

文章编号: 0258-7025(2003)11-1031-05

# 纵扫描法计算全息扫描器的研制

郁弘澎, 丁剑平\*, 潘永华, 周惠君, 周进, 高文琦

(南京大学物理系, 江苏 南京 210093)

**摘要** 介绍了纵扫描的计算全息扫描器的基本原理, 并对此种扫描器如何调整扫描图形的位置、大小, 以及优化扫描结果提出了一系列方法。给出了计算机模拟实验和相应的光学实验结果。对此种扫描器实现彩色曲线扫描以及同时实现多点扫描进行了一些探索, 并用计算机模拟其扫描输出。

**关键词** 信息处理技术; 光扫描器; 计算全息; 纵扫描

**中图分类号** O 436.1; O 438 **文献标识码** A

## Study on Longitudinal Scanning Method Used for Fabricating CGH Scanner

YU Hong-peng, DING Jian-ping, PAN Yong-hua,

ZHOU Hui-jun, ZHOU Jin, GAO Wen-qi

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract** The theory of longitudinal scanning in computer-generated hologram (CGH) scanner is introduced. A series of methods of how to change the position, size of the scanning curve and how to improve the quality of image are described. The computer simulating result and experimental result are presented. The paper also discusses how to scan color curve with CGH scanner and the computer-simulated result is presented.

**Key words** information processing technique; optical scanner; computer-generated hologram; longitudinal scanning

## 1 引 言

在很多领域中,常需要令激光束以一定速率扫描,或沿一定曲线扫描,具有这种功能的器件就是光扫描器。微电子机械光扫描器是光扫描器的一种<sup>[1,2]</sup>,但是由于机械构造上的限制,有许多缺点是无法克服的,比如扫描角度小、扫描频率低、抗干扰能力差等。除了微电子机械光扫描器外,还有声光偏转扫描器、棱镜扫描器以及全息扫描器等<sup>[3~6]</sup>。同这些扫描器相比,计算全息扫描器<sup>[7]</sup>具有自己的特点,它只需要简单的机械运动来改变光束在全息扫描器上的相对位置,利用光的衍射改变扫描光点的位置。如果把计算全息扫描器的模板做成环状时,还可以实现无过渡的回扫。计算全息扫描器能够进行高频率和大角度的扫描。此外,计算全息扫

描器还具有其他优点:器件可以制作得很小,可以大量复制,成本低;质量小,惯性几乎不会带来影响。因此,计算全息扫描器也是计算全息中最具有应用前景的光学元件之一。

## 2 计算全息扫描器中的纵扫描法

光扫描器所用的计算全息模板由一组条纹组成。以  $\phi(x, y) = C$  表示条纹曲线的方程,  $\phi(x, y)$  称为全息函数,式中的  $C$  为参变量,条纹实际上就是等  $C$  线,相邻两条纹间的  $C$  相差一常数  $\Delta C$ 。激光束照射模板后产生的衍射+1级扫描光点的坐标  $(\xi, \eta)$  满足以下偏微分方程

$$\xi = k \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad \eta = k \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (1)$$

收稿日期:2002-06-28; 收到修改稿日期:2002-09-23

作者简介:郁弘澎(1979—),天津人,码捷(苏州)科技有限公司工程师,从事光学设计方面的研究工作。E-mail: h. p. yu@cn. metrologic. com

\* 通讯联系人。

式中的  $\frac{\partial\phi}{\partial x}$  和  $\frac{\partial\phi}{\partial y}$  相当于条纹光栅沿  $x, y$  方向的周期 (光栅常数) 的倒数;  $k$  为定标因子, 由扫描器光路和光波长决定。如果全息方程  $\phi(x, y) = C$  已知, 代入上式即得扫描曲线的函数形式  $\xi = \xi(\eta)$  或  $\eta = \eta(\xi)$ 。在制作计算全息时, 根据所需的扫描函数, 可通过求

解偏微分方程组(1)得到全息函数  $\phi(x, y)$ 。

我们已提出了纵扫描的想法<sup>[8,9]</sup>, 在纵扫描方式中, 当光束沿水平方向( $x$ 方向)匀速移动计算全息扫描器时, +1级衍射光束沿垂直方向( $\eta$ 方向)扫描速率不变, 工作原理如图1所示。

