

# 机器人化纳米刻画的建模及实时显示研究\*

田孝军, 王越超, 席 宁, 董再励

(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)

**摘 要:** 利用 AFM 探针刻画方式可进行 MEMS 掩膜图案等的制备与修复研究, 本文针对软塑性材料, 建立了 AFM 探针刻画时的刻痕尺寸模型, 依据该模型及探针的实际受力与位置信息, 可得到刻痕的实时位置与尺寸, 并借助虚拟现实技术将刻画过程实时显示在视觉界面上。在上述研究基础上, 操作者可在线控制纳米刻画的过程及结果, 对聚酯基片的纳米刻画实验初步验证了上述模型的有效性。

**关键词:** 机器人化纳米刻画; 刻痕尺寸模型; 实时显示; 原子力显微镜

## Study on modeling and real-time display of AFM based robotic nano-imprint

Tian Xiaojun, Wang Yuechao, Xi Ning, Dong Zaili

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Nano-imprint based on AFM probe may be used in fabrication or repair of MEMS mask pattern. In this research, we propose a nano-scotch size model of plastic material, based on which the scotch's position & size can be obtained according to probe's position & applied force, and then displayed on the visual interface according to virtual-reality (VR) technology. Based on real-time display of nano-imprint process, the operator can elementarily control the imprint process and eventual result, and nano-imprint on polycarbonate verifies the effectiveness of the proposed model.

**Key words:** robotic nano-patterning; nano-scotch size model; real-time display; atomic force microscope

## 1 引 言

近年来, 基于原子力显微镜 (AFM) 的纳米操作成为了微纳制造领域的研究热点。利用硬度较高的 AFM 探针 (如金刚石探针), 有学者对某些硬质材料进行了纳米切削 (或刻画) 加工<sup>[1~3]</sup>。当然, 利用常规 AFM 硅探针, 也可对 MEMS 掩膜等软塑性材料进行图案制备或修复等工作。但是, 若利用常规 AFM 刻画方式, 其所进行的刻画只能采用扫描—规划—刻画—扫描的加工方式, 由于在刻画过程中缺乏实时反馈信息, 无法得知探针的实时刻画效果, 刻画过程需要停

顿下来进行重新扫描成像来验证。显然, 这种刻画方式使得操作者无法对刻画的中间过程以及结果进行实时控制; 另外, 对于复杂的图案刻画任务采用离线编程方式实现起来也非常困难, 这些不足妨碍了基于 AFM 的纳米刻画技术的发展及应用。

针对上述问题, 本课题组在前期研究中已初步实现了对聚碳酸酯刻画过程的视觉显示<sup>[4][5]</sup>, 但对其中深层次的刻画模型描述的不够深入。对此, 本文将进行较深入的分析与阐述, 针对纳米刻画建立起新的刻痕尺寸模型, 依据该模型及探针的实际受力等信息, 将得到刻画时刻痕的尺寸 (宽度或深度), 并根据探针的位置得到刻痕的实时位置, 再借助虚拟现实技术将刻

\* 基金项目: 国家自然科学基金课题 (60635040, 60575060)、863 计划 (2006AA04Z320) 及辽宁省优秀青年科研人才培养基金 (2005220025) 资助

痕位置与尺寸实时显示在视觉界面上。依据刻画过程的实时视觉信息,操作者可在线控制纳米刻画的中间过程及最终结果,实现对纳米刻画的实时控制。对聚酯基片的纳米刻画实验将初步验证了上述模型的有效性。

## 2 塑性材料的纳米刻痕模型

对于纳米刻画过程,由于光学显微视觉技术无法对纳米环境成像,而 AFM 刻画与成像使用同一探针,操作时无法同时进行成像来获取刻画进展的实时视觉信息。为此,本研究将通过建立刻痕尺寸,依据探针的实时受力信息来得到视觉界面上的刻痕尺寸,并根据探针的实时位置确定刻画的位置,借助虚拟视觉技术实时更新视觉操作界面,为操作者提供刻画时的实时视觉显示。

