

논문 2013-50-8-31

편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템 및 병렬 프로그래밍 기반 측정 고속화

(A Polarization-based Frequency Scanning Interferometer and the
Measurement Processing Acceleration based on Parallel Programing)

이 승 현*, 김 민 영**

(Seung Hyun Lee and Min Young Kim[©])

요 약

광학측정기법 중 주파수 스캐닝 간섭계는 기존 3차원 측정기법과 비교하여 광학 하드웨어 구조가 측정과정동안 고정되어 있어, 대물렌즈나 대상물체의 수직 스캐닝 없이 단지 광원의 주파수만 특정한 주파수 밴드내에서 스캐닝 하여 대상물체에 주사되므로, 우수한 광학 측정 성능을 보인다. 광원의 주파수를 변경하여 간섭계를 통해 간섭 영상을 획득한 후, 밝기 영상 데이터를 주파수 영역 데이터로 변환하고, 고속 푸리에 변환을 통한 주파수 분석을 이용하여 대상 물체의 높이 정보를 계측한다. 하지만, 대상물체의 광학적 특성에 기인한 광학노이즈와 주파수 스캐닝동안 획득되는 영상의 수에 따라 증가하는 영상처리시간은 여전히 주파수 스캐닝 간섭계의 문제이다. 이를 위해, 1) 편광기반 주파수 스캐닝 간섭계가 광학 노이즈에 대한 강인성을 확보하기 위해 제안되어진다. 시스템은 주파수 변조 레이저, 참조 거울 앞단의 $\lambda/4$ 판, 대상 물체 앞단의 $\lambda/4$ 판, 편광 광분배기, 이미지 센서 앞단의 편광기, 광섬유 광원 앞단의 편광기, 편광 광분배기와 광원의 편광기 사이에 위치하는 $\lambda/2$ 판으로 구성된다. 제안된 시스템을 이용하여, 편광을 기반으로한 간섭이미지의 대조대비를 조절할 수 있다. 2) 신호처리 고속화 방법이 간섭계 시스템을 위해 제안되며, 이는 그래픽 처리 유닛(GPU)과 같은 병렬처리 하드웨어와 계산 통합 기기 구조(CUDA)와 같은 프로그래밍 언어로 구현된다. 제안된 방법을 통해 신호처리 시간은 실시간 처리가 가능한 작업시간을 얻을 수 있었다. 최종적으로 다양한 실험을 통해 제안된 시스템을 정확도와 신호처리 시간의 관점으로 평가하였고, 실험결과를 통해 제안된 시스템이 광학측정기법의 실적용을 위해 효율적임을 보였다.

Abstract

Frequency Scanning Interferometry(FSI) system, one of the most promising optical surface measurement techniques, generally results in superior optical performance comparing with other 3-dimensional measuring methods as its hardware structure is fixed in operation and only the light frequency is scanned in a specific spectral band without vertical scanning of the target surface or the objective lens. FSI system collects a set of images of interference fringe by changing the frequency of light source. After that, it transforms intensity data of acquired image into frequency information, and calculates the height profile of target objects with the help of frequency analysis based on Fast Fourier Transform(FFT). However, it still suffers from optical noise on target surfaces and relatively long processing time due to the number of images acquired in frequency scanning phase. 1) a Polarization-based Frequency Scanning Interferometry(PFSI) is proposed for optical noise robustness. It consists of tunable laser for light source, $\lambda/4$ plate in front of reference mirror, $\lambda/4$ plate in front of target object, polarizing beam splitter, polarizer in front of image sensor, polarizer in front of the fiber coupled light source, $\lambda/2$ plate between PBS and polarizer of the light source. Using the proposed system, we can solve the problem of fringe image with low contrast by using polarization technique. Also, we can control light distribution of object beam and reference beam. 2) the signal processing acceleration method is proposed for PFSI, based on parallel processing architecture, which consists of parallel processing hardware and software such as Graphic Processing Unit(GPU) and Compute Unified Device Architecture(CUDA). As a result, the processing time reaches into tact time level of real-time processing. Finally, the proposed system is evaluated in terms of accuracy and processing speed through a series of experiment and the obtained results show the effectiveness of the proposed system and method.

Keywords : Frequency Scanning Interferometer, Polarization, 3D Profilometry, Parallel Processing, GPU, CUDA

* 학생회원, ** 정회원, 경북대학교 IT대학 전자공학부

(School of Electronics Engineering, IT College, Kyungpook National University)

© Corresponding Author(E-mail: mykim@ee.knu.ac.kr)

접수일자: 2013년3월2일, 수정완료일: 2013년7월19일

I. 서 론

현재의 반도체 칩 제조 기술이나 전자, 기계 기술은 나날이 소형화, 고정밀화 되어 가고 있다. 이러한 미세 공정 기술을 이용해 생산되는 제품은 과거엔 상상도 할 수 없었을 정도로 더욱 복잡해 졌으며 이에 따라 부품 생산의 마지막 단계인 3차원 부품 검사 기술의 요구 정밀도가 나날이 높아지고 있다. Microsoft사의 XBOX 360 제품에 사용되는 CPU 크기의 경우 2005년에는 90 nm 공정, 2008년에는 65nm 공정, 2010년에는 45nm 공정으로 칩의 크기가 점점 줄어들었다. 실제로 2010년 45nm 공정으로 생산된 칩은 CPU와 GPU를 하나의 칩으로 통합했음에도 2005년 초창기 칩 보다 50%정도 크기가 줄어들었다^[1]. 이와 같이 반도체의 소형화 및 생산되는 제품의 불량률 감소 및 소비자의 욕구를 충족시키기 위해 부품의 3차원 검사의 필요성 및 요구 정확도가 높아지고 있다.

또한 반도체 패키징 기술의 변화에 따라 금속과 같이 반사율이 높은 물체의 표면뿐만 아니라 Flux와 같은 투명체의 표면 높이 측정에 대한 요구가 높아지고 있다^[2,3]. 기존 패키징 기술은 웨이퍼를 뒤집어 flux에 담겼다 가 기판에 접착하는 방식이었다. 하지만 최근 패키징 시간의 단축을 위해 웨이퍼를 뒤집는 동안 미리 기판에 flux를 프린팅하고 웨이퍼를 기판에 접착하는 방식을 사용한다. 이때 미리 기판에 프린팅하는 flux의 위치와 모양의 정도가 반도체 패키징에 큰 영향을 미친다. 따라서 flux의 위치와 모양을 검사할 수 있는 검사기술이 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존과 같이 기판, 전자 소자와 같은 불투명체의 3차원 측정뿐만 아니라 flux와 같은 투명체의 3차원 측정도 가능한 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템을 연구 및 개발한다.

