

具有实时视觉/触觉反馈的纳米操作系统

刘连庆^{***} 焦念东^{*} 田孝军^{*} 董再励^{*} 席宁^{*} 王越超^{*}

(^{*}中国科学院沈阳自动化研究所机器人重点实验室 沈阳 110016)

(^{**}中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 由于缺乏实时的传感器信息反馈,导致传统的基于原子力显微镜的纳米操作盲目,操作效率和成功率都非常低。为了克服这一问题,设计和实现了一种具有实时视觉和三维触觉反馈的纳米操作系统。当利用该系统进行纳米操作时,操作者不但可以实时感受到探针与被操作物体间的相互作用力,还可以在 3D 增强现实图像界面中观察到纳米操作场景的变化,并可以在线控制探针的三维运动。这种交互式的操作系统使得纳米操作变得容易可行。纳米刻画实验和多壁碳纳米管的推动实验验证了该系统的有效性和高效率。

关键词 纳米操作,力反馈,视觉反馈,人机交互,原子力显微镜

0 引言

在纳米尺度下进行单个纳米器件的组装已经成为科技研究的一个前沿和热点,目前在机器人意义上依靠相互作用进行装配的方法主要有三种:(1)利用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)进行操作;(2)利用光镊进行操作;(3)利用双向电泳的方法进行操作。其中利用原子力显微镜进行纳米操作是目前最为广泛应用的一种方法,许多学者对此都作了大量的研究,比如 Kim 和 Lieber 通过增加 AFM 扫描时的负载,验证了表层薄氧化物结构的重组^[1], Junno 等人在常规环境下,通过控制单个 GaAs 微粒(直径 30 纳米)的推动,证明可以构成任意纳米结构^[2]等。但是传统的基于 AFM 的纳米操作存在一个问题:在操作过程中缺乏实时的视觉和触觉反馈,只能依靠离线编程来进行操作。操作者完全是在一种盲目的状态下进行操作,对实际操作过程中所发生的情况一无所知,而且操作的每一步都需要进行重新成像验证,这往往需要花费好几分钟的时间,这种扫描-规划-操作-扫描的方法显然非常耗费时间,而且由于纳米尺度下物体的运动模型难以建立精确,使得复杂操作任务离线编程非常困难,并且会产生很大误差,这也使得离线编程的成功率极低,这些都大大阻碍了基于 AFM 纳米操作的广泛应用。

为了克服这个问题,我们设计了一种具有实时视觉和三维触觉反馈的纳米操作系统。该系统不但可以为操作者提供实时的视觉/触觉反馈,还可以让操作者通过 Haptic 装置的操纵杆在线控制探针的三维运动,因而可实现具有实时力感与可视图形反馈的人机交互式纳米操作。

1 系统介绍

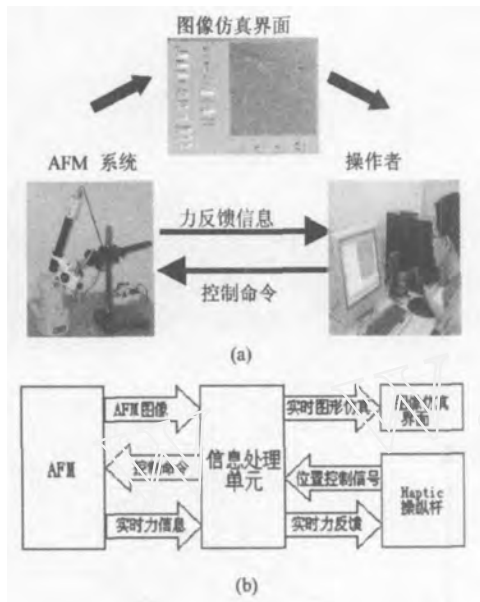
该系统由 AFM 本体(纳米操作执行器)、信息处理单元(用于操作信息、传感器反馈信息的传输、转换和处理)、图像仿真界面(操作场景图形仿真)、具有力感觉的探针运动操作机械装置等构成,图 1 为系统结构示意图。

该系统可以完成如下功能:(1)作用力的生成与感知,即实时采集 AFM 系统提供的操作状态传感器信号,将其在力的分解模型作用下生成相应的电信号,经 Haptic 机电系统转换生成 X、Y、Z 三个方向上的机械力,这种力作用在 Haptic 的操作手柄上,可以使操作员感受到纳米尺度下操作力的存在和大小;(2)纳米操作环境可视化图形仿真,它由信息处理单元根据 AFM 扫描图像和对象的运动学模型生成,并根据操作动作信号实时更新,为操作者提供可视化的实时操作图形界面,以辅助操作者进行操作,提高操作效率和操作精度;(3)交互式探针动作控

