



# 공장 자동화를 위한 광학 방식 삼차원 측정 기술 연구

## I. 서론

산업 분야의 제조 및 검사 공정에서 다모델 제품의 대응과 이에 따른 소재/부품의 변동성을 대응하는 유연한 생산 시스템이 요구되고 있다. 시각 정보를 기반으로 하는 머신 비전 기술은 형상, 색상, 위치 등 단일 센서에 비해 많은 정보로 가공이 가능하므로 유연한 시스템을 적용하는데 매우 중요한 수단이 된다. 특히 사람의 육안 판단에 의존하였던 제품의 수량/종류/위치 확인 및 추적, 결점 존재 확인/측정, 형상 측정, 문자 판독 등의 세부 단계가 빠르게 머신 비전 기반의 시스템으로 대체 또는 보완되고 있다.

머신 비전의 도입은 육안에 의한 시각 검사에 비해, 작업 및 측정의 반복성뿐 아니라 품질에 대한 정량적인 관리 및 정밀성과 경제성을 확보할 수 있는 수단이 되므로, 원자재, 반도체, 자동차, 전자제품, 식약품 생산 등의 산업 전반에 걸쳐 단순한 측정에서부터 획득한 영상의 처리, 판단 프로세스까지 광범위하게 머신 비전의 적용이 이루어지고 있다.

대개의 공장에서의 머신 비전 적용 사례는 2차원 검사가 대다수를 차지하고 있으나, 삼차원 이미징 기술이 보편화됨에 따라 검사 및 측정 응용 사례들도 빠르게 늘어나고 있다. 특히 많은 자동차 제조사들의 경우, 자동차 문, 보닛, 엔지, 계기판 및 LED의 조립을 삼차원 비전이 장착된 로봇이 처리하는 경우가 늘고 있으며, 일례로 BMW는 2015년부터 완전 자동화된 외관 측정 셀(cell) 구축에 삼차원 광학 기술을 도입하였다<sup>[1]</sup>. 이 시스템은 로봇에 부착된 센서를 이용해 전체 차량에 대한 3D 이미지를 만들고 100um 이하의 정밀도로 3D 데이터 모델을 생성한다. 그 외에도 잠재적인 애플리케이션 수는 빠르게 성장하고 있다.

현재 생산 현장에서는 광학식 삼차원 측정 방법으로 광삼각법을 필두로 하여 모아레(Moire) 측정법, 광위상 간섭법(Phase-shifting



장효영  
LG전자 소재/생산기술원



노영준  
LG전자 소재/생산기술원


 <그림 1> BMW 광학 측정 셀 시스템<sup>[1]</sup>

interferometry), 백색광 주사 간섭법(White-light scanning interferometry), 공초점 측정법(Confocal microscopy), 피조 간섭계(Fizeau Interferometry) 등을 포함한 수십 가지의 광학식 형상 측정 기술이 적용되고 있다. 이들은 삼차원 위치 계산의 방법에 따라 크게 광학적 삼각 측량 방식과 시간 지연 측정 방식으로 나뉘게 되며, 여기서는 삼각측량을 활용하는 대표적인 방법인 레이저 광삼각 측정 및 구조광(Structured light)에 대해 다루도록 한다.

먼저 2장에서는 레이저 광삼각 및 구조 조명 이용 삼차원 측정 방법에 대한 기술적인 소개를, 3장에서는 실제 적용에 대한 사례를 든 후 4장에서 결론으로 글을 마치도록 하겠다.

## II. 관련 기술 소개

### 1. 광삼각 측정 방식

광삼각법은 거리 또는 변위, 형상의 측정에 다양하게 이용된다. 광원으로는 레이저 빔을 이용하는 것이 일반적이며, 시스템은 점(또는 선) 형 광원 및 컨트롤러와 이미징 광학계, 데이터 처리장치로 구성된다. 기본 원리는 <그림 2>와 같다. 물체 면에 조사된 레이저 광점(A)은 입사 레이저 빔 축과 특정 각도로 기울어져 설치된 이미징 광학계에 의해 위치 측정 센서(Position Sensing Detector, PSD) 또는 이미지 센서 - Charge Coupled Device(CCD) 또는 Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) - 면에 상(a)을 맺는다. 만약 조사 레이저 위치가 변경되면(B), 이는 다시 이미지 센서에 맺히는 상의 위치에 변화를 준다(b). 이와 같은 레이저 조사 위치 변화(H)와 이미징 위치 변화(h) 간의 관계식을 유도하기 위해 먼저 대상체 거리( $L_3$ )와 이미징 거리( $L_4$ )를

아래와 같은 수식으로 기술한다.

$$L_3 = L_1 - H \cos \alpha \quad (\text{식 1})$$

$$L_4 = L_2 - h \cos \beta \quad (\text{식 2})$$

또한 영상 포커싱과 관련한 식 3의 수식으로부터 식 4와 5가 유도된다.

