

적응적 영역분할법을 이용한 임의의 점군으로부터의 형상 재구성

유동진[#]

Shape Reconstruction from Unorganized Cloud of Points using Adaptive Domain Decomposition Method

Dong-Jin Yoo[#]

ABSTRACT

In this paper a new shape reconstruction method that allows us to construct surface models from very large sets of points is presented. In this method the global domain of interest is divided into smaller domains where the problem can be solved locally. These local solutions of subdivided domains are blended together according to weighting coefficients to obtain a global solution using partition of unity function. The suggested approach gives us considerable flexibility in the choice of local shape functions which depend on the local shape complexity and desired accuracy. At each domain, a quadratic polynomial function is created that fits the points in the domain. If the approximation is not accurate enough, other higher order functions including cubic polynomial function and RBF(Radial Basis Function) are used. This adaptive selection of local shape functions offers robust and efficient solution to a great variety of shape reconstruction problems.

Key Words : Shape reconstruction(형상재구성), Polynomial function(다항식함수), Radial basis function(레이디얼 기초 함수), Adaptive domain decomposition method(적응적 영역분할법)

1. 서론

CAD(Computer Aided Design) 시스템 또는 3D 스캐너(scanner) 시스템으로부터 생성된 폴리곤 모델에는 무수한 홀(hole) 및 폴리곤(polygon)간의 겹침(overlap)이 존재하기 때문에 폴리곤 편집기 또는 전용 CAD 시스템에 의하여 폴리곤 모델로부터 이런 결함들을 제거해야만 CAM(Computer Aided Manufacturing) 시스템과 CAE(Computer Aided

Engineering) 시스템 및 패속조형(Rapid Prototyping) 등의 후처리를 위한 입력데이터로 이용될 수 있다. 대부분의 CAD 시스템에서 이러한 폴리곤 모델의 결함을 제거하기 위한 편집기능을 지원하고는 있으나 엔지니어의 많은 노력과 작업시간이 요구되고 있는 것이 현실이다. 이런 관점에서 최근 CAD 및 CG(Computer Graphics) 분야에서는 3 차원 상에 존재하는 무수한 임의의 점군으로부터 형상을 재구성하려는 일련의 연구가 진행되어 왔다.¹⁻⁴ 폴리

접수일: 2006 년 1 월 25 일; 게재승인일: 2006 년 6 월 7 일

[#] 교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과

E-mail djyoo@daejin.ac.kr Tel. (031) 539-2031

곤 모델도 다양한 방법에 의하여 임의의 점군으로의 변환이 용이하기 때문에 임의의 점군으로부터 형상을 재생성 해낼 수만 있다면 모든 문제가 일시에 해소 될 수 있는 것이다. 일차적으로 연구 보고된 저자의 선행 연구결과^{5,6}를 통하여 음함수 곡면기법에 기초한 영역분할법이 대형 폴리곤 모델의 홀 메움에 효율적이라는 것을 확인 할 수 있었으나 보간 해야 할 점의 수가 수십만 개에 이르면 곡면의 보간 및 가시화를 위한 폴리곤 재생성에 많은 시간이 소요되는 등 방법의 개선이 필요했었다. 음함수 곡면 기법을 대형 폴리곤모델에 응용하려는 시도는 Carr³ 및 Kojekine⁷ 등에 의하여 이루어져 왔으나 이들의 연구는 주로 음함수곡면의 계수를 풀기 위한 연립방정식의 수치해석적 접근에 관한 것이었다. 영역분할법에 의한 음함수 곡면보간에 관한 연구는 Ohtake⁸ 등에 의하여 시도 되었는데 이들은 복수개의 다양한 형태의 이차함수에 가중치를 부여하여 전체 곡면식을 구성하는 MPU(Multi-level Partition of Unity) 방법을 제안하여 다양한 데이터의 음함수곡면 보간에 적용하였다. 본 연구에서는 보간 하고자 하는 점군이 차지하고 있는 공간을 복수개의 영역으로 나눈 후 각 영역마다 서로 다른 형상함수(shape function)를 선택적으로 사용하므로써 곡면보간 및 형상 재구성에 소요되는 시간을 획기적으로 줄일 수 있는 적응적 영역분할법을 제안 하고자 한다. 아울러 본 연구의 효용성 및 확장성을 확인 해보기 위하여 CAM 과 CAE 및 RP 분야에서 널리 활용되고 있는 오프셋(offset)곡면생성과 유한요소의 자동생성 및 복셀(voxel) 생성 등의 주요 응용분야에 본 연구결과를 적용해 보고자 한다.

2. 형상함수의 수식적 표현

2.1 2차 다항식에 의한 형상함수의 표현

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 영역의 중심을 원점으로 하는 지역좌표계(U,V,W)에 대하여 영역내의 모든 점들을 근사하게 통과하는 곡면을 식(1)과 같은 2차 다항식으로 표현할 수 있다.

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

여기서,

\mathbf{X} : 임의의 점의 좌표값

u,v,w : 지역좌표계(U,V,W)에 대한 \mathbf{X} 의 좌표값

a_i : 선형회귀분석을 통하여 구해야 할 계수

이다.

