

나노조작기의 수평축 위치제어를 위한 Visual Servoing Loop 구성

최진호***, 박병천*, 안상정*, 김달현*, 유준**
 * 한국표준과학연구원, ** 충남대학교

Realization of Visual Servoing Loop for Position Control of a Nano Manipulator

Jinho Choi***, Byong Chon Park*, Sang Jung Ahn*, Dal-Hyun Kim*, Joon Lyoo**
 * Korea Research Institute of Standards and Science, ** Chungnam National University

Abstract - Nano manipulator is used to manufacture Carbon NanoTube(CNT) tips. Using nano manipulator, operator attaches a CNT at the end of Atomic Force Microscopy(AFM) tip, which requires a master mechanic and long manufacture time. Nano manipulator is installed inside Scanning Electron Microscopy (SEM) chamber to observe the operation. This paper presents a control of horizontal axis of nano manipulator via processing SEM image. Edges of AFM tip and CNT are first detected, the position information so obtained is fed to control horizontal axis of nano manipulator. To be specific, visual servoing loop was realized to control the axis more precisely.



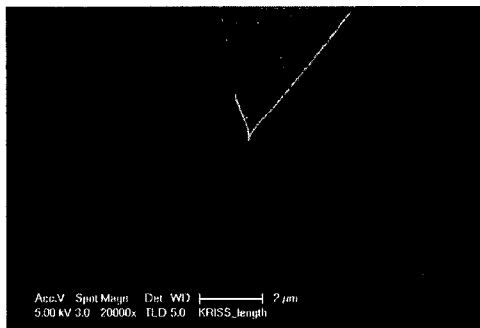
〈그림 2〉 전자현미경 안에 설치되어진 나노조작기

나노조작기는 위의 사항들을 고려하여 독일의 Attocube 사의 ANP100 시리즈와 ANP50 시리즈를 이용하여 각각 X, Y, Z, Rotator로 2부분으로 제작이 되어 있으며 제작된 탐침 교체를 위한 Yaw방향의 이송대가 또한 설치되어 있어 총 9축으로 구성되어 있다.

1. 서 론

최대 원자단위까지 미세영역을 측정할 수 있는 원자간력 현미경(Atomic Force Microscopy : AFM)은 탐침에 따라 분해능에 많은 차이가 있다. 특히 중횡비가 큰 시편 같은 경우 탐침의 형상과 접촉부분 간섭으로 인하여 정확한 측정 결과를 얻을 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림1의 탄소나노튜브 탐침이 제작되었다. 탄소나노튜브 탐침을 제작하는 방법에는 전기영동을 이용한 방법, 화학기상증착법을 이용한 방법, 미세조작기를 이용한 방법등이 있다. 이 중 미세조작기를 이용한 방법은 탄소나노튜브를 부착각도를 10° 이내로 탐침 제작이 가능할 뿐만 아니라 전자현미경을 이용, 관찰하며 제작하기 때문에 원하는 탄소나노튜브를 임의로 선택하여 제작이 가능하다. 하지만 숙련된 운용자가 하더라도 제작시간이 길며 동일한 품질의 탐침제작이 힘들다. 또한 대량 생산이 어려운 단점이 있다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하고 누구나 쉽게 탐침을 제작할 수 있게 하기 위하여 전자현미경의 영상을 추출하여 센서로 사용하였으며 추출한 영상에서 탐침과 탄소나노튜브의 위치정보를 획득하여 미세조작기 즉, 나노조작기의 수평축 위치제어를 할 수 있는 Visual Servoing Loop를 구성하여 보았다.



〈그림 1〉 탄소나노튜브 탐침

2.1.1 주사 전자현미경의 영상 추출

주사 전자현미경의 Chamber안이라는 특수한 상황에서 나노조작기의 위치정보를 얻기 위해선 공간적으로 센서 설치에 많은 제약은 받는다. 특히 진공도에 영향을 주지 않으며 전자기장이 발생하지 않는 센서가 필요하다. 이러한 제약을 극복하고 위치정보를 얻기 위하여 탐침 제작시 사용되는 주사 전자현미경의 영상을 추출하였다. 주사 전자현미경의 영상은 방송주파수 신호로 출력되는데 이 영상을 얻기 위하여 NI-IMAQ 1411를 사용하였다. 획득한 영상의 크기는 640x480의 Pixel로 나타나지며 이때 영상의 정밀도 (Rx, Ry)는 아래(1)의 식으로 구할 수 있다.

$$R_x = \frac{FOV_x}{N_x}, R_y = \frac{FOV_y}{N_y} \quad (1)$$

여기서 FOV는 영상영역(Field of View : FOV)이며 Nx와 Ny 각각 X, Y방향의 화소수이다. 이렇게 구해진 한 화소수당 정밀도는 아래와 같다.

