

# 초소형 마이크로 부품 표면 측정 시스템 개발

홍성욱<sup>+</sup>, 고명준<sup>+</sup>, 신영현<sup>+</sup>, 이득우<sup>++</sup>

Development of a measurement system for the surface of micro-parts

Seong-Wook Hong<sup>+</sup>, Myung-Jun Ko<sup>+</sup>, Young-Hyun Shin<sup>+</sup>, Deug-Woo Lee<sup>++</sup>

## Abstract

This paper proposes a measurement method for the surface of micro-parts by using AFM(Atomic Force Microscope). To this end, two techniques are presented to extend the capacity of AFM. First, the measurement range is extended by using an image matching method based on correlation coefficients. To account for the inaccuracy of the coarse stage implemented in AFM's, the image matching technique is applied to two neighboring images intentionally overlapped with each other. Second, a method to measure the shape of relatively large specimen is presented by using the inherent trigger mechanism due to the atomic force. The proposed method is proved effective through a series of experiments.

**Key Words :** 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope), 영상상합(Image matching), 상관계수(Correlation coefficient), 3차원 측정기(Coordinate measuring machine), 접촉/비접촉 측정(Contact/Noncontact measurement), 힘구배(Force gradient)

## 1. 서론

부품의 초소형화에 따라 그 가공에 있어서 필요한 만큼 최소한의 가공능력을 가진 이른바 초소형 미세제조 시스템이 요구되고 있다. 초소형 미세제조 시스템은 미세가공 기술, 초소형/고정도 이송 기술, 초소형 부품의 조립, 공정간 부품 계측 시스템이 필요하며 최종적으로 가공된 부품의 품질을 검사하는 시스템을 필요로 한다. 본 연구에서는 부

품의 품질검사 시스템으로 최근 나노 관련 기술개발에 따라 각광받고 있는 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope)을 이용한 소형 부품 표면측정 시스템에 대하여 논의하였다.

원자간력 현미경은 기존의 현미경으로는 관측이 불가능했던 시료의 표면을 원자단위까지 측정 가능하게 하는 기술이다. 원자간력 현미경의 원리는 시료의 표면을 캔틸레버(Cantilever)라 불리는 작은 막대가 주사를 하게 되고 이

\* 주저자, 금오공과대학교 기계공학부 (swhong@kumoh.ac.kr)

주소: 730-701 경북 구미시 양호동 1번지

+ 금오공과대학교

++ 부산대학교

때 캔틸레버 끝에 붙어있는 탐침이 시료 표면에 접근하여 탐침과 시료 표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 인력과 척력이 작용하게 되며 이 힘에 의해 캔틸레버가 아래 또는 위로 휘어지게 되는 특성을 이용하여 표면형상을 측정하는 것이다 [1]. 원자간력 현미경의 발달로 더욱 정밀한 시료 표면형상의 측정이 가능하게 되었으나 별도의 구동장치를 포함하지 않는 상태의 일반적인 측정범위 한계는 대체로  $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$  이하로서 측정 면적이 대단히 제한적이다. 따라서 원자간력 현미경을 이용하여 소형 부품과 같은 상대적으로 큰 시료의 표면을 전반적으로 관찰하기는 어려운 실정이다.

본 연구에서는 원자간력 현미경을 이용하여 소형 부품의 표면을 측정하기 위해 두 가지 기술을 개발하였다. 즉, 원자간력 현미경에 의해 연속적으로 측정된 여러 개의 중첩된 표면형상 영상에 영상처리 기법을 적용하여 정합시키는 방법과, Fig. 1과 같이 이송계가 포함된 원자간력 현미경의 접촉 및 비접촉 방식 측정 원리를 이용하여 임의의 형상을 갖는 대면적 부품의 표면을 3차원측정기와 유사한 방식으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였으며 실험적으로 유용성을 확인하였다.

