

선형레이저빔의 적응적 패턴 분할을 이용한 3차원 표면형상 측정 장치의 성능 향상에 관한 연구

박승규*, 백성훈*, 김대규**, 장원석**, 이일근***, 김철중*

A Study on the Performance Improvement of a 3-D Shape Measuring System Using Adaptive Pattern Clustering of Line-Shaped Laser Light

Seung-Kyu Park*, Sung-Hoon Baik*, Dae-Kyu Kim**,
Won-Seok Jang**, Ill-Keun Rhee***, Cheol-Jung Kim*

ABSTRACT

One of the main problems in 3D shape measuring systems that use the triangulation of line-shaped laser light is precise center line detection of line-shaped laser stripe. The intensity of a line-shaped laser light stripe on the CCD image varies following to the reflection angles, colors and shapes of objects. In this paper, a new center line detection algorithm to compensate the local intensity variation on a line-shaped laser light stripe is proposed. The 3-D surface shape measuring system using the proposed center line detection algorithm can measure 3-D surface shape with enhanced measurement resolution by using the dynamic shape reconstruction with adaptive pattern clustering of the line-shaped laser light. This proposed 3-D shape measuring system can be easily applied to practical situations of measuring 3-D surface by virtue of high speed measurement and compact hardware compositions.

Key Words : Traingulation(삼각법), 3D surface measuring system(3차원표면형상측장치), Measurement resolution(측정분해능), Line-shaped laser light(선형레이저), Adaptive pattern clustering(적응적 패턴분할), Center line detection(중심선추출)

1. 서론

주어진 물체의 형상을 측정하는 기술은 자동화 시스템에 의해 대상체의 크기와 형태를 전산화 하는 기계적 시각(machine vision) 시스템⁽¹⁾의 구성에서 중요한 부분 중의 하나이다. 광학적인 방법을 이용한 3차원 형상 측정 기술은 접촉식의 기계적 방법보다 경제적이면서도 측정속도가 빠르고 원격 비접촉식이며 고정밀 측정이 가능하여 이 분야에

많은 연구가 진행되어 왔다⁽²⁾⁽³⁾. 그러나 이러한 광학적 방법의 3차원 형상 측정장치는 측정 대상체의 표면 굴곡이 심하거나 난 반사가 심한 지역 등에서 재현성과 측정 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 광학식 3차원 형상측정 방법 중 레이저 점(spot)을 사용하는 장치는 물체 표면의 색깔이나 반사각, 난반사 등으로 인하여 센서에 입사되는 빛의 강도값이 변하여도 능동적으로 레이저 출력을 가변 시킴으로써 에러를 보정할 수 있으나 측

* 한국원자력연구소 양자광학기술개발팀

** 건양대학교 공과대학 정보전자공학과

*** 한남대학교 공과대학 전자공학과

정 속도가 느린 단점이 있다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 선형 광원을 사용하는 광삼각법의 3차원 형상측정 방법은 CCD 카메라를 사용하여 획득한 선형 레이저빔이 주사된 측정대상체 영상으로부터 한번에 한 줄에 대한 형상 정보를 추출하므로 측정속도는 빠르나 물체 표면의 굴곡이나 색깔, 반사각 등의 변화가 심할 경우 CCD 카메라에 획득된 선형레이저빔의 강도 분포는 균일하지가 않아 측정 정밀도가 떨어지는 단점이 있다⁽⁶⁾. 이 문제를 개선시키기 위하여 레이저빔의 중심 픽셀에 위치정보 가중치를 증가시키는 방법⁽⁷⁾과 측정대상체에 대한 정보를 미리 데이터베이스화⁽⁸⁾ 시켜 참고하는 등 여러 가지 방법의 연구가 있어왔고 각 방법의 측정 결과는 측정 대상체의 종류나 측정 환경에 따라 장단점이 있다.

