

음함수 곡면기법과 영역 분할법을 이용한 대형 폴리곤 모델의 홀 메움에 관한 연구

유동진[#]

A Study on Filling Holes of Large Polygon Model using Implicit Surface Scheme and Domain Decomposition Method

Dong-Jin Yoo[#]

ABSTRACT

In order to fill the holes with complex shapes in the large polygon model, a new approach which is based on the implicit surface interpolation method combined with domain decomposition method is presented. In the present study, a surface is constructed by creating smooth implicit surface from the incomplete polygon model through which the surface should pass. In the method an implicit surface is defined by a radial basis function, a continuous scalar-valued function over the domain R^3 . The generated surface is the set of all points at which this scalar function takes on the value zero and is created by placing zero-valued constraints at the vertices of the polygon model. In this paper the well-known domain decomposition method is used in order to treat the large polygon model. The global domain of interest is divided into smaller domains where the problem can be solved locally. LU decomposition method is used to solve a set of small local problems and their local solutions are combined together using the weighting coefficients to obtain a global solution. In order to show the validity of the present study, various hole fillings are carried out for the large and complex polygon model of arbitrary topology.

Key Words : Hole-filling(홀 메움), Implicit surface(음함수 곡면), Radial basis function(레이디얼 기초 함수), Domain decomposition method(영역 분할법)

1. 서론

홀 메움(hole filling)과정은 폴리곤 모델을 다루는 많은 분야에서 반드시 거쳐야 할 필수적인 단계로서 유한요소 모델의 경우 원치 않던 홀이 존재하게 되면 CAE 과정에서의 해석 자체를 불가능하게 하고 컴퓨터 그래픽스(CG), 역 공학(reverse

engineering), 쾌속 조형(rapid prototyping)등을 위한 폴리곤 모델에 있어서의 홀은 형상모델링 또는 형상가공상에 많은 문제점을 발생시키므로 유한 요소 모델, 폴리곤 모델에 존재하는 홀은 반드시 제거 되어야 한다. 최근 CG 분야에서는 3 차원 상에 존재하는 무수한 점 군으로부터 하나의 음함수 곡면(implicit surface)을 생성함으로써 다양한 형태의

* 접수일: 2005년 4월 22일; 게재승인일: 2005년 11월 14일

교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과

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

홀을 동시에 메우려는 일련의 연구가 진행되어 왔다.^{1,4} 저자에 의하여 이미 연구 보고된 단성 유한 요소 해석과 트림곡면에 의한 방법도⁵ 다양한 형태의 홀 메움에 적용이 가능하지만 홀의 크기가 증가하면 유한요소 해석을 위한 요소수가 증가하게 되고 따라서 장성 행렬의 크기도 급증하게 되므로 계산시간, 프로그램 작성 난이도 등 여러 면에서 볼 때 음함수 곡면 기법에 의한 방법이 더 효율적이라고 할 수 있다. 일차적으로 연구 보고된 저자의 선행 연구결과⁶를 통하여 음함수 곡면 기법이 폴리곤 모델의 홀 메움에 효율적이라는 것을 확인할 수 있었으나 대형 폴리곤 모델을 다루기에는 한계가 있었으며 새롭게 생성된 폴리곤들의 형상이 홀 주위의 폴리곤 모델의 형상과 많은 차이가 나는 등 방법의 개선이 필요 하였다. 음함수 곡면 기법을 대형 폴리곤 모델에 응용하려는 시도는 여러 연구가 들에 의하여 다각적으로 이루어져 왔다. Carr³ 등은 Beatson 이 제안한 fast multipole method 를 이용하여 대형 폴리곤 모델을 음함수 곡면화 하는 연구를 수행하여 다양한 데이터에 성공적으로 적용 하였으나 계산시간이 다소 많이 소요되고 알고리즘이 수학적으로 다소 복잡하여 프로그래밍이 용이하지 않다는 단점이 있다. Kojekine⁷ 등은 음함수 곡면의 계수를 풀기 위한 연립 방정식의 행렬을 대각지배 행렬로 변환하여 계산시간 단축 및 메모리 저장에 있어 효율성을 증대시키려 하였으나 폴리곤 모델을 구성하는 절점들의 분포가 불균일 해지면 해가 강건하지 못하다는 단점이 있다. Ohtake⁸ 등은 복수개의 다양한 형태의 이차 함수에 가중치를 부여하여 전체 곡면식을 구성하는 MPU(multi-level partition of unity) 방법을 제안하여 다양한 데이터의 음함수 곡면 보간에 적용하였다. 본 연구에서는 유한요소 모델 또는 폴리곤 모델에 존재하는 다양한 형태의 홀을 자동으로 메우기 위하여 음함수 곡면 기법과 영역 분할법을 이용하여 폴리곤 모델의 모든 절점들을 통과하는 하나의 곡면을 생성한 후 음함수 곡면의 가시화 방법중의 하나인 마칭큐브알고리즘(marching cube algorithm)과 요소 세분화 기법 및 스무딩(smoothing)을 이용하여 완전하고 양질의 형상을 가진 폴리곤 모델을 재 생성하는 새로운 방법을 제안 하고자 한다.

