

文章编号: 0258-7025(2010)05-1304-06

# 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法

金洪震 楼益民 王 辉 马利红

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要** 依据集成照相术(IP)和计算机图形学原理,提出了一种新的单波长激光在同一种记录介质上一次曝光记录虚拟三维物体的彩色全息图的方法。首先利用计算机图像处理技术对彩色虚拟三维物体进行三原色分解,并对分色后的三维物体进行坐标变换,模拟全息集成照相过程计算获取具有水平视差的三原色体视图序列,再利用彩虹全息术的狭缝进行消除色串扰,实现单波长激光一次曝光记录彩色全息图。理论上分析了该方法的可行性,并进行了实验验证,讨论了影响全息图再现像分辨率的因素。

**关键词** 全息;合成彩色全息图;集成照相术;计算机图形学;彩虹全息术

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1304

## Integral Color Hologram of Virtual 3D Object Generated by Integral Photography

Jin Hongzhen Lou Yimin Wang Hui Ma Lihong

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

**Abstract** Based on integral photography and computer graphics, a new method for recording color holograms of virtual 3D objects using single wavelength laser is proposed. Three horizontal parallax only integral photography (IP) images whose colors correspond to tricolor are calculated by simulating integral photography. IP images are illuminated with the coherent beam from the opposite side. Three images of the virtual 3D object are reconstructed and overlapped on a particular image plane by three liner micro-lens arrays. With interfering the reconstructed 3D images and the reference beam after a single exposure, a color hologram is created. Experimental implementation of the new method for a simple case is presented.

**Key words** holography; integral color hologram; integral photography; computer graphics; rainbow holography

### 1 引 言

全息立体显示是通过记录和再现物体的物光波前分布来实现物体的三维显示,被认为是最理想、最具前景的三维显示技术之一<sup>[1]</sup>,尤其是三维彩色全息显示更具吸引力<sup>[2~4]</sup>。

制作彩色全息图方法有多种,其中以单波长激光记录彩色全息图的方法最为常用<sup>[5]</sup>。采用激光记录彩色全息图的方法条件苛刻,且只能记录尺寸较小的物体,不能记录室外场景,更不能实现虚拟三维场景的彩色全息记录。激光记录三维物体的彩色全

息图时,对于三维物体三原色信息的提取过程较为复杂,且记录全息图时光能利用率低<sup>[6]</sup>。

计算机制全息技术是一种很有前途的实现三维物体立体显示的技术<sup>[7~9]</sup>,且制作的全息图衍射效率高、不受光学元件像差影响。但是,计算机制全息图的计算量正比于物体的大小和全息图的样点数,计算量非常庞大且耗时,尤其是制作大场景及大视角彩色全息图时,其计算量更是庞大。再者,计算全息图输出时也受到出图设备的分辨率限制。尽管如此,学者们还是潜心于计算机制彩色全息图的研究<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2009-07-21; 收到修改稿日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(60877002)和浙江省自然科学基金(Y105061)资助课题。

作者简介: 金洪震(1965—),男,副教授,主要从事全息立体显示、数字全息和光电技术等方面的研究。

E-mail: kingh@zjnu.cn

Pole<sup>[11]</sup>提出的全息集成照相技术(IP)实现了非相干物体的全息显示,拓展了全息显示技术的应用,尤其在大视角三维立体显示及多视角立体像等方面优势明显<sup>[12,13]</sup>。Shaked等<sup>[14]</sup>基于透镜阵列,在白光场景下用单个相机多视角拍摄合成体视图序列,计算实现了数字傅里叶全息图记录;Sando等<sup>[8]</sup>利用彩色 CCD 白光下拍摄体视图序列,并计算获取三原色分离的三维物体的傅里叶光谱信息,再通过计算三原色的全息图再现得到彩色全息像。其目的是直接利用计算机计算,在不需要用激光和暗室的情况下制作了全息图。

本文提出了一种基于集成照相术的记录虚拟三维物体彩色全息图的方法。该方法结合了计算机图像处理技术、集成照相术以及彩虹全息术,实现了虚拟三维物体全息立体显示。首先将计算机内已经存储的彩色虚拟三维物体数据进行三原色分离,并分别对分色后的三原色物体进行坐标变换,再依据全

