이중 현미경 구조를 이용한 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이 기반 병렬 공초점 시스템

A Parallel Mode Confocal System using a Micro-Lens and Pinhole Array in a Dual Microscope Configuration

배 상 우, 김 민 영*, 고 국 원, 고 경 철
 (Sang Woo Bae¹, Min Young Kim¹, Kuk Won Ko², and Kyung Chul Koh²)

¹School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

²Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

Abstract: The three-dimensional measurement method of confocal systems is a spot scanning method which has a high resolution and good illumination efficiency. However, conventional confocal systems had a weak point in that it has to perform XY axis scanning to achieve FOV (Field of View) vision through spot scanning. There are some methods to improve this problem involving the use of a galvano mirror [1], pin-hole array, etc. Therefore, in this paper we propose a method to improve a parallel mode confocal system using a micro-lens and pin-hole array in a dual microscope configuration. We made an area scan possible by using a combination MLA (Micro Lens Array) and pin-hole array, and used an objective lens to improve the light transmittance and signal-to-noise ratio. Additionally, we made it possible to change the objective lens so that it is possible to select a lens considering the reflection characteristic of the measuring object and proper magnification. We did an experiment using 5X, 2.3X objective lens, and did a calibration of height using a VLSI calibration target.

Keywords: micro lens array, micro pinhole array, multi confocal system, massive parallel system, micro bump inspection

1. 서론

현재까지 3차원 측정에 있어 여러 연구가 진행되어 왔다. 그 중에는 백색광 간섭계, 모아레 레이저 스캐닝, 위상천이법 등이 있다[1-3]. 이에 기반한 시각정보는 다양한 산업에 응용될 수 있다[4,5].

3차원 측정에 있어 공초점 시스템은 단일 핀홀을 이용하는 방식으로 높은 명암비와 분해능을 가지고 있다. 공초점 현미경은 정밀도는 우수하나, 면적 측정을 위해서는 XY축의 스캔을 요구하는 단점을 가지고 있다. 또한 3차원 측정을 위한 Z축 스캔을 고려하면 측정에 있어 많은 시간을 소요하게 된다. 이와 같은 공초점 시스템의 단점을 해결하기 위한 방안으로 표 1과 같이 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중 하나의 방식으로 갈바노미터를 이용한 빔 편향 방식이 있다[6]. 이는 대물렌즈에 입사하는 빔의 각도를 변화시켜 초점의 위치를 조정하는 방식이다. 이 방식은 XY축의 스캔 시간을 줄일 수는 있으나 속도 개선의 한계가 있다. 또한 수차가 발생되는 단점이 있다. 또 다른 방식으로는 배열 핀홀을 이용하는 방식이 있다[7]. 기존의 배열 핀홀을 이용하는 방식은 XY축 스캔이 빠르다는 장점이 있다. 그러나 핀홀 표면에서 발생하는 빛의 반사율로 신호의 간섭을 발생시킨다. 배열 핀

홀의 사용은 낮은 광투과율로 인하여 충분한 광효율을 얻지 못하는 점이 있다. 이를 보완한 방법이 마이크로 렌즈와 배열 핀홀을 이용한 것이다[8]. 이는 핀홀 위에 마이크로 렌즈를 결합하여 핀홀의 광투과율을 높이고 면 반사율을 낮추는 장점을 가지게 된다. 이 방식에서 빠른 Z축 스캔을 위하여 초점거리가 다른 유리판과 회전 디스크를 사용하게 되는데 이는 회전 디스크에서 발생하는 진동의 영향과 사용되는 유리판의 개수의 한계로 제한된 측정 범위를 가지는 단점이 있다.

본 논문에서는 공초점 현미경의 단점을 보완하여 마이크로 렌즈와 핀홀 어레이를 이용한 이차 현미경 구조의 병렬 공초점 시스템을 제안한다. 기존의 공초점 시스템에서 단점이 되는 XY 축의 스캔은 마이크로 렌즈와 핀홀 어레이를 이용하여 2차원 스캐닝의 속도를 높여준다. 이 방식은 빔 편향 방식과 비교하여 수차의 발생이나 편향각의 계산이 필요치 않다는 장점을 가지게 된다. Z축 스캔은 MLA와 대물렌즈를 이용하여 측정한다. 이는 스캐닝이 없는 다중빔 공초점 현미경기법[8]과 비교하여 회전 시 발생하는 진동을 줄일 수 있고 넓은 측정 범위를 가질 수 있다.

