

# 이미지 기반 특징 유지 3차원 메쉬 간략화 알고리즘

김수균, 지준용, 김창현 | 고려대학교

## 1. 개 요

3D 다각형 모델의 원본 형상과 외형을 최대한 유지하면서 단순한 형태로 변환하기 위해 최근 많은 간략화 알고리즘이 개발되어 왔다. 간략화 알고리즘은 다양한 경우에 비슷한 결과를 만들어 낸다. 하지만 아주 낮은 단계의 해상도를 가지는 모델에서는 모델에 대한 의미나 혹은 고차원적인 의미가 종종 무시된다. 왜냐하면 이러한 특징들은 인간의 인지에 의해 주관적으로 인식되기 때문이다. 예를 들어 인간 얼굴 모델의 경우 눈, 눈썹, 코와 입술 선과 같은 영역은 비록 그 영역이 간략화 기준에 대해 작은 기하학적 오차를 가지고 있지만 의미적으로 매우 중요하다.

이 문제를 해결하기 위해서 이전 연구<sup>[17, 20]</sup>들은 사용자가 간략화 수행 중에 선택적으로 의미 있는 특징을 다루는 방법을 사용했다. 이러한 연구들은 사용자가 직관적으로 찾을 수 없는 임계 값을 반드시 선택해야 되는 단점이 있다. 사용자는 3D 다각형 모델에 대해 의미 있는 특징을 찾기 위한 최적의 임계 값을 찾아야 한다. 그리고 이 작업은 매우 숙련된 기술이 요구되고 지루할 뿐만 아니라 시간도 많이 소비된다. 임계 값이 매우 크면 고주파의 잡음과 같은 불필요한 영역이 특징에 포함되고 임계 값이 작으면 의미 있는 특징은 찾아지지 않는다. 레인지 스캐닝 시스템(range scanning system)은 텍스처와 기하학적 정보를 제공하기 때문에 이러한 두 정보를 모두 사용할 필요가 있다. 그러므로 제안 방법은 기하학 특징 맵과 텍스처 특징 맵을 이용한 새로운 간략화 척도를 제안한다. 위의 두 가지 특징 맵을 결합함으로써 본 알고리즘은 모델에서 의미 있는 특징을 사용자의 개입 없이 유지한다. 우리는 특징을 추출하기 위해 세 종류의 특징 맵을 이용한다. 첫 번째로 텍스처 특징 맵은 이미지 처리 기술을 이용해서 텍스처 이미지에서 채도 혹은 명암의 변화를 표현하는 경계선을 추출하여 만들어진다. 두 번째로 3D 정점에 대한 이산 곡률을 계산하여 이를 곡률 특징 맵으로 저장하고, 이를 에지 디텍터로 분석한다. 마지막으로 모델 특징 맵은 텍스처 특징 맵을 곡률 특징 맵에 중첩함으로써 생성된다. 예를 들어, 텍스처 특징 맵은 얼굴 모델에서 코의 특징을 찾아내지 못하지만 (즉, 코 위에 있는 픽셀과 그 주변에 있는 다른 픽셀이 구분이 되지 않기 때문이다), 곡률 특징 맵은 그것을 찾아 낼 수 있다. 모델이 텍스처 정보를 제공하지 않을 경우엔 모델은 곡률 정보를 가지고 있는 2D 영역으로 매개 변수화된다. 모델 특징 맵의 2D 선 형태 특징을 3D 메쉬에 일치시킴으로써 특징 선을 찾고, 이 부분에 가중치를 주어 간략화 과정 중에 특징 선을 유지할 수 있다. 다음은 제안 방법의 특징에 대한 요약이다.

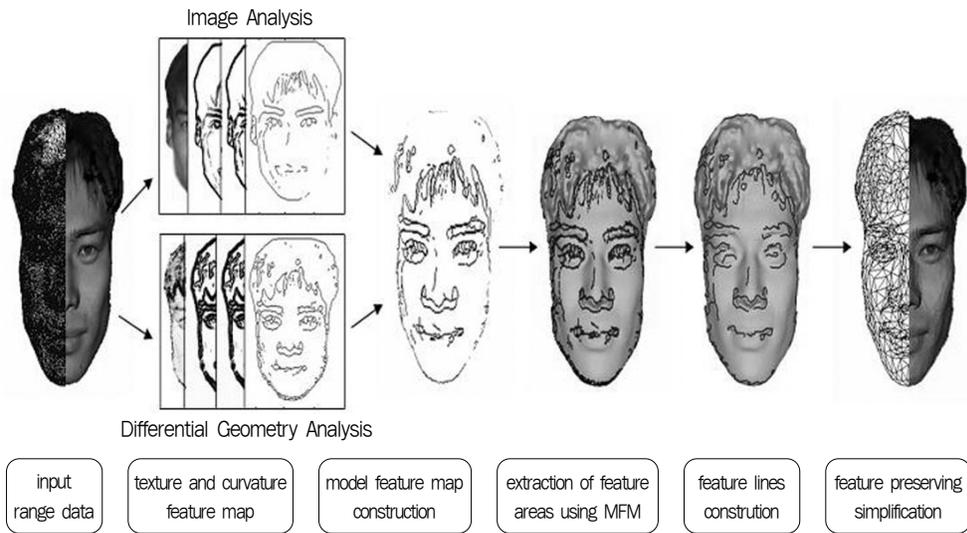


그림 1. 제안 방법의 개요도: 입력 모델은 레인지 스캐닝 데이터; 텍스처와 곡률 특징 맵으로 구성된 MFM (모델 특징 맵) 을 만들고 3D 모델에서 MFM에 해당하는 메쉬에서의 특징 영역을 추출; 그 다음 추출한 영역을 특징 선으로 만듦; 특징 선을 부드러운 선으로 변환한 후 특징-유지 간략화를 수행

### 특징

1. 제안 방법은 특징-유지 간략화를 위해 텍스처 특징 맵과 곡률 특징 맵을 결합하여 의미 있는 특징 영역을 나타낸다.
2. 의미 있는 특징을 직접 명시해야 되는 어려운 작업을 벗어나 자동적으로 의미 있는 특징을 찾아냄으로써 사용자가 편리하게 다룰 수 있다.

