

〈論 文〉

접촉감지프로브를 이용한 자유곡면의 삼차원형상 자동측정

송창규* · 김승우** · 박준호***

(1992년 9월 9일 접수)

Automatic Measurement of 3-Dimensional Profile of Free-Formed Surfaces by Using Touch-Trigger Probes

Chang-Kyu Song, Seung-Woo Kim and Junho Park

Key Words : 3-Dimensional Profile Measurement(삼차원형상 측정), Touch-Trigger Probes(접촉감지프로브), Coordinate Measuring Machine(삼차원 측정기), Probe Radius Compensation(프로브 반경보정), Remeshing(재배열)

Abstract

This report presents an automatic measurement method of 3-dimensional profiles of free-formed surfaces, by using a touch-trigger contact probe along with a conventional coordinate measuring machine. The method proceeds in three steps ; The surface profile under consideration is traced by the probe in an automatic manner, and then its measured data is compensated by considering the actual probe radius. Finally the compensated data is rearranged in the form suitable for the further processings of CAD/CAM applications. Some experimental results are discussed to verify the validity of the method suggested in this study.

1. 서 론

최근 기계가공의 대상이 되고 있는 공학표면들의 곡면형상은 수치제어와 CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) 기술의 발달과 더불어 복잡다양화하여 가고 있다. 이러한 공학표면의 형상은 크게 해석곡면(analytical surface)과 자유곡면(sculptured surface)으로 분류될 수 있다.⁽¹⁾ 전자의 해석곡면은 평면과 구에서와 같이 곡면상의 높이를 다음의 기하학적 함수 형태의 수식으로 표현이 가능한 표면울 의미한다.

$$F(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

그러므로 해석곡면의 경우, 함수 F 가 주어지면 임의의 x, y 값에 대한 높이정보 z 를 정확히 계산할 수 있어 적은 양의 정보로부터 곡면형상의 표현이 가능하다. 반면, 자유곡면은 기능 또는 미적관점에서 설계되어 식(1)과 같은 형태의 단순한 수학적 수식으로 표현되지 않는 곡면을 칭한다. 이러한 자유곡면을 표현하기 위한 가장 간편한 형태는 Fig. 1에서와 같이 표면 S 상에 위치한 유한개의 점들에 대해 주어진 x, y 값에 해당되는 높이정보의 집합으로 기술되는 z -map 곡면이라 할 수 있다.⁽²⁾

$$S = \{z(x_i, y_j) | i=1, \dots, n, j=1, \dots, m\} \quad (2)$$

이러한 z -map으로 표현된 자유곡면은 해석곡면과는 달리 곡면형상을 정의하기 위하여는 많은 양의 점의 높이정보가 필요하게 된다. 이러한 자유곡면의 높이정보는 일반적으로 설계하고자 하는 곡면의 모형을 찰흙이나 석고를 이용하여 제작한 후 이리

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과 대학원

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

***정회원, 대성산업 중앙연구소

부터 측정을 통해 얻는 방법이 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 이를 위해 현재 사용되고 있는 측정기술은 수동식 삼차원 측정기에 의존하고 있어 측정시간과 정밀도 면에서 많은 문제점이 제기되고 있다.^(3,4)

본 연구에서는 자유곡면의 측정을 자동화하기 위한 삼차원측정기와 접촉감지프로브를 이용한 자유곡면의 자동측정방법을 제안한다. 먼저 임의의 형상을 갖는 자유곡면을 대상으로 측정시간을 최소화할 수 있는 자동측정 알고리즘을 제시한다. 또한 측정 프로브가 갖는 유한한 반경으로 인해 야기되는 측정오차의 교정을 위한 프로브 반경보정에 대해 기술한다. 그리고 최종적으로 보정된 표면형상의 결과를 직접적으로 CAD/CAM에서 활용할 수 있게 하기 위한 재배열과정을 설명한다. 이상의 세 과정에 필요한 수학적 알고리즘을 본 논문에서 세부적으로 기술하며 실제 실험측정에 의한 결과를

검토한다.

2. 자동측정 알고리즘

자유곡면의 3차원형상 측정은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 물체가 놓인 xy 의 수평면상을 Δ 간격의 등변사각형으로 분리한 $n \times m$ 개의 격자점(rectangular grid)을 기준으로 시행된다. 이 때 각 격자점의 x 와 y 축의 좌표는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_i = x_0 + i\Delta, \quad i=0, 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

$$y_j = y_0 + j\Delta, \quad j=0, 2, \dots, m-1 \quad (4)$$

여기서 x_0 와 y_0 는 초기 격자점의 위치를 의미한다. 그러므로 삼차원형상 측정의 첫 단계에서는 식(2)와 (3), (4)로 주어진 x 와 y 축의 좌표에 대한 높이정보를 작업자의 도움없이 자동적으로 추출하는 작업이 요구되며, 이를 실현하기 위한 논리를 자동측정 알고리즘으로 정의한다.

본 연구에서 제안되는 자동측정 알고리즘은 측정 대상의 자유곡면은 z -map 곡면으로서 다음의 특성을 만족하는 것으로 가정한다.

