

引用本文:张娅雅,段俊萍,张斌珍.基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量[J].光通信技术,2024,48(5):91-96.

基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量

张娅雅^{1,2},段俊萍²,张斌珍²

(1.山西科技学院,山西 晋城 048000;2.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘要:为了精确测量物体的形貌信息,提出了一种基于无透镜傅里叶变换数字全息的成像系统。首先,分析了无透镜傅里叶变换数字全息的成像原理,引入了倾斜平面校正方法;然后,搭建了成像系统平台,通过实验验证系统的成像性能。实验结果表明:系统的实际分辨率为 57.02 lp/mm。测量结果的相对误差仅为 3.95%,充分验证了该系统卓越的成像性能。

关键词:数字全息;形貌测量;相衬成像;反射式成像;无透镜傅里叶变换成像

中图分类号:O436;TN305.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)05-0091-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Structural morphology measurement based on lens-less Fourier transform digital holography

ZHANG Yaya^{1,2}, DUAN Junping², ZHANG Binzhen²

(1. Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng Shanxi 048000, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to accurately measure the morphology information of objects, an imaging system based on lensless Fourier transform digital holography is proposed. Firstly, the imaging principle of lensless Fourier transform digital holography was analyzed, and a tilt plane correction method was introduced. Then, an imaging system platform was built and the imaging performance of the system was verified through experiments. The experimental results show that the actual resolution of the system is 57.02 lp/mm. The relative error of the measurement results is only 3.95%, fully verifying the excellent imaging performance of the system.

Key words: digital holography, profile measurement, phase contrast imaging, reflective imaging, lensless Fourier transform imaging

0 引言

数字全息成像技术作为一种无损、无标记的相干成像方法,能够广泛探测薄样品的形貌和折射率分布,目前在生物成像、文物保护和无损检测等领域得到了深入应用^[1-4]。依据成像系统内记录结构是否包含

物光与参考光之间的夹角特征,可以将系统细分为同轴数字全息成像系统与离轴数字全息成像系统两大类。同轴数字全息成像记录结构中,物光和参考光共路,结构简单且紧凑^[5-6]。但是,这种方法限制了被测样品的尺寸,并且消除零级像和共轭像所需的相位复原迭代算法耗时较长,严重影响了物波前再现的速度。基于物光与参考光共路离轴的数字全息成像方法通过频谱滤波很快去除零级像和共轭像^[7],但是这种方法仍然限制了被测样品的尺寸。通过采用分束器件和空间滤波器相结合的方式可以扩大被测样品照明区域,但这会使成像系统的结构变得更加复杂^[8]。利用基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)或迈克尔逊(Michelson)干涉原理的相移离轴干涉技术,在数字全息记录过程中,通过连续捕获并分析具有多个预设相移量的全息图像序列,能够有效抑制并消除由于干涉效应产生的李

收稿日期:2024-04-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(5217555)资助;山西省基础研究计划资助项目(202203021222336)资助;山西省高等学校教学改革创新立项项目(J20231863)资助。

作者简介:张娅雅(1988—),女,博士,讲师,主要从事数字全息成像、太赫兹成像、太赫兹波超材料等领域的研究工作。包括相干超分辨率成像、连续太赫兹波全场成像、太赫兹波吸波超材料的研究,以及在无损检测、生物医学、材料表征方面的应用研究。主持了2项省级项目,参与了多项国家级项目。



张娅雅,段俊萍,张斌珍:基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量

生像干扰,从而显著提升全息图像的质量与清晰度。尽管这种物光与参考光分开光路的结构成功克服了被测样品尺寸受限的问题,但在实现实时记录方面仍面临挑战^[9]。菲涅耳离轴数字全息技术仅需记录一幅离轴全息图^[1],便能通过频谱滤波技术有效剔除零级像与共轭像的干扰。随后,无论是应用菲涅耳算法还是角谱再现算法,均可精确提取出物体的波前信息。然而,这2种再现方法均涉及多次傅里叶变换操作,并需借助自聚焦算法来确定精确的再现距离,这一过程在追求实时成像的场景中显得不够高效。相较于同轴或非涅耳离轴数字全息成像系统,无透镜傅里叶变换数字全息成像方法采用球面参考波与物光波在记录面上进行干涉以产生无透镜傅里叶变换数字全息图。该全息图不仅精准捕捉了物光波的空间频谱信息,还显著简化了成像流程——无需精确测定记录距离,仅需对采集的全息图执行一次傅里叶变换处理,即可高效重建出物像的强度分布,实现了全息成像的便捷与高效^[10]。因此,无透镜傅里叶变换数字全息成像方法因其适合实时成像与动态观测的特性,被广泛应用于物体形貌测量、生物医学及温度测量等领域^[11-13]。目前,该成像方法还在太赫兹、极紫外等众多波段上展开了深入的相关研究^[14-15]。