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} = \frac{1}{f} \quad (\text{식 3})$$

$$L_2 = \frac{L_1 f}{L_1 - f} \quad (\text{식 4})$$

$$L_4 = \frac{L_3 f}{L_3 - f} = \frac{(L_1 - H \cos \alpha) f}{L_1 - H \cos \alpha - f} \quad (\text{식 5})$$

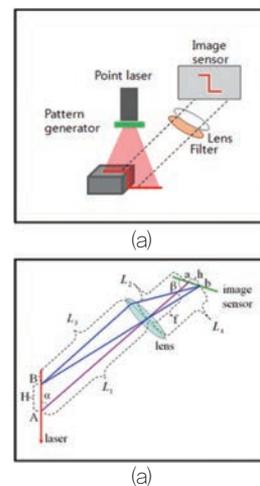
마지막으로 식 6의 관계식에 식 1부터 5까지의 수식을 적용하면, 식 7과 식 8이 도출된다.

$$\frac{H \sin \alpha}{h \sin \beta} = \frac{L_4}{L_3} \quad (\text{식 6})$$

$$H = \frac{h \sin \beta (L_1 - f)}{f \sin \alpha - h \cos \alpha \sin \beta} \quad (\text{식 7})$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{L_1 - f}{f} \tan \alpha \right) \quad (\text{식 8})$$

이와 같은 수식을 통해 광삼각법 시스템 구현 시  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $f$  등의 변수를 설계할 수 있다<sup>[2]</sup>.


 <그림 2> 광삼각 측정 방식의 원리:  
 (a) 센서의 구성도, (b) 고려 대상 센서 파라미터



레이저 광삼각법은 광학계의 구성과 정렬이 매우 간단한 장점이 있다. 그러나 조사되는 광원이 대상체의 표면에 투영되어야 측정이 가능하므로 반사도가 높은 경면의 대상체 측정에 있어 측정오류가 나기 쉽다. 또한 광축을 따라 측정하는 것이 아니라 패턴을 조사하는 발광부의 축과 그 패턴을 기록하는 수광부의 축이 특정 각도로 틀어져 있어 카메라 시야에서 광원이 가려지는 측정 사각지대가 존재하는 한계를 갖는다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 대상체의 표면에 따라 반사율을 적절하게 통제하기 위한 다파장 광원을 사용하거나 두 개 이상의 광원 혹은 카메라를 사용하여 사각지대를 개선하는 방식이 사용된다.

최근의 레이저 광삼각 측정 장치는 기존 접촉식 측정 장치에 비견하거나 그 이상의 공간 및 높이 분해능을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 시스템의 성공적인 도입을 위해서는 아래와 같은 한계 및 오차 요인에 대해 검토가 이루어져야 한다.

광삼각 측정 장치의 분해능은 주로 레이저 광점의 크기와 센서 화소 크기에 따른 분해능에 의해 결정된다. 또한 광점의 위치가 기준 면에서 벗어날수록 광학적 분해능이 떨어지게 된다. 대표적인 레이저 광삼각법의 오차는 고스트(ghost) 효과로 인한 것이다. 물체의 주변 반사나 다중 반사 등으로 실제 레이저 광점이 아닌 위치에 레이저 광점이 형성될 경우 이를 고스트라 한다. 고스트가 발생할 경우 중심점의 위치 측정이 어려워지고 결국 오차가 유발된다. 레이저빔이 입사하는 광축과 영상을 맺는 광학계의 광축이 많이 기울어져 있을 경우에도 이로 인한 입사 광점의 상 변형이 오차를 야기하게 된다. 이 효과는 사이각이 클 경우 발생하게 되며, 고스트와 중첩되어 나타나기도 한다. 마지막으로 측정 대상의 국부적인 표면반사율의 변화가 심할 때 측정 오차가 발생한다.

