

文章编号: 0258-7025(2005)01-0087-05

# 大视角数字全息的研究

应朝福, 马利红, 王 辉\*, 徐展斌

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要** 提出一种新的数字全息方法实现大视角彩虹全息的制作。根据两步法彩虹全息原理,用计算机制作彩虹全息图的  $H_1$ ,并用镜像折叠的新算法将大幅的全息图折叠成一幅较小的全息图。输出微缩后成为一个高密度的全息图。光学方法制作  $H_2$  时,必须配以合适的平面镜,使再现的光波按光的可逆原理展开成原状。该种镜像折叠的方法巧妙地把计算机制全息与光学全息相结合,吸取了两者各自的优点,实现了大视角数字全息的制作。理论及实验结果表明该方法既解决了大幅度计算机制全息图的输出问题,又使相同信息量的数据容量大大减少,为计算全息图用于立体显示的研究开辟了一条新的途径。

**关键词** 信息光学;计算机制全息;大视角;彩虹全息;镜像

**中图分类号** O 438.1 **文献标识码** A

## Digital Holograms with Large Viewing Angle

YING Chao-fu, MA Li-hong, WANG Hui, XU Zhan-bin

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

**Abstract** A new technique of digital holography is proposed, which can make the holograms with large viewing angle. According to the theory of two-step rainbow holography, rainbow holograms  $H_1$  are generated by computer and the new algorithm of mirror image is proposed which can fold the holograms with large dimension into little ones. After the downsizing by taking pictures, a hologram with high density is made. When  $H_2$  is made on optical setup, two right mirrors must be matched in order to returning the reconstructed wave to the original condition. The advantages of both computer generated holograms and optical holograms are adopted in this technique. The technique of mirror image can successfully make the holograms with large viewing angle. The principle of the proposed method and the experimental result prove that the technique not only resolves the problem on the output of holograms with large dimension and reduces the data volume greatly, but also breaks a new path for hologram three-dimensional display.

**Key words** information optics; computer generated holograms; large viewing angle; rainbow holograms; mirror image

## 1 引 言

随着计算机技术的高速发展,将计算全息图用于立体显示的研究越来越受到人们的关注<sup>[1~5]</sup>。立体显示用全息图的尺寸一般要求较大,以提供足够的视角产生立体视差效应。从计算速度和容量方面

来说,目前的个人计算机已经完全可以胜任三维物体全息图的计算量,加之辅以高速算法,大幅度的全息图计算已成为现实<sup>[6]</sup>。但是众所周知,全息图的分辨率是非常高的,一般全息图的特征频率可以达到 600 lp/mm,这样分辨率的图像很难用普通的出图设备输出。而高分辨率的出图设备,例如电子束

收稿日期:2003-07-24;收到修改稿日期:2003-12-01

基金项目:浙江省自然科学基金(102056)和浙江省科技计划(2003C31011)资助项目。

作者简介:应朝福(1964—),男,浙江仙居人,浙江师范大学信息光学研究所副教授,硕士,主要从事信息光学方面的研究。

E-mail:ying@zjnu.cn

\* 通信联系人。E-mail:wanghui@mail.zjnu.net.cn

扫描设备价格非常高。因此,一般情况下所采用的办法是将计算全息图放大,用普通打印设备出图,然后再进行照相微缩。但是,对于立体显示用的全息图,其大小至少为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,按照取样定律,为了保证信息的不丢失,其像素数至少  $12 \times 12$  万个。一般的打印设备的输出分辨率为  $1200\text{ dpi}$ ,通过计算可以得到,大小为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,频率为  $600\text{ lp/mm}$  的全息图通过普通打印机输出的大小应该为  $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 。显然这样大小的图像利用普通打印机是很难打印的,即使利用拼接的办法可以解决,但对这样大小的图像进行精密微缩也是很困难的。这就限制了计算全息在立体显示中的应用。在计算全息的研究中,目前研究的热点之一就是大视角计算全息<sup>[7,8]</sup>。

一种新的数字全息的方法可以解决大幅度全息图的输出问题。充分利用计算全息的灵活性,将大幅的全息图镜像折叠成一幅较小的全息图输出,微缩后成为一个高密度的全息图。再现时配以平面镜,再现的光波将按光的可逆原理展开成原状。本技术对于计算机-激光联合制作彩虹全息非常有意义。

