

# 具有三维力反馈的原子力显微镜纳米操作系统<sup>\*</sup>

田孝军<sup>1,2</sup> 王越超<sup>1</sup> 刘连庆<sup>1,2</sup> 焦念东<sup>1,2</sup> 董再励<sup>1</sup> 席宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016)

<sup>2</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 在基于原子力显微镜的纳米操作过程中,由于缺乏实时反馈信息,造成纳米操作效率低下且灵活性差,同时探针因受力过大而损坏。为此,本文通过对探针受力-悬臂变形进行建模,并根据实时检测到的悬臂变形信号、新的参数获取与校准方法,从而获取探针所受的实时三维纳米力。将此三力经比例放大后送入力/触觉设备进行感知,操作者就可以实时调节施加在探针上力的大小及探针的运动轨迹,使得操作的效率及灵活性明显提高,且可以避免探针因受力过大而造成损坏。纳米刻画和多壁碳纳米管的操作实验验证了系统的有效性。

**关键词** 原子力显微镜 纳米操作 三维纳米力

中图分类号 TH742 TP29 文献标识码 A 国家标准学科分类代码 510.8040

## AFM based nanomanipulation system with 3D force feedback

Tian Xiaojun<sup>1,2</sup> Wang Yuechao<sup>1</sup> Liu Lianqing<sup>1,2</sup> Jiao Niandong<sup>1,2</sup> Dong Zaili<sup>1</sup> Xi Ning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

<sup>2</sup>(Graduate School, Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Due to the lack of real time sensory information feedback during atomic force microscope (AFM) based nanomanipulation, the manipulation is performed with low efficiency and less flexibility, and AFM probe is also prone to be broken. To solve this problem, the model of nano forces acting on probe and cantilever deflection was proposed. The real time three dimensional (3D) nano forces are obtained from cantilever deflections measured by position sensing detector (PSD) using new parameter calibration method. The 3D nano forces are magnified proportionally and sent to a haptic/force device for operator to feel, then the operator can adjust the forces acting on the probe and probe motion trajectory in real time. Thus the efficiency and flexibility of nanomanipulation can be significantly improved and the probe can be protected from being broken. The nanolithography and MWCNT pushing experiments have verified the effectiveness of the system.

**Key words** atomic force microscope (AFM) nanomanipulation three dimensional (3D) nano forces

## 1 引 言

近年来,原子力显微镜<sup>[1]</sup>(atomic force microscope, AFM)不仅用于样本表面的高精度成像,也越来越多地应用到纳米操作中。针对AFM,学者们

提出了一些纳米操作方法,并实现了对纳米微粒的操作<sup>[2-5]</sup>。但在上述基于AFM的纳米操作中,其基本规律是先扫描成像,再根据得到的图像进行离线规划,之后AFM系统根据规划好的程序进行操作,再后进行扫描验证,如此往复循环,形成扫描-规划-操作-扫描的操作模式。由于此操作模式在操作

\* 本文于 2005 年 5 月收到,系国家 863 计划(2002AA422210, 2003AA404070)资助项目。

过程中缺乏实时反馈信息, 探针在运动过程中对微粒作用与否及作用效果如何无法得知(如操作时探针是否作用在微粒上以及是否推动微粒等), 这样每一步操作的结果无法实时得到, 而只能通过重新扫描成像来验证, 但由于每次扫描成像时间一般需几分钟, 很显然这种操作方式效率低且灵活性差。另外, 由于在操作过程中缺乏探针的受力信息, 很容易造成探针的损坏。

对此, 有学者尝试将 AFM 与力/触觉设备结合起来辅助纳米操作<sup>[6,7]</sup>, 采用一单自由度触觉设备来感知作用在 AFM 探针上的法向力。但一方面, 在它们的力获取计算公式中, 由于许多参数(如毛细力时液体厚度、针尖-物体间距等参数)无法准确获得, 造成实际无法准确获得此法向力的大小; 另一方面, 由于缺乏作用在探针水平方向的力反馈信息, 无法对纳米操作环境进行全面感知, 不利于对操作进行在线规划, 而且当探针受到过大横向力时, 由于操作者无法感知横向力信息而易造成探针的损坏。

