

역공학(Reverse Engineering)을 위한 자유곡면 형상의 NURBS Approximation

조재형*, 조명우**

Reverse Engineering for Sculptured Surfaces by Using NURBS Approximation

Jae Hyung Cho*, Myung-Woo Cho**

ABSTRACT

In measuring step for reverse engineering of sculptured surfaces, computer vision system is used to simplify the complicated surface by boundary edge detection method that minimizes the measuring error. The measured data by Coordinate measuring machine is clouded data points of surfaces which is segmented surface using image process. In this research, the measured data is approximated as NURBS surfaces by new suggested algorithm. The position and number of control points, selection of parametric values and compensation of weight factors are proposed. Finally, surface model is simulated and improved resulting performance is obtained.

Key Words : reverse engineering(역공학), sculptured surface(자유곡면), weight factor(가중치), computer vision(컴퓨터비전), NURBS(너브스)

1. 서론

최근 CAD/CAM 관련 기술발달에 의해서 자동차, 우주항공분야 및 전자제품 분야에서 자유곡면의 활용이 일반화되고 활성화 되어있다. 일반적으로 설계과정에서 자유곡면의 형상을 생성하고 그 설계데이터에 의해서 CAM 시스템을 통하여 제품을 생산하거나 생산품을 위한 금형, 치공구를 생산한다. 다른 방법의 설계과정 예로는 자동차 차체와 같이 외관을 디자인 할 때 Clay Model로부터 좌표를 측정하여 얻은 데이터를 이용하여 자유곡면을 설계한다. 이와같이 날로 확산되어지는 자유

곡면의 설계 및 생산과정에서 자유곡면의 다양한 형상에 의한 금형 또는 완제품에서의 자유곡면의 표면 완성도나 정밀도를 검사, 측정하기 위해서는 적절한 방법이나 기준을 제시하는 일이 설계표준이나 사양을 결정하는데 중요한 과제라 할 수 있다.

디자인 과정에서 시제품 형상의 좌표를 3 차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)나 비접촉 측정기계에 의해서 읽어 들여서 모델링을 수행하는 경우, 생산단계를 위하여 측정 좌표들은 자유곡면 형태로 보관되거나, 보정되어진다. 이러한 CAD 데이터생성방식을 역공학(Reverse Engineering)이라 하

~ 2002년 2월 6일 접수
* 단국대학교 공학부 산업공학 전공
** 인하대학교 기계공학부

며, 제품의 설계공정에 있어서 역공학은 기존의 제품형상을 CAD 모델로 전환하는 기술이다.⁽¹⁻³⁾ 그러므로 역공학은 시제작이나 개념설계에 의해서 만들어진 제품의 설계데이터를 취득하는데 사용되거나, CAD Data의 손실 등의 경우에 곡면의 재 모델링을 위하여 사용된다. 특히 의학에서 CT 촬영에 의한 평면 형태의 신체의 장기나 뼈 등도 3 차원 모델링 되거나 신발의 원형(pattern) 또는 사람의 얼굴 등도 역공학에 의해서 모델링 되어진다.

자유곡면 형상의 역공학에 있어서 크게 두 가지의 연구분야가 요구된다. 첫째는 3 차원 데이터를 취득하는 방법이다. 여러 가지 측정기기가 존재하나 일반적으로는 제품의 좌표를 읽기 위해서는 3 차원 측정기를 이용하거나, 레이저 스캐닝에 의해서 좌표를 읽어들이게 된다. 이와같이 3 차원 데이터를 얻는 방법으로는 Puttre⁽⁴⁾에 의해서 조사되어있다. 취득 되어진 3 차원 좌표들은 여러 가지 방법에 의해서 곡면모델로 재생성되어 질 수 있는데, 일반적인 자유곡면 형식으로 Bezier, B-Spline, NURBS 방식 등이 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 그렇지만 곡면을 생성하는데 많은 장점을 보이는 NURBS 곡면의 특성을 나타내는 가중치(weight factor)에 대한 보정방법이 무시되는 경우가 많이 있다. 본 논문에서는 3 차원 측정기에 의해서 형성된 3 차원 좌표에서의 NURBS Surface에 의한 자유곡면의 근사 방법을 제시한다.

