

〈論 文〉

컴퓨터 비전을 이용한 자유곡면의 CAM 시스템에 관한 연구

양 민 양* · 유 진 규**

(1990년 3월 14일 접수)

A CAM System of Sculptured Surface Using Computer Vision

M.Y. Yang and J.K. Yoo

Key Words : Sculpture Surface(자유곡면), Stereo Vision(스테레오 영상), Subpixel Algorithm(서브픽셀 알고리즘), Geometric Modelling(기하학적 모델링), CAM(컴퓨터이용 가공)

Abstract

A CAM system for NC machining of sculptured surfaces with automatic measurement using stereo vision is proposed and verified by experiments. For feature extraction from the sculptured surface an artificial grid pattern is made on it. A simple stereo algorithm for 3D positioning of object points on a physical model is applied. In order to improve measurement accuracy, an algorithm for subpixel registration is also used. After a depth map of the phsysical model is calculated by the stereo algorithm, its computational model is obtained through fairing and Ferguson surface fitting method. CL data for NC machining are calculated, and finally, NC part programs are generated. An advantage of this method is to produce easily the sculptured surface.

1. 서 론

여러가지 산업제품 또는 일상용품 등에 있어서 외관이나 기능적 곡면으로서 자유곡면(sculptured surface)이 자주 이용되고 있다. 따라서 이러한 제품 또는 그것을 생산하는 데 필요한 금형을 구성하고 있는 자유곡면의 신속하고 능률적인 가공은 다 품종 소량 생산방식이 증가하며, 제품의 수명(life cycle)이 점점 짧아지는 최근의 추세에 비추어 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 근자에 들어 NC가공 및 CAD/CAM기술의 발전에 힘입어 이러한 문제들에 대한 접근이 비교적 용이해지고 있으며 이로 인한 생산성의 향상이 기대되고 있다. 그러나 CAD를 이용한 자유곡면의 최종적인 설계 및

수정이 CRT상이나, 플롯터 및 제도기 상에서 가능하기는 하나 종종 설계된 제품의 실제적 3차원 모형이 최종적인 설계결과를 확인하거나, 또는 외관의 상세한 내용을 조사하기 위하여 요구된다. 따라서 산업현장에서는 최종 설계단계에서 이러한 실체모형을 통상 진흙, 석고 또는 나무 등을 이용하여 만들어 사용하고 있다⁽¹⁾.

그런데 이와같이 자유곡면이 포함된 제품을 생산하는데 있어 실체모형을 사용하는 경우 자유곡면은 통상 수학적으로 간단히 표현되지 않는다. 따라서 먼저 자유곡면의 3차원 점 데이터가 측정된 후 그 데이터를 이용하여 기하학적 모델이 만들어지고 이어 NC가공에 필요한 CL(cutter location)데이터가 계산된다. 다음 Fig. 1은 자유곡선으로 구성된 금형의 제작순서도이다. 그런데 자유곡면의 3차원 데이터를 측정하는 일반적인 방법은 접촉식 3차원 측정기(CMM)를 이용하는 것으로 이 방법은 매우

*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

**한국과학기술원 생산공학과

번잡스러우며 많은 시간이 요구된다. 또한 모형에 유연성이 있는 경우 접촉력 등에 의하여 측정오차가 발생되기도 한다⁽²⁾.

본 논문에서는 최근 컴퓨터 비전분야에서 널리 이용되고 있는 스테레오 비전기술을 이용하여 자유곡면의 3차원 데이터를 측정후 표면 피팅을 수행하여 NC가공에 필요한 CL데이터를 자동적으로 생성해 내는 CAM시스템에 관하여 서술코저 한다. 이와같은 방법의 장점으로는 몇개의 영상으로부터 비교적 짧은 시간내에 모델링 및 가공에 필요한 정보를 얻을 수 있으므로 생산성을 향상시킬 수 있으며, 비접촉식 측정을 수행하므로 접촉력에 의한 측정오차를 줄일 수 있다.

