

文章编号: 0253-2239(2003)03-0284-05

# 三维面形测量数据的计算全息可视化\*

王 辉 李 勇 金洪震 应朝福

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

苏显渝

(四川大学光电系, 成都 610064)

**摘要:** 提出利用计算机制全息进行三维面形测量数据立体重现的技术。首先利用三维面形测量技术同时获取三维物体的强度像和距离像;然后根据三维面形测量数据,设计和制作菲涅耳计算全息图;最后将计算全息和光学全息相结合,以菲涅耳计算全息图的光学再现像为对象,记录光学像全息。这样既解决了计算机制全息术中真实三维物体立体信息数据捕捉的问题,又为三维面形检测提供了一个行之有效的立体重构技术。给出了这种方法的原理、计算全息的设计、制作方案和实验验证结果。

**关键词:** 全息术; 立体显示; 计算机制全息图; 三维面形测量

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

## 1 引 言

三维面形测量技术已在工业检测、实物仿形、生物医学、机器人视觉等领域得到了广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。在三维面形测量中,通过获得的三维面形数据进行立体重建,不仅可以更直观地对三维结构进行分析(例如微观三维表面结构分析),而且,三维数据的物体重建与三维面形测量一起可以构成一种新的立体显示技术。但是,已有的三维面形测量数据,从显示的角度来看,仍然是原物体的各个侧面的二维投影图或等高线图,并不是真正意义上的空间光分布的立体再现像。

激光全息是一种最有前途的逼真立体显示技术,将全息过程数字化的计算全息图更具灵活性和可传输性,所以一直受到人们的特别关注<sup>[5]</sup>。但是计算机制全息图在立体显示中却一直未有较大的进展。除了计算机速度原因以外,造成这一状况的另一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形体作为物体进行模拟的。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<sup>[6]</sup>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,但对记录系统要求高。蔡晓鸥等<sup>[7]</sup>曾经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,这一数据即包含原物光的振幅和相位,由此即可利用计算机制作原物的相息图。但这一方法仍是激光全息图的数字化,在实际应用中仍受到激光全息制作的诸多限制。

显然,将三维面形检测技术和计算机制全息技术相结合,既可以解决三维面形检测立体数据重现问题,同时为计算机制全息图的三维信息的捕获提供了一个行之有效的方法。本文提出一种真实感三维数据的全息可视化方法。首先利用三维面形测量技术同时获取三维物体的强度像和距离像,然后基于三维面形测量数据,设计和制作菲涅耳计算全息图,最后以菲涅耳计算全息图的光学再现像为对象,记录光学像全息。下面介绍利用计算机制全息技术达到三维表面测量数据的立体重构的原理并给出了实验结果。

## 2 由三维表面检测数据获得离散物光波数据

利用三维面形检测技术可以得到两组数据,分别是三维物体表面的相对深度数据  $h$ (又称距离像)和表面亮度数据  $r$ (又称强度像):

\* 浙江省自然科学基金(699024)、教育部高等学校骨干教师计划(1822)资助课题。

E-mail: wanghui@mail.jhptt.zj.cn

收稿日期:2002-01-29; 收到修改稿日期:2002-04-15

$$h(x_0, y_0) = \begin{vmatrix} h(-L\Delta x_0, -K\Delta y_0) & \cdots & h(L\Delta x_0, -K\Delta y_0) \\ \vdots & h(0,0) & \vdots \\ h(-L\Delta x_0, K\Delta y_0) & \cdots & h(L\Delta x_0, K\Delta y_0) \end{vmatrix}$$

$$r(x_0, y_0) = \begin{vmatrix} r(-L\Delta x_0, -K\Delta y_0) & \cdots & r(L\Delta x_0, -K\Delta y_0) \\ \vdots & r(0,0) & \vdots \\ r(-L\Delta x_0, K\Delta y_0) & \cdots & r(L\Delta x_0, K\Delta y_0) \end{vmatrix}$$

