

비점수차를 이용한 3차원 표면형상의 측정

Measurement of 3D surface profile using astigmatism

*#강주식¹, 김재원¹, 김종안¹, 임태봉¹, 진종한¹, 이종용²

*C.-S. Kang (cskang@kriss.re.kr)¹, J.W. Kim¹, J.-A. Kim¹, T.B. Eom¹, J. Jin¹ and J.-U. Lee²

¹한국표준과학연구원 길이시간센터, ²청주대학교 레이저광정보공학과

Key words : astigmatism, surface profile, single shot, microscope, three-dimensional

1. 서론

표면의 형상을 측정하는 방법은 다양하다. 이중 널리 사용되는 것으로는 백색광주사간섭법, 위상천이간섭법, 공초점현미경을 사용한 방법이 있는데, 이들 모두 기본적으로 물체 스테이지나 광학 프로브, 기준거울 또는 레이저 주파수 등의 스캐닝 과정이 요구되어 고속 측정에는 한계가 있게 된다. 최근 공간위상천이장치가 개발되면서 위상천이된 4장의 간섭무늬 이미지를 동시에 획득할 수 있는 기술이 개발되어 진동에 둔감한 측정이 가능하게 되었는데, 이 또한 위상 언래핑 (unwrapping) 등의 연산시간이 소요되며 연속적이고 부드러운 표면형상 측정에 국한된다는 제한점이 있다. 본 발표논문에서는 단 한 장의 이미지 획득을 통해 파장의 20배가 넘는 단차까지도 위상 모호성 없이 고속측정할 수 있는 기술을 소개하고자 한다.

2. 비점수차를 이용한 형상 측정 원리

비점수차는 광학계의 수차의 일종이다. 렌즈에 비점수차가 있을 경우 평행광이 입사하면 하나의 초점이 형성되지 않고 두 개의 서로 수직한 초선(line focus)이 서로 다를 곳에 형성되는데, 그 두 초선 사이의 지점에서는 타원형의 모양을 띠고 중간지점에서는 원형의 초점(circle of least confusion)을 가지게 된다. 따라서 이 위치에 4분할 광검출기를 위치시키면 타원의 모양에 따라 값이 바뀌는 초점오차신호(focus error signal: FES)를 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$FES = \frac{(A+C) - (B+D)}{(A+B+C+D)} \quad (1)$$

여기서 A, B, C, D는 각각 4분할 광검출기의 1, 2, 3, 4사분면에 입사한 빛의 세기를 나타낸다. 이 FES 신호는 자동초점장치에 널리 사용되는 것인데, 역으로 FES를 통해 물체의 높이 정보를 얻고자 하는 것이 본 논문의 핵심이다.

광원을 2차원 핀홀 어레이에 조사시키고, 이 핀홀 어레이의 상을 물체면에 결상시키면, 물체면의 핀홀 상들은 다시 현미경 대물렌즈와 서로 직교한 두 개의 실린더 렌즈를 통해 CCD카메라에 결상되게 된다(Fig. 1 참조). 이 때 각 핀홀의 상은 물체면의 높이에 따라 원형이 되기도 하고 타원형이 되기도 하는데, 식 (1)로 정의되는 FES를 모든 핀홀 위치에 대해 계산하여 물체의 3차원 높이 정보를 얻을 수 있다.

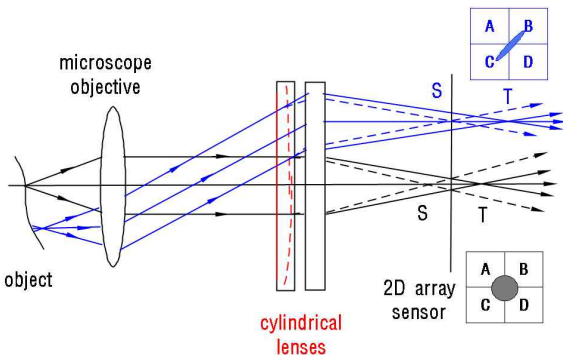


Fig. 1 Principle of the measurement

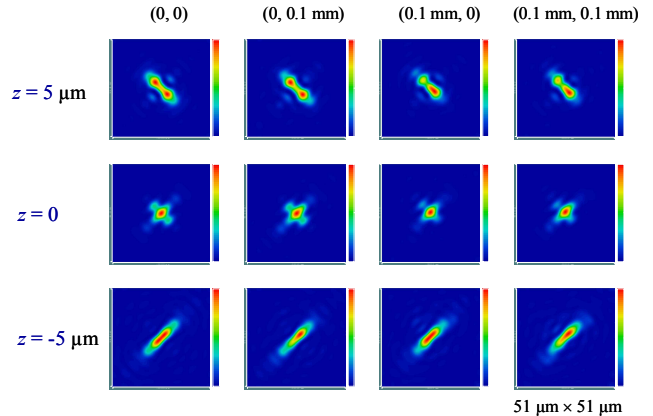


Fig. 2 Point spread function (simulated)

