

판재 곡면변형률 자동측정을 위한 적응 2치영상화

신 건 일* · 권 호 열** · 김 형 중***

Adaptive Image Binarization for Automated Surface Strain Measurement

Shin, Gun Il* · Kwon, Ho Yeol** · Kim, Hyong-Jong***

ABSTRACT

In this paper, an adaptive image binarization scheme is proposed for automated surface strain measurement. At first, we reviewed an image based 3D deformation factor measurement briefly. Then, a new adaptive thresholding method is proposed for the extraction of lattice pattern from a deformed plate image using its local mean and variance. Some experimental results are presented to verify the effectiveness of our approaches.

1. 서 론

3차원 곡면 변형률의 측정은 자동차, 전자 제품, 주방기구 등의 외장 및 부품에 비롯한 수많은 판재 프레스 제품에 나타나는 각종 결함을 검사하고, 금형설계/공정설계의 오류, 공정조건의 변화, 소재 물성의 차이 등 결함 발생의 원인을 규명하여 설계과정에 반영하는데 중요한 실험적 근거를 제공한다. 또한, 다양한 변형률비를 가진 성형조건에서의 주변형률 측정은 판재의 각종 성형성 평가에 사용되는 성형한계도표(Forming Limit Diagram)를 그리기 위한 필수적인 작업이다. 이러한 3차원 곡면 변형률의 측정기술은 판재성형 문제에만 국한되지 않고 단조나 압축, 고분자 화합물이나 초소성 재료의 중공성형법(Blow Molding)등 다양한 성형 분야에서 응용되고 있다.

3차원 곡면의 변형률 분포를 측정하는 기술은 지난 수십 년간 판재성형의 해석·실험·설계분야에

종사하는 수많은 학자와 기술자들에 의하여 고안·개선되어 왔으며, 최근에 컴퓨터 영상처리 기술을 이용하여 3차원 곡면에 대한 데이터를 자동적으로 얻는 방법이 소개되기 시작하였다.

Schedin과 Melander[1]는 카메라가 장착된 3축 시스템으로 정사각형 격자가 입혀진 소재를 촬영하여 그 화상을 모니터에서 디지털이징하는 방법을 고안하였고, Ayres 등[2]과 Harvey[3]는 원형 격자와 컴퓨터 비전 기술을 이용한 상업용 변형률 측정장치를 개발한 바 있다. Miyoshi등[4]과 Bednarski[5]는 표면 상의 3점을 인식하는 2대의 카메라 장치로부터 한 영역의 변형률을 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 이들 연구는 종래의 연구에서보다 비교적 진보된 방법을 사용하였음에도 불구하고 1회의 측정으로 기껏해야 1개의 변형률 값밖에 얻을 수 없어서 판재성형 제품의 측정에 응용되는 데는 역시 정확도에 대한 신뢰성 문제나 다대한 시간·인력의 소요 문제 등으로 인하여 제한적으로 이용될 수밖에 없었다.

한편, Lee등[6,7]은 컴퓨터 화상처리기술을 이용하여 두 방향의 화상으로부터 한 영역의 변형률을 한꺼번에 측정할 수 있는 시스템 ASAME (Automated Strain Analysis and Mesuring Envi-

* 강원대학교 대학원 전자공학과 석사과정

** 강원대학교 컴퓨터공학과 부교수

*** 강원대학교 기계공학과 부교수

이 연구는 강원대학교 멀티미디어 특화연구센터(MRC)의 1997년도 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

ronment)를 개발하여 상용화 단계까지 발전시켰으며, 최근에는 변형률 측정치의 오차 요인을 분석하기 위한 연구[8,9]를 계속하고 있다. 이 시스템은 현재까지 개발된 판재 변형률 측정장치 중 가장 진보된 것으로 알려져 있다. Dankert와 Albrektzen[10]도 이 장치를 이용하여 변형중의 판재의 가공성에 관한 연구를 한 바 있다.

그러나 이와 같은 영상에 의한 판재의 변형률 측정기술에 관한 대부분의 연구는 측정 작업의 자동화 수준과 측정 결과의 정확도면에서 아직 많은 개선의 여지를 갖고 있다.

