

폴리곤모델의 국부적 홀 메움 및 유연화에 관한 연구

유동진[#]

A Study on Local Hole Filling and Smoothing of the Polygon Model

Dong-Jin Yoo[#]

ABSTRACT

A new approach which combines implicit surface scheme and recursive subdivision method is suggested in order to fill the holes with complex shapes in the polygon model. In the method, a base surface is constructed by creating smooth implicit surface from the points selected in the neighborhood of holes. In order to assure C^1 continuity between the newly generated surface and the original polygon model, offset points of same number as the selected points are used as the augmented constraint conditions in the calculation of implicit surface. In this paper the well-known recursive subdivision method is used in order to generate the triangular net with good quality using the hole boundary curve and generated base implicit surface. An efficient anisotropic smoothing algorithm is introduced to eliminate the unwanted noise data and improve the quality of polygon model. The effectiveness and validity of the proposed method are demonstrated by performing numerical experiments for the various types of holes and polygon model.

Key Words : Local hole filling(국부적 홀 메움), Implicit surface(음 함수 곡면), Recursive subdivision method(회귀분할법), Anisotropic smoothing(이방성유연화)

기호설명

n = Number of points on the boundary curve of hole

P_c = Center point of plane

N_u = Unit normal vector of plane

P_i = Position vector of i -th point on the boundary curve of hole

N_i = Normal vector of i -th point on the boundary curve of hole

r_o = Position vector of a node in the triangular net

λ = Parameter for the length of a line

P = New location of a node

A_i = Area of i -th element

C_i = Centroid of i -th element

np = Number of elements connected with a node

$|e|$ = Length of an edge

θ_e = Dihedral angle of an edge

N_1, N_2 = Unit normal vectors of two triangles connected with an edge

r = Control parameter of the width of the transition

S = Scaling factor for the step width

λ = Feature detection parameter

$AREA[V_i]$ = Sum of areas of triangles connected with i -th node

☞ 접수일: 2006년 7월 18일; 게재승인일: 2006년 8월 9일

교신저자: 대진대학교 컴퓨터응용 기계설계공학과

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

1. 서론

컴퓨터 그래픽스(CG), 역 공학(reverse engineering), 폐속조형(rapid prototyping) 등을 위한 폴리곤모델에 있어서의 홀은 형상모델링 또는 형상가공상에 많은 문제점을 발생시키므로 홀 메움(hole filling) 과정을 통하여 제거 해야 만 후 처리 시스템의 입력데이터로 이용 될 수 있다. 홀 메움에 관한 연구는 크게 두 방법으로 분류 될 수 있는데 불완전한 폴리곤모델을 완전한 폴리곤모델로 새로 만드는 형상 재구성 방법과 모델에 존재하는 홀 만을 찾아 그 부분만 메우는 국부적 홀 메움 방법(local hole filling)이 그것이다. 원래의 폴리곤모델의 삼각형 망의 질이 사용하고자 하는 용도에 적합하지 않다면 홀을 메우면서 전체 삼각형 망의 질도 동시에 개선 할 수 있는 형상 재구성 방법을 이용하는 것이 좋을 것이고 모델자체의 질은 좋지만 다양한 형태의 홀이 존재하는 경우에는 특정 홀 만을 찾아 메우는 국부적 홀 메움 방법이 더 효율적일 것이다. 형상 재구성 방법은 불완전한 폴리곤모델로부터 얻어진 점 군 데이터로부터 음 함수 곡면기법^{1,3}과 영역분할법^{4,7}을 이용하여 부드러운 곡면을 생성한 후 필요한 폴리곤모델을 재구성하는 방법으로서 수십 만, 수백 만개에 달하는 대용량의 점 데이터를 처리하는 것이 가능할 뿐만 아니라 음 함수 곡면의 형상함수인 레이디얼 기초함수(radial basis function)의 외삽성(extrapolation characteristics)에 의하여 홀을 자동으로 메울 수 있는 장점이 있다. 저자의 선행 연구결과를 통하여 보고된 적응적 영역분할법(ADDM)⁶과 반복적 영역분할법(RDDM)⁷ 도 음 함수 곡면과 영역분할법을 이용한 방법으로서 대형 폴리곤모델의 홀 메움에 성공적으로 적용 된 바 있다. 그러나 원래의 폴리곤모델의 형상은 그대로 유지하면서 홀 만을 메우고 싶다거나 수천 만개의 삼각형 망으로 구성된 초대형의 모델을 다루어야 한다면 국부적으로 홀을 메우고 유연화(smoothing)등의 후처리를 통하여 완전한 모델로 만들어 가는 단계적인 방법이 더 효율적 일 수 있다. 현재 상용화 되어 있는 대부분의 폴리곤모델 편집기들도 이러한 국부적 홀 메움 기능을 지원하고는 있으나 홀의 형태가 복잡해 지면 메우어진 면이 홀 주변의 면들과 부드럽게 연결되지 못하고 왜곡되거나 홀 메움 자체가 불가능한 경우가 많이 발생하고 있다. 저자에 의

