

곡면평활화를 고려한 공작기계상에서의 가공곡면 검사

이세복* · 김경돈* · 정성중**
(1999년 6월 16일 접수)

Machined Surface Inspection Based on Surface Fairing on the Machine Tool

Sey-Bok Lee, Kyung-Don Kim and Sung-Chong Chung

Key Words: Error Compensation(오차보상), Freeform Surface(자유곡면), Non-uniform B-spline Surface(비균일 B-spline 곡면), Parameterization(매개변수 할당), Surface Fairing(곡면 평활화)

Abstract

The assessment of machined surface is difficult because the freeform surface must be evaluated by surface fairness as well as dimensional accuracy. In this study, the machined freeform surface is modeled by interpolating the data measured on the machine tool into the mathematical continuous surface, and then the surface model is improved with the parameterization to minimize surface fairness. The accuracy reliability of the measured data is confirmed through compensation of volumetric errors of the machine tool and of probing errors. Non-uniform B-spline surface interpolation method is adopted to guarantee the continuity of surface model. Surface fairness is evaluated with the consideration of normal curvature on the interpolated surface. The validity and usefulness of the proposed method is examined through computer simulation and experiment on the machine tool.

1. 서론

제품의 미적 외관 등이 강조되면서 자동차, 항공, 조선, 가전, 플라스틱 산업 등에 자유곡면이 널리 이용되고 있다. 자유곡면의 설계 및 가공은 CAD/CAM 시스템과 자동화 설비의 보급으로 보편화되고 있는 반면에 자유곡면의 측정 및 검사에 관한 연구는 상대적으로 저조한 실정이며, 그 주된 요인들 중의 하나는 가공곡면의 품위 평가가 곡면의 기능성을 평가할 수 있는 치수정밀도와 함께 곡면의 부드러운 정도를 나타내는 곡면평활도(surface fairness)를 동시에 고려해야 하기 때문이다. 그러나, 치수정밀도와는 달리 미적 기준이라 할 수 있는 부드러움이나 아름다움을 표

현하는 곡면평활도는 아직까지 어떤 절대적인 수치로써 객관화되어 있지 못하기에 곡면의 측정 및 검사에 관한 기존의 연구는 주로 치수정밀도에 의존하고 있다.

자유곡면의 측정 및 검사에 관한 기존의 연구는 주로 좌표측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)가 이용되었다.^(1~8) 그러나 좌표측정기에서 측정을 하기 위해서는 공작물을 이동시켜야 하며, 대형공작물일 경우는 좌표측정기의 한정된 크기로 인해 마땅한 측정방법이 없는 실정이다. 이로 인해 최근에는 머시닝센터에서 접촉식 측정 프로브를 이용하여 공작물의 가공상태를 평가하고자 하는 연구가 진행되고 있다.^(9~11)

일반적으로 가공곡면을 검사하는 목적은 수정 가공을 위한 NC 코드의 생성이나 다듬질 공정에 유용한 정보를 제공하기 위함이다. 따라서 몇몇 측정점을 선정하여 그곳에서의 측정결과와 설계치를 비교하는 것만으로는 상기의 목적을 달성하기 어려우며, 가공곡면 전반에 걸친 측정데이터

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : chung@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0444 FAX : (02)2298-4634

를 채취하고 신뢰도를 확보한 후, 곡면보간(surface interpolation)을 통해 치수정밀도를 평가함과 동시에 곡면의 평활화(surface fairing)를 통해 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면모델을 생성하는 것이 필요하다.

보다 구체적인 연구결과들을 살펴보면, Duffie⁽²⁾와 Lee⁽³⁾ 등은 곡면의 형상을 평가하기 위해 측정데이터를 Ferguson 패치로 모델링하였다. Ferguson 패치는 곡면 경계의 측정데이터만이 이용되므로 패치의 크기가 작아야 하며 많은 측정데이터가 필요하다. Suh⁽⁴⁾와 Aoyama 등⁽⁵⁾은 곡면 경계는 물론 곡면내부에서 측정데이터를 이용할 수 있는 Bezier 패치로 곡면 모델링을 수행하였다. 그러나, Bezier 곡면은 측정데이터로부터 수학적 연속성을 확보하여 전체곡면을 표현하기 위해 단위패치(simple patch)의 경계면에서 곡면의 조정점을 조작해야 한다. Vassilev⁽⁶⁾와 Lott 등⁽⁷⁾은 C2 연속의 B-spline 곡면의 평활도를 단순식으로 유도하고 설계단계에서 이를 '고려한 곡면근사(surface approximation)를 제안하였다. 그러나 가공곡면을 평가하기 위해서는 모델링 곡면이 측정데이터를 지나야 하므로 곡면의 치수정밀도 확인에는 부적합하다. 정 등^(9,10)은 자유곡면의 특정영역을 B-spline으로 모델링하여 이를 설계정보와 비교하였다. 곡면보간을 이용함으로써 치수정밀도를 우수하게 평가할 수 있으나 곡면평활도를 고려하지 못하였으며 전체곡면이 아닌 특정영역에 한정되어 있다.

