

임의의 점 군 데이터로부터 NURBS 곡면의 자동생성

유동진[#]

Automatic NURBS Surface Generation from Unorganized Point Cloud Data

Dong-Jin Yoo[#]

ABSTRACT

In this paper a new approach which combines implicit surface scheme and NURBS surface interpolation method is proposed in order to generate a complete surface model from unorganized point cloud data. In the method a base surface was generated by creating smooth implicit surface from the input point cloud data through which the actual surface would pass. The implicit surface was defined by a combination of shape functions including quadratic polynomial function, cubic polynomial functions and radial basis function using adaptive domain decomposition method. In this paper voxel data which can be extracted easily from the base implicit surface were used in order to generate rectangular net with good quality using the normal projection and smoothing scheme. After generating the interior points and tangential vectors in each rectangular region considering the required accuracy, the NURBS surface were constructed by interpolating the rectangular array of points using boundary tangential vectors which assure C^1 continuity between rectangular patches. The validity and effectiveness of this new approach was demonstrated by performing numerical experiments for the various types of point cloud data.

Key Words : NURBS surface(비 균일 유리 B-스플라인곡면), Unorganized point cloud data(임의의 점 군 데이터)
Implicit surface(음 함수 곡면)

1. 서론

임의의 점 군 데이터로부터 곡면을 생성하는 문제는 역 공학(reverse engineering), 컴퓨터원용설계(computer aided design), 컴퓨터그래픽스(computer graphics) 등의 분야에 있어서 매우 주요한 관심사항이기는 하나 지금까지는 이에 대한 체계적인 연구보고가 미흡했었다. 특히 3D 스캐너(scanner)와 같은 비 접촉식 측정장치의 발달로 비교적 적은 시간에 수백, 수천 만개에 이르는 점 데이터를 획득

할 수 있는 기술적 수준에 와 있지만 스캐너 시스템에 의하여 얻어진 점 군 데이터로부터 CAD, CAE, CAM 등의 후 처리를 위한 곡면데이터를 완성하기 위하여 엔지니어의 많은 경험과 노력이 요구되고 있는 것이 현실이다. 이와 관련해서 많은 상용코드들이 개발되어 사용되고는 있으나 곡면생성에 사용자의 많은 수작업이 개입되어야 하고 생성된 곡면의 품질에 대한 신뢰성부족 등으로 인하여 사용상에 많은 문제점이 있어 왔다. 본 연구에서는 점 군 데이터로부터 여러 분야에 실제 적용

☞ 접수일: 2006년 7월 18일; 게재승인일: 2006년 8월 8일
교신처자: 대진대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과
E-mail: djyoo@daejin.ac.kr Tel. (031) 539-2031

가능한 곡면데이터를 얻기 위하여 음 함수 곡면기법과 NURBS 곡면 보간법을 이용하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 음 함수 곡면기법¹⁻⁴은 3 차원 공간상에 존재하는 무수한 개수의 점 군 데이터로부터 형상을 재구성 하는 방법중의 하나로서 저자의 선행연구결과⁵⁻⁸를 통하여 대형 폴리곤 모델의 홀 메움 등에 성공적으로 적용된 바 있다. 이러한 음 함수 곡면기법을 이용하면 임의의 형상을 부드러운 단일곡면으로 표현하는 것이 가능할 뿐만 아니라 좌표값 및 미분값 등의 계산이 용이하기 때문에 NURBS 곡면으로의 변환 시 제반계산에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 본 논문에서는 임의의 점 군 데이터를 통과하는 곡면을 음 함수 곡면으로 표현한 후 음 함수 곡면을 가시화하는 과정에서 자연스럽게 추출할 수 있는 복셀(voxel) 데이터를 NURBS 곡면의 패치(patch)로 변환하는 방법을 제안하고 여러 모델에 대한 실험을 통해 제반 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 곡면의 수식적 표현

