

비전을 이용한 중·대형 판재성형 제품의 곡면변형률 측정 알고리듬 개발

김두수* · 김형중**

Development of an Algorithm for the Vision-Based Surface-Strain Measurement of Large Stamped Parts

D. S. Kim* and H. J. Kim**

Abstract

It is still hard to measure the strain distribution over entire surface of a medium or large-size stamped part even by using an automated strain measurement system. Several methods which enable to enlarge the measurement range without losing accuracy and precision are suggested in this study. The superposition of images having different high-lightened or damaged part each other results in an enhanced image. A new method for constructing the element connectivity from a line-thinned image makes it possible to identify up to 1,000 elements. And the geometry assembling algorithm is proved very efficient, in which the whole area to be measured is divided into several parts; the coordinate transformation between every two adjacent parts is obtained from the concept of the least square error; and the 3-D shape or strain distribution over the whole surface is assembled.

Key Words : Computer Vision, Surface-Strain Measurement, Image Superposition, Element Connectivity, Geometry Assembling

1. 서 론

판재성형 제품의 곡면변형률 측정은 변형 전 소재에 일정한 크기의 격자를 입힌 후 성형 후 변형된 형상을 측정하여 변형률을 계산하는 일련의 과정으로 이루어진다. 본질적으로 격자를 인식하여 3차원 좌표를 측정하는 작업이므로 컴퓨터 비전과 화상처리법을 이용하는 것이 현실적으로 가장 효율적인 자동화 방안이라 할 수 있다.^(1~4) 이 방법은 수작업에 비하여 빠르고 정확한 측정이 가능할 뿐 아니라 대상물의 3차원 형상을 구할 수 있는 등 많은 장점이 있으나, 비전 시스템의 특성에 기인하는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 하나는 조명 조건으로 카메라와 프레임 그레이버(frame grabber)를 통해 얻어지는 화상

의 질이 조명에 따라 민감하게 변하는 것이다. 또 하나는 화상처리법 자체가 화소 단위로 크기가 제한되어 있는 화상을 다룬다는 점이다. 이는 실제의 물체를 이산적이고 유한하게 표현하기 때문에 정밀도는 물론 한 번에 측정할 수 있는 영역과 격자의 개수가 제한됨을 뜻한다.

크기가 작고 형상이 간단한 실험실 수준의 성형 제품이라 하더라도 1/2 또는 1/4 정도의 영역은 비교적 용이하게 측정할 수 있으나, 전체를 한꺼번에 신뢰할 만한 정확도로 측정하는 것은 어려운 일이다. 더욱이 실제 대형 제품의 경우에는 특별히 중요한 국부 영역만 측정할 수밖에 없으며, 유한요소 해석과의 비교도 자연 지엽적이 될 수밖에 없는 실정이다. 본 연구에서는 특별히 고안된 고가·고정도의 이송 장치가 없이도 중·대형 판재성형 제품의 곡면변형률을 측정할 수 있는 몇 가지 방안을 제시하고자 한다.

* 강원대학교 대학원

** 강원대학교 기계공학과

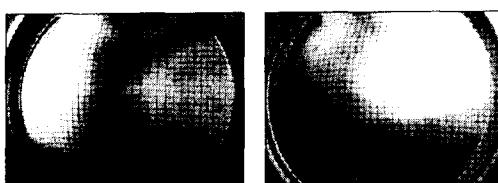
2. 알고리듬 및 응용

2.1 화상의 중첩

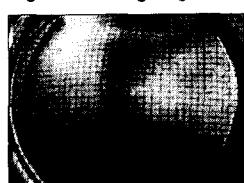
변형률 측정은 주로 반사율이 좋은 금속 판재에 대해 행해지므로 조명의 위치, 종류 및 강도에 따라 획득한 화상에서 측정 가능한 부위는 Fig. 1(a)와 같이 큰 차이를 보이게 된다. 이러한 현상은 측정 대상의 굴곡이 심할수록 더욱 두드러지며 모든 측정 대상에 대해 만족할만한 화상을 얻는다는 것은 대단히 힘든 일이다. 그러나 동일한 위치에서 조명 조건을 달리한 후 양호한 부위를 조합한다면 측정 영역을 확대할 수 있게 된다. 이 과정에서 간단한 산술 및 논리 연산을 화소 단위로 적용한다면 단순히 화소를 대치하는 것보다 더 나은 결과를 기대할 수 있다. Fig. 1(b)는 (a)의 두 화상에서 반사광의 영향을 받지 않은 부분을 취하여 재구성한 것이다.

