

# 위상이동 간섭무늬 투영을 이용한 3차원 형상측정 시스템의 위상계산오차 해석

류현미 · 김석성 · 홍석경<sup>†</sup> · 연구황

충북대학교 물리학과

☎ 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48번지

(2002년 2월 25일 받음, 2002년 4월 1일 수정본 받음)

위상이동 간섭무늬 투영 방법을 이용한 3차원 형상측정 시스템의 위상계산오차를 분석하였다. 본 연구에서 다룬 오차의 요소에는 물체 표면의 특성에 따라 검출기에 나타나는 양자화 크기의 변이 효과, 물체 표면에 맺히는 간섭무늬 패턴의 초점어긋남 효과, 간섭무늬의 위상이동 오차에 의한 효과, 위상 이동된 간섭무늬 패턴이 투영된 여러 개의 물체 상을 받아들이는 도중에 시스템 및 주위 환경 변화에 의한 오차, 그리고 투영되는 격자 패턴의 왜곡에 의한 효과들을 계산하고 논의하였다.

주제어 : shape measurement, phase shifting fringe projection, optical measuring, phase calculation error.

## I. 서 론

다양한 여러 가지 산업에서 제품의 개발 속도를 높이고, 생산된 제품의 품질 확인 및 개선을 위해서 물체의 정확한 3차원 형상이 요구된다. 3차원 형상측정은 지능 로봇의 제어, 운송 수단 안내를 위한 방해물 확인, 주형 주물 개발을 위한 크기 측정, 압연관의 구조 검사 및 확인, 정확한 응력 및 응력 변형과 진동 측정, 비파괴 검사, 역공학에 의한 유지 보수 등 다양하다. 또한 생산 물품의 외부 페인트 결함과 형체의 흠집 검사 등과 같은 생산라인의 자동 검사 및 자동 인식 문제에서도 3차원 형상측정이 이용되고 있다.<sup>[1]</sup>

지금까지는 3차원 형상측정을 위해서 접촉식 탐촉자를 이용한 기계적인 측정 방법이 주로 사용되었다. 기계식 방법은 3차원 정보측정에 있어서 정확성이 뛰어나고, 보이지 않는 곳까지 측정할 수 있다는 장점이 있기는 하지만, 측정시간이 길고 물체 표면에 손상을 입힐 수 있을 뿐만 아니라 단단한 물체가 아닌 경우에는 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위해서 근래에는 각 점들의 위치를 얻기 위해서 비접촉의 광학식 3차원 형상측정법을 이용하기 시작하였다. 이 방법은 기계식에 비해 측정시간이 짧을 뿐만 아니라 비접촉이기 때문에 물체의 표면 손상이 없다는 장점이 외에도 큰 물체의 3차원 형상측정에도 유리하다.

광학 방법도 측정 원리 및 방법에 따라 여러 가지가 있고 각각은 측정 대상 물체의 특성에 따라 각기 장단점이 있지만 그 중 대표적인 방법의 하나가 sine 형태의 간섭무늬 패턴을 투영하는 방법이다.<sup>[2]</sup> 이와 같은 방법은 물체 표면 전체에 간섭무늬를 투영하게 되므로 레이저 라인 스캔과 같은 방법에 비해 시간 절약에 유용하다. 이때 물체의 깊이 정보는 옆에 있는 카메라에서 바라보는 변형된 간섭무늬 패턴에 담기게 된다. 즉, 깊이 정보는 이미지의 각 화소에 분포되는 간섭무늬의

절대 위상값으로 변환된다. 본 논문에서는 백색광을 이용한 간섭무늬 투영 시스템에서 카메라에 들어온 물체의 이미지들로부터 위상값을 계산할 때 발생할 수 있는 오차들에 대하여 분석하고 논의하였다.

## II. 위상이동 간섭무늬 투영을 이용한 3차원 형상측정

간섭무늬 투영 방법은 그 기본원리에 있어서 광학식 삼각측량법을 이용한다.<sup>[3]</sup> 광학식 삼각측량법을 이용한 비접촉 광학식 3차원 형상측정의 기본원리는 요철이 있는 3차원 물체 위에 직선을 투영하고 투영한 곳과 다른 각도에서 바라보게 되면 요철에 따라서 굽거나 꺾여 보이게 되는 것을 이용하며, 이때 꺾여진 정도가 3차원 물체의 깊이 정보를 준다. 간섭무늬 형태의 패턴을 사용하는 이유는 물체 위에 직선을 한꺼번에 뿌려서 카메라가 볼 수 있는 화면 전체에 대해 물체의 깊이 정보를 한번에 얻을 수 있다는 것과 이때 인접해 있는 선들의 구분은 이미 간섭계에 대한 연구에서 확립되어 있는 간섭무늬 처리 기술을 이용하면 가능하다는 것이다. 그렇게 하기 위해서 sine 형태의 간섭무늬 형태의 패턴을 사용해야 한다. 이때 인접한 선 사이의 구분은 서로 다른 위상값으로서 얻어진다.

그림 1은 간섭무늬 투영을 이용한 3차원 형상측정 원리를 설명하기 위한 구성도이다. 그림에서 A는 sine 형태의 간섭무늬 패턴을 투영하는 투영 중심이고, 점 O는 물체의 상을 맺는 결상렌즈의 중심이다. Z축은 상을 맺는 시스템의 광축 방향에 놓여져 있다. 평면 m은 투영된 패턴에서 동일한 위상으로 정의되는 면을 의미하고, 이 평면은 x-z 평면에 수직이다. P는 물체 표면 위의 한 점이고 P'은 P로부터 x-z평면에 수직으로 내린 점이다. 그림에서는 P'이 P와 같은 위치에 있다. 만약 P'에서 각도  $\alpha$  와  $\xi$ 를 정할 수 있다면, x-y 평면으로부터의 거리  $Z_0$ 를 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$Z_0 = \frac{a}{\tan \xi + \tan \alpha} \tag{1}$$