그런데 스테레오 비전에 있어서 한가지 어려운 점은 특징점 추출(feature extraction) 및 스테레오

매칭과정이다⁽³⁾. 스테레오 매칭을 위한 특징점으로 통상 물체의 모서리나 또는 경계 등이 사용되고 있으나 기하학적 형태상 이러한 특징점을 발견하기 어려운 자유곡면의 경우는 이와같은 방법이 적용되기 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 자유곡면 상의 특징점 추출을 위하여 실제모형에 인위적으로 격자모형을 만들어 넣어 해결하였다.

2. 스테레오 비전시스템

Fig. 2에는 본 연구에서 채택된 기하학적 영상시스템이 나타나 있다. 즉 초점거리가 f 인 동일한 두대의 카메라로 기초(base line)길이 $2b$ 만큼 떨어진 위치에 평행 카메라 좌표계가 설정되었다. 이때 실제 모형 상의 임의의 점 P 의 좌표를 (x, y, z) 라 하고 왼쪽과 오른쪽 영상에서 이 점에 대응되는 영상점을 각각 $P_l = (x_l, y_l)$ 와 $P_r = (x_r, y_r)$ 라 하자. 이제 영상 평면내에서 대응되는 점 P_l 와 P_r 간의 불균형을 d_p 라 하면 $d_p = x_l - x_r$ 로 정의된다. 그런데 d_p 는 점 P 의 좌표값 z 에 역비례하게 되며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_p = x_l - x_r = \frac{2bf}{z} \tag{1}$$

따라서 한쌍의 스테레오 영상으로부터 실제 모형

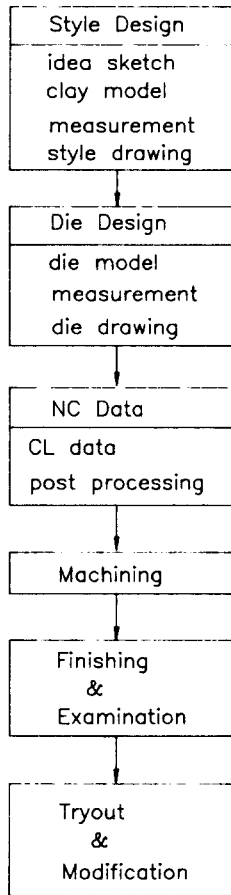


Fig. 1 Manufacturing procedure of dies including sculptured surfaces

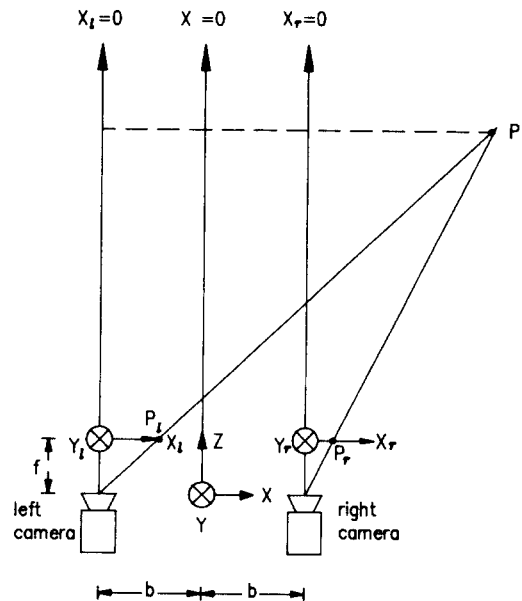


Fig. 2 Imaging geometry of parallel camera coordinate system

상의 모든 점의 불균형이 없어지면 이로부터 이 실체 모형의 depth map은 다음 식에 의하여 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= \frac{2bf}{d_p} \\ x &= \frac{z}{f}x_l - b \\ y &= \frac{z}{f}y_l \end{aligned} \quad (2)$$

그런데 스테레오 비전시스템에 있어서 불균형을 결정하기 위해서는 특징점 추출 및 스테레오 매칭 과정이 필요하게 되는데 이에 많은 계산시간이 소요되므로 이를 개략화하기 위하여 superimposed difference image 알고리즘을 적용하였다⁽⁴⁾. 이 방법은 우선 두대의 카메라로 부터 스테레오 영상이 얻어지면 불균형을 결정하기 위하여 superimposed difference image가 구성된다. 여기서 superimposed difference image $f_a(x, y)$ 란 왼쪽 영상 $f_l(x, y)$ 와 오른쪽 영상 $f_r(x, y)$ 로부터 다음과 같이 구성되며

$$\begin{aligned} f_a(x, y) &= [f_l(x, y) - f_r(x - \bar{d}, y)] \\ &\quad + f_l(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

