

文章编号 1004-924X(2018)05-1106-07

## 面向超分辨光学成像的浸没微球透镜控制

陈 涛, 孟 凯, 杨 湛\*, 刘会聪, 孙立宁

(苏州大学 江苏省先进机器人技术重点实验室 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021)

**摘要:**微球透镜配合传统光学显微镜可以采集到衍射极限以下的超分辨光学图像,为了精确控制微球透镜在样品表面的位置,同时扩大超分辨成像范围,提出了一种控制微球透镜的方法,结合多轴微动平台实现微球透镜的精确定位与成像扫描操作。通过光学仿真分析了微球透镜超分辨成像效果,并对精密微动平台进行了运动学分析。为了提高超分辨成像效果,将微球透镜浸没于液体介质中,并对在液体中运动的微球透镜进行力学分析。通过实验,清晰分辨出 130 nm ( $\sim\lambda/4$ )的蓝光光碟条纹间隙,证明了微球透镜具有超分辨成像能力,结果表明,微球透镜可以在传统光学显微镜的基础上进一步提高约 3.52 倍的放大倍数。通过控制微球透镜以  $5\times 10^{-6}$  m/s 的速度在液体中按“S”型轨迹移动,实现了对一个视场内样品的超分辨成像,此控制方法可以精确控制微球透镜的运动,通过扫描的方式可以扩大微球透镜的观测范围,提高观测速度。

**关键词:**超分辨成像;微操作;微球透镜

**中图分类号:**O439;TP241.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1106

## Control of liquid-immersed submerged microsphere for super-resolution optical imaging

CHEN Tao, MENG Kai, YANG Zhan\*, LIU Hui-cong, SUN Li-ning

(*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Robotics & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: yangzhan@suda.edu.cn*

**Abstract:** Images with resolution beyond the diffraction limit can be achieved by combining conventional microscopy with a microsphere. In order to position the microsphere on the field of interest of the sample surface and to expand the observation area, a method to manipulate the microsphere by combining it with a multi-axis translation stage was proposed in this paper. Images were obtained by scanning the microsphere, which was positioned accurately by driving the translation stage with four degrees of freedom. The influence of the probe on the super-resolution image was analyzed by performing an optical simulation. Kinematic analysis of the translation stage was studied for determining the manipulation strategy of the microsphere. Force analysis of the microsphere in a liquid medium was carried out to evaluate the possibility of detachment of the microsphere from the probe. By using a microsphere, the gap between the Blu-ray disc stripes could be clearly observed. The experimental results indicate that the amplification factor of the microsphere is 3.52 and a

收稿日期:2017-12-29;修订日期:2018-02-02.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFB1107602);国家自然科学基金资助项目(No. 61673287, No. 61433010)

resolution of 130 nm (approximately  $\lambda/4$ ) can be achieved. In addition, by scanning the microsphere along the S-shaped trajectory at a speed of  $5 \times 10^{-6}$  m/s over the sample surface, the super-resolution image over a large continuous area was achieved. Therefore, by using this method, the imaging area could be expanded and the observation efficiency was improved.

**Key words:** super-resolution imaging; micro-manipulation; microsphere

## 1 引言

传统光学显微镜具有非接触、实时观测、观察范围大等特点,是生物医学、材料科学等领域的重要研究工具,但是传统光学显微镜的分辨率受衍射极限影响,分辨率极限大约为光源波长的一半<sup>[1-2]</sup>,所以,如何提高光学显微镜的分辨率极限一直都是光学研究的一个热门课题。时至今日,许多超分辨成像显微技术与设备已经被研究与开发,如扫描电子显微镜(SEM)、原子力学显微镜(FAM)、透射电子显微镜(TEM)、扫描近场光学显微镜(NSOM)<sup>[3]</sup>、荧光光学显微镜<sup>[4]</sup>等,但是上述超显微技术往往需要对观测样品进行特殊处理,或者需要在真空环境下工作<sup>[5]</sup>,这些都不利于观测活体对象,并且,这些设备大多价格昂贵、操作复杂、观测效率低。而在2010年,Wang等提出了一种微球透镜技术<sup>[6]</sup>,将透明介质微球置于被观测样品表面,结合传统光学显微镜,可以在白光光源下得到50 nm分辨率的图像<sup>[7]</sup>,小于衍射极限,实现了超分辨成像。研究人员认为,微球能够耦合近场信息并将其放大,传输到远场后被物镜接收,同时,配合一定的液体介质,可以提高微球透镜的超分辨成像能力<sup>[8]</sup>,这种简单有效的技术为实时、非侵入、快速的超分辨成像提供了一种新的可能。

