

Hierarchical Computation of Simplified Meshes for Multiresolution Mesh Generation

다단계 메쉬 생성을 위한 간략화 메쉬의 계층적 계산

Sun-Jeong Kim, Won-Ki Jeong, Chang-Hun Kim

김 선 정, 정 원 기, 김 창 현

Dept. of Computer Science & Engineering, Korea Univ.

고려대학교 컴퓨터학과

요 약

본 논문은 곡률 오차에 의해 간략화 된 메쉬에 계층적 계산을 이용하여 다단계 메쉬를 생성하는 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 알고리즘으로 생성된 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 임의의 메쉬의 분할 연결성 생성을 위한 분할 메쉬로의 근사 과정이 생략 가능하므로, 다단계 메쉬 생성 속도의 향상을 도모할 수 있다. 또한 분할 연결성이 없는 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 간략화 메쉬들의 단순 축적이 아닌, 간략화 메쉬의 단계 사이를 계층적 계산으로 얻어지는 계수들과 가장 간략화 된 메쉬로 구성됨으로써 다면체 압축 및 다단계 편집에 유효한 다단계 메쉬 생성이 가능하다.

1. 서 론

3차원 스캐닝 시스템의 발달로 복잡한 형태를 갖는 3차원 물체들도 메쉬 표현이 가능[1, 2, 3]해짐에 따라, 많은 수의 꼭지점과 면을 갖는 메쉬를 쉽게 주위에서 접할 수 있게 되었다. 이러한 메쉬들은 메모리 관리나 데이터 전송, 모델링, 렌더링의 효율성을 증대시키기 위해 다단계 메쉬로 변형될 수 있다. 임의의 메쉬로부터 다단계 메쉬를 생성하는 기존 방법으로는 연속적인 간략화 알고리즘의 축적으로 다단계 메쉬를 구성하는 방법[4, 5]과 분할 연결성을 갖는 분할 메쉬에 대해 웨이브렛을 이용하여 다단계 메쉬를 생성하는 방법[6]이 있다. 특히 분할과 웨이브렛을 기반으로 구성된 다단계 메쉬의 경우, 다면체 압축, 점진적인 전송[7], 연속적인 LOD 제어, 다단계 편집

[8] 등의 다양한 활용 분야를 갖는다. 그러나, 대부분 임의의 메쉬는 분할 연결성을 갖지 않으므로, 임의의 메쉬가 분할 연결성을 갖기 위해서는 분할 메쉬로 근사시키는 복잡한 과정을 거쳐야 한다[9, 10, 11].

연속적인 간략화 알고리즘의 축적에 의한 다단계 메쉬 생성 방법은 빠른 디스플레이를 위해 사용되나, 원래의 메쉬보다 많은 저장소가 요구되고 활용이 디스플레이 분야로 국한될 수 있다.

본 논문에서는 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬의 생성 대신 계층적 계산[12]의 구조를 갖는 다단계 메쉬를 생성한다. 기존의 분할 연결성을 이용한 다단계 메쉬 생성 방법은 임의의 메쉬에 분할 연결성을 생성시키기 위해 반드시 근사 과정을 거쳐야 하며, 이 과정에는 많은 계산이 요구되는 매개 변수화 단계가 포함되어 있어 수행 시간이 길다. 그러나 본 논문에서는 분할 연결성 대신, 계층적 계산을

곡물 오차에 기반한 간략화 알고리즘에 의해 연속적으로 생성되는 간략화 메쉬에 수행하여 계층적인 구조의 다단계 메쉬를 생성하므로, 기존의 근사 과정을 생략할 수 있다. 계층적 계산[12]이란, 평균 값 속성을 이용하여 한 꼭지점과 그 주위 꼭지점들 사이의 관계를 정의하는 보간 연산자를 이용하여 계층 사이의 관계를 생성하는 방법으로, 본 논문에서는 간략화 메쉬에 대해 계층적 계산을 수행한다.

본 논문의 알고리즘으로 생성된 다단계 메쉬는 분할 연결성에 의존하지 않으므로, 부드러움을 보장하지 못하고 연속적인 LOD 제어와 다단계 메쉬의 질이 간략화 알고리즘에 의존되나, 근사 과정으로 인해 발생되던 원래의 메쉬와 근사된 분할 메쉬 사이의 대응 문제를 피할 수 있고, 다면체 압축 및 다단계 편집 등에도 활용될 수 있다.

