

〈논 문〉

백색광의 제한 간섭성을 이용한 초정밀 위치결정

박현구* · 강민구* · 김승우**

(1996년 12월 20일 접수)

Ultra-precision Positioning By Using Coherence of White Light

Hyun-Goo Park, Min-Gu Kang and Seung-Woo Kim

Key Words : Coherence Probe Microscopy(간섭현미경), Step Measurement(단차측정), Auto-Focusing(자동초점맞춤), VCR Head(VCR 헤드)

Abstract

In this paper, a new positioning method with incoherence of white light is described and practically implemented to attach VCR heads on a drum very accurately. This method utilizes the Michelson Interferometer which uses white light with short coherence length as the light source to generate interference fringes only in case the optical path difference is shorter than about $2 \mu\text{m}$. The course position of VCR heads and the fine are determined by appearance and visibility of interference fringes, respectively. The appearance are detected by an image processing technique using FFT(Fast Fourier Transform).

1. 서 론

전자 및 반도체 기술의 발달로 인해 현재 모든 제품에 소형화, 경량화, 고집적화, 고속도화가 요구되고 있으며, 이에 따라 제품의 검사 및 측정분야에 있어서도 서브마이크로미터의 분해능을 갖는 측정기, 검사기가 요구되고 있다. 정밀측정에서 현재 사용되고 있는 방식은 측정물의 특성과 측정분해능에 따라 다양하며, 접촉식방법으로는 다이아몬드 측정식(stylus type) 측정기, 3차원 좌표 측정기(coordinate measuring machine)가 있고,⁽¹⁾ 비접촉식 방법으로는 광위상간섭기(phase measuring interferometer),⁽²⁾ 모아레측정법,⁽³⁾ 광삼각법,⁽⁴⁾ 스테레오 비전⁽⁵⁾ 등이 있다. 접촉식 방법은 측정속도가 느리고 측정물체에 손상을 준다는 단점을 갖고 있다. 반면에, 비접촉식방법들은 측정속도가

빠르고 분해능도 높지만 측정물체의 형상에 제한을 받는 단점을 가진다.

반도체 분야에서는 생산공정중에 미세한 패턴을 고배율의 광학현미경으로 확대하여 관찰하면서 제품의 품질을 검사하는 공정이 요구되고 있다. 광학현미경은 주로 확대된 2차원 영상을 얻기 위해 사용된다. 이러한 광학현미경의 광축방향에서 거리를 측정할 수 있는 기술을 결합하면 3차원 측정에도 응용이 가능하다. 이 경우에 광축방향의 거리측정 기술에 따라 높은 분해능을 갖는 비접촉식 3차원 측정기로 사용될 수 있다. 광학현미경을 이용한 광축방향의 거리측정기술은 선명한 2차원 상을 얻기 위해 필요한 자동초점맞춤(auto-focusing)을 응용하는 것이다.

자동초점맞춤방법들은 크게 소프트웨어와⁽⁶⁾ 하드웨어⁽⁷⁾ 의한 두 가지 방식으로 분류된다. 소프트웨어 자동초점맞춤은 특별히 광학계를 구성하지 않고, 광학현미경을 통해 획득한 영상으로부터 초점에 대한 정보를 얻어서 이용하는 방법으로 구현이

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

쉽고, 영상처리 알고리즘을 자유롭게 수정/보완이 가능하기 때문에 측정물의 다양한 형상에 대해서 측정이 가능하다는 장점을 갖는다. 이에 반해 측정 시간이 오래 소요되고 측정분해능이 낮은 단점을 가지고 있다. 하드웨어 자동초점맞춤은 전용 광학계를 구성하여 이용하는 방법으로 높은 분해능과 빠른 측정속도를 얻을 수 있지만 광학계의 구성이 까다롭고 측정물체의 형상에 제한을 받는다. 이러한 자동초점맞춤을 이용하여 3차원 좌표를 측정하기 위해서는 광학계의 초점심도가 매우 작아야 하고, 광학현미경에서 선명한 화상을 얻기 위해서는 초점심도가 클수록 좋은 서로 상반된 조건을 가진다. 그러므로 측정물의 형상에 관계없이 측정이 가능하고, 높은 분해능을 가지며, 구현이 쉽고, 광학계의 초점심도에 무관하게 정확한 측정이 가능한 자동초점맞춤방법의 개발이 요구된다.