하여 이미 연구 보고된 탄성유한요소해석과 트림곡면에 의한 국부적 홀 메움 방법⁸도 다양한 형태의 홀 메움에 적용이 가능하지만 홀의 크기가 커지면 계산시간이 급증하게 되는 단점이 있었다. 이를 개선하기 위하여 제안한 음 함수 곡면기법과 트림곡면에 의한 방법⁹에서는 계산시간은 많이 단축되었으나 새롭게 생성된 홀 부위의 삼각형 망들의 형상이 주변의 형상과 많은 차이가 있어 적용에 있어 많은 제약이 있었다. 본 연구에서는 폴리곤모델에 존재하는 다양한 형태의 홀을 메우기 위하여 홀 주위의 폴리곤모델에서 홀 내부의 형상복원에 필요한 점들을 취하여 이 점들을 통과하는 부드러운 기본곡면을 음 함수 곡면기법을 이용하여 생성한 후 종래의 요소생성법중의 하나인 회귀분할법(recursive subdivision method)에 의하여 홀 내부의 요소를 생성하는 방법을 제안하고자 한다. 아울러 대형 폴리곤모델에 효율적으로 적용 될 수 있는 유연화(smoothing) 알고리즘을 제안하고 이를 홀 메움과 연계하여 적용 될 수 있는 방안에 대해서도 논의해 보고자 한다.

2. 국부적 홀 메움 알고리즘

2.1 음 함수 곡면기법을 이용한 곡면의 생성

Fig. 1에서 보는 바와 같이 홀을 메우기 위한 기본곡면을 생성하기 위하여 홀 내부의 형상복원에 필요한 점들을 홀 경계곡선과 홀 주위의 폴리곤모델로부터 취한 후 이 점들을 통과하는 부드러운 곡면을 하나의 새로운 음 함수 곡면으로 정의하는 방법을 사용하였다.⁵

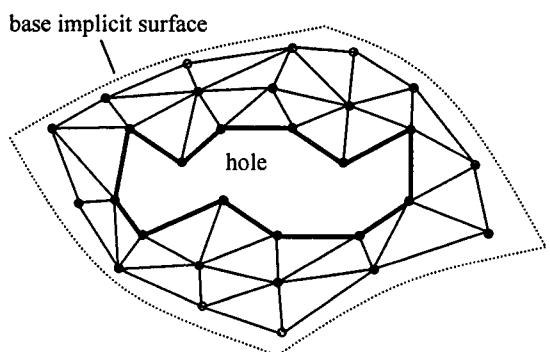


Fig. 1 Extraction of points to be interpolated from the neighboring triangles of hole

홀 주위의 면들과의 연속성을 보장하기 위하여 홀 경계곡선상의 점들은 물론이고 경계곡선과 인접한 모든 삼각형들의 구성점들을 보간점으로 하였다. 특히 Fig. 2에서 보는 바와 같이 홀이 크고 형태가 복잡해지더라도 매우어진 면이 왜곡되지 않고 홀 주변의 면들과 최대한 부드럽게 연결되게 하기 위하여 보간점들의 수와 동일한 개수의 점들을 폴리곤모델에서 구한 법선벡터를 이용하여 오프셋한 후 이 점들을 부가적인 구속조건으로 하여 곡면을 생성하였다.

off-surface points

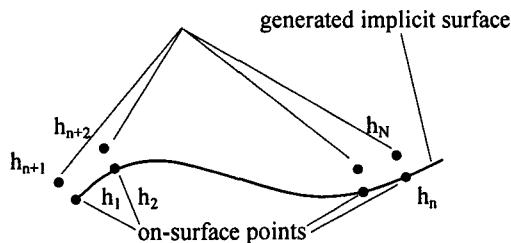


Fig. 2 Generation of base implicit surface

식 (1)과 식 (2)와 같이 통과해야 하는 모든 점들에서는 스칼라 함수 값에 의한 구속조건 대입 시 0의 값을 법선 방향으로 오프셋 한 추가된 점들에 대해서는 임의의 양의 값을 갖게 함으로써 홀 주위의 면들과 C^1 이상의 연속성을 갖는 부드러운 곡면을 생성할 수 있다.

$$h_i = f(\mathbf{e}_i) = 0$$

$$i = 1, \dots, n \quad (\text{on-surface points}) \quad (1)$$

$$h_i = f(\mathbf{e}_i) > 0$$

$$i=n+1, \dots, N \quad (\text{off-surface points}) \quad (2)$$

이는 3 차 스플라인 곡선 생성시 접선벡터에 의하여 양끝 단 구속조건(clamped end condition)을 조절함으로써 곡선의 형상을 제어하는 것과 유사한 개념이라 할 수 있다. 음 함수 곡면의 생성과정에 관한 자세한 수치해법은 저자의 선행연구⁵에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 생략하도록 한다.