- (1) 측정곡면은 주어진 x_i 와 y_j 의 좌표값에 대해 하나만의 높이정보 $z(x_i, y_j)$ 값을 갖는다.
- (2) 측정곡면의 기울기는 연속이며 모든 측정점에서 접선평면과 법선벡터를 정의할 수 있다.
- (3) 모든 측정점에 대해 감지프로브의 접근이 가능하도록 측정곡면의 곡률반경은 감지프로브의 접촉구의 반경과 비교하여 충분히 크다.

이상의 가정을 근거로 한 접촉 감지프로브(Touch-Trigger Probe)를 이용한 삼차원 측정기의 전체적 작동구조는 Fig. 3과 같다. 삼차원 측정기는 독립적으로 구동되는 xyz 방향의 직교한 세 측정축

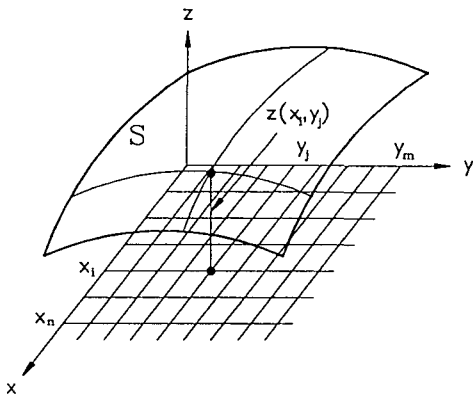


Fig. 1 Description of the z-map surface

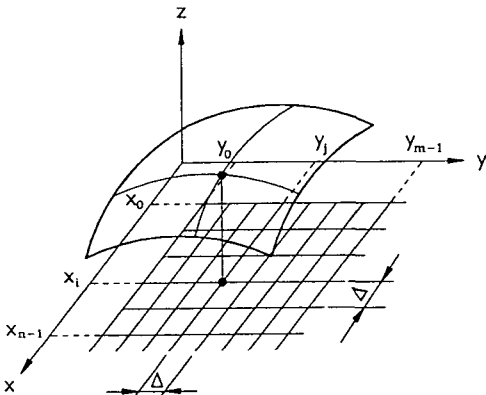


Fig. 2 Rectangular grid for the z-map surface

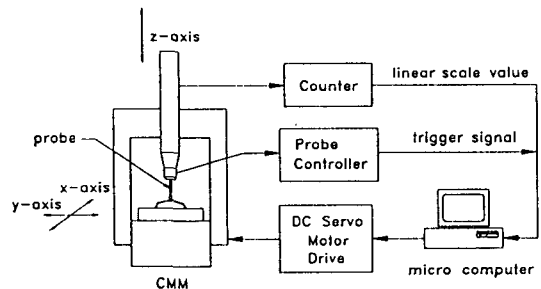


Fig. 3 Schematic diagram of CMM operating structure

들로 구성된다. 각 측정축은 위치검출기(linerar scale)를 부착하고 있으며 중앙제어기(IBM PC 386)에 의해 감지프로브를 원하는 위치로 이송한다. 감지프로브(renishaw)는 선단에 접촉된 반경 ρ 의 접촉구(contact ball)와 물체가 xyz 공간상에서 임의의 방향으로부터 접촉되는 순간에 중앙제어기로 감지신호를 송출한다. 이의 수신과 동시에 중앙제어기는 각축에 부착된 위치검출기로부터 각 측정축의 좌표값을 입력한다.

자동측정의 과정에서 물체상의 한 격자점을 대상으로 한 삼차원 측정기의 기본 동작은 Fig. 4에서와 같이 다음의 세 단계의 과정을 통해 수행된다.

- 단계1: x 와 y 축을 이송하여 감지프로브를 측정대상물의 격자점 상공에 위치시킨다.
- 단계2: z 축을 이동하여 감지프로브와 물체가 접촉하는 순간까지 하강시킨다.
- 단계3: 접촉을 감지하는 순간 z 축을 안전거리 Δ_z 만큼 상승시킨 후, x 와 y 축을 이송하여 다음의 격자점으로 이동한다.

격자점의 측정순서는 편의상 먼저 x 축을 주축방향으로 시행하며, 한 x 축상에서의 측정이 완료되면 y 축을 Δ 만큼 이동한 후 다시 x 축 방향의 주적을 수행하여 반복적으로 전체의 격자점에 걸쳐 수행된다. 이 때 전체측정에 소요되는 시간은 제3단계의 z 축의 상승거리 Δ_z 에 의해 좌우된다. 이는 다음 격자점으로의 이동시 물체와 감지프로브와의 불필요한 접촉을 방지하기 위해 요구되나, Δ_z 가 과도하게 책정되면 불필요한 동작이 누적되어 전체 측정시간을 확장하게 된다. 이를 방지하기 위해 상승거리 Δ_z 는 다음과 같이 측정된 격자점의 높이정보를 이용하여 최적화될 수 있다.