2. 자유곡면 측정

자유곡면의 표면 데이터를 구하는 방법으로는 Laser 의 고밀도 광원을 이용하여 카메라에 잡힌 자유곡면 표면의 곡선으로부터 좌표점을 구하는 비접촉식 측정방법과 3 차원 측정기를 이용하는 접촉식 측정방법이 있다. 비접촉식 방법은 이미지(Image) 정보를 갖고 있는 화소(pixel)의 크기에 해당되는 실물의 수치에 전적으로 정밀도가 좌우되며, 금형과 같이 금속물질에서는 난반사에 의한 오차정도가 정밀도를 요하는 부품의 측정에서는 적합하다고 볼 수 없다. 3 차원 측정기에 의한 측정에서 정밀도는 측정기계의 정밀도에 의해서 결정되므로 상대적으로 높은 신뢰성과 잠재성을 가지고 있으나 가공시의 에러를 포함한 실물의 정확한 접선벡터의 정보를 가지고 있지 않은 상태에서 측정치는 접촉하는 접촉점(Touch Probe)의 반경

에 의해서 법선벡터 방향의 보정이 필요하게 된다.

이 문제를 해결하기 위해서 역공학(Reverse Engineering)에 기초하여 두 가지 측정방법의 장점을 이용한 연구의 필요성이 요구된다. 컴퓨터 비전 시스템을 이용한 비접촉식 측정방법에 의한 데이터는 이러한 작업을 자동화하여 유연하게 사용하기 위해서 복잡한 형상에서의 자유곡면을 분리하고 단순화하는데 사용한다.

자유곡면의 형상정보를 얻기 위하여 측정표면을 컴퓨터 비전시스템에 의해서 이미지를 획득하여 이미지 정보로부터 측정하고자 하는 곡면의 경계선을 추출하여 단위 곡면을 분리한다. 이때 경계선을 검출하는 기법으로 미분필터를 이용한 소벨(Sobel Operation)기법⁽¹⁰⁾을 이용하여 경계선을 검출하여 검사영역을 분리한다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 실험에 사용된 곡면 모델과 경계선 검출의 예이다.



Fig. 1 Image Data of Compound Surface

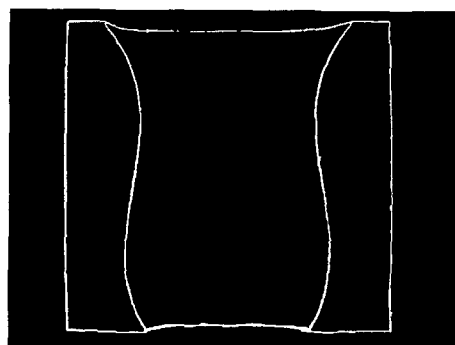


Fig. 2 Boundary Segmentation by Edge detection

복합곡면에서 경계(Boundary)에 의해서 분리되어진 단위곡면들은 3 차원 측정기(Coordinate

Measuring Machine)에 의해서 측정되어진다. 측정 방법은 여러 연구에 의해서 제시된 바와 같이 측정점의 수가 결정이 되면 그 다음 단계로 측정할 좌표를 선정하여 측정계획을 세우게 된다.^(11,12)

측정물과 측정접촉점(Touch Probe)의 접촉에 의해서 기준점에 대한 위치를 측정하는 3 차원 측정기에서는 경우에 있어서 접촉하는 접촉점의 반경에 대한 정확한 위치 보정이 측정의 정밀도를 높게 된다.

3 차원 측정기에서의 측정은 Fig. 3 과 같이 자유곡면을 측정기 접촉점의 접근방향이 곡면의 법선방향과 일치하여 접근을 해야만 접촉점의 반경만큼 계산하여 보정할 수가 있다. 그렇지만 공작 기계에 의해서 일어나는 여러 가지 종류의 에러와 공작물의 셋팅에 의해서 일어나는 기술적 오류 등 정밀측정이 요구되는 측정물에 대해서는 무시할 수 없는 오류들에⁽¹³⁾ 의해서 자유곡면의 한 점에 대한 정확한 법선을 예측하는 일은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