## 2. 관련 연구

오늘날 반복적인 에지 축약에 기반을 둔 메쉬 간략화 알고리즘<sup>[24, 27, 28]</sup>은 주목을 받고 있다. 왜냐하면 원본 메쉬의 외형과 형상을 유지하기 위해 새로운 정점 위치가 제어될 수 있고 재삼각화(retriangulation)가 필요 없기 때문이다. QEM<sup>[11, 12, 9]</sup>은 반복적인 에지 축약과 거리의 제곱의 합을 이용하는 메모리 효율적인 알고리즘이며 간략화 진행 과정 동안 물체의 정점에 축약의 비용을 축적한다. 비록 그 방법은 Hausdorff 거리와 연관이 되는지가 명확하지 않지만 제안된 척도는 빠르고 비교적 정확하다. 최근에 이 방법은 외형의 속성을 다루도록 일반화되었다. 왜냐하면 이차 형태는 거리, 면적, 부피와 같은 것들을 최소화하는데 효율적이기 때문이다. 이 방법이 부피 간략화<sup>[24]</sup> 접근 방법에 적용되면 삼각형의 면적 변화를 최소화시킬 수 있다. Garland<sup>[12, 9]</sup>와 Hoppe<sup>[6]</sup>는 기하학적 정보와 법선, 색상과 텍스처와 같은 표면 속성이 결합된 확장된 오차 척도를 제안했다. 확장된 방법은 오직 기하학적 정보만 사용하는 것 보다 정확하고 결과적으로 고품질의 메쉬가 만들어지게 한다. Cohen<sup>[3]</sup>은 제곱 형식을 이용하지 않았지만 텍스처 오차 측정 알

고리즘을 제안했다. Alliez<sup>[1]</sup>는 다양한 속성 (균등성, 세미-레귤러티, 곡률에 기반한 재샘플링, 특징-보존)을 지니고 있는 복잡한 임의의 메쉬를 만들어 내는 재샘플링 알고리즘을 제시했다. 그들은 원본 기하학적 정보를 그러한 속성들을 얻어내기 위해 하프-토닝 및 적분과 같은 다양한 조작이 수행되어 지는 하나 이상의 2D 맵과 교체하였다. 그러나 기본 개념은 충분히 단순하지만 전체 과정의 비용은 매우 높다. Vorsatz<sup>[30]</sup>는 remeshing 과정 동안 삼각화된 표면의 뚜렷한 특징을 찾아내는 자동적인 기술을 선보였다. 이 방법은 뚜렷한 에지를 찾기 위해 임계 값에 의존하지 않는다는 점에서 주목할 만하다. 이 방법은 또한 부드러운 특징을 고려하지 않고 오직 뚜렷한 에지를 따라서 정점을 배열하는데 초점을 두었다. 이산 곡률<sup>[4, 7, 19]</sup>은 삼각형 표면의 모양을 측정하기 위한 기하학적인 척도이다. Kim<sup>[18]</sup>은 이산 곡률을 원본 모델의 모양을 유지하기 위한 간략화 방법의 좋은 척도로 사용하였다. 이미지 처리 기술을 3D 메쉬에 적용함으로써 메쉬에서 특징 점들을 찾는 몇몇 방법들이 제안되었다. Guskov<sup>[44]</sup>는 고주파 영역의 표현을 향상시키기 위해 기하학적 필터를 3D 메쉬에 적용하였다. Hubel<sup>[2]</sup>는 두 법선의 차이에 기반한 에지에 가중치를 주는 특징 에지를 3D 메쉬에서 찾고 다항식을 파라미터 평면과 메쉬 사이에 있는 교차 선에 맞추는 방법을 제안했다. 이 방법의 단점은 사용자가 직관적으로 찾기 힘든 임계 값을 선택해야 한다는 데 있다. 게다가 두 방법 모두 다 3D 메쉬에서 특징 점을 추출하기 위해 사용되는 시간이 만족스럽지 못하다. Pauly<sup>[25]</sup>는 포인트-샘플된 표면에서 선 형태의 특징을 검출하고 찾아내는 새로운 방법을 소개하였다. 이 시스템은 선 형태의 특징을 찾고 추출하기 위한 사용자의 제어를 필요로 한다. Kobbelt [KS01]는 enhanced distanced field representation과 확장된 마칭 큐브 알고리즘을 이용한 feature sensitive surface extraction for preserving features를 소개하였다. Kho와 Garland<sup>[17]</sup>는 특징을 유지하기 위한 user-guided simplification algorithm을 소개하였다. Pojar<sup>[26]</sup>는 user-controlled creation of multiresolution meshes를 소개하였다. 이 방법은 사용자가 선택적으로 기하학적 영역을 제어해야 한다. Gumhold<sup>[13]</sup>은 포인트 클라우드에서부터 특징을 추출하는 방법을 소개했고 포인트 클라우드에서 직접적으로 특징 선도 추출했다. 이 방법은 covariance 분석과 좋은 결과 이미지를 위해 지그재그 에지 문제를 해결할 수 있는 미니맵 스페닝 그래프를 이용했다. Walter<sup>[6]</sup>은 다차원 데이터 셋에 대한 특징-유지 간략화 방법을 제안했다.

### 3. 시스템 개요

그림 2는 제안 방법의 특징-유지 간략화의 개요도를 보여준다. 3D 다각형 모델은 텍스처와 기하학적 정보를 가지고 있다. 제안 방법은 사용자의 제어 없이 의미 있는 특징을 유지하며 다중해상도를 가지는 모델을 생성해낸다. 다각형 모델에서 의미 있는 특징을 추출하기 위해 3D 모델에서의 곡률의 변화와 텍스처 정보와 같은 의미 있는 특징을 분석하기 위한 텍스처 특징 맵과 곡률 특징 맵을 제안한다. 채도와 명암의 변화를 나타내는 경계선이 포함된 두 개의 맵을 에지 디텍터를 이용해서 생성한다. 이 방법은 쉽게 동작되고 많은 알고리즘에서 사용되었다. 따라서 제안 방법에서 제안한 방법은 Canny edge detection, block binary, skeleton 알고리즘과 같은 전통적인 이미지 처리 방법을 사용한다. 모델 특징 맵은 곡률 특징 맵과 텍스처 특징 맵을 결합함으로써 생성된다. 모델 특징 맵에서 2D 특징 선에 해당되는 3D

특징 영역을 매쉬에서 추출하고 그것들을 선 형태의 특징으로 결합한다. 지그재그 연결 선을 부드러운 연결 선으로 바꾼 후에 특징-유지 간략화를 위한 가중치에 대한 성분이 추가된 확장된 QSlim<sup>[12]</sup> 방법을 이용해서 복잡한 다각형 모델을 간략화한다.