2.1 음 함수 곡면의 수식적 표현

본 연구에서는 임의의 점 군 데이터를 통과하는 부드러운 곡면을 하나의 새로운 음 함수 곡면으로 정의하는 방법을 사용하였다. 또한 음 함수 곡면의 보간 및 NURBS 곡면으로의 변환에 소요되는 시간을 단축시키기 위하여 다양한 형상함수를 선택적으로 사용하는 적응적 영역분할법⁸을 이용하였다. 적응적 영역분할법은 점 군이 점유하고 있는 3 차원 공간을 복수개의 영역으로 나눈 후 각 영역마다 서로 다른 형상함수를 사용하는 방법으로서 본 논문에서는 식(1)과 식(2) 및 식(3)과 같은 2 차 다항식과 3 차 다항식 및 레이디얼 기초함수(radial basis function)를 사용하였다.

$$f(\mathbf{x}) = w - (a_0 + a_1u + a_2v + a_3u^2 + a_4uv + a_5v^2) \quad (1)$$

$$f(\mathbf{x}) = w - (a_0 + a_1u + a_2v + a_3u^2 + a_4uv + a_5v^2 + a_6u^3 + a_7u^2v + a_8uv^2 + a_9v^3) \quad (2)$$

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\mathbf{x} - \mathbf{c}_j) + P(\mathbf{x}) \quad (3)$$

여기서,

$$\phi(\mathbf{x}) = |\mathbf{x}|^2 \log(|\mathbf{x}|)$$

$$P(\mathbf{x}) = P_0 + P_1x + P_2y + P_3z$$

이다.

곡면의 생성과정에 관한 자세한 수치해법은 저자의 선행연구⁵⁻⁸에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 생략하도록 한다. 임의의 점 군 데이터를 하나의 새로운 음 함수 곡면으로 정의한다는 것은 NURBS 곡면으로의 변환을 위한 기초곡면이 확보된다는 것을 의미한다. 또한 NURBS 곡면으로의 변환 시 반드시 필요한 패치의 구성점의 좌표값 및 경계곡선상에서의 접선벡터, 법선벡터 등의 계산이 부드러운 기초곡면상에서 이루어지므로 우수한 패치간 연속성을 기대할 수 있다.

2.2 NURBS 곡면의 수식적 표현

NURBS는 Non-Uniform Rational B-Spline의 약자로서 본 연구에서 사용한 NURBS 곡면 식은 식(4)와 같이 정의된다.⁹

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} \mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (4)$$

여기서,

$\mathbf{P}_{i,j}$: 곡면을 구성하는 조정점의 좌표

$p, q : u, v$ 방향의 차수

$n : u$ 방향의 조정점의 수 - 1

$m : v$ 방향의 조정점의 수 - 1

$N_{i,p}(u), N_{j,q}(v) : u, v$ 방향의 B-스플라인 블랜딩 함수

$w_{i,j}$: 조정점 $\mathbf{P}_{i,j}$ 의 가중치

이다.

식(4)와 같이 다항식의 비율(ratio) 형태로 표현되고 비 균일(non-uniform)한 노트값(knot value)과 B-스플라인 블랜딩 함수를 기본으로 하기 때문에 NURBS 곡면이라 불리운다. 각 블랜딩 함수는 노트값의 일정범위 내에서만 영향력을 발휘하기 때

문에 곡면에 대한 국부 수정이 용이하고 조정점의 개수와 무관하게 차수를 지정할 수 있다. 특히 가중치 w_{ij} 의 사용으로 자유곡면(free form surface)은 물론 구, 실린더, 타원체 등의 원추곡면을 오차 없이 정확히 나타낼 수 있고 적은 수의 조정점으로 복잡한 형태의 곡면생성이 용이하다. 또한 CAD 데이터의 표준포맷인 IGES, STEP 등으로의 전환이 정확하고 용이하게 때문에 타 CAD 시스템이나 CAE, CAM 시스템과의 연결(interface)에 전혀 문제점이 없다는 장점을 갖고 있다. 식(4)에서 $N_{i,p}(u)$ 와 $N_{j,q}(v)$ 는 B-스플라인 블랜딩 함수로서 다음과 같은 재귀함수로 정의된다.

