

光学扫描全息术及其计算机仿真

梁万国¹ 袁乃荣² 谢敬辉¹ 赵达尊¹ 赵业玲¹

(¹ 北京理工大学光电工程系 北京 100081; ² 河北师范大学物理系 石家庄 050016)

提要 提出了一种新的全息术——光学扫描全息术,它是建立在光学扫描之上的光电混合处理技术。阐明了扫描全息术的基本原理,给出了计算机仿真的结果。

关键词 光学扫描,全息术,光电混合处理系统,计算机仿真

全息术是获得三维图像的一种方法^[1],在不丧失分辨率的前提下,它可以记录大场景的物体。全息术在许多方面已获得了成功(如粒子大小的测定和全息显微术)^[2~4]。但用传统的方法记录全息图时,由于较强的零级光的存在,致使全息图的衍射效率很低^[5],再加上记录和再现属于两个不同过程,很难做到全息图的实时操作。为此,美国弗吉尼亚州立大学 T. C. Poon 等提出了光学扫描全息术(OSH)^[6],它是一种建立在光学扫描之上的光电混合处理技术。在 T. C. Poon 等提出的 OSH 中,物体的三维信息用外差扫描记录。系统包括两个阶段:记录阶段(编码)和再现(解码)阶段。在记录阶段中,三维样品被与时间有关的菲涅耳波带板(TDFZP)作二维扫描。当样品被扫描时,光电探测器聚集传播到它上面的光,并产生一外差电流输出。包含样品的菲涅耳波带板(FZP)编码的电流被混频、放大等电学处理过程,产生解调信息并储存于计算机中,储存的信息是一种同轴菲涅耳波带板编码图像,它本质上是一种包含样品的三维信息的全息图。在再现(解码)过程中,存储于计算机中的全息图可以通过光学再现或数字再现,记录和再现是实时进行的。T. C. Poon 等提出的 OSH 中应用声-光调制器产生频率不同的两束光波,从而产生与时间有关的 FZP 对物体进行扫描。通过理论证明,光学外差是多余的。采用与时间无关的 FZP 信号对物体作非相干光扫描,同样可以采集物体的全部信息。由于我们提出的实验方案不用声-光移频器,在信号处理中省去了对外差信号进行混频、解调的电学处理单元,使得系统结构更简单。

本文提出并研究了光学扫描全息术的基本原理及其计算机模拟结果。

1 理论分析

采用的 OSH 的系统原理图如图 1 所示,由 He-Ne 激光器发出的光经过分光镜后分为两束光,其中一束光“1”经透镜 L_1, L_2 扩展后变为平行光,另外一束光“2”经透镜 L_3, L_4 后变为发散光波(球面波)。这两束光波经过分束器 BS 后产生实时 FZP,该 FZP 作用于物体,物体放在 $x-y$ 移动台上随着 $x-y$ 移动台一起运动,这相当于 FZP 扫描物体,这样在数学上实现了物体强

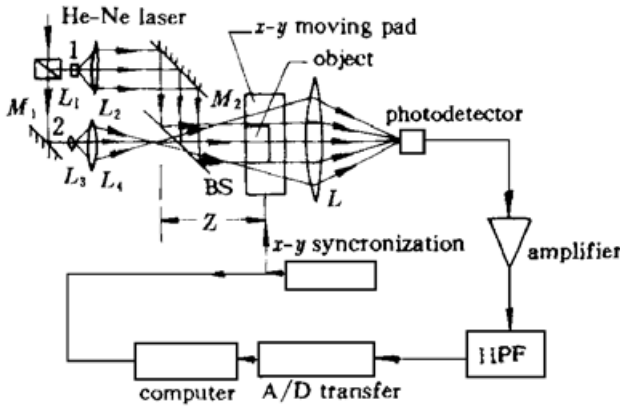


图 1 光学扫描全息术的基本光路布置

Fig. 1 The practical implementation of optical scanning holography

度透射率函数与 FZP 的卷积过程。聚光镜将二者卷积后的光场聚集到光电探测器上, 光电探测器把光信号转换为电信号, 然后该电信号经过放大器放大、滤波等电学处理后输入到 A/D 卡, 经过 A/D 卡转换的电信号输入到计算机中, 通过计算机处理后, 可以在计算机上显示出再现图像。x-y 同步器实现记录时扫描信号与计算机采集信号的同步。

