

선모양을 한 레이저빔의 방향성 배율 확대를 이용한 정밀 형상측정 시스템

박승규*, 백성훈*, 김철중*

A New Profilometry System for Precision Measurement of 3D Shape Using the Directional Magnification Control of a Laser Light Stripe

Seung-Kyu Park* , Sung-Hoon Baik* , Cheol-Jung KIM*

ABSTRACT

This paper proposes a new profilometry system for precise surface contouring of 3D objects using a directionally magnified image of a laser light stripe. The resolution of this system can be improved several times compared with that of conventional systems without loss of spatial resolution and depth of measurement. A pair of cylindrical lens(a convex lens and a concave lens) are used for a directionally magnified image of a laser light stripe maintaining the same focal plane. Also, image processing procedures for image reconstructions are described.

Key Words : Profilometry(형상측정기), Cylindrical lens(원통형렌즈), Directional Magnification(방향성 배율확대), A Laser Light Stripe(선모양의 레이저빔), Image Reconstructions(영상재구성)

1. 서론

주어진 물체의 형태를 계측하는 기술은 제품검사 자동화⁽¹⁾ 및 기계적시각(machine vision)⁽²⁾ 시스템의 개발에서 중요한 문제중의 하나이다. 광학적인 방법을 이용한 형상 측정 장치는 원격 비접촉식의 고정밀 측정이 가능한 장점외에도 병렬측정이 가능하여 동시 신호처리가 용이하고 상대적으로 경제적이며 비교적 큰 대상체에도 이를 활용할 수 있는 등 실용성이 높다. 일정한 형태의 빛을 측정대상체에 조사하여 형상정보를 추출하는 광학적 방법 중에서 선모양의 레이저빔을 이용한 삼각 측정 장치는 경

제적이며 설치가 간단하고 고속 측정이 가능하여 많이 사용되고 있는 방법이다. CCD 카메라에 획득된 선모양의 레이저빔 영상에서 추출한 3차원 형상 정보의 분해능은 관측 길이에 대응하는 CCD 카메라의 픽셀(pixel) 분해능에 의존한다. 물체의 요철이 크지않은 경우 CCD 카메라에 맺히는 레이저빔 영상의 요철도 크지않아 측정 정밀도를 높이는데 한계가 있다. 이 경우 sub-pixel 분해능을 갖도록 소프트웨어적으로 처리하는 방법이 있으나 시간이 많이 소요되고, 점(point) 측정이 아닌 선모양의 레이저빔을 이용한 형상 측정시에는 선 전체에 걸쳐 빔의 세기가 균일하지 않아 어려움이 있다.

* 한국원자력연구소 레이저가공/광계측팀

광학적으로 측정 분해능을 높이는 방법은 영상배율을 확대하는 것인데, 이 경우 측정하는 면적이 줄어들게 된다. 측정범위를 유지하면서 측정분해능을 높이는 방법으로는 배율의 방향성 확대를 고려할 수 있는데 이에 대해서는 발표된 예⁽³⁾가 있다. 그들의 착상은 하나의 원통형 렌즈를 사용하는 것으로, 측정대상체로부터 CCD 센서에 맺히는 영상의 광입사 방향(X축, Y축 : Fig.3)에 따라 초점면이 달라져 높낮이의 측정 범위가 작아지는 문제점을 가지고 있다. 영상렌즈의 조리개를 작게하면 초점이 맞는 영역(depth of focus)이 커져 이 방식의 광학계로도 측정 범위안에서 선명한 상을 얻을 수 있으나, 실제 현장에서 사용할 때 조리개를 닫는다는 것은 광량의 감소를 의미하기 때문에 사용에 많은 제약이 따른다. 또한 레이저 점(spot)을 조사하여 한 포인트(point)를 측정하는 삼각측정 방식의 경우 영상의 흐림(image blur)이 큰 문제가 안될 수도 있으나, 선모양의 빔을 조사하는 측정 장치에서는 상의 흐림은 곧 물체 표면에서 측정 공간 분해능의 저하를 초래하므로 선명한 영상을 얻는 것이 아주 중요하다.

