

透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术研究

张熙¹, 王绥琦¹, 孔艳¹, 何小亮¹, 蒋志龙¹, 刘诚^{1,2*}

¹江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 为了克服传统数字全息三维成像技术的扫描速度慢等诸多缺点,设计一种仅需单波长且可以一维扫描的透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术。首先采用片状光束对样品进行照明并记录透射光的离轴全息图;然后利用传统的数字全息重建技术得到透射光的复振幅分布后去除其低频分量;最后在频谱空间进行坐标变换并对变换后的空间频谱进行傅里叶逆变换,便可得到被照明切片平面上的样品结构信息。在对工作原理和主要参数进行系统理论分析的基础上,利用数值模拟和光学实验对此技术的可行性进行实际验证。由于该技术能够使用透射光进行三维层析成像,因此很容易推广并应用于 X 光和其他短波长的辐射源成像,为研究样品高分辨三维结构提供新的工具。

关键词 全息; 数字全息; 三维显微成像; K 空间变换; 透射成像

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2109001

1 引言

数字全息技术是利用 CCD (Charge Coupled Device) 等面阵探测器来记录离轴或同轴全息图,并使用菲涅耳衍射公式从所记录的全息图中重建物光的强度和相位^[1-2]。与使用银盐胶片记录全息图的传统全息技术相比^[3],数字全息技术不仅方便快捷,而且能够与现代的信息传输技术和图像处理技术更好地结合,因此自 1967 年提出后^[4]便得到了充分的研究和发展,广泛应用于生物组织成像^[5-7]、粒子追踪^[8]、水印加密^[9]和波前测量^[10]等领域。利用数值计算的方法进行图像重建可以使数字全息技术具备非常出色的数字重聚焦功能,能够很方便地计算出物光波在不同距离处的复振幅分布,即只需要一幅全息图就可对任意深度处的样品进行成像^[11],这是数字全息成像技术的一个突出优点。但这种数字重聚焦像往往是聚焦面的清晰像和离焦面的模糊像之间的干涉叠加^[12],本质上并不是样品的层析像,因

此揭示样品内部三维结构的能力仍然较弱。为了使数字全息技术实现真正的三维成像,麻省理工学院 Feld 研究组将数字全息技术与计算机断层扫描成像技术结合,通过旋转样品来记录多个角度的透射光,并利用经典的 Radon 变换^[13]来重建出样品的三维折射率分布,从而实现层析全息成像^[14]。韩国高丽大学 Choi 研究组^[15]和韩国科学技术院 Park 研究组^[16]对层析全息成像技术进行了改进,即提出光学衍射层析成像技术,该技术考虑了光束在样品内部传输的衍射效应,获得了更为准确的三维重建结果。但基于传统计算机层析成像原理的层析数字全息技术需要对样品或者光路进行多角度扫描,导致光学系统较为复杂,而且成像的空间分辨率极大地受到扫描机械精度和扫描范围的限制。以色列特拉维夫大学 Shaked 研究组^[17]使用光镊实现了对样品的全角度扫描,但在改善成像系统性能的同时也明显增加了其结构和操作的复杂度。南佛罗里达大学 Kim 研究组^[18]提出了类似于光学相干层析成

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-03-24; 录用日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(12004141, U1730132)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP51721B)、江苏省自然科学基金(BK20200588, BK20180598)

通信作者: *chengliu@siom.ac.cn

像技术的多波长数字全息技术,通过记录多个波长的全息图来实现三维全息成像,完全避免了成像过程中的机械运动,但是由于存在色散效应,样品对不同波长的光有不同的折射率,而且普通 CCD 的帧频比扫频光源的波长变换频率低很多,因此很难找到波长可以连续切换并满足全息记录要求的光源。为了能够简单方便地实现数字全息层析成像,本课题组提出了与传统三维成像技术完全不同的 K 空间变换数字全息技术^[19],利用单波长光源和一维扫描的方式便可快速实现三维成像。该方法是使用光片对样品进行照明并记录其反射光的数字全息图,通过对反射光的傅里叶频谱进行坐标变换可以将观测面从探测器平面转换到光片平面,从而实现了使用一幅全息图对整个被照明切面进行成像。由于这种方法仅仅需要一个激光波长,而且只需要对样品进行一维扫描,因此具有系统简单和成像速度快的优点。但是由于该方法需要采用反射光路,因此在几乎不发生反射的 X 射线和电子束等短波长显微成像领域^[20-22]很难使用。为了拓展 K 空间变换数字全息三维成像技术的适用范围,本文根据环状光瞳的切趾成像原理^[23-24]提出透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术,首先记录样品透射光的全息图并在重建过程中滤除低频光,然后对滤波后的空间频谱进行坐标变换,可以直接获得样品结构的高轴向分辨率层析图像,而且由于所得的图像是样品的

