

논문 2010-47SP-2-6

백색광 위상천이 간섭계를 위한 개선된 삼차원 형상 측정 방법

(Improved 3D Shape Measurement Scheme for White Light Phase Shifting Interferometry)

김 경 일*, 이 동 열**, 고 윤 호**

(Kyoungil Kim, Dongyeol Lee, and Yunho Ko)

요 약

본 논문에서는 백색광 위상천이 간섭계에서 향상된 3차원 형상 정보를 보다 빠르게 얻을 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 백색광 위상천이 간섭계는 초정밀 제품의 형상 측정에 사용되는 유용한 방법이다. 첫째, 가시도 함수를 포함하는 간섭신호로부터 3차원 높이 정보를 신속하게 계산할 수 있는 가시도 유효 검출 구간 설정 방법을 제안한다. 둘째, 기존의 백색광 위상천이 간섭계에서 발생하는 전역 기울어짐 현상을 해결하기 위하여 바닥면 데이터 자동 추출 방법과 이를 이용한 최소 제곱 근사화 기반의 바다 평면 추정 방법을 제안한다. 셋째, 높이의 변화가 큰 경계영역에서의 형상 왜곡인 bat-wing effect를 제거하기 위한 적응 필터 방법을 제안한다. 실험을 통해 제안하는 방법이 기존의 백색광 위상천이 간섭법의 성능을 보다 향상시킴을 보인다.

Abstract

This paper proposes a new scheme to obtain enhanced 3D shape information rapidly for WLPSI(White Light Phase Shifting Interferometry). WLPSI is a convenient method to measure the height of the micro products. First we propose an effective method of limiting search interval for detecting the peak of the visibility function in order to obtain 3D shape information rapidly. Second we propose an automatic base level decision method based on image processing and a correction algorithm using the least square approximation method to overcome the global tilt problem of the conventional WLPSI algorithms. Third we propose an adaptive filtering method to remove the distortion known as bat-wing effect which appears near the step discontinuity. Experimental results show that the proposed overall technique is fast and provides more enhanced 3D shape information compared with the conventional WLPSI algorithms.

Keywords : WLPSI, Interferometry, peak of the visibility, bat-wing effect

I. 서 론

광 간섭계(Interferometer)는 넓은 측정 범위와 높은 분해능을 이유로 반도체 및 평판디스플레이 등 초정밀 부품의 측정에 널리 사용되고 있으며, 빠른 측정 속도의 이점으로 생산 공정상의 검사 역할까지 그 응용 범위가 확대되고 있다.

이러한 간섭법 중 단색광 위상천이 간섭법(Phase Shift Interferometry : PSI)은 주로 레이저나 단파장의 빛을 사용하며 간섭상의 한 파장 내에서 적절한 구동 간격으로 위상을 천이시켜 기준 위상을 구하고 이를 높이로 복원하는 방법이다. 그러나 높이를 구하는 과정에서 위상 모호성에 의한 측정 한계가 존재한다^[1-2].

백색광 주사 간섭법(White-light Scanning Interferometry : WSI)은 단색광 위상 천이 간섭법이 가지는 위상 모호성에 의한 측정 한계를 보정하기 위하여 개발된 방법으로 백색광이 만드는 간섭상의 짧은 가간섭성을 이용한다. 가시도 함수를 포함하는 간섭신호로부터 가시도를 추출하여 가시도 함수의 정점을 찾음으로써 높이를 구

* 정회원, LIG넥스원 전자광학연구센터
(EO/IR R&D Lab, LIG Nex1)

** 정회원, 충남대학교 메카트로닉스공학과
(Department of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University)

접수일자: 2009년10월7일, 수정완료일: 2010년2월11일

할 수 있다. 백색광 주사 간섭법은 단색광 위상천이 간섭법이 가지는 위상 모호성에 의한 측정 한계는 존재하지 않지만, 위상에 비해 높이 방향의 변화에 덜 민감한 가시도 함수를 사용하기 때문에 단색광 위상천이 간섭법에 비해 분해능의 저하가 뒤따르게 된다^[3~4].

LCD, MEMS, 반도체 등의 부품들은 수 나노미터의 단차를 가지는 형상으로 이루어져 있기 때문에 위상 모호성에 의한 측정 한계를 가지는 단색광 위상천이 간섭법 보다는 백색광 주사 간섭법이 선호되고 있다. 하지만 단색광 위상천이 간섭법에 비해 분해능이 떨어지는 단점을 가지고 있어, 이를 개선하기 위해서 단색광 위상천이 간섭법과 동일한 분해능을 가지면서, 위상 모호성에 의한 측정 한계가 없는 백색광 위상천이 간섭법 (White Light Phase Shifting Interferometry : WLPSI)에 대한 관심이 고조되고 있다^[3, 5].

본 논문에서는 백색광 위상천이 간섭법의 성능을 개선하기 위해서 가시도 추정과 후처리 단계에 대한 새로운 방법을 제시한다. 백색광 위상천이 간섭법은 가시도를 추출하는 과정에서 많은 연산량을 필요로 하고 전기적 노이즈 및 외부 진동 등으로 인하여 전역 기울어짐 현상과 서브 나노미터 내의 오차를 가지게 된다. 특히 높이의 변화가 큰 경계영역에는 bat-wing effect^[7]와 같은 형상 왜곡이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 극복하기 위해 먼저 가시도 검출 단계에서는 가시도 유효 검출 구간을 설정하는 방법으로 기존의 백색광 위상천이 간섭계의 처리 속도를 개선하는 방안을 제안한다. 또한 영상처리 기반의 보정 방법으로 전역 기울어짐과 bat-wing effect를 제거하여 향상된 3차원 형상을 얻을 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 백색광 위상천이 간섭 기술을 정리 요약하고, 그 특징과 문제점을 분석한다. III장에서는 가시도 추정을 고속화 하는 방법을 소개하고, IV장에서는 전역 기울어짐과 bat-wing effect 해결을 위한 영상처리 기반의 후처리 기법을 제시한다. V장에서는 실험을 통해 제안하는 방법의 성능을 기존 기술과 비교 분석한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 백색광 위상천이 간섭법

백색광 위상천이 간섭법(WLPSI)은 단색광 위상천이 간섭계(PSI)의 알고리즘을 백색광 주사 간섭계(WSI)에

적용한 방법이다. 즉, 기존의 백색광 주사 간섭법에서 사용하는 가시도 추출법을 이용하여 가시도의 최고점을 구하고 이 최고점을 기준으로 단색광위상천이 알고리즘에 의해 위상을 계산하여 높이의 분해능을 향상시킨다.