息集成照相原理计算获取体视图序列图,最后利用彩虹全息术的狭缝进行消除色串扰<sup>[15]</sup>,单色光一次曝光实现虚拟三维物体的彩色全息图的记录。实验表明,利用该方法记录虚拟三维物体的彩色全息图时,彩色三维物体的三原色分离过程和坐标变换操作变得简单。只需一种记录介质一次曝光记录的全息图,其彩色再现像的立体效果明显,具有较高的衍射效率,且记录过程相对简单。

## 2 单波长激光合成彩色全息图原理

集成全息照相的原理如图 1(a)所示,三维物体通过线性透镜阵列成像在胶片上,得到具有不同视角的二维体视图序列。所得的体视图由相干光照明,经同一透镜阵列合成重构出三维物体的像,像的光场分布相当于原来物体的光场分布,如图 1(b)所示,引入参考光即可记录获得三维物体的全息图。

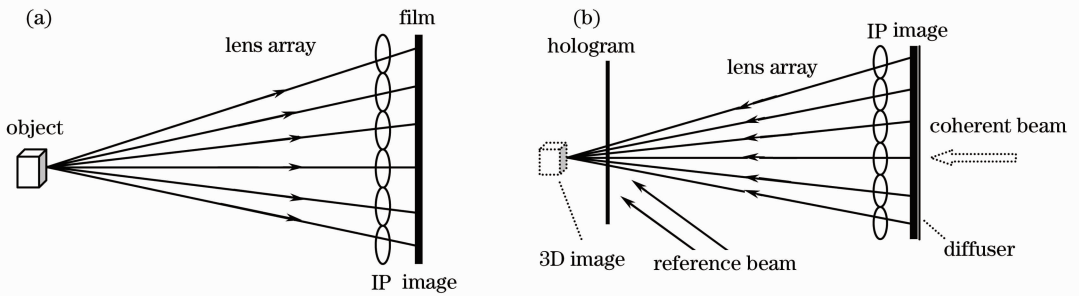


图 1 集成照相术原理。(a)体视图获取原理图;(b)三维物体像的重构过程

Fig. 1 Integral photography. (a) principle diagram for recording progress; (b) principle diagram for reconstruction progress

提出的单波长合成彩色全息的原理如图 2 所示,此光路记录彩色全息图的原理与单波长二步法真彩彩虹全息的原理是非常类似的。图中的三个线性透镜阵列不仅起到成像作用,而且起到彩虹全息术中狭缝的作用。将计算得到的彩色虚拟物体的三原色体视图序列图分别置于三个透镜阵列的右侧,用单色激

光同时照明三张体视图序列图,经三组平行放置的线性透镜阵列后成三个独立的像。通过精确调整体视图序列图在 y 方向的位置以及透镜阵列之间的相对距离,使得红、绿和蓝三个像在透镜阵列左侧 Z<sub>0</sub> 处重合,引入平行参考光即可记录彩色彩虹全息图。

上述过程中记录的彩色全息图,用白光再现时,要使得三原色狭缝像都能准确重叠,也就是在三原色狭缝像重合的地方观察到真彩色像,三个狭缝之间的相对位置是关键。设 λ<sub>r</sub>, λ<sub>g</sub> 和 λ<sub>b</sub> 分别为最后再现的分色像的中心波长, λ<sub>0</sub> 为记录波长,根据彩色彩虹全息的原理及全息基本物像关系<sup>[16]</sup>,在 y 方向计算得到三组透镜阵列之间的相对距离为<sup>[5]</sup>

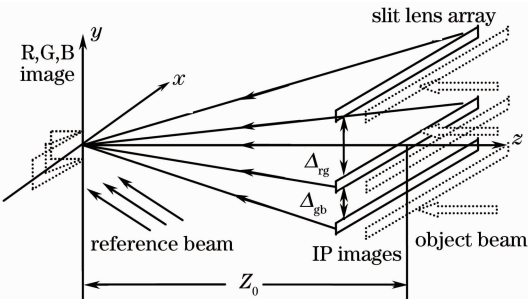


图 2 彩色全息图记录原理示意图

Fig. 2 Principle diagram for color hologram recording of holographic integral photography with single wavelength

$$\begin{cases} \Delta_{rg} = \frac{\lambda_r - \lambda_g}{\lambda_r \lambda_g} \lambda_0 Z_0 \tan \theta \\ \Delta_{gb} = \frac{\lambda_g - \lambda_b}{\lambda_g \lambda_b} \lambda_0 Z_0 \tan \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中 Δ<sub>rg</sub> 表示红色体视图成像的透镜阵列与绿色体视图成像的透镜阵列的间隔, Δ<sub>gb</sub> 表示绿色体视图成

