

## 가간섭 영역 외의 배경 잡음성 간섭무늬 신호 필터링을 통한 백색광 주사간섭계의 성능 향상

임해동 · 이민우 · 이승걸 · 박세근 · 이일항 · 오범환<sup>†</sup>

인하대학교 정보통신공학과 집적형 광자기술 연구센터(OPERA)  
Ⓞ 403-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2009년 7월 1일 받음, 2009년 10월 8일 수정본 받음, 2009년 10월 9일 게재 확정)

본 논문에서는 백색광 간섭계(White Light Interferometry, WLI)의 데이터 처리 과정에서 가간섭 영역 외의 배경 잡음성 신호 필터링을 통하여 백색광 주사 간섭계의 성능을 향상시켰다. 광학계의 개구수(Numerical Aperture, NA)가 유한한 백색광 간섭계의 경우, 단차가 크고 표면 굴곡이 심한 시료를 측정하게 되면 유한한 초점심도(Depth Of Focus, DOF)에 의하여 배경 잡음이 발생하며, 반사가 심한 경면의 경우에는 간섭무늬 신호보다 배경 잡음의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 배경 잡음을 제거하기 위하여 간섭무늬 신호 자체 형상에 영향을 주지 않으면서 효율적으로 배경 잡음 필터링이 가능한 전후 구간 평균법을 제시하였다. 전후 구간 평균법은 원 데이터와 그 이동평균과의 차이를 이용하는 방법으로, 고속으로 대략적인 정점의 위치를 파악한 후 정밀도가 높은 가시도 정점 검출 알고리즘으로 처리하여 측정 속도와 정밀도를 높였다. 전후구간 평균법을 이용하여 배경 잡음을 제거한 경우, 제거하지 않은 경우와 비교하여 잡음 화소가 약 1/4로 감소되었다.

### Interference Fringe Signal Filtering Method for Performance Enhancing of White Light Interferometry

Hae-Dong Yim, Min Woo Lee, Seung-Gol Lee, Se-Geun Park, El-Hang Lee, and Beom-Hoan O<sup>†</sup>

School of Information and Communication Engineering, Inha University, Optics and Photonics Elite Research Academy,  
253 Younghyun-Dong, Nam-Ku, Incheon 402-751, Korea

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

(Received July 1, 2009; Revised manuscript October 8, 2009; Accepted October 9, 2009)

In order to enhance the background noise filtering performance of the white light interferometry(WLI), we demonstrate the noise filtering performance of preprocessing of the measured fringe signals. The WLI was realized through a mirau interferometer which was equipped with a green LED. When measuring large-height and rough surface objects, the illumination optics are considered the numerical aperture(NA) and the depth of focus(DOF). In this case, the limited NA of the illumination optics has a considerable impact on the interference fringe. Therefore, we propose a preprocessing method that uses the intensity difference between the measured intensity and the moving average intensity. The performance is demonstrated by measuring an array of metal solder balls fabricated on printed circuit board(PCB). The proposed method reduces the noise pixels by 15 percent.

Keywords: White-light scanning Interferometry, Preprocess, Moving average interference fringe filtering, Background noise  
OCIS codes: (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology; (100.2650) Fringe analysis; (120.3180) Interferometry

### I. 서 론

백색광 간섭계(White Light Interferometry, WLI)의 설계시 광학계의 구성 및 정점 검출 알고리즘의 적용은 측정 대상 물체의 형상 및 광학적 특성을 고려해야 한다. 이러한 백색광 간섭계의 수직 방향 분해능(Axial resolution)은 광원의 가

간섭 거리, 이송 장치의 이송 간격 및 정밀도 등에 의해서 결정되며, 수평 방향 분해능(Lateral resolution)은 백색광 주사 간섭계의 광학계 구성에 의해 결정된다. 측정 대상물을 고려하면 백색광 간섭계의 광학계 구성은 개구수(Numerical Aperture, NA)가 작은 렌즈를 이용하여 초점심도(Depth Of Focus, DOF)가 크고 수평 방향 분해능이 큰 방식, 개구수가 큰 렌즈를 이용하여 초점심도가 작고 수평방향 분해능이 작은 방식으로 설계할 수 있다. 광학계의 초점심도보다 단차가