계수 a_i 를 구하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 일반적인 선형최소자승법을 이용하였다.

$$w = a_0g_0 + a_1g_1 + a_2g_2 + a_3g_3 + a_4g_4 + a_5g_5 \quad (2)$$

식(2)를 행렬형태로 표현하면

$$\{\mathbf{w}\} = [\mathbf{G}] \{\mathbf{A}\} \quad (3)$$

로 되고 계수 a_i 는 식(4)와 같은 연립방정식의 해를 구하므로써 얻어질 수 있다.⁹

$$[\mathbf{G}]^T [\mathbf{G}] \{\mathbf{A}\} = [\mathbf{G}]^T \{\mathbf{W}\} \quad (4)$$

여기서,

$$[\mathbf{G}] = \begin{bmatrix} g_{01} & g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} & g_{51} \\ g_{02} & g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} & g_{52} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{0n} & g_{1n} & g_{2n} & g_{3n} & g_{4n} & g_{5n} \end{bmatrix}$$

$$\{\mathbf{A}\}^T = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5]$$

$$\{\mathbf{W}\}^T = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_n]$$

$$g_0 : 1 \quad g_3 : u^2$$

$$g_1 : u \quad g_4 : uv$$

$$g_2 : v \quad g_5 : v^2$$

g_{ij} : j 번째 점에서의 g_i 함수값

n : 영역내의 점의 갯수

이다.

본 연구에서는 지역좌표계 W의 방향을 영역내의

점들에서의 법선벡터들의 평균벡터방향으로 하였다. 각 점들에서의 법선벡터들은 초기 STL 파일 또는 폴리곤모델 데이터로부터 쉽게 얻을 수 있으며 법선벡터의 정보가 없는 경우에는 영역내의 점들을 근사하게 통과하는 평면의 방정식으로부터 W의 방향을 구할 수 있다. 일반적인 평면의 방정식은 식(5)와 같은 벡터방정식으로 표현된다.

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{u} = p \quad (5)$$

여기서,

- r: 평면상의 임의의 점의 위치벡터
- u: 평면에 수직인 단위벡터
- p: 좌표계 원점과 평면과의 수직거리

이다.

모든 점들과 근사 평면과의 수직거리의 제곱의 합이 최소가 되게 다중선형회귀분석기법을 적용하면 식(6)과 같은 연립방정식을 구성할 수 있고 이 방정식의 해를 구함으로써 각 영역에서의 지역좌표계 W의 방향을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} n & -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i \\ \sum x_i & -\sum x_i^2 & -\sum y_i x_i & -\sum z_i x_i \\ \sum y_i & -\sum x_i y_i & -\sum y_i^2 & -\sum z_i y_i \\ \sum z_i & -\sum x_i z_i & -\sum y_i z_i & -\sum z_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

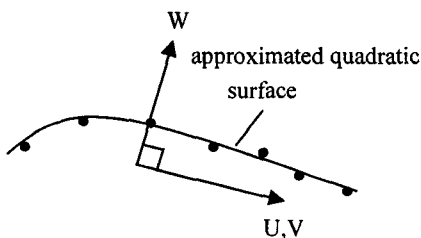


Fig. 1 Local fit of a quadratic polynomial

2.2 3차 다항식에 의한 형상함수의 표현

Fig. 2에서 보는 바와 같이 2차 다항식 곡면으로

영역내의 모든 점들을 주어진 허용오차 이내로 근사화 하기 어려운 경우에는 식(7)과 같은 3차 다항식 곡면을 이용하였다.

$$f(\mathbf{X}) = w - (a_0 + a_1 u + a_2 v + a_3 u^2 + a_4 uv + a_5 v^2 + a_6 u^3 + a_7 u^2 v + a_8 uv^2 + a_9 v^3) \quad (7)$$

계수 a_i 는 앞절에서와 같이 선형최소자승법을 이용하여 구하였다. 계수가 10개로 늘어남에 따라 앞절에서의 [G]와 {A}^T 및 g_i 는 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$[\mathbf{G}] = \begin{bmatrix} g_{01} & g_{11} & \cdots & \cdots & g_{81} & g_{91} \\ g_{02} & g_{12} & \cdots & \cdots & g_{82} & g_{92} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{0n} & g_{1n} & \cdots & \cdots & g_{8n} & g_{9n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\{\mathbf{A}\}^T = [a_0 \quad a_1 \quad \cdots \quad \cdots \quad a_8 \quad a_9] \quad (9)$$

여기서,

- $g_0 : 1$
- $g_1 : u$
- $g_2 : v$
- $g_3 : u^2$
- $g_4 : uv$
- $g_5 : v^2$
- $g_6 : u^3$
- $g_7 : u^2 v$
- $g_8 : uv^2$
- $g_9 : v^3$

이다.

