

# 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵

梁言生 姚保利 马百恒 雷 铭 严绍辉 于湘华

中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

**摘要** 在经典 Gerchberg-Saxton(GS)算法的基础上,提出一种改进的快速三维 GS算法获取目标场的全息图(CGH)并用于全息光镊系统中,从理论和实验上充分证明了该算法的快速性和有效性。实验搭建了一套基于纯相位液晶空间光调制器(SLM)的全息光镊系统,实现了对酵母菌细胞和二氧化硅小球等微粒的多光阱、多平面三维稳定捕获和动态操纵。实验上还产生了具有强度梯度的线状光阱和光学涡旋光阱,实现了对微粒的运输和旋转操纵。这种可以对微粒实现多光阱、多平面动态三维操纵的全息光镊系统为生物、胶体物理等研究提供了一种新的微操纵工具。

**关键词** 全息; 光学捕获; 光镊; GS算法; 计算机产生全息图

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0309001

## Holographic Optical Trapping and Manipulation Based on Phase-only Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Liang Yansheng Yao Baoli Ma Baiheng Lei Ming Yan Shaohui Yu Xianghua

State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** An improved and rapid three dimensional Gerchberg-Saxton (GS) algorithm based on the classic GS algorithm for computer generated holograms is proposed and applied to holographic optical tweezers. Theoretical simulations and experimental results have demonstrated the rapidity and efficiency of the proposed algorithm. A robust holographic optical tweezers setup based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator(SLM) is built, and stable trapping and dynamic manipulation of yeast cells and silica beads with large array traps in three dimensions are demonstrated. Two special traps, i.e., line trap with intensity gradient distribution and optical vortex trap, are generated to transport and rotate micro-particles respectively. The system is verified to be robust on particles manipulations, which provides a new and powerful tool for researches on biology, colloid physics and so on.

**Key words** holography; optical trapping; optical tweezers; GS algorithms; computer-generated holograms

**OCIS codes** 350.4855; 090.1760; 140.3300

## 1 引 言

光镊技术<sup>[1]</sup>自1986年诞生以来,已逐渐成为生命科学和物理等微观研究领域不可或缺的工具。光镊技术通过聚焦激光光束捕获、操纵微粒,让人们更加深入、直观地了解微观世界。如今光镊技术已被广泛用于研究DNA分子的力学特性及其构象<sup>[2-3]</sup>、胶体微粒的物理性质<sup>[4]</sup>和微观流体的动力学性质<sup>[5]</sup>等。相比于传统光镊技术,如单光阱<sup>[1]</sup>、时分复用多光阱<sup>[6-7]</sup>等,通过衍射元件调制光束波前来产生目标光场的全息光镊(HOT)

收稿日期: 2015-08-18; 收到修改稿日期: 2015-09-14

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB921900)、国家自然科学基金(61275193)

作者简介: 梁言生(1987—),男,博士研究生,主要从事光学微操纵方面的研究。E-mail: liangyansheng@opt.cn

导师简介: 姚保利(1968—),男,博士,研究员,主要从事光学微操纵技术,超分辨显微成像技术和数字全息技术的开发与应用等方面的研究。E-mail: yaobl@opt.ac.cn(通信联系人)

技术具有无可比拟的灵活性。这种技术不仅可按照任意特定的图案同时捕获多个微粒,而且可独立操纵其中的每一个微粒,还可以产生特殊的光阱,如光涡旋<sup>[8]</sup>。其中最受关注并被广泛使用的是基于空间光调制器(SLM)的全息光镊技术,通过编程控制 SLM 上加载的计算机产生全息图(CGH),可实现目标光场的调制与微粒的操纵。

