

文章编号: 0258-7025(2001)06-0556-03

电子束直写计算全息图^{*}

高 峰 朱建华 黄奇忠 高福华 姚 军 郭永康

(四川大学物理系 成都 610064)

崔 铮

(Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK)

提要 报道了采用电子束直写制作计算全息图(CGH)的新方法,该方法与传统的计算全息图制作方法相比可以明显提高CGH再现的像质(信噪比和对比度)。给出了两种制作方法的对比实验结果,同时就量化编码误差对CGH信噪比的影响进行了理论分析。

关键词 计算全息图 电子束直写 迂回位相编码

中图分类号 TB 877 文献标识码 A

Computer-generated Hologram Fabricated by Electron-beam Direct-writing

GAO Feng ZHU Jian-hua HUANG Qi-zhong GAO Fu-hua YAO Jun GUO Yong-kang

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

CUI Zheng

(Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK)

Abstract A new method of making computer-generated hologram (CGH) by electron-beam direct-writing is reported in this paper. Compared with conventional CGH fabricating method, the new method can improve the image quality of CGH obviously. In this paper, the comparative experimental results of two methods are given, and the effects of quantizing and coding errors on the signal-to-noise ratio of CGH are also analyzed theoretically.

Key words CGH, Electron-beam direct writing, detour phase coding

1 引 言

计算全息与光学全息相比具有设计灵活、重复性好、应用范围广等特点,在光学信息处理、干涉计量术、衍射光学元件等领域有非常广泛的应用前景^[1]。传统的计算全息制作方法一般要经过波面抽样、数据计算、空间编码、图稿打印、照相缩版(漂白)等多个中间环节,制成的全息图不可避免地引入了多次(线性、非线性)失真,同时由于一般的打印输出和照相缩版设备的分辨率有限,制作大空间带宽积的计算全息图(CGH)非常困难,严重影响了CGH的像质,使其应用受到了很大的限制^[2]。电子束直写

方法由于具有很高的空间分辨率(精度可达30 nm左右)和一次直写成图的特点^[3],可弥补传统制作方法的不足,可以进一步提高CGH再现的图像质量,为满足CGH更高水平的应用提供了一种新的技术途径。本文针对同一种编码图形分别采用两种制作方法进行了实验研究,结果表明电子束直写方法制作的CGH在图像信噪比、对比度、细节特征等方面均比传统制作方法有明显改善。

2 理论分析

罗曼Ⅲ型迂回位相编码方法^[4]是一种十分重要的计算全息编码方法,它采用全息图每个抽样单元中的矩形通光孔径面积来调制波面的幅值(矩形孔径的宽度 W 为定值,高度 l_{mn} 随不同样点 (m, n) 处的幅值 A_{mn} 成正比例关系),用矩孔中心偏离单元中心的距离来编码波面的位相(p_{mn} 与 (m, n) 处的位

* 中国科学院光电所微细加工光学技术国家重点实验室资助课题。

收稿日期 2000-04-11

相值 ϕ_{mn} 也成正比例关系),即

$$\begin{cases} l_{mn} = A_{mn} \\ p_{mn} = \frac{\phi_{mn}}{2\pi} \end{cases} \quad (1)$$

这样全息面上不同抽样点处的振幅、位相就与每个抽样单元中矩形孔径的结构参数建立了固定联系,整个全息面的透过率函数可写成

$$H(\mu, \nu) = \sum_m \sum_n \text{rect} \left[\frac{\mu - (m + p_{mn})\delta\mu}{W\delta\mu} \right] \text{rect} \left(\frac{\nu - n\delta\nu}{l_{mn}\delta\nu} \right) \quad (2)$$

将此二元傅里叶变换全息图放入图 1 的再现装置中,采用倾斜平面波 $\exp(j2\pi x_0\mu)$ 照明,在透镜 L_2 的后焦面上将出现其逆傅里叶变换 $h(x, y)$,即再现的全息图像。

$$h(x, y) = \iint H(\mu, \nu) \exp(j2\pi x_0\mu) \exp[j2\pi(x\mu + y\nu)] d\mu d\nu = \sum_m \sum_n l_{mn} W\delta\mu\delta\nu \text{sinc}(yl_{mn}\delta\nu) \text{sinc}[W\delta\mu(x + x_0)] \exp[j2\pi n y\delta\nu] \exp[j2\pi(x + x_0)(m + p_{mn})\delta\mu] \quad (3)$$