目前,微球透镜的使用方式是将其播撒在被观察对象的表面上,微球透镜洒落到的区域能够采集到超分辨图像;但是,这种播撒的方式是无序不可控的,无法精确控制微球透镜的位置对特定样品区域进行观察,而且超显微观测区域只限制在被微球透镜所覆盖的区域,难以观测样品的连续区域,实验测量结果不易重复,并且洒落的微球可能会破坏样品的表面结构,易造成样品的损伤与污染。本文提出了一种控制微球透镜的操作方法,将微球透镜粘附于钨探针之上,结合多轴微动平台实现微球透镜的精确定位与成像扫描操作,

进而利用传统光学显微镜观测到样品的任意区域。为了提高微球透镜的成像效果,将微球透镜浸没于液体介质中。并利用光学仿真研究探针及光学胶水对微球透镜成像效果的影响,然后通过力学分析,计算微球透镜在液体介质中的运动参数。最后搭建实验平台,利用被探针粘附的微球透镜进行相关的超分辨光学实验,通过扫描探针的方式,扩大微球透镜的成像区域,使微球成像区域不仅仅限于单个微球透镜所覆盖的区域。

## 2 理论分析与仿真研究

微球透镜能够获得超分辨图像的机理得到了广泛的研究。2009年, Lee等人发现介质微透镜有近场放大和聚焦现象,微球透镜可以把近场的消逝波传播至远场,使得被微球透镜放大的像可以被传统的光学显微镜在远场观察到<sup>[9]</sup>,从而突破衍射极限的限制。同时,这种微球透镜的超分辨成像机理与微透镜所形成的聚焦有关<sup>[10]</sup>,这些微纳米尺寸的透镜可以把入射光聚焦到亚波长范围,这些超强度的聚焦光斑即所谓的“光子纳米喷流”,其长度可以维持几个波长,光束的半高全宽可以小于半个波长,使得微球透镜可以获得超过衍射极限的分辨能力。

入射光进入微球透镜形成纳米喷流,它最小的半高全宽光柱的宽度称为光子纳米喷流的束腰。实验表明,束腰的宽度越窄,超分辨能力越强<sup>[11-12]</sup>。而光子纳米喷流的腰宽与微球直径、微球材质以及浸没介质的折射率有关。

本研究通过观察入射光纳米喷流的腰宽,来判断钨探针与光学胶水对微球透镜超分辨成像能力的影响程度。利用COMSOL Multiphysics软件来仿真分析钨探针与光学胶水对微球透镜超分辨成像能力的影响。仿真光源为波长为590 nm的高斯平面光波,微球透镜的直径为16  $\mu\text{m}$ ,材质为折射率为2.1的钛酸钡玻璃(BTG),微球透镜浸没在浓度为折射率为1.36乙醇中,光学胶水的折射率为1.48,钨探针设定为不透光区域。

图 1 为经过仿真计算得到的电场强度分布。根据仿真所得的电场强度分布,计算出光强分布,得出只有一个微球透镜时(图 1(a))与将微球粘附在探针上时(图 1(b))的光子纳米喷射的腰宽分别为 280.6 nm 和 282.2 nm,所以在两种模式下所产生的光子纳米喷射的腰宽大小极度接近,探针及光学胶水对微球透镜产生的光子纳米喷射的影响几乎可以忽略不计。因此它们对微球透镜的超分辨能力几乎没有影响。