본 논문에서는 선형으로 주사된 레이저빔의 패턴을 측정 환경에 따라 적응적으로 영역 분할하여 중심선을 추출함으로써 중심선 추출 정밀도를 높이는 3차원 표면 형상 측정 장치를 제안하였다. 이상적인 측정 환경에서 획득되는 선형 레이저빔 영상의 강도분포는 일정하다고 가정할 수 있으나, 실제 측정 환경에서 획득되는 선형 레이저빔 영상은 난반사나 유도반사 등 여러 조건에 의하여 강도 분포가 일정하지 않다. 제안된 3차원 표면 형상 측정 신호처리 알고리즘은 측정 대상체로부터 반사되어 CCD 카메라에 촬상된 강도 분포가 일정하지 않는 선형 레이저빔 영상을 비슷한 강도 분포를 가지는 영역별로 측정 영역을 분할하고, 분할된 영역에서 독립적으로 중심선을 추출함으로써 중심선 추출 정밀도를 높인다.

2. 본 론

2.1 광 삼각법의 기본 원리

레이저 삼각 측정 방식의 기본 원리는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 레이저 입사각에 대한 CCD 카메라의 관측각도 θ 및 배율 $m(m=f/f')$ 은 알려진 변수이다. 영상 삼각형의 y' 은 CCD 카메라를 통하여 획득한 영상에서 추출한 높이 정보이다. 그러므로 영상 삼각형의 높이정보 y' 와 실제 높이 정보인 대상체 삼각형의 기준선에 대한 상대적인 높이 값 Z 는 삼각법에 의하여 식 (1)과 같은 관계가 성립된다. 그러므로 사용자는 CCD 카메라에 획득된 선형레이저빔이 조사된 측정 대상체 영상에서 기준선과 선형레이저빔의 중심점 사이의 거리값인

y' 값을 구함으로써 실제 측정 대상체의 높이 값인 Z 값을 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$y' = mz \frac{\sin(\theta)}{1 + (z/f)\cot(\theta)} \quad (1)$$

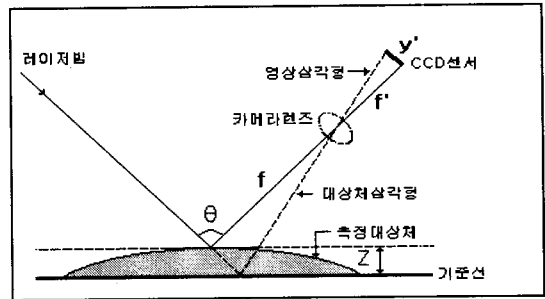


Fig. 1 Principle of laser triangulation

2.2 선형광원을 이용한 3차원 표면형상측정장치

선형 광원을 이용한 3차원 표면 형상 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 선형 레이저빔을 만드는 광원 장치, 광학적 비등방성 분해능 향상 장치⁽⁹⁾, 조사된 선형 레이저빔 영상을 획득하는 영상 광학계, CCD 카메라 및 영상신호처리를 위한 영상처리보드와 컴퓨터로 구성된다. 다이오드 레이저빔은 집속렌즈와 원통형 렌즈를 통과하여 측정 대상체의 표면에 선형의 일정한 강도 분포로 집속되어 조사된다. 측정 대상체에 조사된 선형 레이저빔 영상의 각 점은 그 위치에서의 높이 값에 비례하여 기준면의 수직방향으로 변형이 된다. 표면의 높이 변화에 의하여 변형된 선형의 레이저빔은 광학식 분해능 향상 장치와 편광 필터 및 색 필터를 통과하여 CCD 센서에 영상이 맺힌다.

신호처리는 CCD 카메라에 획득된 표면 형상의 변화에 의하여 변형된 선모양을 한 레이저빔 영상에서 3차원 형상 정보를 추출할 수 있다. 측정대상체에 대한 하나의 완전한 3차원 형상정보는 측정대상체를 이동시켜 획득한다. CCD 센서에 맺힌 영상은 영상신호처리 전용 보드의 버퍼에 저장된다. 영상처리 보드에 저장된 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.

