

动态数字彩虹全息显示的研究*

王媛媛 王 辉 任志君 叶 慧

(浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

摘 要 提出一种动态数字彩虹全息显示术, 该技术将计算机全息术和动态双视彩虹全息合成术相结合, 根据彩虹全息的基元全息图为“线全息图”以及双眼立体视觉的特点, 计算物点的线全息图上两个片断, 使得两个全息图片断分别对应左右眼视图, 同时对彩虹全息图的狭缝像进行横向分割, 使得不同区域成为物体不同姿态的视窗, 从而达到动态显示的效果. 给出了数字动态全息的计算方法, 并得到了初步的实验结果.

关键词 计算机全息; 动态全息; 彩虹全息; 体视全息对

中图分类号 TB877 **文献标识码** A

0 引言

作为数字全息技术之一的计算机全息术^[1]与光学全息比较具有灵活方便的特点, 尤其在显示全息领域这些特点表现得更为明显. 随着计算机技术及其外设备的迅速发展, 数字全息用于显示的技术得到了快速发展并逐渐趋向实用^[2~4]. 动态全息技术作为一种生动的立体显示技术一直受到人们的关注^[5,6], 但是计算机全息图^[7]在动态全息术中的应用尚未见报道. 所谓动态全息图指的是在一张全息图上记录了物体的连续的不同姿态, 再现时, 当移动眼睛或者移动全息图时, 可以看到变化的立体场景. 当然, 动态全息技术和目前兴起的实时全息技术^[8]不是一个概念. 实时全息术是数字全息和电子技术相结合的产物, 尽管它的动态显示效果比动态全息更加强烈, 且具实时性, 但技术和显示设备的复杂性是无法取代动态全息术的. 充分利用计算全息技术的灵活性, 给出数字动态全息的计算方法, 并通过实验进行验证, 取得比较好的效果.

1 动态数字全息基本原理

全息动态显示的基本现象如图 1, 将已经记录好的全息图用适当的光源照明, 人的双眼处在任一个位置时, 比如在 AA' 为止, 将看到一个物体的一个姿态 O_1 , 当双眼移动 BB' 时, 则看到物体的另一个姿态 O_2 . 由于人眼的立体感觉主要来自于双目的视轴辐合, 所以要产生立体感觉, 双眼必须看到同一个姿态的不同侧面, 这就是所谓的“体视对”. 图 1 只是示意图, 实际情况 O_1 和 O_2 几乎是重合的. 如果随着人眼的连续移动所看到的体视对是连续变化

的, 将会产生动态立体显示的效果. 动态数字全息的计算原理就是寻求一种计算方法, 使得最后的全息图能够达到这样的显示功能.

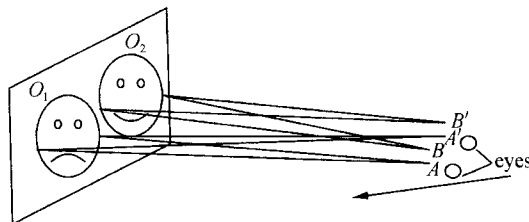


图 1 动态全息显示基本现象
Fig. 1 Principle diagram for dynamic hologram

从全息再现的显示过程可以看出, 其原理类似彩虹全息, 见图 2. 很明显, 眼睛观察的位置就是彩虹全息图的狭缝位置. 和彩虹全息不同之处是, 一般的彩虹全息图物点 (x_0, y_0, z_0) 的基元全息图是所谓的“线全息图”, 而这里的基元全息图是两个从线全息图上截取的两个片断 h_l, h_r , 称做体视全息对. 相应的狭缝像也演变成了两个与人眼瞳距相等的两个光斑 s_l, s_r . 事实上, 同一个姿态的物体上所有点的光波传播都来自与之对应的体视全息对, 同时最后都必须汇合在 s_{l1}, s_{r1} 处. 而不同姿态物体的体视全息对衍射的光将汇合到另一组光斑 s_{l2}, s_{r2} 处. 如图 3. 这样当人的两只眼睛处于 s_{l1}, s_{r1} 处时就可以观察到姿态 1 的立体像, 而当人眼移动到 s_{l2}, s_{r2} 时则