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (5)$$

$$N_{j,q}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+q} - v_j} N_{j,q-1}(v) + \frac{v_{j+q+1} - v}{v_{j+q+1} - v_{j+1}} N_{j+1,q-1}(v) \quad (6)$$

식(5)와 식(6)의 u_i, v_j 는 노트벡터(knot vector)의 요소로서 다음과 같은 u, v 방향의 노트벡터를 구성한다.

$$\mathbf{U} = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_n, b, \dots, b\} \quad (7)$$

$$\mathbf{V} = \{c, \dots, c, v_{q+1}, \dots, v_m, d, \dots, d\} \quad (8)$$

본 연구에서는 식(4)로 표현되는 NURBS 곡면상의 3 차원 점의 좌표값 및 접선벡터 등을 구하기 위하여 Cox de Boor 알고리즘을 이용하였다.⁹

3. 음함수곡면으로부터 NURBS 곡면의 생성

점 군 데이터로부터 일차적으로 얻어진 음 함수곡면을 이용하여 NURBS 곡면을 생성하기 위해서 본 연구에서는 음 함수 곡면을 마칭큐브알고리즘(marching cube algorithm)에 의하여 가시화 하는 과정에서 추출해낸 복셀(voxel) 데이터를 이용하는 방법을 제안하고자 한다. 형상의 표면에 걸쳐 존재하는 복셀의 바깥 면들을 보간된 곡면에 수직 투영한 후 스무딩 과정을 거치면 NURBS 곡면을 구성하기 위한 사각형모양의 곡선망을 구할 수

있다. 하나의 사각형은 NURBS 곡면의 한 패치를 구성하게 되는데 사각형 내에서 허용오차를 고려하여 u, v 방향으로 구성점들을 배치 시킨 후 이 구성점들과 경계곡선상의 점들에서의 접선벡터를 이용하여 NURBS 곡면으로 보간한다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 u 방향으로 $S+1$ 개, v 방향으로 $T+1$ 개의 점들이 주어졌을 때 이 점들을 지나는 NURBS 곡면은 다음과 같은 u, v 두 방향으로의 B-스플라인 보간법에 의하여 구할 수 있다.⁹ u 방향으로의 B-스플라인 보간은 식(9)와 같이 $S+1$ 개의 구성점을 지나는 $T+1$ 개의 곡선을 구하는 문제로 된다.

$$\mathbf{Q}_{k,j} = \sum_{i=0}^{S+2} N_{i,p}(\bar{u}_k) \mathbf{P}_{i,j} \quad (9)$$

$$(0 \leq k \leq S, 0 \leq j \leq T)$$

여기서,

$$\bar{u}_0 = 0, \bar{u}_S = 1$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{|\mathbf{Q}_{k,j} - \mathbf{Q}_{k-1,j}|}}{d} \quad (1 \leq k \leq S-1)$$

$$d = \sum_{k=1}^S \sqrt{|\mathbf{Q}_{k,j} - \mathbf{Q}_{k-1,j}|}$$

이다.

본 연구에서는 3 차 B-스플라인 보간법을 이용하였는데 이 경우 식(9)는 식(10)과 같은 형태로 표현될 수 있다.⁹

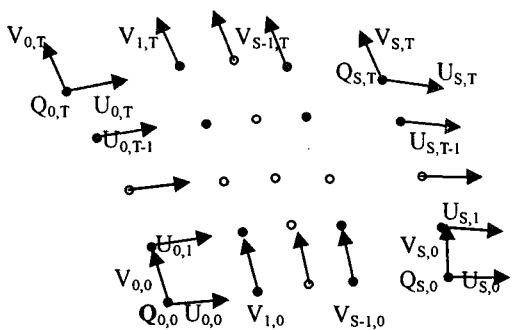


Fig. 1 NURBS surface interpolation

$$Q_{k,j} = N_{k,3}(\bar{u}_k)P_{k,j} + N_{k+1,3}(\bar{u}_k)P_{k+1,j} + N_{k+2,3}(\bar{u}_k)P_{k+2,j} \quad (10)$$

$$(1 \leq k \leq S-1)$$

식(10)은 식(11)과 같은 연립방정식의 해를 구하기 위한 행렬형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{1,j} - a_1 P_{1,j} \\ Q_{2,j} \\ \vdots \\ Q_{S-2,j} \\ Q_{S-1,j} - c_{S-1} P_{S+1,j} \end{bmatrix} = \quad (11)$$

$$\bar{v}_0 = 0, \bar{v}_T = 1$$

$$\bar{v}_k = \bar{v}_{k-1} + \frac{\sqrt{|P_{j,k} - P_{j,k-1}|}}{d}$$

$$(1 \leq k \leq T-1)$$

$$d = \sum_{k=1}^T \sqrt{|P_{j,k} - P_{j,k-1}|}$$

이다.

