

논문 2006-43SC-6-3

# 펄초 레이저 미세가공을 위한 3차원 형상 복원 시스템의 최적설계 및 구현

(Optimal Design and Implementation of 3D Shape Restoration System  
for Femto-second Laser Micromachining)

박정홍\*, 이지홍\*\*, 고윤호\*\*, 박영우\*\*

(Jeonghong Park, Jihong Lee, Yunho Ko, and Youngwoo Park)

## 요약

본 논문에서는 평판형 디스플레이 장치의 필수 구성품인 투명한 ITO(Indium-Tin-Oxide) 유리를 가공하기 위한 펄초(Femto-second) 레이저 미세가공의 효율을 극대화하기 위해 가공 대상체의 정보를 추출하는 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 레이저 스캐닝 시스템을 활용하여 펄초 레이저 빔의 초점 거리 오차와 각도 오차를 사전에 계측하고 3차원으로 형상을 복원한다. 본 시스템은 라인 스캔 레이저, 고해상도 카메라, 리니어 모션 가이드(Linear Motion Guide), 시스템 제어부로 구성되어 있다. 또한 본 시스템의 모델링을 통한 카메라와 레이저의 위치와 측정 결과와의 관계를 나타낼 수 있는 민감도 지수를 정의하고, 이를 활용하여 더욱더 정확한 측정이 가능한 시스템을 설계할 수 있었다. 가공 대상체인 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하고 3차원으로 형상을 복원하여 주사 탐침 현미경(SPM)으로 얻은 결과와 비교하여 본 시스템의 성능을 검증하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a 3D shape restoration system which measures height and surface shape of transparent ITO glass and delivers errors in focal length and incident angle of laser beam to femto-second laser micromachining. The proposed system is composed of a line scan laser, a high resolution camera, a linear motion guide synchronized to image capturing, and a control station. Also, we define the sensitivity indices that represent a relation between measurement error and a position of a camera and scan laser, and utilize it for optimum design. The results of the proposed system are compared with results of SPM(Scanning Probe Microscope) and prove the usefulness of the system.

**Keywords :** 3D shape restoration system, Transparent ITO glass, Sensitivity, Optimum design

## I. 서론

종래의 레이저 미세가공 기술로서는 고밀도, 고집적화 되어가고 있는 산업추세에 정밀 패턴의 가공이 어려워 새로운 개념의 공정과 첨단 레이저 가공 기술에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 특히 유리와 같은

투명재질의 경우 일반 레이저를 이용한 미세가공이 쉽지 않았다. 게다가 레이저의 긴 펄스폭으로 인하여 조사된 에너지의 대부분이 열전달을 통해 주변으로 전파되어 재질의 열적 변형이 발생하게 된다. 따라서 투명재질을 가공하기 위해서 기존의 레이저나 레이저 가공 방법을 달리 적용해야 하며, 그 대안 중의 하나가 펄초 레이저를 이용하는 것이다.

펄초 레이저는 극히 짧은 펄스폭으로 인해 열적 변형이 거의 없으며, 재료의 열 반응 속도보다 빠른 시간 내에 빔을 조사하므로 비열적 성질을 가지고 있다. 또한 펄초 레이저의 높은 침투 출력은 투명 재질 내에서 다광자 흡수를 일으켜 이론적으로는 파장에 관계없이

\* 학생회원, \*\* 정회원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단  
(BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University)

※ 본 논문은 산업자원부의 “지역혁신 인력양성 사업”의 연구 결과로 수행되었습니다.

접수일자: 2006년7월3일, 수정완료일: 2006년10월31일

이 대부분의 재질을 가공할 수 있는 큰 특징이 있다. 펄소 레이저와 재료간의 상호 작용에 대한 연구는 1990년대 중반부터 미국 국립연구소의 하나인 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)을 중심으로 진행되었으며, 펄소 레이저 가공이 기존의 다른 레이저 가공보다 우수함을 이론적, 실험적으로 증명하였다. 이를 이용한 가공은 기존의 기계적 가공에 비해 높은 정밀도를 필요로 하는 첨단 영상 산업 분야의 소재 및 정밀 부품 가공에 널리 보급되어 초미세 가공기술 분야에 활발한 응용이 이루어지고 있는 추세이다<sup>11-14</sup>. 펄소 레이저 가공의 정밀도를 높이기 위해서는 임의 가공영역에서의 위치변화에 따른 초점 거리 오차와 가공물의 기울기에 따른 각도 오차를 포함하는 최적 초점 오차를 사전에 계측하여 펄소 레이저 빔의 효율을 높여야만 한다<sup>15-17</sup>.

기존의 선행연구<sup>18-12</sup>에서는 레이저 스캐닝 시스템을 활용하여 일반적인 조형물과 같은 불투명 물체의 표면 형상을 측정하고, 3차원 영상으로 측정 물체의 형상을 복원하였다. 그러나 기존의 선행 연구에서 제안한 시스템으로는 플라즈마 디스플레이(PDP)의 전면에서 사용되는 투명 전도성 금속막인 ITO 유리와 같은 투명한 재질의 높이와 표면 형상을 측정할 수가 없다. 또한, 수~수십  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 ITO 유리의 높이와 표면 형상에 대한 미세한 측정이 불가능하다. 따라서 플라즈마 디스플레이(PDP)의 질(quality)을 결정하는 투명한 ITO 유리의 미세가공에 앞서 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하기 위한 시스템이 필요하며, 측정시 발생하는 오차를 감소시키기 위한 시스템의 최적 설계도 필요하다.

본 논문에서는 펄소 레이저를 이용한 미세가공의 효율을 극대화하기 위해 비접촉식 방식인 레이저 스캐닝 시스템을 활용하여 투명한 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하고, 펄소 레이저 빔의 초점 거리 오차와 각도 오차를 사전에 계측하기 위한 3차원 형상 복원 시스템을 설계하였다. 그리고 시스템의 측정 결과는 카메라와 레이저의 위치에 매우 의존적이기 때문에 최적의 측정 결과를 획득하기가 쉽지 않다. 그래서 설계된 시스템의 모델링을 통한 카메라와 레이저의 위치와 측정 결과와의 관계를 나타내는 민감도 지수를 정의하고, 본 시스템에 적용하여 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정할 때에 발생하는 오차를 감소시켜 보다 정밀한 실험이 가능한 최적의 시스템 설계 및 구현하였다.