1998年,Dufresne等<sup>[9]</sup>利用一个固定衍射元件产生了大阵列光阱分布,标志着全息光镊技术的诞生。2002年,Curtis等<sup>[10]</sup>利用可编程控制的商用SLM产生了 $20 \times 20$ 的大阵列光阱分布。2003年,Eriksen等<sup>[11]</sup>利用全息光镊技术实现了对双折射粒子的旋转操纵。2004年,Josephh等<sup>[12]</sup>利用全息光镊成功捕获了碳纳米管簇。人们利用全息光镊技术还进行了微粒的运输<sup>[13]</sup>、分选<sup>[14]</sup>等尝试,并逐步应用于生命科学、胶体物理等方面的研究,如研究神经网络的光刺激作用<sup>[15]</sup>、胶体微粒的电泳现象<sup>[16]</sup>等。与国外相比,国内在这方面的研究相对匮乏,特别是全息光镊的实验研究。2008年,任煜轩等<sup>[17]</sup>首次在国内中文期刊上系统介绍了全息光镊。他们研究了利用衍射元件产生阵列光镊的算法设计<sup>[18]</sup>和全息光镊系统的像差校正<sup>[19]</sup>。2012年,徐淑武等<sup>[20]</sup>理论模拟了如何通过组合相位光栅产生三维阵列光镊。2014年,罗伟等<sup>[21]</sup>利用商用SLM调制产生了具有幂指数相位分布的涡旋光束来操纵微粒。经典Gerchberg-Saxton(GS)算法是获取目标光场CGH的常用迭代算法,与组合相位光栅法相比具有更高的精度,但是速度较慢<sup>[22]</sup>。如何在保证精度的前提下快速计算目标光场的CGH是全息光镊的关键技术。

本文在经典GS算法的基础上,提出了一种改进的快速三维GS算法<sup>[23]</sup>,这种改进的算法将菲涅耳透镜相位函数的计算步骤从GS迭代过程中分离出来,从而有效地减少了CGH的计算时间,同时使再现图像具有更高的质量。将该算法应用于全息光镊系统中,从实验上充分验证了其有效性和快速性。利用自主搭建的基于空间光调制器的全息光镊系统,实现了多光阱、多平面三维稳定捕获与动态操纵微粒,通过产生具有强度梯度分布的线状光阱和光涡旋光阱,实现了对微粒的运输和旋转操纵。

## 2 实验与方法

图1是搭建的全息光镊系统光路示意图。实验所用捕获光源是波长为1064 nm、输出功率为2 W的连续Nd:YAG激光器(RGBLase LLC,美国),捕获物镜采用数值孔径为1.4的100倍浸油物镜(Nikon,日本)。使用反射式纯相位液晶空间光调制器(Holoeye,德国),分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,线性相位调制深度为 $2\pi$ 。SLM通过计算机控制加载8bit的CGH,刷新频率为60 Hz,可以满足实时动态操控的需要。经扩束准直后的激光光束入射SLM液晶面板进行调制,然后经过一个缩束系统(透镜1和2)将光斑缩小至与物镜入瞳相匹配的尺寸,最后经物镜作傅里叶变换之后在其焦平面上再现期望的光场分布。待操纵的样品溶液被密封在一个大小约为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 150 \mu\text{m}$ 的样品池中。照明光源(LED)通过聚光镜照射样品,然后经捕获物镜和成像镜头后由CCD相机记录被捕获样品图像。图1中的二向色镜一方面反射捕获激光光束使其进入物镜,另一方面允许照明光透过使样品能成像到CCD相机。为了提高激光能量的利用率,入射激光光束采用

