

## 백색광 간섭계의 봉우리 찾기 섹법 비교

민경일 · 남기봉†

한림대학교 자연과학대학 물리화학부

Ⓣ 200-702 강원도 춘천시 옥천동 1번지

(2000년 11월 27일 받음, 2000년 12월 7일 수정본 받음)

백색광 간섭계에서는 신속하고 그리고 정확하게 주사방향의 간섭무늬 봉우리 점을 추출하는 것이 중요한 관건이다. 봉우리 점 산출 속도 향상을 목표로 하여 많은 연구가 진행되어 왔지만, 본 연구에서는 가장 간단한 섹법을 이용하여 기준 시료가 얼마나 정확하게 재구성 되는가를 비교 검토하였다. 두 방법 모두 mm 수준의 정밀도로 단차를 측정할 수 있었는데, 역상관을 이용한 섹법이 표면 구조나 수직한 면의 재 구성에 더 충실한 결과를 산출함이 관찰되었다.

OCIS codes : 110.4500, 120.3940.

### I. 서 론

백색광 간섭계(white light interferometer, WLI)는 간섭계에 서 선호하는 고도의 가간섭성 광원을 백색광원으로 대체하여 간섭무늬가 관찰되기 힘든 요건을 마련해 두고, 간섭무늬가 관찰되는 좁은 위치에서 간섭계 팔의 광로정이 같다는 조건을 활용하여 측정 대상으로부터 필요한 정보를 추출하는 용도로 넓게 활용되고 있다.<sup>[1]</sup> 이 방법은 특히 시료의 3차원 표면 형상을 추출하는 용도로 많이 활용되고 있으며, 또한 개발 초기 부터 의용 생체측정수단으로 응용되어, 현재는 광가간섭 단층촬영법(Optical Coherence Tomography, OCT)으로 정착되어, 인체 여러 부위의 수 mm 깊이의 피하조직을 검사하는 방법으로 정착되었다.<sup>[2,3]</sup>

이 WLI에서는 통상 측정시료가 위치하지 않은 쪽의 반사경을 일정한 방법으로 이동시키면서 관찰되는 간섭무늬의 가시도 변화를 관찰하여야 한다. 간섭계 양 팔의 광로정이 동일한 지점에서 가시도가 최대가 되기 때문에 기준 거울을 이용하면서 화소별로 계속해서 가시도를 수치화하여 그 최대점을 연속적으로 기록하면서 이 가시도의 최대점을 수치적으로 결정하게 된다. 간섭계의 기본 뼈대로 마이켈슨 형을 사용할 경우, 이 이동하는 거울이 반 파장 이동 할 때마다 한 주기의 간섭무늬 변화가 관찰되므로, 표본추출 이론에 의해 이 변화를 제대로 감지하기 위해서는 최소한 거울의 이동거리 반 파장 마다 2회 이상 출력화면의 밝기 값을 확인하여야 한다. 따라서 파장 500 nm의 빛을 사용할 경우 1 mm 구간 당 한 화소에 대하여 8,000개의 자료 값을 저장 처리할 수 있는 설비가 필요하게 되는 등 다량의 수치처리 부하가 요구된다. 3차원 형상 측정용으로 활용 할 경우 화면 전반의 모든 화소에 대하여 동일한 방법을 사용하여야 하므로 계산량은 위 값에 화소의 수(통상 512×512) 배만큼 증가하기 때문에 자료를 처리하는데 효과적인 섹법의 개발이 중요한 자리를 차지해 왔다. 처리

속도를 향상시키기 위해 표본추출 간격을 늘리면 가시도 변화를 충실이 기록하지 못하는 결과(aliasing)가 얻어지기 때문에 가시도의 봉우리 찾기에 관련된 오차의 범위가 확대될 위험이 있다. Kino<sup>[4]</sup> 등이 푸리에 변환, 힐버트 변환법 등을 소개한 이래로 다양한 방법<sup>[5]</sup>들이 소개되었다. 국내에서 박민철<sup>[6]</sup> 등이 계산속도 향상을 위한 내용의 연구를 수행하였다.