또한 일반적으로 측정 정확도와 측정소요 시간은 반비례적인 경향이다. 하지만 반도체 소요 증가에 따른 생산량 증가를 위해 정확도가 높으면서도 측정소요 시간이 짧은 검사기술이 요구된다. 높은 정확도를 유지하면서도 실시간으로 검사를 수행할 수 있는 기술의 필요성이 더욱 커져가고 있다. 3차원 높이 측정에 필요한 시간을 단축하기 위하여 GPU(Graphics Processing Unit)라는 하드웨어와 GPU 기반의 병렬 프로그래밍 라이브러리인 CUDA(Compute Unified Device

Architecture)를 적용한 시스템을 통하여 실시간 측정 고속화를 제안한다.

이 시스템을 통해 단순히 불투명체 검사물체의 3차원 좌표 측정뿐만 아니라 투명체 및 다양한 검사물체의 3차원 좌표를 획득할 수 있을 것이다.

II. 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템

1. 편광 분석법을 활용한 FSI 시스템

3차원 측정기술은 측정시스템과 측정하고자 하는 물체와의 접촉성 여부에 따라 크게 접촉식과 비접촉식으로 대별될 수 있다. 접촉식 측정방식은 이론적으로는 매우 정밀한 측정이 가능하지만 측정대상물을 주사하기 위한 기계 구동방식의 한계로 인해 측정시간을 많이 요구하며, 측정물체와의 접촉으로 인해 측정물체의 손상이 발생할 수도 있으며 액체와 같은 표면이 딱딱하지 않은 물체는 측정이 불가능하다는 단점이 있다.

이에 반해 비 접촉식 측정은 최근 광학기술의 높은 발전을 바탕으로 활발히 연구되고 있으며 곡면에 투사한 광의 간섭이나 반사를 이용하여 정해진 위치에서의 곡면높이를 획득하는 방식이다^[4]. 비 접촉식 측정기술에는 많은 방법이 있는데 그 중 간섭계를 이용한 측정기술이 많이 제안되고 있다.

간섭계는 빛의 전자기와 성질을 이용하는 것으로 공간상에서 서로 다른 광경로를 가지는 빛을 만나게 하여 간섭을 발생시킨다. 광경로차(Optical Path Difference)만큼 보강 또는 상쇄간섭이 발생하게 된다. 이 간섭신호를 카메라를 이용해 측정 후 신호처리를 통해 측정물체의 높이를 계산한다^[5]. 다양한 간섭계 시스템 중 주파수 스캐닝 간섭 시스템은 입력 빛의 파장을 연속적으로 변화시키며 간섭신호를 측정하는 방법이다. 기존의 백색광 간섭 측정방법^[6-7]에 비하여, 대물렌즈나 대상물체의 기계적 스캐닝이 최소화되므로, 측정정밀도나 측정속도의 제약이 작아 환경외란에 대해 강인한 측정이 가능한 특징이 있다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템의 개념도이다. 파장 가변 레이저를 사용하여 간섭계 입력 광원의 파장을 계속 변화시켜준다. 파장 가변 레이저에서 출력된 빛은 파이버를 통하여 편광 빔 스플리터에서 기준거울과 측정물체로 분리된다. 기준거울과 측정물체에서 반사된 빛은 다시 빔

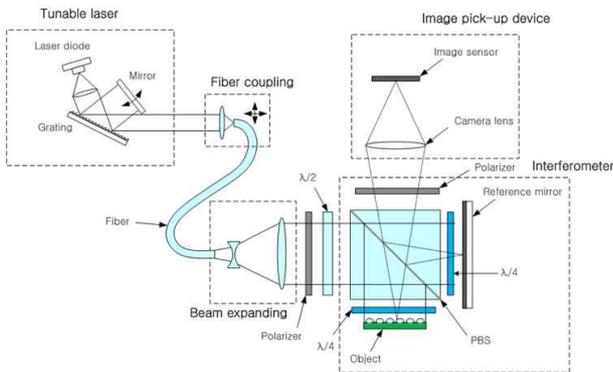


그림 1. PFSI 시스템의 광학 하드웨어 시스템 개념도
Fig. 1. Concept Optical hardware setup for PFSI.

스플리터로 돌아와 간섭을 일으키고 간섭된 빛은 CCD에 맺히게 된다. 빔 스플리터와 측정물체, 기준거울 사이에 $\lambda/4$ 파장판을 놓음으로써 측정물체의 편광 특성을 이용한다.

일반 FSI 시스템^[8]의 경우 거울과 같이 반사율이 높은 물체의 경우에는 높이 측정이 용이하지만 반사율이 낮고 표면이 거친 물체의 경우에는 반사된 빛의 밝기가 어두워 노이즈가 많이 발생하여 측정 높이의 정확도가 낮아진다. 또한 물체 표면에 투명체가 있을 경우 빛이 투명체를 통과하면서 편광 회전 문제가 발생하여 간섭무늬 영상의 명암비가 크게 저하되어 높이 측정이 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 기존 FSI 시스템에 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판과 편광판을 사용하여 편광 분석법^[9]을 적용한다. 편광 분석법 적용으로 인해 기준거울과 측정물체로 가는 광량을 조절할 수 있다. 또한 측정물체와 기준거울 앞에 위치하는 $\lambda/4$ 파장판 조절을 통해 측정물체의 편광 특성을 이용할 수 있다. $\lambda/4$ 파장판을 회전시킴에 따라 측정물체의 표면 중 특정한 편광방향으로 반사된 부분의 높이만 측정 할 수도 있다.

