

# 体视全息图的实时拍摄方法

唐继跃 郭履容

王 辉 金为民

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064) (浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

**摘 要** 在现有体视全息图制作方法的基础上, 提出一种新的方法, 利用液晶光阀作为像的转换元件, 使得体视全息图的制作由原来的三次曝光简化为一次曝光, 从而实现了实时拍摄的目的. 文中给出了用这种方法设计的实时摄像系统和实验结果.

**关键词** 三准显示, 体视全息图, 立体照相, 彩虹全息术.

## 1 引 言

通常有二种类型的光学三维图像显示技术<sup>[1]</sup>:一种是传统的立体照相术, 另一种是光全息术. 前者观察时需戴上一分离左、右视图的附加装置; 而后者由于记录时需要相干性极好的激光光源, 所以难以记录大场景目标和自发光目标(如点燃的火炬等)的立体信息. 近年来, 有人把这两种技术相结合, 利用彩虹全息术中的狭缝功能制作了体视全息图. 它能使观察者在一定范围内无须任何附加装置就可观察到大场景的立体图像<sup>[2~4]</sup>. 但这种方法过程复杂, 要分体视对的记录和体视全息图合成二步来完成. 一般需三次曝光<sup>[4]</sup>:第一次曝光是用传统的立体照相方法来获得体视对透明正片, 第二和第三次曝光是分别用左、右视图透明正片在一张干版上编码记录对应视图的彩虹全息图. 本文将在此基础上, 利用液晶光阀的实时图像转化功能, 提出一种实时的拍摄方法, 使得体视全息图的制作过程由原来的三次曝光简化为一次曝光.

## 2 原 理

### 2.1 图像的转换原理

液晶光阀作为一种实时的图像转换器件, 已广泛地用于光学信息处理<sup>[5~8]</sup>. 应用这种器件对图像的非相干光-相干光转换功能<sup>[8]</sup>, 用写入的非相干光强度分布信息调制入射的相干读出偏振光, 再经偏振器和透镜后, 就可在像面上得到一与写入像相关的相干偏振光图像, 其偏振态与入射的读出光垂直. 为了同时把左、右视图像从非相干光转化为相干的偏振光, 实验使用了二只液晶光阀, 其转换原理如图1所示. 两个照相机镜头(L<sub>r</sub>和L<sub>l</sub>)同时将非相干光照明的目标成像在液晶光阀的写入面上. 偏振分束器(PBS)把激光束分成两束互相正交偏

振的偏振光，它们分别从两个液晶光阀中读出左、右视图信息，再经偏振分束器检偏后，由透镜  $L_1$  同时成像在  $O$  面。此时左、右视图的像分别呈水平和垂直偏振态。这样就完成了把目标的左、右视图像由非相干光转化为偏振态互相正交的相干光的任务。

### 2.2 实时拍摄系统及其工作原理

把上述双液晶光阀编码成像装置与彩虹全息拍摄光路相结合，就可得到一实时体视彩虹全息拍摄系统。图 2 给出了这种系统的俯视图，它由四部分组成：1) 光源：激光器，激光电源和波片 WP；2) 体视对镜头： $L_r, L_l$ ；3) 图像转换元件：液晶光阀 LCLV，偏振分束器 PBS，成像透镜  $L_1$ ；4) 彩虹全息光路：条形散斑屏  $S$ ，成像透镜组  $L_2, L_3$ ，偏振滤波器 PF；参考光路(图中未画出)。其工作原理是：光源部分提供全息记录所必需的相干光束(对于外腔式激光器，通过调整波片 WP 可改变输出激光束的偏振方向，以保证读出的左、右视图光光能相等。对于内腔式激光器就不需要波片)；体视镜头和图像转换元件实时地把目标的左、右视图的非相干光像转化为偏振态互相正交的相干光像，并共面地呈现在彩虹全息光路的物面  $O$  上；彩虹全息光路中，物面采用条形散斑  $S$  调制，并在谱面( $L_2$  和  $L_3$  的合成焦面)作偏振滤波(PF)处理——用水平偏振和垂直偏振分别对左、右半谱进行滤波，则到达像面  $H$  的左、右视图像分别是通过左、右半狭缝过来的偏振光。把全息干版置于  $H$  面，并采用在垂直平面内倾斜照射的参考光，就可经一次曝光得到体视彩虹全息图。当它用逆参考光方向的白光照明时，就会再现两列彩色的狭缝实像，并且干版面上再现的左、右视图的光将分别只通过左、右半狭缝而得到解码。因此，观察者的左右眼只要分别处于左、右半狭缝，就可看到立体图像，并且上下移动时可看到不同颜色的立体像。

