

화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발

한상준* · 김영수** · 김형종** · 오수익*

(1998년 7월 1일 접수)

Development of a Surface-Strain Measurement System Using the Image Processing Technique

S. J. Han, Y. S. Kim, H. J. Kim and S. I. Oh

Abstract

An automated surface-strain measuring system using the image processing technique is developed in the present study, which consists of the hardware to capture and to display digital images, and the software to calculate the 3-D informations of grid points from two views. New or improved algorithms for the mapping and establishing correspondence of grid points and elements, the camera calibration, and the subpixel measurement of grid points, are implemented. As an application of the present system the surface-strains of deformed blanks in the limiting dome height test, the square cup deep-drawing and punch stretching to obtain the forming limit diagram are measured. The results are compared with those obtained by conventional manual methods.

Key Words : Image Processing, 3-D Surface-Strain, Subpixel Measurement, Camera Calibration, Two-View Method, Sheet Metal Forming

1. 서론

3차원 곡면의 변형률 측정은 자동차, 전자 제품, 주방기구 등의 외장 및 부품을 비롯한 수많은 판재성형 제품의 금형설계, 공정설계 및 제품검사 등에 필요한 실험적 자료를 제공한다. 특히, 다양한 변형률비를 가진 성형조건에서의 주변형률 측정은 판재의 성형성 평가에 사용되는 성형한계도를 그리는 데 필수적인 작업이라 할 수 있다. 근년에 유한요소법의 광범위한 응용과 함께 복잡한 3차원 형상의 금형에 의한 판재성형 공정의 해석도 상당한 정도까지 가능하게 되었다. 그러나 유한요소해석으로 얻어진 결과들

은 실험적인 비교, 검증을 거쳐야 그 신뢰성이 입증될 수 있음에도 불구하고, 3차원 곡면의 변형률 측정과 관련된 기술적 문제나 방대한 자료 처리를 위한 시간적, 경제적 문제 등으로 인하여 사실상 검증 없이 그대로 사용되는 경우가 많다. 곡면변형률 측정에 관련된 기술은 판재성형 문제에만 국한되지 않고, 단조나 압축, 증공성형법(blow molding) 등 다른 성형 분야에서도 중요하며, 나아가 NC 가공을 위한 물체 표면 형상을 정의하거나 CAD 데이터 준비하는 데에도 응용될 수 있다.

지난 수십 년간 판재성형의 해석·실험·설계 분야의 수많은 학자와 기술자들에 의하여 3차원 곡면변형률 측정

* 서울대학교 기계설계학과
** 강원대학교 기계공학과

기술이 고안·개선되어 왔으며, 최근에는 컴퓨터 화상을 이용하여 측정과정을 자동화하고자 하는 연구가 시도되었다. Schedin과 Melander⁽¹⁾는 정사각형 격자가 인쇄된 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. Miyoshi 등⁽⁴⁾은 표면 상의 세 점을 인식하는 두 대의 카메라 장치로부터 한 영역의 변형률을 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 이들 연구는 한 번의 측정으로 한 개의 변형률 값만 얻을 수 있어서 판재성형 제품의 측정에는 제한적으로 이용될 수밖에 없었다. Lee 등은 화상처리기술(image processing technique)을 이용하여 두 방향의 화상으로부터 한 영역의 변형률을 한꺼번에 자동으로 측정할 수 있는 시스템 "ASAME"를 개발하여 상용화하였으며,⁽⁵⁾ 변형률 측정치의 오차 요인을 분석하고 정확도를 향상시키기 위한 연구를 계속하고 있다^(6,7). 국내에서는 몇몇 대학과 연구소, 산업체에서 이와 같은 고가의 외국산 장비를 도입하여 연구에 활용하고 있으나, 최근에는 독자적인 연구개발 활동이 진행되고 있다^(8,9).

본 연구에서는 화상처리법을 이용한 자동곡면정보분석 시스템 "ASIAS(Automated Surface Information Analysis System)"를 개발하였다. 이 시스템은 기본적으로는 Lee 등의 방법과 같이 두 대의 카메라로 촬영한

디지털 화상으로부터 곡면 상의 격자점들의 3차원 좌표를 계산하는 방법을 사용하지만, 격자점 및 요소 정합, 화상 좌표의 실수단위 측정, 카메라 보정, 3차원 좌표 계산 등에 필요한 알고리즘을 독자적으로 개발하거나 기존의 연구결과들에서 최적의 방법을 응용·개선하였다. 개발된 시스템을 이용하여 한계점높이 시험, 정사각굽 디프드로잉 및 성형성 평가를 위한 펀치 스트레칭 시편의 변형률을 측정하고, 그 결과를 기존의 수동식 측정 결과와 비교하였다. Fig. 1은 본 시스템의 변형률 측정 과정을 나타낸 것이다.

2. 이 론

2.1 화상처리

2.1.1 이치화

256 단계의 명암도를 가진 흑백화상에서 선분을 추출하기 위하여는 적절한 역치값(threshold)을 기준으로 0(검은색)과 1(흰색) 두 단계의 색으로 이루어진 화상을 만드는 이치화 과정을 필요로 한다. 본 연구에서는 적응 이치화 및 베지에르 이치화 알고리즘을 고안하여 선택적으로 적용하였다.

적응 이치화 방법은 원화상과 Fig. 2의 저역 필터링 커널을 사용하여 구한 평활화 화상과의 차이를 이용하여 선분의 윤곽을 얻어내는 방법이다. 메디안 필터를 통해 잡음을 제거하면 육안으로 식별할 수 있는 거의 모든 선분을 추출할 수 있다.

