

基于光场层析的激光超光速运动三维成像

潘龙, 封晓华*

类人感知研究中心, 之江实验室, 浙江 杭州 311121

摘要 实时表征超快激光的时域特性是一项非常重要且很有挑战性的工作。现有方法通常仅限于在少数空间点或者二维空间内观测超快激光的传播过程, 无法完整记录超快激光在介质中的传播过程, 尤其是涉及超光速运动时。作为一种新方法, 光场层析技术通过结合智能算法和新型的光学设计, 能够以皮秒级时间分辨率对超快现象进行三维成像。笔者借助该技术捕获了超快激光在三维空间中的超光速运动, 并证明了在测量超快激光的时空特性时完整考虑激光三维传播过程的重要性。

关键词 超快光学; 超快激光; 三维成像; 超光速运动; 光场成像

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230574

1 引言

超快激光的时空特性表征是激光技术发展的重要推动力之一。因光电探测器的带宽有限, 且只能探测光子的能量, 超快激光的大部分物理参数(如脉冲长度、复相位)无法直接测量。因此, 表征超快激光的主流技术均基于间接物理测量和智能信号处理, 典型的技术有频率分辨光学开关法(FROG)^[1]和光谱相位干涉法(SPIDER)^[2]。然而, 这些测量技术仅能探测超快激光的时域特性, 无法表征其空间特性。尽管空间特性可以由 CMOS 或 CCD 相机传感器采集表征, 但相机的有限帧率(<1000 frame/s)导致其只能获取超快激光的稳态空域特性, 无法采集激光空域特性随时间的演变过程。随着超快激光技术的迅猛发展, 准确表征超短激光的时空特性、深入研究超短激光脉冲在光纤等介质中的动力学变得日益迫切^[3-4]。

近年来, 得益于智能信号处理和新型光学设计的快速发展, 超快成像方法获得了长足进步, 为表征超快激光时空特性提供了新工具。2014年, Gao等^[5]发明了压缩超快摄影(CUP)技术, 首次实现了单次曝光内捕捉脉冲激光在二维空间的传播过程 (x, y, t) 。2021年, Feng等^[6]发明了光场层析技术(LIFT), 率先将三维光场成像技术引入超快成像中, 并在单次曝光内以 3 ps 的时间分辨率记录了超短激光脉冲在弯曲光纤中的三维传播过程。然而, 随着超快时间分辨率接近皮秒级别, 光速的有限性使得超光速运动效应变得尤为明显, 进而导致观测到的激光时空传播特性失真。然而, 现有的超快成像方案^[7-9]以及光场层析技术均没有

考虑超快成像时的超光速运动效应。

2021年, Morimoto等^[10]率先利用激光传播过程中的超光速运动效应, 从单光子相机采集的时间分辨图像数据 (x, y, t) 中, 推导出激光脉冲在三维空间中的深度信息 z , 直接佐证了三维成像对于正确记录光子传播时空特性的重要性。然而, Morimoto等所提方法无法用于复杂场景, 且三维成像的深度分辨率有限。同时, 观测三维超快现象时需要成像系统具备大的成像景深, 以保证整个三维场景在成像时有足够的空间分辨率。而在传统成像以及现有的超快成像方法中, 这将导致系统光通量与景深之间的矛盾: 获得大的成像景深需要降低系统的数值孔径, 从而使得系统的光通量以二次方的方式降低^[11]。

笔者基于光场层析技术和智能图像处理算法, 解决了超快成像中光通量与景深的矛盾, 并完整记录了超快激光在空间中的三维传播过程。在此基础上, 笔者通过分析三维成像结果, 有效检测了激光传播过程中的超光速运动效应, 为提高超快激光时空特性表征的准确度奠定了基础。与其他超快成像方法(如 CUP)相比, 光场层析技术无须光学编码, 系统复杂度较低。更重要的是, 光场层析是到目前为止唯一能够实现光场图像处理的超快三维成像技术。尽管光场层析成像的图像分辨率相对较低, 但其重构质量通常更好, 这是因为光场层析技术在图像采集过程中的压缩比较小, 且不存在空间-时间信号串扰的问题^[6]。

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-25; 录用日期: 2023-05-23; 网络首发日期: 2023-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(62205302)、之江实验室科研启动项目(113010-PI2107)