그러나 현재의 PC가 10년 전의 PC보다 50배 이상 성능이 향상되었기 때문에, 또한 앞으로도 계속 성능의 향상이 계속 될 것으로 예상되므로, 이제는 계산속도 향상의 중요 못지않게 복구된 형상의 정밀도에 대한 검토도 연구대상이 될 수 있게 되었다. 본 연구에서는 이 비교를 위해 이런 방법들 중 가장 단순하면서도 신뢰도가 높은 두가지 방법을 이용하여 제작한 표준 물체에 대한 3차원 형상 복구형태를 비교하여 그 방법론의 적합성에 대한 검토를 시도하였다.

### II. 시험 대상 섹법의 비교

본 연구에서는 가중평균법과 적응상관법(adaptive correlation method, 이하 상관법)을 그 비교 대상으로 선정하였다. 이 두 방법은 특별한 수학적 변환 등을 사용하지 않기 때문에 시간적으로는 불리한 점이 있으나 수치적 오차를 유발할 가능성이 비교적 작다는 장점이 있다.

#### (1) 가중평균

가중평균법은 무게중심을 찾는 방법으로, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N z_k g(z_k)}{\sum_k g(z_k)} \quad (1)$$

여기서  $z(x, y)$ 는 화면상  $(x, y)$  좌표에 해당하는 주사방향( $z$ 방향)의 최대 가시도 좌표값을,  $g(z_k)$ 는 다음과 같이 정의한 가중함수이다.

†E-mail: kbnaem@sun.hallym.ac.kr

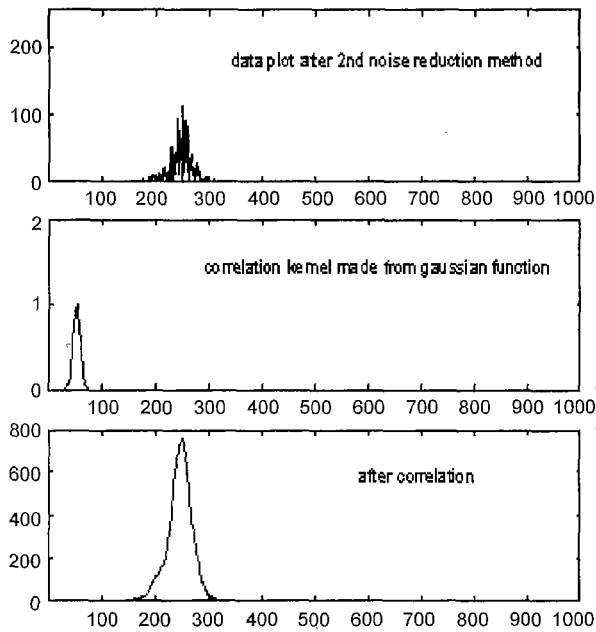


그림 1. 역상관 법의 봉우리 추출과정.

$$g(x_k) = |f(x_k) - f_0| \quad (2)$$

여기서  $f_0$ 는  $(x, y)$  점에서  $z$  방향의 주사 전 구간에 대한 화소 밝기값의 평균을 의미하므로,  $g(x_k)$ 는  $z$  축상  $k$  번째 지점에서 주어진 화소값이 얼마나  $z$  방향의 평균치에서 벗어나 있는가를 나타낸다. 그러므로 이 가중평균법은 가중함수의 선택에 따라 다른 결과를 도출해 낼 가능성이 있는데, Windecker<sup>[7]</sup>는 이 가중함수로 화소값의 제곱치를 사용하기도 하였다. 여기서 (2)로 정의된 가중함수는 검증 모의실험<sup>[8]</sup>에서 그 적합성이 확인되었다.

(2) 적응상관법

이 방법은 실험 결과와 임의의 형태의 함수를 만들어 서로 역상관시켜 그 크기가 가장 큰 점을 찾는다.

$$f(x) \otimes h(x) = \int f(x)h(\alpha - x)d\alpha \quad (3)$$

여기서 역상관시키는 함수  $h(x)$ 는 통상 측정치 함수를 잘 대표할 수 있는 함수를 구성하여 사용하는데, WLI의 가시도 분포함수는 보통 가우스 함수 형태를 가지고 있기 때문에 여기에서도 그러한 함수를 사용한다. 그림 1은 이런 역상관 함수를 사용하여 원 자료를 처리하는 과정을 보인 것이다.