## 2. 구조 조명 형상 측정 방식

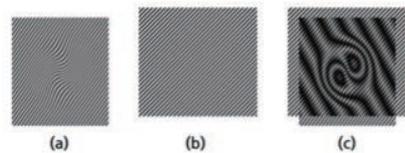
구조 조명 형상 측정 방식이란 라인이나 격자 구조 등 특정 패턴의 빛을 활용하여 물체의 기하학적 높이와 깊이를 측정하는 방법론을 의미한다. 기본적인 원리는 광삼각법과 같이 조명이 되는 패턴 조명이 삼차원 대상체에 투

영되어 변형이 되는 양을 카메라로 읽는 것으로, 일반적인 광삼각법의 경우 한 점, 혹은 한 개의 라인에 대한 측정이 된다면, 구조 조명을 사용하는 경우 2차원 면에 대한 전체의 삼차원 정보를 얻어내는 방법이라 할 수 있다.

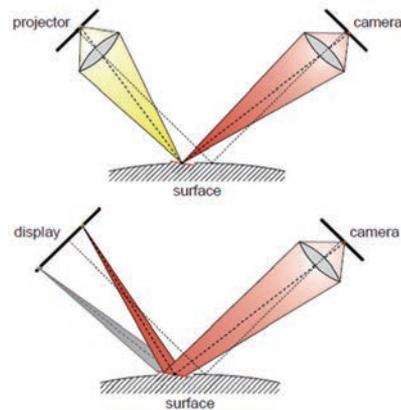
대표적인 구조 조명 형상 측정 방식으로 모아레(Moire) 측정법이 있다. 2개의 격자무늬가 겹쳐지게 되면 간섭 현상이 일어나게 된다. <그림 3>에 이에 대한 예시를 들었다. 그림에서와 같이 서로 다른 무늬 a와 b를 겹치게 되면 새로운 무늬 c가 생기게 되며, 이 간섭무늬를 모아레 패턴이라 한다. 만약 패턴 b에 대한 정보를 사전에 알고 있다면 c를 관측함으로써 a 패턴의 정보를 역으로 산출해 낼 수 있다.

구조광을 이용한 삼차원 측정 방식은 광학 시스템의 구축이 간단하며, 주된 반사 요소가 난반사(diffuse reflectance)인지, 정반사(specular reflectance)인지에 따라 구조광의 조사 방식 등의 구현에 차이가 존재할 수 있으나 일반적으로 카메라 광학계를 사용하므로 수십 mm 영역까지의 넓은 측정 영역 적용이 가능하다. 단, 사용하는 격자에 다른 측정 제한 높이가 존재하게 된다.

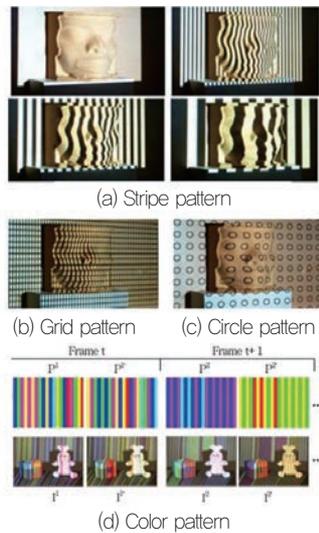
<그림 5>에 구조 조명을 이용한 삼차원 측정 시 사용되는 다양한 패턴의 예시를 보였다<sup>[4-5]</sup>. 적용되는 패턴의 수



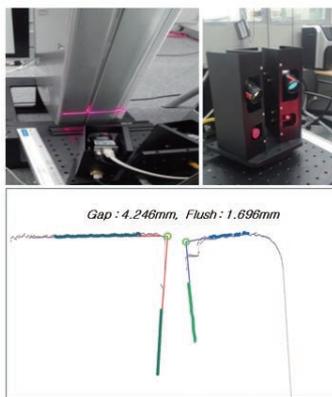
<그림 3> 서로 다른 패턴(a)와 (b)를 겹치면 새로운 무늬 (c)가 생긴다<sup>[3]</sup>