본 논문에서는 판재성형 분야의 연구·개발 및 설계·생산 단계에 필수적으로 제공되어야 할 3차원 곡면 변형률 측정 데이터를 정확하고 신속하게 얻기 위한 적응 2치화 영상처리방법에 대하여 연구하였다. 먼저 영상을 이용한 곡면 변형률 측정 방법에 대하여 간단히 소개하였으며, 소재와 함께 변형된 격자선들을 효과적으로 추출하는 영상의 적응 2치화 처리에 대하여 제안하였다. 제안된 방법에 의한 실험결과는 본 논문에서 제안된 방법이 금속판재의 불균일한 반사도와 광원의 조도에 영향을 받지 않는 우수한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 끝으로 본 논문과 관련한 추후 연구과제에 대하여 논하였다.

2. 곡면변형률의 영상 측정

영상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 과정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 크게 다음과 같은 세 단계로 나눌 수 있다.

첫째는 변형 전의 소재 표면에 전기-화학적 방법, 광-화학적 방법, 실크 스크린 방법 등으로 격자를 입힌 후 프레스로 성형시키는 준비 단계이며, 둘째는 투시각도가 서로 다른 두 방향에서 반도체 전하결합소자(CCD) 카메라로 촬영한 디지털 화상을 컴퓨터에 입력하여 격자를 인식하기 위한 여러 가지 화상처리를 하는 과정, 그리고 셋째는 두 방향 화상 간의 기하학적 관계로부터 격자점들의 3차원 좌표를 계산함으로써 소재면의 변형률 분포를 구하여 그래픽 처리하는 작업이다. 각 단계를 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

2.1 소재 시편의 준비와 성형

(1) 초기격자 생성

전기-화학적 방법, 광-화학적 방법, 실크 스크린 방법 등을 이용하여 Fig. 2와 같은 정사각형

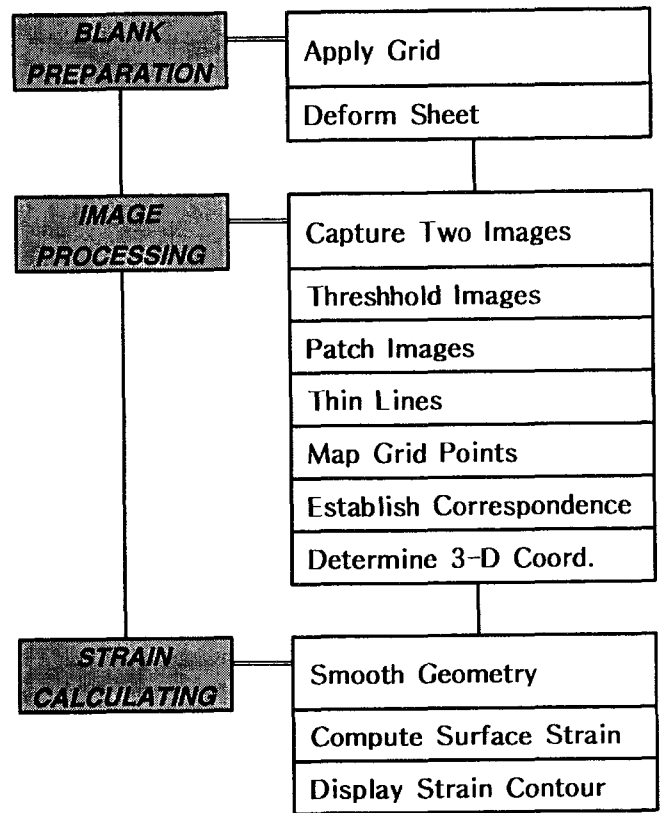


Fig. 1. Work flow for automatic deformation measurements.

또는 원형 격자를 변형 전 소재의 표면에 입히는 작업이다. 이 중 가장 정밀도가 좋은 것은 광-화학적 방법으로서, 소재 표면 세정, 감광액 도포, 진공장치를 이용하여 격자무늬 필름을 표면에 밀착, 자외선으로 감광, 현상, 정착 및 염색, 물로 세척, 물은 질산 속에서 부식, 물로 세척, 건조의 순서로 초기 격자를 만든다.

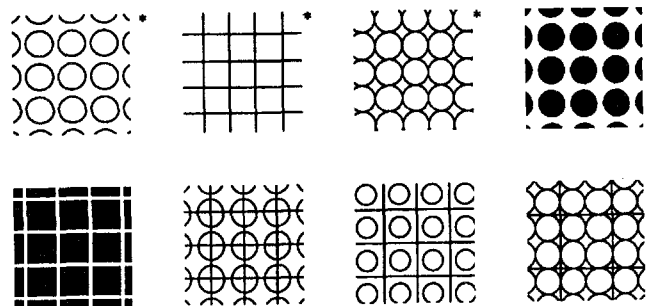


Fig. 2. Lattice patterns for deformation measurements.