$$\Delta_z = \begin{cases} \Delta \tan \phi & \text{if } \tan \phi \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 격자점 (x_i, y_j) 에서의 x 축의 이송방향으로의 기울기를 나타내며, $z^p(x_i, y_j)$ 를 격자점 (x_i, y_j) 에서 측정된 높이정보라하면 이는 다음과 같이 계산된다.

$$\tan \phi = \frac{1}{\Delta} \{z^p(x_i, y_j) - z^p(x_{i-1}, y_j)\} \quad (6)$$

이때 Fig. 5(a)에서와 같이 격자점의 높이변화가 급격한 경우, 다음 격자점 (x_{i+1}, y_{j+1}) 에 도달하기 전 접촉이 발생하게 된다. 이 때에는 이 접촉점을

격자점 (x_i, y_j) 으로 대체하여 식(6)에 의해 다시 새로운 상승량 Δ_z 을 책정한 후 다음 격자점 (x_{i+1}, y_{j+1}) 에 도달되도록 진행한다. Fig. 5(b)에서는 이상의 알고리즘을 적용하여 측정되는 감지프로브 이동의 한 예를 보여주고 있다.

3. 프로브 반경보정

앞절의 자동측정 알고리즘에 의해 얻어지는 높이 정보는 다음의 집합으로 표현될 수 있다.

$$Z^p = \{z^p(x_i, y_j) | i=1, \dots, n, j=1, \dots, m\} \quad (7)$$

이때 주지할 사항은 식(7)의 높이정보는 측정하고자 하는 물체의 엄밀한 형상이 아닌 감지프로브 선단의 접촉구의 중심의 이동궤적을 의미한다. 실제 측정하고자 하는 표면형상의 높이정보 $Z = \{z(x_i, y_j)\}$ 는 Fig. 6에 보인 바와 같이 접촉구의 반경만큼 일정거리 평행하게 격리되어 있다. 이는 접촉구가 유한한 반경을 갖고 있어 접촉점이 항상 접촉구와 일정한 기하학적 관계를 갖지 않는 이유에 기인한다. 그러므로 실제 표면형상의 높이정보를 얻기 위해서는 식(7)의 접촉구의 이동궤적을 근거로 일련의 수학적 연산이 요구되며, 이 과정을 프로브 반경보정이라 정의한다. 이는 Fig. 7에 보인 바와 같

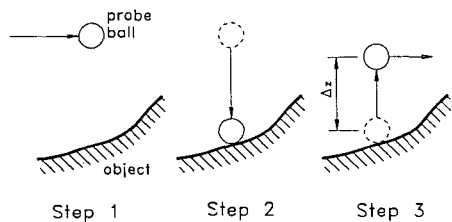


Fig. 4 Three steps of the basic operation in automatic measurement

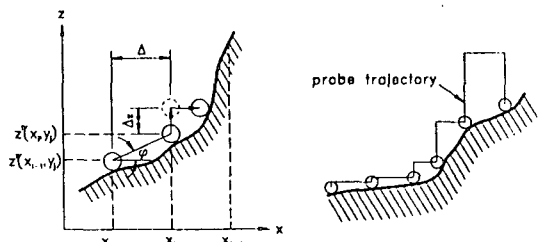


Fig. 5 (a) Interference between probe and surface (b) Probe trajectory for automatic measurement

