

화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정에 관한 연구 (II)

한상준*, 김영수**, 김형중**, 오수익*

* 서울대학교 기계설계학과

** 강원대학교 기계공학과

A Study on the Measurement of Surface-strain Using the Image Processing Technique (II)

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

* Dept. of Mech. Design & Prod. Eng., Seoul National University

** Dept. of Mech. Eng., Kangwon National University

Abstract

An automated surface-strain measuring system 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. The software is implemented using the image processing technique, and includes a program for the camera calibration and the post-processor to display the strain distribution. An LDH(limiting dome height) test specimen is measured its surface-strain as an application of the present system.

1. 서 론

3차원 곡면변형률의 측정은 판재성형에서의 금형설계, 공정설계, 제품검사 등에 필요한 실험적 데이터를 얻는 데 필수적인 작업이라 할 수 있으나, 방대한 데이터 처리를 위한 시간적, 경제적 문제와 정밀측정을 위한 기술적 문제 등 많은 어려움이 수반된다.

Lee 등은 화상처리기술을 이용한 측정시스템을 개발하여 상용화에 성공한 이래[1], 오차 분석과 정확도 향상을 위한 연구를 계속하고 있으며[2,3]. 최근에는 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다[4,5].

본 연구에서는 두 대의 CCTV 카메라를 이용하여 3차원 곡면변형률의 측정을 위한 하드웨어 장치를 구축하였으며, 측정과정에 필요한 화상처리, 카메라 보정, 3차원 좌표 및 변형률 계산, 후처리 등의 프로그램을 개발하였다. 카메라 보정에서의 오차를 분석하는 한편, 개발된 시스템의 응용 예로서 LDH 성형 시편의 주변형률 분포를 측정하였다.

2. 이 론

2.1 카메라 보정

카메라 보정(calibration)은 초점거리, 왜곡계수 등의 카메라 내부의 광학적인 특성과 임의의 절대좌표계(world coordinate system)에 대한 카메라 좌표계의 위치와 방위를 결정하는 과정으로, 이를 통하여 컴퓨터 화상좌표로부터 절대좌표를 구할 수 있다. 보정은 격자점들의 절대좌표를 알고 있는 기준격자(master grid)를 사용하여 격자점의 절대좌표와 화상좌표사이의 관계를 구함으로써 이루어진다.

본 연구에서는 동일 평면상의 보정점을 이용하는 방법을 써서 프로그래밍 하였으며, 그 이론적 배경은 Tsai[6]가 제안한 것이다. 단, 미지의 보정변수들을 구하기 위한 비선

형 최적화 과정에서 다음과 같이 정의되는 오차함수 λ 를 사용하였다.

$$\lambda = \sqrt{\left[X_d(1+xr^2) - f\frac{x}{z} \right]^2 + \left[Y_d(1+xr^2) - f\frac{y}{z} \right]^2}, \quad r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (1)$$

여기서 (X_d, Y_d) 는 왜곡된 화상좌표계, (x, y, z) 는 카메라 좌표계, x 는 왜곡계수, f 는 초점거리를 각각 나타낸다.

2.2 요소망 구성

화상정합과 변형을 계산을 위해 요소망을 구성한다. 화상처리 과정중 얻은 교차점에 절점번호를 부여하고 각 절점 주위에 연결되어 있는 절점을 검색한 후에 시작 절점으로부터 반시계방향으로 요소 connectivity를 구성한다.

