a) The structure of a compressive light field camera and the use of light field atoms as the fundamental building blocks of natural light fields to sparsely reconstruct a 4D light field from optimized 2D projection^[108]; (b) The principle of compressive light-field microscopy and extracting light-field signatures and 3D positions of individual neural structures^[109]; (c) The principle of sparse decomposition light field microscopy and whole-brain imaging of larval zebrafish^[110]

上的稀疏性,能够在不重建整个体积图像的前提下,有效地识别和精确定位三维空间中的每个神经元,同时自然地考虑了散射和像差效应,为测量大体积组织中单个神经元的活动提供了一种新的途径,如图 20(b) 所示。2020 年, YOON 等^[110]提出了稀疏分解光场显微镜 (Sparse Decomposition Light-Field Microscopy), 通过算法优化充分利用了光场显微镜的高时间分辨率以及神经元尖峰信号的时间稀疏性,有效提升了空间分辨率和信噪比,从而在大体积内对单细胞水平的神经元活动进行精确捕捉,结果如图 20(c) 所示。压缩光场成像这类“以少博多”、“以小博大”的方式,需要借助于物体或者光场本身的稀疏性这一先验条件,存在依赖样品的特殊性质这一缺点,限制了其普适性。

3.3 孔径编码光场成像

通过微透镜阵列获取四维光场不可避免的受到空间分辨率和角度分辨率之间的权衡,可编程孔径光场成像技术^[84,111-118]提供了一种有前景的解决方案,能够在不牺牲传感器分辨率的情况下获取光场数据。2008 年, LIANG 等^[113]提出一种复用的光场采集方法,即可编程孔径光场摄影技术 (programmable aperture photography), 如图 21(a) 所示。无需其他光学元件或移动相机,可编程孔径能够调整孔径的形状,并通过连续多次曝光,以传感器的完整分辨率记录光场。LEVIN 等^[70,111,119]从频域分析了编码孔径的响应,

指出在频域上,三维光强传输的能量主要集中在四维光场频谱的一个子集里,存在维度差。2016 年, ZUO 等^[115]将孔径编码技术应用于显微成像,提出了孔径编码显微技术 (programmable aperture microscopy), 如图 21(b) 所示。通过将可编程液晶显示屏 (LCD) 集成到传统宽场显微镜中,实现了多模态计算成像。LCD 在显微镜物镜的后孔径处选择性地调制光的分布,使得在单一设备中能够快速实现并切换多种成像技术,包括明场、暗场、差分相衬成像、定量相位成像、多视角成像和全分辨率光场成像模式。2017 年, LIU 等^[116]将空间光调制器放在孔径平面,顺序形成多路复用编码孔径并拍摄图像。通过正则化的最小二乘法结合近端加速梯度下降算法来解决逆问题,从而重建样本的三维荧光分布,如图 21(c) 所示。KAUVAR 等^[117]分析了光波通过孔径不同区域时会发生干涉效应,可以捕获到更高的空间频率信息,从而提高成像的空间分辨率,并分析了不同编码图案下的三维传递函数 (OTF), 如图 21(d) 所示。2023 年, CAI 等^[118]使用环形孔径将成像系统的 PSF 调制为准贝塞尔光束,使 PSF 在轴向上保持恒定,实现景深延拓的成像效果。并推导了非相干傅里叶切片定理,发现环形孔径下检测到的二维强度信号等于三维物体频谱中的一个二维切片。利用环形孔径调制实现了将计算断层扫描技术应用于非相干荧光宽场显微镜,如图 21(e) 所示。2024 年, ZHANG 等^[120]使用高

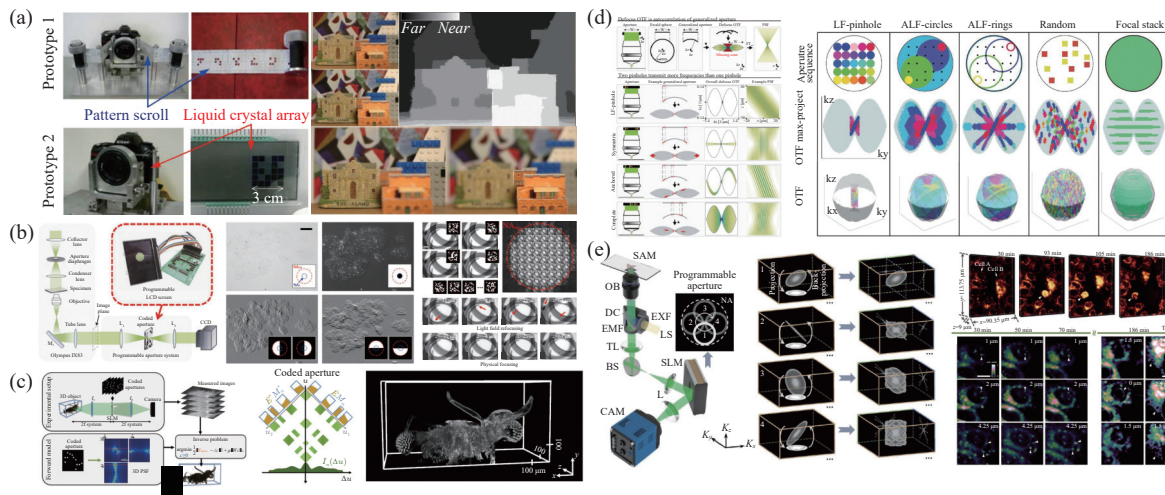


图 21 基于孔径编码的光场成像技术。(a) 可编程孔径光场摄影技术^[113]；(b) 可编程孔径显微技术以及多模态成像^[115]；(c) 相空间复用三维荧光体成像技术^[116]；(d) 不同孔径编码图案下的三维传递函数^[117]；(e) 可编程孔径光场显微技术^[118]

Fig.21 Programmable aperture light field imaging. (a) Programmable aperture photography^[113]; (b) Programmable aperture microscopy and multi-modal imaging^[115]; (c) Multiplexed phase-space imaging for 3D fluorescence microscopy^[116]; (d) 3D OTFs under different programmable aperture^[117]; (e) Programmable aperture light field microscopy^[118]

速电控变焦透镜器件,使得对厚样本进行无移动、高空间分辨率的实时全聚焦成像成为可能。得益于电控变焦透镜的高速扫描特性,三维样本的强度分布得以沿 z 轴积分,并有效地“投影”到二维成像平面上。对于单次全聚焦成像,二维全聚焦点扩散函数为三维点扩散函数沿 z 轴的积分投影。根据傅里叶切片定理,二维全聚焦点扩散函数的傅里叶谱,可以看作是三维光学传递函数的中心切片。

3.4 扫描光场成像

通过多张低分辨率图像重建高分辨率图像也是一种常见的超分辨率方法^[121]。在超分辨率成像技术中,提升图像的空间分辨率的基础是有多个从同一场景捕获的低分辨率图像。在超分辨率成像中,这些低分辨率图像通常代表了对同一场景的不同“观察视角”。这意味着,这些图像不仅经过了亚像素级的精确移位,还可能存在一定程度的混叠现象。然而,如果这些图像之间存在不同的亚像素级移位,并且伴随着混叠,那么每个图像就包含了其他图像所没有的独特信息。在这种情况下,每个低分辨率图像中所蕴含的新信息可以被用来合成高分辨率图像。多帧图像超分辨的核心思想在于利用时间带宽(获取同一场景

的多帧图像序列)换取空间分辨,构建病态逆向问题的求解矩阵。为了获取同一场景的不同观察视角,需要存在相对场景的运动。受到果蝇复眼的光机械响应^[122]和亚像素位移超分辨率成像技术^[123-127]的启发,如图 22(a)所示,2021年,WU等^[128]开发了一个紧凑型的扫描光场显微镜系统,提出了数字自适应光学扫描光场互迭代层析(DAOSLIMIT)方法,通过周期性扫描微透镜阵列来获取接近光学衍射极限的四维空间-角度光场分布,并且能够在不增加额外硬件改动的前提下,对三维成像进行像差校正,从而在广泛的应用领域中实现高速、高精度的成像效果,随后该技术进一步取得了系列研究进展^[129-133]。如图 22(b)所示,2022年,WU等^[52]提出了一种集成的扫描光场成像传感器—元成像传感器(integrated meta-imaging sensor),能够在不依赖任何数据先验信息的情况下,仅用一个球形透镜就实现高达十亿像素的高分辨率摄影,这一成果显著降低了光学成像系统的存储容量需求和成本。即便在动态大气湍流等恶劣条件下,元成像传感器也能够在不牺牲采集速度的同时,对 80 cm 口径的地面望远镜进行高达 1 000" 的多点像差校正,为高分辨率的天体观测提供了可能。

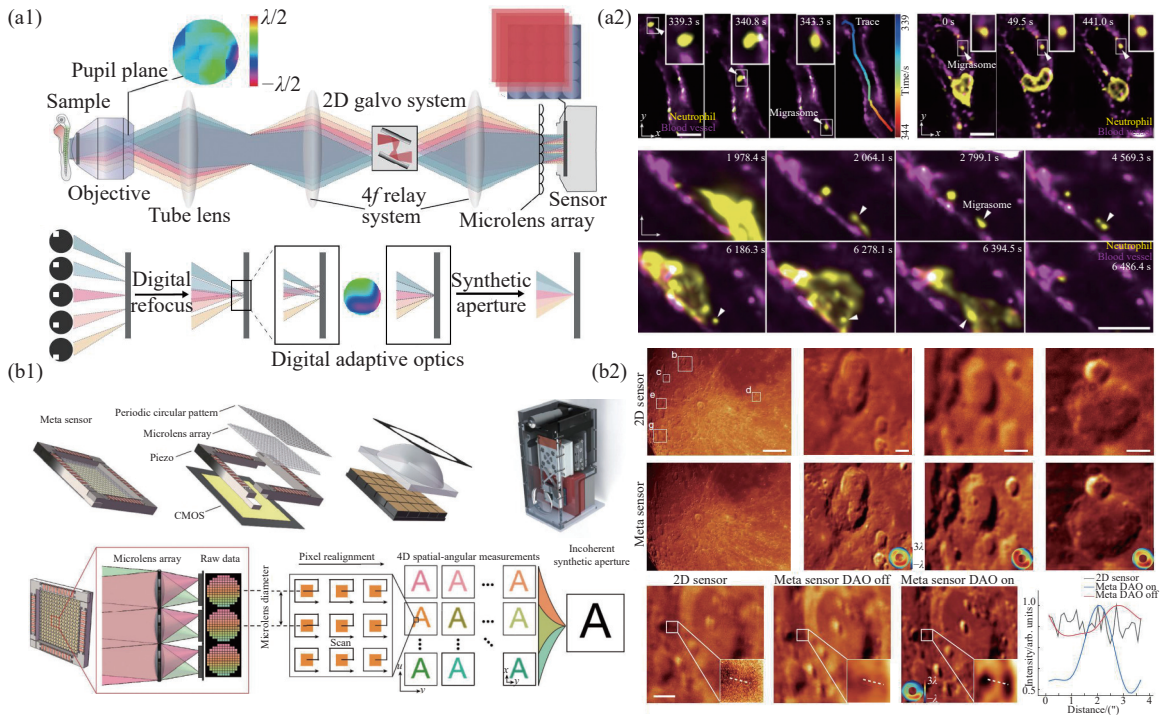


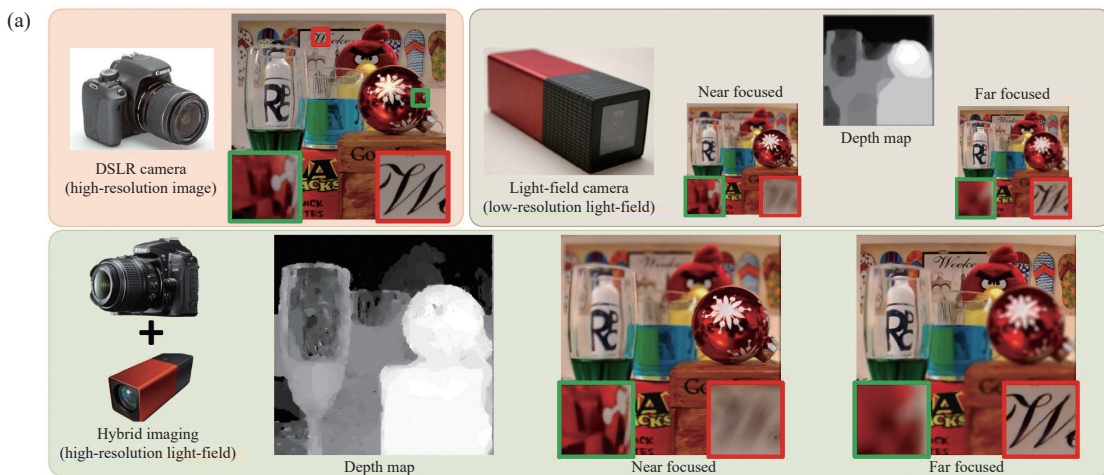
图 22 扫描光场超分辨率成像。(a) DAOSLIMIT 原理以及观测小鼠肝脏中中性粒细胞迁移过程中的迁移过程^[128]；(b) 元成像传感器的工作原理，以及多点数字自适应光学 (Multisite DAO) 对抗地面望远镜所面临的动态大气湍流成像结果^[52]

