

◆특집◆ 광학식 3차원 형상측정기술

광삼각법을 이용한 형상측정 장치

백성훈*, 박승규*

Shape measurement by using optical triangulation

Sung-Hoon Baik*, Seung-Kyu Park*

Key Words : Optical triangulation (광삼각), Shape measurement (형상측정), Distance measurement (거리측정), 3-dimension profilometry (3차원 형상측정)

1. 서론

광학식 측정 방법은 비접촉/원격으로 측정이 가능하다는 것 뿐 아니라, 기존 기술에 비해 측정 속도가 빠르고, 정밀도가 높으며, 또한 자동화가 용이하여 산업현장에서의 측정 및 검사 응용에 큰 장점이 있다¹. 최근 들어서는 3 차원 형상의 광학식 측정 방법이 많이 개발되어서 가공, 품질 검사, 자동화 분야에서 기존의 2 차원 검사 방법을 대체하고 있는 중이다.

광학식 3 차원 형상측정 방식으로는 광삼각법(optical triangulation)², Moire 방법³, 위상측정방법(PMP; Phase Measuring Profilometer)^{4,5}, 전자 스펙클 간섭계(ESPI)⁶, 공초점 방법⁷ 등 여러 가지가 있다. 이들 방법은 각각의 장단점을 가지고 있으므로, 아직도 여러 방식의 장치가 여러 응용 분야에서 사용되고 있다. 이 중에서 광삼각법은 가장 고전적이면서도 가장 안정적인(robust) 방법으로 아직까지도 산업 현장에 많이 사용되고 있다. 광삼각법

은 광원으로 레이저를 많이 사용하게 되므로 레이저 삼각법(laser triangulation)이라고도 하고, 점이 아닌 선형의 빛을 사용하는 경우에는 빛이 물체의 단면을 측정하게 되므로 광 단면법(light sectioning)이라고도 한다.

광학식 3 차원 측정 기술은 생산 공정과 검사 자동화의 확산으로 국내 수요가 계속적으로 증가하고 있으나, 아직 국내 제품의 개발은 이에 못미치고 있다. 국내에서도 대학과 연구소, 기업 등에서 여러 가지의 센서나 장치를 개발하고 있으나, 외국 제품의 수입에 많은 부분을 의존하고 있다. 따라서 국내에서 산업적으로 필요한 센서의 사양을 분석하고 외국의 제품과 충분한 경쟁력을 갖는 국내 센서의 기반기술을 갖추는 것이 시급하다 할 수 있다.

본 논문에서는 거리측정 장치나 3 차원 형상 측정 장치에 사용되는 광삼각법의 이론과 오차 요인을 살펴보고, 실제 장치의 구성이 이루어지는 과정, 그리고 개발된 장치의 응용 분야와 활용 결과들에 대하여 기술하고자 한다.

2. 광삼각 장치 이론

2.1 광삼각 측정 원리

광삼각 측정 방법은 거리(또는 변위) 측정 장치나 형상측정 장치에 이용되는 방법이다. 빛의

* 한국원사력연구소 양자광학기술개발부

Tel. 042-868-8993, Fax. 042-861-9602

Email shbaik@kaeri.re.kr

레이저 광 계측, 3 차원 측정, 원격 검사기술, 적외광학, 간섭계 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

집속이 필요하므로 광원으로 레이저 빔을 사용하는 것이 일반적이다. 장치의 구성은 점(또는 선)형의 레이저 빔 발생 광학계, 레이저 빔 영상 광학계, 레이저 전류 제어부, 수광소자, 그리고 영상신호 처리장치 등으로 구성된다.