2.3 3차원 좌표 계산

Fig. 1에 도시한 바와 같이 물체 위의 한 점 P를 서로 다른 위치에서 바라본 투시선은 교차하므로, 두 카메라의 위치벡터 v_1, v_2 와 투시선 방향의 단위벡터 n_1, n_2 를 알면 그 점의 3차원 공간좌표를 구할 수 있다. 점 P의 위치벡터 p 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = v_1 + a_1 n_1 = v_2 + a_2 n_2 \quad (2)$$

벡터방정식 (2)를 a_1 과 a_2 에 대하여 풀면,

$$a_1 = \frac{(n_1 \times n_2) \cdot [n_2 \times (v_1 - v_2)]}{|n_1 \times n_2|^2} \quad (3a)$$

$$a_2 = \frac{(n_1 \times n_2) \cdot [n_1 \times (v_1 - v_2)]}{|n_1 \times n_2|^2} \quad (3b)$$

식 (3a) 또는 (3b)를 식 (2)에 대입하면 점 P의 위치벡터를 계산할 수 있다. 그러나 일반적으로 한 점의 상이 CCD 센서에 투영될 때 그 해상도에 따라 투영위치가 미세하게 변하고, CCD로부터 얻어진 화상은 근본적으로 오차를 수반하게 되어 두 투시선이 교차하지 않는다. 따라서 두 투시선 사이의 수직거리가 가장 짧은 지점에서 수직거리의 중점을 택하여 교차점으로 한다. 즉,

$$p = \frac{(v_1 + a_1 n_1) + (v_2 + a_2 n_2)}{2} \quad (4)$$

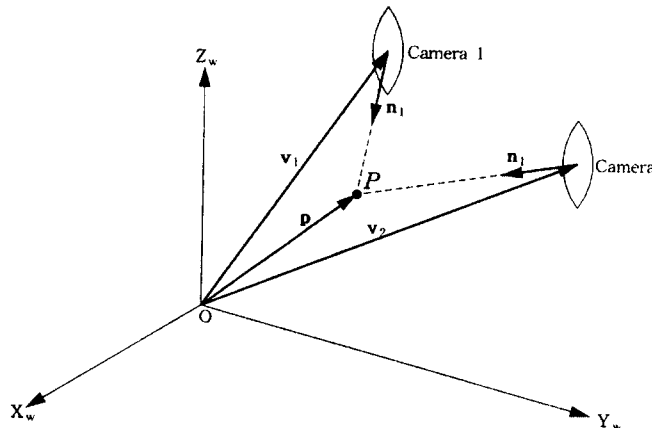


Fig. 1 A schematic diagram for 3-D coordinates calculation

2.4 곡면변형률 계산

사각형 격자를 각각 대각선으로 둘로 나눈 삼각형 소영역으로 전체 측정영역을 분할하고, 앞서 구한 격자점들 즉, 삼각형 꼭지점들의 3차원 좌표로부터 유한변형 이론에 의한 변형률 성분을 다음 식으로 계산한다. 각 삼각형은 균일변형률을 가지는 것으로 가정한다

$$\begin{aligned}
 E_{11} &= \frac{1}{2a^2} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 - a^2] \\
 E_{22} &= \frac{1}{2a^2} [(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 - a^2] \\
 E_{12} &= \frac{1}{2a^2} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2][(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2] \\
 &\quad \times [(x_1 - x_0)(x_2 - x_0) + (y_1 - y_0)(y_2 - y_0) + (z_1 - z_0)(z_2 - z_0)]
 \end{aligned} \tag{5}$$

단, a : 변형 전 이동변직각삼각형의 짧은 변 길이

$(0, 0, 0), (a, 0, 0), (0, a, 0)$: 변형 전 삼각형의 세 꼭지점 좌표

$(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$: 변형 후 삼각형의 세 꼭지점 좌표

3. 변형률 측정 시스템의 구축

3차원 곡면변형률 측정 시스템은 화상의 입력과 표현, 그리고 후처리 등을 위한 하드웨어와, 화상처리, 영상경합, 카메라 보정, 3차원좌표 및 변형률 계산 등을 수행하는 소프트웨어로 구성된다. Fig. 2는 본 연구에서 제작한 하드웨어의 사진으로 두 대의 CCTV 카메라(Panasonic, WV-BP310) 및 카메라 고정/이송 장치와, 디지털 화상을 얻기 위한 frame grabber(Data Translation, DT-3152) 및 이를 내장한 PC 등으로 구성되어 있다. 입력화상은 해상도 640×480의 흑백(grey) 화상이며, 화상처리 프로그램에 의하여 진처리(thresholding) 및 이치화(thresholding) 단계를 거쳐 세션화된 화상으로 바뀐다.