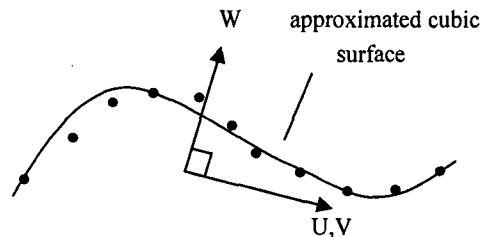


Fig. 2 Local fit of a cubic polynomial

식(1)과 식(7)에서 보는 바와 같이 구해야 할 계수

가 2 차 다항식곡면의 경우에는 6 개이고 3 차 다항식곡면의 경우에는 10 개 이므로 곡면의 차수를 하나 올림으로써 구해야 할 계수가 1.67 배 정도 증가하지만 한 개의 3 차 다항식곡면으로 2 개의 2 차 다항식곡면을 대체할 수만 있어도 계산시간 및 메모리 등에서 더 효율적이므로 어떤 영역에서 2 차 다항식곡면으로 허용오차 이내의 근사화가 실패할 경우 영역을 팔분체로 나누어 분할해 들어가는 옥트리(octree)기법에 의한 종래의 영역분할법⁸에 비하여 보간 및 가시화를 위한 제반계산에 소요되는 시간을 절감할 수 있다.

2.3 레이디얼 기초함수에 의한 형상함수의 표현

본 연구에서는 2 차 다항식곡면과 3 차 다항식곡면으로 영역내의 점들을 허용오차 이내로 근사화하는데 실패하였을 경우에는 식(10)과 같은 레이디얼 기초함수를 기반으로 하는 음함수곡면식을 이용하여 영역내의 점들을 보간하였다. 음함수곡면의 수식적 표현은 저자의 선행연구^{5,6}에 자세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 간략히 설명하도록 하겠다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \phi(\mathbf{x}-\mathbf{c}_j) + P(\mathbf{x}) \quad (10)$$

여기서,

- \mathbf{x} : 임의의 점의 좌표값(x,y,z)
- N : 구속점수
- \mathbf{c}_j : 구속 점들의 좌표 값
- ϕ : 기초함수
- λ_j : 구해야 할 각 점에서의 가중치
- $P(\mathbf{x})$: 구해야 할 일차 다항식
($P(\mathbf{x}) = P_0 + P_1x + P_2y + P_3z$)

이다.

식(10)에서 ϕ 는 보간을 위한 기초함수로서 본 연구에서는 박판 보간에 많이 사용되고 있는 다음과 같은 레이디얼 기초 함수(radial basis function)를 사용하였다.

$$\phi(\mathbf{x}) = |\mathbf{x}|^2 \log(|\mathbf{x}|) \quad (11)$$

식(10)에 생성하고자 하는 하나의 음함수 곡면이 폴리곤 모델의 모든 점들을 통과 해야 하고 오프셋(offset) 점들에서 양 또는 음의 스칼라 함수 값을 갖는다는 구속조건을 대입하면 식(12) 와 같은 행렬형태의 선형연립방정식계를 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \dots & \phi_N & 1 & C_1^x & C_1^y & C_1^z \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \dots & \phi_{2N} & 1 & C_2^x & C_2^y & C_2^z \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_n & \phi_{n2} & \phi_{n3} & \dots & \phi_{nN} & 1 & C_n^x & C_n^y & C_n^z \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1^x & C_2^x & C_3^x & \dots & C_N^x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1^y & C_2^y & C_3^y & \dots & C_N^y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1^z & C_2^z & C_3^z & \dots & C_N^z & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,

$$\phi_{ij} = \phi(\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_j)$$

이다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 식(12)의 h_1 부터 h_n 까지 n 개의 점에서의 함수값을 0 으로 놓고 폴리곤 모델상에 존재하지 않는 h_{n+1} 부터 h_N 까지 N-n 개의 점에서의 함수 값을 임의의 양의 값으로 놓은 후에 연립방정식을 풀면 각 점에서의 가중치 λ_j 와 일차 다항식의 계수 P_i 를 구할 수 있다.

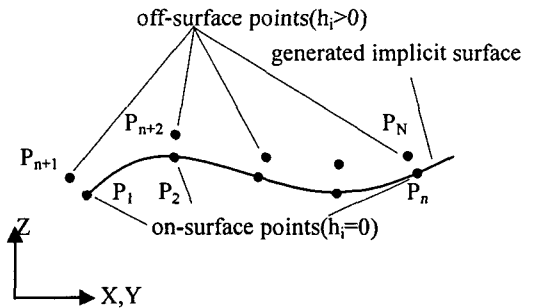


Fig. 3 Local fit of a radial basis function

3. 적응적 영역분할법을 이용한 형상의 재구성

적응적 영역분할법은 Fig.4 에서 보는 바와 같이 보간 대상이 되는 점들이 점유하고 있는 3 차원 공간을 다수의 영역으로 분할하여 각 영역에서의 곡면방정식을 구한 다음 적절한 혼합함수(blending function)에 의하여 전체 곡면방정식을 구성하는 방법으로서 3 차원 공간상에 불규칙하게 산재되어 있는 수십만, 수백만개의 점 군에 대해서도 적용이 가능할 뿐만 아니라 보간 및 가시화에 소요되는 계산시간을 획기적으로 단축 할 수 있다.

