

측정점의 순정을 통한 B-스플라인 곡면 품질의 개선

홍석용*, 이현찬**

Quality Improvement of B-spline Surfaces through Fairing of Data Points

Hong, S. Y.* and Lee, H. C.**

ABSTRACT

In reverse engineering, existing products are digitized for the computer modeling. Using the digitized data, surfaces are modeled for new products. However, in the digitizing process measuring errors or deviations can be happened often in practice. Thus, it is important to adjust such errors or deviations during the computer modeling. To adjust the errors, fairing of the modeled surfaces is performed. In this paper, we present a surface fairing algorithm based on various fairness metrics. Fairness metrics can be discrete. We adopt discrete metrics for fairing given 3D point set. The fairness metrics include discrete principal curvatures. In this paper, automatic fairing process is proposed for fairing given 3D point sets for surfaces. The process uses various fairness criteria so that it is adequate to adopt designers' intents.

Key words : Reverse engineering, Surface fairing, Fairness metric, Discrete metric, Point set

1. 서 론

제품의 설계에 있어서 자유 곡면의 설계는 선체나 자동차의 차체, 비행기의 동체 등의 설계와 같이 중요하고 다양한 응용 분야들을 가지고 있다. 이러한 응용 분야에 있어서 CAD 시스템이 구비해야 할 기능 중의 하나가 입력된 측정점 데이터로부터 부드러운 곡면을 모델링하는 것인데, 근래에 들어 역공학(reverse engineering)의 비중이 점점 부각되고 있는 상황에서, 입력된 측정점군을 이용한 자유 곡면의 설계는 중요한 의미를 가지고 있다.

자유 곡면의 설계란 설계자가 의도하는 곡면을 수학적으로 전환하는 작업을 말한다. 하지만 현재 많이 사용되고 있는 B-스플라인 곡면 형성 방법을 사용하더라도, 시스템에 입력되는 측정점군 자체에 오차가 있거나 편향성과 같은 오류가 존재하여 설계자가 의도하지 않은 곡면 모델링 결과가 발생하기도 한다. 그

러므로 이러한 오류를 사전 보정하여 설계자가 원하는 곡면을 설계하기 위해 부가적인 보정의 절차가 요구되는데, 여기에 곡면의 순정(fairing)이 사용된다.

전술하였듯이 순정이란 곡면 또는 곡선을 더욱 부드럽게 만들기 위하여 보정을 하는 과정을 의미하는 것인데, 이러한 순정은 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째는, 설계자가 순정 과정에 반복적으로 참여하는 방법(interactive fairing)으로, 설계자가 곡면의 모양을 변화시키기 위해 변경해야 할 특정 부분을 결정하고 이를 적절히 변경시킴으로 곡면을 개선하게 된다. 이런 작업은 변경된 곡면과 이에 대한 곡률분포를 그려보아 만족할 만큼 곡면이 부드럽게 될 때까지 반복이 된다. 대표적인 방법으로 reflection line, highlight band, isophote 등을 이용한 순정이 여기에 해당된다^[1-3]. 그러나 이러한 방법은 설계자의 높은 기술이 요구되며 동일한 작업이 반복되어 시간과 비용의 면에서 소모성이 상대적으로 크다. 둘째는, 자동적인 순정 방법(automatic fairing)으로서, 이 방법에서는 곡면의 물리적 에너지나 곡면의 기하학적 요소들을 이용하여 곡면의 부드러움의 정도가 가능하면 최대가 되도록 하여 설계자의 반복적 작업이 없

*학생회원, 홍익대학교 정보산업공학과
**중신회원, 홍익대학교 정보산업공학과
- 논문투고일: 2000. 1. 14
- 심사완료일: 2001. 1. 2

이 순정이 진행된다. 이러한 자동적인 순정에 관련된 알고리즘들은 주로 주어진 측정점을 이용하여 부드러운 곡면을 모델링하는 방법과 이미 모델링되어 있는 곡면을 보정하여 곡면의 순정을 수행하는 방법에 관한 연구들에서 다음과 같이 제시되었다.

다수의 패치(patch)로 구성된 부드러운 곡면의 생성에 있어서, Hagen은 장력(strain energy)을 최소화하는 순정 평가 척도를 쿤스 패치(Coons' patch)에 적용하여 입력 트윈스트 벡터 값을 계산함으로써 쿤스 패치로 구성된 부드러운 곡면을 생성했고¹⁴⁾, Ma는 여러 개의 패치로 구성된 곡면을 G' 조건을 만족하는 곡면으로 순정하는 방법을 제시했다¹⁵⁾. Moreton은 지정된 보간 조건과 곡률 변화량 순정 평가 척도들을 사용함으로써 최종적으로 부드러운 Minimum Variation Surface를 생성하는 알고리즘을 제시하였다¹⁶⁾. 곡면 순정을 위한 순정 평가 척도에 있어서도 다양한 연구가 진행되었는데, Lott은 곡면 주곡률 제곱값의 합을 최소화하는 척도를 적용하여 B-스플라인 곡면을 순정하는 방법을 제시했으며¹⁷⁾, Ferguson은 B-스플라인 곡면을 순정하되 isoparametric line들이 볼록포 조건(convexity condition)을 만족하도록 하였다¹⁸⁾. 또한 Rando는 곡면의 기하학적 불변 요소로부터 유도된 파생 곡면을 이용해 순정 평가 척도를 유도하고 적용함으로써 순정을 수행하였고¹⁹⁾, Hahmann은 절점 제거, 재삽입 방법을 응용하여 국부적인 순정을 하되 국부적 순정의 경로를 결정하는 방법으로 탐색 전략을 사용하였다¹⁰⁾.