### 3.1 이미지 분석

레이저 스캐닝 시스템에서 얻어진 복잡한 다각형 모델은 텍스처 정보 뿐 만 아니라 기하학적 정보도 제공한다. 이미지 처리를 통해 텍스처 이미지의 윤곽선을 찾아낼 수 있다. 이미지 데이터는 보통 [rgb] 값의 배열로 표현되기 때문에 다루기 쉽고 많은 알고리즘에서 사용된다. 텍스처 이미지는 다각형 모델에서의 텍스처 좌표를 이용하는 자연적인 매개 변수화를 가지고 있다. 에지 추출은 이미지에서 에지를 추출하고 보강할 때 많이 사용되는 알고리즘이다. 에지는 경계 선으로 배경에서 이미지가 경계를 이루거나 겹쳐있는 영역을 말한다. 에지는 이미지의 채도와 명암의 변화를 포함한다. Canny, Sobel, Robert, Laplacian, Prewitt 알고리즘이 에지 추출에 많이 사용되지만 각각 장·단점을 가지고 있다. 특히 Canny 에지 알고리즘은 다른 방법들 보다 에지를 잘 찾아낸다.

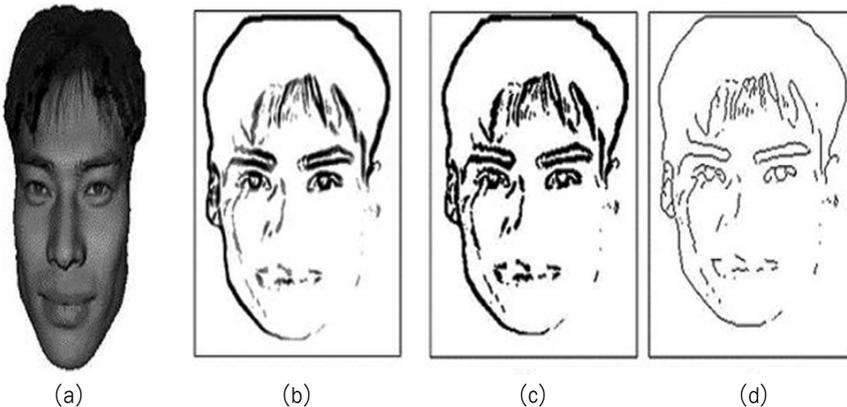


그림 2. 텍스처 특징 맵 (a) 텍스처 맵핑된 모델, (b)Canny 알고리즘, (c) Block binary, (d) skeleton algorithm

#### 3.1.1 텍스처 특징 맵

제안 방법은 텍스처 이미지에서  $n \times n$  배열로 구성된 [rgb] 값 텍스처 특징 맵을 생성해 낸다. 이미지에서 2D 특징 선을 찾기 위해서 Canny 에지 추출과 block binary와 skeleton algorithm과 같은 이미지 처리 기술을 이용한다. Canny 에지 추출 방법은 물체에서 에지를 찾아내며 특히 솔리드한 영역의 이미지에 대해 매우 유용하다.

이미지에서 기울기를 계산해내는 최적 일차 미분 필터를 사용하여 잡음 레벨을 측정한다. 따라서 제안 방법은 Canny 알고리즘을 사용한다 (그림 2b). Block binary 기술을 사용하여, 추출한 에지를 명확히 한다(그림 2c 참조). 즉 흑백 이미지의 적당한 구분을 이용해서 두꺼운 에지를 얻는다. Skeleton 알고리즘 (그림 2d)을 이용하여 에지를 얇게 한다. 물체의 골격은 반복적으로 물체를 얇게 함으로써 생성된 한 개 픽셀 크기의 얇은 픽셀 집합으로 구성된다. 그 방법은 보통 모든 선을 한 픽셀 두께로 함으로써 Canny

에지 추출 혹은 block binary 방법에서 나온 결과를 정리하는데 쓰인다.

### 3.2 미분 기하 분석

이산 곡률, 법선, 이면각과 같은 미분 기하 정보는 넓이 추정 계산과 같은 기하학적 처리를 통해서 분석된다. 제안 방법은 다각형 모델을 대체할 수 있는 표현을 만들었다. 그것은 2D 이미지 형태로서 쉽게 다룰 수 있다. 기하학적 입력 데이터에서 곡률 특징 맵을 만드는 방법도 나타내고, 이를 에지 디텍터를 이용해서 곡률 특징 맵을 얻는다.

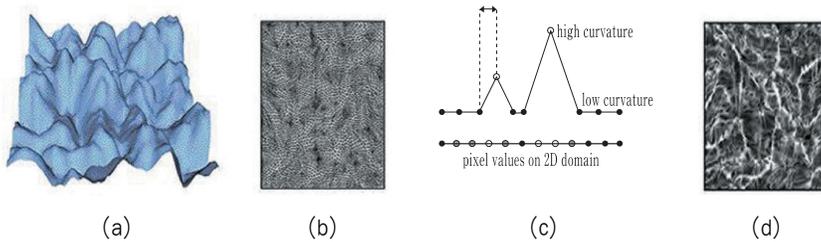


그림 3. 곡률 특징 맵. (a) 텍스처 정보 없는 지형 모델, (b) 모델이 2D 영역으로 매개 변수화됨, (c) 곡률 값을 RGB 값으로 바꿈. 화살표는 정점간의 간격을 나타냄(메쉬의 측면도), (d) 곡률 맵 (이미지 처리 기술을 적용하지 않음)

#### 3.2.1 곡률 특징 맵

이산 곡률<sup>[4, 7, 19]</sup>은 이산 표면에서의 곡률을 추정하는 것이다. 다각형 메쉬에서  $[xyz]$  데이터 값 형태의  $n \times n$  배열로 구성된 곡률 맵을 만들 수 있다. 이론적 관점에서 삼각 메쉬와 같은 이산 표면은 모든 곳에서 곡률을 가질 수 없다. 왜냐하면 평평한 면과 같은  $C^0$  미분 가능하지 않은 면에서의 에지와 정점에서는 곡률이 적절하게 정의되지 않기 때문이다. 그러나 삼각 메쉬를 알지 못하는 부드러운 표면의 부분 선형 추정이라고 생각한다면 삼각 메쉬 자체가 주는 정보만을 이용해서 알지 못하는 표면의 곡률을 추정할 수 있다. 제안 방법은 삼각 메쉬의 정점에서 절대 평균 곡률<sup>[10]</sup>을 계산하는데 초점을 두었다. 입력 다각형 모델의 정점에서 이산 가우시안 곡률  $K$ 와 절대 이산 곡률 $|H|$ 와 절대 이산 주 곡률  $|k_1|$ 과  $|k_2|$ 의 합을 계산한다. 두 방법으로 곡률 특징 맵을 만들 수 있다.