베지에르 이치화는 베지에르 곡선이 다항식 함수에 기반을 두고 있어 수치적 취급이 용이하고 자유곡선의 표현에 적합하다는 점에 착안한 방법이다. 이는 대상 점 주위

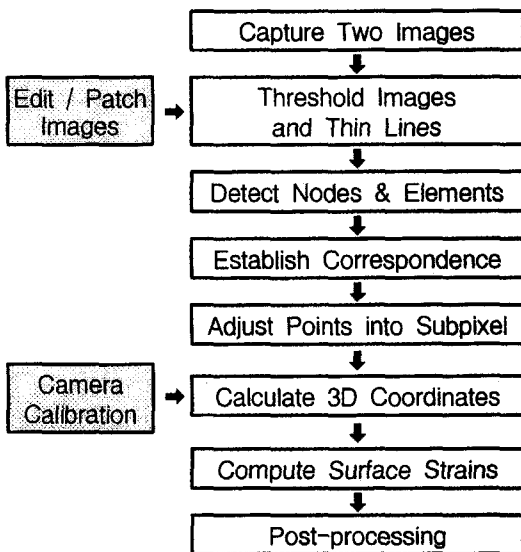
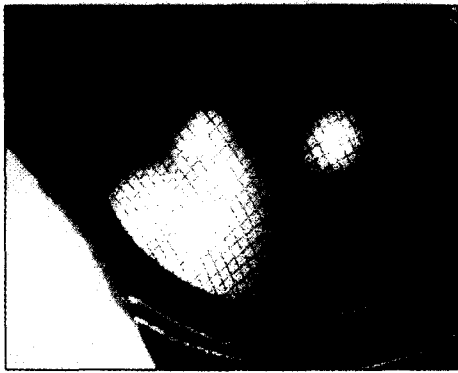


Fig. 1 Procedure of automated 3-D surface strain measurement

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

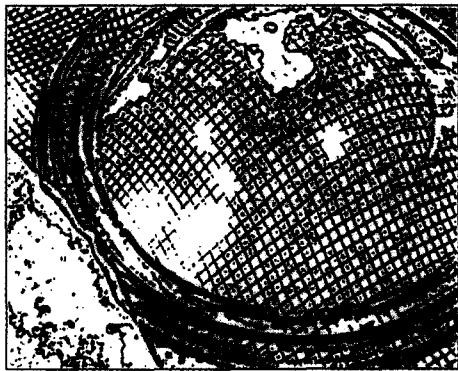
Fig. 2 Adaptive thresholding kernel



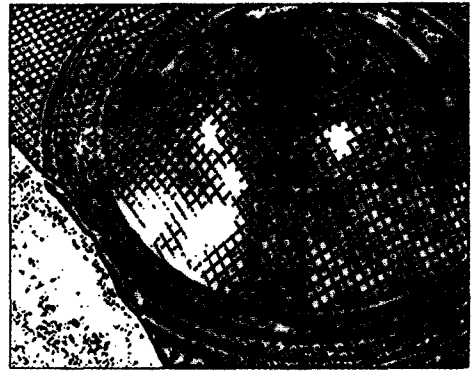
(a) original image



(b) global thresholding



(c) adaptive thresholding



(d) Bezier thresholding

Fig. 3 The results of thresholding

의 적절한 영역(보통 9 9)에 대한 명암도 분포를 베지에르 곡면으로 근사하여, 그 점이 곡면에서 차지하는 높이를 가변 역치와 비교하는 방법이다. 실제적으로는 처리 속도의 향상을 위하여 3차원 베지에르 곡면 대신 2차원 베지에르 곡선을 x, y 방향으로 두 번 적용한 후 두 화상의 평균을 취하는 방법을 사용하였다. 베지에르 곡선의 극소점은 n 차 근사 다항식의 극소점에 비하여 실제 선분의 중심을 정확하게 표현하여 격자선을 분리한다.

Fig. 3(a)는 매우 나쁜 조명 조건에서 촬영한 원화상이며, (b)는 임의의 고정 역치를 적용하여 얻은 이치화상, 그리고 (c)와 (d)는 각각 적응 이치화 화상과 베지에르 이치화 화상이다. 고정 역치를 적용하여 얻은 화상 (b)는 격자선의 대부분이 손상되어 있으나, (c)와 (d)에서는 원화상의 상태가 좋지 않음에도 불구하고 대부분의 선분이 추출되어 있음을 알 수 있다.

2.1.2 세선화

세선화(line thinning)는 이치화상의 전체영역을 검색해 나가면서 임의의 세선화 대상 화소 주위의 3×3 화소를 판별식에 대입하여, 조건을 만족할 경우 대상 화소를 제거함으로써, 원래 도형의 연결성을 보존한 1 화소 굵기의 중심 골격선을 얻는 작업이다. 세선화는 격자점의 정수형 좌표를 얻고 요소망을 구성하는데 필요한 과정이다. 본 연구에서는 Hilditch^[10]의 세선화 방법을 사용하였다. 이 방법의 장점은 골격선이 패턴의 중심 위치에 생기도록 하며, 선 폭이 2인 선분에 대하여는 한쪽만을 제거하는 처리가 가능함과 동시에, 더 굵은 선분에 대하여는 상하 좌우로부터 주변 점을 한 겹씩 제거할 수 있다.

