

공초점 주사 현미경에서 고속, 고품질 3 차원 영상복원을 위한 최적조건

김태훈¹, 김태중², 권대갑³

^{1,2}한국과학기술원 기계공학과 Nano Opto Mechatronics 연구실

³한국과학기술원 기계공학과 Nano Opto Mechatronics 연구실(나노스코프시스템즈(주))

초록

공초점 주사 현미경(Confocal Scanning Microscope, CSM)은 Bio-cell 및 특정 형태를 가지는 object의 고분해능 3차원 영상복원이 가능하여 3차원 측정장비로 주로 사용된다. 특히 LCD 패널 및 반도체 웨이퍼의 불량 검사 장비로의 활용이 가능하여 3차원 영상으로부터 불량 여부와 원인을 알아낼 수 있다. 하지만 생산 공정에서 불량 검사를 하기 위해서는 고속, 고품질의 성능이 요구된다. 따라서 이 논문에서는 공초점 주사 현미경을 이용하여 고분해능으로 고속, 고품질의 3차원 영상복원을 할 때 어떠한 조건이 요구되는지 알아보고 시뮬레이션 하도록 하겠다.

1. 서론

공초점 주사 현미경(CSM)은 Optical Sectioning 이라는 강력한 기능을 가지고 있어 object 의 3 차원 영상복원이 가능하다. 3 차원 영상복원 과정 중 2 차원 절편 이미지들의 pixel 의 Intensity data 로부터 높이정보를 얻는 과정을 Peak-Detection 이라고 한다. Peak-Detection 방법에는 동일한 axial 방향의 범위 안에서 많은 2 차원 절편 이미지를 얻어 최대 Intensity 위치를 찾는 Maximum Peak-Detection(MPD) 방법과 적은 수의 2 차원 절편 이미지로부터 Curve Fitting 하여 최대 Intensity 위치를 찾는 Curve Fitting Peak-Detection(CFPD) 방법이 있다.

MPD 방법은 많은 수의 2 차원 절편 이미지가 필요하므로 3 차원 영상복원에 많이 시간이 소요되는 반면 CFPD 방법은 MPD 방법에 비해 적은 수의 2 차원 절편 이미지를 사용하기 때문에 짧은 시간에 3 차원 영상복원이 가능하다. 따라서 고속으로 3 차원 이미지를 얻기 위해서는 CFPD 방법을 이용해야 한다. 하지만 CFPD 방법에서 적절치 못한 Curve Fitting data 수(Threshold level 이상의 Intensity 를 갖는 data 수)와 Curve Fitting Order(CFO)는 측정속도에 영향을 주므로 고속측정이 어려울 수도 있다. 또한 CFPD 방법을 이용할 때 적절치 못한 Curve Fitting Order 로 인한 큰 Peak Position Deviation 과 2 차원 절편 이미지의 Intensity 정보를 얻을 때 발생하는 다양한 시스템 에러(Noise)로 인한 낮은 SNR(Signal-to-noise ratio) 때문에 고품질의 3 차원 영상을 얻을 수 없다. 따라서 이 논문에서는 Curve Fitting Peak-Detection 방법을 이용하여 고분해능으로 측정할 때 고속, 고품질의 3 차원 영상복원을 위한 최적조건을 알아보고 이러한 최적조건을 얻기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 방법

2.1 3차원 영상복원

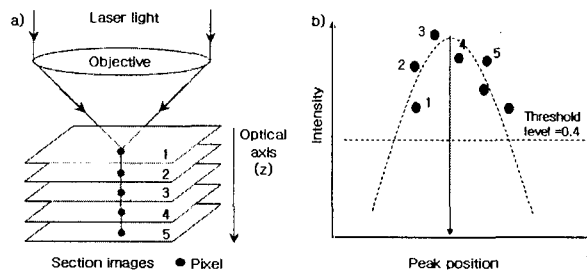


그림 1. a) Optical Sectioning, b) Curve Fitting Peak-Detection

3 차원 영상복원은 Optical Sectioning 을 통해 획득한 2 차원 절편 이미지들로부터 3 차원 이미지를 얻는 것을 말하는 것으로 2 차원 이미지의 크기가 640×480 이라면 3 차원 복원 과정은 $640 \times 480 = 307,200$ 번 수행되어야 하며 다음과 같은 과정을 거치게 된다. 첫 번째 과정에서는 CSM 을 이용하여 Optical Sectioning 을 통해 여러 장의 2 차원 절편 이미지를 얻음으로써 3 차원 Data 를 얻는다(그림 1-a). 두 번째 과정에서는 광축(Optical axis) 방향의 서로 다른 위치에서 얻어진 2 차원 절편 이미지들에 대해 일정한 Threshold level 이상의 Intensity 를 갖는 pixel 만을 이용하여 Curve Fitting 함으로써 최대 Intensity 를 갖는 peak-position 을 검출한다(그림 1-b). 마지막 과정에서는 각 pixel 에 대해 검출된 peak-position 이 저장되고 각 peak-position 에 해당하는 Intensity 가 display 된다.