빛의 간섭성(coherence)을 이용한 자동초점맞춤은 위에서 요구되는 사항중 많은 장점을 가진다. 이 방법은 소프트웨어 자동초점맞춤과 하드웨어 자동초점맞춤의 두 가지 성격을 모두 가지면서 양쪽의 장점을 골고루 갖고 있다. 분광기와 기준거울만 설치하고 광원은 광학현미경의 것을 그대로 사용하기 때문에 광학계의 구현이 매우 쉽다. 측정원리는 백색광과 같이 간섭성이 매우 나쁜 광원을 사용하여, 기준거울과의 광경로차가 매우 근소한 위치에서만 간섭무늬가 발생한다는 것을 이용한다. 즉, 간섭무늬의 발생여부 및 정도를 이용하여 광축방향으로의 거리를 측정할 수 있다. 실제 측정은 광학현미경의 영상을 획득하여 영상내에 발생하는 간섭무늬의 발생정도를 소프트웨어 자동초점맞춤의 에너지함수로 정의하고 이 함수의 값을 영상처리를 통하여 계산한다. 계산속도는 다른 에너지함수에 비해 매우 빠르며 분해능은 서브마이크로미터를 얻을 수 있다. 또한 광원의 초점심도와 무관하기 때문에 초점심도를 충분히 크게 광학계를 구성하여 선명한 영상을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 빛의 간섭성을 이용한 자동초점맞춤방법의 기본원리를 유도하고 이를 VCR(Video Cassette Recorder) 헤드(head)의 초정밀 위치결정에 적용하고자 한다.

2. 간섭의 기본원리

Fig. 1은 리닉간섭광학계의 구조 및 간섭의 기본

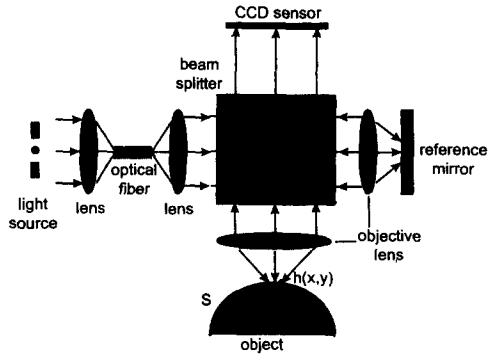


Fig. 1 Schematic diagram of interferometer

원리를 보여준다. 입사광속이 분광기 (beam splitter)에 의해 기준광속과 측정광속으로 분리되면, 기준면과 측정표면에 입사되어 반사되는 파두면 (wavefront)의 방정식은 각각 다음과 같다.^(8,9)

$$W_r(x, y) = a \exp[-j(\frac{2\pi c}{\lambda}t - 2kl)] \quad (1)$$

$$W_i(x, y) = b \exp[-j(\frac{2\pi c}{\lambda}t - 2kh(x, y))] \quad (2)$$

여기서, a 와 b 는 파두면의 진폭, λ 는 빛의 파장, $k(=\frac{2\pi}{\lambda})$ 는 빛의 전파상수, 그리고 i 와 $h(x, y)$ 는 각각 기준면과 측정표면으로부터 분광기까지의 거리를 의미한다. 기준면은 평면이라고 가정하고, 측정표면의 형상함수(profile function) S 는 물체 상에 위치한 점들의 집합으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S = \{h(x, y) \mid h(x, y) \in S\} \quad (3)$$

식 (1)과 식 (2)의 두 광속이 분광기에 의해 다시 모아져 일으키는 간섭무늬의 강도는 다음과 같다.

$$I(x, y) = |W_r(x, y) + W_i(x, y)|^2 \quad (4)$$

여기서, ‘—’는 빛의 강도의 시간평균치를 의미한다. 식 (4)에 식 (1)과 식 (2)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$I(x, y) = I_0(1 + \gamma \cos(\frac{4\pi}{\lambda}(h(x, y) - l))) \quad (5)$$

