

# 콘트라스트 수치에 따른 삼차원 형상 측정에서의 화이트 노이즈 변화에 관한 연구

박두빈, 김기승, 박윤창\*  
선문대학교 정보통신공학과

## Study on white noise variation in three-dimensional measurement according to contrast value

Doo-Bin Park, Gi-Seung Kim, Yoon-Chang Park\*

Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

**요약** 생산공정에서 불량 판정을 위해 자주 사용되고 있는 PMP 삼차원 형상 측정기는 측정 시 카메라가 받는 광량이 부족할 경우 격자 패턴의 신호가 약화 되어 삼차원 형상 측정값에 잡음이 증가할 수 있다. 카메라로 들어오는 광량은 노출 시간을 조절하거나 렌즈의 조리개를 여닫는 것으로 조절할 수 있지만, 이때 노출 시간이 길어지면 카메라로 이미지를 획득하는 시간이 길어져 측정 속도가 느려지는 문제가 있고 조리개는 촬영 이미지의 콘트라스트와 연관되어 있어 조절이 쉽지 않다. 그러므로 효율적인 광량 조절을 위해 콘트라스트 수치에 따라 화이트 노이즈가 얼마나 발생하는지 예측할 필요가 있다. 본 논문에서는 1951 USAF resolution test chart를 촬영하여 콘트라스트를 정량화하는 MTF값을 계산하였고, PMP 3D Scanner로 평면을 측정한 후 측정 결과에서 나온 화이트 노이즈 강도를 SNR, RMS 그리고 TV값으로 계산하여 MTF와 화이트 노이즈의 관계식을 구하였다. 이 관계식을 이용하여 3D Scanner의 설계 단계에서 MTF 값을 활용하여 화이트 노이즈를 예측할 수 있게 되었다.

**Abstract** The PMP 3D Scanner, commonly used for defect detection in manufacturing processes, may experience increased noise in measurement values when the camera receives insufficient light, causing signal degradation in grid patterns. While adjusting the camera's light intake is possible by altering exposure time or adjusting the lens aperture, exposure time slows down the measurement speed, and aperture adjustments are challenging due to their association with image contrast. Therefore, it is necessary to predict how much white noise occurs based on contrast values for efficient light control. In this thesis, modulation transfer function (MTF) values quantifying contrast are calculated by capturing images of the 1951 USAF resolution test chart. Subsequently, measurements of planes were conducted using a PMP three-dimensional shape measurement device. The intensity of white noise derived from the measurement results is then computed by using SNR, RMS, and total variation values to establish the relationship with the MTF. Utilizing this relationship, it becomes possible to predict white noise in the design stage of a three-dimensional shape measurement device.

**Keywords** : 3D Measurement, PMP, White Noise, Contrast, MTF, SNR, RMS, Total Variation

---

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

email: y0827cc@hanmail.net

Received March 29, 2024

Accepted June 7, 2024

Revised April 25, 2024

Published June 30, 2024

## 1. 서론

삼차원 형상 측정은 형상의 검증이 필요한 여러 분야에서 사용되고 있으며, 반도체, 배터리 등을 생산하는 공정에서도 불량 판정을 위해 많이 사용되고 있다[1,2]. 기술의 발달로 생산설비에서 제품을 양산하는 속도가 점점 빨라지고 있으며, 생산되는 물품들은 더욱 소형화되어 찾아내야 하는 결함 또한 작아지고 있다. 이에 따라 삼차원 형상 측정기(3D Scanner)도 더 빠르고 정밀한 측정이 요구되어 다양한 측정법이 시도되고 있다[3-5]. 그 중, 비교적 빠르면서도 정밀한 측정이 가능하여 자주 사용되고 있는 삼차원 형상 측정법 중 하나가 PMP(Phase Measuring Profilometry) 삼차원 형상 측정법이다[6,7].