2.2 회귀분할법에 의한 홀 내부의 삼각형 망 생성

앞절에서와 같이 일차적으로 기본곡면이 구해지면 회귀분할법에 의하여 홀 내부의 삼각형 망을 구성하고 생성된 삼각형 망을 음 함수 기본 곡면에 투영함으로써 홀 메모 과정이 완성된다. 회귀분할법은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 경계곡선을 반복적으로 분할해 들어가는 고전적인 요소생성법으로서 요소 망의 비틀림이 적은 절 좋은 요소를 생성할 수 있고 경계곡선의 기하학적 형상에 제약이 없는 장점이 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 하나의 폐회로를 두개의 폐회로로 분할하는 작업을 모든 폐회로가 네개 이하의 절점을 가질 때 까지 반복함으로써 삼각형 또는 사각형요소를 생성하게 된다. 용도에 따라서 사각형 망을 그대로 사용할 수도 있고 삼각형만을 사용해야 한다면 사각형을 분할함으로써 용이하게 삼각형 망으로 변환할 수 있다. 이 회귀분할법의 핵심은 분할방법에 있는데 본 연구에서는 분할 후보선에 대하여 식 (3)과 같은 분할 기준함수를 정의하고 이 함수가 최소가 되는 후보선을 최종 분할선으로 선정하였다.¹⁰

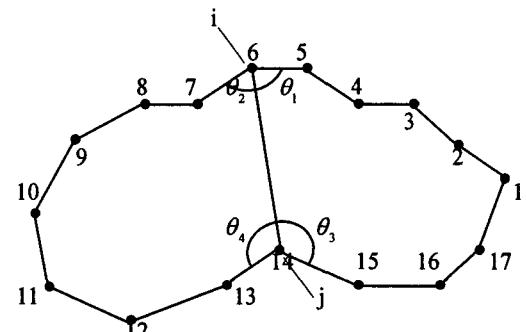


Fig. 3 Schematic diagram illustrating the concept of recursive subdivision method

$$f(\theta, L_{ij}) = C_1\theta + C_2L_{ij} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^4 \left| \theta_i - \frac{\pi}{2} \right|}{2\pi} \quad (4)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

본 연구에서는 식 (3)의 C_1, C_2 를 0.5 로 계산하였다. 요소를 생성하기 전에 훌의 경계곡선은 식(6)과 식 (7)로 정의되는 평면으로 수직 투영되어야 한다.

$$\mathbf{P}_c = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i}{n} \quad (6)$$

$$\mathbf{N}_u = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i}{\left| \sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i \right|} \quad (7)$$

2.3 삼각형 망의 음 함수 곡면으로의 투영

앞 절에서 구한 삼각형 망은 평면상에 있기 때문에 각 절점들을 음 함수 곡면으로 투영해야 한다. 절점을 통과하는 평면에 수직한 방향의 직선과 음 함수 곡면과의 교차점은 다음과 같이 비 선형방정식의 해를 구함으로써 얻어질 수 있다. 일반적인 직선의 방정식은 식 (8)과 같은 벡터방정식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \lambda \mathbf{N}_u \quad (8)$$

식 (8)로 표현되는 직선과 음 함수 곡면과의 교차점은 다음과 같은 λ 에 관한 뉴튼 랩슨 반복계산식으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i - \frac{F(\lambda)}{F'(\lambda)} \quad (9)$$

$$\dot{F}(\lambda) = \mathbf{n} \cdot \nabla F \quad (10)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla F}{|\nabla F|} \quad (11)$$

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \mathbf{k} \quad (12)$$

음 함수 곡면의 곡률이 크면 수직 투영된 삼각형

망의 질이 다소 나빠질 수 있는데 본 연구에서는 일차적으로 투영된 절점들을 각 절점과 연결된 삼각형들의 무게중심으로 이동시킨 후 그 점에서의 법선방향으로 음 함수 곡면에 재 투영 시킴으로써 형상의 정확도는 그대로 유지하면서 삼각형 망의 질을 개선하는 방법을 사용하였다.