## 2. 영상정합에 의한 측정 범위 확대

### 2.1 기본 개념

원자간력 현미경에 의해 얻어진 영상은 어떠한 특이한 형식을 취하지 않으므로 다른 일반적인 영상들과 같이 모든 영상처리 알고리즘의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 원자간력 현미경의 측정범위 확대를 위해 원자간력 현미경에 의해 얻어진 표면형상 영상을 이용하여 이 영상들 사이에 존재하는 상관성에 의해 정합좌표를 추출하고 이 좌표를 바탕으로 영상들을 정합하여 측정범위를 확대하는 방법을 제안하였다. 영상정합의 기본 원리는 Fig. 2에서와 같이 시료의 표면형상을 측정할 때 원자간력 현미경의 측정범위 한계인  $M \times N$  크기의 두 영상을 서로 정확히 이웃이 되도록 획득하

여 정합하는 것이다. 서로 정확히 이웃이 되는 영상을 획득한다면 영상들 간의 정합은 특별한 알고리즘의 적용 없이 간단하게 이루어질 수 있다. 그러나 원자간력 현미경의 이송장치 분해능 문제와 측정환경 등의 여러 가지 외부 요인으로 인하여 측정 시 이웃 표면을 연결하는 동일한 측정점을 찾고 이 측정점을 기준으로 하여 다른 영역을 측정하기에는 많은 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 Fig. 3과 같이 현미경의 최대 측정범위인  $X \times Y$  크기의 영상 A, B, C, D를 획득하는데 있어서 영상들 상호간의 일정한 영역을 중복되게 측정을 하고 중복 측정영역에 대한 영상을 상관계수 (Correlation coefficient)에 의한 영상정합 방법과 같은 정합 알고리즘을 적용하면 영상 상호간 공역점(Conjugate point) 즉, 정합좌표를 추출할 수 있다. 이러한 방법으로 추출된 정합좌표를 이용하여 영상들을 정합하면 측정범위 한계를 극복한 대면적 표면형상 영상을 얻을 수 있다.

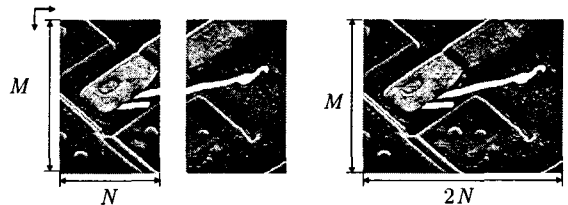


Fig. 2 Illustration of image matching

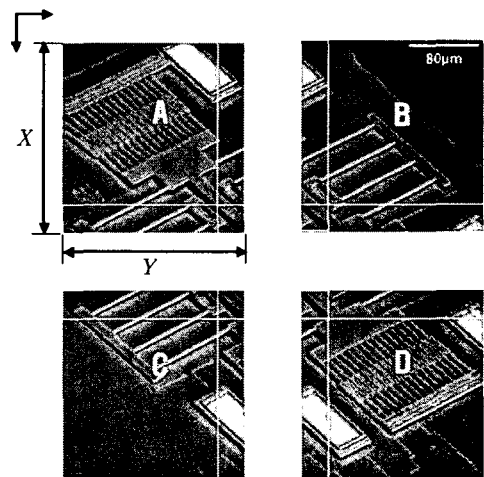


Fig. 3 Four overlapped images for a sample surface



Fig. 1 Atomic force microscope(AFM)

## 2.2 상관계수에 의한 영상정합 방법

영상정합은 물리적으로 유사한 영상에 존재하는 영역들을 기하학적으로 일치시키는 처리로서 기본적인 절차는 영상의 일부를 다른 부분과 비교함으로써 수행되는데 대상 영상의 회전, 수평과 수직위치, 크기를 변환하면서 두 영상의 유사성이 최대가 되는 인자를 추출하는 것이 가장 핵심적인 내용이다 [2~5].