针对上述问题, 本文通过对 AFM 探针受力-悬臂变形进行分析, 并利用位置敏感检测器(position sensing detector, PSD) 来检测悬臂的变形, 从而得出探针所受的三维纳米力, 将此三维纳米力经比例放大后送入力/触觉设备提供给操作者进行感知, 操作者可以获得实时的操作进展情况信息, 并据此通过控制力/触觉设备的操作手柄来控制探针的运动。这样, 操作者就可以在实时力/触觉反馈的辅助下进行纳米操作, 操作的效率与灵活性明显提高, 并可以避免探针受到过大作用力而造成损坏。纳米刻画和多壁碳纳米管(multiwall carbon nanotube, MWCNT)的操作实验验证了该纳米操作系统的有效性。

## 2 三维纳米力建模

### 2.1 AFM 探针悬臂受力-变形建模

常用于纳米操作的 AFM 探针分矩形悬臂探针与三角形悬臂探针两种, 其中矩形悬臂探针如图 1 所示。

在用 AFM 探针进行纳米操作时, 探针针尖受到各种纳米力(如范德华力、毛细力、静电力、排斥力、摩擦力等<sup>[8]</sup>)的共同作用, 从而使悬臂产生垂直面内的弯曲与绕其中心轴的扭转变形, 将其合力分解为沿三轴方向的分力  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$ , 如图 2 所示。

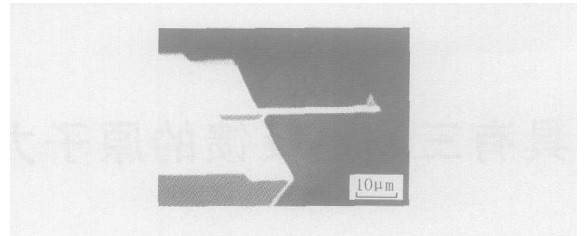


图 1 具有矩形悬臂的 AFM 探针

则探针受力与悬臂变形之间的关系为:

$$\begin{cases} F_x(h_t + b/2) = K_a \theta_x \\ F_z l_c + F_y(h_t + b/2) = k \delta_c l_c \\ F_y = F_x \tan \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta_c$  为悬臂弯曲变形量,  $\theta_x$  为悬臂绕其  $Y$  轴的扭转角。

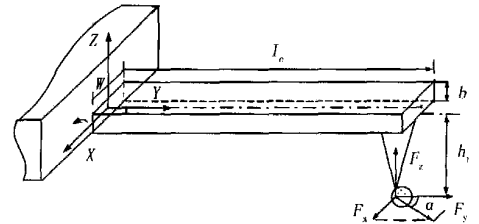


图 2 AFM 探针受三维纳米力作用模型

### 2.2 利用 PSD 信号获取悬臂变形量

在进行纳米操作时, 探针针尖受力会引起悬臂变形, 使投射在悬臂端部的激光光路发生偏转, 从而使接受悬臂反射激光的 PSD 输出信号发生变化, 利用 PSD 检测悬臂变形的示意图如图 3 所示。

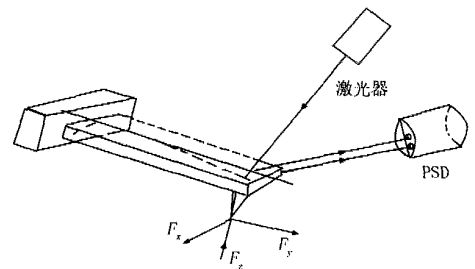


图 3 利用 PSD 检测悬臂变形

此时, 悬臂弯曲变形  $\delta_c$  和扭转角  $\theta_x$  可表述为:

$$\delta_c = k_v S_v \quad (2)$$

$$\theta_x = k_h S_h \quad (3)$$

式中:  $k_v$  和  $k_h$  为系统常数,  $S_v$  为 PSD 输出的垂直信号,  $S_h$  为 PSD 输出的水平信号。

### 2.3 三维纳米力计算公式

在上述探针受力-悬臂变形分析与利用 PSD 得到悬臂变形量的基础上, 将式(2)~(3)带入式

(1), 可以得到三维纳米力的计算公式如下:

$$\begin{cases} F_x = k_a k_h S_h / (h_u + b/2) \\ F_y = F_x \tan\alpha \\ F_z = k k_v S_v - F_y (h_u + b/2) / l_c \end{cases} \quad (4)$$

### 3 参数获取与校准

为了获得作用在针尖上三维纳米力的大小, 需要得到式(4)中的 4 个重要参数  $k_a$ 、 $k_v$ 、 $k_h$  和  $k$ 。对此, 有学者提出了一些参数获取与校准方法<sup>[9-10]</sup>, 但其方法费时且实现困难, 为此本文提出了一种新型且简单的方法来校准或获取这些参数。