텍스처 정보: 텍스처 정보를 포함하고 있는 3D 다각형 모델은 텍스처 좌표에 있는 점  $u = (u_x, u_y)$ 과 그것에 대응하는 메쉬 위에 있는 3D 정점  $v = (x, y, z)$  사이의 대응 함수를 효율적으로 만들 수 있는 방법을 제공한다. 따라서 제안 방법은 대응 함수를 이용해서 곡률 맵을 쉽게 만들 수 있다.

매개 변수화: 만약 3D 모델이 텍스처 정보를 제공하지 않는다면, 모델은 2D 영역으로 매개 변수화된 다(그림 3b 참조). 대응 함수<sup>[8, 23]</sup>는  $R^3$ 에 있는 메쉬  $S$ 와 매개 변수화된 공간  $R^2$ 에서의 부분 집합과 일대일 함수이다. 대응 함수를 이용해서 2D 곡률 맵을 만든다.

제안된 방법은 곡률 맵을 만들기 위해서 가우시안 곡률과 평균 곡률을 측정한다. 실험적으로 볼 때 가우시안 곡률 맵은 좋은 품질을 보여주지 못한다. 그래서 평균 곡률을 사용하여 정점에서의 이산 곡률 값을 선형 보간해서 계산된 맵을 만든다(그림 3c 참조). 정점에서의 곡률 값을 RGB 값으로 변환한다( $R, G, B$ 는 같은 값을 가진다.): 즉 곡률 값은  $[rgb]$ 으로 취급된다. 모델에서의 최대 최소 곡률 값은 2D 영역에서 0부터 255까지이다. 마지막으로 흑백 이미지를 얻는다(그림 3d 참조). 이 이미지에서 2D 특징 선

을 찾기 위해 Canny, block binary, skeleton 알고리즘 과 같은 이미지 처리 기술을 적용한다 (그림 2 참조).

### 3.3 모델 특징 맵

이 절에서는 텍스처와 곡률 특징 맵을 결합하는 방법에 대해 소개한다(두 개의 맵은 각각 장·단점을 가지고 있다). 그림 4a에서 텍스처 특징 맵은 픽셀을 구분할 수 없기 때문에 코를 찾아내지 못한다. 그러나 곡률 특징 맵은 기하학적 처리를 해서 만든 것이기 때문에 코의 영역을 찾아낼 수 있다. 따라서 제안 방법은 텍스처와 곡률 특징 맵 사이의 가중치 함수를 선택한다. 텍스처 곡률 맵의 가중치를 곡률 특징 맵의 픽셀에 더한다. 따라서 모델 특징 맵의 경계는 명확해 진다. 그림 4c는  $\alpha$ 와  $(1-\alpha)$  값이 0.5일 때의 결과를 보여준다. 모델 특징 맵의 식은 다음과 같다.

$$MFM = \alpha \cdot \text{texture feature map} + (1-\alpha) \cdot \text{curvature feature map} \quad (1)$$

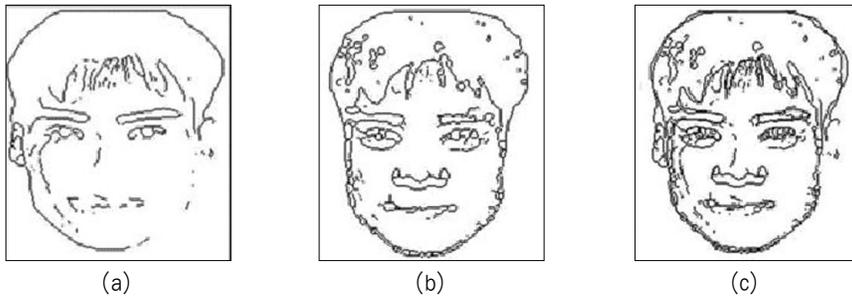


그림 4. 모델 특징 맵. (a) 텍스처 특징 맵, (b) 곡률 특징 맵, (c) 모델 특징 맵 ( (a) + (b)을 픽셀 단위로 합함 )

## 4. 특징 영역의 추출

2D 특징 선에 해당되는 메쉬의 3D 특징 영역을 MFM에서 추출해야 한다. 영역 D를 MFM에 대한 단위 영역이라 하자. 영역 D는 픽셀 좌표를 가지는  $(u_i/(n-1), v_j/(n-1), n=512, ij = 0, n-1 ) n \times n$  픽셀의 사각 영역이다. 영역 D의 픽셀은 3D 특징을 가지고 있고 백색 픽셀은 MFM이 흑백 이미지가기 때문에 2D 특징 선을 나타낸다. 흑백 이미지 I를 의미하는  $\nabla I$ 를 사용하여 영역 D에서 2D 특징 선을 찾는다. 다음 단계는 매개 변수화이다. 대부분의 다각형 모델은 텍스처 좌표 (uv)를 가지고 있다. 제안 방법은 텍스처 좌표를 고려해서 3D 기하 좌표를 텍스처 맵에 매개 변수화 하는 직관적인 방법을 사용한다. 정점 좌표  $(x_i, y_i, z_i)$ 는 텍스처 좌표  $(s_i, t_i)$ 를 사용하여 영역 D에 매개 변수화된다.  $\nabla I(u_i, v_i)$ 는 영역 D에서의 기울기이다. 제안 방법은 메쉬 위의  $(u_i, v_i) \leq (s_i, t_i) \leq (u_i, v_i)$  범위 안에서  $(s_i, t_i)$  좌표를 찾는다. 따라서 영역 D에서 메쉬의 3D 특징 영역을 추출한다. 왜냐하면 텍스처 좌표  $(s_i, t_i)$ 와 정점 좌표  $(x_i, y_i, z_i)$ 를 알기 때문이다. 그러나 모델이 텍스처 좌표를 가지고 있지 않다면 매개 변수화를 적용한다<sup>[8]</sup>(그림 3b 참조). 그림 5는 특징 영역을 찾는 방법을 설명하고 있다. 특징 영역은 메쉬의 에지들의 집합으로 구성되어 있기 때문에 이를 선 형태의 특징으로 만들어야 한다.

## 5. 특징 선 추출

이 절에서 가장 중요한 단계는 3D 특징 영역에서 의미 있는 선 형태의 특징을 만드는데 있다. 제안 방법은 컴퓨터 비전과 Hubel<sup>[2]</sup>의 스케레톤나이징과 유사하다. 그러나 위의 알고리즘을 직접적으로 사용하지 않는다.