표 1. 기존의 공초점 이미징 시스템.

Table 1. Conventional confocal imaging system.

방법	장점	단점
갈바노미터 사용[6]	시편의 이동 없이 면적 스캔 가능	면적과 Z축 스캔에 많은 시간을 소요
핀홀 어레이 사용[7]	빠른 XY축 스캔	핀홀의 면에 반사되는 빛의 간섭
MLA 사용[8]	마이크로 렌즈로 인한 높은 광효율	제한적인 측정 범위

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

배상우, 김민영: 경북대학교 전자공학부

(gabear@naver.com/mykim@ee.knu.ac.kr)

고국원, 고경철: 선문대학교 제어계측학과

(kuks2309@sunmoon.ac.kr/kckoh@sunmoon.ac.kr)

※ 본 연구는 중소기업청 기술혁신개발사업 (SA113489)의 지원을 받아 수행되었음.

그림 1. 병렬 모드 공초점 이미징 시스템.

Fig. 1. A parallel mode confocal imaging system.

제안된 이중 현미경 구조의 다중 공초점 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 이는 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이를 이용하여, 측정 면에서 렌즈 어레이 개수에 해당하는 다수개의 공초점 프루브를 병렬적으로 형성하게 된다.

일차 구조의 대물렌즈는 MLA에서 발생하는 공초점 신호를 측정하게 되며, 이차 구조의 telecentric 렌즈는 시료를 측정하게 된다.

또한 일차 구조에 사용되는 대물렌즈의 교체가 가능하게 하여 측정 물체의 반사 특성에 따라 배율을 선택할 수 있는 시스템을 구성한다. 대물렌즈의 배율이 증가함에 따라 핀홀의 광투과율을 높일 수 있는 이점이 생기게 된다.

이차 구조의 telecentric 렌즈는 제안된 시스템에서 시료를 측정하는 역할을 한다. 3차원 측정을 위하여 Z축 스캔 시 telecentric 렌즈는 고정된 상태로 측정 시료에 초점을 맞추게 된다. 이차 구조의 렌즈는 공초점 응답신호를 결정하게 된다. 이때 사용되는 렌즈의 NA가 높을수록 신호의 분해능은 높아지게 된다.

공초점 시스템에서 3차원 영상을 획득하기 위해서는 Z축 스캔을 필요로 하게 된다. 기존의 공초점 방식[6,7]은 시편을 움직이는 방식으로 많은 시간이 소요가 된다. 본 논문에서는 1차 구조의 대물렌즈와 MLA를 고정하여 같이 Z축 이동이 가능 하도록 하였다. 이것은 시편을 움직이는 방식에 비하여 빠른 스캔이 가능하고 이는 스캐닝이 없는 다중빔 공초점 현미경 방식[8]과 비교하여 자유로운 측정 범위와 간격을 선택할 수 있다.

II. 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이

공초점 현미경 시스템에 있어 핀홀은 공초점 응답신호를 형성하는 매우 중요한 역할을 한다. 이때 핀홀 어레이만을 사용할 경우 낮은 광 투과율을 보이게 된다[9]. 이를 보완하기 위한 방법이 마이크로 렌즈를 같이 사용하는 방법이다.

그림 2. 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이의 구조도.

Fig. 2. The schematic diagram of micro lens and pinhole array.

그림 3. 제작된 마이크로 렌즈와 핀홀 어레이.

Fig. 3. Implementation of micro lens and pinhole array.

본 논문에서 제안하는 시스템에 사용된 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이는 그림 2와 같이 한 몸체에 통합하여 결합된 마이크로 렌즈와 핀홀 어레이의 구성을 갖는다. 마이크로 렌즈의 초점거리는 핀홀 면에 맞도록 제작이 되며 각 렌즈와 핀홀의 위치는 정밀하게 정렬된다. 이는 마이크로 렌즈로 모인 빛이 핀홀을 지나도록 하여 광효율을 높여주는 역할을 하게 된다.