III. 실험 및 형상복구

3.1. 실험설비 및 시료

본 실험에서는 Twyman-Green형 간섭계에 반도체 레이저 광원(Toshiba TOLD 9140, 파장 692.7 nm)을 사용하였고, 측정을 위하여 기준 거울을 스텝 모터, 감속기어 및 마이크로미터를 이용하여 최저 이동증가분 156.3 nm씩 이동하도록 하였다. 이 값은 주어진 파장에서 간섭무늬의 한 주기가 파장의 반 거리인 346.4 nm마다 되풀이 되므로, 최대 표본 추출 간격

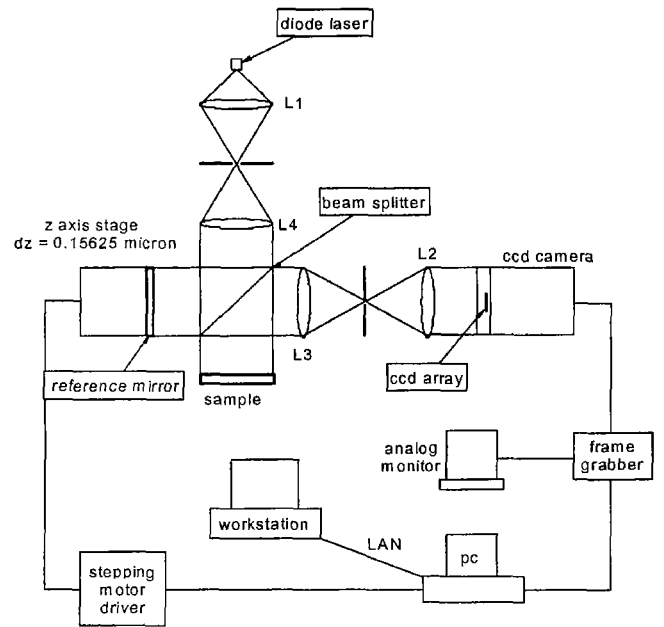


그림 2. Twyman-Green 간섭계와 제어 계통도.

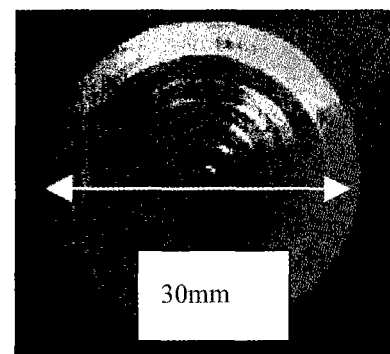


그림 3. 기준 시료.

이 이의 절반인 173.2 nm를 넘지 않도록 선정된 값이다. 그림 2는 본 실험에 사용된 간섭계통의 개략도이다.

그림 3은 검증 기준으로 사용하기 위하여 제작한 시편을 보인 것으로, 밀면의 직경은 3 cm, 최고 단계가 약 0.15 mm 인 계단형 원기둥 모양을 하고 있다. 실제 실험에서는 광학계의 시야한계 때문에 가운데 부분의 3개 구조물로 제한되었다. 검출용 CCD의 512×512 화소 중 중심 부분의 256×256 화소가 분석에 이용되었으며 화소 값은 8 bit로 변환 저장되었다.

CCD를 통하여 입력된 원 자료 값들은 전처리 과정을 거치지 않은 상태로 (1)과 (2)의 관계식을 적용하여 최대 가시도에 해당하는  $z$  방향의 좌표점을 산출하였다. 이렇게 산출된 최대 가시도를 나타내는  $z$ 좌표들이 이루는 면이 삼차원 형상을 나타내는데, 이 자료는 3×3 median filter로 후처리 하여 일부 noise를 제거하였다.