2.2 요소망 구성 알고리듬

교차점의 3차원 좌표를 계산하기 위하여는 두 방향 화상에서 서로 대응하는 점을 인식해야 한다. 이러한 정합 과정은 요소망을 먼저 구성한 후 일정한 규칙을 따라 번호를 부여함으로써 이루어진다⁽¹⁾. 그러나 요소망을 구성하기 위하여 교차점과 교차점 사이를 잇는 선분을 추적하는 일은 간단한 문제가 아니다. 실제 화상의 교차점은 Fig. 2에 나타난 것처럼 세선화 과정에서 두 점으로 분리되는 경우가 많으므로 이를 처리하는 방안이 다시 요구된다. 기존의 방법은 모든 교차점 주위에 분리된 교차점을 포함하는 7×7 내지는 11×11 화소 크기의 이중 커널을 써운



(a) images with high-lightened part



(b) superposed image

Fig. 1 Superposition of images

후 커널과 커널을 연결하는 선분을 추적하여 요소를 구성하는 것으로 요약할 수 있다. 이 방법은 교차점 사이의 거리가 커널이 중복될 정도로 가까워지면 요소망 구성을 할 수 없는 단점을 가지므로, 교차점 사이에 충분한 거리(커널의 크기 $\times \sqrt{2}$ 화소)를 확보하기 위하여 확대 촬영을 해야 하므로 실제로 얻어낼 수 있는 교차점의 개수는 최대 500개 정도이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 커널에 의존하지 않는 방법을 고안하였으며, Fig. 3에 요소망을 구성하기 위한 기존의 방법과 개선된 방법을 간단히 비교해 놓았다. 세선화된 화상에서의 모두 분기점을 일단 교차점이라 간주한 후 요소를 구성한다. 하나의 교차점은 두 개의 분기점으로 분리될 수 있으므로 하나의 요소를 구성하는 분기점은 최대 8개가 존재할 수 있다. 이렇게 임시로 구성한 요소에서 내부 교차점 사이의 거리를 계산하여 가변역치(adaptive threshold)에 의해 가까운 거리에 존재하는 두 개의 교차점을 평균하여 한 점으로 하고 교차점이 4개가 될 때까지 반복한다.

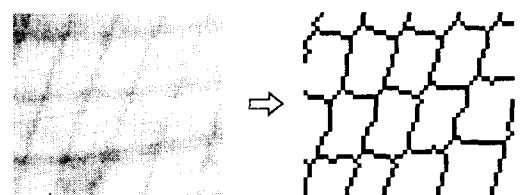


Fig. 2 Example of the grid point divided into two by line thinning

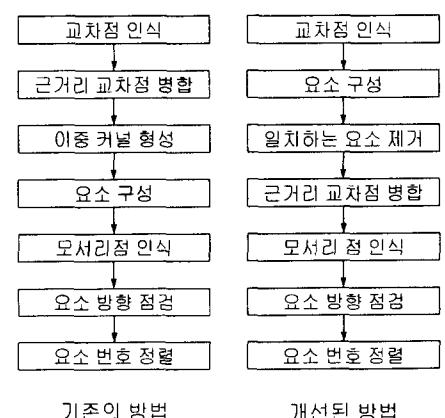


Fig. 3 Algorithms for constructing the element connectivity

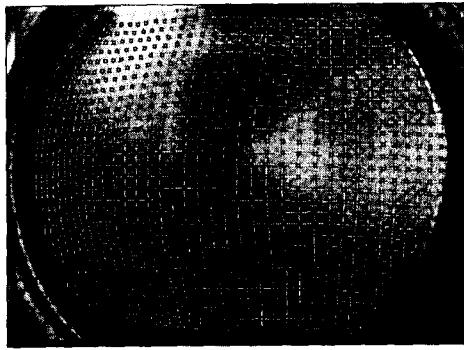


Fig. 4 Application of new algorithm for the element identification

Fig. 4는 개선된 격자인식 알고리듬의 적용으로 970개의 교차점을 추출해 낸 모습이다. 화상의 왼쪽 부분은 교차점의 거리가 5 화소 정도에 불과한데도 성공적으로 요소망을 구성하였음을 알 수 있다.