通信作者: *fengxiaohua@zhejianglab.com

2 基本原理

2.1 超光速运动

在对超快激光进行观测时,成像系统与激光传播方向的几何关系可能会导致超光速运动。如图 1(a)所示,在以相机为原点的坐标系中,激光在介质中从点 P_1 传播到点 P_2 ,在此过程中相机捕获到的是介质对激光的微弱散射光子信号(绿色虚线),其沿着直线传播至相机(黑色虚线)。在图 1(b)中,假设激光在介质(如光纤)中的传播方向与相机光轴(z 轴)的夹角为 β ,激光在点 P_1 时与相机的距离为 r_1 ,散射光子在空气中的传播轨迹与光轴夹角为 α 。当激光传播了一段距离 d 到达点 P_2 后,到相机的距离为 r_2 。在计算即时速度时,传播距离 d 非常小(即 P_2-O-P_1 间夹角 δ 趋近 0)。假设激光传播介质的折射率为 n ,则可推导出相机测量到的激光在两点之间的传播时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{r_2}{c} + \frac{d}{c/n} - \frac{r_1}{c} = \frac{r_2 - r_1 + nd}{c} \approx \frac{d \cos(\beta - \alpha) + nd}{c}, \quad (1)$$

式中: c 为激光传播速度。传统的二维超快相机因无法采集深度信息 z ,测量到的激光传播距离为激光传播轨迹 d 在 x - y 平面的投影: $\Delta d = d \sin \beta$ 。因此,其测量到的激光传播速度为

$$c' = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{d \sin \beta}{[d \cos(\beta - \alpha) + nd]/c} = c \frac{\sin \beta}{1 + n \cos(\beta - \alpha)} = c\gamma, \quad (2)$$

式中: γ 为几何因子。同理,三维相机测量到的深度变化 Δz 为激光传播轨迹 d 在 z 方向上的投影: $\Delta d = d \cos \beta$,从而使得测量到的 z 方向激光传播速度为

$$c_z = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{d \cos \beta}{[d \cos(\beta - \alpha) + nd]/c} = c \frac{\cos \beta}{1 + n \cos(\beta - \alpha)} = c\eta, \quad (3)$$

式中: η 为几何因子。

由此可见,测量到的光速 c' (或者 c_z)与实际光速 c 不同,测量到的光速与实际光速的比值是一个几何因子 γ (或者 η)。

对于二维相机而言,为保证测量的光速等于实际光速,需要夹角 β 为 90° (即激光垂直于相机光轴传播),且 $\alpha \approx 0$ (即位于相机中心区域附近或者成像角度视场较小)。在实验观测中,这显然是一个较小的成像区域。由式(2)可推导出:当激光传播方向与相机光轴的夹角 β 小于 90° 时,测量光速小于实际光速;反之,测量光速大于实际光速,从而导致超光速运动。同时,同一几何因子 γ 可对应不同的传播角度组合 (β, α) ,因此,判定与量化测量过程中的超光速运动需要正确记

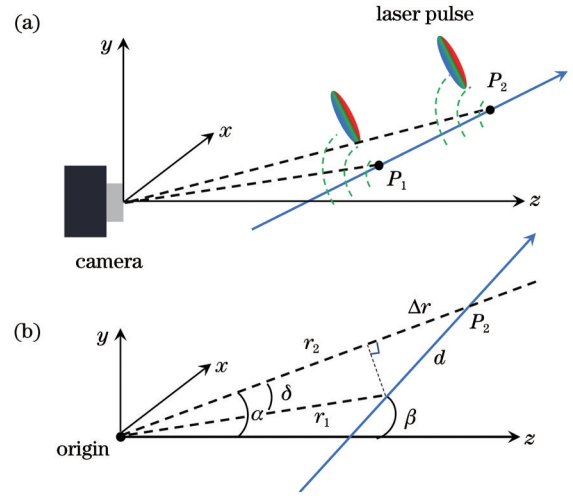


图 1 超快激光在相机坐标中的三维传播示意图。

Fig. 1 Illustration of ultrafast laser pulse propagating within the camera coordinate system

录激光的三维传播过程,以计算实际传播角度 α 与 β 。

2.2 光场层析成像

光场层析技术是一种新型的三维光场成像技术,其时间分辨率由后端的条纹相机传感器决定,最高可达 $3 \text{ ps}^{[6]}$,是超快激光时空特性表征的有力工具之一。不同于传统的基于圆形透镜的点对点图像传感方式,光场层析技术利用柱面透镜和一维图像传感器记录图像的拉东变换数据,并依靠智能算法恢复图像。如图 2(a)所示,柱面透镜将每个物体点沿着其长轴方向(曲率无穷大)投射成图像空间中的线性信号,当使用线性阵列传感器接收该信号时,记录的是物体沿着该方向的投影数据 $^{[6]}$,即

$$b(k, \theta) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(u, v) \delta[(u - k) \cos \theta + v \sin \theta] dudv, \quad (4)$$

