

햅틱인터페이스를 이용한 나노스케일 가상표면에서의 나노리소그래피

김 성 관*

공주대학교 기계자동차공학부

Nanolithography Using Haptic Interface in a Nanoscale Virtual Surface

Sung-Gaun Kim*

Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

(Received 13 March 2006 ; accepted 7 April 2006)

Abstract

Nanoscale task such as nanolithography and nanoindenting is a challenging work that is beyond the capabilities of human sensing and precision. Since surface forces and intermolecular forces dominate over gravitational and other more intuitive forces of the macro world at the nanoscale, a user is not familiar with these novel nanoforce effects. In order to overcome this scaling barrier, haptic interfaces that consist of visual and force feedback at the macro world have been used with an Atomic Force Microscope (AFM) as a manipulator at the nanoscale. In this paper, a nanoscale virtual coupling (NSVC) concept is introduced and the relationship between performance and impedance scaling factors of velocity (or position) and force are explicitly represented. Experiments have been performed for nanoindenting and nanolithography with different materials in the nanoscale virtual surface. The interaction forces (non contact and contact nanoforces) between the AFM tip and the nano sample are transmitted to the operator through the haptic interface.

Keywords: Haptic interfaces, Nanorobotics, Nanolithography, Teleoperation control, Nanotechnology

1. 서 론

나노 스케일 구동 및 제어를 다루는 Nano-Robotics 기술은 나노 단위의 연구에 핵심이 되는 기반 기술이다. Nano-robot (또는 Nano-manipulator)를 통한 나노 스케일 물체의 정확한 구동 및 제어는 나노 구조물 제작/변형/합성, DNA 조작, 양자 소자 개발, 나노크기의 로봇/기계, 새로운 센서개발, 테라 바이트 메모리 분자 조작 등 그 응용분야가 매우 크다.

최근 AFM(Atomic Force Microscope)을 nano indentation 또는 nano lithography 등의 나노작업에 이용하고 있다. 그런데, 나노 조작(nano indentation 또는 lithography)시에 미시 나노스케일 세계에 사용자가 직접 액세스하여 조작하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하고, 신뢰성 있는 조작을 위하여 최근

에는 시각, 촉각, 역감과 같은 인간의 감성(또는 human intelligence)에 근거한 Haptic Interface을 이용하여, Macro-scale인 인간의 동작이나 조작을 감지하여 이를 Nano-scale의 원격-나노조작에 구현하려는 노력들이 활발하게 진행되고 있다¹⁻⁵⁾.

특히 AFM(Atomic Force Microscope)을 나노 메 뉴플래이터로 이용할 때, 실제 나노 조작시 실시간 visual feedback을 받을 수 없다는 단점이 있다. 이를 해결 하기 위하여 최근 나노스케일 가상환경을 구현하여 이용하는 연구가 진행되고 있다⁵⁻⁷⁾.

나노스케일 가상환경(nano world)과 실제 원격제 어자의 스케일(macro world)은 길이차원의 차이가 대단히 크고, 서로 물리적 지배 방정식이 상이하다. 그러므로, 매크로-나노 햅틱 인터페이스시에 나노스케일에서의 힘 반향감(reflecting force)을 매크로 환경의 원격조작자에게 적절한 임피던스(Impedance) 재현을 통하여 느끼게 해 주어야 한다. 본 논문에서는 이러한 임피던스 재현을 위하여

*Corresponding author. E-mail : kimsg@kongju.ac.kr

NSVC(nano scale virtual coupling)의 $Z\text{-width}^{11)}$ 개념을 도입하고, Omega[®] 햅틱장치와 Carnegie Mellon Univ.의 Nanorobotics LAB에서 구축한 나노스케일 가상환경을 이용하여 나노 인덴팅과 리소그래피 실험을 수행한다.