<sup>†</sup>E-mail: sk-hong@hanmail.net

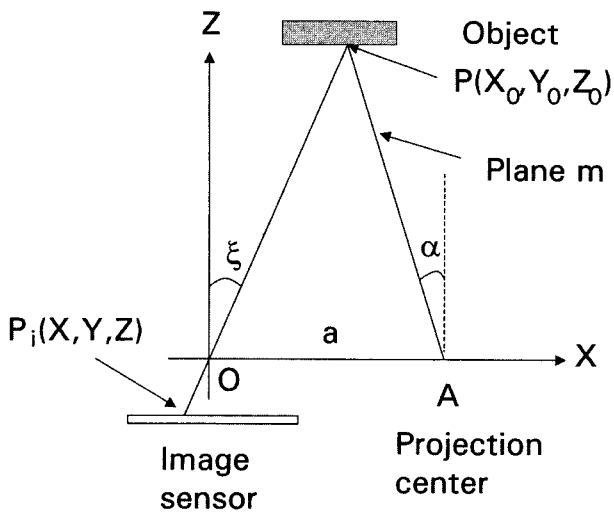


그림 1. 광학식 삼각측량법의 구조.

각도  $\xi$ 는 이미지 센서에 맺은 이미지의 점  $P_i$ 의 좌표로부터 얻을 수 있다. 예를 들어 렌즈로부터의 회절을 무시한 광학 시스템에서 각도  $\xi$ 는

$$X = Z \tan \xi \quad (2)$$

의 관계로부터 구할 수 있다. sine 형태의 격자 투영 방법에서 각도  $\alpha$ 는 각각의 구분된 간섭무늬의 위치로부터 계산된다. 즉 각도  $\alpha$ 는 물체 위에 투영된 간섭무늬의 위상값으로부터 알 수 있다. 따라서 평면  $m$ 은 간섭무늬가 투영될 때 동일한 위상을 가지는 면이다. 간섭무늬 투영 방법에서 물체 위에 투영된 간섭패턴의 세기  $I_0$ 은

$$I_0(\alpha, \beta, r) = I(\alpha, \beta, r) \{1 + \gamma(\alpha, \beta, r) \cos[\phi(\alpha) + \phi_0]\} \quad (3)$$

으로 주어진다. 여기에서  $f_0$ 는 위상  $\phi(\alpha)$ 의 값을 얻기 위해 주어진 위상이동이고,  $r$ 은 A로부터의 거리이다.  $I$ 은 평균 세기이고  $\gamma(\alpha, \beta, r)$ 는 간섭무늬 패턴의 가시도이다. 이 식에서 패턴의 세기는 각도  $\alpha$ 에만 의존한다고 가정한다. 투영된 간섭무늬 패턴은 물체 표면에 의해서 산란되고, 이미지 센서 위에 상을 맺는다. 물체 위에서 세기는 물체의 반사도와 기울기 등에 따라서 다르다. 이러한 영향을  $R(x, y)$ 로 표현하면, 이미지 센서에서 빛의 세기  $I$ 는

$$I(x, y) = R(x, y) I_0(\alpha, \beta, \gamma) \quad (4)$$

로 주어지고 여기에서  $R(x, y)$ 는 물체 표면의 상태를 나타내는 변수이다.

간섭무늬 투영을 이용해서 물체의 깊이 정보를 얻기 위해서는 투영된 간섭무늬 패턴으로부터 이미지의 각 화소에 대응되는 위상값을 얻어야 한다. FFT를 사용하면 투영된 간섭무늬를 하나만 이용해도 쉽게 위상값을 구할 수 있다. 그러나 FFT된 패턴에서 대역을 자르는데에는 많은 제약이 있어서 고정밀을 추구하기가 어려워져 상용화에 대한 관심이 상대적으로 적은 편이다. 현재 가장 많이 사용되며 연구되고 있는 방법이 위상이 이동된 간섭무늬 패턴을 이용하는 것이다. 위상

이동 방법에서 위상이동 간격을 줄여서 패턴수를 많이 사용하면 오차를 줄일 수 있지만 가장 많이 사용되는 것은 90도 간격으로 이루어진 4개의 패턴이다. 위상이동방법은 여러 패턴이 투영된 이미지를 얻어야 한다는 번거로움이 있기는 하지만, 이미지들 사이의 간단한 수식으로부터 각 화소들의 위상값을 쉽게 얻을 수가 있어서 데이터 처리에서 소프트웨어에 대한 의존성을 줄여서 데이터의 왜곡을 막을 수 있다. 위상이 이동된 4개의 디지털화된 간섭무늬 패턴의 세기는 아래의 수식에 의해서 표현된다.<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_g + I_m \cos[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= I_g + I_m \cos\left[\phi(x, y) + \frac{1}{2}\pi\right] \\ I_3(x, y) &= I_g + I_m \cos[\phi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) &= I_g + I_m \cos\left[\phi(x, y) + \frac{3}{2}\pi\right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $(x, y)$ 는 물체 또는 이미지의 특정점으로 이미지 좌표이고,  $I_g$ 는 배경 빛의 세기,  $I_m$ 은 변조 진폭의 세기이다. 위의 수식으로부터 위상 분포  $\phi(x, y)$ 는 아래의 수식과 같이 표현된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (6)$$