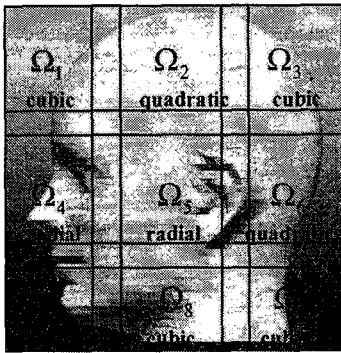


Fig. 4 Schematic diagram illustrating the concept of adaptive domain decomposition method

처음 단계에서는 모든 영역에 대하여 2 차 다항식 곡면을 이용하여 근사화한 후 영역내의 모든 점들과 생성된 곡면과의 최대 수직거리를 구하여 이 거리가 주어진 허용오차를 넘게 되면 3 차 다항식 곡면을 이용하여 재시도하게 되고, 그래도 허용오차를 넘게 되면 최종적으로 레이디얼기초함수에 의한 음함수 곡면보간을 수행하게 된다. 각 영역의 점의 갯수 및 영역간의 겹침 정도는 본 방법의 주요 인자로서 한 영역당 2 차 다항식곡면의 경우에는 10 개 이상, 3 차 다항식곡면의 경우에는 15 개 이상, 음함수곡면의 경우에는 30 개 이상의 점들이 할당되도록 제한된 범위 내에서 각 영역의 크기의 확대 및 축소가 가능하도록 하였다. 영역간 겹침 정도는 선행연구결과⁶를 통하여 확인된 10%에서 20% 정도로 설정하였다. 분할된 각 영역에서의 곡면방정식이 구해지면 혼합함수에 의하여 전체

곡면방정식을 구성할 수 있다.⁶

4. 적용 및 응용

본 연구를 통하여 제안된 적응적 영역분할법을 이용한 형상 재구성 알고리즘의 효율성 및 타당성을 알아보기 위하여 다양한 점군 데이터에 대하여 개발된 프로그램을 적용해 보았다. Fig. 5 는 4 만여 개의 점 군으로 구성된 휴면모델을 본 연구에서 제안한 다양한 형상 함수에 의하여 재구성해 본 결과로서 Fig. 5(a)는 모든 영역을 2 차 다항식 곡면으로만 구성한 경우인데 영역간의 경계선이 보일 정도로 영역간 연속성이 좋지 않음을 알 수 있으며 Fig. 5(b)는 전체 영역을 3 차 다항식 곡면으로만 나타낸 경우인데 2 차 다항식 곡면의 경우와 비교해보면 영역간 연속성이 많이 개선되어 있음을 알 수 있다. 그러나 곡률의 변화가 심한 일부 부위에서의 보간 결과는 여전히 좋지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 모든 영역을 레이디얼 음함수 곡면으로 나타낸 경우인데 전체적으로 양호한 보간 결과를 보여주고 있다. Table 1 에서 보는 바와 같이 같은 개수의 영역으로 분할 하였을 때 선택된 형상 함수의 종류에 따라 보간 및 가시화에 소요되는 시간에 큰 차이가 있음을 볼 수 있는데 시간에 차이가 나는 만큼 보간 결과의 질도 많은 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 각 영역마다 적절한 형상 함수를 선택적으로 사용하여 보간한 결과를 보여주고 있는데 생성된 면의 질도 우수하고 제반 계산에 소요되는 시간도 획기적으로 단축시킬 수 있었다. 전체공간을 400 개의 영역으로 분할하여 계산 하였으며 Fig. 5(d)의 경우 근사화 시 허용오차는 10^{-2} mm 로 하였다. 물론 2 차 및 3 차 다항식 곡면의 경우 영역을 더 세분화하면 근사된 면의 질도 개선됨을 확인할 수 있었다. Fig. 6(a)는 공간을 1400 개의 영역으로 분할하고 2 차 다항식 곡면을 적용한 결과를 보여주고 있고 Fig. 6(b)는 공간을 1400 개의 영역으로 분할하고 3 차 다항식 곡면을 적용한 결과를 보여주고 있는데 분할된 영역의 개수가 증가함에 따라 보간된 면의 질은 개선되는 경향을 나타내나 곡률의 변화가 심한 부위의 면의 질은 여전히 좋지 않았고 계산 시간 또한 영역의 개수에 비례적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 1400 개의 영역으로 나누고 2 차다항식곡면을 적용한 경우와 400 개의 영역

