

能扫描任意字符的光扫描器

叶权书 高文琦
(南京大学物理系)

提 要

本文介绍一种用计算全息方法制作的光扫描器,这种扫描器能扫描任意图形例如字符等。文中还介绍了改善聚焦和回扫(扫描方向回转)的方法,并附实验结果。

一、引 言

在实际应用中往往需要控制激光束使其按一定曲线偏转,具有这种功能的器件称为光扫描器。以往制作光扫描器一般采用反射或折射方法,晚近衍射方法特别是计算全息方法逐渐引人注意,这方面的进展屡有报导^[1~3]。Lee曾经指出^[4],光扫描器是计算全息最有应用前途的领域之一。

为了能扫描任意字符,已发表的工作(例如文献[3])是将字符分成若干线段,对每一线段分别制作计算全息图,这样不论是计算工作量,还是作图工作量,均极繁杂。此外为了改善扫描光束的聚焦情况,附加的像差校正计算方法也不够简易。

本文提出的方法原理简明,改善聚焦的方法也简便易行,计算及作图工作量均不大。缺点是扫描出来的笔划不连续。

以下先介绍计算全息图的制作方法,即如何作全息图上的曲线族,再介绍如何回扫(扫描方向回转)和如何改善聚焦,最后附实验结果。

二、全息图上等中线的作法

为了能扫描任意函数曲线,我们已提出过采用纵扫描法^[5]。考虑全息函数

$$\phi(x, y) = xy + \phi(x, 0), \quad \phi(x, 0) = \int_0^x \xi(t) dt, \quad (1)$$

$\phi(x, 0)$ 为扫描函数 $\xi(\eta)$ 的积分,则 $\xi(\eta)$ 与 $\phi(x, y)$ 之间满足联立偏微分方程^[5, 6]

$$\partial\phi/\partial x = y + \xi(x), \quad \partial\phi/\partial y = x. \quad (2)$$

当扫描图形为一任意字符时,扫描函数不能以分析表达式给出,而只能以离散的取样值形式给出。在坐标纸上画出待扫描的字符,如图1所示。当自变量(横坐标) i 依次取正整数1、2、 \dots n $\dots N$ 时,因变量(纵坐标) f_i 依次取 f_1 、 f_2 、 \dots f_n $\dots f_N$ 等数值。这种函数关系可以用下式

$$f_i = f(i) \quad (i=1, 2, \dots, n, \dots, N) \quad (3)$$

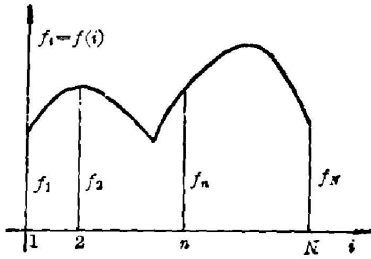


图 1

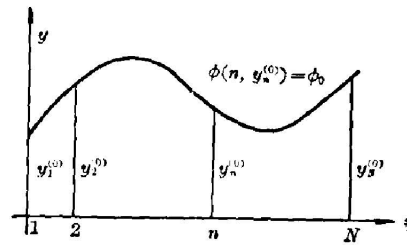


图 2

表示, 我们称 $f(i)$ 为取样数列。注意 $f(i)$ 与 $\xi(\eta)$ 的不同: 自变量 i 只取有限个数值, 又 $f(i)$ 不代表分析表达式, 而只代表一组取样数列。因此由 $f(i)$ 求全息函数 $\phi(x, y)$ 时, 不能再沿用 (1) 式。当 N 值甚大时 (我们取 $400 \sim 500$), 扫描函数的积分可用取样数列的迭加运算代替, 即

$$\phi(n, 0) = f_1 + f_2 + \dots + f_n = \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n f(i). \quad (4)$$

全息函数 (1) 式相应地可改写成以下形式:

$$\phi(n, y) = ny + \phi(n, 0) = ny + [f_1 + f_2 + \dots + f_n], \quad (5)$$

这里自变量 y 与 n 不同, 可以是任意实数。 $\phi(n, y) = \phi(\text{常数})$ 代表全息图上一条曲线, 称为等 ϕ 线。起始一条等 ϕ 线作法如下: 选择适当的参数 ϕ_0 , 令 (5) 式中的 $\phi(n, y) = \phi_0$, 又令 $(n, y_n^{(0)})$ 代表此等 ϕ 线上点的坐标, 则 $n, y_n^{(0)}$ 应满足以下方程:

$$\phi(n, y_n^{(0)}) = ny_n^{(0)} + \phi(n, 0) = \phi_0, \quad (6)$$

或者写作

$$y_n^{(0)} = \frac{\phi_0 - \phi(n, 0)}{n} = \frac{\phi_0 - [f_1 + f_2 + \dots + f_n]}{n}, \quad (7)$$