그림 3은 실제 제작된 MLA로써 마이크로 렌즈의 지름은 $26\mu\text{m}$, 렌즈간 피치 $30\mu\text{m}$, 핀홀 지름 $7\mu\text{m}$ 를 사용한다. 또한 렌즈와 렌즈 사이에서 발생하는 반사문제를 해결하기 위하여 무반사 코팅을 하였다.

III. 피크 검출 알고리즘

공초점 시스템은 Z축 스캔 시 획득되는 신호의 최대광량이 되는 지점이 높이 정보가 되는 특징이 있다. 그러나 검출 신호의 신호 대 잡음비(S/N)가 좋지 않으면 피크의 위치가 변하게 된다.

기본적인 공초점의 응답신호는 가우시안 분포와 유사하게 나타난다. 그러나 수차로 인하여 신호의 분포가 좌우 대칭을 이루지 않고 있다. 이러한 공초점 응답신호 특징들을 고려하여 다차항 모델을 이용하여 곡선맞춤을 한다.

표 2는 반복측정 데이터에 대한 가우시안 분포와 4차 다항식을 이용하여 공초점 응답신호를 피팅한 편차를 나타낸 것이다. 4차다항식의 모델이 편차가 적게 나타남을 알 수 있다.

다차항 모델의 경우 차수가 증가할수록 표준 편차는 감소하여 공초점 신호의 피크 검출이 용이하다. 그러나 그림 4와

표 2. 커브 피팅 오차의 편차.

Table 2. Error deviation after curve fitting.

Model	Gaussian	4th polynomial
Deviation	0.024	0.012

(pixel value/255)

그림 4. 다차항 모델을 이용한 커브 피팅 오차의 편차.

Fig. 4. Error deviation of curve fitting with polynomial models.

같이 4차 이상의 다항식에서는 표준편차의 감소가 적게 나타나고 있다. 또한 본 논문에서는 최소자승법을 이용한 피팅을 하게 되는데, 다차항의 차수가 증가할수록 연산량이 많아지게 된다. 이는 아래의 수식과 같다.

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \dots & \sum x_i^n \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^n & \sum x_i^{n+1} & \dots & \sum x_i^{n+n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f(x_i) \\ \sum x_i \times f(x_i) \\ \vdots \\ \sum x_i^n \times f(x_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

이상의 기초 실험결과로 본 논문에서는 4차다항식을 이용하여 피크검출을 하게 된다. 위의 알고리즘을 이용하여 전체 측정 영역의 높이를 추출하려면 CCD 카메라의 해상도 만큼의 연산을 필요로 한다.

본 논문에서 사용된 CCD 카메라의 해상도는 1600×1200 이므로 192만의 곡선맞춤 연산이 필요로 하게 된다. 이를 CPU를 이용하여 연산하기에는 많은 시간을 요구하게 된다.

그리하여 본 논문에서는 NVIDIA에서 지원하는 GPGPU 기술인 CUDA를 이용하였다[10]. CUDA는 그래픽 처리장치를 이용하여 연산을 하는 것으로 코어의 연산속도는 CPU 보다 느리나 많은 코어개수를 가지고 있어 병렬처리에 용이하다. 실제 구현 시 CPU의 연산보다 4~7배의 속도 개선이 가능하다는 보고가 있다[11].

다음 표 3은 CPU와 CUDA를 이용하여 피팅 연산시간을 비교한 것이다. CUDA의 경우 병렬처리로 인하여 연산의 고속화를 가능하게 한다. 그러나 GPU의 연산을 위해서는 CPU로 데이터의 전송시간이 필요로 하기 때문에 연산 횟수가 적은 프로그램의 경우 CUDA가 더 비효율적일 수가 있다[12]. 본 논문에서 사용된 알고리즘의 GPU 연산 결과는 데이터 전송시간을 포함하여 CPU 연산 대비 약 48배의 빠른 연산결과를 나타내고 있다.

표 3. PC와 CUDA의 측정 시간 분석.

Table 3. Measurement time analysis of PC and CUDA.

Item	Time(msec)	Item	Time(msec)
PC연산 (i7 930)	1600	입력데이터 전송	18.52
		GPU 연산 (C1060)	14.42
		출력 데이터 전송	0.08
Total	1600	Total	33.02

IV. 실험 및 결과

그림 5는 본 논문에서 제안한 시스템의 실험을 위하여 구성한 것이다. 실험 시스템에 사용된 광학계 구성은 표 4와 같다.