이때 평균 불균형 \bar{d} 는 다음과 같이 표현되는 상관 함수 $C(x_s)$ 를 최대화시키는 오른쪽 영상의 이동량 x_s 로 정의된다.

$$C(x_s) = \iint_{-\infty}^{\infty} f_l(x, y) f_r(x - x_s, y) dx dy \quad (4)$$

물체의 특징점으로는 Sobel Operator⁽⁵⁾에 의하여 격자모형의 와가 검출되며, 영상내의 와의 x 성분은 미리 선정된 기준에 의하여 임계치화(thresholding)된 후 thinning에 의해 국부적 최대값을 갖는 x 로 결정된다. 이제 $g_l(x, y)$ 와 $g_r(x, y)$ 를 각각 $f_l(x, y)$ 와 $f_r(x, y)$ 로부터 소벨 오퍼레이터에 의하여 검출된 특징값이라 하면 superimposed difference image $f_a(x, y)$ 에서 특징값 $g_a(x, y)$ 는 다음과 같이 얻어진다⁽⁶⁾.

$$\begin{aligned} g_a(x, y) &= 2g_l(x, y) \\ &\quad - g_l(x + (d(x, y) - \bar{d}), y) \end{aligned} \quad (5)$$

이때 여기에는 불균형이 평균불균형과 같은 overlapped feature의 경우와 약간의 편차를 갖는 paired feature의 경우의 두가지 형태가 존재하게 되며 불균형 $d(x, y)$ 는 각각 왼쪽과 오른쪽 영상으로부터의 특징점의 좌표인 x_{rl} 과 x_{rr} 의 검출에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$d(x, y) = \bar{d} + (x_{rl} - x_{rr}) \quad (6)$$

이제 이렇게 구해진 불균형을 앞의 식 (2)에 대입하면 물체의 모든 점에서의 depth map을 구할 수 있다.

그런데 스테레오 비전의 영상처리에 있어서 디지털 영상으로의 변환은 측정 분해능을 1픽셀 이하로 낮출 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 측정 분해능을 높이기 위하여 subpixel registration 방법 중 intensity interpolation 알고리즘을 채택하였다⁽⁷⁾. 이것은 먼저 보간법을 이용하여 초기의 불연속적인 영상으로부터 원래의 연속적인 영상을 만들고, 이어 앞서 사용되었던 것보다 더 높은 비율로 resampling하여 더 촘촘한 서브픽셀을 만드는 것으로서, 샘플링 주파수가 충분히 높고, 보간 함수의 선택이 적절하며 영상신호가 충분히 불균형 상태가 되어 있는 경우 측정오차를 크게 개선할 수 있는 것으로 보고되고 있다⁽⁸⁾. 여기서는 gradient operator를 사용하여 구한 와의 인텐시티와 그 좌우 픽셀의 인텐시티를 이용한 least square method 보간방법을 적용하였다.

3. 자유곡면의 모델링 및 NC가공

스테레오 비전시스템에 의하여 측정된 자유곡면상의 3차원 점 데이터로부터 NC가공에 필요한 기하학적 모델링을 하기 위해서는 점군의 수학적인 피팅에 의하여 곡면을 형성하여야 한다. 점군에 의한 곡면 형성의 방법은 곡면 상에서 점군의 분포형태와 점군에 주어진 형상 정보에 따라 달라지게 되는데, 점군이 불규칙적인 분포를 갖는 경우는 삼각 patch방식이 효과적이며 규칙적인 사각형 그물 모양의 분포를 갖는 경우에는 Ferguson이나 Bezier 사각 patch방식이 적합하다⁽⁹⁾. 본 연구에서는 격자모형의 와상의 데이터가 측정되므로 이 경우 규칙적인 사각형 그물 분포를 갖는 경우로 취급할 수 있으므로 Ferguson의 서페이스 피팅 방법을 사용하기로 하였다.