式中标志 (0) 代表起始一条等 ϕ 线, n 为正整数, 取值范围从 1 到 N 。(7) 式实际上给出起始一条等 ϕ 线: $\phi(n, y) = \phi_0$ 上 N 个离散点的坐标 $(n, y_n^{(0)})$ 如图 2 所示。因为 N 值很大 (约 $400 \sim 500$) 对于作出这条等 ϕ 线来说, 信息完全足够。实际上用不着算这么多点, 大约算 $N/15$ 到 $N/10$ 个点即足。令此点数为 m , 为了区别起见, 我们将这 m 个点的坐标记作: $(n_1, y_{n_1}^{(0)}), (n_2, y_{n_2}^{(0)}) \dots (n_i, y_{n_i}^{(0)}), \dots (n_m, y_{n_m}^{(0)})$ 。注意横坐标 n_1, n_2, \dots, n_m 之间并不一定等距, 可以根据作图需要灵活选取。

当 $\phi(n, y) = \phi$, 式中的 ϕ 改取别的数值时, 即得到别的等 ϕ 线方程。注意相邻两等 ϕ 线的 ϕ 值应相差一常数, 记作 $\Delta\phi$, ϕ 取值。

$$\phi_l = \phi_0 + l\Delta\phi \quad (l=0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (8)$$

全息图上各等 ϕ 线上离散点的坐标 $(n_i, y_{n_i}^{(l)})$ 满足以下方程:

$$\phi(n_i, y_{n_i}^{(l)}) = n_i y_{n_i}^{(l)} + \phi(n_i, 0) = \phi_0 + l\Delta\phi. \quad (9)$$

因为 $y_{n_i}^{(0)} = [\phi_0 - \phi(n_i, 0)]/n_i$, 上式又可写作

$$y_{n_i}^{(l)} = \frac{\phi_0 - \phi(n_i, 0)}{n_i} + l \frac{\Delta\phi}{n_i} = y_{n_i}^{(0)} + l \frac{\Delta\phi}{n_i}, \quad (10)$$

也就是说同一横坐标 n_i 所对应的各等 ϕ 线纵坐标 y 值依次为 $\dots y_{n_i}^{(0)} - 2\Delta\phi/n_i, y_{n_i}^{(0)} - \Delta\phi/n_i, y_{n_i}^{(0)}, y_{n_i}^{(0)} + \Delta\phi/n_i, y_{n_i}^{(0)} + 2\Delta\phi/n_i \dots$ 均相差一常数 $\Delta\phi/n_i$, 所以在起始一条等 ϕ 线作出后, 其它等 ϕ 线只要在点 $(n_i, y_{n_i}^{(0)})$ 上下每隔 $\Delta\phi/n_i$ 依次点出一系列点, 然后将相应点联成曲线(如图 3)即可。纵扫描方法的一个优点是计算及描图工作均可大大简化。

等 ϕ 线画好后, 将相邻两等 ϕ 线之间的区域间断地涂黑(为了压低衍射 2 级), 然后拍照精缩, 即得计算全息图。

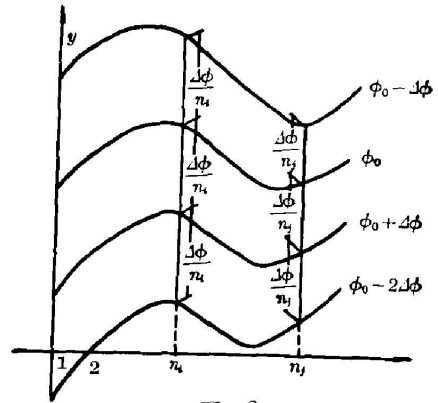


图 3

三、光的回扫及拖曳现象的克服

扫描字符时, 常常需要令衍射光回扫, 下面以字符“6”为例加以说明。在取样图形(图 4(a))中, 字符“6”的纵坐标 f_i 是多值函数, 应该将字符展成如图 4(b) 所示的单值函数再取样。在制作全息图时要注意, 激光束照射到 p (或 q) 点, 图后出射光应当开始回扫, 让出射光回扫的方法是将 (2) 式作如下修改:

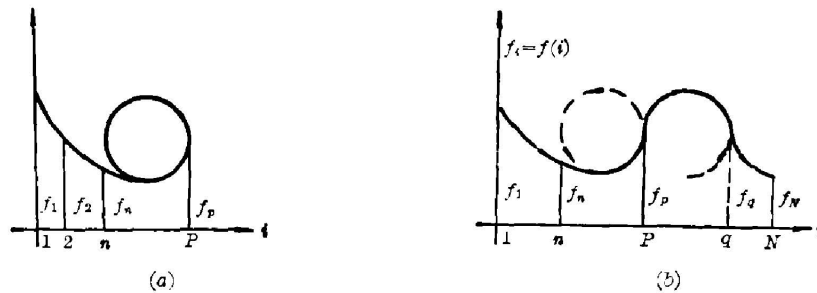


图 4

$$\partial\phi/\partial x = -y + \xi(x), \quad \partial\phi/\partial y = x_p - x, \quad (11)$$

相应地全息函数(1)式应改为

$$\phi(x, y) = (x_p - x)y + \phi(x, 0), \quad (12)$$

即可使出射光从 x_p 起回扫。当扫描图形为字符时, 以离散值表示的全息函数(5)式从 p 起应改为

$$\phi(n, y) = (p - n)y + \phi(n, 0) = (p - n)y + [f_1 + f_2 + \dots + f_n]. \quad (13)$$

上式中 n 取值范围从 p 起到 q 止。从 q 开始出射光再次回扫, 并改变全息函数为

$$\phi(n, y) = ny + \phi(n, 0) = ny + [f_1 + f_2 + \dots + f_n], \quad (14)$$

式中 n 取值范围从 q 起到 N 止。

图 5 为根据以上方法制作的计算全息图(放大约 20 倍), 图 6 为再现光路简图, 图 7 为出射光扫描轨迹(原图照片未放大, 但遮去零级)。

实验结果表明: 用这种方法制作的光扫描器的确可以扫出任意字符。不过像质不好,

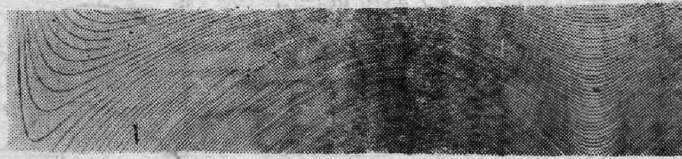


图 5

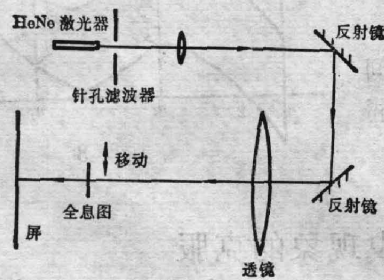


图 6



图 7

主要原因正如我们指出过^[5], 在于全息方程 (1) 式中存在的 xy 项。(为了保证纵方向扫描速率的均匀性, 这一项是不能缺少的。)而照射全息图的激光束总有一定的宽度(为了尽可能增强衍射光的强度, 应充分利用全息图, 使激光束宽度等于全息图的宽度), 这样照射在全息图上端和下端的激光, 由于 y 值不同将分别扫描不同的曲线: $y + \xi(\eta)$ (见 (2) 式), 因而形成拖曳现象。

在字符需要回扫的情况下, 偏置项 y 在回扫时要变号, 这样将使再现的字符在回扫处笔划移位, 因此激光束应尽可能沿 $y=0$ 的直线照射, 以减小移位的距离。但是由于激光束总有一定的宽度, 拖曳现象仍是不可避免的。

克服拖曳现象的最简单方法是: 减少全息图的宽度。例如遮去全息图的大部分, 只留下 $1/n$ 宽度的一窄长条, 这样偏置项 y 的差值也降为 $1/n$, 拖曳距离相应地也降为 $1/n$ 。但是由于全息图宽度的减少, 使纵方向的衍射角度加大, 从而影响纵方向聚焦。又由于全息图透光面积的减小, 衍射光的强度也相应降低, 因而不可取。

我们采取的是延拓的方法, 即将此 $1/n$ 宽度的全息图照原样上下重复 n 次, 使全息图恢复到原来的宽度。这对再现像的影响可简单分析于下。

为了简单起见, 只考虑 y 方向一维的变化情况。以 $F_1(y)$ 表示 $1/n$ 宽度全息图, 它产生的再现像为 $f_1(\eta)$ 。以 $F_2(y)$ 表示延拓后的全息图, $f_2(\eta)$ 为其再现像, 那么

$$F_1(y) \supset f_1(\eta), \quad F_2(y) \supset f_2(\eta),$$

$$\begin{aligned} F_2(y) &= F_1(y) \otimes \left[\delta(y) + \delta\left(y - \frac{d}{n}\right) + \dots + \delta\left(y - \frac{n-1}{n} d\right) \right] \\ &= F_1(y) + F_1\left(y - \frac{d}{n}\right) + \dots + F_1\left(y - \frac{n-1}{n} d\right), \end{aligned} \quad (15)$$