<sup>†</sup>E-mail: obh@inha.ac.kr

큰 물체를 측정하는 경우 광학계의 유한한 초점심도에 의하여 초점이 맞지 않는 스캔 구간이 발생한다. 이 구간에서 측정되는 광의 세기는 스캔 거리에 따라 변하게 되는데, 표면 굴곡이 심한 경우에 주변부 배경잡음이 노이즈로 작용하여 간섭무늬의 가시도 정점 검출을 어렵게 한다. 초점심도가 작은 렌즈를 사용하는 경우 이러한 광의 세기 변화는 더 심하다<sup>[1]</sup>. 일반적으로 백색광 간섭계의 광학계 설계시 다양한 측정대상에 대하여 광학계의 개구수와 초점심도를 고려하기 힘들기 때문에 간섭무늬 측정 후 데이터 처리 과정에서 간섭무늬의 전처리 과정이 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 광학계 구성에 의한 유한한 초점심도 외의 스캔 영역에서 발생하는 배경잡음에 의하여 간섭무늬가 측정 되었으나 노이즈 점으로 구분되는 부분의 광 세기의 높이에 따른 변화를 추적 분석하고 잡음을 제거하여 백색광 간섭계의 가시도 정점 분석 성능을 향상시키는 방법을 제안하고 검증하였다.

### II. 백색광 간섭계의 기본 원리

백색광 주사간섭계는 백색광의 넓은 주파수 대역으로 인한 짧은 가간섭 거리를 이용하여 물체의 삼차원 형상을 측정하는 방식이다. 간섭 방식으로 마이켈슨(Michelson), 미라우(Mirau)<sup>[2]</sup> 간섭계를 주로 이용하며, 기준단의 기준 거울을 이동하면서 반사되는 기준광과 물체에서 반사되는 물체광의 광경로차(Optical Path Difference)가 백색 광원의 가간섭 거리(Coherence length) 이내일 때 발생하는 간섭무늬의 분석을 통하여 물체의 형상을 복원 할 수 있다. 이러한 간섭무늬의 정점을 전체 측정 영역에 대하여 검출함으로써 측정 물체의 3차원 형상을 복원할 수 있다. 간섭무늬의 정점을 계산하는 알고리즘은 주로 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(phase peak) 알고리즘으로 분류된다. 가시도 정점 알고리즘은 간섭무늬 신호의 외형을 추출하여 최대 정점을 검출하는 방법으로 주로 디지털 신호처리에서 사용되는 다양한 방법들이 개발되었고<sup>[2-7]</sup>, 위상 정점 알고리즘은 간섭무늬 신호의 변화가 가장 큰 0차 오더 신호에서 정점을 추출하는 방식으로 Larkin<sup>[8]</sup>, Sandoz<sup>[9]</sup>방법이 대표적이다. 가시도 정점 검출 알고리즘으로 개발된 방법으로는 Fourier transform을 이용한 방법<sup>[2-4]</sup>, 무게 중심법, 2차 다항식 맞춤 알고리즘<sup>[5]</sup>, SEST (Squared-Envelope function estimation by Sample Theory) 방법<sup>[6]</sup>, 등이 제안되었으며, 최근에는 고속 알고리즘을 이용한 방식과 정점 검출 성능이 뛰어난 알고리즘을 병행하여 수행속도가 빠르며 정점 검출 성능이 좋은 방법이 제안되었다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서 측정한 시료의 경우 배경 신호의 세기가 측정 위치에 따라 수시로 변하기 때문에 이러한 정점 검출 알고리즘을 바로 적용하기 힘들며, 정점 검출 전에 전처리 과정이 필수적이다. 본 논문에서는 전처리 방법에 대하여 비교 분석하였다.