PMP 삼차원 형상 측정법은 정현파 형태의 격자 패턴을 물체에 영사하고 카메라로 촬영하는 삼차원 형상 측정법이다. 이때 획득한 격자 이미지가 광량의 부족으로 인해 격자 패턴의 신호가 약화 되거나, 카메라의 초점이 맞지 않아 노이즈가 발생할 경우 삼차원 형상 측정의 정밀도가 떨어진다[8]. 그러므로 카메라의 초점과 광량은 삼차원 형상 측정에서 중요한 요소다.

카메라의 광량은 카메라의 노출 시간을 조절하거나 조리개를 조정하여 원하는 값으로 설정할 수 있다. 카메라의 노출 시간을 길게 하면 촬영 시간이 늘어나기 때문에 이미지를 획득하는 데 더 많은 시간이 소모되어 3D Scanner의 측정 속도가 느려진다. 이를 극복하기 위해 조리개를 많이 열면 카메라의 심도가 낮아지는 특성이 있어[9] 측정된 이미지의 콘트라스트(Contrast)가 감소하여 격자 패턴이 정현파 형태로 촬영되지 않는다.

이러한 특성을 고려하여 3D Scanner가 목표로 하는 측정 속도와 정밀도를 파악하고 효율적으로 노출 시간과 조리개를 조절해야 한다. 이때 콘트라스트 수치와 화이트 노이즈(White noise)의 상관관계를 파악하면 3D Scanner를 제작하기 전 설계 단계에서 콘트라스트값으로 화이트 노이즈 강도를 예측할 수 있으며, 목표하는 노이즈의 상한값을 벗어나지 않는 최대치까지 조리개를 조절하여 광량을 늘릴 수 있다.

본 논문에서는 PMP 알고리즘을 사용하는 비접촉식 3D Scanner를 활용하여 화이트 노이즈와 콘트라스트의 상관관계를 찾기 위한 실험을 진행하였다. 카메라가 초점이 가장 잘 맞는 위치에서 멀어질수록 콘트라스트가 감소하는 특성을 활용하여 3D Scanner를 이동시키며 삼차원 형상 데이터를 확보하고, 이를 SNR(Signal to Noise Ratio)[10], RMS(Root Mean Square) 그리고

TV(Total variation)[11] 방식을 사용하여 화이트 노이즈를 계산한 뒤 콘트라스트를 정량화하는 수치인 MTF(Modulation Transfer Function)[12,13]값과의 상관관계를 구하여 설계 단계에서 화이트 노이즈를 예측할 수 있는 지표를 만들었다.

## 2. 본론

### 2.1 콘트라스트와 노이즈 평가 방법

콘트라스트를 정량화하며, 광학 렌즈의 성능을 수치로 나타내는 지표로 사용되고 있는 MTF는 상 측과 물체 측의 콘트라스트 비율로 Eq. (1)의 식으로 표현된다. 콘트라스트는 밝고 어두운 정도의 차이를 나타내는 지표로 Eq. (2)의 식으로 표현된다.

$$MTF = \frac{C_{image}}{C_{object}} \quad (1)$$

Where,  $c$  denotes contrast

$$Contrast = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2)$$

Where,  $I$  denotes brightness values of image pixels

삼차원 형상 측정에서 발생하는 화이트 노이즈를 평가하는 방법으로 SNR, RMS, 그리고 TV방식이 있다. SNR은 노이즈 대비 신호의 세기를 나타내는 지표이며 Eq. (3)의 식으로 표현된다.

$$SNR = 10 * \log_{10} \frac{\sigma_{image}}{\sigma_{noise}} \quad (3)$$

Where,  $\sigma$  denotes signal power

RMS는 변화하는 값의 크기에 대한 통계적인 척도이며 Eq. (4)의 식으로 표현된다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{N}} \quad (4)$$

Where,  $x$  denotes value of the function,  $N$  denotes size of function

TV는 측정 결과값의 변동을 측정하는 방법으로, 변동 폭을 합하여 계산하며 Eq. (5)의 식으로 표현된다.

$$TV = \sum_{n=1}^N |H_n - H_{n-1}| \quad (5)$$

Where,  $H$  denotes value of the function,  $N$  denotes size of function

Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) 식을 사용하여 화이트 노이즈를 계산하여 MTF 수치와 SNR, RMS 그리고 TV값과의 상관관계를 분석하였다.