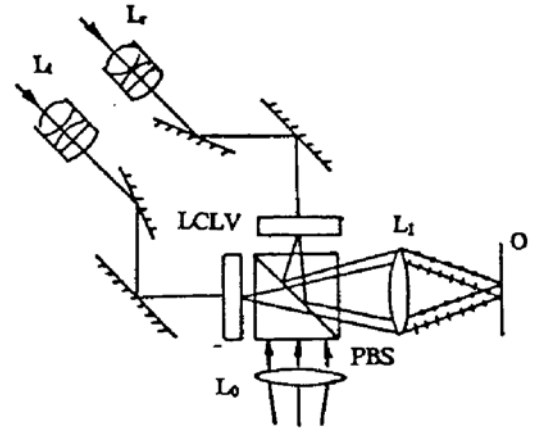


Fig. 1 Illustration of the image transformation

把上述双液晶光阀编码成像装置与彩虹全息拍摄光路相结合，就可得到一实时体视彩虹全息拍摄系统。图 2 给出了这种系统的俯视图，它由四部分组成：1) 光源：激光器，激光电源和波片 WP；2) 体视对镜头： $L_r, L_l$ ；3) 图像转换元件：液晶光阀 LCLV，偏振分束器 PBS，成像透镜  $L_1$ ；4) 彩虹全息光路：条形散斑屏  $S$ ，成像透镜组  $L_2, L_3$ ，偏振滤波器 PF；参考光路(图中未画出)。其工作原理是：光源部分提供全息记录所必需的相干光束(对于外腔式激光器，通过调整波片 WP 可改变输出激光束的偏振方向，以保证读出的左、右视图光光能相等。对于内腔式激光器就不需要波片)；体视镜头和图像转换元件实时地把目标的左、右视图的非相干光像转化为偏振态互相正交的相干光像，并共面地呈现在彩虹全息光路的物面  $O$  上；彩虹全息光路中，物面采用条形散斑  $S$  调制，并在谱面( $L_2$  和  $L_3$  的合成焦面)作偏振滤波(PF)处理——用水平偏振和垂直偏振分别对左、右半谱进行滤波，则到达像面  $H$  的左、右视图像分别是通过左、右半狭缝过来的偏振光。把全息干版置于  $H$  面，并采用在垂直平面内倾斜照射的参考光，就可经一次曝光得到体视彩虹全息图。当它用逆参考光方向的白光照明时，就会再现两列彩色的狭缝实像，并且干版面上再现的左、右视图的光将分别只通过左、右半狭缝而得到解码。因此，观察者的左右眼只要分别处于左、右半狭缝，就可看到立体图像，并且上下移动时可看到不同颜色的立体像。