본 연구에서는 측정대상체에 조사된 선모양의 한 레이저빔의 수직(원통형렌즈의 폭, X축, Fig.3)방향 확대배율을 수평방향(볼록원통형렌즈의 길이방향 : Y축, Fig.3) 확대배율 보다 상대적으로 높여 배율이 방향성 확대된 영상을 광학적으로 획득함으로써 개선된 분해능을 갖는 3차원 형상정보 추출 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 제안한 광학적 방향성 배율 확대 방식은 볼록과 오목 원통형렌즈(cylindrical lens)를 같이 사용함으로써 광입사 방향에 관계없이 CCD 센서에 맺히는 영상의 초점면이 일치된다.

2. 삼각측정법을 이용한 형상측정 시스템의 기본 원리

레이저 삼각측정 방식의 기본 원리는 Fig.1과 같다. Fig.1에서 레이저 입사각 n 과 CCD카메라의 관측각도 θ 및 배율 $m(m=f'/f)$ 은 알려진 변수이다. 영상 삼각형의 y' 는 CCD 카메라를 통하여 획득한 영상에서 추출한 높이 정보이다. 그러므로 영상삼각형의 높이정보 y' 와 대상체 삼각형의 기준선에 대한 상대적인 높이정보 z 는 식 (1)과 같은 관계가 성립된다.

$$y' = mz \frac{\sin(n + \theta)}{\cos(n)} \quad (1)$$

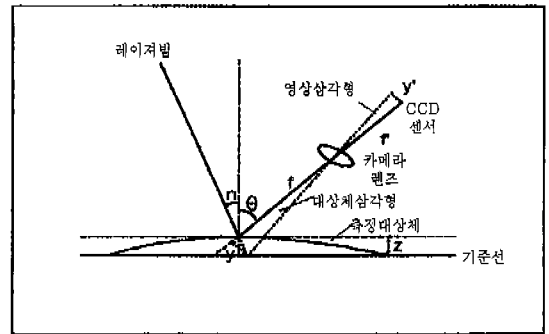


Fig.1 Triangulation principle

Fig.2는 선모양의 레이저빔을 측정대상체에 조사할때 기준면에 대한 물체 표면의 높이 정보에 따른 변형된 선모양의 레이저빔 형태를 보여준다. 측정대상체에 조사된 선모양의 한 레이저빔 영상의 각 점은 그 위치에서의 높이 정보량에 의해 기준면의 수직방향으로 변형이 된다. 표면 형상의 변화에 의하여 변형된 이 선모양을 한 레이저빔의 영상을 CCD 카메라로 획득하여 3차원 형상 정보를 추출하게 된다. 측정대상체에 대한 하나의 완전한 형상정보는 측정 대상체의 이동⁽⁴⁾ 혹은 레이저빔의 이동⁽⁵⁾⁽⁶⁾을 사용하여 획득한다.

3. 선모양을 한 레이저 빔의 방향성 배율 확대를 이용한 형상측정 시스템의 구성

Fig.3은 선모양을 한 레이저빔의 방향성 배율 확대를 이용한 형상측정 시스템 구성도이다. 다이오드 레이저 빔은 집속렌즈와 원통형렌즈를 통과하여 대상체의 표면에 선모양으로 집속되어 조사된다. 표면의 형상 변화에 의해 변형된 선모양의 레이저 빔은 볼록과 오목 원통형 렌즈와 필터를 통과하여 CCD 센서에 영상이 맺힌다. CCD센서의 영상은 영상신호처리 전용 보드의 버퍼에 저장이 된다. 영상신호처리 보드에 획득된 영상은 640x480 픽셀 행렬에 256단계의 밝기 강도값으로 구성되어 있고 영상의 각 열에는 측정대상체의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 하나씩 존재하므로 하나의 영상에는 640개의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 존재한다. 본 시스템에서는 파장 670nm, 출력 10mW의 다이오드 레이저와 레이저 빔 이외의 잡신호인 주변광을 차단하기 위한 색유리 필터를 사용하였다.