광삼각 방식의 레이저 형상(거리)측정 장치의 기본 원리는 Fig. 1 과 같다. 선형의 레이저 빔에 대해서는 2 차원 CCD 센서의 각 화소에 대하여 동일한 원리를 적용하여 대상체의 높이 정보와 배율을 구하여 3 차원 정보를 구하게 된다. 물체면에 조사된 작은 레이저 광점은 입사 레이저 빔 축과 특정 각도로 기울어져 설치된 영상렌즈에 의해 위치측정센서인 PSD(Position Sensing Detector)나 CCD(Charge-Coupled Device) 면에 상을 맺는다. 물체의 높이가 그림과 같이 p 방향으로 바뀌면, CCD 센서에 결상된 레이저 광점의 위치가 q 만큼 바뀌게 된다. q 값을 측정하여, 구성된 광학계의 변수들을 대입 환산하여 대상 물체의 높이 p 를 측정할 수 있다. 물체까지의 높이 p 와 CCD 에서 레이저 광점의 위치 q 는 식 (1)과 같이 비선형 수식을 통해 구할 수 있다. 이 레이저 삼각측정법은 다른 방법들 (예를 들면, Moire, PMP, time-of-flight 등)에 비해, 물체면의 산란특성에 의해 큰 영향을 받지 않으며, 광학계의 구성과 정렬이 비교적 간단하다는 장점도 가지고 있다⁸.

$$p = \frac{q \cos \phi (s - f)}{f \sin \theta + q \cos \phi \cos \theta} \quad (1)$$

(1)식에서 f 는 영상렌즈의 초점거리이고, s 는 렌즈에서 표면 물체까지의 거리, θ 는 레이저가 조사되는 광학계의 광축과 레이저 빔의 상을 맺는 광학계의 광축 사이 각, 그리고 ϕ 는 광축의 수직선과 센서면이 이루는 각도이다.

Fig. 1 과 같은 광삼각 광학계는 Fig. 2 와 같은 Scheimpflug 조건이라고 부르는 광학정렬을 가지는 것이 일반적이다. 즉, 물체가 광축과 수직하지 않은 면에 있을 때 상면도 광축에 대해 기울어진 면이 된다. Scheimpflug 조건은 물체 면과 상면이 렌즈면 상에서 만나도록 구성이 되는 광학계 구성요건을 말하며, 이 조건을 만족할 때 물체의 변위를 나타내는 레이저빔의 영상이 센서면에 정확히 상을 맺게 된다⁹.

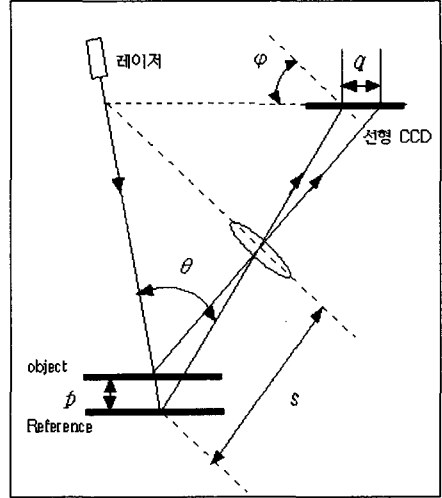


Fig. 1 Principle of Optical triangulation

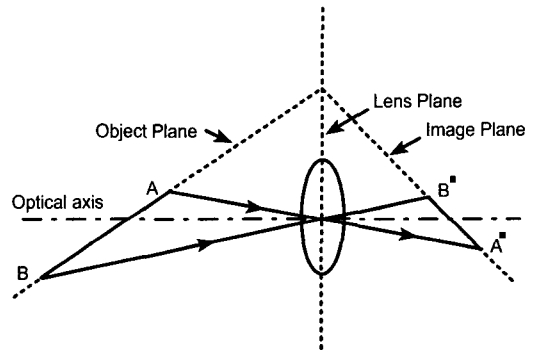


Fig. 2 Geometry of Scheimpflug Condition

(1) 식의 영상면의 각도 ϕ 대신에 배율 m 을 사용하여 표시할 수 있는데 종배율 m 은 $s'/s = f/(s-f)$ 를 나타내며, 이 때 (1) 식은 다음의 (2) 식으로 표시된다. 이 식에서 알 수 있듯이 p 와 q 는 선형적으로 비례하지 않고, 복잡한 환산식을 갖는다. 실제 장치에서 신호처리를 할 때에는 이 식과 별도의 영점조정 기능을 사용하여 실제 변위를 환산하여 주게 된다.

$$p = \frac{q(s-f)}{f\sqrt{m^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} + q \cos \theta} = \frac{f}{m \sqrt{f\sqrt{m^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} + q \cos \theta}} \quad (2)$$

2.2 광삼각 측정 정밀도와 오차

광삼각 측정 장치에서는 다음과 같은 측정 한계와 오차요인이 존재한다^{10,11}.