본 연구에서는 동작기계상에서의 가공곡면 검사를 위해 접촉식 측정프로브를 이용하여 채취한 측정데이터를 수학적 연속곡면으로 보간(interpolation)하고 곡면평활도를 고려하여 전체곡면의 형상을 개선한다. 측정데이터는 동작기계의 체적오차와 프로빙오차의 보정(calibration)과 보상(compensation)으로 신뢰도를 확보한다. 곡면 모델링에는 연속성 확보에 유리한 비균일 B-spline 곡면보간법을 이용한다. 곡면평활도는 보간된 곡면의 법선곡률을 고려해 평가하며, 이를 최소화하는 매개변수 할당으로 곡면 형상을 개선한다.

2. 측정신뢰도 확보

동작기계상에서 접촉식 측정프로브에 의해 공작물 측정시 발생하는 측정오차 E는 동작기계

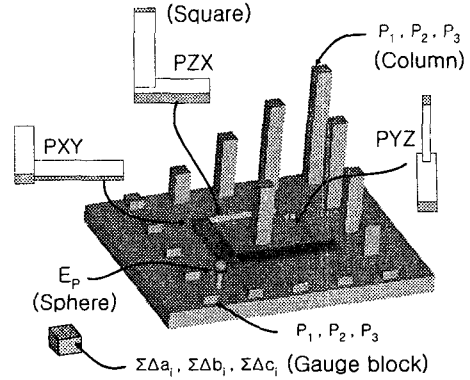


Fig. 1 Designed reference artefact

가공체적 내의 위치함수인 동작기계의 체적오차(volumetric error) $E_V = E_V(X, Y, Z)$, 측정침의 장착오차인 E_{offset} , 그리고 측정침과 공작물 사이의 접촉각과 이송속도의 함수인 프로빙오차 $E_P = E_P(F_m, \theta, \phi)$ 의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$E = [E_X E_Y E_Z]^T = E_V + E_P + E_{offset} \tag{1}$$

측정침의 장착오차인 E_{offset} 은 주축의 중심과 측정침의 중심을 일치시킴으로써 쉽게 제거할 수 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 장에서는 프로빙오차와 체적오차의 보정 및 보상을 통한 측정데이터의 신뢰도 확보에 대해 기술한다. Fig. 1은 프로빙오차와 체적오차의 보정 및 보상을 위해 고안/제작된 기준물(reference artefact)을 보인 것이다.

2.1 프로빙오차 보정 및 보상

3차원 형상측정시 프로빙오차는 Fig. 1의 진구를 이용해 보정한다.⁽⁹⁾ 진구가 차지하는 영역(ϕ 25mm)은 동작기계의 가공체적에 비해 매우 작으므로 위치에 의존하는 동작기계 오차는 없다고 가정하고, 측정속도를 고정하면 프로빙오차 E_P 는 Fig. 2의 진구와 측정침 사이의 관계로부터

$$E_P(\phi, \theta) = R_M(\phi, \theta) - R_S - R_N \tag{2}$$

이 된다. 여기서, R_M 은 접촉각 ϕ, θ 에 따른 측

정값이며 R_S 는 진구반경, R_N 은 측정침의 공칭 반경이다. 자유곡면 측정시 곡면의 법선벡터를 정확히 알 수 없기에 -Z축 방향으로만 측정을 수행하므로 프로빙오차 보정을 위한 진구 측정시의 프로빙 방향도 -Z축 방향이다. Fig. 2에 나타낸 진구 측정시, 측정점에서의 법선벡터 $N = [N_X N_Y N_Z]^T$ 와 접촉각과의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \cos^{-1}(N_Z/\sqrt{N_X^2+N_Y^2+N_Z^2}) \\ &= \cos^{-1}(N_Z) \\ \theta &= \tan^{-1}(N_Y/N_X) \end{aligned} \quad (3)$$

자유곡면 측정시의 프로빙오차 보상량은 곡면 모델링을 통해 각 측정점에서의 법선벡터가 구해지면 식 (3)에 대입하여 접촉각을 구한후, 접촉각에 따른 진구 측정시의 프로빙오차 보상량으로부터 산출한다. Fig. 3은 진구 측정시의 접촉각

ϕ, θ 에 따른 프로빙오차의 보정결과이다.

