

# 基于连续变频技术的三维图像激光打印方法与系统

楼益民<sup>1</sup> 陈林森<sup>2</sup> 魏国军<sup>2</sup> 浦东林<sup>2</sup> 叶 燕<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006; <sup>2</sup> 苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 提出了一种基于  $4f$  成像系统和衍射光栅结构的连续变频技术, 利用该技术设计并制造了一套三维(3D)图像激光打印系统, 可实现幅面为  $15\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的大视角(大于  $90^\circ$ )、真彩色 3D 图像的激光打印输出。分析了 3D 图像中的变频结构特性, 获得了变频结构参数的数学表达式。详细解析了连续变频结构的实现原理, 推导了变频规律。通过实验证实了连续变频原理与输出系统的有效性, 实现了彩色 3D 图像的激光打印输出。

**关键词** 全息; 三维打印; 空频调制; 激光直写

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0209009

## Method and System of Three-Dimensional Laser Printing Based on Consecutive Spatial Frequency Modulation

Lou Yimin<sup>1</sup> Chen Linsen<sup>2</sup> Wei Guojun<sup>2</sup> Pu Donglin<sup>2</sup> Ye Yan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China  
<sup>2</sup> Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** A consecutive spatial frequency modulation technique using  $4f$  imaging system and diffractive grating is proposed. Based on this technique, a three-dimensional (3D) image printing system is designed and fabricated, by which a large formate ( $15\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ) and true color 3D image with wide view angle (more than  $90^\circ$ ) is made. Characteristics of frequency modulation structure in 3D image are analysed. Mathematical expressions with parameters of frequency modulation structure are given. Principles of consecutive spatial frequency modulation are analysed and frequency modulation rules are deduced. Validity of the rules and system of spatial frequency modulation are varified by experiments. Color 3D images are outputed by laser printing system.

**Key words** holography; three-dimensional printing; spatial frequency modulation; laser direct writing

**OCIS codes** 090.2870; 090.5640; 070.2615

## 1 引 言

三维(3D)图像打印是有望引领下一代信息显示革命的重要技术, 一直以来备受瞩目。如何在二维(2D)平面介质上打印输出 3D 图像是人们孜孜以求的重要课题。美国麻省理工学院<sup>[1]</sup>、日本东京工业大学<sup>[2-3]</sup>、亚利桑那大学<sup>[4-5]</sup>、美国斑马影像公司<sup>[6]</sup>相继利用数字合成全息打印技术实现了幅面可扩展的彩色全息打印输出。该技术原理与全息电视技术相近, 利用光折变聚合物对全息信息进行了简化记录, 实现大幅面高衍射效率的全息显示。但是, 这类技术需要

专门的记录设备和显示材料对全息信息进行输出, 而且仅限于单幅反射全息的制作, 难以批量印刷复制, 所以价格昂贵, 导致使用范围受限。

点阵全息图<sup>[7]</sup>是由按一定位置坐标排列的微小光栅像素构成的全息图, 可在平面上实现 3D 立体、光变等视觉效果, 可实现卷对卷的大批量印刷复制, 是实现 3D 图像全息显示<sup>[8-9]</sup>的重要途径。但是, 目前并没能很好地解决光栅像素中光栅空频的连续调制这个业内难题, 导致图像的 3D 立体效果不强、观察角度受到限制。Frank<sup>[10-11]</sup>利用三组不同夹角

收稿日期: 2013-09-22; 收到修改稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91023044)、国家自然科学基金(61307009)、中国博士后科学基金第 54 批面上项目(2013M540462)、江苏省自然科学基金(BK20130330)

作者简介: 楼益民(1983-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事全息、三维显示技术等方面的研究。

E-mail: davislou@163.com

导师简介: 陈林森(1961-), 男, 博士, 研究员, 从事光信息与衍射器件、激光干涉光刻系统等方面的研究。

E-mail: lschen@suda.edu.cn (通信联系人)

的光束进行干涉获得了3种空间频率调制的点阵全息图,仍无法实现连续空频调制。文献[12]利用多组相对位置可变的棱镜分光系统和透镜聚光系统实现了空频的连续调制,但是这种机构要求棱镜组在绕光轴轴向转动的同时沿着光轴上下移动,结构复杂,不利于光路稳定。

本文在大量前期工作的基础上<sup>[13-16]</sup>,针对上述问题提出了一种基于连续变频技术的3D激光打印方法与系统,利用4f成像系统和衍射光栅等简单结构实现了空频的连续调制,基于上述结构搭建了一套3D激光打印系统,可实现大幅面、大视角、真彩色3D图像的打印输出。