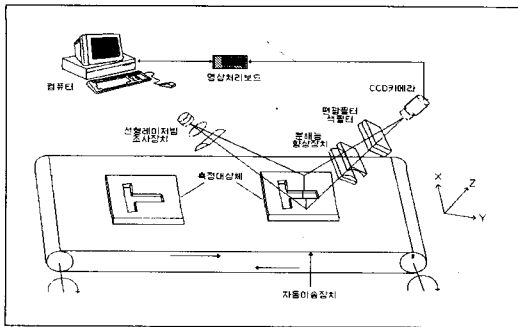


Fig. 2 The system configuration of the 3-D surface shape measurement system

2.2.1 장치 구성

배경 영상으로부터 레이저빔의 구분이 용이한 측정 환경에서는 낮은 출력의 광원을 사용하여도 무방하나 획득된 영상에서 레이저빔의 구분이 어려운 측정환경에서는 출력이 높은 레이저빔을 사용하여 구분이 용이하도록 하여야 한다. 본 시스템에서는 파장 670nm, 출력 10mW의 다이오드 레이저를 사용하였고 난반사되어 카메라로 유입되는 빛을 줄이기 위한 편광필터와 레이저 빔 이외의 잡신호인 주변광을 차단하기 위한 색유리 필터를 사용하였다. 또한 광원으로 사용되는 다이오드 레이저는 정전류 제어방식의 다이오드레이저 전용 전원장치(ED lab: ED330)를 사용하였다. 선모양의 레이저빔 조사 장치는 집속 렌즈와 원통형 렌즈로 구성되어 있다.

본 연구에서는 고속의 표면 형상측정을 위하여 영상처리 전용보드(MATROX사, PCI, METEOR-2)를 사용하였으며 RS170방식의 흑백 카메라를 사용하여 영상을 획득하였다. IBM PC(인텔 CPU 400MHz)에 장착된 영상처리 전용 보드는 PCI형이며 2MByte의 메모리를 갖고 있다. 영상처리 보드에 의하여 획득된 영상은 640x480 픽셀로 구성되며 각 픽셀은 256 단계의 밝기 강도 값을 갖는다.

2.3 형상 재구성을 위한 신호처리 소프트웨어

CCD 카메라로 획득한 선형 레이저빔 영상에 대해 영상신호처리를 통하여 측정 대상체의 3차원 위치 좌표를 추출하는 과정에서 가장 중요한 부분은 정확히 선형 레이저빔의 중심선 위치 정보를 추출하는 것이다. Fig. 2에서 주사되는 선형 레이

저빔의 길이방향인 X축 방향으로 강도분포는 일정하다고 가정할 수 있다. 그러나 측정 대상체에 조사된 후 반사되어 CCD 카메라에 맺혀진 영상에서 선형 레이저빔의 길이 방향으로 강도 분포는 대응되는 측정 대상체 상에서의 색상이나 반사각, 유도반사 등에 의하여 일정하지 않다. 이러한 불규칙 반사는 특히 반사가 심한 표면이나 굴곡의 변화가 심한 측정 대상체 등의 경우에 심하고 이러한 불규칙 반사 문제는 실제 측정 과정에서 쉽게 해결되지 않는 문제이다.

본 논문에서 제안한 3차원 표면 형상 측정 신호처리 알고리즘은 측정환경에 따라 능동적으로 선형 레이저빔 영상을 비슷한 강도분포를 갖는 여러개의 독립적인 측정 영역으로 분할한 후, 분할된 영역에 대해 독립적으로 레이저빔 중심선의 위치를 추출함으로써 시스템의 측정 효율을 높인다. 또한 먼저 찾아진 중심선의 위치 정보로부터 세분하여 다시 정밀 중심선의 위치를 추출하여 서브 픽셀 분해능을 제공한다.