2. 음함수 곡면의 수식적 표현

본 연구에서는 폴리곤 모델에 산재 되어 있는 많은 홀들을 한번에 메우기 위하여 폴리곤 모델의 모든 점들을 통과하는 부드러운 곡면을 하나의 새로운 음함수 곡면으로 정의 하는 방법을 제안하였다. 일반적인 음함수 곡면식은 다음과 같이 정의 된다^{2,3}

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

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

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

식(1)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 다음과 같은 식(3)을 구할 수 있다.

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

여기서,

$$h_i = f(\mathbf{c}_i) \quad (1 \leq i \leq N)$$

이다.

식(3)에서 h_i 는 i 번째 점에서 $f(\mathbf{x})$ 가 갖는 스칼라 함수 값으로서 식(4)와 같이 그 점이 곡면 상에 놓여 있다면 0의 값을 아닌 경우에는 양 또는 음의 값을 갖게 된다.

$$h_i = f(\mathbf{c}_i) = 0 \quad i = 1, \dots, n \text{ (on-surface points)} \quad (4a)$$

$$h_i = f(\mathbf{c}_i) \neq 0 \quad i = n+1, \dots, N \text{ (off-surface points)} \quad (4b)$$

아울러 각 점에서의 가중치 λ_j 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.³

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^x = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^y = \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^z = 0 \quad (5)$$

홀을 포함하는 폴리곤 모델의 모든 점들을 통과하는 부드러운 음함수 곡면을 얻기 위해서 모든 점들에 대하여 식(3)부터 식(5)까지의 구속조건식을 식(1)에 적용하면 다음과 같은 행렬 형태의 선형 연립 방정식 계를 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \dots & \phi_n & 1 & C_1^x & C_1^y & C_1^z & \lambda_1 \\ \phi_{n+1} & \phi_{n+2} & \phi_{n+3} & \dots & \phi_{n+n} & 1 & C_2^x & C_2^y & C_2^z & \lambda_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_n & \phi_{n+1} & \phi_{n+2} & \dots & \phi_{n+n} & 1 & C_N^x & C_N^y & C_N^z & \lambda_N \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_0 \\ C_1^x & C_2^x & C_3^x & \dots & C_N^x & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ C_1^y & C_2^y & C_3^y & \dots & C_N^y & 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 \\ C_1^z & C_2^z & C_3^z & \dots & C_N^z & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

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

Fig. 1에서 보는 바와 같이 식(6)의 h_1 부터 h_n 까지 n 개의 점에서의 함수 값을 0으로 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.

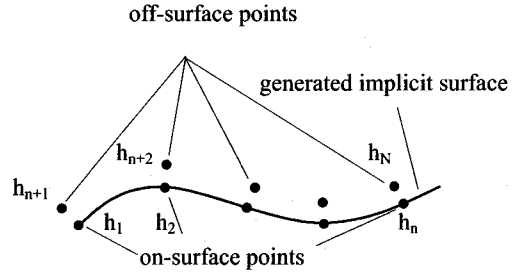


Fig. 1 Generation of implicit surface

3. 영역 분할법을 이용한 폴리곤 모델의 홀 메움

3.1 영역 분할법에 의한 국부 음함수 곡면의 생성

영역 분할법은 Fig.2에서 보는 바와 같이 폴리곤 모델이 점유하고 있는 3차원 공간을 다수의 영역으로 분할하여 각 영역에서의 해를 구한다음 적절한 혼합함수(blending function)에 의하여 전체 해를 구하는 방법으로서 수십만, 수백만개의 폴리곤으로 구성된 대형 모델에 대해서도 적용이 가능할 뿐만 아니라 보간 및 가시화를 위한 제반 계산에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있다.