(3) 영상 수정

Paintbrush와 같은 프로그램과 마우스를 사용하여 수작업으로 끊어진 격자선을 연결하거나 불필요한 여분의 선조각들을 제거하는 과정이다. 카메라로 입력된 초기 영상은 변형률을 측정하고자 하는 부분보다 큰 영역을 담고 있으므로 대상영역만 남기고 그 외의 부분을 제거한다.

(4) 영상 분할

2차원 단색 영상으로부터 3차원 공간에 존재하는 물리적 대상의 경계선(또는 경계면)을 파악하여 구성성분 또는 물체별로 나누는 단계로, 격자선 추출 및 세선화 작업을 포함한다.

(5) 매핑(Mapping)

격자점, 즉 격자선들의 분기점들 및 인접 격자점들의 위치와 4개의 선분으로 구성되는 사각형을 인식하여, 격자망의 연결성 정보를 얻는다.

(6) 대응점 정합

두 방향의 영상에서 동일한 격자점에 해당하는 점들을 서로 짝지워 주는 작업으로, 특징적인 한 점을 재료 시편에 미리 표시하면 이 작업을 자동적으로 수행할 수 있다.

(7) 카메라교정 및 3차원 좌표의 결정

두 방향 영상의 기하학적 관계와 광학 이론으로부터 격자점들의 3차원 좌표를 계산하기 위하여 카메라 교정을 실시하여 3차원 전체좌표계 (x_w, y_w, z_w) 와 2차원 컴퓨터 영상좌표계 (X_f, Y_f) 와의 변환관계를 구한다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 3차원 카메라좌표계 (x, y, z) 는 광중심 O 에 원점을 두고 z 축이 광축과 나란한 좌표계이며, 영상좌표계 (X, Y) 는 광축과 전방 영상면과의 교점 O_i 에 원점을 두고 x, y 축과 평행한 좌표계이다. 따라서 렌즈의 유효초점거리를 f 라고 하면 $\overline{OO_i} = f$ 가 된다. 일반적 (X_d, Y_d) 으로 렌즈의 왜곡된 굴절현상때문에 실제 영상좌표는 이상적인 영상좌표 (X_u, Y_u) 와 차이를 나타낸다. 또한, 컴퓨터 영상좌표 (X_f, Y_f) 는 화소의 수로 측정되기 때문에 실제 영상좌표 (X_d, Y_d) 와의 관계를 정의하는 변수가 추가적으로 필요하다.

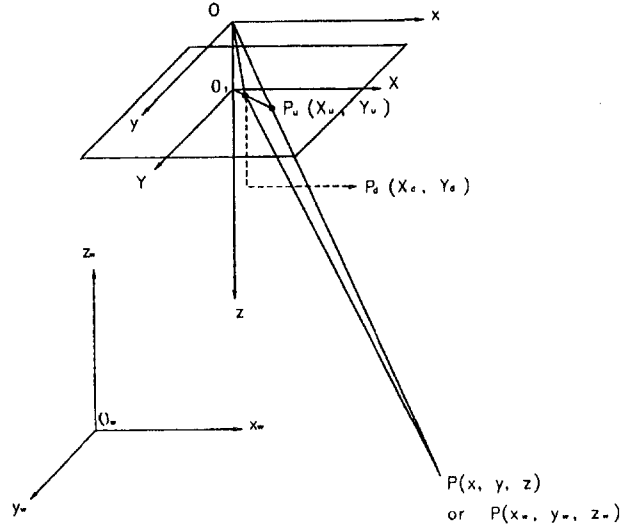


Fig. 7. Coordinate system for camera calibration.

좌표계 변환은 다음과 같이 4단계로 수행된다.

- a) 전체좌표계와 카메라좌표계와의 강체 변환
 전체좌표계와 카메라좌표계에서 바라본 3차원 공간상의 임의의 위치가 각각 (x_w, y_w, z_w) 및 (x, y, z) 라는 좌표값을 갖는다고 할 때, 이들간의 변환은 좌표계 원점간의 이동벡터 (T_x, T_y, T_z) 와 좌표축간의 회전행렬 $[r_{i,j=1:3}]$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

- b) 3차원 카메라좌표계 (x, y, z) 와 2차원 영상좌표계 (X_u, Y_u) 와의 변환

$$X_u = f \frac{x}{z}, \quad Y_u = f \frac{y}{z} \quad (3)$$

단, 여기서 f 는 렌즈의 초점거리이다.