Ferguson복합곡면의 경우는 Fig. 3에 보인 바와 같이 $(M+1) \times (N+1)$ 개의 위치 벡터 \mathbf{r} 과 곡면 경계선에서의 접선 벡터 \mathbf{t} , \mathbf{s} 및 곡면의 네모서리에서의 트위스트 벡터 \mathbf{x} 로 정의된다. 이때 곡면을 정의하는 위치 벡터는 스테레오 비전에 의하여 측정된 자유곡면 상의 점 데이터 좌표를 입력하면 되나, 곡면 정의에 필요한 경계선에서의 접선 벡터와 트위스트 벡터는 실제 측정이 곤란하다. 따라서 여

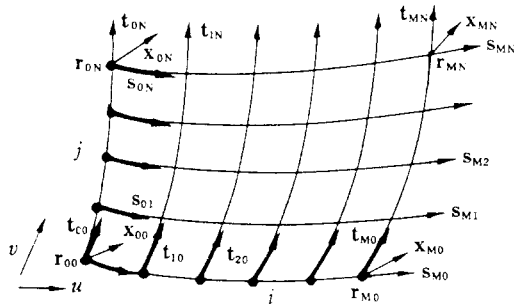


Fig. 3 Ferguson composite surface fitting

기서는 복합곡면을 이루고 있는 patch는 이와 인접한 patch들과 평활하게 연결되어야 하므로 patch 네 모서리에서 일차 및 이차 미분값의 연속성 원리를 이용하여 이들을 구하였다⁽¹⁰⁾.

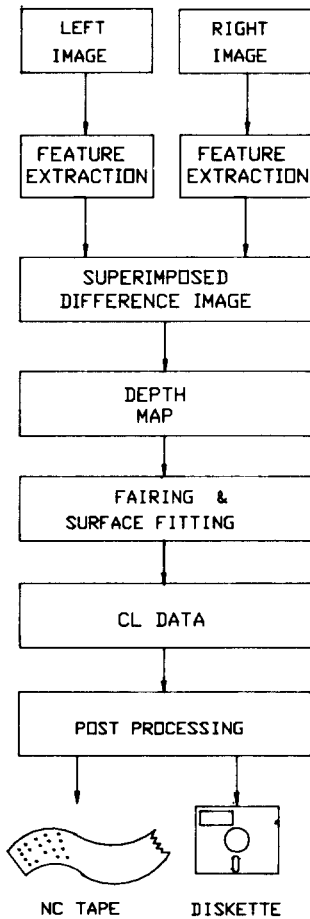


Fig. 4 Overall processing step

그런데 실물모형을 측정하여 얻어지는 점 데이터에서는 일반적으로 측정오차가 따르게 마련이고, 실물모형 자체에도 원하지 않는 굴곡이 있을 수 있으므로 기하학적 모델링 단계 전에 각 점 데이터를 일정한 한도 내에서 조금씩 움직여 평활한 (smooth) 곡면을 만드는 과정이 필요하다. 이러한 과정을 fairing이라 하는데 본 연구에서는 Ferguson spline의 fairing방법이 사용되었다⁽¹¹⁾.

가공할 곡면에 대한 fairing 및 기하학적 모델링이 끝나면 이제 곡면을 가공하기 위한 가공경로계획(cutter path planning) 및 CL 데이터를 계산하여야 한다. 본 연구에서는 정의된 자유곡면이 매개변수형이므로 isoparametric곡선을 따라 공구의 접촉점들이 정의되는 parametric가공방식을 채택하였다. 여기서 step length는 내부공차 또는 외부공차가 지정되었을 경우 이를 만족시킬 수 있는 보간 길이로 하였으며, path interval은 볼랜드 밀 공구의 가공흔적(scallop)의 높이 지정에 의하여 결정되는 것으로 하였다⁽¹²⁾. CL데이터는 사용공구가 볼랜드 밀이므로 다음식에 의하여 계산되었으며

$$r_L = r_c + R(n - u) \quad (7)$$

이때 r_c 는 공구 접촉점의 좌표이고, R 은 공구 반경, n 과 u 는 각각 곡면의 단위 법선벡터와 공구의 회전축 방향 단위벡터이다. 이렇게 계산된 CL데이터는 운송과정을 거쳐 NC테이프 또는 디스켓으로 출력된다. 다음 Fig. 4에는 본 연구에서 채택된 전체 처리과정이 나타나 있다.