여기서, $I_0(=a^2 + b^2)$ 는 빛의 평균강도, $\gamma(=\frac{2ab}{a^2 + b^2})$ 는 간섭무늬의 광도진폭, 즉 가시도를 의미한다. 식 (5)에서 다음과 같이 정의되는 두 빛의 광경로의 차(OPD : Optical Path Difference)에 의해서 간섭무늬가 발생함을 알 수 있다.

$$OPD = 2(h(x, y) - l) \tag{6}$$

자연계에 존재하는 모든 빛은 단일파장은 존재하지 않으며, 여러파장으로 구성된 대역 (band : $\Delta\lambda$) 을 가지고 있으므로 측정하는 빛의 강도는 이러한 파장의 전체 대역에 대해 적분을 한 값이 된다. 각 파장에 대한 진폭은 모두 같다고 가정하면, 빛의 강도는 다음 수식으로부터 얻어질 수 있다.

$$I' = \int I d\lambda = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_c - \Delta\lambda/2}^{\lambda_c + \Delta\lambda/2} I_0 (1 + \gamma \cos(\frac{4\pi}{\lambda} (h(x, y) - l))) d\lambda \tag{7}$$

여기서, λ_c 는 중심파장, $\Delta\lambda$ 는 파장의 대역이다. $\Delta\lambda^2 \ll \lambda_c^2$ 라고 가정하면, 식 (7)은 다음과 같이 유도된다.

$$I' \approx I_0 [1 + V \cos(\frac{2\pi}{\lambda_c} OPD)] \tag{8}$$

여기서, V 는 간섭무늬의 가시성 (visibility) 으로 다음과 같이 정의된다.

$$V = \frac{I'_{max} - I'_{min}}{I'_{max} + I'_{min}} = \gamma \text{sinc}(\frac{\pi\Delta\lambda}{\lambda_c^2} OPD) \tag{9}$$

그러므로 식 (9)와 Fig. 2에서 간섭무늬의 가시성은 파장의 대역함수이고, sinc 함수에 비례함을 알 수 있다. sinc 함수의 정의는 다음과 같다.

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} \tag{10}$$

sinc 함수는 인수 x 가 커질수록 진폭이 0으로 감소하므로 광경로차가 커지면 간섭무늬는 사라지게 된다. sinc 함수가 처음으로 0이 되는 광경로차를 빛

의 코헤런스길이 (coherence length, δ_c) 라고 정의하고, 이 영역에서 간섭무늬의 발생이 뚜렷하므로 이 영역을 코헤런스영역이라 한다. 코헤런스길이는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\pi\Delta\lambda}{\lambda_c^2} \delta_c = \pi \tag{11}$$

식 (11)로부터 코헤런스길이 δ_c 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\delta_c \equiv \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda} = \text{const} \tag{12}$$

식 (12)에서 보면 코헤런스길이는 파장의 대역에 반비례하므로 파장의 대역이 크면 클수록 간섭무늬가 발생할 수 있는 구간이 작아지게 된다.

광경로차가 0이라는 것은 분광기로부터 측정물체까지의 거리와 기준면까지의 거리가 같음을 의미한다. 코헤런스길이가 매우 작을 때 간섭무늬가 발생하면 광경로차는 0에 가까우므로 이미 알고 있는 기준면과 분광기사이의 거리로부터 측정물의 위치를 결정할 수 있다. 정밀한 측정을 위해서는 코헤런스길이가 짧을수록 좋음을 알 수 있는데, 일반적으로 간섭계에서 많이 사용되고 있는 레이저의 경우는 파장폭이 매우 작아 코헤런스길이는 약 수 km나 된다. 수은 등의 경우는 파장폭이 대략 0.1 nm, 중심파장이 약 550 nm 정도이므로 코헤런스길이는 약 3 mm 정도이다. 파장폭이 대략 200 nm, 중심파장을 600 nm 정도인 백색광을 사용하면 이때의 코헤런스 길이는 약 1.8 μm 정도이다. 따라서 백색광을 사용할 경우 단순하게 간섭무늬의 발생여부만을 판단하더라도 매우 정확한 위치결정을 할 수 있게 된다.