2. 전체시스템 개요

2.1 개요

그림 1은 나노 매니퓰레이터로 이용되는 AFM의 구동원리를 나타내고 있다^{8,9)}. 본 논문에서는 AFM 팁과 나노 표면과의 상호 작용 힘을 모델링 하기 위하여, 접촉 모델(contact model)은 MD(Maugis-Dugdale) 접촉모델을 사용하였고, 비접촉 나노 힘

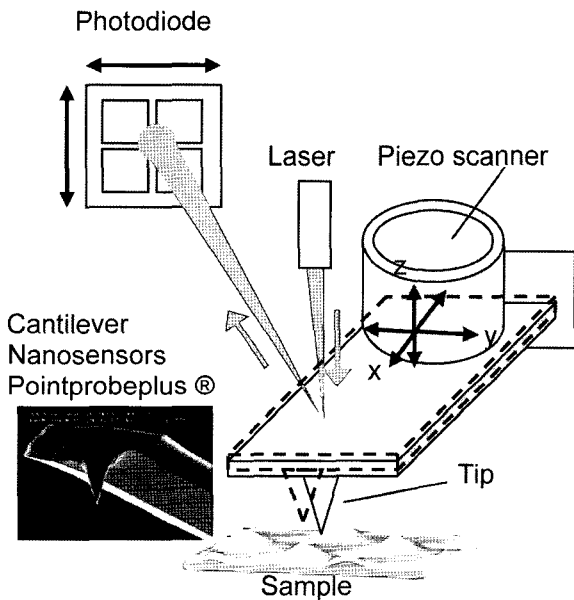


Fig. 1. AFM (Atomic Force Microscope).

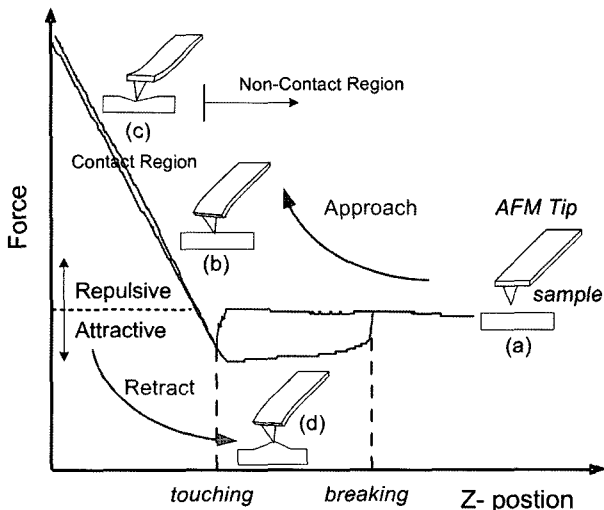


Fig. 2. Non-contact and contact MD force models in the NVE.

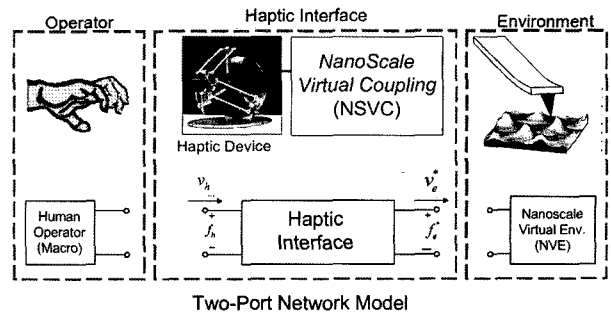


Fig. 3. Tele-nanomanipulation overall system as a two-port network model.

(van der Waals forces와 capillary forces)을 모델링 하였다¹⁾. 이때의 상호 작용 힘을 나타낸 그림이 그림 2이다.

또한 그림 3은 나노-원격조작을 위한 전체시스템을 2-port network 모델^{12,13)}로 표현한 그림으로, 사람, 햅틱 인터페이스, 나노스케일 가상환경으로 구성되어 있다.

2.2 오퍼레이터

Hogan의 실험을 근거로 하여 볼 때, 원격조작자(사람)는 전체 시스템의 불안정(unstable)을 인위적으로 야기하지 않는다고 가정할 수 있다¹⁴⁾.

2.3 햅틱인터페이스

그림 3에서 나타낸 바와 같이, 햅틱 인터페이스는 햅틱장치(햅틱 디스플레이)와 본 논문에서 제안한 NSVC로 이루어져 있다. 나노스케일 가상환경(NVE)의 contact surface와 Omega[®] 햅틱 장치는 NSVC와 그림 4에 나타난 것처럼 연계되어 있다. 여기서 v_c^* 는 햅틱장치에서의 출력이고, f_c^* 는 햅틱 디스플레이로의 입력이다. 이 때 "*"는 이산 파라미