本文提出一种新的基于无透镜傅里叶变换数字全息的全息成像系统,用于测量物体的形貌。系统采用反射式凹面镜生成球面参考光束,简化记录结构,避免传统方法中采用物镜或光纤头时系统结构复杂且稳定性差的问题。

1 基本原理

1.1 无透镜傅里叶变换数字全息图的记录和再现

无透镜傅里叶变换数字全息成像系统记录原理图如图1所示。其中, x_0-y_0 和 $x-y$ 分别作为物平面和

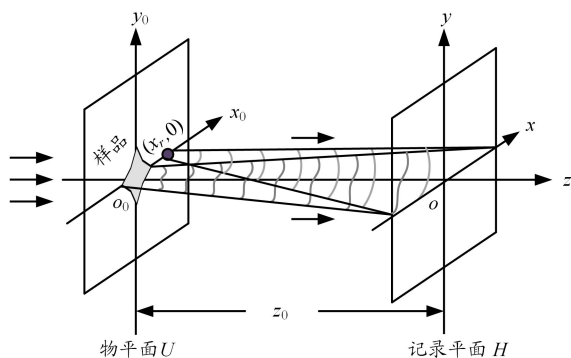


图1 无透镜傅里叶变换数字全息成像系统记录原理图

记录平面的坐标系。平面波沿着 z 方向照射物体。在无透镜傅里叶变换数字全息成像系统结构中,物体和球面参考光的点源 $(x_r, 0)$ 必须保持在同一平面。

物光在物平面的复振幅分布表示为 $O_0(x_0, y_0)$ 。根据菲涅耳衍射公式,在傍轴近似条件下,忽略常数相位因子,到达记录平面的物光波复振幅分布 $O(x, y)$ 可以描述为

$$\left\{ \begin{aligned} O(x, y) &\propto \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \iint_{\Sigma} O_0(x_0, y_0) \times \\ &\quad \exp\left[\frac{jk}{2z_0}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right] dx_0 dy_0 \quad (1) \\ &\quad \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] F\{O'_0(x_0, y_0)\} \\ O'_0(x_0, y_0) &= O_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \end{aligned} \right.$$

其中, $F\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换运算, z_0 为物体至记录平面的距离,波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 为波长,记录平面参考光复振幅 $R(x, y)$ 的焦点坐标为 $(x_r, 0)$, $R(x, y)$ 的光场分布为

$$R(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{jk}{z_0}(xx_r)\right] \quad (2)$$

物光束和参考光在记录平面干涉并产生全息图。全息图的强度可以表示为

$$I(x, y) = |O+R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + O^*R + OR^* \quad (3)$$

其中, $*$ 表示共轭。前2项包含了零级分量,第三项和第四项分别对应于包含共轭像和原始像分量。利用频谱滤波的方法可以抑制零级项和孪生像的干扰。

式(3)中的第4项是原始像,它可以表示为

$$O(x, y)R^*(x, y) \propto \exp\left[-\frac{jk}{z_0}(xx_r)\right] F\{O'_0(x_0, y_0)\} \quad (4)$$

重建的物体复振幅 $O(x', y')$ 分布为

$$\left\{ \begin{aligned} O_{+1}(x', y') &= F^{-1}\{O(x, y)R^*(x, y)\} \\ &\propto O_0(x'-x_r, y') \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x'-x_r)^2\right] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中, $x'-y'$ 是重建像平面坐标, $F^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换。