3. 위치결정

본 연구에서는 전자제품의 주요부품의 정확한 위치 결정을 위한 센서로서 백색광의 제한 간섭성을 이용한 자동초점맞춤법을 사용하였다. 자동초점맞춤방법에는 크게 수동식 (passive type) 과 능동식 (active type) 방법으로 나누어지며 본 연구에서 사용하는 방법은 수동식방법에 해당한다. 기존의 수동식방법들은 광학현미경을 통해 얻어진 영상으로부터 에너지를 계산하고, 이 에너지가 최대인 위치를 초점으로 정의하는 방법이다. 초점위치에서 얻어진 영상에서는 공간주파수의 고주파성분이 증가

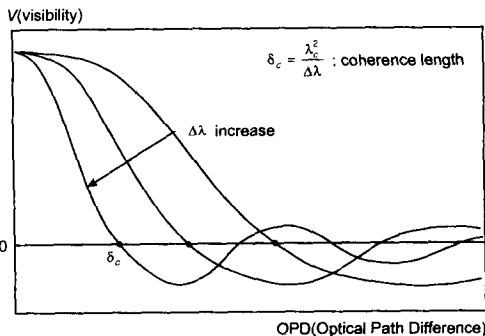


Fig. 2 Variation of visibility with OPD and wavelength width

되고 초점위치에서 멀어질수록 고주파성분은 감소하게 된다. 따라서 에너지는 이러한 고주파성분의 포함정도로 정의할 수 있다. 에너지를 계산하는 방법으로는 푸리에변환법(Fourier transform)과 고주파필터법(high pass filtering) 등이 있다. 이러한 방법들을 이용하여 정확한 초점위치를 얻기 위해서는 에너지 값의 변화가 크면 클수록 좋으므로 광학현미경의 초점심도가 작아야 한다. 그런데 초점심도가 너무 작으면 한 화면 내에서 초점이 맞지 않는 부분이 있을 수 있으므로 초점심도를 작게만 만들 수 없다. 이러한 이유로 일반적인 수동식 자동맞춤방법은 보통 10 μm 이상의 정밀도를 얻지 못한다.

본 연구에서는 실제 응용을 위해서 Fig. 4에서와 같이 마이켈슨간섭계를 도입하였다. Fig. 3은 마이켈슨간섭계에서 백색광의 제한 간섭성을 이용한 자동초점맞춤의 방법을 보여준다. 측정물체를 구(sphere)라고 가정하고, Fig. 3의 영상에서는 측정물의 형상은 제외하고 간섭무늬모양만을 표시하였다. Fig. 3(a)은 측정물이 코헤런스영역안에 있지 않으므로 간섭무늬가 발생하지 않음을 보여준다.

Fig. 3(b), (c)는 측정물이 코헤런스영역안으로 들어감에 따라 간섭무늬의 가시성이 좋아짐을 보여준다. Fig. 3(d)는 측정물이 계속해서 움직여 다시 코헤런스영역밖으로 나갔을 때 간섭무늬가 사라짐을 보여준다. 여기서, 초점은 간섭무늬가 가장 강하게 나타나는 위치가 되며, 결국 식 (9)에서 V가 최대가 될 때의 위치가 되고, 초점을 결정하기 위한 에너지함수는 다음과 같이 정의된다.

$$E = |V| \tag{13}$$

간섭무늬는 식 (8)과 같이 주기함수로서 발생하므로 푸리에변환에 의해서 간섭무늬의 가시성을 계산할 수 있다. 측정물체상의 좌표계(x, y)에 대하여 광학현미경을 통해 얻은 영상좌표계(ρ, γ)는 크기가 N×M인 정수좌표계로 정의가 될 수 있다. 광학현미경을 통해 획득한 영상의 2차원 푸리에변환은 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{\rho=0}^{N-1} \sum_{\gamma=0}^{M-1} f(\rho, \gamma) \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{u\rho}{N} + \frac{v\gamma}{M}\right)\right) \tag{14}$$

여기서, u=0,1,2,...,N-1, v=0,1,2,...,M-1 이고

$$f(\rho, \gamma) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} F(u, v) \exp\left(j2\pi\left(\frac{u\rho}{N} + \frac{v\gamma}{M}\right)\right) \tag{15}$$

여기서, ρ=0,1,2,...,N-1, γ=0,1,2,...,M-1 이다. 이때의 공간주파수 분해능은 다음과 같다.