2.2 체적오차 보정 및 보상

측정시 발생하는 공작기계의 체적오차는 공작기계의 기하학적오차와 열변형오차에 의한 준정적오차(quasi-static error)로서 공작기계의 테이블, 새들, 칼럼 등과 같이 기구의 링크에 해당하는 형상변환요소에서 발생하는 형상오차와 공작기계의 이송부와 같이 기구의 조인트에 해당하는 조인트변환요소에서 발생하는 조인트오차로 나뉜다.

본 연구에서는 형상변환요소는 뒤틀림으로 인한 각오차가 없고 각 축방향으로 열변형에 의한 병진변형 오차만이 존재한다고 가정하였으며, 조인트변환요소는 피치오차, 직각도오차에 의한 진직도오차, 열변형에 의한 선형 병진변형 오차를 가진다고 가정하였다. 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix)을 이용한 기구학적 연쇄(kinematic chain)에 의해 측정점에서의 공작기계 체적오차 $E_V = [e_x e_y e_z]^T$ 를 구하면⁽¹²⁾

$$\begin{aligned} e_x &= -\delta_x(x) - \sum \Delta a_i - P_1 x - PZX z \\ e_y &= -\delta_y(y) - \sum \Delta b_i - P_2 y - PXY x + PYZ z \\ e_z &= -\delta_z(z) - \sum \Delta c_i - P_3 z \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 여기서, $\delta_x(x), \delta_y(y), \delta_z(z)$ 는 이송축의 피치오차이고 PXY, PYZ, PZX 는 X-Y, Y-Z, Z-X 축간의 직각도오차이며, P_1, P_2, P_3 는 이송축의 선형열팽창을 모델링한 것이다. 그리고 $\sum \Delta a_i, \sum \Delta b_i, \sum \Delta c_i$ 는 열변형으로 인한 각 축의 원점이동을 의미한다.

상기의 오차모델 파라미터 중 각 축의 피치오차인 $\delta_x(x), \delta_y(y), \delta_z(z)$ 는 레이저 간섭계를 이용하여 규명하고, 직각도 오차인 PXY, PYZ, PZX 와 열변형 오차인 $\sum \Delta a_i, \sum \Delta b_i, \sum \Delta c_i$ 와 P_1, P_2, P_3 는 3차원 좌표측정기에서 보정된 기준물을 접촉식 측정프로브를 이용하여 공작기계상에서 측정함으로써 규명한다.⁽¹²⁾ Fig. 4는 기준물의 기둥들(columns)을 측정하고 상기의 방법에 의해 규명된 체적오차를 보정한 후의 측정오차를 나타낸 것이다. 가로축은 기준물상의 기둥들의 꼭지점의 위치를 나타내며 세로축은 꼭지점의 측

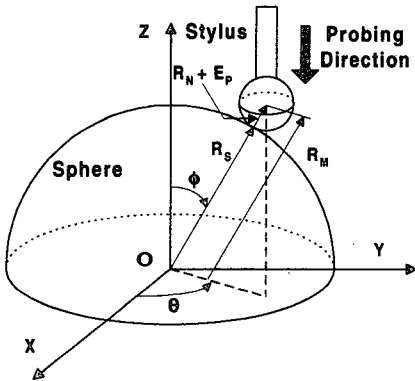


Fig. 2 Probing error identification

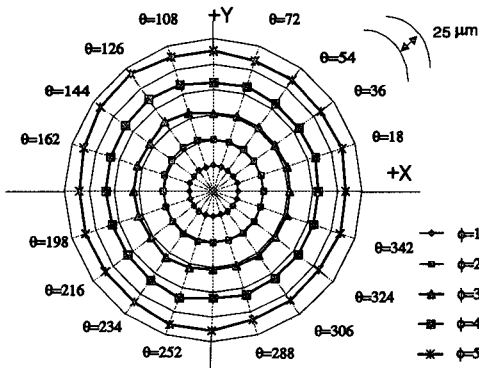
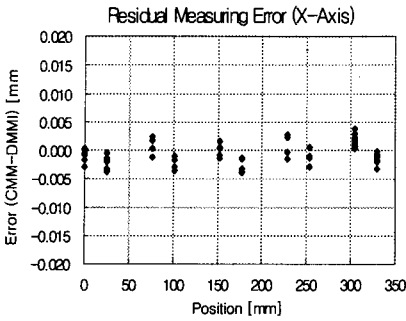
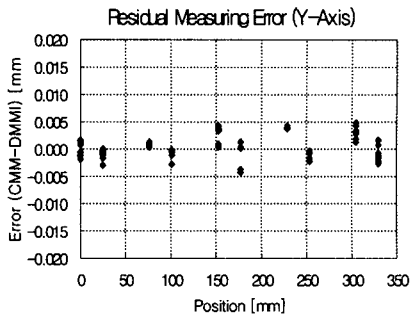