2. 관련 연구

재메쉬화(remeshing) 알고리즘[9]은 임의의 메쉬에 분할 연결성을 생성시키기 위해 제안된 알고리즘으로 매개 변수화, 분할, 재샘플링 과정을 거친다. 즉, 임의의 메쉬에 대해 분할에 적합한, 가장 단순한 기본 메쉬를 생성한 후 이를 분할과 재샘플링 과정으로 분할 연결성을 갖는 근사된 분할 메쉬를 생성한다. 이런 근사 과정은 분할에 의해 생성되는 분할 메쉬를 원래의 메쉬와 일치시켜야 하는 대응 문제를 해결하기 위해, 매개 변수화와 재샘플링 과정을 거치나 많은 수행 시간이 소요된다. 또한 재메쉬화 알고리즘은 날카로운 모서리를 보존하기에 부적합하고, 작은 특징을 재메쉬화 된 다단계 메쉬에서 표현하기 위해서는 기본 메쉬의 면의 수를 증가시키거나, 원래의 메쉬보다 더 높은 분할 레벨로 인해 원래의 메쉬보다 더 많은 수의 꼭지점과 면을 가질 수 있다.

부드러운 표면으로의 적합(smooth surface fitting) 알고리즘[11]에서는 B-스프라인 패치를 사용하여 매개 변수화 단계를 생략한다. 즉 B-스프라인 패치로 분할한 후, 재샘플링과 적합을 통해 다단계 메쉬를 생성하는 알고리즘으로, 매개 변수화 과정이 생략될 수 있으나 원래의 메쉬 전체를 사용자가 직접 모두 분할해야 한다.

불연속 선형 하모닉 대응(PL harmonic

embedding)의 계층적 계산[12]에서는 불연속 선형 하모닉 대응 위에서의 계층적 계산을 정의하여 레이저 불연속 선형 하모닉 웨이브렛을 생성하고, 이로부터 얻어진 선조건 쥘레 기울기(preconditioned conjugate gradient) 알고리즘의 계층적 선조건자를 이용하여 불연속 선형 하모닉 대응을 생성한다. 기존의 불연속 선형 하모닉 대응의 생성 복잡도를 $O(n^2)$ 에서 $O(n)$ 으로 감소시켜 불연속 선형 하모닉 대응의 생성 속도를 향상시키고, 특히 불연속 선형 하모닉 대응 위의 구간 선형 함수 공간을 다단계 분해하여 생성된 계층적 선조건자는 연속적으로 간략화 된 메쉬들과 불연속 선형 하모닉 대응 사이의 평균 값 속성에 의해 보간 연산자를 이용하여 정의되어 진다.

최근 들어, 임의의 메쉬로부터 다단계 메쉬를 생성하는 많은 알고리즘들이 제안되고 있는데, 특히 다단계 메쉬 생성을 위한 다른 매개 변수화 방법[13, 14, 16]들과 분할 연결성 대신 간략화 메쉬를 이용[14]하는 연구들이 있다.

MAPS[13]에서는 원래의 메쉬를 기본 메쉬로 부드러운 매개 변수화 시키는 방법을 제안한다. 계층적으로 이루어진 간략화를 이용하여 제거되는 꼭지점에 대해 무게 중심 좌표를 축적하여 매개 변수화 시키고, Loop 분할에 기반한 계층적 세련화 과정으로 기본 메쉬의 면들 사이에서도 부드러움이 유지되도록 분할 연결성을 생성한다.

다단계 모델링[14]에서는 지역적 프레임 코딩 기법과 이산 정형[15]에 기반한 다단계 세련화를 이용하여, 임의의 메쉬로부터 분할 연결성이 없는 다단계 메쉬를 생성한다. 세부 계수를 지역적 프레임 코딩을 이용하여 생성하므로 재메쉬화의 과정을 생략할 수 있으나, 다단계 편집시 다단계 세부 계수가 아닌 원래 모델로 가는 한 단계 세부 계수로 다단계 편집의 유연성을 감소시키고, 모서리 길이를 일정하게 만드는 세련화 과정은 매개 변수화에 영향을 끼친다.

메쉬에 대한 다단계 신호 처리[16]에서는 기하학 정보에 기반한 비정규 이완 절차를 이용하여 임의의 메쉬에 분할 연결성을 만든다. 비정규 이완 절차는 비정규 분할 이론을 간략화 메쉬의 세련화 과정에 적용시킨 것으로, 지역적 매개 변수화에서 발생하는 왜곡 현상을 제거하여 텍스처 맵핑에 유리한 다단계 메쉬를 생성할 수 있다.

3. 간략화 알고리즘

2차원 하모닉 대응에서 수행되던 연산인, 계층적 계산을 3차원에서 수행하기 위해서는 평균 값 속성을 만족하는 3차원 도메인을 구성해야 한다. 그러므로, 계층적 계산이 수행될, 간략화 되는 지역은 평면에 가까운 곳이어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 곡률 오차에 기반한 간략화 알고리즘[17]을 이용하여 평면에 가까운 지역에 위치한 꼭지점들을 제거하고 그 지역에서 계층적 계산을 수행한다.