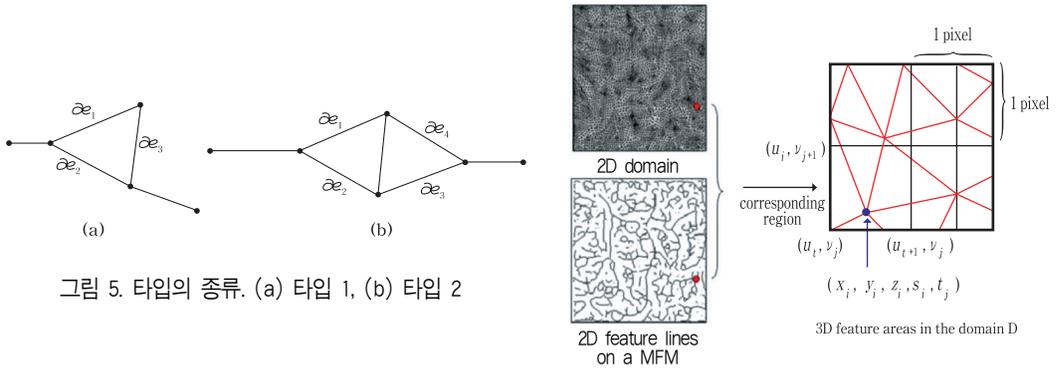


그림 5. 타입의 종류. (a) 타입 1, (b) 타입 2

그림 6. 지형 모델에서 특징 영역을 추출

### 5.1 특징 선 선택

특징 영역에서 선 형태의 특징을 만들기 위해서는 무엇보다도 특징 영역에서 모든 경계 에지  $a_e$ 를 제거해야 한다. 동시에 제거하지 않은 타입 1,2,3에 대한 조건을 검사해야 한다. 전 단계의 결과는 타입 1,2,3의 특징 선으로 남게 된다. 마지막으로  $a_e$ 를 구성하는 타입 1,2,3을 제거하여 모든  $a_e$ 의 타입은 제거 된다.

- 타입 1 :  $a_{e_1}, a_{e_2}, a_{e_3}$ 의 끝점을 검사한다(그림 6 참조). 각 끝점의 valence를 검사하고 valence가 2인 정점을 제거한다.
- 타입 2 : 선택된  $a_e$ 를 제거하게 되면 타입 1로 된다. 타입 1에 대한 조건을 만족하는 정점을 제거한다.
- 타입 3 : 타입 1과 2를 제외한 모든  $a_e$ 를 지운다(그림 6 참조). 마지막으로 특징 선의 모든 에지를 찾고 에지의 수가 최소가 되는 에지를 제거한다.

### 5.2 부드러운 선 추출

추출된 특징 선은 들쭉날쭉하다. 이전 방법<sup>[13, 25]</sup>은 스플라인 피팅과 액티브 컨투어 모델<sup>[21]</sup>을 사용했다. 그러나 이 방법은 실행을 위한 임계 값을 선택해야 한다. 제안 방법은 비저빌리티 그래프<sup>[5]</sup>와 비슷한 방법으로 들쭉날쭉한 선 문제를 해결하였다. 이것은 회전 가능한 평면 스윙과 비슷하다(2D 평면에 투영하여 진행함). 스윙은 평면에서 작은 곡률로 시작해서 양의 x 방향으로 회전하고 시계 방향으로 진행한다. 즉 근원 점 p가 만약 하나 혹은 세 개 이상의 valence를 가지면 그 점을 사용하지 않는다. 점 p와 정점  $p_i$ 에 연결된 이웃 사이의 중심 위치  $c_i$ 를 계산한다.  $c_i$ 는 다음과 같이 계산된다:  $c_i = (p+p_i)/2$ .  $r_i$ 는 점 p의 이웃 구의 반지름이다.

$$r_i = \text{dist}_{i \in \text{Neigh}} \| c_i - p \| \quad (2)$$

그림 7은 한 가지 예를 보여준다. 제안 방법은  $r_i$ 에 의해 교차된 에지들의 순서로 찾는다. 그림 7a는 두 원의 내부가 교차됨을 보여준다. (에지  $\overline{pp_1}$ 과 에지  $\overline{pp_2}$ 가 회전에 의해 교차된다.)  $p_1$ 과  $p_2$ 를 통합하고 정점  $p$ 를 제거한다. 그림 7b는 두 원의 내부가 교차되지 않음을 보여준다. 그리고 근원 점  $p$ 를 제거하지 않는다.

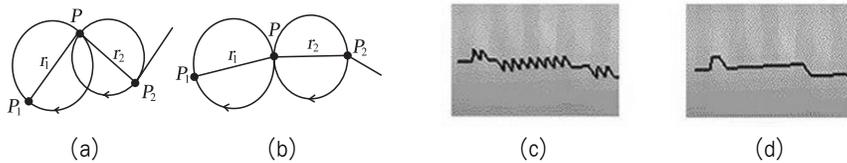


그림 7. 부드러운 선 만들기. (a) 구와 구가 교차, (b) 구와 구가 접합, (c) 부드럽게 처리하기 전 메쉬에서의 특징 선, (d) 부드러운 선 스트립

## 6. 특징-유지 간략화

본 방법은 반복적인 에지 축약을 이용하는 QEM (Quadric Error Metrics)<sup>[12, 9]</sup>에 기초한다. QEM은 원본 메쉬의 각 면에 대해 이차식  $Q(v)$ 를 정의한다. 그 값은 정점  $v = (p) \in R^3$ 에서 그것을 포함하고 있는 평면까지의 거리 제곱과 같다. 원본 메쉬의 각 정점  $v$ 에 대해서 그것의 이웃하는 면의 제곱 합은 면의 넓이 따라 가중치가 주어진다. 각 에지 축약  $(v_i, v_j) \rightarrow \bar{v}$  후, 새로운 정점  $v$ 의 위치는 이차식을 최소화 함으로써 결정되고 그리고 다음 에지 축약은 가장 작은 값을 가진 것으로 선택된다. 만약 정점이 특징 정점이면 제안 방법은 큰 가중치 값을 설정한다. 가중된 특징 정점  $v_i$ 와 그것의 이웃 정점  $v_j$ 는 2차 오차  $Q^v = w_{v_i}Q^{v_i} + w_{v_j}Q^{v_j}$ 에 결합되어 축약된다.  $\bar{v}$ 의 위치는  $w_{\bar{v}}Q^{\bar{v}}$ 를 축약하기 위해 선택된다. 주어진 특징 정점  $v_i$ 에 대해서 식 (3)은 전체 이차 오차  $e_i$ 가  $Q^v(v_i)$ 와 이웃 정점  $Q^v(v_j)$ 의 선형 결합으로 표현됨을 보여주며 여기서  $w_{v_j}$ 는 정점  $v_j$  이웃의 가중 계수를 나타낸다. 결국 모든 가중된 이차식은 메쉬 축약 동안에 높은 에지 축약 비용을 갖는다. 따라서 이 식은 간략화된 특징 선을 유지하게 한다. 게다가 간략화 동안에 텍스처 맵핑을 고려해야 한다. 왜냐하면 대부분의 복잡한 메쉬는 텍스처 정보를 가지고 있기 때문이다. 본 방법은 텍스처 이미지와 간략화 특징-유지 정점까지 고려하여 좋은 간략화 메쉬를 얻는다. 전체 오차 척도  $e$ 가 계산되기 전에 가중된 텍스처 속성의 향이  $Q^v(v_i)$ 에 곱해진다. 확장된 QEM은 정점  $v = (p) \in R^5$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$e_i(v \in R^5) = w_i Q^v(v_i) + \sum_{j=1}^n w_j Q^v(v_j) \quad (3)$$