결과적으로 위상이동방법을 이용해서 물체 이미지의 각 점들에 대한 위상값을 얻게 된다. 그러나 위의 식을 이용해서 얻어진 위상값은 삼각함수의 주기성 때문에  $-\pi$ 에서  $+\pi$ 까지 값만을 갖게 된다. 따라서 인접한 화소와 위상차가  $2\pi$ 보다 커질 때 정수 간섭차수만큼 애매해진다. 즉 위와 같은 과정만으로는 상대적인 위상값만을 알게 되어 위상이동은 각 화소에서 간섭무늬의 부분차수만을 결정한다. 이러한 부분차수를 인접한 정수차수와 함께 연결하는 것이 소위 위상값 펼치기(phase unwrapping) 과정이다. 불연속을 극복하는 열쇠는 위상값 펼치기 과정 중에 정수 간섭무늬 차수  $n$ 을 결정하는 것이다. 간섭무늬 패턴 투영 방법을 이용한 형상측정 시스템에서 이러한 불연속을 극복하기 위해서 여러 가지 방법이 개발되었다. 대표적인 것이 graycode 방식과 heterodyne 방법이다.<sup>[4,5]</sup>

위상이동 간섭무늬 패턴 투영을 이용한 형상측정 시스템에서 오차 또는 정확도에서 가장 중요한 것의 하나가 위상값을 계산할 때 생기는 오차이다. 이와 관련된 연구 중에 일반적인 위상이동 간섭계에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있어서 위상이동 오차, 검출기의 비선형성에 의한 효과 및 위상이동 간격의 효과 등에 대한 오차 해석 연구가 주를 이룬다. 예를 들어서 간섭계에서는 기준빔이 되는 팔쪽에 위상이동을 위해서 상대적인 거리를 변화시켜야 하고 보통 PZT를 사용하는데 이것이 선형이 아닐 뿐만 아니라 늘어날 때와 줄어날 때의 이력이 달라서 위상이동 오차가 주요한 오차의 요소로 고려되어야 한다.<sup>[6]</sup> 비록 이에 대한 보정 연구가 Wyant 등과 같은 유명한 연구그룹에 의해 많이 이루어지고 있기는 하지만 여전히 가장 중요한 오차 요소의 하나이다. 그래서 Schwider는 위상

이동의 비선형성, 측정을 위한 위상이동 중 위상 유동, 저주파수의 기계적인 진동 등에 의한 위상이동 간섭계의 오차에 대하여 살펴보았다.<sup>[7]</sup> Wingerden 등은 광원의 불안정성, 위상이동 오차, 기계적인 진동, 검출기의 비선형성 및 검출기 신호의 양자화가 위상이동 간섭계에 어떻게 오차를 가져오는지에 대해 연구하였다. 여기에서는 선형근사를 사용하였다. 위상이동 간격에 대한 적절한 알고리즘에 대해서도 살펴보았다.<sup>[8]</sup> 한편 Rathjen은 위상을 계산하는 알고리즘의 통계적인 성질에 대해 살펴보았으므로 오차를 분석하였다.<sup>[9]</sup>

간섭무늬 투영 시스템에서 오차에 대한 해석도 앞에서의 위상이동 간섭계에서와 크게 다른 것은 아니지만 유리과 같은 투명체에 간섭무늬 모양의 패턴을 코팅해서 사용하기 때문에 그 조건이 다르게 되어 이에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다. 간섭무늬 패턴 투영 시스템에서 투영되는 광원은 3차원 형상측정 시스템에서 전체 정확도에 기여하는 중요한 요소의 하나이다. 위상이동을 이용해서 절대 위상을 얻으려면 여러 개의 격자 슬라이드가 필요하다. 이것은 측정 속도를 느리게 할 뿐만 아니라 모터 등을 포함해야 하므로 시스템을 복잡하게 한다. 그래서 간섭무늬 투영 시스템으로 LCD의 이용 연구가 많은데 이때에는 각 화소가 컴퓨터의 영상 생성에 의해 주어지게 된다. 이렇게 투영할 때의 장점은 위상이동 및 격자 주파수 변경 속도가 빠르다는 것이다. 그러나 고출력의 광원이 필요하기 때문에 냉각을 위해 중량이 커지는 단점이 생긴다. 또한 분해능이 슬라이드 투영에 비해 낮다. 한편 Coggrave 등은 Spatial Light Modulator를 투영기로 사용하는 시스템에 대한 오차를 해석해서 시스템을 최적화하는 연구를 하였다. 이 경우에도 LCD에서처럼 분해능이 낮아서 이를 극복하기 위해 인위적으로 초점어긋남을 주는 것이 바람직하다는 결론을 얻는다.<sup>[10]</sup> Buckberry 등은 카메라와 투영기의 각도에 따라 분해능이 달라지는 효과와 간섭무늬 개수에 따른 효과들에 대해 살펴보았다.<sup>[11]</sup> 본 논문에서는 백색광을 이용한 4단계 위상이동 간섭무늬 형태 패턴의 투영 시스템에서 위상값을 계산할 때 발생할 수 있는 오차들에 대하여 분석하고 논의하였다. 편의상 위상을 계산하는 알고리즘의 적합성에 대해서는 살펴보지 않았다.<sup>[12]</sup>

### III. 위상계산 오차

여기에서는 위상이동 간섭무늬 패턴의 투영을 이용한 형상 측정에서 위상계산 오차에 대해서 살펴본다. 비록 위상이동 간섭계에서와 유사하지만 형상측정 시스템에서 좀 더 구체적인 변수에 대해 오차를 분석함으로써 적절한 시스템을 설계하거나 측정데이터의 가치를 가늠하는 기준으로 삼고자 한다. 간섭무늬 투영 3차원 형상측정 시스템에서 위상을 계산할 때 고려되어야 할 오차의 요인들이 많지만 여기에서는 몇가지 중요한 경우에 대해서 살펴본다.