### III. 백색광 간섭계의 설계 및 제안된 간섭무늬 필터링 방법

본 실험에서는 개구수가 큰 렌즈를 사용하여 초점심도보다 높이가 크고 표면 굴곡이 심한 시료를 측정하였다. 측정 시료는 PCB기판 위에 수십  $\mu\text{m}$  높이의 금속 솔더 볼(solder ball)이 배열된 기판을 이용하였다. 그림 1은 본 논문에서 구성한 미라우형 백색광 간섭계의 개략도이다. 광원으로 LED(PEAK 파장 = 530 nm,  $\lambda_{\text{min}} = 520 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{\text{max}} = 550 \text{ nm}$ )를 사용하였고, 간섭계는 니콘(Nikon)사의 미라우형 간섭렌즈(배율 = 10배, NA = 0.3, DOF =  $3.03\mu\text{m}$ )를 사용하였다. 검출용 CCD의 성능은 640x480화소이며, 화소 값은 8bit로 저장되었다. 이송 장치는 정밀 전동 스테이지(motorized stage)를 이용하여 100 nm 간격으로 측정하였다.

그림 2(a)는 상용장비(Ambios Xi-100)를 이용하여 금속 솔더 볼의 표면 형상을 측정한 결과와 광축 스캔에 따른 측정 광의 세기 변화를 나타낸다. 상용 장비의 측정시 금속 솔더 볼의 중심부에서 간섭무늬가 측정 되었지만, 가간섭 영역 외의 스캔 영역에서 발생한 반사광에 의하여 금속 솔더 볼의 중심부 형상을 제대로 복원하지 못하였다. 전체 광축 스캔 영역이 광학계의 초점심도 보다 큰 경우 스캔에 따른 배경 신호의 세기가 많이 변하였으며, 반사가 심한 경면 시료에 대해서는 배경 신호의 세기가 더 많이 변하여 원 데이터의 배경 신호 세기를 일정하게 하는 전처리 과정이 필요하다. 간단한 전처리 방식으로  $[I'_k] = [I_{k+1}] - [I_k]$  또는  $[I'_k]^2 = [I_k]^2 - [I_{k-1}]^2$  등의 방법을 이용한다. 여기서 k는 광축방향 스캔 인덱스,  $I_k$ 는 측정된 광의 세기  $I'_k$ 는 노이즈 보정된 광의 세기를 나타낸다. 이전 또는 이후 프레임의 광의 세기를 이용하는 간단한 전처리 방법과 본 논문에서 제안하는 전후구간 평균 방법을 간섭무늬 신호에 적용하여 각 방법의 전처리 성능과 계산 시간을 비교해 보았다. 전후구간 평균법은 원 데이

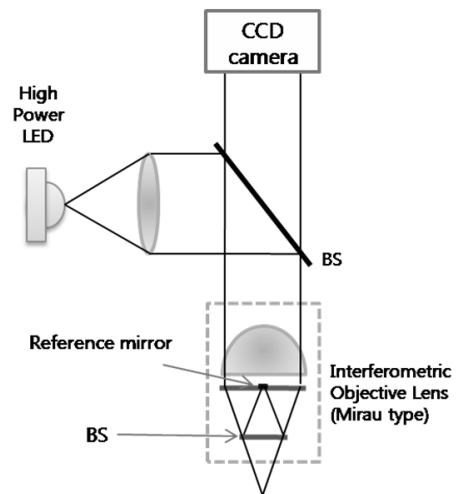


FIG. 1. Schematic view of a mirau correlation microscope. (BS : Beam Splitter).