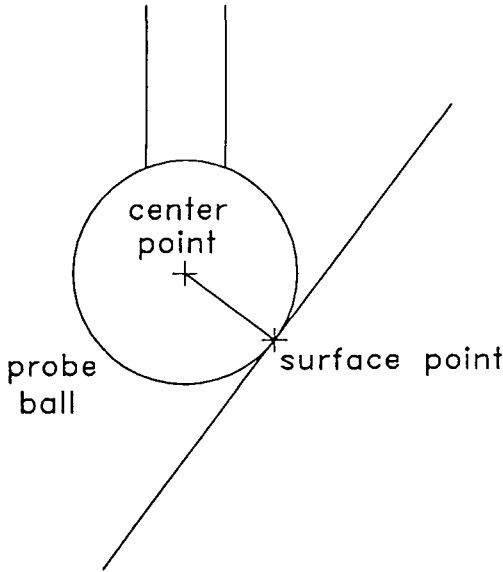


Fig. 6 Contact geometry between probe and surface

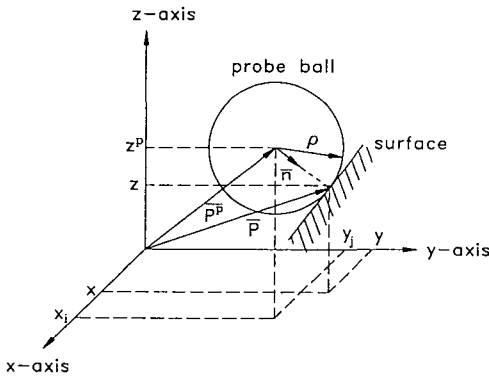


Fig. 7 Vectorial description for probe compensation

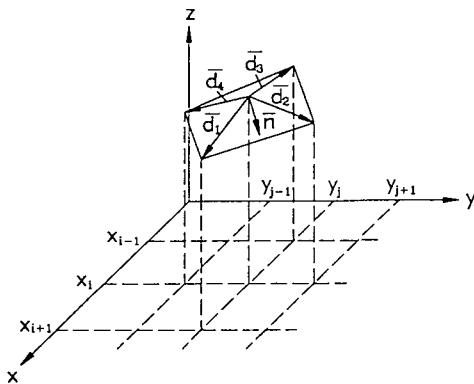


Fig. 8 Determination of normal vector at $z^p(x_i, y_j)$ point

이 두 개의 위치벡터를 이용해 유도될 수 있다. 먼저 접촉구의 중심을 향한 위치벡터를 \vec{p}_{ij}^p 라고 하면 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{p}_{ij}^p = \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \\ z^p(x_i, y_j) \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한 이에 대응하는 접촉점을 향한 위치벡터를 \vec{p}_{ij} 라하면 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{p}_{ij} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z(x, y) \end{bmatrix} \quad (9)$$

이상의 두 위치벡터를 접촉구를 중심으로 한 기하학적 조건에 의해 다음의 관계를 갖는다. 즉,

$$\vec{p}_{ij} = \vec{p}_{ij}^p + \rho \vec{n}(x_i, y_j) \quad (10)$$

여기서 ρ 는 접촉구의 반경을, 그리고 $\vec{n}(x_i, y_j)$ 는 접촉구의 중심으로부터 실제 접촉점을 향한 법선벡터를 의미한다. 그러므로 식(10)의 연산을 수행하면 실제 물체상의 접촉점 높이정보를 얻을 수 있으며 이를 다음의 집합으로 표기한다.

$$Z = \{z(x, y)\} \quad (11)$$

식(10)에서 요구되는 법선벡터는 Fig. 8에 보인 바와 같이 $z^p(x_i, y_j)$ 주변의 4개의 높이정보들의 조합으로부터 구해지는 4개의 법선벡터의 산술평균을 취한다.⁽⁵⁾ 즉,

$$\vec{n}(x_i, y_j) = \frac{\vec{d}_1 \times \vec{d}_2 + \vec{d}_2 \times \vec{d}_3 + \vec{d}_3 \times \vec{d}_4 + \vec{d}_4 \times \vec{d}_1}{|\vec{d}_1 \times \vec{d}_2 + \vec{d}_2 \times \vec{d}_3 + \vec{d}_3 \times \vec{d}_4 + \vec{d}_4 \times \vec{d}_1|} \quad (12)$$

여기서 벡터 $\vec{d}_1, \vec{d}_2, \vec{d}_3, \vec{d}_4$ 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \vec{d}_1 &= \vec{p}_{i+1,j}^p - \vec{p}_{ij}^p \\ \vec{d}_2 &= \vec{p}_{ij+1}^p - \vec{p}_{ij}^p \\ \vec{d}_3 &= \vec{p}_{i-1,j}^p - \vec{p}_{ij}^p \\ \vec{d}_4 &= \vec{p}_{ij-1}^p - \vec{p}_{ij}^p \end{aligned} \quad (13)$$

4. 재배열

프로브의 반경보정의 결과로 얻어지는 식(14)의 높이정보 $Z = \{z(x, y)\}$ 는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 xy 평면상에서 등변의 사각형격자를 구성하지 못한다. 이는 식(10)의 연산결과 x 와 y 의 좌표값

이 x_i 와 y_j 로부터 변화하는 이유에 기인한다. 이런 형태의 왜곡된 격자에 대한 높이정보는 CAD/CAM에서 사용이 불편하고 형상합성(merging) 등과 같은 작업에서 연산의 난이도를 높이는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점으로 인해 왜곡된 격자의 정보를 다시 등변 사각형 격자의 정보로 변환하는 재배열 과정이 요구된다. 즉, 집합 $Z=\{z(x, y)\}$ 로부터 형상측정 초기에 정하였던 등변 사각형격자를 다시 구성하고 이에 대응되는 격자점의 높이정보를 연산하는 과정이다. 이를 위해서는 平面보간법(bilinear interpolation method)이 효율적으로 적용될 수 있다.

평면보간법은 원하는 격자점 (x_i, y_j) 를 둘러싼 주변의 4점의 높이정보를 선형적으로 보간하여 격자점 (x_i, y_j) 에서의 높이정보 $z(x_i, y_j)$ 를 구하는 방법이다.⁽⁶⁾ Fig. 10에서와 같이 격자점 (x_i, y_j) 의 주위에 반경보정된 측정정보 z_a, z_b, z_c, z_d 가 존재하고 각 점들의 xyz좌표를 $(x_a, y_a, z_a), (x_b, y_b, z_b), (x_c, y_c, z_c), (x_d, y_d, z_d)$ 라 하면 격자점 (x_i, y_j) 에서의 높이정보는 다음과 같이 보간된다.

