

文章编号: 0253-2239(2006)01-0049-5

# 菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通成像研究\*

孙 萍<sup>1</sup> 谢敬辉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京师范大学物理系北京市重点实验室, 北京 100875)  
(<sup>2</sup> 北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

**摘要:** 提出了菲涅耳波带板(FZP)无运动卷积偏振选通全息术,该技术的原理与菲涅耳波带板扫描全息术相同,但在成像系统结构上作了重大改进,改进内容主要有两个方面:第一,使用扩展光源,用多个菲涅耳波带板在物体上的投影叠加形成卷积运算来取代机械扫描,克服了扫描造成的系统不稳定性和限制实际应用的耗时问题;第二,用 CCD 取代光电倍增管,使物体上所有的点都同时成像在 CCD 靶面上,达到实时采集整个全息图的目的。对线偏振光和圆偏振光经过散射介质脂肪乳剂(Intralipid)溶液后偏振度的变化规律进行了实验研究,研究表明,在米氏散射区,圆偏振光比线偏振光更容易保持偏振态。应用菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通成像系统,采用圆偏振光作为入射光,对埋在浓度为 1%、深度为 2 cm 的脂肪乳剂溶液中的金属丝(直径 0.4 mm)进行了成像实验,结果表明,菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术原理是可行的。

**关键词:** 信息光学; 高散射介质成像; 无运动卷积; 偏振选通

中图分类号: R318.51 文献标识码: A

## Study on Polarization-Based Holography of Fresnel Zone Plate Convolution without Motion

Sun Ping<sup>1</sup> Xie Jinghui<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing Area Major Laboratory, Beijing 100875)  
(<sup>2</sup> School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** The polarization-based holography of Fresnel zone plate (FZP) convolution without motion is proposed. Its principle is the same as that of the FZP scanning holography. But its configuration is modified significantly. First, the uniformly distributed source is used to form the superposition of the FZP projects on the object so as to realize the convolution operation. Thus the time-consuming problem and the instability of the system due to the mechanical scanning are resolved. Furthermore, the imaging system is more stable than before. Secondly, the CCD camera is used to replace the photomultiplier tube to collect the whole hologram in real time. The degree of polarization is investigated experimentally when the linearly and circularly polarized light propagate respectively through the scattering media of intralipid. The results demonstrate that the polarization of the circularly polarized light is maintained better than that of the linearly polarized light. By using of the imaging system of the polarization-based holography of FZP convolution without motion, the experiments on a metal wire with a diameter of 0.4 mm embedded in the intralipid solution with concentration of 1% (volume fraction) and depth of 2 cm are implemented. The experimental results testify the principle of polarization-based holography of FZP convolution without motion is feasible.

**Key words:** information optics; imaging through highly scattering media; convolution without motion; polarization gating

## 1 引 言

为了去掉漫射光给生物组织的再现像所带来的

背景噪音,人们采用了各种选通技术,如时间选通<sup>[1]</sup>、空间选通<sup>[2]</sup>、相干选通<sup>[3]</sup>、电子全息选通<sup>[4]</sup>、偏

\* 北京理工大学自然科学基金(BIT\_UBF\_200301F06)资助课题。

作者简介: 孙 萍(1963~),女,长春市人,高级工程师,博士。主要从事信息光学、薄膜光学、半导体纳米材料的光学性质的研究。E-mail: pingsun@bnu.edu.cn

收稿日期: 2005-02-28; 收到修改稿日期: 2005-05-11

振选通<sup>[5]</sup>等等。其中,偏振选通是近年来发展较快的一种选通技术,它基于这样一个事实:弹道光 and 蛇形光经过散射介质后保持原入射光的偏振态,漫射光由于传播方向随机变化,使得经过散射介质后的出射光退偏。因此,使入射光为偏振光,当光经过散射介质后,再将该偏振光检测出来,被检测出来的光便携带了物体的内部结构信息<sup>[6]</sup>。菲涅耳波带板(FZP)扫描全息术是一种新的成像技术,该技术可以对嵌埋在高散射介质中的吸收体成像,在生物医学成像领域具有潜在的应用前景<sup>[7~11]</sup>。菲涅耳波带板扫描全息术的全息图是菲涅耳波带板的透过率函数与物体的透过率函数的卷积,卷积通过机械扫描方式来实现。本文基于 Goodman<sup>[12]</sup>的无运动卷积原理,提出菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术,从根本上解决了菲涅耳波带板扫描全息术由于机械扫描所带来的耗时问题,并结合偏振选通技术来提高物体全息图再现像的衬比度和信噪比。然后,通过对偏振度的实验研究,确定入射光为圆偏振