## 2 原 理

### 2.1 镜像折叠数字全息图的设计

计算机制全息有多种编码方法,仿照光学全息的办法,引入离轴参考光。全息图平面上记录的总光强为

$$I = |O(x, y) + R(x, y)|^2, \quad (1)$$

式中  $R(x, y)$  为参考光,  $O(x, y)$  为物光。因为是计算全息图,所以必须对物光波进行离散处理,即假设物体由若干个离散的发光点组成,每个物点都发出若干离散光线照亮全息面上每一采样点,则在全息图上任一点的物光波复振幅分布可表示为(假设原点在全息面上)

$$O(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{U_o(x_n, y_n, z_n)}{r(x, x_n, y, y_n, z_n)} \times \exp\{-j[kr(x, x_n, y, y_n, z_n)]\}, \quad (2)$$

式中  $N$  为物点数,  $U_o$  为物点的复振幅,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $r$  为物点到全息图上  $(x, y)$  点的距离,它可表示为

$$r(x, x_n, y, y_n, z_n) = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + z_n^2}. \quad (3)$$

采用两种算法可以将文献[9]的光学方法移植到计算机制全息上,使大幅的计算机制全息图能镜

像折叠成一幅较小的全息图。假设任意物点  $P(x, y, z)$  都满足单次反射的镜像关系。

算法一:根据光路的可逆性,从物体的镜像关系入手。图1所示的记录光路和一般的记录光路相比,唯一的不同就是全息图平面上的物光波场不再是单个物体上所有点发出的光波场的叠加,而是成镜像关系的三个物体上所有点发出的光波场的叠加。

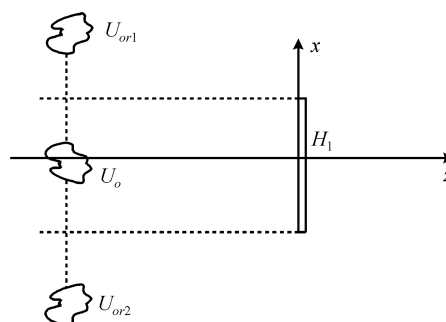


图1 物体镜像后的等效光路

Fig.1 Equivalent optical path of object distribution by mirror image

物点的复振幅分布可以表示成

$$U'_o(x, y, z) = U_o(x, y, z) + U_{or1}(x, y, z) + U_{or2}(x, y, z), \quad (4)$$

$U_{or1}, U_{or2}$  与  $U_o$  之间有着镜像的关系。假设两块平面镜之间的距离为  $2w$ , 坐标原点在  $H_1$  的中心。式中

$$U_{or1}(x, y, z) = U_o(2w - x, y, z), \quad (5)$$

$$U_{or2}(x, y, z) = U_o(-2w - x, y, z), \quad (6)$$

全息面上物光波复振幅分布为

$$O(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{U_o(x_n, y_n, z_n)}{r(x, x_n, y, y_n, z_n)} \times \exp\{-j[kr(x, x_n, y, y_n, z_n)]\} + \sum_{m=1}^N \frac{U_{or1}(x_m, y_m, z_m)}{r(x, x_m, y, y_m, z_m)} \times \exp\{-j[kr(x, x_m, y, y_m, z_m)]\} + \sum_{l=1}^N \frac{U_{or2}(x_l, y_l, z_l)}{r(x, x_l, y, y_l, z_l)} \times \exp\{-j[kr(x, x_l, y, y_l, z_l)]\}. \quad (7)$$

算法二:将  $H'_1$  直接折叠成  $H_1$ 。

先用一般的计算机制全息图的方法计算出  $H'_1$  面上的物光波分布  $O(x, y)$ , 然后将  $H'_1$  面上的物光波镜像折叠到  $H_1$  上。由于是单次反射, 可将  $H'_1$  三等分, 如图2。

设  $H_1$  的长度为  $2w$ ,  $x$  轴的坐标原点位于全息图的中心。整个  $H'_1$  上的物光分布为

$$O(x, y) = \begin{cases} O_{r2}(x, y) & -3w \leq x \leq -w \\ O_{r0}(x, y) & -w \leq x \leq w \\ O_{r1}(x, y) & w \leq x \leq 3w \end{cases}, \quad (8)$$