그림 8은 특징-유지 간략화를 보여준다. (a)는 자동으로 찾아진 특징 에지를 보여주며  $\overline{SP}$ ,  $\overline{PQ}$ , 그리고  $\overline{QR}$  에지로 구성된다. 적색 선  $\overline{P'Q'}$ 는  $\overline{PQ}$ 에지 대신에 축약 에지로 선택된다.  $\overline{PQ}$ 와 같은 특징 선을 제거하는 것을 유지하기 위해서 무거운 가중치 값을 거리 제곱에 할당하기 때문이다. 에지  $\overline{P'Q'}$ 가  $\overline{P}$ 로 축약되는 것 대신에 제거되지 않는다(그림 8b 참조). (c)는 간략화 결과를 보여 주며, 특징 선  $\overline{PQ}$ 는 사라진다. 이는 에지 축약  $(P,Q) \rightarrow \overline{P}$ 이다(그림 8d).

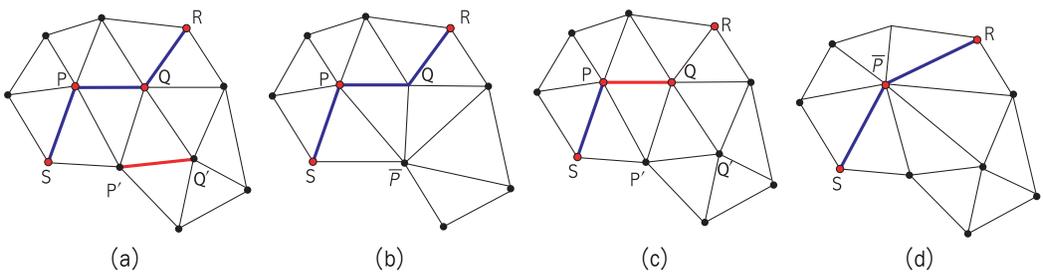


그림 8. 특징-유지 간략화. (a) 메쉬에서의 특징 선이 두꺼운 선으로 보여짐, (b) 특징 유지 간략화 (특징 에지  $\overline{PQ}$ 가 축약되지 않았지만 에지  $\overline{P'Q'}$ 는 축약됨), (c) 메쉬에서의 특징 선이 두꺼운 선으로 보여짐, (d) 특징 선  $\overline{PQ}$ 는 QEM에 의해 축약됨

### 7. 결 과

모든 모델은 펜티엄 프로세서 III 1.7 GHz 768MB 메모리 PC에서 테스트 되었다. Range/RGB complex 데이터는 솔루션닉스에 의해 제공되었다<sup>[29]</sup>. 텍스처, 곡률, 모델 특징 맵은 512 x 512 크기이며, 이러한 맵을 만드는데 걸린 시간은 이미지 처리를 사용하였기 때문에 몇 백분의 일초 정도 걸렸다. 표 1은 데이터 크기와 실행 시간의 리스트를 보여준다. 제안 방법의 간략화 방법의 품질을 테스트하기 위하여 많은 단순화 모델을 만들었고 이렇게 만들어진 모델과 확장된 QSlim<sup>[12]</sup>을 사용하여 만들어진 간략화 모델과 비교하였다. 그림 9에서 세 특징 맵을 비교하였다. 그림 9a는 텍스처 특징 맵을 사용하여 단순화된 모델의 결과를 보여준다. 이 맵은 입술 선과 코의 연결 부위가 유지됨을 보여주고 있다. 그림 9b는 곡률 특징

표 1. 데이터와 수행 시간 (sec.)

수/모델	Mr. Kim	Sun	Car-Door	Terrain	Igea
입력 면 수	63,950	65,000	61,264	8,000	268,686
곡률 특징 맵	0.102s	0.109s	0.125s	0.016s	0.203s
3D 특징 영역 추출	0.150s	0.140s	0.141s	0.094s	0.484s
특징 선 구성	2.50s	2.65s	2.093s	1.313s	164.150s
특징-유지 간략화	29.473s/850면	30.141s/100f면	27.28s/30면	3.79s/120면	53.156s/250면

맵을 사용하여 모델을 간략화 하였다. 이 맵은 코의 끝부분이 유지됨을 보여준다. 그러나 코와 입술의 연결 부위가 그림 9a에 비해 명확하지 않음을 알 수 있다. 그림 9c에서 코의 연결 부위와 눈, 눈썹, 그리고 입술 선과 같은 의미 있는 특징이 유지됨을 볼 수 있다. 그림 10에서 제안 방법은 세 간략화 알고리즘을 비교하였다. 그림 10a는 기존 QSlim<sup>[11]</sup>의 결과를 보여준다. 그러나 결과가 좋지 않은 것을 알 수 있다. 예를 들어 입과 입술 주위 부분에 왜곡이 있음을 알 수 있다. 반대로 그림 10b에서는 텍스처 이미지에 왜곡이 없다. 그러나 그림 10a와 그림 10b는 그리 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 10c에서 눈과 입 주위에 부수적인 왜곡이 없음을 볼 수 있다. 제안 방법은 눈, 코, 그리고 입과 같은 의미 있는 특징을 보다 명확히 보여준다. (MFM을 만들기 위해 값으로 0.5로 하였다). 그림 11b는 원본 모델의 선 형태 특징을 보여주고 얼굴 모델의 눈, 눈썹, 코, 입술과 같은 의미 있는 특징 선을 명확히 인식할 수 있음을 보여준다. 그림 11c는 본 제안 방법으로 수행한 결과로 저해상도에서도 코 부분이 뭉개지지 않음을 보여준다. 그러나 그림 11d에서 알 수 있듯이 확장된 QSlim으로 구현된 결과에서는 모델의 코 부분이 뭉개짐을 알 수 있다. 그림 12b에서는 모델에서 선 형태의 특징을 추출함을 보여준다. 본 방법으로 자동차 문의 형상이 유지되는 반면 확장된 QSlim은 그렇지 못함을 보여준다(그림 12c). 그림 13은 태양 모델의 특징이 유지되어 간략화 된 모습을 보여준다. 이 모델을 통해 본 방법이 확장된 QSlim 방법보다 고품질의 결과를 낼 수 있다. 또한 태양 모델의 코 끝 부분이 유지된다(그림 13c). 그림 14는 지형 모델과 Igea 모델에서 추출된 특징 선의 결과 그림이다. 이 경우에 모델은 텍스처 정보가 없고 오직 기하학적 데이터만을 가지고 있다. 곡률을 가지고 있는 2D 영역으로 모델이 매개 변수화된다. 특별히 ( $\alpha=0$ )일 때, 지형과 Igea 모델의 모델 특징 맵에서 추출된 선 형태의 특징을 나타낸다.