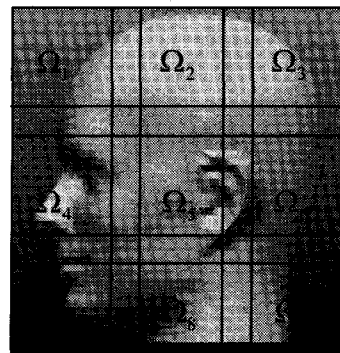


Fig. 2 Schematic diagram illustrating the concept of domain decomposition method

각 영역의 점의 개수 및 영역간의 겹침 정도는 본 방법의 성패를 결정 짓는 주요한 인자로서 본 연

구에서는 각 영역의 점의 개수 및 영역 간 겹침 정도를 적절히 조절 할 수 있도록 제한된 범위 내에서 각 영역의 크기의 확대 및 축소가 가능하게 하였다. 각 영역의 크기가 정해지고 각 영역에 보간 되어야 할 폴리곤 모델의 점들이 할당되면 2절에서 언급된 방법을 이용하여 각 영역에서의 음함수 곡면 식을 구하게 된다.

3.2 혼합함수에 의한 전체 음함수 곡면의 생성

각 영역에서의 음함수 곡면식이 구해지면 적절한 혼합함수에 의하여 전체 음함수 곡면 식을 구할 수 있는데 혼합함수는 전체 음함수 곡면 식의 영역간 연속성을 결정짓는 주요한 인자로서 본 연구에서는 영역간에 C^2 이상의 연속성이 보장되도록 다음과 같은 혼합함수를 사용하였다.

$$d_i(\mathbf{P}) = 1 - \prod_{r \in x,y,z} \frac{4(\mathbf{P}_r - \mathbf{S}_r)(\mathbf{T}_r - \mathbf{P}_r)}{(\mathbf{T}_r - \mathbf{S}_r)^2} \quad (7a)$$

$$W_i(\mathbf{P}) = -6d_i^5 + 15d_i^4 - 10d_i^3 + 1 \quad (7b)$$

여기서,

S: 각 영역의 최소 x,y,z 값

T: 각 영역의 최대 x,y,z 값

P: 구하고자 하는 점의 좌표값

W_i : i 번째 영역의 가중치

어떤 점 **P**가 i 번째 영역의 정 중앙에 있으면 d_i 의 값은 0 이 되고 W_i 의 값은 1 이 되며 점 **P**가 i 번째 영역의 경계면상에 있으면 d_i 의 값은 1 이 되고 W_i 의 값은 0 이 된다. 즉 점 **P**가 i 번째 영역의 중앙에 있으면 i 번째 해에 의한 영향이 가장 크다는 의미이고, 점 **P**가 경계면상에 있으면 i 번째 해에 의한 영향이 없다는 것을 뜻한다. 전체 음함수 곡면 식은 다음과 같이 각 영역의 음함수 곡면 식에 가중치를 곱한 후 전체 가중치의 합으로 나눈 형태로 표현 될 수 있다.

$$F(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^{ND} f_i(\mathbf{P})w_i(\mathbf{P}) \quad (8a)$$

$$w_i(\mathbf{P}) = \frac{W_i(\mathbf{P})}{\sum_{j=1}^{ND} W_j(\mathbf{P})} \quad (8b)$$

(ND : number of domain)

3.3 전체 음함수 곡면에 의한 폴리곤 모델의 생성

폴리곤 모델이 식(8)과 같이 하나의 음함수 곡면으로 정의 되었으므로 사용자의 요구에 의하여 여러 형태의 가시화가 가능하다. 본 연구에서는 음함수 곡면의 가시화 방법으로 널리 사용되고 있는 마칭 큐브 알고리즘(marching cube algorithm)과 요소의 세분화 및 스무딩(smoothing)을 통하여 홀 등의 불완전한 요소를 제거하는 것은 물론이고 양질의 요소를 재생성 함으로써 다양한 용도로의 적용도 가능하도록 하였다. 마칭 큐브 알고리즘은 음함수 곡면이 정의 되어 있는 공간을 작은 직육면체 또는 정육면체로 나눈 후 각 코너점에서의 함수값을 구하여 전부가 양 또는 음이면 지나가고 양 과 음의 값이 혼재 되어 있는 경우에는 적절한 방법에 의하여 폴리곤을 구성하는 방법이다.