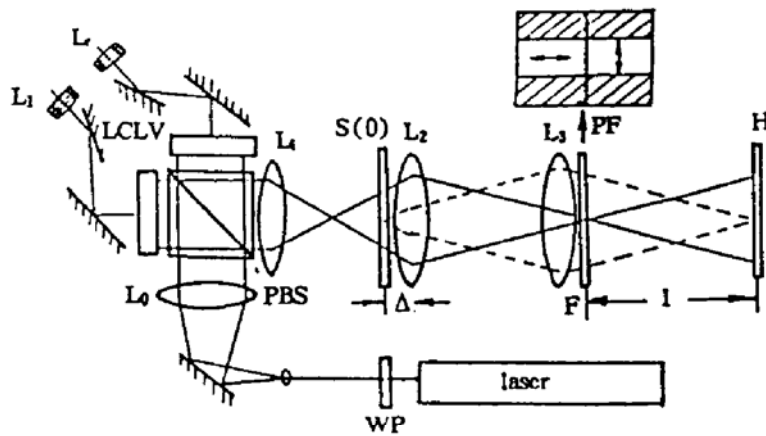


Fig. 2 Real-time system for taking stereo-hologram

### 2.3 问题讨论

#### 2.3.1 对目标稳定性的要求

目标的运动可分解成横向运动与轴向运动。前者将引起像面上像的平动，而后者将引起

像的离焦. 由于全息记录中的物光并不是直接来自物体本身, 而是来自液晶光阀的读出面, 物体的运动仅引起光阀中的潜像运动, 而潜像只调制读出光的振幅, 不调制其位相. 所以, 目标在曝光期间的运动不会引起像面上物光波位相分布的变化. 这样, 只要拍摄期间系统足够稳定, 就能在记录面上得到稳定的干涉条纹记录. 当然目标的运动最终将对全息再现像的模糊程度有影响. 设目标以速度  $v$  沿  $x$  轴作匀速横向运动, 则记录面上对应的左视图的光场分布为时间的函数:

$$U(x, y, t) \propto A_0 A(x - Mvt, y) \exp [i\varphi(x, y)] \quad (1)$$

式中  $A_0$  为射入液晶光阀的读出光振幅,  $A(x, y) \exp [i\varphi(x, y)]$  是像面  $H$  上  $t = 0$  时刻物光场分布, 而  $\exp [i\varphi(x, y)]$  是与读出光的传播光路及位相条形散斑屏有关的位相因子, 根据前述理由它是与时间  $t$  无关的,  $M$  是系统的横向放大率. 这样的光场与参考干涉后的光强度分布为:

$$\begin{aligned} I(x, y, t) &= [U(x, y, t) + R][U(x, y, t) + R]^* \\ &= |R|^2 + |U(x, y, t)|^2 + RU^*(x, y, t) + R^*U(x, y, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{或} \quad I(x, y, t) = A_0^2 + A_0^2 \{ [A(x - Mvt, y)]^2 + 2A_0 A_R A(x - Mvt, y) \cos [\varphi_R - \varphi(x, y)] \} \quad (3)$$

由上式中的干涉条纹项(第三项)可见: 由于余弦函数的位相与时间无关, 所以条纹的分布不随时间变化. 目标的运动仅引起了条纹调制度分布的变化. 如果进一步假设目标仅是一横向运动的点物, 即

$$A(x - Mvt, y) = \delta(x - Mvt, y) \quad (4)$$

则这样记录的全息图用共轭参考光再现时, 其再现像的强度分布可由(2)式中第三项对时间取平均, 然后再取模的平方而得:

$$\begin{aligned} I(x, y) &\propto \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T A(x - Mvt, y) dt \right\}^2 \\ &= \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \delta(x - Mvt, y) \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) dt \right\}^2 \\ &= \left( \frac{1}{MvT} \right)^2 \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{MvT} \right) \right]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

可见, 用  $T$  的曝光时间去记录一以  $v$  速度横向运动的点目标的体视全息图, 其再现左视图的再现像将是一长为  $MvT$  的亮线, 只要它小于人眼的分辨率则还是可以认为是一物点. 以上的分析对右视图也同样成立, 所以实时体视全息拍摄系统对目标的稳定性要求与普遍照相中对目标稳定性的要求是一样的. 取人眼的分辨角为  $1'$ , 观察距离为  $40 \text{ cm}$ ,  $M = 1/20$ , 只要曝光时间内目标的最大横向位移量小于  $2.3 \text{ mm}$ , 则所记录的全息图能再现出较清楚的立体图像.