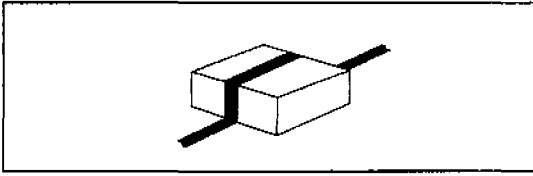


Fig. 2 Laser light stripe technique.

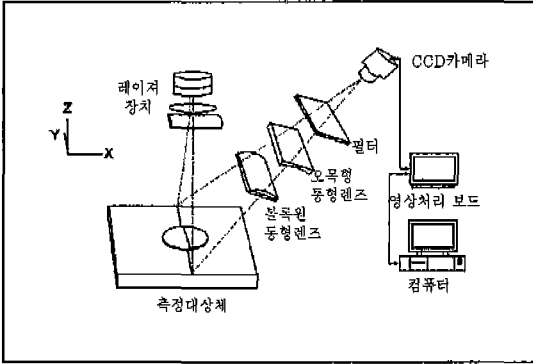


Fig. 3 System configuration of a laser profilometer with directional magnifications

Fig. 3의 시스템에 구성된 블록과 오목의 원통형 렌즈를 사용하여 레이저빔의 방향성 배율이 확대된 영상을 얻는 자세한 과정은 Fig. 4에 나타나있다. Fig. 4(a)는 레이저빔이 조사된 측정 대상체 영상이 CCD 카메라에 맺히는 과정에서 원통형 렌즈의 길이 방향인 Y축 단면을 통과하는 광경로를 설명하고 Fig. 4(b)는 원통형 렌즈의 폭방향인 X축 단면을 통과하는 광경로를 설명한다(Fig. 3). Fig. 4의 ②는 블록 원통형 렌즈이며 ③은 오목 원통형 렌즈이다. 측정 대상체 영상이 CCD카메라에 맺히는 과정에서 원통형 렌즈들은 Y축 단면을 통과하는 광의 경로에 거의 영향을 미치지 않으므로 CCD 카메라에 맺히는 영상은 Y축 방향으로 확대되지 않은 영상이 맺힌다. Fig. 4(b)는 원통형 렌즈의 X축 단면을 통과하는 광경로를 나타낸 그림으로 Fig. 4(a)와는 다른 확대 배율을 가진다. 블록 원통형 렌즈의 초점거리가 f_1 , 오목 원통형 렌즈의 초점거리가 $-f_2$ 라 할 때, Fig. 4(b)와 같이 초점점이 측정 대상체 면과 일치한다면 f_2/f_1 만큼의 확대배율을 추가로 얻게 된다. 따라서 f_1 과 f_2 를 변화시키거나 두 렌즈사이의 거리를 변화시킴으로써 확대 배율을 변화시키는 줌(zoom)효과도 얻을 수 있다.

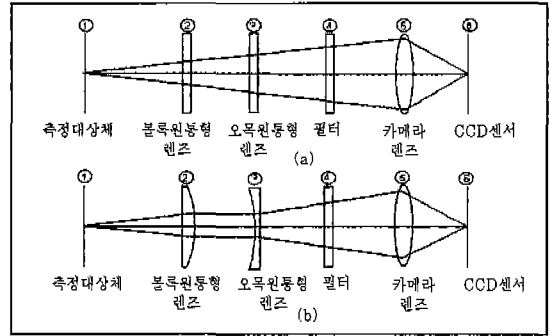


Fig. 4 Principle of Directional Magnifications

4. 형상 재구성을 위한 영상신호처리

본 연구에서는 2Mbyte의 메모리 버퍼와 기본 라이브러리를 지원하는 영상신호처리 전용보드인 DT2867(Data Translator사)을 사용하였다. DT2867의 채널 0에 연결된 CCD 카메라(Pulnix TM-7CN)를 사용하여 영상을 획득하였으며, 빠른속도의 형상정보 추출을 위하여 영상획득에서 중심선 추출 과정까지 DT2867보드가 실시간 혹은 준실시간으로 지원하는 기능들만을 활용하였다. 최종단계인 중심선의 위치를 메모리로 가져와서 하드디스크에 저장하는 기능은 개인용 컴퓨터의 중앙연산처리 장치가 담당하였다. 이를 위한 전체 순서도는 Fig. 5와 같다.