으로 나누고 영역마다 적절한 형상함수를 선택적으로 사용한 경우를 비교해 보면 보간된 면의 질과 소요시간 모든 면에서 본 연구에서 제안한 적응적 영역분할법이 더 효율적이라는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법에 의하면 Fig. 5(d)와 Fig. 6(c) 에서 보는 바와 같이 분할영역의 개수와 보간된 면의 질과는 거의 무관함을 알 수 있으며 계산시간에 있어서만 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 물론 계산시간을 최소화하는 분할 영역의 개수를 찾기 위한 시도도 생각해 볼 수는 있으나 입력된 점군 데이터의 형상의 복잡성과 요구되는 근사오차 등 여러 인자들에 의하여 최적의 영역 개수를 사전에 결정한다는 것은 다소 어려울 것으로 판단된다. 그러나 Table 1 에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한 적응적 영역분할법과 모든 영역을 레이디얼 음함수곡면으로만 표현한 종래의 영역분할법⁶ 과 계산시간을 비교해 보면 400 개의 영역으로 분할한 경우 497 초가 단축되어 71% 향상되었으며 1400 개의 영역으로 분할한 경우에는 498 초가 단축되어 55% 향상된 것을 볼 수 있으며 2 차 다항식곡면이나 3 차 다항식곡면으로 표현한 경우에는 계산시간은 본 방법에 비해 다소 적게 걸리는 반면에 Fig. 5 와 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 곡률의 변화가 심한 부위의 면의 질이 좋지 않은 것을 감안하면 본 연구에서 제안한 적응적 영역분할법의 타당성을 확인할 수 있었다. Fig.7 은 3D 스캐너를 이용하여 기존의 조각상을 여러 방향에서 측정하여 얻은 점군 데이터로부터 형상을 재구성한 결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 초기 STL 파일의 폴리곤 데이터로부터 얻은 점 데이터를 보여주고 있는데 소년상의 경우는 368746 개의 절점, 소녀상의 경우는 647642 개의 절점으로 구성하였다. 소년상의 경우는 보간 과정에 5 분, 가시화를 위한 폴리곤 재생성에 11 분, 소녀상의 경우는 보간 과정에 7 분 30 초, 폴리곤 재생성에 13 분 정도가 소요되었다. Fig. 7(b)의 최종 모델은 소년상의 경우는 985784 개의 삼각형 요소로, 소녀상의 경우는 828468 개의 삼각형 요소로 가시화 하였다. 본 연구에서는 보간곡면의 가시화를 위하여 저자의 선행연구⁶ 에서 제안한 마칭 큐브 알고리즘에 요소의 세분화(element refinement) 및 스무딩(smoothing)기법을 접목한 방법을 사용하였다. 결과에서 보는 바와 같이 초기 STL 파일의 폴리곤 모델에 존재하던 무수한 홀 및 겹쳐 있던

삼각형 요소들을 점군 데이터를 이용하여 보간된 하나의 곡면으로부터 폴리곤모델을 새롭게 재생성함으로써 자동으로 제거할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 형상재구성방법은 다양한 용도로 사용되어질 수 있는데 Fig. 8 은 적응적 영역분할법을 이용하여 휴먼모델을 오프셋 한 결과를 보여 주고 있다. 오프셋은 CAM¹⁰ 과 패속조형 및 CG 등 여러 응용분야에서 활용되는 중요한 기능으로 Fig. 8 은 원래의 폴리곤모델로부터 각 점들을 원하는 거리만큼 오프셋하고 오프셋 된 점 군 데이터를 보간하여 곡면을 재생성한 후 가시화한 결과를 보여주고 있다. Fig. 9 는 CAE 의 한 분야인 스템핑형 해석을 위한 틀요소의 오프셋 결과를 보여주고 있는데 Fig. 9(b) 는 종래의 요소에 의한 오프셋 결과를 Fig. 9(c) 는 본 연구에서 제안한 곡면보간에 의한 오프셋결과를 나타내고 있다. 요소간의 연결성(connectivity)이 완전하지 않은 경우, 종래의 요소에 의한 오프셋에서는 Fig. 9(b) 에서 보는 바와 같이 요소간에 간격 및 겹침이 발생하는 반면에 곡면보간에 의한 오프셋에서는 모든 점군 데이터를 이용하여 하나의 곡면을 재생성하고 이 곡면으로부터 각 절점에서의 법선 벡터를 정확히 구할 수 있으므로 Fig. 9(c) 에서 보는 바와 같이 결함이 없는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 10 은 본 연구결과와 다른 적용 예를 보여주고 있는데 보간 된 곡면을 삼각형요소로 가시화 하지 않고 정육면체 복셀(voxel)로 가시화 한 것이다. 형상을 복셀로 표현하는 기법은 CG 및 패속조형¹¹ 등 에서 널리 사용되는 방법으로서 본 연구에서는 생성된 곡면을 마칭큐브알고리즘에 의하여 가시화하는 과정에서 자연스럽게 복셀데이터를 추출해 내는 것이 가능할 뿐만 아니라 복셀크기를 변화시킴으로써 형상의 정밀도를 용이하게 조절할 수 있다. 본 연구 결과는 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 CAE 에서 널리 사용 되고 있는 사각형 유한요소의 자동생성에도 응용될 수 있다. 형상 표면에 걸쳐 존재하는 복셀의 바깥 면들을 보간된 곡면에 수직 투영한 후 세분화 및 스무딩 과정을 거치면 유한 요소 해석이 가능할 정도의 질 좋은 사각형요소를 용이하게 얻을 수 있다. Fig. 12 는 170 여 만개의 삼각형망으로 구성된 초기 STL 파일을 이용하여 형상을 재구성해 본 결과를 보여주고 있는데 상용 CAD 시스템의 폴리곤 편집기 또는 RP 전용 폴리곤 편집기를 이용해도 완전한 폴리곤모델을 생성하기가

매우 힘들 정도로 복잡한 형상의 큰 홀도 많고 삼각형간의 겹침도 많은 모델이나 본 연구를 통하여 개발된 프로그램을 이용하여 30 여분 만에 RP 장비의 입력데이터로 사용될 수 있는 완전한 솔리드 (solid) 형태의 STL 파일을 재생성 할 수 있었다.