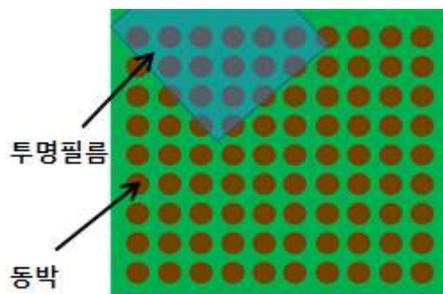
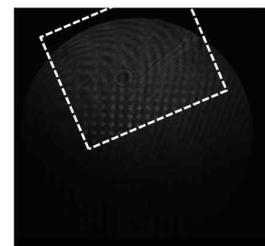
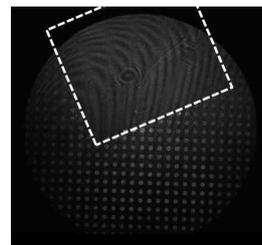


그림 2. 편광 특성 실험에 사용한 타겟
Fig. 2. The used target of the polarization properties experiment.

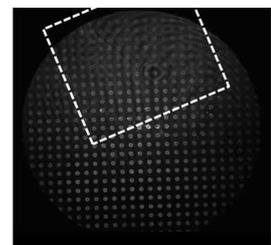
기초실험을 위해, 그림 2와 같이 동박 원이 배열되어 있는 PCB 기판 중 일부분에 투명한 필름을 부착한다. 투명필름이 부착된 부분과 부착되지 않은 부분의 빛이 반사될 때 서로 다른 편광 방향을 가지는 것에 불구하고 투명필름이 부착된 부위와 노출된 부위를 포함하는 타겟 부분의 간섭무늬 영상이 동시에 얻어질 수 있는지에 대한 실험을 진행한다. 그림 3은 편광 특성 실험결과 영상들이다. 측정되는 타겟 앞에 위치하는 $\lambda/4$ 파장판을 회전시킴으로써 타겟에 반사된 빛의 편광 방향을 조절하여 영상을 촬영한다. 영상에서 흰색 점선으로 표시된 부분이 투명필름이 부착되어 있는 부분이다. 파장 가변 레이저는 PCB 바닥부근에서 간섭신호가 관측되도록 미리 세팅 되어있다. 편광방향의 조절과 함께, 그림 3의 (a)의 경우 투명필름이 부착된 부분만(흰색 박스 안) 바닥부의 반사 간섭신호가 관측되는 것을, (b)의 경우 투명필름이 부착되지 않은 부분에만(흰색 박스 바깥쪽) 바닥부의 반사 간섭신호가 관측되는 것을, (c)의 경우 투명필름이 부착된 부분과 부착되지 않은 모든 부분에서 간섭신호가 관측되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 측정 물체의 편광 특성과 측정 시스템의 $\lambda/4$ 파장판의 적절한 조절을 이용해 선택적인 영역의 측정 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 c)의 경우와 같이 투명체 하부의 간섭신호와 노출된 기판의 간섭신호를 동시에 측정할 수 있으면, 기존 FSI 시스템에서는 측정



(a)



(b)



(c)

그림 3. 편광 특성 실험 결과 영상
Fig. 3. The result image of polarization properties experiment.

할 수 없었던 투명체를 PFSI 시스템을 통해 측정할 수 있고 동일한 타겟에서 선택적으로 높이 측정이 가능함을 알 수 있다.

2. 주파수 스캐닝 간섭 시스템 알고리즘

일반적으로 두 빛에 의해 생성된 간섭 신호는 식 (1)과 같이 표현된다^[8].

$$I(x,y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[k2h(x,y)] \quad (1)$$

I_1 과 I_2 는 각각 기준거울과 측정물체에서 반사된 빛의 밝기이며 간섭 신호의 주파수 성분인 $\Phi(x,y)$ 가 높이 정보를 가지고 있다. k 는 주파수의 변화량을 나타내는 변수이므로 수식은 다음과 같다.

$$\Phi(x,y) = k2h(x,y)$$

$$\Delta\Phi(x,y) = \Delta k2h(x,y) \quad (2)$$

대상 물체의 높이인 $h(x,y)$ 는 미리 알고 있는 Δk 와 측정 결과인 $\Delta\Phi$ 를 통해서 얻을 수 있다. 다음의 식(3)을 기본으로 간섭무늬 영상에서 측정 물체의 높이를 계산한다.

$$h(x,y) = \frac{1}{2} \frac{\Delta\Phi}{\Delta k} \quad (3)$$

높이 측정을 위한 전체적인 신호 처리 알고리즘 순서는 그림 4와 같다.

먼저 카메라를 통해 획득한 영상을 전부 불러온 후 영상 데이터를 같은 픽셀별로 정렬한다. 정렬된 간섭신호는 정확한 주파수 계산을 위해 전처리 과정을 수행한

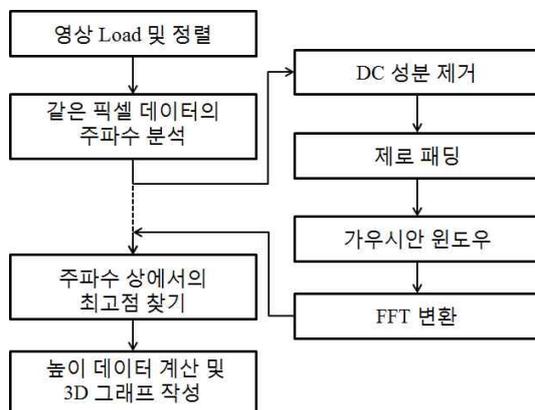


그림 4. 신호 처리 알고리즘 순서도
Fig. 4. Flowchart of signal processing algorithm.

다. 첫 번째로 간섭신호의 평균값을 뺀다. 즉 간섭신호의 DC성분인 $I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ 값들이 제거된다. 두 번째로 제로 패딩을 통해 간섭신호 데이터의 길이를 늘려 주파수 성분의 해상도를 높여준다. 제로 패딩의 길이는 실험적인 결과로 4배 패딩을 수행한다. 세 번째로 가우시안 윈도우를 간섭신호에 곱하여 주파수 성분의 노이즈를 제거해 준다. 전처리 과정이 끝나면 필터링된 신호를 FFT 변환한다. FFT 변환을 하면 간섭신호의 밝기 값의 주파수성분이 검출되고 주파수는 높이에 비례하기 때문에 이로부터 높이를 측정할 수 있다^[10]. FFT 변환된 주파수성분은 이산분포를 띄기 때문에 정확한 주파수를 알기 위해 포물선 보간법을 사용한 최고점 검출을 수행한다. 이산 주파수 신호에서 크기가 가장 큰 지점을 β , $\beta-1$ 지점을 α , $\beta+1$ 지점을 γ 로 정의한 후 세 점을 이용해 포물선 보간법을 통해 실제 포물선 최고점 지점 P 를 계산한다^[11].