우선, 급격한 경사를 가진 물체의 주변부에서 레이저 광점이 물체에 가려 센서로 측정이 되지 않는다는 한계를 가진다. 광삼각법은 광축을 따라 측정하는 것이 아니고, 패턴을 조사하는 발광부의 축과 그 패턴을 기록하는 수광부의 축이 특정 각도 틀어져 있기 때문에 그 방향으로 그 각도 이상의 기울기를 가지는 피 측정물에 대해서는 측정 자체가 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 두 개의 광검출기를 사용하는 장치 등도 개발이 되고 있다.

광삼각 측정 장치의 분해능은 주로 레이저 광점의 크기와 센서 화소의 크기에 따른 분해능에 의존한다. 따라서 레이저 광점의 크기가 증가할수록 형상측정 분해능은 어느 정도 줄어들 수 밖에 없다. 특히 광점이 집속되는 물체가 기준 면 주위에 있을 때는 광학적 분해능이 좋지만, 주위로 갈수록 광학적 분해능은 떨어질 수 밖에 없다. 이러한 것은 특별한 광학계의 구성이나¹² 영상처리 알고리즘을 통해 보완하게 된다. 최근의 레이저 삼각측정 장치의 경우, 빠르고 정확한 신호처리 기술의 도입으로 기존의 접촉식 측정장치 이상의 공간 및 높이 분해능을 내고 있다.

광삼각 측정장치의 오차를 유발하는 요인으로 ghost 영상 효과를 들 수 있다. 물체의 주변이나 다중 반사등의 이유로 실제 레이저 광점이 아닌 위치에 레이저 광점을 형성하는 ghost 영상이 생길 경우 중심점의 위치 측정이 어려워지고, 따라서 많은 오차를 유발할 수 있다. 이 ghost 영상도 중심점 이동과 마찬가지로 레이저 광축에서 벗어난 지점에 형성되므로 이중 검출기를 사용하거나, 패턴 매칭 등의 적응형 영상처리기술을 사용하여 오차를 줄일 수 있다.

또 다른 오차 요인으로 큰 입사각에서의 영상 변형이 있다. 레이저빔이 입사되는 광축과 영상을 맺는 광학계의 광축이 많이 기울어져 있는 경우 입사 광점의 상이 많이 길어지는 형태를 갖게 되고, 이는 광점 영상의 변형을 유발하게 되어 오차의 원인이 된다. 이 효과는 사잇각이 클 때에 발생하는 효과로, 이 경우 실제로 ghost 영상 효과와 중첩되어 나타나기도 한다. 따라서 실제 장치의 설계에서는 사이 각이 너무 커서 이러한 2 차적인

문제가 크게 발생하도록 하지 않는다.

마지막으로 표면반사율의 변화에 의한 오차가 있다. 피 측정체의 국부적인 표면반사율의 변화가 심할 때에는 주변 부근에서 중심점 이동과 비슷한 효과를 나타낸다. 이 오차를 줄이는 방법은 이중 검출기를 사용하는 방법이 있으나, 현실적으로 장치가 복잡해 진다는 단점이 있다. 보다 현실적인 방법은 면의 반사 상태에 따라서 레이저의 출력을 적응하여 조절해 주는 방법으로 현재 거리측정 장치에서 많이 사용하고 있다.