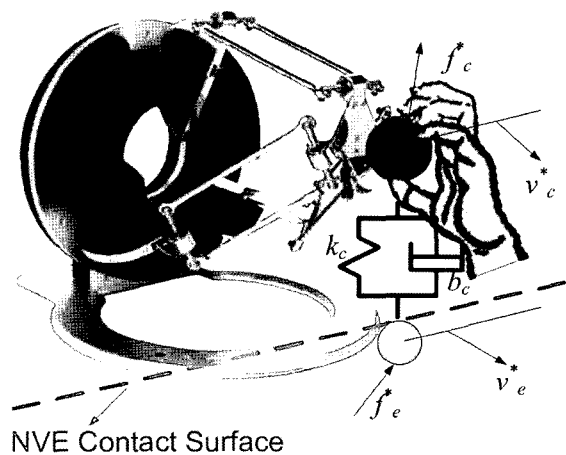


Fig. 4. Nano scale virtual coupling (NSVC) - spring and damper model.

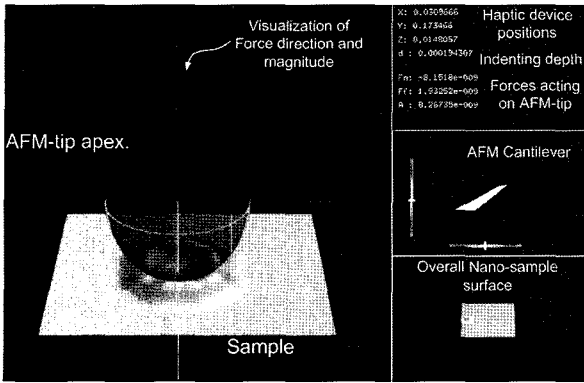


Fig. 5. Nanoscale virtual environment experiment for telemanipulation⁴⁾.

터를 나타낸다. 또한 NVE는 impedance display로써, 위치(혹은 속도)가 입력이고, 힘이 출력이다. Omega[®] 햅틱 장치는 delta 병렬로봇 매커니즘으로 구성되어 있는 3 자유도 장비로써, 그 작업영역은 88 mm 직사면체이고, 최대 반력은 20 N 정도이다.

2.4 나노스케일 가상환경

나노스케일 가상환경은 AFM과 나노표면과의 상호반응을 모사하기 위하여 개발되었으며, 그림 5에 나타나 있다. 여기서, AFM 팁은 구로 모사 되어 있고, 구 위의 화살표는 팁에 작용하는 힘의 방향과 크기를 나타낸다. 또한 cantilever의 변위와 나노 표면을 모사 하였다. 선형 굽힘 빔 모델을 AFM probe 모델링에 사용되었으며, 나노 샘플 표면을 스플라인(spline)을 이용하여 모델링 하였다.

3. 원격-나노 조작 제어

3.1 Hybrid Matrix

원격-나노 조작을 위한 전체 제어 아키텍처를 그림 6에 나타내었다. 여기서 햅틱 인터페이스는 2 포트 네트워크로 모델링 되었으며, 조작자와 가상환경의 동역학은 임피던스 $Z_h(s)$, $Z_c(z)$ 와 외력

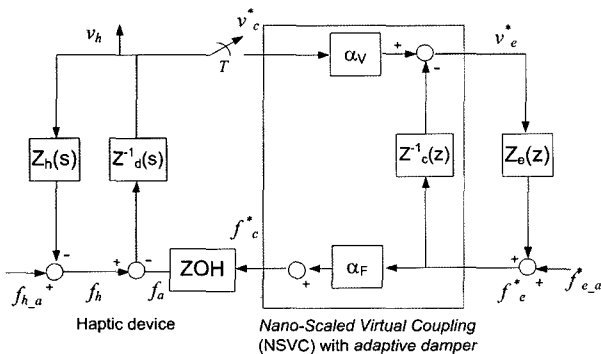


Fig. 6. The tele-nanomanipulation control architecture.

f_h^a 와 f_c^a 로 다음 식과 같이 묘사될 수 있다¹⁵⁾.

$$\begin{aligned} f_h &= f_{h_a} - Z_h(s)v_h \\ f_c^* &= f_{c_a}^* + Z_c(z)v_c^* \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, v_h 와 v_c^* 는 조작자와 나노메뉴플레이터의 속도를 각각 나타내고, f_h 는 조작자에 의한 햅틱장비에 가해지는 힘과 f_c^* 는 나노스케일 가상환경에서 AFM 팁으로 가해지는 힘을 나타낸다.

