

文章编号 : 0258-7025(2001)02-0173-03

三维物体相息图的研制*

蔡晓鸥

(温州师范学院物理系 温州 325003)

王辉 李勇

(浙江师范大学信息光学研究所 金华 321004)

提要 通过扫描将全息图输入计算机,用计算机分析出物光波的信息,并以此制作相息图,从而实现实际物体相息图的制作。

关键词 相息图,光学全息图,立体显示,计算机全息图

中图分类号 :TB 877 **文献标识码** :A

Study on the Kinoform of 3D Object

CAI Xiao-ou

(Department of Physics, Wenzhou Teacher's College, Wenzhou 325003)

WANG Hui LI Yong

(Institute of Optical Information, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Abstract A way to manufacture kinoform of actual object is proposed. A kinoform is given by two steps—inputting optical hologram in computer by scanning and then analyzing its information of object wave.

Key words kinoform, optical hologram, stereoscopic display, CGH

1 引言

相息图(Kinoform)只有成像光波,无其他衍射光损失,衍射效率高,因而是一种光波重构的理想元件^[1]。由于相息图及其制作的特殊性,很难用光学方法得到,一般都是用计算机制作^[2]。到目前为止,以相息图为基础的最成功的应用是制作二元光学元件^[3,4]。利用相息图进行三维物体的记录与再现,除了早期的一些工作外^[5],到目前为止几乎没有什么进展,造成这一状况的主要原因是实际三维物体的物光波数据难以提取。以前这方面的工作都是以简单的几何图形作为物体的。实际三维物体的空间结构一般都很复杂,很难用具体函数去描述其物光波的分布。Schnars等提出用 CCD 元件作为全息图的记录材料得到数字全息图,并用计算机获取物光波波前的方法^[6],但记录系统要求高。本文提出把实际物体的全息图扫描输入计算机,通过计算机模拟再现全息图。在再现光波的数据中析出原物光波

数据,这一数据包含原物光的振幅和位相,由此即可利用计算机制作原物的相息图。理论和实验结果都表明,这一方法是完全可行的。

2 计算机模拟再现全息图和三维物光波信息的提取

光学全息图是一幅连续的灰阶图,经扫描仪扫描输入计算机形成二维向量

$$t(i, j) = \begin{bmatrix} \alpha(0, 0) & \alpha(0, 1) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha(1, 0) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \alpha(i, j) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha(N, N) \end{bmatrix} = [t_{ij}] \quad (1)$$

$[t_{ij}]$ 为数字化的全息图透射率; $\alpha(i, j)$ 为 (i, j) 点的振幅透射率。它和如下的透射率相对应

$$t(x, y) = O(x, y) + R(x, y) + O^*(x, y)R(x, y) + \alpha(x, y)R^*(x, y) \quad (2)$$

$O(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 分别为全息图面上的物光和参考光分布,上标星号表示复共轭。由光学再现全息图

* 浙江省科委科技计划项目和浙江省自然科学基金资助项目。

原理可知,若要从(1)式的全息图再现物体实像,需用原参考光的共轭光照明全息图。设照明光为 C , 计算机模拟时,将其量化为

$$\vec{\alpha}(i, j) = \begin{bmatrix} \alpha(0, 0) & \alpha(0, 1) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \alpha(1, 0) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \alpha(i, j) & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha(N, N) \end{bmatrix} = [C_{ij}] \quad (3)$$

从全息图出射光的复振幅为 $\alpha(i, j) \cdot \vec{C}(i, j) = [\phi_{ij}]$, 此光波在像面的复振幅分布为

$$K(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \phi(j, k) \cdot \exp\left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{1}{l_l} (j^2 + k^2)\right] \cdot \exp\left[-\frac{2\pi i}{N} (uj + vk)\right] \quad (4)$$

式中 l_l 是像距,它与原物距 l_0 , 参考光、再现光到全息图的距离 l_R, l_C 之间的关系是

$$\frac{1}{l_l} = \frac{1}{l_C} - \mu \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_R} \right) \quad (5)$$