본 논문의 전개는 다음과 같다. II장에서는 투명한 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하고, 펄소 레이

저 빔의 초점 거리 오차와 각도 오차 계측하기 위한 레이저 스캐닝 시스템과 3차원 형상 복원에 대해서 서술한다. III장에서는 카메라와 레이저의 위치와 측정 결과와의 관계를 나타낼 수 있는 민감도 지수에 대해 서술하고, 초점 거리 오차와 각도 오차 계측에 대해서 서술한다. 마지막 IV장에서 가공 대상 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하고 3차원으로 형상을 복원 및 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하여 주사탐침 현미경으로 얻은 결과와 비교하여 본 시스템의 성능을 검증하였다.

## II. 시스템 구성

본 논문에서 제안한 전체 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 ITO 유리의 높이와 표면 형상을 측정하기 위해 고해상도 CCD 카메라와 라인 스캔 레이저를 활용한 레이저 스캐닝 시스템과 앞서 측정된 결과로부터 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하기 위해 ITO 유리의 형상을 3차원으로 복원하는 3차원 형상 복원 시스템으로 구성되어 있다. 전체 시스템은 다음과 같은 순서에 의해 동작된다. 첫 번째 단계에서는 3차원 형상 복원 시스템에서 커맨드 채널을 통해 레이저 스캐닝 시스템의 카메라 동작 및 파라미터를 설정하고, 두 번째 단계에서는 레이저 스캐닝 시스템에서는 라인 스캔 레이저 빔을 측정 물체의 표면에 주사시킨다. 세 번째 단계는 고해상도의 CCD 카메라는 물체의 표면과 물체가 놓여있는 리니어 모션 가이드에 맺힌 라인 스캔 레이저 빔의 위치 정보를 획득한다. 카메라가 획득한 정보는 데이터 채널을 통해 연결된 3차원 형상 복원 시스템의 데이터 버퍼로 전송된다. 3차원 형상 복원 시스템은 전

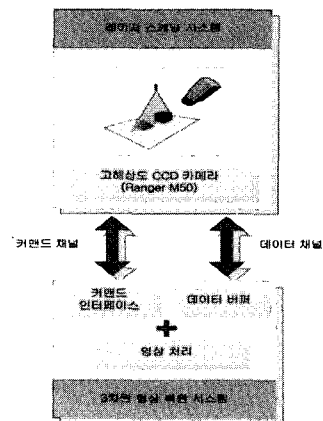


그림 1. 전체 시스템 개략도  
Fig. 1. Block diagram of the entire system.

송된 데이터를 이용하여 물체의 형상을 복원하는 역할을 한다. 복원된 영상으로부터 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하게 된다.

1. 레이저 스캐닝 시스템

레이저 스캐닝 시스템은 그림 2와 같이 라인 스캔 레이저, 고해상도 CCD 카메라 그리고 측정 물체를 이동시키기 위한 리니어 모션 가이드로 구성되어 있다. 기본적으로 레이저 스캐닝 시스템의 라인 스캔 레이저는 가공기판에 수직조사가 가능하도록 설치하고, 카메라의 위치는 가공물의 표면에 맺힌 라인 스캔 레이저 빔을 감지하도록 레이저와 비스듬한 위치에 설치하였다. 측정 물체의 크기 및 재질 등이 변경되었을 경우 최적화된 시스템 설정 조건하에서 측정을 진행할 수 있도록 레이저와 카메라의 위치 이동이 원활하도록 설계되었다.

먼저 측정하고자 하는 물체의 표면을 스캐닝하기 위한 라인 스캔 레이저의 사양은 다음 표 1과 같다. 시스템의 정밀도를 결정하는 중요한 부분은 라인 스캔 레이저의 선폭이기 때문에 최대한의 정밀도를 얻기 위해 8  $\mu\text{m}$ 의 선폭을 가지는 라인 스캔 레이저를 선정하였다.

다음으로 물체의 표면에 맺힌 라인 스캔 레이저의 빔의 위치를 감지하여 물체의 높이와 표면 형상 정보를 획득하기 위한 고해상도 CCD 카메라의 사양은 다음

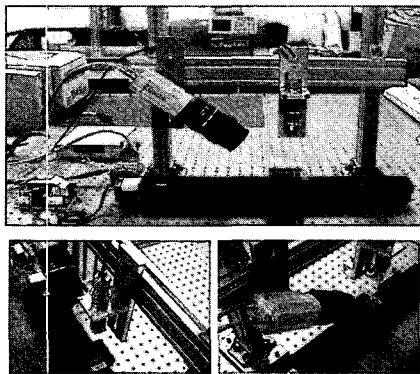


그림 2. 레이저 스캐닝 시스템  
Fig. 2. Designed laser scanning system.

표 1. 라인 스캔 레이저 사양  
Table 1. Specifications of the line scan laser.

사 양	규 격
코 드	13LN-40 M125S
선 길이	38mm
선폭	8 $\mu\text{m}$
초점 거리	119mm
팬 각도(Fan Angle)	11.2°

표 2와 같다. 카메라 CCD의 화소(pixel)당 크기가  $x, y$  축 방향으로 9.5  $\mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 IVP 사의 Ranger M50 카메라를 선정하였다. 카메라는 레이저에 의해 물체의 표면에 조사된 레이저의 빔을 감지할 뿐만 아니라, 카메라 영상에 맺힌 레이저 빔의 위치로부터 물체의 표면 형상 정보를 획득한다. 즉, 카메라에 내장되어 있는 컨트롤러에서 카메라의 CCD에 맺힌 영상의 정보를 실시간으로 디지털 신호로 변환하고, 내부 연산 및 알고리즘을 수행하여 물체의 높이와 표면 형상 정보를 획득한다. 획득한 높이와 표면 형상 정보를 데이터 채널을 통해 3차원 영상 복원 시스템의 데이터 버퍼로 전송된다.

레이저 스캐닝 시스템은 라인 스캔 레이저가 고정되어 있는 상태에서 레이저의 빔을 가공물에 조사하는 방식이기 때문에 물체의 전체적인 표면을 스캐닝하기 위해서 가공물을 이동시키기 위한 이송장치가 필요하다. 그러나 펄토초 레이저 가공기에 직접 부착하여 측정할 수 없기 때문에 측정에 사용한 리니어 모션 가이드를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 리니어 모션 가이드는 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 물체를 보다 정밀하게 측정하기 위해서 수  $\mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는다.