표면의 곡률을 구하기 위해서는 그 표면은 미분 가능하여야 한다. 그러므로 이산적인 표면에서는 한 꼭지점과 그 이웃의 꼭지점에 관하여 미분 가능하지 않은 모양은 없고 적절한 모양으로 대응되어 미분 가능하다는 가정 아래에서 표면 곡률을 구한다. 그러므로 이산 곡률에서는 특이점이나 접히는 모서리들로 인하여 생기는 오차는 별도로 관리해야 한다. 꼭지점 중심의 이산 곡률은 기하학적 추론[18, 19]을 이용하여 구한다. 즉, 각과 면의 면적으로 표현되는 가우시안 곡률 K 와 이면각과 모서리의 길이로 표현되는 평균 곡률 H 를 다음의 식 (1), (2)와 같이 구한다.

$$K = \frac{2\pi - \sum_{i=0}^k \theta_i}{A} \quad (1)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^k l_i \alpha_i \right)}{A} \quad (2)$$

여기서, $A = \sum_{i=0}^k f_i$ 는 그림 1에서와 같이, 꼭지점의 이웃 삼각형들의 면적의 합을 뜻하고, θ_i 는 꼭지점 주위의 내각, l_i 와 α_i 는 꼭지점의 이웃 모서리들의 길이와 이웃 면들 사이의 이면각을 뜻한다.

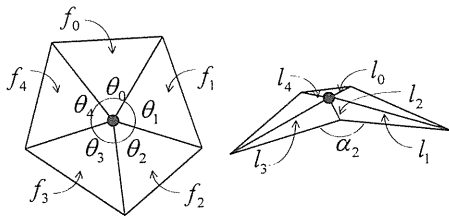


그림 1. 이산 곡률의 계산 요소

θ_i : 꼭지점 주위의 내각

f_i : 꼭지점 이웃 면의 면적

l_i : 꼭지점 이웃 모서리의 길이

α_i : 꼭지점 이웃 면들 사이의 이면각

미분 가능한 표면에서 곡률의 크기는 선형적으로 변화하므로, 굽은 정도(curvedness) R 를 이용하여 간략화 가중치를 정의할 수 있다. 굽은 정도의 식은 (3)과 같다.

$$R = \sqrt{\frac{(x_1^2 + x_2^2)}{2}} \quad (3)$$

여기서 x_1, x_2 는 최대, 최소 기본 곡률을 뜻한다. 또한 가우시안 곡률 K 는 식 (4)와, 평균 곡률 H 는 식 (5)과 같으므로, 각 꼭지점에 대해 이산 곡률로 구한 K 와 H 를 이용하여 굽은 정도 R 을 나타내면 식 (6)과 같다.

$$K = x_1 x_2 \quad (4)$$

$$H = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{2H^2 - K} \quad (6)$$

가우시안 곡률, 평균 곡률은 간략화 되는 메쉬의 면적과 서로 관련되어 변화하므로, 다음의 식 (7)과 같이, 곡률 오차를 정의하기 위한, 간략화 가중치 W 를 정의할 수 있다.

$$W = \lambda \frac{A}{A_{\max}} + (1 - \lambda) \frac{R}{R_{\max}} \quad (7)$$

여기서 λ 는 면적과 굽은 정도에 가중치를 주기 위한 계수로, 본 논문에서는 실험적 결과로 $\lambda = \frac{1}{2}$ 를 사용하였고, A_{\max} 는 꼭지점의 이웃 삼각형들의 면적의 합 A 의 최대값, R_{\max} 는 꼭지점의 굽은 정도 R 의 최대값을 뜻한다.

간략화 가중치에 따라 정렬된 꼭지점 중에서 제거될 수 있는 후보 꼭지점을 선택하기 위해, 곡률 오차를 계산한다. 곡률 오차는 간략화 전후의 곡률 변화량으로 정의된다. 곡률의 변화량을 계산하기 위해서는, 꼭지점의 제거로 인해 생긴 영역을 재삼각화 한 후 이웃 꼭지점들의 곡률을 재계산 해야한다. 본 논문에서 재삼각화 방법은 재삼각화 후에도 최대한 표면의 모양과 곡률이 유지될 수 있도록, 모서리에 대한 최소 이산 곡률을 찾아 삼각화

한다. 예를 들어, 그림 2 (a)에서 꼭지점 e 가 제거되는 경우 (b)나 (c)처럼 재삼각화가 될 수 있는데, 이 중 모서리에 대한 최소 이산 곡률을 찾아 재삼각화 할 경우 (c)와 같은 재삼각화가 이루어진다.