공조점 응답신호의 분해능을 높이기 위해 파장과 대역폭이 낮은 광원을 사용하였고, 배율 교체가 가능한 5X, 2.3X 렌즈를 이용하여 구성하였다. 또한 반복 정밀도 실험을 위해 2 종류의 Z축 스테이지를 사용하였다.

본 논문에서 측정 시편의 특성에 따라 1차 구조의 대물렌즈의 교체가 가능하다고 하였다. 이에 대한 실험결과는 그림 6과 같다.

그림 5. Confocal 시스템 구성.

Fig. 5. Experimental configuration of the confocal system.

표 4. 평행 모드 Confocal 시스템의 사양.

Table 4. Specifications for a parallel mode confocal system.

구성	사양
CCD	Adimec-1600 m Resolution : 1600 x 1200 Pixel size : 7.4 μm square pixels
광원	Wavelength : 470 nm Bandwidth : 10 nm
대물렌즈	5X, NA: 0.13 2.3X, NA: 0.069
Telecentric 렌즈	0.9X, NA: 0.041
Z축 스테이지	Pi M-111.1DG Design resolution : 0.007 μm Backlash : 2 μm PI P-563 Open-loop resolution : 0.5 nm Closed-loop resolution : 2 nm

그림 6. 대물렌즈의 배율에 따른 공초점 신호.

Fig. 6. Confocal signals with different magnifications.

그림 7. VLSI 교정 타겟.

Fig. 7. VLSI Calibration target.

2.3X 렌즈를 이용한 측정

그림 8. VLSI 타겟의 3차원 측정 결과.

Fig. 8. The 3D height profile measurement of VLSI target.

그림 6은 5X와 2.3X의 대물렌즈를 이용하여 거울 타겟을 측정한 것이다. 2.3X 렌즈 보다 5X 렌즈가 빛을 더 많이 모아주어 공초점 응답 신호의 크기가 커짐을 알 수 있다. 이것은 낮은 반사율의 시편을 측정시 NA가 큰 높은 배율의 렌즈를 이용하여 측정이 가능하다는 것을 보여준다.

구성된 실험 셋업에 VLSI 교정 타겟을 이용하여 기초 실험을 하였다. 그림 7은 실험에 사용된 타겟으로 50 μm 의 높이 단차를 가지고 있다.

그림 8은 2.3X의 대물 렌즈를 이용하여 VLSI 타겟을 측정한 영상이다. 이를 이용하여 높이 단차의 교정을 수행하고 측정 반복 정밀도를 측정하여 보았다.

그림 9. 50 μm 높이 타겟의 측정 결과.Fig. 9. Measurement result on 50 μm height target.

그림 10. A-A' 단면의 높이형상 반복 측정.

Fig. 10. Repeated measurements on A-A' cross-sectional height profile.

그림 11. 타겟의 반복도 실험결과.

Fig. 11. Repeatability test for target.

그림 9와 10은 반복도의 측정을 위해 단차의 영역을 10회 반복하여 측정한 것이다. 측정에 사용된 Z축 스테이지는 PI사의 M-111.1DG이다.

그림 11은 타겟에 대한 높이 측정 반복도를 나타내는 것으로 표준편차는 2.1 μm 이다.

그림 12는 반복 정밀도의 향상을 위해 보다 높은 반복도를 가지는 PI사의 P-563을 이용하여 반복 정밀도를 측정한 것이다. 측정 결과 표준편차가 기존 2.1 μm 에서 1.1 μm 로 2배 가량 향상됨을 알 수 있다. 그러나 실험에 사용된 스테이지의 분해능의 비율과 비교하여 실험 결과는 좀 더 향상을 시킬 수 있는 가능성이 있는 것으로 분석된다.

그림 12. 거울의 반복도 실험결과.

Fig. 12. Repeatability test for mirror.