오차에 대해 살펴보기 전에 각각의 화소에서 계산되는 위상이 어떤값으로 대표되는지를 살펴보자. 다시 말해서 물체 위에 투영된 간섭무늬 패턴의 상을 맺는 CCD 카메라는 한 축이 수백개 이상의 화소로 이루어져 있다. 즉 카메라 화소의

면적이 유한하기 때문에 sine 곡선의 일정영역이 적분되는 효과가 생긴다. 이때 하나의 카메라 화소 안에 포함되는 sine 부분 중 어떤 위상값으로 계산되는지를 알아보자. 예를 들어 하나의 화소에 위상이  $\alpha$ 와  $\beta$  사이에 해당하는 sine 형태의 간섭무늬 패턴이 투영될 때 식 (6)으로 위상값을 계산할 때 그 화소에 대응되는 위상이 어떻게 되는지 계산해보자. 편의상 간섭무늬의 세기를  $I(x, y) = I_g + I_m \cos\phi(x, y)$ 라 놓으면

$$I_1 = \int_{\alpha}^{\beta} [I_g + I_m \cos\phi] d\phi = I_g(\beta - \alpha) + I_m(\sin\beta - \sin\alpha)$$

$$I_2 = \int_{\alpha}^{\beta} [I_g + I_m \cos(\phi + \frac{\pi}{2})] d\phi = I_g(\beta - \alpha) + I_m(\cos\beta - \cos\alpha)$$

$$I_3 = \int_{\alpha}^{\beta} [I_g + I_m \cos(\phi + \pi)] d\phi = I_g(\beta - \alpha) + I_m(-\sin\beta + \sin\alpha)$$

$$I_4 = \int_{\alpha}^{\beta} [I_g + I_m \cos(\phi + \frac{3\pi}{2})] d\phi = I_g(\beta - \alpha) + I_m(-\cos\beta - \cos\alpha) \quad (7)$$

와 식 (6)으로부터 아래와 같이

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \tan^{-1} \frac{\cos\alpha - \cos\beta}{\sin\beta - \sin\alpha} = \frac{\alpha + \beta}{2} \quad (8)$$

위상값이 그 중간값으로 주어진다. 즉, 각 카메라의 화소에서 계산되는 위상은 화소에 포함되는 위상의 중간값으로 정의된다는 것을 알 수 있다.

간섭무늬 투영기를 이용한 3차원 형상측정기의 개념도는 그림 2와 같다. 측정과정은 투영기에서 렌즈와 램프 사이에 있는 격자로부터  $\pi/2$ 씩 위상이동된 sine 형태의 패턴이 측정 물체에 차례대로 투영되고 각 이미지가 카메라를 통해 기록되면 컴퓨터에서 이들 이미지로부터 위상값을 계산해서 이로부터 3차원 좌표값이 얻어진다. 여기에서 여러 가지 가능한 시스템 오차에 대해서 생각해보자. 먼저 위상을 이동할 때 오차가 생길 수 있다. 다음으로 투영기에서 물체 표면에 간섭무늬 패턴의 이미지를 맺을 때에 심도가 제한되기 때문에 초점이 흐려지는 부분이 생길 수 있는데, 이때 오차가 발생한다. 그리고

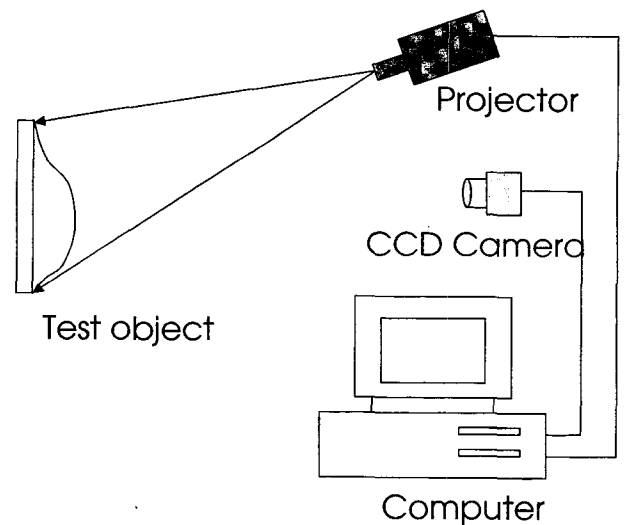


그림 2. 3차원 형상측정 시스템 구성도.

위상이동 시스템에서는 동일한 부위를 같은 위치에서 여러번 촬영해야 하는데 측정도중 여러 가지 변화에 의해 이미지들 사이에  $I_g$ 나  $I_m$ 이 달라져서 오차가 생길 수 있다.

또한 물체의 표면 상태에 따라 이미지 센서의 각 화소에서 얻어지는 간섭무늬 패턴의 변조 세기가 달라진다. 즉 산란이 잘 되는 부위에서는 변조 세기가 크지만 산란이 잘 되지 않는 부분에서는 변조 세기가 작아서 A/D 변환에 의해 디지털 이미지로 기록될 때 물체 부위에 따라서 양자화되는 정도가 달라지게 되는데 이에 대해서도 살펴본다. 이 장에서는 이러한 효과가 위상계산 오차에 얼마나 영향을 주는지 알아본다. 그 이외의 오차에는 CCD 카메라의 비선형 현상, 위상이동 간격의 수, 카메라의 잡음 특성, 카메라 렌즈의 수차 문제 등이 있는데 여기에서 이에 대한 구체적인 해석은 제외되었다. 한편 위상값을 구할 때 위상이동 개수에 따라서 적절한 계산 알고리즘을 생각할 수 있는데 이에 대해서도 고려하지 않았다. 본 논문에서 위상계산오차는 위의 오차요인을 컴퓨터 모사하여 실행하였다.

**3.1. 양자화 오차**

카메라로 받은 이미지를 컴퓨터에서 처리할 수 있도록 하기 위해서 연속적인 물리량(각각의 화소에 들어오는 빛 세기)이 불연속적인 숫자로 바뀌게 된다. 이때 불연속적인 값을 몇 단계로 나누는가 하는 것이 양자화 크기의 문제이다. 12 bit와 같이 고분해능의 CCD 카메라도 많이 있지만, 보통 경우에는 8 bit 카메라를 많이 사용한다. 그러나 물체의 표면 특성에 따라 부분적으로 8 bit보다 더 작은 bit수로 기록된다. 산란이 잘 일어나지 않는 부분은 변조 진폭이 작아서 양자화 크기가 낮아진다. 그림 3은 양자화 크기에 대한 위상계산 오차를 계산한 것으로 bit수가 증가할수록 위상계산오차는 기하급수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림에 나타난 값은 한 주기를 400개의 간격으로 나누어서 얻은 오차들을 제곱평균근한 것이다. 양자화 크기가 1 bit일 때는 graycode만으로 형상측정을 하는 것을 의미한다. 이때 위상계산오차는 0.12 정도인데 이것은 약  $\lambda/50$  정도의 오차를 의미한다.