Omega[®] 햅틱장치의 동역학은 Tustin 방법을 사용하여 다음과 같은 임피던스로 모델링을 할 수 있다¹²⁾.

$$Z_d(z) = (ms + b) \Big|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (2)$$

여기서, aliasing 효과는 무시할 수 있고, 샘플러는 $1/T$ 의 정적계인으로 가정할 수 있다.

햅틱 디스플레이의 이산화된 하이브리드 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -v_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & ZOH(z) \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ f_c^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, zero order holder는 다음과 같이 표현된다.

$$ZOH(z) = \frac{1(z+1)}{2z}$$

또한, 햅틱 장치와 나노스케일 가상환경과의 속도(위치) 및 힘의 정보는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} v_c^* &= \alpha_v v_c - \frac{1}{Z_c(z)} f_c^* \\ f_c^* &= \alpha_f f_c^* \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, α_v 와 α_f 는 각각 속도와 힘의 스케일링 계수를 나타낸다. Z_c 는 virtual coupling 임피던스를 나타내고, 아래와 같이 모델링 될 수 있다.

$$Z_c(z) = \left(b_c + \frac{k_c}{s} \right) \Big|_{s \rightarrow \frac{z-1}{Tz}} \quad (5)$$

따라서, NSVC가 포함된 전체 하이브리드 행렬은 아래의 식과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -v_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & \alpha_f \cdot ZOH(z) \\ -\alpha_v & \frac{1}{Z_c(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ f_c^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 NSVC 및 임피던스 스케일링

원격작업자(teleoperator) 없이 마치 직접적으로 작업할 때의 느낌(feeling)을 조작자에게 전달할 수 있는 정도를 transparency 혹은 fidelity라고 정의한다¹⁰⁾. 이는 햅틱 인터페이스의 성능을 나타내는 개념이기도 하다. Colgate와 Brown¹¹⁾은 이러한 성능지수를 나타내기 위하여, 임피던스 범위를 Z-width라는 개념으로 도입하였다. 따라서, 본 논문에서도 나노스케일 가상환경과 햅틱 인터페이스 작업시, 원격 조작자에게 전달되는 임피던스(Z_t)의 허용 상하범위를 성능지수로 한다.

그림 6에서 나노스케일 가상환경의 포트를 단락시키면 ($f_c^* = Z_c(z)v_c^*$), 가상환경의 임피던스(Z_c)는 다음과 같은 임피던스(Z_t)로 전달된다.

$$Z_t = Z_d(z) + \frac{\alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) Z_c}{Z_c(z) + Z_c} \quad (7)$$

Z-width의 허용 하향 범위는 $Z_c \rightarrow \infty$ 일 경우(즉, $f_c^* = 0$, short circuit) 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Z_{t, \min} = Z_d(z) \quad (8)$$

또한 Z-width의 허용 상향 범위는 $Z_c \rightarrow \infty$ 일 경우(즉, $v_c^* = 0$, open circuit) 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Z_{t, \max} = Z_d(z) + \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) \quad (9)$$

따라서, Z-width는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Z_{t, \max} = Z_{t, \min} + \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \cdot ZOH(z) \quad (10)$$

식 (10)에서 Z-width는 임피던스 스케일링 계수 ($\alpha_v \alpha_F$)와 비추열 커플링 임피던스($Z_c(z)$)로 표현된다. 따라서 NSVC는 다음과 같이 정의된다.

$$NSVC = \alpha_v \alpha_F \cdot Z_c(z) \quad (11)$$

사람의 인지 범위에 대해, transparency의 성능을 향상 시키기 위해서는 햅틱인터페이스시에 넓은 임피던스 범위(Z-width)를 재현할 수 있어야 한다. 이러한 Z-width를 증가하기 위해서는 식 (10)에서 나타난 바와 같이, 임피던스 스케일링 계수($\alpha_v \alpha_F$) 크게 하거나, 비추열 커플링 임피던스($Z_c(z)$)를 크게 하면 된다. 만약 햅틱인터페이스가 절대안정(absolutely stable) 하면, Z-width는 구현 가능한 상하향 범위의 임피던스 영역을 나타낸다¹¹⁾.

만약 나노스케일 가상환경과 조작자 사이의 속도(혹은 위치) 스케일링 계수를 α_v 라면, 임피던스 스케일링 계수($\alpha_v \alpha_F$) 선정 문제는 힘 스케일링 계수(α_F) 선정 문제로 단순화 된다. 그러므로, 햅틱 인터페이스의 성능지수인 Z-width를 증가하기 위하여, 힘 스케일링 계수를 증가시키면 된다고 생각할 수 있다. 그러나, 재현할 수 있는 햅틱 장비의 한계성 및 햅틱 인터페이스의 안정성 문제 때문에 그 한계가 있다¹³⁾.