像的透镜阵列与蓝色体视图成像的透镜阵列的间隔,  $Z_0$  是透镜阵列与像平面之间距离,  $\theta$  表示参考光与物光的夹角。

采用单波长制作三维物体的彩色全息图, 再现时确保三原色像精确重合, 在记录彩色全息图之前必须分别对物体的三原色物体进行坐标变换<sup>[17]</sup>。采用光学方法进行变换其操作复杂, 利用计算机处理, 使得这种坐标变换简单易行。

### 3 三维物体的坐标变换

设有一个彩色物点其坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 将三原色物点的坐标分别设为  $(x_{Or}, y_{Or}, z_{Or})$ ,  $(x_{Og}, y_{Og}, z_{Og})$  和  $(x_{Ob}, y_{Ob}, z_{Ob})$ , 并设全息图拍摄时用单一波长为  $\lambda_r$  的光作为记录光。按照全息图的物像关系, 物点、像点、再现光源和再现像之前的关系为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \frac{x_I}{l_I} = \frac{x_C}{l_C} + \frac{\lambda}{\lambda_r} \left( \frac{x_O}{l_O} - \frac{x_R}{l_R} \right) \\ \frac{y_I}{l_I} = \frac{y_C}{l_C} + \frac{\lambda}{\lambda_r} \left( \frac{y_O}{l_O} - \frac{y_R}{l_R} \right) \\ \frac{1}{l_I} = \frac{1}{l_C} + \frac{\lambda}{\lambda_r} \left( \frac{1}{l_O} - \frac{1}{l_R} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $l = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$  为各点到坐标原点距离,  $(x_I, x_C, x_O, x_R)$ ,  $(y_I, y_C, y_O, y_R)$ ,  $(z_I, z_C, z_O, z_R)$  分别表示再现像、再现光源、物点和参考光源在  $x, y, z$  轴上的坐标,  $\lambda$  为再现光波长。

由(2)式可知, 全息图再现时, 像点坐标除了与原物点位置有关以外, 还与再现波长有关。当用红绿蓝三原色光( $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ )再现时, 可以再现出 9 个像点, 其中红光再现红原色像点, 绿光再现绿原色像点, 蓝光再现蓝原色像点, 这 3 个像点对研究有意义, 其他 6 个像点属于串色像, 可以采用彩虹全息术的狭缝进行消除。在傍轴近似情况下, 由(2)式求出 3 个原色像点的坐标分别为

$$\begin{cases} z_r = \frac{z_C z_{Or} z_R}{z_{Or} z_R + z_C (z_R - z_{Or})} \\ x_r = \frac{x_C z_{Or} z_R + z_C (x_{Or} z_R - x_R z_{Or})}{z_{Or} z_R + z_C (z_R - z_{Or})} \\ y_r = \frac{y_C z_{Or} z_R + z_C (y_{Or} z_R - y_R z_{Or})}{z_{Or} z_R + z_C (z_R - z_{Or})} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} z_g = \frac{z_C z_{Og} z_R}{z_{Og} z_R + \mu_g z_C (z_R - z_{Og})} \\ x_g = \frac{x_C z_{Og} z_R + \mu_g z_C (x_{Og} z_R - x_R z_{Og})}{z_{Og} z_R + \mu_g z_C (z_R - z_{Og})} \\ y_g = \frac{y_C z_{Og} z_R + \mu_g z_C (y_{Og} z_R - y_R z_{Og})}{z_{Og} z_R + \mu_g z_C (z_R - z_{Og})} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} z_b = \frac{z_C z_{Ob} z_R}{z_{Ob} z_R + \mu_b z_C (z_R - z_{Ob})} \\ x_b = \frac{x_C z_{Ob} z_R + \mu_b z_C (x_{Ob} z_R - x_R z_{Ob})}{z_{Ob} z_R + \mu_b z_C (z_R - z_{Ob})} \\ y_b = \frac{y_C z_{Ob} z_R + \mu_b z_C (y_{Ob} z_R - y_R z_{Ob})}{z_{Ob} z_R + \mu_b z_C (z_R - z_{Ob})} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $(x_r, y_r, z_r)$ ,  $(x_g, y_g, z_g)$  分别为参考光和再现光坐标,  $\mu_g = \lambda_g / \lambda_r$ ,  $\mu_b = \lambda_b / \lambda_r$ 。希望这 3 个原色像点能够重合, 这样就完成了一个彩色物点到一个彩色像点的传递。显然, 如果由物点分解出来的三原色点用同一波长纪录, 并且保持其坐标点不变, 即  $(x_{Or}, y_{Or}, z_{Or})$ ,  $(x_{Og}, y_{Og}, z_{Og})$ ,  $(x_{Ob}, y_{Ob}, z_{Ob})$ 。则再现时, 三原色再现点通常不能重合, 因而也就不能再现原彩色像点。