3. 광삼각 형상측정 장치의 실제 및 응용

3.1 광삼각 형상측정 장치 구성

선형 레이저빔을 사용하는 광삼각 3 차원 형상측정 장치는 크게 레이저 패턴 빔 조사부, 카메라 영상 센서부, 1 축 이송장치, 그리고 영상처리 컴퓨터부로 구성된다. 동작은 레이저 빔 발생부에서 선형 레이저 빔을 이송장치위의 테이블위에 있는 물체에 주사하고, 이송장치를 이동시키면서 CCD 카메라로부터 영상을 획득하여 컴퓨터로 보내면 이를 컴퓨터에서 처리하여 3 차원 데이터를 구한 후 화면으로 표시해 주게 된다. Fig. 3 은 형상측정 장치의 레이저빔 영상처리 알고리즘의 순서도이고, Fig. 4 는 3 차원 형상측정을 위해 개발한 프로그램 주화면이다.

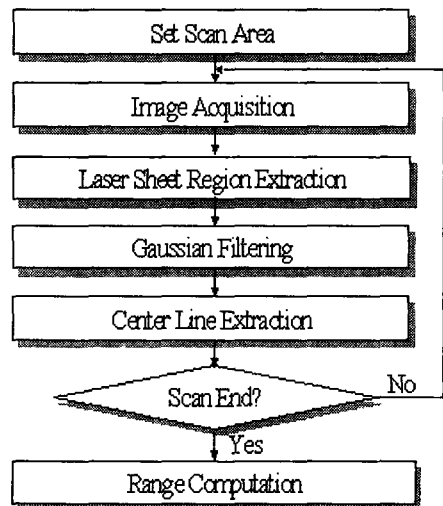


Fig. 3 Flow chart of shape measurement

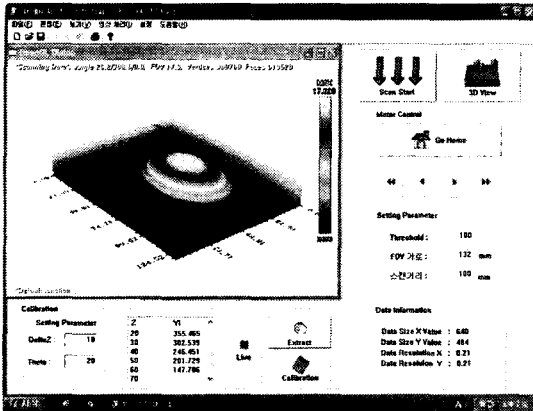


Fig. 4 3-D shape measuring program

영상처리는 CCD 에 결상된 영상 신호를 분석하여 레이저빔이 주사한 위치의 정확한 화소를 추출하는 것이다. 이상적으로는 레이저 빔이 한 화소에만 결상되면 좋으나 물리적으로 그렇게 만드는 것은 불가능하다. 특히 레이저 빔이 초점에서 멀어질수록 선폭이 넓어지므로 이의 중심 화소를 정확히 추출해야 한다. 레이저 빔의 중심선 추출은 거리(형상)측정 정밀도와 직접적인 관련이 있는 부분으로 이를 정확히 또 빠르게 추출하는 것이 매우 중요하다. 주요 영상신호 처리 사항은 다음과 같다.

0 레이저 빔 영역 추출 : 영상처리 알고리즘은 먼저 처리 속도 및 정밀도를 높이기 위해 전체 CCD 영상에서 레이저 빔이 주사한 유효 영역만을 추출한다. 이 영역의 선택은 초기 설정과정에서 사용자에게 의해 설정이 되거나, 세로축으로 누적된 분포함수를 구한 후 자동으로 설정하게 할 수도 있다.

0 방향성 필터링 : 획득된 영상은 레이저빔의 집속성 에너지에 의해 물체 표면에 따라 난반사가 많이 생기므로 이를 제거하기 위해 평활화 과정을 거친다. 한 예로 본 연구에서는 3(H)x7(V) 방향성 가우스 필터링을 취하였다.