在全息图的记录过程中,由于采用了电荷耦合器件(CCD),记录平面(CCD平面)与重建像平面之间的像素尺寸关系可以表示为:水平方向上, $\Delta x' = \lambda z_0 / (M \Delta x)$;竖直方向上, $\Delta y' = \lambda z_0 / (N \Delta y)$ 。其中, $(\Delta x, \Delta y)$ 和 $(\Delta x', \Delta y')$ 分别代表记录平面和重建像平面的水平和竖直方向像素尺寸, M 和 N 则分别表示水平和竖直方向上的像素个数。

物体重建的相位分布 $\varphi(x', y')$ 计算式为

$$\varphi(x', y') = \arctan \left\{ \frac{\operatorname{Re}[O(x', y')]}{\operatorname{Im}[O(x', y')]} \right\} \quad (6)$$

其中, Re 和 Im 分别表示复数的实部和虚部。通过式(6)计算出被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 的相位。对该包裹相位进行解包裹和消除相位畸变的运算后可以得到被测物体的真实相位信息。对于反射型样品, 相位与物体形貌高度信息 $h(x', y')$ 之间的关系为

$$h(x', y') = \frac{\varphi(x', y') \lambda}{4\pi} \quad (7)$$

1.2 倾斜平面再现像的校正方法

在众多反射式成像系统中, 基于倾斜照明的记录结构被广泛应用。本文提出的反射式无透镜傅里叶变换数字全息成像系统采用倾斜照明的记录结构, 其记录原理如图 2 所示。物平面 U 与平面波存在 α 角, 这时存在倾斜照明使得物平面上的光斑是椭圆形, 物体的法线方向和反射物光波之间也存在夹角 α 。待校正倾斜像平面 $U'(x', y', z')$ 需要旋转 α 角才能映射到校正后像平面 $U''(x'', y'', z'')$ 。校正的过程分为 2 步: 第一步, 需要将全息图进行傅里叶变换, 再现出平行于记录平面的像平面 U' , 即 $\hat{U}'(f_x, f_y) = \delta[U'(x', y')]$, (f_x, f_y) 和 $(f_{x'}, f_{y'})$ 分别表示校正前后平面的频域坐标。第二步, 再现倾斜像平面 U' 围绕 y 轴旋转角度 α 至校正后的像平面 U'' 。这里, 假设 U' 和 U'' 这 2 个平面坐标系共享坐标原点, 因此只需要计算坐标旋转的公式即可得到正确的再现像平面。

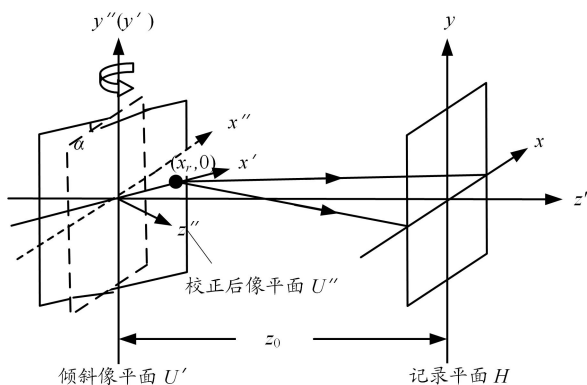


图 2 反射式无透镜傅里叶变换数字全息成像系统记录原理图

待校正像平面 U' 与校正后像平面 U'' 的频域坐标的对应关系^[16]如下:

$$\begin{pmatrix} f_{x'} \\ f_{y'} \\ f_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中, $(f_{x'}, f_{y'})$ 为校正后像平面的频域坐标系。将式(8)展开可以得到

$$\begin{cases} f_{x'} = \xi(f_x, f_y) = f_x \cos \alpha + f_z \sin \alpha \\ f_{y'} = \eta(f_x, f_y) = f_y \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中, } f_z = \sqrt{\frac{1 - (f_x')^2 - (f_y')^2}{\lambda}}.$$

在频率空间坐标变换后, 利用傅里叶变换表示光波场时, 根据能量守恒定律, 积分面元还需满足数学关系 $df_x df_y = |J(f_x, f_y)| df_x df_y$, 其中 $J(f_x, f_y)$ 为雅克比行列式^[17]。

$$|J(f_x, f_y)| = \begin{vmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial f_x} & \frac{\partial \xi}{\partial f_y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial f_x} & \frac{\partial \eta}{\partial f_y} \end{vmatrix} = \cos \alpha + \sin \alpha \frac{f_x}{f_z} \quad (10)$$