2. 3차원 형상 복원 시스템

3차원 형상 복원 시스템의 목적은 레이저 스캐닝 시스템을 통하여 얻은 물체의 높이와 표면 형상을 나타내는 2차원 정보인 프로파일을 이용해서 3차원으로 물체의 형상을 복원하여 사용자에게 물체의 높이와 표면 형상에 대한 정보를 제공하고, 제공된 정보로부터 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하기 위함이다. 그림 3과 같이 3차원 형상 복원 시스템에는 레이저 스캐닝 시스템의 일부 기능을 제어할 수 있는 기능이 포함되어 있으며, 레이저 스캐닝 시스템의 편리한 제어와 고정밀도의 높이와 표면 형상에 대한 정보를 획득하기 위해 카메라에 내장되어 있는 알고리즘 선택 및 파라미터를 설정할 수 있는 기능과 카메라로부터 획득한 데이터에 포

표 2. 고해상도 CCD 카메라 사양  
Table 2. Specification of high resolution CCD camera.

사 양	규 격
코 드	Ranger M50
화소의 크기	9.5 $\times$ 9.5 $\mu\text{m}$
CCD의 크기	1536 $\times$ 512 pixel
데이터 전송 속도	330Mbit/s
성 능	최대 10,000 profiles/s

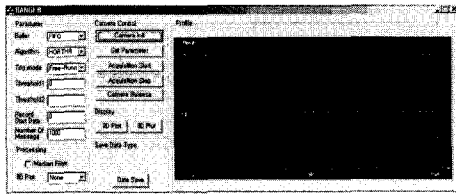


그림 3. 3차원 형상 복원 시스템  
Fig. 3. 3D shape restoration system.

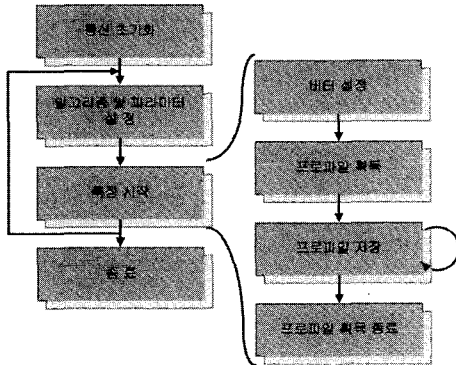


그림 4. 프로파일 획득 과정  
Fig. 4. Process of acquiring profiles.

함되어 있는 노이즈를 제거하기 위한 영상처리 기능이 포함되어 있다.

3차원 형상 복원 시스템은 레이저 스캐닝 시스템의 기능적인 면을 향상시키고, 사용자에게 편리한 인터페이스를 제공하기 위해 VC++의 MFC를 사용하였으며, 레이저 스캐닝 시스템으로부터 획득한 정보로부터 3차원으로 형상을 복원하기 위해 DirectX 프로그램을 사용하였다.

그림 4는 본 논문에서 사용한 카메라에서 측정 물체의 높이와 표면 형상에 대한 정보를 포함하고 있는 프로파일(Profile)을 획득하는 과정이다. 먼저 커맨드 채널을 통해 카메라와 영상 처리를 위한 PC간의 통신을 초기화한다. 그리고 물체의 재질 또는 상태에 따른 적합한 알고리즘 선택 및 임계값(Threshold), ROI(Region of Interest), 동기화 모드, 획득하려는 프로파일의 수와 관련된 파라미터들을 설정한다. 측정 결과에 가장 큰 영향을 미치는 중요한 파라미터로는 라인 스캔 레이저의 빔을 제외한 간섭광을 차단하기 위한 임계값 파라미터이다. 임계값은 측정할 때에 주위 환경과 측정 물체의 재질과 상태, 형상에 따라 달라지므로 반복적인 실험을 통하여 설정한다. 측정이 시작되면, 측정 결과를 저장하기 위한 버퍼의 형식을 설정하고, 카메라는 물체의 표면에 조사된 라인 스캔 레이저 빔을 감지하여 물체의 높이와 표면 형상 정보를 포함하는 프로파일을 획득

한다. 획득한 프로파일은 앞서 설정된 버퍼에 데이터 채널을 통하여 전송되며, 파라미터 설정단계에서 설정된 획득하고자 하는 프로파일의 수만큼 버퍼에 저장된다.

본 논문에서 제안한 시스템을 이용하여 물체의 높이와 표면 형상 정보를 측정할 때, 라인 스캔 레이저의 강한 빛을 제외한 간섭광인 조명에 의한 노이즈가 측정 결과의 오차를 발생시키는 요인으로 작용하기 때문에 외부 빛의 차단이 필수적이다. 그래서 빛 차단용 덮개를 사용하여 측정 결과에 영향을 미치는 요인인 간섭광을 최소화하였으며, 실제 펄토초 레이저 가공 환경과 동일한 실험 환경을 조성하여 측정 결과의 오차를 최소화하였다.

### III. 민감도 지수 및 초점 오차 해석

#### 1. 민감도 지수

레이저 스캐닝 시스템의 측정 결과인 측정 물체의 높이와 표면 형상 정보는 카메라와 레이저의 위치에 매우 의존적이기 때문에 측정하는 과정에서 측정자 고유의 습성으로 측정상 또는 조정상 불가피하게 발생하는 오차에 의해 정확한 측정 결과를 얻기가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해서는 측정 결과에 큰 영향을 미치지 않는 카메라와 라인 스캔 레이저의 위치 선정이 필요하다. 먼저 측정 결과와 카메라와 레이저의 관계를 알아보기 위해 시스템의 모델링을 하고, 카메라와 레이저의 위치 변화에 따른 측정 결과의 변화량을 나타내는 민감도 지수를 정의하여 측정 결과에 영향을 거의 미치지 않는 민감도 지수가 가장 낮을 때의 카메라와 라인 스캔 레이저의 위치를 찾아내고자 한다. 그림 5는 카메라와 라인 스캔 레이저 사이의 위치와 측정 결과의 관계를 알아보기 위해 레이저 스캐닝 시스템의 모델링을 나타낸 것이다.

이 모델링을 통하여 카메라와 레이저의 위치와 카메라의 CCD에 맺힌 물체의 높이의 변화에 대한 관계식은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$h_{vsb} = \left(\frac{d_{cob}}{d_{com}}\right) \times \left(\frac{h_{object} \times D_{cl}}{d_{cob} + d_{cob}^*}\right) \times \sin\theta \quad (1)$$

여기에서  $h_{vsb}$ 는 카메라가 측정 물체를 바라보고 있는 View 평면에 투영된 측정 물체의 높이이며,  $d_{cos}$ ,  $d_{com}$ ,  $d_{cob}$ 는 각각 카메라와 View 평면에 투영된 물체의 표

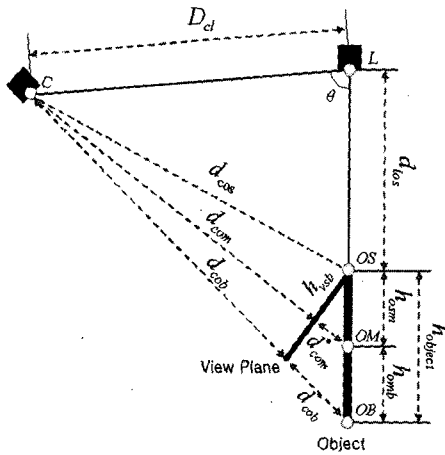


그림 5. 레이저 스캐닝 시스템의 모델링

Fig. 5. Modeling of a laser scanning system.