예를 들어, 100 mm의 물체 위에 50개의 간섭무늬를 투영하

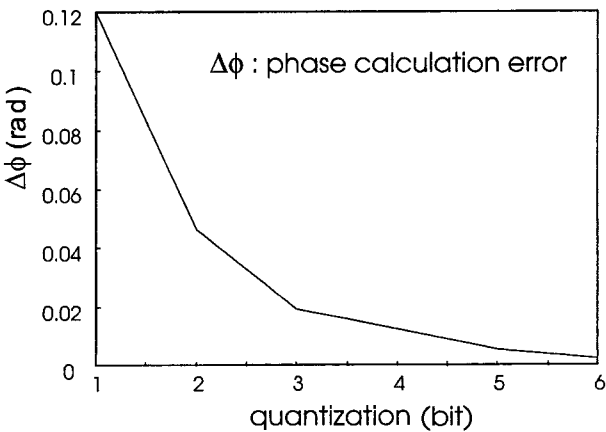


그림 3. 이미지 센션의 양자화 크기에 따른 위상계산 오차.

는 경우에, 간섭무늬 하나의 간격이 2 mm이므로 위상계산 오차는 약 40 μm이다. 이 정도 오차라면 정확도가 크게 요구되는 정밀 기계와 같은 분야 외의 물체 측정에 적용이 가능할 것이다. 보통 고정밀의 시스템의 경우에는  $\lambda/200$  정도의 정확도가 요구되는데 3 bit 이상이면 가능하다. 즉 변조 크기가 8 정도 이상이면  $\lambda/200$  이상의 정확도를 얻을 수 있다.

**3.2. 투영 패턴의 초점 어긋남에 의한 오차**

투영기 격자에 새겨진 sine 형태의 간섭무늬를 물체 표면에 맺을 때 결상렌즈의 구경 크기에 따라 심도가 제한된다. 그림 4는 투영 시스템에서 렌즈 위쪽에 위치한 sine 형태의 세기 단면 상을 아래쪽에 맺을 때의 구조를 기하학적으로 나타낸 그림이다. 물체가 격자 패턴의 초점거리에서 떨어져 있으면 초점이 어긋나서 상이 흐려지게 되는데 그림에서는 물체가 초점거리보다 투영기에 가까이 다가가게 되었을 때 상이 흐려지게 되는 상황을 나타낸 것이다. 일반적으로 물체가 3차원 형태를 지니게 되므로 물체의 표면이 초점을 벗어나는 부분이 생기게 된다. 이때에는 물체 표면에 맺은 패턴의 상이 흐려지게 되어 위상계산 오차가 발생하게 된다.

먼저 그림 4와 같은 구조에서 sine 형태의 간섭무늬 패턴이 초점거리로부터 벗어난 곳에서 어떤 세기 분포 패턴을 보이는지 살펴보자. 이렇게 defocus 된 곳  $r_0$ 에서의 세기는 격자 패턴에서  $x_0$ 를 중심으로 반경  $b$ 인 원 안의 sine 패턴 빛 세기의 합에 대응된다. 따라서 격자 패턴에서 임의의 점  $x$ 에서의 세기는

$$I(x) = I_g + I_m \cos x \tag{9}$$

이고 여기에서  $Z_0$ 는 격자와 렌즈 사이의 거리,  $Z_i$ 는 렌즈와 초점사이의 거리이고  $L$ 은 렌즈의 직경이다. 그리고  $a$ 는 초점이 벗어난 정도이고  $b$ 는 이대응해서 defocus 면의 상흐림에 기여하는 격자위 원의 반경이다. 그러면 defocus 면에 투영된 sine 패턴의 세기 분포는 다음 식과 같이 주어진다.

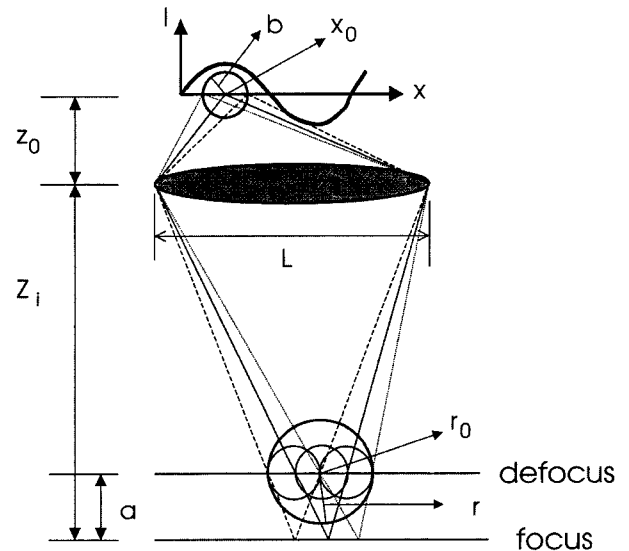


그림 4. 초점에서 벗어난 평면에 투영된 sine 형 패턴의 모양.