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{i=1}^{np} A_i \mathbf{C}_i}{\sum_{i=1}^{np} A_i} \quad (13)$$

3. 대형 폴리곤모델의 유연화 알고리즘

종래의 폴리곤모델의 유연화 알고리즘은 식 (13)으로 정의되는 등방성 유연화(isotropic smoothing) 알고리즘이 주류를 이루어 왔는데 최근에 와서 역 공학 등의 기술이 발전하면서 폴리곤모델의 형상의 부드러움 정도를 적극적으로 개선하려는 여러 새로운 알고리즘이 제안되었다. 그 중에서도 형상의 주요 부분은 그대로 유지하면서 노이즈(noise) 데이터를 효율적으로 제거할 수 있는 이방성 유연화(anisotropic smoothing) 알고리즘이 폴리곤모델을 다루는 여러 분야에서 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 국부적 훌 메움을 마친 후 전체 폴리곤모델에서 노이즈 데이터를 제거하고 전체 곡면의 질을 향상시키기 위하여 다음과 같은 이방성 유연화 알고리즘을 사용하였다.¹¹

$$H_e = 2|\mathbf{e}| \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \quad (14)$$

$$\mathbf{N}_e = \frac{\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2}{\|\mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2\|} \quad (15)$$

$$\Delta_\lambda [\mathbf{V}_i] = \Delta_\lambda [\mathbf{V}_i] - W_\lambda(H_e) H_e \cdot \mathbf{N}_e \quad (16)$$

$$\Delta_\lambda [\mathbf{V}_j] = \Delta_\lambda [\mathbf{V}_j] - W_\lambda(H_e) H_e \cdot \mathbf{N}_e \quad (17)$$

for each edge

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_i + 3s/(2\text{AREA}[\mathbf{V}_i]) \cdot \Delta_\lambda [\mathbf{V}_i] \quad (18)$$

for all vertex \mathbf{V}_i

$$W_\lambda(H_e) = 1 \quad \text{for } |H_e| < \lambda \quad (19)$$

$$W_\lambda(H_e) = \frac{\lambda^2}{r(\lambda - |H_e|)^2 + \lambda^2} \quad \text{for } |H_e| > \lambda \quad (20)$$

Fig. 4에서 보는 바와 같이 각 에지에 대하여 길이와 사이각을 구한 후 식(16)과 식(17) 및 식(18)을 이용하여 각 절점들을 반복 이동시키면 노이즈 데이터는 제거되고 CAD를 위한 곡면을 생성할 수 있을 정도의 질 좋은 폴리곤모델을 얻을 수 있다. 이 유연화 알고리즘의 또 다른 장점은 코너(corner), 에지(edge) 등의 특징형상은 그대로 유지하면서 필요없는 노이즈 데이터만을 선택적으로 제거할 수 있다는데 있다. S , λ , r 등의 조절계수를 이용하여 폴리곤모델의 용도에 따라 사용자가 다양한 선택을 할 수 있다는 것도 종래의 유연화 알고리즘과 크게 다른 점이다.

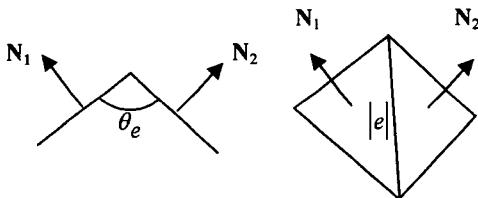


Fig. 4 Anisotropic smoothing of polygon model

4. 적용 및 토론

본 연구를 통하여 제안한 국부적 홀 메움 알고리즘과 유연화 알고리즘의 효용성 및 타당성을 검증하기 위하여 다양한 폴리곤모델에 대하여 실험을 해 보았다. Fig. 5는 폴리곤모델의 입력으로부터 홀 메움이 완성되기 까지의 세부과정을 보여주고 있는 전체흐름도이다. Fig. 6은 여러 개의 내부 홀이 존재하는 Bunny 모델¹²로서 Fig. 6(a)는 홀이 메우어지기 전의 모습이며 Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 본 연구에서 제안한 국부적 홀 메움 알고리즘을 이용하여 홀을 메우고 난 후의 모습을 보여주고 있다. 홀 들은 다 메우어져 있으나 요소의 질 측면에서 보면 좋지 않은 형상을 가진 요소들이 많이 존재하고 있다. Fig. 6(d)와 Fig. 6(e)는 이방성