4. 실험

다음 Fig. 5는 실험을 위하여 제안된 전체 시스템의 구성도이다. 초점거리 16mm인 Sony상의 756(H)×581(V) CCD(Charge Coupled Device) 카메라 한대가 스테레오 영상을 얻기 위하여 평행으로 이동한다. 카메라로부터 입력된 스테레오 영상은 아답터를 통하여 Image Technology사의 pvisionplus frame grabber로 전달되는데, 이것은 2장의 512×480 8bit 영상을 위한 On-Board메모리와 8개의 look-up테이블로 구성되어 있다. 전달된 스테레오 영상은 frame grabber에 의해서 디지털화 되고, 주 컴퓨터인 32-bit PC에 의하여 처리된다. 컴퓨터에 연결된 NC tape puncher는 Hansin사의 CP-250R로서 천공속도는 50자/초이다.

실험은 본 시스템의 정밀도를 측정하기 위한 기

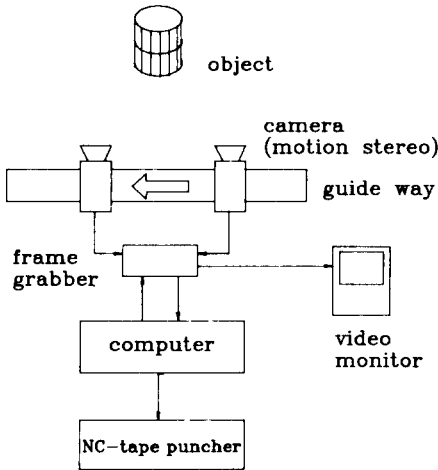


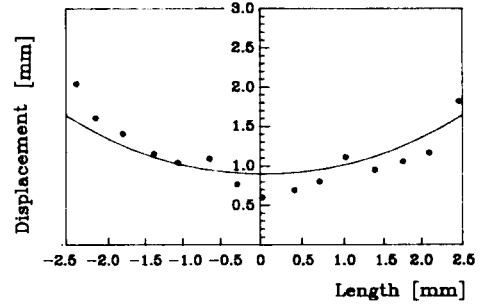
Fig. 5 Experimental set-up for proposed CAM system

초실험과 임의의 자유곡면으로 구성된 실체모형에 대한 측정 및 NC가공으로 수행되었다. 먼저 기초 실험에서는 공간좌표를 알 수 있는 직경 9.2cm의 원통 상에 격자모형을 만들어 넣고 원주 방향으로 측정을 하였는데, 300mm의 거리에서 배이스 라인 길이 70mm인 경우와 800mm의 거리에서 배이스 라인 길이 195mm인 두 가지 경우에 대하여 수행하였다.

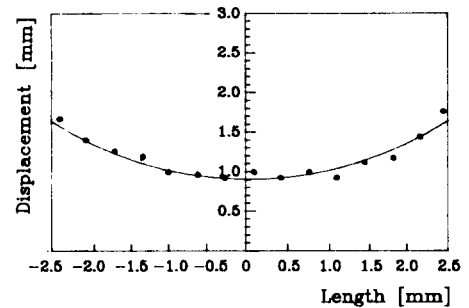
실체모형에 대한 실험에서 측정은 기초실험에서와 같은 방법으로 수행되었으며, 측정된 자유곡면상의 점 데이터를 이용하여 위에서 설명된 바와 같이 fairing 및 기하학적 모델링이 행하여졌다. 얻어진 기하학적 모델을 이용하여 parametric가공방식에 의한 CL데이터가 계산되었으며 가공공차 0.1mm가 부여되었다. CL데이터는 운송과정에 의하여 NC파트 프로그램화 되어 NC 테이프 또는 디스켓으로 출력되고 CNC머시닝 센터로 전송되어 가공이 행하여졌다.