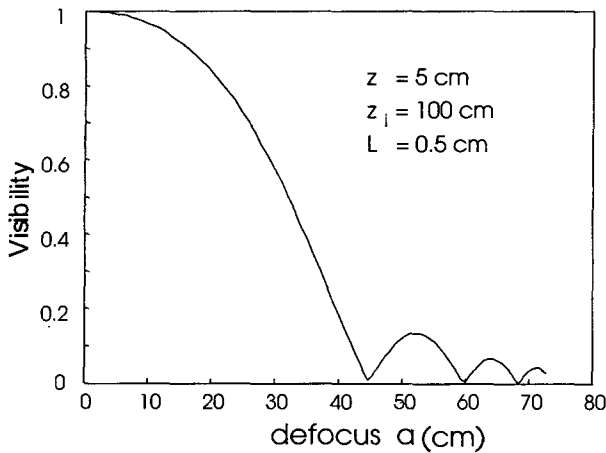


그림 5. 초점 어긋남에 의한 간섭무늬 패턴의 가시도.

$$I_1(r_0) \propto \sum_x I(x) = b^2 \pi I_g + 2I_m \int_{x_0-b}^{x_0+b} \cos \sqrt{b^2 - (x-x_0)^2} dx \quad (10)$$

defocus된 패턴들로부터 위상값을 얻어내기 위해서 위상이  $\pi/2$  씩 이동된 패턴들에 대한 세기도 위와 같이해서 구한다. 이렇게 해서 얻어진 네 개의 defocus된 패턴 이미지들로부터 defocus된 위의 한점  $r_0$ 에 대한 위상을 식 (6)에 의해서 구할 수 있다. 여기에서는 주어진 시스템 상수들에 대해 컴퓨터 모사를 통해 구하였다. 시스템의 기하학적인 상수들과의 관계를 얻기 위해서 defocus되는 거리  $a$ 를 패턴위 원의 반지름  $b$ 로 나타내면 간단한 관계식을 통해 아래와 같이 얻는다.

$$b = \frac{Daz_0}{2z_i(z_i - a)} \Leftrightarrow a = \frac{2bz_i^2}{Dz_0 + 2bz_i} \quad (11)$$

식 (10)으로부터 defocus 패턴의 세기분포  $I(r_0)$ 가 sine 형태의 모양을 갖는다는 것을 알 수 있다. 위상계산이 sine 형태에 기초하고 있어서 이것은 중요한 의미를 갖는다. 즉 패턴의 상이 초점에서 벗어나더라도 sine 형태를 유지하기 때문에 sine 형태 왜곡에 의한 위상계산 오차가 발생되지 않는다는 것이다. 그러나 변조 진폭의 크기가 감소해서 그림 5에서 보는 바와 같이 가시도가 줄어들게 되는데, 이것은 곧 양자화 크기가 줄어드는 결과가 된다. 그림 5는 렌즈의 구경이 5 mm, 격자 패턴과 렌즈 사이의 거리는 50 mm, 렌즈와 초점 면과의 거리는 1000 mm인 경우를 생각하였는데, 예를 들어, defocus 크기가 약 320 mm 정도라면 가시도는 초점 면에서의 경우에 비해서 반으로 줄어들게 되고, 이것은 양자화 크기에서 1 bit가 줄어드는 것과 마찬가지로 된다. 그래서, 초점 면에서 벗어나는 곳에서는 양자화 크기가 줄어드는 효과에 의한 위상계산 오차가 발생하게 된다.

### 3.3. 위상이동 중 변화에 의한 오차

위상이동을 이용한 측정 방법에서 커다란 단점의 하나는 동적인 상황에 있는 물체의 측정이 어렵다는 것이다. 앞의 식 (6)에서 보듯이 위상이동된 패턴들이 투영된 물체 이미지들로부터 위상값을 계산할 때 위상이 이동 이외의 요소는 모두 잡

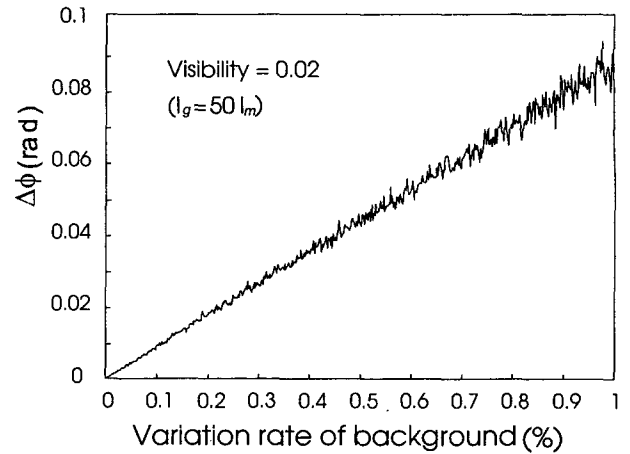


그림 6. 간섭무늬 패턴의 배경 세기 변화에 따른 위상계산 오차.

음 역할을 하게 된다. 그런데 위상이동된 패턴들이 투영되는 도중에 위상이동 이외의 여러 요인에 의해 세기 패턴에 변화가 생길 수 있다. 이러한 요인으로는 입력 전원의 불안정성, CCD 카메라 및 격자 패턴을 투영하는 광원의 전기적 잡음 등이 있다. 외부 요인으로는 주위 배경 조명의 변화 또는 측정하는 사람의 움직임이나 측정물 또는 측정기의 움직임 등이 있다.

위상이동 중의 변화에 의한 위상계산 오차를 계산하기 위해서 여기에서는

$$I_i = I_g + I_m \cos(\phi + \Delta_i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

의 네 패턴 사이에 배경 빛의 세기  $I_g$ 에 제멋대로 잡음 (random noise)을 넣었다. 그림 6은  $I_g = 50, I_m = 1$ , 즉 가시도가 0.02인 경우에 주위의 여건 등에 의해서 생기는 변화를  $I_g$ 에  $\pm 0.25$  내의 제멋대로 잡음을 실었을 때의 위상계산 오차이다. 당연한 결과로 이때 배경 빛의 세기의 변화율  $\Delta I_g / I_g$ 에 비례해서 위상계산오차도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 7에서는 앞의 그림과 같은 조건에서 변조 진폭 세기  $I_m$ 를 1부터 50까지 증가시켰다. 즉 가시도를 0.02에서  $1(I_m = I_g)$ 이 될 때까지 증가시키고 이에 대한 위상계산 오차를 살펴본 것이다.