### 2.3.2 体视放大率

一般情况下, 通过体视全息图观察重视的立体场景与直接观察景的立体感是不同的. 立体场景中各物点位置深度差的鉴别能力, 可用相应两点产生的生理视差  $\Delta X_e$  的比值表示, 称为体视放大率. 参照文献[3]用图 2 所示系统摄得的体视全息图的体视放大率为

$$P = M \frac{Bf_c \cos^2 \theta}{bl \cos^2 \theta'} \quad (6)$$



式中  $M = M_1 M_2 M_3$  为  $L_1, L_2, L_3$  的总放大率,  $B$  为  $L_r$  和  $L_l$  的间距,  $b$  为人眼左、右眼的间距,  $f_r$  为  $L_r$  和  $L_e$  的焦距,  $2\theta$  和  $2\theta'$  分别为拍摄视轴的夹角和直接观察目标对两眼视轴的夹角,  $l$  为观察者到体视全息图的距离. 由(6)式可见, 通过调整系统参数  $B, f_r, M, l$ , 可以得到不同的体视放大率. 通常使  $P > 1$ , 这样可增大立体景物深度差别的鉴别能力.

### 3 实验和结果

实验装置如图 2 所示体视对镜头是用两架同一型号的照相机(相距  $B = 180 \text{ mm}$ )同步曝光拍得视对. 用白炽灯为光源, 将左、右视图分别成像在两液晶光阀的写入面上. 光阀的分辨率为  $30 \text{ lp/mm}$ , 孔径为  $\phi = 50 \text{ mm}$ , 驱动电压为  $4 \text{ V}_{\text{rms}}$  ( $2 \text{ kHz}$ ). 光路参数是  $f_1 = 180 \text{ mm}$ ,  $\phi_1 = 50 \text{ mm}$ ;  $f_2 = 400 \text{ mm}$ ,  $\phi_2 = 135 \text{ mm}$ ;  $f_3 = 200 \text{ mm}$ ,  $\phi_3 = 100 \text{ mm}$ ;  $M_1 = 2.63$ ,  $M_2 = 1.14$ ,  $M_3 = 1$ ;  $A = 50 \text{ mm}$ ,  $l = 400 \text{ mm}$ . 实际记录的全息图的有效尺寸为  $9 \text{ cm}^2$ . 在白光照明下, 通过再现的一系列彩虹狭缝来观察再现像的立体效果. 按照(6)式可以算得  $P \approx 1$ , 实际观察中也得到了比较强的立体感. 例如目标中的人与背景字牌间有  $30 \text{ mm}$  左右的深度感. 实验结果见图 3, 这是分别从左、右半缝拍摄的再现像.