Fig.22 Scanning light field superresolution imaging. (a) Principle of DAOSLIMIT and the migration process observed during neutrophil migration in the liver of mice^[128]; (b) Principle of the integrated meta-imaging sensor and multisite DAO against dynamic turbulence for ground-based telescopes^[52]

3.5 混合高/低分辨率光场成像

结合光场相机和高分辨率相机的混合成像系统，将标准相机所拍摄的高分辨率图像与基于微透镜阵列获得的低分辨率图像相结合，能够实现高分辨率成像以及更好的景深控制。混合成像技术的概念最初由 SAWHNEY 等^[134] 在 2001 年提出，他们通过结合一个低分辨率摄像机和一个高分辨率摄像机的立体视

觉设置，成功生成了高分辨率的立体图像。FAVOR 等^[135]、BOOMINATHAN 等^[136]、WANG 等^[137] 将光场相机与传统高分辨率单反相机相结合，设计了一种混合成像系统，通过分光棱镜将物体发出的光线一分为二，并由单反相机和光场相机同时捕获，提高了成像空间分辨率与景深，结构和实验结果如图 23(a) 所示。LU 等^[138-139] 提出了一种光场混合成像系统，通



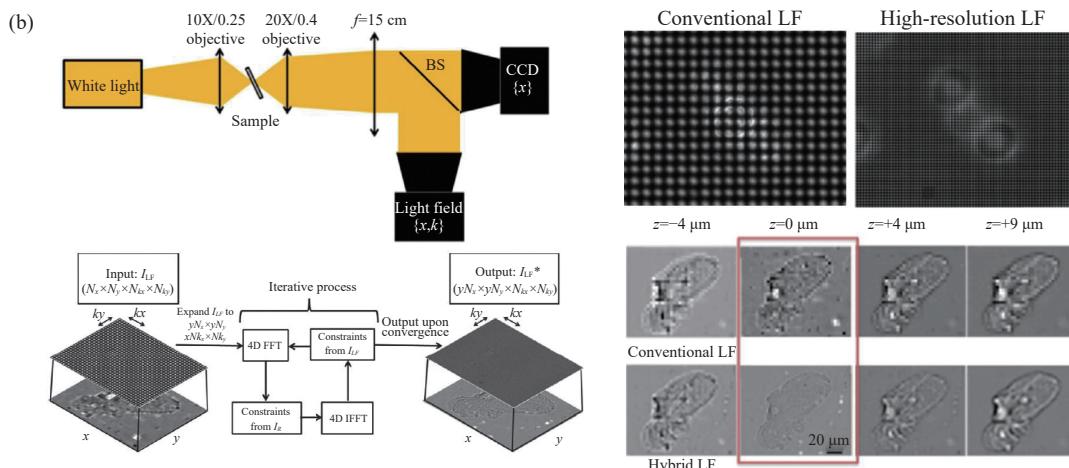


图 23 混合光场高分辨率成像。(a) 混合光场相机/传统相机高分辨率光场成像^[136]; (b) 混合高分辨率 CCD/Shack-Hartmann 高分辨率光场显微成像^[139]

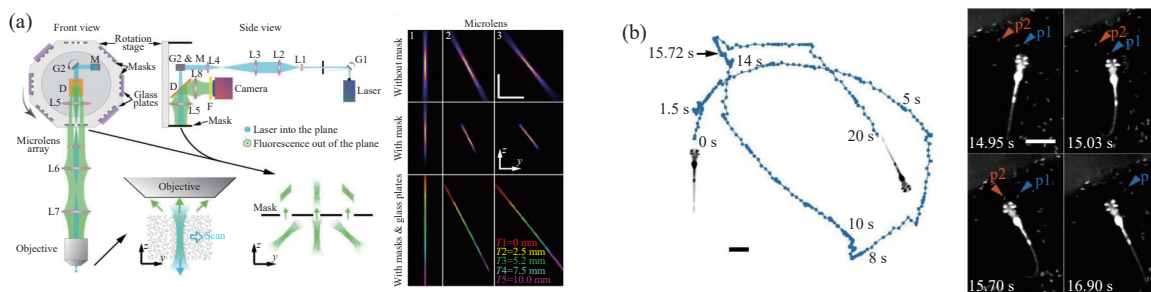
Fig.23 Hybrid high-resolution light field imaging. (a) Hybrid plenoptic camera/traditional camera high-resolution light field imaging^[136]; (b) Hybrid high-resolution CCD/Shack-Hartmann high-resolution light field microscopy imaging^[139]

过将高分辨率 CCD 相机与 Shack-Hartmann 传感器同位设置, 利用标准图像作为傅里叶变换过程中的约束条件, 对角谱进行插值处理, 实现了在傅里叶空间中的高分辨率, 结果如图 23(b) 所示。从原始光场图像的视角出发, 所得到的结果是在直接图像分辨率基础上进行的高密度相空间采样。从摄影的角度来看, 为传统的二维图像增添了新的维度, 通过数值重聚焦技术实现了图像的深度扩展。

3.6 共聚焦光场成像

先前提到的超分辨率光场成像技术提升了光场成像空间分辨率。然而, 在宽场显微成像中, 光场显微成像技术通过在单次相机曝光中同步捕获整个体积不同深度的信号混合, 实现了荧光信号采集的全面并行化, 并随后利用三维反卷积算法计算分离这些混合信息。这种方法能够在三维空间中快速捕捉动态过程, 但受限于光场显微镜在空间分辨率和成像体积

的轴向覆盖之间的固有折衷, 超出轴向覆盖范围的信号可能会通过增加背景噪声显著干扰聚焦信号, 从而影响成像的信噪比 (signal-to-noise ratio), 并降低传统光场显微镜三维重建的图像质量和轴向切片能力。因此, 针对厚组织如大脑样本, 优化轴向覆盖以实现所需的分辨率、信噪比和重建质量, 是一项极具挑战性的任务。2021 年, ZHANG 等^[140] 提出一种共聚焦光场显微成像技术 (confocal light field microscopy), 该技术能够在大脑深处实现无背景的快速体积成像。共聚焦光场显微术配备了一种新型的通用共聚焦检测方案, 与常规仅能一次提取单一成像平面信号的共聚焦检测设计不同, 它能够确保从聚焦体积中选择性且高效地收集信号, 其光学设计结构和特性如图 24(a) 所示。通过消除背景噪声, 即光学断层能力, 共聚焦光场显微术在保持高信噪比的同时, 减少了厚组



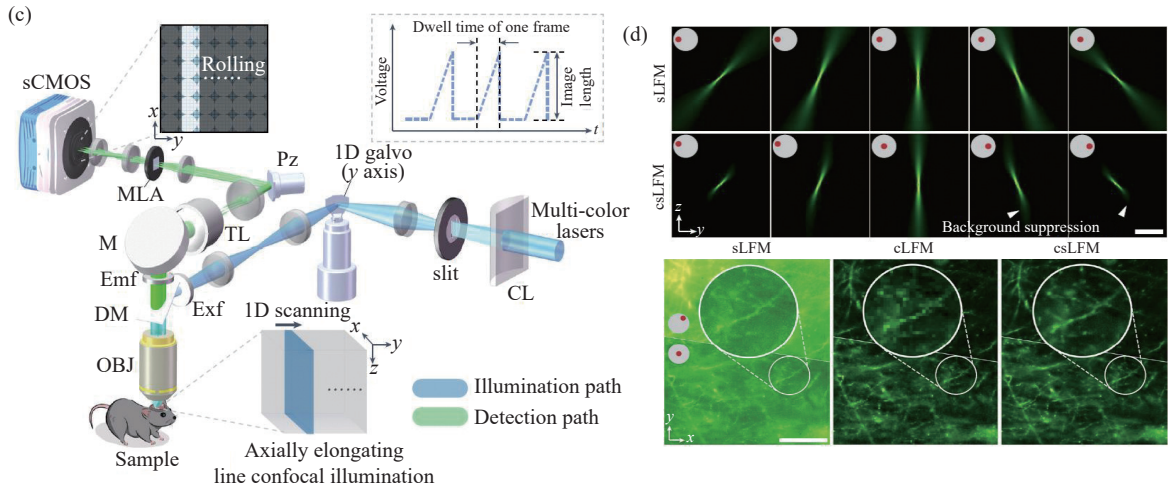


图 24 共聚焦光场显微成像^[140-141]。(a) 共聚焦光场显微镜的光学设计结构和系统特征；(b) 在斑马鱼幼虫捕食行为期间对全脑神经活动的追踪和成像；(c) 共聚焦扫描光场显微镜的系统示意图；(d) 在像素重对其后，对厚脑切片的原始结果，在扫描光场显微镜、共聚焦光场显微镜与共聚焦扫描光场显微镜的对比

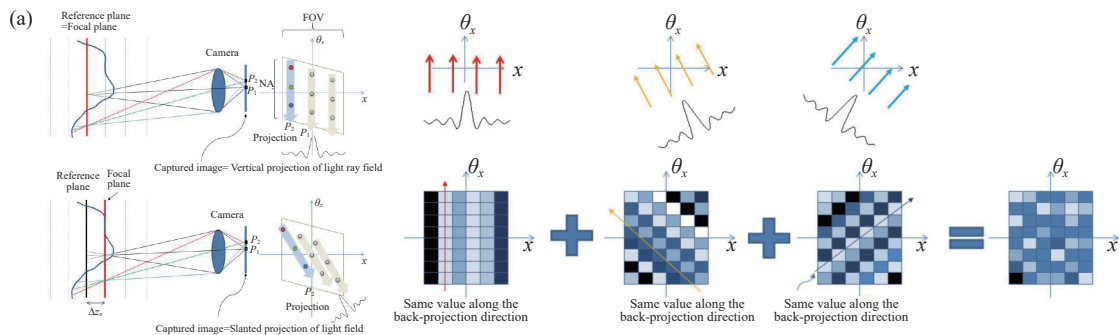
Fig.24 Confocal light field microscopy^[140-141]. (a) Design and characterization of confocal LFM; (b) Tracking and imaging whole-brain neural activity during larval zebrafish's prey capture behavior; (c) Diagram of csLFM system; (d) The raw measurements on a thick brain slice after pixel realignment for the comparison among sLFM, cLFM and csLFM

织成像中的重建伪影。利用这项技术记录了自由游动的斑马鱼幼虫的全脑钙瞬变，并观察到了在捕食行为中与行为相关的单神经元活动(见图 24(b))。此外，在小鼠大脑中，能够探测到高达 370 μm 深度的神经活动，并在一个直径 800 μm 、厚度 150 μm 、深度达 600 μm 的体积内，以 70 Hz 的频率追踪血细胞。这些成果为神经科学研究提供了新的视角和工具。2024 年，LU 等^[141]将扫描光场显微镜与共聚焦显微镜技术相结合，提出了共聚焦扫描光场显微镜(confocal scanning light-field microscopy, csLFM)，能够在接近衍射极限的分辨率下实现高保真度、高速、三维成像，

同时具备光学切片能力和低光毒性。

3.7 强度堆栈光场反演

另一类计算光场成像技术是通过轴向移动相机采集聚焦堆栈图像序列，基于强度测量进行光场反演(其原理如图 25(a)所示)，相比于编码掩膜，其优点在于图像采集过程中可以保持相机孔径全开，大大增加了信噪比。几何近似下的光场成像同样具备与维格纳分布函数光学信号变换类似的成像性质，例如光场传播等效于四维光场的空间坐标剪切，剪切后的光场沿角度坐标轴进行投影可以获得聚焦于特定深度的等效成像效果。通过获取不同轴向位置的