그림 1에서와 같이 백색광 위상천이 간섭기에서 광원은 분광기(beam splitter)에 의해 기준광과 측정광으로 분리되고 기준면에서 반사된 기준광과 측정면에서 반사된 측정광은 간섭현상을 일으켜 광섬유(optical fiber)를 통하여 측정기로 들어온다. 측정기 내에서 간

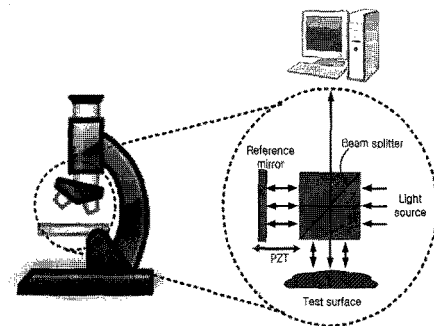


그림 1. 백색광 위상천이 간섭기의 개념도
Fig. 1. Concept of WLPSI.

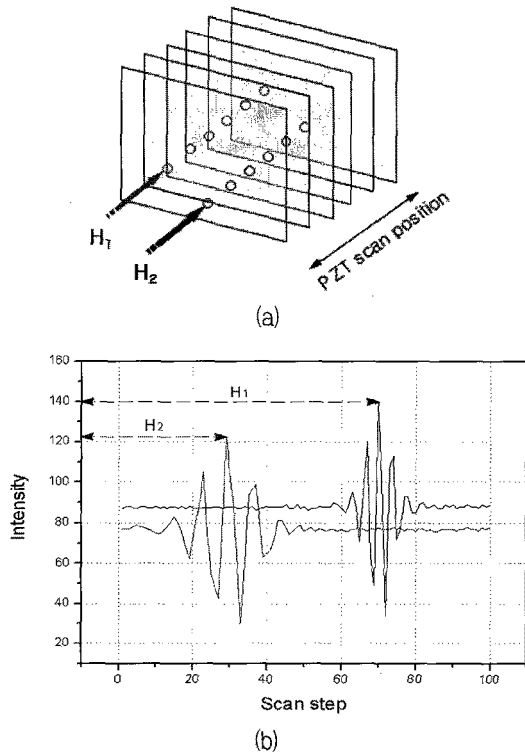


그림 2. 간섭무늬 영상
(a) 간섭무늬 영상 열, (b) 간섭신호
Fig. 2. Fringe image.
(a) fringe image sequence, (b) fringe signal

섭신호는 CCD에 의해 전기적인 신호로 바뀌어 영상의 형태로 저장이 된다. 여기서 간섭된 두 빛의 경로차에 따라 보강 또는 상쇄간섭이 일어나는데 측정면과 기준면의 거리가 동일한 지점은 보강간섭에 의해 최대 밝기를 가진다. 이때 기준면의 위치를 압전구동기(PZT)로 조절하면 그림 2의 (a)에서와 같이 위치에 따라 서로 다른 간섭영상을 얻을 수 있다.

그림 2(a)의 간섭무늬 영상열에서 H_1 과 H_2 에 해당하는 화소의 간섭신호는 그림 2(b)와 같이 관찰되며 가장 밝게 표현된 부분은 최대 보강간섭이 일어나 영상의 화소가 가리키는 측정 지점과 기준면의 압전구동 거리가 같음을 의미한다. 그러므로 두 화소의 최대 보강간섭이 일어난 정점의 압전구동 거리 H_1 과 H_2 의 차이는 두 측정 지점의 단차를 나타낸다. 이러한 과정을 간섭무늬 영상의 전체 화소에서 관찰하면 높이 형상을 측정할 수 있다.

1. 가시도 추출

백색광 위상천이 간섭계에서(WLPSI)는 그림 3에서와 같이 위상을 구하기 전에 백색광 주사 간섭법(WSI)에 의해 가시도(visibility function)의 정점(V_p)을 구한 후 이 정점과 가장 가까운 간섭영상 프레임 번호로부터 PZT 구동횟수(step number)인 n_{Δ} 를 구하게 된다. 이때 백색광 주사 간섭법에 의한 높이(h_{WSI})는 식 (1)과 같다.

$$h_{WSI} = n_{\Delta} \times \Delta \tag{1}$$

여기서 Δ 는 압전구동 간격(scan step)을 의미한다. 백색광 주사 간섭법을 위한 가시도 추출 방법에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며 본 논문에서는 주파수 변환이나 별도의 처리가 필요하지 않은 MOC(Mo-

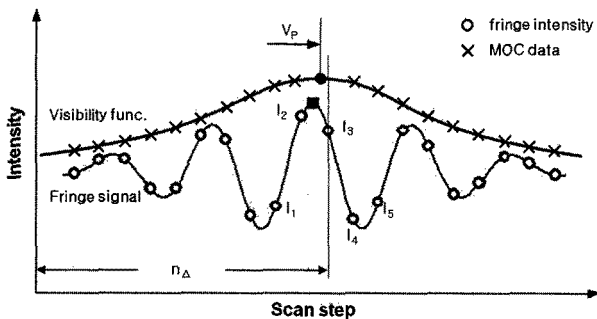


그림 3. 백색광 위상천이 간섭계의 가시도 정점
Fig. 3. Visibility peak in WLPSI.

dulation of Contrast)에 기반한 방법을 사용한다^[7].