0 중심선 추출 : 3 차원 형상정보를 얻기 위해 가우스 필터링한 영상으로부터 레이저빔 선의 중심선을 추출하게 된다. 이러한 중심점(또는 중심선) 추출 방식은 여러 가지가 있으나, 보통 무게 중심법(center of gravity)을 사용하거나 변형된 무게 중심법을 사용하는 것이 일반적이다. 속도가 문제

가 될 때에는 미리 설정된 문턱치로 이진화를 한 후 가장 빈도수가 많은 영역에 대해서만 무게중심을 구하는 방식도 사용된다. 따라서 이 중심위치의 값은 수십 분의 부화소(sub-pixel) 해상도로 얻어진다.

0 잡음 제거 : 위의 방법으로 구한 중심선의 영상에도 여러 가지의 잡음이 실려 있으므로 적절한 잡음 제거 과정이 필요하다. 본 연구에서는 opening, closing 의 1 차원 모폴로지 연산으로 잡음을 제거하였다.

0 3 차원 거리 계산 : 이론 부분에서 언급하였듯이, 센서 상에서 얻은 변위와 실제 물체의 높이(또는 변위)는 선형적으로 비례하지 않는다. 따라서 적절한 캘리브레이션(calibration) 모델 M 을 설정하여 센서에서 얻은 영상의 좌표(i,j)를 실 좌표(y,z)으로 변환하는데 사용하게 된다. 본 연구에서는 영상좌표(i,j) 에 해당하는 실좌표 $z = f(i,j)$ 를 캘리브레이션 막대를 정밀하게 이송시키면서 실험 데이터를 일정한 간격에서 획득하고, 이에 대한 최소 오차법에 의해 캘리브레이션 변수를 얻었다. 여기서 사용된 f는 여러 가지 함수들 중에서 광학 렌즈의 왜곡과 레이저 빔의 특성을 고려하여 2 차 함수를 선택하여 식(3)처럼 모델화 하였고, 가우스 소거법을 통해 M 을 얻었다. 이렇게 하여 얻은 3 차원 데이터를 선택적으로 필터링하는 과정을 도입하였다. 가로축으로는 잡음제거 필터링을 수행하였고, 세로축으로는 발생하는 임펄스 잡음을 제거하기 위해 y 축 모폴로지 필터링을 하였다.

$$[x^2 \ y^2 \ xy \ x \ y \ 1]M = z \quad (3)$$

0 샘플링에 의한 거리 영상 획득 : 계산된 3 차원 데이터는 x,y,z 가 규칙적인 배열로 구성되어 있지 않다. 즉, dx 와 dy 가 같은 값이 아니므로 이를 3 차원 상에서 직접처리 하면 데이터 량의 증가와 처리 시간이 증가 된다. 따라서 이를 B-spline 으로 근사화 해서 재샘플링을 거치면 규칙적인 배열의 거리 영상이 된다. Fig. 4 의 화면에 보이는 형상측정 결과는 이렇게 해서 얻은 거리 영상을 Open-GL 로 보여준 화면이다. 그래픽 디스플레이에서는 Open-GL 인터페이스를 이용하여 mesh, pseudo coloring, gray map 등 다양한 표현 기법을 사용할 수 있다.

3.2.3 차원 형상측정 장치의 응용

광삼각 방식의 형상측정 장치는 새로운 기술 이라기 보단 이미 산업적으로 사용이 증명된 기술로서, 현재 여러 제품이 개발되어 있다. 일반적인 기관 검사 장치 등 특정 목적을 가지고 그 목적에 맞도록 최적화 된 장치까지 많이 사용되고 있다. 본 절에서는 이러한 응용 사례 몇 가지를 소개하고자 한다.

3 차원 납형상 검사 장치는 전자 기관 위의 납형상(높이, 면적, 체적)을 비접촉으로 측정하여 납 프린팅 상태를 칩 장착 전에 검사하여 불량품의 발생을 사전 방지하는 용도로 사용된다. 이러한 용도의 장치는 분해능이 수 μm 정도로, 미세 선형빔 폭의 레이저와 고해상도 CCD 카메라로 구성된다. 응용 분야는 납 형상 뿐 아니라 미세 피치, BGA 검사, 부품의 위치 검사, IC 리드 선의 평면도 검사 등에 사용된다. Fig. 5 는 이러한 용도의 3 차원 검사장치의 모습이고, Fig. 6 은 이 장치를 이용해 불량이 있는 납의 형상을 측정한 결과이다.