generated polygons

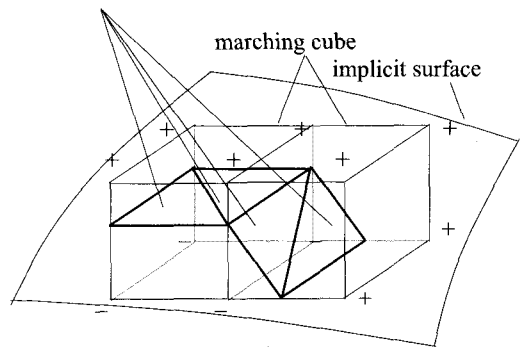


Fig. 3 Schematic diagram illustrating the concept of marching cube algorithm

직육면체의 크기는 생성되는 폴리곤의 크기와 비례하므로 보간된 음함수 곡면을 정밀하게 표현하려면 직육면체의 크기를 작게 해야 하는데 이는 계산시간을 증가 시키는 큰 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 마칭 큐브 알고리즘에 의하여 개략적인 폴리곤을 생성하고 요소의 스무딩 및 세분화를 통하여 정밀도 및 요소의 질을 동시에 향상시키는 방법을 제안하였다. 마칭 큐브 알고리즘에 의하여 생성된 폴리곤들은 요소의 질 관점에서 보면 바람직하지 못한 형상들을 갖고 있다. 폴리곤들의 질을 향상시키기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 각 절점들을 각 절점과 연결된 폴리곤들의 무게중심으로 이동시키는 방법을 사용하였다.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n A_i C_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (9)$$

여기서,

- P : 절점의 새로운 위치
- A_i : i 번째 요소의 면적
- C_i : i 번째 요소의 무게중심
- n : 연결된 요소의 개수

식(9)에 의하여 각 절점들을 재위치 시킨 후 한 삼각형 요소를 네 개의 새로운 삼각형 요소로 세분화 시킨 후 각 절점들을 원래의 음함수 곡면에 수직 투영 시킴으로써 폴리곤 모델은 점차 부드러운 음함수 곡면의 형상으로 변화하게 된다. 이러한 과정은 사용자가 요구하는 형상의 정밀도를 만족할 때 까지 반복된다.

4. 결과 및 토론

본 연구를 통하여 제안된 음함수 곡면과 영역 분할법을 이용한 대형 폴리곤 모델의 홀 메움 알고리즘의 효율성 및 타당성을 검증하기 위하여 개발한 프로그램을 이용하여 다양한 폴리곤 모델에 대하여 해석을 해 보았다. Table 1 에서 보는 바와 같이 본 연구의 주요 부분인 음함수 곡면보간 및 폴리곤 생성프로그램은 IBM RS/6000 워크스테이션에서 C 언어로 작성하였으며 생성된 폴리곤 모델

의 가시화를 위한 프로그램은 PC 에서 Visual C++ 언어와 OpenGL 을 이용하여 작성하였다. Fig. 4 는 초기 폴리곤모델의 입력으로부터 음함수 곡면생성까지의 세부 과정을 보여주고 있는 전체 흐름도이고 Fig.5 는 정의된 음함수곡면으로부터 마칭큐브 알고리즘과 스무딩 및 세분화 작업을 통하여 가시화를 위한 폴리곤모델을 생성하는 과정을 보여주고 있다.

Table 1 Configuration of developed system

Classification	Hardware	Software	
		O/S	language
Reconstruction & polygonization	IBM RS / 6000	AIX	C
	200MHZ Power CPU		
	128MB RAM		
Visualization	Pentium IV 1.7 GHz	WINDOWS XP	Visual C ++
	512MB RAM		& OpenGL