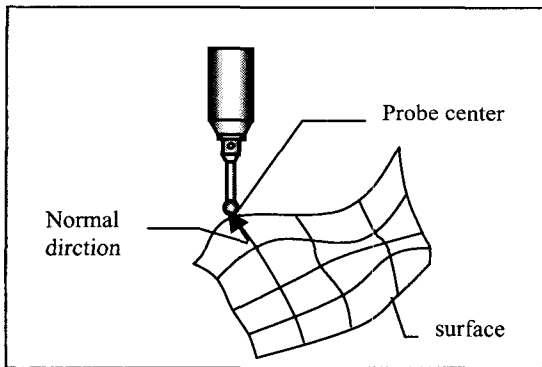


Fig. 3 Probe approaching direction by normal vector of surface

그러므로 일정 두께의 Offset 된 NURBS Surface 로 곡면이 재생성 되는 방법을 택하여 측정점의 법선이 알려지지 않은 상태에서 측정중에 발생하는 오류를 보정할 수 있다. 식 (1)은 probe 중심점에 의해서 생성된 NURBS 곡면식이다.⁽¹³⁾

$$M(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} \mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (1)$$

여기서, $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$ 와 $w_{i,j}$ 는 각각 매개변수 u , v 에 대한 Basis function 과 가중치이며 $\mathbf{P}_{i,j}$ 는 조정점이다.

식 (1)은 식 (2)와 같이 다시 쓰여질 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$M(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \mathbf{P}_{i,j}^w \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{P}_{i,j}^w$ 는 가중치를 포함한 조정점이다.

최종 곡면은 오프셋(offset) 거리 probe 반경 R 을 고려한 다음 식에 의해서 얻어진다.

$$S(u, v) = M(u, v) + Rn(u, v) \quad (3)$$

$$\mathbf{n}(u, v) = \frac{S_u(u, v) \times S_v(u, v)}{|S_u(u, v) \times S_v(u, v)|} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\mathbf{n}(u, v)$ 는 법선벡터이며, $S_u(u, v)$, $S_v(u, v)$ 는 각각 u, v 방향의 접선벡터이다.

본 논문에서는 NURBS 곡면식을 이용하여 임의의 측정데이터에 대한 곡선보간, 곡선근사와 곡면근사 방법을 통하여 효과적으로 곡면을 재생성하는 방법을 연구 수행하였다.

3. NURBS Approximation

주어진 데이터에 의해서 곡면을 재 생성하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 보간(Interpolation) 방식으로 Newton Method 를 이용하여 곡면을 생성하며 조정점(Control Point)을 찾아나가는 방법이다.⁽¹⁵⁾ 이 방법에서 조정점의 수는 곡면의 표면에 위치한 표면 데이터들의 수와 일치하여야 하며, 두 방향의 매개 변수값이 중요도와 관계없이 미리 주어져야 하므로 곡면보간될 표면의 데이터들은 반드시 그리드 형태를 갖는 매트릭스형의 데이터 집합이어야 한다. 무작위의 데이터 집합에 의한 곡면 보간방법은 구조적으로 불가능하다. 둘째 방법은 리스트 스퀘어 방법(Least Square Method)을 적용한 곡면근사(Approximation) 방법이다. 이 방법에서는 곡면 표면의 데이터수와 조정점의 수는 일치하지 않아도 무방하지만, 측정 데이터가 생성된 곡선과 비교할 때 어느정도의 오차범위를 감수해야 하는 최적의 해를 찾는 문제이다.

NURBS Surface 로 곡면을 Fitting 하기 위해서는 수치적으로 구해져야 할 인자들은 여러 가지가 있으며, 먼저 곡면식의 차수와 조정점들의 수 및 좌표점, 측정점에 해당되는 매개변수의 값들과 NURBS 에서의 가중치(Weight factor)들이 곡면상의 데이터들을 포함하는 형태의 곡면으로 fitting 되어진다.

본 논문에서는 측정데이터로부터 곡면을 생성하기 위하여 일차적으로 측정된 데이터에서 보간을 수행하여 조정점의 초기위치를 결정하고, 다음 단계로 가중치 결정을 포함한 곡선근사 방법을 연구하였다. 재 생성되어진 곡선들은 스키닝 곡면 생성 방법에 의해서 곡면을 재 생성하였다.

Fig. 4 는 측정데이터로부터 NURBS Surface Fitting 을 위한 개략적인 순서도이다.