곡면을 순정하기 위한 일반적인 방법은 곡면의 주곡률들로 구성된 순정 평가 척도를 최소화시키도록 곡면을 변경하는 것이다^{16, 17, 19, 11)}. 또한 일반적으로 측정점군을 지나는 곡면을 순정하기 위해서는 먼저 측정점군을 지나는 곡면을 생성한 후, 순정 평가 척도를 최소화하도록 곡면을 순정하는 방법을 사용한다¹²⁾. 여기에서 중요한 것은 순정 평가 척도를 구하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 곡면의 생성을 위해 입력된 3차원 측정점군에 대하여 곡면을 생성하지 않고서 직접 순정을 행하였는데, 이를 위해서 측정점으로부터 이산적 곡률과 그 미분 값들을 구하여 순정 평가 척도를 계산했고¹³⁾, 이러한 순정 평가 척도를 최소화하도록 측정점들을 보정하는 순정 알고리즘을 사용하였다. 즉, 곡면 생성을 위해 주어진 측정점군에 대하여 순정을 행하되 곡면을 보정하는 방법으로 측정점을 이동하는 방법을 사용했으며¹¹⁾, 순정 이후에 점군을 지나는 곡면을 생성하여 곡면의 품질을 최종 평가했다. 그리고 이러한 순정이 자동적으

로 수행되도록 제약식이 있는 비선형 최적화 문제의 최적해를 구하는 알고리즘을 사용했다. 순정 평가 척도는 다양하게 유도되었으며, 각 순정 척도를 제약식이 있는 비선형 최적화 문제에 적용하여 해를 구했고, 순정된 곡면의 모양과 곡률 분포를 분석함으로써 순정 척도에 따른 곡면 모양의 변화 추이를 살펴보았다¹⁵⁾.

본문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 곡면 품질을 평가하는 순정 평가 척도를 기술했고, 3장에서는 곡면 순정 알고리즘에 대해 설명했으며, 4장에서는 예제들을 계산된 알고리즘으로 순정한 결과와 기존 순정 방법과의 비교 결과를 제시했다. 5장에서는 결론 및 추후 연구를 제시하였다.

2. 곡면 순정 평가 척도

2.1 이산적 곡률

입력으로 주어진 측정점군에 대한 순정을 하기 위해서는 이산적 곡면 순정 평가 척도를 구해야 한다. 이산적 곡면 순정 평가 척도란 곡면의 부드러움을 평가하는 척도를 계산함에 있어서 곡면의 연속적인 기하학적 정보를 이용하는 것이 아니라 곡면을 보간하기 이전의 측정점군으로부터 기하학적 정보를 얻어내는 것을 의미한다. 이처럼 이산적 순정 평가 척도를 이용해서 순정을 하면 연속적인 곡면을 계산하지 않고도 순정을 할 수 있어 계산량의 상대적 감소 효과를 얻을 수 있고, 여러 가지 순정 평가 척도를 이용하여 순정을 할 수 있으므로 설계자 의도를 반영하는 순정 또한 가능하다.

이산적 곡면 순정 평가 척도를 구하기 위해서는 이산적 곡률과 이산적 곡률의 일차 미분을 구해야 한다. 이산적 곡률은 다음과 같이 구해질 수가 있다. N개의 점들로 구성된 점군이 있다면, 양 끝점을 제외한 내부의 N-2개의 내부 점들에 대해 각각 이산적 Frenet 프레임을 할당할 수가 있고, 이것을 매개변수 변화에 따라 이동시킴으로써 이산적 Frenet-Serret 공식을 구할 수 있게 된다¹⁶⁾. 그리고 나서 이산적 Frenet-Serret 공식의 계수를 이루는 이산적 곡률을 구할 수 있는데, 결과적으로 이산적 곡률은 세 점을 지나는 원을 정의하고 그 반지름의 역수를 취하는 것이 된다.

Fig. 1은 세 점을 지나는 원의 곡률을 구하기 위한 기하학적 정보들을 보여준다. 주어진 점군은 공간상의 점들이므로 P에서의 이산적 곡률 K는 양의 값이 되며 식 (1)과 같이 정의한다. 식 (1)에 사용된 기호들은 Fig. 1에서의 기호들과 동일한데, 우선 P는 i번째 측정점을 의미하고, V는 P와 P_{i+1} 사이의 길이이

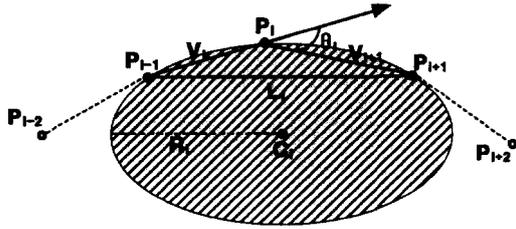


Fig. 1. Discrete curvature.