유연화 알고리즘을 이용하여 스무딩을 한 후의 결과로서 CAD 모델 및 유한요소모델로 사용될 수 있을 정도로 삼각형 망의 질이 개선되어 있음을 확인 할 수 있다. 총 35947 개의 절점 및 69168 개의 삼각형으로 구성되어 있는 모델로서 홀 메움 및 유연화에 IBM RS 43P 140 W/S에서 5초 정도가 소요되었다. Fig. 6(f)는 본 연구에서 제안한 국

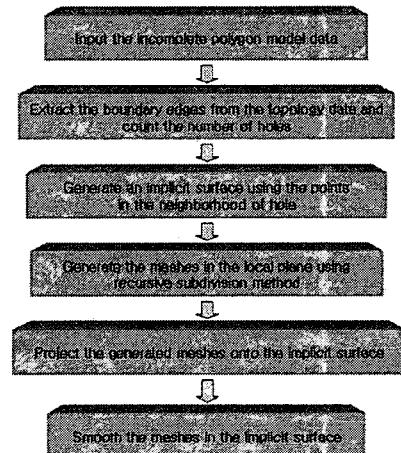


Fig. 5 Flow chart showing the procedures of local hole filling

부적 홀 메움 알고리즘의 신뢰성을 검증해 보기 위하여 복잡한 홀에 대하여 제안한 방법을 이용하여 홀을 메운 후의 모습을 보여주고 있는데 원래 어느 부분에 홀이 있었는지 분간하기 힘들 정도로 홀 내부의 면이 주변의 면들과 부드럽게 연결되고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 7(a)는 372563 개의 절점 및 746846 개의 삼각형으로 구성되어 있는 Igea 모델¹³로서 크고 복잡한 형상의 홀이 눈과 입가 등 형상의 중요부분에 위치하고 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에서 보는 바와 같이 홀의 형상이 크고 복잡하더라도 홀 내부에 형성된 음 햄수곡면이 홀 주변의 폴리곤모델과 부드럽게 연결되어 있기 때문에 Fig. 7(d)의 완성된 모델을 자세히 관찰해 보더라도 원래의 홀들의 흔적을 구별하기 힘들 정도로 생성된 삼각형 망의 질이 우수함을 확인할 수 있었다. 홀 메움에 IBM RS 43P 140 W/S에서 12초 정도가 소요되었다. Fig. 8은 본 연구에서 제안한 이방성유연화 알고리즘의 노이즈 제거의 우수성을 검증하기 위하여 Igea 모델에 인위

적인 노이즈를 주고 유연화 반복횟수에 따라 변화되는 형상을 관찰해 본 결과로서 Fig. 8(b) 와 Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d) 에서 보는 바와 같이 반복횟수가 증가함에 따라 곡면의 질이 점차 개선되고 있음을 확인할 수 있었다. 반복횟수와 유연화 정도를 조절하는 계수를 사용자가 입력할 수 있도록 하여 사용자의 편의성을 도모하였다. 본 연구에서 제안한 유연화 알고리즘의 대형 폴리곤모델에의 적용 가능성을 검증하기 위하여 190 만개의 절점 및 390 만개의 삼각형으로 구성되어 있는 Lucy 모델¹² 을 실험대상으로 선택하였다. Fig. 9 의 전체 모습만으로는 유연화 전, 후의 형상을 비교하기 힘드나 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 특정부분을 자세히 검토해 본 결과 일반적인 등방성 유연화 방법으로는 얻기 힘든 우수한 질의 폴리곤모델을 얻을 수 있음을 확인하였다. 총 10 회의 반복계산을 수행하였으며 IBM RS 43P 140 W/S 에서 51 초 정도가 소요되었다.