#### 3.1 $k_v$ 的获取

将 AFM 关反馈, 控制探针在 Z 向标定光栅上作横向运动, 探针将沿台阶上下运动, 此时悬臂变形为台阶高度, 记录此时 PSD 输出垂直信号如图 5 所示(示波器信号)。

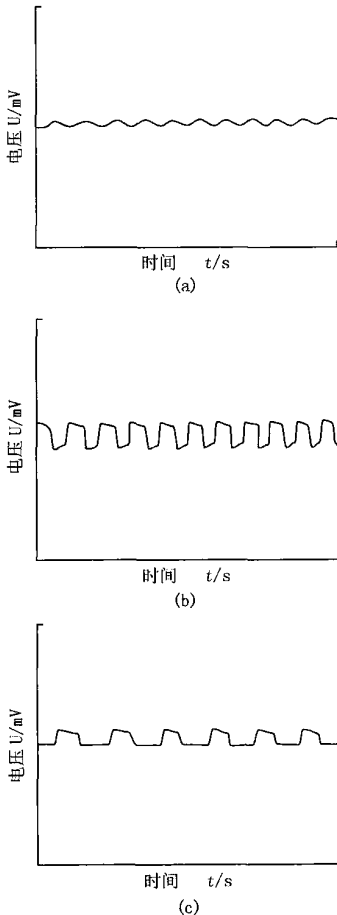


图 4 PSD 输出垂直信号

图 4 中(a)、(b)、(c) 分别为台阶高 20nm、101.8nm 及 500nm 时的 PSD 输出垂直信号, 分别为

32mV、156mV 及 710mV, 则悬臂垂直变形  $\delta_z$  与 PSD 输出垂直信号  $S_v$  之间的关系如图 5 所示。

由图 5 可见, 当悬臂变形量较小时, 悬臂垂直变形与 PSD 输出垂直信号之间成线性关系。由式(2) 则有:  $k_v = \delta_z / S_v$ , 可得  $k_v = 706 \text{ nm/V}$ 。

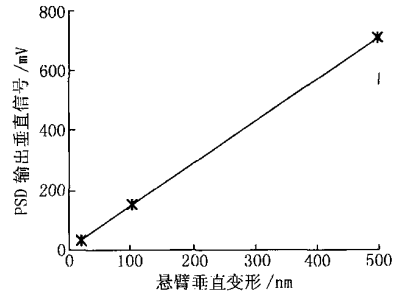


图 5 悬臂垂直变形与 PSD 输出垂直信号之间关系

#### 3.2 参数 $k_h$ 的获取

由于悬臂变形角很小, 有  $\theta \approx \tan\theta$ , 则悬臂弯曲角为:  $\theta \approx \delta_z / l_c = k_v / l_c S_v$ ; 而悬臂扭转角为:  $\theta_t = k_h S_h$ ; 由于 PSD 在垂直和水平方向上具有相同的灵敏度, 也即当悬臂弯曲角等于扭转角时, PSD 输出垂直信号与水平信号相同, 则可得  $k_h = k_v / l_c$ 。此处可算得  $k_h = 0.00565 \text{ rad/V}$ 。

#### 3.3 参数 $k_a$ 的获取

矩形悬臂的扭转强度可以表述为<sup>[11]</sup>:

$$k_{ct} = G\beta\omega b^3 / l_c \quad (5)$$

式中:  $G$  是悬臂材料硅(100)的弹性模量,  $\omega$  是悬臂的宽度,  $\beta$  是取决于比值  $b/\omega$  的常数<sup>[11]</sup>。此处可算得  $k_a = 8.56 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ 。

#### 3.4 参数 $k$ 的获取

由于悬臂弹性常数很难通过实验获得, 因此选用该常数经校准过的探针(N SC15-F5 型, MickoMasch 公司), 其值为  $k = 38.6 \text{ N/m}$ 。

