

원자간력 현미경의 측정면적 확대를 위한 영상정합 알고리즘 개발

고명준*(금오공대), V. Patrangenaru(조지아 공대), 홍성욱(금오공대)

Development of Image Matching Algorithm to Expand Measuring Area of Atomic Force Microscope

M. J. Ko* (KIT), V. Patrangenaru(Georgia Institute of Technology), S. W. Hong(KIT)

ABSTRACT

This paper introduces a correlation-based surface matching algorithm that can be used to reconstruct the surface topography of an object that is scanned from multiple overlapping regions by an AFM. The image matching technique is applied to two neighboring images intentionally overlapped with each other. To account for the inaccuracy of the coarse stage implemented in AFM, all the six axes including the rotational degrees of freedom are successively matched to maximize the correlation coefficient. The results show that the proposed 6-axes image matching method is useful for expanding the measurement range of AFM.

Key Words : Atomic Force Microscope (원자간력 현미경), Image Matching (영상정합), Correlation Coefficient (상관계수), Measuring Area (측정면적)

1. 서론

원자간력 현미경(Atomic Force Microscope)은 전기적 성질에 관계없이 원자단위까지 측정할 수 있는 장점이 있어 초정밀/나노 분야에 필수적인 장비로 인식되고 있다. 이러한 원자간력 현미경의 발달로 더욱 정밀한 시료의 표면형상에 대한 관측이 가능하게 되었으나 원자간력 현미경의 일반적인 측정면적의 한계는 대체로 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 이하로서 대단히 제한적이다. 따라서 그 용도의 확대를 위해 이송장치를 장착하여 보다 큰 시료에 대한 측정에 대응하는 추세에 있으나 최대 측정면적이 정밀 이송장치의 사양에 의존하기 때문에 측정면적의 제한 문제는 여전히 남아있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 원자간력 현미경에 의해 측정된 시료의 표면형상을 이용하여 측정면적을 확대하는 방법이 연구되고 있다¹. 이 방법은 연속적으로 측정된 여러 부분영역의 중첩된 표면형상에 대하여 상관계수(Correlation Coefficient)를 계산하고 이를 바탕으로 하나의 대면적 표면형

상을 재구성하여 측정면적을 확대하는 방법으로서 그 유용성이 입증되었다¹. 그러나 이 방법은 XY 평면의 2축과 Z축만을 고려한 방법으로 대면적 이송장치(Coarse stage)에 내재되어있는 회전에 의한 편차가 있을 경우는 고려할 수 없기 때문에 정확한 정합에는 한계가 있었다. 본 논문에서는 기존의 방법의 XYZ 3축에 대한 방법을 확장하여 대면적 이송장치의 회전축 오차를 포함한 모든 축을 순차적으로 고려한 영상정합 알고리즘을 개발하였다. 개발된 방법을 실제 측정된 표면영상에 적용한 결과 우수한 정합특성을 보이게 됨을 알 수 있었다.

2. 상관계수 영상정합에 의한 측정면적 확대

원자간력 현미경에 의해 측정된 표면형상은 높이 정보를 단계적으로 밝기 값으로 대응시켜 수치 영상(Digital image)으로 표현하여 표면영상으로 나타낸다.

본 논문에서는 원자간력 현미경에 의해 측정된 이와 같은 표면영상로부터 합성된 영상을 얻는 방

법을 제시하였다. 즉, 영상들 사이에 존재하는 상관성에 의해 부분 중첩 측정된 두 개의 표면영상들간의 6 축 정합좌표를 구하고 이를 기준으로 부분 표면형상들을 재구성하여 측정면적을 확대하는 영상정합 방법을 제안하였다. 영상정합을 위해서는 상관계수를 극대화하는 알고리즘을 이용하였다.

2.1 2 차원 상관계수 영상정합

영상정합은 서로 다른 두 개 이상의 유사한 영상에 존재하는 영역들을 기하학적으로 일치시키는 처리로서 두 영상의 유사성을 나타내는 인자를 설정하고 이 인자가 최대가 되도록 영상을 정합하는 것을 의미한다²⁻⁴.

