

组合数字彩色动感全息图的研究

徐光磊, 葛宝臻

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:提出了一种基于傅里叶变换全息原理制作数字彩色动感全息图的方法。该方法通过获取待记录对象同一时刻不同位置状态和同一位置不同时间状态的多幅图像,将每幅图像分解为RGB三基色灰度图,利用计算机软件编程进行全息编码、记录与模拟再现,再将三基色灰度图合成为彩色图像。将不同位置和不同时刻的再现像按预定方式排列,当人眼移动时由于视觉暂留效应,会看到随着空间状态变化和时间状态变化的彩色动感全息图。实验结果表明,通过该方法制作的全息图能够产生丰富的动感效果,且随着排列规则、角度间隔、时间间隔的变化,动感效果也发生相应变化。

关键词:数字彩色全息;动感全息;全息编码;空间状态;时间状态

中图分类号:TB877 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.07.019

Study on the digital combination of color dynamic hologram

XU Guang-lei, GE Bao-zhen

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education of China,
College of Optoelectronics and Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper proposes a method how to make the digital combination color dynamic holograms base on the Fourier transform hologram principle. This method is to get the photos of the object which is in different locations at the same time and in the same locations at different times, and then decompose each image into the RGB three primary colors gray images, simulate holographic coding, recording and reconstruction by the computer software, and compose color images of the three primary colors gray images. Now arranging the reconstruction images of different locations and the different times, the color dynamic holograms can be observed with changes of the space state and the time state. The experimental results show that various dynamic effects can be produced by this method, and the dynamic effects will be changed with the change of alignment rules, angle interval and time interval.

Key words: digital color hologram; dynamic hologram; holographic coding; space state; time state

1 引言

全息图的制作有两种方法:光学全息与数字全息图^[1]。相比光学全息,数字全息更加灵活与方便,它不仅可以实现实物的全息纪录,而且可以根据物体的数学描述实现虚拟物体的全息纪录^[2-3]。彩色全息图的制作方法可分两种:一步彩虹全息与两步彩虹全息,但其相干光的利用率低且散斑噪声比较大,而且随着对象景深的变大,再现像色模糊现象也越来越严重。数字彩色全息图较好地解决了这一问题,它不仅克服了传统彩色全息的缺点,还能

较好地实现动态效果^[4-6],动态全息可由光学合成方法、点列合成方法以及数字合成方法制成^[7-8],动感全息图的制作在全息防伪及全息投影等领域有着广阔的应用前景。组合数字彩色动感全息是通过对象不同状态图像的获取、全息记录与再现,再将这些图像按一定顺序排列组合,当人眼观察再现像时,

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60077028)资助。

作者简介:徐光磊(1987-),男,硕士研究生,主要从事数字全息与图像处理等方面的研究。E-mail: tjnk_xgl@163.com

收稿日期:2011-11-14

随着人眼的移动,再现像呈现出连续变化的动态效果。

本文基于迂回相位型傅里叶变换全息原理^[9],研究并制作了数字彩色全息图,提出了一种实现彩色动感全息的方法,通过获取不同空间状态和不同时间状态对象的不同图像,采用组合数字全息的方法,对每幅图像进行三通道的灰度图像提取、全息记录、再现、合成及按一定次序排列,使对象的彩色再现图像呈现出动感效果,反映出空间位置的变化和时间状态的变化。

2 数字彩色动感全息图的制作

2.1 彩色全息图的制作

彩色图像由三种基本颜色红、绿、蓝组成。在对彩色图像进行数字全息纪录时,可将原图分解为三个通道,分别对每个通道进行抽样、离散傅里叶变换、编码、全息记录及再现,之后再三个通道合成即可得到原图的彩色再现图。

根据抽样定理对输入物面与全息图面的抽样是进行离散傅里叶变换的前提,是数字全息图的重要基础。设输入的物波函数为 $o(x,y)$,其振幅和相位分别为 $a(x,y)$ 和 $\varphi(x,y)$,表示为: $o(x,y) = a(x,y)e^{j\varphi(x,y)}$,其傅里叶变换频谱为: $O(u,v) = A(u,v)e^{j\phi(u,v)}$ 。

