

· 光电探测 ·

一种基于光斑操控的光束轴向扫描新方法

马国利, 尹学爱, 郭洪岩, 陈庆东

(滨州学院 光电工程系, 山东 滨州 256603)

摘要: 光束的轴向扫描在光学三维成像、光学材料制造等领域中具有十分广泛的应用。然而, 现有的光束轴向扫描方法均存在着各自的不足, 或是扫描速度过慢, 或是扫描范围有限, 又或是会影响生物样品的活性。文中基于光斑操控理论, 通过对照明光束进行相位编码, 改变相应的聚焦光斑轴向位置, 实现光束的轴向扫描。通过模拟计算, 验证了方法的可行性。模拟结果表明, 本扫描方法具有较好的线性度, 线性拟合因子 $R^2=0.993\ 9$ 。由于该方法不涉及机械移动, 因此具有扫描精度高, 对生物样品影响小等优点, 有潜力在相关科研领域得到很好的应用。

关键词: 轴向扫描; 光斑操控; 相位编码

中图分类号: 0439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0008-03

Beam Axial Scanning New Method Based on Focal Spot Manipulation

MA Guo-li, YIN Xue-ai, GUO Hong-yan, CHEN Qing-dong

(Department of Optoelectronic Engineering, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: Beam axial scanning has been widely applied in the fields of three-dimensional optical imaging and optical material production. However, the existing beam axial scanning methods all have their own drawbacks such as low scanning speed, limited scanning range and damage on the activity of biological samples. Based on focal spot manipulation theory and through performing illumination beam phase encoding, the relative axial position of the focal spot is changed to realize beam axial scanning. The feasibility of the method is verified through simulation calculation. Simulation results show that the scanning method has better linearity and linear fitting factor R_2 is 0.993 9. Without mechanical movement, the method has high scanning accuracy, little influence on biological samples, and has potential ability to be well applied in the area of related scientific researches.

Key words: axial scanning; focal spot manipulation; phase encoding

一些精密光机电装置中需要使用精密变焦光学镜头。光束的轴向扫描是指通过使得照明光束聚焦在样品的不同深度位置来对样品的相应位置进行作用。这种技术在光学三维成像^[1-2]、光学材料制造^[3-4]等领域中具有非常广泛的应用, 由此在科学研究中具有十分重要的意义。

传统的光束轴向扫描是通过对样品或物镜进行机械移动来实现的。常用的机械移动工具有纳米平移台^[5-6]、扫描转盘^[7]等。然而, 受限于机械惯性, 这种

方式的扫描速度较慢^[8]。同时, 还可能会导致样品的横向漂移, 影响测量精度^[9]。此外, 在对生物样品, 特别是活体的样品进行成像时, 机械移动导致样品产生的振动会对生物的活性造成影响^[10]。因此, 有必要发展一种新型的非机械式的光学轴向扫描方法。

近年来, 几种新型轴向扫描方法被提出, 包括液体变焦透镜^[9-11]、可变声致折射率梯度透镜^[12-13]、电光效应变焦透镜^[14]等。这些方法均已被验证, 可以实现光束的轴向扫描, 但是仍然存在各自的不足。其

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 滨州市科学技术发展计划(2013ZC0401); 滨州学院科研基金项目(BZXYG1303); 滨州学院科研基金项目(BZXYL1107)

作者简介: 马国利(1974-), 男, 山东惠民人, 硕士, 副教授, 主要研究领域是激光技术、光电检测等方面。

中,液体变焦透镜的焦距改变总是伴随着液体的机械位移,因此目前焦距切换速度仍然较慢,限制了其在快速轴向扫描中的应用;可变声致折射率梯度透镜的轴向扫描范围较为有限;而电光效应变焦透镜的通光口径较小,限制了光束在轴向快速扫描时的可分辨点数和扫描范围。

基于光斑操控理论,提出一种新型的光束轴向扫描方法。通过对照射光束进行相位编码,从而改变光束的轴向聚焦位置。这种方法不涉及机械移动,可以在高精度、无损的情况下实现对于样品的轴向扫描。文中将详细介绍这种方法的机理,并给出相应的模拟计算结果。

1 方法及装置

新型光束轴向扫描方法所用装置如图1所示。准直的照明光束入射到空间光调制器(SLM)上接收相位调制,经相位调制后的光束经过显微物镜(objective lens)聚焦之后投射到样品上,与样品进行相互作用。空间光调制器(SLM)的相位调制函数实时切换,控制照明光束聚焦点轴向位置的改变,实现对于样品的轴向扫描。