(4) 式可写成如下形式

$$K(u, v) = i(u, v) + i^*(u, v) + \alpha(u, v) \quad (6)$$

式中 $i(u, v)$ 为再现像的分布, $i^*(u, v)$ 为共轭像的分布, $\alpha(u, v)$ 为直透光的分布。按照全息再现原理,在离轴全息情况下,只要参-物光夹角足够大,这三个分布在像面上是分离的。这就意味着 $K(u, v)$ 表示的像面分布矩阵中, $i(u, v)$ 不为零的地方, $i^*(u, v)$ 和 $\alpha(u, v)$ 都为零, 同样 $i^*(u, v)$ 不为零的地方, $i(u, v)$ 和 $\alpha(u, v)$ 都为零。这样,就可以从 $K(u, v)$ 中单独提取出 $i(u, v)$ 或 $i^*(u, v)$, 得到实际三维物体光波的数字化复振幅分布。我们用 Matlab 语言编程, 计算再现衍射公式(4)式, 得到了非常满意的结果。图 1 是一三维物体全息图, 经扫描数字化后, 由(4)式算出的 $K(u, v)$ 分布, 其中三个区域分别是 $i(u, v), \alpha(u, v)$ 和 $i^*(u, v)$ 。

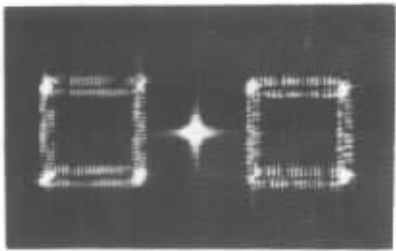


图 1 光学全息图计算机模拟再现的波前光强分布
Fig.1 Light-intensity distribution of wavefront reconstruction from optical hologram by analog computation

一种特殊情况是傅里叶变换全息图。此时 $l_0 = l_R$, 且再现光是平行光, 即

$$1/l_l = 0$$

(4) 式变为

$$K(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \phi(j, k) \cdot \exp\left[-\frac{2\pi i}{N} (uj + vk)\right] \quad (7)$$

上式实际上是从全息图出射光波 $\phi(j, k)$ 的傅里叶变换。这样, 通过计算机计算光学全息图所记录的三维物体光波信息就更加容易。

3 相息图的制作

分离出的 $i(u, v)$ 是像的复振幅分布, 对于三维物体它应是其像附近某一平面上的分布, 一般不是均匀的漫射光, 因而直接用 $i(u, v)$ 来制作相息图不太合适。可以让它再传播一段距离 l , 如图 2 所示, 在平面 O 上的分布菲涅耳近似为

$$\alpha(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} i(u, v) \cdot \exp\left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{1}{l} (m^2 + n^2)\right] \cdot \exp\left[-\frac{2\pi i}{N} (um + vn)\right] \quad (8)$$

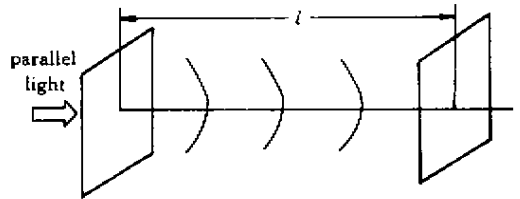


图 2 物光波的传播

Fig.2 Propagation of object wavelight

(8) 式和(4)式具有相同的形式, 因而可以用相同的程序计算 $\alpha(m, n)$, 同样, 如果令 $1/l = 0$ (8) 式就为傅里叶变换表达式。用 Matlab 语言算出 $\alpha(m, n)$ 的相位分布, 即 $\alpha(m, n)$ 的幅角

$$\varphi(m, n) = \text{angle}[\alpha(m, n)] \quad (9)$$

制作相息图的一个简单的方法是将 $\varphi(m, n)$ 取模数 2π 的余数, 即在 $(0, 2\pi)$ 之间取值。然后绘制成灰阶图, 并微缩翻拍到浮雕型感光胶片上, 经显影和漂白处理后就得到了相息图^[2]。

本实验中所使用的扫描仪的分辨率约为 24 线对/mm, 对于实际全息图来说这一分辨率是过小的。为了解决这一问题, 第一是选择很小的物体作为目标, 并使参-物光夹角尽量小, 第二是将已拍摄的全息图放大。作为原理验证, 选择大小为 3 mm × 3 mm

$\times 3 \text{ mm}$ 的框架作为物体,参-物光夹角约为 3° 。然后经图 3 所示光路进行放大 4 倍。最后得到的全息图的主空间频率约为 20 线对/mm。