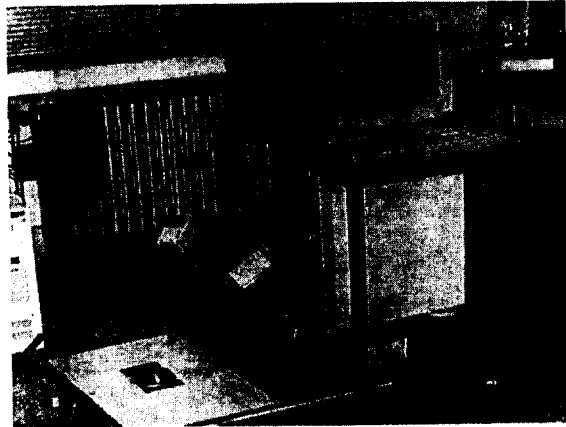


Fig. 2 A Photograph of the surface-strain measuring system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 카메라 보정 및 오차 분석

본 실험에 사용된 각각 5mm 간격으로 10개씩의 격자무늬(격자점 121개)를 600dpi의 레이저 프린트로 인쇄하여 기준격자(master grid)로 사용하였다. 좌우 두 대의 카메라에 대해 각각 보정을 수행하기 위해 거리, 왜곡계수 등 카메라 특성인자와 변환행렬을 구하였다.

각각 보정을 수행하여 초점거리, 왜곡계수 등 카메라 특성인자와 변환행렬을 구하였다.

카메라 보정 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 기준격자점들의 3차원 좌표를 계산하고, 이로부터 다시 격자간격에 대한 오차를 분석하였다. 그 결과는 Table 1에서 보는 바와 같이 비교적 양호한 것으로 나타났다.

Table 1 Error of the grid size measured by the present method

Grid Size	Mean Error	Maximum Error
5.0 mm	0.062 mm (1.23 %)	0.205 mm (4.09 %)

화상처리를 이용한 3차원 좌표의 측정에서 오차의 주된 원인은 화상처리와 카메라 보정에 있다. 격자점을 찾을 때 화소단위로 읽으므로 분해능은 카메라의 화소수에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 화소를 세분하여 읽을 수 있는 방법이 요구된다. 카메라 보정 방법에 있어서도 정확한 보정 결과를 얻기 위해서는 보정면의 실제좌표와 화상좌표의 정확한 입력이 필요하다.

4.2 한계돔높이 시편의 변형률 측정

개발된 시스템의 응용 예로서, NUMISHEET '96의 벤치마크 모델인 한계돔높이 (LDH) 성형 시편을 대상으로, 전술한 변형률 측정의 전 과정을 수행하였다. Fig. 3은 두 대의 카메라로부터 입력된 원시화상이며, Fig. 4는 그 왼쪽 화상을 이치화 및 세선화한 결과를 보여준다. 또한, Fig. 5는 최종적으로 얻어진 주변형률 분포를 도시한 것으로, 직접 비교해 보이지는 않았지만, 본 실험에서 얻은 결과는 다른 상용 시스템으로 측정된 결과나 유한요소해석 결과[3]와 거의 비슷한 변형률 분포를 보여 주는 것으로 확인되었다.