2.1.3 교차점 추출

세선화 과정을 거친 3×3 화소 영역에서 중심점 이웃의

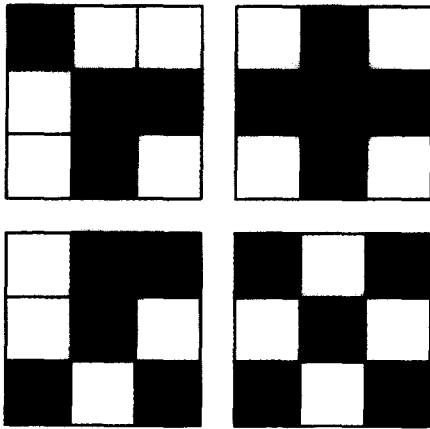


Fig. 4 Some patterns of the neighbor of a grid point

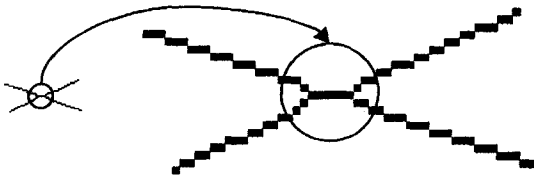


Fig. 5 An example of a grid point divided into two by line thinning

8 화소 중 검은 화소 수가 3개 이상일 때, 이 점을 교차점 (또는 격자점)이라 간주한다. Fig. 4는 교차점의 몇 가지 유형을 나타낸 것이다.

Fig. 5와 같이 굵은 두 격자선이 작은 각도로 만나는 경우 세션화에 의하여 그 교차점이 두 개로 분리되는 수가 있다. 이때는 일정한 거리 이하로 근접한 교차점에 대하여 두 점의 좌표를 평균한 값으로 교차점을 정한다. 보통의 경우 분리된 교차점의 거리는 5 화소를 넘지 않는다.

2.1.4 요소망 구성

Fig. 6과 같이 추출된 각 교차점 주위에 정사각형의 커널을 적용하고 이를 통과하는 선분을 반시계 방향으로 추

적하여 요소망을 순차적으로 구성한다. 이 방법을 사용하면 분리된 교차점의 경우에도 영향을 받지 않고 주변 교차점을 추적할 수 있다. 커널의 크기는 보통 7×7, 9×9 정도가 적합하지만, 세션화된 상태와 교차점 사이의 거리에 따라 적절히 가감해서 사용한다.

2.1.5 절점 및 요소의 정렬

본 연구에서는 요소와 절점의 정렬(renumbering)을 위하여 이미 구성되어 있는 요소망 데이터의 처리에 기본적인 자료구조 중 하나인 큐(queue)와 연결리스트(linked list)를 사용하였다. Fig. 7은 절점의 정렬 과정을 도식화한 것이다. 각 요소 안쪽 모서리의 작은 숫자는 요소 내 절점번호, 요소 바깥쪽 모서리의 숫자는 전체 절점번호, 그리고 가운데 큰 숫자는 요소 번호이다. 전체 절점번호에 붙은 별표첨자는 정렬과정에 의하여 새로 부여된 번호임을 나타내며, 표시는 현재 정렬대상 절점을 나타낸다.

요소 정렬은 절점 정렬이 끝난 후 각 요소를 구성하는 절점들 중 요소 내 절점번호 1번에 해당하는 전체 절점번호의 크기 순서대로 요소번호를 재배열함으로써 순차적으로 이루어진다.

2.1.6 화상 정합

3차원 좌표를 계산하기 위하여는 두 방향에서 얻은 화상에서 서로 같은 교차점들을 일치시키는 것이 필요하다. 이 정합 과정은 좌우 두 화상에서 임의의 동일 절점 하나를 시작점으로 선택하여 마우스로 클릭하면, 두 화상에서 각각 절점과 요소의 정렬을 행하면서 같은 순서를 가지게 되므로 자동적으로 이루어진다.

2.1.7 실수형 좌표 측정

세션화 과정을 거쳐서 추출된 교차점 좌표값은 화소단위(정수형)로 측정되므로, 화소단위이하(subpixel)의 실수형 좌표값을 얻어야 정확도를 높일 수 있다. 본 연구에