Goldfarb¹⁷⁾은 차원해석(dimensional analysis)법을 통하여 힘 스케일링 계수(α_F) 선정하였다. 높은 표면 점착(surface adhesion), 즉, 큰 AFM 팁의 반경과 높은 점착에너지 일 경우는 $\alpha_F = 1/\alpha_v$ 를, 작은 adhesion 힘일 경우는 $\alpha_F = 1/\alpha_v^2$ 으로 선정할 때 더 좋은 성능이 나타남을 보였다. 즉 나노 샘플의 hardness나 task에 따라서, 이러한 힘 스케일링 계수(α_F) 다르게 선정하여야 한다.

4. 실험

Fig. 7에 나타낸 세가지 종류의 task와 표 1의 물질들에 대하여 실험을 행하였다. Task (a)는 나노 표면에 대하여 일정거리를 유지(10~20 nm)하는, 탄소 나노튜브나 나노 입자를 나노표면에서 푸싱하는 작업을 나타낸 것이다. Task (b)와 (c)는 nanolithography나 indenting 작업을 나타낸다.

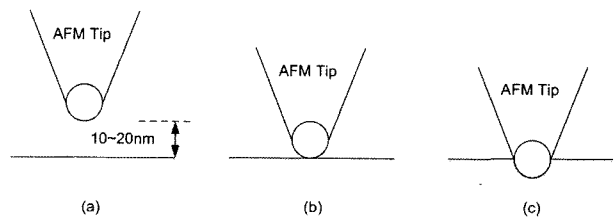


Fig. 7. Nanomanipulation tasks: (a) Small distance (10-20 nm) above the nano sample surface, (b) Contact on the surface, (c) Some distance below the surface (valid for only deformable surfaces).

Table 1. Sampled material properties¹⁸⁾

| Material | Young's modulus (GPa) | Surface energy (J/M ²) | Poisson's ratio |
|------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| Silicon Oxide | 70 | 0.2 | 0.27 |
| Polystyrene | 2 | 0.066 | 0.4 |
| Silicone Rubber (PDMS) | 0.001 | 0.022 | 0.5 |

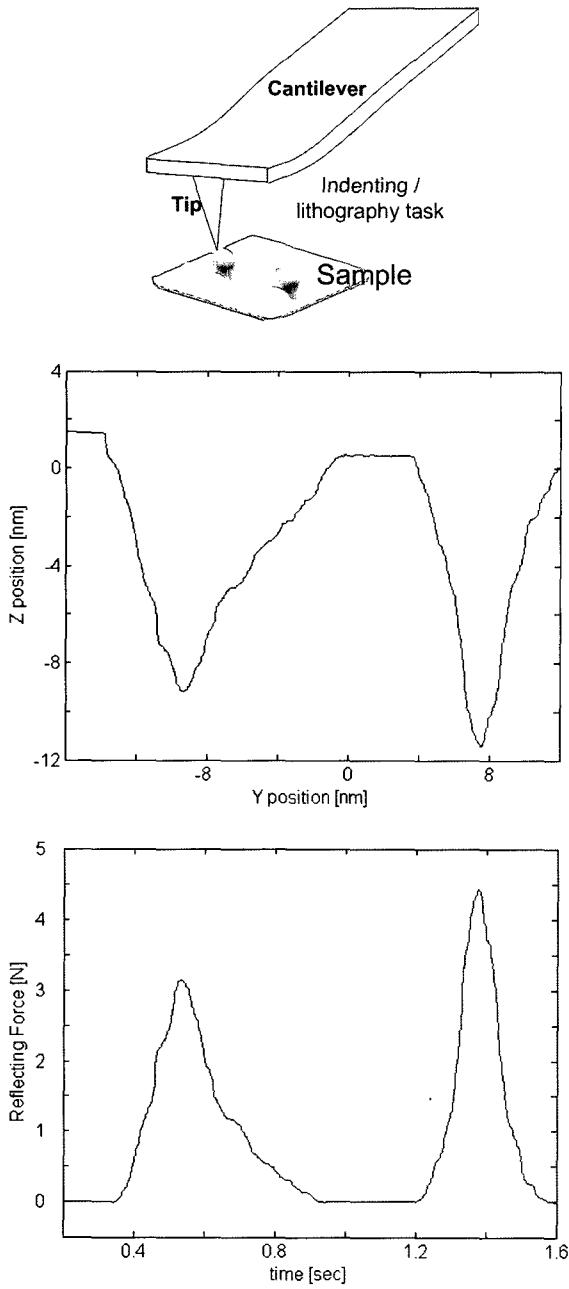


Fig. 8. Task (b) and (c) cases for nanoindentation in a NVE with the haptic interface.