MOC에 기반한 방법에서는 모든 측정위치를 중심으로 연속적인 간섭무늬 영상 5 프레임에서의 밝기 값 I (intensity value)를 이용하여 식 (2)에 따라 MOC를 계산한다.

$$M_n^2 \propto (I_2 - I_4) - (I_1 - I_3)(I_3 - I_5) \tag{2}$$

간섭신호에 대해 MOC를 계산하면 가우시안함수 형태의 결과를 보이며, 그 결과에 가우시안함수 곡선 맞춤을 하여 최종적으로 간섭신호의 저주파 성분인 그림 3의 가시도함수를 검출한다.

2. 위상 계산을 이용한 높이 보정

단색광 위상천이 간섭계(PSI)에서의 위상 계산 알고리즘은 오랜 기간 연구가 이루어져 왔다. 하지만 단색광 위상천이 간섭계는 광 경로차에 따른 가시도가 일정한 간섭신호를 다루기 때문에 기존의 위상 계산 알고리즘을 백색광 위상천이 간섭계(WLPSI)에 적용하게 되면, 가시도 성분에 의해서 위상 계산 시 오차 성분을 가지게 된다. 그러므로 위상을 구하는 과정에서 가시도 보상이 이루어지는 방법인 Bucket 알고리즘이 개발되었다.

Larkin^[3]과 Sandoz^[5~6]에 의해서 제안된 5-Bucket 알고리즘은 가시도의 정점을 중심으로 5개 프레임의 MOC 정보를 이용한다. 위상천이 간섭계에서 구동기의 선형 오차에 대한 효과적인 보상 방법으로 잘 알려졌으며 구동기의 선형 오차 보상 성능을 유지한다. 5-Bucket 알고리즘은 식 (3)과 같이 유도된다^[7~8].

$$\Delta h = 0.4\Delta \frac{L_1 + 3L_2 - 3L_4 - L_5}{L_1 - 2L_3 + L_5} \tag{3}$$

where, $L_n = \ln[M_n]$

즉 가시도 정점에 대한 구동횟수 n_{Δ} 로부터 가장 가까운 위치의 간섭무늬의 MOC를 M_3 라하고 위상을 계산하기 위해 M_3 를 포함하여 좌우 대칭이 되도록 5개 간섭무늬 영상 프레임의 MOC를 선택한다. 선택된 5개의 값으로부터 높이 보상량은 식 (3)과 같고 최종 측정 지점의 높이는 식 (4)와 같다^[7].

$$H = h_{WSI} + \Delta h \tag{4}$$

3. 기존 백색광 위상천이 간섭법의 문제점

반도체나 평판디스플레이 공정 시 다소 오차가 있더라도 박막 두께의 전반적 경향을 신속히 파악하여 공정을 관리하고자 하는 요구는 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 기존 백색광 위상천이 간섭법은 정확한 가시도 검출을 위해 많은 연산량을 요구하기 때문에 신속한 형상 측정에 한계가 있다. 그리고 간섭무늬 영상 획득 시 기계적 진동이나 압전구동 간격의 오차에 의해 전역 기울어짐 현상이 발생하고 경계 영역의 bat-wing effect와 같은 형상 왜곡은 물리적 방법으로 보정하기에는 한계가 있다. 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위한 측정 알고리즘에 대한 개선 연구가 필요하다.

III. 유효 검출 구간을 이용한 가시도 추정 의 고속화

본 논문에서 유효 검출 구간은 가시도를 추출하는데 있어서 신뢰성을 가지는 구간을 말한다. 백색광에 의한 간섭신호는 가시도의 정점 위치에서 멀어질수록 신호의 진폭이 작아지게 되며 이러한 신호들은 높이를 측정하는 과정에서 직접적인 영향을 주지 않는다. 그러므로 가시도를 추정하는 단계에서는 진폭이 큰 신호만의 사용으로 가시도함수 검출이 가능하다^[9].

1. MOC(Modulation of Contrast) 연산

측정물이 균일한 재질로 이루어지고 외부 환경 변화가 없다면 가시도함수의 정점은 간섭신호의 정점을 중심으로 진폭이 큰 3주기 이내에 존재한다. 그림 4는 간

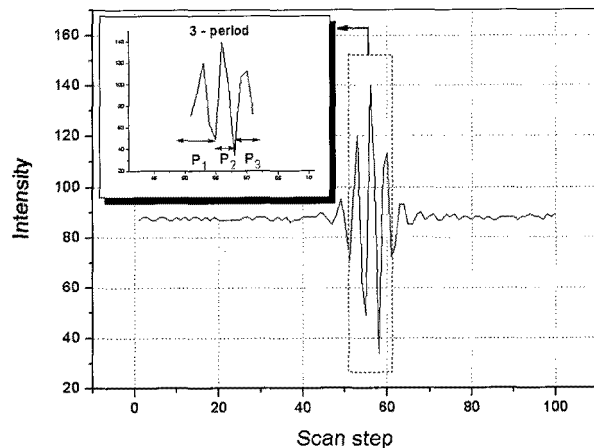


그림 4. 간섭신호 정점의 3주기
Fig. 4. Three period of the fringe signal.

섭신호 정점의 3주기를 나타낸다. 최대 정점이 포함되는 주기(P_1)와 이로부터 좌·우로 한 주기씩을 포함한 3주기를 가시도 유효 검출 구간으로 정의한다.