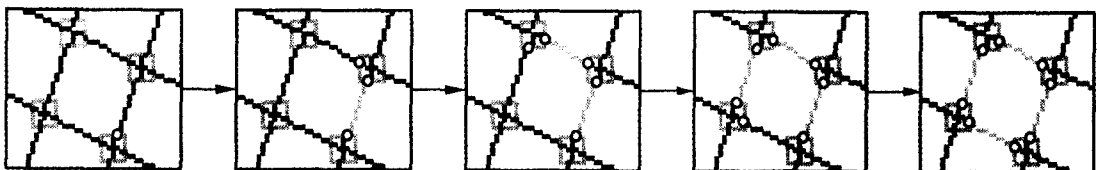


Fig. 6 Schematic diagram of the element establishing procedure using 7×7 kernel

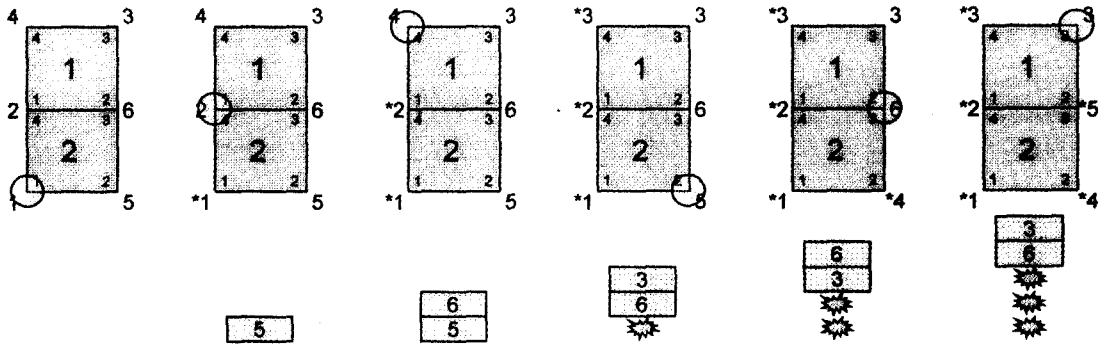


Fig. 7 Schematic diagram of the node renumbering procedure

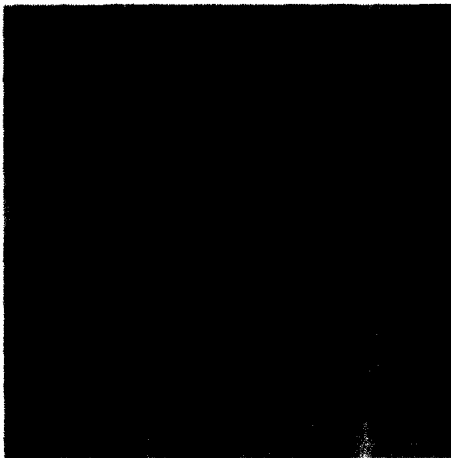


Fig. 8 Subpixel measurement of a grid point by the second-order curve fitting

서는 Fig. 8과 같이 이미 얻어진 교차점을 중심으로 하는 주변 21×21 영역의 초기화상에서 가로 및 세로 방향의 한 줄씩 차례로 명암도 분포곡선을 베지에르 곡선으로 보간할 때 그 극소점들의 집합이 선분의 중심곡률을 이룬다고 가정하였다. 이 점들을 서로 교차하는 두 개의 2차곡선(곡률이 매우 클 때는 직선)으로 각각 수치 근사하고, 두 곡선의 교점을 계산함으로써 실수단위 교차점 좌표를 구하였다.

2.2 카메라 보정

카메라 보정(calibration)은 초점거리, 왜곡계수 등 카메라 고유의 광학적 특성과, 임의의 전체좌표계(world coordinate system)에 대한 카메라좌표계의 위치와 방향

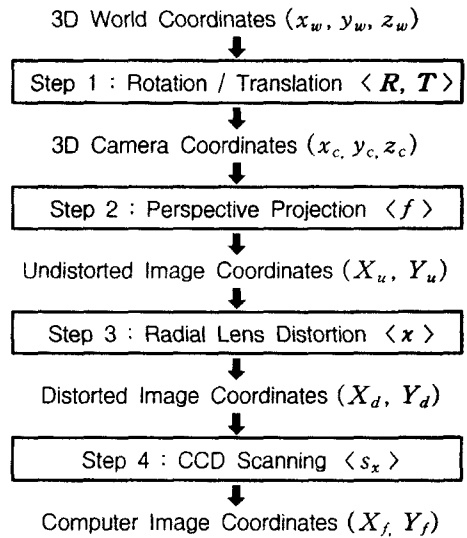


Fig. 9 Four steps of coordinate transformation

을 결정하는 과정으로서, 이를 통하여 컴퓨터 화상좌표와 절대좌표와의 관계를 구할 수 있다. 본 연구에서는 Tsai⁽¹¹⁾가 제안한, 바늘구멍(pin-hole) 카메라 모델에 대한 4단계 변환 방법을 사용하였다. Fig. 9는 이 변환과정을 도식화한 것으로, < > 안에 보정인자를 표시하였다. R , T 는 각각 강체 회전이동 행렬 및 강체 평행이동 벡터, f 는 유효초점거리, χ 는 렌즈의 왜곡계수, 그리고 s_x 는 스케일 인자(scale factor)를 각각 나타낸다. 정식화된 카메라 모델에 대하여 보정면 상의 점 $i(i=1, \dots, N; N$ 은 보정점 개수)에 대한 전체좌표 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 와 컴퓨터 화상좌표 (X_{fi}, Y_{fi}) 를 이용하여 카메라 보정을 수행한다.

2.3 3차원 좌표의 계산

Fig. 10에 도시한 바와 같이 물체 위의 한 점 P 를 서로 다른 위치에서 바라본 투시선은 교차하므로, 두 카메라 렌즈 초점의 위치벡터와 각 투시선의 방향벡터를 알면 그 점의 3차원 공간좌표를 구할 수 있다. 그러나 일반적으로 한 점의 상이 CCD 센서에 투영될 때 그 해상도 문제로 인하여 투영위치가 미세하게 변하므로, 얻어진 화상은 근본적으로 오차를 수반하게 되어 두 투시선이 교차하지 않는다. 따라서 두 투시선 사이의 거리가 최소인 지점에서 수직거리의 중점을 택하여 교차점으로 한다.

두 카메라 렌즈의 광중심 O_1, O_2 의 위치벡터를 각각 \vec{v}_1, \vec{v}_2 라 하고, 점 O_1, O_2 에서 점 P 를 향하는 방향벡터를 각각 \vec{n}_1, \vec{n}_2 라 하자. \vec{n}_1, \vec{n}_2 의 연장선 상에 있는 점을 각각 P_1, P_2 라 할 때, 이들의 위치벡터는 매개변수 α_1, α_2 를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{p}_1 = \vec{v}_1 + \alpha_1 \vec{n}_1, \quad \vec{p}_2 = \vec{v}_2 + \alpha_2 \vec{n}_2 \quad (2)$$

P_1, P_2 사이의 거리가 최소인 지점에서 $\vec{P_1P_2}$ 는 방향벡터 \vec{n}_1, \vec{n}_2 과 각각 수직이므로

$$\vec{P_1P_2} \cdot \vec{n}_1 = [(\vec{v}_1 + \alpha_1 \vec{n}_1) - (\vec{v}_2 + \alpha_2 \vec{n}_2)] \cdot \vec{n}_1 = 0 \quad (3a)$$

$$\vec{P_1P_2} \cdot \vec{n}_2 = [(\vec{v}_1 + \alpha_1 \vec{n}_1) - (\vec{v}_2 + \alpha_2 \vec{n}_2)] \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad (3b)$$