영상정합 기본 알고리즘 중에서 상관성에 의한 정합 방법은 한 영상에 기준영역(Target area)과 정합 대상 영상에 탐색영역(Search area)을 설정하고 기준 영역에서의 밝기 값의 통계학적 분포와 탐색영역에서의 밝기 값의 통계학적 분포의 상관성을 고려하여 기준영역 및 탐색영역의 중앙점을 공액점으로 결정하는 방법인데, 좌측 영상의 대상점을 중심으로 하는 일정한 크기의 기준영역을 설정하고 우측 영상에서 공액점이 존재할 가능성이 있는 범위를 탐색영역으로 설정하여 영상정합을 실시한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이  $M_1 \times N_1$  크기인 좌측영상의 기준영역을  $f(x, y)$ 로 설정하고 이에 대응하는  $M_2 \times N_2$  크기인 우측 영상의  $w(x, y)$ 로 설정하여 좌측 영상의 기준영역을 우측 영상의 탐색영역 내에서 한 화소씩 이동하면서 각각의 위치에 대한 상관계수( $\rho(x, y)$ )를 결정하며 결정식은 다음과 같다.

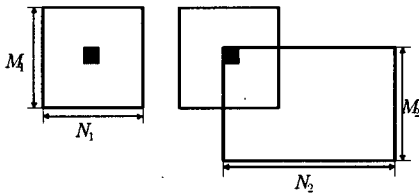


Fig. 4 Image matching based on target and search area

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

여기서,

$\bar{f}$  : 기준영역(배열) 밝기 값의 평균,

$\bar{w}$  : 탐색영역(배열) 밝기 값의 평균,

$f = f(x, y)$  : 기준영역에서 임의 화소의 밝기 값,

$w = w(x, y)$  : 탐색영역에서 임의 화소의 밝기 값이며

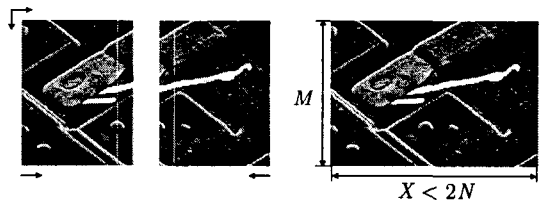
상관계수는  $-1 \leq \rho(x, y) \leq 1$ 의 조건을 만족한다.

식(1)에 의해 탐색영역 내의 모든 화소의 상관계수를 계산하여 가장 높은 상관계수를 갖는 점을 정합점으로 결정하게 된다.

## 2.3 원자간력 현미경 영상에의 적용

본 연구에 적용되는 상관성에 의한 영상정합 방법에서 기준영역과 탐색영역의 크기는 대체로 일정하기 때문에 기준영역과 탐색영역의 크기로 인한 영상정합의 정확도 문제, 효율성 및 계산속도 등은 크게 문제되지 않는다 [4].

Fig. 5와 같이 원자간력 현미경의 최대 측정범위인  $M \times N$  크기의 영상 A를 측정하고 이웃하는 영상 B를 측정할 때 영상 A의 측면에 어느 정도의 중복 측정영역을 설정하여 영상을 획득하면 영상 A와 B에는 서로 동일한 영역의 영상이 일부 존재하게 된다. 중복 측정영역의 영상은 동일한 정보를 포함하고 있으므로 매우 큰 상관계수 값을 갖게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 중복 측정영역에서 최대 상관계수를 갖는 위치를 선정하여 영상을 정합하는 방법을 제안하고자 한다. 영상 A는 좌측부터, 영상 B는 우측부터 화소의 위치를 옮기면서 두 영상의 상관계수를 계산하면 두 영상의 중복 측정영역이 시작되는 위치에서 상관계수의 값이 최대가 된다. 두 영상의 상관계수가 최대가 되는 화소의 위치정보는 정합 좌표가 되고 이를 이용하여 두 영상을 정합하게 된다. 이 방법은 좌·우 방향 영상과 상·하 방향 영상 모두에 적용가능하다. 영상 A와 B에 존재하는 중복 측정영역의 위치 및 크기는 측정자의 의도에 따라 대략적으로 판단이 가능하므로 중복 측정영역을 포함하는 부분 영상을 영상 A와 B로부터 기지의 좌표로 추출하고 추출한 두 영상을 이용하여 위와 같은 방법을 적용하면 영상의 크기에 따른 상관계수 계산 속도를 향상시킬 수 있다.