2.3 측정영역의 분할과 조합

전술한 격자인식 알고리듬을 적용하면 비교적 작은 시편에 대하여 전체 영역을 한 번에 측정할 수는 있으나 일부분을 확대하여 촬영하는 것에 비하여 측정값의 신뢰도는 떨어지게 된다. 이는 카메라의 투시각도 및 시편에 대한 보정 불록의 상대적 크기 등 몇 가지 이유에 기인한다⁽²⁾. 따라서 대상물 전체 표면을 여러 영역으로 나누어 측정한 후 각각의 형상을 하나로 조합한다면 신뢰도를 유지하면서 전체적인 형상과 변형 양상을 관찰할 수 있게 된다.

카메라 보정(calibration)을 실시하여 전체좌표계 $X-Y-Z$ 를 정의하고, 대상물의 어떤 일부 영역을 측정한 후 카메라 위치와 초점은 고정한

채로 대상물을 적당히 움직여 인접 영역을 측정 한다. 두 영역이 공유하는 격자점 P_i ($i=1,2,\dots,N$; N 은 공유격자점수)에 대하여 대상물을 움직이기 전·후에 측정한 3차원 좌표를 각각 (x_i, y_i, z_i) 및 (x'_i, y'_i, z'_i) 라 하면, 두 좌표 사이의 변환 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{T} + \mathbf{R} \mathbf{x}_i \quad (1)$$

즉,

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

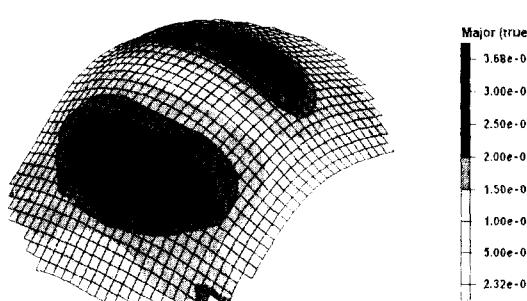
여기서 회전변환행렬 \mathbf{R} 의 성분은 서로 독립인 3 개의 오일러 각 α, β, γ 로 나타낼 수 있다.

따라서 두 좌표 사이의 변환관계를 결정하려면 6 개의 파라미터 즉, $T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma$ 의 값을 구해야 하며, 이론적으로는 2 개의 공유 격자점의 3차원 좌표값을 대응시킴으로써 이들을 모두 구할 수 있다. 그러나 측정에서 얻어진 3 차원 좌표는 본질적으로 오차를 포함하므로 2 개 이상의, 가능한 한 많은 공유점들을 대응시켜 최소자승오차(least square error) 방법으로 오차를 최소화하는 것이 바람직하다.

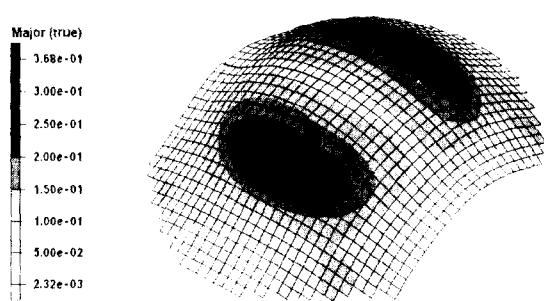
본 연구에서는 다음과 같은 오차함수 E 를 정의하였다.

$$E = \sum_{i=1}^N \| \mathbf{x}'_i - (\mathbf{T} + \mathbf{R} \mathbf{x}_i) \|^2 \quad (3)$$

여기서 $\| \cdot \|$ 는 벡터 노름(norm)을 표시한다. 이 오차함수에 최소자승오차 알고리듬을 적용하



(a) one image for the whole area



(b) assembling of four images

Fig. 5 Comparison of the major strain between one image and assembled images

면 결계 미지수 $T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma$ 에 대한 ($N \times 6$)의 비선형 연립방정식을 얻게 되며, Gauss-Newton 법⁽⁵⁾을 사용하여 그 해를 구하였다.