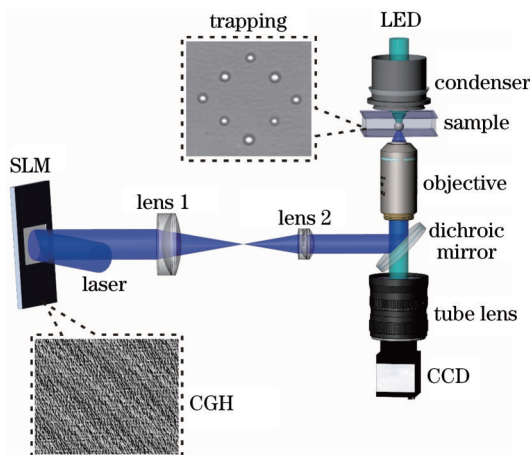


图1 全息光镊系统的光路示意图

Fig.1 Schematic implementation of HOT

小角度入射 SLM, 入射角约为  $6^\circ$ 。

基于纯相位空间光调制器的全息光镊技术通过控制 SLM 加载特定的相位分布来调制入射光波前, 使得入射光经过傅里叶变换之后在 SLM 的共轭面形成期望的光场分布。实际上, SLM 之后的所有透镜可等效于一个傅里叶透镜, SLM 全息面与光场再现面分别位于该透镜的前后焦平面, 用  $I_0$  和  $I_T$  分别表示全息面和再现面的光强, 要想在再现面上得到目标光场  $I_T$ , 则全息面的光场应为  $I_T$  的逆傅里叶变换场。由于采用的是纯相位 SLM, 因此只需要找到一个相位分布  $\varphi_H$ , 使得被调制后的场分布  $\sqrt{I_0} \exp(i\varphi_H)$  的傅里叶变换场的强度近似为  $I_T$ , 即

$$\mathcal{F}\left[\sqrt{I_0} \exp(i\varphi_H)\right] \approx \sqrt{I_T} \exp(i\varphi_T), \quad (1)$$

式中  $\mathcal{F}[\cdot]$  表示傅里叶变换,  $\varphi_T$  表示再现光场的相位分布, 通常不需要这一项, 只需要再现光场的强度分布  $I_T$ 。

如何快速计算 CGH 是全息光镊的关键。通常计算 CGH 的算法可以分为直接算法和迭代算法两类。其中直接算法包括“菲涅耳透镜与闪耀光栅函数组合算法”<sup>[24]</sup>和“随机掩膜编码”技术<sup>[25]</sup>, 而迭代算法包括 adaptive-additive(AA)<sup>[10]</sup>和 GS 算法<sup>[22]</sup>。直接算法速度快, 但是精度较低, 且只能产生简单的阵列光阱, 而迭代算法则相反<sup>[26]</sup>。本文采用比 AA 算法速度更快的 GS 算法来计算 CGH。图 2 是经典 GS 算法的流程图, 左右两个虚线框分别表示全息面和再现面,  $A_H$  和  $A_T$  (均为已知) 分别表示全息面和再现面的光场振幅,  $\varphi$  表示相位,  $n$  表示迭代次数。第一次迭代开始前先给再现场的振幅  $A_{T0}$  叠加一个随机(或均匀)的相位因子  $\varphi_{T0}$  作为初始值, 计算其逆傅里叶变换  $A_{Hn} \exp(i\varphi_{Hn})$ , 然后开始迭代运算过程。在第  $n$  次迭代中, 由于入射光是均匀的平行光, 因此可令  $A_{Hn} = A_{H0}$ , 得到新的复振幅  $A_{H0} \exp(i\varphi_{Hn})$ , 对其作傅里叶变换得到再现场  $A_{T,n+1} \exp(i\varphi_{T,n+1})$ , 并进行收敛判断, 如果收敛, 则  $\varphi_{Hn}$  是所求相位分布, 否则令  $n = n + 1$ ,  $A_{T,n+1} = A_{T0}$ , 新的再现场变为  $A_{T0} \exp(i\varphi_{Tn})$ , 然后进行下一次迭代运算, 直至收敛。

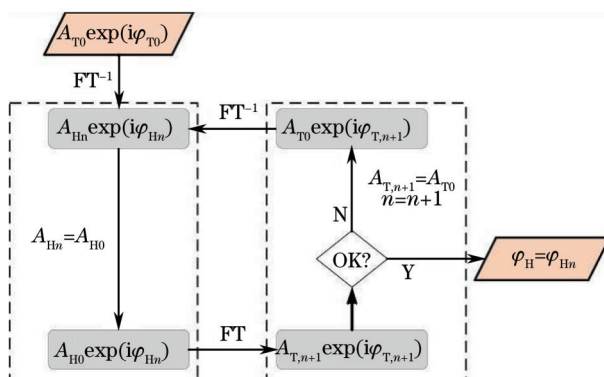


图 2 经典 GS 算法流程图

Fig.2 Flow chart of classical GS algorithm

由经典 GS 算法得到的 CGH 只能再现物镜焦平面上的光场, 若要再现分布在多个平面上的光场, 传统的做法<sup>[10]</sup>是根据再现平面的不同位置, 将相应的菲涅耳透镜相位因子  $\varphi_j$  直接引入到图 2 所示经典 GS 算法的迭代过程中, 这种方法运算量很大。为了提高效率, 首先假定所有光场的再现面都位于物镜焦平面上, 分别计算其全息图  $\varphi_{Hj}$ , 然后根据每一个再现平面的轴向位置  $z_j$  给  $\varphi_{Hj}$  叠加其对应的菲涅耳透镜相位因子  $\varphi_{zj}$ , 最后根据 (2) 式求出总的相位分布  $\varphi_H$ :