3.2. 복구 형상의 비교

그림 4는 주어진 시료에 대한 두 봉우리 찾기 샘플의 최종

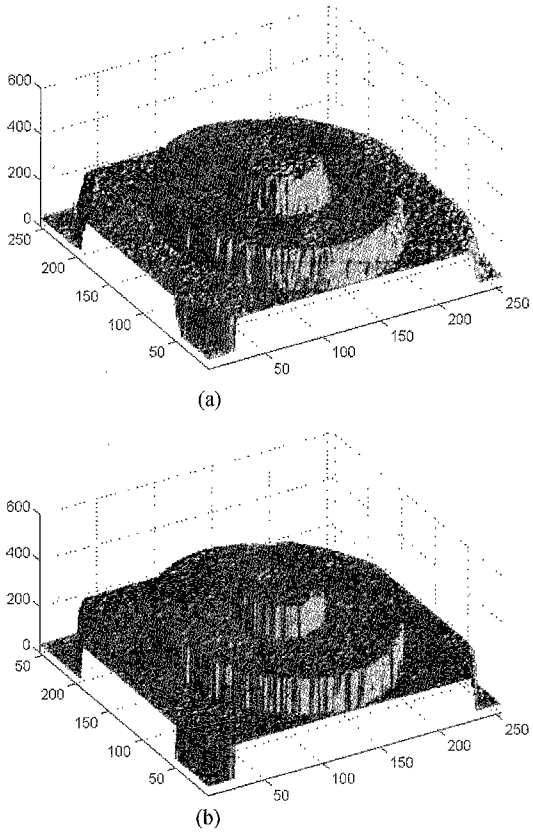


그림 4. 기준 시료의 3차원 재구성. (a) 가중 평균법, (b) 상관법  
x, y축의 숫자는 화소 번호이며, z축의 번호는 스텝모터의 계수 번호임.

결과를 보인 것으로, Matlab의 shading기능을 이용하여 제시하였다. 두 결과의 비교에서 가장 대조적으로 나타나는 차이점은 표면 거칠기인데, 상관법의 결과가 훨씬 그 표면오차의 크기가 작은 것처럼 제시되고 있다. 또 다른 차이점은 수직 벽에 대한 표현에서 관찰되는데, 이 부분에서도 상관법이 수직 벽을 더 실물에 가깝게 재현하고 있다는 점이다. 각 단계(가운데 부분부터 1, 2, 3단으로 구분)별 높이 비교 결과를 그림 5에 보였는데, 이 결과에서 수직 벽의 재현 특성차이가 명확하게 대조됨을 관찰할 수 있다. 각 단계의 높이도 두 방법 모두 마이크로미터 측정치의 오차범위 이내의 또는 그 근사값을 재현하였다. 특히 제1단 부분의 높이는 양 방법이 모두 동일한 값(132.530 nm)으로 산출되어, 실제 측정치 0.132 mm와 합치하는 결과를 보였으며, 2단계의 높이에서도 가중평균치의 경우보다 상관법의 결과 144.578 nm가 실측높이 0.144 mm에 더 가까이 측정되었으며, 3단계의 경우는 두 경우 모두 실측 오차 범위 이내에서 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 자세한 수치비교는 표 1에 제시하였다.

위의 기준 시료에 대한 잠정적 결론은 같은 방법을 동전에 적용하여 얻은 결과에서도 대동소이하게 검증되었다. 그림 6은 동전의 일부분으로, 이 결과에서도 상관법의 돌출부분의 벽면이 그림 4(b)와 같은 질감, 즉 벽면에 수직의 고랑형 무늬를 가진 특성을 가지고 있음을 볼 수 있다.

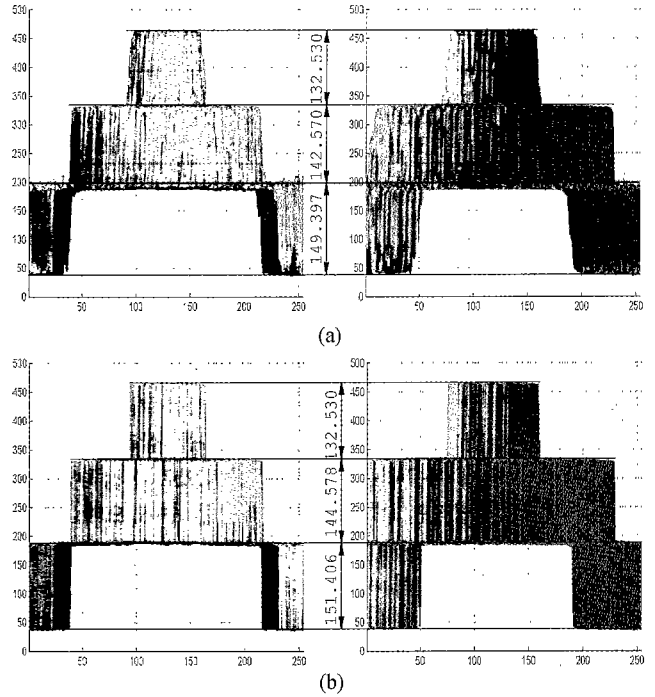


그림 5. 재구성한 3차원 형상의 측단면 비교. (a) 가중 평균법 (b) 상관법. 각 그림에서 제일 아래 공백부분은 절단면이 지나가고 있는 가상 면임.