유효 검출 구간 설정 방법은 간섭신호의 최대 정점으로부터 좌·우 방향으로 밝기 값을 관찰하여 감소에서 증가로 변화하는 지점까지를 그림 4의 P_2 로 설정하고 P_2 로부터 좌·우 방향에서 같은 방법으로 밝기 값의 증감에 따라 좌측의 한주기인 P_1 과 우측의 한주기인 P_3 를 가시도 유효 검출 구간으로 설정한다.

제안하는 유효 검출 구간 설정 방법은 기존 MOC 기반의 가시도 검출 방법에서 구한 식 (1)의 n_{Δ} 와 동일한 결과를 얻을 뿐 아니라 진폭이 작아 높이 측정에서 불필요한 데이터의 연산을 줄여주어 처리 속도를 빠르게 한다.

2. MOC fitting

일반적으로 기존의 기법들은 MOC에 의한 결과에 가우시안함수 곡선 맞춤을 하여 최종적인 가시도 함수를 구한다. 그러나 가우시안 곡선 맞춤은 많은 연산량을 요구하므로 제안된 방법에서는 가우시안함수가 최대 정점에서 2차함수 형태를 따르는 특성에 따라 2차함수 맞춤을 이용한다. 즉 그림 5와 같이 MOC 최대 정점에서 좌우 대칭이 되도록 5개의 MOC 데이터를 선택하여 가우시안함수가 아닌 2차함수 맞춤을 통해 수행시간을 단축한다. 가시도함수의 정점을 의미하는 2차함수의 정점과 가장 가까운 간섭무늬를 식 (4)의 압전구동 거리 h_{WSI} 로 구한다. 최종 높이는 백색광 주사 간섭법의 가시도 정점에서 구한 압전구동기의 거리 h_{WSI} 에 II장 2

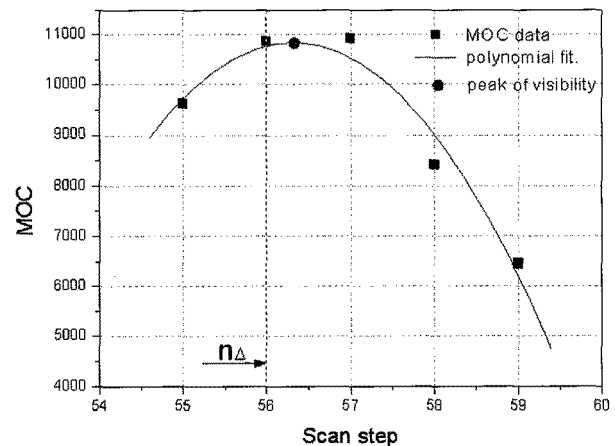


그림 5. MOC 맞춤 결과
Fig. 5. Result of Modulation of Contrast fitting.

절에서 설명된 5-Bucket 알고리즘으로 위상을 계산하여 높이를 보정한다.

IV. 영상처리 기반의 후처리

1. 전역 기울어짐 보정

압전구동 모듈의 자체 진동이나 외부로부터의 진동에 의하여 측정 헤드와 시료 사이에 상대 변위가 발생하게 되며, 이 상대 변위는 광 분리기와 시료 사이의 거리를 변화시켜 기울기 오차를 발생시킨다. 그림 6은 측정된 높이 정보를 3차원 형상화 하였을 때 발생하는 전역 기울어짐 현상을 도시한 것이다.

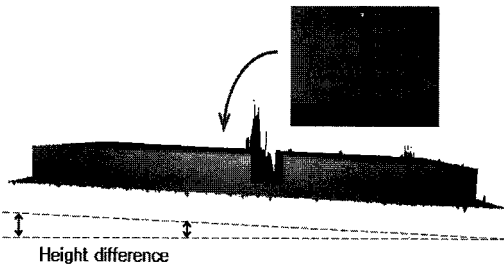


그림 6. 백색광 위상천이 간섭계의 전역 기울어짐 현상
Fig. 6. Global tilt problem in WLPSI.

가. 바닥 평면 데이터 자동 추출

전역 기울어짐은 그림 6에서와 같이 선형적인 높이 오차로 3차원에서 하나의 평면 형태로 나타난다. 측정 시료의 구조가 복잡하지 않고 높이를 가지지 않는 바닥면의 면적이 충분히 넓다면 바닥면의 데이터들은 기울어짐 오차를 갖는 평면 위에 존재하게 된다. 그러므로 바닥면의 데이터를 추출하여 평면의 방정식을 유도하면 평면의 기울어짐 정도를 알 수 있다.

평면의 방정식은 3차원 좌표를 갖는 3개의 데이터만으로 유도할 수 있지만 오차를 최소화하기 위해 추출된 다수의 바닥 데이터를 이용한다. 본 논문에서는 영상 전역에 분포되어 있는 모든 바닥면의 데이터를 사용하지 않고 x, y 축 방향으로 대표 행과 열을 선택하고 이에 포함된 바닥 데이터만을 추출하여 기울어짐 추정 연산량을 감소시킨다.

그림 7은 x 축 방향의 데이터를 추출하기 위한 순서도를 도시한 것이다. 먼저 x 축 방향으로 각각의 행에 대한 표준편차를 구하고 가장 최소의 표준편차 값을 가지는 행을 그림 8의 (a)에서와 같이 결정한다. 바닥 데

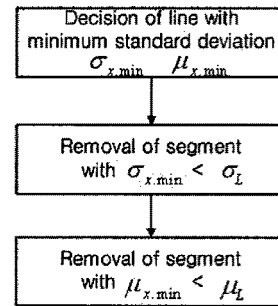


그림 7. 바닥면 데이터 추출 알고리즘 순서도
Fig. 7. Flow chart of base level decision method.