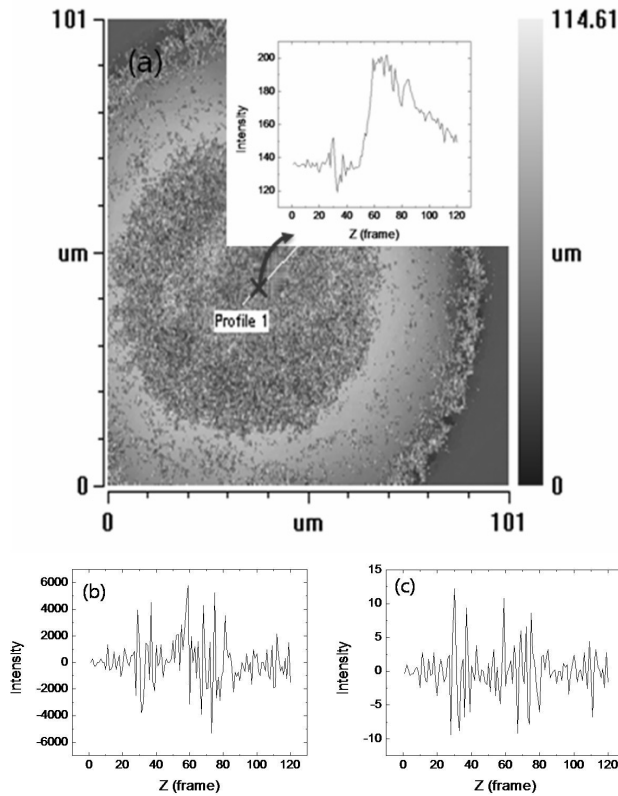


FIG. 2. (a) Measurement result of metal solder balls using a conventional equipment (Ambios Xi-100). (inset figure: the intensity data of the noise pixel). The preprocessed intensity data of noise pixel. (b) result of the simple method ( $I'_k = [I_k]^2 - [I_{k-1}]^2$ ), (c) result of the proposed method.

터와 이동평균과의 차이를 통하여 배경 신호의 세기를 일정하게 하는 방법으로 간섭무늬의 형상에 영향을 주지 않으면서 간섭무늬 검출을 쉽게 한다. 전후구간 평균법은

$$I'_k = I_k - \frac{\sum_{m=-i}^i w_{k-m} I_{k-m}}{\sum_{m=-i}^i w_{k-m}}$$

으로 정의된다.  $k$ 는 광축방향 스캔 인덱스,  $w_k$ 는 참조 구간의 가중치를 나타내며,  $I_k$ 는 측정된 광의 세기  $I'_k$ 은 노이즈 보정된 광의 세기를 나타낸다. 전후구간 평균법은 보정 대상 프레임의 전후  $i$ 개의 데이터 참조구간 값에 가중치 행렬 처리를 하여 계산한 이동평균 값과 대상 프레임 값과의 차이를 보정값으로 정한다. 전후 데이터 참조구간  $i$ 는 광원의 가간섭 거리( $l_c$ )와 스캔 간격( $s$ )을 고려하여 최적의 크기를 결정하였다. 본 실험에서 광원의 가간섭 거리는 2~3  $\mu\text{m}$  이며, 스캔 간격은 100 nm 로 측정하여, 전후 데이터 참조구간은 5, 가중치  $w_k$ 는 [1 1 1 1 1] 로 계산하였다.

전처리 성능을 비교하기 위하여 그림 2의 (a)와 같이 배경 광의 세기가 급격하게 변하는 화소에 대하여 전처리 결과를 비교해 보았다. 그림 2의 (b)와 (c)는 그림 2(a)의 측정 결과

Table 1. Measurement result by the algorithms

전처리 방법	정점 검출 방법	표준시료 (50 frame)	금속 솔더 볼 (185 frame)	측정 오차
FFT		4.5 sec	26 sec	~1.1%
$I'_k = [I_k - I_{k-1}]^2$ $I'_k = [I_k] - [I_{k-1}]$ $I'_k = [I_k]^2 - [I_{k-1}]^2$	무계중심법 (N=21, 0.25 sec)	0.33 sec	0.61 sec	~5.44%
	SEST (N=21, 0.32 sec)	0.4 sec	0.68 sec	~5.32%
전후구간 평균법	무계중심법 (N=21, 0.25 sec)	0.5 sec	1.22 sec	~1.31%
	SEST (N=21, 0.32 sec)	0.57 sec	1.29 sec	~1.22%

에 각각의 전처리 방법을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 2 (a)에서 간섭무늬의 위치는 스캔구간 20~40에서 측정 되었지만, 간단한 전처리 방법을 적용한 결과인 그림 2(b)에서는 간섭무늬의 위치를 정확하게 판별하지 못하였고, 전후구간 평균법을 적용한 결과인 그림 2(c)에서는 간섭무늬의 위치를 파악할 수 있었다. 전처리 결과 전후구간 평균법에서만 간섭무늬를 찾아내는 경우는 34064(79136-45072)화소로 약 11.1%정도였다. 배경 광의 세기가 급격하게 변하는 부분의 처리에서 간단한 전처리 방법은 성능이 좋지 않았고, 전후구간 평균법은 노이즈를 상당히 줄일 수 있었다.