며, L_i 는 P_{i+1} 과 P_{i-1} 사이의 길이이다. 또한, θ 는 P_i 에서의 외각에 해당된다.

$$K_i = \frac{2\sin\theta_i}{L_i} \quad (1)$$

여기서,

$$L_i = |\vec{L}_i|, \vec{L}_i = P_{i+1} - P_{i-1}$$

$$\cos\theta_i = \frac{\vec{V}_i \cdot \vec{V}_{i+1}}{|\vec{V}_i| |\vec{V}_{i+1}|}, 0 \leq \theta_i \leq \pi$$

$$V_i = |\vec{V}_i|, \vec{V}_i = P_i - P_{i-1}$$

코드 길이 방법 매개변수화(chord length method parameterization)를 가정하고, 이산적 곡률 K_i, K_i, K_{i+1} 을 이용해 2차 보간(quadratic interpolating)을 하면 K 의 미분을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = \frac{1}{V_i + V_{i+1}} \times \left(V_i \frac{K_{i+1} - K_i}{V_{i+1}} + V_{i+1} \frac{K_i - K_{i-1}}{V_i} \right) \quad (2)$$

2.2 이산적 주곡률

본 논문에서 사용한 곡면 순정 평가 척도에는 주곡률(principal curvatures)이 포함되어 있으므로 이산적 곡면 순정 평가 척도를 구하기에 앞서 이산적 주곡률을 계산한다. 주곡률이란 곡면상의 특정 지점에서 구할 수 있는 무수한 곡률 중 최대, 최소값을 갖는 두 곡률을 의미한다^[17]. 또한 이러한 주곡률에 대한 주방향(principal directions)은 서로 수직이 된다.

특정 측정점에 대해 이산적 주곡률을 구하기 위해서는 측정점에서 여러 방향으로 이산적 법선곡률을 계산한다. 측정점에 대해 구하는 이산적 법선곡률은 Fig. 2와 같이 측정점에 인접한 여덟 개 측정점에 대해 수평, 수직 방향과 두 개의 대각선 방향의 네 가지가 있다. 더 많은 방향을 설정할 수 있으나 편의상 네 방향으로 한정했다. 그리고 본 논문에서는 측정

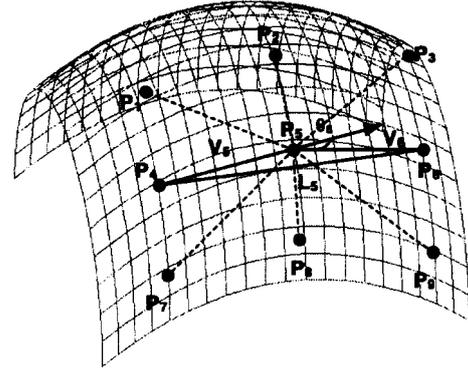


Fig. 2. Calculation of discrete principal curvatures.

점을 xy평면으로 투영하면 가로, 세로 길이가 일정한 직사각형 격자꼴로 배열하도록 가정하며, 순정은 허용오차 내에서 수행되므로 가정한 점 배열 형태에 영향을 주지 않는다.

곡면의 특정한 측정점에서의 법선곡률은 다음과 같이 계산할 수 있다^[12].

$$\chi_n = \chi N \cdot n \quad (3)$$

여기서,

χ_n =곡면의 법선곡률

χ =곡면상에 있는 특정 곡선의 곡률

N =곡면상에 있는 곡선의 주법선벡터

n =곡면의 단위법선벡터

그러므로 위의 식을 이용하여 이산적 법선곡률을 구하려면 χ, N, n 에 대한 이산적인 추정치를 구해야 한다. 곡면상의 특정 곡선상의 곡률 χ 는 앞서 이산적 곡률에서 설명한 바와 같이 세 개의 측정점으로 정의되는 원의 반지름의 역수로 구할 수 있다. 다음으로 곡면에 놓인 곡선에서의 주법선벡터 N 은, 이산적 곡률을 구하기 위해 세 점으로 원을 정의했을 때 세 점 중 두 번째 점으로부터 원의 중심까지를 연결한 벡터를 벡터 길이로 나누면 추정치를 구할 수 있다. 마지막으로 곡면의 단위법선벡터 n 을 이산적으로 추정하기 위해서는 일단 앞서 구한 주법선벡터에 수직이 되는 단위접선벡터를 구하되, 수직, 수평, 두 개의 대각선 방향에 대해 네 개의 단위접선벡터들을 구한다. 그리고 나서 수직과 수평 방향 단위접선벡터들을 외적하고 두 개의 대각선 방향에 대한 단위접선벡터들을 외적하여, 외적으로 구해진 두 벡터를 평균하면 단위법선벡터 n 을 추정할 수 있다. 이것은 다음의 식으로 표현된다.