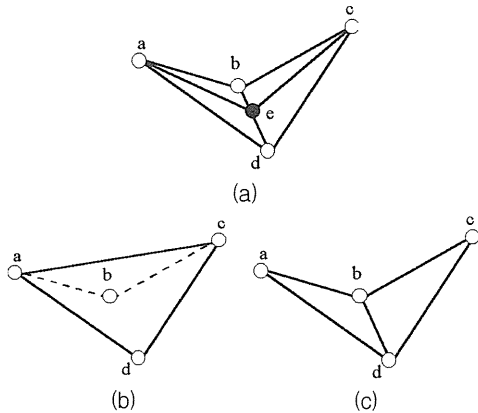


그림 2. 모서리에 대한 최소 이산 곡률에 의한 재삼각화

- (a) 제거될 꼭지점 e ,
- (b) 원래 모양이 유지되지 않은 재삼각화,
- (c) 모서리에 대한 최소 이산 곡률로 인해 원래 모양이 유지된 재삼각화

곡률 오차는 재삼각화 후 이웃 꼭지점들의 간략화 가중치의 변화량 중 가장 큰 값으로 정의되며, 곡률 오차 E 는 식 (8)과 같다.

$$E = \max \{ |W_{v_1} - W'_{v_1}|, \dots, |W_{v_n} - W'_{v_n}| \} \quad (8)$$

여기서 W_{v_i} 는 꼭지점의 n 개 이웃 꼭지점 중 i 번째 이웃 꼭지점 v_i 의 원래 간략화 가중치를 뜻하고, W'_{v_i} 는 간략화 후 재계산된 간략화 가중치를 뜻한다.

모든 꼭지점들은 이산 곡률 계산에 의해 계산된 간략화 가중치 값에 따라 정렬된다. 만약 꼭지점의 곡률 오차가 주어진 임계값 ϵ 보다 작으면 후보 꼭지점으로 선택되고, 곡률 오차가 임계값 ϵ 보다 크면 후보 꼭지점에서 제외된다.

계층적 계산을 수행하기 위해 제거되는 후보 꼭지점들의 이웃 꼭지점들로 최대 독립 집합(maximally independent set)[13]을 구하되, 본 논문에서는 그 구성 방법을 확장시킨다.

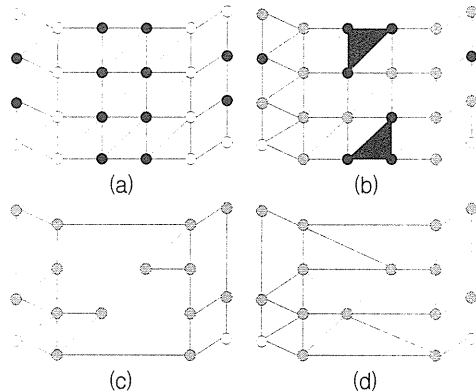


그림 3. 최대 독립 집합(회색 점)의 확장
(a) 주어진 임계값 ϵ 이내의 곡률 오차를 갖는 후보 꼭지점들(검은색 점),
(b) 제거될 후보 꼭지점과 면 선택,
확장된 최대 독립 집합 구성(회색 점)
(c) 꼭지점과 면 제거, (d) 재삼각화 결과

그림 3(a)의 검은색 꼭지점들은 곡률 오차가 주어진 임계값 ϵ 보다 작아, 후보 꼭지점으로 선택된 점들이고, 회색 꼭지점들은 주어진 임계값 ϵ 보다 큰 곡률 오차를 가져 후보 꼭지점에서 제외된 점들이다. 그림 3(b)에서와 같이, 후보 꼭지점들 중 곡률 오차가 작은 순서대로 제거될 후보 꼭지점이 선택되고, 또 3개의 후보 꼭지점을 갖는 면도 제거될 후보 면으로 선택된다. 그림 3(b)의 회색 점은 최대 독립 집합으로, 제거될 후보 꼭지점과 면의 이웃 꼭지점들로 구성된다. 그림 3(c), (d)는 간략화 후 생긴 영역을 재삼각화 하여 생성된 간략화 결과이다.

기존의 최대 독립 집합은 제거되는 꼭지점에 대해서만 그 이웃 꼭지점들을 원소로 갖는 집합이다. 그러나 곡률 오차에 기반한 간략화 알고리즘에서는 모서리에 대한 최소 이산 곡률에 따라 재삼각화가 이루어지므로, 충분히 평평한 곳에서는 꼭지점뿐만 아니라 면까지도 제거 가능하다. 즉, 최대 독립 집합은 계층적 계산의 지역적 영역의 경계를 위해 반드시 필요한 집합이지만, 그 지역이 충분히 평면에 가깝다면 그 경계를 반드시 꼭지점의 1차 이웃으로 국한시킬 필요가 없다. 그러므로 기존의 최대 독립 집합이 제거되는 한 꼭지점에 대해 그 1차 이웃만을 원소로 가졌던 구성 방법과 달리, 본 논문에서는 하나의 면이 제거될 때에도 그 면에 대한 1차 이웃 전부를 최대 독립 집합에 포함시켜, 평면에 가까운 지

역에서는 많은 꼭지점의 수를 제거하면서 동시에 계층적 계산의 경계를 만들 수 있도록, 최대 독립 집합의 구성 방법을 확장시킨다.