면, 중간, 바닥지점까지의 거리이며,  $d^*_{com}$ ,  $d^*_{cob}$ 는 각각 View 평면에서 실제 물체의 중간, 바닥지점까지의 거리이다. 그리고  $h_{object}$ 는 측정 물체의 높이,  $h_{osm}$ 와  $h_{omb}$ 는 각각 측정 물체의 표면에서 중간, 중간에서 바닥지점에서의 높이이다.  $D_{cl}$ 은 카메라와 라인 스캔 레이저와의 거리이고  $\theta$ 는 카메라와 레이저가 이루는 각이다.  $d_{cos}$ ,  $d_{com}$ ,  $d_{cob}$ ,  $d^*_{com}$ ,  $d^*_{cob}$ 는 모두  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 를 이용하여 표현할 수 있다. 식 (1)의 결과를 이용하여 각각  $D_{cl}$ 과  $\theta$  값의 변화에 따라 측정 결과에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 로 표현된  $h_{vsb}$ 를  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 로 각각 편미분하여 식 (2), (3)과 같이 거리와 각도에 대한 민감도를 수치화하였다.

$$Sensitivity_{D_{cl}} = \frac{\|\Delta h_{vsb}\|}{\|h_{vsb}\|} / \frac{\|\Delta D_{cl}\|}{\|D_{cl}\|} \quad (2)$$

$$Sensitivity_{\theta} = \frac{\|\Delta h_{vsb}\|}{\|h_{vsb}\|} / \frac{\|\Delta \theta\|}{\|\theta\|} \quad (3)$$

여기서  $\Delta D_{cl}$ ,  $\Delta \theta$ 는 각각 거리와 각도의 변화량을 나타낸다. 식 (2), (3)과 같이 각각의  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 에 대한 민감도를 각각 표현하였지만,  $h_{vsb}$ 는  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 의 변화에 따라 달라지므로 식 (4)와 같이 식 (2)와 (3)의 곱으로 민감도 지수를 표현하였다.

$$Sensitivity = \left( \frac{\|\Delta h_{vsb} \times D_{cl}\|}{\|\Delta D_{cl} \times h_{vsb}\|} \right) \times \left( \frac{\|\Delta h_{vsb} \times \theta\|}{\|\Delta \theta \times h_{vsb}\|} \right) \quad (4)$$

이 식을 통해 민감도 지수가 낮을수록 측정 결과의

변화가 위치 변화에 따라 둔감함을 확인할 수 있으며, 민감도 지수가 가장 높을 때의 카메라와 라인 스캔 레이저의 위치를 찾아야만 측정할 때 발생하는 오차에 의한 영향을 최소화하여 정확한 측정 결과를 획득할 수 있다.

그림 6의 (a), (b)는 각각 식 (2), (3)에서  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 에 대한 변화에 따른 민감도를 각각 나타낸 그림으로  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 에 대한 각각의 변화에 따라 민감도의 변화가 매우 비선형적이라는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 (c)는  $D_{cl}$ 과  $\theta$ 의 변화에 따른 식(4)의 민감도 지수를 나타낸 그림이다. (c)의 그림을 통하여 민감도 지수는  $\theta \geq 60^\circ$ 인 경우에  $D_{cl}$ 의 값에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있으며,  $\theta \leq 60^\circ$ 인 경우에  $D_{cl}$ 의 값에 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 3차원 좌표계를 이용하여 카메라가 바라본 물체의 한 점 (X, Y, Z)와 카메라의 초점 거리  $\lambda$ 와의 관계에 의해 카메라의 CCD를 의미하는 이미지 평면에

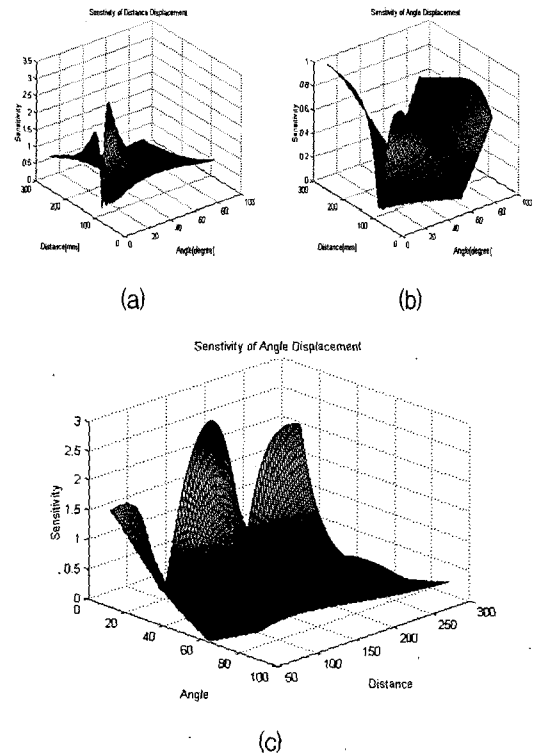


그림 6 (a) 각도와 거리 변화에 따른  $Sensitivity_{D_{cl}}$   
 (b) 각도와 거리 변화에 따른  $Sensitivity_{\theta}$   
 (c) 제안한  $Sensitivity$ 의 변화  
 Fig. 6. (a)  $D_{cl}$ -Sensitivity of  $\theta$  and  $D_{cl}$ .  
 (b)  $\theta$ -Sensitivity of  $\theta$  and  $D_{cl}$ .  
 (c) Proposed sensitivity.

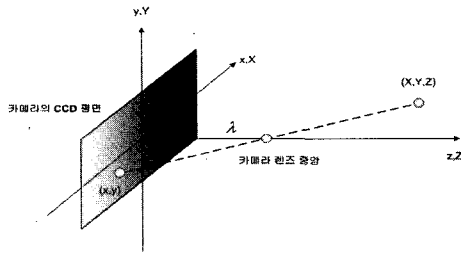


그림 7. 카메라 모델  
Fig. 7. Projection camera model.

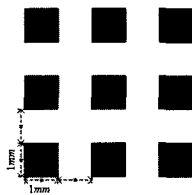


그림 8. 초점거리를 구하기 위한 기준 패턴  
Fig. 8. Reference pattern for calculating focal length.