为讨论简单, 设参考光和再现光为同一束平行光, 并选取参考光的方向与  $x$  方向垂直。则有  $z_r = z_C = \infty$ , 且  $y_r / z_r = \sin \theta_{yR}$ , (3)~(5)式可以简化为

$$\begin{cases} z_r = z_{Or} \\ x_r = x_{Or} \\ y_r = y_{Or} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} z_g = \frac{z_{Og}}{\mu_g} \\ x_g = x_{Og} \\ y_g = \sin \theta_{yR} z_{Og} \left( \frac{1}{\mu_g} - 1 \right) + y_{Og} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} z_b = \frac{z_{Ob}}{\mu_b} \\ x_b = x_{Ob} \\ y_b = \sin \theta_{yR} z_{Ob} \left( \frac{1}{\mu_b} - 1 \right) + y_{Ob} \end{cases}. \quad (8)$$

为了使再现的三原色像点坐标再现时重合, 则三原色的物点的坐标应变换为

$$\begin{cases} z'_{Or} = z_O \\ x'_{Or} = x_O \\ y'_{Or} = y_O \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} z'_{Og} = \mu_g z_O \\ x'_{Og} = x_O \\ y'_{Og} = y_O + z_O \sin \theta_{yR} (\mu_g - 1) \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} z'_{Ob} = \mu_b z_O \\ x'_{Ob} = x_O \\ y'_{Ob} = y_O + z_O \sin \theta_{yR} (\mu_b - 1) \end{cases}. \quad (11)$$

利用计算机图像处理技术对已存储在计算机中的彩色虚拟三维物体进行三原色分离, 并利用(9)~(11)式对 3 个分色物体分别进行坐标变换并存储, 用于计算输出三原色体视图序列。

### 4 体视图序列的计算

利用计算机图形学原理,模拟集成照相记录过程,按照图 3 所示的操作流程,通过 VC++ 和 OpenGL 编程计算,可以将三维物体显示在二维屏幕上,也就是得到三维物体的体视图。按图 3 流程,每次循环完成计算透镜阵列中的一个小透镜的不重叠、不交叉的二维像,即输出了一幅基元体视图。一个小透镜下观察到三维物体的角度称为一个视角,流程中将所有的视角都计算操作完毕,输出最终的体视图序列。

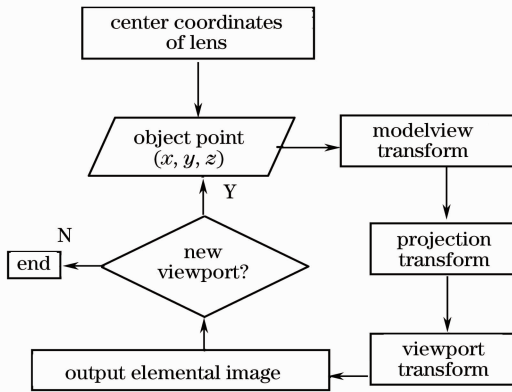


图 3 体视图序列的计算流程图

Fig. 3 Flow chart for holographic encoding 3D object

在计算流程中,视点模型变换操作的目的是对准场景并调整场景处于取景框中合适的位置,其过程是根据各透镜的中心坐标和物体的中心坐标所确定的视线对三维物体坐标进行平移变换和旋转变换来实现。透视投影变换是完成小透镜成像模拟的过程,通过透视变换矩阵操作来实现。计算机把输入