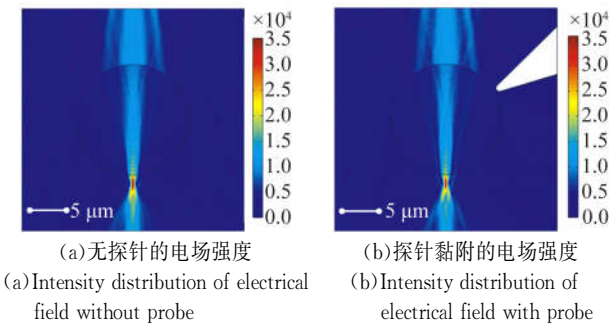


图 1 光学仿真结果图

### 3 机械手运动学分析

用于粘附微球透镜的钨探针是安装在多轴微动平台上的,微动平台具有 XYZ 三轴直线运动自由度和绕 X 方向旋转自由度,共 4 个自由度。XY 方向的运动由两个精度为 5 μm 的电动滑台控制(KS102-70R, SURUGA SEIKI),Z 方向的运动由精度为 10 μm 的手动滑台控制(B31-80A, SURUGA SEIKI),绕 X 方向的旋转机构精度为 0.2° (DCM 210, Cascade Microtech)。图 2 是微动平台的结构示意图。四自由度的微动平台可以看作一个机械手,要利用该机械手控制微球透镜的运动,需要先对它进行运动学分析。

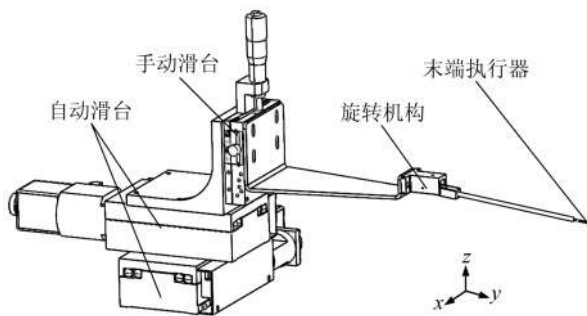


图 2 机械手结构示意图

Fig. 2 Three-dimensional model of robotic manipulator

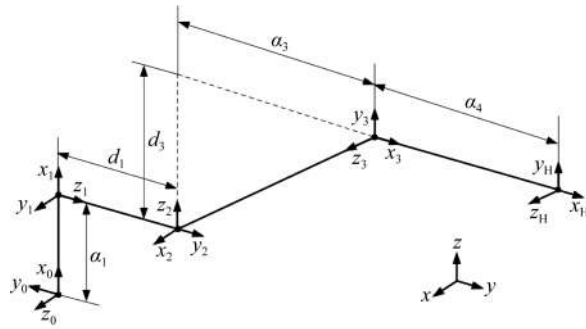


图 3 机械手各关节及其参考坐标系

Fig. 3 Links and link coordinate systems of robotic manipulator

对机械手进行运动学分析,首先要建立运动学方程,如图 3 所示。机械手可以认为是由一系列连杆以及关节按特定顺序组合而成,每一个关节都有一个相对于公共坐标系的参考坐标系,每个坐标系的 Z 对应每个关节自由度所指的方向,而每一个参考坐标系之间又存在一个变换矩阵使它们能够相互转化,所谓运动学方程就是要通过这些变换矩阵,建立起微球的运动与机械手各自由度之间的联系。根据 Denavit-Hartenberg (D-H) 机器人运动学建模方法<sup>[13]</sup>,相邻关节之间参考坐标系的变换矩阵可以表示为:

$${}^{i-1}T_i = A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $i$  是关节的序号, $\alpha_i$  是两相邻关节 Z 轴之间的扭角, $\theta_i$  是关节之间沿 Z 轴的旋转角, $a_i$  是两关节之间的连杆长度, $d_i$  是关节之间 Z 轴公垂线之间的距离。表 1 列出了机械手中每一个关节之间的对应参数。

表 1 机械手关节相关参数

Tab. 1 Parameters of links of robotic manipulator

$i$	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i / (^\circ)$
1	$0^\circ$	$\Delta d_1$	$a_1$	90
2	$90^\circ$	$d_2 + \Delta d_2$	0	90
3	$90^\circ$	$d_3 + \Delta d_3$	$a_3$	90
4	$\Delta \theta$	0	$a_4$	0