## 2.2 실험 과정

### 2.2.1 실험 장치 구성

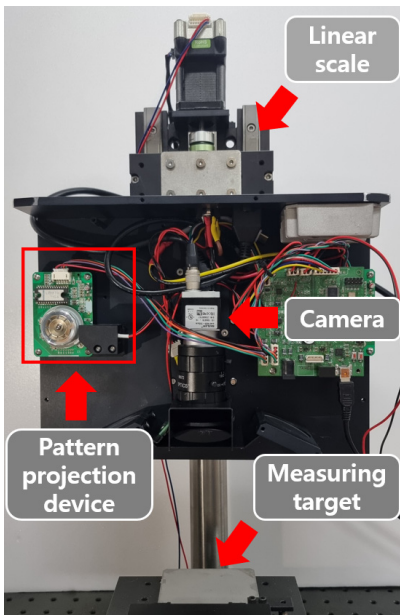


Fig. 1. The device used in the experiment

Fig. 1은 실험에 사용된 3D Scanner를 촬영한 사진이다. 실험에 사용된 3D Scanner는 수직으로 움직일 수 있도록 리니어 레일 위에 결합 되어있다. 3D Scanner에 사용된 카메라 화소 수는  $1926 * 1216$  pixel이며 FOV는  $76 * 48$  mm이고 Working Distance는 165 mm이다.

### 2.2.2 실험 데이터 획득

렌즈는 중심부에선 콘트라스트 수치가 높지만, 외곽으로 갈수록 낮아지는 경향이 있다[14]. 이러한 특성을 고려하여 카메라의 이미지 센서의 중심  $100 \times 100$  pixel 범위만 실험에 사용되었다.

측정 높이 범위는 초점이 잘 맞는 위치를 기준으로

+13 mm부터 -13 mm까지의 구간으로 설정하였고, 3D Scanner에 설치된 모터를 활용해 1 mm씩 이동하며 측정하였다.

콘트라스트를 평가하기 위한 격자의 피치가 크면 z축 방향 높이 변화에 둔감하고, 격자의 피치가 작으면 실험에서 설정한 측정 범위 안에서 격자 이미지가 흐려져 측정이 불가할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 MIL-STD-150A 표준에 의해 정의된 광학 해상도 테스트 타겟인 1951 USAF resolution test chart의 2.52 lp/mm 격자를 사용하였다.

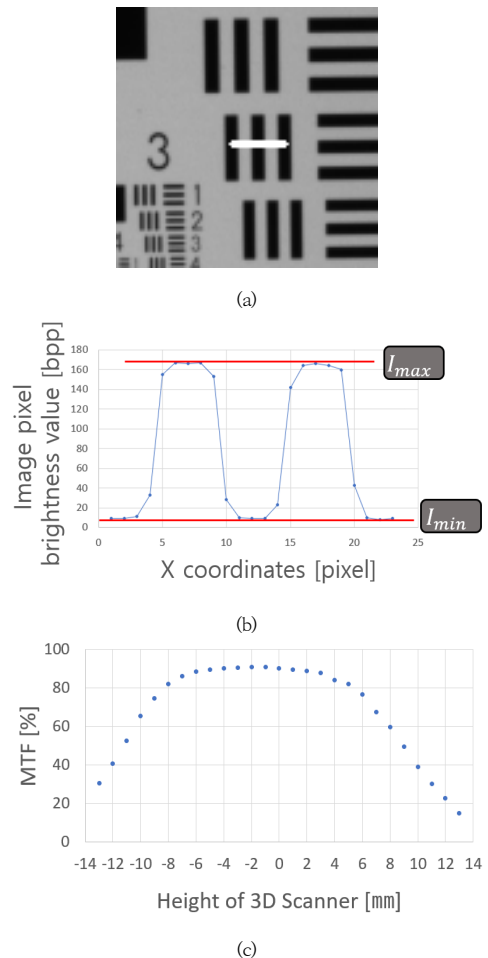


Fig. 2. MTF image used in the experiment

(a) Take images of 1951 USAF resolution test chart (Group Number : 1, Element Number : 3) (b) Bright Flag Profile of the Grid (c) MTF graph according to height of 3D Scanner