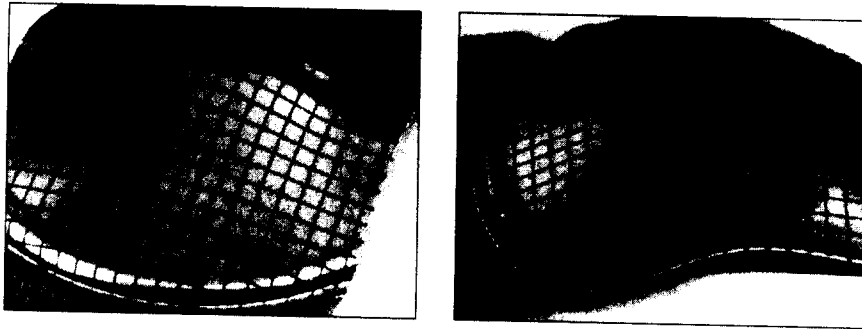


Fig. 3 The raw images captured by two CCTV cameras

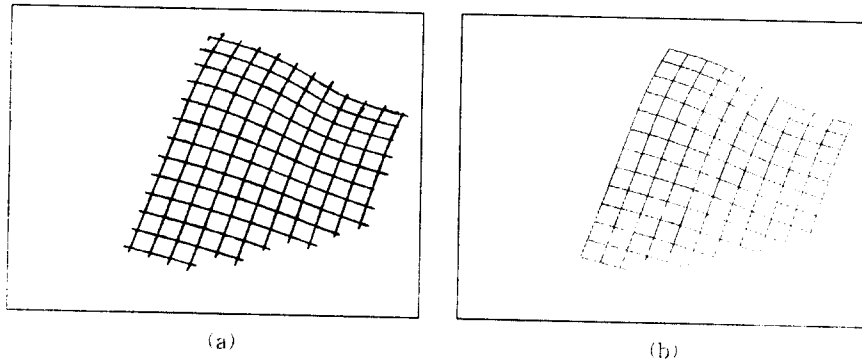


Fig. 4 The images obtained through (a) thresholding and (b) thinning, respectively

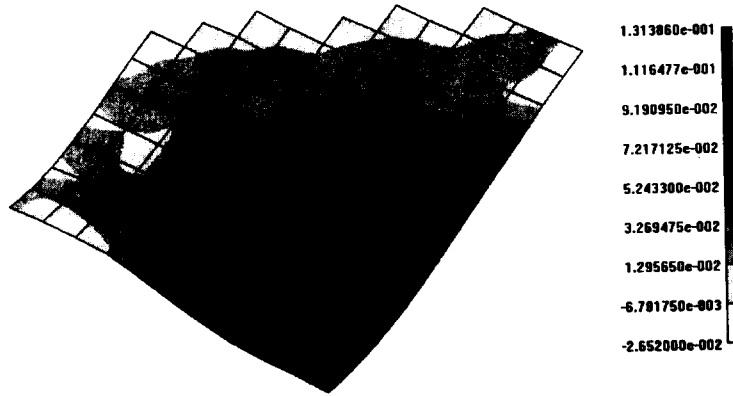


Fig. 5 The major strain distribution of an LDH specimen

5. 결론

본 연구는 3차원 곡면의 변형률 분포를 자동으로 측정하는 시스템의 개발을 목표로 진행 중에 있다. 현재까지 하드웨어 시작품을 제작하였고, 화상처리, 격자점 추출 및 요소망 구성, 카메라 보정, 3차원좌표 및 변형률 계산, 변형률 분포의 그래픽 등 소프트웨어의 주요 모듈들의 프로그래밍을 완성한 단계에 있다.

앞으로 해결하고자 하는 주요 과제는 첫째, 변형률 측정에 필요한 모든 화상처리와 카메라 보정 및 계산 등의 과정을 일괄 처리할 수 있는 통합환경의 구축과, 둘째, 격자점 좌표를 화소수 단위의 정수값으로 읽는 수준을 넘어 소수점 이하 단위까지 읽을 수 있는 알고리즘을 개발하여 측정오차를 획기적으로 감소시키는 것이다.

참고문헌

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 김낙수, "판형부품의 설계 및 공정해석", 공업기반기술과제 보고서, 서강대학교 산업기술연구소 (1996)
- [5] 김영수, 김형중, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정에 관한 연구", 한국소성가공학회 '97 춘계학술대회 논문집, pp. 213-216 (1997)
- [6] R. Y. Tsai, "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 (1987)