微球透镜位于机械手末端,相对于公共坐标系的变换矩阵可以由相邻关节坐标系之间的变换矩阵连乘得到,即有:

$${}^0\mathbf{T}_H = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_H = \begin{bmatrix} \sin \Delta\theta_1 & \cos \Delta\theta_1 & 0 & a_1 \sin \Delta\theta_1 + d_3 + \Delta d_3 \\ -\cos \Delta\theta_1 & \sin \Delta\theta_1 & 0 & -a_1 \sin \Delta\theta_1 - a_3 - d_2 - \Delta d_2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3$  是微动平台的位移, $\Delta\theta_1$  是旋转机构的转角,它们的最大值对应各自由度方向上的行程,分别为 70 mm、70 mm、12.5 mm、 $30^\circ$ ;  $a_1, d_2, d_3, a_3$  是与机械手相关的固定参数,分别为 46, 80, 35, 168 mm, 根据机械手的运动学矩阵,可以计算出机械手的末端运动范围为一个体积大约为  $500 \text{ cm}^3$  的扇形区域。

由机械手的运动学矩阵,就可以根据机械手在不同自由度的位移量来计算末端微球的位姿。但是,要根据微球所需要移动的位姿,来调节机械手各自由度的运动,还需要进行机械手的逆运动学研究。根据运动学方程,逆运动学方程的解可以表示为:

$$\begin{cases} \theta_H = \arctan(o_y/o_x) \\ \Delta d_3 = p_x - a_1 n_x - d_3 \\ \Delta d_2 = -p_y - a_1 o_x - a_3 - d_2 \\ \Delta d_1 = p_z \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $n, o, a$  为机械手末端的空间姿态信息, $p$  为机械手末端的空间位置信息。利用逆运动学方程的解,便可以根据微球透镜所需要移动到的位置,计算出机械手各个自由度所需的位移量。

### 4 微球透镜力学分析

研究表明,将微球透镜浸没于液体介质中,可以提高微球透镜的成像效果<sup>[9-10]</sup>,而微球透镜在液体中受到水的黏滞阻力会脱离粘附,与钨探针相分离。图 4 所示为微球透镜在水中移动时所受的作用力,其中, $F_r$  为液体的黏滞阻力, $f$  为摩擦力, $F_b$  为浮力, $F_n$  为支持力, $G$  为重力, $M$  和  $F$  为钨探针对于微球透镜的拉力和转矩,探针与水平面之间的倾斜角设为  $30^\circ$ ,探针与微球透镜之间的连接点为弧 AB 的中点。

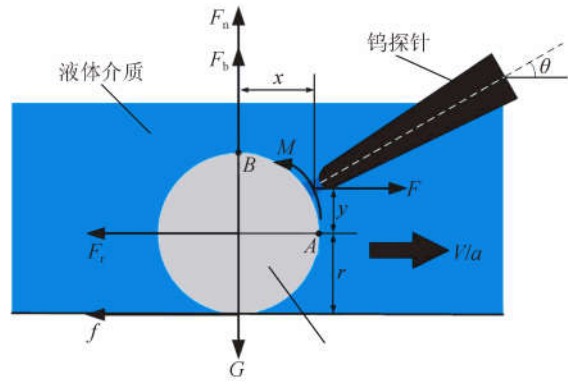


图 4 微球透镜在液体中的受力分析图  
Fig. 4 Force analysis of microsphere in liquid

当微球透镜以速度  $v$  和加速度  $a$  运动时,作用在微球透镜上的力的平衡方程可以表示为:

$$\begin{cases} F_r + f + ma = F \\ F_n + F_b = G \\ f \cdot (r + y) + F_r \cdot y + ma \cdot y = M \end{cases}, \quad (4)$$

其中液体的黏滞阻力  $F_r$  可以表示为:

$$F_r = 6\pi\eta vr, \quad (5)$$

其中: $\eta$  是液体的黏滞系数;液体介质为无水乙醇,它的黏滞系数为  $2.87 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;微球半径  $r$  为  $8 \mu\text{m}$ ,而移动速度  $v$  则作为判断微球是否会脱离探针粘附的判断依据。

微球透镜与钨探针连接的区域可以被认为是由固态光学胶水填充的圆柱体,其圆截面最小半径  $r'$  设为  $0.3 \mu\text{m}$ ,而固态光学胶所受的最大拉伸应力可以表示为:

$$\sigma_{\max} = \frac{32M}{\pi r'^3} + \frac{F \cdot \cos \theta}{\pi r'^2}. \quad (6)$$