$$\varphi_H = \arg \left\{ \sum_{j=1}^N A_{H0} \cdot \exp \left[ i \left( \varphi_{Hj} + \varphi_{zj} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中  $\varphi_{zj} = 2\pi z_j(x_j^2 + y_j^2) / \lambda f^2$ ,  $\lambda$  表示激光波长,  $f$  表示物镜焦距,  $(x_j, y_j)$  是全息图的像素坐标。这种算法不但避免了透镜相位因子  $\varphi_{zj}$  在迭代过程中引入的大量运算, 提高了计算速度, 而且由同样的迭代次数得到的再现光场质量比经典 GS 算法的更高, 即具有更快的收敛速度<sup>[22]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 多光阱捕获

传统光镊技术通常使用光束偏转器(如扫描振镜或者声光调制器)来实现多微粒捕获与操纵<sup>[6, 7]</sup>。这些方



法受限于器件的扫描频率或者光束偏转角的大小,难以产生大阵列光阱。而基于纯相位液晶空间光调制器的全息光镊技术通过调制相位把单束入射光分成多束出射光来得到大阵列光阱。图3所示是通过在SLM上加载由GS算法得到的CGH来控制酵母菌细胞[图3(a)、(b)]和二氧化硅小球[图3(c)、(d)]按照不同的点阵结构排列分布,其中酵母菌细胞和二氧化硅小球的直径分别约为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 。全息光镊不仅可以将微粒排列成规则的点阵[图3(a)、(b)],还可以排列成复杂的图案[图3(c)、(d)]。如果在样品溶液中注入凝胶,微粒的特定排列结构就可以保持下来,这在光学微加工方面有着重要的应用,例如2002年Hoogenboom等<sup>[7]</sup>就利用二维光学势阱结构产生了一个二维结晶的胶体粒子阵列。

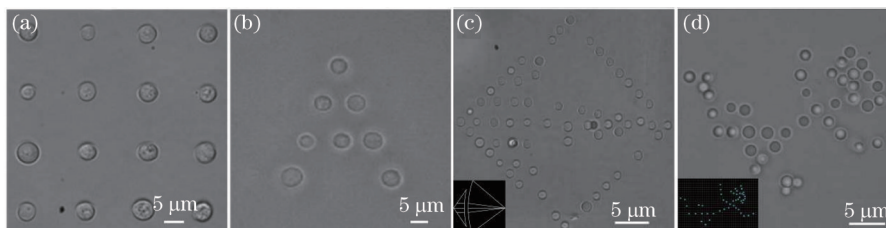


图3 按特定分布捕获酵母菌细胞(a,b)和二氧化硅小球(c,d):(a)4×4阵列;(b)字母“A”分布;(c)西安光学精密机械研究所图标(插图)点阵分布;(d)卡通人物(插图)点阵分布

Fig.3 Patterns of trapped yeast cells (a, b) and silica beads (c, d): (a) 4×4 array; (b) character “A”; (c) logo of Xi’an Institute of Optics and Precision Mechanics; (d) cartoon pattern

### 3.2 动态操纵

利用扫描振镜或者声光调制器将捕获光束按照一定轨迹扫描可动态操纵微粒<sup>[27]</sup>。但是如果同时要同时独立操纵多个目标,这种方法显然是无法胜任的。利用全息光镊可以同时产生多个光阱并分别独立控制每一个光阱的运动,从而实现复杂的多微粒动态操纵。把提前计算好的CGH图像序列加载到SLM,然后按照一定帧率刷新CGH就可以实现微粒的动态操纵,如图4所示。图4(a)~(c)所示是先向外移动被虚线圆标注的四个二氧化硅小球,其余四个保持不动;到了图4(d)~(f),被虚线圆标注的四个二氧化硅小球绕中心作圆周运动,同时外侧的四个二氧化硅小球沿着图4(d)中白色箭头所示方向作近似简谐运动。微粒的动态操纵可用于研究细胞的弹性、胶体微粒的物理性质。