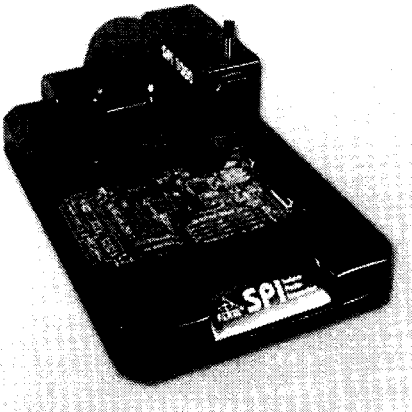


Fig. 5 3-D inspection equipment

일상생활에 많이 사용되는 스캐너를 3 차원으로 확장시킨 것이 3 차원 스캐너이다. 아직까지 3 차원 스캐너는 주로 디자인 분야나 산업적인 용도에 사용되고 일상생활에는 많이 사용되고 있지 않으나, Fig. 7 과 같은 얼굴 스캐너는 일상적인 용도를 가진 3 차원 스캐너의 일종이다. Fig. 8 은 얼굴 스캔 결과를 보여준다.

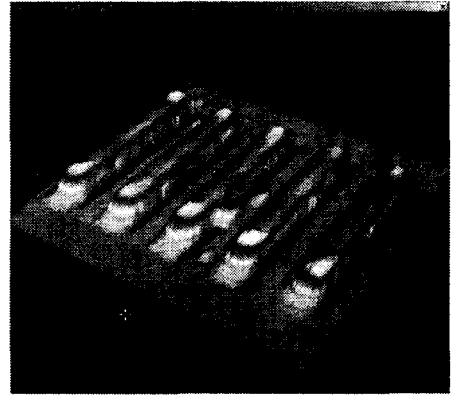


Fig. 6 3-D shape of solder paste

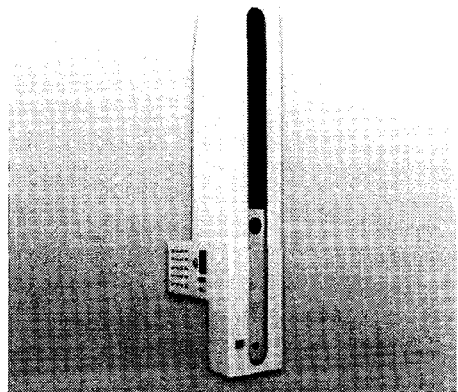


Fig. 7 3-D scanner

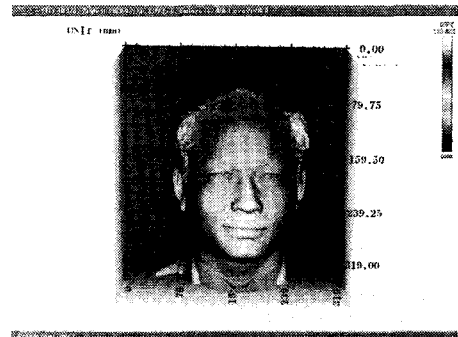


Fig. 8 3-D shape of a human face

광삼각 방식의 형상측정 장치는 비접촉 특성을 가지고 있기 때문에 탐침의 접촉이 어려운 물체의 형상을 측정하는데 특히 장점을 가진다. 이러한 용도로 많이 활용되는 분야로는 점토 모형의

3 차원 CAD 데이터 확보 등 디자인 분야가 있다. 또한 탐침의 접촉이 어려운 분야에의 응용 사례로서 목판 활자의 인식을 들 수 있다. Fig. 9는 오래된 목판 활자의 3차원 형상을 측정된 결과이다.