固态光学胶水的极限应力大约为  $9.65 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,固态光学胶水所受的最大拉伸应力不能超过极限应力。通过计算得出微球透镜的移动速度不能大于  $0.01 \text{ m/s}$ ,而当运动速度为极限运动速度的 99% 时,加速则不能超过  $4.68 \text{ m/s}^2$ 。

### 5 实验及结果

#### 5.1 搭建实验平台

实验将微球透镜粘附于钨探针之上,并利用传统光学显微镜来观测显微图像,图 5 为实验示意图,图 6 为实验平台实物图。实验所使用的探针为 Picoprobe 公司的 ST-20-2 型钨探针,样品放置在 Cascade Microtech 公司的 M150 探针台

上,观测所使用的光学显微镜为 SEIWA OPTICAL 公司的 PS-888 Microscope 型显微镜,并配备有 SEIWA OPTICAL 公司的 M Plan Apo 型放大倍数为 50 倍的显微镜物镜,该物镜的工作距离为 20.5 mm。光源为 OPTEM 公司的 LampLink2 型卤素灯,峰值波长约为 590 nm。显微图像由 point grey 公司的 FL3-U3-13S2C-CS 型 CCD 相机记录,探针在竖直方向上的位姿通过安装在侧面的变焦镜头 (CORRECT TOKYO ZOOM 0.75X-4.5X) 观察。

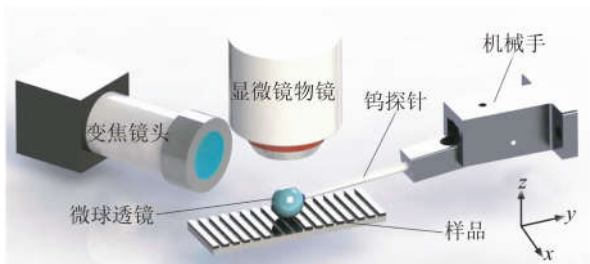


图 5 超分辨光学成像实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of super-resolution experiment

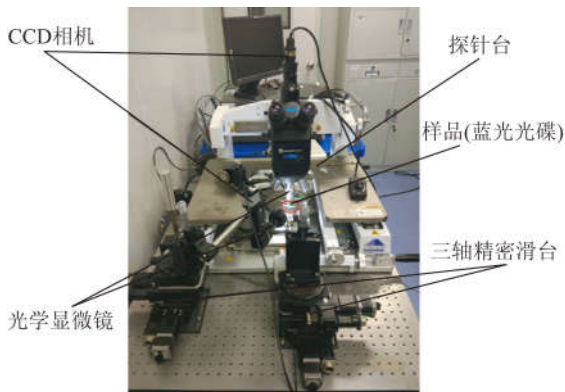
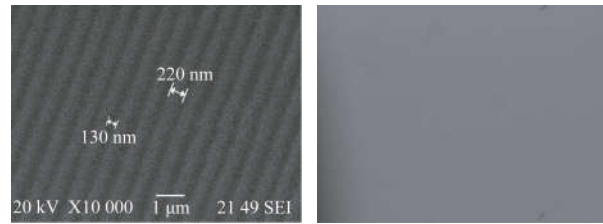


图 6 超分辨光学成像实验平台实物图

Fig. 6 Setup for optical super-resolution experiment

## 5.2 微球成像实验

实验所使用的观测样品为蓝光光碟,蓝光光碟的底部条纹宽度为 220 nm,条纹间距为 130 nm,图 7(a)为扫描电子显微镜(SEM)观测下的图像,图 7(b)为传统光学显微镜下的图像。使用光学显微镜直接观测,并不能观测到显微图像,为了观测到光碟底部的条纹,实验将使用直径为 16  $\mu\text{m}$  的 BTG 微球透镜。