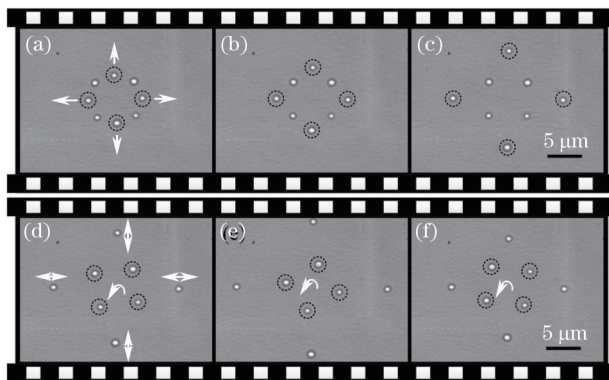


图4 动态操纵直径 $1\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅小球。(a-c)虚线圆标注的四个小球向外移动,其余四个保持不动;(d-f)虚线圆标注的四个小球绕中心作圆周运动,外侧四个小球在不同方向作近似简谐运动

Fig.4 Dynamic manipulation of silica beads with  $1\ \mu\text{m}$  diameter. (a-c) Four beads marked by the dashed circles move outward while the others remain static; (d-f) four beads marked by the dashed circles run in a circular motion while the others run in a harmonic motion

### 3.3 多平面捕获与操纵

全息光镊还可以同时产生位于不同平面的光阱分布,即具有三维空间结构分布的光阱阵列,实现微粒的多平面捕获与操纵。根据第2节提出的改进的快速三维GS算法,图5给出了理论模拟结果,图中的三个“中”字分别位于三个不同的平面上。观察第一个(左上角)“中”字,则其余两个“中”字比较模糊,距离越远成像越模糊。由图5(b)和(d)可以看到,第一个“中”字在图5(b)中的再现效果比图5(a)好,这说明改进算法得到的再现光场噪声更小,即具有更高的再现质量。在同样的迭代次数下(20次),改进的算法只用了16.8 s,而传

统算法则需要 27.3 s,这说明改进算法速度更快。

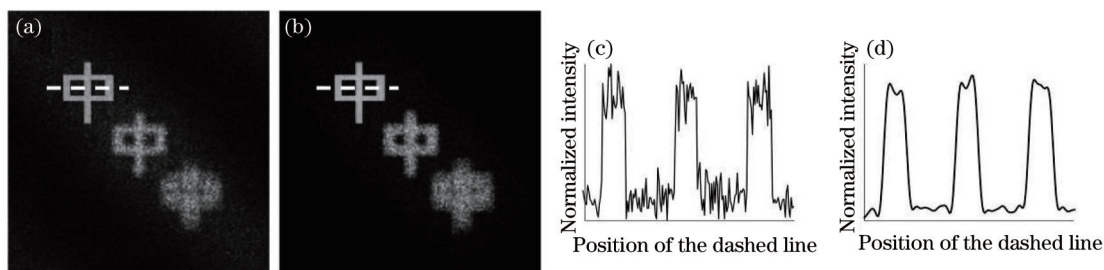


图5 传统三维GS算法(a,c)与改进的三维GS算法(b,d)再现位于三个不同平面的汉字“中”的理论模拟结果比较。(c)和(d)分别是(a)和(b)中白色虚线处的归一化强度分布

Fig.5 Comparison of traditional GS algorithm (a, c) and our improved 3D algorithm (b, d) with theoretically reconstructed results of character “中”. Figure (c) and figure (d) are the normalized intensity profiles of figure (a) and figure (b), marked by the dashed lines