a) 입력환경설정

영상획득 전 입력환경인 바닥선(base line), 윗선(top line), 선폭(line width) 값은 사용자에 의하여 설정되거나 기본값으로 설정된다. 전체영상에서 실제 측정하고자 하는 영역은 최소변이와 최대 변이 사이의 영상이므로 최소, 최대 변이 크기를 알면 원하는 측정영역의 바닥선과 윗선을 설정해 줄 수 있다. 선폭(픽셀단위)은 시스템의 설정시 CCD 카메라에 잡히는 영상의 각 열에서 선모양의 레이저빔이 갖는 픽셀단위의 평균 선폭값을 의미한다.

b) 경계값 결정

경계값(threshold value)은 이진 영상을 얻기 위한 변수이며 입력환경에서 설정된 선폭값으로부터 유도된다. 경계값 K는 아래 식 (2)를 만족하는 i의 최대값이다. 식 (2)에서 SUM(i)는 픽셀강도값 i의 히스토그램(histogram)값을 누적 합산 한 값으로, 픽셀 강도값 i는 최대값 255로부터 1씩 순차적으로 감소되는 값이다.

$$\text{SUM}(i) \geq \text{선택} * 640 \quad (2)$$

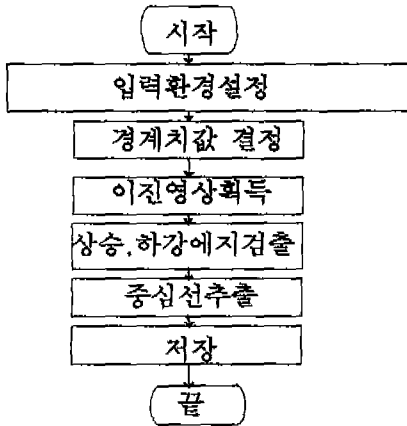


Fig.5 Flowchart of image processing for image reconstructions.

c) 이진영상 획득

DT2867은 히스토그램 계산을 실시간으로 제공하며, 경계값이 결정되면 입력 LUT (look up table)를 사용하여 경계값 이상의 픽셀은 1, 경계값 이하의 픽셀은 0값을 갖는 이진영상을 획득한다.

d) 상승, 하강경계선 검출

획득된 이진영상에서 선모양을 한 레이저빔의 상승경계선(rising edge)과 하강경계선(falling edge)을 추출하기 위하여 영상에 step1창(3x1)을 사용하여 콘볼루션을 실시하였다. 콘볼루션 결과 상승경계선(rising edge)값은 2, 하강경계선(falling edge) 값은 3 및 중심선 후보 픽셀들은 1의 값을 가진다.

$$\text{step 1} = \begin{bmatrix} -1, \\ 4, \\ -2 \end{bmatrix}$$

e) 중심선 추출

중심선을 추출하기 위한 준비 단계로 실시간 지원이 가능한 연산 LUT(processing LUT)를 사용하여 상승 경계선값은 3, 하강 경계선값은 5, 중심선 후보값은 1로 설정하였다. 상승경계선과 하강경계선이 얻어진 영상에서 세션화(skeleton) 과정에 의한 중심선 추출을 위하여 step2창(3x1)을 사용하여 콘볼루션을 설정된 수만큼 반복적으로 실시하여 각 열의 중심선을 추출하였다. 매 콘

볼루션 실행시 사용하는 연산 LUT의 변환 값은 다음과 같다.