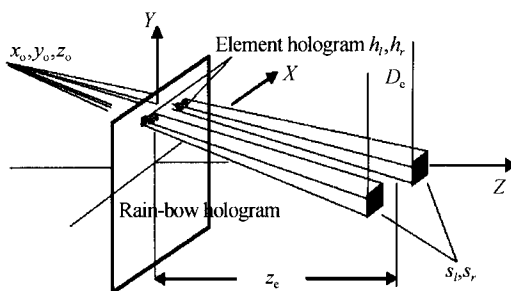


图 2 全息再现的基本显示原理
Fig. 2 Principle diagram for reconstruction of hologram

* 国家自然科学基金(60477039)资助
Tel: 0579-2298882 Email: wswyy2000@tom.com
收稿日期: 2005-03-22

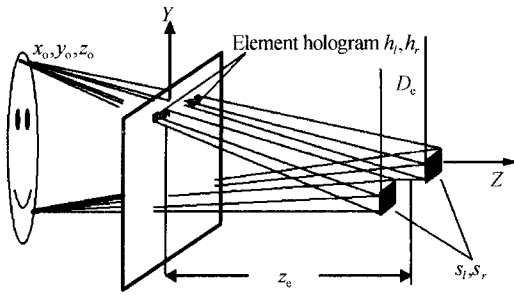


图 3 全息再现物体一个姿态原理

Fig. 3 Schematic diagram for reconstruction of one gesture
看到姿态 2 的立体像. 如果全息视角能够做得比较大, 以至于眼睛可以移动的距离大于瞳距, 比如向右移, 这时左眼移到 s_r 处, 将看到原来右眼看的像, 但是由于左右眼视图是相对的, 右眼也移动了同样的距离, 因而看到新的右眼视窗 $s_{r'}$, 此时, s_r 、 $s_{r'}$ 构成了新的体视全息对视窗. 但是就目前的计算机全息图而言, 很难达到这样大的视角^[9].

根据再现像光波的传播规律, 计算机制动态全息图的制作原理见图 4, 可以描述为: 对于某一姿态物体 O_i 上的任意一点发出的光波, 在传播的过程中被孔径 s_{li} 、 s_{ri} 所限制, 根据光的传播规律可以计算出在记录平面(全息图)上物点光波的分布, 然后引入参考光与之干涉, 就获得了这一物点的全息图——全息体视对.

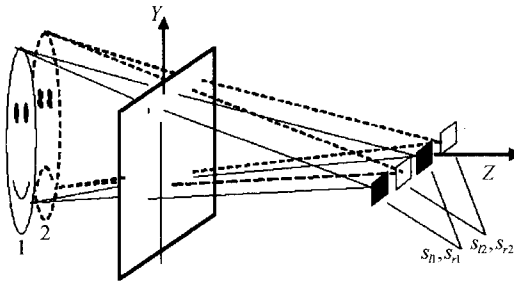


图 4 全息再现物体不同姿态原理

Fig. 4 Schematic diagram for reconstruction of different gesture

按照彩虹全息图的原理, 孔径 s_{li} 、 s_{ri} 是从狭缝像上截取得来的, 一般的形状可以认为一个矩形, 设其大小为 $w_e \times w_e$. 由于衍射效应, 如果物点发出的光在观察处形成矩形光斑, 那么, 在记录平面上的光的分布应该通过求衍射的方法, 进行逆运算获得, 这样考虑将会使得计算变得很繁杂. 为了简化问题, 作如下近似: 假设在记录平面上两个体视全息图对 h_l 、 h_r 是矩形. 当作这样近似的时候, 首先必须研究它的衍射在观察平面形成的光斑大小是否可以满足人眼观察的要求.

用图 5 来考虑这个问题. 计算机全息图^[10]实际上是光学全息图的模拟, 图 5 是一步法彩虹全息的原理图. 图中的虚框部分就是图 1~图 4 所显

示的部分. 物点 O 和狭缝 S (在这里是两个矩形孔), 经过透镜 L 分别成像于 O' 和 S' . O 点发出的锥状光束经矩形孔后将发生衍射, 像点 O' 实际上应该为被矩形孔夫琅和费衍射调制的双孔干涉分布. 但是, 如果孔的宽度足够大, 像点 O' 的扩展是很小的. 人眼的瞳孔直径在正常情况下一般为 3 mm 左右. 孔的宽度 w_e 应该和人眼瞳孔一致, 而孔和像点之间的距离一般约为 $z_c = 300$ mm 左右, 根据衍射原理, 像点弥散斑的大小为 (设照明光波长为 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$): $\lambda z_c / w_e \approx 2 \mu\text{m}$, 人眼对这样小的光斑可视为光点, 即可以看成是理想成像. 所以, 在一定的近似范围内, 全息记录平面 H 上的物光分布可以看成是双孔的几何投影.