上述物光波被镜像折叠后,  $H_1$  上的物光分布为

$$O_{H_1}(x, y) = O_{r0}(x, y) + O_{r1}(x', y) + O_{r2}(x'', y), \quad (9)$$

式中  $x$  与  $x'$ ,  $x$  与  $x''$  的映射关系为

$$x' = 2w - x, \quad x'' = -2w - x。$$

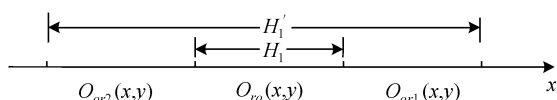


图 2 将  $H'_1$  的物光分布折叠成  $H_1$  物光分布的示意图

Fig. 2 Sketch map of the object light distribution on  $H'_1$  folding into  $H_1$

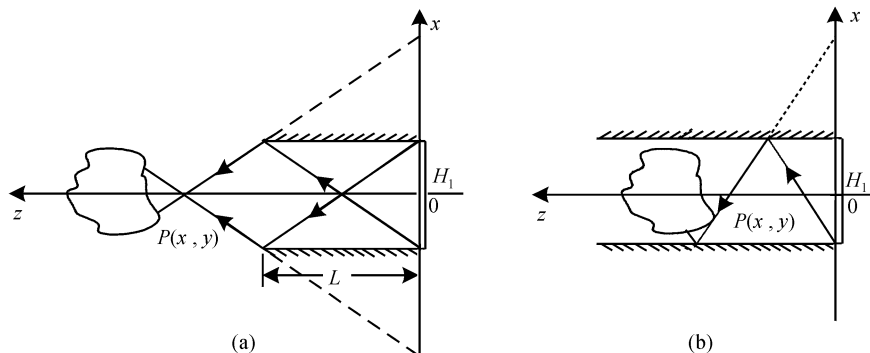


图 3 彩虹全息记录光路

(a) 短镜; (b) 长镜

Fig. 3 Optical setup for recording rainbow hologram

(a) shorter mirror; (b) longer mirror

可以看出,物点越远,  $L$  就越大;若  $x > 0$ , 对于上平面镜,  $x$  越大,  $L$  越大, 而对于下平面镜,  $x$  越大,  $L$  越小。若  $x < 0$ , 结论相反。总之, 假设物体中最远的物点距离为  $z_m$ , 最靠近平面镜物点的  $x$  坐标大小为  $|x_m|$ , 则平面镜的长度至少为

$$L = \frac{2wz_m}{3w - |x_m|}。 \quad (12)$$

表面上看似乎  $L$  只要足够长, 就可以使所有衍射光线整合成原物点, 但从图 3(b) 可以看出, 近处的物点可能被多次反射, 反射光与远处的物点混在一起, 而使再现像模糊, 所以物体的景深是受到限制的。

假设物体中最近的物点距离为  $z_n$ , 最靠近平面镜物点的  $x$  坐标大小为  $|x_m|$ , 为了保证任意衍射光线不发生多次反射, 则平面镜的长度至多为

$$L = \frac{4wz_n}{3w + |x_m|}。 \quad (13)$$

## 2.2 镜像折叠数字全息图的光学再现

再现记录  $H_2$  时要配以平面镜<sup>[9]</sup>。由于在计算  $H_1$  时, 已经假设了任意物点都满足单次反射的镜像关系, 所以为了保证任意衍射光线都按光的可逆原理整合成原状, 必须适当选择平面镜的长度。如图 3(a), 设平面镜长为  $L$ , 两块平面镜之间的距离为  $2w$ , 设像点坐标为  $(x, z)$ , 对于上平面镜, 满足任意衍射光线按光的可逆原理整合成像点时  $L$  为

$$L = \frac{2wz}{3w - x}, \quad (10)$$

对于下平面镜, 满足任意衍射光线按光的可逆原理整合成像点时  $L$  为

$$L = \frac{2wz}{3w + x}。 \quad (11)$$

从(12), (13)式可知, 平面镜的长度应满足

$$\frac{2wz_m}{3w - |x_m|} \leq L \leq \frac{4wz_m}{3w + |x_m|}, \quad (14)$$

上式成立的条件是

$$\frac{2wz_m}{3w - |x_m|} \leq \frac{4wz_m}{3w + |x_m|}, \quad (15)$$

也就是物体的景深和大小之间必须满足一定的关系

$$z_m \leq \frac{2z_n(3w - |x_m|)}{3w + |x_m|}。 \quad (16)$$

## 3 实验及讨论

根据上述原理进行了实验。实验中物体数据是由三维面形测量仪获得的实际物体三维分布数据, 如图 4(a), 取样间隔为  $100 \mu\text{m}$ ; 全息图的取样点数为  $15000 \times 1500$ , 取样间隔为  $2 \mu\text{m}$ ; 波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。图 4(b) 为计算得到的全息图的局部。通过激