$$n_1 = T_1 \times T_2 \quad (4)$$

$$n_2 = T_3 \times T_4 \quad (5)$$

$$n = 0.5(n_1 + n_2) \quad (6)$$

여기서,

T_1 =수평 방향으로 구한 단위접선벡터

T_2 =수직 방향으로 구한 단위접선벡터

T_3, T_4 =대각선 방향으로 구한 단위접선벡터

이렇게 이산적 법선곡률들을 구한 후 값이 최소 (또는 최대)인 곡률을 주곡률의 하나로 정하고, 이에 대해 수직 방향을 갖는 곡률을 다른 주곡률로 정한다. 이러한 이산적 주곡률은 주곡률에 대한 근사치로 볼 수 있는 것이다. 예를 들어, Fig. 2의 P_5 에서 이산적 주곡률을 구한다면, 네 방향으로의 이산적 법선곡률을 구하고 그 중 최소값을 가지는 곡률을 택하여 주곡률 중 최소 곡률 k_1 으로 정하되, 만일 최소 곡률 k_1 의 방향이 P_4, P_5 , 그리고 P_6 으로 진행되는 수평 방향이라면 이에 대해 직교하는 수직 방향 즉, P_2, P_3 , 그리고 P_8 로 진행되는 방향으로의 이산적 법선곡률을 최대 곡률 k_2 로 정함으로 주곡률을 구한다. 그리하여 위의 방법으로 이산적 주곡률을 구하면 이산적 주곡률과 이산적 주곡률의 미분을 이용하여 측정점에 대한 다양한 이산적 곡면 순정 평가 척도들의 값을 계산하게 된다.

2.3 곡면 순정 평가 척도

본 연구에서는 파생 곡면을 이용한 순정 평가 척도를 사용했으며, 사용된 곡면 순정 평가 척도들은 flattening 척도, rolling 척도, 그리고 rounding 척도의 새 가지로, 이것들은 각기 다른 파생 곡면의 표면적으로부터 유도된다^[11]. 파생 곡면이란 가우시안 곡률 (Gaussian curvature)과 평균 곡률 (mean curvature), 법선 벡터 등과 같은 기하학적 불변요소들로 구성된 곡면을 의미한다. 즉, 임의의 곡면 r 과 그 정의역이 주어지고, 특정 파생 곡면을 c 라고 하면 c 의 표면적 Γ 를 최소화함으로써 곡면의 순정을 달성하게 되는 것이다^[9].

이러한 파생 곡면의 표면적 계산을 위해 기본적으로 필요한 것은 가우스 곡률 K 와 평균 곡률 H 의 두 가지이다. 이는 다음과 같이 정의되며, k_1 과 k_2 는 주곡률을 의미한다.

$$K = k_1 k_2 \quad (7)$$

$$H = (k_1 + k_2) / 2 \quad (8)$$

Flattening 곡면 순정 평가 척도에서는 파생 곡면이 $c=Kn$ 으로 주어지며 n 은 단위 법선 벡터이고, 다음 식을 주어진 정의역에 대해 적분하면 파생 곡면의 표면적 즉, flattening 척도를 얻는다. 이후, s 와 t 는 주방향으로의 매개변수를 의미한다.

$$\left| \frac{\partial c}{\partial s} \times \frac{\partial c}{\partial t} \right| = |K| \left[\left(k_1 \frac{\partial K}{\partial t} \right) + \left(k_2 \frac{\partial K}{\partial s} \right) + K^4 \right]^{1/2} \quad (9)$$

식 (9)의 순정 평가 척도를 최소화하는 방향으로 곡면을 순정하게 되면 가우시안 곡률의 크기와 곡률 방향으로의 가우시안 곡률 변화율을 최소화하게 되기 때문에 곡면을 평평하게 하는 효과와 곡률의 급격한 변화를 최소화하는 효과가 있다.

Rounding 곡면 순정 평가 척도에서는 파생 곡면이 $c=r+(H/K)n$ 으로 주어지는데, 다음 식을 주어진 정의역에 대해 적분하면 rounding 척도를 얻게 된다.

$$\left| \frac{\partial c}{\partial s} \times \frac{\partial c}{\partial t} \right| = \left[(1-Qk_1)^2 (1-Qk_2)^2 + (1-Qk_1)^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)^2 + (1-Qk_2)^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

식 (10)에서 $Q=H/K$ 이며, 식 (10)의 순정 평가 척도를 최소화하는 방향으로 곡면을 순정하게 되면 $(1-Qk_1)$ 과 $(1-Qk_2)$ 의 크기를 최소화하게 되는데 이는 k_1 과 k_2 가 같게될 때 달성된다. 즉, 이 조건이 만족되면 곡면이 구의 표면에 근사하도록 하는 효과가 있다.

마지막으로 rolling 곡면 순정 평가 척도에서는 파생 곡면이 $c=[K+H^2]n$ 으로 주어지게 되는데 동일한 과정을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있고, 마찬가지로 이것을 주어진 정의역에 대해서 적분을 하면 rolling 척도를 얻게 되는 것이다.

$$\left| \frac{\partial c}{\partial s} \times \frac{\partial c}{\partial t} \right| = |W| \left[k_1 \left(\frac{\partial W}{\partial t} \right) + k_2 \left(\frac{\partial W}{\partial s} \right) + W^2 K^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

식 (11)에서 $W=K+H^2$ 이며, 식 (11)의 순정 평가 척도를 최소화하는 방향으로 곡면을 순정하게 되면 곡면상의 특정한 지점에서의 두 주곡률 중 하나는 0으로 근접하게 되고 다른 하나는 특정한 상수에 근접하게 되는데 이는 곡면을 원통이나 원추의 일부분으로 근접하도록 하는 효과가 있다.