强度微分像^[25],因此其具有更好的细节分辨能力。

本文在对成像原理和分辨率等基本特性进行系统分析的基础上,利用数值模拟和光学实验证明透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术的可行性。由于该技术能够使用透射光进行三维层析成像,因此很容易推广和应用于 X 光和其他短波长的辐射源成像,为研究样品的三维高分辨结构提供新技术。

2 基本原理

2.1 基本光路和数据的处理方法

透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术的原理如图 1 所示,其中 Z_n 为第 n 个 Z 平面, Δ 为颗粒 a 和 b 的间距。平行光被柱透镜聚焦后形成片状光束并照射到透过率为 $T(x, y, z)$ 的三维透射样品上,在探测器平面上样品的透射光 $O(x, y)$ 与离轴平面上的参考光 $R(x, y)$ 相互干涉后形成离轴全息图 $H(x, y)$,其中 (x, y, z) 为空间直角坐标,如图 1(a) 所示。若波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,柱面镜的焦距 $f = 10 \text{ cm}$,柱面镜的边长 $L = 5 \text{ mm}$,探测器到柱面镜的距离 $d = 20 \text{ cm}$,参考光 $R(x, y)$ 与光轴的夹角为 2° ,在不放置任何待成像物体的条件下,可以计算得到图 1(b) 的离轴全息图 $H(x, y)$ 。采用传统的数字全息离轴重建方法来观察平面的复振幅 $U(x_1, y_1)$,其中 (x_1, y_1) 为物平面坐标, $U(x_1, y_1)$ 可表示为

$$U(x_1, y_1) = \frac{\exp(ikd_i)}{i\lambda d_i} \iint_{-\infty}^{\infty} R(x, y) \times H(x, y) \exp\left[ik \frac{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}{2d_i}\right] dx dy, \quad (1)$$

式中: d_i 为数字全息图平面到观察平面的距离; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

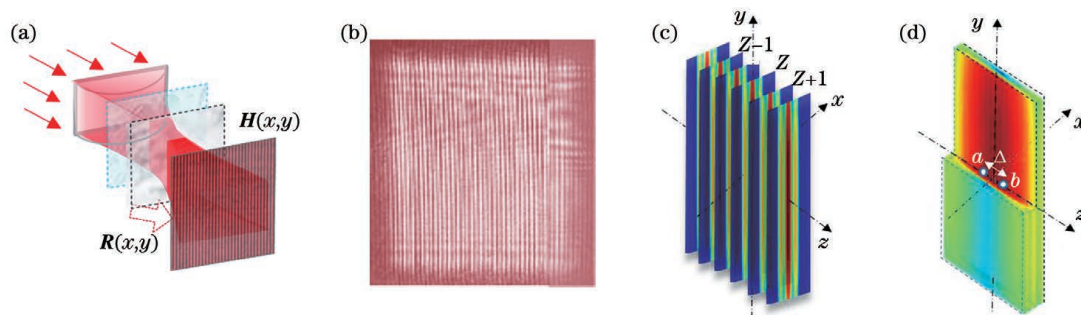


图 1 透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术的原理。(a) 照明光片的产生过程; (b) 离轴干涉的数字全息图; (c) 照明光片在轴向不同深度的强度; (d) 照明光片的三维振幅

Fig. 1 Principle of transmission K-domain transform digital holography 3D imaging technology. (a) Production process of illumination film; (b) digital holograms of off-axis interference; (c) intensity of illumination film at different axial depths; (d) three-dimensional amplitude of illuminated film

由(1)式可计算出 $O(x, y)$ 在任意轴向距离 $z - n\Delta z$ 处的强度分布,其中 Δz 为相邻 Z 平面的间

距。图 1(c)为 $O(x, y)$ 在光片束腰附近平面上的强度分布,若 Δz 值足够小,则可计算出光片的三维复振幅分布 $O(x, y, z)$,如图 1(d)所示。

如图 1(d)所示,若在光片中心沿着光轴方向且间隔为 Δ 处放置两个无限小的散射颗粒 a 和 b ,则采用图 1(a)的光路可以使光片焦线所在平面上 ($z=0$) 的重建光具有图 2(a)的复振幅分布。由于两个粒子沿着光轴放置,所以衍射效应可以使二者在重建光中表现为两个完全重合的系列衍射同心环,因此普通数字全息技术无法区分两个粒子的轴向位置。

