

## 光学信息处理讲座

### 第三讲 计算机全息图及其应用

陆 伯 祥

(中国科学院物理研究所)

1948年 Gabor 提出了一种新的两步成像方法,他称之为波前重现。Gabor 证实,物体的衍射光波与一个合适的相干参考波相叠加,该物体衍射光波的振幅和相位都能以干涉强度的形式记录下来,由这样一张记录下来的干涉图象(全息图),可以重现原来物体波前。现在甚至可以记录和重现看不见的或者实际上不存在的直觉物理客体,这就是计算机全息图能帮我们做到的。原则上讲,只需要知道物体的数学表示,计算机全息图就可以把物体波前重现出来,例如有机化学分子、电子云分布、计算机辅助设计的飞机和水坝等。

计算机全息图可以产生接近于理想的物体波前。利用光学干涉方法,将加工的光学元件同计算机全息图产生的波前进行比较,能够完成加工精度检测。利用计算机全息图可以制作最佳特征识别滤波器以及许多特殊的全息光学元件,计算机全息图还可以将二维图象合成为三维图象显示出来。

#### 一、计算机全息图<sup>[1]</sup>

就重现物体衍射波前这一点来讲,计算机全息图和光学全息图是一样的。但计算机全息图并不完全类同于光学全息图。为了说明计算机全息图的制作,我们先了解一下光学离轴全息图。

假设我们记录一个三维物体如图1所示,全息图是物体衍射波前和参考波前干涉强度的记录。如果在全息图平面上物体衍射波前表示为  $O(x, y)$ , 参考波前表示为  $R(x, y)$ , 则它们

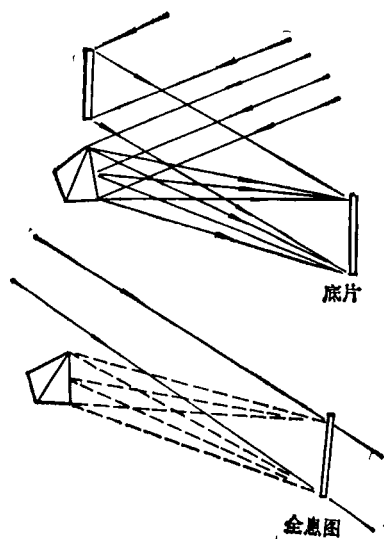


图1 光学全息图的记录和重现

彼此相干的干涉强度为

$$\begin{aligned} H(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |O|^2 + |R|^2 + RO^* + R^*O. \end{aligned}$$

这是光学全息图的数学表示。重现时用参考光束照明全息图,将得到三项重现波前:

$$\begin{aligned} R(x, y)H(x, y) &= G_1 + G_2 + G_3, \\ G_1 &= (|O|^2 + |R|^2)R, \\ G_2 &= RR^*O^* \\ G_3 &= |R|^2O. \end{aligned}$$

$G_1$  是经调制的参考光束,仍然沿原来方向传播,  $G_2$  为物体的共轭波前,  $G_3$  就是重现的物体衍射波前。  $G_2, G_3$  分别位于参考光束的两边。如果参考光束和物体衍射光波之间的夹角足够大,  $G_1, G_2, G_3$  彼此就不会重叠。

实际上我们感兴趣的是  $O(x, y)$ , 通常物体衍射波前是复振幅,物理上我们还无法直接

记录光波复振幅中的相位项。以上光学全息的办法是叠加一束相干参考光波，使其和物体波前形成一组干涉条纹，将相位信息巧妙地编码在干涉强度之中，而光强则有许多办法可以记录。用无线电的概念来理解参考光束的作用，相当于在信号(物体波前)上叠加一偏置项，使  $H(x, y)$  总保持正实数，我们把这种在物理上使复振幅记录成为可能的办法称为编码(coding)方法。前面已经指出，重现时  $G_1, G_2$  是没有用的，制作计算机全息图时，为了节省计算和画图时间，往往想法省掉这二项，问题是要找出新的编码方法。实际上创造和改进编码方法一直是计算机全息图研究工作的一个重要内容。计算机全息图是 Lohmann 等<sup>[2]</sup>发明的，下面我们仍以 Lohmann 全息图为例，简要地介绍计算机全息图的制作并了解它与光学全息图的差别。