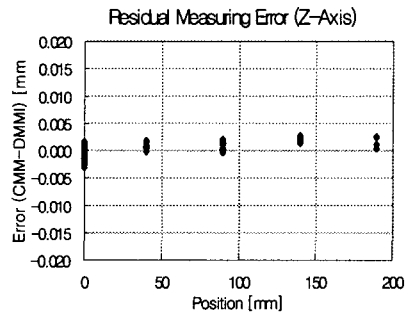
Fig. 3 Calibration results of probing error



(a) X-axis



(b) Y-axis



(c) Z-axis

Fig. 4 Compensation results of volumetric error

정오차로서 3차원 좌표측정기에서의 측정값과 공작기계상에서의 측정값과의 차이를 나타낸 것이다. 측정신뢰도 비교를 위해 사용된 3차원 좌표측정기는 Carl Zeiss사의 UPMC-850으로 $U1(\mu m)=1.2+L/400$, $U3(\mu m)=1.7+L/300$ 이다.

3. 곡면평활화를 통한 비균일 B-spline 모델링

접촉식 측정프로브를 이용하여 공작기계상에서 가공곡면을 측정하고 이를 평가하기 위해 측정데이터를 다음의 비균일 B-spline 곡면^(13,14)으로 모델링한다.

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad (5)$$

여기서 $P_{i,j}$ 는 i, j 번째 조정점, $N_{i,k}(u), N_{j,l}(v)$ 는 매개변수 u, v 에 대한 접속함수(blending function)로 다음과 같다.

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

$$N_{j,1}(v) = \begin{cases} 1 & v_j \leq v < v_{j+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$N_{j,l}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+l-1} - v_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{v_{j+l} - v}{v_{j+l} - v_{j+1}} N_{j+1,l-1}(v)$$

여기서 $u_i, v_j (i=0, \dots, n+k+1, j=0, \dots, m+l+1)$ 는 각각 u, v 방향의 i, j 번째 매듭값이다.

비균일 B-spline 곡면은 측정데이터의 개수 $((n+1) \times (m+1))$ 에 관계없이 곡면을 일정 차수 (k, l) 로 모델링 할 수 있으며 곡면의 차수가 3차 $(k=4, l=4)$ 이상인 경우 C2 연속성을 보장하므로 연속성 확보를 위한 별도의 계산과정이 필요 없다. 따라서 본 장에서는 측정데이터를 B-spline 곡면으로 보간하며 곡면평활화를 고려하여 곡면형상을 개선한다.

3.1 비균일 B-spline 곡면보간

가공곡면의 형상정보는 이산화(digitization)된 측정데이터를 통해 확보되므로 가공형상의 치수 정밀도 평가를 위해서는 곡면보간이 필요하다. B-spline 곡면보간은 다음과 같이 곡면모델이 $p, q (p=0, \dots, n, q=0, \dots, m)$ 번째 측정데이터 $Q_{p,q}$ 를 지나도록 조정점 $P_{i,j}$ 를 구하는 과정이다.

$$Q_{p,q} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m N_{i,k}(\bar{u}_p) N_{j,l}(\bar{v}_q) P_{i,j} \quad (8)$$

여기서 \bar{u}_p, \bar{v}_q 는 각각 p, q 번째 측정점에 대한 매개변수이다.

식 (8)을 모든 측정데이터에 대한 식으로 표현하면 다음과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$[Q] = [N_u][P][N_v]^T \quad (9)$$

식 (9)의 곡면 조정점 $[P]$ 는

$$[P] = ([N_u])^{-1}[Q]([N_v]^T)^{-1} \quad (10)$$

이 되며, 식 (10)에서 곡면 조정점을 유도하기 위해서는 접속함수 행렬 $[N_u]$ 와 $[N_v]$ 를 구성하고 역행렬을 취해야 한다. 식 (6)과 식 (7)에서 볼 수 있듯이 접속함수 결정에는 매듭값 선정이 필요하다. 매듭값은 측정데이터에 할당된 매개변수를 이용하는 다음의 평균매듭법(averaging knot method)을 적용한다.

$$u_0 = \dots = u_{k-1} = 0$$

$$u_{n+1} = \dots = u_{n+k} = 1 \quad (11)$$

$$u_{i+k-1} = \frac{1}{k-1} \sum_{p=i}^{i+k-2} \bar{u}_p \quad 1 \leq i \leq n-k+1$$

$$v_0 = \dots = v_{l-1} = 0$$

$$v_{m+1} = \dots = v_{m+l} = 1 \quad (12)$$

$$v_{j+l-1} = \frac{1}{l-1} \sum_{q=j}^{j+l-2} \bar{v}_q \quad 1 \leq j \leq m-l+1$$