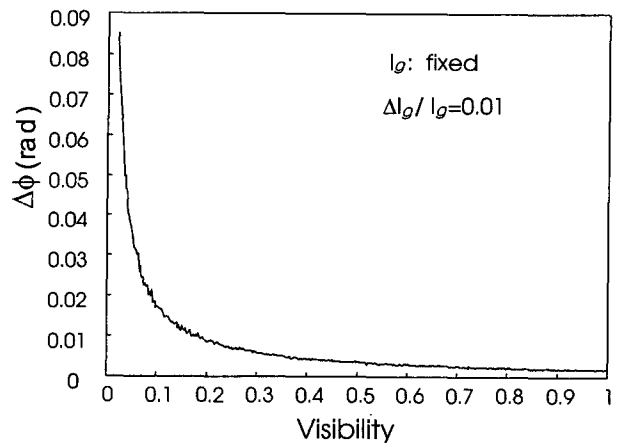


그림 7. 간섭무늬 패턴의 변조 세기 변화에 따른 위상계산 오차.

기대하는 바와 같이 오차가 가시도에 반비례함을 볼 수 있다. 주변 환경에 의한 변화로 생기는 위상계산오차는 측정 중에 얻은 4개의 간섭무늬 패턴으로부터 물체를 측정하는 동안에 확인이 가능하기 때문에 계산 결과의 수용여부를 결정할 수 있는 기능을 제공하게 될 수 있을 것이다.

### 3.4. 위상이동 오차에 의한 효과

일반적으로 간섭계에서 위상을 이동하기 위해서 압전소자(PZT)나 마이크로미터를 많이 사용한다. 3차원 형상을 측정하기 위해서 간섭무늬 패턴을 만들 때 간섭계를 이용하는 경우에는 위상이동 간섭계에서와 마찬가지로 간섭계 한 쪽 팔의 거울을 이동할 때 위상이동에 오차가 생길 수 있다.<sup>[6]</sup> 이때에는 공기흐름에 의한 위상의 요동이 더해진다는 점을 고려해야 한다. 그래서 간섭계를 이용한 시스템으로 온도 변화가 있는 조건이나 고정밀 측정에는 어려움이 있다.

근래에는 간섭계 대신 투명한 두꺼운 유리 등에 크롬같은 것을 코팅해서 패턴들을 만들어 놓고 모터 등을 이용해서 이 패턴들을 움직이도록 한다. 이때에는 투영을 위한 광원으로 사용되는 할로겐 램프에 의한 열팽창 효과 등이 위상이동 오차의 한 요인이 될 수 있다.

그림 8은 위상이동 오차를 최대  $\pm\pi/10$ 로 했을 때의 위상계산오차이다. 위상이동 오차에 대해 위상계산오차가 선형적으로 비례해서 증가하는 것을 볼 수 있다. 예를 들어, 유리 위에 1 mm 정도 폭에 50개의 간섭무늬를 새겨 놓은 경우, 한 주기가 0.02 mm이므로 슬라이드 패턴 이동 오차 1  $\mu\text{m}$ 는 위상이동 오차  $\pi/10$ 에 해당하고 이 때 위상계산오차는 0.1정도이다.

### 3.5. 간섭무늬 패턴의 왜곡에 의한 오차

위상을 계산할 때에는 투영되는 패턴이 sine 형태라는 가정에서 계산되므로 실제 기록되는 패턴이 이로부터 벗어나면 오차가 발생한다. 기록되는 패턴이 sine 형태로부터 벗어나는 원인은 여러 가지이다. 우선 sine 패턴을 만들 때 생길 수 있다. 또한 투영된 패턴을 받아들이는 카메라의 비선형성에 의해서 sine 형태가 왜곡될 수 있다.

여기에서는 이러한 경우를 가정해서 sine 형태에서 벗어나는 정도에 따른 위상계산오차를 살펴보았다. 그림 9에서 실선은

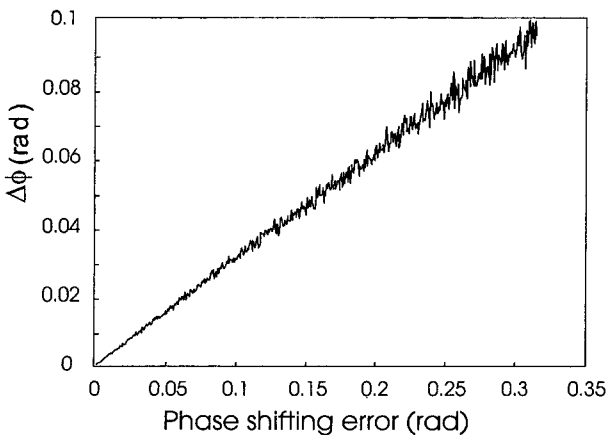


그림 8. 위상 이동 오차에 의한 위상계산 오차.

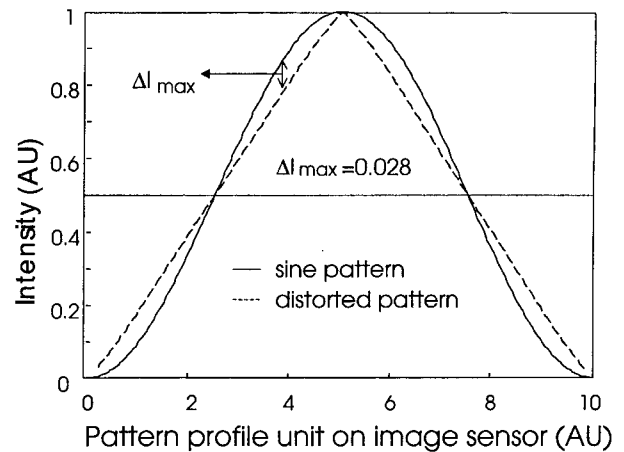


그림 9. sine 형태 패턴의 왜곡, 실선은 sine 형태, 쇠선은 왜곡된 형태.