(a) image A (b) image B (c) matching of images A&B

Fig. 5 Illustration of the image matching of two overlapped images for a sample surface

본 연구에서 제안한 영상정합 알고리즘의 적합성 및 효율성을 판단하기 위해 Matlab[6,7]을 사용하여 계산 프로그램을 구현하였다. Fig. 6은 컴퓨터 저장 장치인 하드디스크의 디스크 표면형상 영상으로서 Fig. 3과 같이 시료의 표면을 중복 측정영역이 일부 존재하도록 측정된 4분할 영상이다. 분할 영상 각각의 측정영역은 가로·세로  $30\mu\text{m}$ 이며 중복 측정영역은 해당위치에 따라 가로  $30\mu\text{m}$ , 세로  $10\mu\text{m}$  또는 가로  $10\mu\text{m}$ , 세로  $30\mu\text{m}$ 가 되도록 측정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 영상간의 약간의 정도 차이는 있으나 중복 측정영역이 존재함을 알 수 있다. 영상정합의 순서는 좌측영상의 상·하 방향부터 실시하였으며 그 후 우측영상의 상·하 방향 정합을 실시하고 최종적으로 정합된 좌측영상과 우측영상을 정합하였다. Fig. 7 (a)는 좌·우측 영상의 화소위치에 따른 상관계수 곡선을 나타내고 있으며 Fig. 7 (b)는 상관계수 최대값을 취하는 화소의 위치를 좌표로 선정하여 정합한 좌·우측 영상을 보여주고 있다. 상관계수 곡선에서 최대값을 갖는 화소위치를 쉽게 확인할 수 있으며 일정한 중복 측정영역에 의해 최대값을 취하는 화소위치가 정합해야할 위치임을 알 수 있다. Fig. 7 (c), (d)는 각각 Fig. 7 (b), 두 영상을 정합할 때의 상관계수 곡선과 최종 정합된 영상을 나타내고 있으며 영상의 정합이 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다.

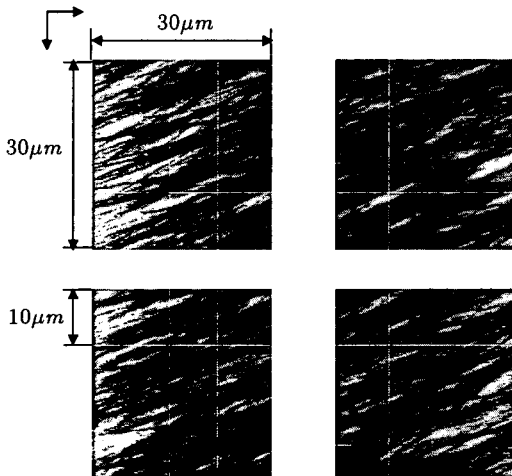
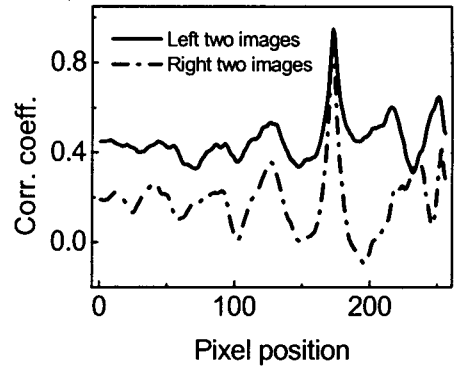
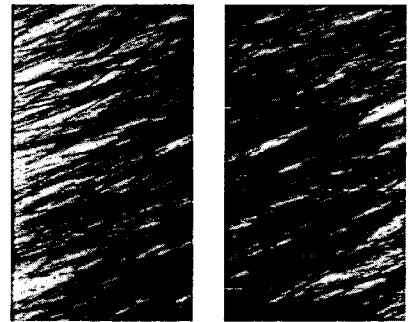