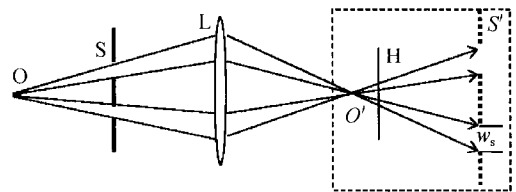


图 5 一步法彩虹全息的原理图

Fig. 5 Principle diagram for one-step rainbow hologram

如图 2 建立坐标系. 对于任一物点 (x_{on}, y_{on}, z_{on}) , 体视全息对 h_{ln} 、 h_{rn} 在彩虹全息图上的位置和大小可由其片状光束在记录面上投影的矩形顶点的坐标来表示. 设记录平面位于 $z=0$ 平面, 对于物体的第 n 个姿态, 双孔像 s_{ln} 、 s_{rn} 中心坐标为 $(x_{sn}, 0, z_c)$, 之间的距离为 D_e , 各自大小为 $w_e \times w_e$, 与全息图之间的距离为 z_c . 图 6 为片状光束在 XOZ 平面上的投影.

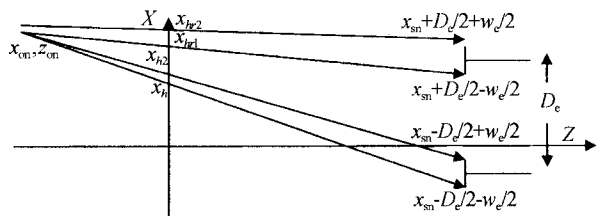


图 6 彩虹全息中物点、体视全息对、双孔及其片状光束之间的关系

Fig. 6 The relation between object point, stereoscopic hologram, double aperture and sheet beam

根据投影原理, 并通过简单的几何计算, 可以得到体视全息对 h_l 、 h_r 在记录面上 X 方向上截点坐标为

$$x_{hl1} = \frac{-x_o + x_{sn} - D_e/2 - w_e/2}{z_o - z_c} z_o + x_o$$

$$x_{hl2} = \frac{-x_o + x_{sn} - D_e/2 + w_e/2}{z_o - z_c} z_o + x_o$$

$$x_{hr1} = \frac{-x_o + x_{sn} + D_e/2 - w_e/2}{z_o - z_c} z_o + x_o$$

$$x_{hr2} = \frac{-x_o + x_{sn} + D_e/2 + w_e/2}{z_o - z_c} z_o + x_o$$

全息图的宽度为

$$\Delta x_{hl} = \Delta x_{hr} = \frac{z_o}{z_o - z_e} w_e$$

同理,可以得到全息体视对在 Y 方向上截点坐标和宽度为

$$y_{l1} = y_{r1} = -\frac{w_e/2 + y_o}{z_o - z_e} z_o + y_o$$

$$y_{l2} = y_{r2} = \frac{w_e/2 + y_o}{z_o - z_e} z_o + y_o$$

$$\Delta y_{hl} = \Delta y_{hr} = \frac{z_o}{z_o - z_e} w_e$$

设记录波长为 λ ,则在计算全息体视对时记录区域的物光分布为菲涅耳衍射

式中 $(x_{onijl}, y_{onijl}, z_{onijl})$ 是物体第 n 个姿态上第 (i, j, l) 个物点的坐标.

$$U_{onijl}(x, y) = a_{onijl} \exp\left(ik \frac{x_{onijl}^2 + y_{onijl}^2}{2z_{onijl}}\right) \cdot \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z_{onijl}}\right) \exp\left(-ik \frac{x_{onijl}x + y_{onijl}y}{Z_{onijl}}\right)$$

式中计算区域为

$$\begin{cases} x_{hl1} \leq x \leq x_{hl2}, x_{hr1} \leq x \leq x_{hr2} \\ y_{hl1} \leq y \leq y_{hl2} \end{cases}$$

