

## 고광택 물체 3D 형상 측정시 발생하는 잡음개선에 관한 연구

문태수, 김기승, 박윤창\*  
선문대학교 정보통신공학과

### A Study on Noise Reduction in 3D Measurement for High-Reflective Object

Tae-Su Moon, Gi-Seung Kim, Yoon-Chang Park\*

Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

**요 약** PMP 삼차원 형상 측정법은 측정할 물체에 격자 패턴을 일정한 주기로 위상 이송을 하면서 영사하고, 동시에 카메라로 이미지를 획득하여 3D 형상을 측정하는 방법이다. 이때 획득된 이미지들의 픽셀 광량 변화로부터 위상값을 구할 수 있다. 하지만 반사율이 높은 고광택 물체에 격자 패턴을 영사하면 반사광이 한쪽 방향으로 크게 포화된 준정반사의 경향이 자주 나타나고, 이에 해당되는 부분은 카메라의 이미지 센서에서 매우 밝거나 어두운 값으로 얻어지게 된다. 이때의 픽셀 광량 변화는 매우 적어 비정현파의 형태가 되고, 위상값에 많은 잡음이 포함되게 된다. 본 논문에서는 PMP 형상 측정법으로 고광택 물체 측정 시, 준정반사에 의해 발생하는 잡음을 두 종류로 분류하였고, 카메라 노출시간을 변경하여 두 종류의 잡음을 줄이는 연구를 진행하였다. 제안된 방법을 적용한 결과, 이미지 전체 픽셀에서의 두 종류의 잡음이 1.827 %에서 0.201 %로 감소하는 것을 확인하였다.

**Abstract** The PMP 3D shape measurement technique projects a grating pattern onto an object to be measured. The pattern undergoes phase shifting at regular intervals, and a camera captures images to determine the 3D shape. The phase values can be determined from the acquired image's pixel intensity variations. However, when projecting the grating pattern onto highly reflective glossy objects, specular reflection often appears saturated in one direction. The regions affected by this have extremely bright or dark values on the camera's image sensor. The pixel intensity variation becomes minimal and take the form of a non-sinusoidal wave, leading to significant noise in the phase values. This study classified the noise generated by specular reflection during PMP shape measurement of glossy objects into two types. The two types of noise were reduced by adjusting the camera's exposure time. Upon implementing the proposed method, it was observed that the noise across all pixels of the image was reduced from 1.827% to 0.201%.

**Keywords** : Phase Measuring Profilometry, Exposure Time, Light-Shortage Noise, Saturation Noise, Light Intensity, High Reflection

---

\*Corresponding Author : Yoon-Chang Park(Sunmoon University)

email: y0827cc@hanmail.net

Received August 1, 2023

Accepted September 1, 2023

Revised August 31, 2023

Published September 30, 2023

### 1. 서론

광학을 이용한 비접촉 방식의 삼차원 형상 측정 기술은 대량 생산품의 형상 검사, 제품의 역설계(Reverse engineering), 컴퓨터 그래픽스(Computer graphics) 등의 다양한 산업 분야에서 활용되는 기술이다. 그 중, 자주 사용되는 위상측정 형상 측정법(Phase Measuring Profilometry, 이하 PMP)은 광학식 삼차원 형상 측정 기술 중 하나로 다양한 연구들이 진행되고 있다[1-5]. PMP 삼차원 측정법은 격자 패턴의 한 주기를 최소 3버킷(Bucket) 이상으로 일정하게 나누어진 격자 패턴을 위상 이송하며 물체에 영사하는데, 이때 반사된 빛을 카메라의 이미지 센서로 받아들여 이미지들을 획득한다. 획득된 이미지들에서 한 점에서의 픽셀 광량 변화가 정현파 형태와 가까울수록 측정 잡음(Noise)이 적은 위상값이 구해진다[6,7].

하지만, 반짝이는 동전과 같은 고광택 물체에서는 격자 패턴을 영사하더라도 반사된 빛이 한쪽 방향으로 크게 포화 된 준정반사(Quasi specular reflector)[8]가 빈번하게 일어나게 된다. 이에 해당되는 픽셀의 광량 변화는 매우 적어지게 되며, 비정현파의 형태가 된다. 이러한 원인으로 인해 측정된 위상값에는 많은 측정 잡음이 포함되게 된다.