相关的参数代入矩阵,执行透视投影变换运算,完成对小透镜的成像模拟,也就实现了物体的三维坐标转换成物体图像的二维坐标。视口变换的作用是对二维图像进行整体缩放调整,并在屏幕上开辟一个视口,用于显示或输出,在 OpenGL 中由函数  $glViewport(x, y, width, height)$  实现,其中  $x, y$  为矩形视口的左下角像素坐标,  $width, height$  为视口的宽度和高度。上述各个操作矩阵按操作顺序被合成一个组合变换矩阵,然后将该矩阵作用于物体的三维坐标,实现组合变换过程,完成了一个单视角基元体视图。最后,对三维物体进行多视角计算操作,得到三维物体的体视序列图。

### 5 实验结果

首先将计算机内已经存储的彩色三维物体数据进行三原色分解,然后根据(9)~(11)式进行坐标变换,再利用计算机图像处理技术,按集成照相的原理,用图 3 流程计算彩色三维物体的体视序列图。考虑到记录彩虹全息图时狭缝的宽度为 5 cm 左右及人眼双目立体视觉等要求,选择计算体视图序列时的相关参数是:线性透镜阵列中小透镜个数为 20 个,透镜单元的大小为  $6\text{ mm} \times 4.6\text{ mm}$ ,焦距为 10 mm,三维物体模型的某个截面与阵列透镜的垂直距离  $Z_0 = 425\text{ mm}$ 。计算得到的三原色体视图序列各包含 20 个幅基元体视图,其结果如图 4 所示。每个基元体视图代表一个视角,体视图序列共有 20 个方向的视角。将计算所得的三原色体视图序列以  $600\text{ pixel/inch}[\text{pixel}/(25.4\text{ mm})]$  的分辨率输出到胶片上,尺寸为  $120\text{ mm} \times 4.6\text{ mm}$ 。



图 4 彩色三维物体分色体视图序列。(a)红色体视图序列;(b)绿色体视图序列;(c)蓝色体视图序列

Fig. 4 Color separation stereographic image series of virtual 3D object. (a) red stereographic image series;

(b) green stereographic image series; (c) blue stereographic image series

记录彩色全息图的光路如图 5 所示。D 为散射屏,SI 为体视图,LA 为透镜阵列,RB 为参考光,OB 为物光,H 为全息记录面。将图 4 体视序列图放置在线性透镜阵列的原来记录的像面上,与透镜阵列的距离大约是 10.2 mm。散射光照明体视图序列,适当调整使得在全息记录面上得到清晰的像为止。

3 条线性透镜阵列在  $y$  轴方向的间距分别为  $\Delta_{rg} = 36.8\text{ mm}, \Delta_{gb} = 16.8\text{ mm}$ 。根据几何成像的规律,各分色体视图经透镜阵列沿光轴成像时将不会直接重合在同一位置。为了解决这个问题,根据几何成像的规律,将红、蓝色的体视序列图相对于其透镜阵列光轴沿  $y$  轴方向适当位移,如图 5 中的  $\delta_r \approx f\Delta_{yg}/z_0,$

$\delta_b \approx f \Delta_{gb} / z_0$ , 使三原色体视图序列经过透镜阵列成的 3 个像的某个横向截面重合。全息干板放置在  $Z_0$  位置。引入平面参考光, 参物光夹角  $\theta = 22^\circ$ , 一次曝光拍摄得到彩色全息图。

白光照明所记录的彩色全息图, 眼睛实际观察三维再现像的彩色重构和立体效果是令人满意的。用数码相机拍摄得到彩色的三维再现像如图 6 所示, 其中图 6(a) 为左侧视重构像, 图 6(b) 为右侧视重构像, 重构像的大小约  $100 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。

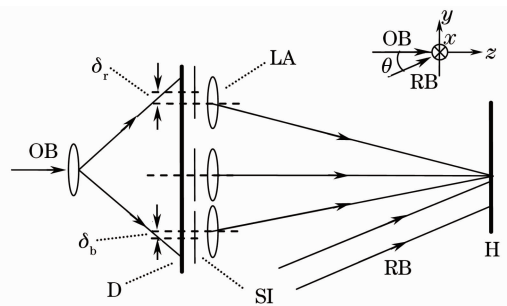


图 5 彩色全息图拍摄光路结构

Fig. 5 Schematic diagram of recording color holograms

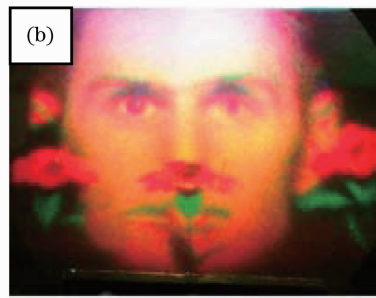


图 6 彩色全息图的再现像。(a)左视图;(b)右视图

Fig. 6 Color reconstruction image of stereo-rainbow hologram. (a) left view; (b) right view