4. 간략화 메쉬의 계층적 계산

4.1 불연속 선형 하모닉 대응의 계층적 계산[12]

Duchamp et al.[12]은 기존 보다 빠른 불연속 선형 하모닉 대응 생성을 위한 계층적 선조건자를 만들기 위해 보간 연산자를 이용한 계층적 계산 방법을 제안하였다.

간략화에 의해 $K_{-(k+1)}$ 에서 제외된 K 의 꼭지점의 집합을 S_{-k} 라 하고, 간략화 된 메쉬들의 계층을 $\{K_{-k}\}$ 라 하자.

$$C_{-J}^{PL} \hookrightarrow C_{-(J-1)}^{PL} \hookrightarrow \dots \hookrightarrow C_0^{PL} = C^{PL}(K)$$

를 만족하는 $C^{PL}(K)$ 는 K 의 구간 상수 함수의 공간으로, 이 공간에서는 다음과 같은 보간 연산자 ι_k 를 정의할 수 있다.

$$\iota_k: C^{PL}(K_{-(k+1)}) \rightarrow C^{PL}(K_{-k})$$

$k=0, 1, \dots, J-1$ 이며, 보간 연산자 ι_k 는 불연속 하모닉 대응의 평균 값 속성으로부터 형성된 것으로, 불연속 하모닉 대응의 함수 $f \in C^{PL}(K_{-(k+1)})$ 와 $v \in K_{-k}$ 에 대해 보간 연산자 $f' = \iota_k(f)$ 는,

- ① $v \in K_{-(k+1)}$ 인 v 에 대해서는,

$$f'(v) = f(v) \quad (9)$$

- ② $v \in S_{-k} \cap \partial K_{-k}$ 인 v 에 대해서는,

$$f'(v) = 0 \quad (10)$$

- ③ $v \in S_{-k} - \partial K_{-k}$ 인 v 에 대해서는,

$$f'(v) = \sum_{i=1}^{n_v} \omega_{v,i} f(v_i) \quad (11)$$

이다. 여기서 n_v 는 꼭지점 v 의 이웃 개수이고 $\omega_{v,i}$ 는 식 (12)와 같다.

$$\omega_{v,i} = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^{n_v} x_j} \quad (12)$$

여기서 x_i 는 모서리 $\{v, v_i\}$ 의 스프링 상수이다.

이와 같은 보간 연산자에 제거되는 꼭지점 v 의 헛 함수 ϕ 를 적용시켜 다음과 같은 레이지 불연속 선형 하모닉 웨이브렛을 만든다.

$$\psi_v^{-k} = \iota_0 \circ \iota_1 \circ \dots \circ \iota_{k-1}(\widehat{\phi}_v^{-k})$$

이를 이용해 $C^{PL}(K)$ 를 아래의 식과 같이 다단계 분해한다.

$$C^{PL}(K) = \bigoplus_{k=-J}^0 W^{(-k)}(K)$$

$$W^{(-k)}(K) = \text{span}\{\psi_v^{-k} : v \in S_k\}$$

헛 함수와 불연속 선형 하모닉 웨이브렛을 이용하여 계층적 선조건자를 정의하고, 이를 사용하여 불연속 하모닉 대응을 기존보다 빠르게 생성한다.

4.2 간략화 메쉬의 계층적 계산

계층적 계산의 도메인을 3차원 간략화 메쉬로 옮겨온다. 제거되는 꼭지점은 곡률 오차에 의해 충분히 평평한 곳으로 보장되는 지역이므로 그 꼭지점과 이웃 꼭지점의 3차원 좌표들은 계층적 계산이 수행되기 위한 평균 값 속성을 만족할 것이다.

계층적 계산을 이용해 간략화 메쉬 사이의 관계를 생성한다. 레벨 $-k$ 의 R^3 상의 좌표 함수 $f(v) \in F(K_{-k})$ 로부터 레벨 $-(k+1)$ 의 좌표 함수 $f'(v) \in F(K_{-(k+1)})$ 를 구하는 계산을 계층적 계산의 보간 연산자 ι_k 를 이용하여, 다음과 같이 계산한다.

- ① 꼭지점 $v \in K_{-(k+1)}$ 에 대한 좌표 함수

$f'(v)$ 는 식 (9)와 같이 $f(v)$ 의 값을 그대로 유지한다.