$$P = \beta + p$$

$$p = \frac{1}{2} \frac{\alpha - \gamma}{\alpha - 2\beta + \gamma} \quad (4)$$

그림 5는 주파수 최고점 검출 결과 그래프이다. 그래프에서 파란색으로 표시된 값들이 FFT 연산으로 얻어지는 결과이다. 이 결과들 중 제일 값이 큰 세 점을 사용하여 포물선 보간법을 사용한 최고점 검출법을 계산하면 그래프에서 붉은색으로 표시되는 값이 얻어진다. 그래프를 보면 가장 최고점이 계산된 것을 확인할 수 있다. 이후 계산된 주파수 P 는 측정 물체의 높이에 비례하기 때문에 간단히 Δk 를 나눠줌으로써 물체의 높

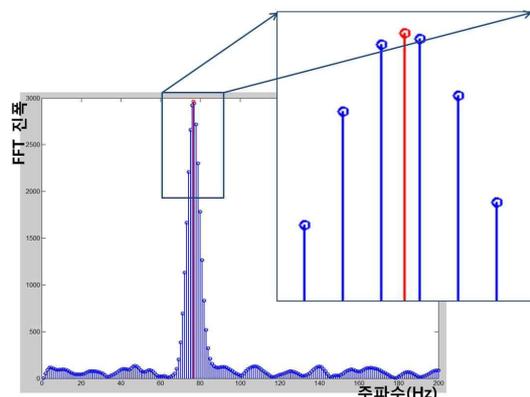


그림 5. FFT 진폭 스펙트럼
Fig. 5. FFT magnitude spectrum.

이를 알 수 있다.

2. GPU 기반 병렬 프로그래밍

가. GPU 기반 병렬 프로그래밍

GPU는 컴퓨터 그래픽을 전문적으로 처리하는 연산 장치이다. GPU는 3D 그래픽을 주로 담당하여 이와 관련된 연산을 할 때 CPU 대신 처리하여 부담을 줄여준다. 그런데 최근 GPGPU라는 개념이 등장하였다. General Purpose Graphic Processing Unit의 약자로 GPU의 성능을 그래픽 처리뿐만 아니라 일반적인 데이터를 처리하는 데도 사용하는 것을 의미한다. 3D 그래픽에서 수많은 데이터를 멀티코어 또는 가속기를 이용하여 빠르게 계산한다는 점에서 범용적인 병렬처리와 유사하다. 이런 유사성을 이용하여 강력해진 GPU 성능을 일반적인 신호처리와 같은 데이터 병렬처리에 이용하고자 하는 것이 GPGPU이다^[12].

CPU와 GPU는 다른 환경과 지향점 때문에 두 프로세서의 트랜지스터 배분은 큰 차이를 보인다. 그림 6은 각각의 프로세서의 집적된 트랜지스터의 배분 비율을 그림의 면적으로 나타내고 있다^[13].

CPU는 연산 명령의 순서 제어를 위한 컨트롤과 데이터 캐시를 위해 많은 부분을 배분한다. 이에 반해 GPU는 3D 그래픽 처리와 같은 대량의 병렬 연산을 처리하기 위해 많은 부분을 ALU에 배분하고 있다. 이것은 단순하지만 강력한 계산 능력을 갖추게 된다. 이렇게 GPU는 뛰어난 계산 능력을 보이지만 일반적인 용도로 사용하기에는 무리가 있는데, 그것은 그래픽을 위한 전용 API 함수와 그래픽 카드의 한계 때문이다. 이러한 한계를 극복하고 효율적으로 GPGPU를 지원하기 위해



그림 6. CPU & GPU 트랜지스터 자원 배분 비율
Fig. 6. CPU & GPU transistor resource distribution ratio.

나온 것이 CUDA이다. Compute Unified Device Architecture(CUDA)는 NVIDIA에서 제공하는 병렬처리 시스템이다. CUDA는 영상의 픽셀과 같이 비순차적, 비 상호작용 데이터 처리에 최적화 되어 있어 영상 처리나 단순 계산 알고리즘에 적합하다^[14,15]. 또한 NVIDIA에선 CUDA용 FFT 라이브러리인 CUFFT를 제공하고 있다. Cooley-Tukey와 Bluestein의 알고리즘을 기반으로 병렬 프로그래밍에 최적화 되어 있다^[16].

따라서 본 논문에서도 GPGPU의 강력한 병렬처리 능력을 적용하여 측정 고속화 시스템을 제안한다. 기존 일반 CPU환경에서 실시간 처리가 불가능 하던 문제를 GPU라는 병렬처리를 할 수 있는 하드웨어를 이용하여 실시간 처리가 가능함을 확인한다^[16].

나. GPU 기반 높이 측정 방법

그림 7은 GPU를 이용한 높이 측정 방법을 나타내고 있다. 전체적인 과정은 그림 4에서 설명한 방법과 동일하다. 99장의 간섭무늬 영상을 불러와 동일 픽셀별로 정렬한 후 데이터를 PC메인 메모리에서 GPU 내부 메모리로 전송한다. 전송이 완료되면 전처리 및 FFT 변환 높이 계산을 병렬로 수행한다. 사용하는 GPU의 모델 및 알고리즘 특성에 따라 최대의 연산 속도를 낼 수 있는 알맞은 개수의 스레드로 분할한다. 병렬 처리를 통해 측정 물체의 높이 계산이 완료되면 결과 데이터를 GPU 내부 메모리에서 PC 메인 메모리로 전송한다. 이후 원하는 포맷으로 높이 데이터를 저장하거나 3D 그래프를 작성한다.

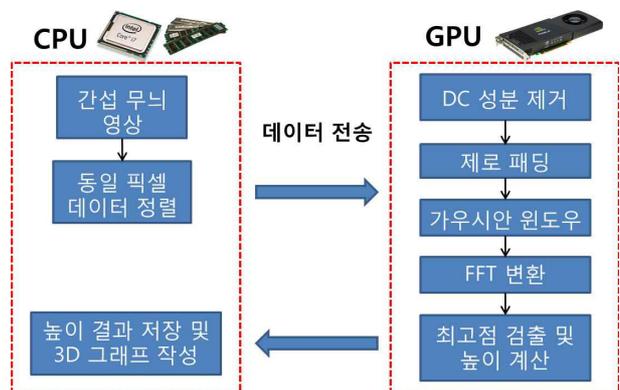


그림 7. GPU를 이용한 높이 측정 방법
Fig. 7. Height measurement method using GPU.