最终校正后的倾斜再现像的复振幅分布表示为

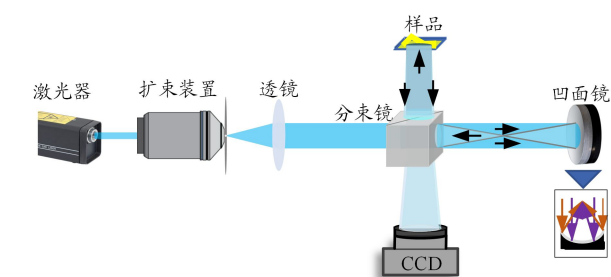
$$U''(x'', y'') = \iint \hat{U}'[\xi(f_x, f_y), \eta(f_x, f_y)] \times \exp[j2\pi(f_x x' + f_y y')] |J(f_x, f_y)| df_x df_y \quad (11)$$

由于实际记录的数字全息图是离散值, 在进行傅里叶变换计算时, 采样是等间隔的, 所以上面的计算必须要通过插值获得。为了得到准确的计算结果, 选择双三次插值方法比较合适。倾斜平面的采样间隔需要满足不等式 $\Delta x'' > \lambda / (2 \cos \alpha)$ ^[18], 其中 $\Delta x''$ 是校正图像平面中的像素间距, 与 $\Delta x'$ 相等。

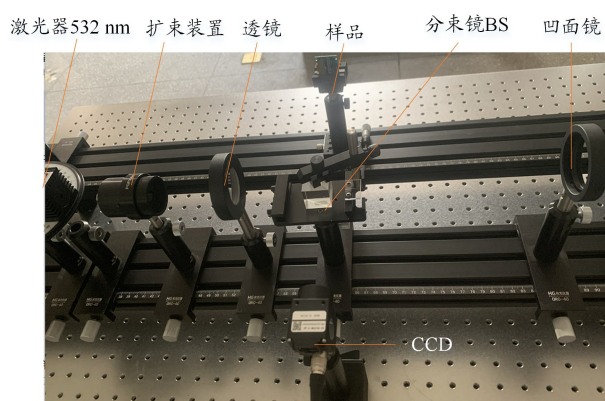
2 实验装置

系统实验装置示意图和实物图如图 3 所示, 该装置使用 He-Ne 激光器 ($\lambda = 532 \text{ nm}$, 线性偏振, 输出功率为 0.8 mW)。激光器输出的光束经过扩束装置对照明光斑进行扩束, 该扩束装置由显微镜物镜 ($40\times$, 数值孔径 $(\text{NA}) = 0.65$) 和直径为 $10 \mu\text{m}$ 的针孔组成, 然后光束经过 $L_1 (f = 100 \text{ mm}, d = 10 \text{ cm})$ 对其进行准直, 变为平行光束。随后, 光束通过 50:50 的立方体分束器 (Thorlabs BS016, 非偏振, 体积为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) 分成传播方向相互垂直的 2 束平行光, 其中被反射的光束用于照明反射型样品, 携带了物体信息变成物光束, 另一束透过分束器后被镀银的凹面镜 ($f = 101.6 \text{ mm}$) 反射变为球面参考光。本系统的离轴角为 3.8° 。将样品置于二维平移台上方便调整物体到探测器的距离, 最终调整至与球面参考光的点源至探测器的距离保持一致, 这也是无透镜傅里叶变换数字全息记录结构的一个显著特点。最后, 物光束与球面参考光束在探测器 (CCD 像