对于刻画较硬的脆性材料,由于其刻痕边缘较易崩裂<sup>[3]</sup>,使得很难建立该类材料刻痕的尺寸模型。这里,我们将主要针对较软的塑性材料(如聚碳酸酯、光刻胶等)进行研究,以用于进行 MEMS 模板的修复与制作等方面,探针对此类材料刻画时的几何模型可描述为图 1 所示。

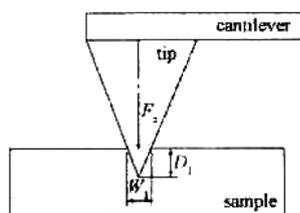


图 1 利用 AFM 探针进行纳米刻画的几何模型

在图 1 中,由于 AFM 探针针尖的锥形角保持一致(如图 2 所示),使得压印的深度与宽度保持一定的比例关系,这样刻痕尺寸可以用刻痕宽度(或深度)来代替。

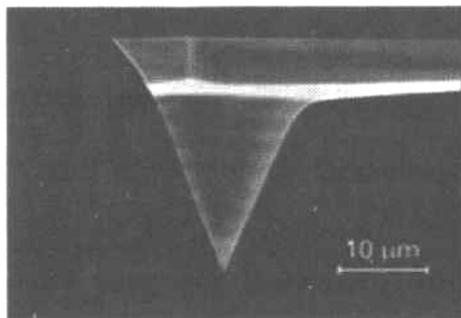


图 2 AFM 探针针尖的扫描电镜图

由于刻痕宽度与探针受力大小、探针针尖尺寸、基片材料的软硬程度等有关,另外,对于不同的成像视觉范围,同样的物理尺寸在视觉界面上显示的宽度也不相同,因而与扫描范围也相关。由此,我们构造了操作界面中的刻痕尺寸模型,可初步表述为:

$$D = f(F_z, R_t, H, S) \quad (1)$$

其中, $D$  为操作界面中刻痕尺寸(宽度); $F_z$  为施加在 AFM 探针上的  $Z$  向力; $R_t$  为探针针尖尺寸; $H$  为被刻画基片材料的硬度; $S$  为 AFM 扫描范围。

进一步的研究表明:由于针尖越细、被刻画材料越软,探针越容易刻画进样本,这样刻痕尺寸与针尖尺寸及样本硬度就成反比;另外,施加的作用力(这里指  $Z$  向力)越大,刻痕的深度越大,也即刻痕宽度尺寸越大;还有,随着扫描范围的扩大,同样的物理尺寸在图像中显得越小,因此图像中的刻痕宽度与扫描范围成反比。基于上述分析,上述刻痕尺寸可以进一步表述为下面形式:

$$D = k_{FS} F_z / S (k_s H R_t + k_c) \quad (2)$$

其中, $k_{FS}$ ,  $k_s$  为比例常数, $k_c$  为修正因子。

在上式中,对于某次刻画实验,由于针尖尺寸  $R_t$ 、基片硬度  $H$  恒定,则刻痕的尺寸主要随施加作用力的变化而变化(在该次操作中其扫描范围  $S$  也恒定),通过对施加在探针上的作用力进行在线调节与控制,就可以实现对刻痕尺寸的在线控制。当然,当扫描范围变化时,相应的刻痕尺寸也会发生成反比的变化。

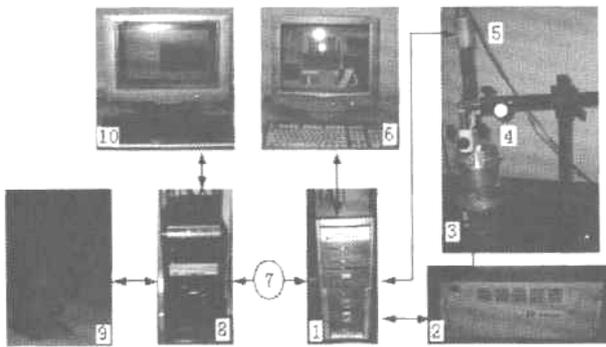
在建立了上述刻痕尺寸模型后,再通过大量实验对其中的三个参数  $k_{FS}$ ,  $k_s$  以及  $k_c$  进行确定及修正,以实现刻画时的界面视觉显示与实际刻痕结果相一致。当然,界面上显示的刻痕位置由探针针尖位置确定(针尖位置根据文[6]所提出方法确定)。