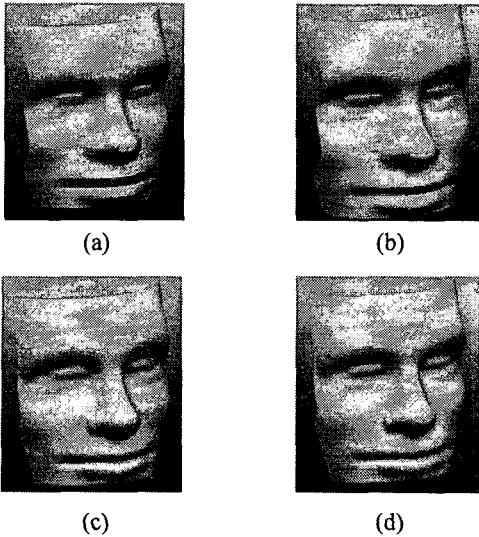


Fig. 5 Shape reconstruction of human head model (Number of domains : 400) : (a) quadratic, (b) cubic, (c) radial, (d) adaptive

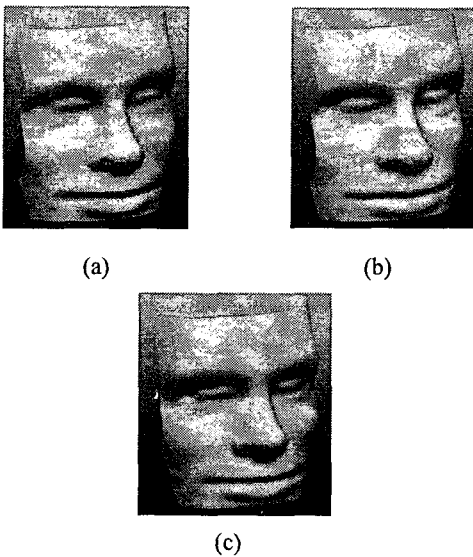


Fig. 6 Shape reconstruction of human head model (Number of domains : 1400) : (a) quadratic, (b) cubic, (c) adaptive



Fig. 7(a) Shape reconstruction of sculpture model (raw unorganized cloud of points)

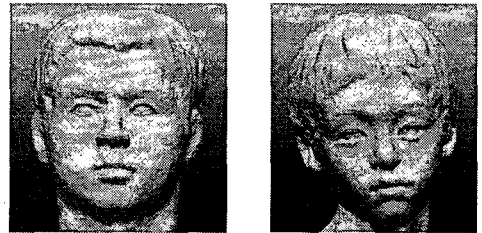


Fig. 7(b) Shape reconstruction of sculpture model (reconstructed sculpture model)

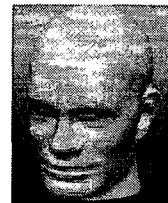


Fig. 8(a) Offset of human model (offset : 0 mm)



Fig. 8(b) Offset of human model (offset : 4 mm)



Fig. 8(c) Offset of human model (offset : 8 mm)

Table 1 Computational time measurements for fitting and polygonization
(H/W : IBM RS 43P 140 W/S)

Shape function	Number of domains	Computing time(sec)
Quadratic polynomial	400	120
	1400	368
Cubic polynomial	400	124
	1400	380
Radial implicit	400	700
	1400	910
Adaptive shape function	400	203
	1400	412



Fig. 9(a) Offsets of stamping die(overview of die)



Fig. 9(b) Offsets of stamping die(mesh offset)

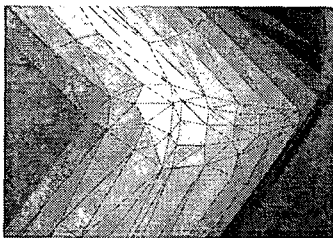


Fig. 9(c) Offsets of stamping die(surface offset)

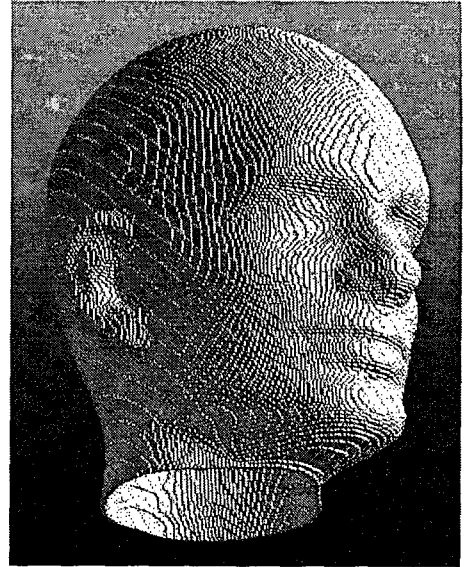


Fig. 10 Voxel representation of human model

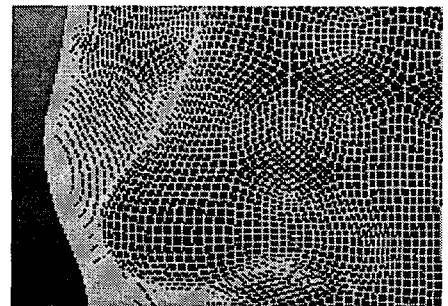
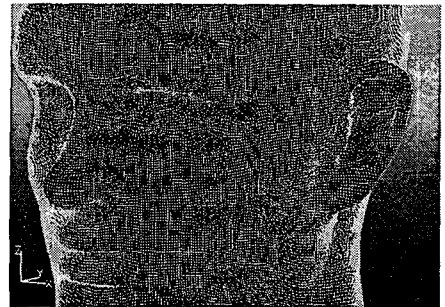