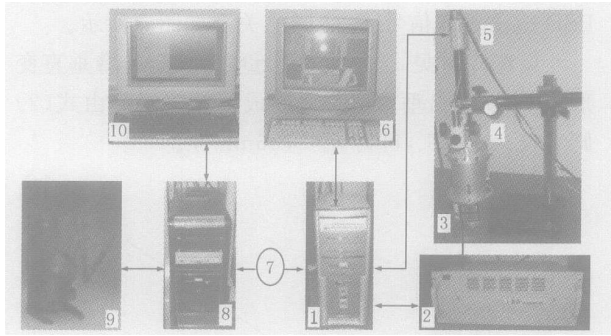
### 4 系统与实验

为了验证纳米操作系统的有效性, 在三维纳米力反馈信息的辅助下, 进行了纳米刻画与 MWCNT 的推动操作实验。

#### 4.1 系统组成

本实验系统采用本原公司的 CSPM-2000wet 型原子力显微镜进行成像与操作。该 AFM 探头所配扫描器的 X - Y 向最大扫描范围为  $50 \mu\text{m} \times$

50 $\mu\text{m}$ , Z 向最大扫描范围为 5 $\mu\text{m}$ , 纳米操作系统组成如图 6 所示。



1 AFM 控制 PC 机 2 AFM 控制器 3 AFM 探头  
4 光学显微镜 5 CCD 相机 6 用于成像与 CCD 观测的显示器 7 网卡 8 力/触觉设备控制 PC 机 9 力/触觉设备 10 人机交互操作界面显示器

图 6 纳米操作系统组成

其中, PC 机 1 中的 A/D 板实时采集探头 3 中 PSD 检测到的悬臂变形信号, 并将此信号通过网卡 7 送到 PC 机 8 中, 在此 PC 机中据式(4)计算出三维纳米力, 再经比例放大后送入力/触觉设备 9, 操作者就可以获得实时三维力感知, 并通过操纵力/触觉设备的操作手柄输出运动命令来控制探针的三维运动。光学显微镜和 CCD 相机主要用于辅助操作者对探针进行粗定位。

#### 4.2 纳米刻画

实验利用 MickoMasch 公司的 NSC15-F5 型探针(探针针尖尖端半径约 10nm, 锥型角小于 20 $^{\circ}$ ), 在聚碳酸酯上刻画字母‘SIA’, 刻画结果如图 7 所示。

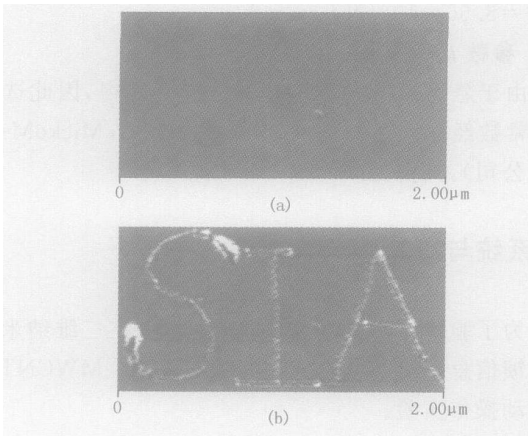


图 7 在聚碳酸酯上进行纳米刻画

由图 7(a)、(b)可见, 纳米刻画得以有效进行, 记录下刻画字母‘S’过程中探针的受力情况如图 8

所示。

刻画实验表明, 借助实时三维力/触觉信息, 可以判断纳米刻画的进展情况, 并依此实时调节施加在探针上的作用力大小, 从而使纳米刻画得以连续而灵活的进行, 并避免探针因受力过大而损坏。

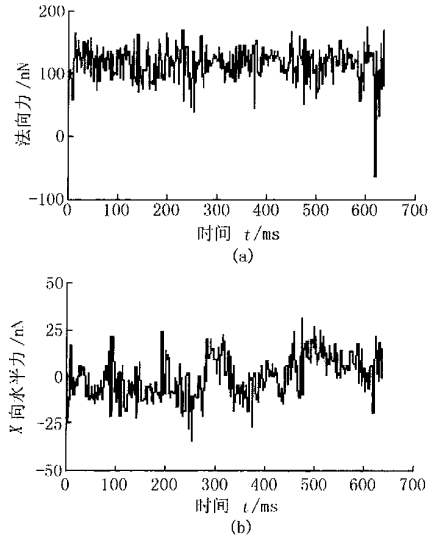


图 8 刻画字母‘S’中探针的受力

#### 4.3 MWCNT 推动

实验时取少量 MWCNT(直径约 100nm、长度约 5 $\mu\text{m}$ )置于乙醇中, 经超声分散后滴于聚碳酸酯表面, 经成像后进行推动操作, 操作结果如图 9 所示。