III. 실험 및 결과

1. 높이 측정 정확도 검증 실험

가. 불투명체 높이 측정 실험

지금까지 본 논문에서 제안한 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템과 높이 계산 알고리즘을 적용하여 정확도 검증 실험을 수행한다. 불투명체 높이 정확도 실험에 사용한 타겟은 VLSI Standards 회사의 VLSI SHS - 50.0제품이다. 글자와 문양이 $50\mu\text{m}$ 단차를 가지고 음각으로 새겨져 있다. 본 실험에 사용된 제품의 보증서에 따르면 단차의 높이는 $48.811 \pm 0.262 \mu\text{m}$ 로 명시되어 있다. 실험에 사용한 입력 빛의 파장은 $765\text{nm} \sim 784.8\text{nm}$ 까지 0.2nm 씩 변화시키며 총 99번 변화시킨다.

그림 8은 실험으로 얻은 간섭무늬 샘플영상이다. 이런 영상을 99장 촬영한 후 물체의 높이를 계산한다.

그림 9는 VLSI 타겟을 이용해 계산한 높이를 3차원

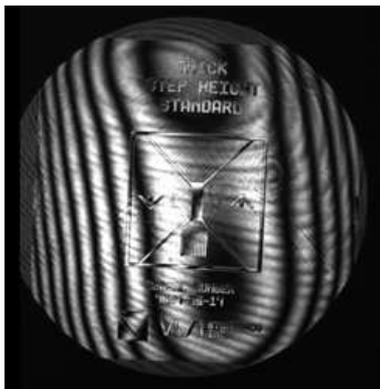


그림 8. 간섭무늬 샘플 영상
Fig. 8. Sample image of interference pattern.



그림 9. 높이 결과 3차원 복원 영상
Fig. 9. Reconstructed height map of object.

그래프로 복원한 결과이다. 실험에 사용한 타겟과 동일하게 글자나 문양이 음각으로 새겨져 있는 것을 확인할 수 있다. 타겟 일부분의 라인 프로파일을 통해 정확한 높이를 분석한 결과 높이가 높은 곳과 낮은 곳의 단차가 $48.726\mu\text{m}$ 이다. 타겟 보증서에 나와 있는 높이 단차 $48.811\mu\text{m}$ 기준으로 오차가 $0.085\mu\text{m}$ 발생한다. 이는 측정 타겟 자체의 오차 범위 안에 속하는 값으로 타겟의 높이를 잘 측정된 것을 알 수 있다. 또한 구현한 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭계 시스템의 반복 정밀도를 측정하기 위해 VLSI 타겟을 사용하여 동일한 환경에서 5번 측정 후 타겟의 일부분의 동일한 지점의 높이 단차를 측정한다. 반복도 실험 결과는 표 1에 정리한다.

표 1. 반복 정밀도 실험 결과
Table 1. Repeatability experiment result.

	1	2	3	4	5
높이 단차	48.81	48.73	48.43	48.77	48.60
표준 편차	0.16				

(단위 : μm)

나. 투명체 높이 측정 실험

본 논문의 연구목적 중 하나인 간섭계 시스템을 이용한 투명체의 높이 측정 실험을 앞선 불투명체 높이 측정 실험과 동일한 방법으로 진행한다. 실험에 사용한 타겟은 불투명 반사체인 거울표면에 $30\mu\text{m}$ 인 투명필름을 부착하여, 투명필름이 부착된 부분과 부착되지 않은 부분의 높이 단차가 정확하게 측정이 되는가를 실험 한다.

그림 10은 실험으로 얻은 간섭무늬 영상이다. 영상을 보면 투명필름이 부착된 부분과 투명필름이 부착되지

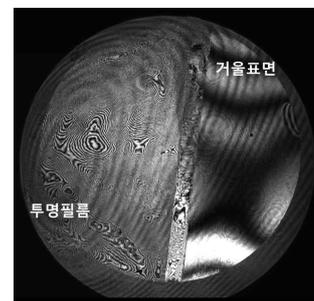


그림 10. 간섭무늬 샘플 영상
Fig. 10. Sample image of interference pattern.

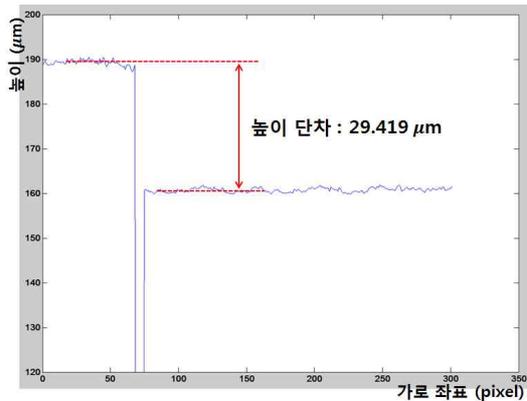


그림 11. 높이 데이터 중 라인 프로파일
Fig. 11. One line profile of height map.

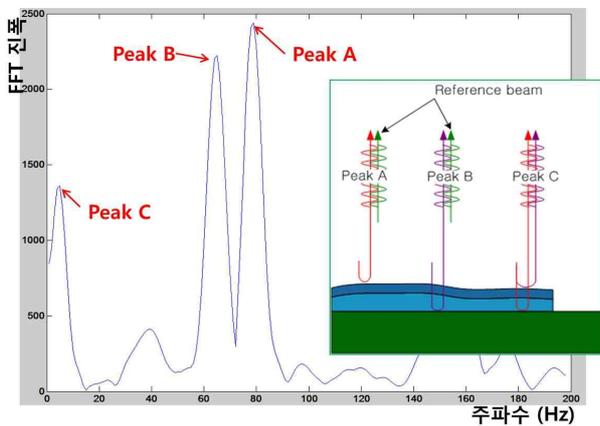
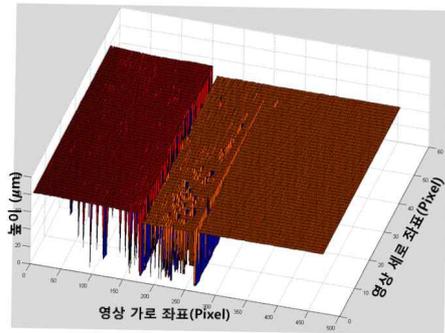


그림 12. 다층 반사 신호의 FFT 진폭 스펙트럼
Fig. 12. FFT magnitude spectrum of multi-layer reflection signal.