式中: θ 为柱面透镜长轴与线性图像传感器间的夹角; k 为图像传感器的像素坐标; $g(u, v)$ 为目标物体; $\delta(u, v)$ 为狄拉克函数。该数学模型与 X 射线计算机断层成像的数学模型一致。因此,完整图像 $g(u, v)$ 可通过获取不同角度的投影信号 $b(k, \theta)$,并利用滤波反投影算法 $^{[12]}$ 重构得到。在光场层析中,不同角度的投影信号可通过旋转柱形棱镜改变 θ 获得。所不同的是,光场层析技术采用了阵列型柱面透镜,如图 2(b)所示。每个柱面透镜与线性传感器间的夹角 θ 不同,从而在采集目标物体不同角度投影信号的同时,可高效采样光场信息。这一复合采样光场和投影信号的技术,极大地降低了系统的数据采集量,为单曝光三维成像奠定了基础。

光场层析成像实验系统在图 2(b)中给出,7 块柱面透镜(直径 2 mm, 焦距 8 mm)与传感器的夹角均匀分布在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 内,并且 7 块柱面透镜置于成像主镜头的焦平面附近。图像传感器位于柱面透镜的像平面上,系统的角度视场在图像端约为 6° 。光学成像简

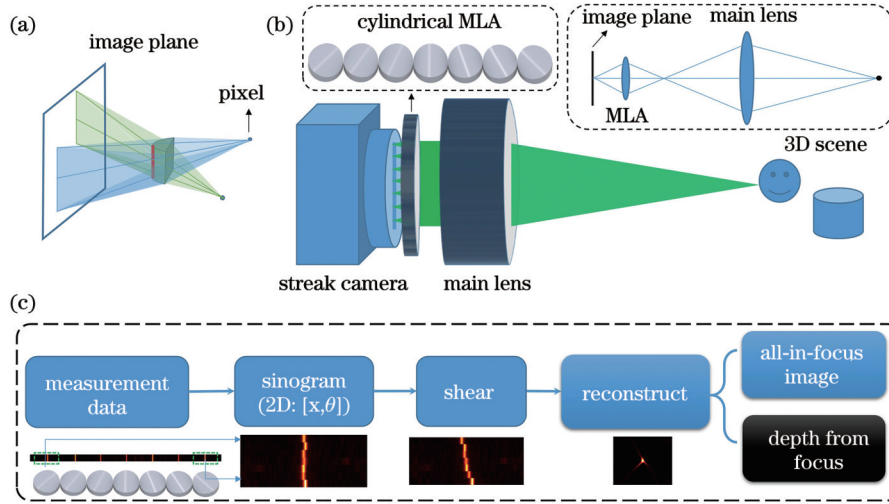


图 2 光场层析三维成像原理与图像处理流程图(MLA: 微透镜阵列)。(a)柱形镜头成像原理图;(b)光场层析成像系统;(c)光场层析图像处理流程

Fig. 2 Principle of 3D light field tomography imaging system and image processing flowchart (MLA: microlens array). (a) Imaging principle of cylindrical lens; (b) imaging system of light field tomography; (c) image processing pipeline for light field tomography

图在虚线框内详细给出。为在单次曝光内完整记录飞行时间信息,该系统采用条纹相机(C13410-01A, Hamamatsu)作为线阵图像传感器(1016个时间点,最高时间分辨率约为3 ps)。完成数据采集后,每个时间点上的一维空间图像信号被划分为一个正弦图信号 $b(k, \theta)$ (一维空间图像被柱面透镜阵列分割,阵列中的每个柱面透镜获得目标场景一个角度的投影信号,所有柱面透镜的投影信号的合集形成正弦图)。该条纹相机的一维像素分辨率为1344,除去透镜之间的边缘像素,7块柱面透镜下的有效像素为128。因此,正弦图的分辨率为 128×7 。因7个角度投影信号的角度采样率远低于尼奎斯特角度采样率,基于传统滤波反投影的图像恢复算法将导致重构结果产生大量伪影,无法获得高质量图像。为解决这一难点,智能算法将图像重构转化成一个优化问题(以提高对噪声的鲁棒性),并通过引入图像先验知识来解决伪影^[13]。