- c) 렌즈의 왜곡에 의한 영상좌표의 변화

$$X_d(1 + x_1 \rho^2 + x_2 \rho^4 + \dots) = X_u \quad (4.1)$$

$$Y_d(1 + x_1 \rho^2 + x_2 \rho^4 + \dots) = Y_u \quad (4.2)$$

$$\rho = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (4.3)$$

단, 여기서 x_1, x_2, \dots 는 렌즈의 왜곡율이다.

- d)실영상좌표 (X_d, Y_d) 와 컴퓨터영상좌표 (X_f, Y_f) 사이의 변환

$$X_f = s_x \frac{N_{fx}}{N_{cx}} \frac{X_d}{d_x} \quad (5.1)$$

$$Y_f = \frac{Y_d}{d_y} \quad (5.2)$$

단, 여기서 d_x 와 d_y 는 X방향과 Y 방향의 이웃하는 두 CCD 센서의 중심간 거리, N_{cx} 는 X 방향의 센서 화소의 개수, N_{fx} 는 컴퓨터에 의하여 샘플링될 때 한 줄당 화소의 개수, s_x 는 영상의 불확실성 보정인자이다.

위와 같은 단계별 변환식들에 포함된 외부변수 r_1, r_2, \dots, r_9 및 T_x, T_y, T_z , 그리고 고유변수 f, x_i, s_x 등은 전체좌표 (x_w, y_w, z_w) 가 알려진 5개 이상의 점들에 대하여 교정(Calibration)함으로써 구할 수 있다. 카메라의 교정작업에는 일정 간격의 원형(또는 정사각형) 격자가 새겨진 평판 또는 입방체를 사용한다.

2.3 변형률 계산 및 결과 처리

(1) 표면형상 평활화

측정오차를 줄이기 위하여 최소자승법을 이용하여, 영상처리에서 얻어진 표면형상을 평활화한다.

(2) 3차원 곡면 변형률 계산

각 사각형 격자를 둘로 나누는 삼각형 소영역으로 전체 측정영역을 분할하여, 앞서 구한 각 삼각형 꼭지점의 3차원 좌표로부터 유한변형 이론에 의한 변형률 성분을 (6)식으로 계산한다. 각 삼각형은 균일변형률을 가지는 것으로 가정한다.

$$E_{11} = \frac{1}{2a^2} [\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2 + \Delta z_1^2 - a^2] \quad (6.1)$$

$$E_{22} = \frac{1}{2a^2} [\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2 + \Delta z_2^2 - a^2] \quad (6.2)$$

$$E_{12} = \frac{1}{2a^2} [\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2 + \Delta z_1^2] \cdot [\Delta x_2^2 + \Delta y_2^2 + \Delta z_2^2 - a^2] \cdot [\Delta x_1 \Delta x_2 + \Delta y_1 \Delta y_2 + \Delta z_1 \Delta z_2] \quad (6.3)$$

단, 여기서 a 는 $(0, 0, 0)$, $(a, 0, 0)$, $(0, a, 0)$ 를 꼭지점으로 하는 변형전 직각삼각형의 짧은 변 길이이며, 변형후의 삼각형이 갖는 꼭지점은 각각 (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) 과 같다. 이 때, x 축 변의 길이는 $\Delta x_1 = x_1 - x_0$, $\Delta x_2 = x_2 - x_0$ 로 정의되며, y 축과 z 축도 같은 방법으로 정의된다.

(3) 변형률 분포의 시각화

변형률 성분, 주변형률, 유효변형률 등의 분포를 등고선 표현하거나, 측정 결과의 분석을 쉽게 하기 위하여 다양한 방법으로 그래픽 처리한다.

3. 영상의 적응2치화

3.1 판재영상의 격자선 추출

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 3차원 곡면의 변형률의 측정정밀도는 영상처리의 효율성에 크게 좌우된다. 특히 판재 영상의 격자선 패턴은 판재의 재질과 변형에 따른 판재표면의 방향변화에 따라 카메라에서 측정된 영상의 밝기가 크게 변하므로 영상의 지역적인 밝기에 무관한 격자선 추출방법이 요구된다.