利用改进的快速三维GS算法,捕获了三组位于不同平面的酵母菌细胞,如图6所示,其中下方三个图分别对应图6(a)~(c)中#1、#2和#3三组酵母菌轴向位置示意图,虚线表示三组细胞所在的平面,间隔为 $3\ \mu\text{m}$ 。通过刷新预先计算好的CGH图像序列操纵三组酵母菌细胞作三维空间运动。如图6(a)所示,开始时#1、#2和#3三组酵母菌细胞分别被稳定捕获在三个不同的平面上,其中#1细胞组位于焦平面,被清晰成像,其余两组位于其下方,比较模糊。然后操纵#2细胞组使其移动到#1细胞组所在平面,则#1和#2两组细胞同时被清晰成像,如图6(b)所示。到了图6(c),#3细胞组被移动到了#1细胞组所在的平面上,至此三组细胞都同时被清晰成像。将被捕获的微粒排列成具有任意三维空间分布的结构在晶体和微流管结构制作等方面有潜在的应用前景<sup>[28-30]</sup>。

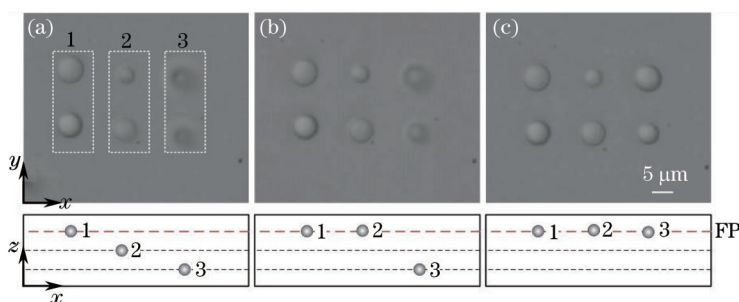


图6 多平面捕获与动态操纵酵母菌细胞。下方三个图分别表示#1、#2和#3三组酵母菌的轴向位置,其中红色虚线表示焦平面  
Fig.6 Multi-planes trapping and dynamic manipulation of yeast cells. Three figures of the second row indicate the axial position of yeast cells and the red dashed line indicates focal plane of objective

### 3.4 特殊光阱捕获与操纵

纯相位空间光调制器的特点是可以任意调制入射光场的相位分布,因此常用于特殊光场的产生,如贝塞尔光束<sup>[31]</sup>、拉盖尔高斯光束(L-G Beam)<sup>[8]</sup>等。这里产生了两种较为简单的特殊光阱——具有强度梯度分布的线状光阱和涡旋光阱,并成功对微粒分别进行了运输与旋转操纵。

将点状光阱一维拓展,就可以产生一个线状的光阱。这种光阱只能在与线状光斑垂直的方向限制和捕获微粒,而在沿着线状光斑的方向微粒的行为基本上不受限制。产生线状光镊的传统方法是在单光镊系统中插入一个柱面镜,而全息光镊则具有更高的灵活性,可以利用SLM加载具有柱面镜相位  $\exp[i(2\pi zx^2/\lambda f^2)]$  的CGH来产生,并可任意调节柱面镜的参数。利用全息光镊技术产生的光强均匀分布的线状光阱具有较大的捕获区域,可同时捕获多个微粒。如果把线状光阱设计成强度不均匀的梯度分布,如光强由左向右逐渐增强,则被捕获的微粒就有朝着光强较强的一端运动的趋势,从而实现对微粒的运输操纵。如图7(a)~(c)所示,二氧化硅小球在光强由左向右逐渐增强的线状光阱作用下由左向右运输,所用激光输出功率为2 W,小球运动速度约为 $30\ \mu\text{m/s}$ 。图7(a)中的插图是光强由左向右逐渐增强的线状光场分布示意图(右上),以及用于产生该线状光阱所加载的相位分布图(右下)。

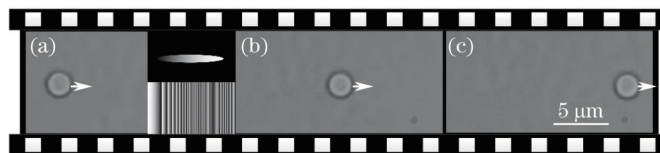


图7 利用具有强度梯度分布的线状光阱捕获和运输微粒。(a-c) 光强从左向右逐渐增强的线状光阱捕获和运输单个直径 2.5 μm 的二氧化硅小球从左向右运动

Fig.7 Trapping and transportation of micro-beads with line traps of intensity gradient. (a-c) A single 2.5 μm silica bead is trapped and moved rightward by a line trap with increasing intensity from left to right