制作计算机全息图的第一步是标定物体，将待重现的物体以数字形式输入计算机。假定物体是二维的图象，将每一方向分成  $N = 2^n$  个单元，这样二维平面共有  $N \times N = 2^{2n}$  个取样单元，将每个单元对应的图象以数值形式输入计算机。然后，象光学全息图一样，按照物体和全息图平面之间的位置关系，确定全息图的类型。计算机全息图也分为：(1) 像全息图；(2) Fourier 全息图；(3) Fresnel 全息图。确定了全息图类型后，就能决定波的传播的数学表示并计算全息图平面上物体衍射波前的复振幅。假定我们制作 Fourier 全息图，那末从物平面到全息图平面波的传播过程在数学上表示为 Fourier 变换，对物函数进行 Fourier 变换，就可以求出全息图平面上的复振幅分布。注意，我们只计算物体衍射波前在全息图平面的复振幅分布，而光学全息图是记录物体波前叠加参考波以后的干涉强度分布。接着的问题是采用什么物理上可行的办法将复振幅表示出来？Lohmann 全息图应用迂回位相(Detour Phase)方法编码复振幅。所谓迂回位相法是这样编码振幅和相位的：根据取样定理，全息图应具有和物平面相同的分辨单元数  $N^2$ ，假定第

物理

$n, m$  个单元的振幅值为  $A(n, m)$ ，相位值为  $\Phi(n, m)$ 。我们在取样单元中开一个矩形孔，使矩形孔的面积正比于振幅值， $A(n, m)$ ，矩形孔在取样单元中的位置(指相对于取样单元中心的距离)正比于  $\Phi(n, m)$ ，如图 2 所示。

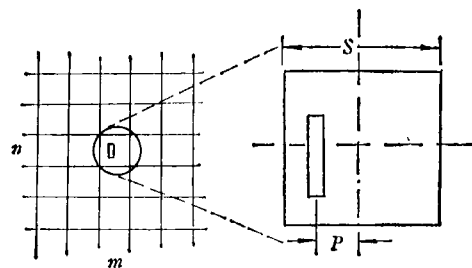


图 2 迂回位相全息图的取样单元

我们不想在这里对迂回位相全息图进行详细讨论，而只想说明这样做是合理的。假定我们可以“冻结”一束平面波前，两个相邻振幅最大值(波峰)平面的间距为  $\lambda$ ，如果这个被“冻结”的平面波以入射角  $\theta$  照射在一个平面上，在这个平面上相邻最大值的间距为  $S = \lambda / \sin \theta$ ；假定在该平面处放一块黑屏，在屏上每隔  $S$  距离开一条细孔，这样透过每一细孔的光波都具有相同的相位，如图 3 所示，如果有一个开孔偏离正常位置  $S/2$ ，那么透过这个孔的光波同其它位置透过的光波相差  $180^\circ$ ，这说明了开孔位置和相位之间的关系  $\Phi = 2\pi P/S$ ， $P$  表示位置偏离，迂回位相法就是利用这种位置和相位的关系来编码相位的。至于开孔大小正比于振幅

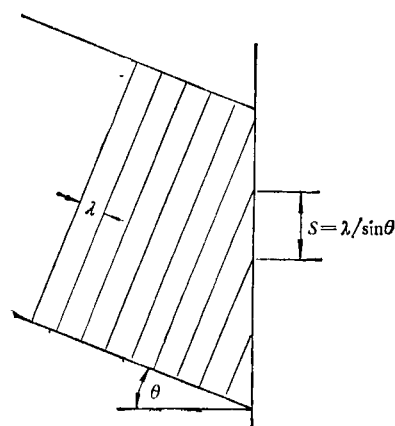


图 3 平面波前的位置和相位

是比较容易理解的。

有了适当的编码方法以后，就可以将计算结果通过计算机控制的绘图设备绘制在纸上，迂回位相法画出来的计算机全息图是由  $N^2$  个小孔组成的二维阵列。为了充分利用绘图仪器的分辨能力，画在纸上的全息图一般比较大，最后需要照相缩小 300—500 倍。缩小后的全息图，放到相干光处理器前焦平面上，在后焦平面位置上就能看到重现现象。