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x}, \quad \Delta v = \frac{1}{N\Delta y} \tag{16}$$

또한 f(ρ, γ)에 대한 파워스펙트럼은 다음과 같이 정의 된다.

$$P(u, v) = |F(u, v)| \tag{17}$$

식 (17)의 P(u, v)는 측정물체 자체의 스펙트럼과 간섭무늬의 스펙트럼을 동시에 포함하고 있다. 간섭무늬만의 스펙트럼을 얻기 위해서는 밴드패스 필터링(band pass filtering)을 시키면 다음과 같이 간섭무늬의 가시성에 비례하는 에너지함수를 정의할 수 있다.

$$E' = \sum_u \sum_v P(u, v) H(u, v) \tag{18}$$

여기서, u, v에 대한 합계는 각 스펙트럼에 대

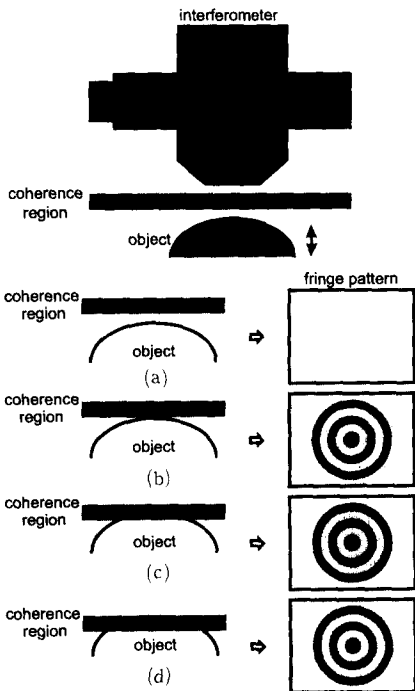


Fig. 3 Interference fringes changed with position of object

한 적분을 의미하고, 밴드패스필터 $H(u, v)$ 는 측정물체에 따라 다르게 정의될 수 있다.

4. 응용 예 및 실험결과

본 연구에서는 위치결정 대상으로서 VCR의 헤드드를 사용하였다. Fig. 4는 4개의 헤드드를 갖는 VCR 드럼 및 실제 측정시스템의 광학계를 보여주고 Fig. 5는 실제로 제작된 실험장치의 사진이다. VCR이 정확한 화면을 재생하기 위해선 드럼에 부착되는 헤드드의 위치가 매우 중요한데, 이 때 요구되는 정확도는 $\pm 2 \mu\text{m}$ 이다. 그러므로 코헤런스길이 $2 \mu\text{m}$ 이내인 백색광을 이용하여 간섭무늬가 발생하도록 헤드드의 위치를 조정하면 헤드드는 요구하는 정확도내에 위치하게 된다. 실험방법은 다음과 같다. 간섭계를 일정한 간격으로 이동하면서 아래