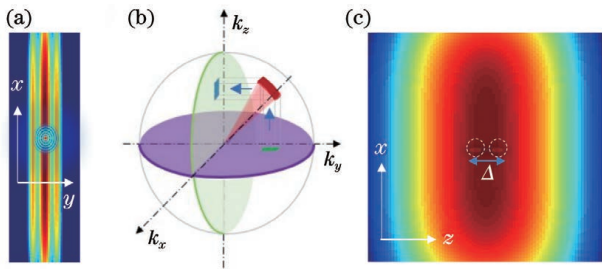


图 2 透射式 K 空间变换数字全息三维成像技术的特性分析。(a)照明光片在焦平面处的振幅分布;(b)K 空间坐标变换原理;(c) $x-z$ 平面上的物光强度

Fig. 2 Characteristic analysis of transmission K-domain transform digital holography 3D imaging technology. (a) Amplitude distribution of illumination film at focal plane; (b) coordinate transformation principle in K-domain; (c) object light intensity on $x-z$ plane

受到 $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (1/\lambda)^2$ 的限制,任何光场的空间频谱都被限制在图 2(b)半径为 $1/\lambda$ 的球壳上,如果将图 1 中透射光 $O(x, y)$ 的空间频谱用球壳上的弧面区域表示,那么 $O(x, y)$ 的傅里叶变换 $\tilde{O}(k_x, k_y)$ 对应着弧面部分在 k_x-k_y 平面上的投影,即 k_x-k_y 平面上的方形区域,若将空间频谱投影在 k_x-k_z 平面上,则可得到 $O(x, y)$ 在 k_x-k_z 平面上的傅里叶变换 $\tilde{O}'(k_x, k_z)$,即图中 k_x-k_z 平面上的方形区域。两个平面上的方形区域是等价的, $\tilde{O}'(k_x, k_z)$ 和 $\tilde{O}(k_x, k_y)$ 都可以用来描述 $O(x, y)$,不同的是 $\tilde{O}'(k_x, k_z)$ 的傅里叶逆变换所得到的 $O'(x, z)$ 是物光在 $x-z$ 平面上的分布描述,相当于将探测器放在光片平面上所记录的透射光。图 2(c)为按照上述方法计算所得的透射光在 $x-z$ 平面上的分布,其中两个虚线圆圈内两个很暗淡的亮点对应着图 1(d)的两个待成像粒子。图 2 从理论上说明了基于透射光路的 K 空间变换全息技术

可以实现三维成像,但由于所成像的对比度很低,而且很容易被实验中的各种噪声淹没,因此必须采用有效的措施来提高成像的对比度。

2.2 对比度的提高算法

假设图 1(a)中三维样品的光学透过率为 $T(x, y, z)$,其在弱衍射条件下可表示为 $T(x, y, z) = 1 - t(x, y, z)$,其中 $t(x, y, z)$ 为样品的反射率且 $t(x, y, z) \ll 1.0$,因此三维反射函数可以写为 $R'(x, y, z) = t(x, y, z)$ 。在图 1(d)片状光 $E(x, y, z)$ 的照射下,样品不同深度的透射光可写为

$$U_T(x, y, z) = E(x, y, z) - E(x, y, z) \times t(x, y, z) \quad (2)$$

由于 $t(x, y, z) \ll 1.0$,因此透射光 $U_T(x, y, z)$ 中能够反映样品三维信息的 $E(x, y, z) \times t(x, y, z)$,仅仅相当于强度很高的背景光 $E(x, y, z)$ 的微扰,这是造成图 2(d)对比度非常低的根本原因,因此若想提高成像的对比度,必须将非散射背景 $E(x, y, z)$ 全部滤除。

图 3(a)为 $x-z$ 平面内衍射光和照明光的传播方向,由于图 1(d)中两个粒子 a 和 b 的尺寸都很小,因此其衍射光均沿着虚线箭头所包含的角状区域进行散射传播,而照明片状光束则沿着实线箭头的方向进行传播。图 3(b)为 $y-z$ 平面内衍射光沿着虚线箭头所包含的角状区域进行散射传播,而片状照明光在此平面内因具有一定的发散角而在阴影所包含的区域内传播,但发散角度仍然比衍射光的发散角度小得多。如图 3(c)所示,当存在两个粒子时,对透射光 $U_T(x, y, z)$ 进行傅里叶变换,其中亮线为照明光片的空间频谱,只要将其在计算中滤除就可以去掉(2)式中的 $E(x, y, z)$,从而提高空间频谱的对比度。