在离散空间内,式(4)所示的数学模型可以转化为两个步骤:沿着夹角 θ 的投影等效为将图像旋转 θ 角度,而后沿着 y 轴积分。

$$\mathbf{b} = \mathbf{TR}^\theta \mathbf{g} = \mathbf{Ag}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{R}^θ 为旋转矩阵(尺寸为 16384×16384); \mathbf{T} 为积分矩阵(尺寸为 128×16384); \mathbf{g} 为矢量化的物体图像(尺寸为 16384×1); $\mathbf{A} = \mathbf{TR}^\theta$ 。物体图像 \mathbf{g} 可以通过解决式(6)所示的优化问题获得。

$$\arg \min \|\mathbf{b} - \mathbf{Ag}\|^2 + \mu \|\mathbf{g}\|_{\text{TV}}, \quad (6)$$

式中: μ 是一个超参数; $\|\mathbf{g}\|_{\text{TV}}$ 是 \mathbf{g} 的总变差范数。该优化问题可通过 FISTA 算法^[14] 高效求解。

值得注意的是,与传统光场成像类似,光场层析技术可以实现数字重聚焦^[6]: 将正弦图信号 $b(k, \theta)$ 剪切后重构目标图像 \mathbf{g} , 即可聚焦至不同的场景深度。基

于其重聚焦能力,光场层析技术可进一步采用传统光场相机的焦点深度方法,计算目标场景的深度信息^[15], 并通过图像分割算法合成全聚焦图像(AiF)^[6], 以极大地拓展成像景深。图2(c)以点光源成像为例,总结了光场层析三维成像智能信号处理流程,其中包括了分割一维图像形成正弦图的过程。借助条纹相机单次曝光采集到的1016个飞行时间信号和智能图形重构算法,光场层析成像可完成空间分辨率为 128×128 、光场角度分辨率为7、时间分辨率最高为3 ps的快照式1016 frame 三维图像采集,使其在观测随机、不规则的超快现象(如激光动力学)方面具有独特优势。

3 结果与分析

基于光场层析成像技术,笔者在不损害成像系统光通量的情况下将成像景深提升了7倍^[6], 可以有效观测超快激光在三维空间中的传播。如图3(a)所示,一束皮秒激光(532 nm, 10 ps 脉宽)耦合到多模散射光纤,光纤固定在一个倾斜纸板上,倾斜角约为 45° 。当光场层析相机数字重聚焦到不同深度时,得到的图像有着明显的失焦效应,如图3(b)所示,无法清晰地捕捉整个光纤结构。与之相反,图3(c)所示的光场层析合成的全聚焦图像完整、清晰地描绘了光纤的形态,实现了与小数值孔径的传统二维相机相同的成像效果。值得一提的是,景深的提升是由光场的角度分辨率决定的,目前光场层析技术的角度分辨率为7,因此最大可将景深提高7倍。更高的角度分辨率可通过使用大型阵列柱形透镜获得,以进一步提升成像景深。鉴于光通量在超快测量中的重要性,光场层析技术的大景深、高通量优势使得其能更有效、简易地观测三维超快现象(无须在观测前进行准确对焦)。

光场层析表征超快激光时空变换的能力在

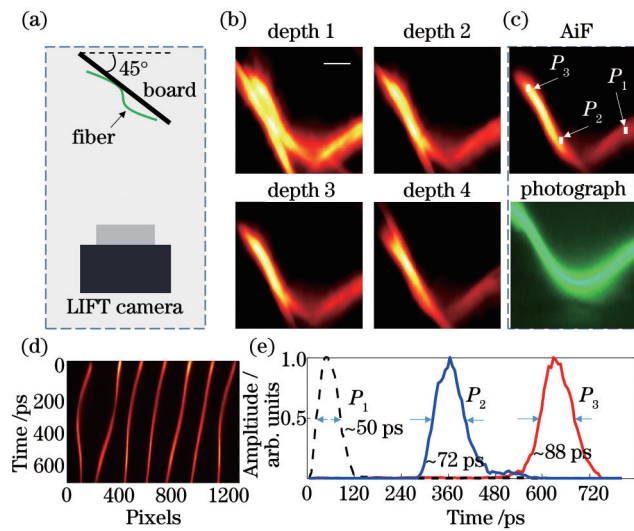


图 3 光场层析成像数字重聚焦与生成全聚焦图像(比例尺: 15 mm)。(a) 成像实验装置图; (b) 超快激光数字重聚焦成像结果; (c) 全聚焦图像生成结果与参考二维相机成像; (d) 条纹相机传感器记录的原始信号; (e) 超快激光脉冲在散射光纤(图 3(c)中的点 P_1 、 P_2 、 P_3)中的展宽过程