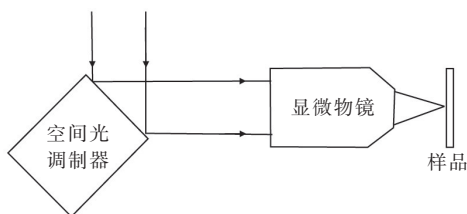


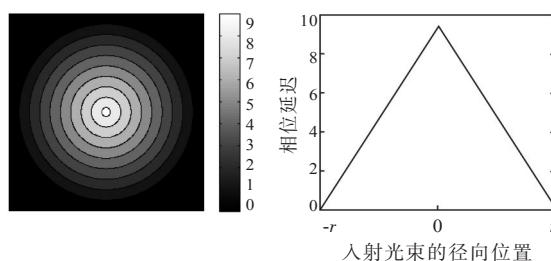
图1 新型光束轴向扫描方法所用装置示意图

文中方法中所用空间光调制器(SLM)的相位调制函数如式(1)所示

$$f(\rho, \varphi) = \phi \times (1 - \rho/r) \quad (1)$$

其中, ρ 为入射光束截面上一点的径向位置; φ 为入射光束截面上一点的位置矢量与 x 轴的夹角; ϕ 为相位延迟因子,代表了相位调制函数的极值大小; r 为入射光束的半径大小。图2所示为当 ϕ 取值为 3π 时,相位调制函数的等高线图以及径向剖面图。

通过改变 ϕ 的大小,调整空间光调制器的相位函数分布,可以改变调制后光束聚焦点的轴向位置,实现轴向扫描。



(a) 相位调制函数的等高线图

(b) 径向剖面图

图2 当 ϕ 取值为 3π 时,相位调制函数的等高线图及径向剖面图

2 模拟及结果

新型光束轴向扫描方法的轴向扫描效果可以通过 Debye 积分计算来进行模拟。根据 Debye 积分,矢量光束在高数值孔径聚焦下的光场分布如式(2)所示^[15]

$$E(r_2, \varphi_2, z_2) = iC \iint \sin \theta \cdot A_1(\theta, \varphi) \cdot A_2(\theta, \varphi) \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \cdot \exp[i f(\theta, \varphi)] \cdot \exp[ikn(z_2 \cos \theta + r_2 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_2))] d\theta d\varphi \quad (2)$$

其中, $E(r_2, \varphi_2, z_2)$ 为以显微物镜理想焦点为原点的球坐标系中一点的光矢量; $A_1(\theta, \varphi)$ 为入射光束的振幅分布; θ 为光束截面上一点对应的孔径角; φ 为光束截面上一点的位置矢量与 x 轴的夹角; $A_2(\theta, \varphi)$ 代表了显微物镜的像差函数; $f(\theta, \varphi)$ 为入射光束受到的相位调制函数; $\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ 则代表了入射光束的偏振情况。

具体的,显微物镜的像差函数 $A_2(\theta, \varphi)$ 又可以表示为^[16]

$$\text{球差: } A_2(\theta, \varphi) = \exp[ikA_s \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right)^4] \quad (3)$$

$$\text{慧差: } A_2(\theta, \varphi) = \exp[ikA_c \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right)^3 \cos \varphi] \quad (4)$$

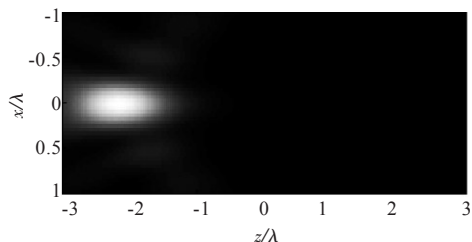
$$\text{像散: } A_2(\theta, \varphi) = \exp[ikA_a \left(\frac{\sin \theta}{\sin \alpha}\right)^2 \cos^2 \varphi] \quad (5)$$

其中,各像差因子 A_s 、 A_c 、 A_a 均以入射波长为单位。

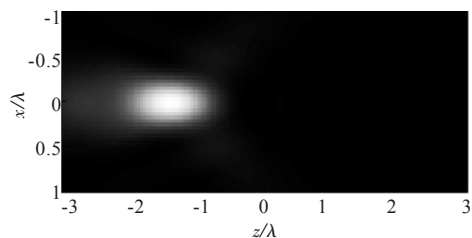
为了简便起见,在模拟时考虑采用的是一个数值孔径 $NA=1.4$ 的理想浸油显微物镜,各像差因子 A_s 、 A_c 、 A_a 的值均为 0。