由平面波和球面波干涉而产生的 FZP 式的干涉条纹。设传播于样品的平面波的复振幅为 A , 球面波的复振幅为 $B \frac{k_0}{2\pi z} \exp\left[-jk_0 \frac{x^2+y^2}{2z}\right]$, 式中 A, B 是常数, 分别代表平面波和球面波的振幅, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为波数, z 为由球面波的球心算起到物体之间的距离, 它代表物光波深度参数, 则 FZP 的强度由下式决定^[5]

$$I(x, y, z) = \left| A + B \frac{k_0}{2\pi z} \exp\left[-jk_0 \frac{x^2+y^2}{2z}\right] \right|^2 = A^2 + C^2 + 2AC \cos\left[\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)\right] \quad (1)$$

式中 $C = \frac{Bk_0}{2\pi z}$ 。

1.2 记录过程

当物体通过 x-y 移动台与 FZP 发生相对运动时, 光波不动, 这相当于光波(FZP)扫描物体。若移动台在 x 方向上以速度 v 运动, 且在 x 方向依次重复运动, x 方向上每次运动时对应于 y 方向上有不同的 y_m (物体上的点在 x, y 方向采用反射坐标)。则通过聚光镜 L 聚集后光电探测器接收的响应是^[7] (以下推导过程中不考虑前面的系数)

$$i_m(y_m, z, t) = \iint I(x, y, z) \cdot O(vt - x, y_m - y, z) dx dy = \iint \left[A^2 + C^2 + 2AC \cos\left[\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)\right] \right] \cdot O(vt - x, y_m - y, z) dx dy \quad (2)$$

式中 k 为常数, O 为物体光波的强度透射率分布。从(2)式可以看出, 光电探测器的响应由两部分组成, 第一部分为直流部分可用滤波器把它滤掉, 第二部分为余弦函数与物体光波的强度透射率函数的卷积, 该电信号经过放大及高通滤波处理后, 进入 A/D 卡的电信号为

$$(y_m, y, z) \propto \iint \cos\left[\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)\right] \cdot O(vt - x, y_m - y, z) dx dy = O(x, y, z) \odot \cos\left[\frac{k_0}{2z}(x^2+y^2)\right] \quad (3)$$

其中 \odot 表示卷积运算, 注意到 i_d 中既包含物体的平面位置信息 (x, y) 又包含了深度信息 (z) , 从而实现了全息记录。

1.3 再现过程

采用数字再现该全息图信息, 再现时数字存贮的电信号与一所需平面 z' 相对应的空间滤

度透射率函数与 FZP 的卷积过程。聚光镜将二者卷积后的光场聚集到光电探测器上, 光电探测器把光信号转换为电信号, 然后该电信号经过放大器放大、滤波等电学处理后输入到 A/D 卡, 经过 A/D 卡转换的电信号输入到计算机中, 通过计算机处理后, 可以在计算机上显示出再现图像。x-y 同步器实现记录时扫描信号与计算机采集信号的同步。

1.1 FZP 的产生

两分束器和四反射镜形成一标准的马赫-曾德尔干涉仪, 透镜 L_1, L_2 在上臂以产生平面波, 透镜 L_3, L_4 在下臂以产生球面波。因此, 在样品中形

波响应进行卷积操作, 该滤波响应即为自由空间的脉冲响应^[8], 其大小为

$$h(x, y, z', k_0) = \frac{jk_0}{2\pi z'} \exp\left[-jk_0 \frac{x^2 + y^2}{2z'}\right] \quad (4)$$

通过选择不同的平面 z' , 可以把厚样品的不同深度进行解卷积, 即可观察到样品不同深度的信息。把空间滤波响应函数存放于计算机中, 再现过程在计算机内自动完成。可以证明

$$\exp\left[j \frac{k_0}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \odot \exp\left[j \frac{-k_0}{2z_2}(x^2 + y^2)\right] = \begin{cases} \delta(x, y), & \text{当 } z_1 = z_2 \text{ 时} \\ \text{噪声}, & \text{当 } z_1 \neq z_2 \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