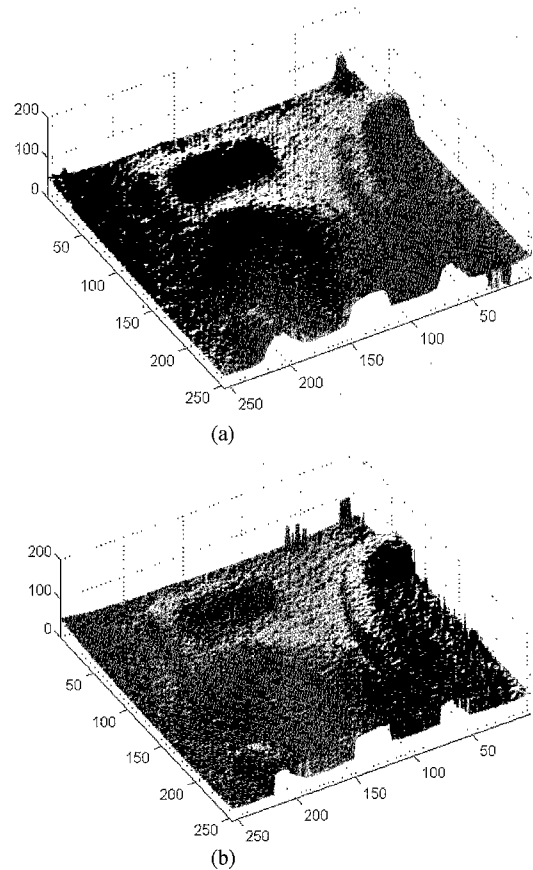


그림 6. 동전의 표면 구조. (a) 가중법, (b) 상관법.

표 1. 기준 시료에 대한 측정치(nominal value) 비교

	1단	2단	3단
실측치	132	144	150
가중법	132.530	142.570	149.397
상관법	132.530	144.578	151.406

실측치는 마이크로 미터로 측정된 값임, 단위 : micrometer

#### IV. 토의 및 결론

본 논문에서는 백색광 주사 간섭계에서 간섭무늬의 가시도 봉우리를 찾는 썸법의 충실도를 비교 하였다. 비교 대상은 기본적으로 주사 방향 각 점의 간섭무늬 밝기를 가중함수로 사용하는 가중치 법과, 가우스형 포락선 함수를 실측 함수와 역상관 시켜서 최대 봉우리를 찾는 두 방법으로 선정하였는데, 이 두 방법은 직접적인 의미를 쉽게 파악할 수 있으며 수학적 처리 단계를 줄여 오류의 가능성이 적다는 점에서 비교 대상으로 선정하였다. 계단식 시료를 대상으로 한 비교에서, 두 방법 모두 높이의 재현에서는 높은 정확도를 보였다. 상관법은 그러나 표면의 구조(topography) 재현에서 가중치 방법 보다는 거칠기를 상대적으로 작게 재현하고 있으며, 특히 수직한 구조물의 벽면 표현에서 이상적인 직각에 가까운 구조를 나타냄이 관찰되었다. 평균 높이 단차의 측정 오차는 양 방법이 동등한 정도였다.

표면 거칠기 표현의 정확도에 대해서는 추후 시료의 표면 조도를 여타의 방법으로 측정하여 비교하여야 할 내용이지만, 위 두 조의 비교자료에서 두드러지게 나타나는 차이점은 벽면의 표현에서 발견된다. 상관법은 그림 5(b)에서 보인 바와 같이 이상적인 직각의 벽을 재구성해 냈는데, 실제의 시료를 현미경으로 관찰해 보면 단계의 모서리들이 부드러운 곡면을 이루고 있다. 동전의 경우에도 마찬가지로 숫자의 수직벽이 그림 6(b)와 같은 90°벽을 형성하지는 않는 것으로 관찰된다. 오히려 실제의 형상은 그림 5(a), 6(a)의 형태에 더 근사한 형태를 하고 있다.

위와 같은 차이에 대하여 저자들은 다음과 같은 모델을 사용하여 해석을 제시한다.