전처리 결과가 간섭무늬의 정점 검출 위치에 주는 영향을 검증하기 위하여 전처리 과정이 필요없는 FFT방법으로 정점을 검출한 결과와 전처리 후 무계중심법과 SEST방법으로 정점을 검출한 결과를 비교하였다. 정확한 비교를 위하여 측정 시료는 높이가 9193 Å 인 표준 시료를 이용하고, 측정시 각 프레임은 100 nm 간격으로 총 50프레임을 측정 하였으며 10 회 반복측정 하였다. 무계중심법과 SEST방법의 경우 전처리를 하여 대략적인 정점 위치를 파악하고 정점에서 전후10프레임(N = 21)의 데이터를 이용하여 계산시간을 감소시켰다. 정점 검출 결과는 표 1과 같다. 분석 결과 간단한 전처리 방식의 경우 약 45 nm정도의 차이를 보였다. 간단한 전처리 방식의 경우 계산량이 많지 않지만, 이용 데이터 수가 적어서 스캔 간격에 영향을 받을 수 있고, 간섭무늬 부근에서 차체 형상에 영향을 주게 되어 정점 검출시 오차가 발생하였다. 반면에 전후구간 평균법을 적용한 경우에는 FFT방법과 큰 차이가 보이지 않았고, 간섭무늬 신호 차체에 왜곡이 발생하지 않고 광의 세기가 급격하게 변하는 부분의 노이즈도 상당히 줄어들었다. 금속 솔더 볼을 측정할 경우에도 표준 시료 측정 결과와 마찬가지로 간단한 전처리 방식에서 정점 검출 차이가 발생하였고, 두 가지 정점 검출 방식에 의한 오차는 기존의 결과 [7]와 비슷하였다. 총 계산 시간은 표준 시료(N = 50)의 경우 FFT방법은 약 4.6초, 전처리 후 정점 검출 방식은 모두 1초를 넘지 않았고, 금속 솔더 볼(N = 185)의 경우 FFT 방법은 26초, 전처리 후 정점 검출 방식은 모두 1.5초를 넘지 않았다. 측정 오차도 전처리 방법으로 전후구간 평균법을 이용하는 경우 FFT 결과와 크게 차이가 없었다.

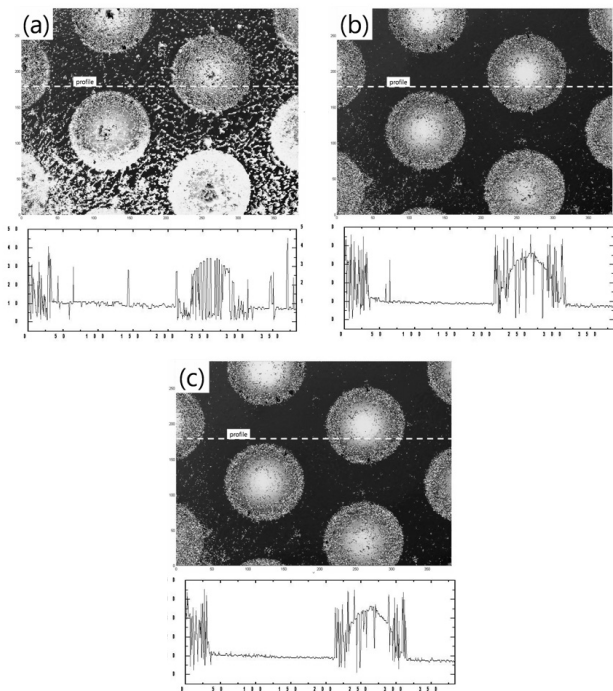


FIG. 3. 3D Measurement result and profile of ball grid array using WLI. (a) nonpreprocessed result (b) the simple method  $([I_k]^2 - [I_{k-1}]^2)$ . (c) the proposed result.