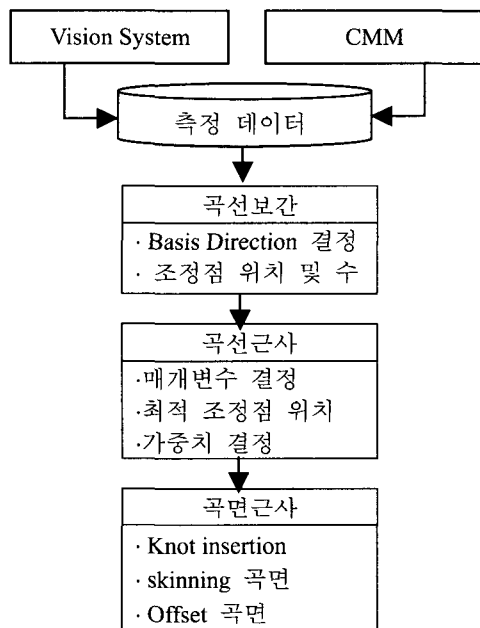


Fig. 4 Rough flow chart for surface re-generation

3.1 조정점의 초기값 결정

측정된 좌표들에 의한 곡면 데이터는 생성하고자 하는 곡면의 법선 방향으로 읍셋된 곡면데이터이며, 곡면데이터를 fitting 하는 곡선은 곡면을 자르는 평면 위에 놓이게 된다. 첫 단계에서는 조정점의 좌표들을 곡면위의 점좌표들로 곡선을 형

성하는 보간방법을 택하여 곡선을 생성하였다. 다음은 식(2)에 대한 NURBS 곡선 방정식이다.

$$C_b(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,p} M_i^w \quad (5)$$

여기서, 조정점 M_i^w 는 측정점들이다.

곡선의 조정점의 개수는 곡면위의 측정된 점 좌표수와 같게 한다. 즉, Fig. 5 a)에서와 같이 측정된 측정점들을 b)와 같이 조정점으로 이용하여 곡선을 보간하였다.

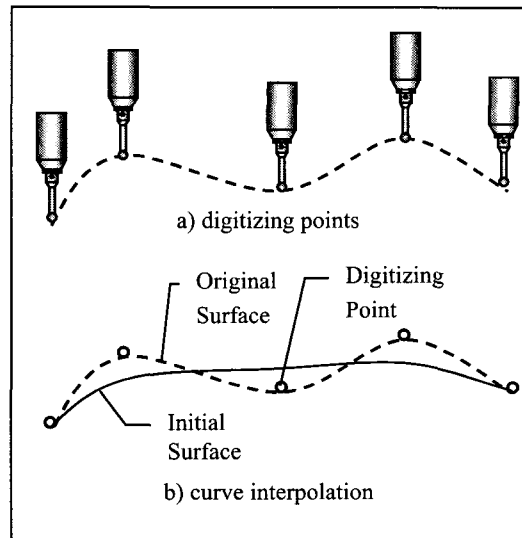


Fig. 5 Initial curve interpolation

초기 조정점의 수가 너무 많을 경우, 곡선의 보간 과정 중에 곡선이 꼬이는 경향이 발생되므로 곡선근사를 수행하기 이전에 조정점을 줄이고 근사의 초기조건이 되는 조정점의 위치를 결정한다. 본 논문에서는 초기 곡선에서 조정점이 형성되어야 할 위치를 정하기 위하여 곡선의 시작점 및 끝점을 잇는 직선을 기초방향(Basis Direction)으로 하여, 이 방향에서 수직으로 직교하는 방향을 법선 벡터로 갖는 위치에 초기 조정점이 위치하도록 하였다. 즉 기초방향에서 0°와 90°에 해당하는 방향의 곡선의 법선벡터 지점에 초기 조정점을 결정하였다. 이 경우, 생성되어질 곡선의 최소 조정점의 숫자는 시작점과 끝점을 포함하여 3 개의 조정점이 되며, 3 차 다항식의 경우 최소 4 개의 조정점을

확보하여야 하므로 초기 조정점이 3 개일 경우 법선벡터와 초기방향과의 각도를 45°, 30°와 60° 등 순차적으로 대입하여 조정점의 위치를 계산하였다. 각도에 따른 조정점의 위치를 계산하기 위해서 다음과 같은 수식을 만족하는 위치의 좌표를 계산하였다.

$$\cos\theta - t \leq D(u) < \cos\theta + t, \quad \theta = 0, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{6}$$

$$D(u) = |C'_i(u) \cdot v| \quad (6)$$

여기서, $|C'_i(u)|$ 와 $|v|$ 는 각각, 보간곡선의 단위 미분벡터와 기초방향의 단위벡터이며, t 는 구간을 결정하는 공차값이다. 식 (6)을 만족하는 임의의 공차구간에서 생성되는 초기 조정점의 위치는 구간중심을 매개변수로 하는 위치로 하였다.