앞에서와 마찬가지로 3 차 B-스플라인 보간의 경우 식(12)는 식(13)과 같이 표현되고 최종적으로 식(14)와 같이 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{S-2} & b_{S-2} & c_{S-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{S-1} & b_{S-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{2,j} \\ P_{3,j} \\ \vdots \\ P_{S-1,j} \\ P_{S,j} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$a_k = N_{k,3}(\bar{u}_k), \quad b_k = N_{k+1,3}(\bar{u}_k), \quad c_k = N_{k+2,3}(\bar{u}_k)$$

$$P_{1,j} = \frac{u_4}{3} U_{0,j} + P_{0,j}$$

$$P_{S+1,j} = P_{S+2,j} - \frac{1-u_{S+2}}{3} U_{S,j}$$

이다.

u 방향으로의 보간에 의하여 구해진 조정점들을 구성점으로 하여 v 방향으로 다시 한번 보간함으로써 NURBS 곡면으로의 변환이 완성된다.

$$P_{j,k} = \sum_{i=0}^{T+2} N_{i,q}(\bar{v}_k) P'_{j,i} \quad (12)$$

$$(0 \leq k \leq T, 0 \leq j \leq S+2)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} P_{j,1} - a_1 P'_{j,1} \\ P_{j,2} \\ \vdots \\ P_{j,T-2} \\ P_{j,T-1} - c_{T-1} P'_{j,T+1} \end{bmatrix} = \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{S-2} & b_{S-2} & c_{S-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{S-1} & b_{S-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_{j,2} \\ P'_{j,3} \\ \vdots \\ P'_{j,T-1} \\ P'_{j,T} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$a_k = N_{k,3}(\bar{v}_k), \quad b_k = N_{k+1,3}(\bar{v}_k), \quad c_k = N_{k+2,3}(\bar{v}_k)$$

$$P'_{j,1} = \frac{v_4}{3} V_{j,0} + P'_{j,0}$$

$$P'_{j,T+1} = P'_{j,T+2} - \frac{1-v_{T+2}}{3} V_{j,T}$$

이다.

최종적으로 구해진 NURBS 곡면은 u 방향으로 $S+3$ 개, v 방향으로 $T+3$ 개의 조정점 $P'_{i,j}$ 을 갖게 되며 u , v 방향으로의 차수는 3 차이고 u , v 방향으로 각각 $S+7$, $T+7$ 개의 노트벡터를 갖게 된다. Fig. 2 는 점 군 데이터로부터 NURBS 곡면생성까지의 세부과정을 보여주고 있는 전체흐름도이다.