그림 3은 금속 솔더 볼의 측정 결과를 나타낸다. (a)는 전처리 하지 않은 경우의 3차원 형상으로 배경 잡음성 신호에 의하여 간섭무늬가 발생하였지만 정점을 검출하지 못하여 수많은 오차가 발생 하였다. (b)는  $[I_k] = [I_k]^2 - [I_{k-1}]^2$ 를 이용하여 간단하게 전처리한 결과로 전처리 하지 않은 경우보다 개선되긴 했지만 여전히 많은 노이즈가 관측된다. 전후구간 평균법으로 전처리한 경우를 (c)에 나타내었다. 금속 솔더 볼의 가장자리만 약간의 노이즈가 나타날 뿐 대부분의 영역에서 간섭무늬의 정점을 검출하여 3차원 형상을 복원할 수 있었다. 전처리 하지 않은 경우 노이즈 화소 수는 전체 307200 화소 중 167973화소로 약 54.7%였으며, 간단한 방법으로 처리한 경우 79136화소로 약 25.8%, 전후 구간 평균법의 경우 45072화소로 전체 화소중에 14.7% 만이 노이즈로 측정 되었다. 전처리 하지 않은 경우와 비교하여 122901화소(=168k-45k)가 제대로 측정 되어 잡음성 화소를 약 1/4 수준으로 감소시키는 성능 향상이 있었다.

#### IV. 결 론

백색광 주사 간섭계를 이용하여 PCB 위의 금속 솔더 볼

어레이의 거친 표면 형상을 보다 신뢰성 높게 관측하는 신호 처리 방안을 제안하고 검증하였다. 전처리 과정으로 원 데이터의 배경 잡음성 신호를 필터링하기 위해 제안된 전후구간 평균법은 원 데이터와 이동평균과의 차이를 이용하는 방법이다. 전후 구간 평균법을 이용하여 간섭무늬 데이터를 왜곡 없이 추출하였으며, 추출된 간섭무늬 데이터에 정밀도 높은 정점 검출 알고리즘을 적용하여 정밀도와 속도를 향상 시킬 수 있었다. 전처리를 거치지 않은 경우와 비교하여 잡음 화소를 1/4정도로 감소시키는 간섭무늬 검출 성능 향상이 있었고, 이는 후속 영상처리과정에서 더욱 좋은 결과를 가져오며, 총 계산 속도는 약 1.7초 소요되어 고속 측정에 무리가 없었다.

#### 감사의 글

본 연구는 삼성전기-인하대 초정밀 검사 계측 연구센터 (PIMC)와 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022)의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. J. You and S.-W. Kim, "Optical inspection of complex patterns of microelectronics products," *Manufacturing Technology* **57**, 505-508 (2008).
2. G. Kino and S. Chim, "The Mirau correlation microscope," *Appl. Opt.* **29**, 3775-3783 (1990).
3. P. de Groot and L. Deck, "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms," *Opt. Lett.* **18**, 1462-1464 (1993).
4. P. de Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain," *J. Mod. Opt.* **42**, 389 (1995).
5. M. C. Park and S. W. Kim, "Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms," *Opt. Eng.* **39**, 952-957 (2000).
6. A. Hirabayashi, H. Ogawa, and K. Kitagawa, "Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory," *Appl. Opt.* **41**, 4876-4883 (2002).
7. K. W. Ko, K. C. Ko, and J. H. Kim, "Pole height inspection on LCD glass via high speed whit light interferometry," *J. of the KSPE* **24**, 21-28 (2007).
8. K. G. Larkin, "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 832-843 (1996).
9. P. Sandoz, "An algorithm for profilometry by white-light phase shifting interferometry," *J. Mod. Opt.* **43** 1545-1554 (1996).