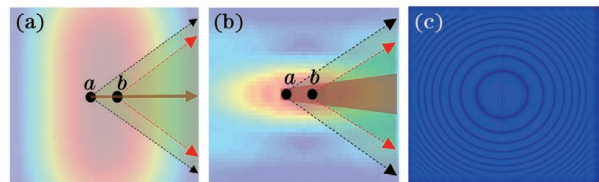


图 3 高通滤波 K 空间成像的示意图。(a) $x-z$ 平面内衍射光和照明光的传播方向;(b) $y-z$ 平面内衍射光和照明光的传播方向;(c)透射光的空间频谱

Fig. 3 Schematic of high-pass filtering K-domain imaging. (a) Propagation direction of diffracted and illuminated light in $x-z$ plane; (b) propagation direction of diffracted and illuminated light in $y-z$ plane; (c) spatial spectrum of transmitted light

图 4(a)为滤除透射光的频谱 $\tilde{O}(k_x, k_y)$ 后衍射光的空间频谱,图 4(b)为由 K 空间变换算法计算得到 k_x-k_z 平面上的空间频谱 $\tilde{O}'(k_x, k_z)$ 。图 4(c)为 $\tilde{O}'(k_x, k_z)$ 的傅里叶逆变换结果,即物体在 $x-z$ 平面上的强度分布。从图 4(c)可以看到,照明背景光被完全去除,两个粒子可以清晰分辨,所以只要将普通再现法所重建的物光中的低频成分滤除,然后再对滤除低频分量后的空间频谱在频谱空间域进行坐标变换,就可以采用透射光路实现高对比度的三维成像。

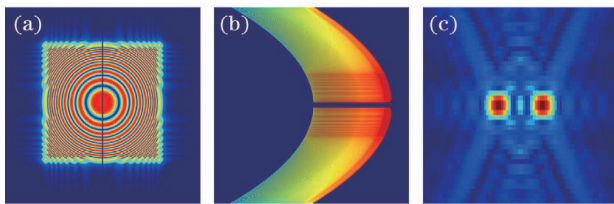


图 4 高通滤波的 K 空间变换结果。(a)高通滤波后透射光的空间频谱;(b) K 空间变换后的空间频谱;(c) $x-z$ 平面的强度

Fig. 4 K-domain transformation results of high-pass filtering. (a) Spatial spectrum of transmitted light after high-pass filtering; (b) spatial spectrum after K-domain transformation; (c) strength of $x-z$ plane

2.3 数值模拟

为了验证本文所提出的高通滤波 K 空间变换

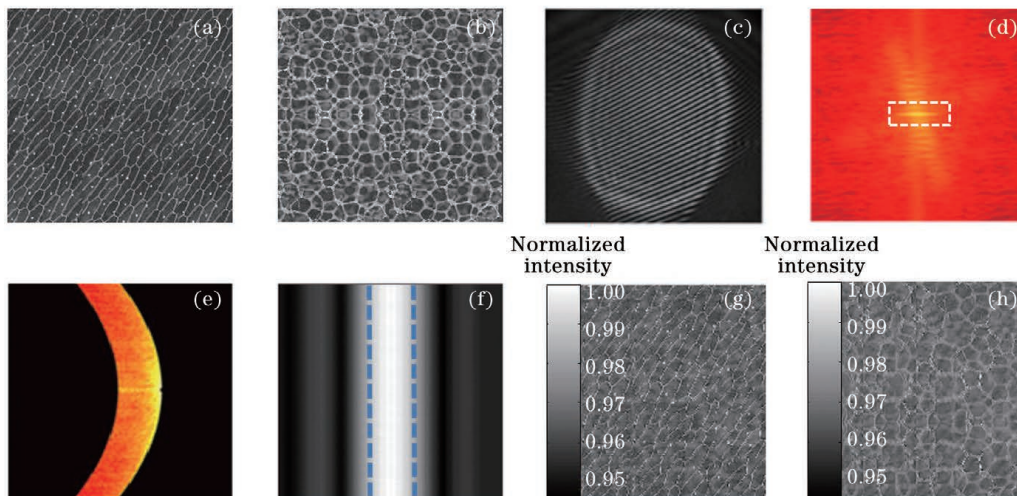


图 5 无高通滤波的透射式 K 空间变换成像。(a)模拟样品图 1;(b)模拟样品图 2;(c)全息图;(d)物光频谱;(e) $y-z$ 平面上的频谱;(f) $y-z$ 平面上的强度;(g)模拟样品图 1 的模拟再现结果;(h)模拟样品图 2 的模拟再现结果

Fig. 5 Transmission K-domain transform imaging without high-pass filtering. (a) Simulated sample image 1; (b) simulated sample image 2; (c) holograms; (d) spectrum on $y-z$ plane; (e) intensity on $y-z$ plane; (g) reconstructed image of sample 1; (h) reconstructed image of sample 2