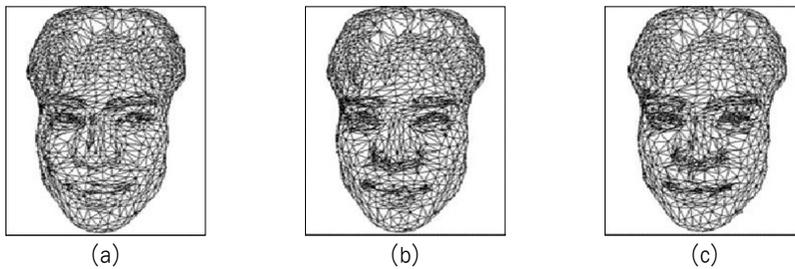


그림 9. 텍스처, 곡률, 모델 특징 맵을 사용한 Mr. Kim 모델의 간략화 결과의 비교. (a) 텍스처 특징 맵을 사용한 단순한 모델, (b) 곡률 특징 맵을 사용하여, (c) MFM을 사용 (각 모델은 3,000면을 간략화.)

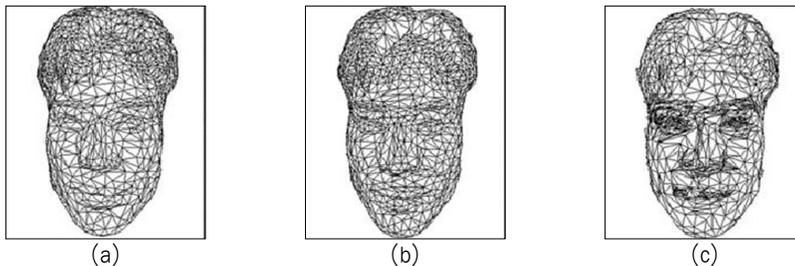


그림 10. Mr. Kim 모델의 간략화 알고리즘 비교. (a) QEM<sup>[11]</sup>을 이용한 단순화된 모델, (b) 확장된 QSlim<sup>[12]</sup>을 이용하여, (c) 제안 방법의 방법으로 (모델은 각각 2,000개의 면을 간략화함.)

## 8. 결론 및 향후 연구

제안 방법은 사용자의 개입 없이 의미 있는 특징을 유지하기 위해 다중해상 모델을 만드는 알고리즘에 대해 제안하였다. 제안 방법에서 MFM을 사용하여 의미 있는 특징 선을 찾고 추출함을 보였으며, 또 특징 선에 더 많은 가중치를 주어 특징 유지된 단순화된 모델을 보여주었다. 본 방법으로 만들어진 다중해상도 모델이 특징-유지가 됨으로써 효율적임을 보였다. 게다가 이러한 방법은 메쉬 편집, 포핑, 얼굴 애니메이션과 같은 분야에 활용될 수 있다. 그러나 장점에도 불구하고 다음과 같은 향후 연구가 필요하다. 먼저 향상된 오퍼레이터를 이용하여 보다 정확한 선 형태의 특징 선을 찾을 수 있다. 두 번째로 선 형태의 특징을 보다 잘 보여주기 위해 비사실적 렌더링을 적용하는 방법을 고려할 수 있다.

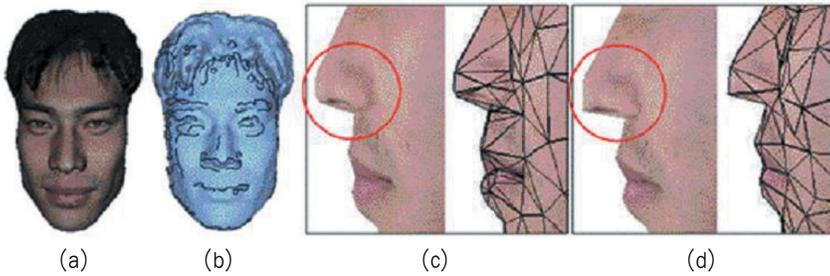


그림 11. Mr. Kim 모델의 특징-유지 간략화. (a) 입력 모델 (63,950면), (b) MFM을 사용한 선 형태의 특징 ( $a=0.5$ ), (c) 제안 방법의 방법을 사용한 단순화 모델 (860면), (d) 확장된 QSlim을 사용한 단순화된 모델 (850면)

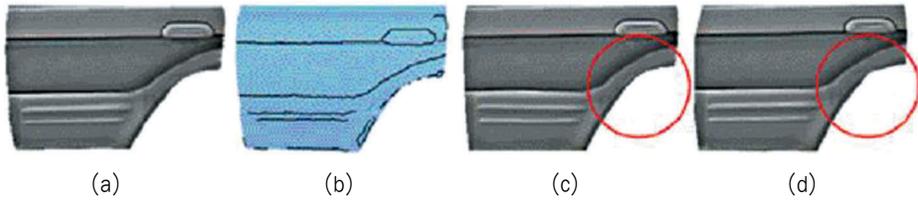


그림 12. 자동차 문 모델의 특징-유지 간략화. (a) 입력 원본 모델 (61,264면), (b) MFM을 사용한 선 형태 특징 ( $a=1$ ), (c) 제안 방법의 방법을 사용한 결과 (30면), (d) 확장된 QSlim의 결과 (30면)