2.2 저품질 3차원 영상복원의 원인

3 차원 영상복원의 품질은 Peak-Detection 방법에 의해 검출된 peak-position 의 repeatability 에 의해 평가된다. 낮은 SNR, Optical Sectioning 할 때 사용되는 actuator 의 낮은 accuracy 와 CSM 에 사용된 optical component 들에 의해 발생한 aberration 은 3 차원 영상복원의 품질을 저하시키는 원인이다.

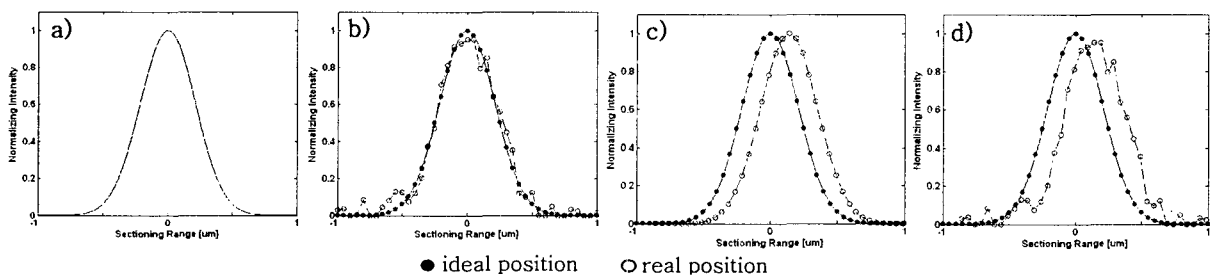


그림 2. Axial response, a) Ideal, b) with noise, c) with the position error of actuator, d) with noise and the position of actuator

그림 2 는 CSM 의 Ideal Axial Response(그림 2-a)와 여러 error 로 인한 영향이 부가된 Axial Response(그림 2-b,c,d)를 보여준다. 그림 2-b 는 저품질 3 차원 영상복원의 원인이 되는 낮은 SNR 의 영향을 보여주고 있으며, 그림 2-c 는 sectioning 을 위해 사용된 actuator 의 낮은 accuracy 때문에 원하는 광축 방향의 위치를 측정하지 못해서 정확한 peak-position 을 검출하지

못한 경우이다. 그림 2-d 는 낮은 SNR 과 actuator 의 낮은 accuracy 가 복합적으로 적용되어 나타난 경우이다.

2.3 시뮬레이션 방법

고속 측정을 위해 CFPD 방법을 이용할 때 시스템의 SNR, Curve Fitting Order, Curve fitting 에 사용될 data 의 수를 결정짓는 Threshold level 과 2 차원 절편 이미지의 수를 변화시켜가면서 검출된 peak-position 이 어떠한 error 도 없는 Ideal 한 경우에 검출된 peak-position 에 대해 어느 정도의 편차를 가지는지 시뮬레이션 하고, 그 결과로부터 3 차원 영상복원에 있어 어느 정도의 성능 감소가 있는지를 판단하고 성능감소가 최소가 되는 적절한 SNR, Curve Fitting Order, Threshold level 와 2 차원 절편 이미지의 수를 결정해보도록 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Curve Fitting Order 과 SNR 사이의 관계