근사곡선의 초기 조정점의 수, 매개변수위치가 정해지면 Fig. 6 의 순서도와 같이 다음 단계에서는 조정점을 이동하면서 Least Square 방법에 의하여 측정치와 근사곡선의 차이가 최소값이 되는 조정점의 위치를 계산하는 곡선근사 알고리즘을 수행하였다.

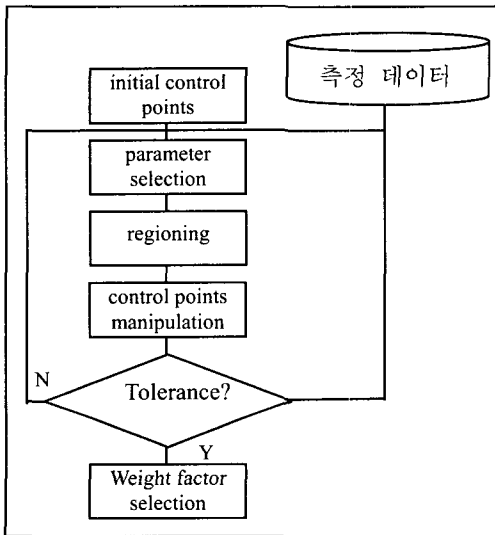


Fig. 6 Flow chart for curve approximation

3.2 NURBS 곡선근사 및 가중치 계산

일반적인 방법에서의 곡선근사에서는 매개변

수의 값이 선형방정식에 의한 임의로 주어지게 되며, 매개변수값에 의한 곡선위의 좌표들은 측정점들과 비교하여 그 오차값을 보정하는 방향으로 조정점들이 움직이게 된다. 그렇지만 이와 같은 경우 불필요한 곡선의 밀도 변화를 발생시킬 수 있으며, 비교되는 곡선위의 좌표들은 합리적인 위치의 좌표를 보장받지 못하기 때문에 최적치를 찾는 데 장애가 될 수 있다.

본 논문에서는 측정치와 곡선에서 가장 최소 위치에 해당하는 좌표와의 변위를 계산함으로써 수치적 계산을 합리적으로 유도하였다. 각각의 수렴 단계에서 측정치와 비교되는 매개변수값은 다음 식에 의해서 구하여진다.

$$g(\bar{u}) = (x_p - x(\bar{u})) \frac{\partial x(\bar{u})}{\partial x} + (y_p - y(\bar{u})) \frac{\partial y(\bar{u})}{\partial y} + (z_p - z(\bar{u})) \frac{\partial z(\bar{u})}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

여기서, x_p, y_p, z_p 는 측정점의 3 차원 좌표이며, $\frac{\partial x(\bar{u})}{\partial x}, \frac{\partial y(\bar{u})}{\partial y}, \frac{\partial z(\bar{u})}{\partial z}$ 는 매개변수 \bar{u} 를 갖는 곡선위의 임의의 점 $(x(\bar{u}), y(\bar{u}), z(\bar{u}))$ 의 x, y, z 방향의 미분성분이다. 따라서, 매개변수 값은 식(7)을 만족하는 \bar{u} 에 의해서 결정되어지므로 변수값이 임의로 선택되지 않고 계산 근거에 의해서 결정되어진다. 이때의 측정점은 곡선과의 가장 근접한 거리에 있는 한 점과 비교되며, 두 점이 이루는 방향은 곡선을 수직으로 직교하는 법선벡터와 같다. 또한, 두 점과의 거리를 오차량으로 기록하고 각각의 수렴단계에서는 전체 측정점들의 오차량에 의해서 수렴여부를 결정하였다.

앞에서 결정된 초기 조정점들의 위치는 각각의 측정점에 대한 오차를 줄이기 위한 최적의 위치로 이동하며, 임의로 정해진 오차범위 내에 들어올 때 까지 다음의 식을 수행하였다.