分别设置相位延迟因子 ϕ 的值为 -5π 、 -4π 、 -3π 、 -2π 、 0 、 2π 、 3π 、 4π 和 5π ,通过 Matlab 编程,计算得到了相应

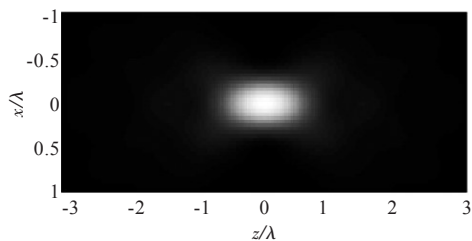
的光束聚焦点的轴向位置。图3所示为 ϕ 的值分别等于 -5π 、 -3π 、 0 、 3π 和 5π 时聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图,所述 XZ 平面的坐标原点为显微物镜的理想焦点。



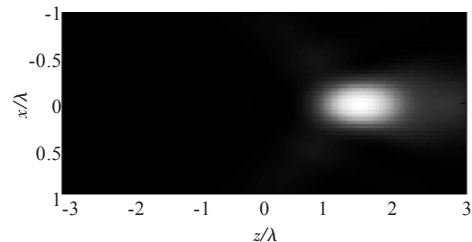
(a) $\phi = -5\pi$ 时,聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图



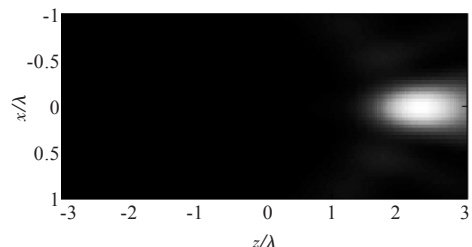
(b) $\phi = -3\pi$ 时,聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图



(c) $\phi = 0$ 时,聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图



(d) $\phi = 3\pi$ 时,聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图



(e) $\phi = 5\pi$ 时,聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图

图3 当相位延迟因子 ϕ 的值分别为 -5π 、 -3π 、 0 、 3π 和 5π 时的聚焦光斑在 XZ 平面上的强度分布图

从图3所示结果可以看出,当相位延迟因子 ϕ 的值发生改变时,相应聚焦光斑的轴向位置将发生改变而横向位置不发生改变,从而证明了这种通过相位调制实现光斑操控,进而实现光束轴向扫描方法的可行性。

为了进一步对新型光束扫描方法的线性度进行评价,绘制了如图4所示的聚焦光斑轴向位置(Z_{COM})与相位延迟因子 ϕ 的对应关系散点图,并对这些散点进行了线性拟合。线性拟合的结果为

$$Z_{COM} = 0.4379\phi + 0.01727 \quad (6)$$

线性拟合的相关因子 $R2=0.9939$,由此反映出新型光束轴向扫描方法具有较好的线性度。

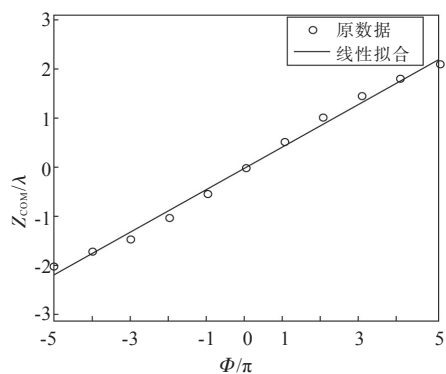


图4 Z_{COM} 与 ϕ 的对应关系散点图及相应的线性拟合结果

新型光束轴向扫描方法可以实现的扫描速度完全由所用空间光调制器的切换速度来决定。一般地,现有空间光调制器的切换频率可达 $60\sim 100$ Hz,由此保证了新型方法的扫描速度。此外,由于该扫描方法完全不涉及到机械移动,是一种纯光学的方法,因此具有精度高、对生物样品活性影响小等优点。

3 结 论

在细胞显微成像、光刻等应用领域中,传统的机械轴向扫描会带来样品微小振动或者光束的横向微小抖动。文中基于矢量光束操控理论,通过对照明光束进行相位编码改变其聚焦点的轴向位置,实现了一种无机械的光点轴向扫描新方法。通过理论分析及模拟仿真验证了这种方法的可行性,且具有良好的扫描线性度,有潜力在相关的科