이러한 측정 시스템의 구축을 위해 시스템 설계를 하였으며 시뮬레이션을 통해 이러한 발상이 실제로 구현가능한지를 먼저 진단하였다. 물체상의 몇 군데의 위치에서 물체의 높이가 변할 때 CCD 카메라상에서의 point spread function (PSF)을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 2와 같다.

또한 핀홀 어레이의 사양을 정하기 위하여 역시 시뮬레이션을 통해 카메라에서의 타원형 초점의 크기를 계산하였다. 핀홀의 피치를 구멍 지름의 4배로 하였을 때의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같으며 이로부터 핀홀의 크기를 5 μm 와 10 μm 사이가 적당함을 알 수 있었다.

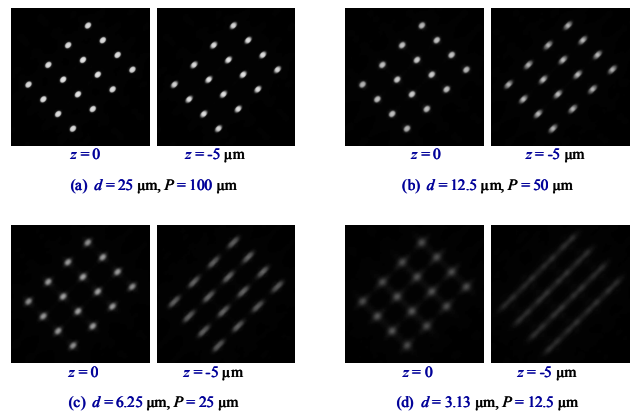


Fig. 3 Images of pinhole array at the CCD plane (simulated)

3. 실험

시뮬레이션에 사용한 광학부품들을 사용하여 실험장치를 Fig. 4와 같이 꾸렸다. 광원으로는 470 nm의 파장을 가지는 LED를 사용하였고, 핀홀 어레이는 핀홀의 지름이 10 μm, 피치는 50 μm 되도록 제작하여 사용하였다.

FES를 교정하여야 FES로부터 높이를 환산할 수 있으므로, 물체 스테이지를 약 1 μm씩 변위시키면서 그 때의 FES를 측정하여 본 시스템의 교정곡선을 얻어내었다. 얻어진 S-형 곡선은 Fig. 5와 같다.