Fig. 3 Digital refocusing and all-in-focus image generation of light field tomography (scale bar: 15 mm). (a) Imaging experimental setup; (b) digital refocusing imaging results of ultrafast laser; (c) results of all-in-focus (AiF) image generation and reference 2D camera imaging; (d) raw signal recorded by the streak camera sensor; (e) pulse broadening of the ultrafast laser pulse inside the light diffusing fiber (point P_1 , P_2 and P_3 in Fig. 3(c))

图 3(d)~(e)中给出。因多模散射光纤中掺杂了纳米材料,皮秒激光在传播时会随着传播距离的增大而扩宽。尽管多模光纤中也存在脉宽展宽效应,但散射纳米材料的加入使得该效应尤为明显。然而,这在图 3(d)所示的原始信号中是无法观察到的。在完成智能图像

重构之后,光场层析技术可完整重构时空图像数据(x, y, t),从而表征超快激光的时空变换。图 3(e)所示的是在光纤上的三个空间点(见图 3(c)标注)观测到的皮秒激光脉冲(强度归一化),可见,其在 720 ps 的传播时间内逐渐变宽至约 50、72、88 ps。这与超短激光脉冲穿透散射介质后在时间上的展宽类似。

在数字重聚焦处理的基础上,光场层析技术可以实现三维成像。为实现定量的深度测量,笔者对一系列分布在不同深度的点光源进行了成像,以便标定数字重聚焦剪切系数与实际深度之间的数学关系。同时,为了消除噪声以及图像残余伪影对深度测量的影响,利用图像信号在空间上具有的非局部相似性,在空间维度上对深度图像信息进行了 BM3D 滤波^[16],并进一步利用深度变化在相邻时刻缓慢、光滑的数学特性,在时间维度上对深度信号进行了去噪处理^[17]。图 4 显示了光场层析相机记录的皮秒激光在三维自由空间中的反射过程。该实验装置在图 4(a)给出,斜入射的皮秒激光经过一个反射镜后,传播方向与相机光轴的夹角变大。因此,其深度随时间的变化相比反射前要慢。图 4(b)、(c)给出了皮秒激光反射过程中 4 个时刻的瞬态三维图像以及完整反射路径的三维图像。图 4(d)、(e)分别给出了相机记录的原始图像信号以及皮秒激光在反射传播过程中的深度变化,其中,黑色圆点表示原始未经滤波的深度信息。从结果可以看出,光场层析的三维成像结果正确地记录了皮秒激光反射前后深度的变化特性:在 280 ps 时刻经过反射镜后,皮秒激光深度的增速变慢。这一结果符合实验设定。

尽管激光反射三维成像已经包含了一定程度的超光速运动,但反射前后的传播角度仍保证了激光传播是单向远离相机的,即超光速运动在反射前后对比不鲜明(测量光速均小于实际光速)。为最大化展示超光

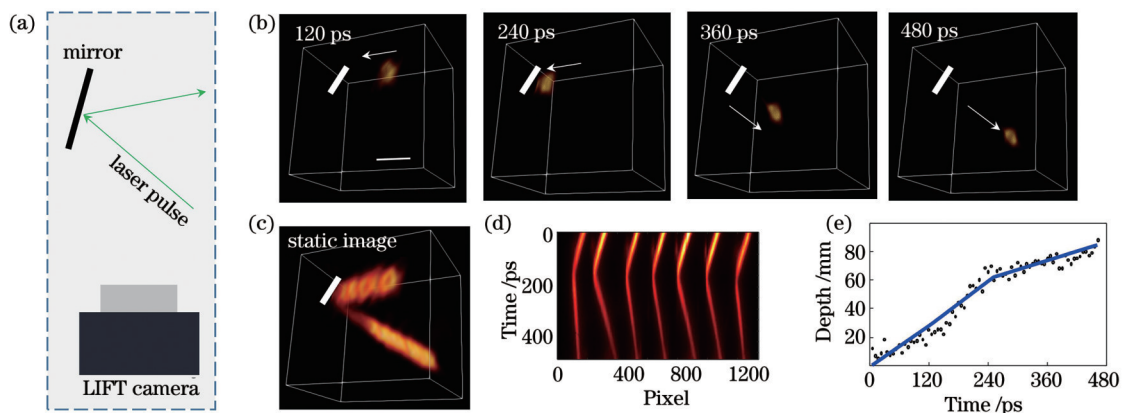


图 4 光场层析三维探测超快激光在空气中的反射传播过程(比例尺: 15 mm)。(a) 实验装置示意图; (b) 超快激光反射实验的三维成像结果; (c) 超快激光反射路径的三维图; (d) 条纹相机传感器记录的原始信号; (e) 超快激光脉冲深度随时间的变化,其中圆点表示原始深度点,实线表示滤波后的深度点