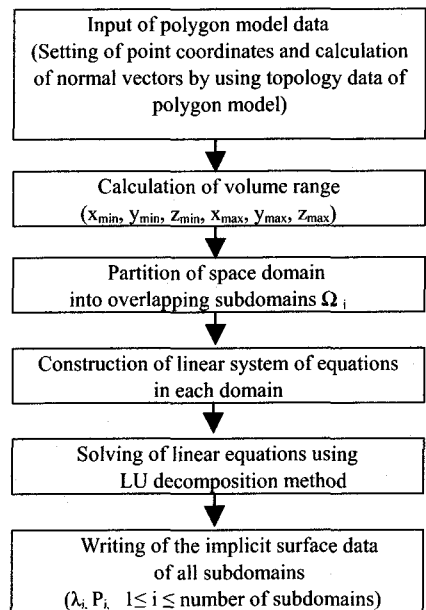


Fig. 4 Overall flow of generation of an implicit surface

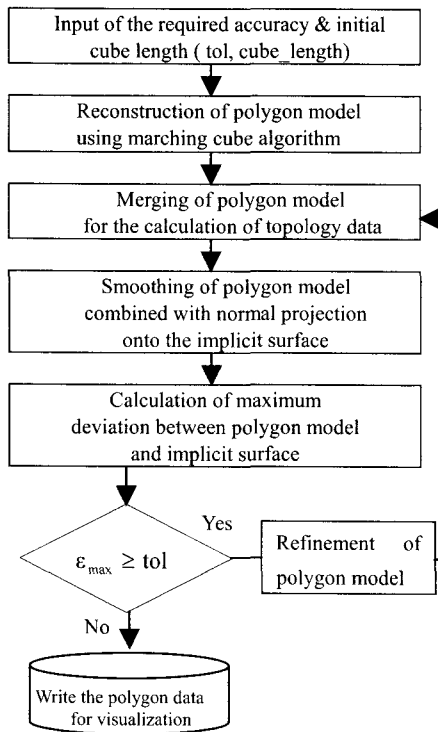
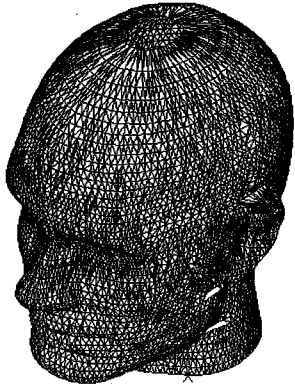


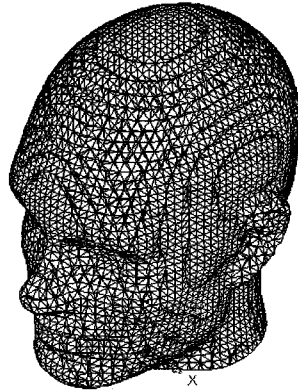
Fig. 5 Overall flow of reconstruction of polygon model

Fig. 6 은 여러 개의 내부 홀이 존재하는 휴먼모델로서 Fig. 6(a)는 홀이 메우어지기 전의 모습이며 Fig. 6(b)는 기존의 폴리곤 모델의 모든 절점들을 구속조건으로 해서 생성된 음함수 곡면에 마칭큐브 알고리즘을 이용하여 폴리곤을 생성한 결과이다. 산재되어 있던 홀들은 다 메우어져 있으나 요소의 질 측면에서 보면 좋지 않은 형상을 가진 요소들이 많이 존재 하고 있다. Fig. 6(c)는 스무딩(smoothing)을 한 후의 결과로서 유효요소 모델로 활용될 수 있을 정도로 요소들의 질이 개선 되어 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 6(d)는 한 삼각요소를 네 개의 삼각요소로 분할하고 각 절점들을 음함수 곡면에 수직 투영 시킨 후 스무딩 한 후의 모습으로서 요소의 질은 물론이고 가시화된 형상의 정밀도도 향상된 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(e)는 귀 부분만 확대해 본 그림인데 원래의 폴리곤 모델에 비하여 형상의 정밀도 및 부드러움