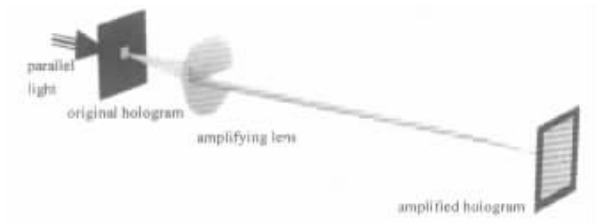


图 3 全息图放大光路

Fig.3 A light path for hologram's amplification

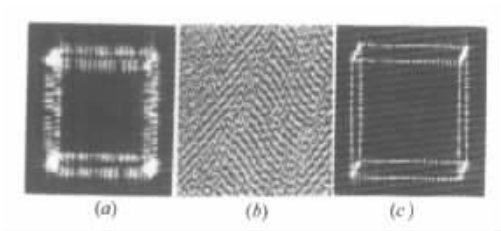


图 4 (a) 从再现光中截取的物光波 (b) 与 (a) 对应的相息图 (c) 相息图再现像

Fig.4 (a) Object wave captured from wavefront reconstruction; (b) Kinoform corresponding (a); (c) Image reconstruction of Kinoform

图 4 是实验结果。(a) 为从 $K(u, v)$ 中提取的 $i(u, v)$ 的光分布 (b) 为 $i(u, v)$ 的傅里叶变换相息图的灰度分布, 将这一灰度图缩微到银盐干板上, 经显影、漂白等处理后形成相位分布, 图 4(c) 为相息图的激光再现像。

实验发现, 和原全息图的再现像相比, 模拟相息图的再现像噪音较大。其原因主要有三个: 一是扫描仪的分辨率尚不能完全满足要求, 为了满足扫描仪的分辨率要求, 我们不得不取原全息图很小的一部分并将其放大进行扫描, 这样最后得到的相息图的面积也是很小的, 因衍射受限而产生像点模糊。按照点全息图再现像最小分辨周期公式^[7]: $\epsilon_i = \lambda |z_i| / D_h$, 式中 z_i 为再现像点到相息图的距离, 全息图孔径 D_h 越小, 其再现像分辨率越低, 将产生大的像模糊。另外, 目前个人计算机的容量和速度也限

制了全息图面积的大小, 大面积的全息图必然要占据更多的内存和花费更多的计算时间。但这些原因并非原理上的问题, 可通过提高实验设备的档次来解决。第二个原因是由于全息图数据的量化产生了量化噪音。其后果是再现时产生了很弱的叠加在零级像上的高级次再现像, 这可以在微缩时作适当的平滑来解决。第三个原因是相息图的相位控制不严格引起的。在相息图制作过程中, 位相的控制是极为关键的一步。控制漂白过程中相位分布与灰度分布严格成正比, 并且位相差在 0.2π 之间是一个复杂的问题, 目前尚在研究之中。

在考虑现有实验条件的情况下, 实验结果已经完全证实了本方法的可行性。这一方法的提出实际上包含两层意义, 首先是使实际物体的相息图的制作成为可能, 第二是作为本方法的中间步骤, 可以很容易得到一个实际物体的衍射光的波前分布, 这无疑对实现三维物体图像的计算机信息处理有重要意义。

参 考 文 献

- 1 L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jordan. The kinoform: a new form reconstruction device. *IBM J. Res. Develop.*, 1969, **13**(3): 150 ~ 154
- 2 Yu Meiwen. *Optical Holography and its Applications*. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1996. 301309 (in Chinese)
- 3 S. Bartkiewicz, A. Miniewicz, F. Kajzar *et al.*. Observation of high gain in a liquid-crystal panel with photoconducting polymeric layers. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(29): 6871 ~ 6877
- 4 Nobukazu Yoshikawa, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai. Adaptive computer-generated hologram using interpolation method. *Opt. Rev. B*, 1997, **4**(1): 161 ~ 163
- 5 Wai-han Li. Computer generated holograms: techniques and applications. *Progress in Optics*, 1978, Vol. XVI, 121 ~ 232
- 6 Ulf Schnars, Thomas M. Kreis, Werner P. O. Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms: reduction of the spatial frequency spectrum. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(4): 977 ~ 982
- 7 Yu Meiwen. *Holographic Display Technique*. Beijing: Science Press, 1989. 51 (in Chinese)