图 2 显示了该卷积结果的截面图。

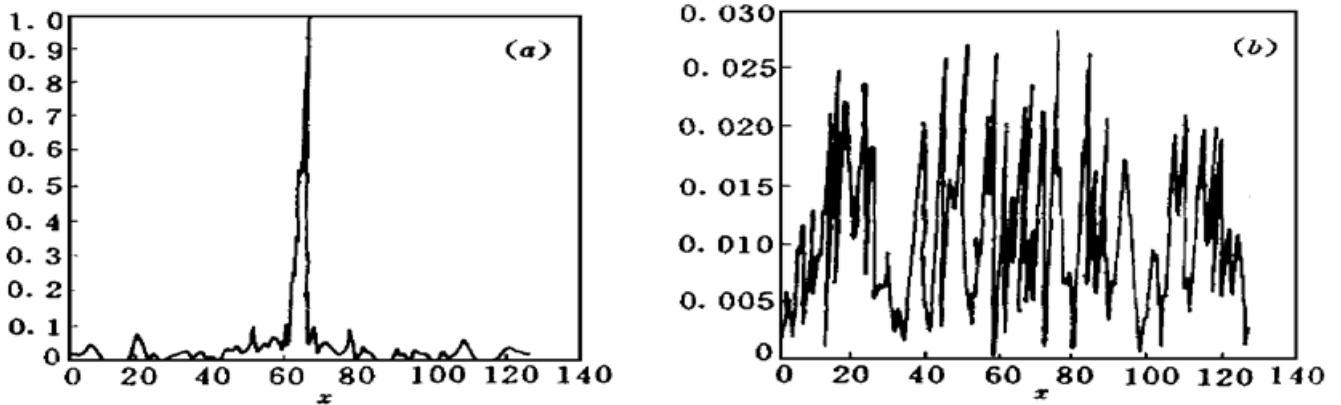


图 2 $\exp\left[j \frac{k_0}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \odot \exp\left[j \frac{-k_0}{2z_2}(x^2 + y^2)\right]$ 的截面图

Fig. 2 The result of $\exp\left[j \frac{k_0}{2z_1}(x^2 + y^2)\right] \odot \exp\left[j \frac{-k_0}{2z_2}(x^2 + y^2)\right]$. (a) $z_1 = z_2$; (b) $z_1 \neq z_2$

再现像的复振幅为

$$\begin{aligned} r(x, y, z) &= i_d(y_m, y, z) \odot h(x, y, z', k_0) \sim \\ &O(x, y, z) \odot \cos\left[\frac{k_0}{2z}(x^2 + y^2)\right] \odot h(x, y, z', k_0) \sim \\ &O(x, y, z) \odot \exp\left[j \frac{k_0}{2z}(x^2 + y^2)\right] \odot \exp\left[-j \frac{k_0}{2z'}(x^2 + y^2)\right] + \\ &O(x, y, z) \odot \exp\left[-j \frac{k_0}{2z}(x^2 + y^2)\right] \odot \exp\left[-j \frac{k_0}{2z'}(x^2 + y^2)\right] = \\ &\begin{cases} O(x, y, z) \odot [\delta(x, y) + \text{噪声}], & \text{当 } z = z' \text{ 时} \\ \text{噪声} \odot O(x, y, z), & \text{当 } z \neq z' \text{ 时} \end{cases} = \\ &\begin{cases} O(x, y, z) + \text{噪声}, & \text{当 } z = z' \text{ 时} \\ \text{模糊像}, & \text{当 } z \neq z' \text{ 时} \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

从(6)式可以看出, 通过解卷积, 当自由空间的脉冲响应的 z 参数与物体内某一截面的 z 参数相等时, 解卷积后结果为该截面的信息加上噪声部分, 其中的噪声部分可用数字滤波法消除 (设定某一阈值, 再现像的强度分布大于该阈值的为信号, 小于该阈值的为噪声), 在计算机上显示该截面的信息; 而当自由空间的脉冲响应的 z 参数与物体内的任何截面的 z 参数都不相等时, 解卷积后结果只有模糊像部分。通过自由空间的脉冲响应的 z 参数在物体截面内的不同深度进行搜索可以把物体的不同截面的信息再现出来, 从而实现再现过程。在计算机屏幕上只显示对应于某一深度 z 时物体的信息 $O(x, y, z)$ 的项。