## 6 结 论

提出了利用计算机图像处理技术模拟全息集成照相术的原理, 并结合彩虹全息术, 实现虚拟三维物体的彩色全息图记录。白光再现时重构出虚拟三维物体的真彩色三维像, 立体效果明显。该方法采用计算机图像处理技术对彩色三维物体进行三原色分离并进行三维物体的坐标变换, 因而操作简单方便。单波长激光一次曝光记录彩色全息图, 具有衍射效率较高等优点, 为制作高质量的模压全息母板提供了一种简单的方法。

在实际拍摄全息图的过程中, 透镜阵列的像差会影响到全息图的再现像效果, 重构像略有失真, 采用像差小的透镜或算法补偿像差的影响可以提高再现像的像质, 这一工作在继续进行中。实验中所使用的透镜单元较大, 再现的立体像随着眼睛的移动有些跳跃, 减小透镜阵列中的透镜单元尺寸, 增加透镜单元数目可以减弱跳跃感。另外, 人像部分出现了较为明显的像素点阵结构, 这是因为体视序列图上的像素点被放大的结果, 解决的办法一方面需要由高分辨率的图像输出设备制作体视序列图, 另一方面也可以通过适当的离焦使像素点发生模糊, 对其分辨率进行补偿。提出的制作彩色全息图的方法是可行的, 在提高再现像像质方面还要继续做些工

作, 实现大幅的全息显示。

## 参 考 文 献

- 1 M. Lucente. Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth [J]. *Comp. Graphics*, 1997, **31**(2): 63~67
- 2 T. Kubota. Recording of high quality color holograms [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(22): 4141~4145
- 3 I. Yamaguchi, T. Matsumura, J. -I. Kato. Phase-shifting color digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13): 1108~1110
- 4 H. I. Bjelkhagen, E. Miralis. Color holography to produce highly realistic three-dimensional images [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(4): A123~A133
- 5 Wang Hui, Tang Jiyue, Guo Lürong. A new method of recording 2D full-color hologram with single wavelength light [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(3): 320~325
- 6 王 辉, 唐继跃, 郭履容. 单波长记录二维真彩色全息图的一种新方法[J]. *光学学报*, 1995, **15**(3): 320~325
- 7 Liu Yi, Wang Shifan. A simple method of making two-step rainbow hologram with high efficiency and high brightness [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(4): 359~362
- 8 刘 艺, 王仕璠. 一种简单高效的高亮度二步彩虹主全息图制作方法[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(4): 359~362
- 9 H. He, N. R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop. Optical particle trapping with higher-order doughnut beams produced using high efficiency computer generated holograms [J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(1): 217~223
- 10 Y. Sando, M. Itoh, T. Yatagai. Full-color computer-generated holograms using 3-D Fourier spectra [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6246~6251
- 11 D. Abookasis, J. Rosen. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1537~1545
- 12 N. T. Shaked, B. Katz, J. Rosen. Fluorescence multicolor

- hologram recorded by using a macrolens array [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1461~1463
- 11 R. V. Pole. 3-D imagery and hologram of objects illuminated in white light [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**(1): 20~22
- 12 T. Mishina, M. Okui, F. Okano. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(17): 4026~4036
- 13 B. Lee, S. Jung, S. -W. Min *et al.*. Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(19): 1481~1482
- 14 N. T. Shaked, J. Rosen, A. Stern. Integral holography: white-light single-shot hologram acquisition [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5754~5760
- 15 Yu Meiwen. Zhang Jingfang. *Holographic Display Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1989. 132~136  
于美文, 张静芳. *全息显示技术* [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 132~136
- 16 Yu Meiwen. *Optical Holography and its Applications* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 74~84  
于美文. *光全息学及其应用* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 74~84
- 17 Fan Cheng, Jiang Chaochuan, Guo Lürong. A new true color rainbow holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(11): 1032~1036  
范 诚, 江朝川, 郭履容. 一种新的真彩色彩虹全息术 [J]. *光学学报*, 1991, **11**(11): 1032~1036