光。最后,进行了成像实验,验证菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术原理的可行性。

## 2 原 理

菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术与菲涅耳波带板扫描全息术的原理相同,也分为扫描全息图的获得和全息图的再现两个过程<sup>[9]</sup>。但是,在菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术中,扫描全息图无需机械扫描便可以获得,其原理叙述如下:

在图 1 中,S 为亮度均匀的非相干扩展光源,放在透镜  $L_1$  的前焦面上。光强透过率分布函数为  $f_1(-x, -y)$  的菲涅耳波带板编码孔径紧贴在透镜  $L_1$  之后。在离菲涅耳波带板的距离为  $d$  处,并且紧贴在透镜  $L_2$  的前面放置光强透过率分布函数为  $f_2(x, y)$  的物体 OB。在  $L_2$  的后焦面 P 上用 CCD 接收透过 P 的强度分布。S 与 P 为物像共轭面,假设  $L_1$  与  $L_2$  的焦距相等(都为  $f$ ),则系统的横向放大率为  $-1$ 。

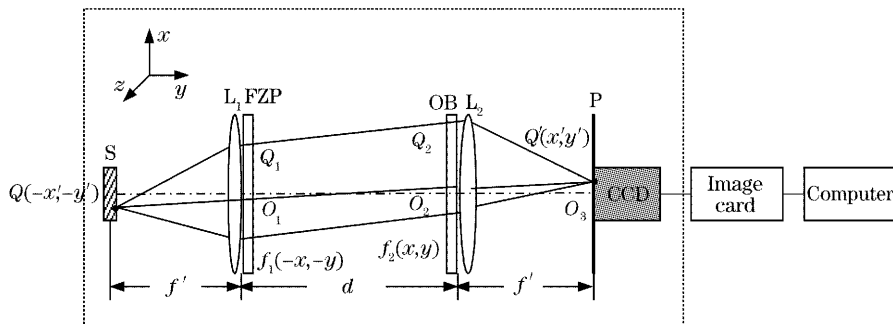


图 1 菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of holography of Fresnel zone plate convolution without motion

在 S 上任取一点  $Q(-x', -y')$ ,它在 P 上的共轭点记为  $Q'$ ,则  $Q'$  的坐标与 Q 点的坐标值大小相等,符号相反,表示为  $Q'(x', y')$ 。由 S 发出的光经  $L_1$  后变成平行光照明物体,照明光的强度分布正比于  $f_1\left(-x + \frac{d}{f}x', -y + \frac{d}{f}y'\right)$ 。通过物体后,这些平行光线再聚焦到 CCD 的  $Q'(x', y')$  点上,CCD 上的强度分布为

$$I(x', y') = k \iint_{-\infty}^{\infty} f_1\left(\frac{d}{f}x' - x, \frac{d}{f}y' - y\right) f_2(x, y) dx dy, \quad (1)$$

其中  $k$  为光电转换系数。上式是  $f_1$  和  $f_2$  的卷积,可以写成如下简单形式:

$$I(x', y') = k f_1\left(\frac{d}{f}x', \frac{d}{f}y'\right) * f_1(x', y'), \quad (2)$$

其中符号  $*$  表示卷积运算。图 1 中虚线框内完成扫描全息图的记录过程。

全息图的再现过程采用数字相关解卷积的方法:CCD 将接收到的光电信号经图像卡变换为数字信号输入到计算机中,数据以二维矩阵形式存放在计算机内存中。采用文献<sup>[9]</sup>的方法进行图像重建。

偏振选通技术的应用:在 S 与  $L_1$  之间放置一个线偏振光起偏器或者圆偏振光起偏器,使照射到物体上的光为线偏振光或者圆偏振光。再在  $L_2$  与 CCD 之间放置一个线偏振光检验器或者圆偏振光检验器,便可以将出射的偏振光部分检测出来。

## 3 实 验

### 3.1 线偏振度和圆偏振度的测量及比较

研究线偏振光和圆偏振光经过散射介质后的偏

振度,从而确定偏振选通所采用的偏振光形式。选取脂肪乳剂(Intralipid)溶液作为散射介质,改变其浓度和体积,分别测量入射线偏振光和圆偏振光的偏振度。

图 2 是测量偏振度的实验装置,光源为波长为 650 nm 的半导体激光器。选取如图所示的直角坐标系,起偏器 P 的主方向平行于  $x$  轴,玻璃样品池中注入脂肪乳剂溶液。样品池前后两个面透明,而其它四面均被涂黑。透镜 L 将光会聚在光电二极管 D 上,用激光功率计读取透过光强值。旋转检偏器 A,当 P 和 A 的主方向平行时,记为  $I_1$ ,此时,出射光是偏振光和 50% 的漫射光;当 P 和 A 的主方向垂直时,记为  $I_2$ ,此时,出射光只有 50% 的漫射光。作运算  $I_1 - I_2$  后消除漫射光成分,只剩下偏振光成分。线偏振度可由下列公式计算得到<sup>[13]</sup>:

$$P = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2}, \quad (3)$$

配制体积分数  $C = 0.1\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.5\%$ 、 $0.7\%$ 、 $0.9\%$ 、 $1\%$  的脂肪乳剂稀释溶液。样品池尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times d$ ,选取厚度  $d = 2 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm}$  四个值。测量结果如图 3 所示。

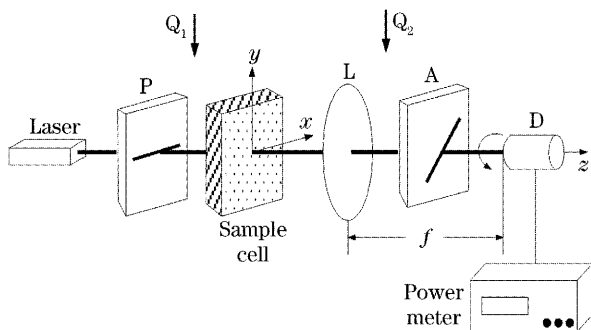


图 2 偏振度测量装置

Fig. 2 Measuring device of degree of polarization

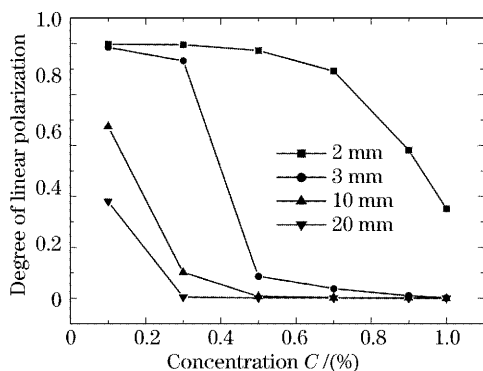


图 3 线偏振光测量结果

Fig. 3 Experimental results of linearly polarized light

当样品池中不注入溶液时,测量的线偏振度结果应为理想值 1,实际测量结果为 0.9987,接近于 1,因此,用图 2 所示的实验装置测量偏振度是可信的。

测量圆偏振度的实验装置只需在图 2 所示的装置中,分别在起偏器 P 后和检偏器 A 前各插入  $1/4$  波片  $Q_1$  和  $Q_2$ , $Q_1$  的快轴方向与  $x$  轴成  $45^\circ$  角。P 和  $Q_1$  构成右旋圆偏振光起偏器,A 和  $Q_2$  构成圆偏振光检验器。实验条件与测量方法与线偏振度时相同。圆偏振度仍用(3)式计算。测量结果如图 4 所示。当不放样品时,测量的圆偏振度结果为 0.9982,接近于理想值 1。

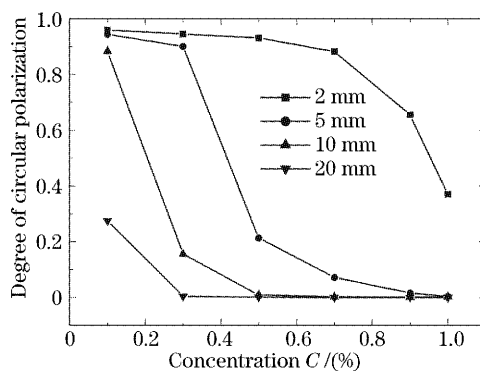


图 4 圆偏振光测量结果

Fig. 4 Experimental results of circularly polarized light

对比图 3 和图 4 可见,二者实验结果规律相同:当脂肪乳剂溶液的浓度增加时,线偏振度减小;当脂肪乳剂溶液的厚度(体积)增加时,线偏振度也减小。这是因为当脂肪乳剂溶液的浓度增加时,漫射光成分增加,总光强保持不变,因此,弹道光 and 蛇行光成分相对减少,所以线偏振度减小。当浓度一定,而脂肪乳剂溶液的厚度增加时,光发生多次漫射的几率增加,也就是漫射光成分增加,因此线偏振度也会减小。若比较同一厚度样品池测量的结果,可以发现,在溶液浓度较低时,圆偏振度和线偏振度差别不大,但在溶液浓度较高时,圆偏振度比线偏振度要高。图 5 是对浓度为 0.9% 的脂肪乳剂溶液测试的结果进行拟合,得到的偏振度与样品池厚度的关系曲线,为明显起见,其中纵坐标取对数坐标。在图 5 中取偏振度为 0.001 时,线偏振光对应的厚度为 15.5 mm,而圆偏振光对应的厚度为 18 mm,显然,圆偏振光的穿透深度大于线偏振光的穿透深度。本文用高倍生物显微镜对脂肪乳剂溶液的颗粒度进行了测量,结果为  $3 \mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。因此,可以判断,当光在脂肪乳剂溶液中传播时会发生米氏散射<sup>[5]</sup>。