평균매듭법은 각 측정데이터에 할당된 매개변수 \bar{u}_p, \bar{v}_q 의 평균값을 이용해 매듭값을 선정하는 방법으로 곡면형상이 매듭값에 반영되며 접속함수 행렬요소를 대각선 방향에 위치시켜 수치적 안정성을 확보할 수 있다.⁽¹⁴⁾

측정데이터에 대한 매개변수 할당⁽¹⁵⁾은 식 (13), (14)와 같이 측정점간의 거리로 정의된다.

$$\overline{u_0^{(q)}} = 0 \quad (13)$$

$$\overline{u_p^{(q)}} = \overline{u_{p-1}^{(q)}} + \frac{|Q_{p,q} - Q_{p-1,q}|^e}{\sum_{i=0}^{p-1} |Q_{i+1,q} - Q_{i,q}|^e} \quad 1 \leq p \leq n$$

$$\overline{v_0^{(p)}} = 0 \quad (14)$$

$$\overline{v_q^{(p)}} = \overline{v_{q-1}^{(p)}} + \frac{|Q_{p,q} - Q_{p,q-1}|^e}{\sum_{j=0}^{q-1} |Q_{p,j+1} - Q_{p,j}|^e} \quad 1 \leq q \leq m$$

여기서 $e(0 \leq e \leq 1)$ 는 멱지수이며 $\overline{u_p^{(q)}}$ 는 q 번째 점열에 대한 p 번째 u 방향 매개변수, $\overline{v_q^{(p)}}$ 는 p 번째 점열에 대한 q 번째 v 방향 매개변수이다. $e=0$ 인 경우 균일(uniform) 매개변수 할당이며 $e=1/2$ 는 중심(centripetal), $e=1$ 은 활선 길이(chord length) 매개변수 할당이다. 이와 같이 측정데이터를 비균일 B-spline 곡면으로 모델링할 경우 곡면형상은 측정데이터에 할당된 매개변수에 의해 결정되므로 이를 합리적으로 선정할 경우 곡면형상을 개선시킬 수 있다.

3.2 매개변수 할당을 통한 곡면평활화

자유곡면은 전체적으로 매끄러운 것이 바람직하므로 측정데이터들의 보간에 의해 생성된 자유곡면의 형상을 부드럽게 표현하기 위해서는 평활도(fairness)를 고려하여 곡면형상을 개선하여야 한다. 본 절에서는 평활도를 정의하고 최적의 매개변수 할당을 통해 곡면평활화를 유도한다.

평활도는 곡면모델의 부드러운 정도를 표현^(6,7)한 것으로

$$F = \int_u \int_v (k_{nu}^2 + k_{nv}^2) dudv \quad (15)$$

로 정의된다. 여기서 k_{nu}, k_{nv} 는 각각 u, v 방향의 법선곡률이며,

$$k_{nu} = \frac{P_{uu} \cdot N}{|P_u|^3}, \quad k_{nv} = \frac{P_{vv} \cdot N}{|P_v|^3} \quad (16)$$

이 되며, P_u, P_v 는 모델링 곡면의 u, v 방향의 1차 도함수벡터, P_{uu}, P_{vv} 는 2차 도함수벡터,

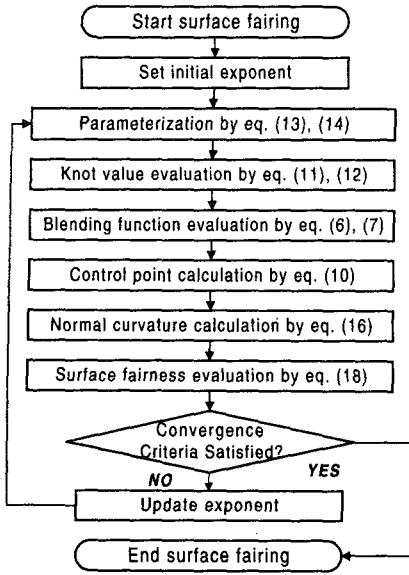


Fig. 5 Sequence of surface fairing

N 은 식 (17)로 표현되는 단위법선벡터이다.

$$N = \frac{P_u \times P_v}{|P_u \times P_v|} \quad (17)$$

식 (15)는 물리적 상사로부터 지지조건을 만족하는 탄성평판의 변형에너지를 의미한다.⁽⁷⁾ 변형에너지가 최소가 될 때 탄성평판은 전반적으로 부드러운 형상을 유지하게 되므로 자유곡면의 경우 곡면평활도를 최소화함으로써 전체적인 곡면형상을 개선할 수 있다.