〈표 1〉 이미지 배율에 따른 한 화소수당 정밀도

배율	한 화소수당 정밀도
10,000x	46nm
20,000x	23nm
50,000x	9.6nm
100,000x	4.6nm

2. 본 론

2.1 나노조작기 시스템 구성

탄소나노튜브 탐침 제작은 탐침을 탄소나노튜브로 이동, 직경10~20nm 탄소나노튜브를 탐침의 끝부분의 접촉하여 붙여 뽑아내는 방식으로 제작되어진다.

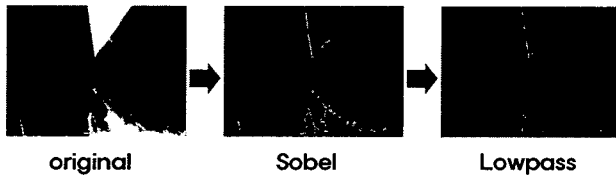
그리하여 나노조작기 시스템은 나노크기로 위치이동을 할 수 있는 이송대로 구성되어 있으며 고진공의 주사 전자현미경 Chamber안에 설치되어 있다. 이때 이송대는 주사 전자현미경의 영상에 영향을 최소로 줄일 수 있는 압전소자(Piezo) 방식을 사용하였으며 주사 전자현미경의 자체 시편 이송대를 사용할 수 있도록 나노조작기 전체 크기와 무게를 최소화 하였다.

2.2 영상 처리 및 특징치 추출

주사 전자현미경의 영상은 최대 백만 배까지 분해능을 가지고 있다.(Display Mode) 이렇게 고분해능의 성능을 가지고 있는 전자현미경의 영상을 이용하여 각각 탐침과 탄소 나노튜브의 위치정보를 획득하기 위하여 에지 추출방법을 사용하였다. 에지 추출 방법으로 Robert, Prewitt, sobel 등 3가지의 Edge Detection Algorithm을 적용하였다.

이동시 나타나는 진동에 대하여 Robert는 약한 모습을 볼 수 있었으며 Prewitt와 Sobel의 경우 강한 모습을 보였다. 또한, 에지의 경우 수직, 수평 방향으로 에지 추출이. 강한 Sobel보다는 대각선 방향으로 에지 추출이 강한 Prewitt 알고리즘이 좀 더 선명함을 보였다. 하지만 많은 잡음가지고 있

어 Sobel 에지 추출 알고리즘을 적용하였으며 추출된 에지의 선명도를 높이고 에지 추출로 인한 영상 왜곡을 줄이기 위하여 Lowpass 필터를 사용하였다.

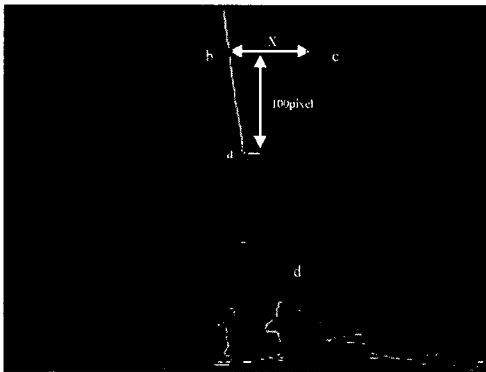


〈그림 3〉 원본 영상에서 Sobel, Lowpass까지 에지 추출 결과

2.2.1 특징치 추출

에지 추출방법을 이용하여 탐침과 탄소나노튜브의 위치정보를 획득하기 위해서 탐침과 탄소나노튜브의 각각의 특징을 찾아야 한다. 이는 또한 이동시 위치정보를 획득하기 위한 중요한 길잡이가 된다. 탐침의 경우 아래의 그림에서 보는 것 같은 역삼각형의 특징을 가지고 있으며 탄소나노튜브는 선 모양을 가지고 있다. 이러한 특징들을 이용하여 특징치를 추출하였다.