$$\text{step 2} = \begin{bmatrix} 11 \\ 3 \\ 7 \end{bmatrix}$$

- 연산 LUT : 43→3:상승경계선
- 21→1:중심선후보
- 49→5:하강경계선
- 45, 71, 56→15 : 중심픽셀후보
- 44, 53, 42→14 : 중심픽셀후보
- 그외 → 0

연산 LUT에서 설정되는 중심픽셀값 15는 영상의 각 열(column)에서 홀수개의 중심 후보 픽셀이 상승 경계선과 하강 경계선 사이에 존재할 경우에 유도되며, 중심 픽셀값 14는 짝수개의 중심 후보 픽셀이 있는 경우에 유도된다. 콘볼루션이 끝난 최종단계에서 홀수 후보군으로부터 추출되는 중심 픽셀은 픽셀 단위의 분해능으로 추출되며 45 혹은 56의 값을 가진다. 짝수 후보군으로부터 추출되는 중심 픽셀은 상승경계선과 하강경계선 사이의 정확한 중심위치에 픽셀이 존재하지 않으므로 픽셀과 픽셀 사이의 중간 위치가 중심으로 선택되며 이는 픽셀 분해능 보다는 조금 개선된 분해능을 가지고 44 혹은 53의 값을 갖는다.

5. 형상측정 실험

측정대상체로는 실험실에서 제작한 만원구의 모형과 동전을 사용하였다. 본 장치로 측정된 만원구 모형에 대한 측정 결과를 1μm의 분해능을 가지는 정밀 형상측정기(UBM사, MMS)로 측정된 결과와 비교하여 실제 측정 오차를 측정하였다. 다이오드 레이저 빔은 집속렌즈와 원통형 렌즈를 사용하여 길이 20mm의 선모양으로 만들어 측정대상체의 기준면에 대하여 수직으로 조사되었으며, CCD 카메라는 기준면에 대하여 45° 각도에서 영상을 획득하였다. 카메라의 영상 렌즈로는 초점거리가 105mm인 니콘 마크로 렌즈를 사용하였으며, 원통형렌즈는 초점거리 100mm인 볼록렌즈와 -250mm인 오목렌즈를 사용하였고 렌즈 초점이 물체 기준면에 일치되게 구성하여 2.5배 방향성 확대 배율을 얻었다. 광학적으로 배율을

2.5배 방향성 확대한 영상에 대한 측정 결과는 확대하지 않은 영상에 대한 측정결과와 cubic B spline 보간 함수를 사용하여 소프트웨어적으로 4배 확대한 영상에 대한 측정결과와 서로 비교되었다.

6. 실험결과 및 검토

IBM PC 486/66을 사용하여 배울을 방향성 확대 하지 않은 장치에서 높이 정보를 추출하는 시간은 약 1초이며, 광학적으로 2.5배 확대한 영상에서는 1.5초, 보간함수를 사용하여 소프트웨어적으로 4배 확대한 영상에 대해서는 약 3초 정도의 시간이 소요되었다. Fig. 6은 방향성 확대를 하지 않은 장치로 측정된 주화(100원)의 형상(80x80)으로 전체적인 해상도가 떨어지며 표면의 형상이 명확히 관측되지 않았다. Fig. 7은 일반적으로 사용되는 cubic B spline 보간함수를 사용하여 소프트웨어적으로 배울을 4배 방향성 확대한 영상에 대한 형상 측정 실험결과(60x80)로, 해상도는 크게 증가되었으나 형상 추출 시간이 상대적으로 많이 소모되었으며, 영상 전체에 대하여 일정한 간격으로 확대를 실시함으로써 경계선 구역도 같은 배율로 확대되어 정확한 경계선 추출시 오차발생의 확률이 높아져 형상 재구성시 일부 표면이 불규칙한 현상을 보였다. Fig. 8은 광학적으로 배울을 2.5배 방향성 확대한 영상(60x80)에 대한 결과로 개선된 분해능을 갖는 측정결과를 제공하였다. 본 실험에서는 시스템의 성능 분석을 위하여 실험실에서 제작한 반원구 모형에 대해 측정된 결과를 표준 데이터와 서로 비교하였다. 표준데이터는 1 μ m의 분해능을 갖고 있는 정밀 형상 측정 시스템을 사용하여 획득하였다. Fig. 9는 확대하지 않은 영상에 대한 측정결과와 표준데이터를 나타내며, 절대값을 취한 오차에 대한 평균오차는 18.6 μ m였다. Fig. 10은 배울을 2.5배 방향성 확대한 영상에 대한 측정결과를 표준 데이터와 비교한 것으로 절대값을 취한 오차에 대한 평균오차는 5.6 μ m였다. Fig. 9와 Fig. 10에서 가로축은 픽셀단위의 길이, 세로축은 (μ m)단위의 높이값, AA는 1 μ m분해능을 갖는 표준데이터, BB는 오차의 절대값, CC는 선모양의 레이저 빔을 이용한 측정 데이터이다. 본 실험 구성에서 이론적으로 계산된 확대하지 않은 영상의 픽셀분해능은 32.5 μ m이며 2.5배 확대한 영상의 픽셀분해능은 13.5 μ m로 본 실험결과는 이 이론치의 범위안에 들어감을 알 수 있다.