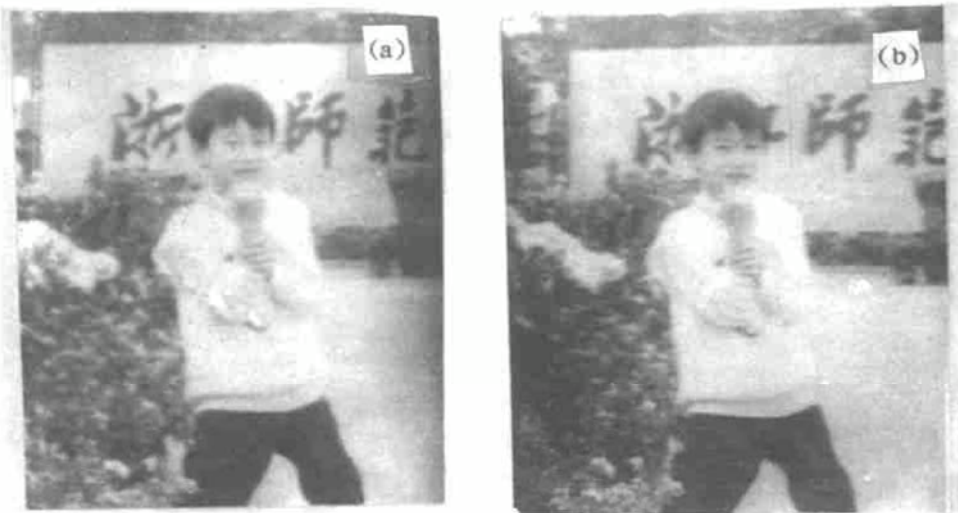


Fig. 3 Experimental results

应该指出, 对这种全息图的观察, 一方面要求双眼限制在特定的范围内, 使它们分别处于左、右半狭缝内, 只允许观察者在水平方面有大约  $65 \text{ mm}$  的移动范围. 另一方面, 由于这种全息图只含有一对体视信息, 所以观察者在限定范围内移动时, 所感觉到的立体效果是一样的. 这就是本实验结果只给出左、右眼视图的原因. 但通过对左、右视图视差程度的分析, 还是能得到一些深度的信息. 例如左视图中“浙”字完整, 而右视图“浙”字被人头挡住了一部分, 从照片中量出这一视差值, 再根据照片的缩放倍数, 可以推算出直接由全息图再现的左、右视图对应部分的视差值约为  $5 \text{ mm}$ . 理论计算表明, 当具有如此此视差量的左、右视图在  $400 \text{ mm}$  处观察时, 应得到  $33 \text{ mm}$  的深度感. 这一数值与本文实际观察到的效果相近.

### 4 结 论

本文所提出的实时体视全息拍摄方法, 其技术关键是用两只液晶光阀来实现目标左、右视图像由非相干光到偏振态互相正交的相干光的实时转换. 然后再在彩虹全息光路中, 采用偏振滤波技术来完成对左、右视图信息的单次曝光编码记录. 用这种方法所摄得的全息图,

在与原参考光共轭的白光照明下,其左、右视图再现像的光就会在左、右半狭缝位置上分离,从而达到左、右视图分别进入观察者左、右眼的目的.显然,这种方法具有4个优点:1)观察体视图不需戴任何附加装置,更接近自然观察;2)用它不但可拍摄大场景目标的全息图,而且还可拍摄像点燃的蜡烛这一类自发光目标的全息图;3)拍摄时允许目标有一定的运动,能够拍摄动态目标的立体信息.4)整个拍摄过程只需一次曝光.过程简单,易于优化设计后固化成一个面向用户的全息照相机系统.

### 参 考 文 献

- [1] T. Okoshi, *Three-dimension Image Technique*, Fifth Avenue, New York, Academic Preee, 1976, 2~6
- [2] 本田捷夫·丰福敏之·迁为顺平,ホログラムたよるステレオ写真対の立体表示. *光学(日)*, 1981, 10(5): 334~338
- [3] 康辉,杨英民,用于三维显示的双目体视全息图. *中国激光*, 1989, 18(11): 681~684
- [4] 于美文,张静方,全息显示技术.第一版,北京,科学出版社,1989,119~123
- [5] 唐继跃,王辉,LCLV实时伪色编码方案. *科技通报*, 1990, 8(2): 106~108
- [6] 蔡铁权,王辉,姚晓刚,二维彩色彩虹像面全息图记录的一种新方法. *光学学报*, 1990, 10(7): 656~659
- [7] T. D. Beard, W. P. Bleha, S. Y. Wong, AC liquid-crystal light valve. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 22(2): 90
- [8] [美]杨振寰著,母国光,羊国光,庄松林译,光学信息处理,第一版,天津,南开大学出版社,1986,160~161

## A Real-time Method for Making Stereo-Hologram

Tang Jiyue      Guo Lurong

(*Institute of Information Optics, Sichuan University, Chendu 610064*)

Wang Hui      Jin Weimin

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

(Received 14 December 1993; revised 8 February 1994)

**Abstract** A real-time recording method for making stereo-hologram is presented in this paper. Two liquid crystal light valve (LCLV) are used as the transforming device of the left-eye image and right-eye image with this method, the traditional three times exposure can be simplified to only single exposure. The real-time system and the experimental results are shown in this paper.

**Key words** three-dimension display, stereo-hologram, stereography, rainbow hologram.