<그림 4> 구조 조명 형상 측정 시스템



〈그림 5〉 구조 조명 적용 패턴 예시



〈그림 6〉 2파장 레이저 Gap 측정 장비

는 코드화 기법과 컬러 유무에 따라 설계하도록 한다. 여러 장의 이진 패턴 사용 시 구현이 단순하고 고해상도의 깊이 맵(depth map)을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 하나의 장면(scene)에 대하여 여러 장의 패턴 영상을 연속적으로 투영하여야 하므로 움직이는 물체가 있는 경우에는 적용이 적절하지 않다. 이에 대한 보완 방법으로 그레이 또는 컬러 패턴을 이용하여 패턴 영상의 종 수를 줄일 수 있으나, 컬러 대상체에 대한 오류 발생 가능성이 있으며 깊이 맵의 해상도 한계 문제가 발생하게 된다.

### III. 공장 자동화 적용 사례

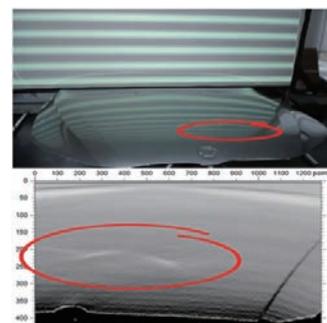
최근 삼차원 측정 방식에 대한 공장 자동화 관점에서의

요구가 증대됨에 따라, 여러 가지 솔루션들의 적용 사례가 업계에 보고되고 있다. 특히 자동차 업계는 이에 대해 활발한 투자 또는 검토가 이루어지고 있는 시장으로, 로봇에 의한 자동화와 함께 고급화에 따른 외관의 품질 관리의 관점에서 삼차원 측정 기술이 다양한 분야에서 적용되고 있다.

〈그림 6〉은 2파장 레이저를 활용하여 간격(Gap)을 측정하는 시스템이다. 2개의 레이저 조사 각도를 조정하여 좁은 간격 측정에서 발생하는 측정의 사각지대를 해소하고 좀 더 깊은 위치까지의 간격 측정이 가능하도록 하였다.

〈그림 7〉은 자동차 차체의 표면 깊이(depth) 측정 예시이다. 시분할 방식의 구조광 조사를 통해 차량 표면과 같은 유광 표면의 형태적인 변형을 검출할 수 있다. 광학계를 로봇에 부착하여 전체를 스캔하는 방식으로 전체 차체의 표면 측정도 가능하다(〈그림 8〉).

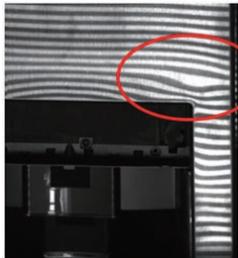
유광체에 대한 표면 형상 왜곡 검출 기술의 이해를 돕기 위하여 〈그림 9〉에 직선형의 패턴을 유광 재질 대상에 조사하였을 경우의 이미지를 제시하였다. 등 간격의 직선형 패턴을 대상에 조사하였으므로, 직선 간 간격이 주변과 비교하여 급격하게 변화하는 부분은 표면 형상에 있어 급격한 깊이(depth) 변화가 있는 것으로 판단할 수 있다. 각 직선 간 간격의 편차량을 이용하여 표면 형태 변형 위치를 극대화하여 도시하는 방법으로는 여러 수직적 접근이 가능하다. 일례로 직선 패턴에 대한 수직 방향으로의 높이 변화를 산출하기 위해서는 (식 9)와 같은 간단한 수식의 이용이 가능하며 그에 따른 〈그림 9〉에서의 표면 왜곡 부위에 대한 높이 프로파일을 〈그림 10〉에 제시하였다.



〈그림 7〉 차량 표면 깊이 맵(Depth map)<sup>[6]</sup>



〈그림 8〉 차량 표면 형상 검사<sup>[7]</sup>



〈그림 9〉 가전제품 표면 검사를 위한 조명 조사 예시<sup>[8]</sup>

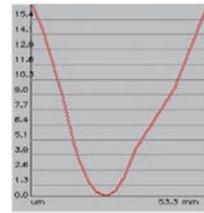
$$f(i) = \frac{\int_{i_0}^i g(i) - F(i_0)}{F(i_n) - F(i_0)} \times \alpha \quad (\text{식 } 9)$$