采用本文所提的高通滤波技术重复上述再现过程,在得到图 5(d)的透射光频谱 $\tilde{O}(k_x, k_y)$ 后,令

成像技术的可行性,首先进行了数值模拟验证。模拟计算的过程中,图 5(a)和图 5(b)中两个纯振幅型样品均沿着轴向并以 3 mm 的间距平行放置,作为被成像的三维样品。假定形成片状照明光的柱透镜在 x 方向的数值孔径为 0.1,照明光波长为 632.8 nm,在样品后 25 mm 的距离处可以得到图 5(c)的数字全息图。采用传统的离轴全息重建技术对全息图进行重建,并对重建的物光波进行傅里叶变换可以得到图 5(d)的透射光频谱 $\tilde{O}(k_x, k_y)$ 。根据坐标变换公式可以计算出图 5(e)的透射光 $\tilde{O}(x, y)$ 在 k_x-k_z 面上的空间谱分布 $\tilde{O}'(k_y, k_z)$,对 $\tilde{O}'(k_y, k_z)$ 进行傅里叶逆变换可以得到图 5(f)在 $y-z$ 平面上的光场分布,其中两条虚线分别表示两层样品实际所处的位置,但由于很强背景光的存在,所以在图中观察不到这两条线。将图 5(a)和图 5(b)中的两层样品均沿着图 1 的 x 方向进行横向扫描并重复上述重建过程,接着将每次得到的图 5(f)两条亮线处的强度分别进行拼接,即可得到图 5(g)和图 5(h)的再现像。从图 5 可以看到,虽然图 5(g)和图 5(h)分别能体现图 5(a)和图 5(b)的结构信息,但彼此之间存在明显串扰,而且对比度都只有 1% 左右,因此对于存在各种噪声干扰的实际实验来说,将不可能从这两幅图中得到任何有用的样品信息。

图 5(d)虚线框内的低频成分为零,并对其进行坐标变换即可得到 k_x-k_z 面上的空间谱分布 $\tilde{O}'(k_y,$

k_z),接着对 $\tilde{O}'(k_y, k_z)$ 进行傅里叶逆变换即可得到图 6(a)的两条亮线,这两条亮线就是两层样品被照明的位置。对物体进行横向扫描后将每个位置的这两条亮线进行拼接,可以得到图 6(b)和图 6(c)的再现像。图 6(b)和图 6(c)之间完全没有串扰,而且都

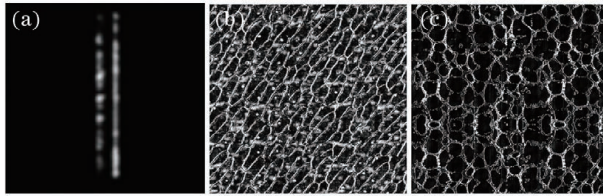


图 6 高通滤波透射式 K 空间变换成像的结果。(a) $y-z$ 平面上的强度分布;(b)高通滤波 K 空间变换再现像 1;(c)高通滤波 K 空间变换再现像 2

Fig. 6 High pass filter transmission K-domain transform imaging results. (a) $y-z$ plane intensity distribution; (b) reconstructed image 1 by high-pass filtering K-domain transform; (c) reconstructed image 2 by high-pass filtering K-domain transform

具有接近 1.0 的高对比度。将其与图 5(a)和图 5(b)进行对比,发现图 6(b)和图 6(c)分别为其强度微分像。图 6 的数值模拟结果与理论分析结果完全吻合,证明了本文所提的高通滤波 K 空间变换技术可以利用透射光来获得对比度良好的三维像。

3 实验与分析

根据图 1 的原理并按照图 7(a)的光路搭建了实验系统。波长为 632 nm 的 He-Ne 激光经过准直和扩束后转变为平行光,然后被分光棱镜分为两束。一束被一个焦距为 20 cm 的柱面透镜聚焦成片状光束后照射在样品上,另一束通过另一个焦距为 20 cm 的柱面透镜后形成一个片状的参考光,样品的透射光和参考光被分光棱镜合束后在 CCD 上形成离轴全息图。