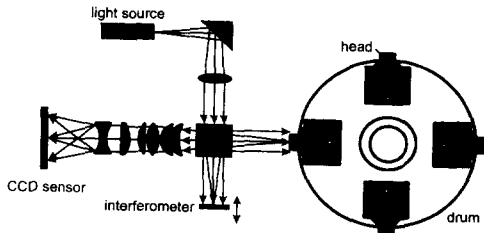


Fig. 4 Schematic diagram of VCR alignment system

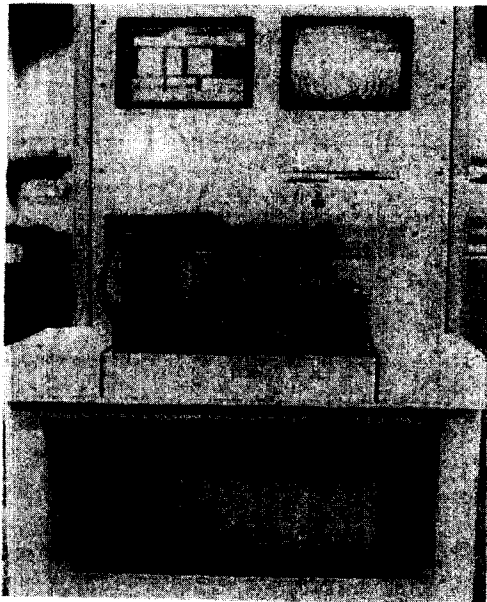


Fig. 5 Experimental apparatus

에 제시된 방법을 통해 간섭무늬의 유무를 판단하고 간섭무늬의 가시성을 계산한 후 가시성이 최대인 위치를 찾고, 그 위치로 헤드드를 이동시키므로써 정밀한 위치 결정을 수행한다.

헤드드는 x, y 방향으로 서로 다른 곡률을 갖기 때문에 타원형의 간섭무늬가 발생한다. 그러므로 2차원 푸리에변환을 하는 대신에 1차원 푸리에변환만으로도 간섭무늬의 가시성을 계산할 수 있다. 이때 영상과 푸리에변환사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F(u)_r = \sum_{\rho=0}^{N-1} f(\rho)_r \exp\left[-\frac{j2\pi u \rho}{N}\right] \quad (19)$$

$$f(\rho)_r = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u)_r \exp\left[\frac{j2\pi u \rho}{N}\right] \quad (20)$$

여기서, $f(\rho)_r$ 는 영상에서 수직좌표값이 γ 인 한 선의 수평방향 데이터이고, $F(u)_r$ 는 $f(\rho)_r$ 를 푸리에변환한 결과이다. 실험에서 사용된 CCD센서의 분해능이 512×480 이므로, $N=512, M=480$ 이다. 그러므로 $F(u)_r$ 에서 주파수의 분해능 Δu 은 다음과 같다.

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} = \frac{1}{512} / \pi xei \quad (21)$$

VCR 헤드드의 경우 약 30배의 광학현미경을 사용할 때 한 화면에서 간섭무늬가 $4\Delta u \sim 10\Delta u$ 의 주파수를 가지며, 이러한 범위의 주파수만을 통과시키기 위하여 다음과 같은 밴드패스필터(band pass filter)를 사용한다.

$$H(u) = \begin{cases} 1 & 4\Delta u < u < 10\Delta u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

식 (18)로부터 에너지함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_{\gamma=j} = \sum_u |F(i\Delta u)_{\gamma=j}| \cdot H(u) = \sum_{i=4}^{10} |F(i\Delta u)_{\gamma=j}| \quad (23)$$

여기서, j 는 영상의 γ 좌표 값이다. 간섭무늬의 모양은 한 화면 전체에서 나타나므로 위의 에너지 값을 한 화면에서 다섯 개의 γ 좌표에 대해서 계산한 뒤 이들 모두 더한 값을 최종적으로 이용한다. 즉,

$$E' = \sum_{j=1}^5 E_{\gamma=M_j} \quad (24)$$

이 된다.