Fig. 6(a) The shaded view of polygon model before hole filling of Bunny model

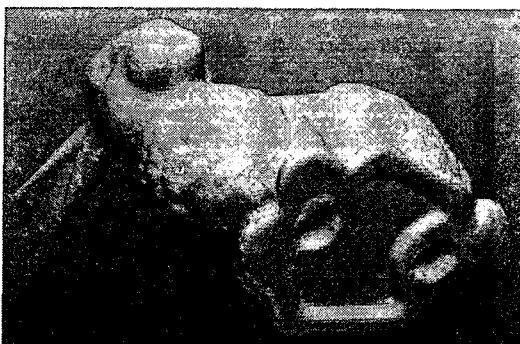


Fig. 6(b) The shaded view of polygon model after hole filling of Bunny model

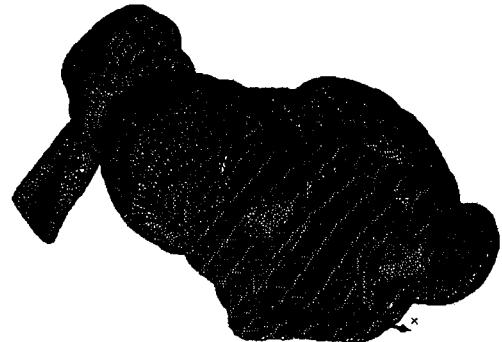


Fig. 6(c) The mesh view of polygon model after hole filling of Bunny model



Fig. 6(d) The shaded view of polygon model after smoothing of Bunny model

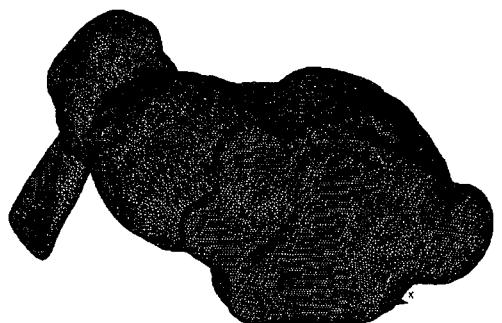


Fig. 6(e) The mesh view of polygon model after smoothing of Bunny model

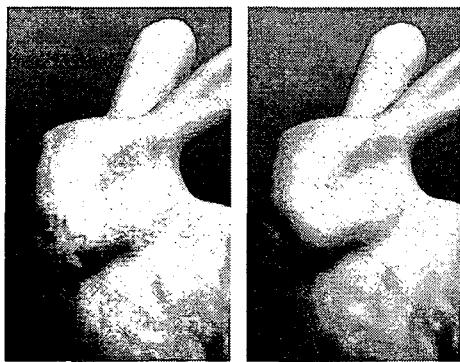


Fig. 6(f) Local filling of hole with complex shape

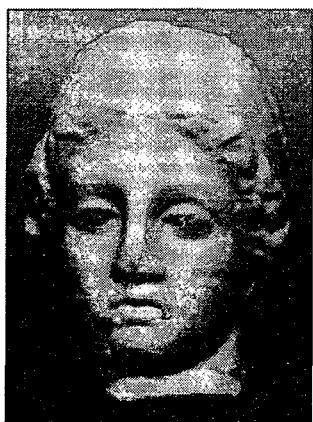
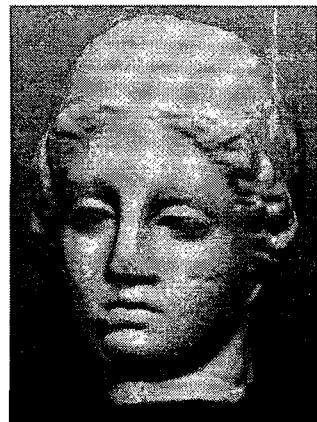
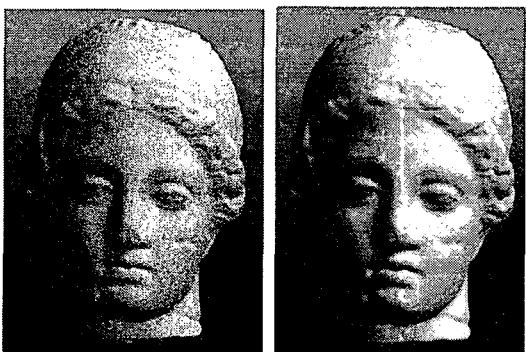


Fig. 7(a) Igea model before local hole filling



(a)

(b)

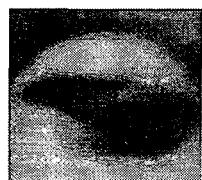


Fig. 7(b) Igea model after local hole filling (detailed view of eye)

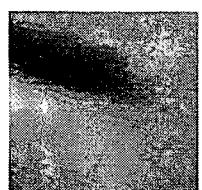
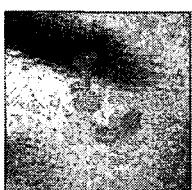
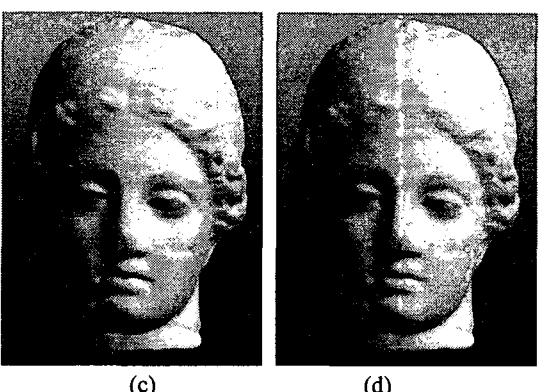


Fig. 7(c) Igea model after local hole filling (detailed view of mouth)



(c)

(d)