$\Delta x_0, \Delta y_0$  是三维物体分布数字化取样间隔,  $x_0 = l\Delta x_0, y_0 = k\Delta y_0, l = -L, -L+1, \dots, 0, \dots, L-1, L; k = -K, -K+1, \dots, 0, \dots, K-1, K$ 。物点数为  $(2L+1) \times (2K+1)$ 。

这两组数据可以构成三维物体的空间分布  $f(x_0, y_0, z_0)$ , 它既可以是自发光物体发光效率的空间分布, 也可以看成是三维物体的空间反射率。仿照全息的一般过程, 将  $f(x_0, y_0, z_0)$  看作是物体反射率, 假设用复振幅为  $A$  的平面相干光照明, 选择任一物点  $O$  与全息图的垂直距离为

$$z_0 = z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0),$$

$z$  是当物体的深度数据  $h(x_0, y_0) = 0$  时的物平面与全息图的距离, 如图 1 所示。

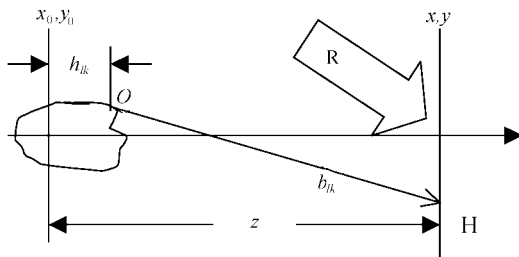


Fig. 1 Analogue hologram recording optical setup for three-dimensions data

物体上某一点  $O(l\Delta x_0, k\Delta y_0, z_0)$  反射的光传播到距物体参考表面为  $z$  的平面  $H$  上时, 物光波波前的菲涅耳近似为

$$U_{lk}(x, y) = Ar(l\Delta x_0, k\Delta y_0) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} b_{lk}\right), \quad (1)$$

式中,

$$b_{lk} = \frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)} + \frac{1}{2} \frac{(l\Delta x_0)^2 + (k\Delta y_0)^2}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)} - \frac{x(l\Delta x_0) + y(k\Delta y_0)}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)}, \quad (2)$$

是物点  $O(l\Delta x_0, k\Delta y_0, z_0)$  到  $H$  平面某点  $(x, y)$  的菲涅耳近似距离。

对于所有的点, 在  $(x, y)$  平面上的分布应是(1)式的相干叠加,

$$U(x, y) = \sum_{l=-L, k=-K}^{l=L, k=K} Ar(l\Delta x_0, k\Delta y_0) \times \exp\left\{\frac{-i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda[z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)]}\right\} \times \exp\left\{\frac{-i\pi[(l\Delta x_0)^2 + (k\Delta y_0)^2]}{\lambda[z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)]}\right\} \times \exp\left\{\frac{-i2\pi[x(l\Delta x_0) + y(k\Delta y_0)]}{\lambda[z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)]}\right\}, \quad (3)$$

因为是计算全息图, 所以必须对  $U(x, y)$  进行离散处理。实际上在具体计算时, 首先对  $U_{lk}(x, y)$  进行离散化, 然后再进行叠加得到  $U(x, y)$ 。离散化实质是取样, 而取样的精度取决于取样的间隔。根据香农定理, 当取样的间隔小于被取样函数的最小周期一半时, 信息不会因抽样而损失。但全息图所要记录的并不是  $U(x, y)$  本身, 而是  $U(x, y)$  与参考光叠加以后的干涉条纹强度分布。以  $(x, y)$  平面作为全息图记录平面, 引入参考光

$$R = R_0 \exp[i(2\pi/\lambda) y \sin \theta],$$

得到点  $O(l\Delta x_0, k\Delta y_0, z_0)$  全息图的干涉条纹分布

$$I_{lk} = |U_{lk}|^2 + |R|^2 + U_{lk}^* R + U_{lk} R^* = |U_{lk}|^2 + |R|^2 + 2R_0 Ar(l\Delta x_0, k\Delta y_0) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} y \sin \theta - \frac{2\pi}{\lambda} b_{lk}\right), \quad (4)$$