863 计划(2003AA404070;2002AA422210)资助项目。
男,1980 年生,博士生;研究方向:机器人化纳米装配;联系人,E-mail:lqiu@sia.cn
(收稿日期:2005-04-12)

制,即操作员通过对操作手柄的操作(推、拉、刻划、敲击等)动作,经 Haptic 装置的机电信号转换,在线传递到 AFM 控制探针产生相应的三维运动。

检测出被检测样品的表面形貌,其检测原理如图 2 所示。



(a) 纳米操作系统示意图:左边为 AFM 系统,右边为操作者,系统为操作者提供实时的视觉反馈和触觉反馈,操作者在线控制探针的三维运动;(b) 系统信号传递框图

图 1 系统结构示意图

我们在系统的图形仿真界面上引入了虚拟现实技术对操作场景进行仿真。我们这里没有采用三维仿真的办法,而是采用二维平面视图,但是用颜色来弥补第三维,不同的地貌用不同的颜色进行代表,因此,操作者仍然可以得到操作场景的三维信息。

2 触觉反馈和视觉反馈的实现

对探针-悬臂受力变形进行分析得到探针与被操作物体相互作用纳米力的大小,放大合适的倍数后通过 Haptic 操纵杆反馈给操作者,实现触觉反馈,触觉反馈力是探针与被操作物体相互作用力的真实再现;根据被操作物体的运动学模型以及操作过程中的受力情况,计算出其运动状态,并以此实时更新视觉仿真界面,为操作者提供视觉反馈。

2.1 触觉反馈:三维纳米力的感知

AFM 的工作原理是利用一束激光照射到针尖的悬臂梁上,再反射到四象限 PSD(光电探测器)上。当针尖在样品表面扫描时,针尖随着样品表面的形貌发生上下起伏及侧向的扭转运动,悬臂梁的这些运动将使照射到 PSD 的光斑发生偏移,这样就可以

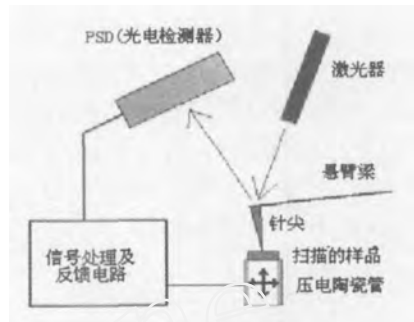
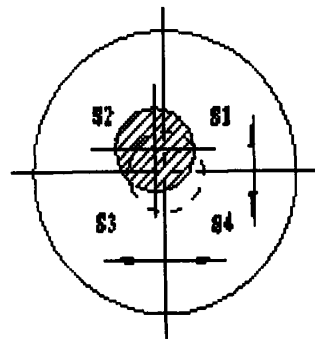


图 2 AFM 成像原理图

四象限 PSD 检测原理如图 3 所示。



$S_1 \sim S_4$ 代表四个光电检测器的输出

图 3 四象限 PSD 检测原理图

AFM 探针悬臂-探针受三维纳米力作用模型如图 4 所示。

设 PSD 的垂直方向和水平方向的输出分别为 S_v, S_h ,那么有以下关系式成立:

$$S_v = \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)}$$

$$S_h = \frac{(S_1 + S_4) - (S_2 + S_3)}{(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)}$$

当利用 AFM 进行纳米操作时,由于探针针尖与被操作物体间的相互作用,PSD 的输出信号随着相互作用力的大小而改变,经分析可以知道:PSD 的输出与探针所受作用力之间存在唯一的函数关系^[3],其关系式如下:

$$F_x = \frac{k_t K_f}{h_t} S_h \quad (1)$$

$$F_y = -F_x \text{ctg } \alpha \quad (2)$$

$$F_z = k K_n S_v - \frac{h_t}{l_c} F_y \quad (3)$$

这里 K_t 和 K_n 是系统参数,需要测量,参考文献 [4] 提供了测量方法。其中 k_t 是悬臂梁的扭曲常数, k 是悬臂梁的弹性系数, h_t 代表探针针尖到悬臂梁中心的距离, l_c 代表悬臂梁的长度; θ 代表探针的运动方向和悬臂梁轴线 y 之间的夹角; S_v, S_h 是 PSD 垂直方向和水平方向的输出信号。将计算出的三维力放大合适的倍数后,通过 Haptic 装置的手柄输出,真实再现了探针与被操作对象间相互作用力,实现了纳米操作中力信息的感知。