光照排系统将全息图打印在透明薄膜上,输出分辨率设置为 625 dpi,全息图大小约为  $600\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ,然后用 H93-4/YL 高精度缩微重复照相机,采用 CSD140-A 大视场初缩镜头 ( $f\ 1400\text{ mm}$ ,视场  $\phi\ 40\text{ mm}$ ,缩小倍率  $1/20 \sim 1/30$ ),将全息图照相微缩成一个长度为  $30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的条形全息图  $H_1$ 。物体与全息图的距离设计为  $300\text{ mm}$ ,视角约  $1/30\text{ rad}$ 。用波长  $\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$  的激光照明时,可观察到图 4(c) 的再现像。按照图 3 所示光路配以合适的平面镜,即可制作彩虹全息图  $H_2$ 。实验表明, $H_2$  的视角约为  $1/10\text{ rad}$ ,相当于等效狭缝的长度为  $H_1$  长度的三倍,即  $90\text{ mm}$ 。这样大的视角足以观察到明显的视差再现像,产生明显的立体感觉。图 5 是不同视角观察到的再现像。

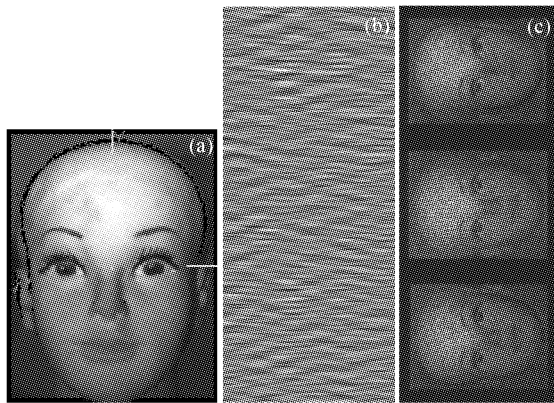


图 4 大视角数字全息图的实验结果  
(a) 原始物体;(b) 数字全息图;(c) 再现图像  
Fig. 4 Results of the digital hologram with large viewing angle  
(a) original object; (b) digital hologram;  
(c) reconstruction images

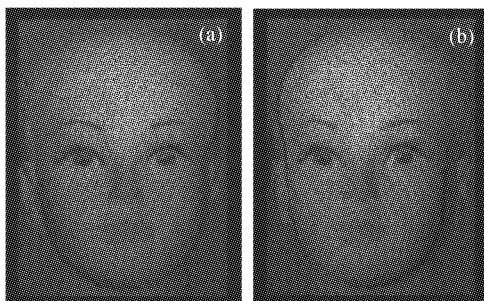


图 5 大视角彩虹全息图再现像  
(a) 左视图;(b) 右视图  
Fig. 5 Reconstruction image of the rainbow hologram with large viewing angle  
(a) left view image; (b) right view image

实验表明,将大幅计算机制全息图镜像折叠成

小幅全息图的编码方法是正确的。它的意义在于:

首先,该方法解决了大幅计算机制全息图的输出问题。对于计算机-激光联合制作大视角彩虹全息图更有意义。综合考虑色模糊和人眼的分辨极限,计算机制彩虹全息图  $H_1$  的缝宽取  $2 \sim 3\text{ mm}$ 。为了得到双眼立体视角, $H_1$  的长度必须大于人眼的瞳距,即全息图  $H_1$  的长度  $L_h \geq 65\text{ mm}$ 。实验中,等效全息图  $H'_1$  的长度为  $90\text{ mm}$ ,进行单次反射镜像折叠后,全息图长度为  $30\text{ mm}$ 。利用分辨率为 625 dpi 的激光照排输出图仪,输出的图像长度仅为  $0.6\text{ m}$ 。如果不进行镜像折叠,输出的图像有  $1.8\text{ m}$ 。相对于  $1.8\text{ m}$  而言,对  $0.6\text{ m}$  长度的图像进行微缩既方便又可以得到精密的微缩。