그림 8은 silicon oxide sample에 대한 나노인덴팅 실험 결과를 나타낸다. 원격조작자가 nano contact 시의 AFM tip과 nano surface상의 상호 작용 힘을 인덴팅 작업시에 느낄 수 있었다. 같은 임피던스 스케일링(Impedance Scaling)일 경우는 각 샘플의 물성에 따라서, 햅틱 인터페이스에서 재현되는 힘이 달라짐을 알 수 있다.

그림 9는 불규칙한 가상 나노 표면을 AFM tip이 contact하면서 리소그래피하는 궤적을 나타낸다. AFM tip의 3방향의 위치(x, y, z)에 따른 AFM tip과 나노 표면사이의 상호작용력이 Haptic Interface

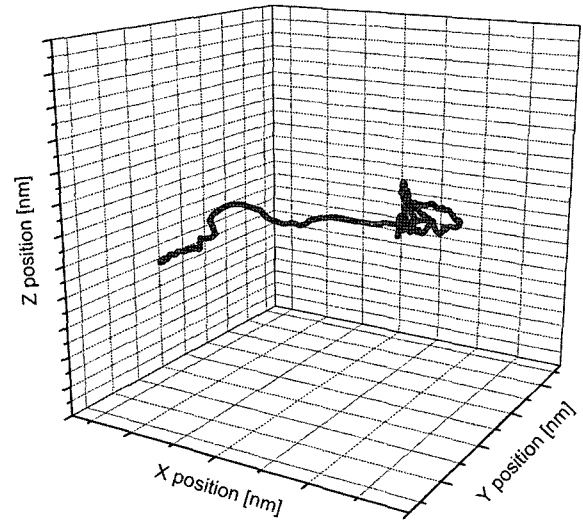


Fig. 9. Nano contact trajectory for nanolithography in a NVE with the haptic interface.

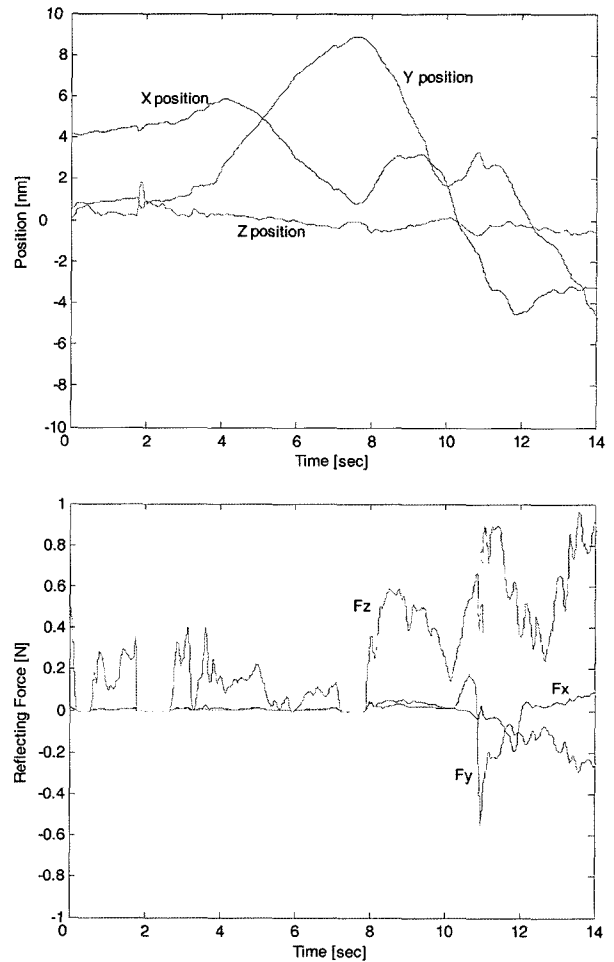


Fig. 10. Nano contact task for nanoindentation in a NVE with the haptic interface.