张娅雅,段俊萍,张斌珍:基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量



(a) 系统实验光路示意图



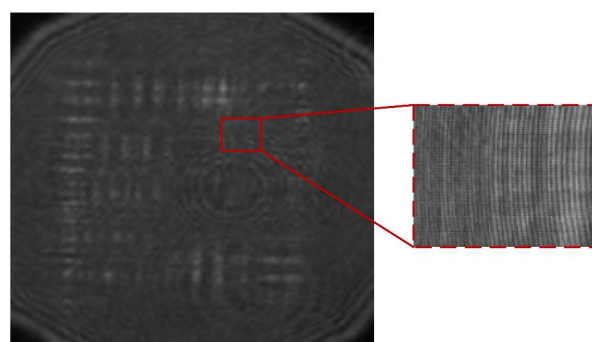
(b) 系统实物图

图3 无透镜傅里叶变换数字全息成像系统实验光路图

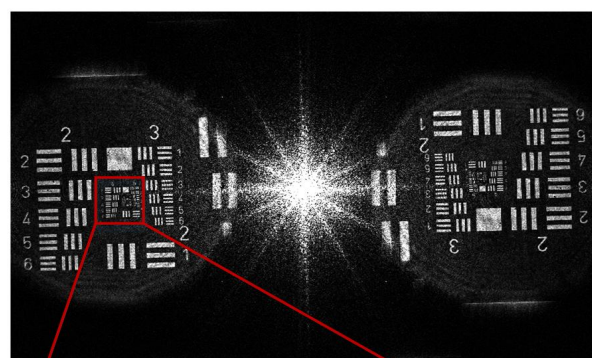
素数为 $2\,704 \times 2\,704$, 像元尺寸: $3.96\,\mu\text{m}$)平面处干涉并产生无透镜傅里叶变换全息图。

3 实验结果分析与讨论

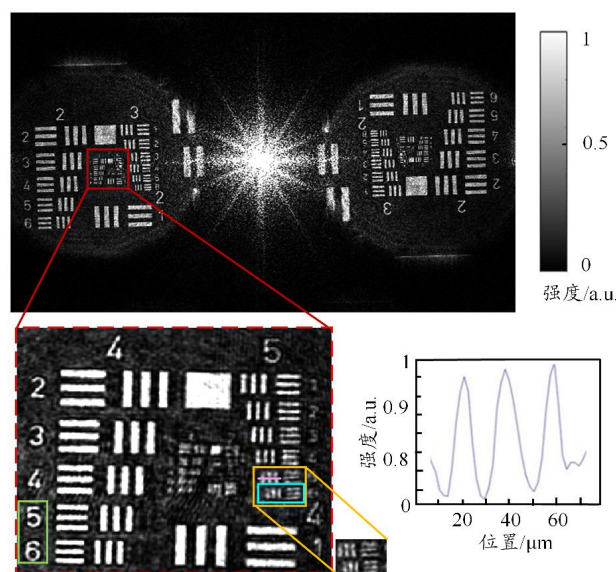
为了验证系统成像的有效性,首先对 USAF1951 分辨率测试板进行实验测试本系统的成像分辨能力。实验记录的全息图如图4(a)所示。图4(a)中,红色矩形框为选择计算条纹衬比度的区域,通过其放大图可以看出,干涉条纹的衬比度很高(经过计算干涉条纹的衬比度为0.65)。此外,探测器靶面的限制使得重建物波前受到干扰。为了削弱这种影响,本文采用Tukey窗函数与数字全息图相乘,该函数的作用是对数字全息图进行切趾处理^[19]。同时,由于样品表面的高反射性,它与分束器、探测器之间会产生多次反射,进而影响全息图的记录。为消除这一影响,本文将物体倾斜放置于置物架上,实验中物体倾斜的角度为 13° ,随后使用倾斜平面校正算法对其进行校正。图4(b)中,通过细节放大图可以看出,绿色方框中的数字和橘色方框中的线对,均不清晰。通过图4(c)中的细节放大图可以看出,经过校正后使得上述2个方框中的信息更加清晰,更接近真实的物信息分布。其中,右图为放大图中划线处线对的强度分布曲线;蓝色方框表示该系统能清晰



(a) 全息图



(b) 经过傅里叶变换后得到的再现振幅像的全息图



(c) 经过倾斜平面校正算法后的重建结果

图4 分辨率板的实验结果图

成像到第五组第六个元素,该元素线宽为 $8.77\text{ }\mu\text{m}$,表明系统分辨率达到 57.02 lp/mm 。此外,样品与探测器的距离 d 为 112 mm ,基于 $\lambda d/M\Delta x$ 计算得出的理论分辨率 δ 为 $5.56\text{ }\mu\text{m}$,这一特性尤其适合样品形貌的精确成像测量,充分证明了该系统在成像分辨能力上的卓越表现。