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \frac{E_i}{N_i} \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (8)$$

여기서, 조정점 p_i^k 는 i 번째 조정점의 k^h iteration 에 해당되는 점이며, E_i 와 N_i 는 각각 i 번째 구간내의 오차량과 측정점의 수이다. 여기서 i 번째 구간은 조정점 p_{i-1}^k 과 p_{i+1}^k 이 각각 법선방

향으로 곡선과 만나는 곡선의 매개변수 \bar{u}_{i-1} , \bar{u}_{i+1} 의 두 점 사이에 위치하는 지점이다. 오차량 E_i 에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{if } \bar{u}_{i-1} < \bar{u}_p \leq \bar{u}_{i+1} \text{ then,}$$

$$E_i = \sum_{p=1}^N (C(\bar{u}_p) - \mathbf{M}_p) \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (9)$$

여기서, $C(\bar{u}_p)$ 는 N 개의 측정점 \mathbf{M}_p 와 수직으로 직교하는 곡선위의 점이며, 각 구간에 해당하는 부분에서의 오차 합계 E_i 에 의해서 다음 단계 $(k+1)$ 의 조정점 해를 찾기 위한 변수로 활용되었다. 따라서, N 개의 측정수에 대한 최소화 되어지는 목적함수는 다음과 같다.

$$F(\bar{u}) = \sum_{p=1}^k \frac{\sqrt{(x_p - x(\bar{u}))^2 + (y_p - y(\bar{u}))^2 + (z_p - z(\bar{u}))^2}}{N} \quad (10)$$

최적 위치의 조정점이 계산되어지면 Fig. 6 과 같이 그 다음 단계의 NURBS 곡면의 가중치 w_i 값을 찾는 연산을 수행한다.

NURBS 곡선에서 가중치의 값이 1 인 경우에 B-Spline 곡선을 나타낸다. NURBS 곡선은 각각의 조정점에 가중치를 줌으로서 곡선의 변화를 주게 된다. 그러므로, 가중치에 의해서 곡선과 측정좌표와의 간격을 한층 더 줄일 수 있으며, 원과 원호, 타원의 경우 가중치의 변화에 의해서 더욱 도형에 가까운 곡선값을 만들 수 있는 장점이 있다.

앞 단계에서 만들어진 곡선식에서 가중치의 변화를 주기 위하여, 조정점 좌표의 위치를 고정시키고 가중치의 값을 변화시키면서 곡선과 측정좌표와의 오차량을 감소시키는 최적의 가중치를 다음 식에 의해서 계산하였다.

$$w_i^{k+1} = w_i^k + w_i^k \cdot q^{k+1}$$

$$q^{k+1} = \frac{(F(\bar{u})^k - F(\bar{u})^{k+1})q^k}{\sqrt{1 + (F(\bar{u})^k - F(\bar{u})^{k+1})^2} \cdot |q^k|} \quad (11)$$

여기서, w_i^k 는 k^{th} iteration에서의 가중치이며, 최종적으로 얻어진 곡선의 조정점과 가중치는

$\mathbf{p}_i^w = (x_i, y_i, z_i, w_i)$ 에 의해서 NURBS 곡선을 나타낸다.

3.3 곡면생성

위의 과정에서 얻어진 곡선들은 일반적으로 다른 차수의 knct 벡터를 가지는 경우가 된다. 같은 차수의 곡선을 만들기 위해서 knot insertion 알고리즘을 사용하였다.⁽¹⁶⁾

역공학에 의해서 얻어진 NURBS 곡선은 스킨 곡면 보간 방법에 의해서 다음과 같이 곡면으로 fitting 되어진다.⁽¹⁷⁾

$$C_k(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \mathbf{Q}_{i,k}^w \quad (k = 0, 1, \dots, K)$$

$$= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,p}(\bar{v}_k) \mathbf{P}_{i,k}^w \quad (12)$$

여기서, $\mathbf{P}_{i,k}^w$ 는 k^{th} 곡선의 i^{th} 조정점이다. u, v 방향의 스킨 곡면을 식 (2)에서의 $M(u, v)$ 라 한다면, v 방향의 매개변수 \bar{v}_k 의 단면곡선의 $C_k(u)$ 로 나타내며 $M(u, \bar{v}_k)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$M(u, \bar{v}_k) = C_k(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \mathbf{Q}_{i,k}^w$$

$$\mathbf{Q}_{i,k}^w = \sum_{j=0}^m N_{j,p}(u) \mathbf{P}_{i,k}^w \quad (k = 0, 1, \dots, K) \quad (13)$$

