

---

# 위상 보정을 통한 Fringe Pattern Profilometry 3D 측정의 정확성 개선

김호중\* · 조태훈\*

\*한국기술교육대학교

## Improvement of the Accuracy of Fringe Pattern Profilometry 3D Measurements through Phase Correction

Ho-Joong Kim\* · Tai-Hoon Cho\*

\*Korea University of Technology and Education

E-mail : hjhjhjof@naver.com

### 요 약

기술이 발전하면서 카메라를 통해 3D 측정을 하는 방법은 계속 발전되어 왔다. 3D 측정을 하는데 있어서 신경 써야 할 요소로는 속도, 정확성, 쉬운 구현 등이 있다. 최근 들어서는 여러 주기의 Fringe pattern을 이용한 측정 방법이 나왔고 많이 쓰이고 있는 추세이다. 이 방법은 일반적으로 프로젝터를 통해 사인파를 뿌려서 얻은 영상으로 높이를 측정하는 방법이다. 이때 사인파를 소프트웨어적으로 생성하여 뿌리는데, 생성된 패턴은 완벽한 사인파일지라도 프로젝터로 뿌릴 때는 감마에 의해서 완벽한 사인파가 될 수가 없다. 이것은 높이 측정에 악영향을 주어, 보다 정확한 높이를 측정할 수 없게 한다. 따라서 본 논문에서는 감마 영향을 받지 않기 위해 사인파의 위상에 대한 보정 방법을 제안한다. 이 방법을 통하여 보다 정확한 높이 측정을 할 수 있을 것이다.

### ABSTRACT

As technologies evolve, 3D measurement techniques using cameras have been developed continuously. In 3D measurement, high accuracy, fast speed, and easy implementation are very important factors. Recently, 3D measurement using multi-frequency fringes has been widely used. This method is generally a method of measuring the height of a image obtained by projecting a sine wave through the projector. The sine wave is produced by software. However, this sine wave is not a perfect sine wave by gamma of projector. This is given a bad influence on the height measurement, and can not measure the correct height. In this paper, we propose a method for correcting the phase of the sine wave to avoid being affected gamma. Through this method it will be able to make more accurate height measurement.

### 키워드

3D Measurement, Fringe projection, High accuracy, Fast speed, Phase correction

### I. 서 론

Fringe Projection Profilometry (FPP)는 빠른 처리 속도, 높은 정확성, 여러 물체가 섞여 있어도 처리가 가능한 점 등의 이점이 있어 3D 측정에 많이 쓰이고 있는 추세이다.[1] FPP는 특정한 함수에 의해 만들어진 fringe pattern을 물체에 뿌려

영상을 얻은 후에, 이 영상의 위상 정보를 통해 물체의 높이를 측정하는 방법이다. 보통 fringe pattern으로 사인파(sine wave)를 이용해서 높이를 측정한다. 그렇지만 이런 사인파는 프로젝터를 이용해서 사인파를 뿌릴 때와 카메라를 이용해서 영상을 얻을 때, 감마(gamma)에 의해 왜곡이 되어 정확한 사인파가 되지 못한다. 이것은 보다 정

확한 높이 측정에 장애요소가 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 위상에 대한 예러 록업테이블[2,3]을 이용하는 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본론, 실험 결과, 결론으로 되어 있으며, 본론은 두 가지의 예러 록업테이블에 대한 소개를 하고, 위상 보정에 대하여 설명한다. 또, 실험 결과에서 제안한 방법의 성능을 테스트한 결과에 대해 소개 하고, 결론으로 이루어져 있다.

## II. 본 론

본 논문에서 사용한 위상인  $\phi(x,y)$ 를 구하기 위해서 위상천이 양이  $\pi/2$ 이고, 4-단계 위상천이 방법을 사용하였다. 순차적인 위상천이에 의한 4장의 사인파 그레이팅 밝기 영상은 식 (1)과 같이 표시 될 수 있다.[4]

$$I_n(x,y) = I_b(x,y) + I_m(x,y)\cos[\phi(x,y) - (n-1)\frac{\pi}{2}], \quad n = 1,2,3,4 \quad (1)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right] \quad (2)$$

$n$ 은 4장에 대한 순차 번호이고,  $I_b(x,y)$ 는 배경 밝기,  $I_m(x,y)$ 는 fringe modulation,  $\phi(x,y)$ 는  $(x,y)$ 에서의 위상 값을 뜻한다. 식 (1)을 풀면  $(x,y)$ 에서의 위상 값은 식 (2)와 같이 계산 된다.