(a) 입력환경설정

전체 획득된 영상에서 실제 신호처리 하고자 하는 영역은 측정대상체의 최소 변이와 최대 변이 사이의 영역이므로 효율적인 신호처리를 위하여 신호처리 영역에 해당하는 영역인 바닥선(base line) 값과 윗선(top line) 값을 설정한다. 또한 영상 획득 후 선형 레이저빔을 추출하기 위한 변수의 하나인 선폭(line width) 값을 설정한다. 이 값은 CCD 센서에 촬상된 영상에서 레이저빔 폭이 위치하는 평균 픽셀 수를 의미하고 사용자는 소프트웨어가 제공하는 프로파일 기능 등을 활용하여 전체 영상에서 선형레이저 빔의 평균 픽셀 폭 값을 측정 후 수동으로 설정한다. 또한 사용자는 측정 대상체의 이동 속도인 모터의 속도와 이동 거리를 설정할 수 있다.

(b) 영상획득 및 중심선 추출

Fig. 3은 CCD 카메라에 획득된 영상으로부터 선형 레이저빔 영상의 중심선을 추출하기 위하여 본 논문에서 제안한 신호처리 과정을 그림으로 도시한 것이다.

선형 레이저빔이 주사된 상태에서 일정한 속도로 이동되는 측정 대상체에 대하여 컴퓨터는 CCD 카메라를 사용하여 Fig. 3의 (1)과 같은 하나의 영상을 획득한 후, 저주파 통과필터(3x3, 5x5 창)를 사용하여 전처리를 수행한 후 Fig. 3의 (2)

와 같이 영상처리 전용 보드 상의 두 버퍼 메모리에 각각 저장한다. 이진영상을 얻기 위하여 두 번째 버퍼 메모리에 저장된 영상에 대하여 신호처리기는 다음 식 (2)를 만족하는 픽셀 강도값 i 의 최대값에 해당하는 값인 경계값을 계산한다.

$$\text{SUM}[i] \geq (\text{선폭값}) \times (\text{선길이값}) \quad (2)$$

여기서 SUM[i]는 획득된 영상에 대한 픽셀 강도값 i 의 히스토그램(histogram) 값을 누적 합산한 값으로, 이때 픽셀 강도값 i 는 최대값 255부터 0으로 1씩 순차적으로 감소되는 값이다. 선폭 값은 사용자에게 의해 설정된 값으로 선형 레이저 빔이 선폭 방향으로 평균적으로 차지하는 픽셀 수를 의미하고, 선길이 값은 획득된 영상에서 행 방향으로의 픽셀 수(640)를 의미한다.

경계 값을 계산한 후, 신호처리기는 선형 레이저 빔의 적응적 패턴 분할 과정에서 시간 손실을 최소화 하기 위하여 Fig. 3의 (3)과 같이 경계값을 기준으로 0과 1의 값을 갖는 이진 영상을 획득한 후, Fig. 3의 (4)와 같이 획득된 영상의 열 방향에 대한 선형 프로파일을 획득한다. 신호처리기는 획득한 열 방향 프로파일에 대하여 행 방향으로 설정된 값(기본:2픽셀) 이상의 0값을 갖는 지역을 제외하고 1x3창 혹은 1x5창의 저주파 통과 필터를 사용하여 전처리를 수행한다.

전처리가 수행된 열 방향 프로파일에 대하여 신호처리기는 기준 설정값(기본:0) 이하의 값을 갖는 위치를 경계면으로 Fig. 3의 (5)와 같이 선형 레이저빔의 패턴 영역 분할을 수행한다. Fig. 3의 (5) 영상과 같이 두 번째 버퍼의 분할된 영역은 Fig. 3의 (6) 영상에 보이는 것 같이 첫 번째 버퍼의 메모리 영상에도 같이 적용된다. 신호처리기는 첫 번째 버퍼 메모리에 저장된 영상의 분할된 영역 각각에 대해 독립적으로 식(2)를 만족하는 레이저 빔 위치 정보 추출을 수행하여 Fig. 3의 (7) 영상과 같은 결과를 얻는다. 여기서 식(2)의 선길이 값은 각각의 분할된 영역이 갖는 행 방향으로의 픽셀 수를 의미한다. Fig. 3의 (3) 영상의 B영역에 보이는 바와 같이 추출되지 않던 레이저빔의 위치 정보가 분할된 영역에 대해 독립적으로 레이저빔의 위치 정보 추출을 수행한 결과 Fig. 3의 (7)영상에 보이는 바와 같이 레이저빔의 위치 정보가 추출됨을 알 수 있다. 이는 측정대상체의 어