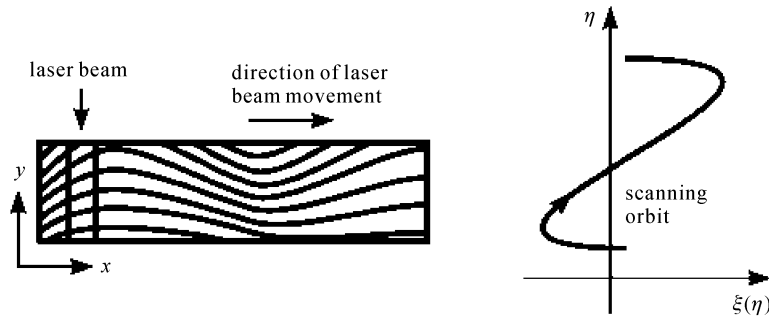


图1 纵扫描方式的说明(左:全息图;右:+1级衍射光束的扫描轨迹)

Fig. 1 Illustration of longitudinal scanning

(left: hologram pattern; right: scanning orbit of +1 diffraction)

此时扫描光点的坐标  $\eta$  与  $x$  呈线性关系,  $\xi$  则按扫描函数  $\xi(\eta)$  变化, 即

$$\begin{aligned}\frac{\partial\phi}{\partial x} &= \frac{1}{k}\xi = \frac{1}{k}\xi(\eta), \\ \frac{\partial\phi}{\partial y} &= \frac{1}{k}\eta = ax + b\end{aligned}\quad (2)$$

式中  $a, b, k$  均为常数。为了简单起见, 令  $k = 1, a = 1, b = 0$ , 方程的解可表示成如下形式

$$\phi(x, y) = xy + F(x), \quad F(x) = \int_0^x \xi(t) dt \quad (3)$$

当以(3)式作为全息函数时, 扫描光点的参数方程为

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \xi(\eta) = y + \xi(x), \quad \frac{\partial\phi}{\partial y} = \eta = x \quad (4)$$

从(4)式可见, 除前一方程中多一项  $y$  以外, 可以满足由(2)式指定的扫描条件。由于沿  $x$  方向移动光束, 激光束照射区的  $y$  坐标保持为常数, 因此用纵扫描方法所扫描出的图像, 与原来扫描函数图像仅仅相差一常数  $y$ , 称为扫描曲线位置的偏置项。

### 3 扫描曲线的移动和放大

在实际应用中, 往往希望移动扫描曲线的位置, 包括水平和垂直两个方向的移动。可利用下述方法来实现纵扫描方式中扫描曲线的移动和放大。

由纵扫描方程(4)左式可知, 由于有偏置项存在, 因此只要改变  $y$  的值, 就可以改变扫描曲线在水平方向的位置; 由方程(4)右式可得, 加入一常数  $x_0$

可以改变扫描曲线在垂直方向上的位置

$$\begin{aligned}\frac{\partial\phi}{\partial x} &= \xi(\eta) = y + \xi(x), \\ \frac{\partial\phi}{\partial y} &= \eta = x + x_0\end{aligned}\quad (5)$$

因此通过控制  $y, x_0$  的值, 就可以控制扫描曲线的偏移。

现取如下的四分之一圆弧

$$\xi(\eta) = \sqrt{R^2 - \eta^2}, \quad \eta \in (0, R) \quad (6)$$

将其向下平移  $3R/2$  作为扫描曲线, 由(3)式导出全息方程为

$$\begin{aligned}y &= \frac{C}{x - \frac{3}{2}R} - \frac{x}{2(x - \frac{3}{2}R)} \sqrt{R^2 - x^2} - \\ &\quad \frac{R^2}{x - \frac{3}{2}R} \arcsin \frac{x}{R}\end{aligned}\quad (7)$$

选取(7)式中  $C$  的变化量  $\Delta C = 1$ , 画出图2(a)所示的模板。选取不同  $y$  值时, 可以观察到扫描曲线在水平方向上的平移效应, 如图2(b)和2(c)所示(其中  $\pm 1$  级衍射同时存在)。

与上述效果类似, 改变  $x_0$  的值可以调节扫描曲线在垂直方向的位置。

采用如下两种方法还可以实现扫描图形的缩小和放大:

1) 由光栅方程可知, 如果减小模板的光栅常数  $d$  就可以增大衍射角, 反之可以减小衍射角, 以此可实现对扫描曲线的缩放。

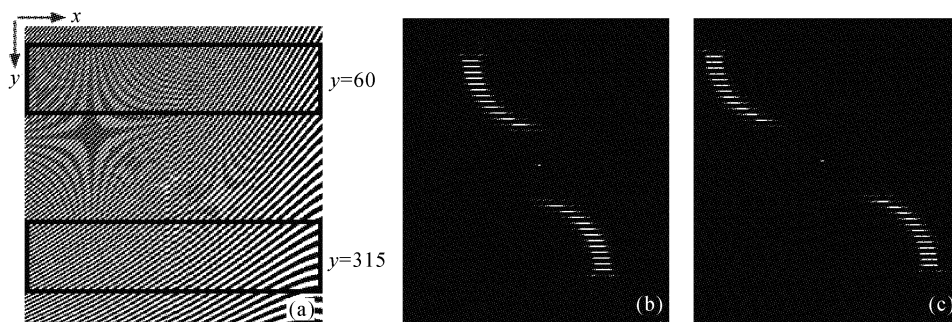


图 2 扫描区的 y 坐标取不同数值时,扫描曲线在水平方向上的平移效应

(a) 全息模板;(b) y = 60 时的扫描曲线;(c) y = 315 时的扫描曲线

Fig. 2 Effect of mask at different y coordinate on scanning curve

(a) mask; (b) scanning curve when y = 60; (c) scanning curve when y = 315

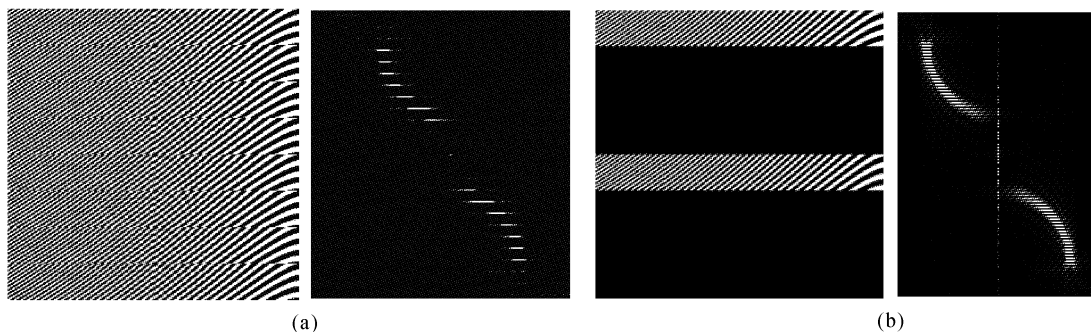


图 3 增加模板延拓距离的效果

(a) 模板延拓距离为有 1 倍模板宽度时的扫描图形;(b) 模板延拓距离为有 4 倍模板宽度时的扫描图形

Fig. 3 Effect of increasing distance between masks

(a) mask repeated by eight times and the corresponding scanning curve;

(b) mask with 4 times width space and the corresponding scanning curve

2) 当模板固定时,可以通过调节光路的放大倍数来实现对扫描曲线的缩放。

### 4 拖曳现象及改进方法

在纵扫描方程(4)中,存在偏移项 y,因为光束有一定的宽度,而光束的上下沿在模板上对应的 y 值不同,这就造成了光束上下沿所扫描的曲线在水平方向上存在偏移,这就是拖曳现象。将全息模板重复延拓可以减少拖曳现象<sup>[8]</sup>,但由于插零现象的存在,不能实现曲线的连续扫描,并且延拓次数越多,插零现象越明显。插零现象的产生,是由于各个延拓条纹之间产生干涉。依据以上理论提出减少拖曳现象的方案。从双缝干涉公式可知,插零现象中再现像的亮条纹间的距离与延拓全息模板间的距离近似成反比例关系,即两延拓模板相距越远,再现像中的插零现象越不明显。如图 3 所示,图 3(a)给出了模板延拓 8 次后的扫描效果,图 3(b)为只保留第

1,5 模板时,即相当于增加全息模板间的延拓距离的效果。与直接 8 次延拓相比,增加延拓距离降低了再现像中的插零现象。为了充分利用两模板间遮挡住的光束,可在遮挡部分插入全息函数其他部分的模板,这样不但充分利用了光束,并且可以实现多点同时扫描,这在其他的扫描方案中是很难实现的。

### 5 彩色扫描

彩色扫描系统通常比较复杂,需要特殊设计。例如电控镜子扫描器当中,每一面镜子只能控制一种颜色的光线偏转,如果要实现三原色扫描,则需要 3 面镜子。若实现二维扫描,一共需要 6 个独立的控制系统。本文设计的计算全息彩色扫描器,使得彩色扫描相对比较容易实现,且结构较简单。

由色度学原理可知,任何一幅图像均可以分解为三原色的叠加

$$I_{color} = I_R + I_G + I_B \tag{8}$$

一束白光可以分解为三原色的光(红 R, 绿 G, 蓝 B)的混合光。当白光照射到某一种颜色的滤波器时,只有这种颜色的光可以透过。如果滤波器的颜色是两种原色的混合颜色,则这两原色均可透过。因此,可以将三种颜色的模板混合起来,即混合模板图上的每一点的颜色值为原来三个模板对应位置点的颜色值的叠加。用一束白光照射混合的模板,对于其中的某一种颜色来说,和照射其单色模板的效果相同,因为这种颜色的光在单色模板上不能透过的地方在混合模板上仍然不能透过。