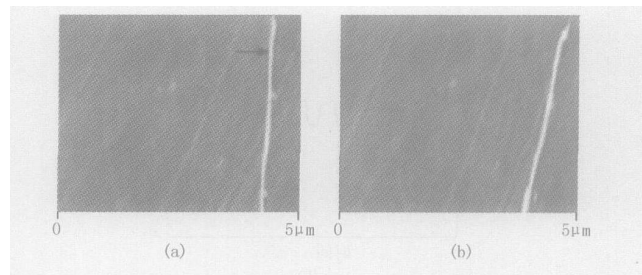


图 9 MWCNT 推动操作(箭头所指为探针操作处)

从图 9(a)、(b)中可以看出, MWCNT 在操作过程中发生了转动, 操作中得到的探针受力情况如图 10 所示。

MWCNT 推动实验表明, 借助实时三维力/触觉反馈信息, 可以实时得知探针在运动过程中对微粒作用与否及作用效果如何, 而无须针对每步操作结果都重新扫描成像来加以验证, 从而可提高操作的效率, 并可避免在操作过程中探针因受力过大而损坏。

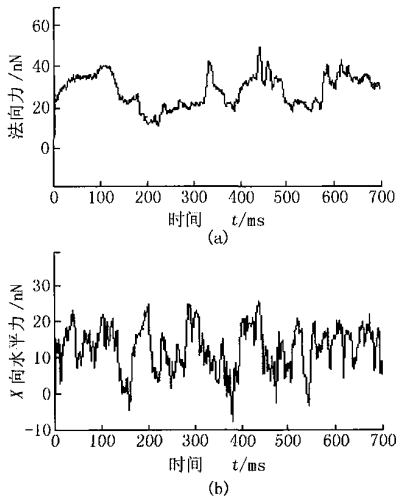


图10 推动MWCNT中探针的受力

## 5 结 论

为了解决纳米操作过程中由于实时反馈信息的缺乏而造成操作效率及灵活性低下、探针易损坏等问题,本文将AFM探针用做三维纳米力传感器,通过对探针受力-悬臂变形进行分析,并根据实时检测得到的反映悬臂变形的PSD信号来获取三维纳米力的大小。将此三维纳米力经比例放大后反馈到力/触觉设备,操作者可以获得实时力及操作进展情况信息,从而依此在线规划下一步的操作,而无须停止操作重新扫描成像来验证该步操作的结果,这样提高了纳米操作的效率与灵活性,并可避免探针因受力过大而损坏。纳米刻画和MWCNT的推动实验验证了该系统的有效性。

下一步研究将根据被操作对象的运动学与动力学模型以及操作过程中的受力情况,实时得出被操作微粒的位置与姿态,以此实时更新操作视觉界面,为操作者提供实时的视觉反馈,以实现具有视觉与力/触觉反馈的纳米操作,进一步提高纳米操作的成功率和灵活性,为研制纳电子、纳机电器件等提供高效灵活的实验平台。

### 参考文献

[1] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(9):

930-933.

- [2] SCHAEFER D M, REIFENBERGER R, PATIL A. Fabrication of two dimensional arrays of nanometer size clusters with the atomic force microscope[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66: 1012-1014.
- [3] JUNNO T, DEPERT K, MONTELIUS L, et al. Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(26): 3627-3629.
- [4] REQUICHA A A G, BAUR C, BUGACOV A. Nanorobotic assembly of two dimensional structures[C]. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1998: 3368-3374.
- [5] HANSEN L T, KUHLE A, SORENSEN A H. A technique for positioning nanoparticles using an atomic force microscope[J]. Nanotechnology, 1998, 9: 337-342.
- [6] SITI M, HASHIMOTO H. Tele nanorobotics using atomic force microscope[C]. Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 1998: 1739-1746.
- [7] GUTHOLD M, FALVO M R, MATTHEWS W G. Controlled manipulation of molecular samples with the nanomanipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(2): 189-198.
- [8] ISRAELACHVILI J. Intermolecular and surface forces[C]. Academic Press London, 1991.
- [9] SADER J E, CHON J W M, MULVANEY P. Calibration of rectangular atomic force microscope cantilever[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(10): 403-405.
- [10] CAIN R G, REITSMAN M G, BIGGS S. Quantitative comparison of three calibration techniques for the lateral force microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72: 3304-3312.
- [11] CASE J, CHILVER L, ROSS C T F. Strength of materials and structures (4th Edition)[M]. Elsevier, 2002.

### 作者简介

田孝军 男 1975年出生 博士 主要研究方向为机器人学 纳米操作与纳米制造。

E-mail: xjtian@sia.cn