MTF값을 얻기 위해 Fig. 2(a)와 같이 1951 USAF resolution test chart를 촬영한 뒤 격자의 수직 방향의

밝기값 Fig. 2(b)를 획득하고 Eq. (1), Eq. (2)를 활용하여 MTF값이 Fig. 2(c)와 같이 측정되었다. Fig. 2(b)의 세로축은 0~255 사이의 값으로 밝기값을 표현하는 bpp(bit per pixel)로 표현되었다.

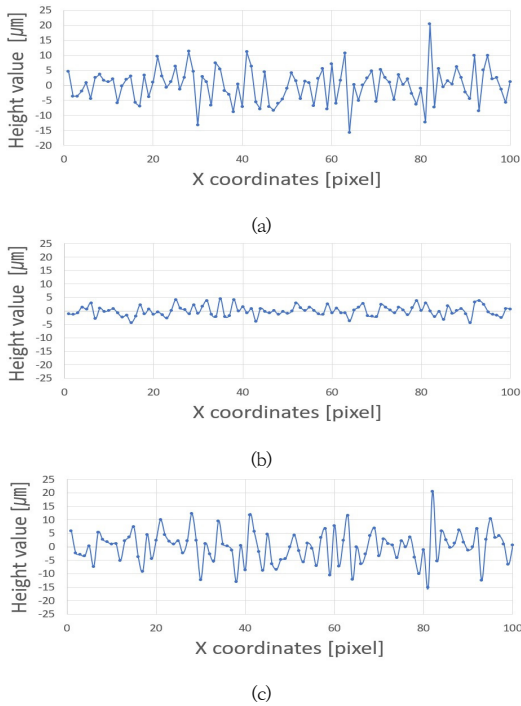


Fig. 3. X profile at image center ( $y = 50$ )  
 (a) Measured height value (b) Calculated uniform noise  
 (c) Calculated White Noise

SNR, RMS 그리고 TV를 계산하기 위해선 깨끗한 세라믹 평면 형상을 측정한 결과값인 Fig. 3(a)에서 화이트 노이즈를 분리해야 한다. 본 실험에선 평면을 측정하였기 때문에 0이 아닌 모든 값은 기구적 특성에 의해 모든 측정에서 일정하게 나타나는 계통오차(Systematic error)와 랜덤하게 나타나는 우연오차(Random error)의 합으로 이루어져 있는데, 이중 우연오차는 화이트 노이즈를 나타낸다.

이때 측정을 반복적으로 진행한 후 결과값을 모두 더해 평균을 내면 계통오차는 유지되고 화이트 노이즈는 대폭 감소하게 된다.

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N H_n}{N} \quad (6)$$

Where,  $S$  = systematic error,  $H$  = 3d data,  $N$  = number of 3d data

이러한 특성을 바탕으로 Eq. (6)의 식을 활용하여 측정 높이별로 10회 반복측정 하여 계통오차 Fig. 3(b)을 구하였다.

$$W = M - S \quad (7)$$

Where,  $W$  = white noise,  $M$  = measured height value,  $S$  = systematic error

이후 Eq. (7)의 식을 활용하여 측정 결과에서 화이트 노이즈 Fig. 3(c)을 분리하였다.

분리한 화이트 노이즈를 Eq. (3), Eq. (4), 그리고 Eq. (5)의 식을 활용하여 SNR, RMS 그리고 TV값이 산출되었다.