Fig. 8(a)에 규칙적으로 반복되는 격자선이 그려진 판재가 충격에 의해 변형된 후 얻어진 전형적인 판재 영상의 단면도를 굵은 선으로 나타내었다. 영상에 격자무늬로부터 얻어진 주기적인 어두운 홈이 나타나 있으며 화면의 평균 밝기는 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 점차 증가하고 있다.

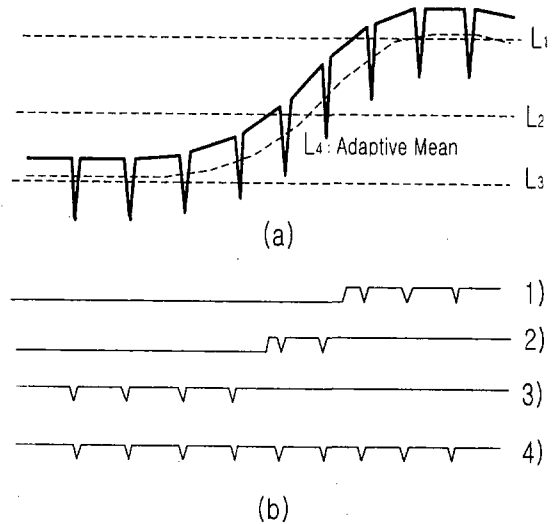


Fig. 8. Adaptivity in image thresholding. (a) Fixed and adaptive thresholds. (b) Thresholded images.

이 때 각각 점선으로 나타낸 L_1, L_2, L_3 과 같은 고정된 역치를 사용하여 2치화를 실행하면 각각 Fig. 8(b)의 1), 2), 3)에 나타낸 것과 같은 2진영상이 얻어지며, 추출하고자 하는 격자무늬가

심하게 손상된 영상이 얻어진다. 따라서 별도의 수작업으로 끊어진 격자선을 연결하거나 불필요한 여분의 선들을 제거하는 영상수정과정의 필요하며, 이들 추정격자선에 의한 변형률 계산의 오차가 발생한다.

그러나 2치화에 사용되는 역치를 고정값을 사용하지 않고 Fig. 8(a)의 L_4 와 같이 지역영상의 평균밝기에 따라 변하는 가변역치를 이용한 적응2치화 방법을 사용함으로써 Fig. 8(b)의 4)와 같이 격자선 정보의 손상이 없는 결과를 얻을 수 있다.

3.2 평균값 필터 커널설계

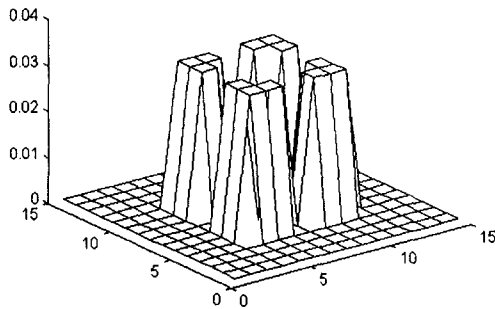
지역영상의 평균값을 얻기 위해서 본 논문에서는 (7)식과 같은 형태의 지역통과 필터커널 $M(i, j)$ 을 사용하여 원영상을 콘볼루션(convolution)한다.

$$\frac{1}{N \times N} [M_{N \times N}], \quad \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N M(i, j) = 1 \quad (7)$$

이 때 필터커널의 크기 $N \times N$ 는 N 이 커질수록 넓은 범위에 걸쳐 평균값을 계산하므로 처음에는 3×3 의 커널로부터 시작하여 5×5 , 9×9 크기의 커널이 차례로 사용하면서 효과를 측정함으로써 최적의 크기의 필터커널을 결정할 수 있다.

1/32	1/32	1/32	0	1/32	1/32	1/32
1/32	1/32	1/32	0	1/32	1/32	1/32
1/32	1/32	0	0	0	1/32	1/32
0	0	0	0	0	0	0
1/32	1/32	0	0	0	1/32	1/32
1/32	1/32	1/32	0	1/32	1/32	1/32
1/32	1/32	1/32	0	1/32	1/32	1/32

(a)



(b)

Fig. 9. Modified filter kernel. (a) Window mask. (b) 3D display of the kernel.