Fig. 5(a)는 전술한 화상 중첩 및 격자인식 알고리듬을 적용하여 한계돌높이(LDH) 시편의 전체 영역을 한 번에 측정한 것이고, (b)는 전체를 네 부분으로 나누어 측정한 후 본 알고리듬을 사용하여 화상들간의 좌표 변환관계를 구한 후 조립한 것이다. 동일한 시편을 측정하였음에도 (a)가 (b)에 비하여 2 % 정도 크게 평가되었음을 알 수 있다.

Fig. 6은 흰색 원으로 표시한 1/4 영역을 기준으로 화살표 방향을 따라 조합한 것으로, 위쪽 두 영역의 경계가 약 0.5 mm 정도 벌어져 있다.

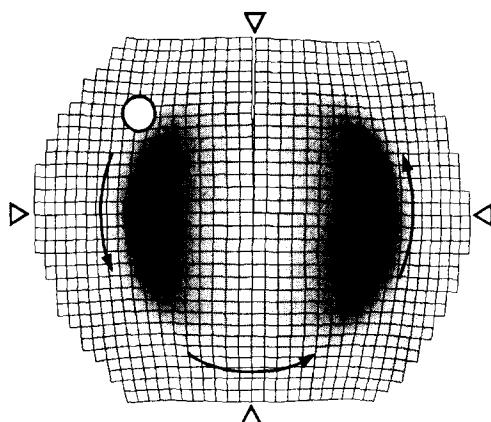


Fig. 6 Error accumulation by successive image assembling

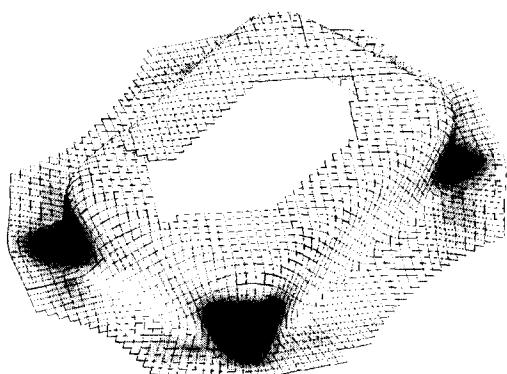


Fig. 7 Application of the geometry assembling to a rectangular deep-drawn cup

즉, 이 방법을 반복 적용할 경우 오차의 전파나 누적을 야기할 수 있음을 보여준다. 따라서 궁극적으로 전체적인 오차를 최소화하기 위해 인접한 두 영역간의 변환관계를 각각 구하는 것보다 모든 부분영역 상호간의 변환관계를 구하는 수치적 알고리듬이 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 7은 직사각 컵 디프드로잉 시편의 주변형률 분포를 11 개 영역으로 나누어 측정하고 조립한 예이다. 본 알고리듬이 중·대형 제품의 측정에 효율적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

- (1) 조명의 영향을 받는 복수의 원시 화상을 중첩하고, 이에 대한 화상처리를 수행함으로써 측정영역을 확대할 수 있었다.
- (2) 격자 인식 알고리듬의 개선으로 한 번 측정으로 1000 개 이상의 격자점을 추출할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 대상물 전체 표면을 여러 영역으로 나누어 측정한 후 이들을 조합하는 알고리듬을 개발함으로써, 고가의 이송장치가 없이도 중·대형 제품의 전체적인 형상과 변형률 분포를 효율적으로 측정할 수 있었다.
- (4) 많은 영역을 조립할 경우 오차의 누적을 최소화하는 수치해법의 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 한상준, 김영수, 김형종, 오수익, 1998, “화상처리 법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발”, 한국소성가공학회논문집, 제7권 제6호, pp.575~585
- (2) 김두수, 김형종, 1999, “비전을 이용한 곡면변형률 측정법의 정확도 및 정밀도 향상에 관한 연구”, 한국소성가공학회논문집 (인쇄중)
- (3) J. H. Vogel and D. Lee, 1989, “An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces”, J. of Mat'l Shaping Tech., Vol.6, No.4, pp.205~216
- (4) CamSys Inc., 1995, ASAME Reference Manual, Ver. 3.8
- (5) S. C. Charpraa and R. P. Canale, Numerical Methods for Engineers, 2nd Ed.