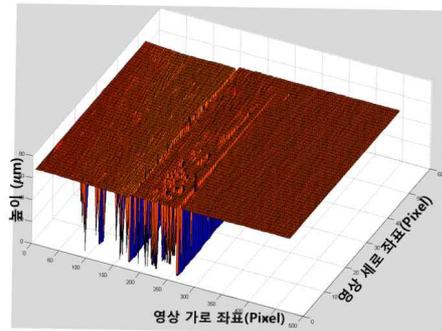
얇은 부분의 간섭무늬가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 99장의 간섭무늬 영상을 이용하여 높이를 계산한다.

그림 11은 계산한 높이 결과 중 일부분의 라인 프로파일을 그린 그래프이다. 그림을 보면 투명필름이 부착된 부분(그래프 중 왼쪽 부분)과 부착되지 않은 부분(그래프 중 오른쪽 부분)의 높이 차이가 $29.42\mu\text{m}$ 이다. 투명필름의 두께가 $30\mu\text{m}$ 이므로 높이 측정 오차는 $0.58\mu\text{m}$ 이다.

그림 12와 같이 반사체 위에 투명체가 있는 물체의 높이를 측정할 경우 여러 개의 간섭신호가 혼합적으로 나타난다. 기준거울에 반사된 빛과 투명체 표면에 반사된 빛의 간섭으로 인해 생성된 피크 A, 기준거울에 반사된 빛과 투명체 밑 불투명체에 반사된 빛의 간섭으로 인해 생성된 피크 B, 그리고 투명체 표면 반사 빛과 투



(a) 투명필름 표면 측정



(b) 투명필름 밑 거울 표면 측정

그림 13. 피크 선택에 따른 높이 결과 3D 복원
Fig. 13. Reconstructed height map of object according to peak selection.

명체 밑 불투명체에 반사된 빛의 간섭으로 인해 생성된 피크 C까지 세 개의 피크, 즉 높이가 측정되는 것을 확인할 수 있다. 데이터 프로세싱을 통해 세 개의 높이 중 선택적으로 원하는 높이 값을 계산할 수 있다. 그림 13은 피크 선택을 통해 투명필름의 표면높이, 투명필름 밑의 거울높이를 각각 계산하여 3차원 그래프로 복원한 결과이다. (a)의 경우 투명필름의 표면의 높이를 측정해서 투명필름이 부착된 부분과 그렇지 않은 부분 사이의 단차가 있는 것을 확인할 수 있고, (b)의 경우에는 투명필름의 바닥면의 높이를 측정한 결과이기 때문에 단차가 없는 것을 확인할 수 있다.

PFSI 시스템의 성능 비교를 위해 상용 제품인 OLYMPUS사의 OLS3000 레이저 공초점 현미경을 사용하여 높이 측정 실험을 한다. 공초점 기법은 일반 광학 현미경과 기본적인 원리는 같으나 CCD에 도착하는 빛이 직경 $20 \sim 60\mu\text{m}$ 의 바늘구멍(pin hole)을 거치는 것이 주요 차이점이다. 측정 물체에 반사되어 돌아오는 빛 중에 초점이 맞는 면의 빛만 바늘구멍을 통과하여 CCD에 맺히게 된다. 초점이 맞는 지점에서의 광경로차를 이용해 높이를 측정한다^[17].

PFSI 시스템 실험과 동일하게 불투명체 표면에 30 μm 두께의 투명필름을 부착 후 공초점 현미경을 이용해 높이를 측정한다. 현미경의 대물렌즈는 5배율 렌즈를 사용한다. 그림 14는 공초점 현미경을 이용해 높이 결과를 복원한 3D 영상과 라인 프로파일 결과를 캡처한 영상이다. 투명필름이 부착된 부분과 부착되지 않은 부분의 측정된 높이 단차는 30.25 μm 로 측정 오차는 0.25 μm 이다. 높이 측정 오차는 PFSI 시스템과 비슷하지만 높이 결과의 편차가 심하게 측정되었다. 공초점 현미경의 경우 높이 편차가 $\pm 5\mu\text{m}$ 인 반면 PFSI 시스템의 경우 $\pm 1\mu\text{m}$ 이다. 이는 PFSI 시스템을 사용할 경우 더욱 높은 분해능으로 물체의 높이를 측정할 수 있음을 나타낸다.

공초점 기법은 물체를 이동시키며 점대점 방식으로 높이를 측정해야 하므로 넓은 영역을 측정하기 위해선 많은 시간을 필요로 한다. 실험에서 높이 500 μm 의 범위를 2 μm 간격으로 252장 영상을 이용하여 높이를 측정할 때 158초가 소요되었다. 측정된 물체의 영역은

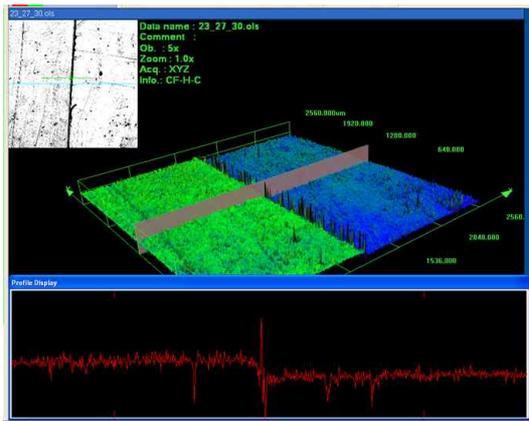


그림 14. 공초점 현미경을 이용한 높이 측정 결과 영상
Fig. 14. Image of height measurement result using confocal microscope.

표 2. PFSI 시스템과 공초점 현미경 성능 비교
Table 2. Performance comparison(PFSI system vs Confocal microscope).