이상과 같이 본 연구에서 곡면의 순정에 사용한 순정 평가 척도는 flattening 척도와 rolling 척도, rounding 척도의 새 가지이다. 그리고 본 연구에서는 이것들을 이용하여 곡면에 대한 측정점군을 순정하기 위해, 전술한 이산적 주곡률과 이산적 주곡률의

일차 미분값을 구하여 각각의 곡면 순정 척도 계산에 사용하였다. 여기서, 이산적 주곡률의 일차 미분값은 이산적 곡률의 일차 미분을 계산하는 것과 동일한 방법으로 계산하였다. 또한, 파생 곡면의 표면적을 계산하는 적분에 있어서는, 특정한 측정점에서의 순정 평가 척도의 값을 계산하고 이러한 계산을 전체 측정점 각각에 적용하여 결과값들을 누적함으로써 주어진 정의역에 대한 파생 곡면의 표면적 계산을 대체하였다.

3. 곡면의 측정점 순정 알고리즘

본 연구에서 제시한 측정점 이동을 통한 B-스플라인 곡면의 순정에서는 지역적 순정 과정을 반복적으로 수행하는 알고리즘을 사용하였다^[10,18-19]. 이는 한번에 한 개의 측정점을 이동시키는 문제를 비선형 최적화 문제에 적용시킴으로 새로운 측정점을 구하는 과정을 이동 가능한 모든 측정점들에 적용함으로써 결국 측정점군으로부터 모델링되는 B-스플라인 곡면이 순정되는 결과를 얻어내는 것이다. 그리고 이러한 지역적 순정에서는 하나의 측정점에서의 순정 평가 척도값을 나타내는 지역적 순정 함수와 모든 측정점에서의 지역적 순정 함수값을 누적시킨 전역적 순정 함수가 사용된다.

단, 순정을 통해 얻어진 새로운 측정점은 원래의 측정점과 그와 인접한 여덟 개의 측정점들과의 거리 중에서 최소 거리를 반지름으로 하는 구의 내부 영역에서만 위치하도록 제약조건을 설정하였다. 또한, 패치의 가장 바깥 부분과 바로 안쪽의 측정점들에 대해서는 이산적 곡률의 일차 미분값 계산이 이산적 곡률의 정의에 있어 불가능하므로 그 점들은 고정되어 있다고 가정한다. 그리고, 이동 가능한 측정점들이 결과적으로 움직일 수 있는 허용오차는 이웃한 측정점들과의 거리 중 최소 거리의 10%에서 50% 범위로 설정하였다. 주어진 비선형 최적화 문제의 최적해를 구하는 순정 알고리즘의 실제 구현을 위해서 IMSL(International Mathematical Subroutine Library)이 사용되었으며, 순정 알고리즘의 순서는 다음과 같다.

step 1. 초기 지역적 순정 함수값과 전역적 순정 함수값을 계산한다.

step 2. 지역적 순정 함수값이 가장 큰 측정점을 선택한다.

step 3. 선택된 측정점의 지역적 순정 함수를 목적 함수로, 선택된 측정점이 이동할 수 있는 범위를 제약조건으로 하여 비선형 최적화 문제에 적용하고 새

로운 측정점의 위치의 최적해를 구한다.

step 4. 새로 구한 측정점 위치의 해를 적용하여 전역적 순정 함수값을 다시 계산한다.

step 4-1. 전역적 순정 함수 값의 감소가 있으면, step 3에서 구한 해를 선택된 측정점의 새로운 위치로 채택하고 step 1로 돌아간다.

step 4-2. 이동 가능한 측정점 중에서, 현재 선택한 측정점 다음으로 지역적 순정 함수값이 큰 측정점이 있다면 이를 선택하고 step 3으로 돌아간다.

step 4-3. 이동 가능한 측정점 중에서 더 이상 보다 작은 지역적 순정 함수 값이 없다면 step 5로 간다.

step 5. step 1~4를 통하여 얻어진 측정점군을 지나는 B-스플라인 곡면을 모델링한다.

4. 적용 예제 및 결과

곡면 순정 평가 척도에 따른 곡면의 순정 효과들을 예제의 적용을 통하여 알아보았다. 이를 위해 우선 측정점에 대한 정보가 순정을 위한 입력 정보로서 주어졌고, 앞서 제시한 알고리즘을 통하여 순정이 수행되었으며, 곡면 순정 평가 척도로는 세 가지 척도가 사용되었다. 또한 특정한 측정점이 움직일 수 있는 범위는 인접한 8개 측정점들과의 거리 중 최소 거리의 10%와 50%로 설정하였다.

예제 1은 7×10 개의 측정점들에 대하여 순정을 한 것이며, 허용오차는 10%로 설정하였다. 또한 여기에서는 기존의 전역적 순정 알고리즘에 의한 순정 결과와 본 논문에서 제안한 지역적 순정에 의한 결과를 비교했다^[9]. Fig. 3은 예제 1에서 주어진 측정점을 지나는 B-스플라인 곡면이 flattening 척도로 순정된 후 어떻게 변화하였는지를 보여준다. Fig. 3에서 Fig. 6에 걸쳐 VIEW 1은 곡면을 비스듬히 내려다본 것이고, VIEW 2는 측면에서 바라본 것이다. 결과적으로 Fig. 3에서 지역적 순정의 결과는 초기 곡면의

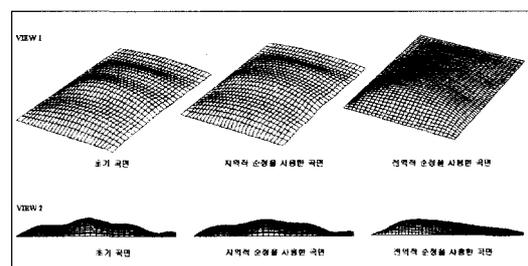


Fig. 3. Fairing results of the example 1 with flattening metric.