### 2.3 실험 결과

본 실험에서는 3D Scanner에 결합 되어있는 모터를 사용하여 3D Scanner를 위아래로 움직이며 1951 USAF resolution test chart를 촬영하여 3D Scanner의 z축 위치에 따른 MTF값을 구하였으며, 깨끗한 세라믹 평면 형상을 측정하였다. 측정을 한 위치에서 10회 반복하여 계통오차를 구하였고 이후 측정 결과값에서 화이트 노이즈를 분리한 뒤 SNR, RMS 그리고 TV값을 구하였다. 산출된 SNR, RMS, 그리고 TV값과 Fig. 2(c)의 MTF 측정 결과를 토대로 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에서 MTF값에 따른 SNR, RMS, 그리고 TV값을 아래와 같이 나타내었다.

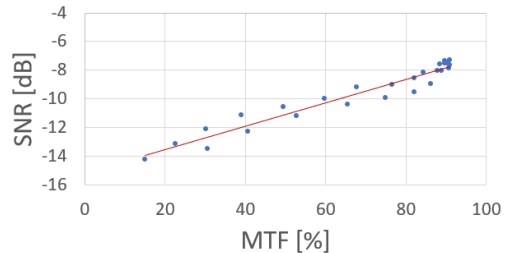


Fig. 4. SNR graph according to MTF

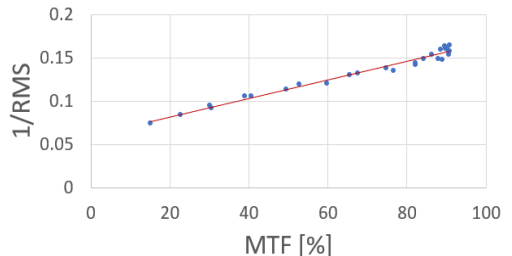


Fig. 5. RMS graph according to MTF

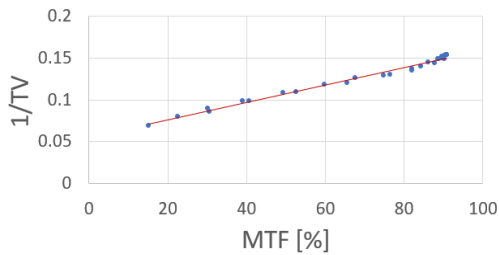


Fig. 6. TV graph according to MTF

Fig. 4에서 MTF값이 증가함에 따라 SNR값이 증가하는 모습을 보여주고 있으며, Fig. 5과 Fig. 6에선 MTF값이 증가함에 따라 RMS, TV값이 감소하는 결과가 나타났다.

$$SNR = 0.082x - 15.195 \quad (8)$$

Where,  $x$  denotes MTF value

$$RMS = -0.0775x + 13.171 \quad (9)$$

Where,  $x$  denotes MTF value

$$TV = -0.0835x + 14.021 \quad (10)$$

Where,  $x$  denotes MTF value

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6의 결과를 토대로 MTF와 SNR, RMS, 그리고 TV의 관계식을 Eq. (8), Eq. (9), Eq. (10)으로 표현할 수 있다.

RMS와 TV값은 변화율이 거의 비슷하며 노이즈가 증가함에 따라 값이 증가하며 각 시행 별 증가 폭이 작다. SNR은 MTF값이 증가함에 따라 값이 감소하고 있지만 측정값이 불안정하고 각 시행 별 증가 폭이 크다. 따라서 RMS와 TV는 MTF와의 연관성이 좋지만, SNR은 비교적 연관성이 낮은 결과가 나타났다.

### 3. 결론

본 논문에서는 삼차원 형상 측정 시 고려해야 하는 광량의 조절 방식 중 조리개를 여닫을 때 생기는 콘트라스트의 변화가 삼차원 형상 측정에 미치는 영향을 정량적으로 알기 위한 실험을 진행하였다.