위와 같이 준정반사에 의해 생길 수 있는 측정 잡음은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 준정반사광이 카메라 이미지 센서에 도달해 이미지 상에서 매우 밝은 영역으로 나타나고, 위상이송 중에서 얻어진 일부 이미지에서 밝기값이 포화되어 측정 잡음이 발생된다. 반대로 준정반사광이 카메라 이미지 센서에 도달되지 않으면 이미지 상에서 매우 어두운 영역으로 나타나고, 위상이송에 따른 밝기변화가 너무 적어서 측정 잡음이 발생된다.

이러한 측정 잡음을 개선하고자, 본 논문에서는 PMP 삼차원 측정법으로 고광택 물체 측정 시 준정반사에 의해 발생될 수 있는 잡음을 두 가지로 분류하였다. 준정반사에 의해 생긴 매우 밝은 영역의 측정 잡음을 광량 포화 잡음(Saturation noise, 이하 '포화 잡음')으로 하고, 매우 어두운 영역의 측정 잡음을 광량 부족 잡음(Light-shortage noise, 이하 '부족 잡음')으로 분류한다.

또한 잡음에 해당되는 픽셀들을 모아 잡음 마스크(noise mask)를 만들어 잡음 영역을 구별하고, 앞에서 측정된 포화잡음과 부족잡음은 각각 카메라의 노출시간을 줄이고 늘려 광량의 변화를 관찰한다.

관찰된 광량변화에 따라 두 종류의 잡음 데이터는 서

로 보강하여 이미지 전체 픽셀에서의 두 잡음을 감소시킨다. 이러한 방법을 사용하여 잡음을 감소시키도록 시도하였고, 실험을 통해 효과를 확인하였다.

### 2. PMP 삼차원 측정법

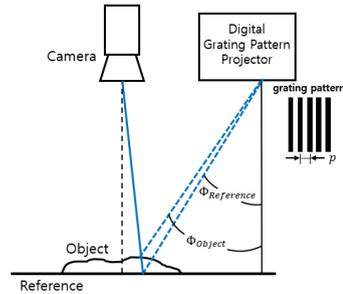


Fig. 1. Optical system of PMP 3D measurement

PMP 삼차원 측정법은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일정한 주기의 격자 패턴을 측정 물체(Object)에 영사하여 반사된 빛을 카메라로 획득한 이미지를 이용하여 측정 물체의 위상값( $\Phi_{object}$ )을 얻고, 동일한 방법으로 기준평면(Reference)에 대하여 기준면 위상값( $\Phi_{reference}$ )과의 위상차를 이용하여 측정 대상의 3차원 형상을 얻는 기술이다.

PMP 삼차원 측정법에서는 격자 패턴 1주기(p)를 N 등분하여 N버킷 위상 이송하게 된다. 이때 1버킷씩 이송시킬 이송량(변위량)  $\Delta_i$ 은 다음과 같이 결정된다[2].

$$\Delta_i = p(i-1)/N \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{1}$$

격자 패턴을 Eq. (1)에서 구한 이송량만큼 1버킷씩 위상 이송하고 카메라로 이미지를 획득한다.

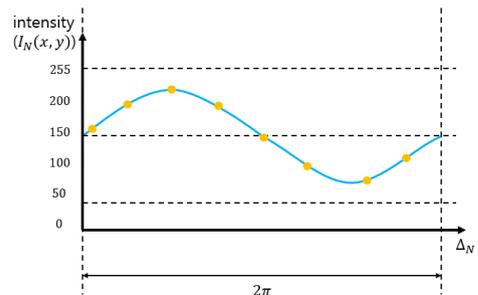


Fig. 2. Intensity variation at the single pixel

Fig. 2는 격자 패턴을 8버킷 위상 이송하면서 획득한 이미지들로부터 하나의 픽셀 광량 변화를 그래프로 나타낸 것이고 정현파 형태가 된다.

N장의 이미지들에서 각 픽셀 광량 값인  $I_N(x, y)$  으로부터 위상  $\Phi(x, y)$  값은 다음과 같이 구해진다[1,2].

$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i \cdot \sin(2\pi \cdot i/N)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i \cdot \cos(2\pi \cdot i/N)} \quad (2)$$

Eq. (2)에 따라 측정 물체 위상값( $\Phi_{object}$ )과 기준면 위상값( $\Phi_{reference}$ )을 구하고, 두 위상의 차이를 계산하면 모아레(Moire) 위상( $\Phi_{moire}$ )을 구할 수 있다.