2 动态数字全息的计算

作为一种现实技术,一般包含图像信息的获取,图像信息的处理和图像显示几个环节.作为一种立体显示,首先必须得到实物的立体信息.在计算机全息技术中,实际三维信息的获取一直是一个难题.最近,高分辨率三维扫描仪的出现为数字全息三维信息的获取提供了非常有效的技术.利用三维扫描仪可以采集较为连续的动态立体信息,假设采集到的不同姿态的立体信息分别用物函数 $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n, \dots, O_N$ 表示,对于第 n 个姿态中第 (i, j, l) 个物点,记录平面物光分布由式(6)和式(7)决定,对于第 n 个姿态所有物点,记录面上的物光分布为

$$U_{on}(x, y) = \sum_{i,j,l} U_{onijl}(x, y)$$

引入参考光与上式叠加,就可以计算出第 n 姿态的全息图了.利用光学方法制作动态全息时,对于每一个姿态,都要进行曝光一次,不仅记录相当麻烦,而且多次曝光的全息图衍射效率会大大降低.数字全息图的优越之处是可以把所有姿态的物光波全部叠加在一起,再与参考光干涉.因为从再现效果来看,全息图衍射出来的物光波包含了所有姿态的物光波,因而全息面上的光波实际上是所有姿态物光波的叠加.因而所有物体姿态在记录平面上总的物光分布为

$$U_o(x, y) = \sum_n U_{on}(x, y)$$

需要说明的是,这里的物光波 $U_o(x, y)$ 是模拟的,在实际中很难得到.它的叠加项的每一项 $U_{on}(x, y)$ 都有自己特定的传播方向,即同一个 $U_{on}(x, y)$ 中每一点分量都向着与之对应的双孔像 (s_{nl}, s_{nr}) 方向传播.

设参考光的分布为 $R(x, y)$,全息图上干涉条纹分布为

$$I(x, y) = |U_o(x, y) + R(x, y)|^2$$

3 动态数字全息的制作实验与结果

通过上述讨论,看到数字动态全息的理论和计算方法是比较简单的,但是计算量却是很大的.在实验中,一方面利用已研究的一些快速算法提高计算速度,另一方面作为原理验证,物体姿态只用了两个姿态.利用三维激光数字扫描仪 vivid 910 获得如图 7 的人物的两个表情的三维信息.

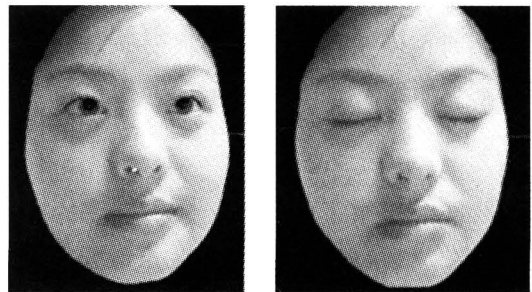


图 7 人物的两个表情

Fig. 7 Two different gesture of the person

在计算中,将这两个姿态周期地变化,所对应的观察面上的双目观察孔也周期地变化.双目观察孔的大小等于人眼的瞳孔直径,正常照明情况下,人眼的瞳孔大小约为 3 mm,所以取 $w_e = 3$ mm;观察孔之间的距离等于人的瞳距,一般人眼的瞳距约为 65 mm,所以 $D_e = 65$ mm.为了不产生像的跳跃,相邻观察孔之间的距离为零.计算时模拟记录光的波长为 600 nm,全息图计算参量如表 1.

表 1 数字全息图计算参量

物点数	缩小倍数	物点取样间隔
50000	10	0.01 mm
全息图点数	全息图取样间隔	参物光夹角
20000 × 25000	0.001 mm	5°

vivid 910 扫描仪获得的数据是真实物体的数据,对其缩小 10 倍以后再进行全息图的计算.获得的全息图通过日本网屏剑神 5055 高质图文照排机出图到胶片上,最后通过缩微照相获得全息图.图 8 是全息图再现结果.图 8(a)和(b)是眼睛移动过程中,分别看到的两个表情,如果快速移动眼睛,感觉好像是在眨眼.