L-G 光束是最为常见的一种具有涡旋相位的光束,它可以通过给高斯光束直接叠加螺旋相位  $\exp(i l \theta)$  的方法来产生,其中  $l$  被称为拓扑荷数,表征光束轨道角动量的大小, $\theta$  为方位角。螺旋相位的产生可直接使用螺旋相位板,但是这种器件加工难度较大,具有波长选择性,而且参数  $l$  通常较小。而利用 SLM 产生涡旋相位则很容易并且可以任意调整参数。图 8(a)~(c) 所示是利用拓扑荷数  $l=20$  的 L-G 光束产生的光学涡旋驱动多个二氧化硅小球作轨道旋转运动的实验结果,所用激光输出功率为 2 W,小球做圆周运动的角速度约为 5.3 rad/s,图 8(a) 中插图所示为拓扑荷数  $l=20$  的螺旋相位 CGH 图。多个二氧化硅小球沿箭头方向绕中心旋转,这表明 L-G 光束所携带的轨道角动量已经有效地传递到了小球上。

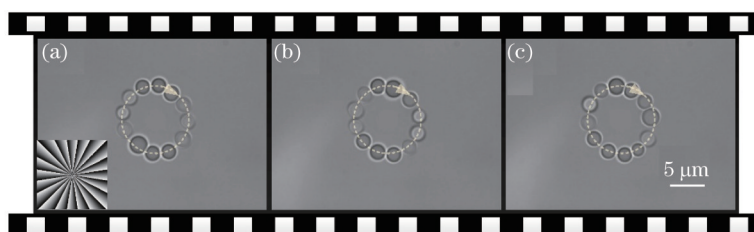


图8 利用聚焦的 L-G 光束旋转直径 2.5 μm 的二氧化硅小球

Fig.8 Using the focused L-G beam to rotate the silica beads with 2.5 μm diameter

## 4 结 论

CGH 产生算法是全息光镊的核心内容,如何提高算法的效率和速度是全息光镊的重点。在经典 GS 算法的基础上提出了一种改进的快速三维 GS 算法,理论模拟结果表明该算法具有比传统的三维 GS 算法更快的运算速度和更高的再现质量。将其应用于全息光镊系统中,成功实现了多种光学捕获和微操纵,验证了该算法的有效性和快速性。搭建的基于纯相位液晶空间光调制器的全息光镊系统成功实现了对酵母菌细胞和二氧化硅小球等微粒的多光阱、多平面三维稳定捕获和动态操纵,以及对微粒的运输和旋转操纵。这对国内全息光镊技术的研究及其在物理和生命科学等相关领域的应用研究具有一定的借鉴与参考意义。

### 参 考 文 献

- 1 Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, *et al.*. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Opt Lett, 1986, 11(5): 288-290.
- 2 Wang G M, Sevick E M, Mittag E, *et al.*. Experimental demonstration of violations of the second law of thermodynamics for small systems and short time scales[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(5): 050601.
- 3 Svoboda K, Schmidt C F, Schnapp B J, *et al.*. Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry[J]. Nature, 1993, 365(6448): 721-727.
- 4 Molloy J E, Burns J E, Kendrick-Jones J, *et al.*. Movement and force produced by a single myosin head[J]. Nature, 1995, 378(6553): 209-212.
- 5 Padgett M, Di Leonardo R. Holographic optical tweezers and their relevance to lab on chip devices[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(7): 1196-1205.
- 6 Visscher K, Gross S P, Block S M. Construction of multiple-beam optical traps with nanometer-resolution position sensing[J]. IEEE, 1996, 2(4): 1066-1076.
- 7 Hoogenboom J P, Vossen D L J, Faivre-Moskalenko C, *et al.*. Patterning surfaces with colloidal particles using optical tweezers[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(25): 4828-4830.