예러 록업테이블이란, 영상을 통해 얻은 위상과 이상적인 위상 사이의 예러를 록업테이블로 만든 것을 의미한다. 이상적인 위상은 두 가지가 있는데, 위상을 단순 선형이라 가정한 것과 입력 위상에 대해 line fitting을 하여 얻은 것이 있다.

본 논문에서는 위의 두 가지 이상적인 위상에 대하여 모두 위상보정을 실시하였고, 각각의 방법에 대해 소개할 것이다.

### 2.1 선형 가정 예러 록업테이블

선형 가정 예러 록업테이블은 앞서 말한 것처럼 이상적인 위상을 선형이라 가정하여 얻은 위상과 입력 위상과의 예러(차이)를 이용해서 록업테이블을 만든 것이다.

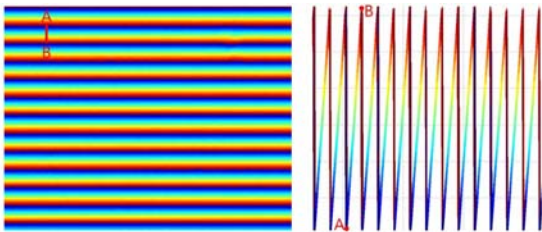


그림 1. 위상 한 주기의 예 (A-B)

<그림 1>은 사인파를 뿌려 얻은 wrapped phase의 예 이고, A와 B사이가 한 주기를 나타낸다. 선형 가정 예러 록업테이블은 다음과 같은 알고리즘에 의하여 만들 수 있다.

우선 한 주기의 시작점(A)과 끝점(B)을 찾아서 한 주기의 픽셀 개수를 구한다. 이 개수를  $n$ 이라 하면, 선형으로 가정한 위상 값은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_k^{ideal} = k * (2\pi/n), \quad (3)$$

$$e = \phi^{input} - \phi_k^{ideal}, \quad (4)$$

$\phi^{input}$ 은 입력 위상,  $\phi^{ideal}$ 는 이상적인 위상을 의미하며,  $k$ 는  $0 \sim n$ 까지를 의미한다. 이렇게 하면 한 주기에 대해 이상적인 선형 위상을 얻게 된다. 이후 식 (4)와 같이 입력 위상과 선형 위상과의 차이  $e$ 를 록업테이블에 저장한다.

위의 작업을 전체 위상에 대하여 반복하면서 모든 예러를 하나의 록업테이블에 누적시킨 뒤, 각각의 bin에 대하여 평균을 구하면 된다.

이렇게 얻은 선형 가정 예러 록업테이블의 예는 <그림 2>와 같다.

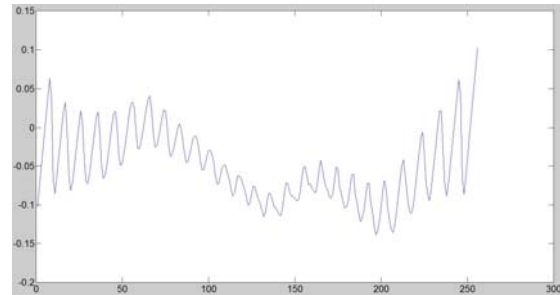


그림 2. 선형 가정 예러 록업테이블의 예

### 2.2 라인 피팅 예러 록업테이블

라인 피팅 예러 록업테이블은 선형 가정 예러 록업테이블을 만드는 방법과 유사하지만, 이상적인 위상을 단순 선형으로 가정하는 것이 아닌, 입력 위상을 이용해 라인 피팅 하여 얻은 것을 이상적인 위상으로 삼아 예러 록업테이블을 만드는 것을 의미한다.

라인 피팅 예러 록업테이블을 만드는 과정은 선형 가정 예러 록업테이블을 만드는 과정과 거의 동일하다. 다른 점이라 하면, 식 (3)을 사용하여  $\phi^{ideal}$ 을 얻는 대신, 한 주기 내의 위상 값들을 least square line fitting을 하여 직선의 방정식을 구한 뒤에, 이를 이용해  $\phi^{ideal}$ 을 계산하면 된다. 이후에는 선형 가정 예러 록업테이블을 만드는 과정과 동일하게 하면 된다. 라인 피팅 예러 록업테이블의 예는 <그림 3>과 같다.