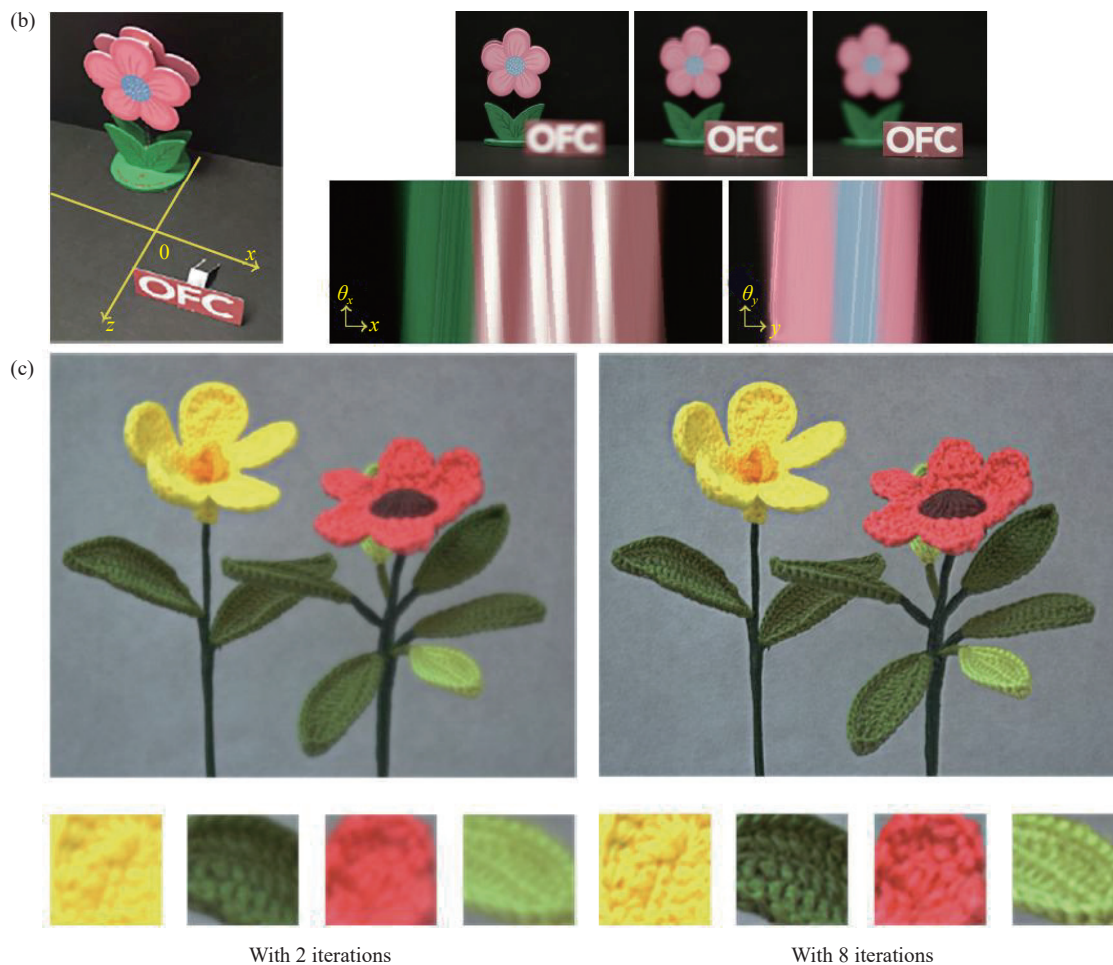


图 25 光场重建的反投影原理。(a) 拍摄图像与光场之间的关系,使用反投影从拍摄图像重建光线场^[142]; (b) 一个真实 3D 场景重建的 EPIs 的示意^[143]; (c) 使用 SART 迭代算法重建光场的结果示意图^[144]

Fig.25 Principle of light field reconstruction with back projection. (a) Relationship between the captured image and the light ray field, and light ray field reconstruction from captured images using back projection^[142]; (b) An example of the reconstructed EPIs of a real 3D scene^[143]; (c) Iterative light field reconstruction based on SART method^[144]

强度图像即可使用反向投影进行光场重建 (light field back-projection, LFBP)。一种方式是通过获取沿光线方向所有强度图像上对应像素的平均值来近似光线的亮度^[142-143], 其结果如图 25(b) 所示。然而, 这种平均近似结果受噪声的影响较大, 当三维场景较为复杂时, 光场的重建质量不高; 另一种方式可以通过焦点堆栈与光场之间进行交替投影^[69,144-145], 充分利用焦点堆栈的结构信息, 克服轴向采样不足和边界封闭等问题, 从而实现更真实、更高质量的光场重建, 其结果如图 25(c) 所示。对该技术感兴趣的读者可以参阅综述文献 [146-147]。

3.8 光场矩成像

反向投影法通常需要较高的轴向采样率来保证光场重建的质量, 仍需要采集较大数量的图像序列。相较之下, 使用光强传输方程只需增加一幅额外的离焦光强图像 (一幅聚焦图加上一幅离焦图) 就可以恢复出相位信息。从信息量角度来看是合乎逻辑的。因为光波场的复振幅仅仅定义在二维平面上, 采用离焦光强图像的信息“置换”出相位信息在信息量上是“守恒”的。ZUO 等^[148] 提出并通过实验验证了两个观点: 1) 四维光场中包含了二维相位信息 (通过光场成像可以直接进行相位重构); 相位梯度可以简单地通

通过对原始光场图像中的每个子孔径图像进行重心检测得到,这与夏克·哈特曼传感器中的标准处理步骤别无二致。2)通过求解光强传输方程虽然无法重构完整光场,但可以获得光场的一阶矩(重心)。此外在某些简单的情形下(空域平稳照明下的缓变物体),此时四维光场高度冗余(如图 26 所示,样品为一个“无散”系统,其并不改变入射光场的角分布 (angle-shift invariance),由主级光源光强所决定,仅仅对其起到整体移动的作用。样品针对入射光场分布表现为一种角平移不变性,在每个位置,每个入射光线的方向都会随着物体相位梯度的大小而移动)。在光源分布已知的前提下,求解光强传输方程可实现对四维光场的完全重构。严格来说,首次采用光强传输方程进行计算光场成像的是 ORTH 与 CROZIER^[149]于 2013 年所提出的“光场矩成像”(light field moment imaging)。他们发现采用两幅不同焦面的光强图像通过求解一偏微分方程(他们当时并不知晓该方程就是光强传输方程)可以近似重构出场景多个视角的图像。而这里的“矩”正是指该方法只能获得光场的一阶矩,而无法获得完全的光场信息。为了获得完整的四维光场,ORTH 等^[149]假设光场的角分布符合高斯模型来填充这些缺失的数据。该做法虽然物理上缺乏依据,实验上却给出了不错的视觉效果。2014 年,ZUO 等^[150]发表评论指出“光场矩成像”实际上就是光强传输方程在几何光学近似下的变体,因此任何关于光强传输方程的求解与轴向微分估计算法等均可以直接“移植”

到光场矩成像中。2015 年,LIU 等^[151]采用基于多平面光强测量的高阶有限差分法去优化光强轴向微分估计,提高了光场矩成像的信噪比。

4 高角分辨率光场成像

光场相机在空间分辨率和角度分辨率之间面临一个固有的权衡问题,往往导致二者的分辨率均受到损失。在第 3 章介绍了提升空间分辨率的技术,在本章节中将介绍光场角度分辨率的提升方法。

4.1 基于视角插值的光场成像

GEORGIEV 等^[93]采用计算机视觉技术来对缺失的角度采样进行直接插值,从而补偿输入中的较低角度分辨率。除了较为直接的方式以外,依靠对场景的精确深度估计来提升角度分辨率是一种常用的方法。LIANG 等^[113]对孔径编码得到的少量视角进行插值,利用深度估计,可以使得在角度分辨率增加的情况下,分辨率不受影响。2012 年,WANNER 等^[152]提出了一个变分框架,使用基于视差的极线平面图的结构张量计算得到的主导方向来局部估计输入视图的高精度深度图,从低分辨率采样的四维光场数据生成超分辨率的新视图,使用凸优化算法在几秒钟内最小化超分辨率模型能量。随后,WANNER 等^[153]进一步提出了一个连续框架,该方法不需要将视差空间离散化,快速且具有亚像素精度。利用光场的连续视差空间,通过变分框架生成超分辨率的新视图,在空间和角度方向上增加四维光场的采样率。图 27(a)上方为角度超分辨率前后对比的极线平面图,可以直观地对超分辨率结果进行对比,角度超分辨率更进一步使得视差估计改进。ZHANG 等^[154]使用微基线立体对,首先进行初始视差图估计,然后通过相位域视图合成和迭代优化过程来改进视差图和合成视图,最终利用视差辅助的相位基础合成来重建四维光场,并生成没有振铃伪影的极线平面图像。PENNER 等^[155]提出了一种软三维重建方法来改进合成视图的质量,在三维重建和渲染的每个阶段都保留了深度不确定性,并考虑了光线的可见性和遮挡关系。

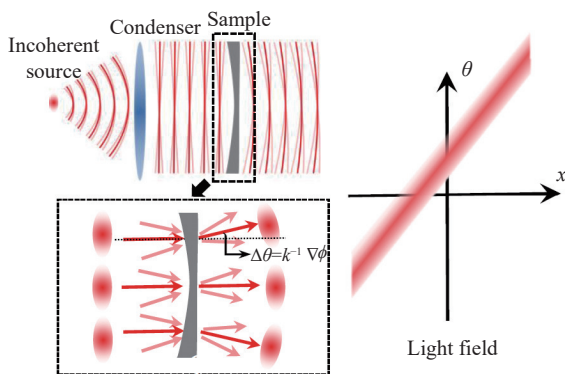


图 26 缓变物体在空域平稳照明下的光场表示^[148]

Fig.26 Light field representation of a slowly varying object under spatially stationary illumination^[148]

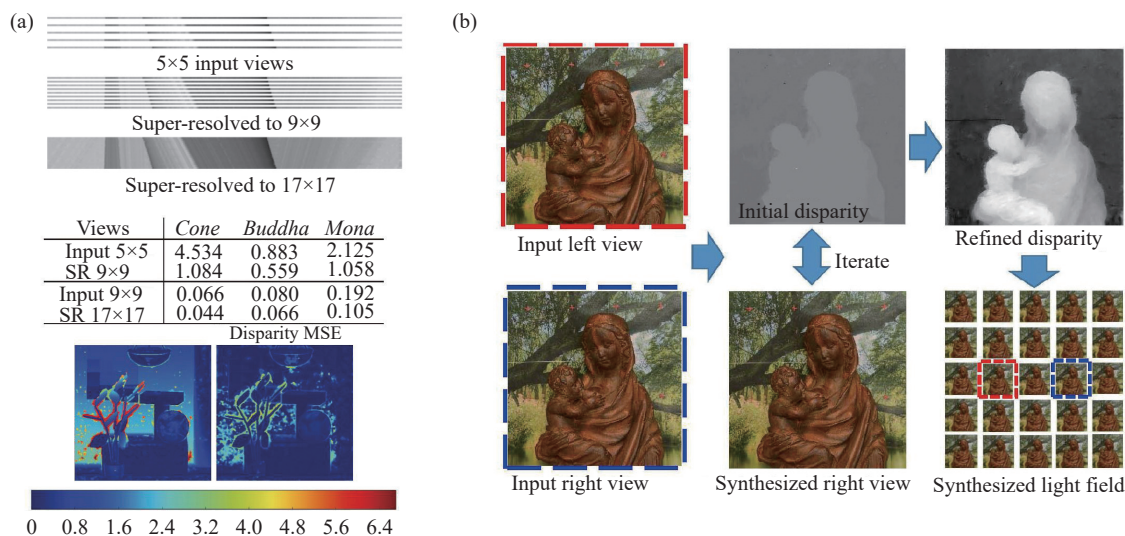


图 27 角度超分辨率示意图。(a) 视差精细化示意图^[153]。角度超分辨率后可以观察到,生成的视图插值具有高质量和准确的遮挡边界;(b) 在相位域中迭代地进行视差估计和视图合成,从微基线立体对重建了密集采样的四维光场^[154]

Fig.27 Angular superresolution diagram. (a) Disparity refinement^[153]. After angular superresolution, one can observe the high quality and accurate occlusion boundaries of the resulting view interpolation; (b) Iteratively performing disparity estimation and view synthesis in the phase domain, we reconstructed a densely sampled four-dimensional light field from a micro-baseline stereo pair^[154]