5. 결과 및 토의

기초실험에 앞서 측정 분해능을 예측하기 위하여 이에 필요한 X와 Y방향의 scaling factor를 구하였다. 이 값들은 카메라만의 특성치로서 baseline 길이 및 거리에 무관하며 본 실험의 경우 동치 61728.6pixel/m로 나타났다. 이때 시스템의 분해능은 배이스라인의 길이, 측정거리 등에 따라 다르



(a)



(b)

(a) Test results from measurement of cylinder without subpixeling algorithm

(b) Test results from measurement of cylinder with subpixeling algorithm

Fig. 6 Experimental results for measurement of cylinder

게 되는데 subpixeling을 무시할 경우 예를 들어 300mm거리에서 배이스라인길이 70mm일 때 x, y, z방향으로의 분해능 R_x , R_y , R_z 는 다음과 같으며⁽⁶⁾

$$R_x=0.29\text{mm}, R_y=0.29\text{mm}, R_z=0.62\text{mm}$$

또 800mm의 거리에서 배이스라인의 길이가 195mm일 때는 다음과 같다.

$$R_x=0.81\text{mm}, R_y=0.81\text{mm}, R_z=1.61\text{mm}$$

Fig. 6에는 원주 상의 원호를 측정된 결과가 나타나 있다.

측정 결과를 살펴 보면 subpixeling알고리즘을 적용하지 않은 경우 측정오차가 예측한 분해능 보다 크게 나타났으며, subpixeling알고리즘을 적용한 경우는 작게 나타났다. 이것은 스테레오 매칭과 연관지어 설명될 수 있는데, 전자의 경우는 스테레오 매칭이 제대로 수행되지 않아 불균형이 적어도 1픽셀 이상 차이가 나 측정오차가 증폭된 것이며,

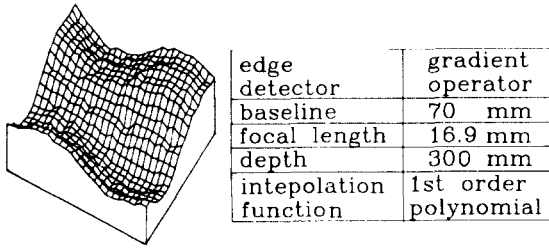


Fig. 7 Depth map of physical model

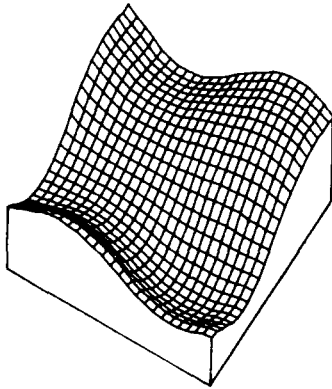


Fig. 8 Geometric model after fairing and surface fitting

후자의 경우는 subpixeling 알고리즘에 의하여 스테레오 매칭이 향상되어 측정오차가 감소된 것이다. 따라서 스테레오 비전시스템에 있어서 트테레오 매칭이 매우 중요하며, 측정 정밀도에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그러므로 시스템 하드웨어의 성능, 예를 들면 카메라 및 frame grabber의 해상도를 현재보다 높이고 적절한 subpixeling 알고리즘을 사용할 경우 측정 정밀도를 크게 향상시킬 수 있으리라 생각된다.

실체 모형의 경우 상관함수 $C(x_s)$ 를 최대화시키는 평균 불균형은 210픽셀로 계산되었다. 이것을 이용하여 superimposed difference image가 구해졌으며, 이로부터 물체의 depth map이 계산되었다. 다음 Fig. 7은 그 결과 인데 전체적인 형상은 같으나 일부 점군에서 스테레오 매칭이 제대로 수행되지 않아 측정오차가 발생되어 표면이 평활하지 않음을 알 수 있다.

이것을 fairing과 surface fitting 단계를 거쳐 평활하게 만든 기하학적 모델이 Fig. 8에 나타나 있다.