Fig. 11 Automatic generation of quadrilateral elements

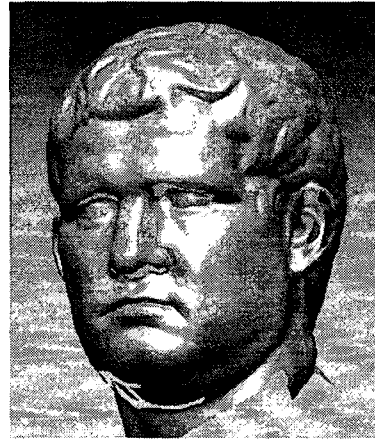
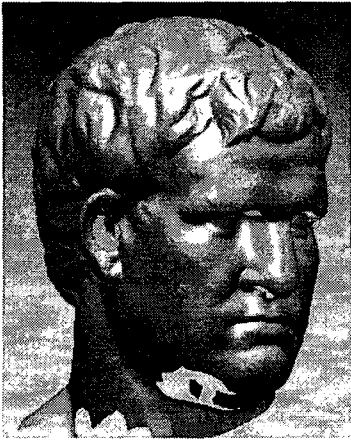


Fig. 12(a) Shape reconstruction from the large number of scanned points (incomplete STL model)

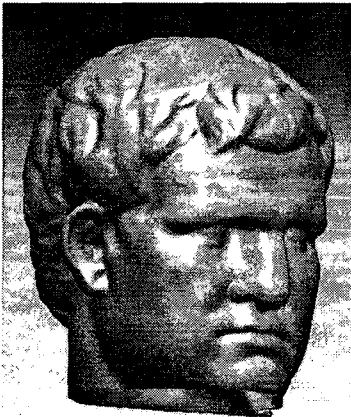


Fig. 12(b) Shape reconstruction from the large number of scanned points (reconstructed complete model)

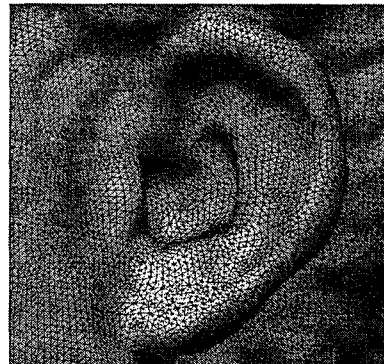
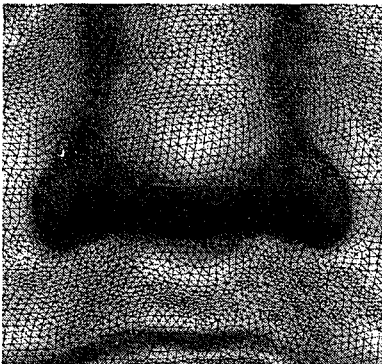


Fig. 12(c) Shape reconstruction from the large number of scanned points (detailed view of nose and ear)

본 연구의 객관적 검증 및 효용성을 재확인해 보기 위하여 많이 알려져 있는 데이터들^{12,13}에 대하여 제안한 방법을 이용하여 형상을 재구성한 결과를 Fig. 13 과 Fig. 14 에 정리해 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 다양한 형상의 점 군 데이터에 대하여 본 연구에서 제안한 적응적 영역분할법이 성공적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

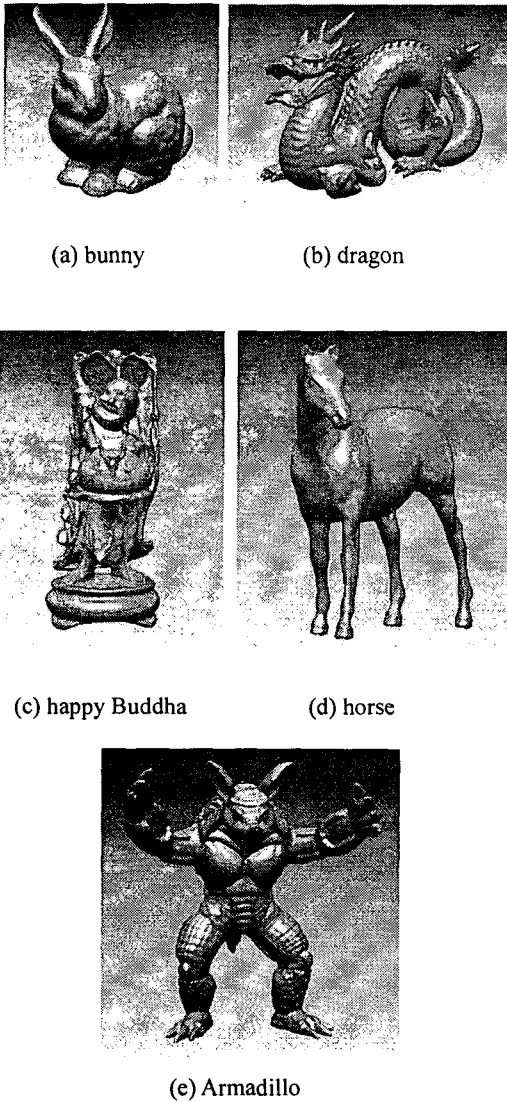


Fig. 13 Reconstructed shapes from the cloud of points of Stanford 3D scanning repository