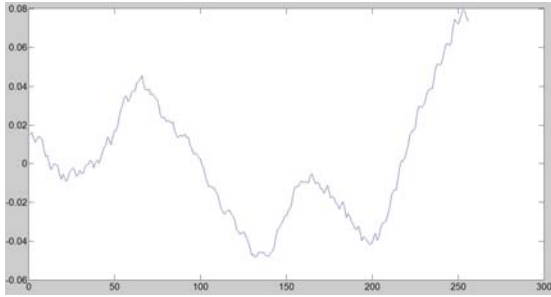


그림 3. 라인 피팅 에러 룩업테이블의 예

### 2.3 위상 보정

2.1과 2.2의 방법으로 에러 룩업테이블을 생성했으면, 이제 이를 이용하여 위상 보정을 하면 된다. 입력 위상이 들어오면 이 위상 값에 대해 알맞은 룩업테이블의 인덱스를 찾아서 해당하는 에러 값을 빼주면 된다. 룩업테이블의 인덱스를 찾는 식은 식 (5)와 같다.

$$i = \frac{n_{bin} * \phi^{input}}{2\pi}, \tag{5}$$

$$\phi^{output} = \phi^{input} - LUT[i], \tag{6}$$

$i$ 는 룩업테이블의 인덱스,  $n_{bin}$ 은 룩업테이블 bin의 개수를 의미한다. 최종적으로 위상 보정의 식은 식 (6)과 같다.  $\phi^{output}$ 은 보정된 위상, LUT는 에러 룩업테이블을 의미한다.

지금까지 두 가지의 에러 룩업테이블과 위상 보정을 하는 방법까지 알아보았고, 이제 각 경우에 대한 실험 결과를 소개하고자 한다.

## III. 실험 결과

실험은 Windows 10(64bit), Microsoft Visual Studio 2010의 환경에서 진행되었다. 캘리브레이션을 위해 쓰인 플레인의 예는 <그림 4>와 같고 영상의 해상도는 1290x867이다.

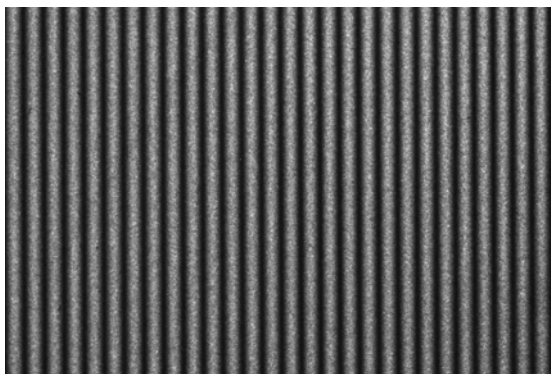


그림 4. 캘리브레이션 플레인의 예

캘리브레이션 플레인의 높이는 0, 300, 600, ~, 2700, 3000 $\mu\text{m}$ 로써 총 11개 높이의 플레인을 사용하였다. 캘리브레이션 방법으로는 Guo의 방법 [5]을 사용해서 캘리브레이션을 하였다. 또 본 논문에서 제안하는 방법의 성능 테스트를 위해서 위상보정을 하지 않은 상태의 캘리브레이션 결과와 두 가지 종류의 에러 룩업테이블을 이용한 캘리브레이션 결과를 비교하였다. 사인파의 주기는 8과 72, 두 개를 사용하여 영상을 얻었는데, 이는 측정하고자 하는 물체에 작은 주기의 사인파를 뿌렸을 때 패턴이 굴절되는 정도가  $2\pi$ 를 넘어 간다면 논문[6,7]에 따라서 큰 주기의 영상을 이용하여 작은 주기의 영상을 unwrap해주어야 하기 때문이다.

각 표의 true는 캘리브레이션 플레인의 실제 높이를 의미하고 avg는 측정된 높이의 평균을 의미한다. 또, sigma는 표준편차를, rmse는 root mean squared error를 나타낸다. (a)는  $|true - mean| + 3\sigma$ 를 의미하고 (b)는 높이의 max - min을 의미한다. 마지막으로 각 수치의 단위는  $\mu\text{m}$ 이다.

<표 1>은 위상 보정을 하지 않은 캘리브레이션 결과를, <표 2>는 선형 가정 에러 룩업테이블을 이용한 캘리브레이션 결과, <표 3>은 라인 피팅 에러 룩업테이블을 이용한 캘리브레이션 결과를 나타낸다.