- ② 꼭지점 $v \in S_{-k} \cap \partial K_{-k}$ 에 대한 좌표

함수 $f'(v)$ 는 식 (13)과 같이, 2개의 이웃 경계 꼭지점들의 좌표 함수 $f(v)$ 의 가중치 평균으로 좌표 함수 $f'(v)$ 를 계산한다.

$$f'(v) = \frac{x_1 f(v_1) + x_{n_v} f(v_{n_v})}{x_1 + x_{n_v}} \quad (13)$$

- ③ 꼭지점 $v \in S_{-k} - \partial K_{-k}$ 에 대한 좌표

함수 $f'(v)$ 는 식 (11)과 같이 스프링 상수를 이용한 가중치 평균을 계산한다.

식 (13)이 식 (10)과 다른 이유는, 좌표 함수 $f'(v)$ 를 0으로 놓는 경우 그 계수 값이 커지기 때문이다. 또한 경계의 꼭지점에 대해 식 (11)을 적용하게 되면 가중치 평균의 위치가 경계 안쪽에 위치하므로 역시 계수의 값이 커진다. 그러므로, 양끝의 경계 꼭지점만으로 가중치 평균을 구하여 계수 값을 작게 만든다.

계산 결과, 레벨 $-k$ 에서 레벨 $-(k+1)$ 로 각 꼭지점마다 이와 같은 계층적 계산이 수행되고, 가중치 w_{v_i} 에 따라 가중치 행렬(제거되는 꼭지점들에 대해 그 이웃 꼭지점들에는 가중치를 갖고, 나머지 꼭지점들에 대해서는 모두 0의 값을 갖는 행렬)이 구성된다.

가중치 평균의 위치로부터 제거되는 꼭지점의 위치의 차이 값을 계수로 생성한다. 레벨 $-k$ 에서 레벨 $-(k+1)$ 로 제거되는 ②와 ③ 종류의 꼭지점 $v \in S_{-k}$ 에 대해, 계수 d_{-k}^v 를 다음의 식 (14)와 같이 구한다.

$$d_{-k}^v = \sqrt{2^{-k}}(f(v) - f'(v)) \quad (14)$$

여기서 $\sqrt{2^{-k}}$ 는 계수의 정규화이다. 이 과정은 분할과 마찬가지로 각 레벨마다 이루어진다.

이와 같은 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 다음의 식 (15)로 레벨 $-(k+1)$ 에서 레벨 $-k$ 의 꼭지점 $v \in S_{-k}$ 를 복원시킬 수 있다.

$$f(v) = f'(v) + d_{-k}^v \sqrt{2^k} \quad (15)$$

이와 같이 간략화 메쉬에 대해 스프링 상수를 이용한 계층적 계산으로, 분할 연결성 없이 계층적 구성의 다단계 메쉬를 생성할 수 있다.

4.3 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬와의 비교

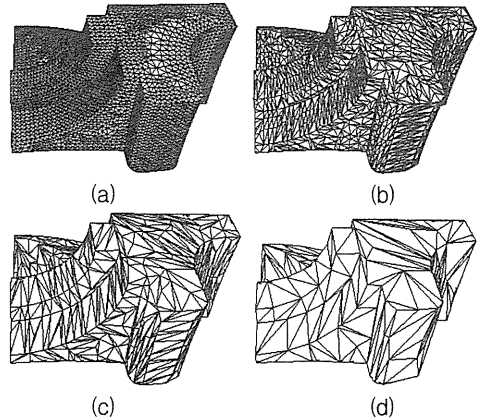
계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는, 근사 과정을 생략하고 간략화 메쉬를 이용하여 생성된 다단계 메쉬임에도 불구하고, 기존의 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬와 비슷한 구조를 갖는다.

기존의 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬가 기본 메쉬와 세부 계수로 구성되어 있다면, 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 간략화 알고리즘에 의해 가장 간략화된 메쉬와 계수로 구성되어 있다. 또한 기존의 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬가 분할 행렬을 이용하여 메쉬 레벨을 증가시키는 것과 마찬가지로, 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 가중치 행렬을 이용하여 메쉬 레벨을 증가시킨다. 그리고 분할 연결성을 갖는 다단계 메쉬의 세부 계수 저장 방식과 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬의 계수의 저장 방식도 같다.

계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 계수를 가지므로, 간략화 메쉬의 단순 축적으로 생성된 다단계 메쉬가 갖지 못하는 다면체 압축이나 다단계 편집에서의 활용이 가능하다.

그러나 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 분할 연결성이 없으므로, 부드러움이 보장되지 못하고 연속적인 LOD 제어나 다단계 메쉬의 질이 간략화 알고리즘에 의존한다.

그 대신 분할 연결성을 생성하려면 거쳐야 하는 복잡한 계산의 근사 과정을 생략할 수 있으므로, 생성 복잡도를 낮추어 생성 속도의 향상을 도모할 수 있고 근사 과정에서 발생하는 원래 메쉬와 분할 메쉬와의 대응 문제를 피할 수 있다.