4.2 基于傅里叶域稀疏性的光场成像

另一种对光场进行分析的方法是从傅里叶域入手^[56,67]。如图 28 所示,SHI 等^[156]利用连续傅里叶域

中的稀疏性来从少量视角采样中重建高分辨率的四维光场。该方法从频谱的某个初始近似值出发,模拟连续稀疏谱向离散域的投影,优化连续频率域内的稀

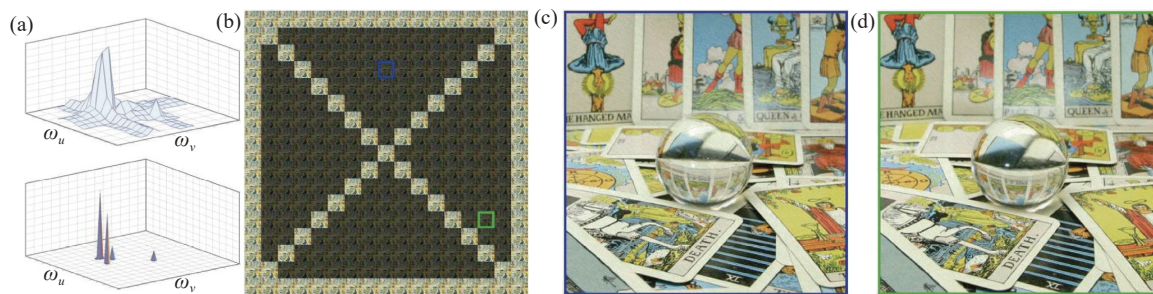


图 28 离散与连续傅里叶域中的稀疏性,以及重建结果^[156]。(a) 水晶球光场的特定二维角度切片的离散傅里叶变换(顶部),及其重建的连续版本(底部);(b) 光场四维数据,算法中使用的图像已突出显示;(c) 和 (d) 为两个重建的视角,展示了这个高度非朗伯特场景的成功重建。(c) 和 (d) 的 uv 位置在 (b) 中以蓝色和绿色框显示

Fig.28 Sparsity in the discrete vs. continuous Fourier domain, and our reconstruction results^[156]. (a) The discrete Fourier transform (top) of a particular 2D angular slice of the crystal ball's light field, and its reconstructed continuous version (bottom); (b) A grid showing the original images from the Stanford light field archive. The used images are highlighted; (c) and (d) two examples of reconstructed viewpoints showing successful reconstruction of this highly non-Lambertian scene. The uv locations of (c) and (d) are shown as blue and green boxes in (b)

疏性。该方法能够重建那些从未被直接记录的高质量视图,甚至可以外推至记录视场之外的新图像,有效地减少了四维光场的采样需求,极大地简化光场的记录过程,并且能够准确重建包括高度非朗伯特场景在内的各种场景。

4.3 基于傅里叶域滤波的光场成像

VAGHARSHAKYAN 等^[157-158]在傅里叶域下利用一系列剪切波构成一个复合滤波器,对频谱信号进行更好地滤波,并解决由欠采样导致的混叠频谱问题。由图 29(a)可以看出,由于采样不足,混叠的副本

(灰色)和期望信号(绿色)发生了重叠,因此使用传统的滤波方法进行带限重建是不可行的。图 29(a)中的情况在图 29(b)中进一步分析,图 29(b)显示了通过四个深度层的频率平面划分,如果给定了深度层,能够在极线平面图中进行插值,而不会产生混叠伪影。图 29(c)为相同的混叠极线平面图展示了基于剪切波的频率平面分离,L1 区域不包含任何混叠。基于上述讨论,图 29(d)给出了一个复合滤波器,用于剪切变换以处理极线平面图特征中的直线。

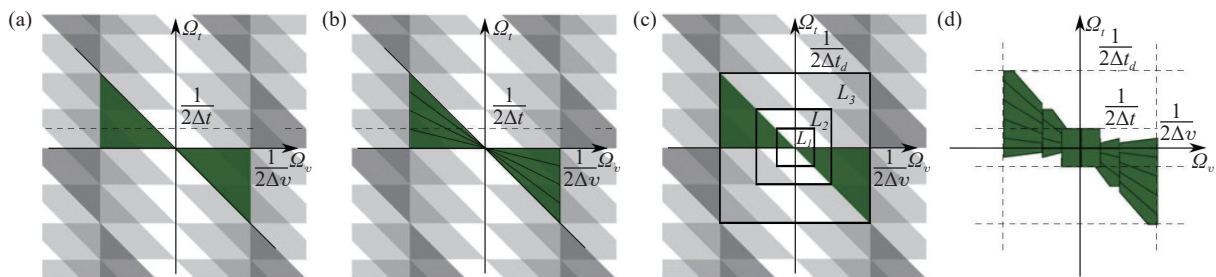


图 29 极线平面图在频域中的性质^[157]。(a) 在 t 轴上采样不足的极线平面图的频率域结构,重叠区域表示混叠现象;(b) 基于深度信息的频域分离;(c) 基于二进制缩放的频率域分离;(d) 用于极线平面图的稀疏表示的复合方向和基于缩放的频域分离

Fig.29 Epipolar-plane image formation and its frequency domain properties^[157]. (a) Frequency domain structure of an EPI being insufficiently sampled over t -axis, the overlapping regions represent aliasing; (b) Desirable frequency domain separation based on depth layering; (c) Frequency domain separation based on dyadic scaling; (d) Composite directional and scaling based frequency domain separation for EPI sparse representation

5 总结与展望

文中概括性地介绍了高分辨率光场成像技术的研究进展,涵盖了光场成像的理论基础、技术发展、以及在不同领域的应用情况。文中首先介绍了光场成像技术的发展,从 20 世纪初的早期概念到现在的成熟技术,并对七维全光函数及简化的四维光场基本概念进行了阐述。光场成像技术的核心在于其能够获得场景的高维度信息,包括时间、空间和角度等维度。时间分辨率允许捕捉动态变化,空间分辨率关乎图像的清晰度,而角度分辨率则提供了深度和视角等三维信息。这三个维度相互关联,提升某一维度的性能往往需要在其他维度上做出妥协,如何突破这一权衡,使得成像速度更快、分辨率更高、视角更多是光

场成像技术的关键挑战。文章进一步探讨了光场成像技术在高时间、空间和角度分辨率方面的最新研究进展。在高时间分辨率光场成像技术方面,文章总结了通过微透镜阵列、不规则相位掩膜、频域外差式编码和相机阵列等方法实现高速动态三维场景记录,并在显微成像领域得到了广泛的应用。在高空间分辨率光场成像技术方面,文章总结了通过算法优化、先验信息约束、多帧扫描、孔径编码、共聚焦、混合高/低分辨率光场成像等空间分辨率提升的方法。在高角度分辨率成像方面,有结合场景深度估计以及利用傅里叶域的稀疏性等方式。

展望未来,随着对光场高维度信息应用的深入挖掘,光场成像技术的发展可能会集中在以下几个方向。

5.1 光场成像与光场相干性调控的交融

在相位缓变光场或几何光学近似下,光波场的维格纳分布函数与光场具有等价性^[37],此时维格纳分布函数可以通过光线的空间位置和角度的四维函数进行表征。而从光的量子本质来讲,不论是自然界中存在的、还是人为调控的任一光场,都不可能是完全相干或是非相干的,而是伴随随机涨落的现象,即在实际应用中所遇到的大部分光场都是部分相干的。光学相干理论旨在通过光场随机涨落的统计性质对光波场随时间变化的特性和规律进行探索和研究。比起四维“光场”函数,四维相干函数或者维格纳分布函数不管在维度上还是物理内涵上都要更加抽象,与其相关的测量技术也要更加复杂繁琐。但是针对计算成像领域而言,对其的研究也是必不可少的。关于光场高维度的相干性表征与测量,可以参阅笔者之前发表的综述文献《光场相干测量及其在计算成像中的应用》^[9]。

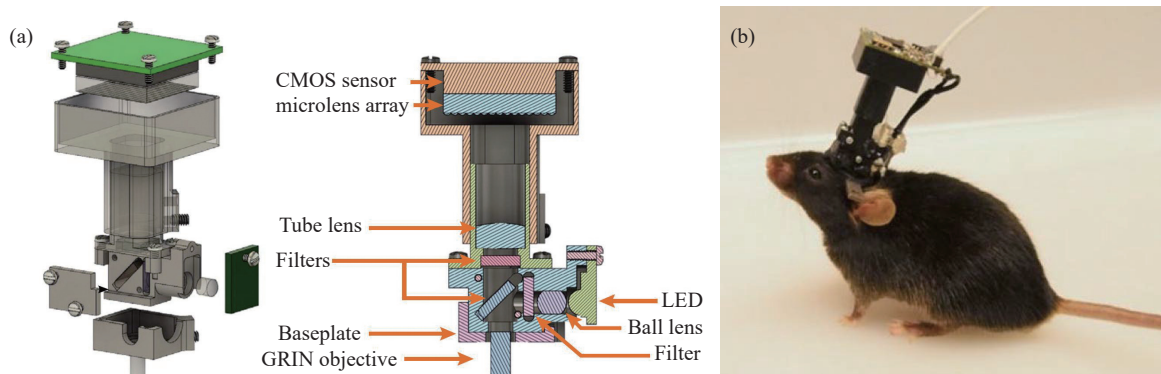
5.2 人工智能与光场成像技术的结合

人工智能作为近年来兴起的一种“数据驱动”技术,在光学成像领域受到越来越多的关注,并在近几年取得了丰硕的成果。它颠覆了传统计算成像的“物理模型驱动”方式,并开启了基于“数据驱动”的新范式^[159]。对比传统方法的正则化函数或指定先验,深度学习所学习到的先验信息是针对真实实验数据的统计量身定制的,这原则上为求解反问题提供了更强、更合理的正则化。因此其绕过了求解非线性病态逆问题的障碍,可以直接建立输入与期望输出之间的

伪逆映射关系。大量已发表的文献结果表明,基于深度学习的光场超分辨率成像技术能够在极小的数据量需求下,提供显著优于基于先验或物理模型的传统的光场超分辨率方法的性能^[132,160-166]。但信息并不会“无中生有”,深度学习所获得的结果不可能总是准确可靠的。深度学习的成功通常取决于从训练样本中学习和提取的“共同”特征作为先验信息。因此当面对“罕见样本”时,神经网络是无法保证其结果的准确性的。

5.3 小型化和便携式光场成像设备

光场成像系统的笨重性很大程度上限制了其应用的潜力,因此,实现系统的小型化和便携化成为了研究者们的重要目标。SKOCEK 等^[167]结合了头戴式 Miniscope 技术和光场显微技术研制出 MiniLFM,结构如图 30(a)所示。头戴式模块轻便,成年小鼠可以携带,使得小鼠能够在实验场中自由移动。通过比较小鼠在不同条件下的行为(无设备、佩戴 Miniscope、佩戴 MiniLFM),发现设备重量对小鼠的敏捷性没有显著影响。这项研究的成果为神经科学研究提供了一个强大的工具,可以用于研究自由移动动物的复杂行为背后的神经活动,同时保持了成像的高分辨率和深度穿透能力。XUE 等^[168]研究提出了一种计算微型显微镜(Computational Miniature Mesoscope, CM²),采用紧凑轻便的设计,集成了微透镜阵列和发光二极管阵列,分别用于成像和激发。其增强的成像能力得益于计算成像技术,该技术通过算法优化光学性能。