实验所用的样品是一个厚度为 4 mm 的玻璃板,在玻璃板的前后两个表面使用飞秒激光分别加

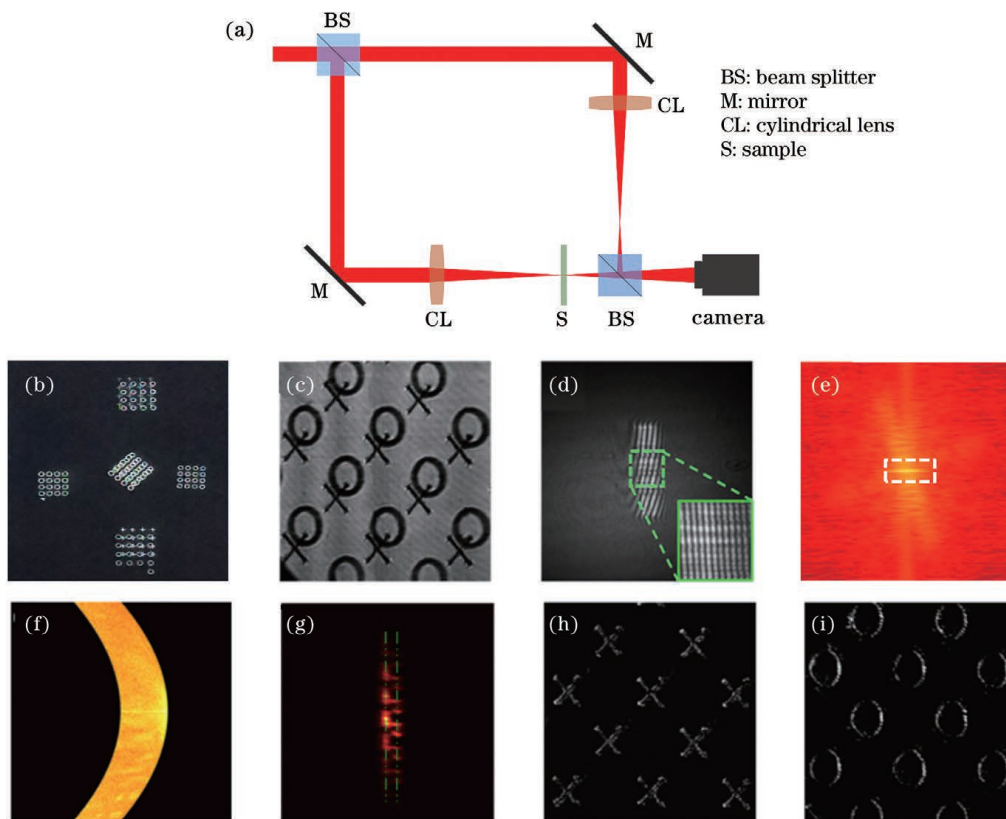


图 7 实验光路和实验结果。(a)实验装置;(b)实验样品;(c)样品的显微结构;(d)离轴全息图;(e) $x-y$ 平面上的物光频谱;(f) $y-z$ 平面上的物光频谱;(g) $y-z$ 平面上的强度分布;(h)第一层再现像;(i)第二层再现像

Fig. 7 Experimental optical path and experimental results. (a) Experimental equipment; (b) experimental sample; (c) microstructure of sample; (d) off-axis holograms; (e) spectrum of object light in $x-y$ plane; (f) spectrum of object light on $y-z$ plane; (g) intensity distribution on $y-z$ plane; (h) reconstructed image of 1st layer; (i) reconstructed image of 2nd layer

工出微小的十字“十”和圆圈“○”阵列,图案的刻痕宽度为 $80\ \mu\text{m}$ 。图 7(b)为样品照片,图 7(c)为普通透射显微镜下样品的显微结构。从图 7(c)可以看到,十字“十”和圆圈“○”的像重叠在一起,两个面的信息完全混叠。由于光在经过样品的过程中被“十”和“○”的刻痕散射,所以图 7(c)样品的刻痕呈现黑色。图 7(d)为实验中所记录的一幅透射全息图,其中离轴干涉条纹清晰可见。图 7(e)为利用普通数字全息重建技术得到的 x - y 平面上物光的频谱 $\tilde{O}(k_x, k_y)$,将其中心虚线位置处的低频部分数值设为零,并按照 K 空间变换关系进行坐标变换即可得到图 7(f)在 y - z 平面上的物光频谱 $\tilde{O}'(k_y, k_z)$,对图 7(f)进行傅里叶逆变换即可得到图 7(g)的两条亮线。将样品沿着 x 方向进行扫描并将全部得到的两条亮线进行拼接,可以得到图 7(h)和图 7(i)的两层再现像。从图 7(h)和图 7(i)可以看到,两幅图像彼此之间无任何串扰而且都具有良好的对比度。由于再现像是样品在 x - y 平面上的强度微分像,因此图 7(h)和图 7(i)中的刻痕呈现为亮线,呈现与图 7(c)相反的对比度,这也与理论分析结果完全吻合。