3.1절에 서술한 바와 같이 모델링 곡면은 매개변수의 함수이다. 따라서, 모델링 곡면의 도함수 벡터도 매개변수의 함수이며 곡면평활도는 다음과 같이 먹지수를 변수로 가지는 단일변수함수로 표현될 수 있다.

$$F(e) = \int_v \int_u \{(k_{nu}(e))^2 + (k_{nv}(e))^2\} dudv \quad (18)$$

본 연구에서는 식 (18)을 곡면평활도로 정의하고 평활도 F 를 목적함수로 하는 비선형 최적화 문제를 구성한다. 최적화 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

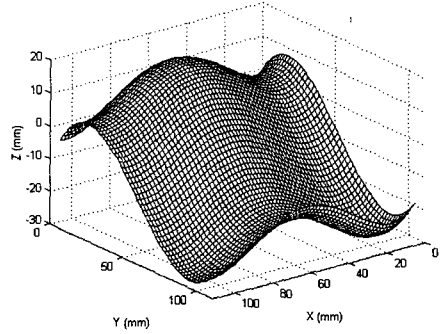


Fig. 6 Designed surface

Minimize :

$$F(e) = \int_v \int_u \{(k_{nu}(e))^2 + (k_{nv}(e))^2\} dudv$$

Subject to :

$$[P] = ([N_u])^{-1} [Q] ([N_v]^T)^{-1} \quad (19)$$

$$0 \leq e \leq 1$$

식 (19)의 곡면평활화는 먹지수의 범위와 측정 데이터를 지나는 곡면보간을 구속조건으로 가진다. 즉, 목적함수를 최소화하는 먹지수의 값으로 매개변수를 할당하고 접속함수를 구성하여 곡면의 조정점을 구함으로써 곡면평활화가 가능하다. Fig. 5는 이제까지 서술한 곡면의 평활화 과정을 보인 것이다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

곡면평활화의 유용성을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. Fig. 6에 나타낸 설계곡면에 오차를 포함시킨 후 각 축방향으로 30점, 총 900점을 모의 측정하였다. 설계곡면에 포함된 오차는 밀링이나 연삭작업에 의한 가공표면을 적절히 묘사하기 위해 다음의 평균 Wiener 곡면(averaged Wiener surface)^(9,10)을 이용하였다.

$$AW(t_1, t_2) = \frac{1}{4} (W(t_1, t_2) + W(1-t_1, t_2) + W(t_1, 1-t_2) + W(1-t_1, 1-t_2)) \quad (20)$$

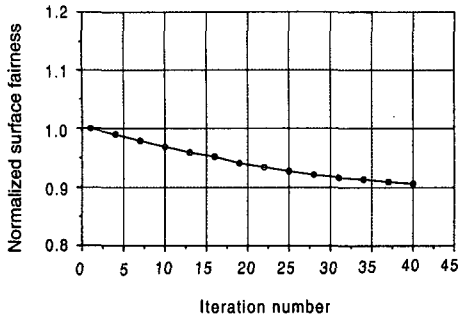
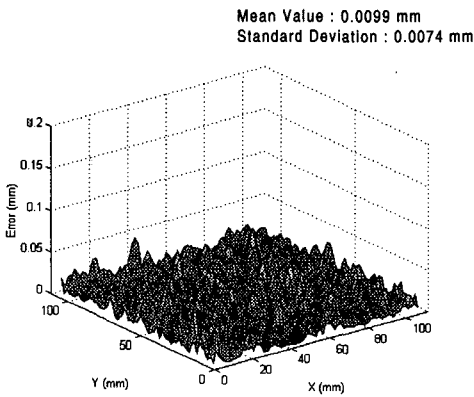
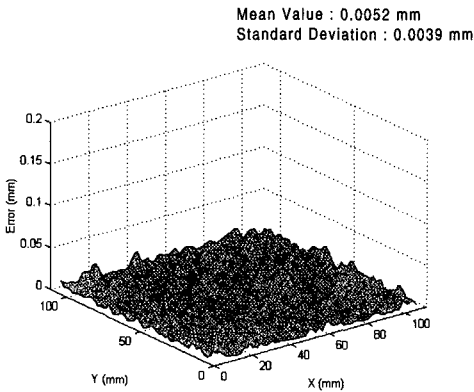


Fig. 7 Improvement of surface fairness



(a) Initial surface model



(b) Faired surface model

Fig. 8 Comparison of error distribution

여기서 W 는 Wiener 곡면이고 t_1, t_2 ($0 \leq t_1, t_2 \leq 1$)는 매개변수이다.