식 (3a)와 (3b)를 매개변수 α_1, α_2 에 대하여 연립하여 풀면,

$$\alpha_1 = \frac{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \cdot [\vec{n}_2(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) - \vec{n}_1|\vec{n}_2|^2]}{|\vec{n}_1|^2|\vec{n}_2|^2 - (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2} \quad (4a)$$

$$\alpha_2 = \frac{(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \cdot [\vec{n}_1(\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2) - \vec{n}_2|\vec{n}_1|^2]}{|\vec{n}_1|^2|\vec{n}_2|^2 - (\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2)^2} \quad (4b)$$

점 P 의 위치는 두 투시선의 수직거리의 중간점, 즉 P_1, P_2 의 중점을 택함으로써 결정된다.

$$\vec{p} = \frac{(\vec{v}_1 + \alpha_1 \vec{n}_1) + (\vec{v}_2 + \alpha_2 \vec{n}_2)}{2} \quad (5)$$

2.4 곡면변형률의 계산

측정영역 내의 정사각형 격자를 각각 대각선으로 분할

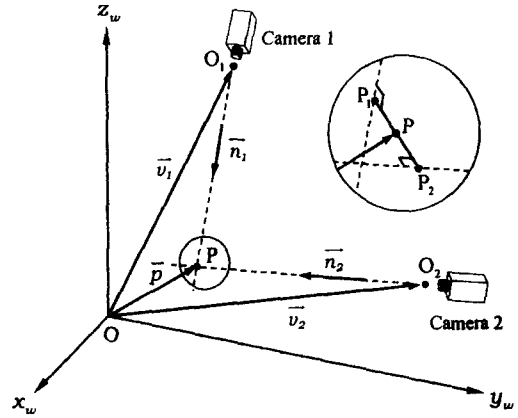


Fig. 10 Determination of 3D coordinates using the stereo-vision method

한 삼각형 요소망을 생각하고, 각 요소 내의 변형률이 균일한 것으로 가정한다. 그러면 삼각형 꼭지점의 3차원 좌표로부터 유한변형 이론에 의한 Green-Lagrange 변형률 성분을 계산할 수 있다.^(5,12) 변형 전과 변형 후의 세 꼭지점의 좌표를 각각 $(0,0,0), (a,0,0), (0,a,0)$ 및 $(x_0, y_0, z_0), (x_1, x_2, x_3), (x_2, y_2, z_2)$ 라 할 때,

$$E_{11} = \frac{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 - a^2}{2a^2}$$

$$E_{22} = \frac{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 - a^2}{2a^2} \quad (6)$$

$$E_{12} = \frac{(x_1 - x_0)(x_2 + x_0) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_0) + (z_1 - z_0)(z_2 - z_0)}{a^2}$$

주변형률은 Green-Lagrange 변형률 및 진변형률 각각에 대하여 다음과 같이 구해진다.

$$E_{1,2} = \frac{E_{11} + E_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{E_{11} - E_{22}}{2}\right)^2 + E_{12}^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_{1,2} = \ln \sqrt{1 + 2E_{1,2}} \quad (8)$$

3. 결과 및 토론

3.1 시스템 구축 및 작업 과정

본 연구에서 개발한 자동 곡면변형률 측정 시스템 "ASIAS"는 화상의 입출력을 위한 하드웨어와, 화상처리,

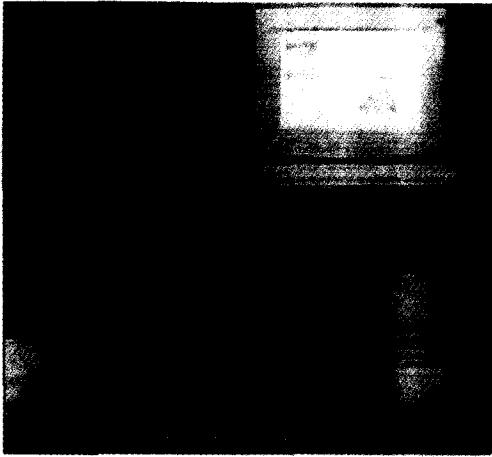


Fig. 11 ASIAS hardware configuration

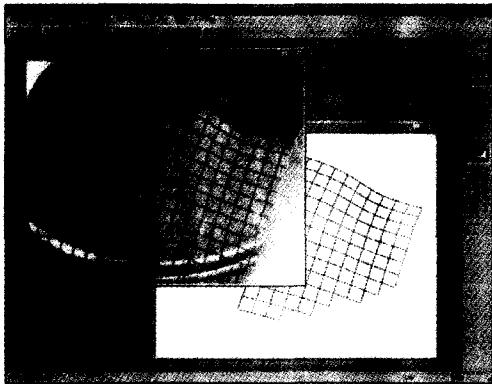


Fig. 12 ASIAS software environment

Table 1 Specification of the vision system

CCD Camera	Model	Panasonic WV-BP310
	Pick-up Device	771(H) × 492(V) pixels
	Scanning Area	4.8(H) × 3.6(V) mm
Frame Grabber	Model	DT-3152
	Resolution	640(H) × 480(V) pixels 256 Gray levels

격자점 추출 및 요소망 구성, 카메라 보정, 3차원 좌표 및 변형을 계산, 후처리 등을 수행하는 소프트웨어로 구성된다. Fig. 11은 본 시스템의 하드웨어 사진으로 두 대의 CCD 카메라와 카메라 고정 및 이송부, 그리고 프레임그래버(frame grabber)가 내장된 PC 등으로 구성되어 있으며, Table 1은 이들의 주요사양을 나타낸다. 소프트웨어는 WINDOWS 95 및 NT 상에서 구동되며, 동시에 여

러 개의 화상을 처리할 수 있도록 MDI(Multiple Document Interface) 방식을 사용하였다. 소프트웨어 개발 도구는 Visual C++이며, 작업 환경은 Fig. 12에 도시한 바와 같다.