$g()$ : a resulted image value,

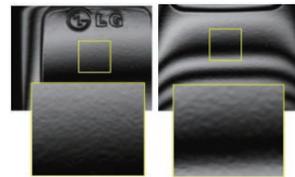
$F()$ : a definite integral of  $f()$ ,  $\alpha$ : a scale factor

또한 구조광 방식은 유광체의 표면 거칠기(Roughness) 검사에도 활용된다<sup>[9]</sup>. 〈그림 10〉에 구조광 흑백 경계부에서의 조사 이미지를 도시하였다. 경계부에서 표면 거칠기가 표현됨을 확인할 수 있다. 따라서 제품 전 영역에 걸친 거칠기 검사를 위해 〈그림 11〉과 같은 검사 시스템을 구축하였다. 시스템은 제품을 거치하기 위한 3축 스테이지와 구조광 출력을 위한 LCD 모니터, 광을 측정하기 위한 광학계 및 측정 데이터 처리를 위한 연산부로 구성된다. 조사 광은 위상 천이 방식의 직선형 구조광을 이용하였다.

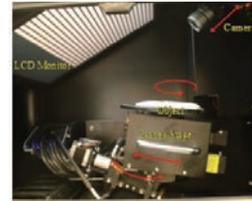
반복성 및 신뢰성 있는 깊이 편차 데이터 취득을 위한 환경과 대상체에 적절한 광학계 구축과는 별개로 측정된



〈그림 10〉 높이 프로파일 예시



〈그림 11〉 유광체 표면 거칠기 이미징



〈그림 12〉 유광체 표면 거칠기 검사 시스템

데이터로부터 목적에 부합하는 특징치(대표치)를 정의하는 것 또한 중요하다. 위의 표면 거칠기 검사 시스템에서는 식 10과 같이 표면 품질을 정의하였다.

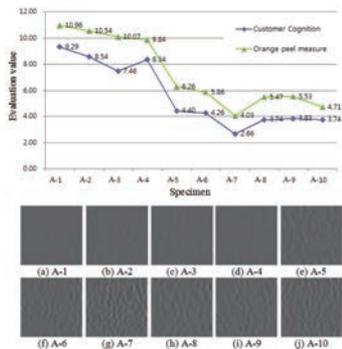
$$m_{\text{unevenness}} = \frac{10}{\log(\sigma)}$$

$\sigma$ : 영상 강도(intensity)의 표준 편차 (식 10)

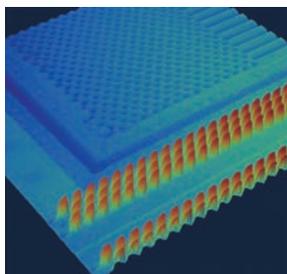
〈그림 13〉는 식 10의 특징치를 기준으로 작업자에 의한 점수화와 비교를 통해 평가한 결과로, 특징치에 의한 평가 및 사람에 의한 평가가 유사한 경향성을 보임을 확인할 수 있다.

이와 같은 삼차원 측정 방식들은 기술적 특성에 따라 상호 보완적인 복합 형태로 적용되기도 한다.

일례로 패키지 범프(Package bump) 형상 측정에 있어서 경사 백색광 주사 간섭계(Tilted white light scanning interferometry, TSI)와 레이저 라인 프로파일러 삼차원 측정 기술을 상호 보완적으로 적용하여 표면 재질에 강인한 측정 결과를 얻는 등의 시도가 그것이다<sup>[13]</sup>. 정밀미세부품의 삼차원 표면 형상 측정 및 박막 두



〈그림 13〉 표면 거칠기 측정치 평가 결과



〈그림 14〉 패키지 범프 삼차원 측정 이미지

계 측정 등에 광범위하게 쓰이고 있는 백색광 주사 간섭계(Scanning White Light Interferometry)의 경우, 백색광원의 결맞음 길이(coherence length)보다 낮은 단차를 측정할 경우 수직 분해능이 상대적으로 떨어지거나, 측정 물체의 국부 기울기가 심할 경우 심각한 측정오차가 유발되는 등의 문제점이 있다<sup>[10]</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 측정 광학계 자체의 개선이나 측정 데이터의 처리 개선 시도가 이루어지고 있으나<sup>[11-12]</sup>, 개선의 또 다른 방향으로 대상체의 형상 특징에 기반을 두고 측정 방식을 복합적으로 설계하여 보다 나은 성능을 얻기도 한다.