## 2 基本原理

### 2.1 3D图像中的变频结构

基于点阵全息原理的3D图像结构如图1所示,3D图像位于 $(x, y)$ 平面上,由光栅像素点阵构成,每一个光栅像素中填充有一定频率 $\Lambda$ 和角度 $\theta$ 的光栅。图像在照明光的作用下,在距离图像平面 $Z$ 处的 $(x', y')$ 平面上形成一个由不同观察区域构成的观察窗口,观察者在不同观察区域中可以看到不同视角的3D图像信息。光栅像素中的光栅频率和角度,由照明光的入射角、衍射光线的出射角以及衍射波长共同确定,根据光栅方程其关系满足如下条件:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\cos \alpha_d - \cos \alpha_i}{\cos \beta_d - \cos \beta_i}\right), \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{\sqrt{(\cos \alpha_d - \cos \alpha_i)^2 + (\cos \beta_d - \cos \beta_i)^2}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 $\alpha_i, \beta_i$ 分别为照明光线的方向余弦角, $\alpha_d, \beta_d$ 分别为衍射光线的方向余弦角, $\lambda$ 为衍射波长。照明光线的方向余弦根据观察条件设定。衍射光线的方向余弦可由光栅像素与观察区域的相对位置计算得到:

$$\cos \alpha_d = \frac{x' - x}{\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z^2}}, \quad (3)$$

$$\cos \beta_d = \frac{y' - y}{\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z^2}}. \quad (4)$$

由(1)~(4)式可知,大视角真彩色3D图像中光栅像素的频率和角度将随着像素坐标的相对位置发生变化。因此,要实现大视角真彩色3D图像的打印输出必须解决光栅频率和角度连续调制输出问题。

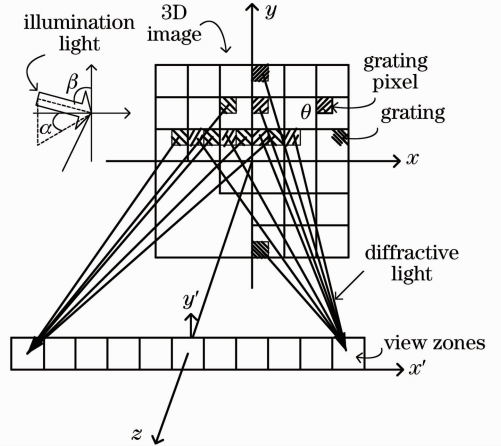


图1 3D图像结构参数示意图

Fig. 1 Structure and parameters of 3D image

### 2.2 连续变频实现原理

为实现光栅频率和角度的连续调制输出,提出了一种基于4f成像系统和衍射光栅的光学系统,其结构如图2所示,包括焦距为 $f_1$ 的第一傅里叶变换透镜与焦距为 $f_2$ 的第二傅里叶变换透镜构成的4f光学系统和位于第一傅里叶变换透镜与第一傅里叶变换透镜后焦距之间的衍射光栅。衍射光栅可以沿着光轴移动,也可以绕着光轴转动。通过调节衍射光栅与第一傅里叶变换透镜之间的距离 $d_0$ 可实现光栅频率的连续调制,通过衍射光栅的转动可实现光栅角度的连续调制。

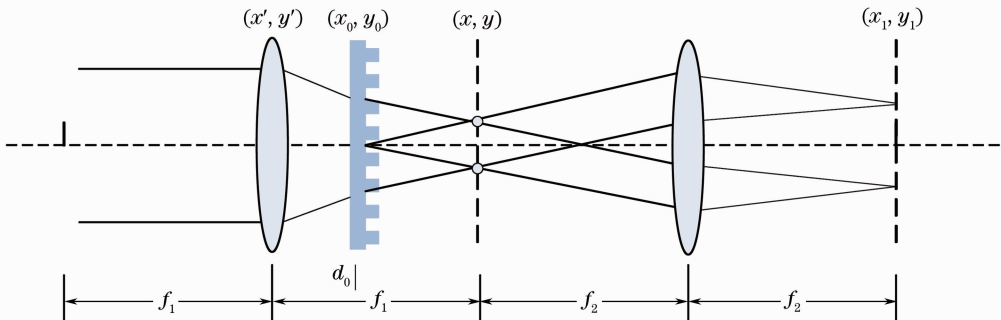


图2 连续变频光学系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle of optical system to realize consecutive spatial frequency modulation

设单位强度的平行光入射到上述系统,第一傅里叶变换透镜的后焦面 $(x, y)$ 上的光场分布为

$$U(x, y) = c' \exp\left[jk \frac{x^2 + y^2}{2(f_1 - d_0)}\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t(x_0, y_0) \exp\left(-jk \frac{xx_0 + yy_0}{f_1 - d_0}\right) dx_0 dy_0, \quad (5)$$