4 结 论

为了给 X 射线和电子束显微成像领域提供一种简单且方便的三维成像工具,本文基于高通滤波技术对本课题组前期提出的 K 空间变换数字全息三维成像技术进行了改进,使其可以实现透射光路的数字全息三维成像。首先使用片状光束对样品进行照明,并记录透射光的离轴全息图;然后利用传统的数字全息重建技术得到透射光的复振幅,接着计算透射光的复振幅频谱并去除其低频分量;最后在频谱空间进行坐标变换,并对变换后的空间频谱进行傅里叶逆变换,即可得到被照明切片平面上的样品结构信息。在对其工作原理和主要参数进行系统理论分析的基础上,本文利用数值模拟和光学实验对此方法的可行性进行实际验证,证明所提技术可以很好地克服原始技术只能工作在反射光路的技术局限,可为 X 射线和电子束等短波长显微成像领域提供一种简单且方便的三维成像新技术。

参 考 文 献

- [1] Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4373-4377.
- [2] Schnars U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 179-181.
- [3] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [4] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [5] Marquet P, Rappaz B, Magistretti P J, et al. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 468-470.
- [6] Wen K, Ma Y, Zhang M L, et al. Quantitative phase microscopy with high stability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 200001. 温凯, 马英, 张美玲, 等. 高稳定性定量相位显微技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 200001.
- [7] Ren Z B, Lin Y M. Progress in optical scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111009. 任振波, 林彦民. 光学扫描全息术研究进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111009.
- [8] Xu W B, Jericho M H, Meinertzhagen I A, et al. Digital in-line holography for biological applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(20): 11301-11305.
- [9] Matoba O, Nomura T, Perez-Cabre E, et al. Optical techniques for information security [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1128-1148.
- [10] Ferraro P, de Nicola S, Finizio A, et al. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(11): 1938-1946.
- [11] Grilli S, Ferraro P, de Nicola S, et al. Whole optical wavefields reconstruction by digital holography [J]. *Optics Express*, 2001, 9(6): 294-302.
- [12] Dubois F, Schockaert C, Callens N, et al. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5895-5908.
- [13] Su X Y, Li J T, Cao Y P, et al. *Information optics* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 282-283. 苏显渝, 李继陶, 曹益平, 等. *信息光学* [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011: 282-283.

- [14] Choi W, Fang-Yen C, Badizadegan K, et al. Tomographic phase microscopy[J]. *Nature Methods*, 2007, 4(9): 717-719.
- [15] Choi W, Fang-Yen C, Badizadegan K, et al. Extended depth of focus in tomographic phase microscopy using a propagation algorithm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 171-173.
- [16] Jo Y J, Cho H, Lee S Y, et al. Quantitative phase imaging and artificial intelligence: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(1): 18035546.
- [17] Habaza M, Gilboa B, Roichman Y, et al. Tomographic phase microscopy with 180° rotation of live cells in suspension by holographic optical tweezers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1881-1884.
- [18] Gass J, Dakoff A, Kim M K. Phase imaging without 2π ambiguity by multi-wavelength digital holography [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(13): 1141-1143.
- [19] Zhang X D, Liu C, Zhu J Q. K-domain transform based three-dimensional microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(22): 221106.
- [20] Wang Y, Wang L H, Wang J Q, et al. Investigation of organic matter pore structures of shale in three dimensions of shale using nano-X-ray microscopy[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017, 36(6): 563-573. 王羽, 汪丽华, 王建强, 等. 利用纳米透射 X 射线显微成像技术研究页岩有机孔三维结构特征[J]. *岩矿测试*, 2017, 36(6): 563-573.
- [21] Li Y J, He X L, Kong Y, et al. Shearing interferometric electron beam imaging based on ptychographic iterative engine method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(13): 134202. 李元杰, 何小亮, 孔艳, 等. 基于电子束剪切干涉的 PIE 成像技术研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(13): 134202.
- [22] Li Y, Zhang J Y, Zhang Y L, et al. In-line phase-shifting holography technology based on multi-focal photon-sieve array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0309003. 李优, 张军勇, 张艳丽, 等. 基于多焦点光子筛阵列的同轴相移全息技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0309003.
- [23] Wang H F, Gan F X. High focal depth with a pure-phase apodizer[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(31): 5658-5662.
- [24] Wang H F, Gan F X. Phase-shifting apodizers for increasing focal depth[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25): 5263-5266.
- [25] Tang S J, Tang X Y. Radial differential interior tomography and its image reconstruction with differentiated backprojection and projection onto convex sets [J]. *Medical Physics*, 2013, 40(9): 091914.