继迂回位相法之后，又有人研究和改进了新的编码方法，Lee<sup>[3]</sup> 提出延迟抽样 (Delayed Sampling) 编码方法。在 Lee 的方法中每一取样单元又分成四小块，每块递增位相差  $\pi/2$ ，类似于复数的坐标轴表示法，1, 3 表示正、负实数，2, 4 表示正、负虚数，任何复数可以用这四个分量中的两个表示出来，如图 4(a) 所示。每个取样单元中有两个矩形孔，矩形孔的大小是固定的，透过率决定于振幅值，位置决定于相位值。Burckhardt<sup>[4]</sup> 对 Lee 的方法稍作改进，他认识到复数坐标中只需要三个基矢就可以表示任何复数，所以他把取样单元只分成三块，每块递增相位  $2\pi/3$ ，如图 4(b) 所示。

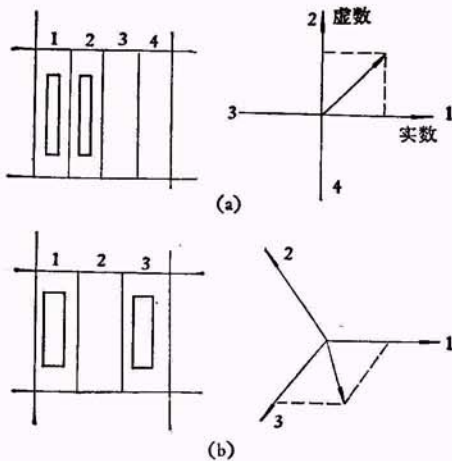


图 4

(a) Lee 全息图取样单元; (b) Burckhardt 全息图取样单元

最近 Lohmann 等<sup>[5]</sup> 根据厄密函数的 Fourier 变换性质，提出了一种新的编码方法。新方法的特点是每个取样单元中矩形孔的位置总

是固定在取样单元中央，矩形孔的大小正比于振幅，图 5 是这种方法编码的全息图和再现现象。

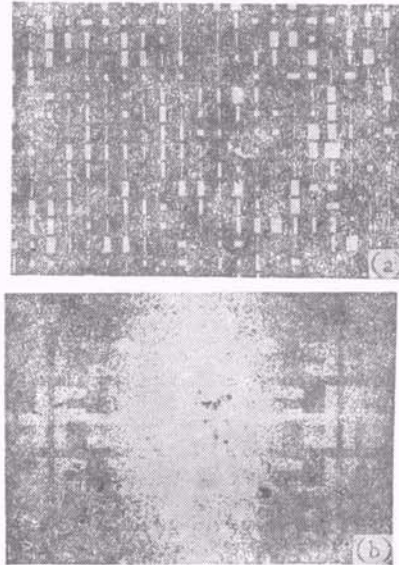


图 5 厄密函数全息图及其再现现象  
(a) 全息图; (b) 再现现象

这种全息图可以用比较简单的仪器制作，例如经过改装的打印机 (printer) 或用铅字印刷技术，适用于具有厄密性质的物函数以及厄密化以后的任意物函数。

对于纯位相物体，画出它的离轴全息图的干涉图象是一种比较好的办法<sup>[6]</sup>，纯位相物体离轴全息图的透过率为

$$T(x, y) = \frac{1}{2} \{1 + \cos[2\pi\alpha x - \Phi(x, y)]\},$$

其中  $\Phi(x, y)$  为物体的相位， $\alpha$  为物光束和参考光束夹角。干涉条纹的极大值和极小值位置在

$$\begin{aligned} \max T(x, y) \quad 2\pi\alpha x - \Phi(x, y) &= 2n\pi \\ \min T(x, y) \quad 2\pi\alpha x - \Phi(x, y) &= (2n+1)\pi \end{aligned}$$

式中  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。

全息干涉条纹的强度变化是正弦式的，考虑到这样一个事实：尽管在记录、显影等过程中有许多非线性效应，黑度畸变的光学全息图仍然能够得到很好的重现现象，因此用计算机制作这类全息图时，我们可以不顾原来正弦变化的条纹分布而制作干涉条纹的二元图象。因为二元条纹的制作和处理要容易得多，限于篇幅