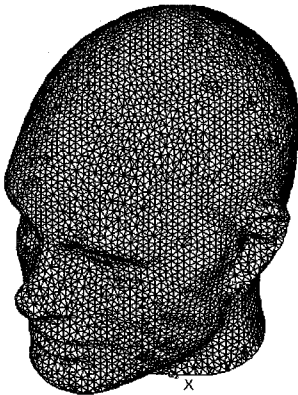
의 정도가 많이 개선되어 있는 것을 볼 수 있다. 폴리곤모델은 7363 개의 절점 및 14562 개의 요소로 구성되어 있어 기존의 방법을 이용해서는 보간 자체가 불가능한 경우이나 영역 분할법에 의하여 보간 및 폴리곤 생성에 소요되는 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있었다. 본 예에서는 원래의 공간을 총 633 개의 영역으로 분할하여 계산하였으며 IBM RS 6000 워크스테이션에서 보간 과정에 55 초 폴리곤 생성에 113 초 정도가 소요되었다. 본 연구를 통하여 많은 계산을 해 본 결과 영역마다 30 여 개 이상의 절점이 할당되면 보간 결과가 양호함을 확인할 수 있었고 최대 300 여 개 이상은 넘지 않도록 영역의 크기를 조절하였다. 일부 영역에 과도한 양의 절점이 할당되면 계산시간이 비약적으로 증가 하므로 적절한 개수의 보간 점 할당이 이루어지도록 영역의 크기를 자동으로 확대, 축소 할 수 있게 프로그램 하였다. Fig. 7 은 영역간 겹침 정도가 전체 해에 주는 영향을 알아보기 위하여 계산해 본 결과인데 Fig. 7(a)는 영역간에 겹침이 없을 때의 결과로서 영역간의 경계선이 육안으로 구별될 정도로 보간 결과가 좋지 않음을 확인할 수 있었으며 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(d) 에서와 같이 겹침 양이 증가 할수록 영역간 연속성이 향상됨을 알 수 있었다. 원래의 폴리곤 모델의 특성에 따라 다소 다른 경향을 보일 수도 있으나 대략 10% 정도의 영역간 겹침이 양호한 보간 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 8(a)는 홀이 메우어지기 전의 폴리곤 모델을 보여주고 있는데 총 306835 개의 요소와 154246 개의 절점으로 구성되어 있는 대형 폴리곤 모델로서 본 연구에서 제안한 제반 알고리즘의 신뢰성 및 확장성을 확인해 보기 위하여 해석을 수행하였다. Fig. 8(b)는 마칭 큐브 알고리즘에 의하여 일차적으로 개략적인 폴리곤 모델을 생성하고 세분화 및 스무딩을 수행 한 후의 최종 모습을 보여 주고 있는데 공간을 총 3398 개의 영역으로 분할하여 계산하였으며 보간과정에 8 분, 폴리곤 재생성에 16 분 정도가 소요되었다. 최종적으로 가시화된 모델은 680480 개의 요소와 340945 개의 절점으로 구성 하였다. Fig. 9 에서 보는 바와 같이 불규칙하게 산재 되어 있던 다수의 홀들이 성공적으로 메우어져 있으며 형상의 부드러움 또한 원래 폴리곤 모델에 비하여 개선되어 있음을 확인할 수 있었다.



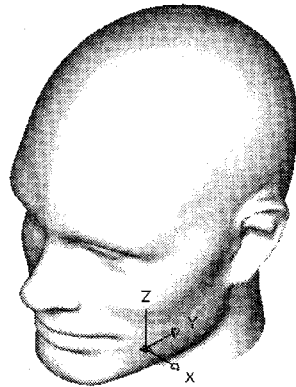
(a) before the hole filling



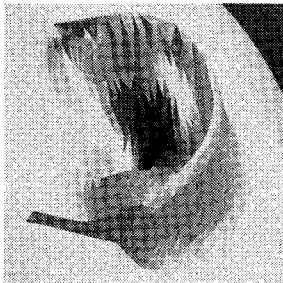
(b) generation of polygon model using marching cube algorithm from the generated implicit surface



(c) smoothed polygon model by the relocation of vertices



(d) view of polygon model after refinement combined with normal projection onto the implicit surface