通过对偏振度测量结果进行分析,可以得到如

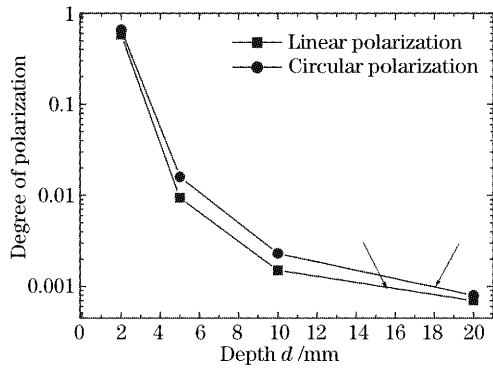


图 5 偏振度与穿透深度的关系

Fig. 5 Relationship between degree of polarization and depth  
 下重要结论:在米氏散射区圆偏振光比线偏振光更容易保持偏振态。对于成像来说,用圆偏振光作为入射光,将会得到更大的穿透深度。这一实验结果与 Sankaran<sup>[6]</sup>的实验结果是一致的。

### 3.2 成像实验

实验装置如图 6 所示。半导体激光器(35 mW)发出 650 nm 的激光束,用直径为  $D$  的圆形光阑限制光束的发散角。紧挨着光阑放置一毛玻璃,这样便形成了一个直径为  $D$  的均匀扩展光源。毛玻璃被电机带动绕光轴旋转。人为地使毛玻璃旋转,目的是为了破坏照射激光束的空间相干性,从而起到消除散斑的作用。光阑放在透镜  $L_2$  的前焦点上。将一个线偏振器  $P$  和一个  $1/4$  波片  $Q_1$  插在毛玻璃和  $L_2$  之间,构成右旋圆偏振光起偏器。紧贴着  $L_2$  的后表面放置液晶空间光调制器(SLM),用计算机  $PC_1$  控制分别输出  $\sin$ -模式和  $\cos$ -模式菲涅耳波带板图形。在距离  $L_2$  的位置  $d$  处放一玻璃容器,容器尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,容器内注入体积分数为 1% 的脂肪乳剂溶液,在容器的后壁上悬挂一个用直径为 0.4 mm 的铁丝制作的“8”字形物体,“8”字上下两个圆环的直径为 3 mm,用其作为成像的吸收体。紧贴容器后壁放置透镜  $L_3$ ,其焦距

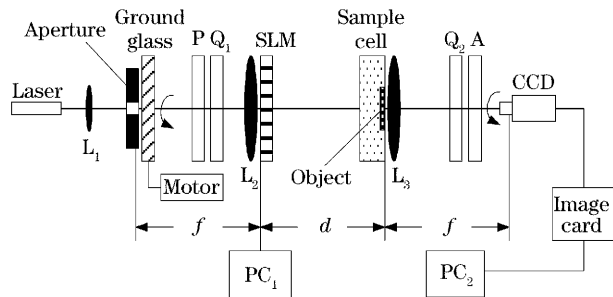


图 6 菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通成像系统

Fig. 6 Imaging system of polarization-based holography of Fresnel zone plate convolution without motion

与透镜  $L_2$  相同。再将一个线偏振器  $A$  和一个  $1/4$  波片  $Q_2$  放在  $L_3$  后面,作为圆偏振光检验器。在  $L_3$  的焦平面处用 CCD 摄像头分别拍摄  $\sin$ -模式和  $\cos$ -模式全息图,在计算机中数字构造复合全息图,然后对其相关解码得到重建图像。实验具体方法是:旋转检偏器  $A$ ,当光强最大时,分别记录下  $\sin$ -模式和  $\cos$ -模式全息图  $H_{s1}$ 、 $H_{c1}$ ;再旋转检偏器  $A$ ,当光强最小时,分别记录下  $\sin$ -模式和  $\cos$ -模式的漫射光噪音  $H_{s2}$ 、 $H_{c2}$ ;将  $H_{s1}$ 、 $H_{c1}$  和  $H_{s2}$ 、 $H_{c2}$  分别输入计算机中,作运算  $H_{s1}-H_{s2}$ 、 $H_{c1}-H_{c2}$ ;用复合全息图方法<sup>[7]</sup>数字重建图像。