Fig. 8 Anisotropic smoothing of Igea model : (a) original noisy data, (b) after 5 iteration, (c) after 10 iteration, (d) after 20 iteration



Fig. 9(a) Original noisy data for anisotropic smoothing of Lucy model



Fig. 9(b) The shaded view of smoothed Lucy model after 10 iteration

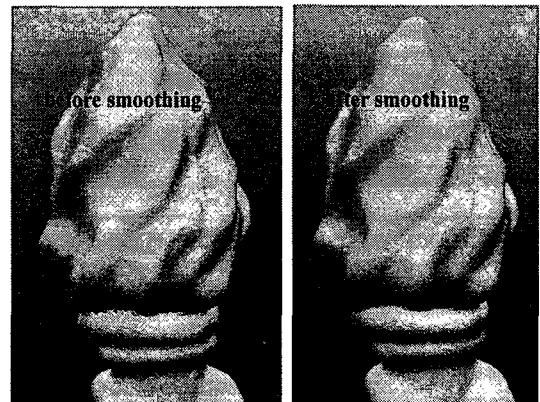


Fig. 10(a) Detailed view of torch of Lucy model after anisotropic smoothing

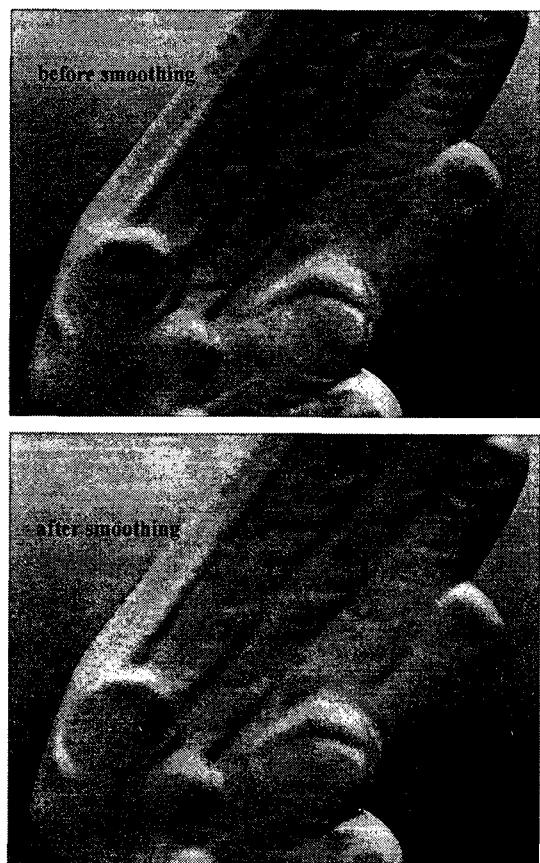


Fig. 10(b) Detailed view of wing of Lucy model after anisotropic smoothing

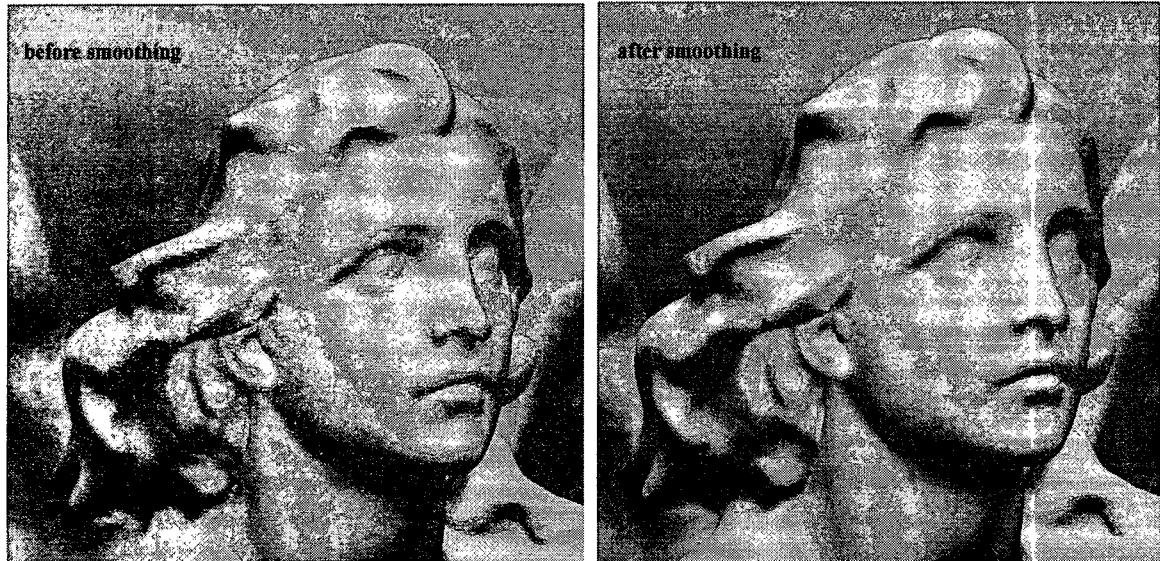


Fig. 10(c) Detailed right view of face of Lucy model after anisotropic smoothing

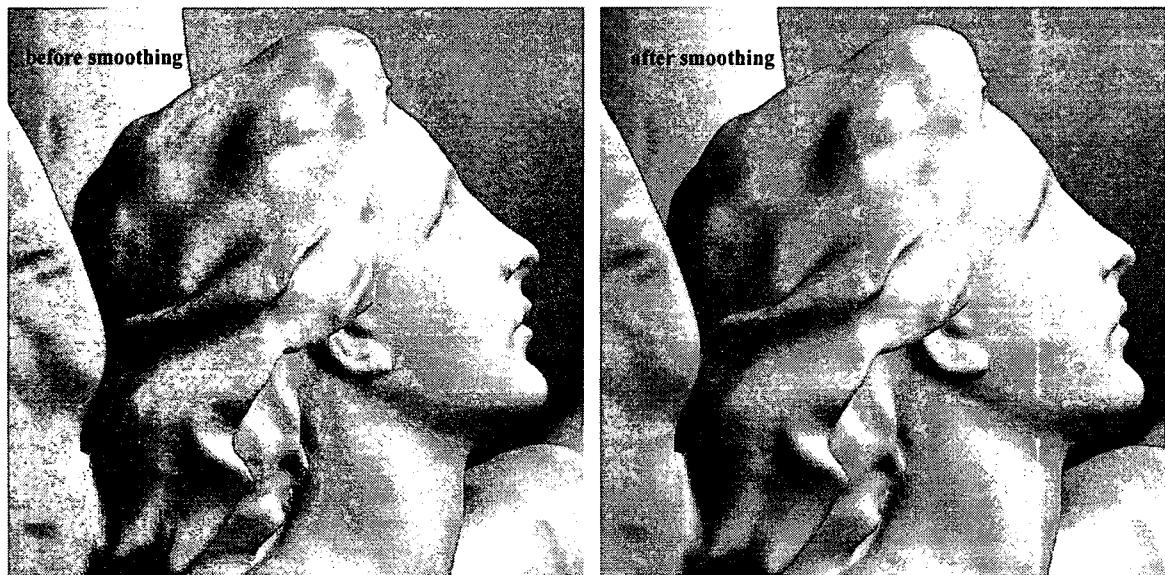


Fig. 10(d) Detailed side view of face of Lucy model after anisotropic smoothing

5. 결론

본 논문에서는 대형 폴리곤 모델에 존재하는 복잡한 형태의 홀들을 메우기 위하여 홀 경계 곡선과 홀 주위의 폴리곤 모델로부터 홀 내부의 형상 복원에 필요한 점들을 선택하고 폴리곤 모델에서 구한 법선 백터를 이동하여 오프셋 한 점들을 부가적인 구속 조건으로 하여 홀 내부의 곡면을 음함수 곡면 기법에 의하여 생성하는 방법을 제안하였다. 홀이 크고 형태가 복잡한 경우에도 홀 내부에 질 좋은 삼각형 망을 생성하기 위하여 종래의 회귀 분할 법에 의하여 평면에서 일차적으로 삼각형 망을 구성한 후 투영과 유연화 과정을 통하여 양질의 삼각형 망을 얻는 단계적인 방법을 제안하였다. 아울러 국부적 홀 메움과 연계하여 효율적으로 사용할 수 있는 이방성 유연화 알고리즘을 도입하고 이를 여러 대형 폴리곤 모델에 적용하여 실제적 사용 가능성을 검증 하였다.

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 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.
6. 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.
7. Yoo, D. J., "Shape Reconstruction from Large Amount of Point Data using Repetitive Domain Decomposition Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, submitted, 2006.
8. 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.
9. 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.
10. Jeffrey, A. T. and Alan, R. P., "Development of an Automatic Two-Dimensional Finite Element Mesh Generator using Quadrilateral Elements and Bezier Curve Boundary Definition," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 1551-1567, 1990.
11. Klaus, H. and Konrad, P., "Anisotropic Filtering of Non-Linear Surface Feature," *EUROGRAPHICS*, Vol. 23, No. 3, 2004.
12. Stanford 3D scanning repository
(<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>)
13. <http://www.cyberware.com/samples>