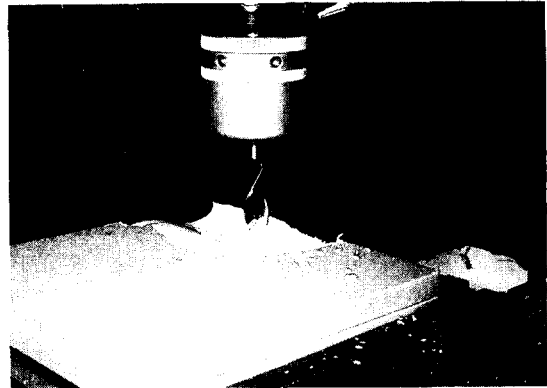


Fig. 9 Photograph of machining sculptured surface

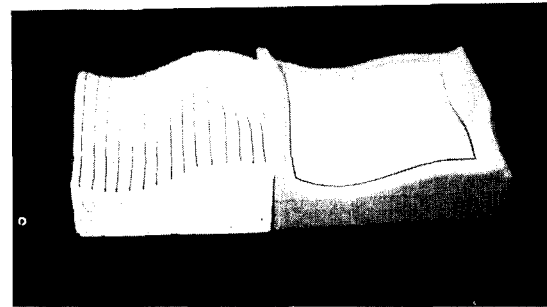


Fig. 10 Comparison of machined workpiece with physical model

Fig. 9는 머시닝 센터에서 가공을 하는 사진이며, Fig. 10은 실체 모형과 가공된 모형을 비교한 사진이다. 자유곡면인 두 모형을 정량적으로 비교할 수 있는 방법이 확립되지 않아 정확한 수치를 제시하기는 어려우나 비교적 만족스러운 결과를 보여주고 있다.

이와 같은 방법은 비교적 짧은 시간 내에 자유곡면의 기하학적 모델링 및 NC가공에 필요한 CL데이터를 창성해 낼 수 있으므로 각종 산업제품의 생산주기(production cycle)를 단축시키는 데 기여할 수 있을 것으로 여겨진다.

6. 결 론

본 연구에서는 자유곡면의 측정 및 NC가공에 컴퓨터 비전을 이용하는 방법이 제시되었으며, 이에 의한 CAM시스템이 제안되었다. 자유곡면의 스테레오 비전에 의한 측정에는 특징점 추출이 중요한 문제가 되므로, 이것을 효과적으로 해결하기 위

해서 본 연구에서는 실체 모형에 격자모형을 인위적으로 만들어 넣는 방법이 고안되었다. 실체 모형의 측정에서 스테레오 매칭이 오차 발생의 주요한 원인으로 분석되었으며, 이것을 해결하기 위하여 subpixeling registration 방법이 적용되어 측정오차가 개선되었다. 측정된 depth map을 이용하여 NC 데이터를 출력시켜 가공을 수행하였으며 이와 같은 방법으로 자유곡면으로 구성된 금형 또는 물체의 효과적인 컴퓨터원용가공이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Eisenstein, P., 1989, "Streamlining Design Steps", American Machinist, Vol. 133, No. 9, pp. 70~71.
- (2) Lavole, R., 1989, "Shopping Intelligently for CMM", Manufacturing Engineering, Vol. 102, No. 4, pp. 67~70.
- (3) Shirai, Y., 1987, Three-Dimensional Computer Vision, Springer-Verlag, Berlin.
- (4) 이정수, 1989, 로봇트의 작업에 응용 가능한 물체 인식을 위한 스테레오 알고리즘, 한국과학기술원 박사학위 논문.
- (5) Rosenfeld, A. and Kak, A.C., 1982, Digital Picture Processing, Academic Press, New York.
- (6) 유진규, 1990, 스테레오 비전을 이용한 자유곡면의 CAM시스템에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위 논문.
- (7) Tian, Q. and Huhns, M.N., 1986, "Algorithms for Subpixel Registration", Computer Vision, Graphics and Image Processing, pp. 220~233.
- (8) Toenshoff, H.K., Janocha, H. and Seidel, M., 1988, "Image Processing in a Production Environment, Annals of the CIRP, Vol. 37/2, pp. 579~590.
- (9) 최병규, 1989, NC 절삭가공과 CAM 시스템, 청문각.
- (10) Faux, I.D. and Pratt, M.J., 1981, Computational Geometry for Design and manufacture, Ellis Horwood.
- (11) Kjellander, J.A.P., 1983, "Smoothing of Bicubic Parametric Surfaces", Computer-Aided Design, Vol. 15, No. 5, pp. 288~293.
- (12) Qiulin, D. and Davies, B.J., 1987, "Surface Engineering Geometry for Computer-Aided Design and Manufacture, John Wiley & Sons.