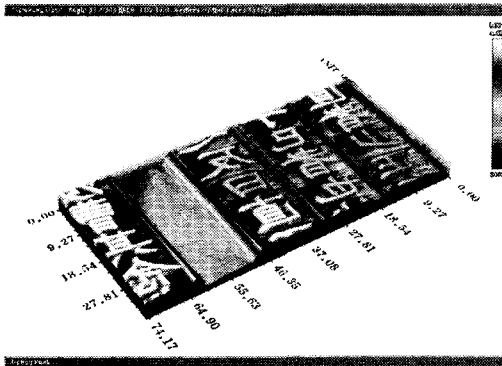


Fig. 9 3-D shape of a woodblock

4. 결론

광삼각법을 이용한 3 차원 형상측정 장치는 원격 비접촉 측정 방식이며, 또한 측정 속도가 빠르고 비교적 정밀하다는 장점으로 인해 산업적으로 많이 활용되고 있다. 최근에는 Moire 나 위상 추출 방식의 스캐닝이 필요 없는 3 차원 형상측정 장치가 새로이 개발되고 있지만, 아직도 많은 분야에서는 광삼각 방식의 장치가 많이 사용되고 있다. 특히 진동이나 분진 등이 있는 산업 환경에서는 아직도 광삼각 측정 방식이 안정적인 결과를 얻을 수 있다.

현재 국내의 수요는 주로 전자 산업과 검사 자동화, 디자인 분야에 집중되어 있다고 할 수 있으나 거의 모든 산업에서 3 차원 형상 측정장치는 활용 가능성을 가지고 있으며, 특히 광삼각 형상 측정 장치는 무한한 활용처를 가지고 있다고 할 수 있다. 국내의 제품 개발이 수요에 비추어 미진한 면이 있는 만큼, 지속적인 기술과 장치의 개발이 이루어지기를 기대한다.

참고문헌

1. Huntley, J., "Optical shape measurement technology: past, present, and future," Proceedings of SPIE, Vol. 4076, pp. 162-173, 2000.

2. Kooijman, K. and Horijon, J., "Video rate laser scanner : Considerations on triangulation optics, detector and processing circuits," Proceedings of SPIE, Vol. 2065, pp. 251-263, 1994.
3. Matsumoto, T., Kitagawa, Y. and Minemoto T., "Sensitivity-variable moire topography with a phase shift method," Optical Engineering, Vol. 35, No. 6, pp. 1754-1760, 1996.
4. Sansoni, G., Biancardi, L., Minoni, U. and Docchio, F., "A novel, adaptive system for 3-D optical profilometry using a liquid crystal light projector," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 43, No. 4, pp. 558-566, 1994.
5. Huang, P., Hu, Q., Jin, F. and Chiang, F-P., "Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring," Optical Engineering, Vol. 38, No. 6, pp. 1065-1071, 1999.
6. Joenathan, C., Pfister, B. and Tiziani, H., "Contouring by electronic speckle pattern interferometry employing dual-beam illumination," Applied Optics, Vol. 29, pp. 1905-1911, 1990.
7. Kang, Y., Song, D., Ryu, W., Baik, S., "A study of the con-focal microscope for the surface measurements," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 05, pp. 73-81, 2003.
8. Zhang, G., An, Z., Zhao, T. and Wang, X., "Research on laser position and dimension on-line inspection system," Proceedings of SPIE, Vol. 2899, pp. 348-353, 1996.
9. Warren, J. Smith, W., Modern Optics Engineering, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., pp. 52, 1990.
10. Costa, M., "Surface inspection by optical triangulation," Proceedings of SPIE, Vol. 2238, pp. 151-159, 1994.
11. Clark, J. and Trucco, E., "Polarization-based peak detection in laser triangulation range sensors," Proceedings of SPIE, Vol. 2599, pp. 81-92, 1996.
12. Park, S., Baik, S., Kim, C., "A new profilometry system for precision measurement of 3D shape using the directional magnification control of a laser light stripe," Journal of KSPE, Vol. 14, No. 05, pp. 60-65, 1997.