$$z(x_i, y_j) = (1-\nu) \left((1-u)z_b + uz_a \right) + \nu \left((1-u)z_d + uz_c \right) \quad (14)$$

위식에서 변수 u 와 ν 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$u = (x_i - x_a) / (x_b - x_a) \quad (15)$$

$$\nu = (y_j - y_a) / (y_c - y_a) \quad (16)$$

5. 결 론

접촉감지프로브와 삼차원 측정기를 이용하여 자

유곡면의 곡면형상을 자동측정하는 알고리즘을 제안하였고 측정된 접촉구의 중심계적을 반경보정하여 표면의 높이정보를 찾는 방법을 기술하였다. 또한 측정된 정보의 호트리짐을 평면보간에 의해 재배열하는 기법에 대해 설명하였다. 이렇게 제안된 삼차원형상 자동측정 알고리즘으로 자유곡면을 측정하는 경우 측정결과와 정밀도에 영향을 주는 주된 요소로서 측정기 자체의 정밀도와 함께 반경보정 알고리즘의 오차를 들 수 있다. 반경보정상의 오차를 유발하는 원인으로는 식(12)에 의해 계산된 법선 방향이 실제 그 지점에서의 법선 방향과 차이가 발생하는 것을 생각할 수 있다. 법선방향의 차이로 인한 반경보정오차의 최대값은 다음으로 정리될 수 있다.

$$\epsilon_{\max} = \rho \times \max \left(\left| \vec{n}_1 - \vec{n} \right|, \left| \vec{n}_2 - \vec{n} \right|, \left| \vec{n}_3 - \vec{n} \right|, \left| \vec{n}_4 - \vec{n} \right| \right) \quad (17)$$

여기서 벡터 $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3, \vec{n}_4$ 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 &= \frac{\vec{d}_1 \times \vec{d}_2}{|\vec{d}_1 \times \vec{d}_2|}, & \vec{n}_2 &= \frac{\vec{d}_2 \times \vec{d}_3}{|\vec{d}_2 \times \vec{d}_3|} \\ \vec{n}_3 &= \frac{\vec{d}_3 \times \vec{d}_4}{|\vec{d}_3 \times \vec{d}_4|}, & \vec{n}_4 &= \frac{\vec{d}_4 \times \vec{d}_1}{|\vec{d}_4 \times \vec{d}_1|} \end{aligned} \quad (18)$$

식(17)에서 반경보정의 최대 오차는 접촉감지프로브의 반경 ρ 와 비례관계에 있으므로 프로브의 반경이 클수록 오차가 커지게 된다. 이상의 측정방법을 실제적으로 적용한 실험측정의 결과를 Fig. 11-12에 보였다. Fig. 11은 실물크기(200 mm×250 mm)의 사람얼굴 석고모형을 $\Delta=3$ mm의 측정간격으로 자동측정한 결과이며 전체 측정에 소요된 시간은 약 7시간 가량이다. Fig. 12에는 범금형의 하