其中 $\text{sinc}[W\delta\mu(x + x_0)]$ $\text{sinc}(yl_{mn}\delta\nu)$ 为量化编码过程中引入的振幅、强度误差,将会带来不均匀的强度分布、降低图像亮度,而 $\exp(j2\pi x p_{mn}\delta\mu)$ 则是迂回位相误差,该误差会带来不均匀的图像强度(特别是在图像边缘),以上三个量化误差因子将会影响再现像的信噪比,对像质产生不同程度的影响^[5]。

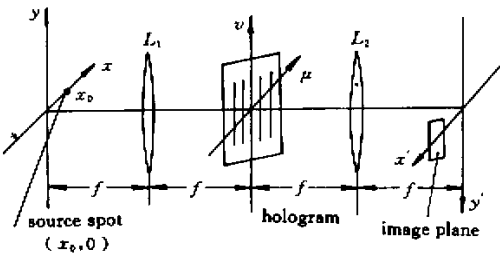


图 1 二元傅里叶变换全息图再现装置,照明由 x_0 处的点源发出

Fig.1 Optical setup for the reconstruction of binary Fourier transform hologram

若假设以上三个误差因子取如下近似:

(a) $\text{sinc}[W\delta\mu(x + x_0)] \approx \text{常数}, |x| \leq \Delta X/2$

(b) $\text{sinc}(yl_{mn}\delta\nu) \approx 1, |y| \leq \Delta Y/2$

(c) $\exp(j2\pi x p_{mn}\delta\mu) \approx 1, |x| \leq \Delta X/2$

则式(3)变为

$$\hat{h}(x, y) \approx \sum_m \sum_n l_{mn} W\delta\mu\delta\nu \exp[j2\pi x_0\delta\mu(m + p_{mn})] \exp[j2\pi(mx\delta\mu + ny\delta\nu)] \quad (4)$$

取 $x_0\delta\mu = 1$ 将(1)式代入(4)式,则有

$$\hat{h}(x, y) \approx \sum_m \sum_n W\delta\mu\delta\nu [A_{mn} \exp(j\phi_{mn})] \exp[j2\pi(mx\delta\mu + ny\delta\nu)] \quad (5)$$

(5)式即为频谱函数 $A_{mn} \exp(j\phi_{mn})$ 的傅里叶函数,将再现得到准确的(无噪声)物波函数。

为评估量化编码误差对最终再现全息图像质的影响,引入信噪比(SNR)作为评价因子

$$\text{SNR} = \frac{\iint |\hat{h}(x, y)|^2 dx dy}{\iint |\hat{h}(x, y) - h(x, y)|^2 dx dy} \quad (6)$$

其中 $\hat{h}(x, y)$ 为理想的物函数, $h(x, y)$ 为引入量化误差的物函数,我们就不同抽样点数 CGH 的 SNR 进行了模拟计算,模拟时抽样单元的结构参数 l_{mn}, p_{mn} 取独立的随机数代入,模拟结果如表 1 所示。由此可见,增加抽样点数,即减小抽样间距,可以制作具有更大空间带宽积的 CGH,使得每个抽样单元中的振幅和位相值更接近被抽样图像本身,可以获得更高的信噪比。

表 1 不同抽样点数对 CGH 信噪比影响的模拟结果

Table 1 Simulation results of CGH SNR with various sampling number

CGH sampling number	32 × 32	64 × 64	128 × 128	256 × 256
SNR	5.46	6.18	6.69	6.82

由于电子束直写装置具有比传统光学缩版设备高得多的分辨率,从而可以制作具有更高空间带宽积的 CGH,获得更好的像质。

一方面,量化编码误差对最终 CGH 的像质有重要的影响;另一方面,由于成图设备的分辨率有限而导致的对每个抽样单元内的振幅、位相的描绘精度误差也将会对 CGH 的信噪比产生不同程度的影响。由于迂回位相编码方法均是通过对抽样单元内矩形孔径的结构参数来对振幅、位相进行编码,故成图设备分辨率引起的精度误差量应是一致的,为此,对几种抽样点数条件下不同单元精度误差(100%(无误差),95%,90%,85%)对 CGH 信噪比的影响也进行了计算机模拟计算,每个单元中振幅、位相值仍取随机数代入,结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,由单元精度误差引起的 SNR 的下降非常明显,其变化程度甚至超过了改变抽样点数对 SNR 的影响程度,这说明,制作过程中所用