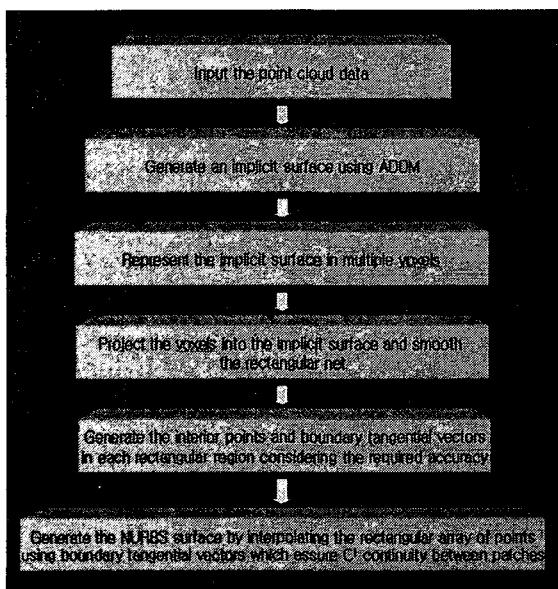


Fig. 2 Flow chart showing the generation of an NURBS surface

4. 적용 및 토론

본 연구에서 제안한 점 데이터로부터의 NURBS 곡면 자동생성 알고리즘의 효용성을 검증하기 위하여 실제 점 군 데이터를 이용하여 NURBS 곡면을 생성해 보았다. Fig. 3 은 372563 개의 점으로 구성된 Igea 모델¹⁰ 의 초기 점 데이터를 보여 주고 있다. 이 점 데이터를 일차적으로 음 함수 곡면으로 보간 한 후 마칭큐브알고리즘에 의하여 가시화한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 폴리곤 모델로 가시화한 곡면의 질이 매우 우수함을 확인할 수 있다. 이 음 함수 곡면은 NURBS 곡면으로의 변환 시 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 변환 과정의 각 단계에서 주요한 기초 곡면으로 활용 된다. 따라서 일차적으로 생성된 기초곡면의 질이 최종 NURBS 곡면의 질을 좌우

한다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 곡면의 연속성, 임의의 형상의 단일곡면으로의 처리 가능성, 좌표값 및 미분값 계산의 용이성 등 여러 장점 때문에 음 함수 곡면을 NURBS 곡면으로의 변환을 위한 기초곡면으로 채택하였다. Fig. 5(a) 는 Fig. 4 의 음 함수 곡면으로부터 생성된 복셀의 바깥 면들을 가시화한 것이다. 이 복셀의 크기는 최종 NURBS 곡면의 각 패치의 크기를 결정하는 주요 인자로서 사용자가 요구하는 대략적인 크기를 입력할 수 있도록 프로그램 하였다. Fig. 5(b) 는 복셀의 바깥 면의 각 절점들을 음 함수 곡면에 수직 투영한 후 스무딩한 후의 모습으로서 하나의 사각형은 NURBS 곡면의 한 패치를 구성하게 된다. Fig. 5(c) 는 사각형 내에서 u , v 방향으로 구성점을 배치 시킨 후의 모습으로서 NURBS 곡면 보간을 하기 위한 모든 데이터가 이 단계에서 만들어 진다. 최종적으로 완성된 NURBS 곡면을 IGES 곡면데이터 형식으로 변환한 후 CATIA™ V.5 에서 읽어 들인 결과를 Fig. 5(d) 에 나타내었다. 기대했던 바와 같이 초기의 점 군 데이터에 충실하고 패치간 연속성도 우수한 곡면을 비교적 적은 시간 내에 얻을 수 있었다. Table 1 에서 보는 바와 같이 최종곡면은 총 1442 개의 패치로 구성하였으며 음 함수 곡면 보간에서부터 NURBS 곡면 생성까지 IBM RS 43P 140 W/S 에서 15 분 30 초 정도가 소요되었다. 본 연구에서 제안한 제반 알고리즘의 신뢰성 및 확장성을 검증하기 위하여 좀 더 복잡한 모델에 대하여 실험을 해 보았다. Fig. 6 은 70368 개의 점으로 구성된 Bunny 모델¹¹ 로서 점의 수는 Igea 모델보다 작지만 목, 귀, 다리 등의 다소 복잡한 형상에서의 NURBS 곡면으로의 변환가능성을 알아보기 위하여 적용모델로 선정하였다. Fig. 7 은 음 함수 곡면으로 보간 한 후 폴리곤모델로 가시화한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 NURBS 곡면으로의 변환을 위한 기초곡면으로 사용되기에 충분한 연속성 및 정확성을 확보하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 8 은 복셀데이터 추출에서부터 NURBS 곡면생성까지의 각 단계를 보여주고 있는 그림으로서 Fig. 8(d) 의 최종 곡면은 3642 개의 패치로 구성하였으며 Table 2 에서 보는 바와 같이 음 함수 곡면 보간에서부터 NURBS 곡면 생성까지의 모든 계산에 IBM RS 43P 140 W/S 에서 4 분 15 초 정도가 소요되었다.