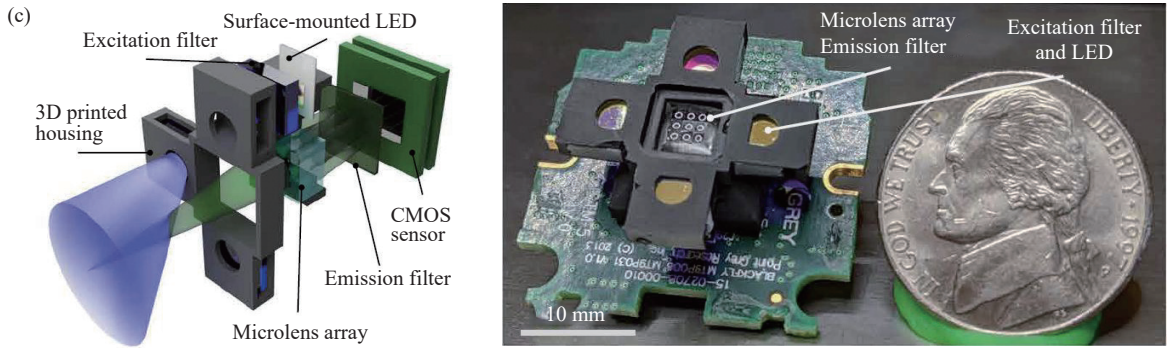


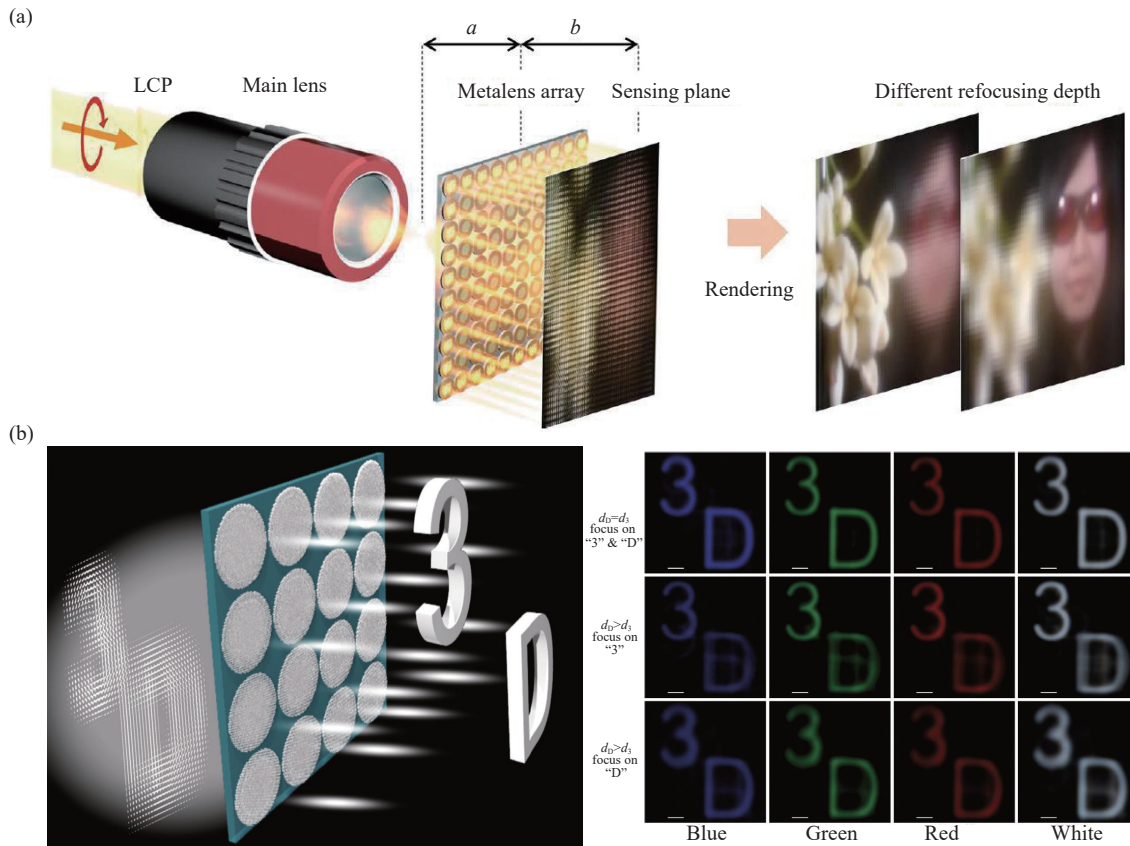
图 30 小型化光场成像设备。(a) 头戴式微型光场显微镜 (MiniLFM)。MiniLFM 的爆炸图 (左侧) 和剖面图 (右侧)。为了清晰展示, 某些部件已以透明方式呈现; (b) 一只佩戴头戴式 MiniLFM 的小鼠的照片^[167]; (c) 计算微型显微镜 CM² 结合了微透镜阵列和发光二极管激发阵列, 构成了一个紧凑轻便的平台^[168]

Fig.30 Compact light-field imaging device. (a) Head-mounted miniature light field microscope (MiniLFM). Explosion (left) and section (right) diagrams of MiniLFM. Some parts have been rendered transparently for visual clarity; (b) Photo of an adult mouse with a head-mounted MiniLFM^[167]; (c) The CM² combines an MLA optics and light-emitting diode (LED) array excitation in a compact and lightweight platform^[168]

5.4 新型光场调控机制

超表面 (metasurface) 由于其精巧紧凑的设计, 有望成为传统笨重且复杂体积光学设备的理想替代品。使用超透镜 (metalens) 成像不仅能够达到亚波长分辨率, 而且获得与商业物镜相当的成像质量^[169-170]。2019 年, JIE 等^[171] 提出基于超透镜的光场成像可以在

可见光范围内获取场景三维信息, 并且不受色差的影响, 如图 31(a) 所示。FAN 等^[172] 研制出了一种应用于可见光波段的超透镜阵列, 该阵列能够在白光条件下实现三维光学场景的高质量消色差集成成像重建, 如图 31(b) 所示。2022 年, HUA 等^[173] 提出了一种超紧凑的快照式光谱光场成像 (ultra-compact spectral light-



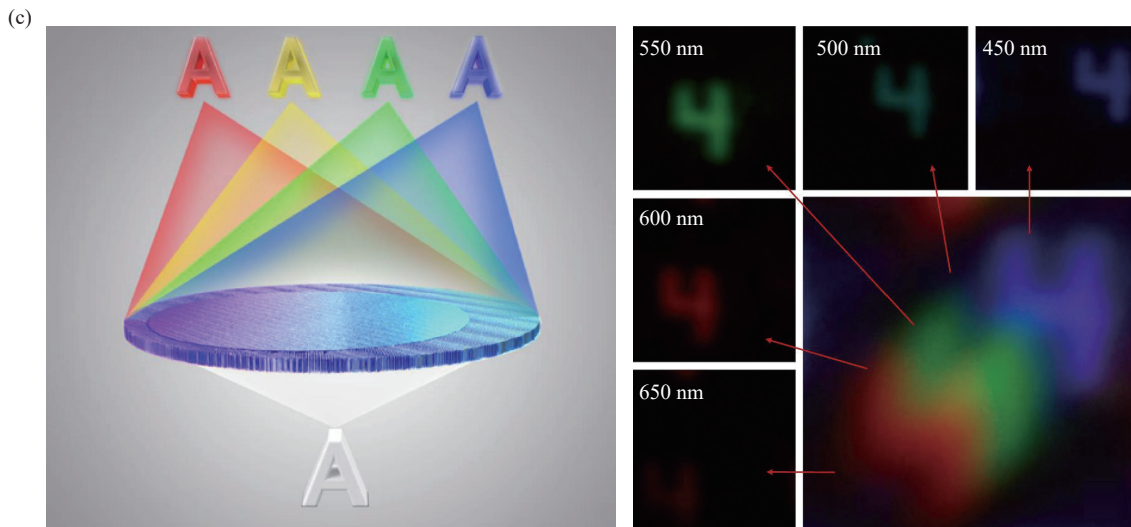


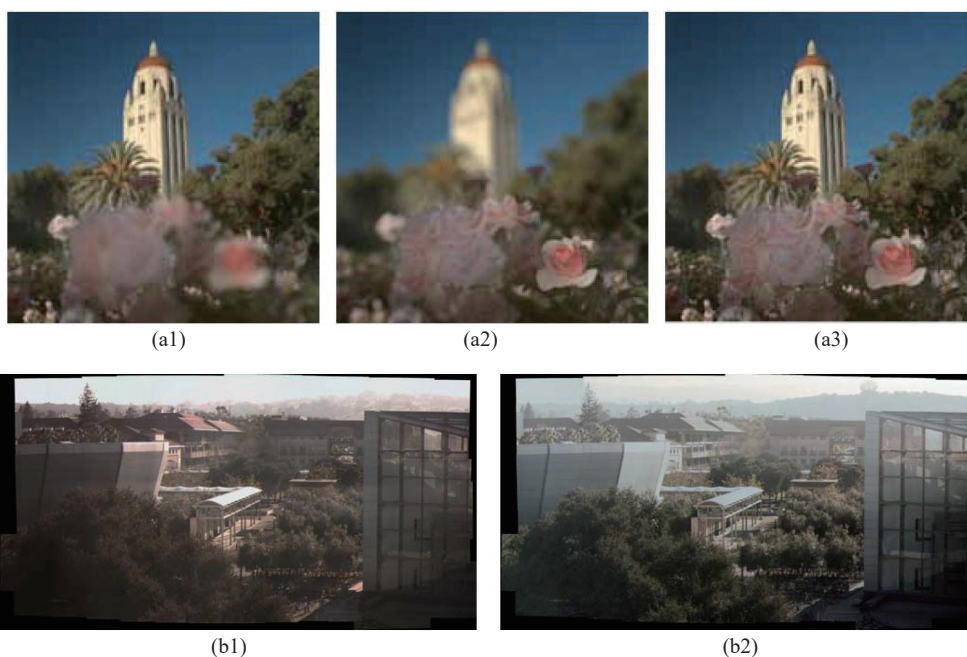
图 31 超透镜光场成像。(a) 使用超透镜阵列的光场成像的示意图和渲染图像^[171]；(b) 基于超透镜的集成成像^[172]；(c) 横向色散超透镜的示意图。使用 450~650 nm 的透光窗口的白光照射下，通过超透镜成像的字母“4”^[173]

Fig.31 Metalens array for light field imaging. (a) Schematic diagram of light-field imaging with metalens array and rendered images^[171]; (b) Schematic of integral imaging based on achromatic metalenses^[172]; (c) Schematic of the transversely dispersive metalens. Image of a letter “4” by the metalens with a white light illumination with a transmission window of 450–650 nm^[173]

field imaging, SLIM) 技术, 该技术能够通过单次拍摄记录场景的四维信息, 即三维空间信息加上一维光谱信息。这项技术利用了横向色散的超透镜阵列 (metalens-array) 和单色成像传感器, 实现了 4 nm 的光谱分辨率和接近衍射极限的空间分辨率, 如图 31(c) 所示。SLIM 的紧凑设计使其可以与集成光学系统 (如光子芯片或光纤) 集成, 为光学成像技术提供了新的可能性。

5.5 光场成像在特殊领域的应用

光场成像作为一种新型的高维度计算成像技术, 具有广阔的应用前景。在摄影成像领域, 光场相机可以对单次曝光后获得的图像进行数字重聚焦, 实现“先拍照、后聚焦”^[39], 并且在一定程度上克服了光圈与景深之间的矛盾 (见图 32(a))。通过紧凑地排列相机并设置它们的视野相互邻近或部分重叠, 构建了一个能够输出高分辨率视频的相机系统^[90]。采用这种



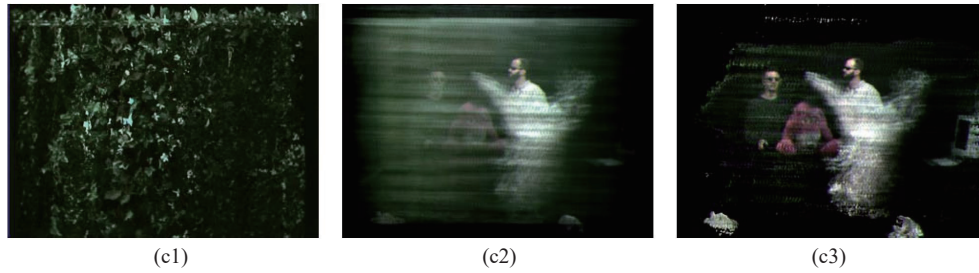


图 32 光场成像在计算摄影的应用。(a1)~(a2) 光场重聚焦与 (a3) 景深延拓技术^[39]; 高动态范围全景摄像, (b1) 所有相机都设置为相同的曝光光度, 能看到阳光下的饱和区域和阴影中的暗区, (b2) 对每个相机设置单独曝光, 生成高动态范围图像^[90]; (c) 合成孔径成像, (c1) 单个相机摄影图像, (c2) 合成孔径聚焦于人群所在平面, (c3) 抑制每台相机中静态像素的贡献, 可以获得更生动的遮挡物背后场景视图^[90]

Fig.32 Light field imaging in computational photography. (a1)-(a2) Light field refocusing and (a3) extended depth-of field technique^[39]; High Dynamic Range panoramic videography, (b1) all cameras are set to the same exposure level, which allows for the observation of saturated areas in sunlight and dark regions in the shade, (b2) individual exposure settings for each camera to produce a high dynamic range image^[90]; (c) Synthetic Aperture Imaging, (c1) a sample image from a single camera, (c2) synthetic aperture focusing on the plane where the people are located, computed by aligning and averaging images from all cameras as described in the text, (c3) suppressing contributions from static pixels in each camera results in a more vivid view of the scene behind the occluder^[90]

布局方式, 结合图像拼接技术领域的现有方法, 能够对多个图像进行精确的配准和平滑的融合, 生成一幅统一的高分辨率图像。多相机系统的优势在于能够对每台相机进行独立的曝光测量, 这使得在保证每个相机狭窄视野内的动态范围足够小的情况下, 能够捕获比单台相机记录的更宽广的动态范围场景。对于局部动态范围超出传感器性能的场景, 可以通过增加相机视野的重叠比例, 以牺牲一定的分辨率为代价, 换取更大的动态范围, 确保每个观察角度都能被多台设置有不同曝光参数的相机所捕捉。图 32(b) 展示了通过利用相机视野的重叠, 对每个点采用不同的曝光时间进行成像, 可以获得更优质的图像。在航天光电测量领域, 光场成像原理还可以实现非合作目标测距, 不依赖目标表面几何特征的光标信息, 在军事上