分别用 X,Y 和 U,V 表示物波面和全息面上的抽样范围,物波面上在 x,y 方向上抽样间距分别为 $\delta x \leq 1/U, \delta y \leq 1/V$,在两个方向上共有的抽样单元数量分别为 G,H ,物波函数在点 (g,h) 可表示为:

$$o(g,h) = o(g\delta x, h\delta y) \quad -\frac{G}{2} \leq g \leq \frac{G}{2} - 1, \\ -\frac{H}{2} \leq h \leq \frac{H}{2} - 1 \quad (1)$$

同理,全息面上在 u,v 方向上抽样间距分别为 $\delta u \leq 1/X, \delta v \leq 1/Y$,在两个方向上共有的抽样单元数量分别为 M,N ,全息面波函数在某点 (m,n) 处的值可表示为:

$$O(m,n) = O(m\delta u, m\delta v) \quad -\frac{M}{2} \leq m \leq \frac{M}{2} - 1, \\ -\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2} - 1 \quad (2)$$

$$\text{抽样单元个数 } G \cdot H = M \cdot N = \frac{X}{\delta x} \cdot \frac{Y}{\delta y} = \frac{U}{\delta u} \cdot \frac{V}{\delta v} = XYUV。$$

在制作傅里叶变换全息图过程中,需要对抽样后的物波函数进行离散傅里叶变换:

$$O(m,n) = \sum_{-\frac{G}{2}}^{\frac{G}{2}-1} \sum_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}-1} a(g,h) e^{j\varphi(g,h)} e^{-j2\pi(\frac{mg}{G} + \frac{nh}{H})} \quad (3)$$

得到全息图面上的物光波分布 $O(m,n)$,幅值为 A_{mn} ,相位为 ϕ_{mn} :

$$O(m,n) = A(m,n) e^{j\phi(m,n)} \quad (4)$$

编码的目的是要把复数值转化为实的非负函数,编码过程可用数学公式表达为:

$$t(m,n) = C_R[O(m,n)] \quad (5)$$

式中, $t(m,n)$ 表示傅里叶变换全息图的全息函数; C_R 表示迂回相位型编码方法; $O(m,n)$ 表示的是空间复函数的傅里叶变换。

对于彩色图像编码,在RGB三个通道的每个抽样单元上设置一个通光孔径。抽样单元中矩形孔径的宽度 s 设为定值, l_{mn} 为孔径高度,它随样点 (m,n) 幅值的变化而变化; p_{mn} 表示孔径中心与抽样单元中心的距离,它是与位相有关系的参数,如图1所示。

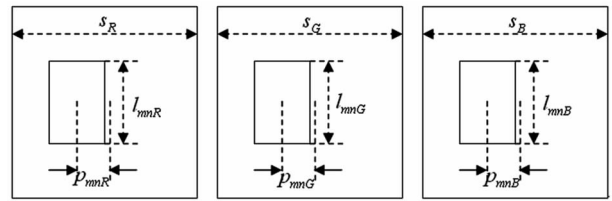


图1 三通道编码抽样单元

Fig. 1 three channel coding sampling units

用矩形孔径的高度 l_{mn} 和中心距 p_{mn} 来编码经过离散傅里叶变换后物光波波前的振幅 A_{mn} 和位相 ϕ_{mn} ,通过计算得到全息图上复函数的编码公式为:

$$l_{mnR} = A_{mnR}, l_{mnG} = A_{mnG}, l_{mnB} = A_{mnB} \\ p_{mnR} = \phi_{mnR}/2\pi, p_{mnG} = \phi_{mnG}/2\pi, p_{mnB} = \phi_{mnB}/2\pi \quad (6)$$