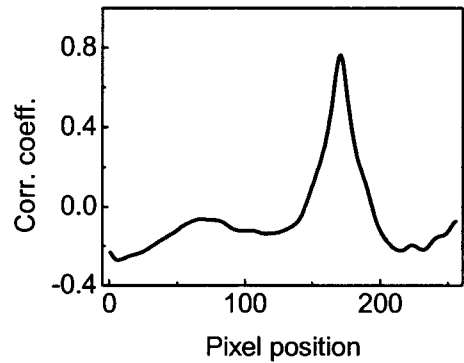
Fig. 6 Four overlapped images measured from a hard disk surface



(a) correlation coefficients of left two and right two images



(b) matched left two and right two images



(c) correlation coefficient between two images in (b)



(d) final image

Fig. 7 Illustration of the image matching process for a hard disk surface

지금까지 논의한 영상정합 방법은 한 축만을 고려한 방법으로서 실제 측정 영상에서는 이송장치의 분해능 및 측정환경으로 인해 정합 축의 수직 방향에서도 영상간의 어긋남이 존재한다. 본 실험에서 사용된 장비의 경우 평균적으로 0~3 화소 정도의 차이를 보이고 있으며 영상정합 알고리즘의 적용에 앞서 영상처리 작업을 수행하여 어긋남을 조정하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 영상 A와 B로부터 중복 측정영역을 포함하는 부분 영상을 기지의 좌표로 추출하고 추출한 두 영상에 대하여 두 축에 관한 영상정합 알고리즘을 적용하였다. 부분 영상을 추출하기 위해 중복 측정영역을 포함하게 하는 임의의 좌표설정이 필요한데 이는 영상의 전체 측정영역에 관계되는 변수이다. Fig. 6의 하드디스크 표면형상 영상에 2차원 정합좌표 추출 알고리즘을 적용하였으며 Fig. 8은 이를 통하여 얻어진 영상간의 상관계수 곡면과 추출된 정합좌표에 의해 정합한 영상을 나타내고 있다.

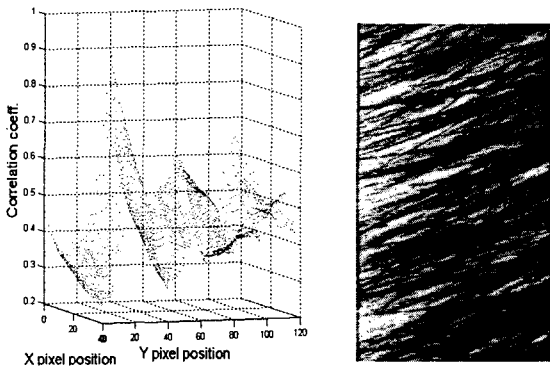


Fig. 8 2-dim correlation coefficient and image matching for left two images

### 3. 원자간력 트리거 방식을 이용한 임의 표면 형상 측정

#### 3.1 측정 개념

최근에는 원자간력 현미경의 용도 확대를 위해 이송장치를 장착하여 보다 큰 시료에 대한 측정에 대응하는 추세이다. 본 연구에서는 이와 같이 원자간력 현미경에 이송계가 포함된 시스템을 이용하여 대면적 부품의 형상을 측정하는 방법에 대해 논의하였다 [8].