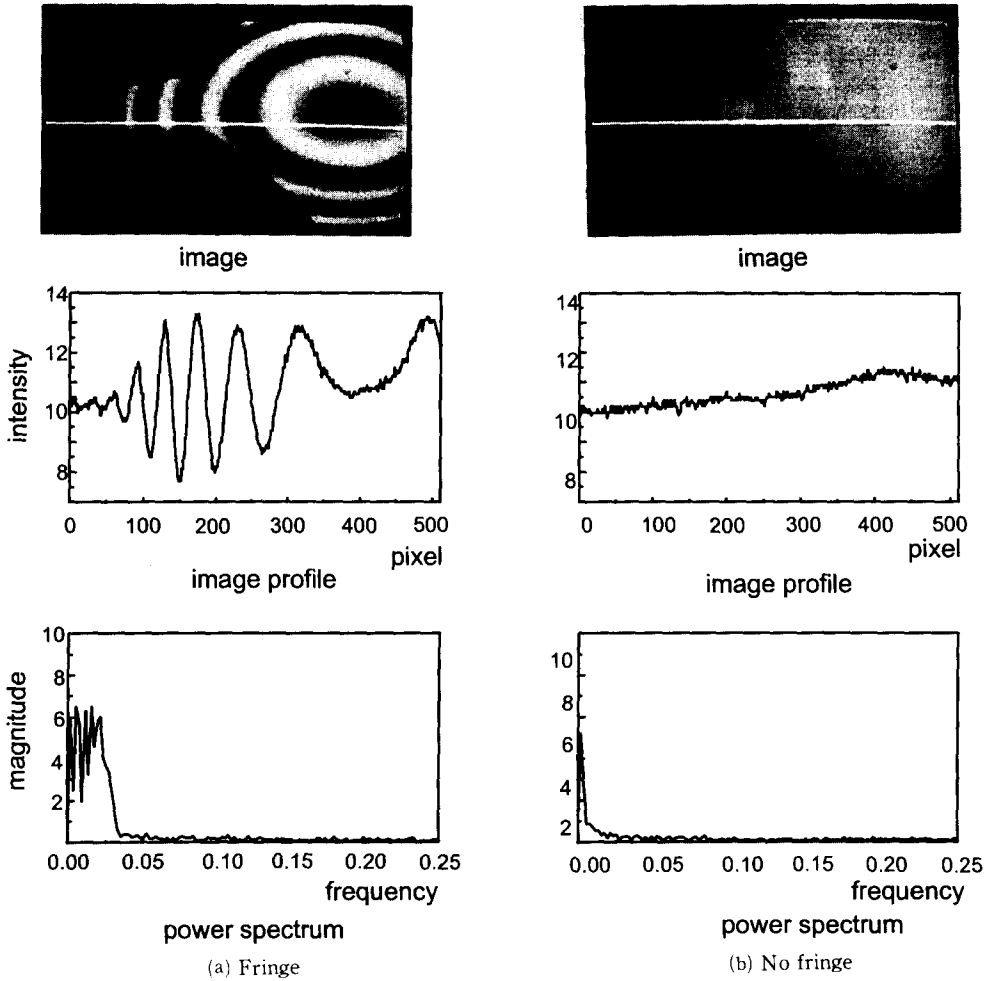


Fig. 6 Comparison of power spectrum with fringe existence

Fig. 6과 Fig. 7은 헤드의 위치를 결정하기 위하여 백색광의 제한 간섭성을 이용한 실험결과이다. Fig. 6은 간섭무늬가 발생하였을 때와 간섭무늬가 없을 때의 헤드의 모양과, 그 때의 한 수평방향선의 빛의 강도분포와 파워스펙트럼(power spectrum)을 비교하였다. 그림에서 보아 알 수 있는 것처럼 주파수범위 $4\Delta u$ 부터 $10\Delta u$ 내에서 파워스펙트럼의 차이가 뚜렷하다. Fig. 7은 식 (24)에 의해 얻어진 에너지 값의 변화를 보여준다. 헤드의 위치가 Fig. 3의 (a), (b), (c) 그리고 (d)의 위치로 이동함에 따라 에너지 값에 뚜렷한 차이를 나타낼 수 있다. 에너지 값이 최고가 되는 점이 분광기로부터 헤드까지의 거리가 기준거울까지의 거리와 일치하는 위치가 된다. 측정분해능 R_m 은 단순히 에너

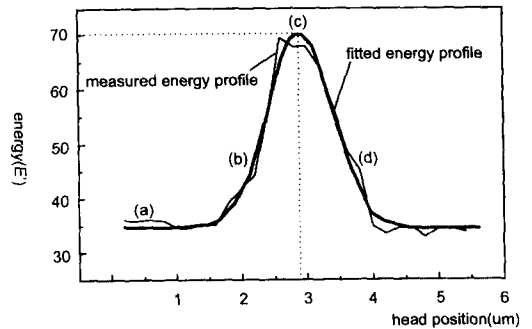


Fig. 7 Variation of energy with head positions

지 값을 비교할 경우에 헤드를 움직이는 모터의 구동분해능 R_d 에 의존한다. 그렇지만 Fig. 7에서와 같이 에너지분포를 연속함수로 가정하고 곡선맞춤