设备的分辨率高低对最终 CGH 的信噪比的影响非常明显,由于电子束直写装置的分辨率远高于一般光学设备的分辨率,可以预期电子束直写制作计算全息图将会明显改善 CGH 的像质。

表 2 振幅及位相描绘精度对 CGH 信噪比(SNR)影响的模拟结果

Table 2 Simulation results of CGH SNR with various amplitude and phase accuracy

Amplitude and phase accuracy Sampling number	100%	95%	90%	85%
64 × 64	6.18	4.08	3.10	2.55
128 × 128	6.69	4.24	3.21	2.58
256 × 256	6.82	4.33	3.22	2.61

3 实验制作

实验中选择“四川大学”四个字符作为物体,分别采用电子束直写方法和传统方法制作了二元像计算全息图,制作流程图如下所示:

传统方法: [全息面抽样] → [迂回位相编码] → [绘制原图] → [照相缩版] → [全息图]

电子束直写方法: [全息面抽样] → [迂回位相编码] → [电子束直写产生 CGH]

在传统制作方法中,抽样点取 128×128 ,先将编码结果用激光打印机输出到 A4 打印纸上形成尺寸为 $10.24 \text{ cm} \times 10.24 \text{ cm}$ 的原图,再利用反射照明方式将原图缩小 20 倍记录到卤化银全息干版上,经显影、定影形成尺寸为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ 的计算全息图,图 2(a)为由面阵 CCD 在像面直接记录的再现像照片。

电子束直写方法中抽样点取 256×256 ,将编码数据直接输入计算机,由计算机驱动电子束曝光设备在抗蚀剂上直接形成最终尺寸(无需照相缩版)的曝光图形,再经显影、刻蚀将图形传递到铝板上形成尺寸为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ 的二元 CGH。该全息图在英国卢瑟福国家实验室微结构中心采用 50 keV



图 2 传统方法(a)和电子束直写(b)制作的 CGH 再现像

Fig.2 Reconstruction image of CGH fabricated by traditional method(a) and by EB direct writing system(b)

的电子束直写设备制作。图 2(b)为全息图的再现像。

4 结果讨论

比较图 2(a)(b)可以看出,电子束直写方法制作的 CGH 的像质明显高于传统方法制作的 CGH,主要反映在以下几个方面(1)对比度高(2)信噪比高(3)图像细部特征清晰。其原因为:

(1)电子束直写方法的空间分辨率更高,可以在满足制作精度的条件下,增多抽样单元数,加大空间带宽积,提高计算全息图的制作质量;

(2)电子束直写方法中间环节少,可以有效降低传统方法中多个环节引入的线性、非线性失真,提高像质;

(3)聚焦电子束焦斑很小,能够提供更大的编码自由度,可以在一个抽样单元中描述更多的振幅层次及相移阶数,使每个抽样单元中的振幅与位相值更接近欲编码的图像本身,再现全息图的细部特征可以得到很好的表现。

采用电子束直写方法制作计算全息图是一种有益的尝试,但目前该方法还存在着写入时间长、加工成本贵等不足。而由于它在有效改善 CGH 的再现像质方面的优越性,可用于制作高质量和高保密模压全息母版。我们相信,随着 X 射线光刻、电子束直写等具有很高分辨率的制作加工设备的日益普及,制作计算全息图将会有更大的设备选择余地,而 CGH 像质的不断提高将为其在更多更广的领域找到实际的应用,获得更大的发展。

参考文献

- 1 G. Tricoles. Computer-generated holograms: an historical review. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20):4351~4360
- 2 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer Generated Hologram. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1984. 4 (in Chinese)
- 3 Nobukazu Yoshikawa, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai. Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18):1483~1485
- 4 A. W. Lohmann, D. P. Paris. Binary fraunhofer holograms, generated by computer. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(10):1739~1748
- 5 J. Bucklew, N. C. Gallagher, Jr.. Comprehensive error models and a comparative study of some detour-phase holograms. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(16):2861~2869