具有重要的应用价值。光场成像的另一大优势在于可以实现多视角图像的合成孔径。不同于光场渲染理论, 合成孔径成像技术能够实现动态光场“再参量化”^[88]。相机阵列整体可看作一个大孔径的“虚拟相机”, 当合成孔径相比于目标前的障碍物具有较大的空间尺寸时, 在像面上可以虚化障碍物从而探测到目标物体。斯坦福大学还设计出动态实时聚焦的合成孔径系统^[90,174], 通过计算得到遮挡物后的目标信息(见 图 32(c))。该穿透遮障的“透视”特性展示了光场合成孔径技术在监控安防、监视侦察领域的重要潜在应用前景。

BRADY 等^[175] 开发了 AWARE-2 相机阵列, 能够实现动态十亿像素成像, 设计结构和成像结果如图 33 所示。AWARE-2 通过使用微相机阵列来克服

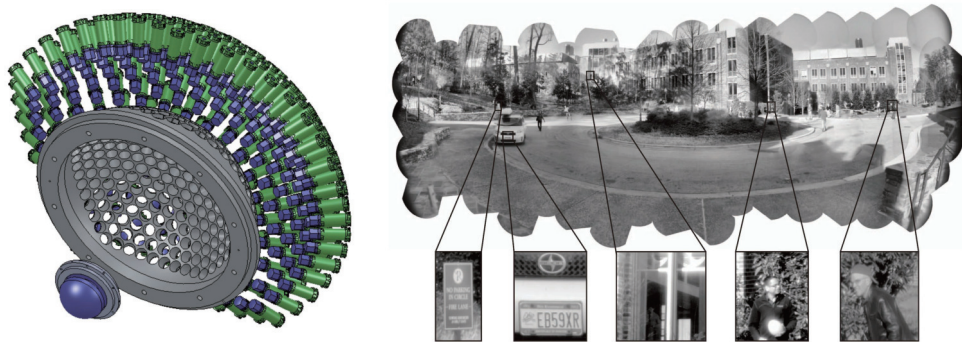


图 33 AWARE-2 相机阵列结构及其成像结果^[175]

Fig.33 The AWARE-2 camera array and its imaging results^[175]

传统相机在高像素成像方面的限制,如几何畸变、成本复杂性以及图像处理的挑战。该相机设计为单中心、多尺度,能够独立控制每个微相机的焦点、增益和曝光,提供了高动态范围成像的能力。此外,AWARE-2 的设计理念允许其扩展至更高的像素计数,同时使用低成本的塑料光学元件来实现紧凑、轻量化的设计。AWARE-2 相机在宽场成像、事件捕捉、持续监控和空间感知等多个领域具有潜在的应用价值,并预示着未来高分辨率、便携式亿像素摄影技术的发展方向。

5.6 光场成像与光场显示技术的结合

光场成像技术在实现广泛应用方面遭遇的一个关键挑战是现有显示技术的局限性。目前,主流的显

示设备大多基于二维平面,这限制了光场渲染的实现,因为光场渲染需要在空间中精确地重现光线的分布,以提供深度感知和立体视觉效果。光场显示技术通过模拟光线在三维空间中的自然传播,为观众提供了更为真实的深度感知和立体视觉体验^[176-178]。光场显示技术同样面临着空间带宽积的限制,这要求我们必须精确地控制光线的角度和方向,以实现高质量的立体显示效果。因此,光场成像技术与光场显示技术的未来进步将会是相互促进的。随着科研人员在这一领域的不懈努力,期待未来能够实现更加自然、真实的三维乃至更高维度的视觉呈现。图 34 展示了光场采集和光场显示的原理,以及光场显示设备。

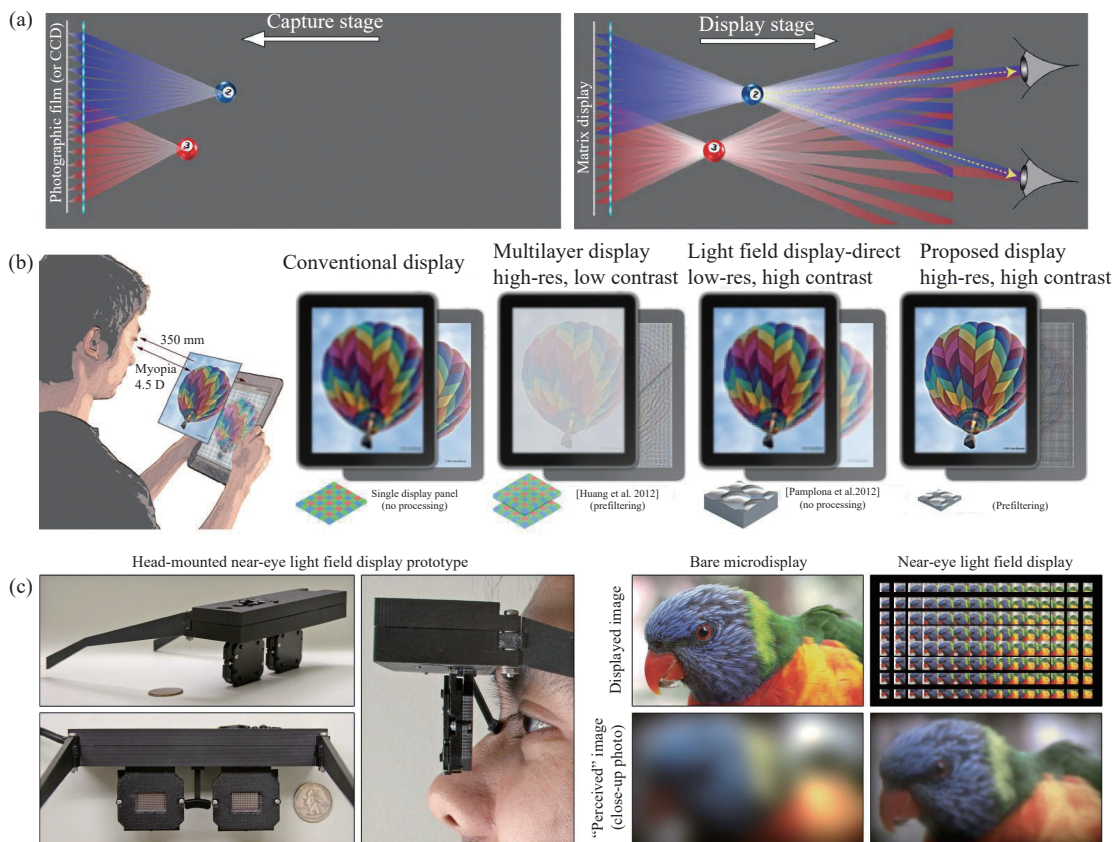


图 34 光场显示原理及设备。(a) 光场采集以及光场显示原理^[179]; (b) 无需眼镜的显示技术^[180]; (c) 近眼光场显示技术^[181]

Fig.34 Principles and devices of light field display. (a) The principle of light field capture and display^[179]; (b) Eyeglasses-free display technology^[180]; (c) Near-eye light field display technology^[181]

该综述深入探讨了光场成像技术的发展现状和面临的挑战。光场成像技术仍然使用现有的二维传感器器件,目前的传感器仅存在空间分辨率,因此需

要通过空间分辨率的牺牲以置换角度分辨率。为了提高光场成像技术的空间分辨率,一方面可以通过提升硬件来实现,如增加传感器的像素分辨率,以及通

过排布大规模相机阵列来实现。另一方面,可以通过使用时间分辨率来提升空间采样,如使用孔径编码技术以及通过多帧扫描的方式来增加空间分辨率。然而,直接提升硬件资源会引致成本的增加,以及可能的体积、重量和数据传输处理等问题。因此,如果不想通过物理增加硬件的方式来提升性能,就需要依靠算法上的创新,例如利用先验信息和深度学习来优化成像结果。这种方法被称为“以小博大”,意味着在不增加物理资源的情况下,通过算法来实现性能的提升。然而,人们也认识到,光场成像技术的发展仍然面临多方面的挑战。为了实现更广泛的应用,未来的研究需要在算法创新、硬件优化以及成本效益之间找到更好的平衡点。总之,光场成像技术的未来是充满希望的,它将继续作为生物医学成像、材料科学和工业检测等领域的重要工具。通过跨学科的合作和创新思维,相信可以实现更高效、更精确的成像技术,为科学研究和实际应用开辟新的视野。

参考文献:

- [1] LEVOY M. Light fields and computational imaging [J]. *Computer*, 2006, 39(8): 46-55.
- [2] BRADY D J. Optical Imaging and Spectroscopy[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] WETZSTEIN G, IHRKE I, LANMAN D, et al. Computational plenoptic imaging[C]//Computer Graphics Forum, 2011, 30(8): 2397-2426.
- [4] ZHOU C, NAYAR S K. Computational cameras: convergence of optics and processing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3322-3340.
- [5] IHRKE I, RESTREPO J, MIGNARD-DEBISE L. Principles of light field imaging: briefly revisiting 25 years of research [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(5): 59-69.
- [6] WU G, MASIA B, JARABO A, et al. Light field image processing: an overview [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(7): 926-954.
- [7] ZUO Chao, CHEN Qian. Computational optical imaging: an overview [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20220110. (in Chinese)
- [8] ZUO Chao, CHEN Qian. Resolution, super-resolution and spatial bandwidth product expansion——some thoughts from the perspective of computational optical imaging [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(6): 1105-1166. (in Chinese)
- [9] ZHANG Runnan, CAI Zewei, SUN Jiasong, et al. Optical-Field coherence measurement and its applications in computational imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811003. (in Chinese)
- [10] FANG Lu, DAI Qionghai. Computational light field imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111001. (in Chinese)
- [11] IVES F E. Parallax stereogram and process of making same: US, 725567 [P]. 1903-04-14.
- [12] LIPPMANN G. La photographie integrale [J]. *Comptes-Rendus*, 1908, 146: 446-451.
- [13] GERSHUN A. The light field [J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1939, 18(1-4): 51-151.
- [14] OKOSHI T. Optimum design and depth resolution of lens-sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(10): 2284-2291.
- [15] DUDNIKOV Y A. Autostereoscopy and integral photography [J]. *Optical Technology*, 1970, 37(7): 422-426.
- [16] DUDLEY L. Methods of integral photography: US, 675553[P]. 1972-07-11.
- [17] DE MONTEBELLO R L. Wide-angle integral photography-the integram system[C]//Three-Dimensional Imaging, 1977, 120: 73-91.
- [18] ADELSON E H, BERGEN J R. The Plenoptic Function and The Elements of Early Vision[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [19] LI Yaning, WANG Xue, ZHOU Guoqing, et al. Overview of 4D light field representation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811012. (in Chinese)
- [20] YIN Yongkai, YU Kai, YU Chunzhan, et al. 3D imaging using geometric light field: a review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1209001. (in Chinese)
- [21] MCMILLAN L, BISHOP G. Plenoptic modeling: an image-based rendering system[C]//Proceedings of the 22nd annual conference on computer graphics and interactive techniques, 1995: 39-46.
- [22] LEVOY M, HANRAHAN P. Light field rendering[C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996: 31-42.
- [23] GORTLER S J, GRZESZCZUK R, SZELISKI R, et al. The lumigraph[C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996: 43-54.
- [24] TESTORF M, HENNELLY B, OJEDA-CASTANEDA J. Phase-Space Optics: Fundamentals and Applications[M]. New York: McGraw Hill, 2009.
- [25] WIGNER E. On the quantum correction for thermodynamic