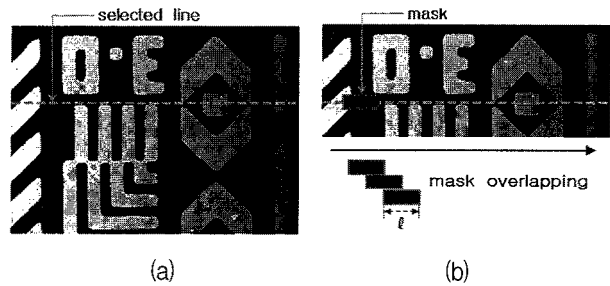


그림 8. 바닥면 추출 방법
(a) 행 검출, (b) 국소영역 제거

Fig. 8. Base level decision method.
(a) decision of line, (b) removal of segment

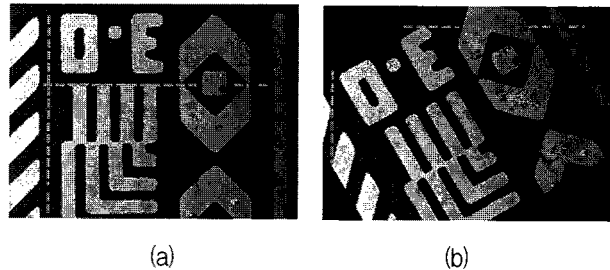


그림 9. 바닥면 데이터 추출
(a) 추출 결과, (b) 회전변환 형상의 추출 결과
Fig. 9. Extraction of base level data (a) extraction result, (b) rotation transform of (a).

이터의 비중이 많은 행일수록 그 표준편차가 작으므로 이러한 과정을 통해 바닥 데이터가 다수 포함된 행을 결정할 수 있다. 이때 결정된 행의 표준편차를 $\sigma_{x.min}$ 라 하고 그 평균을 $\mu_{x.min}$ 라 하자.

그러나 선정된 행은 측정 형상의 구조가 복잡한 경우 높이를 갖는 영역이 포함될 수 있다. 그러므로 그림 8의 (b)에서와 같이 크기 l 인 마스크 내의 국소영역의 표준편차 σ_L 과 평균 μ_L 을 구하고 그림 8의 (b)에서와 같이 이를 행 전체의 표준편차와 평균과 비교하여 국소영역의 포함 여부를 결정한다.

즉 국소영역의 표준편차(σ_L)가 행 전체의 표준편차

($\sigma_{x,\min}$) 보다 크면 바닥 데이터 이외의 데이터가 포함 되어 있다는 의미이므로 해당 국소영역을 제거한다. 또 국소영역의 평균(μ_L)이 행 전체의 평균($\mu_{x,\min}$) 보다 큰 경우 국소영역이 비 바닥면인 데이터로 대부분 구성 되어 있다는 의미이므로 이를 제거한다. 이러한 제거 과정은 그림 8의 (b)에서와 같이 마스크를 중첩시키면서 전체 행에서 수행된다.

그림 9의 (a)는 x, y축 방향으로 이러한 과정을 통해 얻은 바닥 데이터의 예이다. 그림 9의 (b)는 회전변환된 형상에서의 바닥 데이터를 추출한 결과를 보여준다.

나. 최소 자승 근사화 방법을 이용한 전역 기울어짐 추정
기울어진 바닥면에 대한 평면 방정식은 식 (5)의 형태로 표현될 수 있다.

$$z = ax + by + c \tag{5}$$

바닥 데이터로 추출된 N 개의 데이터 (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots , (x_N, y_N, z_N)로부터 데이터의 좌표 (x,y)와 좌표에 해당하는 높이(z) 그리고 구하고자 하는 파라미터로부터 식 (6)의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서 행렬 P 와 벡터 \vec{d} , \vec{q} 를 식 (7), (8), (9)와 같이 각각 정의하면 식 (6)은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$P \triangleq \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\vec{d} \triangleq [a \ b \ c]^T \tag{8}$$

$$\vec{q} \triangleq [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_N]^T \tag{9}$$

$$P \cdot \vec{d} = \vec{q} \tag{10}$$

이때 최소 자승 근사화 방법^[10]에 의해 \vec{d} 는 식 (11)과 같이 유도된다.

$$\vec{d} = \frac{P^T \vec{q}}{P^T P} \tag{11}$$

추정된 바닥 평면의 방정식으로부터 기울어짐에 의한 각 지점의 높이를 보정한다.

2. bat-wing effect 제거

백색광 위상천이 간섭계는 그림 10에서와 같이 높이의 변화가 큰 경계영역에서 빛의 난반사에 의하여 측정 오차가 보다 크게 나타나는데 이러한 경계영역에서의 왜곡 현상을 bat-wing effect라 한다. 이러한 bat-wing effect를 제거하기 위한 제안 알고리즘의 전체 수행과정은 그림 11과 같다. 제안된 알고리즘은 평탄영역과 경계영역의 별도 처리를 위해 높이 맵의 경계를 검출하고 각 영역별로 형상에 적응적인 보정을 가하는 방법이다.

그림 11에서와 같이 먼저 백색광 위상처리 간섭법으로 얻은 높이에 Sobel 연산자와 문턱치화를 적용하여

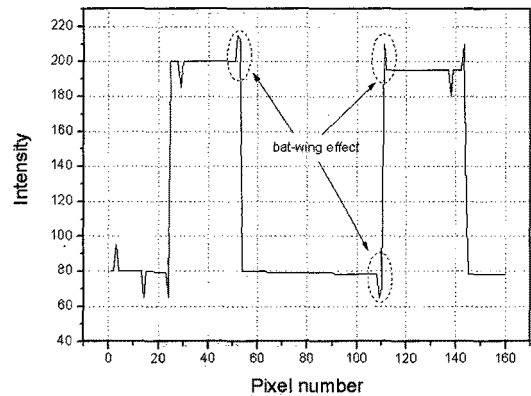


그림 10. 경계영역의 bat-wing effect
Fig. 10. Bat-wing effect near the step discontinuity.