Fig. 4 LIFT observation of 3D reflection propagation of ultrafast laser pulse in air (scale bar: 15 mm). (a) Experimental setup diagram; (b) 3D imaging results of ultrafast laser pulse reflection; (c) 3D image of ultrafast laser reflection path; (d) raw signal recorded by the streak camera sensor; (e) depth variation of the ultrafast laser pulse with time, where the dots denote raw depth points and the solid line denotes filtered depth point

速运动对超快激光传播成像的影响,笔者设计了一个折返式激光传播过程。如图 5(a)所示,皮秒激光耦合至散射光纤(固定在倾斜纸板上)。皮秒激光在光纤内沿着纸板平面传播之后折返,以相反的方向传播回原始起点附近。由图 1 的分析可知:皮秒激光在前向传播过程中与相机光轴的夹角小于 90° ,测得的光速小于实际光速;而在折返过程中,传播角度与相机光轴的夹角大于 90° ,测得的光速大于实际光速。因此,超光速运动在该实验中尤为明显。这在图 5(b)所示的三维图中能明显观察到,即:皮秒激光在 $60\sim 420$ ps 的传播时间内在光纤内传播的路程,要远小于其在折返过程中 $420\sim 720$ ps 的 300 ps 时间窗口内传播的路程(可对照图 5(c)中的原始图像信号,其中白线标注折返时刻)。同时,虽然折返运动中激光在前向与反向传

播过程中经历相同的深度,但实际测量中的超光速运动使得反向传播过程在更短时间内完成了相同的传播深度,如图 5(d)所示。

借助三维成像结果可以计算出实际三维传播过程中皮秒激光路径与相机光轴的夹角大约为 45° 。根据式(2)推测,激光前向传播过程中相机捕捉的 x - y 平面的传播过程相比实际传播过程慢(测量光速约为 $0.48c_f$, c_f 为光纤中光速),而反向传播过程中相机捕捉的 x - y 平面的传播过程相比实际传播过程快(测量光速约为 $1.35c_f$)。根据式(3),深度方向的传播速度在前向与折返过程中分别为 $0.48c_f$ 与 $1.35c_f$,其比约为 0.36。这与图 5(d)中观测到的深度变化速度比约为 0.42 较为接近。两者之间的误差可能是由光纤折射率数据不准确以及系统三维标定误差等造成的。

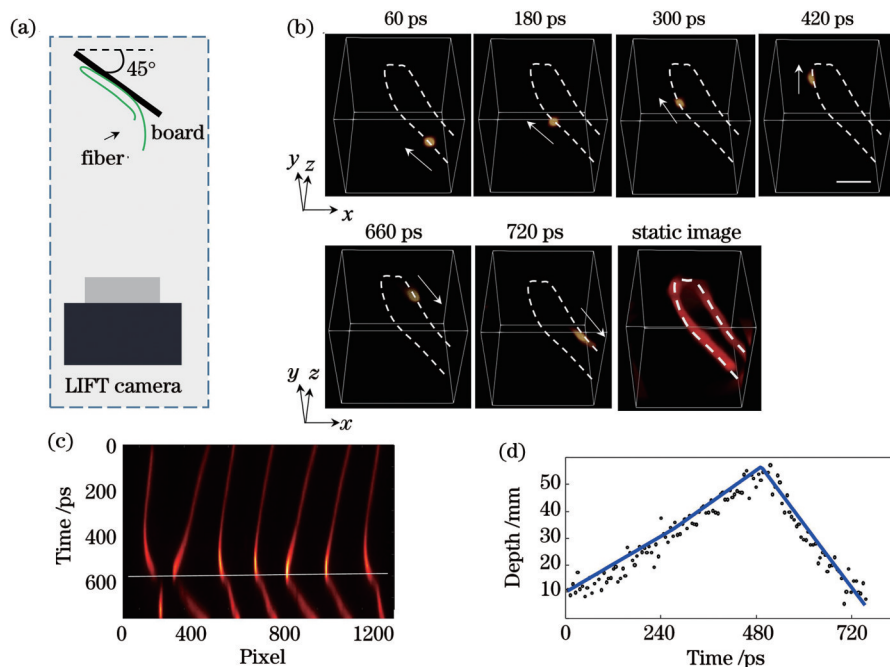


图 5 光场层析三维探测超快激光在光纤中的超光速运动传播过程(比例尺:15 mm)。(a)实验装置示意图;(b)超快激光在光纤中传播的三维成像结果图与静态传播路径三维图;(c)条纹相机传感器记录的原始信号;(d)超快激光脉冲深度随时间的变化,其中圆点表示原始深度点,实线表示滤波后的深度点