	PFSI	공초점 현미경
측정 오차	0.58 μm	0.25 μm
측정 시간	2초	158초
FOV	25mm \times 25mm	2560 μm \times 2560 μm
높이 편차	$\pm 1\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$

2560 μm \times 2560 μm 이다. 또한 투명체를 측정할 경우 투명체의 표면과 바닥면의 반사율이 비슷하지 않을 경우 표면과 바닥면의 높이를 동시에 측정할 수 없다는 단점이 있다. 이에 반해 PFSI 시스템은 비슷한 성능의 높이 정확도를 가지면서 넓은 영역을 한번에 측정할 수 있고 투명체의 표면과 바닥면을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다.

2. CPU환경에서 측정 알고리즘 연산 시간

높이 측정 알고리즘의 연산 시간 측정을 위하여 아래 환경에서 실험을 진행한다.

기본적인 CPU 환경에서 알고리즘을 수행하며 영상 블러오기 및 FFT 연산을 위해서 추가로 컴퓨터 비전 소프트웨어인 OpenCV 2.3 라이브러리를 사용한다^[18]. 실험에 사용한 영상은 표 4와 같이 서로 크기가 다른 4 종류의 영상을 사용하여 전체 알고리즘 연산에 소요되는 시간을 측정한다. 한 영상 당 총 5번 시간을 측정하여 그 값의 평균을 계산한다.

표 4의 (a) 영상, 즉 0.012MB 영상의 경우 알고리즘 연산에 소요되는 총 시간이 1591msec 약 1.6초, (d) 영상(0.5MB 영상)의 경우에는 73221msec 소요된 것으로 측정된다. 실험에 사용되는 영상의 크기가 증가할수록

표 3. PC 환경 실험 셋업(하드웨어 & 소프트웨어)
Table 3. Setup of experiment (Hardware & Software).

	기본 환경	추가요소
CPU	Intel(R) core(TM) i7 930	
RAM	4GB	
O.S	Microsoft Windows7 (64bit)	
S.W	Visual studio 2008	OpenCV 2.3

표 4. 실험에 사용된 영상 종류
Table 4. Kind of image used in the experiment.

분류 영상 번호	영상 크기 (MByte)	픽셀 크기 (Pixel x Pixel)
(a)	0.012	92 x 127
(b)	0.1	223 x 502
(c)	0.3	574 x 538
(d)	0.5	760 x 706

표 5. 알고리즘 연산 평균 소요 시간
Table 5. Average of operation time of algorithm.

영상 번호 \ 분류	총 소요 시간 (msec)
(a)	1591
(b)	15260
(c)	42055
(d)	73221

그에 비례하여 연산에 소요되는 총 시간이 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3. GPU환경에서 측정 알고리즘 연산 시간

GPU환경에서 높이 측정 알고리즘의 연산 시간 측정을 위해 아래 환경에서 실험을 진행한다.

기본적인 CPU 환경에서 알고리즘을 수행하며 영상 불러오기를 위해 컴퓨터 비전 소프트웨어인 OpenCV 2.3 라이브러리를 사용한다. 또한 GPU는 Tesla C1060을 사용하며 GPU 개발 환경으로 CUDA SDK 4.1 및 CUDA Toolkit 4.0을 사용한다. 실험에 사용한 Tesla C1060 모델의 자세한 사양은 다음과 같다^[19].

실험에 사용된 영상은 2절에서 CPU 환경에서 측정

표 6. GPU 환경 실험 셋업(하드웨어 & 소프트웨어)
Table 6. Setup of experiment (Hardware & Software).

	기본 환경	추가 요소
CPU	Intel(R) core(TM) i7 930	
RAM	4GB	
O.S	Microsoft Windows7 (64bit)	
S.W	Visual studio 2008	OpenCV 2.3
GPU	Tesla C1060	CUDA SDK 4.1 CUDA Toolkit 4.0

표 7. Tesla C1060의 상세 사양
Table 7. Technical specifications of Tesla C1060.

특징	Tesla C1060
CUDA 코어	240개
메모리 크기	4GB
메모리 대역폭	102GB/s
장착 슬롯	PCI Express x 16 (Gen 1 or 2)

표 8. 알고리즘 연산 평균 소요 시간 (GPU 환경)
Table 8. Average of operation time of algorithm (in GPU).

영상 번호 \ 분류	데이터 전송시간	알고리즘 연산시간	총 연산시간
(a)	2.59	11.91	14.50
(b)	31.51	106.24	137.75
(c)	86.41	197.91	284.32
(d)	148.66	342.15	490.81

(단위 : msec)

알고리즘 연산 시간을 계산하기 위해 사용한 것과 같다. GPU를 사용할 경우 컴퓨터 메인 메모리에서 GPU 내부 메모리로 데이터를 전송하는 시간이 추가적으로 필요하다. 따라서 영상 데이터를 전송하는데 소요되는 시간과 GPU 내부에서 알고리즘을 연산하는데 소요되는 시간을 따로 측정한다. 한 영상 당 총 5번 시간을 측정하여 그 값의 평균을 계산한다.

컴퓨터 메인 메모리에서 GPU 내부 메모리로 데이터를 전송하는 시간과 알고리즘 연산시간을 더하여 총 연산시간을 계산한다. (a) 영상의 경우 총 연산시간은 14.50msec이다. (d) 영상의 경우 총 연산시간은 490.81msec이다. 동일한 영상을 CPU환경에서 구동할 경우 1591msec, 73221msec 소요된 것과 비교해 보면 평균 적으로 약 130배 정도 빠른 것을 확인할 수 있다. 이는 영상처리와 같이 단순하지만 반복적인 연산을 할 경우 GUP의 많은 수의 코어를 사용하여 병렬처리 하면 매우 효과적임을 증명하는 것이다.

IV. 결 론

반도체나 소형 PCB 기판과 같은 아주 작은 device를 검사하는 검사장비의 빠르고 정확한 검사를 위해 간섭계를 사용하는 경우가 많이 있다. 많은 간섭계 방법 중 측정 시간과 범위에 있어 비교적 제약조건이 적은 주파수 스캐닝 간섭법(Frequency Scanning Interferometry)을 적용하였다.

더욱 다양한 특성을 가지는 물체의 높이 측정을 위해 기존 주파수 스캐닝 간섭 시스템에 편광 분석법을 추가하여 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템을 구현하였다. 또한 GPU 기반 병렬 프로그래밍을 통해 전반적인

연산 속도를 고속화 하여 실시간 3차원 높이 측정 시스템을 제안하였다.