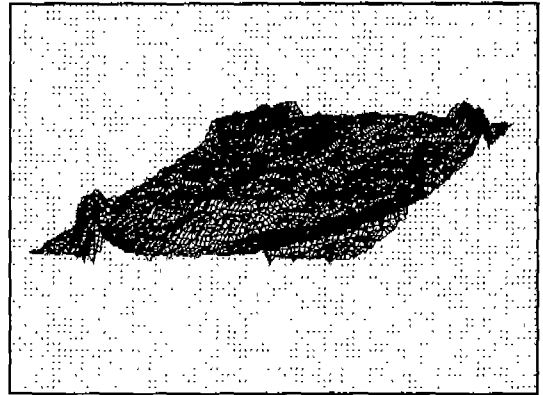


Fig.6 Measured profile of non magnified coin image.

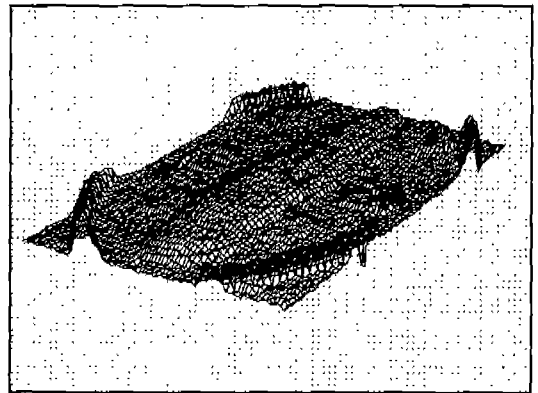


Fig.7 Measured profile of magnified coin image using Cubic-B spline function.

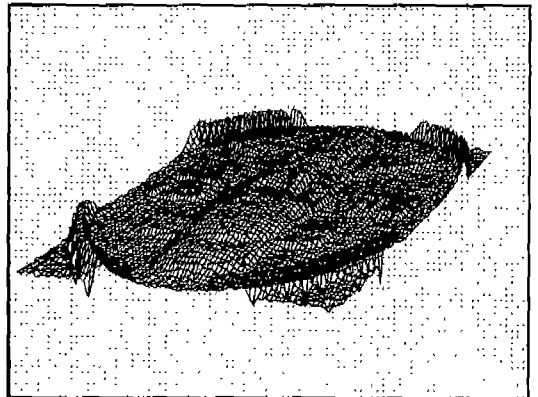


Fig.8 Measured profile of magnified coin image using a pair of cylindrical lens.