Table 1 Experimental conditions

| CAD/CAM system | I-DEAS |
|---------------------|------------------|
| NC Machine tool | HWACHEON VMC-430 |
| Ball end mill | ϕ 10 mm |
| Cusp height | 5 μ m |
| Step length | 1 ~ 10 mm |
| Touch trigger probe | RENISHAW - LP2 |

모의 측정된 데이터를 곡면평활도를 고려한 B-spline 곡면으로 모델링한 후, 각 축방향으로 60 점, 총 3600점을 추정하여 오차가 포함되지 않은 설계곡면과 비교하였다.

평활화 과정에 따른 곡면평활도의 개선은 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 세로축은 평활화 과정 전의 평활도의 값으로 평활화 과정에 따른 평활도의 값을 나누어준 무차원수이다. 최적화 과정을 수행함에 따라 초기 곡면에 비해 평활화 이후의 곡면의 평활도는 10% 정도 개선되었음을 나타낸다. 평활화 전후의 곡면모델과 오차가 포함되지 않은 설계곡면을 비교함으로써 평활화 과정에 따른 곡면오차의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 곡면 평활화 과정에 따라 모델링 곡면과 설계곡면과의 오차 평균값과 표준편차가 감소함을 보이고 있다. 이는 제안된 곡면 평활화 과정에 따라 모의 측정된 데이터 이외의 추정점들이 조금씩 이동하여 설계곡면에 근접해감을 의미한다. 즉, 평활화 과정이 곡면의 형상을 보다 부드럽게 개선함으로써 모델링 곡면이 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면으로 개선되었음을 나타낸다. 따라서 제안된 곡면평활도를 고려한 비균일 B-spline 곡면모델링 기법은 곡면보간을 통해 치수정밀도를 평가함과 동시에 최적의 매개변수 할당으로 곡면평활도를 향상시킴으로써 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면을 생성할 수 있으며, 생성된 곡면은 수정가공을 위한 NC 코드의 생성이나 다듬질 공정에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

4.2 측정실험

가공곡면을 NC 공작기계상에서 측정하여 검사 모델을 생성한 후 이를 설계곡면과 비교하였다. 이를 위해 중립화일 형식인 IGES를 통해 설계정보를 이용한다.⁽¹⁰⁾

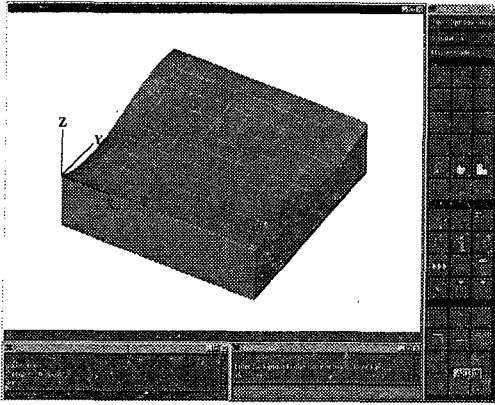


Fig. 9 Designed surface by using I-DEAS

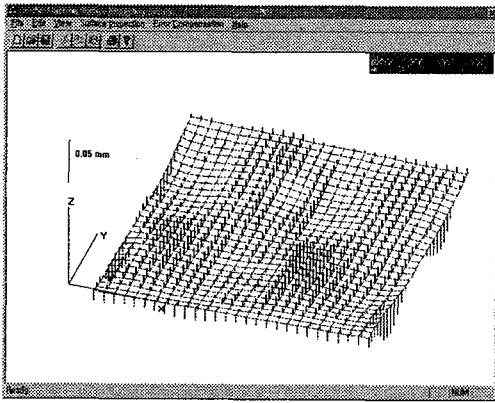


Fig. 10 Inspection model and machining error map

측정실험을 위한 사양을 Table 1에 나타내었다. 대상곡면은 X, Y축 방향으로 180mm의 크기로 상용 CAD/CAM 시스템인 I-DEAS⁽⁶⁾ 상에서 설계하였으며 이를 Fig. 9에 나타내었다.

설계곡면과의 비교를 위한 검사모델의 생성과정은 다음과 같다. 1) B-spline 곡면보간으로 각 측정점에서의 법선벡터를 추정한다.⁽⁹⁾ 2) 2장의 체적오차 및 프로빙오차 보상으로 각 측정점을 이동시킨다. 3) B-spline 곡면보간을 통해 측정오차가 보상된 각 측정점에서의 법선벡터를 재추정한다. 4) 추정된 법선벡터 방향으로 공칭반경 만큼 측정데이터를 이동시킴으로써 검사모델 생성을 위한 측정데이터를 얻는다. 5) 3장에 제시된 방법에 의해 곡면평활도를 고려한 검사모델을 생성한다.