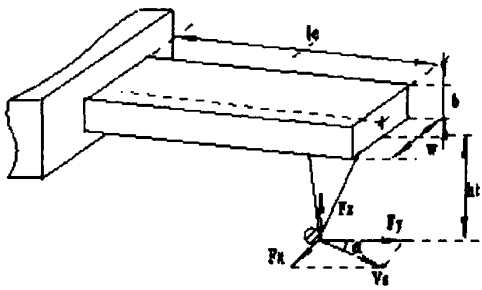


图4 AFM 探针悬臂-探针受三维纳米力作用模型

2.2 视觉反馈:被操作物体运动学建模

AFM 的成像原理决定了其不可能有实时的视觉反馈,因此,我们在这里引进了虚拟现实技术,依靠被操作物体的运动学模型以及操作动作来实时更新图像仿真界面,这样在操作者看来就如同实时的视觉反馈一样,但是操作者眼前实时更新的操作场景只是一种仿真,真实的操作场景对于操作者来讲依然是不可见的,图像仿真界面的可信度取决于被操作物体运动学模型建立的好坏,从这个意义上讲,物体的运动学模型建立得越好,那么视觉仿真界面就越能反映实际的操作场景。在这里我们借鉴 Xi^[5] 对于纳米管线的建模结果,这里只简单介绍一下建模思想:当纳米管线受到探针的推动力后,由于探针的针尖与纳米管相比很小,可以将纳米管受到探针的作用力视为一个点受力来分析,其受力情况可简化为图 5 所示。

当纳米棒在探针的推动下缓慢移动时,应处于自平衡状态,其所受外力合力矩应为零,因此得到下面的等式:

$$F(l - s) = \frac{1}{2}f(L - s)^2 + \frac{1}{2}fs^2$$

可以得到 F 的表达式如下:

$$F = \frac{f(1-s)^2 + fs^2}{2(1-s)}$$

由上式可以看出,一定存在一个距离 s 可以使 F 最

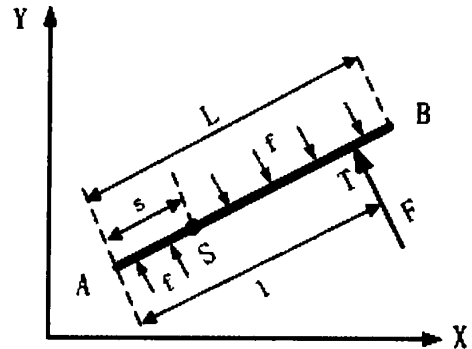
小,也就是说当 F 达到这个最小值 F_{\min} 时,纳米棒开始旋转, s 通过对上式求一阶导数得到:

$$\frac{dF}{ds} = 0 \Rightarrow s^2 - 2ls + lL + \frac{L^2}{2} = 0$$

我们可以得到当纳米棒旋转时静态点距离端点的距离 s 为:

$$s = \begin{cases} l + \sqrt{l^2 - lL + L^2/2} & l < L/2 \\ l - \sqrt{l^2 - lL + L^2/2} & l > L/2 \end{cases}$$

进一步分析得到:当 $l = L/2$ 时,旋转点没有唯一解,因此我们应该避免将探针作用点刚好在纳米管线的正中央,另外,经过分析易知 Z 字形的推动轨迹以及推动方向与纳米管的轴线相垂直,可以使所建立的模型与实际情况吻合较好。



T 是探针的作用点, S 是静止点位置, s 代表静止点到纳米管一端的距离, L 是纳米管长度, l 是探针作用点到一端的距离, f 是纳米管旋转时受到基底阻力的线密度。

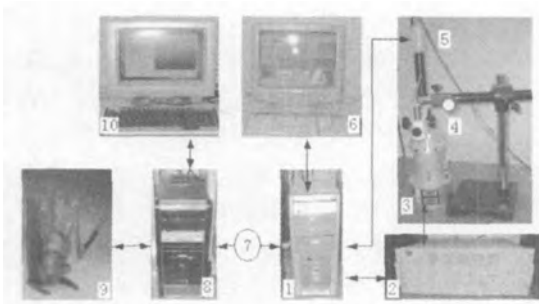
图5 纳米管受力分析

3 实验测试和验证

为了验证上述理论的正确与否,以及该系统进行纳米操作的效率,我们进行了纳米刻画与多壁碳纳米管(multi wall carbon nano tube, MWCNT)的推动实验。