显然(4)式的周期由  $\frac{2\pi}{\lambda} y \sin \theta - \frac{2\pi}{\lambda} b_{lk}$  决定。而  $b_{lk}$  是物点坐标和全息图大小的函数, 当物体大小确定后, 通过计算可以得到全息图上周期最小值为<sup>[8]</sup>

$$\delta x = \frac{z - h(x_0, y_0)_{near}}{|x|_{max} + |x_0|_{max}} \lambda, \quad (6)$$

$$\delta y = \frac{z - h(x_0, y_0)_{near}}{|y|_{max} + |y_0|_{max} + [z - h(x_0, y_0)_{near}] \sin \theta} \lambda, \quad (7)$$

式中  $h(x_0, y_0)_{near}$  是最接近全息图物点的高度值,  $|x|_{max}, |y|_{max}$  分别是全息图  $X, Y$  方向的最大值,  $|x_0|_{max}, |y_0|_{max}$  是物点坐标的最大值。由此可以得到对物光波的取样间隔的要求为

$$\Delta x \leq \delta x / 2, \quad \Delta y \leq \delta y / 2, \quad (8)$$

经取样, (1)式的离散形式为

$$U_{ik}(x, y) = Ar(l\Delta x_0, k\Delta y_0) \begin{vmatrix} U_{ik}(-N\Delta x, -M\Delta y) & \cdots & U_{ik}(N\Delta x, -M\Delta y) \\ \vdots & & \vdots \\ U_{ik}(-N\Delta x, M\Delta y) & \cdots & U_{ik}(N\Delta x, M\Delta y) \end{vmatrix}, \quad (9)$$

式中若  $n, m$  单元取样点复振幅为

$$U_{ik}(n\Delta x, m\Delta y) = \exp\left\{-i \frac{\pi}{\lambda} \left[ \frac{(n\Delta x)^2 + (m\Delta y)^2}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)} - \frac{(l\Delta x_0)^2 + (k\Delta y_0)^2}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)} \right]\right\} \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{nl\Delta x\Delta x_{00} + m\Delta y\Delta y_{00}}{z - h(l\Delta x_0, k\Delta y_0)}\right], \quad (10)$$

$N\Delta x = x_{\max}, M\Delta y = y_{\max}$  是全息图最大尺寸。所有物点波前离散形式为(第  $n, m$  取样点)

$$U(n\Delta x, m\Delta y) = \sum_{l=L}^{L,K} \sum_{k=K} U_{ik}(n\Delta x, m\Delta y). \quad (11)$$

### 3 立体显示用的计算机制全息图的设计

将计算机制全息图用于立体显示必须考虑如下两个问题: 1) 视角问题; 2) 再现条件问题。如果视角太小, 则立体视差就不明显, 没有立体感, 甚至只有单眼视觉。解决这个问题需要将全息图做得大一些, 但由于一般计算机的计算速度对于全息图这样的信息量而言还不够快, 计算大幅全息图所需要的时间量十分巨大。所以彻底解决计算机制全息图大视角的问题取决于计算机的速度。所谓再现条件问题是指全息图是在什么样的照明条件下再现的。作为立体显示, 我们希望能在白光照明下再现。而白光再现计算机制全息图同样受到计算速度的限制。为此, 设计了一种方案, 即将计算机制全息图和光学全息图相结合, 可以同时解决视角和白光再现的问题, 而计算量也可大大减少。

首先根据模拟记录光路图 1 计算出长条形的菲涅耳全息图作为 H1, 然后, 利用激光再现获得再现像, 将此再现像作为目标再次拍摄它的全息图 H2, 如图 2 所示。这实质上是两步彩虹全息的制作方法, 只不过 H1 是计算机制全息图。需要说明的是, 它和纯光学的彩虹全息相比具有更大的灵活性。从质量上来讲, 彩虹全息图的质量基本上依赖于 H1 的质量, 而制作高信噪比的 H1, 对拍摄条件和后处