표 3. 측정된 카메라 초점 거리  
Table 3. Measured focal length of the camera.

측정 거리(mm)	측정 결과(pixel)	간격(mm)
228	63	0.5995
238	57	0.5415
248	52	0.4940
258	47	0.4465
268	43	0.4085
278	40	0.39
288	36	0.3420

투영된 점  $(x, y)$ 를 표현한 것이다<sup>[7,10-11]</sup>. 식 (5)는 3차원으로 표현한 한 점  $(X, Y, Z)$ 과 초점 거리  $\lambda$ 를 이용하여 이미지 평면의 한 점  $(x, y)$ 의 관계를 나타낸다.

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}, y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \tag{5}$$

$\lambda$ 를 구하기 위해 그림 8과 같은 폭과 간격의 길이가 각각 1mm인 목표물과 카메라의 일정한 거리 변화에 따라 카메라의 CCD 평면상에 맺힌 영상의 크기 변화를 다수의 실험을 통하여 얻은 데이터는 표 3과 같다. 이 데이터를 이용하여 식 (6)과 같이 표현된 목표물과 카메라의 거리와 초점거리의 관계식에서 계수  $\alpha$ ,  $\beta$  값을 구하기 위해 최소자승법(Method of Least Squares)을 적용하였다.

$$\lambda = \alpha d_{com} + \beta \tag{6}$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 최소자승법을 통해 얻은 계수이고,  $\alpha$ 의 값은  $-0.1871$ ,  $\beta$ 의 값은  $127.8860$ 이다.

카메라와 View 평면에 투영된 물체의 중심과의 거리인  $d_{com}$ 의 값이 주어지면, 식 (6)으로부터 초점 거리  $\lambda$ 를 구한다.

## 2. 초점 오차

펄스 레이저 가공 시에 가공 레이저의 빔은 가공 물체의 이상적인 표면에 수직으로 초점이 맞춰져있지만, 실제 가공 물체의 표면은 우리가 생각한 것과는 달리 이상적으로 평평하지 않기 때문에 전처리 과정으로 제안한 시스템을 활용하여 물체의 높이와 표면 형상 정보를 활용하여 가공 레이저 빔의 초점 오차를 줄이고자 한다. 그림 9는 제안한 시스템을 활용하여 측정을 통해 얻은 물체의 표면 형상 정보로부터 임의의 가공지점에서의 초점 거리 오차와 각도 오차에 대한 개념도이다.

본 논문에서 측정 물체의 3차원 형상 복원은 그림 10에서 보는 바와 같이  $x, y$ 의 등간격의 화소에 해당하는 물체의 표면 높이 값인  $z$ 좌표 값을 이용하여 물체의 형상을 복원한다. 따라서  $x, y$  각 축에 생성되어 있는 화소의 수와 간격에 대한 정보만을 가지면 1차원적 배열의  $z$ 좌표 값으로 물체의 표면 형상 데이터를 구성할 수 있다.

화소간의 간격이 수십  $\mu\text{m}$  단위이기 때문에 측정 지점이 아닌 임의의 지점에서의 실제 표면 높이를 알아내기

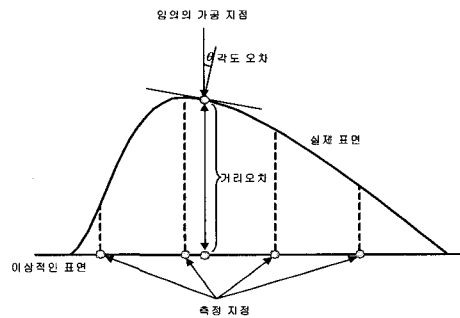


그림 9. 초점 거리 오차와 각도 오차  
Fig. 9. Focal length error and incident angle error.

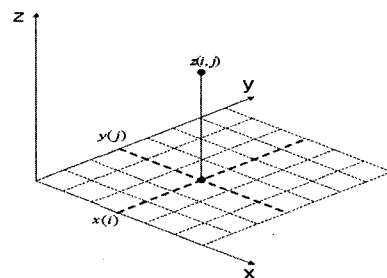


그림 10. 3차원 형상 좌표계  
Fig. 10. Coordinate of 3D shape.

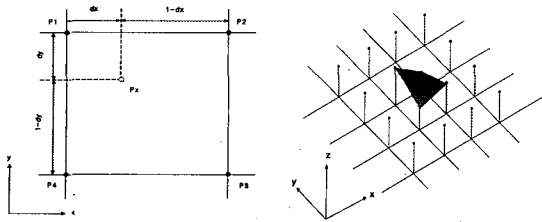


그림 11. 쌍선형 보간법  
Fig. 11. Bilinear interpolation.

위해 쌍선형 보간법(Bilinear Interpolation)을 적용하였다. 그림 7과 같이 제안한 시스템으로부터 측정된 4개의 화소  $P_1, P_2, P_3, P_4$  의 내부에 위치한 임의의 지점  $P_x$ 의 값은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P_x = P_1 \times (1 - dx) \times (1 - dy) + P_2 \times dx \times (1 - dy) + P_3 \times (1 - dx) \times dy + P_4 \times dx \times dy \quad (7)$$

여기에서  $dx, dy$ 는 0과 1사이의 값을 가진다.

가. 초점 거리 오차

초점 거리 오차는 앞의 그림 9에서 보는 바와 같이 이상적인 표면과 실제 표면의 거리 차이를 말한다. 초점 거리 오차는 다음 식(8)과 같이 표현된다.

$$P_e = P_r - P_x \quad (8)$$

여기서,  $P_r$ 는 이상적인 표면으로 가공 레이저 빔의 초점거리이며,  $P_x$ 는 쌍선형 보간법을 이용하여 계산된 임의의 가공지점에서의 높이 값이다.

나. 각도 오차

각도 오차는 펄토초 레이저 빔의 에너지 효율을 극대화하여 정밀한 가공을 위해 레이저 빔을 임의의 가공 지점에서 수직으로 입사시키기 위해서는 반드시 보정되어야 하는 오차이다. 본 논문에서 각도 오차는 앞의 그림 11에서 임의의 가공 위치 점  $P_x$ 에서 가까운 측정 지점인  $P_1, P_2$  그리고  $P_4$  점의 외적을 이용하여 식 (8)과 같이 각도 오차를 구한다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{e}_z \cdot (\| \vec{P}_1 P_4 \times \vec{P}_1 P_2 \|)}{\| \vec{P}_1 P_4 \times \vec{P}_1 P_2 \|} \right) \quad (8)$$

여기서,  $\vec{e}_z$ 는 z축 방향의 단위벡터이다.