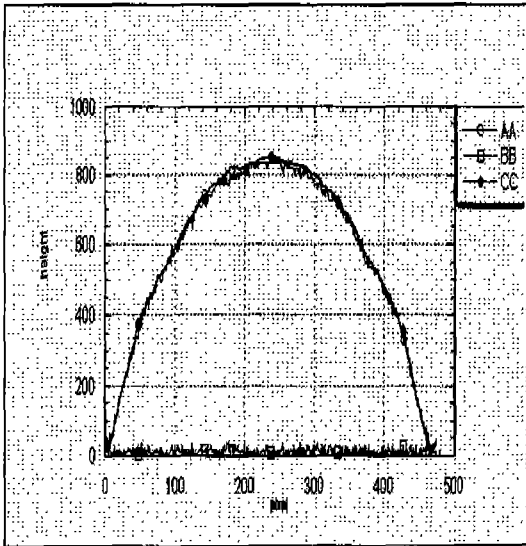


Fig. 9 Measured data comparison of the reference object from MMS and a laser light stripe of a non magnified image.

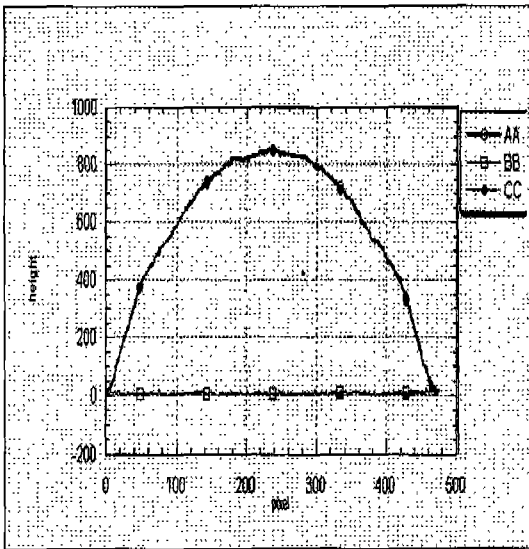


Fig. 10 Measured data comparison of the reference object from MMS and a laser light stripe of a directional magnified image.

7. 결론

선모양의 레이저빔을 이용한 형상 측정장치에 블록원통

형렌즈와 오목원통형렌즈로 구성된 방향성 배율 확대 영상광학계를 도입하여 측정대상체의 높이정보에 대해 개선된 분해능을 갖는 형상측정 시스템을 제안하였고 정밀도의 향상을 실험적으로 실증하였다. 광학적으로 배율이 방향성 확대된 영상에 대한 측정결과는 확대하지 않은 영상에 대한 측정결과에 비하여 상대적으로 개선된 높이정보 분해능을 제공하였고, 소프트웨어적으로 보간함수를 사용하여 확대한 영상에 대한 측정결과와 비교하여서도 상대적으로 빠른 속도와 정밀 측정이 가능함을 확인하였다. 본 시스템은 하드웨어의 구성이 용이하고 실제 현장 활용이 가능한 시스템으로 원통형 렌즈의 위치와 간격을 변화시킴으로써 다양한 확대 배율을 얻을 수 있다. 현재 하나의 선모양을 한 레이저빔에 대한 형상정보 추출 시간은 1초 이상이 소요되므로 차후 더욱 빠르고 정확한 형상정보 추출에 관한 연구가 필요하고 특히 반사율이 높은 물체의 형상측정에서 선모양을 한 레이저빔의 정확한 중심선 추출에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

1. W. K. Pratt, Digital image processing, a Wiley-Interscience Publication, 1991.
2. T. C. Strand, "Optical three-dimensional sensing for machine vision", Optical Engineering, **24**, 33-40, 1985.
3. J. Lewandowski, L. Desjardins "Light sectioning with improved depth resolution", Optical Engineering, **34**, 2481-2486, 1995.
4. J. Klicker, "A very compact two-dimensional triangulation-based scanning system for robot vision", SPIE, **1822**, 217-227, 1992.
5. D. L. Mader and J. C. Kuurstra "In-situ optical profilometry of CANDU fuel channels", Proceedings of the ASME-JSME, ICONE-4, 1996.
6. D. Holm, "Identification and integrity verification of final disposal casks" SPIE, **2248**, 1994.