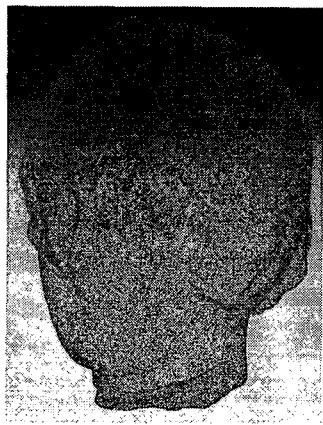


Fig. 3 Point cloud data of Igea model

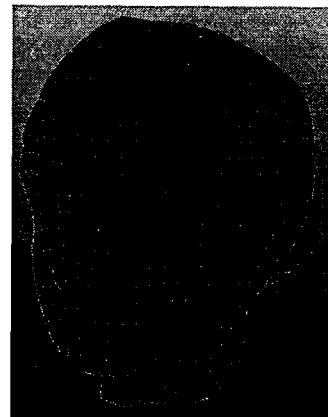


Fig. 5(b) Rectangular net of Igea model



Fig. 4 Generated implicit surface

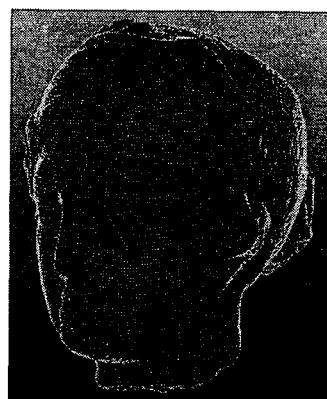


Fig. 5(c) Generated interior points to be interpolated

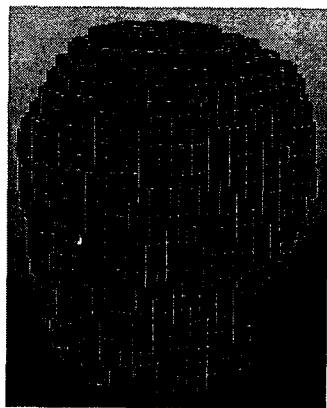


Fig. 5(a) Voxel data of Igea model

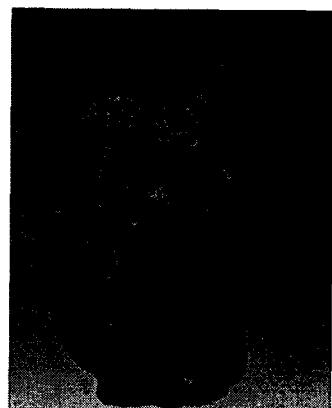


Fig. 5(d) NURBS surface of Igea model



Fig. 6 Point cloud data of Bunny model

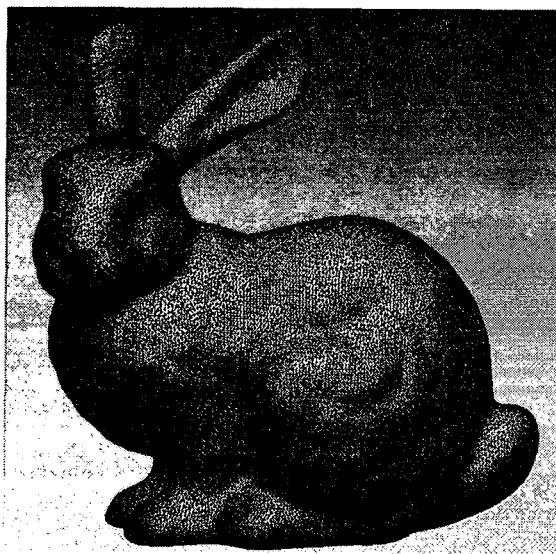


Fig. 7 Generated implicit surface

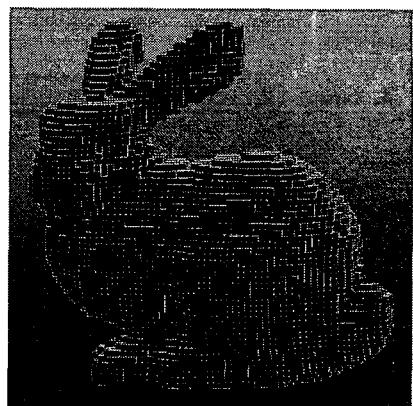


Fig. 8(a) Voxel data of Bunny model



Fig. 8(b) Rectangular net of Bunny model

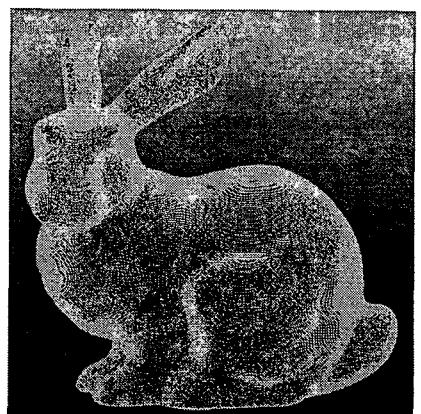


Fig. 8(c) Generated interior points to be interpolated

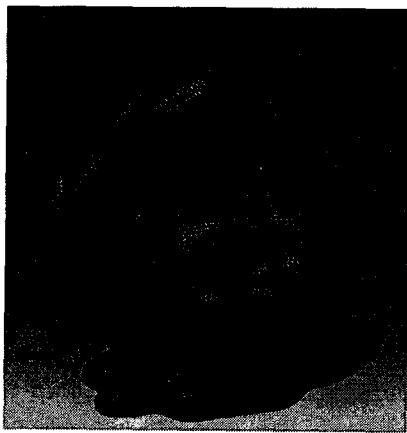


Fig. 8(d) NURBS surface of Bunny model

Table 1 Computational time measurements (IBM RS 43P 140 W/S)

Model	Number of points	Number of patches	Time(sec)		
			Implicit surface interpolation	Extraction of voxels	NURBS surface generation
Bunny	70,368	3,642	60	80	115
Igea	372,563	1,442	320	76	534

5. 결론

본 논문에서는 임의의 점 데이터로부터 NURBS 곡면을 자동 생성하는 알고리즘을 제안하였다. 점군 데이터로부터 직접 NURBS 곡면을 만드는 것은 쉽지 않으므로 과도기적인 곡면 형태로 음 함수 곡면을 이용하는 단계적인 방법을 제안하였다. 주어진 점군 데이터로부터 일차적으로 음 함수 곡면을 생성하고 이 생성된 음 함수 곡면을 가시화 하는 과정에서 추출된 복셀 데이터를 NURBS 곡면의 패치로 전환하는 방법을 제안하였으며 여러 실제 모델에 대한 실험을 통해 제안한 제반 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 각 패치간의 연속성 확보를 위하여 경계곡선상의 접선벡터를 고려한 NURBS 곡면보간법을 이용하였으며 생성된 곡면을 IGES 곡면데이터로 자동 변환하는 프로그램도 개발하여 실제 적용 가능성을 제시하였다. 본 연구에서는 형상의 특성을 고려하지 않은 가장 기본적인 NURBS 곡면 생성에 관한 기법을 다루었지만 향후에는 대상 물체의 용도와 특징형상을 고