为了验证系统对样品结构形貌测量的有效性,本文选取了具有高可见光反射性的金属材质硬币作为实验样品。样品实物如图 5(a)所示,红色方框为光斑照射区域。记录的全息图如图 5(b)所示。经过倾斜校正和

一次傅里叶变换后的重建振幅分布图如图 5(c)所示。右图为将+1 级截取出来的细节放大图,可以看出蚀刻字母“pp”的再现强度像非常清晰。在实验过程中,每当完成一幅全息图的记录后,移除物体并额外记录一张不含物体信息的全息图。随后,对这 2 张全息图分别进行相同的包裹相位再现计算处理,并将结果相减,所得即为仅包含物体信息的包裹相位图。图 5(d)为基于最小二乘解包裹算法再现的硬币的重建相位像^[20],右图为再现相位像中白色实线部分的相位分布曲线。图中每根线宽的计算结果为 $415.8\text{ }\mu\text{m}$,而实际测量硬币该区域的线宽为 $400\text{ }\mu\text{m}$,因此得出的相对误差为 3.95% 。图 5(e)为相位分布的三维显示图,可以清楚地看出字母中凹陷和凸出部分。根据相位差与样品蚀刻深度的关系式 $h=\Delta\varphi\lambda/(4\pi)$,可以计算出样品的刻蚀深度为 $375\text{ }\mu\text{m}$ 。随后,使用螺旋测微器对样品上相应字母区域,刻蚀深度进行了精确测量,实际测得深度为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,计算值与实际测量值之间的相对误差为 6.25% 。

4 结束语

本文提出了一种基于凹面镜的反射式无透镜傅里叶变换数字全息成像系统。本系统的数值重建流程简化至极,仅需对全息图执行单次傅立叶变换,从而显著提升了物波前的重建速度。鉴于样品在实际放置中可能存在的倾斜角度,本系统采用基于频谱坐标变换的方法来校正倾斜图像平面上物体波前的复振幅。通过对 2 个不同样品的成像实验,均验证了本系统的高效性和可靠性。特别地,在第二个硬币样品的实验中,尽管其表面存在一定磨损,但系统仍能成功重建其像。本文提出的成像系统在材料表征、物体动态无损检测等多个领域均展现出广阔的应用前景,并且该成像架构还具有拓展至其它波段相干衍射成像领域的潜力。

参考文献:

- [1] SCHNARS U, JUEPTNER W. Digital holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques [M]. Springer Berlin, Heidelberg, 2005.
- [2] 查宝飞,王祉涵,苏衍峰,等. 基于共定位相位成像的白细胞亚结构特征参数研究[J]. 中国激光, 2024, 51(3): 84-92.
- [3] GROOT P, DECK L, SU R, et al. Contributions of holography to the advancement of interferometric measurements of surface topography[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2022, 3(2): 258-277.
- [4] 周文静,李安琦,陈振凯,等. 壁画文物缺陷的数字全息检测与分析[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 157-167.
- [5] 刘迪,王玉荣,孟祥锋,等. Gabor 同轴数字全息的多重再现与自动聚