V. 결론

본 논문에서는 마이크로 렌즈 및 핀홀 어레이를 이용한 이중 현미경 구조의 병렬 공초점 시스템을 제안 한다. 일차 구조에서 마이크로 렌즈와 대물렌즈를 이용 하여 기존 병렬 공초점의 낮은 광효율을 보완하고 측정 시편의 특성에 따른 대물렌즈를 선택할 수 있게 하였다. 피크 검출 알고리즘으로는 4차 다항식 모델을 이용하여 피팅을 하고, CUDA를 이용하여 피크 검출 연산을 고속화 하였다. 또한 실험을 통하여 배율에 따른 반사도를 측정 하였다. 측정 반복도의 개선은 정밀한 스테이지를 이용하였다. 그러나 실험 결과에서와 같이 스테이지의 성능과 많은 차이를 나타내고 있는데 이는 향후 측정 알고리즘의 개선으로 보완이 가능할 것으로 판단된다.

향후 계획으로 좀더 피치가 작은 MLA 제작으로 정밀도를 높이는 것과 Z축 스캔의 개선으로 고속측정을 가능토록 하는 것이다. 현재 시스템의 몇 가지 문제점을 개선한다면 정밀 제조분야의 측정장비에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] S. Kim, Y. Choi, J. Oh, and M. Jung, "Phase-shifting grating projection moire topography," *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers (in Korean)*, vol. 22, no. 4, pp. 850-857, 1998.
- [2] K. Ko, K. Koh, and J. Kim, "Pole height inspection on LCD glass via high speed white light interferometry," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering (in Korean)*, vol. 24, no. 4, pp. 21-28, 2007.
- [3] J. Kim, S. Han, K. Ko, and K. Koh, "Development of 3-D inspection technology for solder paste using PMP method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering (in Korean)*, vol. 20, no. 10, pp. 12-21, 2003.
- [4] S. Yi, J. Rhi, S. Kim, and J. Lee, "3D Acquisition by using multi-view X-ray images," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 10, pp. 886-890, 2013.
- [5] C. Park and D. Kim, "Obstacle detection for generating the motion of humanoid robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 12, pp. 1115-1121, 2012.
- [6] Y. S. Bae, S. Moon, and D. Y. Kim, "High-speed image acquisition synchronized with the motion of galvanometer scanner for Confocal microscopy," *Proc. SPIE Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy*, vol. 6861, pp. 686116.1-686116.8, 2008.

- [7] G. Q. Xiao and G. S. Kino, "The real-time confocal scanning optical microscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 53, no. 8, pp. 716, 1988.
- [8] M. Ishihara and H. Sasaki, "High-speed surface measurement using a non-scanning multiple-beam confocal microscope," *Optical Engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 1035-1040, 1999.
- [9] J. Pawley, *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, Springer, 2006.
- [10] <http://ko.wikipedia.org/wiki/CUDA>
- [11] H. Choi, E. Park, and J. Kim, "Development of high-speed image interpolation method using CUDA," *Proc. 2008 Conference on Information and Control Systems (in Korean)*, pp. 300-301, 2008.
- [12] Y. Jung, *CUDA Parallel Programming (in Korean)*, Freelec, 2011.

배 상 우

2011년 경일대학교 전자공학과 졸업. 2013년 경북대학교 대학원 전자공학과 석사. 2013년~(주)고영테크놀로지 연구소 비전기술그룹 근무중. 관심분야는 3차원 광학 측정 시스템, CUDA를 이용한 영상처리 병렬고속화.

김 민 영

1996년 KAIST 기계공학과 졸업. 1998년 KAIST 대학원 석사 및 2004년 동대학원 박사. 2004년~2005년 (주)미래산업 연구소 선임연구원. 2005년~2009년 (주)고영테크놀로지 연구소 책임연구원. 2009년~경북대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 3차원 광학 측정 시스템, 광기전공학, 로봇센서 및 구동 시스템, 로봇 및 머신 비전.

고 국 원

1992년 서울대학교 농업기계학과 졸업. 1994년 KAIST 정밀공학과 석사 및 2001년 동대학원 기계공학과 박사. 2002년~2003년 (주)미래산업 연구소 선임연구원. 2003년~선문대학교 정보통신공학과 부교수. 관심분야는 3차원 측정 시스템, 영상처리, 인공지능.

고 경 철

1982년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1984년 KAIST 기계공학과 석사 및 1994년 동대학원 정밀공학과 박사. 1983년~1988년 (주)LG전자 중앙연구소 선임연구원. 1993년~1998년 (주)LG산전 안양연구소 책임연구원. 1998년~현재 선문대학교 정보통신공학과 교수. 관심분야는 로봇, 의료 로봇.