图 7 是得到的“8”字形物体的再现像,与文献[9]相比,二者实验条件相似,所得到的重建图像质量也相差不多,但是,图 7 的结果是实时得到的,体现了菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术的优势。

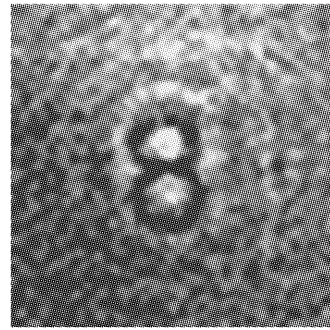


图 7 嵌埋在脂肪乳剂溶液中的金属丝的重建图像

Fig. 7 Reconstruction of the metal wire embedded in intralipid

## 4 结 论

菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术的原理与菲涅耳波带板扫描全息术的原理相同,但是在成像系统的结构上有很大的差异。菲涅耳波带板无运动卷积成像系统使用均匀扩展光源,使得从光源不同位置发出的光束经过菲涅耳波带板编码孔径后在物体上形成多个菲涅耳波带板投影的叠加,这相当于用菲涅耳波带板对物体作机械扫描。另外,采用 CCD 后物体上所有的点都同时成像在 CCD 靶面上,系统可以实时采集物体的全息图,这降低了对于成像系统的稳定性要求,离实际应用更近了一步。嵌埋在体积分数为 1%、深度为 2 cm 的脂肪乳剂散射溶液中的金属丝(直径为 0.4 mm)成像实验表明,菲涅耳波带板无运动卷积偏振选通全息术的原理是可行的,而且该技术具有较高的横向分辨力。

## 参 考 文 献

- 1 K. M. Yoo, R. R. Alfano. Timed-resolved coherent and incoherent components of forward light scattering in random media[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6): 320~322
- 2 A. Kuditcher, B. G. Hoover, M. P. Hehlen *et al.*. Ultrafast cross-correlated harmonic imaging through scattering media[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 45~51
- 3 G. Indebetouw, P. Klysubun. Imaging through scattering media with depth resolution by use of low-coherence gating in spatiotemporal digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 212~214
- 4 E. N. Leith, W. C. Chien, K. D. Mills *et al.*. Optical sectioning by holographic coherence imaging: a generalized analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2003, **20**(2): 380~387
- 5 V. Sankaran, J. T. Walsh, D. J. Maitland Polarized light propagation in biologic tissue and tissue phantoms [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4001**: 54~62
- 6 J. M. Schmitt, A. H. Gandjbakhche, R. F. Bonner. Use of polarized light to discriminate short-path photons in a multiply scattering medium[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(30): 6535~6546
- 7 Ping Sun, Jinghui Xie. Method for reduction background artifacts of images in scanning holography with a Fresnel-zone-plate coded aperture[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4214~4218
- 8 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 110~114 (in Chinese)  
孙 萍,谢敬辉,周元林. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 110~114
- 9 Sun Ping, Xie Jinghui, Gao Yan *et al.*. Imaging through highly scattering media using Fresnel zone plate scanning holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 619~622 (in Chinese)  
孙 萍,谢敬辉,高 艳等. 透过高散射介质菲涅耳波带板扫描全息术成像研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 619~622
- 10 Sun Ping, Xie Jinghui, Jiang Yurong *et al.*. Twin-image noise and its elimination in optical scanning holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 340~343 (in Chinese)  
孙 萍,谢敬辉,蒋玉蓉等. 光学扫描全息术中的孪生像噪声及消除[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 340~343
- 11 Sun Ping, Xie Jinghui, Jiang Yurong *et al.*. Relationship between the fringe number of the Frsnel zone plate and the twin-image noise[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(Suppl.): 71~73 (in Chinese)  
孙 萍,谢敬辉,蒋玉蓉等. 菲涅耳波带板的环数与孪生像噪声的关系[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊): 71~73
- 12 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. San Francisco: McGraw-Hill, 1968. 162~163
- 13 V. Sankaran, K. Schonenberger, J. T. Walsh *et al.*. Polarization discrimination coherently propagating light in turbid media[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4252~4261
- 14 Sun Ping. Study on imaging through highly scattering media using Fresnel aone plate scanning holography [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. 74~84 (in Chinese)  
孙 萍. 透过高散射介质菲涅耳波带板扫描全息术成像研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2004. 74~84