두운 배경에서 역 반사되는 레이저빔의 강도가 밝은 배경에서 역 반사되는 레이저빔의 강도보다 상대적으로 약하므로, 밝은 배경 영역과 어두운 배경 영역을 분할하고, 각 영역에 대해 독립적으로 레이저빔의 위치 정보를 추출함으로써 즉, 배경에 대한 상대적인 밝기에 기초하여 레이저빔의 위치를 탐색함으로써 레이저빔 추출 효율을 높였다.

추출된 레이저빔의 위치 정보로부터 레이저빔의 상승경계선과 하강경계선 사이의 중앙에 위치한 중심점을 추출함으로써 Fig. 3의 (8)영상과 같이 레이저빔의 중심선을 추출한다. 획득된 한 영상의 중심선 추출 과정에서 신호처리기는 배경으로부터 구분이 분명한 레이저빔의 위치부터 우선하여 추출하며, 점차로 구분이 약한 레이저빔의 위치를 추출하며, 이 과정에서 기존에 추출한 주위의 중심선 위치를 참고한다. 명확하지 않는 중심점이나 하나의 열에 여러개의 중심점 후보가 있는 경우 이웃하는 중심점 픽셀의 위치 정보 값은 유사하다는 가정하에 이웃 픽셀의 명확한 위치 정보로부터 가장 가까운 값을 선택한다. 중심선 추출과정에서 중심선 정보의 강도 값이 사용자가 설정하는 값 이하로 배경으로부터 분명하지 않는 레이저빔 중심선은 추출을 포기하고 추출된 주위 정보로부터 추후 선형 보간 법으로 위치 정보를 채워 넣는다.

추출된 레이저빔의 중심선 위치를 중심으로 신호처리기는 첫 번째 버퍼의 원 영상에 식 (3)을 적용하여 Fig. 3의 (9)영상과 같이 높은 분해능(sub-pixel resolution)으로 레이저빔의 중심선 위치를 추출한다.

$$P_i = \frac{\sum_{j=P_{i0}-\frac{W}{2}}^{P_{i0}+\frac{W}{2}} (I_{i,j} \times P_{i,j})}{\sum_{j=P_{i0}-\frac{W}{2}}^{P_{i0}+\frac{W}{2}} I_{i,j}} \quad (3)$$

여기서 I_{ij} 는 j 번째 열과 i 번째 행 픽셀의 강도 값이고, $P_{i,j}$ 는 j 번째 열과 i 번째 행 픽셀의 위치 값이다. P_{i0} 는 i 번째 행에서 픽셀 분해능으로 찾아진 중심선의 위치이고 W 는 선폭 값이다. 설정된 값 이하로 배경으로부터 분명하지 않는 레이저빔의 중심선은 Fig. 3의 (9)영상에 보이는 것과 같이 추출된 주위 정보로부터 선형 보간법으로 채워진다.

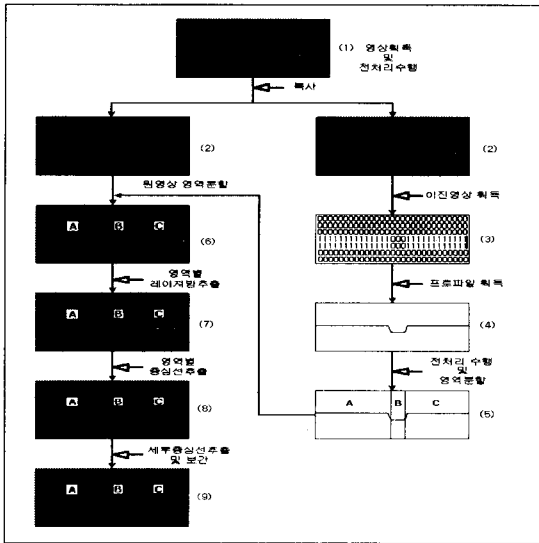


Fig. 3 The graphical procedure of the signal processing for extracting center line

(c) 형상 재구성

식 (1)에 따라 신호처리는 추출된 중심선의 위치 정보로부터 측정 대상체의 실제 높이 값을 계산한 후 이를 메모리에 저장한다. 입력환경에서 설정된 모터의 이동속도와 설정된 거리만큼 측정 대상체를 이동시키면서 형상 측정을 수행한 후, 신호처리는 전체영상을 조합하여 형상을 재구성한다.