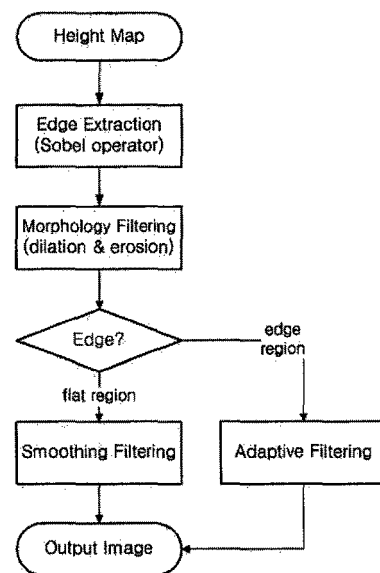


그림 11. 알고리즘 순서도
Fig. 11. Algorithm flow chart.

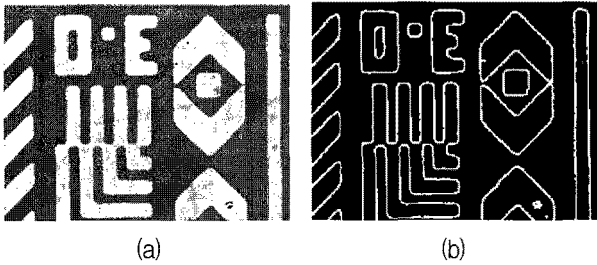


그림 12. 경계검출
 (a) 높이 맵 영상, (b) 추출된 경계 영상
 Fig. 12. Edge extraction
 (a) height map image, (b) extracted edge image.

□ : flat region ■ : edge region

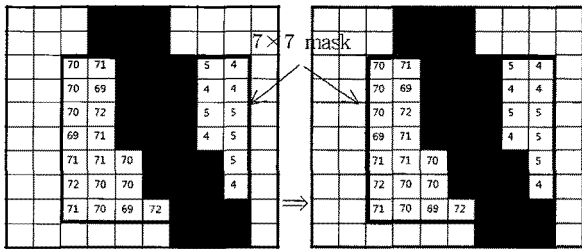


그림 13. 경계영역의 bat-wing effect 제거
 Fig. 13. Removing bat-wing effect near the step discontinuity.

경계를 검출한다. 검출된 경계영상에는 형태학 팽창(dilation)과 침식(erosion) 연산을 차례로 적용하여 잡음을 제거하고 불연속적으로 검출될 수 있는 경계를 연속적으로 연결하여 이후에 다루어질 영역별 적응처리를 위한 평탄영역과 경계영역의 구분을 명확히 한다.

그림 12의 (b)는 그림 12의 (a) 영상에 대한 경계검출 결과이다.

경계검출 후 평탄영역과 경계영역은 별도의 방법으로 후처리 된다. 먼저 평탄영역은 간헐적으로 발생하는 측정 오류를 포함하게 되는데 이를 보정하기 위해 평균값 필터(averaging filter)나 중간값 필터(median filter)와 같은 평활화 필터에 의해 처리된다. 반면 bat-wing effect가 포함된 경계영역은 다음의 적응 필터에 의해 처리 된다.

실제 bat-wing effect에 의해 왜곡된 경계영역은 인접하고 있는 평탄 영역과 비슷한 높이를 가져야 한다. 즉 그림 13에서의 경계영역은 좌측 평탄영역의 높이 또는 우측 평탄영역의 높이 중 어느 하나의 높이를 가져야 한다.

이를 위해 제안된 방법에서는 경계영역에 포함된 (x,y) 지점의 높이를 $m \times m$ 마스크 내의 화소들을 이

용하여 식 (12)에 따라 처리한다.

$$f'(x,y) = \arg \min_{f(a,b)} (|f(a,b) - f(x,y)|) \quad (12)$$

여기서 $f'(x,y)$ 는 수정된 높이값을 의미한다. (a,b) 는 (x,y) 를 중심으로 하는 $m \times m$ 마스크 내에 포함되는 동시에 평탄영역 내에 있는 모든 화소 지점을 의미한다. 즉 $m \times m$ 마스크의 중앙화소인 경계영역의 데이터 $f(x,y)$ 를 마스크 내의 평탄영역 데이터 $f(a,b)$ 와 비교하여 그 차이가 최소가 되는 데이터 $f(a,b)$ 를 경계영역의 새로운 데이터 $f'(x,y)$ 로 치환하는 것이다.

V. 실험 결과

제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 나노 크기의 구조물로부터 얻은 480×360 과 640×480 크기의 해상도를 가지는 간섭무늬 영상을 사용하였다. 모의실험을 위해 압전구동 간격(Δ)은 $80nm$, 바닥 데이터 검출을 위한 국소영역의 크기(l)는 20, 경계영역에 대한 후처리 마스크의 크기(m)는 7로 설정하였다.

1. 가시도 추정의 고속화 알고리즘

처리속도를 평가하기 위해 Intel Core 2 Duo 2.13GHz의 프로세서와 1024MB의 메모리를 사용하는 개인용 컴퓨터를 사용하여 기존 방법과 제안된 방법의 처리속도를 비교하였다. 실험 데이터는 480×360 과 640×480 크기를 갖는 세 종류의 영상을 이용하였으며 기존의 방법과 제안된 방법의 평균 수행시간은 표 1과 같다. 제안된 방법은 기존 백색광 위상천이 알고리즘에 비해 약 40% 정도의 수행시간만으로도 높이 측정이 가능하였다.

표 1. 수행시간
 Table 1. Processing time.