理条件要求是很高的, 而通过计算机制全息图可以得到理想信噪比的 H1, 从类型上来说, 彩虹全息图有彩色全息图、消色差全息图、周视全息图以及 2D-3D 全息图等等, 这些全息图的成功关键在于 H1 的设计与拍摄, 制作这些全息图的 H1 对技术要求特别高, 但若利用计算机来设计并制作 H1 则非常的方便和灵活。从拍摄的对象来说, 光学全息图对物体的静止要求是非常高的, 这样就使得许多物体的全息图的制作变得很困难, 有些物体难以放到全息台上, 如一些很大的物体; 有些物体本身就是动态的, 如人或其它动物。而计算机制全息图只要有这些物体的三维面形分布数据就可以了。另外, 自然界不存在的三维物体, 都可以通过计算机辅助设计 (CAD) 或其他三维设计软件生成三维物体数据, 然后制成全息图。所以计算机制全息图与光学全息图的结合实际上综合了两者各自的优势, 使得两类全息图都更加灵活方便。

彩虹全息图 H1 一般是长条形的, 它在最后再现时相当于视窗。为了得到双眼立体视觉, H1 的长度必须大于人眼的瞳距。即 H1 全息图的长度  $Lh \geq 65 \text{ mm}$ 。但为了保证最后再现像有较为宽松的视窗, 全息图 H1 的长度一般取 100 mm 左右。H1 的宽度要求取决于对再现像的分辨率和色模糊的要求。全息图的宽度越大再现像的分辨率就越高。但全息图的宽度增大将会导致再现像的色模糊增大。设 H1 的宽度为  $w$ , 则色模糊为<sup>[9]</sup>

$$\Delta I \approx z_0 w / z_s.$$

在物点 O 和 H1 相对于 H2 的距离确定后, 狭缝越窄色模糊越小。但考虑色模糊时, 必须同时考虑充分利用人眼的分辨极限。人眼的瞳孔直径约为 3 mm 左右, 为了同时兼顾人眼的分辨率和色模糊, 并考虑到光能利用问题, 狭缝的宽度一般取 2~3 mm。设  $z_0 = 10 \text{ mm}, z_s = 300 \text{ mm}$ , 则  $\Delta I \approx 0.1 \text{ mm}$ , 这样大小的模糊人眼是可以接受的。

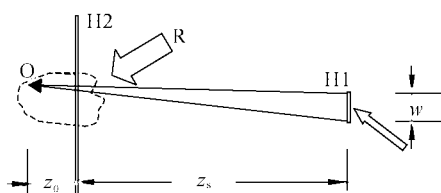


Fig. 2 Optical setup for recording rainbow hologram

## 4 实验与结论

进行实验时,首先必须考虑全息图的量化间隔问题。然后再按(4)式,进行干涉图的计算。

根据(6)式、(7)式,全息图的最小周期取决于如下几个参量:物体的尺寸 $|x_0|_{\max}$ 、 $|y_0|_{\max}$ 、 $h(x_0, y_0)_{\text{near}}$ ,全息图的尺寸 $|x|_{\max}$ 、 $|y|_{\max}$ ,参考光入射角 $\theta$ 以及光波的波长 $\lambda$ 。显然,物体、全息图、入射角越大,全息图的分辨率就越大。分辨率越高,计算量也就变大。为了减少全息图的分辨率以减少不必要的计算量,除了将全息图做成细长条形状以外,还可以尽量减小参考光的入射角。但在减小入射角的同时,必须保证再现像能和零级分离,入射角可参照图3计算。图中, $R^*$ 是再现光,它与原参考光共轭。 $\theta_{\min}$ 是再现像与零级光刚好分离时的参考光入射角。