傅里叶变换全息图的再现原理是将全息记录图置于原光路中,并在全息图后放置一个透镜,再用再现光照射,其就相当于对全息记录图做相应的傅里叶变换,其可表示为:

$$o_i(x',y') = F\{C_R[A_{mni}e^{j\phi_{mni}}]\} \\ = F\{D_R[l_{mni} \cdot e^{2\pi j p_{mni}}]\}, i = R, G, B \quad (7)$$

式中, $o(x',y')$ 表示再现波函数; F 表示傅里叶变换及再现处理过程; D_R 表示抽样编码模式校正算法; l_{mni} 不同通道抽样单元中通光孔径的高度; p_{mni} 表示不同通道孔径与抽样单元的中心距。

将编码后的信息通过绘图仪绘制在记录膜片上,或直接输入到透射液晶屏上,就可制成相应的全息纪录图,将其放入傅里叶变换全息再现光路中,可

实现全息再现。本文通过计算机编写程序实现全息图的抽样、变换、编码、纪录及模拟再现整个过程。

2.2 动感全息图的制作

动感全息的制作是基于组合数字全息的原理,通过拍摄待记录对象不同状态的不同图像,获取图片特有的大量信息,再通过计算机编写程序实现全息纪录、再现、组合,利用人眼的双目立体视觉效应及视觉暂留效应,可观察到动态效果。本文提出两种制作方法,分别是基于空间状态变化与时间状态变化带来的动感效果。

一种方法是:同一时刻,分别对物体不同的空间位置拍摄,获取物体相同时间状态不同空间状态的图像,摄像机与计算机相连,通过计算机程序实现各个图像的三通道分离、全息记录,模拟再现、三通道还原、再现图按规则排列、模拟再现动感效果,实验中通过获取物体不同角度位置的图像来实现。另一种方法是:摄像机相对物体空间位置不变,分别对物体不同时刻的状态进行拍摄,获取相同空间状态不同时间状态的图像,再通过计算机实现动感全息图的制作。由于引入了方位参数 $L(\theta)$ 和时间参数 $T(t)$, 其再现可表示为:

$$\begin{aligned} o_R(x', y', \theta, t) &= F\{D_R[l_{mnR}e^{2\pi j p_{mnR}}]\}L(\theta_i)T(t_j) \\ o_G(x', y', \theta, t) &= F\{D_R[l_{mnG}e^{2\pi j p_{mnG}}]\}L(\theta_i)T(t_j) \\ o_B(x', y', \theta, t) &= F\{D_R[l_{mnB}e^{2\pi j p_{mnB}}]\}L(\theta_i)T(t_j) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq q$, s 与 q 分别为不同角度位置 and 不同时刻获取的图像数量。将三个通道的再现图级联,可得彩色再现图:

$$o(x', y', \theta, t) = P[o_R(x', y', \theta, t), o_G(x', y', \theta, t), o_B(x', y', \theta, t)] \quad (9)$$

式中, P 表示三通道级联函数,当满足三通道的 i 和 j 分别相同时,才能还原彩色再现图。

保持 t_j 不变,随着 θ_i 的改变,会获取待记录对象不同位置的物光波分布 $o_i(x, y)$, 通过全息记录与再现得到其彩色再现光波分布为:

$$o(x', y', \theta) = P[o_R(x', y', \theta), o_G(x', y', \theta), o_B(x', y', \theta)] \quad (10)$$

由式(10)可以看出,再现光分布随着 θ 的变化而变化,将再现图按一定规律记录在介质上,当人眼在介质上移动观察时,会看到空间状态发生变化的彩色动感再现效果,其中 i 所取的数量越多,动态效果越细腻。