- 8 Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nat Photon*, 2011, 5(6): 335–342.
- 9 Dufresne E R, Grier D G. Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69(5): 1974–1977.
- 10 Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt Commun*, 2002, 207(1): 169–175.
- 11 Eriksen R L, Rodrigo P J, Daria V R, *et al.*. Spatial light modulator-controlled alignment and spinning of birefringent particles optically trapped in an array[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(25): 5107–5111.
- 12 Plewa J, Tanner E, Mueth D M, *et al.*. Processing carbon nanotubes with holographic optical tweezers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(9): 1978–1981.
- 13 Cheong F C, Sow C H, Wee A T S, *et al.*. Optical travelator: transport and dynamic sorting of colloidal microspheres with an asymmetrical line optical tweezers[J]. *Appl Phys B*, 2006, 83(1): 121–125.
- 14 Chapin S C, Germain V, Dufresne E R. Automated trapping, assembly, and sorting with holographic optical tweezers[J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 13095–13100.
- 15 Anselmi F, Ventalon C, Bègue A, *et al.*. Three-dimensional imaging and photostimulation by remote-focusing and holographic light patterning[J]. *PNAS*, 2011, 108(49): 19504–19509.
- 16 Semenov I, Otto O, Stober G, *et al.*. Single colloid electrophoresis[J]. *J Colloid Interf Sci*, 2009, 337(1): 260–264.
- 17 Ren Yuxuan, Zhou Jinhua, Wu Jianguang, *et al.*. Holographic tweezers—the most vigorous member in optical tweezers family[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(11): 35–41.  
任煜轩, 周金华, 吴建光, 等. 全息光镊—光镊家族中极具活力的成员[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(11): 35–41.
- 18 Sun Qing, Ren Yuxuan, Yao Kun, *et al.*. Algorithm for diffractive optical element of array optical tweezers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0109003.  
孙 晴, 任煜轩, 姚 焜, 等. 阵列光镊衍射元件的算法设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109003.
- 19 Liu Weiwei, Ren Yuxuan, Gao Hongfang, *et al.*. Aberrations in holographic array optical tweezers corrected with Zernike polynomials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 188701.  
刘伟伟, 任煜轩, 高红芳, 等. 泽尼克多项式校正全息阵列光镊像差的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 188701.
- 20 Xu Shuwu, Zhou Qiaoqiao, Gu Songbo, *et al.*. Generation of the three-dimensional array of optical trap by spatial light modulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 223702.  
徐淑武, 周巧巧, 顾宋博, 等. 用空间光调制器产生三维光阱阵列[J]. *物理学报*, 2012, 61(22): 223702.
- 21 Luo Wei, Cheng Shubo, Yuan Zhazhong, *et al.*. Power-exponent-phase vortices for manipulating particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1109001.  
罗 伟, 程书博, 袁战忠, 等. 幂指数相位涡旋光束用于微粒操控[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1109001.
- 22 Gerchberg R W, Saxton W. Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237–246.
- 23 Ma B, Yao B, Li Z, *et al.*. Generation of three-dimensional optical structures by dynamic holograms displayed on a twisted nematic liquid crystal display[J]. *Appl Phys B*, 2013, 110(4): 531–537.
- 24 Reicherter M, Haist T, Wagemann E U, *et al.*. Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(9): 608–610.
- 25 Davis J A, Cottrell D M. Random mask encoding of multiplexed phase-only and binary phase-only filters[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(7): 496–498.
- 26 Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1913–1922.
- 27 Liao G B, Bareil P B, Sheng Y L, *et al.*. One-dimensional jumping optical tweezers for optical stretching of bi-concave human red blood cells[J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1996–2004.
- 28 Korda P, Spalding G C, Dufresne E R, *et al.*. Nanofabrication with holographic optical tweezers[J]. *Rev Sci Instrum*, 2002, 73(4): 1956–1957.
- 29 Yao X C, Castro A. Optical trapping microfabrication with electrophoretically delivered particles inside glass capillaries[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(15): 1335–1337.
- 30 Leach J, Sinclair G, Jordan P, *et al.*. 3D manipulation of particles into crystal structures using holographic optical tweezers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(1): 220–226.

31 Vasilyeu R, Dudley A, Khilo N, *et al.*. Generating superpositions of higher - order Bessel beams[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 23389-23395.

栏目编辑：刘丰瑞