- equilibrium [J]. *Physical Review*, 1932, 40(5): 749-759.
- [26] DOLIN L. Beam description of weakly-inhomogeneous wave fields [J]. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenii*, 1964, 7: 559-563.
- [27] WALTHER A. Radiometry and coherence [J]. *JOSA*, 1968, 58(9): 1256-1259.
- [28] WALTHER A. Radiometry and coherence [J]. *JOSA*, 1973, 63(12): 1622-1623.
- [29] WALTHER A. Propagation of the generalized radiance through lenses [J]. *JOSA*, 1978, 68(11): 1606-1610.
- [30] BASTIAANS M J. A Frequency-domain treatment of partial coherence [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1977, 24(3): 261-274.
- [31] BASTIAANS M J. The Wigner distribution function applied to optical signals and systems [J]. *Optics Communications*, 1978, 25(1): 26-30.
- [32] BASTIAANS M J. The Wigner distribution function and Hamilton's characteristics of a geometric-optical system [J]. *Optics Communications*, 1979, 30(3): 321-326.
- [33] BASTIAANS M. Transport equations for the Wigner distribution function [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1979, 26(10): 1265-1272.
- [34] BASTIAANS M J. Wigner distribution function and its application to first-order optics [J]. *JOSA*, 1979, 69(12): 1710-1716.
- [35] BASTIAANS M J. The wigner distribution function of partially coherent light [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1981, 28(9): 1215-1224.
- [36] BASTIAANS M J. Application of the Wigner distribution function to partially coherent light [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(8): 1227.
- [37] ZHANG Z, LEVOY M. Wigner distributions and how they relate to the light field[C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2009: 1-10.
- [38] BARTELT H, BRENNER K H, LOHMANN A. The Wigner distribution function and its optical production [J]. *Optics Communications*, 1980, 32(1): 32-38.
- [39] NG R, LEVOY M, BREDIF M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[D]. California: Stanford University, 2005.
- [40] LUKOSZ W. Optical systems with resolving powers exceeding the classical limit* [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(11): 1463.
- [41] LUKOSZ W. Optical systems with resolving powers exceeding the classical limit. II [J]. *JOSA*, 1967, 57(7): 932-941.
- [42] ADELSON E H, BERGEN J R. The Plenoptic function and the elements of early vision[J]. *Computational Models of Visual Processing*, 1991: 18.
- [43] 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.
- [44] MOON P, SPENCER D E. The Photic Field[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [45] 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.
- [46] OH S B, KASHYAP S, GARG R, et al. Rendering wave effects with augmented light field [J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 507-516.
- [47] CAMAHORT E, LERIOS A, FUSSELL D. Uniformly sampled light fields[C]//Eurographics Workshop on Rendering Techniques, 1998: 117-130.
- [48] LEVIN A, FREEMAN W T, DURAND F. Understanding camera trade-offs through a bayesian analysis of light field projections[C]//Computer Vision—ECCV, 2008: 88-101.
- [49] NG R, HANRAHAN P M. Digital correction of lens aberrations in light field photography[C]//International Optical Design Conference, 2006: WB2.
- [50] WEI L Y, LIANG C K, MYHRE G, et al. Improving light field camera sample design with irregularity and aberration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(4): 152: 11.
- [51] JI N, MILKIE D E, BETZIG E. Adaptive optics via pupil segmentation for high-resolution imaging in biological tissues [J]. *Nature Methods*, 2010, 7(2): 141-147.
- [52] WU J, GUO Y, DENG C, et al. An integrated imaging sensor for aberration-corrected 3D photography[J]. *Nature*, 2022: 1-10.
- [53] BOLLES R C, BAKER H H, MARIMONT D H. Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(1): 7-55.
- [54] FORSYTH D A, PONCE J. Computer Vision: A Modern Approach[M]. Hoboken: Prentice Hall, 2002.
- [55] CHEN S E. Quicktime VR: An image-based approach to virtual environment navigation[C]//Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995: 29-38.
- [56] CHAI J X, TONG X, CHAN S C, et al. Plenoptic sampling[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2000: 307-318.

- [57] ISAKSEN A, MCMILLAN L, GORTLER S J. Dynamically reparameterized light fields[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2000: 297-306.
- [58] ZITNICK C L, KANG S B, UYTENDAELE M, et al. High-quality video view interpolation using a layered representation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 600-608.
- [59] CAO X, LIU Y, JI X, et al. Vision field capture for advanced 3DTV applications[C]//Visual Communications and Image Processing (VCIP), 2011: 1-4.
- [60] JONES A, MCDOWALL I, YAMADA H, et al. Rendering for an interactive 360° light field display[C]//ACM SIGGRAPH, 2007: 40
- [61] BROXTON M, FLYNN J, OVERBECK R, et al. Immersive light field video with a layered mesh representation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): 1-86.
- [62] LEVOY M. Volume Rendering Using The Fourier Projection-slice Theorem[M]. California: Stanford University, 1992.
- [63] DEANS S R. The Radon Transform and Some of Its Applications[M]. North Chelmsford: Courier Corporation, 2007.
- [64] MALZBENDER T. Fourier volume rendering [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1993, 12(3): 233-250.
- [65] BRACEWELL R N. Strip integration in radio astronomy [J]. *Australian Journal of Physics*, 1956, 9(2): 198-217.
- [66] MACOVSKI A. Medical imaging systems[J]. *Prentice Hall*, 1983.
- [67] REN Ng. Fourier slice photography[C]//ACM Siggraph, 2005: 735-744.
- [68] BUZUG T M. Computed tomography[C]//Springer Handbook of Medical Technology, 2011: 311-342.
- [69] LIU Y, ZHANG R, FENG S, et al. Consistency analysis of focal stack-based light field reconstruction [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 165: 107539.
- [70] LEVIN A, HASINOFF S W, GREEN P. 4D frequency analysis of computational cameras for depth of field extension [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 14.
- [71] DANSEREAU D G, PIZARRO O, WILLIAMS S B. Linear volumetric focus for light field cameras[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(2): 15: 1-15: 20.
- [72] LEVOY M, NG R, ADAMS A, et al. Light field microscopy[C]// ACM SIGGRAPH, 2006: 924-934.
- [73] BROXTON M, GROSENICK L, YANG S, et al. Wave optics theory and 3-D deconvolution for the light field microscope [J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25418.
- [74] 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.
- [75] HE K, WANG X, WANG Z W, et al. Snapshot multifocal light field microscopy [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12108-12120.
- [76] CONG L, WANG Z, CHAI Y, et al. Rapid whole brain imaging of neural activity in freely behaving larval zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *eLife*, 2017, 6: e28158.
- [77] NÖBAUER T, SKOCEK O, PERNIA-ANDRADE A J, et al. Video rate volumetric Ca²⁺ imaging across cortex using seeded iterative demixing (SID) microscopy [J]. *Nature Methods*, 2017, 14(8): 811-818.
- [78] HUA X, HAN K, MANDRACCHIA B, et al. Light-field flow cytometry for high-resolution, volumetric and multiparametric 3D single-cell analysis [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1975.
- [79] GUO R, YANG Q, CHANG A S, et al. EventLFM: Event camera integrated Fourier light field microscopy for ultrafast 3D imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 144.
- [80] ANTIPA N, NECULA S, NG R, et al. Single-shot diffuser-encoded light field imaging[C]//IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2016: 1-11.
- [81] ANTIPA N, KUO G, HECKEL R, et al. DiffuserCam: Lensless single-exposure 3D imaging [J]. *Optica*, 2018, 5(1): 1.
- [82] 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.
- [83] YANNY K, ANTIPA N, LIBERTI W, et al. Miniscope3D: optimized single-shot miniature 3D fluorescence microscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 171.
- [84] 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): 14.
- [85] VEERARAGHAVAN A, AGRAWAL A, RASKAR R, et al. Non-refractive modulators for encoding and capturing scene appearance and depth[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [86] LI Sheng, WANG Bowen, GUAN Haitao, et al. Far-field computational optical imaging techniques based on synthetic aperture: a review [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(10): 230090. (in Chinese)

- [87] WILBURN B S, SMULSKI M, LEE H H K, et al. Light field video camera[C]//Media Processors, 2001: 29-36.
- [88] YANG J C, EVERETT M, BUEHLER C, et al. A real-time distributed light field camera [C]//Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering, 2002: 77-86.
- [89] ZHANG C, CHEN T. A self-reconfigurable camera array[C]//ACM SIGGRAPH, 2004: 151.
- [90] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, et al. High performance imaging using large camera arrays[C]//ACM SIGGRAPH, 2005: 765-776.
- [91] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, et al. High-speed videography using a dense camera array[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004: 1315176.
- [92] LIN X, WU J, ZHENG G, et al. Camera array based light field microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(9): 3179-3189.
- [93] GEORGIEV T G, ZHENG K C, CURLESS B, et al. Spatio-angular resolution tradeoffs in integral photography [C]//Proceedings of the 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2006: 263-272.
- [94] VENKATARAMAN K, LELESCU D, DUPARRÉ J, et al. PiCam: an ultra-thin high performance monolithic camera array[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(6): 166: 1-166: 13.
- [95] BISHOP T E, ZANETTI S, FAVARO P. Light field superresolution[C]//IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2009: 1-9.
- [96] BISHOP T E, FAVARO P. The light field camera: extended depth of field, aliasing, and superresolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(5): 972-986.
- [97] COHEN N, YANG S, ANDALMAN A, et al. Enhancing the performance of the light field microscope using wavefront coding [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24817-24839.
- [98] LI H, GUO C, KIM-HOLZAPFEL D, et al. Fast, volumetric live-cell imaging using high-resolution light-field microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(1): 29.
- [99] GUO C, LIU W, HUA X, et al. Fourier light-field microscopy [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25573.
- [100] LU Z, WU J, QIAO H, et al. Phase-space deconvolution for light field microscopy [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18131-18145.
- [101] ZHENG G, HORSTMAYER R, YANG C. Wide-field, high-resolution Fourier Ptychographic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 739-745.
- [102] ZHENG G, SHEN C, JIANG S, et al. Concept, implementations and applications of Fourier Ptychography [J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(3): 207-223.
- [103] ZUO C, SUN J, LI J, et al. Wide-field high-resolution 3D microscopy with Fourier Ptychographic diffraction tomography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106003.
- [104] TIAN L, LI X, RAMCHANDRAN K, et al. Multiplexed coded illumination for Fourier Ptychography with an LED array microscope [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(7): 2376-2389.
- [105] ZHOU N, SUN J, ZHANG R, et al. Quasi-Isotropic high-resolution Fourier Ptychographic diffraction tomography with opposite illuminations [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(8): 2461-2466.
- [106] SUN J, ZUO C, ZHANG J, et al. High-speed Fourier Ptychographic microscopy based on programmable annular illuminations [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 7669.
- [107] ZHOU N, ZHANG R, XU W, et al. High-Speed high-resolution transport of intensity diffraction tomography with bi-plane parallel detection[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024: 2400387.
- [108] MARWAH K, WETZSTEIN G, BANDO Y, et al. Compressive light field photography using overcomplete dictionaries and optimized projections[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 46: 1-12.
- [109] PÉGARD N C, LIU H Y, ANTIPA N, et al. Compressive light-field microscopy for 3D neural activity recording [J]. *Optica*, 2016, 3(5): 517.
- [110] YOON Y G, WANG Z, PAK N, et al. Sparse decomposition light-field microscopy for high speed imaging of neuronal activity [J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1457-1468.
- [111] LEVIN A, FERGUS R, DURAND F, et al. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 70.
- [112] ZHOU C, LIN S, NAYAR S K. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2011, 93(1): 53-72.
- [113] LIANG C K, LIN T H, WONG B Y, et al. Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition[C]//ACM SIGGRAPH, 2008, 55: 1-10.
- [114] ZHOU C, LIN S, NAYAR S. Coded aperture pairs for depth from defocus[C]//IEEE 12th International Conference on Computer Vision, 2009: 325-332.
- [115] ZUO C, SUN J, FENG S, et al. Programmable aperture