## 3 纳米刻画实验

在上述建模研究的基础上,还研制了基于 AFM 的机器人化纳米操作系统<sup>[2-7]</sup>,将通过纳米刻画实验来验证上述模型的有效性。

### 3.1 系统组成

本实验用 AFM 系统为 CSPM2000 型 AFM,力/触觉装置为 Phantom™ 系列 Desktop 装置,实验系统组成如图 3 所示。



1 AFM 控制用 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/触觉设备控制用 PC 机, 9 力/触觉装置, 10 人机交互操作界面显示器

图 3 机器人化纳米操作系统组成

进行纳米刻画时,其信息获取与操作命令的执行过程如下:1、AFM 对样品进行扫描成像,得到操作前的纳米环境图;2、操作者根据得到的纳米环境,操纵力/触觉设备 9 的操作手柄进行运动,输出位移信号经由计算机 8 处理并通过网卡 7 传输给计算机 1,在计算机 1 中由 D/A 卡将该位移信号(数字量)转化为模拟信号,并输出给 AFM 控制器 2,在控制器 2 中经高压放大后加到 AFM 扫描器上实现扫描器的运动;3、同时,由于扫描器的运动,探针与基片之间作用力会发生变化,从而引起探针悬臂的变形,PSD 检测到此悬臂变形信号,该信号经由控制器 2 通过计算机 1 中的 A/D 卡进行采集,计算机 1 将该信号通过网卡 7 传输给计算机 8,在此计算机内,根据建立的探针悬臂受力模型得出探针所受的三维纳米力<sup>[7]</sup>,经比例放大后输出给力/触觉设备 9,操作者通过操纵杆就能感觉到探针针尖所受三维作用力的大小。

基于上述刻痕尺寸模型,根据实时得到的纳观力及探针位置信息,可实时得到刻痕的尺寸与位置,并据此对界面上的刻画视觉显示进行实时更新,从而实现了刻画过程的实时视觉显示。这样,结合力/触觉设备反馈的力信息,操作者可以对施加在探针上作用力的大小与方向、探针的作用位置及运动轨迹进行在线调节,就实现了对刻画过程及结果的实时调节与控制。

### 3.2 纳米刻画实验

本实验采用 MickoMasch 公司的 NSC15-F5 型探针,该型探针针尖尖端半径约为 10 nm,锥型角小于 20°,其截面为矩形,力常数为 38.6 N/m。针对聚酯材料基片,在实时三维纳米力觉信息与视觉信息的辅助下,对 5 μm 的扫描范围进行了纳米刻画实验,实验结

果如图 4 所示。

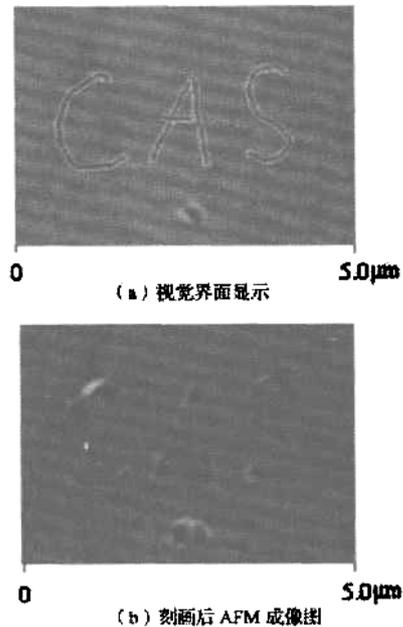


图 4 纳米刻画“CAS”