#### IV. 결론

이상과 같이 현재 업계에서 사용되는 다양한 광학식 삼차원 측정 기술 중 레이저 삼각법 및 구조광 방식 삼차원 측정의 원리와 적용 예를 살펴보았다. 이러한 측정기는 최근의 공장 자동화 추세에 영향을 받아 실제 생산 및 물류 공정에서의 수요가 급격히 증가하고 있다. 초기에는 현미경 또는 투영장비를 이용하거나 별도의 측정실에서 측정 관리되던 항목들이 비접촉 삼차원 측정 기술의 발전에 힘

입어 생산 공정에 도입되고 있다. 공장에서의 삼차원 솔루션 적용은 일부에서는 여전히 혁신적인 트렌드로 회자되지만, 많은 경우 보편화의 단계에 접어들고 있다. 성공적인 삼차원 솔루션의 적용을 위해서는 전문적인 지식과 경험에 기반을 두고 기능성, 융통성, 신뢰성, 처리량 등 전반에 걸친 기술 도입 검토를 통하여 효용성 극대화가 전제되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Automoblog.net, <http://www.automoblog.net/2016/08/06/inside-bmw-optical-measuring-cell/>
- [2] W. Huang and R. Kovacevic, "A Laser-Based Vision System for Weld Quality Inspection", *Sensors* 2011, 11(1), pp.506-521.
- [3] M. G. Gustafsson, "Nonlinear structured illumination microscopy: Wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution", *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(37)
- [4] J. Beraldin, Francois Blais, Luc Cournoyer, Guy Godin, and Marc Rioux, "Active 3D Sensing," NRC Technical Report 44159, Ottawa, 2000.
- [5] J. Posdamer and M. Altschuler, "Surface Measurement by Space-encoded Projected Beam System," *Comput. Graphics Image Processing*, Vol.18, 1982, pp.1-17.
- [6] *Quality Manufacturing Today*, [http://www.qmtmag.com/display\\_edc.cfm?edno=2497063](http://www.qmtmag.com/display_edc.cfm?edno=2497063)
- [7] *Micro-Epsilon*, <http://www.micro-epsilon.com/press/release/PR240-reflectCONTROL/index.html>
- [8] J. Bhang, Y. Roh, and D. Jeong, "A Reflectometry Approach for Rippling Defect Measurement on High Glossy Surface", *Proc. of 2014 International Symposium on Optomechatronic Technologies(ISOT2014)*, 2014.
- [9] Y. Roh, S. Kim, H. Shim, D. Lim, and D. Jeong, "A patterned illumination and phase integration imaging method for high-glossy surface evaluation", *Proc. of 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies(ISOT2010)*, 2010.
- [10] J. Bhang, S. Lee, K. Chang, and Y. Roh, "High speed Tilted white-light Scanning Interferometry system for package



bumps inspection”, Proc. of 2012 International Symposium on Optomechatronic Technologies(ISOT 2012), 2012.

[11] R. Berger, T. Sure, and W. Osten, “Measurement Errors of Mirrorlike, Tilted Objects in White Light Interferometry,” Proc. of the SPIE on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Vol. 6616, Paper No. 2E, 2007.

[12] Y.-S. Ghim, and A. Davies, “Complete Fringe Order Determination in Scanning White-light Interferometry using a Fourier-based Technique,” Applied Optics, Vol. 51, No. 12, pp. 1922–1928, 2012.

[13] Y. Zhou, Y.-S. Ghim, A. Fard, and A. Davies, “Application of the Random Ball Test for Calibrating Slope-dependent Errors in Profilometry Measurements,” Applied Optics, Vol. 52, No. 24, pp. 5925–5931, 2013.



**장효영**

- 2001년 2월 이화여자대학교 정보통신학과 학사
- 2004년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 석사
- 2012년 9월 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정 수료
- 2013년 1월~현재 LG전자 소재/생산기술원 선임연구원

〈관심분야〉  
머신비전, 계측광학, 비파괴검사



**노영준**

- 1995년 2월 연세대학교 기계공학과 학사
- 1997년 2월 한국과학기술원 정밀공학과 석사
- 2003년 2월 한국과학기술원 기계공학과 박사
- 2006년 7월~현재 LG전자 소재/생산기술원 수석연구원

〈관심분야〉  
머신비전, 계측광학, 머신러닝