保持 θ_i 不变,随着 t_j 的改变,会获取待记录对象不同位置的物光波分布 $o_j(x, y)$, 通过全息记录与

再现得到其彩色再现光波分布为:

$$o(x', y', t) = P[o_R(x', y', t), o_G(x', y', t), o_B(x', y', t)] \quad (11)$$

由式(11)可以看出,再现光分布随着 t 的变化而变化,将再现图按一定规律记录在介质上,当人眼在介质上移动观察时,会看到时间状态发生变化的彩色动感再现效果,其中时间间隔越短, j 所取的数量越多,动态效果越细腻。此外,通过编写实时全息记录与再现程序,可以实时的对运动物体进行数字全息记录与再现,将之投影在特殊介质上,会实时地反应一个动态的、立体的虚拟物体。

本文根据上述原理利用计算机技术,制作了三维静止彩色物体及三维运动的彩色物体,采集了静止物体同一时刻不同位置以及运动物体的同一位置不同时刻的多幅图像,通过对图像的数字全息及模拟再现,实现了空间变化与时间变化的动态效果。

3 数字彩色图像全息图模拟结果与分析

本文利用 MATLAB 语言编写全息图制作软件,实验中选取图像由计算机生成,像素为 $100 \times 100 \times 3$ 的彩色图像。一幅彩色图像可分解成为三个与原图形状、细节都相同但色彩不同的灰度图像,如图 2 所示。

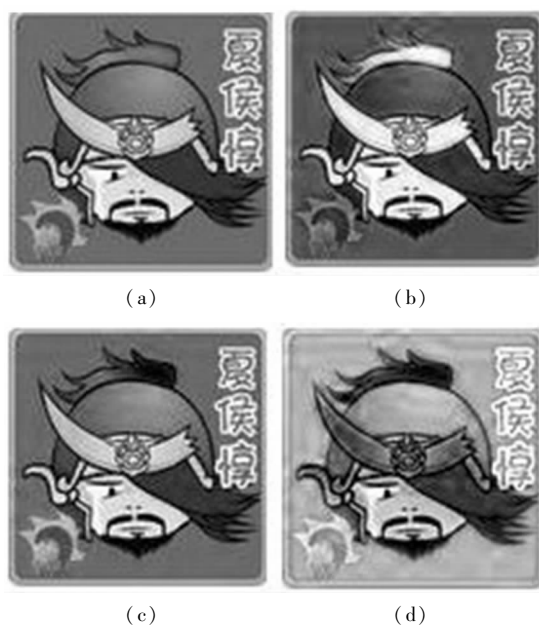


图2 原图及其三基色灰度图

Fig.2 the original and three primary colors gray images

实验中,图 2(b) ~ 图 2(d) 像分别代表红、绿、蓝三基色,像素均为 100×100 , 像素灰度值范围均为 $0 \sim 255$ 的数字灰度图像。

接着对各个灰度图进行抽样并进行离散傅里叶变换、编码、全息记录,最后进行模拟再现,如图 3 所示。

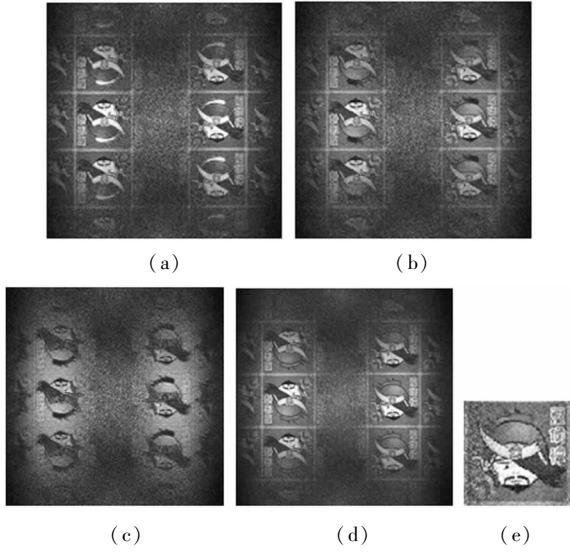


图3 三基色再现图,彩色再现图及提取的正一级再现像

Fig.3 three primary colors reconstruction images and the original color reconstruction image and the first positive reconstruction image