还有一些工作不能一一介绍，更丰富的内容可参阅文献[1]。

## 二、若干新进展

一张光学全息图形成的三维图象包含非常丰富的信息，每一方向上大约有  $10^4-10^6$  分辨单元，这么多信息的储存和处理对一般计算机和画图设备来讲不是没有困难的，由于这个原因，目前计算机全息图还不能很理想地重现三维波前，计算机全息图潜力的发挥尚有待于计算方法 and 绘图设备的突破。近年来计算机全息图制作的研究工作取得了一些进展，下面介绍一些这方面的工作。

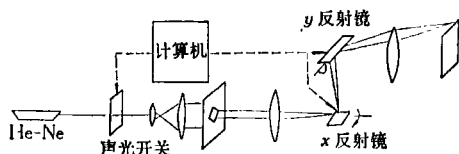


图6 计算机全息图记录装置

加里福尼亚大学(圣地亚哥)<sup>[2]</sup>新建立的制作计算机全息图的设备如图6所示，光束偏转和光强调制都是计算机控制的。工作原理如下：He-Ne 激光器光束经过声光调制开关，扩束后照明一大小可调的矩形孔径光阑。孔径光阑放置在透镜的前焦平面上，两块扫描反射镜的中心平面处在透镜的后焦平面上。扫描反射镜是用电流计反射镜改装的，由计算机控制分别作  $x$  扫描和  $y$  扫描，后面一块透镜形成孔径光阑缩小的象。这个装置制作的全息图采用 Lee/Burckhardt 的编码方法，计算机控制的声光开关可以改变曝光时间从而控制矩形孔象的透过率。用这个设备制作的全息图尺寸达  $1.7 \times 1.7\text{cm}$ ，空间带宽乘积达  $10^7$  瑞利极限可分辨点，扫描速度一般为 350 点/s，最大可达 1000 点/s，最长曝光时间为 65ms，精确到  $1\mu\text{s}$ ，扫描分辨率为一维 16384 点。

Aerodyne Res 公司为美国陆军制造了一台计算机画图设备，这台设备只为和美国政府订

物理

有契约的用户提供服务，设备的关键是一台高质量的阴极射线管，全息图尺寸可达  $7 \times 7\text{cm}^2$ ，最细条纹为  $10\mu\text{m}$ ，位置精度为  $1\mu\text{m}$ 。

Honeywell 公司发展了一种用电子束制作计算机全息图的技术。这种技术先将干涉条纹记录在透明材料上，然后用离子腐蚀的方法产生  $\lambda/2$  深度的二元位相全息图，这种全息图可以将衍射光基本上集中在一级中，得到接近 100% 的衍射效率。

Minnesota 大学<sup>[3]</sup>发展了一种能获得大角度、高衍射效率重现现象的全息复制技术。他们的办法是将计算机全息图放在相干光处理器中得到重现波前，然后叠加一束大角度的参考光束，并将干涉条纹记录在高衍射效率的重铬酸明胶上，这样首先用计算机全息图产生的波前就被复制到高效率的光学全息图上了。

计算机全息图制作技术的进步已经使得某些应用变得更为现实了。

## 三、计算机全息图的应用

### 1. 非球面检测

目前计算机全息图最重要的应用之一是检验透镜，特别是非球面镜的检验。光学系统中使用非球面镜，能大大改进系统的性能和简化光学系统的结构。然而非球面加工和检测是十分困难的事情，这是现代光学系统急待解决的一个课题。计算机全息图可以形成各种理想的波阵面包括非球面，为非球面检测开辟了一条新路。在图7所示的干涉仪中，利用计算机全息图产生的非球面波前作为标准同待测非球面进行比较。计算机全息非球面检测的精度一般可以达到  $1/15$  至  $1/20$  波长。随着计算机全息