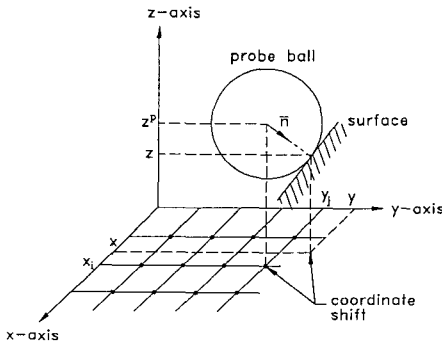


Fig. 9 Coordinate shift caused by radius compensation

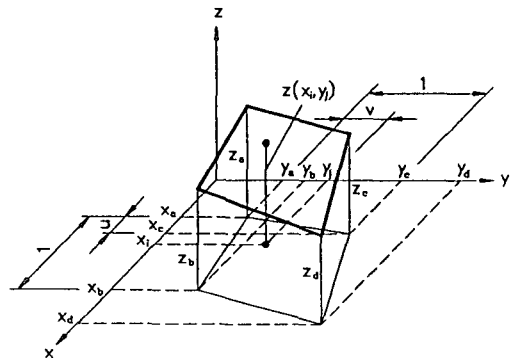


Fig. 10 Bilinear interpolation for remeshing

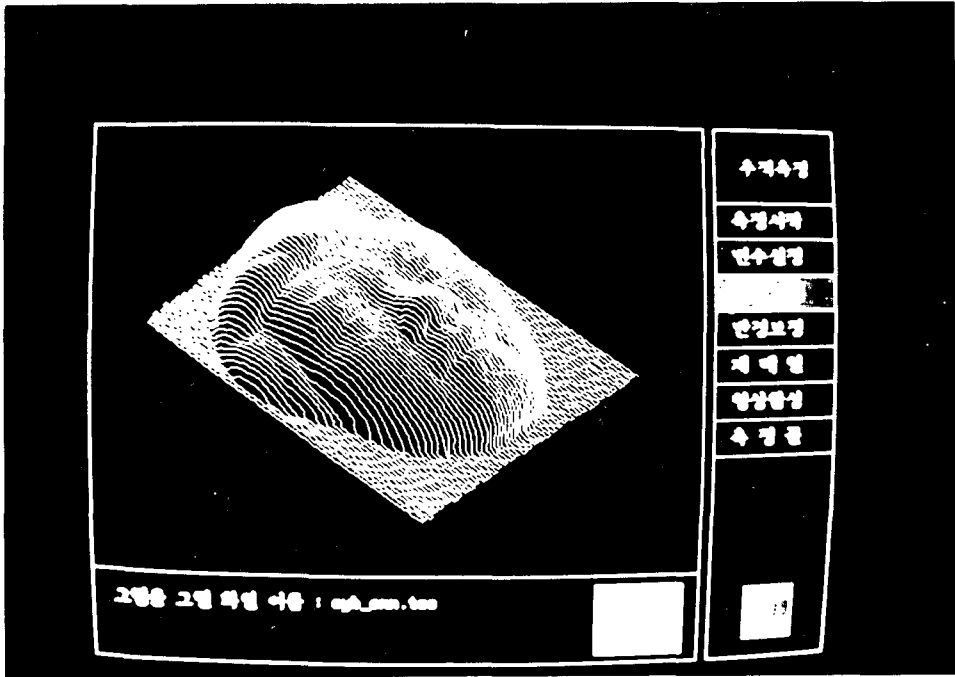