IV. 실험결과 및 검토

1. ITO 유리

ITO 유리는 플라즈마 디스플레이 전면 유리기판 위에 ITO(Indium Tin Oxide)라 부르는 화합물을 박막 증착공정을 시킨 물체로 전기가 통하는 투명 전도체이다. ITO 유리의 표면에서 패턴의 형성도, 두께, 간격 등에 따라 완성된 디스플레이 장치의 화질(Display quality)을 좌우하기 때문에 펄토초 레이저를 이용한 미세가공이 필요하다<sup>[13]</sup>. ITO 유리는 투명하기 때문에 ITO 유리에 조사된 대부분의 레이저 빔이 투과되거나 내부에서 굴절이 되어 그림 12와 같이 카메라의 CCD에는 여러 개의 레이저 빔이 감지된다. 이와 같이 감지된 레이저의 빔 중에서 ITO 유리의 표면에 맺힌 레이저 빔과 바닥에 맺힌 레이저 빔만을 추출하여 정확한 ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보를 측정하기가 어렵다.

본 논문에서 제안한 시스템으로 그림 12와 같이 카메라의 CCD에서 감지된 여러 개의 레이저 빔들 중에서 x 축에 해당하는 각 열에서 y축 방향으로 가장 먼저 감지된 레이저 빔의 명암 값(Intensity)을 인식하여 ITO 유리의 표면과 바닥에 맺힌 레이저 빔으로부터 ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보를 획득하였다.



그림 12. ITO 유리에 조사된 레이저 빔  
Fig. 12. Projected laser beam onto ITO glass.

2. 민감도 지수에 따른 시뮬레이션 결과

본 실험에서는 앞에서 식 (4)와 같이 정의한 민감도 지수에 따라 카메라의 CCD에 맺히는 투명한 물체의 높이가 어떻게 달라지는지를 테스트하기 위한 실험을 하였다. 우선 식 (4)에서 정의한 민감도 지수가 가장 높을 때의 카메라와 레이저의 위치와 가장 낮을 때의 카메라와 레이저의 위치를 각각 구하였다. 각각의 경우에 해당하는 위치에서의 투명한 물체인 ITO 유리의 높이가 어떻게 나오는지 테스트하였다. 실험을 통해 측정된 ITO 유리의 높이는 레이저 스캐닝 시스템에서 화소의 단위로 계산이 되기 때문에 단위를 맞추어주기 위해 앞의 식 (1)과 (6)을 통해 알 수 있는 mm단위의  $h_{usb}$ ,

표 4. 제약 조건

Table 4. Constraints of the system.

	Min.	Max.
카메라와 레이저의 거리(mm)	150	300
카메라와 레이저의 각도(deg.)	70	155

$d_{com}$  과  $\lambda$  를 이용하여 식 (9)와 같이 화소의 단위로 변경한다.

$$D_i = \frac{h_{usb}}{\lambda((d_{com} + D_{cf} - \lambda) \times M_{pd})} \quad (9)$$

여기서,  $D_i$ 는 카메라의 CCD에 맺힌 물체의 높이를 화소의 단위로 표현하며,  $D_{cf}$ 는 카메라의 정면에서부터 내부의 CCD까지의 거리를 의미하며, 그 값은 17.357mm이다. 그리고  $M_{pd}$ 는 카메라의 CCD에서 화소 당 가로, 세로의 실제 크기를 나타내며, 그 값은 가로, 세로로 9.5  $\mu$ m이다. 카메라와 레이저의 위치 관계에 따라 ITO 유리의 표면에 조사된 레이저 빔의 선폭이 크게 달라진다. 카메라와 레이저의 특정 위치에서 카메라의 CCD에 맺힌 레이저 빔의 선폭이 너무 굵어지게 되면, ITO 유리의 표면과 바닥에 맺힌 레이저의 빔이 구분되지 않아 정확한 높이와 표면 형상 정보를 획득할 수가 없다. 정확한 실험 결과를 얻기 위해서 표 4와 같이 시스템의 제약 조건을 제시하였다.

가. 민감도 지수가 가장 높은 경우

MATLAB을 이용하여 계산한 민감도 지수가 가장 높을 때의 시뮬레이션 결과는 표 5와 같다. 그림 13은 시뮬레이션 결과를 이용하여 카메라와 레이저의 위치를 설정한 후, 제안한 시스템을 통하여 100 차례 반복 측정하여 ITO 유리의 표면에 맺힌 레이저 빔의 한 라인에 대한 프로파일이다. 그림 13으로부터 측정 결과 높이는 14.8±0.6 화소임을 확인할 수 있으며, 이를 시뮬레

표 5. 시뮬레이션 결과

Table 5. Results of simulation.

파라미터	측정 결과	단위
카메라와 레이저의 거리	151	mm
카메라와 레이저의 각도	150.19	deg.
카메라와 목표물과의 거리	261.9553	mm
민감도 지수( <i>Sensitivity</i> )	2.1570	
초점 거리 ( $\lambda$ )	78.8862	mm
ITO 유리의 높이	0.95	mm
카메라에 맺힌 ITO 유리의 높이	11.2634	pixel

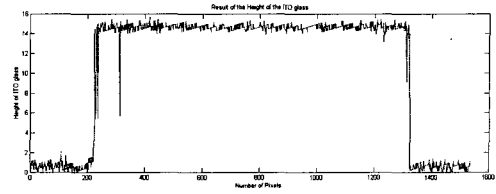


그림 13. ITO 유리의 높이 측정 결과  
Fig. 13. A result of the measuring height.

이션 결과와 비교하면 3.5366±0.6 화소의 오차가 있음을 확인하였다.

나. 민감도 지수가 가장 낮은 경우

MATLAB을 이용하여 계산한 민감도 지수가 가장 낮을 때의 시뮬레이션 결과는 표 6과 같다. 그림 14는 시뮬레이션 결과를 이용하여 카메라와 레이저의 위치를 설정한 후, 제안한 시스템을 통하여 100 차례 반복 측정하여 ITO 유리의 표면에 맺힌 레이저 빔의 한 라인에 대한 프로파일이다. 그림 14로부터 측정 결과 높이는 44±0.65 화소임을 확인할 수 있으며, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하면 1.0210±0.65 화소의 오차가 있음을 확인하였다. 이 결과로부터 민감도 지수가 낮을수록 시뮬레이션 결과와 측정 결과와의 오차가 감소함을 확인할 수 있다.