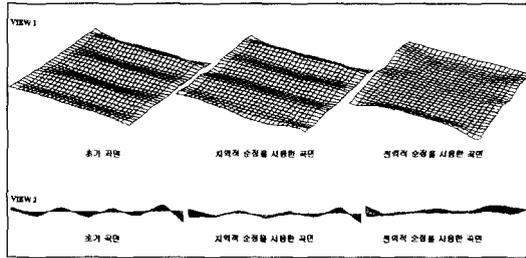


Fig. 4. Mean curvature graphs for fairing results of Fig. 3.

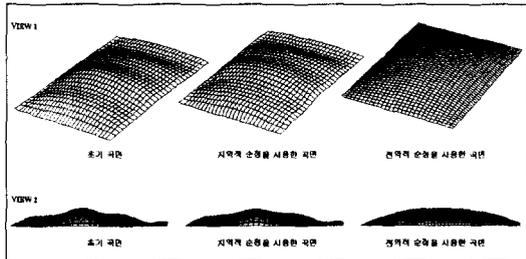


Fig. 5. Fairing results of the example 1 with rolling metric.

형태를 어느 정도 유지하되 굴곡의 정도를 다소 완화한 것으로 나타났고, 전역적 순정은 극부적인 곡면의 굴곡을 더 많이 제거하면서 곡면을 전반적으로 평평하게 만드는 것으로 나왔다. Fig. 4에서는 Fig. 3의 곡면들에 대한 평균 곡률 분포를 보여주는데, 마찬가지로 지역적 순정은 곡률 분포의 굴곡을 다소 완화하며 전역적 순정은 굴곡을 상대적으로 더욱 평평하게 만드는 것을 확인할 수가 있다.

Fig. 5에서는 예제 1의 초기 B-스플라인 곡면이 rolling 척도로 순정된 결과를 보여준다. 지역적 순정의 경우는 곡면의 전반적인 모양을 원기둥에 가깝도록 굴곡을 완화했으나 초기 곡면의 형상을 비슷하게 유지하고 있고, 전역적 순정에서는 곡면이 매우 매끄럽게 되었으나 초기 형상은 남아있지 않다고 볼 수 있다. Fig. 6에서는 이 결과를 평균 곡률 분포를 통해 명확히 보여준다.

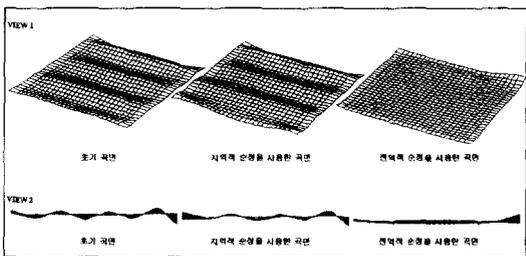


Fig. 6. Mean curvature graphs for fairing results of Fig. 5.

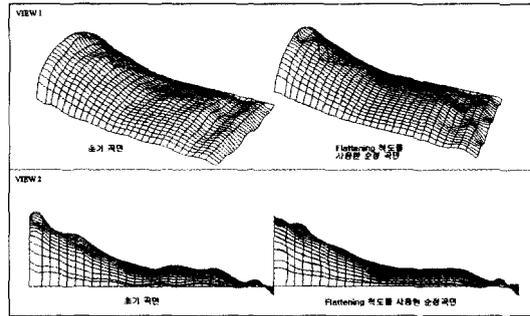


Fig. 7. Fairing result of the example 2 with flattening metric.

결론적으로, 기존의 전역적 순정은 곡면에 대한 순정의 정도에 있어서는 상대적으로 더 매끄러운 곡면을 만들 수 있지만 곡면 내의 굴곡들을 지나치게 제거하는 경향으로 인해 곡면의 형상 보존이라는 측면에 있어서는 부정적인 면이 있음을 알 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 제안한 지역적 순정 알고리즘은 곡면의 형상을 근본적으로 크게 바꾸지 않는 범위에서 극부적인 순정이 요구되는 경우 적합하게 사용될 수 있는 장점이 있음을 확인할 수 있었다.

예제 2에서는 9×15개의 측정점을 지나는 B-스플라인 곡면을 순정하였으며, 허용오차는 50%로 설정하였다. Fig. 7은 예제 2에서 주어진 측정점을 지나는 B-스플라인 곡면을 flattening 척도를 사용하여 순정한 후 곡면의 모양이 어떻게 변하는가를 보여주고 있다. Fig. 7에서 Fig. 9에 걸쳐 VIEW 1은 곡면을 비스듬히 내려다본 모습이고, VIEW 2는 두 곡면을 측면에서 바라본 것이다. Fig. 7에서는 초기 곡면의 극부적으로 볼록한 굴곡들이 매우 평탄하게 바뀌어 결과적으로 매끄러운 곡면이 되었음을 VIEW 1과 VIEW 2에서 확인할 수 있다.

Fig. 8은 예제 2에서 주어진 측정점을 지나는 B-스플라인 곡면에 대해 rounding 척도를 사용하여 순정을 행한 후 어떻게 곡면의 모양이 변하는가를 보여준다. Fig. 8의 VIEW 1에서 곡면이 극부적으로 구면의 모양을 만드는 효과가 있는 것을 알 수 있으며, VIEW 2에서도 같은 결과를 확인할 수 있다. 그러나 이러한 척도에 의한 순정은 곡면의 평평한 부분을 구에 가깝도록 만들므로 긍정적인 효과를 기대하기 어려운 척도로 볼 수 있다.