图3(a)~图3(c)三幅图分别为红、绿、蓝三基色灰度再现图,图3(d)为三通道合成再现图,图3(e)为提取出的正一级彩色再现像。

在计算过程中,其可分别用二维方形矩阵表示为: I_R, I_G, I_B ,其中矩阵元素个数均为10000,用矩阵元素表示灰度值大小,为方便计算,将灰度范围由(0~255)归一化为(0~1)。这样彩色图像矩阵就是三个矩阵的级联,其中每一个像素为 $1 \times 1 \times 3$ 的三维矩阵,彩色图像就是由这些像素矩阵构成的。则在某点(m, n)处的彩色矩阵 I_{mn} 可表示为:

$$I_{mn} = P \begin{bmatrix} I_{nm}^R \\ I_{nm}^G \\ I_{nm}^B \end{bmatrix}, 1 \leq m, n \leq 100 \quad (12)$$

式中, $I_{nm}^R, I_{nm}^G, I_{nm}^B$ 分别表示红、绿、蓝三基色在点(m, n)处的像素值; P 则表示三通道复合函数及实现过程。

实验中,抽样编码后需进行频谱平移,否则再现后在观察窗内无法看到完整的再现像。在相位编码过程中,当 $\phi_{mn} > \pi/2$ 时,第 m 抽样单元的通光孔径会进入第($m+1$)抽样单元,如果第($m+1$)单元编码是 $\phi_{m+1,n} = \pi/2$,就会发生两个通光孔径重叠的现象,使再现失真,这就需要模式溢出的校正,将溢出的部分移到原抽样单元中去,原通光孔径中心一起平移,使 p_{mn} 转变为 p'_{mn} ,原通光孔径分解为两块,是两块之和等于原孔径大小。

4 彩色动感全息图的模拟结果与分析

将一运动状态分解成诸多图片,当人眼在较短

时间内观察到按一定规律变化的这些图片时,会在大脑中形成动态效果。利用这一原理,制作多幅不同状态的全息图以实现动感全息的效果,在显示、激光防伪等领域有很大的利用价值。

4.1 空间状态变化带来的动感效果

在同一时刻,分别对物体不同位置进行拍摄,获取图像。本文通过计算机制作了三维立体彩色五角星作为原图,如图4(a)所示,选取一起始位置 $\theta = 0^\circ$,然后将图形顺时针每隔 5° 旋转并采集一幅图像,一共旋转 360° ,采集图像73幅。通过计算机编写程序实现多幅图像的全息纪录和再现,将再现图像的正一级从左向右依次排列当人眼由左向右观察时,会看到顺时针旋转的彩色动感全息再现图,如图4(b)~图4(f)所示。

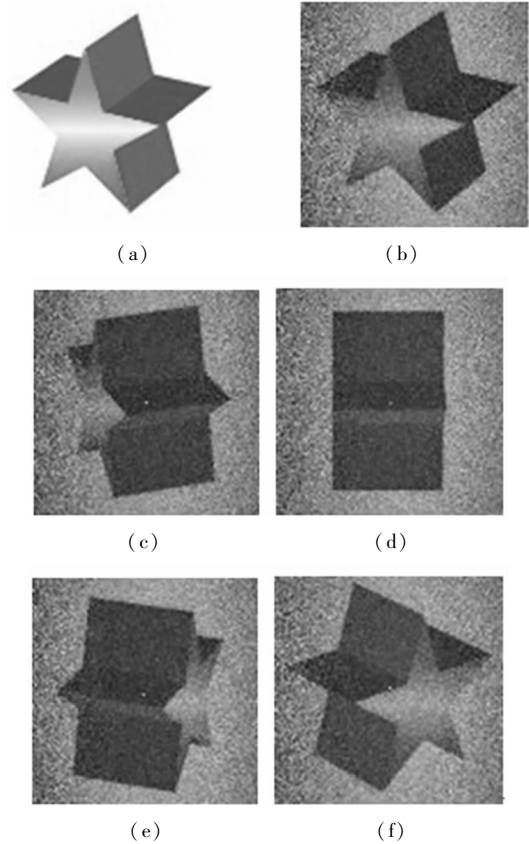


图4 原图及不同位置状态的再现像

Fig.4 the original image and the reconstruction images of different space states

再现时,空间状态的变化带来不同的再现效果,可表示为:

$$o(x', y', \theta) = F \{ D_R [I_{mn} e^{2\pi i p_{mn}}] \} L(\theta) \quad (13)$$