Fig. 11 Exemplary measurement of a sculptured face ($\Delta=3$ mm)

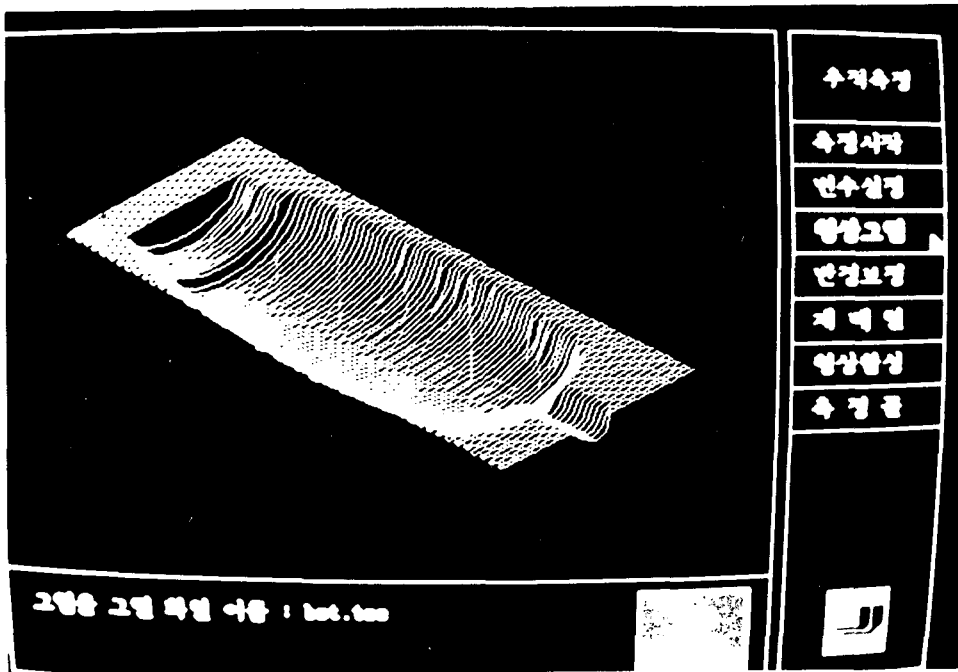
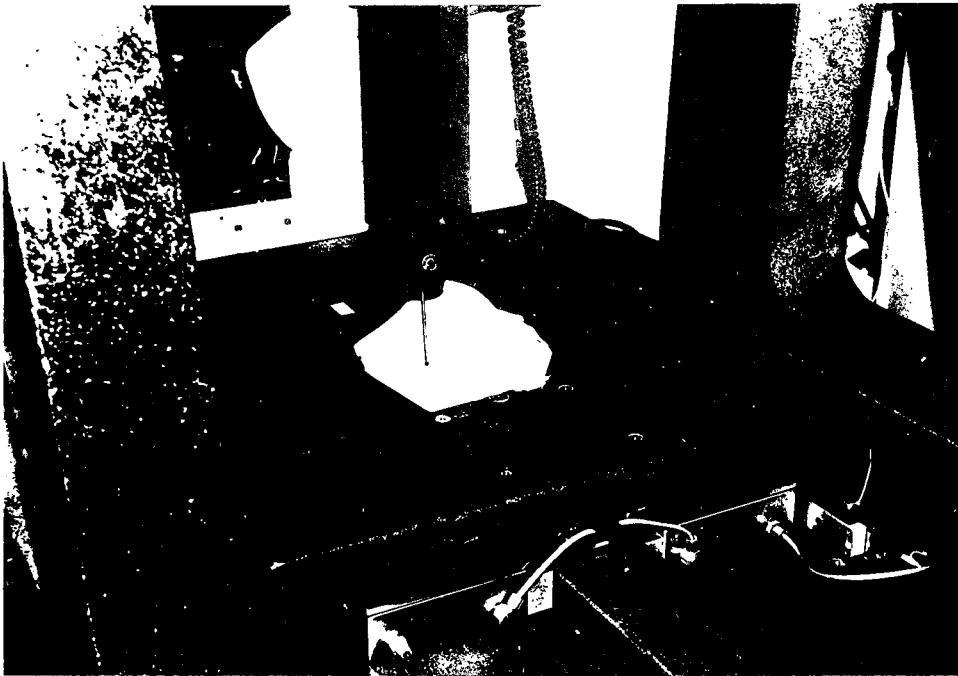
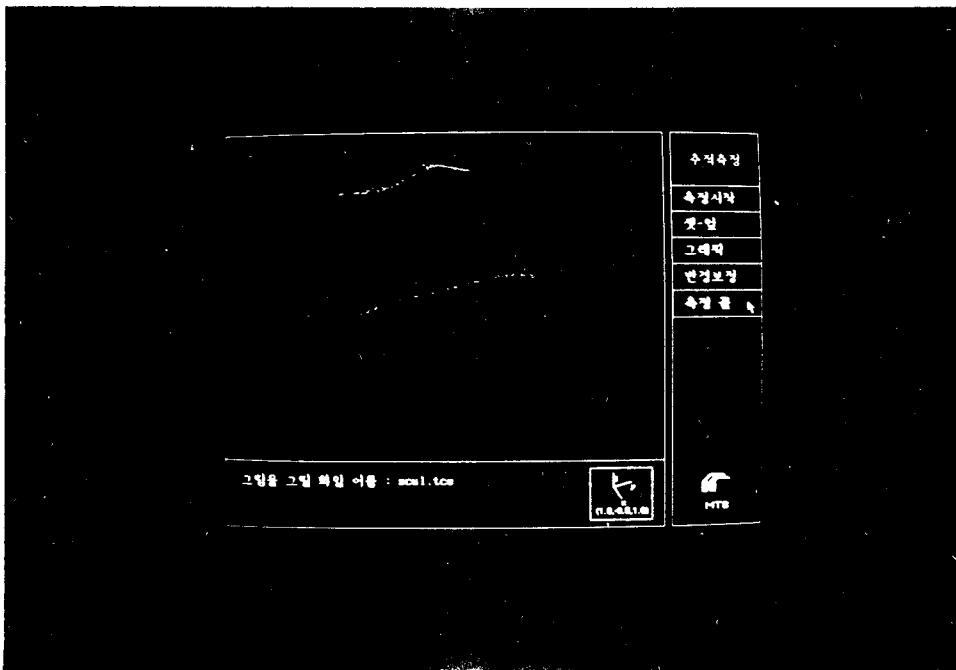