실험 결과 MTF값이 증가할수록 SNR값은 증가하며, RMS값과 TV값은 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 기반으로 카메라의 MTF값으로 해당 3D Scanner의

삼차원 형상 측정 결과값에서 생기는 화이트 노이즈의 SNR, RMS 그리고 TV값을 알 수 있는 관계식을 구하였다. 기존에 화이트 노이즈의 강도를 알아내기 위해선 3D Scanner를 설계한 후 제작 과정까지 거쳐 측정을 진행해야 확인할 수 있었지만, 본 논문에서 산출된 관계식을 활용하면 설계 단계에서 MTF값으로 화이트 노이즈 강도를 예측할 수 있어 3D Scanner의 설계를 보다 효과적으로 진행할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 설계 단계에서 예측된 노이즈 값과 제작 완료된 3D Scanner에서 실제 측정된 노이즈 값을 비교 검증하는 실험이 진행될 것이다.

### References

- [1] C. H. Han, S. J. Lee, C. G. Park, J. Y. Lee, Y. K. Ryu, "2D/3D Visual Optical Inspection System for Quad Chip", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.17, No.1-4, pp.684-692, January 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.1.684>
- [2] H. J. Pahk, W. J. Ahn, "A New Method of Noncontact Measurement for 3D Microtopography in Semiconductor Wafer Implementing a New Optical Probe based on the Precision Defocus Measurement", Korean Society for Precision Engineering, Vol.17, No.1, pp. 129-137, January 2000.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s001700170180>
- [3] Y. M. Koo, K. H. Lee, "Flip Chip Bump 3D Inspection Equipment using White Light Interferometer with Large F.O.V.", Korean Institute of Intelligent Systems, Vol.23, No.4, pp. 286-291, August 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.5391/IJKIIS.2013.23.4.286>
- [4] J. M. Koo, T. H. Cho, "3-D Measurement of LED Packages Using Phase Measurement Profilometry", Semiconductor & Display Technology, Vol.10, No.1, pp. 17-22, March 2011.
- [5] B. G. Joo, T. D. Cho, "3D Accuracy Enhancement of BGA Shiny Round Ball Using Optical Triangulation Method", Korean Society for Precision Engineering, Vol.32, No.9, pp. 799-805, September 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.9.799>
- [6] T. Yoshizawa, "Handbook of Optical Metrology Principles and Applications", p.744, CRC Press, 2009, pp.286-289  
DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420019513>
- [7] M. Halioua, H. C. Liu, "Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry", Optics and Lasers in Engineering, Vol.11, No.3, pp. 185-215, February 1989  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(89\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0143-8166(89)90031-6)

- [8] Y. S. Yu, "A Study on Image Noise Effect to the Phase Error in Phase Shifting Profilometry", KIIT, Vol.14, No.1, pp. 45-52, Jan. 31, 2016  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.1.45>
- [9] S. H. Kim, "photo lens", p.212, WaveScience, 2006, pp.30-33, pp.49-51
- [10] J. C. Russ, F. B. Neal, "The Image Processing Handbook", p. 1053, CRC Press, 2016, pp 357 - 358  
DOI: <https://doi.org/10.1201/b18983>
- [11] L. I. Rudin, S. Osher, E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms", Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol.60, No.1-4, pp.259-268, November 1992.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(92\)90242-F](https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90242-F)
- [12] F. Yang, H. I. Lin, P. Chen, J. Hu, T. Gu, "Monocular depth sensing using metalens", Nanophotonics, Vol.12, Issue 14, pp. 2987 - 2996, March 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0088>
- [13] J. H. Kim, S. M. Sung, "Quality Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Images Using a Resolution Target", Applied Sciences, Vol.14, Issue 5, 2154, March 2024.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app14052154>
- [14] S. S. Lee, H. J. Lee, "Developed an In-Line System of Measuring MTF for Automating the Assembly Process of Lens-Module in a Smartphone Camera", Korean Society for Precision Engineering, Vol.38, No.5, pp. 359-363, May 2021.  
DOI: <http://doi.org/10.7736/JKSPE.020.111>

김기승(Gi-Seung Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

3D 측정, 컴퓨터비전

박윤창(Yoon-Chang Park)

[정회원]



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

<관심분야>

정밀기계, 3D 측정

박두빈(Doo-Bin Park)

[준회원]



- 2022년 8월 : 선문대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2022년 8월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 (석사과정)

<관심분야>

3D 측정, 컴퓨터비전