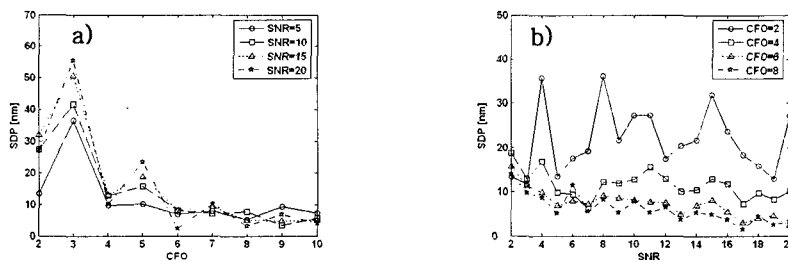


그림 3. Standard Deviatoin of Peak-position, a) CFO의 영향, b) SNR의 영향

Curve Fitting Order(CFO)와 SNR 이 Standard Deviation of Peak(SDP)에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 SNR 을 2 ~ 20, CFO 를 2 ~ 10 까지 변화시켜가면서 SDP 를 구해보았다. 그리고 이때 Threshold level 은 0, 2 차원 절편 이미지의 수는 40 으로 가정하였다. 그림 3-a 는 SDP 에 대한 CFO 의 영향을 보여주는 것으로 CFO 가 증가할수록 SDP 는 감소함을 알 수 있다. 또한 짝수 CFO 가 홀수 CFO 에 비해 더 작은 SDP 를 보여주었다. 이는 짝수 함수의 형태가 CSM 의 Axial Response 와 같은 좌우 대칭이기 이어서 짝수 차수로 Curve Fitting 할 때, 실제적인 Axial Response 를 잘 따라가기 때문으로 생각된다. 그림 3-b 는 SDP 에 대한 SNR 의 영향을 보여주는 것으로, SNR 이 증가할수록 SDP 가 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 SNR 이 클수록 CFPD 과정에 미치는 영향이 작기 때문이다. 또한 그림 3 의 결과를 통해 동일한 SNR 일 경우 CFO 가 높고 짝수 일수록, 동일한 CFO 일 경우 SNR 이 높을수록 더 작은 Curve Fitting error 를 보여줌을 확인 할 수 있었다.

3.2 Threshold level 의 영향

Curve Fitting 을 할 때 사용되는 data 의 수에 따라 fitting 결과가 달라진다. 이 단락에서는 Curve Fitting 에 사용되는 data 의 수를 결정짓는 Threshold level 이 SDP 에 어떤 영향을 주는지 알아보았다. Threshold level 은 최대 Intensity 와 Threshold factor 를 곱하여 얻어지고, Threshold factor 는 0(0%)부터 1(100%)의 값을 갖는다. “최대 Intensity=1” 일 때 “Threshold factor=0.2” 이면 Intensity 가 0.2 이상의 값을 가지는 data 만이 사용되고, “Threshold

factor=0" 이면 얻어진 모든 data 가 Curve Fitting 에 사용된다는 것을 의미한다. 사용되는 data 의 수가 적을수록 3 차원 영상복원에 걸리는 시간은 단축될 수 있다.

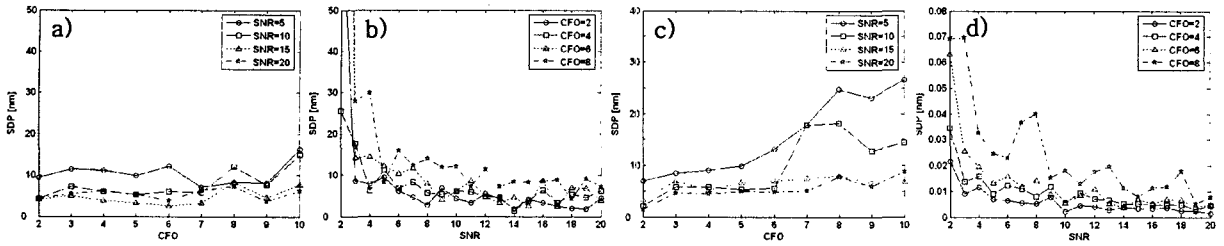


그림 4. Threshold level의 영향, a-b) Threshold level=0.2(20%), c-d) Threshold level=0.4(40%)

그림 4 는 최대 Intensity 를 1 로 가정하고 SDP 에 대한 Threshold level 의 영향을 보여주는 것으로 그림 3 의 결과에 Threshold level 을 변화시켜가면서 SDP 를 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 4-a 와 c 에서 볼 수 있듯이 Threshold level 이 0 보다 큰 경우, 즉 특정한 값 이상의 Intensity 를 가지는 data 만을 이용했을 때, 그림 3 의 결과와 달리 낮은 CFO(CFO=2-4)에서 더 작은 SDP 를 나타냈고, 높은 CFO 의 경우는 SDP 가 오히려 증가(그림 4-c)하는 결과를 얻었다. 이것은 Threshold level 에 의해 Axial Response 의 양쪽 끝 data 가 사용되지 않았기 때문으로 생각된다(그림 5).