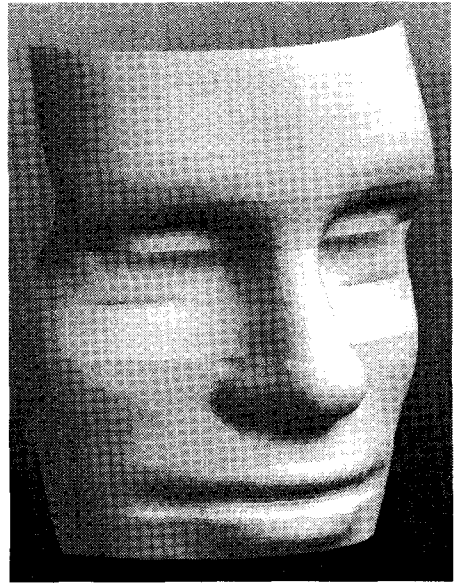


(e) detail view of ear

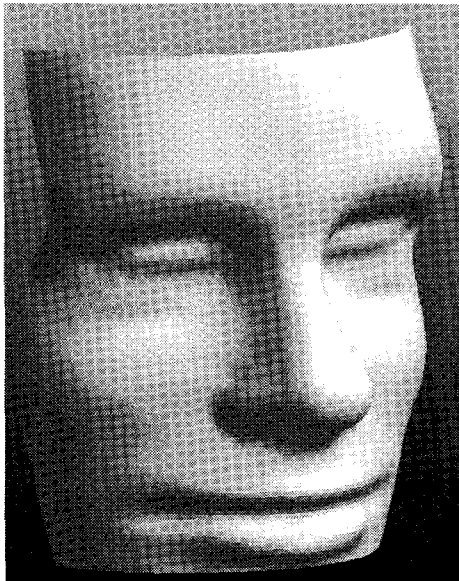
Fig. 6 Filling of hole in the case of human head model



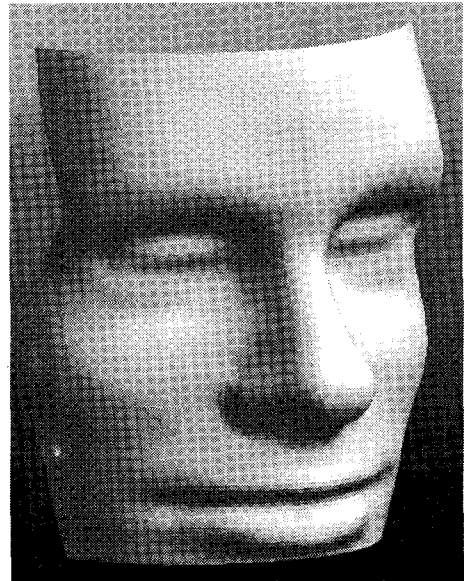
(a) overlap factor : 0%



(b) overlap factor : 5%



(c) overlap factor : 15%



(d) overlap factor : 25%

Fig. 7 The effect of the size of overlapping zones on the results of interpolation