	WLPSI	제안 방식
480x360	4.052 s	1.573 s
640x480	7.151 s	2.861 s

2. 형상 측정 결과

그림 14는 기존의 백색광 위상천이 간섭법과 제안된 방법을 통해 얻은 각각의 높이 맵을 DirectX를 이용하

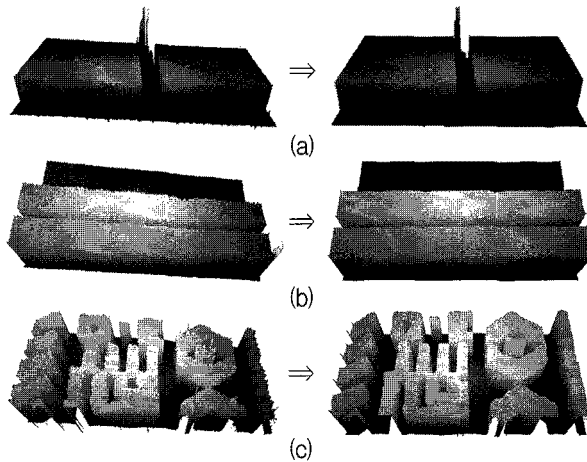


그림 14. 실험 결과 - 백색광 위상천이 간섭법과 제안된 방법

Fig. 14. Simulation results - WLPSP and proposed method.

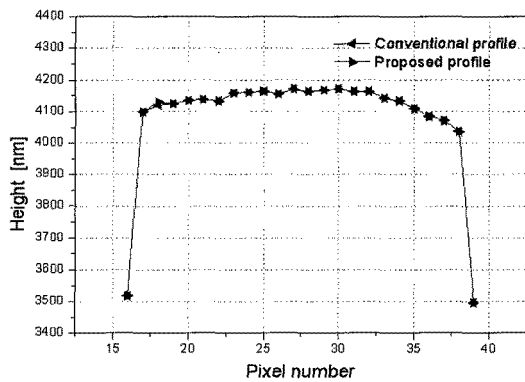
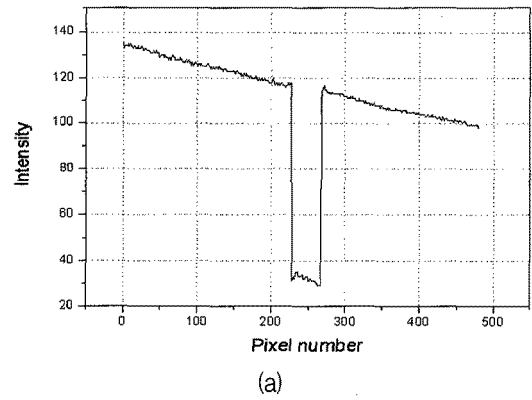


그림 15. 기존의 방법과 제안된 방법의 높이 비교

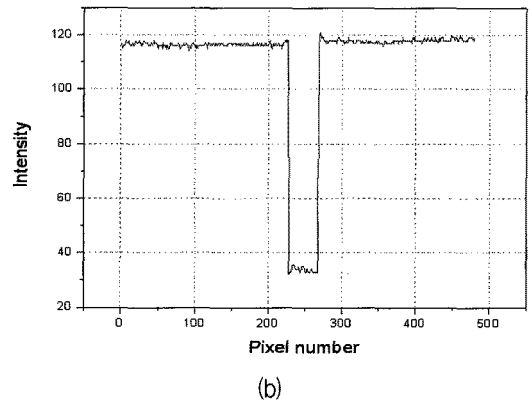
Fig. 15. Comparison of height profile between conventional and proposed method.

여 3차원 형상화한 결과이다. 그림 14의 우측 형상들은 가시도함수를 해석하여 얻은 높이 정보에 제안된 방법을 통해 전역 기울어짐을 보정하고 bat-wing effect를 제거한 결과를 나타낸다.

가우시안 함수와 제안된 2차함수 맞춤 결과의 성능을 비교하기 위해 513,408 화소에 대하여 실험하였다. 실험결과 507,401(98.8%) 화소에서 두 맞춤결과를 통해 얻은 n_{Δ} 가 완전히 일치하였다. 오차가 있는 화소에서 두 맞춤결과를 통해 얻은 n_{Δ} 의 오차는 최대 2 이었다. 그림 15는 가우시안함수 맞춤을 하는 기존의 백색광 위상천이 간섭법을 통해 얻은 높이와 본 논문에서 제안된 방법을 통해 얻은 높이 정보를 비교한 것이다. 유효 검출 구간 설정으로 간섭신호의 진폭이 작아 높이에 영향을 주지 않는 데이터를 사용하지 않고 2차 함수



(a)



(b)

그림 16. 기울어짐 보정 (a) 원본 형상, (b) 보정된 형상

Fig. 16. Result of global tilt revision (a) original profile, (b) revised profile.

맞춤을 함으로써 연산량은 감소하지만 높이 측정 결과는 기존의 백색광 위상천이 간섭법의 결과와 대부분의 측정 위치에서 일치함을 보여준다.

그림 16은 전역 기울어짐을 추정하여 보정한 결과를 보인 것이다. 그림 16의 (a)와 (b)는 특정 가로방향 한 축에서의 높이 패턴 변화를 나타낸 것으로 제안된 자동 바닥 데이터 검출을 통해 전역 기울어짐이 효과적으로 보정됨을 알 수 있다.

그림 17은 경계영역에서 bat-wing effect가 발생하는 형상에 일반적인 평활화 필터를 적용한 결과와 논문에서 제안하는 영역별 적응 필터처리 결과를 비교한 것이다. 일반적인 평활화 필터를 단순히 적용하는 경우 그림 17의 (b)에서 보이는 바와 같이 bat-wing effect가 완벽히 제거되지 않을 뿐만 아니라 형상의 경계가 평활화 필터에 의해 왜곡되어 진다. 반면 그림 17의 (c)에서와 같이 제안된 영역별 적응 필터처리를 수행한 경우 bat-wing effect를 제거할 뿐만 아니라 기존 형상에서와 같이 경계영역과 평탄영역의 명확한 구분을 유지한다.