변형을 측정 작업은 화상입력, 화상처리, 카메라 보정, 3차원 좌표 계산, 변형을 계산 및 후처리의 순서로 수행된다. Fig. 13(a), (b)는 한계돔높이(limiting dome height, LDH) 시험⁽¹³⁾에서 성형된 소재를 두 대의 카메라로 촬영한 초기 화상이다. 측정하고자 하는 영역을 편집 기능을 이용하여 오려낸 후, 그중 왼쪽 화상에 대하여 베지에르 필터를 적용한 이치화상과 이를 세선화한 결과를 Fig. 13(c)와 (d)에 각각 나타내었다.

Fig. 13(e)와 (f)는 각각 절점 및 요소가 정렬된 결과를 보여준다. 정렬과정에서 좌우 화상에서 같은 위치에 시작점을 지정하게 되면 두 화상의 정렬과정에서 절점과 요소의 번호가 자동으로 일치되어 정합이 이루어진다.

카메라 보정은 5 mm 간격으로 정사각형 격자가 인쇄된 보정면 상의 121 개의 보정점을 대상으로 수행하였다. Fig. 14는 세 표면에 와이어 커팅기로 마스터 격자를 가공한, 카메라 보정용 알루미늄 블록의 사진이며, 격자 간격은 5 ± 0.01 mm이다. 3차원 좌표의 계산과 변형률의 계산은 전문한 바와 같이 정합된 좌우 화상의 데이터를 이용하여 행한다. 측정 결과는 후처리 프로그램을 이용하여 가시화한다. 본 후처리 프로그램은 3차원 곡면형상의 도시 및 임의의 물리량 분포의 등고선화(contouring) 등의 기본 기능 외에 회전, 이동, 확대, 대칭 등의 편의 기능, 그리고 임의 단면에 따른 분포도나 성형한계도 작성 등 판재성형 전용 기능들을 갖추고 있다.

3.2 시스템의 응용 및 검토

3.2.1 한계돔높이 시험

전문한 순서대로 한계돔높이 시험의 변형률을 측정하고, 그 결과를 검증하기 위하여 0.001 mm의 분해능을 가지는 윤곽투영기를 사용하여 수동으로 시험의 중심선을 따른 주변형률을 구한 결과와 비교하였다. 오차를 줄이기 위하여 6회 반복 측정한 결과를 평균하였다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 두 측정 결과는 변형률의 백분율값으로 평균 0.80 %, 최대 1.08 %의 차이를 보였다. 특히, 화상좌표를 화소 단위, 즉 정수형으로 측정할 경우에는 평균 2.11 %, 최대 4.18 %의 상당한 차이를 나타내었다. 따라서 화상좌표를 화소미만(subpixel) 단위, 즉 실수형으로 측정함으로써 정확도가 매우 향상됨을 알 수 있다.