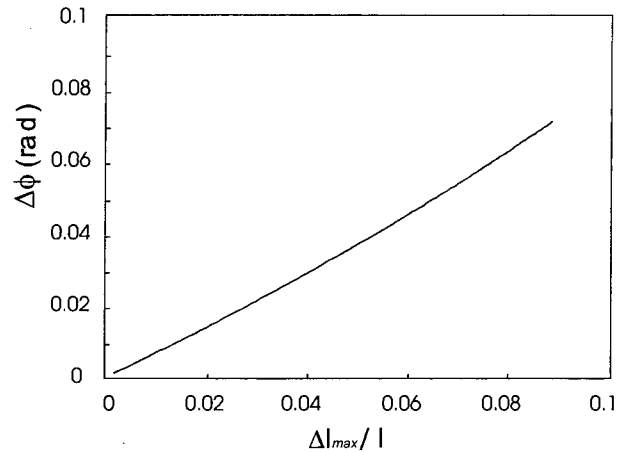


그림 10. sine 형태 패턴의 왜곡에 따른 위상계산 오차.

sine 형태의 패턴을 나타낸다. 그림 10에서 보는 것과 같이 sine 형태에서 벗어나는 정도에 비례해서 위상계산오차도 거의 비례적으로 증가함을 볼 수 있다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 4개의 위상이동된 sine 형태 간섭무늬 패턴을 물체 위에 투영하여 이들 이미지로부터 3차원 형상을 측정하는 시스템에서 발생할 수 있는 시스템 오차에 대해서 살펴보았다. 위상이동 방법에서 물체의 3차원 정보는 위상이동된 패턴이 투영된 이미지들로부터 계산되는 위상값에 담기게 되므로 위상이동법을 이용한 시스템에서 위상계산 오차가 중요한 의미를 갖는다. 위상계산 오차의 요인들 중에서 물체 표면의 산란 특성 또는 검출기의 분해능에 따라 나타나는 양자화 크기 변화, 투영되는 간섭무늬 패턴이 초점을 벗어나서 defocus되어 나타나는 효과, 간섭무늬의 위상이동 오차, 측정 중 주변 또는 측정기내의 변화, 그리고 간섭무늬 패턴이 sine 형태와 달라서 생기는 위상계산오차들에 대해 살펴보았다.

본 연구는 위상이동 간섭무늬 패턴 투영을 이용한 3차원 형

상측정에서 대표적인 위상계산오차에 대해서 살펴봄으로서 적절한 시스템의 설계나 측정된 데이터의 신뢰도에 대한 해석을 위한 중요한 기능자 역할을 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 위상계산 알고리즘의 적합성, 렌즈의 수차등에 대해서는 다루지 못하였으며, 사진계측과의 조합을 고려한 오차해석이 이루어진다면 더욱 바람직할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 BK21 핵심사업의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 10-22, 2000.
- [2] Y. Y. Hung, L. Lin, H. M. Shang, and B. G. Park, "Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 143-149, 2000.
- [3] S. Kakunai, K. Iwata, M. Hasegawa, and T. Sakamoto, "Profile measurement by projecting phase-shifted interference fringes," in *Fringe Pattern Analysis*, G. T. Reid, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 1163, pp. 128-137, 1989.
- [4] W. Nadeborn, P. Andra, and W. Osten, "A robust procedure for absolute phase measurement," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 24, pp. 245-260, 1996.
- [5] C. Reich, R. Ritter, and J. Thesing, "3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 224-231, 2000.
- [6] Y.-Y. Cheng and J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 18, pp. 3049-3052, 1985.
- [7] J. Schwider, "Phase shifting interferometry: reference phase error reduction," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 18, pp. 3889-3892, 1989.
- [8] J. van Wingerden, H. J. Frankena, and C. Smorenburg, "Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 19, pp. 2718-2729, 1991.
- [9] C. Rathjen, "Statistical properties of phase-shift algorithms," *Appl. Opt.*, vol. 12, no. 9, pp. 1997-2007, 1995.
- [10] C. H. Buckberry, D. P. Towers, B. C. Stockley, B. Taven-der, M. P. Jones, J. D. C. Jones, and J. D. R. Valera, "Whole-field optical diagnostics for structural analysis in the automotive industry," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 25, pp. 433-453, 1996.
- [11] C. R. Coggrave and J. M. Huntley, "Optimization of a shape measurement system based on spatial light modulators," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 91-98, 2000.
- [12] J. Schwider, O. Falkenstorfer, H. Schreiber, A. Zoller, and N. Streibl, "New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry," *Opt. Eng.*, vol. 32, no. 8, pp. 1883-1885, 1993.

## Phase calculation error analysis of 3D shape measurement system using phase-shifted fringe projection method

Hyun-Mi Ryu, Seok-Seong Kim, Suc-Kyoung Hong<sup>†</sup>, and Kyu-Hwang Yeon

Dept. of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 360-783, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: sk-hong@hanmail.net

(Received February 25, 2002 ; revised manuscript received April 1, 2002)

We have analyzed the phase-calculation-error of a three-dimensional shape measurement system using the projection of phase shifted fringe patterns. In this study, we have dealt various errors; an error caused by the variation of quantization levels, an error caused by the defocus of fringe pattern projected images, an error caused by phase-shifting errors, an error caused by the intensity variation of the background and modulation amplitude of fringe pattern projected images during the projection of multiple patterns, an error caused by the distortion of sinusoidal shape of a fringe pattern. The results will contribute to the design of a three-dimensional shape measurement system and give an important meaning to the calculation and the analysis of the accuracy of a system.

Classification code : SM.030.