其次,该方法的实现使全息图的数据容量大大减少,这对全息图信息压缩的研究很有意义。全息图再现三维像是通过重建物光来实现的,具备了真正意义上的三维,并且具有相当高的分辨率。但是全息图的信息量非常庞大,因此将全息图直接用于通信是不现实的。国内外有很多学者对全息图的信息压缩进行了研究,提出了一些方法<sup>[10,11]</sup>。随着视角的增大,全息图的分辨率也随着增大,为了保证满足抽样定理,全息图的取样点数也随着增大。本实验的取样点数是  $15000 \times 15000$ ,但如果不进行镜像折叠,要达到同样的视角,取样点数应该为  $3 \times 15000 \times 15000$ 。显然,镜像折叠全息图的信息量只有不折叠的三分之一。如果把用该方法得到的全息图进一步压缩,无疑能将原压缩方法的压缩率大大提高。

另外,同样因为镜像折叠以后全息图的计算面积只有未折叠面积的三分之一,所以本方法可以有效地提高数字全息图的计算速度。

最后,需要说明的是,它比纯光学方法制作大视角全息图具有更大的灵活性。从质量上来讲,彩虹全息图的质量基本上依赖于  $H_1$  的质量,而制作高信噪比的  $H_1$  对拍摄条件和后处理条件的要求是很高的。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  $H_1$  的设计和拍摄,制作这些全息图的  $H_1$  对技术要求特别高,但若利用计算机来制作  $H_1$  则非常方便和灵活。从拍摄的对象来说,光学全息图对物体的静止要求特别高,这样就很难拍摄一些物体。而计算机制全息不存在这个问题,而且不需要物体的物理存在。此外,由于文献[9]提出的大视角彩虹全息术,是通过采用两块反射镜的组合。光线经过平面镜反射后存在能量损失,

这将导致多次反射后光线变弱从而使狭缝变短,使视角变小。而用计算机制  $H_1$  就不存在这个问题。

## 4 结 论

该数字全息的方法实现了大视角彩虹全息的制作。利用计算机制全息图的灵活性把大幅计算全息图镜像折叠成一幅较小的全息图,与彩虹全息光路配合解决了大视角数字全息难以制作的问题。该方法既解决了大幅度全息图的输出问题,同时将全息图的数据量大大减少,对信息压缩的研究很有意义。此种镜像折叠的方法巧妙地把计算机制全息与光学全息相结合,吸取了两者各自的优点,是大视角数字全息的一种新方法。

### 参 考 文 献

- 1 V. I. Girnyk, S. O. Kostyukevych, P. Ye. Shepeliavyi *et al.*. Multilevel computer-generated holograms for reconstructing 3-D images in combined optical-digital security devices [J]. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2002, **5**(1):106~114
- 2 Siegmund Pastoor, Matthias Wöpking. 3-D displays: A review of current technologies [J]. *Displays*, 1997, **17**:100~110
- 3 Fan Pinzhong, Yong Tao. Holographic video [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, (6):6~11  
范品忠,咏涛. 全息影视[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, (6):6~11
- 4 Wang Hui, Ying Chaofu, Wang Xu *et al.*. Information content of 3D object and its compression in the digital hologram display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):823~828  
王辉,应朝福,万旭等. 数字全息显示中的三维物体信息量及其压缩[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9):823~828
- 5 Li Yong, Jin Hongzhen, Wang Hui *et al.*. Research for horizontal parallax only kinoform in 3D display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **B11**(6):465~468
- 6 Wang Hui, Li Yong, Jin Hongzhen *et al.*. Visualization using computer-generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):284~288  
王辉,李勇,金洪震等. 三维面形测量数据的计算全息可视化[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):284~288
- 7 Li Yong, Wang Hui, Ying Chaofu *et al.*. Research of the computer-generated rainbow hologram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):595~597  
李勇,王辉,应朝福等. 大视角计算机制彩虹全息图的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5):595~597
- 8 Hiroshi Yoshikawa, Akihito Kagotani. Full color computer-generated rainbow hologram with enlarged viewing angle [J]. *Opt. Rev.*, 2002, **9**(6):251~254
- 9 Wang Dianmin, Ha Liuzhu, Wang Mincao. Two-step rainbow holography with large viewing angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(9):826~829  
王典民,哈流柱,王民草. 大视角两步彩虹全息术[J]. *光学学报*, 1990, **10**(9):826~829
- 10 Thomas J. Naughton, Yann Frauel, Bahram Javidi *et al.*. Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(20):4124~4132
- 11 Cai Xiaou, Wang Hui, Li Yong *et al.*. The application of wavelet analysis in hologram compression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6):739~743  
蔡晓鸥,王辉,李勇等. 小波分析在全息图信息压缩中的应用[J]. *光子学报*, 2001, **30**(6):739~743