상기의 절차에 의해 생성된 검사모델과 측정점들에서 검사모델과 설계곡면과의 비교를 통한 가

공오차의 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 가공오차의 평균값은 17.9 μ m이며 표준편차는 12.1 μ m이다. 생성된 검사모델은 설계곡면과 마찬가지로 부드러운 형상을 유지하며 곡면 경계부분을 중심으로 과다절삭(overcut)이 일어난 것으로 나타났으며 곡률의 변화가 심한 부분에서 상대적으로 큰 가공오차를 보이고 있다.

5. 결론

접촉식 측정프로브를 이용하여 NC 공작기계에서 채취한 측정데이터를 수학적 연속곡면으로 보간하고, 곡면평활도를 고려한 비균일 B-spline 곡면을 생성하여 이를 설계정보와 비교함으로써 다음의 결론을 얻었다.

(1) 접촉식 측정프로브를 이용한 공작기계상에서의 측정데이터는 공작기계의 체적오차와 프로빙오차의 보정과 보상으로 신뢰도를 확보하였다.

(2) 가공곡면의 치수정밀도 평가를 위해 특정영역이 아닌 가공곡면 전체에 고루 분포된 측정데이터를 비균일 B-spline 곡면으로 보간하여 수치적 조각없이 C2 연속의 곡면으로 모델링하였다.

(3) 곡면의 부드러운 정도를 나타내는 곡면평활도를 정의하고 최적화 기법을 이용한 매개변수 할당을 통해 곡면평활화를 유도하였다.

(4) 곡면평활화를 통해 보간된 곡면의 형상을 개선함으로써 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면을 생성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

(5) 제안된 곡면평활도를 고려한 비균일 B-spline 곡면모델링 기법은 곡면보간을 통해 치수정밀도를 평가함과 동시에 최적의 매개변수 할당으로 곡면평활도를 향상시킴으로써 설계곡면에 가까운 보다 부드러운 곡면을 생성할 수 있으며, 생성된 곡면은 수정가공을 위한 NC 코드의 생성이나 다듬질 공정에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

향후, 효율적인 측정점 선정에 의한 측정법 및 검사시간의 단축에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) Bosch, J. A., 1995, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Marcel Dekker Inc.

- (2) Duffie, N., Piper, R. and Kronerberg, M., 1984, "CAD Directed Inspection and Error analysis Using Surface Patch Database," *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp. 347~350.
- (3) Lee, A. C., Chen, D. P. and Lin, C. L., 1990, "A CAD/CAM System from 3D Coordinate Measuring Data," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 2353~2371.
- (4) Suh, S. H., Lee, S. K. and Lee, J. J., 1996, "Compensating Probe Radius in Free Surface Modelling with CMM : Simulation and Experiment," *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 507~523.
- (5) Aoyama, H. and Inasasaki, I., 1997, "Extraction of Boundary Lines between Free Form Surfaces for Construction of Computer Model," *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. XXV, pp. 293~298.
- (6) Vassilev, T. I., 1996, "Fair Interpolation and Approximation of B-splines by Energy Minimization and Points Insertion," *Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 9, pp. 753~760.
- (7) Lott, N. J. and Pullin, D. I., 1988, "Method for Fairing B-spline Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 10, pp. 597~604.
- (8) H. J. Pahk, M. Y. Jung, S. W. Hwang, Y. H. Kim, Y. S. Hong and S. G. Kim, 1995, "Integrated Precision Inspection System for Manufacturing of Moulds having CAD Defined Features," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, pp. 198~207.
- (9) 정성중, 남우선, 1998, "자유곡면의 온더머신 측정 및 검사를 위한 시스템 설계," 한국정밀공학회지, 제15권, 제12호, pp. 81~88.
- (10) 정성중, 이세복, 1999, "IGES 기반의 자유곡면 온더머신 측정 및 검사시스템," 대한기계학회 논문집 A권, 제23권, 제4호, pp. 590~607.
- (11) 정성중, 김정돈, 1999, "접촉식 측정프로브를 이용한 2½차원 온더머신 측정 및 검사시스템의 설계 및 해석," 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제1호, pp. 37~46.
- (12) 정성중, 김정돈, 1998, "기준물을 이용한 NC 공작기계의 체적오차 규명," 한국정밀공학회 '98년도 추계학술대회논문집 pp. 1256~1259.
- (13) Choi, B. K., 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier Science Publishing Com.
- (14) Piegl, L. and Tiller, W., 1996, *The NURBS Book*, 2nd ed. Springer-Verlag.
- (15) Ma, W. and Kruth, J. P., 1995, "Parameterization of Randomly Measured Points for Least Squares Fitting of B-Spline Curves and Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 27, No. 9, pp. 663~675.
- (16) SDRC Korea, 1997, *I-DEAS User Manual*.