1) 편광 분석법을 적용한 편광 기반 주파수 스캐닝 간섭 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템을 사용해 투명한 물체 즉 반사율이 낮고, 편광 회전이 발생하는 물체의 경우에도 정확한 높이를 측정할 수 있었다. 편광 빔 스플리터 사용을 통한 빔 스플리터 내부 간섭 노이즈 제거, 편광판의 회전을 통한 광량 분배 가능 및 투명체 측정의 경우 투명체의 표면뿐만 아니라 투명체 바닥면의 높이도 측정할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

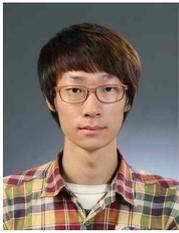
2) 또한 GPU 기반 병렬 프로그래밍 사용을 통해 알고리즘 연산 시간을 단축할 수 있었다. 몇 가지 실험을 통해 높이 측정을 위한 연산 시간이 기존 CPU환경보다 약 130배 빨라진 것을 확인할 수 있었다. 알고리즘 연산 시간 단축을 통해 전체적인 높이 측정 고속화를 구현하였다.

향후 지속적인 연구를 통해 1) 구현한 알고리즘의 최적화와 더불어 신호 처리 알고리즘의 보안을 통해 간섭 시스템 입력 빛의 파장의 변화율을 지금 보다 작게 하여 간섭 신호 이미지 수집에 필요한 물리적인 시간을 줄이면서 기존과 동일한 정확도를 유지할 수 있게 구현해야 한다. 2) 다양한 투명체의 높이를 측정을 위하여 FFT 결과에서 다중피크 발생 시 정확한 피크 선택 알고리즘과 투명체의 굴절률을 고려하여 높이를 계산하는 알고리즘을 구현해야 한다. 3) 또한 GPU의 특성상 컴퓨터 메인 메모리에서 GPU 메모리로 데이터를 전달해야 하는 필요성이 있다. 이 전달 과정에서 많은 시간을 소요 하는데 이 전송 시간을 줄일 수 있는 방법을 연구하여 더욱 빠른 성능의 측정 시스템을 구현해야 한다.

REFERENCES

- [1] http://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/kaigai/20120921_561021.html.
- [2] 주관중, 김동구, 윤형진, 박형무, "Flip-chip 본딩 기술 현황," 한국전자통신연구원 전자통신동향분석, 제 9권, 제 1호, pp. 109-122, 1994
- [3] 윤정원, 김중용, 구자명, 하상수, 노보인, 문원철, 문정훈, 정승부, "전자 패키징의 플립칩 본딩 기술과 신뢰성," 대한용접·접합학회지, 제 25권, 제 2호, pp. 6-15, 2007
- [4] Frank Chen, Gordon M. Brown and Mu min Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Optical Engineering*, vol. 39, issue. 1, pp. 10-22, 2000.
- [5] Eric P. Goodwin and James C. Wuant, *Field Guide to Interferometric Optical Testing*, SPIE, 2006.
- [6] 김경일, 이동열, 고윤호, "백색광 위상천이 간섭계를 위한 개선된 삼차원 형상 측정 방법," *전자공학회 논문지*, 제 47권 SP편, 제 2호, 51-60, 2010.
- [7] 송민호, 이병호, "가시광 영역의 저간섭성 광원을 이용한 마이켈슨 간섭계," *전자공학회논문지-A*, 제 33권, 제10호, pp. 2102-2109, 1996.
- [8] Susumu Kuwamura and Ichirou Yamaguchi, "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement," *Applied Optics*, vol. 36, issue. 19, pp. 4473-4482, 1997.
- [9] E. Hecht, *Optics*, Addison Wesley, New York & Boston, 1998.
- [10] H. Muhamedshlih, X. Jiang and F. Gao, "Comparison of Fast Fourier Transform and Convolution in Wavelength Scanning Interferometry," *Proceedings of SPIE*, vol. 8082, 2011.
- [11] http://ccrma.stanford.edu/~jos/parshl/Peak_Detection_Steps_3.html.
- [12] 정영훈, CUDA 병렬프로그래밍, 프리렉, 2011
- [13] NVIDIA, *CUDA C Programming Guide 3.2*, NVIDIA, 2010.
- [14] 김성수, 김동헌, 이상규, 임인성, "최적화된 CUDA 소프트웨어 제작을 위한 프로그래밍 기법 분석," *정보과학회논문지 : 컴퓨팅의 실제 및 레터*, 제 16권, 제 7호, pp. 775-787, 2010.
- [15] NVIDIA, *CUDA Toolkit 4.1 CUFFT Library*, NVIDIA, 2012.
- [16] 이승현, 김민영, "다중 카메라 기반 대영역 고해상도 영상획득 시스템과 실시간 영상 정합 알고리즘," *전자공학회논문지*, 제49권 SC편 제4호, pp. 10-16, 2012.
- [17] 신은성, 남기봉, "회전원판식 공초점 현미경의 구성과 광학특성," *한국광학회지*, 제8권 제4호, pp. 255-259, 1997.
- [18] 임동훈, 초보자를 위한 OpenCV를 이용한 영상처리, 자유아카데미, 2008
- [19] http://www.nvidia.com/docs/IO/43395/NV_DS_Tesla_C1060_US_Jan10_lores_r1.pdf.

저 자 소 개



이 승 현(학생회원)
2011년 영남대학교 전자공학과
학사 졸업.
2013년 경북대학교 IT대학
전자전기컴퓨터학부
석사 졸업
2013년~현재 경북대학교 IT대학
전자공학부 박사 과정

<주관심분야 : 로봇 비전, 영상 신호처리, 병렬 프로그래밍, 영상 기반 수술 로봇>



김 민 영(정회원)-교신저자
1996년 KAIST 기계공학과
학사 졸업.
1998년 KAIST 기계공학과
석사 졸업.
2004년 KAIST 기계공학과
박사 졸업.

2004년~2005년 미래산업(주) 선임연구원
2005년~2009년 고영테크놀러지(주) 책임연구원
2009년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부
조교수

<주관심분야 : 로봇 비전, 광기전공학, 로봇센서
및 구동 시스템, 인간로봇 상호작용>