i 를 고정하면, 식 (12)는 주어진 좌표 $\mathbf{Q}_{i,k}^w$ 에 의해서 NURBS 곡면의 조정점 $\mathbf{P}_{i,k}^w$ 를 곡선보간에 의해서 얻어질 수 있음을 보여준다. 또한, 측정테이더는 측정기 probe의 반경의 거리만큼 움직여 있음을 고려하여 식 (3)에 의해서 곡면식을 완성할 수 있었다.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 7에서의 단위곡면에서 10×10 의 측정점을 측정데이터로 사용하였으며, 그 중에서 한 평면위의 스킨곡선의 보간을 수행하기 위한 10개의 측정점에 대한 결과는 Table 1에서와 같이 x_m, z_m 에 나타나며, 이 측정점에 의해서 곡선 보간을 수행하여 Tabel 2에서 보여지듯이 5개의 조정점을 갖는 초기 곡선을 산출하였다. 초기 곡선의 조정점

의 수와 위치는 기초 방향에 대하여 0°, 90°의 접선 벡터를 갖는 값에 근거한 것이다. 초기 측정점에 의해서 보간되어진 곡선에 대한 평균 에러값은 4.286mm로 나타났다.

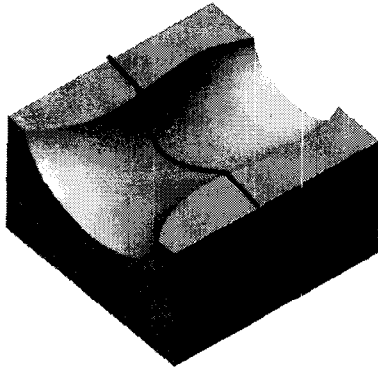


Fig. 7 Measuring surface model

10 개의 측정점을 5 개의 조정점을 갖는 B-spline 근사에 의해서 구해진 곡선의 평균 오차값은 0.083mm 이며 표준편차는 0.063 이었다. Table 1 에서 가장 근접한 매개변수 u 값과 거리오차에 대한 값을 보여준다.

B-spline 곡선 근사에 의해서 얻어진 조정점의 위치를 고정하고 가중치(weight factor)에 대한 iteration 을 수행한 결과 평균오차 0.057mm, 표준편차 0.047 의 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1 Measuring points and approximated data (mm)

Measured Point		B-spline Approximation		NURBS Approximation	
x_m	z_m	u	error	u	error
5.000	50.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.386	36.666	0.100	0.038	0.102	0.089
22.983	26.666	0.208	0.101	0.208	0.024
33.444	20.000	0.322	0.058	0.320	0.070
44.423	16.666	0.439	0.172	0.438	0.052
55.576	16.666	0.557	0.139	0.558	0.016
66.555	20.000	0.676	0.135	0.677	0.156
77.016	26.666	0.791	0.160	0.791	0.092
86.613	36.666	0.899	0.023	0.898	0.070
95.000	50.000	1.000	0.000	1.000	0.000

Table 1 에서의 매개변수는 측정치와 가장 근접한 곡선위의 좌표에 위치하므로, 가중치가 변함에 따라 매개변수가 변화됨을 볼 수 있었다.

Fig. 8 은 10 개의 단면곡선에 의해서 보간되어진 NURBS 곡면 데이터와 boundary edge 들에 의해서 만들어진 110x110 그리드 형태의 3 차원 위치 데이터에 의한 복합곡면의 형상이다

Table 2 는 시뮬레이션된 곡선에 대한 최종 조정점 좌표이다.

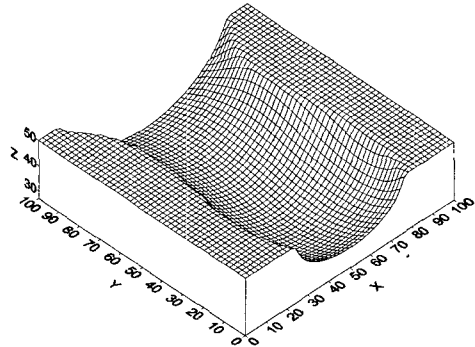


Fig. 8 Generated NURBS surface

Table 2 Final control points by NURBS approximated curve

Initial curve		Approximated curve		weight
X	y	x	y	W
5.000	50.000	5.000	50.000	1.000
19.525	30.680	18.551	24.509	0.961
50.000	17.222	50.334	8.406	0.995
80.474	30.680	81.446	24.556	0.964
95.000	50.000	95.000	50.000	1.000

5. 결론

본 논문에서는 NURBS 곡면 근사를 통한 자유곡면의 역공학(reverse engineering)을 수행하여, 자유곡면에 대한 CAD 데이터를 성공적으로 생성하였다.