그림 13의 경우 카메라와 레이저의 거리가 짧고, 각도가 커질수록 민감도 지수가 높아졌으며, 카메라의 CCD에서 바라보고 있는 ITO 유리의 높이는 매우 작은 값을 갖는다. 즉, ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보가 카메라와 레이저의 거리와 각도의 적은 변화에 매우 의존적이며, 약간의 오차가 측정 결과에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 카메라 CCD에 맺힌 영상의 매우 작은 부분을 차지하기 때문에 ITO 유리의 표면에 대한 분석이 제대로 이루어지기가 어렵다. 반면, 그림 14의 경우 카메라와 레이저의 거리가 길고, 각도는 시뮬레이션에 적용한 제한 조건 범위 내에서 작은 범위에 있을수록 민감도 지수가 낮아졌으며, 카메라의 CCD에 맺힌 ITO 유리의 높이는 민감도 지수가 높았을 때 보다 큰 값이 나왔다. 카메라와 레이저의 거리와 각도의 적은

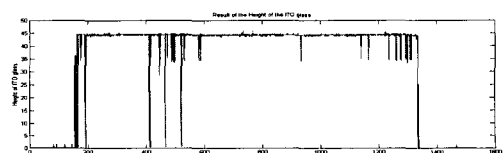


그림 14. ITO 유리의 높이 측정 결과  
Fig. 14. A result of the measuring height.



표 6. 시뮬레이션 결과

Table 6. Results of simulation.

파라미터	측정 결과	단위
카메라와 레이저의 거리	249	mm
카메라와 레이저의 각도	75.81	deg.
카메라와 목표물과의 거리	248.4867	mm
민감도 지수 ( <i>Sensitivity</i> )	0.0334	
초점 거리 ( $\lambda$ )	81.4407	mm
ITO 유리의 높이	0.95	mm
카메라에 맺힌 ITO 유리의 높이	42.9790	pixel

변화에도 ITO 유리의 높이 변화는 크지 않기 때문에 민감도 지수가 낮으며, 측정시 약간의 오차가 측정 결과인 ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3. 3차원 형상 복원 및 오차 계측

민감도 지수를 고려한 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 획득한 ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보로부터 패턴이 있는 ITO 유리의 형상을 3차원으로 복원하였다. 복원한 결과를 이용하여 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하였다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 주사 탐침 현미경을 이용하여 ITO 유리의 실제 표면을 측정하고, 이 결과와 본 논문에서 제안한 시스템의 측정 결과를 비교하였다.

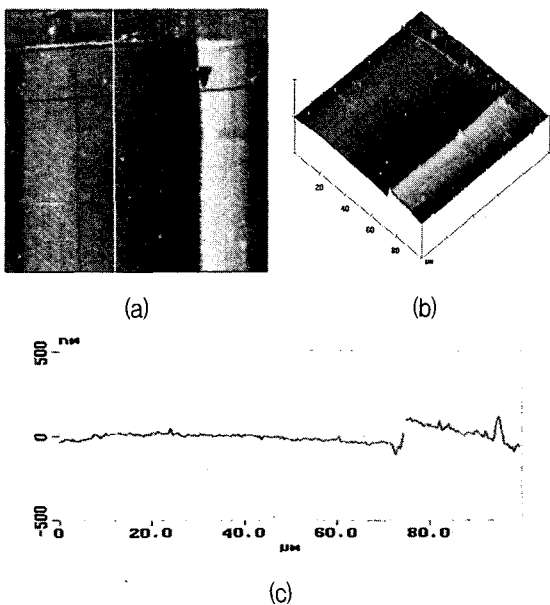


그림 15. (a) 측정된 ITO 유리의 2차원 표면 형상 (b) 측정된 ITO 유리의 3차원 표면 형상 (c) 측정된 ITO 유리의 한 프로파일

Fig. 15. (a) 2D shape (b) 3D shape and (c) Profile of ITO glass.

가. 시스템의 신뢰성 테스트

그림 15는  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  크기의 패턴이 새겨져있는 ITO 유리를 주사 탐침 현미경의 측정범위인  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  범위 내의 패턴이 있는 경계부분을 측정한 ITO 유리의 실제 표면 형상이다. 그림 15의 (a)는 패턴이 있는 경계부분을 측정된 2차원 표면 형상이고, (b)는 이 부분을 3차원으로 측정된 표면 형상이다. (c)는 (b)의 그림에서 바라봤을 때, 가로 행에 대한 하나의 프로파일을 나타낸 그림이다. 이 그림을 통해 펄초 레이저를 이용하여 제작한 패턴과 ITO 유리의 표면이 고르지 않을 뿐더러 평탄하지 않음을 확인할 수 있다.

나. 3차원 형상 복원과 초점거리 및 각도 오차 계측

그림 16은 표 6에서 정리된 것처럼 민감도 지수가 제한된 범위에서 가장 낮을 때의 카메라와 레이저의 위치에서 레이저 스캐닝 시스템으로부터 획득한 ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보를 이용하여  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ ,  $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$  크기의 패턴들이 있는 ITO 유리의 형상을 복원한 그림이다. 그림 16의 (a)는 측정 결과를 이용하여 패턴이 있는 부분을 2차원으로 복원한 것이며, (b)는 이를 3차원 표면 형상으로 복원한 것이다. (c)는 라인 스캔 레이저의 빔이 ITO 유리의 패턴부분에 조사되었을 때의 프로파일을 나타낸다. 표 7은 복

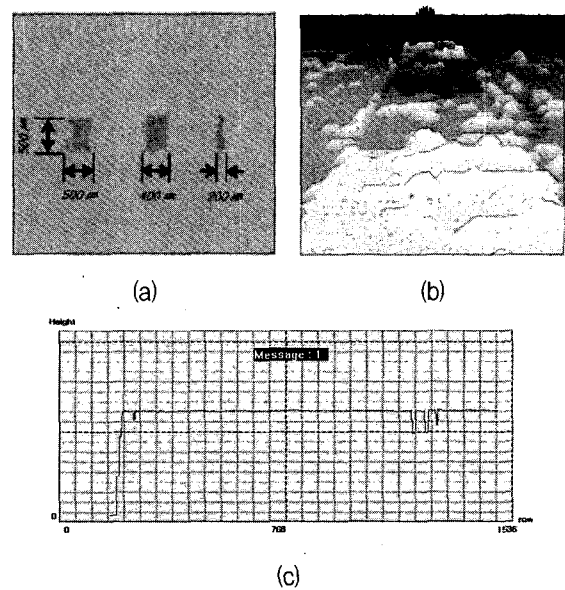


그림 16. (a) 복원한 ITO 유리의 2차원 표면 형상 (b) 복원한 ITO 유리의 3차원 표면 형상 (c) 복원한 ITO 유리의 한 프로파일

Fig. 16. (a) 2D shape (b) 3D shape and (c) Profile of ITO glass.