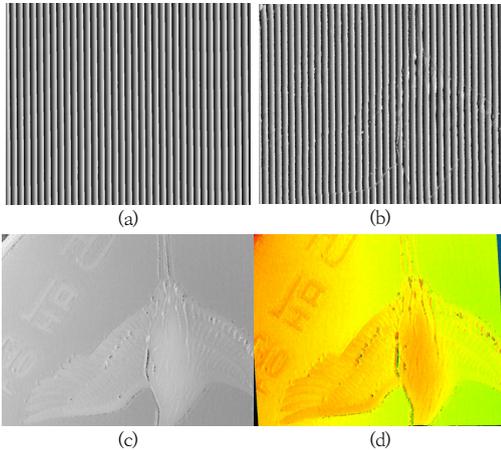


Fig. 3. Phase & Height Images of Coin  
 (a) Reference phase value( $\Phi_{reference}$ )  
 (b) Object(coin) phase value( $\Phi_{object}$ )  
 (c) Moire phase value( $\Phi_{moire}$ )  
 (d) 3D shape gradient

Fig. 3은 반사도가 높은 500원 동전을 PMP 삼차원 측정법으로 측정해 획득된 위상과 측정 결과 이미지들이다. Fig. 3(a)은 기준면 위상으로,  $\tan^{-1}$  계산으로 인하여  $-\pi \sim +\pi$  범위를 갖지만, 이미지로 표현하기 위해 0~255 으로 정규화(normalization)하여 이미지화한 것이다. Fig. 3(b)은 측정 물체 위상의 이미지, Fig. 3(c)은 모아레 위상의 이미지이다. Fig. 3(d)은 실측된 500원 동전을 높이에 따라 색상으로 구별한 삼차원 형상이다.

### 3. 포화 잡음과 부족 잡음의 개선 원리

#### 3.1 포화 잡음 마스크와 부족 잡음 마스크 생성과 원리

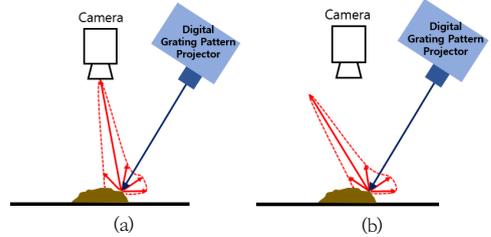


Fig. 4. Path of reflected light by quasi-specular reflection  
 (a) When quasi-reflective light enters the camera  
 (b) When quasi-reflective light does not enter the camera

Fig. 4(a)는 고반사율 물체에 격자 패턴을 영사했을 때 발생할 수 있는 준정반사광이 카메라 이미지 센서로 도달되었을 경우이다. 이때, 이미지상에서의 해당 영역들은 매우 밝고, 픽셀 광량의 일부가 지나치게 밝게 계속되는 포화 잡음이 발생한다. Fig. 4(b)는 준정반사광이 카메라 이미지 센서로 도달되지 않았을 경우이며, 이미지상에서의 해당 영역들은 매우 어둡고 픽셀 광량이 어둡게 계속되는 부족 잡음이 발생한다. 그리고 이러한 잡음들에 해당되는 영역은 마스크를 각각 만들어 잡음을 구별하였다.

포화 잡음의 마스크는 아래의 조건식을 사용하여 분류한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } (I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y) < \text{Threshold}) \quad (3) \\ & \text{if } (I_{\max}(x, y) > 255 - \text{Threshold}) \\ & \quad \text{Saturation noise mask}(x, y) = 0 \end{aligned}$$

Where,  $(x, y)$  denotes pixel coordinates

부족 잡음의 마스크는 아래의 조건식을 사용하여 분류한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } (I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y) < \text{Threshold}) \quad (4) \\ & \text{if } (I_{\min}(x, y) < \text{Threshold}) \\ & \quad \text{Light shortage noise mask}(x, y) = 0 \end{aligned}$$

Where,  $(x, y)$  denotes pixel coordinates

Eq. (3)과 Eq. (4)에서  $I_{\max}$ 는 버킷수 만큼 획득한 다수(N)의 이미지 중에서 한 픽셀의 광량이 가장 큰 값이며,  $I_{\min}$ 는 가장 작은 값이다.