式(13)体现了物体在某一特定时刻,不同的空间状态的信息。

图4(b)~图4(f)分别表示 $\theta = 0^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 120^\circ$ 五幅再现图像,人眼有左至右运动,前一幅

图像的消失伴随着后一幅图像的出现,由于视觉暂留效应,会观察到一个连续逆时针转动的彩色再现五角星图像;而当人眼由右向左运动时,观察到的则是顺时针转动的五角星,实验中,随着 θ 间隔的减小,动感效果更加连贯。在应用上,结合全息烫印技术可以将再现图按规律烫印在防伪薄膜介质上,能够制作成三维立体彩色动感全息防伪商标,设计图形及排列方式的不同会带来不同的三维动感效果,形成特定的显示与防伪效果。

4.2 时间状态变化带来的动感效果

在相对物体的同一位置,分别对物体不同时刻的状态进行拍摄取像,按一定规律全息再现时,同样会带来不同的动感效果。通过计算机制作一实时运动的彩色小车,如图5(a)所示。在垂直面对小车侧面的位置,获取小车运动不同时刻的图像,编写实时再现程序实现全息纪录和再现,将再现像正一级从左向右依次排列,由于其车轮色彩状态的变化,当人眼从左向右观察再现像时,会看到从右向左行驶的彩色再现小车,如图5(b)~图5(f)所示。

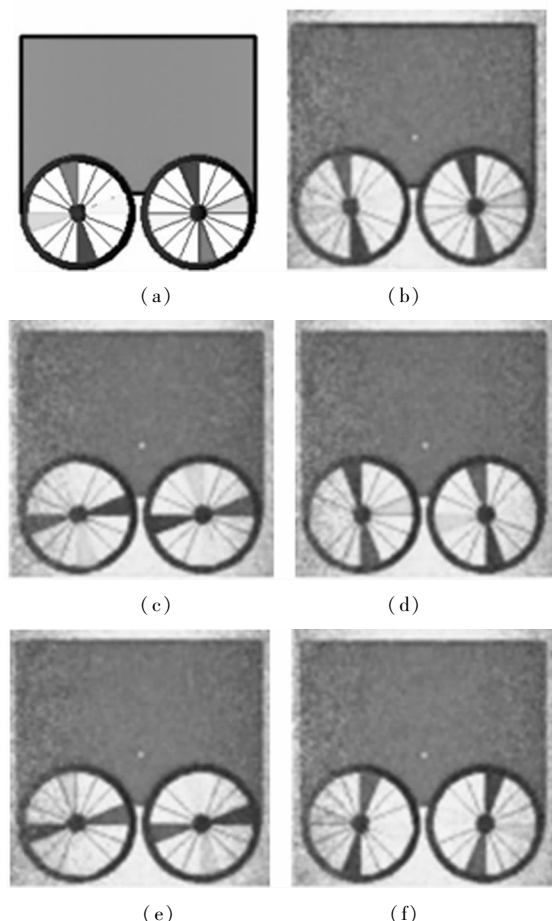


图5 原图及不同时间状态的再现像

Fig.5 the original image and the reconstruction images of different time states

再现时,时间状态的变化带来不同的再现效果,可表示为:

$$o(x', y', t) = F\{D_R[l_{mn}e^{2\pi i p_{mn}}]\}T(t) \quad (14)$$

式(14)体现了物体在某一相对固定的位置,不同时间状态的信息。

实验中共采集了16幅再现图像,图5(b)~图5(f)分别表示 $t=0$ s, 1 s, 2 s, 3 s, 3.75 s时五幅再现图像,车轮的轮辐有四种不同颜色,以红色轮辐为基准观察,由 $t=0$ s到 $t=3.75$ s可看出,红色轮辐按逆时针转动。当人眼由左至右移动时,同样由于视觉暂留效应,会观察到逆时针转动的车轮,其带来的效果就是小车由右向左运动;反之,当人眼由右向左运动时,观察到的是由左向右运动的小车,随着 t 间隔的减小,其运动效果更细腻,更连贯。