먼저 단차의 가장자리가 그림 7과 같은 일반적 형태를 하고 있다고 가정한다. 표면은 연미처리를 하지 않았기 때문에 비교적 거친 상태에 있다. 그림 7에서 A, B, C로 표시된 각 구간은 CCD평면의 한 화소의 폭에 대응되는 물체상의 구역을 나타낸다. A에서 생성된 간섭무늬는 그림 1과 같은 과정을 거치면서 정확한 가시도 봉우리의 위치 정보를 제공한다. 그러

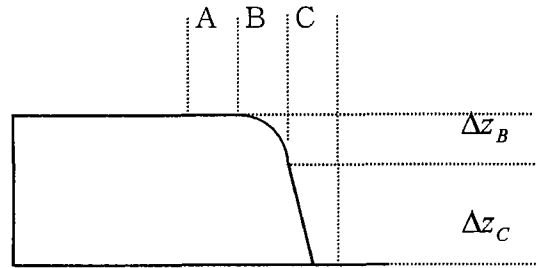


그림 7. 단차 부위에서의 측정오차 분석모델.

나 B, C 구간으로 이동하면서 화소의 폭에 해당하는 수직부분의 위치의 불확정도가 증가한다. 특히 구간 C의 전 구간에서 반사된 빛이 한 화소에 집광되기 때문에 이 화소로부터 추출되는 가시도 정보는 A와 같이 평이한 다른 부분에서 사용하는 일반적인 가우스 형태의 포락선으로 나타낼 수 없을 것으로 판단된다. 그러나 식 (3)과 그림 1에 사용되는 포락선의 형태는 모든 구간 A, B, C에 동일하게 적용되기 때문에 이 구간 B, C에서는 가시도 봉우리 찾기에서 부적절한 위치정보가 산출된다. 이러한 그릇된 정보는 최종 결과에서 돌출형 noise로 간주되었을 것이며, 이러한 돌출형 noise의 제거에 탁월한 median filter가 후처리 과정에 적용됨으로서 그 noise가 전하려고 했던 정보가 최종 결과에서 제거되었을 것으로 추리할 수 있다. 그러나 가중평균법은 자체 자료만으로 위치정보를 찾으려 하며, 포락선과 같은 외부적이며 인위적인 조작의 가능성을 배제한 방법으로서 이와 같은 오동작의 가능성을 최소화 한 방법론이므로 상대적으로 실제물체에 근사한 형상을 재생시킬 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] B. S. Lee and T. C. Strand, Appl. Opt. **29**(26), 3784 (1990).
- [2] A. Knüttel, M. Breit, and D. Bocker, Proc. SPIE **2981**, 7.
- [3] B. E. Bourna, L. E. Nelson, G. J. Tearney, D. J. Jones, M. E. Brezinski, and J. G. Fujimoto, J. Biomedical Optics **3**, 76 (1998).
- [4] G. Kino and S. Chim, Appl. Opt. **29**(26), 3775 (1990).
- [5] P. de Groot and L. Deck, J. Opt. Soc. Am. A **13**(4), 832 (1996).
- [6] 박민철, 김승우, 한국광학회지 **9**(4), 245 (1998).
- [7] R. Windecker, P. Haible, and H. J. Tiziani, J. Mod. Opt. **42**(10), 2059 (1995).
- [8] 민경일, "짧은 기간섭성 광원을 이용한 3차원 형상 측정," 석사학위 논문, 한림대학교, 1998.

## A comparative study on peak finding algorithms in white light interferometry

Kyoung I. Min and Kie B. Nahm<sup>†</sup>

*Dept. of physics, Hallym University, Chunchon 200-702, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: kbnaum@sun.hallym.ac.kr*

(Received November 27, 2000 ; Revised manuscript received December 7, 2000)

In white light interferometry, fast and accurate localization of the fringe visibility is the most essential part in application of the principle. So much attention has been concentrated on speeding up the process, we in this study decided to investigate the results of the various peak-finding algorithms. Of the many approaches, two most simplistic algorithms were selected for their straightforwardness and robustness. Both were equally accurate in measuring the step height of a sample, but the method based on the weighted average technique proved to be truer to the surface topography. A model explaining the shortcomings of the correlation technique is presented.

*OCIS codes* : 110.4500, 120.3940.