根据图3,可以得到最小入射角为

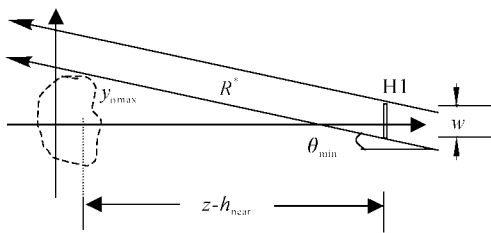


Fig. 3 Optical setup for calculating minimum incidence angle

$$\theta_{\min} = \arctan \frac{y_{\max} + w/2}{z - h_{\text{near}}}$$

设 $y_{\max} = x_{\max} = 30 \text{ mm}$ ,  $z = 300 \text{ mm}$ ,  $h_{\text{near}} = 10 \text{ mm}$ ,  $w = 2y_{\max} = 3 \text{ mm}$ , 则 $\theta_{\min} \approx 0.1082 \text{ rad} \approx 6.2^\circ$ 。

根据两步法彩虹全息图对H1的要求,H1的参量为 $Lh = 2x_{\max} = 100 \text{ mm}$ ,  $y_{\max} = 1.5 \text{ mm}$ , 利用(6)式、(7)式,波长取 $\lambda = 633 \text{ nm}$ , 得到H1的最小周期为 $\delta x = 0.0023 \text{ mm}$ ,  $\delta y = 0.0029 \text{ mm}$ 。取样间隔为 $\Delta x \leq 0.0012 \text{ mm}$ ,  $\Delta y \leq 0.0015 \text{ mm}$ 。

按照取样要求,设计了快速全息图的计算方法<sup>[10]</sup>获得了实际物体计算机制全息图。物体数据是根据相位测量轮廓术的原理获得的<sup>[2]</sup>。物点数为 $200 \times 200$ 。计算全息图像素由全息图的大小和取样间隔决定,因此(9)式中的 $N$ 和 $M$ 分别为

X方向

$$N = x_{\max} / \Delta x = 50 / 0.0012 \approx 41667,$$

Y方向

$$M = y_{\max} / \Delta y = 1.5 / 0.0015 \approx 1000.$$

而全息图的取样像素点数为 $(2N+1) \times (2M+1) = 166753335$ 。

图4(a)为原物体的数码相机拍摄的照片。利用相位测量轮廓术获得它的计算机数据。图4(b)为获得的H1全息图的局部放大,图4(c)为物体[图4(a)所示]利用图2光路拍摄的彩虹全息图再现像。

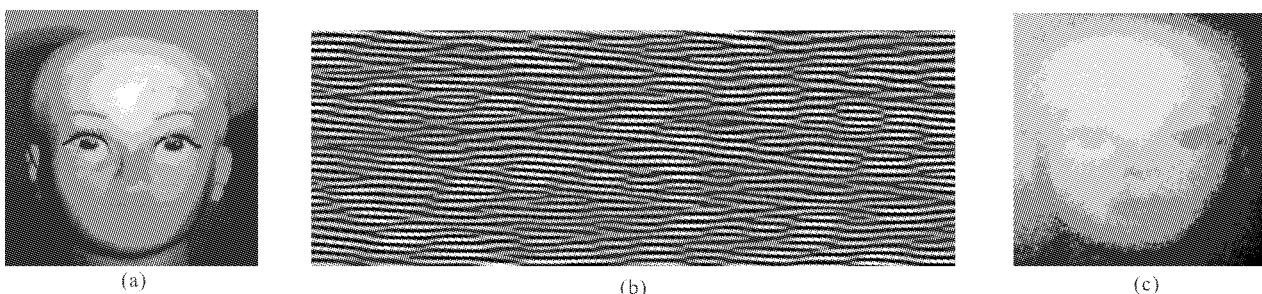


Fig. 4 Experimental result. (a) Original object (with digital camera); (b) Part of the hologram; (c) Reconstruction image (with digital camera)