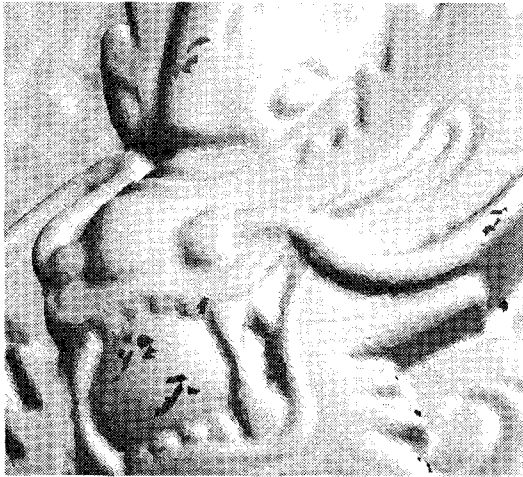


(a) view of polygon model before hole filling

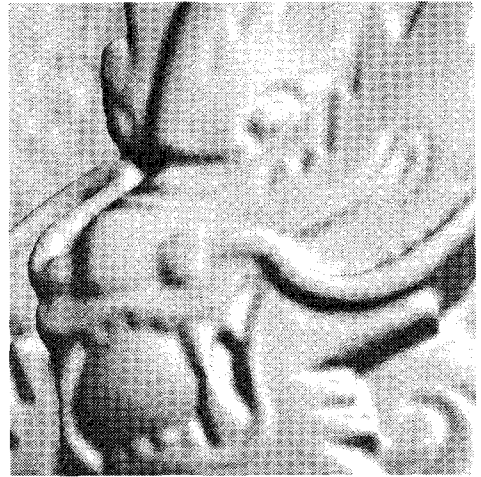


(b) view of polygon model after hole filling

Fig. 8 Filling of hole in the case of dragon model



(a) incomplete polygon model before hole filling

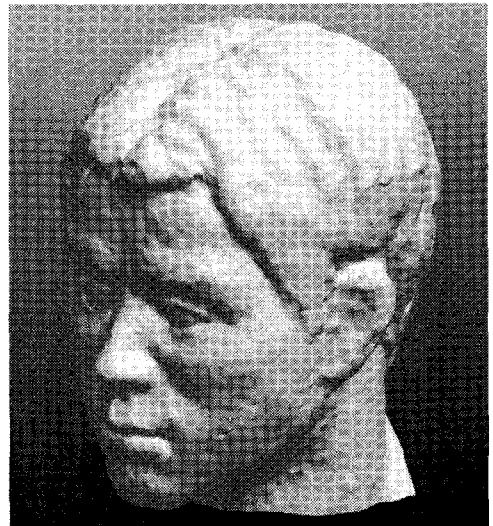


(b) view of polygon model after hole filling

Fig. 9 Detail view of dragon model



(a) before the hole filling



(b) after the hole filling

Fig. 10 Hole filling of sculpture model

Fig. 10 은 Solutionix 사의 Rexcan 3D 스캐너를 이용하여 기존의 조각상을 여러 방향에서 측정한 후 본 연구를 통하여 개발된 프로그램을 이용하여 홀들을 메우고 형상을 재 구성한 결과를 보여주고 있다. Fig. 10(a)는 16 개의 방향으로부터 얻어진 측정데이터에 의하여 일차적으로 만들어진 전체 형상을 보여주고 있는데 초기에 3D 스캐너로부터 점 데이터를 얻는 과정에서 발생할 수 있는 측정 데이터의 누락 및 서로 다른 시점에서 얻은 데이터를 조합하는 과정에서의 오류 등으로 인하여 그림에서 보는 바와 같이 수십 개의 불규칙한 형상의 홀들이 형상전체에 걸쳐 분포 되어 있다. 초기 폴리곤 모델은 623434 개의 요소와 368746 개의 절점으로 구성하였으며 폴리곤 모델이 점유하고 있는 공간을 총 4734 개의 영역으로 나누어 계산하였는데 보간 과정에 16 분, 폴리곤 재생성에 35 분 정도가 소요되었다. Fig.10(b)의 최종모델은 985600 개의 삼각형 요소와 437605 개의 절점으로 가시화 하였으며 그림에서 보는 바와 같이 형상 전체에 산재 되어 있던 홀들이 성공적으로 메워져 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 폴리곤 모델에 존재하는 다양한 형태의 홀을 자동으로 메우기 위하여 폴리곤 모델의 모든 절점들을 통과하는 하나의 곡면을 음함수 곡면 기법과 영역 분할법을 이용하여 생성한 후 마칭 큐브 알고리즘과 요소 세분화 기법 및 스무딩을 이용하여 폴리곤 모델을 재 생성하는 새로운 방법을 제안 하였다. 수십만 개의 요소로 이루어진 대형 폴리곤 모델에도 적용이 가능하도록 공간을 복수개의 영역으로 나누어 국부 해(local solution)를 구한 후 영역간 연속성이 보장되는 혼합 함수에 의하여 전체 해(global solution)를 구하는 단계적 방법을 제안하였으며 실제의 대형 폴리곤 모델에 대하여 적용해 본 결과 홀의 개수와 홀의 형태의 복잡성 등으로 야기 될 수 있는 많은 문제점들을 근본적으로 해소 할 수 있었다. 향후에는 수백만, 수천만 개의 폴리곤으로 구성되어 있는 모델에도 적용이 가능하도록 한층 더 합리적인 영역 분할 기법 및 국부 해들의 병렬처리 기법 등에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후기

이 논문은 2005 학년도 대전대학교 학술 연구비 지원에 의한 것임. 아울러 본 연구에서 제안한 제반 알고리즘의 검증에 도움이 되었던 쾌속조형을 위한 휴먼모델 및 용 버루 모델 등의 다양한 폴리곤 데이터를 제공해 주신 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Floater, M. S., Iske, A. A., " Multistep scattered datainterpolation 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 implicitsurfaces," *Tech. Rep. GIT-GVU-99-15*, Georgia Institute of Technology, May, 1999.
3. Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C., 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., Montefusco, L. B., "Radial basis functionsfor multivariate interpolation of large scattered datasets," *Journal of Computational and Applied Math.*, Vol. 140, pp. 521-536, 2002.
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. Kojekine, N., Hagiwara, I., 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., Seidel, H.P., "Multi-level partition of unity implicits," *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, Vol. 22, pp. 463-470, 2003.