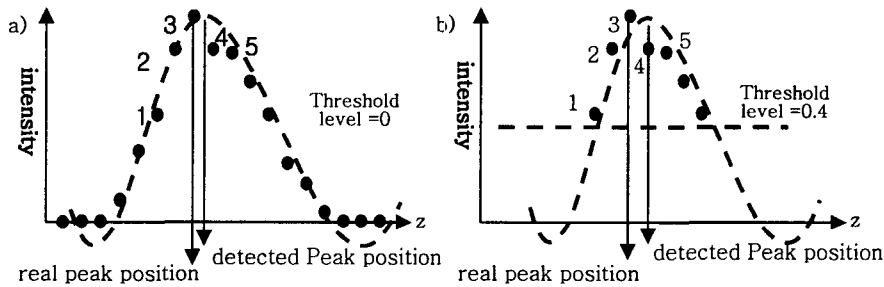


그림 5. 교차(4차) Curve Fitting에서 Threshold effect, a) Threshold=0, b) Threshold =0.4

그림 5 는 4 차로 Curve Fitting 했을 때 Threshold level=0(그림 5-a)과 Threshold level=0.4(그림 5-b)를 비교한 것이다. Threshold level=0 이면 높은 CFO 가 더 작은 SDP 를 보여주고 Threshold level 이 0 이상이면 낮은 CFO 가 더 작은 SDP 를 보여준다. 따라서 빠른 3 차원 영상복원을 위해서는 0 이상의 Threshold level 을 사용해야 하며, 그에 따라 낮은 CFO 를 사용해야 함을 알 수 있다. 그림 4-b 와 그림 4-d 를 비교해 보면 SNR 이 클 때 Threshold level 이 클수록 SDP 가 감소함을 알 수 있는데, 이것은 큰 noise 로 인해 발생한 잘못된 Intensity data 가 Threshold level 에 의해 제거됨으로써 Curve Fitting 시 발생할 수 있는 error 를 줄여 SDP 감소시키기 때문으로 생각된다.

3.3 시스템의 SNR 에 따른 Threshold level 과 2 차원 절편 이미지 수와의 관계

시스템의 SNR 에 따라 사용 가능한 Threshold level 과 2 차원 절편 이미지수의 관계를 시뮬레이션 해보았다. 그림 6 에서 보듯이 작은 SNR(8 이하)의 경우, 2 차원 절편 이미지의 수가 증가함에 따라 사용 가능한 Threshold level 이 증가함을 알 수 있다.

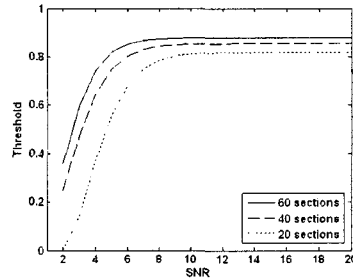


그림 6. SNR에 따른 Threshold level과 2차원 절편 이미지 수의 관계

따라서 Curve Fitting 을 하기 위해서는 구성된 시스템의 SNR 을 알고 그에 맞는 Threshold level 과 2 차원 절편 이미지 수를 사용해야 고속, 고품질의 3 차원 영상복원이 가능하다.

4. 결론

Case	SNR	Curve Fitting Order	Threshold level
1	High	High	Low
2	High	Low	High
Optimum Conditions	More than 10	2 ~ 3	0.4 ~ 0.6

표 1. 고품질 3차원 영상복원을 위한 최적조건

앞에서 SNR, CFO, Threshold level의 영향과 Threshold level과 2차원 절편 이미지 수의 관계에 대해서 알아 보았다. 3차원 영상복원의 품질은 CFPD로부터 검출된 peak-position의 repeatability에 의해 평가되고 repeatability는 peak-position의 표준 편차로 나타낼 수 있다. CFPD를 이용해 peak-position을 찾을 경우, 3차원 영상복원의 품질은 “SNR, CFO, Threshold level과 2차원 절편 이미지 수”와 같은 몇몇 파라미터에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 또한 이러한 peak-position의 표준편차에 대한 파라미터들의 영향을 분석함으로써 고품질 3차원 영상복원을 위한 적절한 파라미터의 값을 결정할 수 있었다(표 1). 공초점 주사 현미경에서 Curve Fitting Peak-Detection 방법을 이용해 3차원 영상복원을 할 때, 시스템의 SNR에 맞는 적절한 Curve Fitting Order와 Threshold level을 사용한다면 고속, 고품질의 3차원 영상복원이 가능할 것이다.

참고문헌

[1] C.J.R Sheppard, D.M. Shotton, “Confocal Laser Scanning Microscopy”, 1977
 [2] Min Gu, “Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes”, Word Scientific Publishing Co PteLtd, 1996
 [3] TONY WILSON, COLIN SHEPPARD, “Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy”, ACADEMIC PRESS INC., 1984
 [4] Eugene Hecht, “OPTICS”, 4th Edition, Addison Wesley, 2002