对比图 4 中(a)与(b),可见界面上刻画的实时视觉显示与实际刻画结果吻合较好,也从一方面初步验证了上述刻痕尺寸模型的有效性。

同时,在纳米刻画过程中,记录下探针所受法向力和 X 向水平力如图 5 所示。

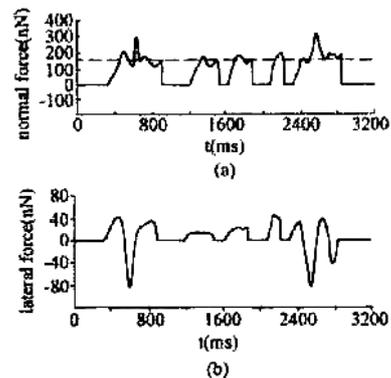


图 5 刻画“CAS”字母过程中的探针受力

从图 5(a)可以看出,由于在刻画过程中 Z 向力控制的较均匀,所得到的刻痕深浅也较均匀(图 7(b)中‘C’字开头较深处对应探针沿轴向前推,对应机器人学的奇异位置,此点刻画深度难控制,可通过调整探针安装方向或轨迹规划来避开此类奇异位置)。

另外,缩小扫描范围,在 2 μm 范围内进行了纳米刻画,刻画过程中的界面显示与刻画结果如图 6 所示。

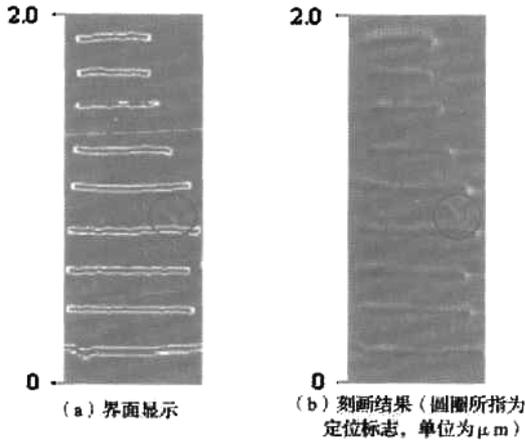


图6 纳米刻画

从图6可以看出,界面显示与实际刻画结果之间也基本吻合(同时也显示出探针具有很高的定位精度)。由于扫描范围缩小为 $2\ \mu\text{m}$ ,对比图4所示的 $5\ \mu\text{m}$ 扫描范围,其刻痕的宽度(粗细程度)成反比变大,这与式(6)刻痕尺寸所述相符合,从而进一步初步证明上述刻痕尺寸模型的有效性。

#### 4 结 论

本文针对软塑性材料,建立了AFM探针纳米刻画时新的刻痕尺寸模型,并根据探针的实际受力及位置得到刻痕的尺寸与位置,依此对视觉界面上的刻画过程进行实时更新,从而实现了纳米刻画过程的实时

视觉显示。根据刻画过程的实时显示(及力反馈信息),操作者可实时调整探针的刻画位置及施加力的大小,刻痕的轨迹与尺寸均可以得到实时控制,与基于AFM的常规刻画相比,刻画的灵活性及效率都可以得到提高。

#### 参考文献

- [1] 赵清亮,等.基于原子力显微镜的纳米加工研究[J].机械工程学报,2003,36(11):64-69.
- [2] 罗熙淳,等.单晶铝纳米切削过程分子动力学模拟技术研究[J].中国机械工程,2000,11(8):860-862.
- [3] VERDYAN A., SOIFER Y. M., AZOULAY J., et al. Nanohardness and crack resistance of HTS YB-CO. thin films [J]. IEEE Trans. on Appl. Supercond., 2005, 15(2): 3585-3588.
- [4] 刘连庆,焦念东,田孝军,等.具有实时视觉/触觉反馈的纳米操作系统[J].高技术通讯,2006,16(1):36-40.
- [5] 焦念东,刘连庆,田孝军,等.具有力觉与视觉反馈的交互式纳米操作系统[J].机器人,2006,28(3):279-284.
- [6] 田孝军,王越超,席宁,等.机器人化纳米操作系统驱动器驱动与探针定位研究[J].排版中,推荐到EI检索的论文,2007,28(7).
- [7] 田孝军,王越超,席宁,等.具有三维力反馈的原子力显微镜纳米操作系统[J].推荐到EI检索的论文,2006,27(7):610-615.