본 논문에서 논의되는 상관계수는 영상정합을 위해 많이 사용되고 있는 인자로서 그 기본 정의는 다음과 같다. Fig. 1 (a)와 같이 원자간력 현미경의 측정면적인 $M \times N$ 크기의 영상 A, B, C, D를 측정하는데 있어서 영상들 상호간에 어느 정도 일정한 중

복 측정영역을 설정하여 측정하면 영상들 사이에는 그림에 표시된 대로 공통된 영역이 일부 존재하게 된다. 중복 측정영역은 동일한 정보를 포함하고 있으므로 매우 높은 상관성을 갖게 된다. 2 차원평면 XY 상에서 영상 A의 기준영역을 $f(x, y)$ 로 설정하고 영상 B에 존재하는 중복 측정영역을 $w(x, y)$ 로 설정하면 영상 A의 기준영역과 중복 측정영역의 화소 위치에 대한 상관계수($\rho(x, y)$) 계산식은 식(1)과 같다.

$$\rho(x, y) = \frac{\sum \{f(x, y) - \bar{f}\} \cdot \{w(x, y) - \bar{w}\}}{\sqrt{[\sum \{f(x, y) - \bar{f}\}^2] \cdot [\sum \{w(x, y) - \bar{w}\}^2]}} \quad (1)$$

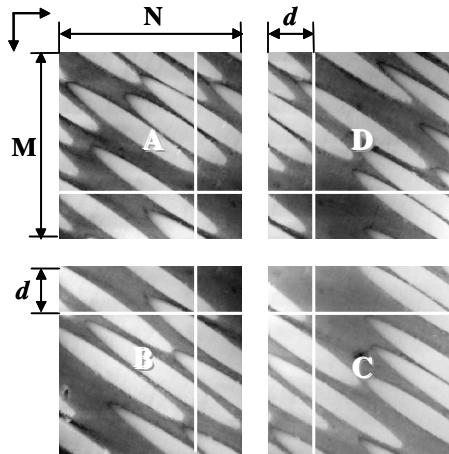
여기서

- \bar{f} : 기준영역의 수치 값의 평균
 - \bar{w} : 탐색영역(중복 측정영역) 수치 값의 평균
 - $f = f(x, y)$: 기준영역에서 임의 화소의 수치 값,
 - $w = w(x, y)$: 탐색영역에서 임의 화소의 수치 값
- 이며 상관계수는 다음과 같은 조건을 만족한다.

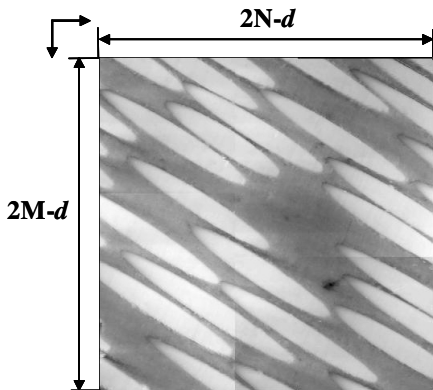
$$-1 \leq \rho(x, y) \leq 1 \quad (2)$$

식(1)의 상관계수를 좌표값을 옮겨가며 계산하여 그 값이 최대가 되는 좌표를 영상정합좌표로 선정하므로 정합을 실시할 수 있다. 그러나 일반적으로 원자간력 현미경을 이용하여 측정된 표면형상의 높이 정보는 시료 표면의 표면형상에 따라 설정된 기준치에 의해 높고 낮음이 양과 음의 값으로 표현되는데 원자간력 현미경의 특성상 동일한 영역에 대하여 개별적으로 측정된 표면형상은 기준치의 값이 서로 다르게 설정되어 영상간 Z 축 편차(Offset)가 존재하게 된다. 이러한 편차를 보정하기 위해 영상정합 대상이 되는 표면영상들간의 기준치를 동일하게 조정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 기준 영상을 선정하고 기준 영상과 정합되는 영상의 중복 측정영역에 대한 평균값의 차이를 이용하여 원자간력 현미경의 Z 축 특성에 의한 편차를 보정하였다. 이러한 영상정합의 원리를 바탕으로 Fig. 1 (a)의 모든 영상들에 대하여 상관계수의 값이 최대가 되는 위치를 정합좌표로 선정하여 영상정합을 실시하였으며 상하편차를 보상하여 Fig. 1 (b)와 같은 결과를 얻을 수가 있다. 여기서 보여지는 예는 대면적 이송장치를 사용하지 않은 경우로서 표면영상들간의 오차가 크지 않으므로 2 축 평면오차 및 상하편차만의 보상으로 상당히 정확한 정합이 가능한 것을 알 수 있다. 그러나



(a) four overlapped images



(b) a synthesized image by image matching

Fig. 1 Illustration of 2-axes image matching method applied to four overlapped images

대면적 이송이 있는 경우에는 다음에 다뤄질 예에서 볼 수 있는 바와 같이 각오차에 대한 보상이 필요하다.