Fig. 9는 예제 2에서 주어진 동일한 B-스플라인 곡면이 rolling 척도를 사용하여 순정을 행한 후 어떻게 변하는가를 보여주고 있다. VIEW 1에서 볼록하게 솟아있는 부분들은 평평하게 낮아지고, 오목한 부

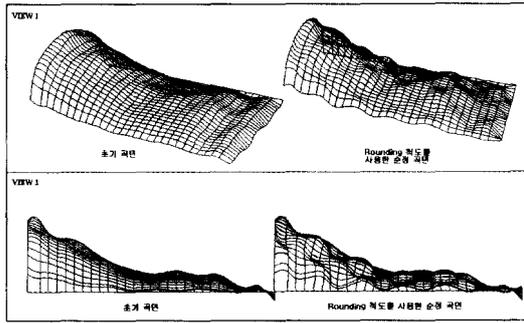


Fig. 8. Fairing result of the example 2 with rounding metric.

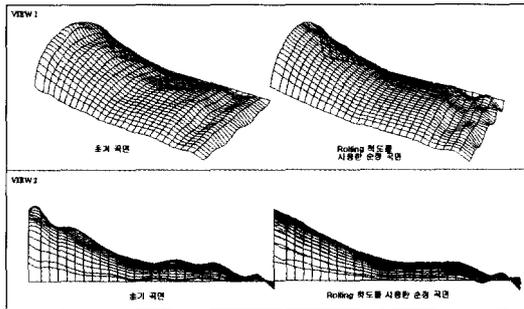


Fig. 9. Fairing result of the example 2 with rolling metric.

분은 그 정도가 완만해짐으로 원기둥 모양의 조합에 근접하는 경향을 볼 수 있으며, VIEW 2에서도 이런 결과를 명확히 보여준다.

예제 2의 초기 곡면과 각각의 순정 곡면에 대한 평균 곡률을 비교한 결과가 Fig. 10에 나와 있는데 이것은 평균 곡률 그래프를 위에서 비스듬히 내려다 본 것이다. Fig. 10에서 flattening 척도를 사용한 경우의 평균 곡률은 초기 곡면의 평균 곡률과 비교했을 때 상대적으로 굴곡의 수가 줄고 그 정도가 매우

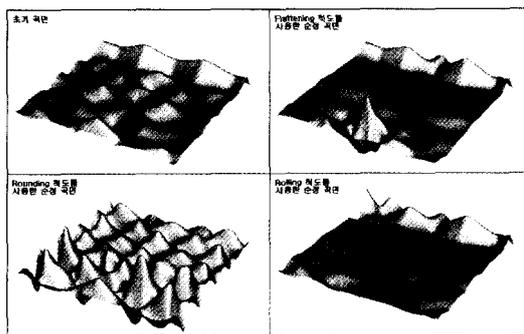


Fig. 10. Perspective views of mean curvature graphs for three fairing results of the example 2.

완화되었을 뿐만 아니라 굴곡의 진행에 있어서도 규칙성이 있음을 알 수 있다. 그러나 그래프의 양 끝 부분에서 부분적인 곡률 증가를 볼 수 있는데 이것은 곡면을 순정하기 위한 최적화의 과정에서 발생한 부분적인 희생이라고 볼 수 있다.

한편 rounding 척도를 사용한 경우에 있어서는 굴곡의 수가 증가하고 정도가 심해졌으며, 마지막으로 rolling 척도를 사용한 경우에 있어서는 굴곡의 수와 정도가 완화된 것은 flattening 척도를 사용한 경우와 동일하나 그래프가 훨씬 더 평평함을 알 수 있다. 이것은 예제 2의 초기 곡면이 원기둥 모양의 조합에 가까우므로 rolling 척도에 의한 순정에 더 적합하기 때문인 것으로 파악할 수 있다. 즉, flattening 척도와 rolling 척도가 이러한 차이를 보이는 이유는 전자는 단순히 곡면을 평탄하게 눌러주는 것을 우선하고, 후자는 곡면의 특정한 방향으로의 곡률을 0이나 특정 상수로 수렴시키려 하기 때문이다.

앞에서 설명한 두 가지의 예제에 대하여 세 가지 곡면 순정 평가 척도를 가지고 순정을 수행한 결과, 세 가지 곡면 순정 평가 척도들 중에서 flattening 척도와 rolling 척도는 좋은 순정 결과를 나타내었지만, rounding 척도로 순정을 수행했을 때에는 곡면의 굴곡이 극부적으로 심해지는 결과가 나왔는데 이것은 본 논문의 알고리즘이 지역적 순정을 반복적으로 수행하는 방법을 사용하고 있기 때문이다. 그러므로 곡면을 전체적으로 구면에 가깝도록 순정하기 위해서는 rounding 척도로 곡면의 전체를 동시에 변경하는 전역적 순정을 이용하거나, 지역적 순정에서도 유사한 rounding 결과를 줄 수 있는 새로운 곡면 순정 평가 척도를 개발해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서 제시한 곡면 순정 알고리즘에서는 연속적인 곡률을 이용하는 대신, 곡면에 대한 측정점의 순정을 위하여 이산적 곡률과 그 미분값을 이용하여 곡면 순정 평가 척도값을 계산했다. 따라서 연속적인 곡면을 구하지 않고 순정을 할 수 있어 계산량 감소의 효과를 얻을 수 있었다. 또한 곡면에 대한 자동적인 순정을 수행하기 위해 지역적인 순정의 과정을 순차적으로 반복함으로써 결과적으로 순정의 효과를 달성하게 되는 알고리즘을 사용했고, 한 번에 한 점을 이동하는 작업을 반복함으로써 한꺼번에 여러 점을 움직이는 최적화 과정에 비해 계산량이 감소하게 되는 이점을 얻을 수 있었다. 그리고 기존