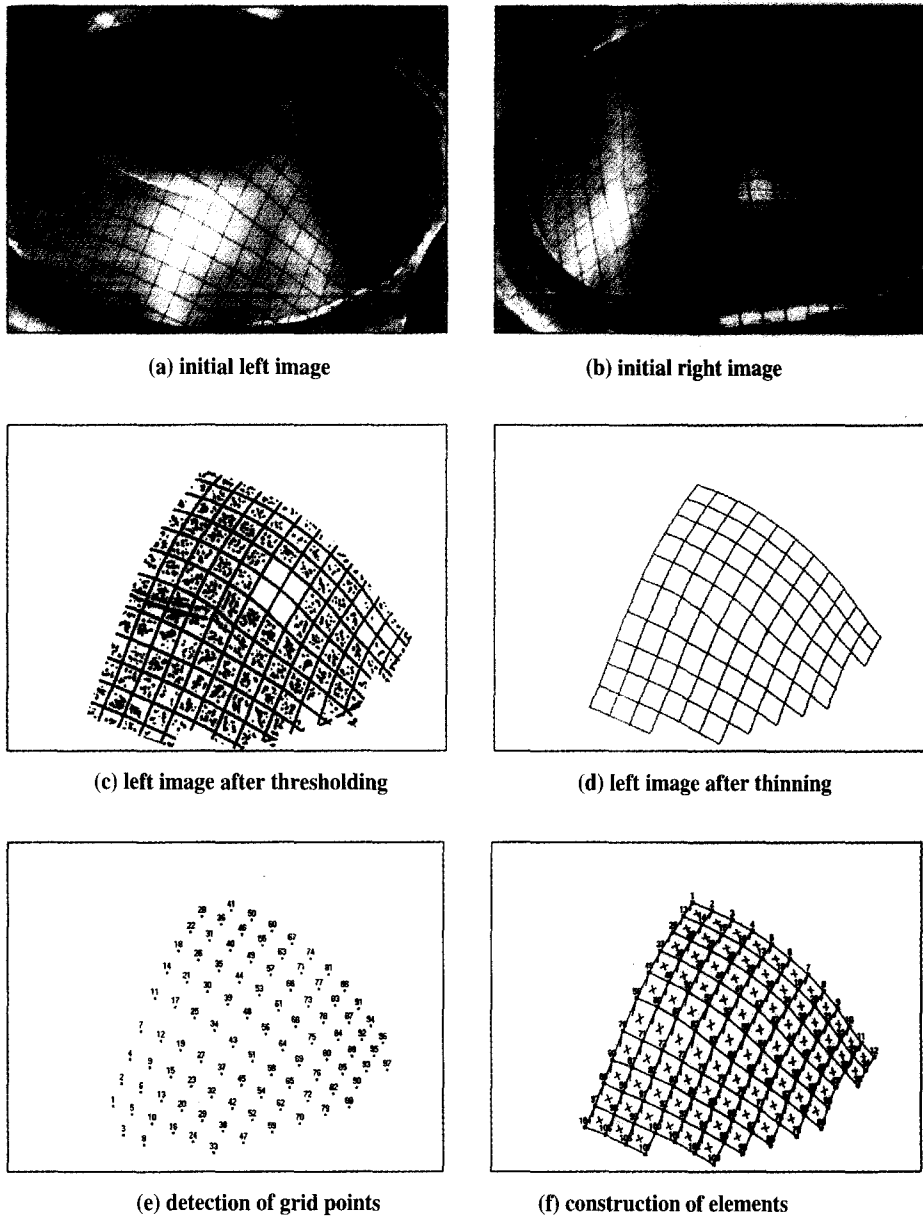


Fig. 13 Results of image processing and grid pattern recognition

3.2.2 정사각컵 디프드로잉 시험

두께 1.0 mm의 Al2024-O 판재에 0.1 in 간격의 정사각형 격자와 0.1 in 직경의 원형 격자를 전기화학적 부식 방법으로 각각 인쇄하고, NUMISHEET '93⁽¹⁴⁾의 벤치마크 모델과 같은 정사각컵 디프드로잉 시험을 수행하였다. 편

치 행정이 12.5 mm일 때, 정사각형 격자는 본 화상처리 시스템을 이용하여 자동으로, 원형 격자는 투명한 마일리 테이프를 이용하여 수동으로 각각 압연방향에 수직인 중심선을 따라 주변형률을 측정하였다. 화상처리법과 수동 측정법의 결과를 비교한 그래프가 Fig. 16에 도시되어 있

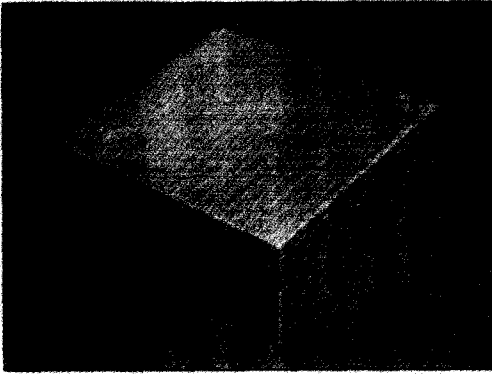


Fig. 14 Aluminium block for calibration

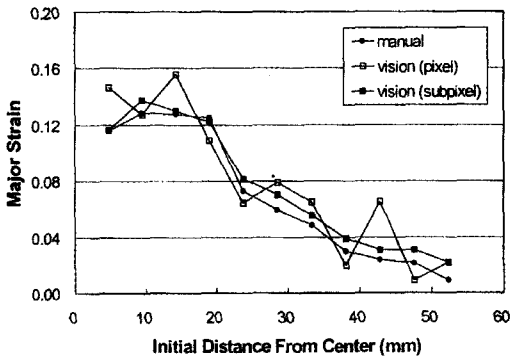


Fig. 15 Major strain distribution along the center line of an LDH specimen

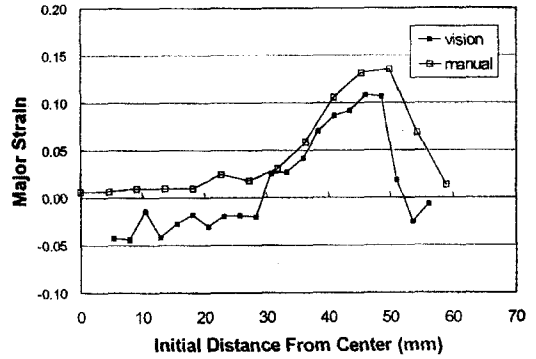


Fig. 16 Major strain distribution along the center line of a square cup drawing specimen

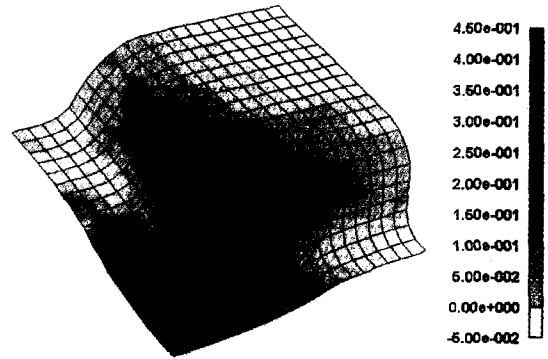


Fig. 17 Major strain distribution of a square cup deep-drawing specimen

다. 크기는 10%까지 차이를 보이고 있으나, 두 가지 측정법 모두 오차요인을 포함하고 있기 때문에 절대적인 정확도를 논하기는 어렵다고 생각된다. 마일러 테이프는 곡률이 심한 모서리부에서도 곡면을 따른 길이를 측정하게 되므로, 절점 사이의 거리를 직선적으로 측정하는 화상처리법보다 일반적으로 더 큰 주변형률값을 나타내게 된다. 또한, 화상처리법은 측정영역 내의 격자수가 과다한 경우 화상의 해상도 문제로 인하여 오차가 커지는 단점이 있다.