2 计算机仿真

采用如下步骤实现计算机的仿真。首先,建立扫描场的模型,扫描场的强度分布为(1)式中的 FZP 的强度分布,为了简单起见,令 $A = C = 1/2$,则扫描场的强度分布为

$$I(x, y, z) = 1 + \cos \left[\frac{k_0}{2z} (x^2 + y^2) \right] \quad (7)$$

其次,产生一简单的透射物体,其强度透射率用 $O(x, y, z)$ 表示,如 1.2 所述,通过把扫描场的强度分布与物体的强度透射率发生卷积即可生成全息图。

即生成的全息图为

$$f(x, y, z) = I(x, y, z) \otimes O(x, y, z) \quad (8)$$

再据(6)式,再现(还原)后的全息图像的复振幅分布为

$$r(x, y, z) = f(x, y, z) \otimes h(x, y, z) \quad (9)$$

在具体进行仿真过程中,利用卷积定理^[7]先求出它们的傅氏变换,特别把每一项抽样成大小为 64×64 的网格,对每一项进行复傅氏变换,完成二变换阵列的相乘后,再对它们进行逆傅氏变换,即可求出二函数的卷积。

通过以上步骤,我们完成的计算机的模拟结果如下:图 3 为 FZP 的计算机仿真结果;图 4 为一简单的三维透射物体图像;图 5 为记录的透射物体的扫描全息图像;图 6 为全息图再现后产生的再现像。

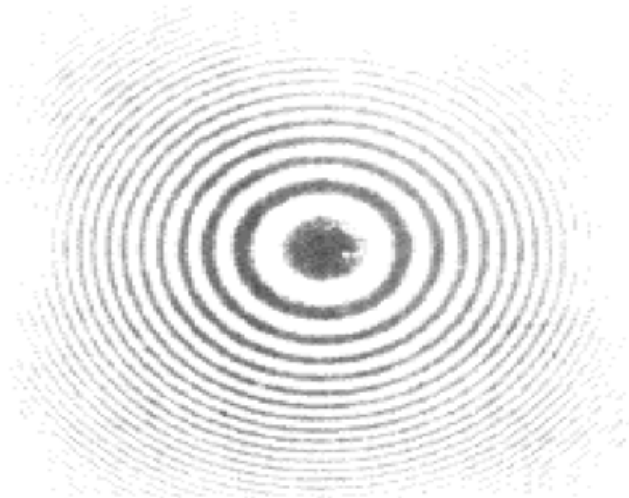


图 3 菲涅耳波带板的计算机仿真结果

Fig. 3 The image of the Fresnel zone plate

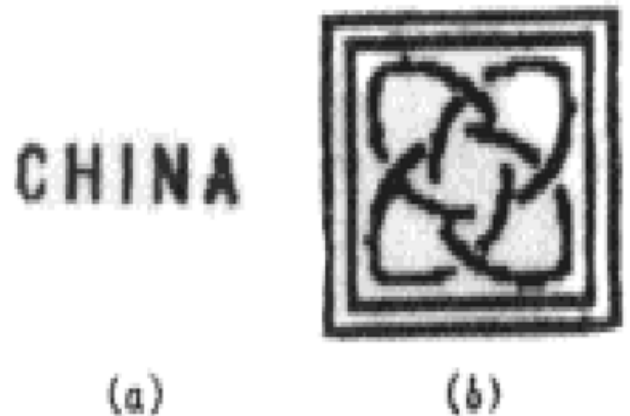


图 4 简单的三维透射物体

(a) 前面的物体; (b) 后面的物体

Fig. 4 The simple original objects

(a) the front object; (b) the back object

3 结 论

阐述了光学扫描全息术的基本原理,并给出了计算机仿真的结果。光学扫描全息术是一种建立在光学扫描之上的光电混合处理技术,它可以在全息显微术、物体的全息照相、三维光学遥感以及三维机器人视觉等方面得到应用,由于光信号转换为电信号,也可以实现全息图的电视传输。