표 1. 위상 보정을 하지 않은 결과

true	avg	sigma	rmse	(a)	(b)
300	300.1	9.5	9.5	28.7	52.3
600	599.8	11.2	11.2	33.7	52.5
900	899.6	8.8	8.8	26.7	39.6
1200	1199.6	7.6	7.7	23.3	35.0
1500	1499.9	7.2	7.2	21.7	33.5
1800	1799.4	7.0	7.1	21.7	36.3
2100	2099.9	8.5	8.5	25.6	37.6
2400	2400.0	8.7	8.7	26.3	36.8
2700	2700.4	6.9	6.9	21.0	30.0
3000	2999.8	5.1	5.1	15.6	30.2

[단위: $\mu\text{m}$ ]

표 2. 선형 가정 에러 룩업테이블 결과

true	avg	sigma	rmse	(a)	(b)
300	300.3	3.2	3.2	9.9	35.6
600	600.0	3.1	3.1	9.3	32.9
900	899.8	3.1	3.1	9.4	29.5
1200	1199.8	3.2	3.2	9.8	27.3
1500	1500.2	3.5	3.5	10.7	27.7
1800	1799.4	3.4	3.4	10.6	28.1
2100	2100.2	3.7	3.7	11.4	30.7
2400	2400.1	3.7	3.7	11.1	27.1
2700	2700.3	3.1	3.2	9.7	25.5
3000	2999.7	2.9	2.9	8.9	24.0

[단위: $\mu\text{m}$ ]

표 3. 라인 피팅 에러 룩업테이블 결과

true	avg	sigma	rmse	(a)	(b)
300	300.2	5.3	5.4	16.3	35.3
600	599.9	5.5	5.5	16.7	35.5
900	899.7	4.8	4.8	14.8	32.4
1200	1199.9	4.2	4.2	12.6	29.4
1500	1500.1	4.3	4.3	12.9	28.7
1800	1799.5	4.4	4.4	13.7	30.6
2100	2100.0	5.0	5.0	15.1	32.9
2400	2400.2	5.0	5.0	15.3	33.2
2700	2700.4	4.1	4.1	12.6	26.6
3000	2999.7	3.9	3.9	11.9	26.2

[단위:  $\mu m$ ]

위의 결과를 살펴보면, 위상 보정을 하지 않은 것에 비해서 두 가지의 에러 룩업테이블을 이용한 방법이 에러가 더 적은 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 3D 측정을 하면 보다 더 높은 정확성을 갖는다고 볼 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 FPP를 통해 3D 측정을 할 때, 감마에 의한 단점을 소개하였고, 해결 방안으로 선형 가정 에러 룩업테이블과 라인 피팅 에러 룩업테이블을 이용하는 방법을 제안하였으며 실험 결과를 비교하였다. 실험 결과를 통해서 제안한 방법의 우수성을 보였으며, 이 방법을 통하여 3D 측정을 하면 더욱 정확도가 높은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

[1] Zhaoyang Wang, Dung A. Nguyen and John C. Barnes, "Some practical considerations in fringe projection profilometry", Optics and Lasers in Engineering, vol. 48, no. 2, pp. 218-225, 2010.

[2] Yanjun Fu, Zhigang Wang, Guangyu Jiang, Jie Yang, "A novel three-dimensional shape measurement method based on a look-up table", Optik-International Journal for Light and Electron Optics, vol. 125, Issue. 6, pp. 1804-1808, 2014.

[3] Chen Xiong, Jun Yao, Jubing Chen, Hong Miao, "A convenient look-up-table based method for the compensation of non-linear error in digital fringe projection", Theoretical and Applied Mechanics Letters, vol. 6, Issue. 1, pp.

49-53, 2016.

[4] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, "Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object," Appl. Opt. 23, no. 18, pp. 3105-3108, 1984.

[5] Hongwei Guo, Haitao He, Yingjie Yu, Mingyi Chen, "Least-squares calibration method for fringe projection profilometry", Optical Engineering, vol. 44, Issue. 3, 2005.

[6] Hong Zhao, Wenyi Chen, Yushan Tan, "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes," Applied Optics, vol. 33, no. 20, pp. 4497-4500, 1994.

[7] Jieli Li, Laurence G Hassebrook, Chun Guan, "Optimized two frequency phase measuring profilometry light sensor temporal noise sensitivity," Journal of the Optical Society of America A, vol. 20, no. 1, pp.106-115, 2003.