(a)SEM 图像

(b)光学显微镜图像

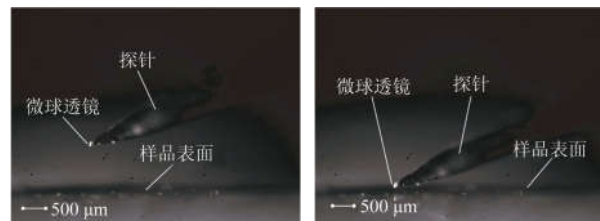
(a)SEM image

(b)Optical microscope image

图 7 蓝光光碟底部在 SEM 和光学显微镜下的观测结果

Fig. 7 Images of blu-ray disc observed by SEM and optical microscope

微球透镜粘附于钨探针末端,图 8 为由变焦镜头观测到的探针侧视图。如图 8(a)所示,为了确保探针末端最先接触底面,探针需要保持一定的倾斜度。如图 8(b)所示,根据探针的侧视图,控制探针接近样品,直至微球透镜即将触碰样品表面。



(a)调节倾角

(b)接触样品

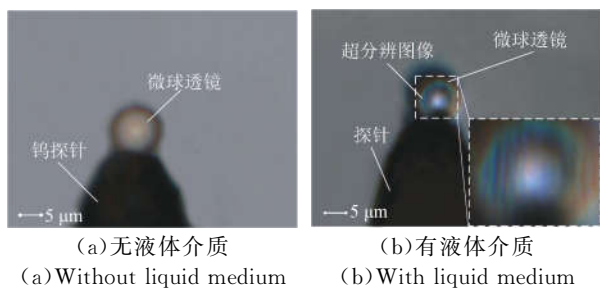
(a)Adjust tilt angle

(b)Touch sample surface

图 8 探针侧视图

Fig. 8 Position of probe in vertical direction

如图 9(a)所示,当微球透镜已经贴近样品表面,调节显微镜焦距并不能观察到蓝光光盘底部的条纹。为了观察到实验现象,在样品表面滴加液体介质,使微球透镜浸没于其中,此时调节显微镜焦距,如图 9(b)所示,可以观察到清晰的蓝光光碟底部条纹,所以得出结论:液体介质确实可以提高微球透镜的超分辨成像能力。通过微球透镜可以观察到 13 条蓝光光碟的底部条纹,而条纹周期为 350 nm(130 nm + 220 nm),微球透镜直径为 16  $\mu\text{m}$ ,所以微球透镜能够在普通光学显微镜的基础上进一步对物体进行大约 3.52 倍(16  $\mu\text{m}/0.35 \mu\text{m}/13$ )的放大。图 10 为微球获得的显微图像中相邻条纹的归一化光强分布,光碟条纹可以被清晰分辨,所以微球透镜的分辨率可以达到 130 nm,约为  $\lambda/4$ (130 nm/590 nm),故而使用微球透镜能突破衍射极限,实现超分辨成像。



(a)无液体介质 (b)有液体介质  
(a)Without liquid medium (b)With liquid medium

图 9 微球透镜超分辨成像

Fig. 9 Super-resolution images achieved by microsphere

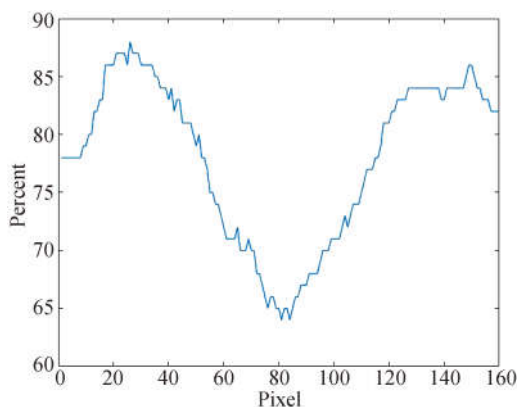


图 10 相邻条纹的光强分布

Fig. 10 Intensity distribution of adjacent stripes

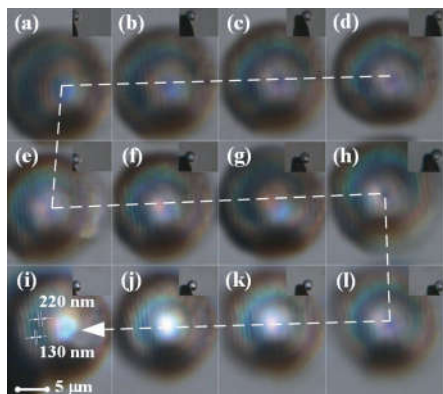


图 11 微球透镜扫描成像

Fig. 11 Scanning image of sample surface achieved by microsphere

### 5.3 连续扫描成像

如图 11 所示,通过将微球透镜以  $5 \times 10^{-6}$  m/s 的速度沿着“S”型扫描,可以获得同一视场下连续大面积区域的超分辨图像。图 11(a)~11(l)为微球透镜扫过的 12 个不同位置的超分辨图像,图片的右上角为微球透镜在视场中的位置。由此可知,通过这种控制微球扫描的方式,不仅能够控制微球的移动,还能够扩大微球透镜的成像范围,而不是局限在微球透镜所覆盖的一小块区域。