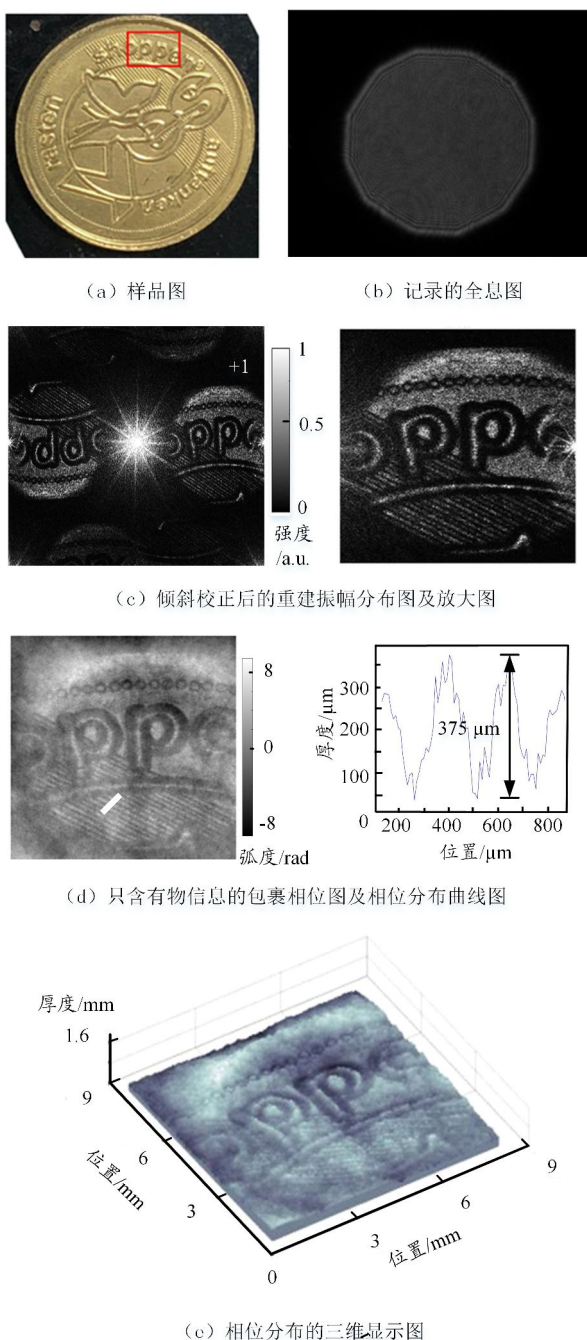


图 5 硬币的形貌测量实验结果

张娅雅,段俊萍,张斌珍:基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量

- 焦[J]. 中国激光,2014,41(9):236-244.
- [6] 赵洁,金晓宇,王大勇,等. 基于物理增强神经网络的连续太赫兹波同轴数字全息成像[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(18):28-36.
- [7] DAYONG W, YAYA Z, LU R, et al. Continuous-wave terahertz self-referencing digital holography based on Fresnel's mirrors[J]. Optics Letter, 2020, 45(4): 913-916.
- [8] 王华英,雷家良,王学,等. 基于分束棱镜分光的共路离轴数字全息显微术研究[J]. 中国激光,2022,49(13):113-121.
- [9] 张美玲,郜鹏,温凯,等. 同步相移数字全息综述(特邀)[J]. 光子学报,2021,50(7):9-31.
- [10] WAGNER C, SEEBACHER S, OSTEN W, et al. Digital recording and numerical reconstruction of lensless fourier holograms in optical metrology[J]. Applied Optics, 1999, 38(22): 4812-4820.
- [11] 王云新,王大勇,赵洁,等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. 光学学报,2011,31(4):117-122.
- [12] ANAND A, FARIDIAN A, CHHANIWAL V, et al. Single beam Fourier transform digital holographic quantitative phase microscopy[J]. Applied Physics Letter, 2014, 104: 103705-1-103705-5.
- [13] AGARWAL S, KUMAR V, SHAKHER C, Temperature measurement of wick stabilized micro diffusion flame under the influence of magnetic field using digital holographic interferometry, optics and lasers in engineering[J]. 2018, 102: 161-169.
- [14] YAYA Z, JIE Z, DAYONG W, et al. Lensless Fourier-transform terahertz digital holography for real-time full-field phase imaging[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 323-331.
- [15] MALM E, MONSERUD N, BROWN C, et al. Tabletop single-shotextreme ultraviolet Fourier transform holography of an extended object[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9959-9966.
- [16] MATSUSHIMA K. Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography[J]. Applied. Optics. 2008, 47(19): D110-D116.
- [17] MATSUSHIMA K, SCHIMMEL H, WYROWSKI F. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20: 1755-1762.
- [18] KIM Y, KIM G H, RY U, et al. Exact light propagation between rotated planes using non-uniform sampling and angular spectrum method[J]. Optics Communication, 2015, 344: 1-6.
- [19] 张延曹,赵建林,张伟,等. Tukey 窗函数用于数字全息图的切趾研究[J]. 光子学报,2007,36(12):2256-2260.
- [20] 钱晓凡,饶帆,李兴华,等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. 中国激光,2012,39(2):189-193.