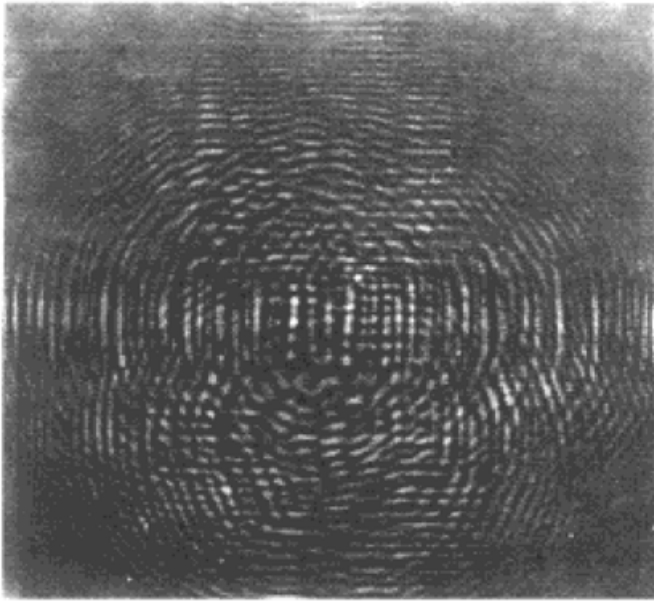
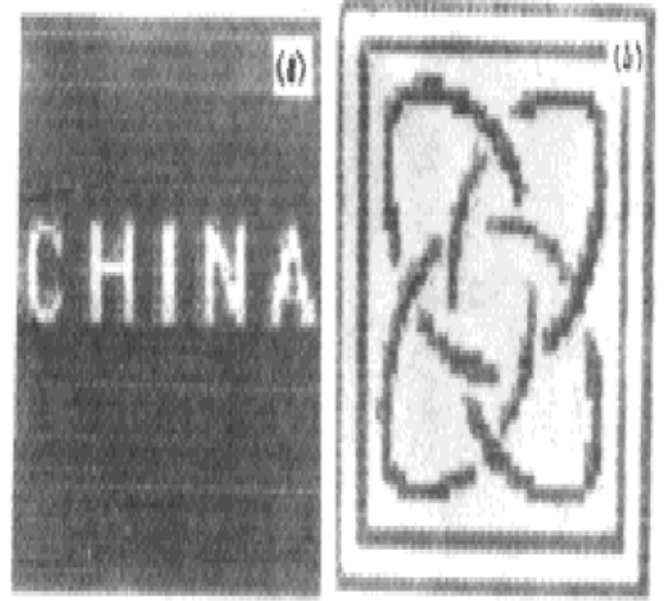


图 5 记录的透射物体的扫描全息图像的
计算机仿真结果

Fig. 5 The image of the optical scanning hologram



6 全息图再现后产生的再现像的计算机仿真结果
(a) 前面物体的再现像; (b) 后面物体的再现像

Fig. 6 The reconstructed images of the original objects
(a) the reconstructed image of the front object;
(b) the reconstructed image of the back object

参 考 文 献

- 1 Leith E. N., Upatnieks J., Haines K. A.. Microscopy by wavefront reconstruction. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(8): 981~ 986
- 2 Thompson B. J., Ward J. H., Zinky W. R.. Application of hologram techniques for particle size analysis. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(3): 519~ 526
- 3 Witherow W. K.. A high resolution holographic particle sizing system. *Opt. Eng.*, 1979, **18**(3): 249~ 255
- 4 Vikram C. S., Ed. Selected papers on holographic particle diagnostics. *SPIE Milestone Ser.*, Vol. **MS21**, 1990
- 5 Yu Meiwen. Optical Holography and Information Processing. Beijing: Defence Industry Press, 1984. 16 ~ 193 (in Chinese)
- 6 Poon T. C., Kyu B. Doh, Bradley W. Schilling *et al.*. Three-dimensional microscopy by optical scanning holography. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(5): 1338~ 1344
- 7 Goodman. Introduction to Fourier Optics. Beijing: Science Press, 1979. 181~ 184 (in Chinese)
- 8 Liu Peisen. Applied Fourier Transform. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1990. 146 (in Chinese)

Optical Scanning Holography and the Numerical Simulation

Liang Wanguo¹ Yuan Nairong² Xie Jinghui¹ Zhao Dazun¹ Zhao Yeling¹

¹Department of Optoelectrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
²Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

Abstract A new holography-optical scanning holography has been proposed, which is a hybrid optoelectrical processing technology. The principle of the optical scanning holography has been elaborated and the result of the numerical simulation is given.

Key words optical scanning, holography, hybrid optoelectrical processing system, numerical simulation