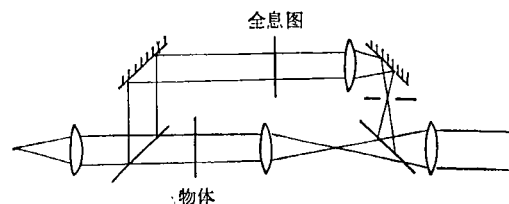


图7 光学干涉仪

技术的发展,非球面检测已逐步接近实际使用阶段。

## 2. 全息光学元件

全息光学元件具有面积大、重量轻、价格低等优点,然而光学方法制作的全息光学元件使用时受制作波长、角度等条件限制。利用计算机全息图能制作更灵活、通用的全息光学元件。特别在一些特殊的波段如红外,由于没有适当的记录材料,光学方法还无法制作红外全息光学元件,在这种场合计算机全息图的灵活性就更突出了。近年来开始研究用全息光学元件做太阳能聚集器<sup>[9]</sup>,全息太阳能聚集器的主要优点是不需要转动机构就能自动跟踪太阳光,它能在原地收集从上午至下午约 $100^\circ$ 角度范围内的太阳光线,聚集度为4:1。美国飞机上已开始装备帮助驾驶员工作的全息光学元件<sup>[10]</sup>,这种元件能将机内有关设备如仪器的面板,仪表指针等根据需要显示在飞行员的正前方,这样飞行员不用扭头就能随时了解机内各种设备的运行状况。计算机全息图还能用来会聚光束,用计算机全息元件聚焦半导体激光器的光束来读取“电视唱片”(video disk)的信息。

## 3. 三维显示

前面提到过三维象包含大量的信息,用计算机全息图直接重现三维象目前还有困难,一般先用计算机全息图产生多个二维象,然后用适当方法将这些二维图象合成使观察者看到三维的象<sup>[11]</sup>。假定有一个三维物体,首先用计算机算出它在各种不同角度的二维投影并形成计算机全息图,将计算机全息图产生的二维投影象顺序地记录在底片上,用合成全息方法顺序将每个投影象转换成许多顺序排列的条状全息图,重现时观察者的两只眼睛在空间不同位置看到不同投影角度的景象,就看到一个有视差效果的三维象。合成的方法有许多种,取决于二维图象的性质。用这种方法可以合成核磁共振、B型超声成像、断面层析(computer aided

tomography)等技术得到的图象。

## 4. 光学信息处理

第一张计算机全息图就是为特征识别目的设计的匹配滤波器。光学信息处理系统主要局限在线性操作范围里,计算机全息图进入光学处理系统能扩大光学信息处理系统的能力。Bryngdahl<sup>[12]</sup>等证实计算机全息图可以使光学系统完成空间可变(space variant)操作。例如,空间坐标变换,对数变换等,但是从质量上看,这种系统还有待于大大改进,才能评价其实用价值。

随着计算技术及外部设备的发展,计算机全息图及其可能的应用也会逐步发展。如果前景做些估计,计算机全息非球面检测将会对光学系统设计产生重大影响。计算机全息图无疑会开拓光学信息处理系统的能力,特别是对于光学特征识别系统及非线性处理系统的发展。用于三维显示目的的计算机全息图一旦发展到接近实用阶段,必将在医学、生物、化学、设计等领域产生深远影响。

## 参 考 文 献

- [1] W. H. Lee, *Progress in Optics XVI*, North Holland, (1978).
- [2] B. R. Brown, A. W. Lohmann, *Appl. Opt.*, **5** (1966), 967.
- [3] W. H. Lee, *Appl. Opt.*, **9** (1970), 639.
- [4] C. B. Burckhardt, *Appl. Opt.*, **9** (1970), 1949.
- [5] A. W. Lohmann, V. Gerbig, Lu Po Shiang Annual Meeting of Opt. Soc. Am., Oct. 18—22, (1982).
- [6] O. Bryngdahl, A. W. Lohmann, *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968), 141.
- [7] J. R. Leger, S. H. Lee, *Opt. Eng.*, **21** (1982), 557.
- [8] H. Bartelt, S. K. Case, *Appl. Opt.*, **21** (1982), 2886.
- [9] J. E. Ludmann, *Appl. Opt.*, **21** (1982), 3057.
- [10] *News from Lasers and Applications*, **2** (1983), 22.
- [11] M. C. King, A. M. Noll, *Appl. Opt.*, **9** (1970), 471.
- [12] O. Bryngdahl, *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974), 1092.