한편 필터커널이 커지면 급격한 변화성분인 영상의 윤곽부분이 상대적으로 손상되는 문제가 있다. 본 논문에서는 판재 변형률을 측정하는 데 결정적인 특징인 십자형태의 격자무늬 교차점이 평균화 과정에 의해 손상되지 않도록 Fig. 9와 같은 필터커널을 사용하였다.

3.3 지역평균을 이용한 적응2치화

본 논문에서 제안된 판재영상 적응2치화 과정의 순서도는 Fig. 10과 같다.

원 영상에 대하여 미리 설계된 지역필터의 커널을 사용하여 지역영상의 평균값을 구한다.[11-13] 이 평균값을 이용하여 원 영상을 역치처리하면 2진영상이 얻어지게 되는 데, 과도한 영상잡음 때문에 역치처리후에도 남아있는 고립점들은 매디안 필터를 사용하여 깨끗하게 제거된다.

한편 판재영상에서 격자선으로 분할된 작은 사각형의 내부영역들은 판재의 변형률측정에 대하여 사용되지 않는 부분으로서, 영상밝기함수의 지역분산값이 일반적으로 작게 나타나는 특성이 있다. 따라서 지역영상의 분산값이 특정값이하이면 그 부분의 역치를 극히 낮추도록 함으로써 판재영상의 격자선 추출을 보다 효과적으로 수행할 수 있다.

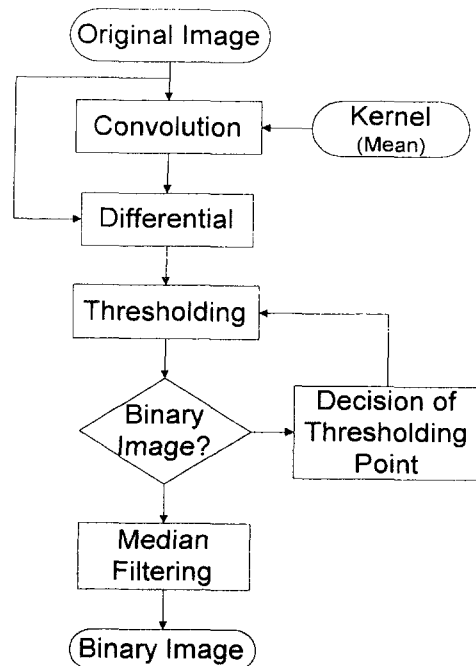
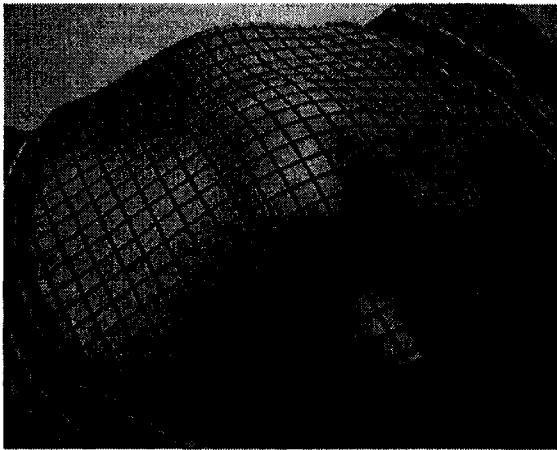
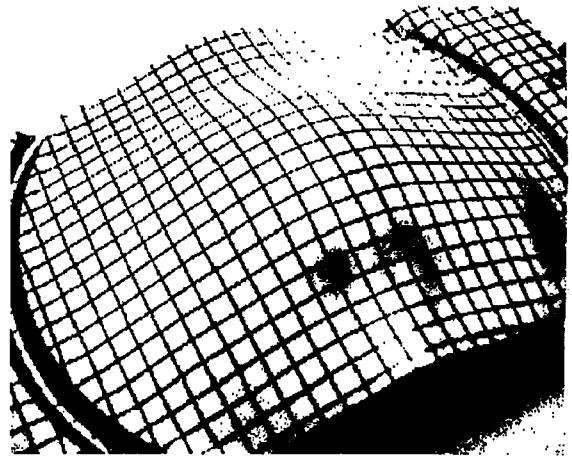


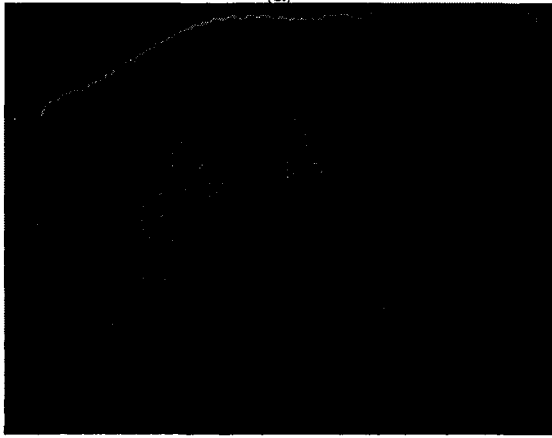
Fig. 10. Adaptive binarization.