Fig. 17은 본 시스템으로 측정된 주변형률 분포를 나타낸다. 시편 전체의 1/4 영역만 측정하였으며, 측정영역 내의 절점수는 441개, 요소수는 400개이다. 모서리부 근처에 높은 주변형률 값이 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.2.3 성형성 평가 시험

박강판의 성형한계도를 얻기 위하여 길이 180 mm, 폭 25~180 mm의 10 가지 시편을 준비하여 0.1 in 간격의 정사각형 격자를 인쇄한 후, 4 in 직경의 반구형 펀치에 의한 신장성형 실험을 행하였다. Fig. 18은 세 가지 시편의 1/2 또는 1/4 영역에 대한 주변형률 분포를 측정하고, 후처리 프로그램의 대칭영상(mirror image) 기능을 이용하여 나타낸 것이다.

4. 결 론

판재성형 제품의 3차원 곡면변형률을 자동으로 측정할 수 있는 시스템 "ASIAS(Automated Surface Information Analysis System)"를 개발하였다. 이 시스템은 화상의 입출력을 위한 하드웨어와 화상처리, 격자점 및 요소정합, 화상좌표의 실수단위 측정, 카메라 보정, 3차원 좌

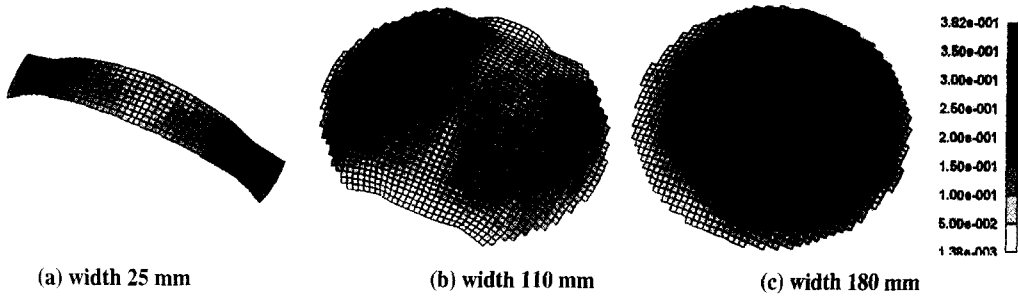


Fig. 18 Major strain distribution of punch stretching specimens

표 및 변형률 계산, 그리고 후처리 등을 수행하는 소프트웨어로 구성되어 있다. 개발된 시스템을 이용하여 여러 가지 성형 시편의 변형률을 측정하고, 그 결과를 기존의 수동식 측정 결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 시스템은 화상처리 기술을 사용하여 넓은 영역을 한번에 정확하게 측정할 수 있으므로, 수동식 측정에 비하여 처리 속도가 빠르고 편리하다.

(2) 화상 개선, 격자점 추출 및 정합, 화상좌표의 실수단위 측정 등에서는 독자적인 알고리즘을 사용하였으며, 그 효과는 매우 유용하였다.

(3) 한계돔높이 시험, 정사각집 디프드로잉 시험 및 성형성 평가를 위한 펀치 스트레칭 시험을 수행하고, 본 시스템을 이용한 변형률 측정 결과와 수동으로 측정한 결과를 비교하여 본 시스템의 신뢰성과 편의성을 확인하였다.

(4) 향후 체계적인 오차 분석을 통하여 시스템의 정확도와 정밀도를 향상시키는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME-97-C-02)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) E. Schedin and A. Melander, 1986, "The Evaluation of Large Strains from Industrial Sheet Metal Stampings with a Square Grid", *J. of Applied Metalworking*, Vol. 4, pp.143~156
- (2) R. Ayres, E. G. Brewer and S. W. Holland, 1979, "Grid Circle Analyzer; Computer Aided Mea-

surement of Deformation", *Transactions SAE*, Vol. 88, No. 3, pp. 2630~2634

- (3) D. N. Harvey, 1984, "Optimizing Patterns and Computational Algorithms for Automated, Optical Strain Measurement in Sheet Metal", *Proc. of the 13th Biennial Congress, Melbourne, Australia, IDDRG*, pp. 403~414
- (4) A. Miyoshi, A. Yoshioka and G. Yagawa, 1988, "Strain Measurement of Structures with Curved Surfaces by Means of Personal Computer-Based Picture Processing", *Engineering with Computers*, Vol. 3, pp. 149~156
- (5) J. H. Vogel and D. Lee, 1989, "An Automated Two-view Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces", *J. of Materials Shaping Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 205~216
- (6) D. Manthey and D. Lee, 1995, "Recent Developments in a Vision-Based Surface Strain Measurement System", *JOM*, Vol. 47, No. 7, pp. 46~49
- (7) H. J. Kim and D. Lee, 1996, "Further Development of Experimental Methods to Verify Computer Simulations", *Proceedings of the 3rd NUMISHEET Conference*, pp. 316~323
- (8) 한상준, 김영수, 김형종, 오수익, 1997, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정에 관한 연구(II)", 한국소성가공학회 '97 추계 학술대회 논문집, pp. 142~146
- (9) 정재운, 황창원, 허만성, 김낙수, 1997, "화상처리법을 이용한 판재의 변형률 측정(II)", 한국소성가공학회 '97 추계 학술대회 논문집, pp. 147~152
- (10) C. J. Hilditch, 1968, "Linear skeletons from

- Square Cupboards”, *Machine Intelligence.*, Vol. 4, pp. 403~420
- (11) R. Y. Tsai, 1987, “A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323~344
- (12) R. Sowerby, J. L. Duncan, and E. Chu, 1986, “The Modeling of Sheet Metal Stampings”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.28, pp.415~430
- (13) J. K. Lee, G. L. Kinzel, and R. H. Wagoner (Ed.), 1996, NUMISHEET '96, Proceedings of the 3rd International Conference
- (14) A. Makinouchi, E. Nakamachi, E. Onate, and R. H. Wagoner (Ed.), 1993, NUMISHEET '93, Proceedings of the 2nd International Conference