(下转第88页)

- 分析[J].光子学报,2011,40(10):1459-1463.
- [6] 胡西多,罗诗裕,邵明珠.掺杂超晶格光学双稳态系统的混沌行为[J].半导体光电,2010,31(1):79-82.
- [7] 赵建利,王京,王慧.洛伦兹-哈肯激光混沌系统有限时间稳定主动控制方法研究[J].物理学报,2012,61(11):110209-9.
- [8] 李文琳,李淑凤.泵浦光强对激光相位共轭波非线性效应的影响[J].光学技术,2011,37(2):253-256.
- [9] 牛永迪,马文强,王荣.电光双稳态系统的混沌控制与同步[J].物理学报,2009,58(5):2934-5.
- [10] 丁灵,吴加贵,夏光琼,等.双光反馈半导体激光混沌系统中外腔延时反馈特征的抑制[J].物理学报,2011,60(1):01421-6.
- [11] Li C, Sun J C, Ren X D, et al. Parameter identification and synchronization between uncertain stimulated Raman scattering and NH_3 laser[J]. Optics Communications, 2012, 285(17):3665-3668.
- [12] 李文琳,李淑凤.激光相位共轭波信号同步传输的仿真研究[J].半导体光电,2012,33(2):280-282.
- [13] Gibbs H M, Hopf F A, Kaplan D L, et al. Observation of chaos in optical bistability[J]. Phys Rev Lett, 1981, 46(7):474-477.
- [14] Alpar O. Analysis of a new simple one dimensional chaotic map[J]. Nonlinear Dyn, 2014, 78(2):771-778.

(上接第10页)

研领域提供一种扫描的新思路,并将得到广泛的应用。

参考文献

- [1] LIU L, XIE H K. Three-dimensional confocal scanning microscope using an MEMS mirror for lateral scan and an MEMS lens scanner for depth scan [C]//2012 International Conference on Optical Mems and Nanophotonics (Omn), 2012:158-159.
- [2] Wildanger D, Medda R, Kastrop L, et al. A compact STED microscope providing 3D nanoscale resolution [J]. J Microsc-Oxford, 2009, 236(1):35-43.
- [3] Horiuchi T, Ishii H, Shinozaki Y, et al. Laser lithography using a half-vacuum support guide for fabricating micro-coils [J]. Microelectron Eng, 2011, 88(8):2567-2570.
- [4] Fischer J, Wegener M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit [J]. Laser Photonics Rev, 2013, 7(1):22-44.
- [5] Gould T J, Burke D, Bewersdorf J, et al. Adaptive optics enables 3D STED microscopy in aberrating specimens [J]. Opt Express, 2012, 20(19):20998-21009.
- [6] Vaishnavi V, Varghese L, Ali B M J. A stage-scanning laser confocal microscope and protocol for DNA methylation sequencing [J]. Journal of Biomedical Science and Engineering, 2010, 3(5):496-500.
- [7] 李明周,王昭,赵宏.点扫描激光共焦测量研究[J].工具技术,2003,37(6):39-41.
- [8] 杜睿.双光子轴向随机扫描方法研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [9] 张运波,侯文玫,郑继红.采用变焦液体透镜的共焦检测系统的设计与仿真[J].应用光学,2012,33(1):14-18.
- [10] 张瑞宇,刘立衡.灭菌牛乳中脂肪酶活性变化的研究[J].食品科学,2009,30(17):221-224.
- [11] Lopez C A, Hirs A H. Fast focusing using a pinned-contact oscillating liquid lens [J]. Nat Photonics, 2008, 2(10):610-613.
- [12] Olivier N, Mermillod-Blondin A, Arnold C B, et al. Two-photon microscopy with simultaneous standard and extended depth of field using a tunable acoustic gradient-index lens [J]. Opt Lett, 2009, 34(11):1684-1686.
- [13] Chang T M, Dupont G, Enoch S, et al. Enhanced control of light and sound trajectories with three-dimensional gradient index lenses [J]. New J Phys, 2012, 14:035011.
- [14] Krishnamurthi M, Ramirez M O, Denev S, et al. Two dimensional dynamic focusing of laser light by ferroelectric domain based electro-optic lenses [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(20):201106.
- [15] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems II structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1959, 253(1274):358-379.
- [16] Deng S, Liu L, Cheng Y, et al. Effects of primary aberrations on the fluorescence depletion patterns of STED microscopy [J]. Opt Express, 2010, 18(2):1657-1666.