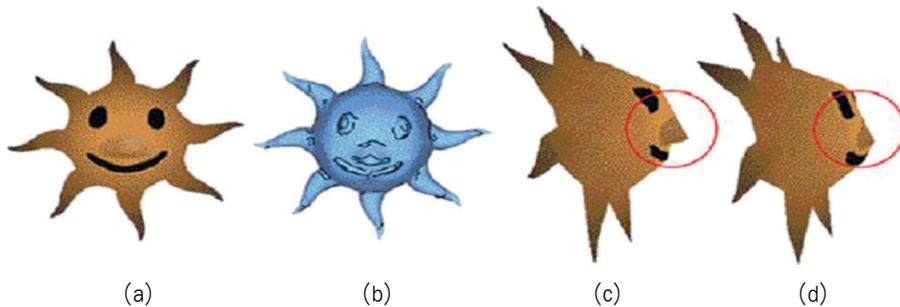


그림 13. 태양 모델의 특징-유지 간략화. (a) 입력 원본 모델 (65,000면), (b) MFM을 사용한 선 형태 특징 ( $a=0.5$ ), (c) 제안 방법의 방법을 사용한 결과 (100면), (d) 확장된 QSlim 모델을 사용한 결과 (100면)

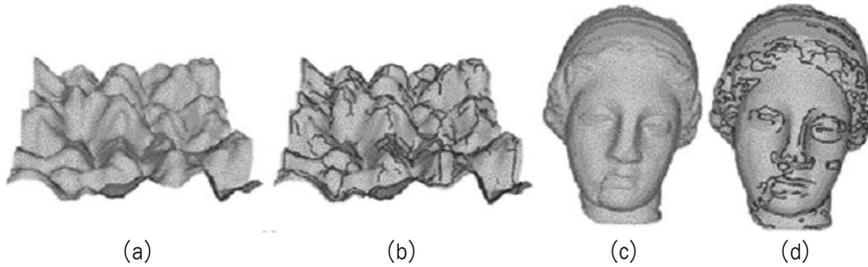


그림 14. 기하 데이터만을 이용하여 선 형태의 특징 추출. (a) 입력 지형 모델 (8,000면), (b) 입력 Igea 모델 (268,686면)

### 참 고 문 헌

- [1] P. Alliez, M. Meyer and M. Desbrun, Interactive Geometry Remeshing, SIGGRAPH 2002, pp.347-354, 2002.
- [2] H. A., M. Gross: New quadric metric for simplifying meshes with appearance attributes, IEEE Visualization, 2001, 2, 5
- [3] J. Cohen, M. Olano, and D. Manocha. Appearance-Preserving Simplification, SIGGRAPH 1998, pp.115- 122, 1998.
- [4] M. Desbrun, M. Meyer, P. Schroder, and A. Barr. Discrete Differential Geometry Operators for Triangulated 2-manifolds, VisMath '02, Berlin, 2002.
- [5] M. de Berg, M. van Kreveld, M. Overmars, O.Schwarzkopf. Computational Geometry Algorithms and Applications, Springer, Second Edition.
- [6] Walter, J. D. and Healey, C. G. Attribute Preserving Dataset Simplification. In Proceedings IEEE Visualization 2001, pp. 113-120, 2001.
- [7] N. Dyn, K. Hormann, S.-J. Kim and D.Levin, Optimizing 3D Triangulations Using Discrete Curvature Analysis, Mathematical Methods for Curves and Surface, pp. 135-146, 2001.
- [8] Floater, M.S: Parameterization and smooth approximation of surface triangulation, Computer Aided Geometric Design (1997), 231-250, 45
- [9] M. Garland, Quadric-Based Polygonal Surface Simplification, Ph.D. Thesis 1999.
- [10] A. Gray, Ed. Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces, Second edition, CRC Press, 1998.
- [11] M. Garland and P. S. Heckbert, Surface simplification using quadric error metrics, SIGGRAPH 1997, pp.209-216, 1997.
- [12] M. Garland and P. S. Heckbert, Simplifying surfaces with color and texture using quadric error metrics, IEEE Visualization 98, pp.263-269, 1998
- [13] S. Gumhold, X. Wang, R. McLeod, Feature Extraction from points Clouds, Proc. 10th Int. Meshing Roundtable 2001.
- [14] I. Guskov, W. Sweldens, and P. Schroder. Multiresolution signal processing for meshes, SIGGRAPH 1999,

pp.325-334, 1999.

[15] R. Gonzalez and R.Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992.

[16] H. Hoppe, New Quadric Metric for simplifying Meshes with Appearance Attributes, IEEE Visualization 99, pp.59-66, October 1999.

[17] Y. Kho and M. Garland, User-Guided Simplification, In Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, April 2003.

[18] S.J. Kim, David Levin and C.H. Kim, Surface Simplification Using Discrete Curvature Norm, Computers & Graphics, Vol.26, No.5, October 2002.

[19] S. J. Kim, S.K. Kim and C.H. Kim, Discrete Differential Error Metric For Surface Simplification, Pacific Graphics 2002, pp.276-283, October 2002.

[20] L. Kobbelt, M. Botsch, U. Schwanecke and H. Seidel, Feature Sensitive Surface Extraction from Volume Data, SIGGRAPH 2001 proceedings

[21] M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos, Snakes: Active Contour Models, Int. Journal of Computer Vision, 1998

[22] B. Levy: Constrained texture mapping for polygonal meshes, SIGGRAPH (2001), 417-424, 4

[23] B. Levy: Petitjean,S. R., Maillot,J: Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation, SIGGRAPH (2002), 4

[24] P. Lindstrom and G. Turk, Fast and memory efficient polygonal simplification, IEEE Visualization '98 Conference Proceedings, pp.279-286, 1998.

[25] M. Pauly, R. Keiser, M. Gross, Multi-scale Feature Extraction on Point-Sampled Surfaces, Eurographics 2003, 2003

[26] E. Pojar and D. Schmalstieg, User-controlled creation of multiresolution meshes, ACM Symposium on Interactive 3D Graphics 2003, pp.127-130, 2003.

[27] J. Rossignac and P. Borrel, Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes, Modeling in Computer Graphics: Methods and Application, pp.455-465, 1993.

[28] W. J. Schroeder, J.A. Zarge and W. E. Lorensen, Decimation of triangle meshes, SIGGRAPH 1992, pp.65-70, 1992.

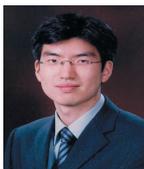
[29] <http://www.solutionix.com>

[30] J. Vorsatz, C. Rossl, L.P. Kobbelt and Hans-Peter Seidel, Feature Sensitive Remeshing, Eurographics 2001, pp. 393-401, 2001.



김 수 균

· 고려대학교 박사수료  
· 관심분야 : 컴퓨터그래픽스,  
CAD/CAM  
· E-mail : nicesk@korea.ac.kr



지 준 응

· 고려대학교 대학원  
· 관심분야 : 컴퓨터그래픽스,  
CAD/CAM



김 창 현

· 고려대학교 교수  
· 관심분야 : 컴퓨터그래픽스,  
CAD/CAM  
· E-mail : chkim@korea.ac.kr