5 结论

本文利用迂回相位型傅里叶变换全息原理,基于计算机技术,研究并制作了彩色数字全息图,通过对模拟物体不同空间状态和时间状态的多幅图像编码,制作了彩色动感全息图。将彩色图像分解为RGB三基色灰度图分别进行全息是制作彩色全息图的关键,通过编写模式溢出校正算法使彩色全息图实现了完整再现。对不同空间状态的彩色全息图模拟再现并按一定规则排列,观察到了相应的动态效果,它体现了物体同一时刻不同位置的信息,且角度间隔越小,动态效果约好;不同时间状态带来的动感效果体现了物体同一位置不同时刻的信息,且时间间隔越小,动态效果越好。基于空间状态与时间状态变化而制作的数字彩色动感全息图体现了物体多维的信息,在全息投影显示及防伪领域有很大利用价值。

参考文献:

- [1] Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer generated hologram [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 1 - 37. (in Chinese)
虞祖良, 金国藩. 计算机全息图 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 1 - 37.
- [2] M Araiza Esquivel, S Guel Sandoval. Two-channel computer-generated holograms: a simplified method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 39: 629 - 634.
- [3] K Nagashima. Improvement of 1D off-axis computer-generated holograms [J]. Optics & Lasers Technology, 2003, 35: 181 - 186.
- [4] Liu Huiping, Wang Jincheng, Yu Jia, et al. The digital stereogram rainbow hologram [J]. Optical Technique,

- 2007,33(4):524-525. (in Chinese)
- 刘惠萍,王金城,于佳,等. 数字合成彩虹全息图[J]. 光学技术,2007,33(4):524-525.
- [5] Wang Yuanyuan, Wang Hui, Ren Zhijun, et al. Research of the Computer generated dynamic rainbow hologram [J]. ACTA Photonica Sinica, 2006, 35(7): 1018-1021. (in Chinese)
- 王媛媛,王辉,任志君,等. 动态数字彩虹全息显示的研究[J]. 光子学报,2006,35(7):1018-1021.
- [6] Gong Yongqing, Fang Lihua, Liu Yuping, et al. Journal of Nanchang University[J]. Journal of Nanchang University, 2002, 26(3): 369-271. (in Chinese)
- 龚勇清,方利华,刘玉萍,等. 基于多角度再现的分层次一步彩虹全息[J]. 南昌大学学报,2002,26(3): 369-271.
- [7] Peng Wanjuan, Wang Ding. Multi-dot synthetic moving holographic stereogram[J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 44-45. (in Chinese)
- 彭婉娟,王丁. 点阵合成体视动感全息图[J]. 激光杂志,2008,29(1):44-45.
- [8] Ge Dayong, Teng Xiaoyun, Zhang Lanwen, et al. The fabrication of optical synthetic hologram [J]. Laboratory Science, 2008, 4: 64-65. (in Chinese)
- 葛大勇,滕晓云,张蓝文,等. 光学合成全息图的制作[J]. 实验室科学,2008,4:64-65.
- [9] Wang Yongzhong, Zhang, Xue Rui, et al. The FFT computer-generated hologram and its reconstruction by detour phase encoding [J]. Infrared Technology, 2004, 26(2): 57-59. (in Chinese)
- 王永仲,张勇,薛蕊,等. 迂回相位编码的傅里叶变换计算全息图及其再现[J]. 红外技术,2004,26(2): 57-59.
-