려한 보다 지능적이고 일반적인 패치 구성 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Turk, G and O'Brien, J. F., "Modelling with implicit surfaces that interpolate," ACM Transactions on Graphics, Vol. 21, pp. 855-873, 2002.
2. Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C. and Evans, T. R., "Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions," In Proceedings of SIGGRAPH 2001, pp. 67-76, 2001.
3. Kojekine, N., Hagiwara, I. and Savchenko, V., "Software tools using CSRBFs for processing scattered data," Computer & Graphics, Vol. 27, pp. 311-319, 2003.
4. Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G and Seidel, H. P., "Multi-level partition of unity implicits," ACM Transactions on Graphics(TOG), Vol. 22, pp. 463-470, 2003.
5. Yoo, D. J., "A Study on the Automatic Elimination of Free Edge for Sheet Metal Forming Analysis," Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 13, No. 7, pp. 614-622, 2004.
6. Yoo, D. J., "A Study on Filling Holes of the Polygon Model using Implicit Surface Scheme," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 107-114, 2005.
7. Yoo, D. J., "A Study on Filling Holes of Large Polygon Model using Implicit Surface Scheme and Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 174-184, 2006.
8. Yoo, D. J., "Shape Reconstruction from Unorganized Cloud of Point using Adaptive Domain Decomposition Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, pp. 89-99, 2006.
9. Piegl, L. and Tiller, W., "The NURBS Book," Springer, pp. 361-405, 1995.
10. <http://www.cyberware.com/samples>
11. Stanford 3D scanning repository
<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>