임계값(threshold)은 5 이하부터 측정 잡음이 많이 포함되어 본 논문에서는 임계값을 5로 지정하였다. 이에 따라 Eq. (3)과 Eq. (4)에 의해 분류된 측정 잡음의 픽셀 위치에는 0 값을 넣어 잡음의 위치를 구별하기 위한 마스크를 생성하였다.

본 논문에서는 카메라 노출시간을 각각 48 ms, 72 ms로 조절하며, 위와 같은 두 종류의 잡음을 개선하였다. 하지만 이러한 방법으로도 개선되지 않는 잡음 들은 다른 잡음에서의 정상적인 값을 가져와 보완하여 개선하였다.

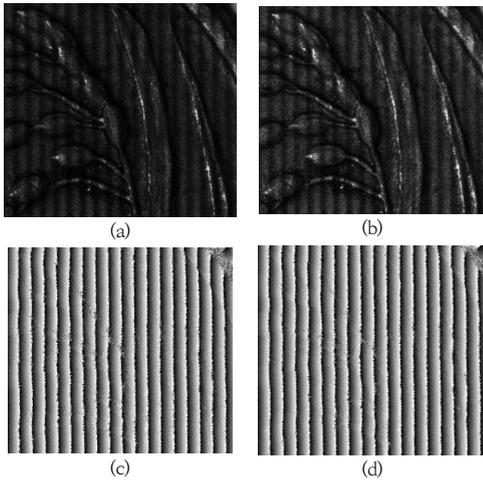


Fig. 5. Images obtained by measuring object(coin)

- (a) Fringe pattern - exposure time 48 ms
- (b) Fringe pattern - exposure time 72 ms
- (c) Phase value - exposure time 48 ms
- (d) Phase value - exposure time 72 ms

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 카메라 노출시간을 각각 48 ms, 72 ms로 하고 50원 동전에 격자 패턴을 영사하여 획득한 이미지이다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 5버킷 위상 이송하면서 획득한 이미지들을 Eq. (2)를 통해 구한 위상 값이고, 이미지로 표현하기 위해 0~255로 정규화하고 이미지화한 것이다.

카메라 노출시간이 각각 48 ms, 72 ms인 Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)은 50원 동전에 격자 패턴을 5버킷 위상 이송을 하여 획득한 이미지들을 Eq. (3)에 의해 만들어진 부족 잡음 마스크이다. 이때 각각의 부족 잡음은 이미지 전체 면적의 1.689 %, 0.063 %를 차지하고 있다. 카메라 노출시간이 각각 48 ms, 72 ms인 Fig. 6(c)과 Fig. 6(d)은 Eq. (4)에 의해 만들어진 포화잡음의 마스크이다. 이때 각각의 포화잡음은 이미지 전체 면적의 0.138 %, 0.423 %의 잡음을 차지하고 있다.

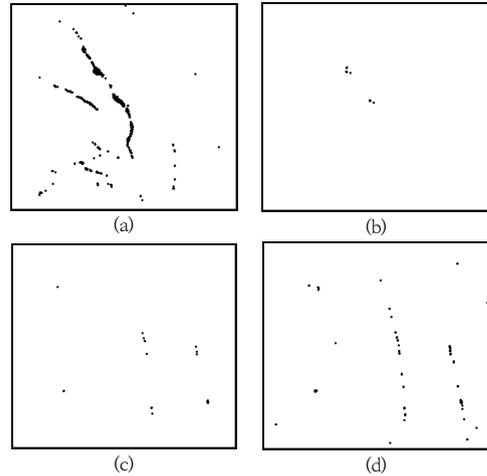


Fig. 6. Noise masks of Coin

- (a) Light-shortage - exposure time 48 ms
- (b) Light-shortage - exposure time 72 ms
- (c) Saturation - exposure time 48 ms
- (d) Saturation - exposure time 72 ms

### 3.2 잡음 보완 방법

두 종류의 측정값 중 부족 잡음이 가장 적은 것은 노출시간 72 ms의 측정값이었으며, 포화 잡음이 가장 적은 것은 노출시간 48 ms의 측정값이었다. 각 두 개의 측정값은 각자 가지고 있는 잡음 부분들을 제외한 나머지 부분들은 동일한 위상값을 가진다.

이러한 특징을 이용하여 두 개의 측정값 중 하나를 기준으로 하고, 기준 측정값의 잡음 부분은 다른 측정값의 정상적인 위상값을 가져와 보완하여 전체 잡음을 개선한다.