- microscopy: a computational method for multi-modal phase contrast and light field imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 80: 24-31.
- [116] LIU H Y, ZHONG J, WALLER L. Multiplexed phase-space imaging for 3D fluorescence microscopy [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14986.
- [117] KAUVAR I, CHANG J, WETZSTEIN G. Aperture interference and the volumetric resolution of light field fluorescence microscopy[C]//IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2017: 1-12.
- [118] CAI Z, ZHANG R, ZHOU N, et al. Programmable aperture light - field microscopy[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023: 2300217.
- [119] LEVIN A, DURAND F. Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1831-1838.
- [120] ZHANG R, ZHOU N, TANG H, et al. High - Speed multi - modal extended depth - of - field microscopy with an electrically tunable lens[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024: 2300770.
- [121] 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.
- [122] HARDIE R C, FRANZE K. Photomechanical responses in *drosophila* photoreceptors [J]. *Science*, 2012, 338(6104): 260-263.
- [123] LIM Y T, PARK J H, KWON K C, et al. Resolution-enhanced integral imaging microscopy that uses lens array shifting [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 19253.
- [124] LLAVADOR A, SÁNCHEZ-ORTIGA E, BARREIRO J C, et al. Resolution enhancement in integral microscopy by physical interpolation [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(8): 2854.
- [125] MUKATI M U, GUNTURK B K. Light field super resolution through controlled micro-shifts of light field sensor [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, 67: 71-78.
- [126] PARK M K, PARK H, JOO K I, et al. Fast-switching laterally virtual-moving microlens array for enhancing spatial resolution in light-field imaging system without degradation of angular sampling resolution [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11297.
- [127] ERDMANN L, GABRIEL K J. High-resolution digital integral photography by use of a scanning microlens array [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(31): 5592.
- [128] 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: S0092867421005328.
- [129] XIONG B, ZHU T, XIANG Y, et al. Mirror-enhanced scanning light-field microscopy for long-term high-speed 3D imaging with isotropic resolution[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 227.
- [130] ZHANG Y, WANG Y, WANG M, et al. Multi-focus light-field microscopy for high-speed large-volume imaging [J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 30.
- [131] LU Z, CAI Y, NIE Y, et al. A practical guide to scanning light-field microscopy with digital adaptive optics [J]. *Nature Protocols*, 2022, 17(9): 1953-1979.
- [132] LU Z, LIU Y, JIN M, et al. Virtual-scanning light-field microscopy for robust snapshot high-resolution volumetric imaging [J]. *Nature Methods*, 2023, 20(5): 735-746.
- [133] ZHAO Z, ZHOU Y, LIU B, et al. Two-photon synthetic aperture microscopy for minimally invasive fast 3D imaging of native subcellular behaviors in deep tissue[J]. *Cell*, 2023, 186(11): 2475-2491.
- [134] SAWHNEY H S, GUO Y, HANNA K, et al. Hybrid stereo camera: an IBR approach for synthesis of very high resolution stereoscopic image sequences[C]//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2001: 451-460.
- [135] FAVARO P. A split-sensor light field camera for extended depth of field and superresolution[C]//Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications II, 2012: 11-19.
- [136] BOOMINATHAN V, MITRA K, VEERARAGHAVAN A. Improving resolution and depth-of-field of light field cameras using a hybrid imaging system[C]// International Conference on Computational Photography (ICCP), 2014: 1-10.
- [137] WANG X, LI L, HOU G. High-resolution light field reconstruction using a hybrid imaging system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2580.
- [138] LU C H, MUENZEL S, FLEISCHER J W. High-resolution light-field microscopy[C]//Imaging and Applied Optics, 2013: CTh3B. 2.
- [139] LU C H, MUENZEL S, FLEISCHER J W. High-resolution light-field imaging via phase space retrieval [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A142.
- [140] ZHANG Z, BAI L, CONG L, et al. Imaging volumetric dynamics at high speed in mouse and zebrafish brain with confocal light field microscopy [J]. *Nature Biotechnology*, 2021, 39(1): 74-83.

- [141] LU Z, ZUO S, SHI M, et al. Long-term intravital subcellular imaging with confocal scanning light-field microscopy[J]. *Nature Biotechnology*, 2024: 1-12.
- [142] PARK J H, LEE S K, JO N Y, et al. Light ray field capture using focal plane sweeping and its optical reconstruction using 3D displays [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25444.
- [143] CHEN N, REN Z, LAM E Y. High-resolution Fourier hologram synthesis from photographic images through computing the light field [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1751-1756.
- [144] LIU C, QIU J, JIANG M. Light field reconstruction from projection modeling of focal stack [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11377.
- [145] YIN X, WANG G, LI W, et al. Iteratively reconstructing 4D light fields from focal stacks [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8457.
- [146] CHEN N, ZUO C, LAM E, et al. 3D imaging based on depth measurement technologies [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3711.
- [147] CHEN Ni, ZUO Chao, BYOUNGHO Lee. 3D imaging based on depth measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603013. (in Chinese)
- [148] ZUO C, CHEN Q, TIAN L, et al. Transport of intensity phase retrieval and computational imaging for partially coherent fields: the phase space perspective [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 71: 20-32.
- [149] ORTH A, CROZIER K B. Light field moment imaging [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2666.
- [150] ZUO C, CHEN Q, ASUNDI A. Light field moment imaging: comment [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 654.
- [151] LIU J, XU T, YUE W, et al. Light-field moment microscopy with noise reduction [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29154.
- [152] WANNER S, GOLDLUECKE B. Spatial and angular variational super-resolution of 4D light fields[C]//Computer vision – ECCV, 2012: 608-621.
- [153] WANNER S, GOLDLUECKE B. Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(3): 606-619.
- [154] ZHANG Z, LIU Y, DAI Q. Light field from micro-baseline image pair[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015: 3800-3809.
- [155] PENNER E, ZHANG L. Soft 3D reconstruction for view synthesis[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 235: 1-11.
- [156] SHI L, HASSANIEH H, DAVIS A, et al. Light field reconstruction using sparsity in the continuous Fourier domain[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2015, 34(1): 12: 1-12: 13.
- [157] VAGHARSHAKYAN S, BREGOVIC R, GOTCHEV A. Light field reconstruction using shearlet transform [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018, 40(1): 133-147.
- [158] VAGHARSHAKYAN S, BREGOVIC R, GOTCHEV A. Accelerated shearlet-domain light field reconstruction [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(7): 1082-1091.
- [159] ZUO C, QIAN J, FENG S, et al. Deep learning in optical metrology: a review[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 39.
- [160] WANG Z, ZHU L, ZHANG H, et al. Real-time volumetric reconstruction of biological dynamics with light-field microscopy and deep learning [J]. *Nature Methods*, 2021, 18(5): 551-556.
- [161] WAGNER N, BEUTTENMUELLER F, NORLIN N, et al. Deep learning-enhanced light-field imaging with continuous validation [J]. *Nature Methods*, 2021, 18(5): 557-563.
- [162] VIZCAINO J P, SALTARIN F, BELYAEV Y, et al. Learning to reconstruct confocal microscopy stacks from single light field images [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2021, 7: 775-788.
- [163] WANG Y, WANG L, YANG J, et al. Spatial-Angular interaction for light field image super-resolution[C]//Computer Vision–ECCV, 2020: 290-308.
- [164] WU G, ZHAO M, WANG L, et al. Light field reconstruction using deep convolutional network on EPI[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017: 1638-1646.
- [165] YEUNG H W F, HOU J, CHEN J, et al. Fast light field reconstruction with deep coarse-to-fine modeling of spatial-angular clues[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 137-152.
- [166] YOON Y, JEON H G, YOO D, et al. Learning a deep convolutional network for light-field image super-resolution[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops, 2015: 24-32.
- [167] SKOCEK O, NöBAUER T, WEILGUNY L, et al. High-speed volumetric imaging of neuronal activity in freely moving rodents [J]. *Nature Methods*, 2018, 15(6): 429-432.
- [168] XUE Y, DAVISON I G, BOAS D A, et al. Single-shot 3D wide-field fluorescence imaging with a computational

- miniature mesoscope [J]. *Science Advances*, 2020, 6(43): eabb7508.
- [169] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [170] PAN M, FU Y, ZHENG M, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 195.
- [171] LIN R J, SU V C, WANG S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [172] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 67.
- [173] HUA X, WANG Y, WANG S, et al. Ultra-compact snapshot spectral light-field imaging [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2732.
- [174] VAISH V, GARG G, TALVALA E, et al. Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)-Workshops, 2005: 129-139.
- [175] BRADY D J, GEHM M E, STACK R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386-389.
- [176] MA Q, CAO L, HE Z, et al. Progress of three-dimensional light-field display [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111001.
- [177] MARTÍNEZ-CORRAL M, JAVIDI B. Fundamentals of 3D imaging and displays: a tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(3): 512-566.
- [178] YAMAGUCHI M. Light-field and holographic three-dimensional displays [Invited] [J]. *JOSA A*, 2016, 33(12): 2348-2364.
- [179] MARTINEZ-CORRAL M, DORADO A, BARREIRO J C, et al. Recent advances in the capture and display of macroscopic and microscopic 3-D scenes by integral imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(5): 825-836.
- [180] HUANG F C, WETZSTEIN G, BARSKY B A, et al. Eyeglasses-free display: towards correcting visual aberrations with computational light field displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 1-12.
- [181] LANMAN D, LUEBKE D. Near-eye light field displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(6): 1-10.

Light field representation and its resolution improvement techniques: an overview (*invited*)

ZHANG Runnan^{1,2,3}, ZHOU Ning^{1,2,3}, ZHOU Zihao^{1,2,3}, DU Heheng^{1,2,3}, CHEN Qian^{2*}, ZUO Chao^{1,2,3*}

(1. Smart Computational Imaging Laboratory (SCILab), School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, Nanjing 210094, China;

3. Smart Computational Imaging Research Institute (SCIRI), Nanjing 210019, China)

Abstract:

Significance Since Gauss's Day, the design and development of imaging systems have been continuously dedicated to the iterative improvement and optimization of lenses, aiming to collect light emitted in various directions from a point on the object plane and converge it as perfectly as possible onto a point on the image plane. However, imaging sensors can only capture and record the spatial position information of the light field, losing the angular information, which causes them to completely lose the ability to perceive perspective transformation and depth of a three-dimensional scene. To compensate for this deficiency, computational light field imaging technology was born, which can record the complete distribution of the radiance, and jointly recording spatial position and angle information, breaking through the limitations of classical imaging. It is

gradually being applied to fields such as life sciences, national defense security, virtual reality/augmented reality, and environmental monitoring, with important academic research value and broad application potential. However, light field imaging technology is still jointly constrained by digital imaging devices and image sensors. The limited spatial bandwidth product (SBP) of the imaging system makes light field imaging often have to make trade-offs between spatial resolution and angular resolution in practical applications, making it difficult to achieve the high spatial resolution of traditional imaging technology. Since the birth of light field imaging technique, how to endow it with higher degrees of freedom, that is, to maintain high-resolution imaging while improving temporal resolution and angular resolution, in order to achieve clearer and more stereoscopic imaging performance, is a key problem that light field imaging technology urgently needs to solve, and has always been a hot topic in this field.

Progress We first reviews the development history of light field imaging technology, and elaborates in detail on the basic concepts of the seven-dimensional full light field function and the simplified four-dimensional light field. Subsequently, the paper delves into the latest research progress of light field imaging technology in enhancing temporal, spatial, and angular resolution, including the application of microlens arrays, phase scattering plates, heterodyne coding, camera arrays, and other methods in the recording of high-speed dynamic three-dimensional scenes; the achievements of techniques such as transfer function deconvolution, prior information constraints, multi-frame scanning, aperture coding, confocal, and hybrid high/low light field imaging in improving spatial resolution; and methods for enhancing angular resolution through depth constraints, sparse prior constraints, and other approaches. In addition, the article also looks forward to the future development directions of light field imaging technology, including the control of high-dimensional coherence in light fields, the integration of artificial intelligence with light field imaging technology, the development of miniaturized and portable light field imaging devices, new imaging mechanisms, and the prospects for the combination of light field imaging and light field display technology, as well as the potential of light field imaging in special fields. Finally, the paper emphasizes the challenges of light field imaging technology in achieving optimal imaging performance, especially the importance of finding an efficient balance among the three key dimensions of temporal, spatial, and angular resolution. With the continuous progress and innovation of technology, light field imaging technology is expected to further break through the limitations of traditional optical imaging, inject new momentum into the advancement of imaging technology, and open up new application prospects in various fields such as life sciences, remote sensing, computational photography, and spectral imaging.

Conclusions and Prospects This review delves into the current state of development and challenges faced by light field imaging technology. Light field imaging still utilizes existing two-dimensional sensor devices, which currently possess only spatial resolution, thus necessitating a trade-off between spatial and angular resolution to achieve the latter. To enhance the spatial resolution of light field imaging, one approach is to improve hardware, such as increasing the pixel resolution of sensors and arranging large-scale camera arrays. On the other hand, temporal resolution can be used to enhance spatial sampling, for instance, by employing aperture coding techniques and multi-frame scanning methods to increase spatial resolution. However, directly upgrading hardware resources can lead to increased costs, as well as potential issues with size, weight, and data transmission processing. Therefore, if one does not wish to enhance performance by physically adding hardware, it is necessary to rely on algorithmic innovation, such as optimizing imaging results using prior information and deep learning. This method is referred to as "punching above one's weight," meaning that performance is improved through algorithms without increasing physical resources. However, we also recognize that the development of light field imaging technology still faces challenges on multiple fronts. To achieve broader applications, future research needs to find a better balance between algorithmic innovation, hardware optimization, and cost-effectiveness. In

summary, the future of light field imaging technology is promising, and it will continue to serve as an important tool in fields such as biomedical imaging, materials science, and industrial inspection. Through interdisciplinary collaboration and innovative thinking, we believe that more efficient and accurate imaging technologies can be realized, opening up new horizons for scientific research and practical applications.

Key words: light field imaging; computational imaging; superresolution imaging; microscopy imaging

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62105151, 62175109, U21B2033, 62227818, 62361136588); National Key Research and Development Program of China (2022YFA1205002, 2024YFE0101300); Leading Technology of Jiangsu Basic Research Plan (BK20192003); Youth Foundation of Jiangsu Province (BK20210338); Biomedical Competition Foundation of Jiangsu Province (BE2022847); Key National Industrial Technology Cooperation Foundation of Jiangsu Province (BZ2022039); Fundamental Research Funds for the Central Universities (30920032101, 30923010206); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023102001); Open Research Fund of Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense (JSGP202105, JSGP202201)