3.1 系统组成及工作流程

本实验采用的是由中科院本原仪器公司生产的 CSPM2000 型 AFM,该 AFM 在 $X-Y$ 上的最大扫描范围是 $50\mu\text{m}$, Z 向最大伸缩范围是 $5\mu\text{m}$, Haptic 触觉装置采用 PhantomTM (Sensable Co., USA) 系列 3D Desktop 操作杆,它具有 6 个自由度,在 3 个自由度方向上具有力反馈功能。本实验系统的实物构建见图 6。



1:AFM 控制计算机;2:AFM 控制柜;3:AFM 探头;4:光学显微镜;5:CCD 照相机;6:成像监视器;7:以太网;8:与 Haptic 装置相连的计算机;9:触觉反馈装置;10:场景仿真界面

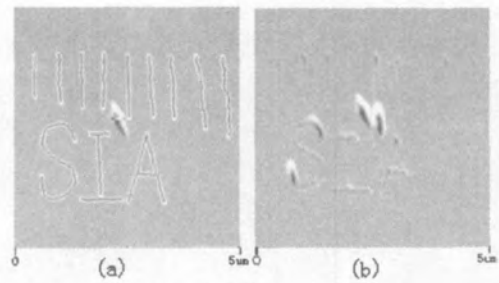
图 6 具有视觉和触觉反馈的纳米操作系统

当利用该系统进行纳米操作时,系统工作流程如下:AFM 对样品进行扫描成像,提供作业环境和对象的基本数据,生成操作环境仿真图形;操作者通过观察操作环境和对象状态,使用 Haptic 操作手柄进行操作,输出位移信号;位移信号从 Haptic 装置由计算机 8 解释并通过以太网 7 传输给计算机 1;计算机 1 将由该位移信号的数字量转化为 AFM 位置控制量;该控制量输入到控制柜 2 的 PZT 驱动器后加到压电陶瓷上,控制陶瓷管的微运动;陶瓷管的运动使探针与被操作样品间的作用力发生改变;光电检测器检测到探针受力产生的形变检测信号,将该信息通过控制柜后,以模拟信号通过 A/D 转换卡输入到计算机 1;计算机 1 将该形变检测信号通过以太网 7 传输给计算机 8;在计算机 8 内,根据建立的悬臂梁受力变形模型将其解释为受力信号,计算出应输出到 Haptic 电信号的大小,同时根据建立的被操作对象的运动学模型,计算出被操作物体的运动姿态,更新监视器 10 中的操作场景仿真界面;Haptic 装置将计算机输入的电信号转化为机械力,输出到操作杆,反馈给操作者。操作者根据操作场景图形仿真界面的视觉显示,结合 Haptic 装置输出的力信息,进行相应的纳米操作,同时规划出下一步的操作策略,然后回到步骤 1。如此反复,直到纳米操作顺利完成。上述操作的信号传递与生成均具有实时性,因此人的操作在感觉上是与动作同步的,可实现具有实时力感与可视图形的人机交互式纳米操作。从控制角度来讲,将传统的规划-操作-扫描验证-规划的开环操作流程变为实时的闭环操作流程。

3.2 纳米刻画实验

本实验利用 MickoMasch 公司的 NSC21 型探针,该探针针尖尖端半径约为 10nm,锥型角小于 30°,探

针长度约为 20 μm ,刻画区域为 5 μm × 5 μm ,刻画了几笔竖线和字母 SIA,实验结果如图 7 所示。



(a) 表示视觉反馈界面上的实时显示;
(b) 重新扫描成像得到的实际刻画结果

图 7 纳米刻画实验结果

图 7(a) 上的所有笔画都是实时显示在仿真界面上的,为了验证系统的有效性,我们自左向右,由短到长刻画了 9 笔竖道,然后又书写了 SIA 三个字母。当这全部完成后,我们重新扫描一幅图像来验证界面实时显示和实际刻画结果是否一致。从图 (b) 来看,界面的实时显示与实际刻画效果吻合较好,验证了系统对纳米刻画的有效性。

图 7(b) 中心多出的深痕是在第二次扫描开始时探针冲击形成的。当我们进行纳米操作的时候,必须把扫描过程中用于控制探针 Z 向闭环的反馈信号关掉,这样探针才能完全根据操作者发出的指令运动。在第二次扫描开始时,需要打开控制 Z 向闭环的反馈信号,由于操作时实际检测 PSD 信号与参考值相差较大,致使反馈给控制器的误差信号较大,因而产生的扫描器 Z 向驱动信号非常大,样本台突然逼近探针,就形成了图 (b) 中心的冲击孔。