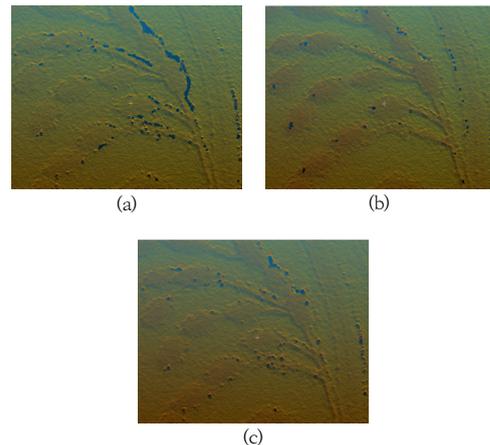


Fig. 7. 3D shape images of object(coin)

- (a) Exposure time 48 ms
- (b) Exposure time 72 ms
- (c) Noise reduced value

Fig. 7(a)과 Fig. 7(b)은 카메라 노출시간이 각각 48 ms, 72 ms일 때 발생하는 포화 잡음과 부족 잡음의 노이즈 값을 제외한 삼차원 형상 이미지이다.

Fig. 7(c)은 Fig. 7(a)의 데이터를 기준으로, 기준 데이터의 부족 잡음 부분은 Fig. 7(b)의 정상적인 위상 데이터를 가져와 보완한 삼차원 형상 이미지이다. 결과적으로 기준 데이터의 전체 잡음은 1.827 %에서 0.201 %로 감소시켰다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고광택의 물체를 PMP 삼차원 측정법으로 측정할 때, 준정반사에 의해 발생하는 잡음을 부족 잡음과 포화 잡음으로 분류하였으며, 카메라 노출시간을 각기 다르게 하여 계속한 측정값들로부터 잡음을 보완하여 개선하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 이용하여 이미지 전체 픽셀에서의 잡음을 1.827 %에서 0.201 %로 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해서 추가적인 격자패턴 데이터 없이 카메라 노출시간만을 이용해 준정반사에 의한 잡음을 효과적으로 감소시키는 방법임을 확인할 수 있었다.

하지만 노출시간을 충분히(본 논문에서는 48 ms) 줄여 측정해도 포화 잡음이 발생하는 현상이 일어나는데, 해당 잡음은 정반사에 의한 잡음으로 노출시간 변경만으로는 한계가 있어 개선의 연구가 필요하다.

향후 정반사에 의한 잡음은 반사광이 카메라 이미지 센서에 도달되어지는 것에 따라, 카메라 노출시간과 광량변화를 관찰하여 잡음을 감소시키는 방법에 대해서 연구를 진행할 예정이다.

#### References

[1] G. S. Kim, Y. C. Park. "A Study on the Compensation of Thermal Errors for Phase Measuring Profilometry.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.6, pp.598-603, Jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.598>

[2] Y. C. Park, S. J. Ahn, M. H. Kang, Y. K. Won, S. J. Ahn, "Phase error compensation for three-dimensional shape measurement based on a phase-shifting method," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.10, No. 11, pp.3023-3030, Nov. 2009. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3023>

[3] H. J. Kim, J. S. Kim, and H. Joo, "3-Dimensional Shape Measurement System for BGA Balls Using PMP Method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.22, No.1, pp.59-65, Jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.15.0128>

[4] J. H. Wang, Y. Zhou, Y. Yang, "A novel and fast three-dimensional measurement technology for the objects surface with non-uniform reflection", *Results in Physics*, Vol.16, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102878>

[5] J. H. Wang, "A novel 3D measurement technique for rigid moving objects with a determined movement trajectory and constant movement speed", *AIP Advances*, Vol.9, No.5, May. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5098368>

[6] Y. C. Park, "The Principle and Applications of Moire Phenomenon", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.17, No.6, pp.25-31, Jun. 2000.

[7] Y. C. Park, H. Y. Kim, "The measurement for micro shape by Phase Shift method I", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, pp.335-341, May. 2005.

[8] A. Penttilä, "Quasi-specular reflection from particulate media", *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 131, pp.130-137, Dec. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.03.007>

문 태 수(Tae-Su Moon)

[준회원]



- 2021년 2월 : 선문대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 (석사과정)

<관심분야>

3D 측정, 컴퓨터비전

김 기 승(Gi-Seung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 선문대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 (박사과정)

<관심분야>

3D 측정, 컴퓨터비전

---

박 윤 창(Yoon-Chang Park)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 정밀공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

정밀기계, 3D 측정