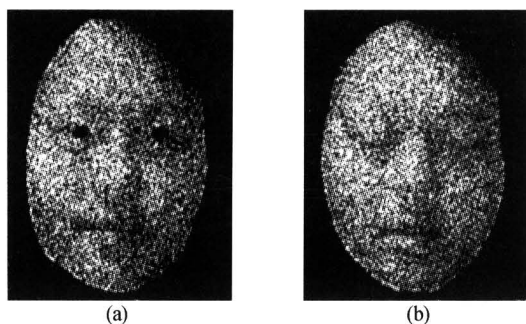


图 8 全息图再现结果
Fig. 8 The result of the reconstructed image

4 讨论

从成像的照片看出,再现像的噪音比较大,这主要是由于全息图的取样间隔太大引起的.由全息图的计算参量可知,全息图的干涉条纹的最小间隔为 0.0069 mm,而取样最小间隔为 0.001 mm,这样在一个条纹周期内所具有的全息点数只有 6~7 个,尽管满足抽样定理,可以重构像的信息,但将产生数字噪音.如果减小全息图取样间隔,计算的数据量和计算时间就会成倍的增加.这里仅仅给出原理性的实验验证.降低数字噪音,提高像质还有待于计算机速度的进一步提高,同时研究计算全息图的快速算法.另外,在计算全息图时,根据全息图的中心和边缘频率不一样的事实进行变频采样^[11]也是很值得借鉴的方法,它对提高计算速度有很重要的意义.

参考文献

- 1 Lucilla C F. Visualization of 3D information with digital holography using laser printers. *Computer & Graphics*, 2001, **25**(2):309~321
- 2 Wang H, Li Y, Jin H Z, et al. Three - dimensional

- visualization of shape measurement data based on computer generated hologram. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, **5**(9):195~199
- 3 Maxime J, Patrick S, Gilbert T. High resolution digital holography. *Optics Communications*, 2001, **190**(1-6):87~94
- 4 刘诚,刘志刚,薄峰,等.数字全息中再现像分离问题的研究. *光子学报*, 2003, **32**(5):588~591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):588~591
- 5 杨世宁,李耀棠,王天及,等.用数字微反射镜器件合成电视全息图拍摄系统. *光电子·激光*, 2001, **12**(7):719~721
Yang S N, Li Y T, Wang T J, et al. *Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(7):719~721
- 6 谢敬辉,杨晓文.合成全息动感的新方法——纵向面积分割法. *北京理工大学学报*, 2000, **20**(3):329~332
Xie J H, Yang X W. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(3):329~332
- 7 赵雅晶,钟金钢.黄氏傅里叶计算全息图的数字再现及零级像的消除. *光子学报*, 2004, **33**(11):1339~1342
Zhao Y J, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1339~1342
- 8 Pierre S, Hilaie S, Benton A, et al. Real-time holographic display: Improvement using a multichannel acousto-optic modulator and holographic optical elements. *SPIE Proc*, 1991, **1461**:254~261
- 9 李勇,王辉,应朝福,等.大视角计算机制彩虹全息研究. *光子学报*, 2003, **32**(5):595~597
Li Y, Wang H, Ying C F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):595~597
- 10 王辉,李勇,金洪震,等.计算机制彩虹全息图的新算法. *光子学报*, 2005, **34**(10):1537~1541
Wang H, Li Y, Jin H Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10):1537~1541
- 11 蔡晓鸥,王辉,李勇.数字全息图变频采样研究. *光子学报*, 2004, **33**(4):481~484
Cai X O, Wang H, Li Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):481~484

Research of the Computer-generated Dynamic Rainbow Hologram

Wang Yuanyuan, Wang Hui, Ren Zhijun, Ye Hui

Information Optical Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

Received date: 2005-03-22

Abstract A technique called computer-generated dynamic rainbow hologram, which combines computer-generated hologram and synthetic technique for double-view dynamic rainbow hologram is presented. According to the characteristic of that rainbow hologram's elementary hologram is "line-element hologram" and the binocular stereo vision, it computes two slices from the "line-element hologram. And right and left eye views are made respectively corresponding to the two slices. The rainbow hologram's slot image was divided simultaneously. The aim of dynamic display can be realized if the region of the slot image corresponds to the object's different gesture. The new method was applied, and the elementary experiment result is given.

Keywords Computer-generated hologram; Dynamic hologram; Rainbow hologram; Stereoscopic hologram



Wang Yuanyuan was born in 1981. She received the B. S. degree from Department of Physics, Zhejiang Normal University in 2002 and now is pursuing her M. S. degree in Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University. Her research interesting includes applying CGH to 3D display.