Fig. 5 LIFT observation of 3D superluminal motion propagation of ultrafast laser pulse inside a fiber (scale bar: 15 mm). (a) Experimental setup diagram; (b) 3D imaging results of ultrafast laser pulse propagation inside the fiber and its static propagation path; (c) raw signal recorded by the streak camera sensor; (d) depth variation of the ultrafast laser pulse with time, where the dots denote raw depth points and the solid line denotes filtered depth point

4 结 论

通过结合智能算法与新型光学成像系统,光场层析技术能有效、完整地记录超快激光在介质中传播的三维时空特性。基于光场层析技术,笔者在单次曝光内,针对自由空间以及光纤中传播的皮秒激光的超光速运动进行了三维观测。光场层析技术具有较高的光场图像处理能力,有效打破了超快成像中光通量与成像景深的折中,并实现了对超快现象的大景深三维观测。相比单光子探测器^[18],光场层析技术使用的条纹

相机的探测灵敏度较差。尽管如此,条纹相机具有在单次曝光内完整记录飞行时间信号的优势,而单光子探测器只适用于可重复性高的物理现象。因此,对于高度随机的超快激光运动,如激光孤子等现象,条纹相机是更合适的选择。目前,光场层析技术仍需要图像先验信息,以完成高质量重构。同时,光场层析成像的图像分辨率与场景的复杂度有关:对于稀疏场景,分辨率通常可达到光学衍射极限;而对于复杂场景,其分辨率仍有待提高^[6]。

在后期的工作中,可通过增加柱形透镜的数量来

提升采样数据量,同时使用深度学习实现智能型图像重构^[19],以降低对先验知识的依赖性。下一步拟利用获取的三维图像信息进行时间信号的数字重采样,以纠正超光速运动引起的时空失真。

参 考 文 献

- [1] Sidorenko P, Lahav O, Avnat Z, et al. Ptychographic reconstruction algorithm for frequency-resolved optical gating: super-resolution and supreme robustness[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1320-1330.
- [2] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 792-794.
- [3] Guo Y K, Wen X X, Lin W, et al. Real-time multispeckle spectral-temporal measurement unveils the complexity of spatiotemporal solitons[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 67.
- [4] Wang W Q, Wang L R, Zhang W F. Advances in soliton microcomb generation[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 034001.
- [5] Gao L, Liang J Y, Li C Y, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 74-77.
- [6] Feng X H, Gao L. Ultrafast light field tomography for snapshot transient and non-line-of-sight imaging[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2179.
- [7] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(9): 695-700.
- [8] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena[J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1145-1149.
- [9] Liang J Y, Zhu L R, Wang L V. Single-shot real-time femtosecond imaging of temporal focusing[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 42.
- [10] Morimoto K, Wu M L, Ardelean A, et al. Superluminal motion-assisted four-dimensional light-in-flight imaging[J]. *Physical Review X*, 2021, 11(1): 011005.
- [11] 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.
- [12] Pan X C, Sidky E Y, Vannier M. Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction?[J]. *Inverse Problems*, 2009, 25(12): 123009.
- [13] Dittmer S, Kluth T, Maass P, et al. Regularization by architecture: a deep prior approach for inverse problems[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2020, 62(3): 456-470.
- [14] Kamilov U S, Mansour H, Wohlberg B. A plug-and-play priors approach for solving nonlinear imaging inverse problems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(12): 1872-1876.
- [15] Moeller M, Benning M, Schönlieb C, et al. Variational depth from focus reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 5369-5378.
- [16] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [17] Selvin S, Ajay S G, Gowri B G, et al. ℓ_1 trend filter for image denoising[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 93: 495-502.
- [18] Bruschini C, Homulle H, Antolovic I M, et al. Single-photon avalanche diode imagers in biophotonics: review and outlook[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 87.
- [19] Gupta M, Jauhari A, Kulkarni K, et al. Compressive light field reconstructions using deep learning[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 1277-1286.