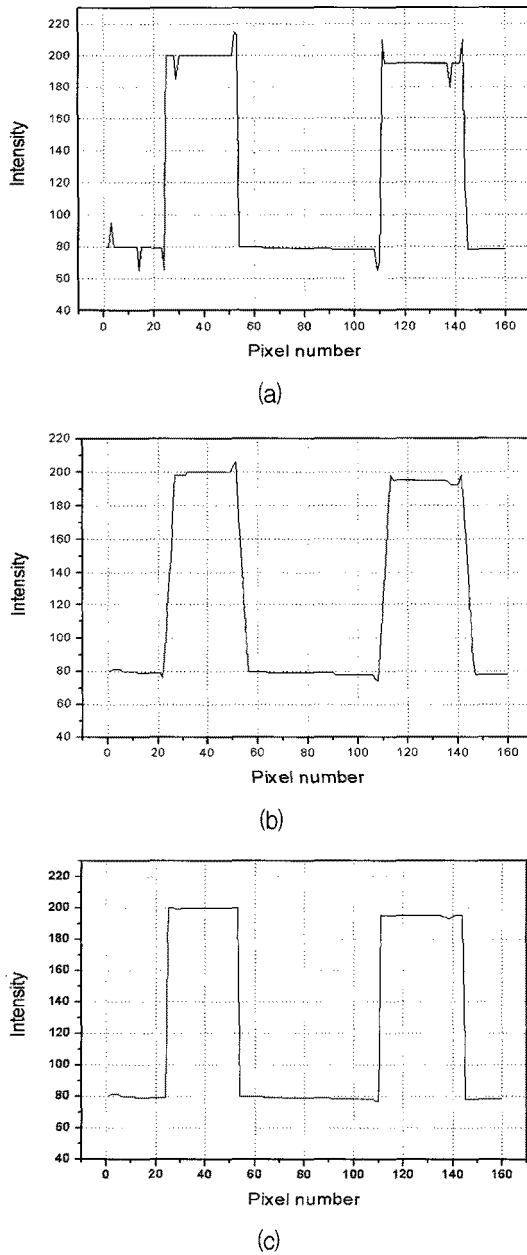


그림 17. 3차원 형상 (a) bat-wing effect, (b) 평활화 필터, (c) 영역별 적응 필터
 Fig. 17. 3D profile (a) bat-wing effect, (b) conventional smoothing filter, (c) proposed adaptive filter

VI. 결 론

본 논문에서는 백색광 위상천이 간섭계에서 향상된 3차원 형상 정보를 보다 빠르게 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저 가시도 검출을 위한 MOC 방법에 유효 검출 구간을 설정하여 연산량을 줄여 고속 측정을 가능하게 하였다. 또한 전기적 노이즈 및 양자화 오차 및 저주파 진동 등으로 인하여 발생하는 전역 기울어짐 문제

와 bat-wing effect 같이 물리적으로 제어가 불가능한 부분을 영상처리 기반의 후처리 과정을 통해 해결하는 방법을 제안하였다. 기존의 백색광 위상천이 간섭계와 성능을 비교한 결과 제안된 방법은 수행시간을 약 60% 단축시키고 3차원 형상의 정확성에서 향상된 성능을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Schwider, R. Burow, J. Grzanna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital Wave Front Measuring Interferometry : Some Systematic Error Sources," *Appl. Opt.* 22, 3421-3432, 1983.
- [2] J. Schwider, "Phase Shifting Interferometry : Reference Phase Error Reduction," *Appl. Opt.* 28, pp. 3889-3892, 1989.
- [3] K.G. Larkin, "Effective nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry," *J. Opt. Soc. Am. A.* 4, 1996.
- [4] Jonna Schmit and Artur Olszak, "High-Precision Shape Measurement by White-Light Interferometry with Real-Time Scanner Error Correction," *Appl. Opt.*, Vol. 41, No. 28, October 2002.
- [5] P. Sandoz, "An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry." *J. Mod. Opt.* 43, 1996.
- [6] P. Sandoz, R. Devillers, and A. Plata, "Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry," *J. Mod. Opt.* 44, 1997.
- [7] Akiko Harasaki, Joanna Schmit, and James C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry," *Appl. Opt.* Vol. 39, No. 13, May 2000.
- [8] G. B. Henning, "Masking effects of low-frequency sinusoidal gratings on the detection of contrast modulation in high-frequency carriers," *Opt. Soc. Am.* Vol. 21, No. 4, 2004.
- [9] 안우정, "백색광 위상천이 간섭계에서의 위상 오차의 수치해석 보정," 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 2005.
- [10] J. Douglas Faires and Richard Burden, "Numerical Methods," Brooks/Cole Publishing Company, pp. 323-365, 1998.

저 자 소 개



김 경 일(정회원)
 2007년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 학사 졸업.
 2009년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 석사 졸업.
 2009년~현재 LIG넥스원 전자 광학연구센터 연구원.

<주관심분야 : 영상신호처리, 적외선 영상 인식 및 추적>



이 동 열(정회원)
 2008년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 학사 졸업.
 2010년 충남대학교 지능로봇시스템 석사 졸업.

<주관심분야 : 영상신호처리, Direct3D, 영상압축>



고 윤 호(정회원)-교신저자
 1995년 부산대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사 졸업.
 2002년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사 졸업.

2002년~2004년 하이닉스반도체 선임연구원.
 2004년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 조교수.

<주관심분야 : 영상신호처리, 컴퓨터비전, 영상인식, 영상압축>