式中 $t(x_0, y_0)$ 为衍射光栅的透射率函数。第二傅里叶变换透镜后焦面上的光场分布为

$$U(x_1, y_1) = c'' \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(x, y) \exp\left(-jk \frac{xx_1 + yy_1}{f_2}\right) dx dy. \quad (6)$$

当 $t(x_0, y_0) = \cos(2\pi ax_0)$ 时,

$$U(x_1, y_1) = c''' \exp[j\pi\lambda a^2(f_1 - d_0)] \cos\left[j2\pi \frac{a(f_1 - d_0)}{f_2} x_1\right], \quad (7)$$

式中 $\exp[j\pi\lambda a^2(f_1 - d_0)]$ 为常数相位因子,最终在第二傅里叶变换透镜的后焦面上的光场强度分布为

$$U(x_1, y_1) = A \cos\left[j2\pi \frac{a(f_1 - d_0)}{f_2} x_1\right]. \quad (8)$$

$U(x_1, y_1)$ 同样是余弦分布函数,其频率是参数 $d_0$ 的线性函数, $c', c'', c''', A$ 为常数,可知通过调节参数 $d_0$ 可实现光栅频率的线性连续调制。

## 3 实验

### 3.1 基于连续变频技术的3D激光打印系统

为证明上述方法的有效性,利用连续变频技术设计了一套3D激光打印系统,其结构示意图如图3所示,激光器发出的激光经空间滤波器扩束准直后形成平行光进入由第一傅里叶变换透镜、衍射光栅

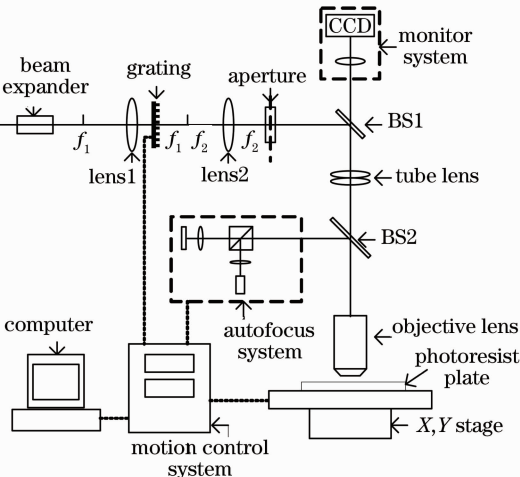


图3 3D激光打印系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of 3D laser printing system

和第二傅里叶变换透镜构成的光栅空频和角度连续调制光路,在第二傅里叶变换透镜后的区域形成指定空频和取向的光栅条纹信息,在第二傅里叶变换透镜后焦面上设置有视场光阑用于限制干涉条纹的成像区域,透过视场光阑的光栅条纹经过半透半反镜(BS)、镜面透镜和微缩物镜在感光材料上形成高频光栅条纹。运动控制器在计算机设定的程序控制下协调激光器快门的脉冲时序、衍射光栅的移动和转动以及精密平移台的二维移动,在感光材料上记录4参量 $(x, y, \lambda, \theta)$ 调制的3D彩色图像信息。实时检测光路对感光材料表面成像用于实时观测记录过程。自动聚焦光束监控并实时调整聚焦物镜与感光材料表面的距离,保证高频光栅条纹在感光材料表面精确成像。

图4为基于连续变频技术的3D激光打印系统实物照片。系统所用激光波长为351 nm,光栅频率调节范围 $0 \sim 3000$  line/mm,可覆盖大视角(大于 $90^\circ$ )真彩色3D图像所需的所有频率范围,光栅转角调节范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ,打印幅面为 $15 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。



图4 3D激光打印系统实物图

Fig. 4 Photography of 3D laser printing system

### 3.2 3D图像的激光打印输出实验

菲涅耳透镜结构的空频率从透镜中心到边缘逐步增大,为验证系统的有效性,首先设计了一个菲涅耳透镜结构进行打印输出。理想的菲涅耳透镜结构的空频率随着坐标位置连续变化,实际打印过程中需要进行分区域采样,设定每个采样区域中的空频率为定值,当采样频率足够高时可逼近理想的菲涅耳透镜的效果。设计菲涅耳透镜的口径为5 cm,焦距为5 cm,其频率变化范围是 $3 \sim 1025$  line/mm。图5(a)为利用图4所示的3D激光打印系统输出的菲涅耳透镜结构的显微照片,图中所示光栅结构的空频和取向随着采样区域逐步变化。图5(b)为在光刻胶板上的菲涅耳透镜结构的宏观显示效果。