Transmission Mode K-domain Transform Based Digital Holographic Three-Dimensional Imaging Technology

Zhang Xi¹, Wang Shouyu¹, Kong Yan¹, He Xiaoliang¹, Jiang Zhilong¹, Liu Cheng^{1,2*}

¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective Compared to traditional holography that relies on silver salt films, digital holography can reconstruct sample wavefront from holograms recorded by digital cameras via Fresnel transform as modern image processing. Therefore, digital holography is more convenient, fast and been widely studied and used in biological tissue imaging, particle tracking, encryption and measurements. Although refocusing is required, samples in digital holography can be focused at any depth for observation, whereas ordinary digital holography cannot provide sample tomographic structure. Optical diffraction tomography via angular scanning has been proposed as a method for obtaining tomographic imaging by combining computed tomography and holography; however, the optical system is complex and the spatial resolution is considerably limited by the accuracy and the range of the scanning mechanism. Multi-wavelength digital holography similar to optical coherence tomography has also been designed for tomographic imaging and it completely avoids the mechanical scanning in the imaging process. The samples, however, have different refractive indices for different wavelengths due to the dispersion effect. To address the shortcomings of traditional digital holographic tomography, this paper proposes a transmission mode K-domain transform-based digital

holographic three-dimensional imaging method that requires only a single wavelength and one-dimensional sample scanning and is completely different from existing methods.

Methods In transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method, light sheet formed by a cylindrical lens is used to illuminate the sample and the off-axis hologram of the transmitted light is recorded via the interference between another reference light sheet. After the complex amplitude of the transmitted light is obtained using the traditional digital holographic reconstruction method, its spectrum is calculated and its low-frequency component is removed via high-pass filtering. Thus, the component of zero-order transmitted light is filtered out, and the high-order diffracted light is enhanced. Then the K-domain transformation is implemented on the spectrum space. The inverse Fourier transform is finally performed on the transformed spatial spectrum to obtain the tomographic sample structure illuminated by the light sheet through one-dimensional scanning. Because the low-frequency component has been removed, the reconstructed images are differential intensity images with intensities that are inverse to the bright field images. They do, however, retain the same structural information as the sample.

Results and Discussions According to theoretical analysis, the principle of transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method is explained (Fig. 1). Then, the characteristics of the method are analyzed by mathematical principle and physical model (Fig. 2). Based on the analyses above, a high-pass filtering algorithm is proposed and its feasibility has been verified (Fig. 3 and Fig. 4). By filtering the low-frequency spatial spectrum of the transmitted light, the tomographic sample structure can be obtained accurately and swiftly via K-domain transforming and one-dimensional scanning. Furthermore, some low-frequency spatial spectrum loss does not affect axial resolution but slightly improves lateral resolution. As a result, even after filtering out some of the low-frequency components, the axial and lateral resolutions of the system are still primarily determined by the numerical aperture of the imaging system. But because the low-frequency components are filtered out, the image obtained is the differential image of the observed object in the transverse direction. The influence of high-pass filtering on reconstructed image quality is analyzed by a set of numerical simulation, and the necessity of high-pass filtering algorithm is proved (Fig. 5). Furthermore, numerical simulations (Fig. 6) and experiments (Fig. 7) in this paper are used to validate the feasibility of this transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method.

Conclusions This paper reports a transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method, which is theoretically analysed and verified by both numerical simulations and experiments, to provide a simple and convenient tomographic imaging tool for the field of X-ray and electron beam microscopy, based on our previously proposed K-domain transform-based tomography. This paper reports a transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method, which is theoretically analysed and verified by both numerical simulations and experiments, to provide a simple and convenient tomographic imaging tool for the field of X-ray and electron beam microscopy, based on our previously proposed K-domain transform-based tomography. It is proved that the method based on high-pass filtering can overcome the technical limitation that our previously proposed K-domain transforming based tomography can only work in the reflection light path. Furthermore, since this three-dimensional imaging method works in transmission mode, it has a much simpler optical alignment. Therefore, it can be adopted for ultra-high microscopic three-dimensional imaging with coherent synchrotron radiation. Furthermore, the illuminating light sheet is used to repeatedly scanning the sample, which can quickly generate a three-dimensional image of the entire sample quickly. As a result, the newly proposed transmission mode K-domain transform-based digital holographic three-dimensional imaging method can provide a simple and practical tomographic imaging tool for X-ray and electron beam short-wavelength microscopic imaging.

Key words holography; digital holography; three-dimensional microscopy imaging; K-domain transformation; transmission imaging

OCIS codes 090.1995; 180.6900; 070.4690; 120.7000