Snapshot Three-Dimensional Imaging of Superluminal Motion of Pulsed Lasers with Light Field Tomography

Pan Long, Feng Xiaohua*

Research Center for Humanoid Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, Zhejiang, China

Abstract

Objective Real-time characterization of temporal behaviors of ultrafast lasers is an important and challenging task. Existing methods are typically limited to a few spatial modes or a two-dimensional (2D) space, which is insufficient for adequately portraying the propagation of ultrafast lasers in a medium when superluminal motion is involved. To accurately characterize the propagation of ultrafast lasers in the presence of superluminal motion, it is necessary to record the complete four-dimensional (4D) space-time (x, y, z, t) in which the laser pulse exists. However, most ultrafast cameras are incapable of three-dimensional (3D) imaging. Additionally, when 2D imaging is performed, the tradeoff between the light throughput and imaging depth of field can be a hindrance for capturing superluminal motions, which typically occurs when the light is propagating at a large angle with respect to the camera plane. The objectives of this study were to develop efficient 3D ultrafast imaging methods that can capture the complete 4D space-time with an extended depth of field and to record and analyze superluminal motions with a high spatiotemporal resolution.

Methods Light field tomography (LIFT), which leverages intelligent algorithms and novel optics, is a new method capable of 3D imaging of ultrafast phenomena with a picosecond-scale temporal resolution. The core idea of LIFT is to reformulate image formation as a computed-tomography problem. In LIFT, the spherical lens is replaced with a cylindrical lens, allowing each pixel to record a line integral of the scene along the direction of the invariant axis of the lens (one without optical power). With a one-dimensional (1D) sensor placed at the focal plane of the cylindrical lens, a parallel beam projection of the scene can be obtained, similar to that in X-ray computed tomography. By using a linear array of such cylindrical lenses, each oriented at a distinct angle with respect to the 1D sensor, projection data along different angles can be simultaneously recorded for computationally reconstructing the scene.

Meanwhile, the light field information of the scene is obtained by the cylindrical lens array, which allows 3D depth extraction at each time instant; thus, complete 4D imaging is achieved. With an intelligent optimization algorithm, we improved the 3D imaging quality and achieved a light field image resolution of $128 \times 128 \times 7$ with a time sequence of 1016 points, allowing the imaging depth of field to be increased approximately sevenfold.

Results and Discussions Using LIFT, we captured the reflection of a picosecond laser pulse upon incidence on a mirror in 3D space. As the laser pulse propagates away from the camera, the measured propagation speed of the laser pulse is lower than the actual speed of light, and the speed is further reduced after the laser is reflected by the mirror, which modifies the propagation angle of the laser pulse. Such superluminal motion is made even more evident by coupling the laser into a multimode light-diffusing-fiber and then winding the fiber in a round-trip fashion. In this case, the forward propagation of the laser has a speed of only approximately 36% of the actual speed of light in the fiber, whereas the reverse propagation appears to be significantly faster: the apparent velocity is 135% of the actual speed, which is far faster than the forward propagation. Interestingly, the light field capability of LIFT is found to be critical for clearly resolving the fiber structure, as conventional imaging of the entire fiber structure with a single focal plane induces significant defocus blur. Moreover, we examined the laser pulse broadening inside the multimode fiber. While pulse broadening is common in multimode fibers, doping the light-diffusing fiber core with nanostructures for scattering light accelerates the broadening: within a propagation time of 720 ps, the picosecond laser pulse width increases from 10 ps to 50, 72, and 88 ps at three different points on the fiber. This is similar to laser pulse broadening after propagation through a thin scattering medium.

Conclusions Using the novel LIFT method, we demonstrated in this study that it is important to consider the 3D nature of light propagation when characterizing the spatiotemporal behaviors of ultrafast lasers. Without accurate 3D information of the laser pulses, the observed speed of light propagation depends heavily on the imaging geometry and the propagation angle of the light. The resultant superluminal motion will distort the spatiotemporal profile of the ultrafast laser pulse, leading to inaccurate interpretations of the dynamics of the laser inside the medium. With accurate 3D information, LIFT can correctly identify the superluminal motions of the ultrafast laser and clarify the temporal variations of the laser pulse at each spatial position, owing to its high spatial resolution (128×128), large depth of field, and deep time sequence (up to 1016 points) acquired with a single snapshot. This paves the way for fully correcting the spatiotemporal distortion of ultrafast lasers caused by superluminal motions, which we aim to achieve in future research.

Key words ultrafast optics; ultrafast lasers; three-dimensional imaging; superluminal motion; light field imaging