在此基础上利用自行设计的软件将计算机 3D 模型转化为 3D 图像,然后利用图 4 所示系统对图像进行了打印输出。图 6 显示的是在白光照明下老虎

模型的真彩色 3D 图像的显示效果,获得很好的立体效果和颜色表现。通过上述实验初步证明了 3D 激光打印方法与系统的有效性。

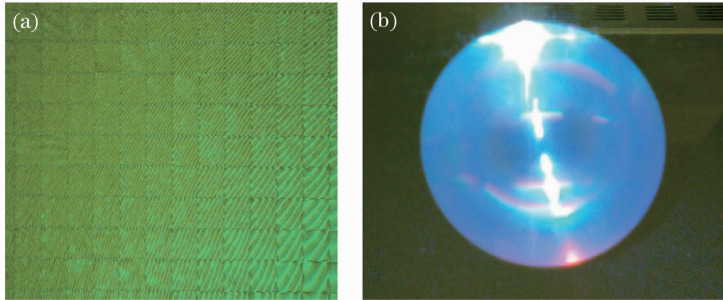


图 5 3D 激光打印系统输出的菲涅耳透镜。(a) 变频光栅结构显微照片; (b) 菲涅耳透镜的宏观显示效果  
Fig. 5 Fresnel lens outputed by 3D laser printing system. (a) Microscope image of grating structure; (b) display results of the fabricated Fresnel lens



图 6 3D 激光打印系统输出的老虎模型 3D 图像的显示效果  
Fig. 6 3D image of tiger model outputed by 3D laser printing system

## 4 结 论

提出了一种基于连续变频技术的 3D 激光打印方法与系统,利用简单的  $4f$  系统与衍射光栅组合实现了光栅频率和角度的连续调制输出。对 3D 图像特性与变频机构原理进行了详细分析,设计并搭建了一套 3D 激光打印系统可实现  $15\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  幅面的大视角彩色 3D 图像的打印输出。实验证明了系统的有效性。

## 参 考 文 献

- 1 M A Klug, A Klein, W Plesniak, *et al.*, Optics for full-parallax holographic stereograms[C]. SPIE, 1997, 3011: 78-88.
- 2 M Yamaguchi, H Higuchi, R Kojima, *et al.*. Evaluation of light-ray reproducibility in full-parallax holographic stereogram[C]. Digital Holography and Three Dimensional Imaging, DTuA4.
- 3 S Maruyama, Y Ono, M Yamaguchi. High-density recording of full-color full-parallax holographic stereogram[C]. SPIE, 2008, 6912: 69120N.
- 4 S Tay, P-A Blanche, R Voorakaranam, *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display [J]. Nature, 2008, 451

- (7179); 694-698.
- 5 P A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.
- 6 ZEBRA IMAGING. What is a 3D Holographic Print? [OL]. <http://www.zebraimaging.com/>. [2013-12-03].
- 7 Zheng Huadong, Sun Guodong, Yu Yingjie. A review of holographic printing technologies[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110002.
- 郑华东, 孙国栋, 于瀛洁. 全息打印技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110002.
- 8 Yang Xin, Li Yong, Wang Hui, *et al.*. Reconstruction of computer generated true color rainbow holograms by filtering in frequency domain[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0809001.
- 杨鑫, 李勇, 王辉, 等. 基于频域滤波的计算机制真彩色彩虹全息图模拟再现[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0809001.
- 9 Y T Li, T J Wang, S N Yang, *et al.*. Theoretical and experimental study of dot matrix hologram[C]. SPIE, 1998, 3559: 121-129.
- 10 Frank S Davis. Holographic Image Conversion Method for Making a Controlled Holographic Grating[P]. US Patent: US 5262879 A. [1993-11-16].
- 11 Frank S Davis. System for Making a Hologram of an Image by Manipulating Object Beam Characteristics to Reflect Image Data [P]. US Patent: US 5822092 A. [1998-10-13].
- 12 C K Lee, Jeffrey C T Hsieh, Jeremy W J Wu, *et al.*. Optical design and implementation of a variable pitch dot matrix writer [C]. SPIE, 1999, 3637: 119-129.
- 13 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Shen Yan, *et al.*. Design of laser direct writing system with changeable double or single beam optical head[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 487-491.
- 陈林森, 解剑峰, 沈雁, 等. 双、单光束互换光学头方光斑激光直写系统设计[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 487-491.
- 14 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Shen Yan, *et al.*. Fabrication of 3D image laser printing system with SLM[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(5): 367-370.
- 陈林森, 解剑峰, 沈雁, 等. 基于 SLM 的三维图像激光光刻系统的研制[J]. 激光与红外, 2003, 33(5): 367-370.
- 15 陈林森, 楼益民, 浦东林, 等. 三维激光打印方法与系统[P]. 中国发明专利: 201310166341.1. [2013-08-14].
- 16 陈林森, 魏国军, 沈雁, 等. 衍射光变图像高速激光直写方法和系统[P]. 中国发明专利: ZL 200510095775.2. [2008-02-27].