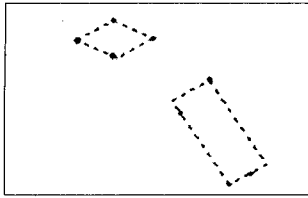
원자간력 현미경은 그 측정 원리상 접촉 및 비접촉의 두 가지 방식으로 운영되는데 접촉방식에서는 시료와 탐침이 매우 근접하게 됨으로서 사실상 접촉 상태를 유지하면서 탐침과 시료간의 척력을 직접적으로 이용하는 반면 비접촉 방식은 시료와 탐침간의 거리가 좀 더 큰 상태에서 인력 구배 (Attractive force gradient)를 이용하는 방식으로서 시료 및 탐침의 훼손이 적다는 장점이 있다. 본 연구에서는 원자간력 현미경의 접촉 및 비접촉 방식 측정 원리를 이용하여 임의의 형상을 갖는 대면적 부품의 표면을 3차원측정기와 유사한 방식으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 표면을 이송계로 이송하면서 좌표측정을 원하는 위치에서 탐침을 표면에 접근시켜 인력구배(비접촉식)가 원하는 값이 되었을 때 좌표를 읽어 들이는 방식으로 표면형상을 측정하였다.

#### 3.2 측정 및 결과

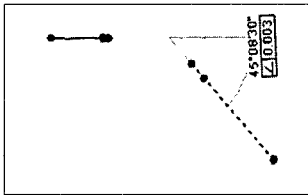
Fig. 9는 본 연구에 사용된 시료의 한 예로서 경사면이 있는 측정 시료이며, Fig. 10은 이 시료를 비접촉 방식으로 측정한 결과 및 이를 이용하여 얻어낸 경사각이다. 측정방법의 평가를 위해 동일한 위치를 반복 측정함으로써 반복 정밀도를 검토하였다.



Fig. 9 Test sample



(a) measured coordinates



(b) estimated inclination angle

**Fig. 10 Measured results for a sample with inclination angle by using the proposed trigger method**

실험결과 동일한 인력구배조건에서 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있었으며 기존의 원자간력 현미경의 기능을 그대로 활용하면서도 제안된 방법이 대면적 표면의 형상 측정에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 소형 마이크로 부품의 표면 특성 측정을 위해 원자간력 현미경을 확장 응용하는 방법을 제시, 검증하였다. 먼저 원자간력 현미경의 측정범위의 한계로 인한 대면적 표면형상 측정의 어려움을 영상정합 방법을 통하여 극복하는 방안을 제안하였다. 원자간력 현미경 영상에 대하여 상관성에 의한 영상정합 방법을 수행하는 프로그램을 구현하였으며 중복 측정영역이 존재하는 원자간력 현미경 영상에 대한 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 원자간력 현미경의 스테이지를 이용하고 원자간력 현미경의 측정원리를 응용하여 임의의 형상을 갖는 표면형상을 3차원 측정방식으로 측정하는 방법을 제안하였으며 실험을 통해 그 유용성을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 원자간력 현미경이 가지는 장점을 대면적 시료 표면측정에 적용할 경우 소형 부품의 표면에 대한 전반적인 형상 및 품질을 매우 정밀하게 관측할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 박준기, 비접촉 원자간력 현미경의 탐침 외팔보 진동특성 및 평가, 석사학위 논문, 금오공과대학교 기전공학과, 2003.
2. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Prentice Hall, 2002.
3. G. A. Baxes, Digital Image Processing : Principles and Applications, John Willey & Sons, 1994.
4. 이재기, 조재호, “수치사진측량을 위한 영상정합의 허용 상관계수 결정에 관한 연구,” 한국지형공간정보학회 논문집, 제5권 제2호, pp.99-110, 1997.
5. 임문철, 황선철, 김우생, “일차 고유벡터와 히스토그램 분석에 의한 영상 정합,” 한국정보과학회 논문지 : 소프트웨어 및 응용, 제27권 10호, 1054, 2000.
6. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB, Prentice Hall, 2004.
7. Matlab Image Processing Toolbox Users Guide, Version 4, The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2003.
8. 신영현, 고명준, 홍성욱, 권현규, “원자간력 현미경을 이용한 대면적 표면 형상 측정 방법,” 한국정밀공학회 춘계학술대회, 제주, 2005.