을 하여 에너지가 최대인 위치를 찾으면 측정 R_m 은 최소한 $R_d/10$ 정도까지 달성하였고, 이는 실험을 통해서 반복능을 측정된 결과로부터 얻어진 값이다. 본 연구에서 제안된 방법을 통해 측정된 결과 약 $0.2 \mu\text{m}$ 의 측정반복능을 얻을 수 있었다. 이 알고리즘을 수행하는데 IBM 486 PC와 영상처리보드인 DT3851(Data Translation사)를 사용하였을 경우 한 화면당 약 0.1초정도가 소요되었다. 이는 영상처리를 이용하는 일반적인 소프트웨어 자동맞춤에 비해 빠른 측정속도이다.

5. 결 론

본 논문에서는 백색광의 제한 간섭성을 이용한 초정밀 위치결정법에 관해 기술하였다. 초정밀 위치결정을 위한 방법으로 자동초점맞춤방법을 이용하였다. 간섭무늬의 가시성을 초점위치에 대한 에너지함수로 정의하였고, 이를 푸리에변환을 이용하여 얻었다. VCR 헤드의 위치조정에 응용한 결과 서브마이크로미터의 정확도를 얻을 수 있었다. 이렇게 구성한 광학현미경이 3차원 좌표측정기의 프로브로 사용될 경우 매우 정밀한 비접촉 3차원 측정기의 구현이 가능하다. 본 방법은 간섭계의 구성이 간단하여 구현이 쉽고 측정정밀도가 매우 우수할 뿐 아니라 영상처리기법을 도입하여 간섭무늬를 인식하므로 측정물체의 다양한 형상에 대해서도 대응이 가능하다. 측정속도는 하드웨어 자동초점맞춤장치에 비해 느리지만 일반적인 소프트웨어 자동초점맞춤장치에 비해서는 빠른 속도를 갖는다. 또한 간섭무늬의 발생정도가 광학계의 심도와 무관하므로 초점심도를 충분히 크게 광학계를 설계하여 선명한 화상을 얻을 수 있다.

참고문헌

(1) 송창규, 김승우, 1992, "삼차원측정기를 이용

- 한 삼차원곡면의 자동 형상측정 알고리즘," 대한기계학회 춘계학술대회 초록집, pp. 660~664
- (2) 김승우, 공인복, 민선규, 1992, "광위상간섭에 의한 경면의 정밀 형상측정," 대한기계학회논문집, 제16권, 제8호, pp. 1530~1535
- (3) Kim, S. W. and Park, H. G. 1992, "Moire Topography by Slit Beam Scanning," *Appl. Opt.*, Vol. 16, pp. 2152~2162
- (4) 박현구, 김승우, 박준호, 1993, "슬릿광 주사 방법에 의한 자유곡면의 삼차원형상 측정," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1202~1207
- (5) Igarashi, S., Shibukawa, K. and Kaneta, M, 1992, "3D Measurement of Shape Using Difference Stereo-vision Algorithm : - Enlargement of Depth Range and Improvement of Measurement Accuracy-, " *JSPE* (in Japanese), Vol. 58, pp. 1167~1172
- (6) Murali Subbarao, Tae Choi and Arman Nikzad, 1993, "Focusing Techniques," *Optical Engineering*, Vol. 32, No. 11, pp. 2824~2836
- (7) 이호재, 1995, "고배율 현미경의 자동초점장치," 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (8) 이상수, 1989, 파동광학, 교학연구사, pp. 21~29.
- (9) Eugene Hecht, 1987, *Optics 2th Ed.*, Addison Wesley.
- (10) Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, 1992, *Digital Image Processing*, Addison Wesley.
- (11) William, J. Dockrey and Douglas Hendricks, 1989, "The Application of Coherence Probe Microscopy for Submicron Critical Dimension Linewidth Measurement," *SPIE, Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control III*, Vol. 1087, pp. 120~137