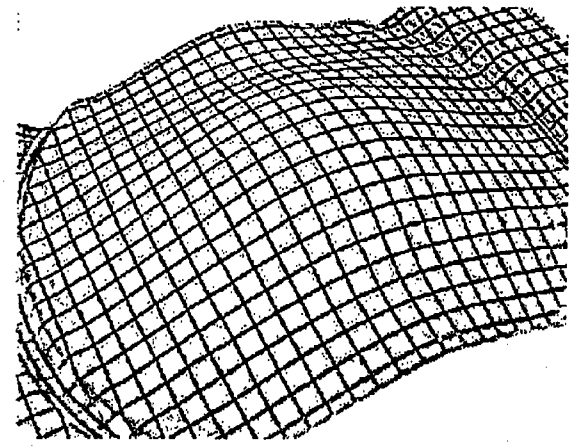
(a)



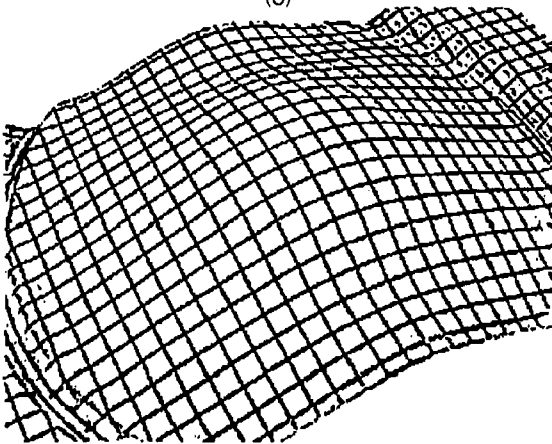
(b)



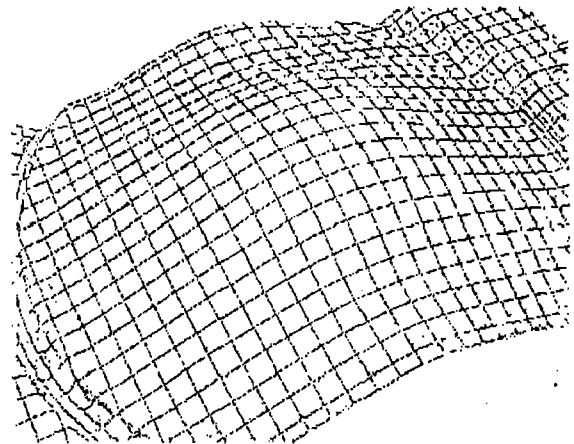
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 11. Adaptive binarization for deformation lattice extraction. (a) Original. (b) Fixed thresholding. (c) Threshold levels for adaptive thresholding. (d) Adaptive thresholding. (e) Median filtered image. (f) Thinned image.

4. 실험 및 결과

본 논문에서 실험에 사용된 영상은 디지털 카메라에서 얻어진 640×473 화소 크기의 8비트 계조영상이다. 영상처리 알고리즘의 구현환경은 펜티엄급 PC에서 MATLAB 수치계산 패키지[14]와 C언어를 주로 이용하였다.

제안된 알고리즘에 의한 판재영상의 적응2치화 과정은 Fig. 11와 같다. 먼저 Fig. 11(a)의 원 영상에 최대 영상밝기의 반에 해당하는 128을 역치로 하여 2치화하면 Fig. 11(b)가 얻어진다. Fig. 11(b)에서는 고정된 역치에 의해 영상의 우상부에서 격자선이 심하게 손상되었으며, 그늘진 중하부의 여러곳에서 격자선이 구분되지 않는 검은 얼룩이 발생한 것을 관측할 수 있다.