탐침은 그림4에서 a부분과 같이 역삼각형 모양의 꼭지점을 특징치로 잡았으며, 탄소나노튜브는 그림에서 d부분과 같이 선택한 선의 중간 부분을 특징치로 잡았다. 하지만 이동할 시에 탐침의 역삼각형의 꼭지점 모양의 특징치가 탄소나노튜브의 에지에 가려져 정확한 위치정보를 얻지 못하는 경우가 발생할 경우 이러한 문제를 해결하기 위하여 역으로 특징치의 위치를 추적할 수 있도록 그림에서 b와 c 부분의 간격 정보를 추가로 저장하였다. 이때 b와 c는 탐침의 특징치에서 수직으로 100화소를 뺀 동일선상의 탐침 에지로 설정하였다.



〈그림 4〉 특징치 추출

2.2 Visual Servoing Loop 구성

획득한 위치정보를 이용하여 Visual Servoing Loop를 구성하였다. 나노조작기 시스템을 위한 Visual Servoing Loop의 전체적인 구조는 전자현미경 영상이 수직으로 고정되어 있는 Eye to hand 방식이며 image-based Visual Servoing으로 구성하였다. 영상의 특징치 점(x, y)과 실제 이동하는 특징치 점(X, Y)으로 할 때 영상에서의 특징치 점의 속도는 각각 \dot{x}, \dot{y} 로 실제 이동하는 특징치 점의 속도는 T_x, T_y 으로 하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = mT_x \quad \dot{y} = mT_y \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \rightarrow J_v = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 m은 배율이며 영상 자코비안(image Jacobian) J_v 을 구할 수 있다. 구해진 자코비안으로 실제 이동하는 특징치 점의 속도를 구하면

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = J_v^+ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

J_v^+ 는 영상 자코비안은 J_v 의 pseudo inverse이다.

영상의 특징치 점을 x_a, y_a 라 하고 특징치가 이동하려는 특징치 점을 x_b, y_b 으로 했을 때 proportional 제어이론을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = KJ_v^+ \begin{bmatrix} x_a - x_b \\ y_a - y_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

x_a, x_b : 현재 특징치 점

y_a, y_b : 이동하려는 특징치 점

K: constant gain matrix

이렇게 구해진 알고리즘을 이용하여 Visual Servoing Loop를 구성하였다.

3. 결 론

주사 전자현미경의 영상을 이용하여 탐침과 탄소나노튜브의 위치정보를 획득하고 탐침 제작 시 탐침이 탄소나노튜브로 정확히 이동할 수 있도록 나노조작기에 Visual Servoing Loop를 적용하여 보았다. 그리하여 손쉽게 탐침을 탄소나노튜브에 접근할 수 있게 한 것은 뿐만 아니라 오작동으로 인한 탐침과 탄소나노튜브의 충돌 가능성을 줄였다. 또한 탄소나노튜브 위치까지 수평축 접근 시간을 줄여 제작에 빠르고 용이하도록 하였다. 비록 전자현미경의 초점심도가 깊어 접촉을 위한 제 Z축을 제어하지 못하였지만 가까운 거리까지 충분히 제어가 가능할 것으로 생각되어지며 추가적인 센서 적용으로 정확한 접촉이 이루어질 수 있는 가능성을 보았다.

〈참고 문헌〉

- [1] 송원영, "나노튜브 탐침 제작을 위한 주사 현미경용 고정밀 다축 나노조작기의 설계 및 제작에 관한 연구", 인하대학교 박사학위논문, 2005.2.
- [2] 정기영, "탄소 나노튜브 탐침 제작에 관한 연구", 인하대학교 박사학위논문, 2004.2.
- [3] FEI Company, "The Sirion(FE-SEM) Operating Instruction Manual", 2005.
- [4] J.R.Paker, "Algorithms for Image Processing and Computer Vision", Wiley, 1997.
- [5] NI Company, "NI Vision concept Manual", 2005.
- [6] S. J. Ralis, B. Vikaramadiya, B. J. Nelson, "Micropositioning of a Weakly Calibrated Microassembly System Using Coarse-to-Fine Visual Servoing Strategies", IEEE Transaction on Electrics Packaging Manufacturing, Vol. 23, No 2, PP. 123-131, 2000
- [7] B. Vikramaditya, J. G. Lord, B. J. Nelson, "Visually Servoed Micropositioning for Assembly of Hybrid MEMS : Theory and Experiments", Proceedings of the 36th Conference on Design & Control, PP. 96-101, 1997
- [8] G. D. Hager, Seth Hutchinson, "A Tutorial on Visual Servo Control", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, PP. 651-670, 1996