의 연속적인 곡면 순정에서 사용하는 곡면 순정 평가 척도들을 이산적인 곡면 순정 평가 척도로 전환하여 적용한 결과에서 각 척도의 특성을 그대로 나타내는 긍정적인 결과를 보여주었고, 기존의 전역적인 순정에 비해서 갖는 지역적 순정의 형상 보존과 국부적 순정의 장점을 확인할 수 있었다.

추후 연구 과제로는 사용자의 복잡하고 다양한 설계 요구 사항을 정확히 반영하는 다른 곡면 순정 평가 척도들을 추가로 개발하는 것과 순정 계산 속도의 향상을 위하여 순정시에 비선형 최적화 방법을 사용하지 않고 분석적 해를 도출해내는 순정 알고리즘을 개발하는 것을 들 수 있다.

감사의 글

본 연구는 홍익대학교 교수연구연기(1999. 8.-2000. 7.) 중 연구되었다. 본 논문을 심사하시고 좋은 조언으로 논문의 질을 높여주시는 심사위원들께 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌

1. Kaufmann, E. and Klass, R., "Smoothing Surfaces Using Reflection Lines for Families of Splines", *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 6, pp. 312-316, Jul 1988.
2. Beier, K. and Chen, Y., "The Highlight Band, a Simplified Reflection Model for Interactive Smoothness Evaluation", *Designing Fair Curves and Surfaces*, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, pp. 213-230, 1994.
3. Poeschl, T., "Detecting Surface Irregularities Using Isophotes", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 1, No. 2, pp. 163-168, 1984.
4. Hagen, H. and Schulze, G., "Automatic Smoothing with Geometric Surface Patches", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 4, No. 3, pp. 231-235, 1987.
5. Ma, L. and Peng, Q., "Smoothing of Free-form Surfaces with Bezier Patches", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 12, No. 3, pp. 231-250, May 1995.
6. Moreton, H. P. and Sequin, C. H., "Minimum Variation Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design", *Designing Fair Curves and Surfaces*, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, pp. 123-159, 1994.
7. Lott, N. J. and Pullin, D. I., "Method for Fairing B-spline Surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 10, pp. 597-604, Dec 1988.
8. Ferguson, D. R., Frank, P. D. and Jones, A. K., "Surface Shape Control Using Constrained Optimization on the B-spline Representation", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 5, No. 2, pp. 87-103, 1988.

9. Roulier, J. and Rando, T., "Measures of Fairness for Curves and Surfaces", *Designing Fair Curves and Surfaces*, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, pp. 75-122, 1994.
10. Hahmann, S. and Konz, S., "Knot-removal Surface Fairing Using Search Strategies", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 131-138, Feb 1998.
11. Rando, T. and Roulier, J. A., "Designing Fair Parametric Surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 7, pp. 492-497, Sep 1991.
12. Choi, B. K., *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier, pp. 168-171, 1991.
13. Eck, M. and Jaspers, R., "Automatic Fairing of Point Sets", *Designing Fair Curves and Surfaces*, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, pp. 45-60, 1994.
14. Piegl, L. and Tiller, W., *The NURBS Book*, Springer, pp. 511-518, 1995.
15. Hohenberger, W. and Reuding, T., "Smoothing Rational B-spline Curves Using the Weights in an Optimization Procedure", *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 12, No. 8, pp. 837-848, Dec 1995.
16. Sauer, R., *Differenzgeometrie*. Springer-Verlag, New York, 1970.
17. Farin, G., *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide, 3rd ed.*, Academic Press, pp. 389-398, 1993.
18. Sapidis, N. and Farin, G., "Automatic Fairing Algorithm for B-spline Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 22, No. 2, pp. 121-129, Mar 1990.
19. 홍충성, 홍석용, 이현찬, "3D NURBS 곡선의 해석적 및 이산적 순정", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제 4권, 제 2호, pp. 127-138, 1999.

홍 석 용



1996년 홍익대학교 정보산업공학과 학사
 1998년 홍익대학교 정보산업공학과 석사
 1998년-현재 홍익대학교 정보산업공학과 박사과정
 관심분야: Geometric Modeling, Rapid Prototyping, Computer Graphics

이 현 찬



1978년 서울대학교 산업공학과 학사
 1980년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1988년 The University of Michigan 산업공학과 박사
 1980년-1983년 세아제강 기획실
 1988년-1991년 전자통신연구원 자동설계연구실 실장
 1991년-현재 홍익대학교 정보산업공학과 부교수
 관심분야: Geometric Modeling, Computer Graphics, Engineering Database, Information Systems