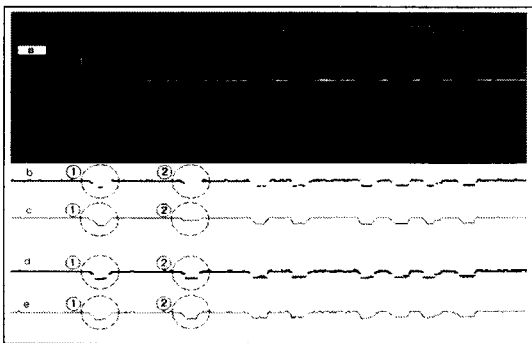


Fig. 4 Measurement results comparison from the conventional method and the proposed adaptive pattern clustered center line extracting method

2.4 형상측정 실험

선형 레이저빔(길이 50mm)은 측정 대상체의 기준 수직면에 대하여 45° 각도로 조사된다. 실험을 위하여 측정대상체 기준 수직면에 대하여 -45° 각도로 기울어진 CCD 카메라(TM-7CN, PULNIX)와 초점거리 105mm의 렌즈(니콘 마크로), 볼록(f:100mm) 및 오목(f:-150mm) 원통형 렌즈, 편광필터 및 색필터가 사용되었다. 측정대상체로는 검은 글자로 음각된 레이저 시스템의 앞 팬널(W40xL5.5xH0.1mm)을 사용하였다. 측정결과는 본 논문에서 제안한 적응적 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법과 수식 (2)를 적용한 전통적인 중심선 추출 방법에 의한 결과들을 Fig. 4에서 서로 비교하였다.

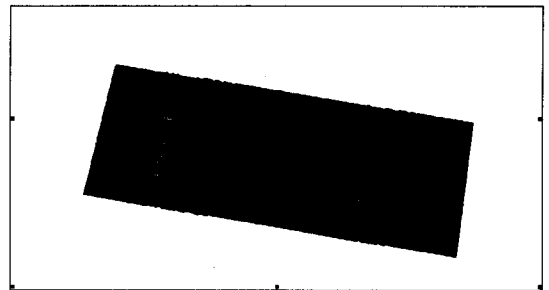


Fig. 5 Measured 3D shape using the conventional center line extracting method

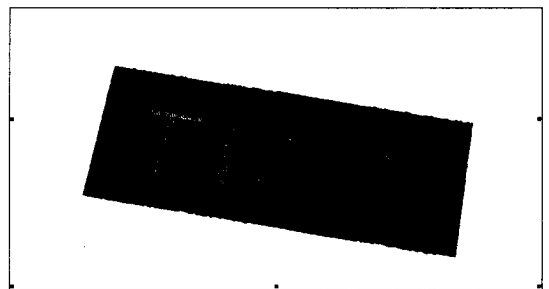


Fig. 6 Measured 3D shape using the proposed adaptive pattern clustered center line extracting method

Fig. 4의 a는 선형레이저 빔이 조사된 측정 대상체인 앞 팬널 샘플을 보여주며 세로선으로 구분된 A-Q는 독립된 측정 영역으로 분할된 패턴을 보여준다. Fig. 4의 b는 수식 (2)를 적용한 전통적