2.2 회전 좌표를 고려한 영상정합

원자간력 현미경은 일반적으로 Z 축의 스캐너(Scanner)와 XY 축 대면적 이송장치로 구성된다. 최대 측정면적은 정밀 이송장치의 사양에 의존하기 때문에 측정면적을 확대를 위해서는 XY 축 대면적 이송장치를 사용하게 되는데 이러한 대면적 이송장치의 사용으로 인하여 서로 이웃하는 표면형상에는 대면적 이송장치의 회전에 의한 편차가 포함되어 있다. 따라서 회전에 의한 편차를 고려하기 위해서는 XY 평면의 2축과 Z 축의 회전축을 고려한 방법이 필요하다.

본 논문에서는 3 차원 공간에서 영상을 표현하고 회전 좌표를 추가하여 기준 영상에 대한 상대적인 회전 위치를 최대 상관계수를 이용하여 설정하였다.

2.3 영상정합 과정

영상정합은 XY 평면의 2 축과 각각의 회전축, 그리고 Z 축에 대하여 순차적으로 이루어지며 알고리즘의 전체적인 흐름은 Fig. 2 와 같다. 알고리즘은 크게 총 3 부분으로 구성되는데 각각의 표면형상에 대한 정합순서와 변수의 설정 그리고 Canvas 라 불리는 작업공간을 생성하는 부분과 설정된 변수를 이용하여 표면형상에 대한 2 축에 관한 정합을 실시하고 각각의 회전축과 Z 축에 대한 편차를 제거하는 부분, 끝으로 최적의 정합위치와 회전 좌표에 대한 정보를 이용하여 표면형상을 Canvas 에 배치하는 부분으로 이루어져있다. 또한 이 같은 과정을 반복하여 정합의 정도를 개선할 수 있다.

3. 제안된 방법의 적용 및 결과

3.1 적용 방법

본 논문에서 제안한 방법은 기준 영상을 설정하고 기준 영상에 이웃하는 영상에 대하여 XY 평면의 2 축과 영상간 상대적인 회전 위치를 순차적으로 계산한 후에 최종적으로 Z 축에 대한 편차를 조정한다. 제안한 방법의 구현을 위해 Matlab⁵을 사용하였으며 실제 측정된 영상에 적용하였다.

Fig. 3 은 복합재료의 표면을 4 분할 영역으로 측정된 영상으로서 각각의 영상은 정밀 이송장치의 최대 측정범위인 가로·세로 100 μm 로 측정되었다. 이웃하는 영상 사이에는 해당 위치에 따라 가로 10 μm , 세로 100 μm 또는 가로 100 μm , 세로 10 μm 의 중

복 측정영역이 존재한다. 여기서, 중복 측정영역은 측정자의 의도에 따라 설정되는 변수로서 시료의 표면특성과 측정 시스템을 고려하여 결정해야 한다.