Fig. 11(c)는 지역평균을 이용한 역치영상을 보이고 있다. 지역필터에 의해 격자선 무늬가 매우 희미하게 변하였으며, 격자선으로 이루어진 작은 사각형내부는 작은 지역분산값을 이용하여 역치를 0으로 처리하고 있다. Fig. 11(d)는 원영상인 Fig. 11(a)를 지역영상의 밝기에 적응된 역치인 Fig. 11(c)를 이용하여 역치처리한 2진 영상이다. 고정역치를 사용한 2진 영상인 Fig. 11(b)와 비교할 때 Fig. 11(d)에서는 판재영상의 격자무늬가 전혀 손상되지 않은 것을 알 수 있으며, 영상잡음에 의한 고립점들이 나타나고 있다.

Fig. 11(e)는 3×3 크기의 2차원 메디안필터를 사용하여 Fig. 11(d)에 남아있던 고립점들을 제거한 영상이며, Fig. 11(f)는 Fig. 11(e)를 MATLAB에 내장된 세션화 알고리즘을 사용하여 세션화한 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 판재의 3차원 변형률을 측정하기 위한 적응 영상 2치화 처리에 대하여 연구하였다. 제안된 방법은 Fig. 11(b)와 Fig. 11(e)의 실험 결과에서 비교되는 바와 같이 판재영상이 갖는 밝기함수의 지역평균값이 변동하는 일반적인 경우에 대하여 가변적인 역치를 사용하므로써 기존의 고정역치를 사용한 방법에 비하여 판재영상의 격자선 추출에 효과적임을 확인하였다.

본 논문의 주제에 관련하여 추후에 연구해야 할 과제는 판재영상의 격자교차점을 효과적으로 추출할 수 있는 알고리즘의 연구와 판재의 3차원 변형률 측정시스템의 정밀도를 개선하는 방법, 그리고

입체영상을 얻을 수 있는 스테레오카메라 시스템을 위한 효과적인 카메라 교정방법 등이다.

참 고 문 헌

1. E. Schedin and A. Melander, "The Evaluation of Large Strains from Industrial Sheet Metal Stampings with a Square Grid", J. of Applied Metalworking, Vol. 4, pp. 143-156 (1986)
2. R. Ayres, E. G. Brewer and S. W. Holland, "Grid Circle Analyzer; Computer Aided Measurement of Deformation", Transactions SAE, Vol. 88, No. 3, pp. 2630-2634 (1979)
3. D.N. Harvey, "Optimizing Patterns and Computational Algorithms for Automated, Optical Strain Measurement in Sheet Metal", in efficiency in Sheet Metal Forming, Proceedings of the 13th Biennial Congress, Melbourne, Australia, IDDRG, pp. 403-414 (1984)
4. A. Miyoshi, A. Yoshioka and G. Yagawa, "Strain Measurement of Structures with Curved Surfaces by Means of Personal Computer-Based Picture Processing", Engineerings with Computers, Vol. 3, pp. 149-156 (1988)
5. T. Bednarski, "Application of Stereophotogrammetric Methods to Analyze Kinematics and Dynamics of Shells" (in Polish), Warszawa, pp. 25-160 (1977)
6. J. H. Vogel and D. Lee, "An Automated Two-view Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces", J. of Materials Shaping Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 205-216 (1989)
7. J. H. Vogel and D. Lee, "The Automated Measurement of Strains from Three-Dimensional Deformed Surfaces", JOM (J. of the Minerals, Metals and Materials Society), Vol. 42, pp. 8-13 (1990)

8. D. Manthey and D. Lee, "Recent Developments in a Vision-Based Surface Strain Measurement System", JOM (J. of the Minerals, Metals and Materials Society), Vol. 47, No. 7, pp. 46-49 (1995)
9. H. J. Kim and D. Lee, "Further Development of Experimental Methods to Verify Computer Simulations", The Proc. of the 3rd NUMISHEET Conference, Dearborn, MI, (1996)
10. J. Dankert and K. Albrektsen, "Determination of the Remaining Formability in Formed Sheet Metal Parts from Grid Measurements Carried out by computer Image Processing Technique", Annals of the CIRP , Vol. 42, pp. 309-311 (1993)
11. Rafael G. Gonzalez "Digital Image Processing" Addison-Wesley, 1993.
12. Jae S. Lim, "Two-Dimensional Signal and Image Processing", Prentice-Hall, 1990.
13. Randy Crane, "A Simplified Approach to Image Processing", Prentice-Hall, 1997.
14. MATLAB User's Guide, Mathworks, 1992.