## 6 结 论

本文提出了一种面向超分辨光学成像的微球透镜控制方法,将微球透镜通过光学胶水粘附于钨探针末端,通过四自由度微动平台来控制探针从而实现微球透镜的定位与运动操作。光学仿真结果表明,钨探针以及光学胶水几乎不会影响微球透镜的超分辨成像能力。通过对微动平台的运动学分析得出了微球透镜的运动范围以及合理的微动平台控制方式。力学分析表明,微球透镜在液体介质中的移动速度不能超过 0.01 m/s,而当速度为极限速度的 99% 时,加速度不能超过  $4.68 \text{ m/s}^2$ 。实验获取图像可以清晰分辨出  $130 \text{ nm} (\sim \lambda/4)$  的条纹间隙,证明了微球透镜具有超分辨成像能力,同时,验证了液体介质对微球透镜超分辨成像的推动作用。通过控制微球透镜以  $5 \times 10^{-6}$  m/s 的速度在液体中按“S”型轨迹移动,实现了对一个视场内样品的超分辨成像,从而扩大了微球透镜的观测范围。本研究提出了一种合理控制微球透镜的方法,对微球透镜超分辨成像的应用具有重要的现实意义。

### 参考文献:

[1] THIBAUT P, GUIZAR-SICAIRIS M, MENZEL A. Coherent imaging at the diffraction limit [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21(Pt 5):1011-1018.  
 [2] 李海, 张宪民, 黄沿江, 等. 光学显微线条纹图像中心线提取 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1340-1347.  
 LI H, ZHANG X M, HUANG Y J, et al.. Centerline extraction of stripe imaged by optical micro-

scope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1340-1347. (in Chinese)  
 [3] UPPUTURI P K, PRAMANIK M. Microsphere-aided optical microscopy and its applications for super-resolution imaging [J]. *Optics Communications*, 2017, 404:32-41.  
 [4] 李辉, 桂征宇, 梁永, 等. 单分散上转换纳米荧光微粒的荧光寿命测量 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2):319-324.  
 LI H, GUI ZH Y, LIANG Y, et al.. Measurement

- of fluorescence life time of single up-conversion nanoparticle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 319-324. (in Chinese)
- [5] CHEN K, KROMIN A, ULMER M P, *et al.*. Nanoparticle sizing with a resolution beyond the diffraction limit using UV light scattering spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 2016, 228(1-3):1-7.
- [6] WANG Z B, GUO W, LI L, *et al.*. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope [J]. *Nature Communications*, 2011, 2:218.
- [7] HAO X, KUANG C F, LIU X, *et al.*. Microsphere based microscope with optical super-resolution capability [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20):203102.
- [8] DARAFSHEH A. Influence of the background medium on imaging performance of microsphere-assisted super-resolution microscopy [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4):735-738.
- [9] LEE J Y, HONG B H, KIM W Y, *et al.*. Near-field focusing and magnification through self-assembled nanoscale spherical lenses [J]. *Nature*, 2009, 460(7254):498-501.
- [10] YANG H, TROUILLON R, HUSZKA G, *et al.*. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8):4862-4870.
- [11] YANG H, TROUILLON R, HUSZKA G, *et al.*. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8):4862-4870.
- [12] YANG H, GIJS M A M. Optical microscopy using a glass microsphere for metrology of sub-wavelength nanostructures [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 143:86-90.
- [13] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1955, 22:215-221.

#### 作者简介:



陈 涛(1980—),男,河南三门峡人,副教授,2004年、2006年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微纳定位及微纳操作等研究。E-mail: chent@suda.edu.cn

#### 通讯作者:



杨 湛(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,2004年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2010年、2013年于日本名古屋大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳米系统工程、微纳机器人的研究。E-mail: yangzhan@suda.edu.cn