표 7. 초점 거리 오차와 각도 오차  
Table 7. The focal length error and the incident angle error.

입의의 지점(x,y)	초점 거리 오차(μm)	각도 오차(deg.)
(750, 200)	-22.452	8.223
(750, 350)	-19.367	49.489
(750, 450)	+18.662	27.156

표 8. 초점 거리 오차와 각도 오차의 범위  
Table 8. Range of the focal length error and the incident angle error.

오차	Min.	Max.
초점 거리 오차	-31.423(μm)	+34.215(μm)
각도 오차	0(deg.)	63.329(deg.)

원된 이미지로부터 입의의 지점에서의 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측한 결과이다. 이상적인 표면의 높이를 나타내는  $P_r = 950\mu\text{m}$ 로 설정하고, 식 (8)에 적용하여 초점 거리 오차를 계측하였다. 초점 거리 오차의 결과를 보면, ITO 유리의 표면이 고르지 않아서 높이차가 확연히 나타나는 패턴의 경계부분에서 초점 거리 오차를 계측하였다. 다수의 실험을 통하여 입의의 지점에서 실제로 계측한 초점 거리 오차와 각도 오차의 값은 표 7과 같고, 초점 거리 오차와 각도 오차의 범위는 표 8과 같다. 표 7, 8로부터 이상적인 표면의 높이는 패턴이 없는 부분의 높이를 평균적으로 나타낸 값이므로 패턴이 있는 부분에서는 (-)의 값이 나왔으며, 패턴이 없는 부분에서는 (+),(-)의 값으로 나왔음을 확인하였다. 그리고 앞의 그림 15에서 확인한 것처럼 ITO 유리의 표면이 매우 고르지 않기 때문에 실험을 통하여 계측한 각도 오차의 범위는 매우 크게 나왔음을 확인하였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 펨토초 레이저의 효율을 극대화시켜 투명한 전기 전도체인 ITO 유리의 미세가공을 위한 ITO 유리의 표면 정보를 추출하는 시스템을 제안하였다. 먼저, 레이저 스캐닝 시스템의 모델링을 통해 카메라와 레이저의 위치와 측정 결과와의 관계를 수치화한 민감도 지수를 정의하였다. 그리고 시스템의 설계 및 구현에 민감도 지수를 적용하여 측정시 발생하는 오차를 감소시켜 더욱 더 정밀한 측정이 가능하도록 시스템을 최적화하여, ITO 유리의 높이와 표면 형상 정보를 획득하였다. 마지막으로 획득한 정보를 활용하여 ITO 유리의 형상을 3차원으로 복원하고, 주사 탐침 현

미경으로부터 얻은 결과와 표면 형상을 비교하여 본 시스템의 성능을 점검하였다. 또한 펨토초 레이저의 효율을 극대화시키기 위해 초점 거리 오차와 각도 오차를 계측하였다. 추후 연구에서는 초점 거리 오차와 각도 오차의 계측 결과를 바탕으로 펨토초 가공 레이저의 정밀도를 향상시키기 위해 피에조 (Piezo)와 터페널-D (Terfenol-D)를 이용한 z축 구동기와 2축 스캐너를 설계하는 연구를 진행할 계획이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 최지연, 장정원, 김재구, 신보성, 장원석, 황경현, "펨토초 레이저를 이용한 유리 표면의 미세구조 생성에 관한 연구," *한국정밀공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집*, 640-643쪽, 2003년
- [2] C. B. Schaffer. "Interaction of femtosecond laser pulse with transparent materials," Ph. D. thesis, Harvard University, May 2001.
- [3] Rafael R. Gattass, "Femtosecond-laser interactions with transparent materials: applications in micro-machining and supercontinuum generation," Ph. D. thesis, Harvard University, June 2006.
- [4] 김동식, 오부국, "펨토초 레이저 재료가공 공정의 이론적 해석," *한국정밀공학회지*, 제23권, 제1호, 48-55쪽, 2006년 1월
- [5] D. Y. Yim and S. W. Kim, "Optical Roughness Measurement of Ground Surfaces By Light Scattering," *Int.J.Mach Tools Manufact.*, Vol. 30, no.2, pp. 283-289, 1990.
- [6] 장정원, 김재구, 신보성, 장원석, 최지연, "비접촉 센서를 이용한 레이저 자동 포커싱," *한국정밀공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집*, 280-283쪽, 2003년
- [7] R. G. Willson, "Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses," Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University, Jan. 1994.
- [8] 성기은, 이세현, "멀티 라인 레이저 비전 센서를 이용한 고속 3차원 계측 및 모델링에 관한 연구," *2002년도 춘계학술대회 논문집*, 169-172쪽, 2002년
- [9] 서영호, 김화영, 안중환, "레이저 빔 반사 패턴을 이용한 표면 프로파일 추정," *2002년도 춘계학술대회 논문집*, 263-266쪽, 2002년
- [10] C. H. Chen, and A. C. Kak, "Modeling and Calibration of a Structured Light Scanner for 3-D Robot Vision," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 807-815, March 1987.
- [11] Y. F. Li and S. Y. Chen, "Automatic Recalibration of an Active Structured Light Vision System," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 19, no. 2, April 2003.

[12] Johnny Park, Guilherme N. DeSouza, and Avinash C. Kak, "Dual-Beam Structured-Light Scanning for 3-D Object Modeling," *Proceedings of the Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001.

[13] 송준엽, 박화영, 김현중, 정연옥, "PDP ITO 패턴 유리의 결합 검사시스템 개발," *한국정밀공학회지*, 제 21권, 제12호, 92-99쪽, 2004년 12월

저 자 소 개



박 정 홍(학생회원)  
 2005년 충남대학교 메카트로닉스 공학과(공학사)  
 2006년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정 재학 중.

<주관심분야 : 로봇틱스, FSS, 국방로봇>



이 지 홍(정회원)  
 1983년 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1993년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.

<주관심분야 : 로봇틱스, 국방로봇, HCI, FSS>



고 윤 호(정회원)  
 1995년 부산대학교 전기공학과 (공학사)  
 1997년 한국과학기술원 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사)  
 2002년 한국과학기술원 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사)

2004년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 조교수.

<주관심분야 : 영상처리, 컴퓨터비전>



박 영 우(정회원)  
 1983년 부산대학교 생산 기계공학과 (공학사)  
 1989년 Syracuse University 대학원 (공학석사)  
 1994년 Pennsylvania State University (공학박사)

1995년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 부교수.

<주관심분야 : 정밀가공, 생산자동화 및 제어>