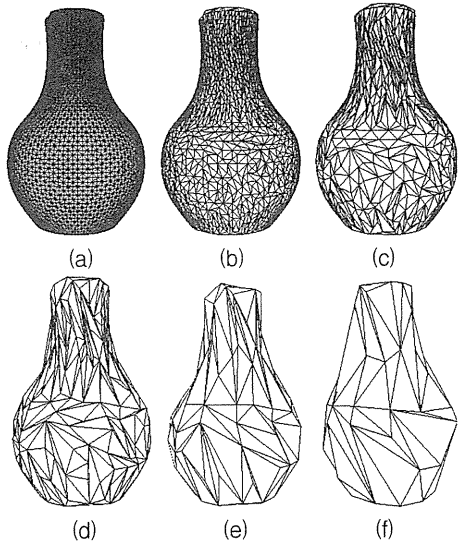


	레벨	간략화 (%)	꼭지점 (개)	면 (개)	계수 (0아닌개수/총)
(a)	0	0.0	6475	12946	0 / 0
(b)	-5	73.78	1698	3392	9560 / 14331
(c)	-10	91.55	547	1090	12012 / 17784
(d)	-15	96.69	214	424	12716 / 18783

그림 4. 팬 디스크 모델의 다단계 메쉬 예

5. 실험 결과

그림 4, 5는 곡물 오차 기반의 간략화 알고리즘으로 생성된 간략화 메쉬에 대해 계층적 계산을 수행하여 생성된 다단계 메쉬의 예이다. 그림 4의 팬 디스크 모델은 평평한 곳이 많으므로 0의 값을 갖는 계수가 많은 반면, 그림 5의 도자기 모델의 경우 0의 값을 갖는 계수의 개수가 적다. 그림 4, 5에서 보듯이 간략화 메쉬의 계층적 계산을 이용하여 생성된 다단계 메쉬는, 메쉬 레벨 사이의 연속적인 LOD 제어와 다단계 메쉬의 질이 간략화 방법에 의존된다. 곡물 오차 기반의 간략화 알고리즘은 계층적 계산의 도메인을 생성하기 위해, 제거 꼭지점 또는 면의 선택이나 재삼각화를 곡물을 기반으로 한다. 이로 인해 그림 5에서 보는 바와 같이 도자기 옆선의 실루엣이 사라지면서 오히려 큰 계수를 생성하고, 재삼각화에서 면의 중형비도 고려되지 않아 다단계 메쉬의 질에 영향을 끼치고 있다.



레벨	간략화 (%)	꼭지점 (개)	면 (개)	계수 (0아닌개수/총)
(a)	0.0	5851	11495	0 / 0
(b)	68.33	1853	3649	11837 / 11994
(c)	87.35	740	1446	15156 / 15333
(d)	93.23	396	768	16520 / 16710
(e)	97.42	151	387	17015 / 17211
(f)	98.24	86	162	17167 / 17364

그림 5. 도자기 모델의 다단계 메쉬 예

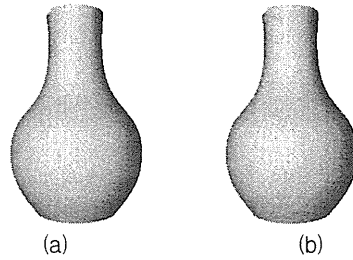


그림 6. 도자기 모델의 다면체 압축 예
(a) 계수 중 100% 사용,
(b) 계수 중 9.57% 사용

그림 6은 도자기 모델의 다면체 압축 예로, 계층적 계산 후에 생성된 계수 중 각각 100%와 9.57%의 계수를 사용하여 복원한 결과이다. (b)의 경우 작은 수의 계수라도 그 형태가 복원될 수 있음을 볼 수 있으나, 자세히 보면 도자기 표면이 부드럽지 못하고 울퉁불퉁함을 알 수 있었다.

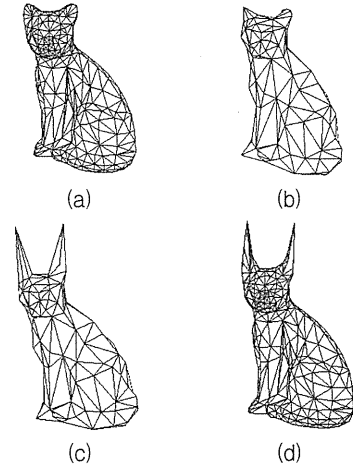


그림 7. 다단계 편집의 예
(a) 원래의 모델, (b) 다단계 메쉬(레벨 -3)
(c) 편집(레벨 -3), (d) 복원(레벨 0)

그림 7은 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 생성된 다단계 메쉬를 다단계 편집에 응용한 예이다. (b)의 레벨 -3의 다단계 메쉬에 대해 양쪽 귀를 잡아 당겨 (c)처럼 편집한 후 복원한 결과, (d)와 같이 편집된 결과가 남아 있는 레벨 0의 다단계 메쉬를 얻었다.