복잡한 형상의 곡면을 컴퓨터 비전을 이용하여 단위곡면으로 분리한 후, 3 차원 측정기에 의해

서 얻어진 곡면 측정 데이터를 곡선들로 fitting 하기 위하여 기초방향을 이용한 초기 조정점의 수와 위치를 계산하였다. 곡선 근사 단계에서 측정점과 곡선과의 변위를 계산하기 위한 기준 변수인 매개 변수를 매 iteration 마다 최소거리 알고리즘을 이용하여 얻음으로써, 매개변수를 고정인자로 두고 계산하는 일반적인 방법과 비교하여 합리적인 계산 방식을 택하였다. 또한 최종 NURBS 곡선의 가중치(weight factor)의 보정에 의해서 곡선 근사의 정확도를 한 단계 높일 수 있었다. 제시된 모델로부터의 시뮬레이션 결과는 가중치의 보정에 의해서 가중치의 변화를 고려하지 않은 B-spline 근사 식과 비교하여 약 31%의 개선된 결과를 가져 오는 것을 볼 수 있었다. 본 연구의 결과로 원과 원호곡선에서 존재하는 가중치의 완전해에 대한 만족스러운 결과가 얻어지지 않으므로, 차후 원과 원호곡선의 완전해에 근접하는 수치해석적 접근방법에 대한 연구가 필요하다고 본다.

후 기

본 연구는 단국대학교 교내 연구비 지원으로 수행 되었음.

참고문헌

1. R.B.Aronson, "Forward thinkers take to reverse engineering," *Manufacturing Engineering*, 117(11), pp. 34-44, Nov. 1996.
2. T. Varody, R. R., Martin and J. Cos, "reverse engineering of geometric models - an introduction," *Computer-Aided Design*, 29(4), pp. 255-268, 1997.
3. M. Puttre, "Capturing design data with digitizing systems," *Mechanical Engineering*, 116(4), pp. 62-65, 1994.
4. 조승현, 조명우, 김재도, "Delaunay 삼각형 분할법을 이용한 3 차원복합형상의 역공학," *한국정밀공학회지*, 제 17 권, 제 7 호, pp. 181-188, 2000.
5. L.A. Piegl, W. Tiller, "Parametrization for surface fitting in reverse engineering," *Computer-Aided Design*, pp. 593-603, Aug. 2000.
6. J.P. Kruth, A. Kerstens, "Reverse engineering modeling of free-form surfaces from point clouds subject to boundary conditions," *Journal of MPT*, 76, pp. 120-127, 1998.
7. S.T. Tuohy, et. al., "Approximation of measured data with interval B-splines," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, pp. 791-799, 1997.
8. A. Werner, et. al., "Reverse engineering of free-form surfaces," *Journal of MPT*, pp. 128-132, 1998.
9. Hong-Tzong Yau, "Reverse Engineering of Engine Intake Ports by Digitization and Surface Approximation," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 37, No. 6. pp. 855-871, 1997.
10. Gonzalez, Rafael C., et. al., "Digital Image Processing," Addison-Wesley, 1992.
11. J. W. Lee, J. H. Cho, K. Kim, "Optimal Probe Path Generation for Sculptured Surface in The Coordinate Measuring Machine," *Technical Paper of NAMRI/SME*, Vol. XXII, pp. 118-122, 1994.
12. 조명우, 김진섭, 서태일, 조재형, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On- Machine Measurement," *정밀공학회지*, 제 16 권, 제 12 호, 1999.
13. J. H. Cho, M. W. Cho and K. Kim, "Volumetric Error Analysis of a Multi-axis Machine Tool Machining a Sculptured Surface Workpiece," *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 345-363, 1994.
14. Les Piegl, W. Tiller, "The NURBS Book," New York, Springer, pp. 129-137, 1995.
15. Wang, H.P., Hewgill, D.E. and Vickers, G.W., "An Efficient Algorithm for Generating B-Spline Interpolation Curves and Surfaces from B-Spline Approximations," *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 6, pp. 395-400, 1990.
16. Les Piegl, W. Tiller, "The NURBS Book," New York, Springer, pp. 141-144, 1995.
17. Les Piegl, W. Tiller, "Algorithm for approximation NURBS skinning," *Computer-Aided Design*, Vol. 28, pp. 699-706, 1996.