但是从光栅的衍射公式可知,衍射角度的正弦值是与入射光的波长成正比的。要达到相同的偏转角度,三种不同的颜色光栅的光栅常数  $d$  要符合下列关系

$$\lambda_R : \lambda_G : \lambda_B = d_R : d_G : d_B \quad (9)$$

在制作模板时只要令  $\phi(x, y) = C$  中的变化量  $\Delta C$  与该颜色的波长成正比。

### 6 实 验

实验编制了制作纵扫描模板的软件。此软件不仅能制作实验所需扫描器的模板,通过参数调节来控制模板的延拓,而且可以对模板的扫描效果进行计算机模拟计算,从而实现扫描的数值评价。

#### 6.1 单色扫描

实验选取圆形作为所要扫描的曲线,其1/4圆

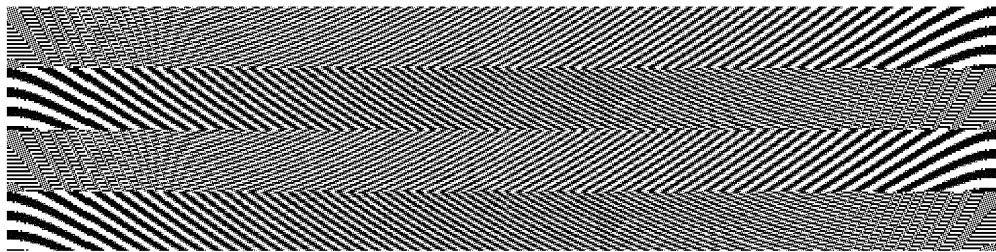


图 5 计算机产生的扫描器模板  
Fig. 5 Computer-generated scanning mask

#### 6.2 彩色扫描

实验中所采用的彩色曲线为红绿蓝三条错开的正弦曲线

$$\xi(\eta) = 5\sin\eta \quad (10)$$

三条曲线偏移 0 级的距离分别为  $\frac{3}{2}\pi, \pi, \frac{\pi}{2}$ 。

假定选取红光波长为 633 nm(He-Ne 激光器), 绿光波长为 532 nm, 蓝光波长为 488 nm(Ar<sup>+</sup> 激光器)。因此有

弧部分的表达式已由(6)式给出,相应模板的全息方程为(7)式。令(7)式中的  $x$  取  $(-R, R)$  的范围,作出右面 1/4 圆弧的模板后,将其进行水平方向的翻转,即可得到另一半的模板。

将计算机生成的模板用激光打印机打在透明片上,尺寸为 8.85 cm×35.4 cm,然后将透明片缩拍到超微粒干板上,缩小 20.4 倍,最终模板的尺寸为 4.3 mm×17.4 mm。

图 4 为实验光路,  $f = 18.5$  cm,图 5 为优化延拓后的全息模板,图 6 为计算机模拟扫描曲线和实验结果扫描曲线。可见,计算机模拟与实验结果相符。

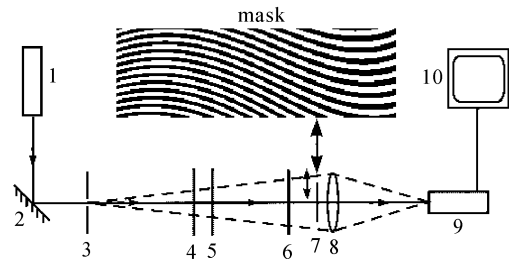


图 4 光学实验系统的装置图  
1: He-Ne 激光器; 2: 反射镜; 3: 针孔滤波器; 4, 5: 偏振片;

6: 光阑; 7: 扫描器模板; 8: 透镜; 9: CCD; 10: 计算机

Fig. 4 Scheme of experiment optical system

1: He-Ne laser; 2: reflector; 3: pinhole filter; 4, 5: polarizers; 6: diaphragm; 7: scanner mask; 8: lens; 9: CCD; 10: computer

$$\Delta C_R : \Delta C_G : \Delta C_B = 6328 : 5320 : 4880 \quad (11)$$

全息方程为

$$y = \frac{C}{x-p} + \frac{5\cos x}{x-p} \quad (12)$$

$p$  为三条曲线分别偏离 0 级的距离。按照(11)式的比例,取

$$\Delta C_R = 0.32, \quad \Delta C_G = 0.269, \quad \Delta C_B = 0.2468 \quad (13)$$