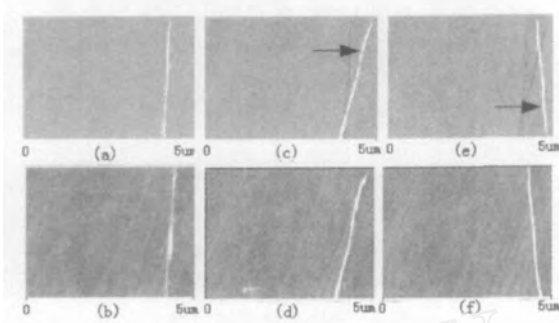
3.3 推动多壁碳纳米管

对于直径约为 100nm,长度约为 5 μm 的 MWCNT 用超声分散后滴于聚氨酯表面,进行推动实验,实验结果见图 8。

图 8(a) 显示的是一根碳纳米管在图形仿真界面中;(c) 显示的是经过一次推动后,图形仿真界面实时显示的推动结果,箭头表示探针推动位置;(d) 显示的是重新扫描成像得到的实际推动结果;按造 Z 字形的推动策略进行第二次推动,推动点位置如图 8(e) 中箭头所示;(e) 和 (f) 分别表明图形仿真界面实时显示的推动结果和重新扫描成像得到的实际推动结果。

需要说明的是我们可以把两次推动合并起来完成,而不需要重新扫描成像,这里扫描成像的目的就

是为了验证界面实时显示的结果和实际操作的结果是否一致,从实验结果来看,界面的实时显示和实际的推动结果几乎完全一致,这验证了模型的正确性和系统进行纳米操作的能力。



(a) (c) (e):视觉反馈界面的实时显示图像;
(b) (d) (f):AFM扫描得到的实际操作结果

图8 多壁碳纳米管推动实验

4 结论

纳米刻画和 MWCNT 推动的顺利实现,证明了该系统用于纳米操作的先进性和实用性。利用该操作系统,避免了利用 AFM 进行操作缺乏实时传感器信息反馈的缺点。该系统另外一个优点就是在实时

视觉/触觉反馈的同时,操作者又可以在线控制探针的三维运动,于是,操作者可以根据反馈信息,决定下一步的操作策略,这样人作为控制器就加入到操作系统中来,使传统的基于 AFM 开环纳米操作变成了实时人机交互式的闭环操作,大大提高了纳米操作的效率和成功性,好几步的纳米操作可以合在一起完成,而不需要进行重新扫描成像来验证。这就为纳米操作、加工提供了具有实际意义的关键技术。

参考文献

- [1] Kim Y, Lieber C M. Machining Oxide Thin Films with an Atomic Force Microscope: Pattern and Object Formation on the Nanometer Scale. *Science*, 1992, 257: 375-377
- [2] Junno T, Deppert K, Montelius L, et al. Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope. *Appl Phys Lett*, 1995, 66: 3627-3629
- [3] Xiao J T, Liu L Q, Jiao N D, et al. 3D Nano Forces Sensing for An AFM Based Nanomanipulator. In: International conference on information acquisition, 2004 Hefei, 208-212
- [4] Ogletree D F, Carpick R W, Salmeron M. Calibration of frictional forces in atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67: 3298-3306
- [5] Li G Y, Xi N, Chen H P, et al. Assembly of nanostructure using AFM based nanomanipulation system In: Proceedings - 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. 428-433

An AFM based nanomanipulation system with real-time visual and force feedback

Liu Lianqing^{***}, Jiao Niandong^{*}, Tian Xiaojun^{*}, Dong Zaili^{*}, Xi Ning^{*}, Wang Yuechao^{*}

(^{*} Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract

An AFM based nanomanipulation system with real-time visual and force feedback is developed aiming to overcome the problem of low manipulation efficiency and effectiveness in the traditional AFM based nanomanipulation because of its lack of real-time sensory feedback. During nanomanipulation, the system can not only provide the operator with real-time visual feedback which displays the real-time nano-environment and a real-time dynamic tip position, but also let the operator feel the 3-D real-time operation force. Furthermore, the operator can directly control the tip 3-D motion of AFM through a joystick, which makes AFM based nanomanipulation feasible and applicable. The nano-lithography and MWCNTs pushing experiments demonstrate the efficiency and effectiveness of the system.

Key words: nanomanipulation, force feedback, visual feedback, human computer interaction, AFM