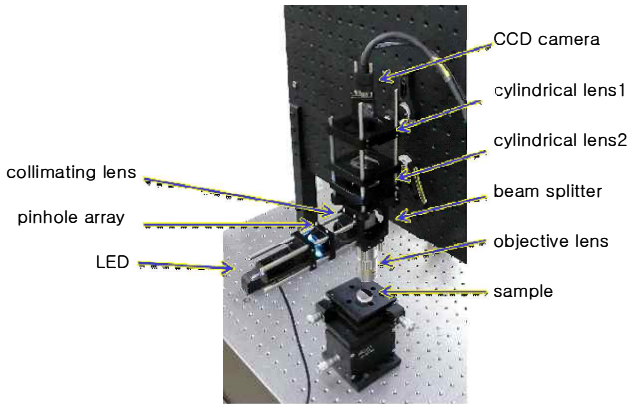


Fig. 4 Experimental setup

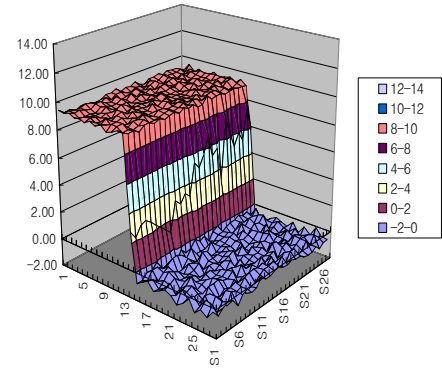


Fig. 7 Measured step height

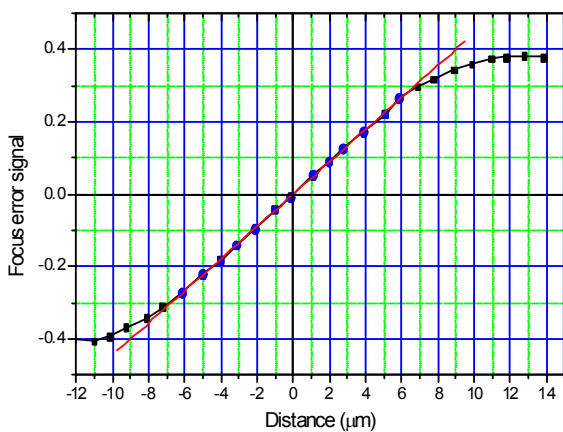


Fig. 5 Calibration of the FES curve of the system

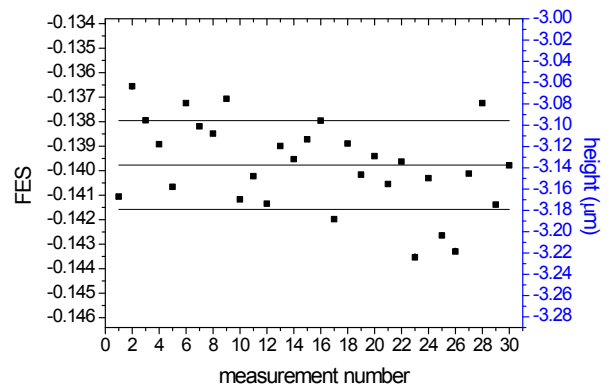


Fig. 8 Repeatability of the measurement

이 곡선의 직선부분의 에이터로부터 직선의 기울기를 구하였으며 이의 역수를 FES에 곱하면 높이 정보가 얻어지게 된다.

단차를 한 장의 이미지로 모호성 없이 측정할 수 있는 예로써 명목값이 10 μm 인 단차시편을 측정하였다. 이 단차는 표면거칠기 측정기 교정용 게이지블록 단차시편인데 4개의 단차중 가장 높은 10 μm 단차를 측정하였고, 두 면의 경계부분을 측정하였다. 획득한 이미지는 Fig. 6과 같으며, 이로부터 얻어진 3차원 표면형상은 Fig. 7과 같다.

동일한 측정점을 30회 반복 측정하여 측정반복도를 평가하였는데 그 결과 FES의 표준편차는 0.0018이 얻어졌다(Fig. 8 참조). 이 값은 높이로 환산하면 41 nm에 해당된다.

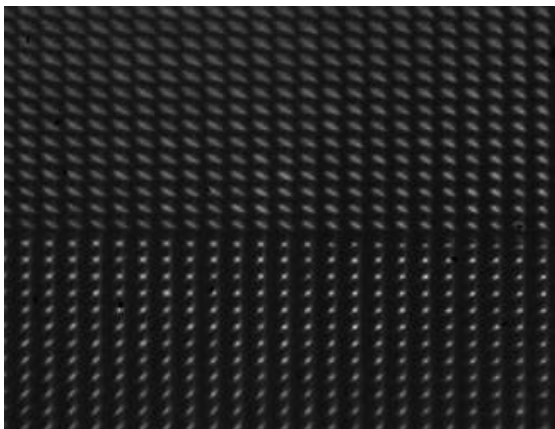


Fig. 6 Focal spots of the gauge block step specimen

4. 결론

물체의 3차원 형상을 한 장의 이미지 획득을 통해 고속으로 측정 가능한 측정시스템을 개발하였다. 본 시스템은 2차원 핀홀 어레이와 비점수차 렌즈를 사용하는 것이 특징이며, CCD상에서 초점의 모양을 측정하여 역으로 물체면에서의 높이 정보를 구하는 방식이다. 본 기술은 단 한 장의 이미지로 형상이 측정되어 진동에 둔감하며 연산이 복잡하지 않아 고속 측정에 활용될 수 있다. 제한점으로는 공간분해능이 구조적으로 높아질 수 있는 한계가 있으며, 측정가능 높이도 한계는 있다. 본 논문에서 사용한 광학계로는 12 μm 의 높이까지 측정 가능하나, 수십 μm 까지는 측정이 가능할 것으로 기대된다. 이 기술은 측정영역이 정해져있는 인라인 검사 장치로 활용되기에 적합할 것이다.

후기

본 연구는 한국표준과학연구원의 기반측정표준 응용기술개발 과제에 수행되었음.

참고문헌

1. Born, M. and Wolf, E., Principles of Optics, 5th Ed., Pergamon Press, Oxford&NewYork, 214-218, 1975.
2. Cohen, D. K., Gee, W. H., Ludeke, M. and Lewkowicz, J., "Automatic focus control: the astigmatic lens approach," Appl. Opt. 23(4), 565-570, 1984.