이와 같이 본 논문 제안 알고리즘으로 생성된 다단계 메쉬는 다면체 압축 및 편집된 결과가 다른 레벨에 자동으로 영향을 주는 다단

계 편집이 가능하다.

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 임의의 메쉬로부터 곡률 오차 기반의 간략화 알고리즘으로 생성된 간략화 메쉬에 대해 계층적 계산의 수행하여 다단계 메쉬를 생성하는 알고리즘을 제안하였다. 간략화 메쉬의 계층적 계산의 사용으로, 기존의 분할 연결성을 이용한 다단계 메쉬 생성 방법에서 사용되었던 복잡한 근사 과정을 생략할 수 있었고 근사로 인해 발생하는 대응 문제를 발생시키지 않았다.

이와 같이 본 논문의 알고리즘으로 생성된 계층적 계산 구조의 다단계 메쉬는 분할 연결성을 갖지 않으므로 부드러움을 갖지 못하고 연속적인 LOD 제어나 다단계 메쉬의 질이 간략화 알고리즘에 의존되는 결과를 보였으나, 간략화 메쉬의 계층적 계산 결과 생성되는 계수로 인해 다면체 압축이나 다단계 편집 등에 활용될 수 있음을 보였다.

향후 연구 과제로 다단계 메쉬에 대응되는 다단계 텍스처 맵핑과 계층적 계산의 3차원 적용에 대한 수학적 타당성 제시를 고려하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Curless, B. and M. Levoy. *A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images*. Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings), pp. 203-312, August 1996.
- [2] Hoppe, H. *Surface Reconstruction from Unorganized Points*. Ph.D. thesis, Dept. of Computer Science & Engineering, Univ. of Washington, Seattle, 1994.
- [3] Turk, G. and M. Levoy. *Zippered Polygon Meshes from Range Images*. Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), pp. 259-268, August 1997.
- [4] Ciampalini, A., P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno. *Multiresolution Decimation Based on Global Error*. Technical Report C96-021, CNUCE-C.N.R., Pisa, Italy, July 1996.
- [5] Hoppe, H. *Progressive Meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings), pp. 99-108, August 1996.
- [6] Lounsbery, M. *Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type*. Ph.D. thesis, Dept. of Computer Science & Engineering, Univ. of Washington, Seattle, 1994.
- [7] Certain, A., J. Popovic, T. DeRose, T. Duchamp, D. Salesin, and W. Stuetzle. *Interactive Multiresolution Surface Viewing*. Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings), pp. 91-98, August 1996.
- [8] Zorin, D., P. Schröder, and W. Sweldens. *Interactive Multiresolution Mesh Editing*. Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), pp. 259-268, August 1997.
- [9] Eck, M., T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, and W. Stuetzle. *Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), pp. 172-182, August 1995.
- [10] Gross, M. H., R. Gatti, and O. Staadt. *Fast Multiresolution Surface Meshing*. In Proceedings of IEEE Visualization '95, pp. 135-142, IEEE Computer Society Press, 1995.
- [11] Krishnamurthy, V. and M. Levoy. *Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '96 Proceedings), pp. 313-324, August 1996.
- [12] Duchamp, T., A. Certain, T. DeRose, and W. Stuetzle. *Hierarchical Computation of PL Harmonic Embeddings*. Technical Report, Dept. of Mathematics, Univ. of Washington, Seattle, July 1997.
- [13] Lee, A., W. Sweldens, P. Schröder, L. Cowsar, and D. Dobkin. *MAPS: Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces*. Computer Graphics (SIGGRAPH '98 Proceedings), pp. 95-104, August 1998.
- [14] Kobbelt, L., S. Campagna, J. Vorsatz, and H.-P. Seidel. *Interactive Multi-Resolution Modeling on Arbitrary Meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '98 Proceedings), pp. 105-114, 1998.
- [15] Kobbelt, L. *Discrete Fairing*. In Proceedings of the Seventh IMA Conference on the Mathematics of Surfaces, pp. 101-131, 1997.

- [16] Guskov, I., W. Sweldens, and P. Schröder. *Multiresolution Signal Processing for Meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '99), pp. 325-334 1999.
- [17] Kim, S.-J., W.-K. Jeong, and C.-H. Kim. *LOD Generation with Discrete Curvature Error Metric*. Proceedings of Korea Israel Bi-National Conference, pp. 97-104, September 1999.
- [18] Falcidieno, B., and M. Spagnuolo. *Geometric Reasoning for the Extraction of Surface Shape Properties*. In D. Thalmann and N. M. Thalmann, editors, *Communication with Virtual Worlds (CGI '93 Proceedings)*, pp. 166-178, 1993.
- [19] Borrelli, V. *Courbures Discretées*. Masters thesis, Université Claude Bernard-Lyon 1, 1993.