Fig. 12 Exemplary measurement of a bottle mold ($\Delta=2$ mm)

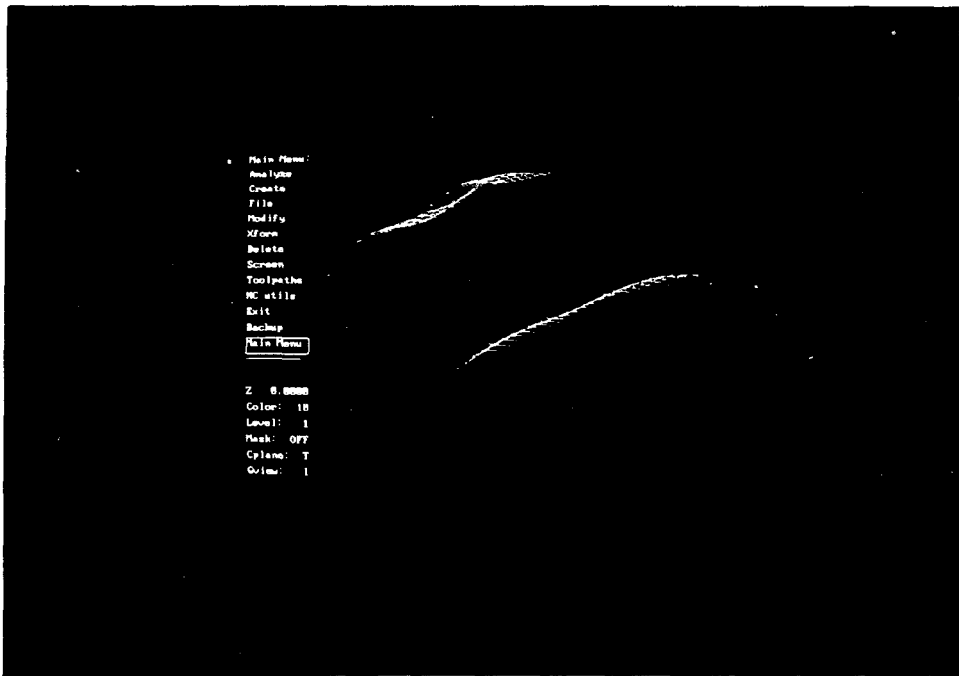


(a) View of automatic measurement

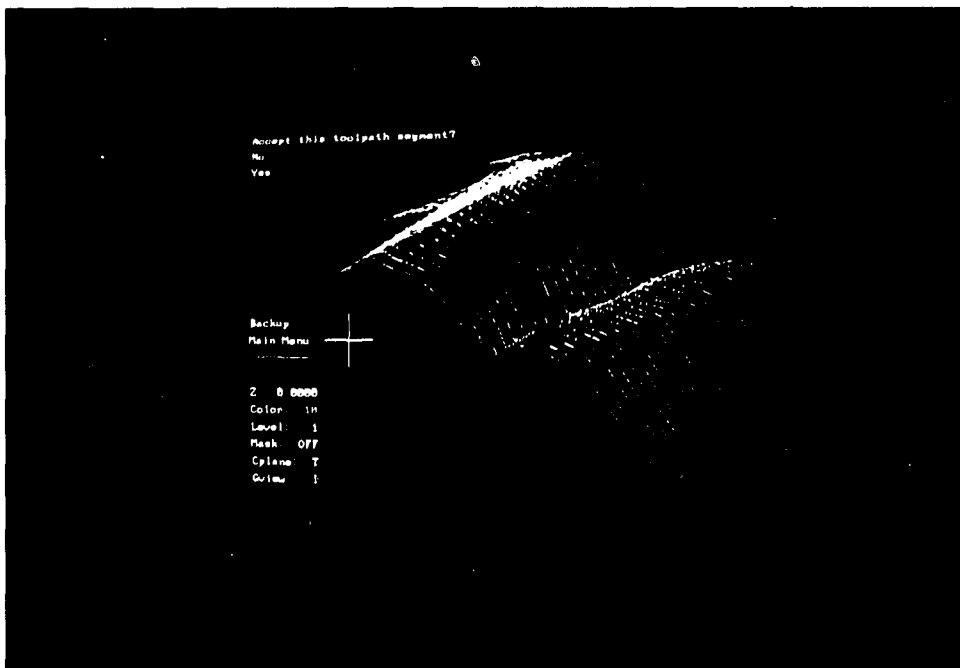


(b) Graphical presentation of measurement data in a CAD system

Fig. 13 Integration of automatic measurement into CAD/CAM processing



(c) Data conversion for CAM processing



(d) CL data generation for CAM

Fig. 13 Integration of automatic measurement into CAD/CAM processing

판(210 mm×90 mm)을 $\Delta=2$ mm로 자동측정 후 반경보정 및 재배열된 결과가 보여졌다. 두 측정에는 모두 $\rho=1.5$ mm인 프로브로 측정한 결과이며 불반경이 측정대상 자유곡면의 평균적인 곡률반경에 비해 작은 값으로서 앞서 가정한 *z-map* 곡면의 특성을 만족한다. 측정예에서 반경보정후의 측정오차에 대해 정량적으로 언급할 수 없는 이유는 두 자유곡면의 CAD 데이터가 존재하지 않아 비교할 기준이 없기 때문이다. 자동측정 알고리즘의 실용적 의미는 CAD 데이터가 없는 가공물을 자동측정을 통해 CAM 소프트웨어가 가공경로 데이터를 생성할 수 있다는 점이다. 자동측정 알고리즘에 의해 얻어진 데이터의 구조는 CAD/CAM 시스템에 바로 전송될 수 있는 효율적 형태를 갖추었으며 이 자동측정 결과를 CAD/CAM 시스템이 이용하여 수치제어 가공기(NC machine)를 위한 가공경로 데이터(CL data)를 생성한다. Fig. 13에 삼차원 형상을 자동측정하여 결과를 CAM(CLEAR-CUT)에 전송하여 가공경로 데이터를 생성하는 과정을 보았다. 자동측정을 통한 측정과 수치제어 가공기술의 연계는 총합생산 시스템(CIM)의 단초를 제공한다.

이상의 실험 측정결과가 보여주듯이 본 연구에서 제시된 자동측정 방법은 실제의 자유곡면의 삼차원 형상을 효율적으로 측정하여 공학적으로 유용하게

사용할 수 있다.

참고문헌

- (1) Duncun, J.P. and Mair, S.G., 1983, "Sculptured Surfaces in Engineering and Medicine," Cambridge University Press.
- (2) Takeuchi, Y., Sakamoto, M., Abe, Y. and Orita, R., 1989, "Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques," Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 429~432.
- (3) 송창규, 김승우, 1992, "삼차원 측정기를 이용한 삼차원 곡면의 자동형상 측정 알고리즘," 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(I), pp. 660~664.
- (4) Kim, S.W. and Park, H.G., 1991, "3-Dimensional Measurement of Surface Profile by Moire Topography," Proceeding of CIRP Conference on PE & MS.
- (5) Chan, S.P., 1985, "Interactive Microcomputer Graphics," Addison Wesley.
- (6) Choi, B.K., 1990, "Surface Modeling for CAD/CAM," KAIST.