分别做出模板后,将三种颜色模板混合,中间插

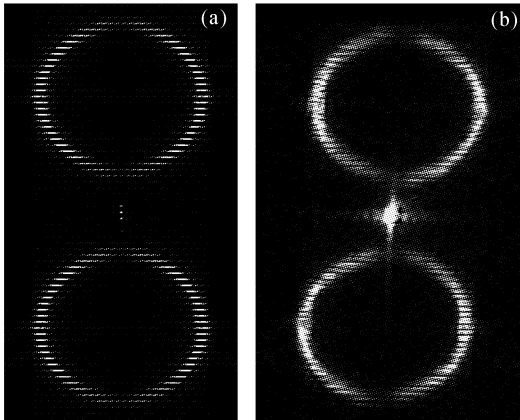


图 6 计算机模拟的扫描图形(a)和光学实验结果(b)  
Fig. 6 Computer-simulated scanning curve (a) and optical experiment result (b)

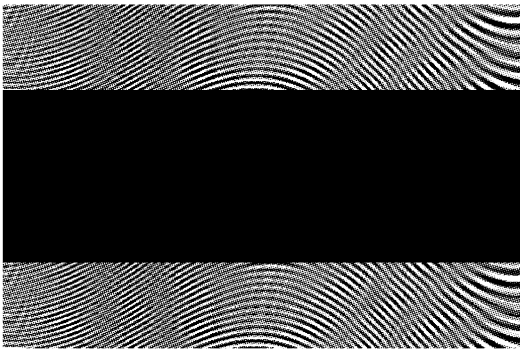


图 7 组合的彩色扫描器模板  
(插入了两倍模板宽度的遮挡区,原图为彩色)  
Fig. 7 Combined mask for color scanning  
(inserted by a space of double width of the mask)

入 2 倍宽度遮挡,得到如图 7 的模板。图 8 给出了计算机模拟的扫描结果。

## 7 结 论

实验结果表明,本文提出的方法可以在一定程度上减少计算全息扫描器的拖曳现象。提出的纵扫描方式可以比较容易地调控扫描图形的位置,从而实现多点同时扫描。若扫描曲线是不可积的,只要将曲线离散取样,仍然可以使用纵扫描的原理进行扫描<sup>[9]</sup>。此外,如果将此种扫描器制作成二元位相型,则能够大大提高扫描效率。相对于其他电子机械光扫描器,实现多点同时扫描和彩色扫描是计算全息扫描器的一个优点。如果能进一步消除拖曳现象,将会提高计算全息扫描器的实用性。

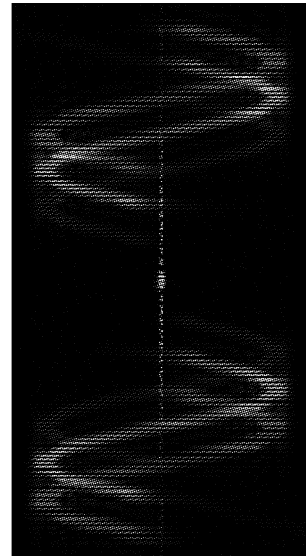


图 8 计算机模拟的彩色扫描图形(原图为彩色)  
Fig. 8 Scanned color curves simulated by computer

## 参 考 文 献

- 1 M. E. Motamedi, S. Park, A. H. Wang *et al.*. Development of micro-electro-mechanical optical scanner [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(5):1346~1353
- 2 K. Fujimoto, J. Smits, R. Carter. Tetramorph, a novel optical scanner using four piezoelectric bimorphs [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(11):3025~3031
- 3 G. F. Marshall. Optical Scanning [M]. New York: Marcel Dekker, 1991. 27~82
- 4 T. Bourouina, A. Garnier, H. Fujita. Magnetostrictive microactuators and application to two-dimensional optical scanners [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(3A): 1608~1613
- 5 H. Iwaoka, T. Shiozawa. Aberration-free linear holographic scanner and its application to a diode-laser printer [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):123~129
- 6 G. F. Marshall. Optical Scanning [M]. New York: Marcel Dekker, 1991. 159~212
- 7 Wai-Hon Lee. Computer-generated Holograms: Techniques and Applications, Progress in Optics [M]. E. Wolf, ed., Amsterdam: Elsevier, 1978. Vol. X VI: 126~133
- 8 Gao Wenqi, Ye Quanshu. Laser beam scanner for any function curve scanning[J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1983, **3**(3):237~240 (in Chinese)
- 9 Ye Quanshu, Gao Wenqi. A laser scanner applicable to scanning any graphic[J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1983, **3**(4):313~318 (in Chinese)