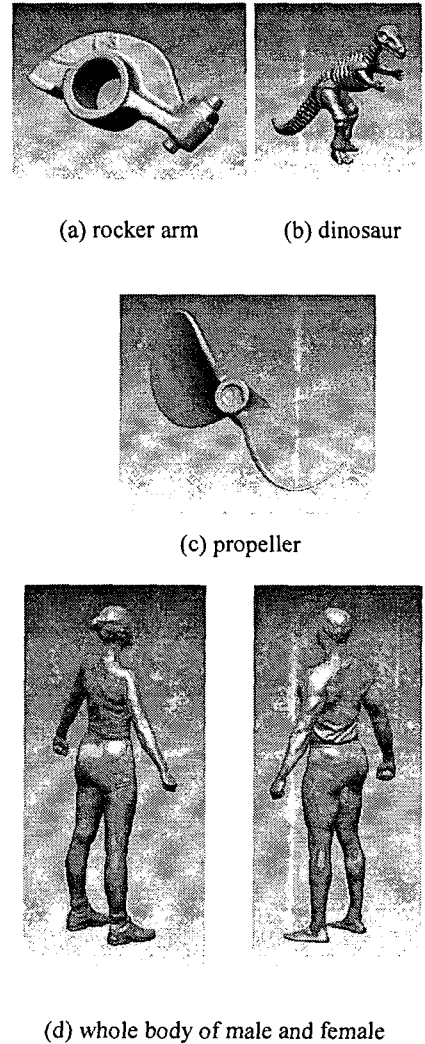


Fig. 14 Reconstructed shapes from the cloud of points of Cyberware

Table 2 는 본 연구에서 제안한 적응적영역분할법과 기존의 레이디얼 기초함수에 의한 영역분할법과의 정량적인 비교분석을 위하여 본 논문에서 사용한 모든 모델에 대하여 계산 결과를 정리해 놓은 것으로서 표에서 보는 바와 같이 점 데이터의 분포특성에 따라 약간의 차이는 있으나 60% 에서 70% 정도의 계산 시간 단축이 가능함을 확인할 수 있었다.

Table 2 Computational time measurements (IBM RS 43P 140 W/S)

Model	Number of points	T _{DMM} (sec)	T _{ADMM} (sec)	(T _{DMM} - T _{ADMM}) / T _{DMM} X 100 (%)
sculpture model(girl)	647,642	3,886	1,230	68.3
agripa	1,700,000	5,200	1,800	65.4
bunny	34,611	293	95	67.6
dragon	433,375	3,320	1,146	65.5
buddha	543,650	4,268	1,439	66.3
horse	96,966	830	275	66.8
armadillo	172,972	1,250	448	64.1
rocker arm	60,264	450	170	62.2
dinosaur	112,384	845	320	62.1
propeller	171135	890	345	61.2
male body	366,964	3,050	920	69.8
female body	263,980	2,550	810	68.2

5. 결론

본 연구에서는 임의의 점군으로부터 하나의 곡면을 다양한 형상함수에 기초한 적응적 영역분할법을 이용하여 생성한 후 여러 가지화방법에 의하여 형상을 재구성하는 방법을 제안하였다. 2 차 다항식과 3 차 다항식 및 레이디얼 기초함수 등 다양한 형상함수를 영역마다 선택적으로 사용함으로써 곡면의 보간 및 가지화를 위한 형상재구성에 소요되는 시간을 획기적으로 줄일 수 있었다. 아울러 음함수 곡면의 가지화 방법중의 하나인 마칭큐브 알고리즘을 이용하여 3 차원 복셀데이터를 효율적으로 추출해내는 방법을 제안하였으며 수직투영과 세분화 및 스무딩 과정을 통하여 양질의 사각형요소 자동 생성하는 방법도 제시하였다.

후 기

이 논문은 2006 학년도 대전대학교 학술 연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Floater, M. S. and Iske, A. A., "Multistep scattered data interpolation using compactly supported radial basis functions," Journal of Comp. Appl. Math., Vol.

73, pp. 65-78, 1996.

2. Turk, G. and O'Brien, J. F., "Variational implicit surfaces," Tech. Rep. GIT-GVU-99-15, Georgia Institute of Technology, 1999.

3. 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.

4. Lazzaro, D. and Montefusco, L. B., "Radial basis functions for multivariate interpolation of large scattered data sets," Journal of Computational and Applied Math., Vol. 140, pp. 521-536, 2002.

5. 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.

6. 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.

7. Kojekine, N., Hagiwara, I. and Savchenko, V., "Software tools using CSRBFs for processing scattered data," Computer & Graphics, Vol. 27, pp. 311-319, 2003.

8. 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.

9. Steven, C. C. and Raymond, P. C., "Numerical Method for Engineers," McGraw Hill, 2002.

10. Kim, S. J. and Yang, M. Y., "Offset of STL Model Generated from Solid Model," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 202-211, 2005.

11. Lim, T. W., Park, S. H., Yang, D. Y., Yi, S. W. and Kong, H. J., "Development of Contour Offset algorithm in RP Process for Fabricating Nano-Precision Features," Journal of the Korean Society of Precision Eng., Vol. 21, No. 6, pp. 160-166, 2004.

12. Stanford 3D scanning repository (<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>)

13. <http://www.cyberware.com/samples>