实验中我们发现有两个重要因素影响再现像的质量。第一是消隐问题。实际观察物体时,在某一视角被遮挡的物点是看不见的,但在计算某一视角的全息图时,空间所有的三维数据都参与了计算,这样当全息图再现时,被遮挡的光点也将被再现出来,这就使得再现像对比度下降,并会产生错误的立体感觉。第二个因素是计算全息所特有的离散噪音。对于消隐问题,进一步的工作是通过将三维空间数据按视角分成多视角立体数据来解决计算全息图的消隐问题,工作较为复杂,将另文发表。至于离散噪音可以通过减小全息图的取样间隔,加大取样点数

来解决。因为减少全息图的取样间隔可以使得噪音成为高频部分,有可能因全息干板的截止频率而被减弱。而取样点数的增大将会使得噪音平滑,减少颗粒噪音。在这一方面我们已经做了一些努力,但不管是减小取样间隔还是增加取样点数,都对计算机的计算速度有更高的要求。因为减小取样间隔同时必须保证全息有一定的尺寸以有足够的视差产生立体感,而大尺寸、小取样间隔的全息图总计算点数必然要增多。我们除了研究快速算法外,目前正在研究使用“集群”计算机从根本上解决计算速度问题。另外,也是由于计算机速度问题将会限制物体

的大小。原因是大的三维物体必然伴随着高的空间频率,而根据(6)式~(8)式,高的空间频率必须有更小的取样间隔。

利用计算机全息技术进行三维表面测量数据的立体重构意义不仅为三维面形检测提供了逼真的立体再现,而且为计算机全息提供了真实三维物体立体信息获取方法,由此可以解决计算机全息图的目标物体一直由计算机模拟的问题。当然,根本地解决计算机全息在立体显示中的实用问题还有待于计算机技术的进一步发展。

感谢清华大学金国藩院士对本项工作的建议和指导。

### 参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Li Jitao. New progress in three-dimensional shape measurement. *Physics* (物理), 1996, **25**(10):614~620 (in Chinese)
- 2 Su Xianyu. Three-dimensional photography base on equivalent wavelength. *J. Optoelectronics Laser* (光电子激光), 2000, **11**(3):330 (in Chinese)
- 3 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: A review. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **35**(5):263~284
- 4 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6):792~796 (in Chinese)
- 5 Leseberg D. Computer generated holograms: cylindrical, conical, and helical waves. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20):4385~4390
- 6 Schnars U, Kreis T M, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms: reduction of the spatial frequency spectrum. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(4):977~982
- 7 Cai Xiaou, Wang Hui, Li Yong. Study on the kinoform of 3D object. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(2):173~175 (in Chinese)
- 8 Tao Chunkan, Tao Chunkuang. *Optical Information Theory* (光学信息论). Beijing: Science Press, 1999. 104~112 (in Chinese)
- 9 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* (信息光学). Beijing: Science Press, 1999. 142~144 (in Chinese)
- 10 Jin Hongzhen, Li Yong, Wang Hui. Fast calculation of kinoform by use of difference method. *Opto-Electronic Engng.*, 2001, **28**(4):30~33

## Visualization Using Computer-Generated Hologram (CGH) Based on Three-Dimensional Shape Measurement Data of Object

Wang Hui Li Yong Jin Hongzhen Yin Chaofu

(*Information Optics Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004*)

Su Xianyu

(*Photo-Electronic Science and Technology Department Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 29 January 2002; revised 15 April 2002)

**Abstract:** A technique of reconstructing 3-D object shape by its measurement data using CGH is proposed. Firstly, both the range image and the intensity image of 3-D object are acquired simultaneously by using 3-D sensing system. Then, the Fresnel CGH is designed and fabricated. The problem of combining CGH with optical holography, an image hologram is recorded. This technique resolves how to obtain 3-D data in CGH as well as how to reproduce the object images in measurement of 3-D object shapes. The principle of the proposed method, the technology for designing and fabrication of the CGH and optical hologram and the experimental results are given.

**Key words:** holography; three-dimension display; computer-generated holograms (CGH); measurement of 3-D object shapes