인 중심선 추출 방법에 의하여 얻어진 결과이다. Fig. 4의 d는 본 논문에서 제안한 선형 레이저빔의 적응적인 패턴 분할 방법에 의하여 측정된 결과이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 음각된 검은 글자로부터 반사되어 CCD 카메라에 촬상된 선형 레이저빔의 강도는 회색의 배경부로 반사된 부분의 강도 보다 낮다. 특히 ①, ② 영역에서, 전통적인 중심선 추출 방법은 레이저빔의 위치를 찾지 못한다. 그러나 본 논문에서 제안된 중심선 추출 방법은 영역 ①, ②에서 독립적으로 중심선을 추출함으로써 레이저빔의 위치를 찾아낸다. Fig. 4의 c, e는 Fig. 4의 b와 d로부터 레이저빔을 찾지 못한 부분에 대하여 선형 보간된 결과를 보여준다.

Fig. 5는 전통적인 중심선 추출 방법을 사용하여 형상을 측정한 후 재 구성한 3차원 표면 형상 측정 결과이다. Fig. 6은 본 논문에서 제안된 적응적인 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법을 사용하여 측정한 결과이다. Fig. 5와 6에서 볼 수 있듯이, 제안된 적응적인 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법은 전통적인 중심선 추출 방법보다 가변적인 반사율을 보이는 측정 대상체에서 특히 보다 나은 분해능을 제공할 수 있다. 하나의 획득된 영상으로부터 중심선을 추출한 후 완전한 높이 정보를 추출하는데 시간은, 전통적인 중심선 추출 방법은 약 0.07초 소요되며, 본 논문에서 제안한 적응적 패턴 분할에 의한 중심선 추출 방법은 약 0.1초 소요되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 선형 레이저빔을 이용한 3차원 표면 형상 측정 시스템에서 측정 환경에 따라 적응적으로 레이저빔 패턴을 강도 분포에 따라 분할한 후, 분할된 영역에 대해 독립적으로 중심선을 추출함으로써 측정대상체의 높이 정보에 대하여 개선된 분해능을 제공하는 신호처리 알고리즘을 제안하였고 중심선 추출 능력 향상을 실험적으로 실증하였다. 제안된 알고리즘은 국부적으로 표면 반사율 및 밝기 차이가 심한 측정 대상체의 형상 측정에 큰 효과가 있었다.

차후 연구과제로, 제안된 알고리즘은 패턴 분할 과정에서 기존의 방법보다 약 1.4배의 시간이 더 소요되므로 최소의 시간 손실로 효율적인 패턴 분할이 가능한 방법에 대한 연구가 필요하리라 생각

된다. 또한 측정대상체의 크기에 따라 분해능향상 장치와 편광필터 및 색필터의 크기가 비례하여 커지는 단점을 극복하기 위하여 이 장치를 카메라에 부착시킬 수 있는 모듈화된 장치 구성에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. W. K. Pratt, Digital image processing, a Wiley-Interscience Publication, 1991.
2. D. Holm, "Identification and integrity verification of final disposal casks," SPIE, Vol. 2248, 1994.
3. T. C. Strand, "Optical three dimensional sensing for machine vision," Optical Engineering, Vol. 24, pp. 33-40, 1985.
4. Yoshinori H, Yasushi K, "A 3D measurement system using a CCD sensor and a laser scanner," SPIE, Vol. 2183, pp. 250-256, 1994.
5. Shahzad F. K, Paul R. H, "Profiling of multichip module interconnects with a hybrid high speed triangulation range sensor," SPIE, Vol. 1821, pp. 357-364, 1992.
6. D. L. Mader and J. C. Kuurstra, "In-situ optical profilometry of CANDU fuel channels," Proceedings of the ASME-JSME, ICONE-4, 1996.
7. Daoshan Yang, Shawn Buckley, "New algorithm to calculate the center of laser reflections," SPIE, Vol. 3306, 1998.
8. Jihong Chen, Huicheng Zhouk, "Research on a geometric model based 3D inspection machine," SPIE, Vol. 2902, 1997.
9. S. K. Park, S. H. Baik and C. J. Kim, "A surface profilometer using line-shaped laser light triangulation with anisotropic magnification," The Review of Laser Engineering, Vol. 26, pp. 55-58, 1998.