를 통하여 반향됨을 그림 10에 나타내었다. Fz 방향으로의 힘이 Fx나 Fy에 비하여 상대적으로 크음을 알 수 있다. 이는 AFM tip의 x 및 y방향의 운동이 z방향 운동 보다 커도 Fz가 AFM tip과 나노표면사

이의 상호작용력으로 지배적임을 나타내고, 실제 물리현상과도 일치한다. 만약 그림 10의 안정한 힘 스케일링 계수영역에서 좀더 큰 값을 선정한다면, 더 큰 반항력을 느낄 수 있을 것이다. 따라서, task 및 재료의 물성에 따라서 임피던스 스케일링 계수를 선정하여야 한다.

5. 결 론

나노인텐팅 또는 나노리소그래피를 위한 매크로-나노 햅틱인터페이스에 나노스케일의 힘 반항감 (reflecting force)을 매크로 환경의 원격조작자에게 느끼게 해 줄 때는 적절한 임피던스 스케일링 (Impedance Scaling)은 필수적이다. 본 논문에서는 NSVC(nano scale virtual coupling)의 개념을 도입하였고, 햅틱인터페이스 성능지수로 Z-width 개념을 이용하였다. 또한 나노스케일 가상환경의 contact surface와 Omega[®] 햅틱 장치를 이용한 실험을 통하여 나노인텐팅 또는 나노리소그래피 작업시에 반항되는 힘들을 살펴보았다. 본 논문의 결과는 향후 재료 내지 박막표면상의 미세거동의 관찰 또는 박막 표면제어에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

나노 가상환경 구축과 관련 연구에 도움을 준 Carnegie Mellon Univ.의 Nanorobotics LAB. 구성원들에게 감사합니다.

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구 되었습니다.

참고문헌

1. M. Sitti, H. Hashimoto, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 8(2) (2003) 287.
2. M. Falvo *et al.*, The nanoManipulator: A teleoperator for manipulating materials at the nanometer scale, in Proc. of the Int. Symp. Science and Technology of Atomically Engineered Materials, Richmond, VA, (1995) 579-586.
3. M. Guthold *et al.*, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 5(2) (2000) 189.
4. W. Vogl, M. Sitti, M. Ehrenstrasser, M. F. Zäh, Augmented Reality User Interface for Nanomanipulation using Atomic Force Microscopes, in Proc.

- of the EuroHaptics 2004, Technische Universitaet in Munich, Germany (2004).
5. W. Vogl, Telepresence at the Nano Scale: Augmented Reality Interface for Scanning Probe Microscopes, Tech. Univ. of Munich, MSc Diploma Thesis, (2003).
6. G. Li, N. Xi, M. Yu, W.-K. Fung, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 9(2) (2004) 358.
7. D. Y. Hwang, Blake Hannaford, H. R. Choi, KSME Journal, 15(1) (2001).
8. A. S. Nain, D. H. Goldman, M. Sitti, Three-dimensional nanoscale manipulation and manufacturing using proximal probes: controlled pulling of polymer micro/nanofibers, in Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 04), 1 (2004) 434-439.
9. G. Li, N. Xi, M. Yu, F. Salem, D. Wang, J. Li, Manipulation of Living Cells by Atomic Force Microscopy, in Proc. of the IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, (2003) 862-867.
10. M. C. Cavusoglu, A. Sherman, F. Tendick, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 18(4) (2002) 641.
11. J. E. Colgate, J. Brown, Factors Affecting the Width of a Haptic Display, in Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 94), IEEE CS Press, (1994) 3205-3210.
12. R. J. Adams, B. Hannaford, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 15(3) (1999) 465.
13. B. E. Miller, J. E. Colgate, R. A. Freeman, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 16(6) (2000) 712.
14. N. Hogan, Controlling Impedance at the Man/Machine Interface, in Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 3, Scottsdale, AZ, IEEE CS Press, (1989) 1626-1631.
15. S. E. Salcudean *et al.*, IEEE Control Systems Magazine, 19(6) (1999) 29.
16. J. E. Colgate, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 9(4) (1993) 374.
17. M. Goldfarb, Dimensional analysis and selective distortion in scaled bilateral telemanipulation, in Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 98), Leuven, Belgium, (1998) 1609-1641.
18. G. Whitesides, E. Ostuni, S. Takayama, X. Jiang, D. Ingber, Annual Review of Biomedical Engineering, 3 (2001) 335.