式中符号 \supset , \otimes 分别代表傅里叶变换及卷积运算, d 为全息图的宽度。对 (15) 式两端分别求傅里叶变换, 得:

$$f_2(\eta) = f_1(\eta) \cdot \left[1 + e^{-i2\pi \frac{d}{n} \eta} + e^{-i2\pi \frac{2d}{n} \eta} + \dots + e^{-i2\pi \frac{n-1}{n} d \eta} \right]. \quad (16)$$

可见全息图延拓后所产生的再现像 $f_2(\eta)$, 与不延拓所产生的再现像 $f_1(\eta)$ 之间相差一个调制因子。该因子由一系列移位相因子组成, 其作用相当于一光栅。当 $\eta=0, n/d, \dots$ 时, $f_2(\eta)=nf_1(\eta)$ 得到主最强点。当 $\eta=1/d, 2/d, \dots$ 时, 调制因子为零, 再现像画面上将出现一系列平行于横轴的暗条, 在两暗点之间还有次最强点。这称为插零现象, 是全息图在纵方向延拓的必然结果^[6]。从以上分析可见: n 愈大, 拖曳距离愈小, 拖曳现象愈减弱, 但插零现象愈明显。图 8, 9 是延拓次数 $n=2$ 时的全息图及再现像, 图 10, 11 是延拓次数 $n=4$ 时的全息图及再现像。实验结果证实了以下结论: 全息图在 y (纵) 方向延拓, 压缩了拖曳距离, 改善了 ξ (横) 方向的聚焦情况, 但是在 η (纵) 方向发生插零现象, 使扫描曲线不连续。

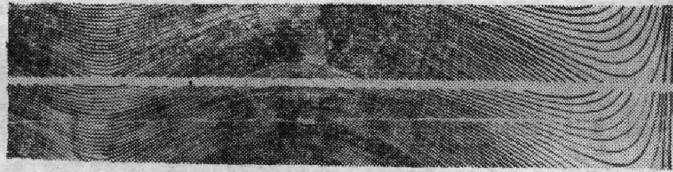


图 8



图 9



图 10



图 11

四、小 结

本文所提出的方法实际上就是将过去我们称之为纵扫描的方法^[5] (它可以扫描任意函数曲线, 但需给出该函数的分析表达式) 用于扫描任意字符。特点是原理简单, 计算及作图工作量均不大。一般字符的取样值 $f(i)$ 个数约 400~500 个, 在用 (4) 式计算 $\phi(n, 0)$ 值时, 约需作 400~500 次加法, 在用 (7) 式计算 $y_n^{(0)}$ 值时, 约需作 25~50 次除法, 即可据此作出第一条等 ϕ 线。由 (10) 式及图 3 可见, 在第一条等 ϕ 线作出后, 其它等 ϕ 线均极易作出。实际上除计算 $\phi(n, 0)$ 值时需用电子计算机外, 其余计算只需手持式计算器即可。增加全息图的重复次数即可改善聚焦情况。这样制作计算全息图时的计算工作量和作图工作量均较已报导过的方法简单得多。缺点是扫描出的笔划不连续, 只能用于例如在材料上刻写字符等特殊用途。

参 考 文 献

- [1] O. Bryndahi, W. H. Lee; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 1 (Jan), 133.
- [2] C. H. Ih; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 5 (1 Mar), 748.
- [3] D. K. Campbell, D. W. Sweeney; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 23 (1 Dec), 3727.
- [4] W. H. Lee; *Ed by E. Wolf; Progress in Optics, Vol. 16*, (North-Holland Pub. Comp., Amsterdam, New York, Oxford, 1978), 228.
- [5] 高文琦, 叶权书; *《光学学报》*, 1983, **3**, No. 3 (May),
- [6] 高文琦, 叶权书; *《南京大学学报》*, 1980, 物理学专刊, 57.

A laser scanner applicable to scanning any graphics

YE QUANSHU AND GAO WENQI

(Department of Physics, Nanjing University)

(Received 12 December 1981, revised 26 July 1982)

Abstract

A type of computer-generated holographic scanner, being able to scan any type of 2-D patterns such as characters is described. Methods of improving the focusing ability and reversing the scanning direction are introduced and the experimental results are presented.