3.2 적용 결과

Fig. 4 는 Fig. 3 의 부분 표면형상을 XY 평면의 2 축에 관하여 영상정합을 실시한 영상이며 Fig.5 는

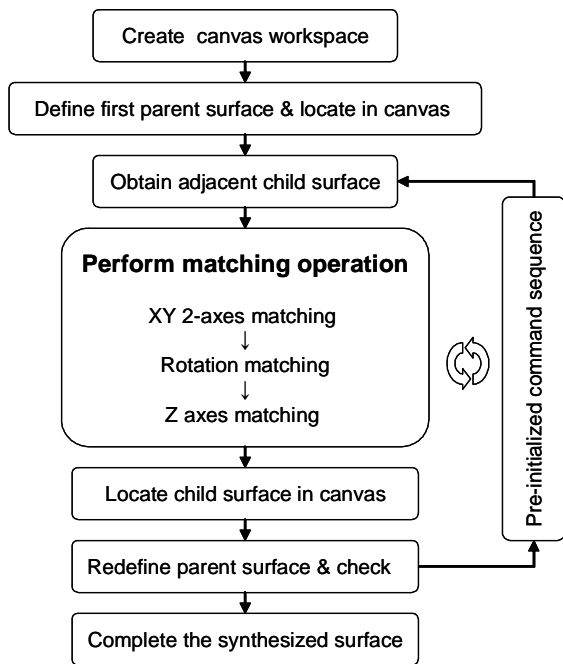


Fig. 2 Flow chart for 6-axes image matching algorithm

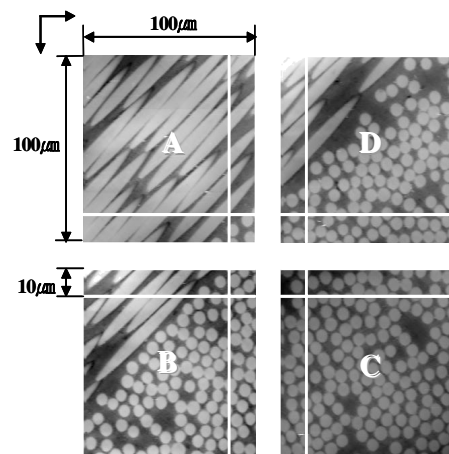


Fig. 3 Four overlapped images measured from a composite surface

제안된 방법으로 6 축을 모두 정합한 경우이다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 2 축 정합의 경우, 서로 이웃하는 영상임에도 불구하고 영상들 사이의 경계부분에서 급격한 밝기 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 표면형상의 높고 낮음을 판단하는 기준치가 서로 다르게 설정되어 Z 축에 대한 편차와 대면적 이송장치의 회전에 의해 회전축에 대한 편차가 존재하기 때문이다.

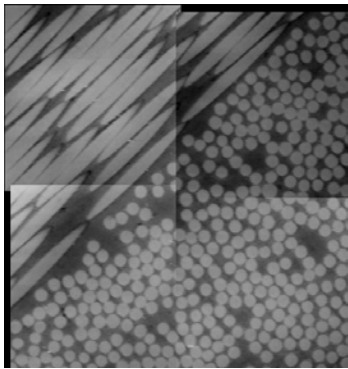


Fig. 4 A synthesized image via 2-axes image matching algorithm

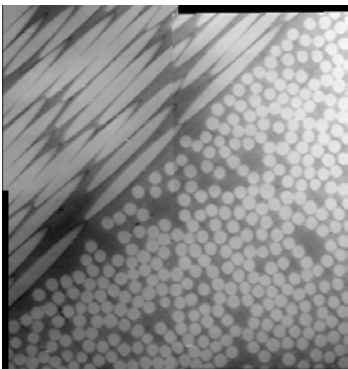


Fig. 5 A synthesized image via 6-axes image matching algorithm

Table 1 Maximum correlation coefficients from the 2-axes and 6-axes algorithms

parent-child surface \ max ρ	2-axes	6-axes
A - B	0.8920	0.9925
B - C	0.7390	0.9329
C - D	0.6836	0.9806

Fig. 5 에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 방법대로 모든 축을 고려하여 영상정합을 실시하면 대면적 이송장치의 회전에 의한 편차와 상하편차 문제가 모두 개선함으로써 좋은 결과를 얻을 수 있다. Table 1 은 2 축 방법과 6 축 방법의 적용과정에서 얻어진 최대 상관계수 값을 비교하고 있다. 예상대로 모든 축을 고려한 경우가 기존의 경우 보다 월등히 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 원자간력 현미경의 측정면적을 확대하기 위해 상관계수에 의한 영상정합 방법을 이용하였다. 최대 측정면적은 정밀 이송장치의 사양에 의해 결정되기 때문에 대면적 이송장치의 사용이 불가피하다. 따라서 기존의 XY 평면의 2 축에 관한 영상정합 방법으로는 대면적 이송장치에 내재되어 있는 회전에 의한 편차를 고려할 수 없기 때문에 회전 편차가 개입된 표면형상에 대해서는 정밀한 대면적 표면형상을 얻을 수 없다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하고 정밀한 표면형상을 얻기 위해 3 차원 공간에서 영상을 표현하고 회전 좌표를 추가하여 회전 편차에 의한 문제에 대응하였다. 회전 편차가 개입되어 있는 표면형상을 이용하여 제안한 방법을 검증하였으며 실험결과 기존의 2 축에 관한 방법보다 우수함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 홍성욱, 고명준, 신영현, 이득우, "초소형 마이크로 부품 표면 측정 시스템 개발," 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.413~418, 2005
2. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Prentice Hall, 2002.
3. H. Neemuchwala, A. Hero, and P. Carson, "Image matching using alpha-entropy measures and entropic graphs," Signal Processing, Vol. 85, pp. 277-296, 2005.
4. Y. Shinagawa and T.L. Kunli, "Unconstrained automatic image matching using multi-resolitional critical-point filters," IEEE Trans. PAMI, Vol. 20, No.9, pp.994-1010, 1998
5. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB, Prentice Hall, 2004.