

3D Magic Wand: 하모닉 필드를 이용한 메쉬 분할 기법

문지혜¹

박상훈²

윤승현*

동국대학교 멀티미디어공학과^{1,*}, 동국대학교 멀티미디어학과²

moonjh5009@naver.com¹, {mshpark², shyun*}@dongguk.edu

3D Magic Wand: Interface for Mesh Segmentation Using Harmonic Field

Ji-Hye Moon¹

Sanghun Park²

Seung-Hyun Yoon*

Department of Multimedia Engineering^{1,*}, Department of Multimedia², Dongguk University, Korea

요약

본 논문에서는 특징 추출 하모닉 필드(harmonic field)와 비등방 측지선(anisotropic geodesic)을 이용하여 메쉬의 특징 영역을 분할하는 새로운 기법을 제안한다. 기존 대부분의 메쉬 분할 기법들은 경계 영역에 대한 사용자의 명시적인 입력을 요구하지만, 제안된 기법에서는 사용자가 관심 영역의 임의의 정점을 선택하여 직관적이고 편리하게 특징 영역을 분할한다. 사용자가 선택한 정점을 중심으로 오목한(concave) 영역에서 큰 변화를 갖는 하모닉 필드를 생성한다. 생성된 하모닉 필드에서 하나의 등위선(isoline)을 선택하여 초기 분할 경계선을 정하고, 선택된 등위선에서 최적의 특징점을 추출하여 비등방 측지선으로 연결함으로써 최종적인 분할 경계선을 생성한다. 다양한 실험을 통해 제안된 기법이 사용자의 입력에 민감하지 않으며, 특징 영역 분할에 효과적으로 사용될 수 있음을 보인다.

Abstract

In this paper we present a new method for interactive segmentation of a triangle mesh by using the concavity-sensitive harmonic field and anisotropic geodesic. The proposed method only requires a single vertex in a desired feature region, while most of existing methods need explicit information on segmentation boundary. From the user-clicked vertex, a candidate region which contains the desired feature region is defined and concavity-sensitive harmonic field is constructed on the region by using appropriate boundary constraints. An initial isoline is chosen from the uniformly sampled isolines on the harmonic field and optimal points on the initial isoline are determined as interpolation points. Final segmentation boundary is then constructed by computing anisotropic geodesics passing through the interpolation points. In experimental results, we demonstrate the effectiveness of the proposed method by selecting several features in various 3D models.

키워드: 대화형 메쉬 분할, 하모닉 필드, 사용자 인터페이스, 비등방 측지선

Keywords: Interactive mesh segmentation, Harmonic field, User interfaces, Anisotropic geodesic

1. 서론

메쉬 분할(mesh segmentation)은 형상 검색(shape retrieval), 텍스처 매핑(texture mapping) 그리고 메쉬 편집(mesh editing) 등 컴퓨터 그래픽스의 다양한 응용 분야에서 활용되는 주요한 기술이다. 이러한 응용에서 메쉬 특징 영역을 선택하는 것은 중요한 기능적 요소이며, 이를 위해 다양한 기법이 제안되었다. 경계 분할(boundary segmentation) 기법 [1]은 메쉬 분할의 대표적인 기법으

로 Hoffman과 Singh [2]의 이론을 따라 분할 경계를 찾으며 비교적 좋은 분할 결과를 보여주지만, 닫힌 경계선(closed boundary)에 대한 보장이 없다. 닫힌 분할 경계선을 생성하기 위해 하모닉 필드를 이용한 기법 [3]이 제안되었다. 이는 특징 추출 가중치를 사용하는 라플라스 연산자와 포아송 방정식(Poisson equation)을 사용한다. 하모닉 필드를 이용한 기법은 메쉬의 노이즈에 민감하지 않으며 메쉬의 자세 변화에 둔감하다는 장점이 있다.

*corresponding author: Seung-Hyun Yoon/Dongguk University(shyun@dongguk.edu)

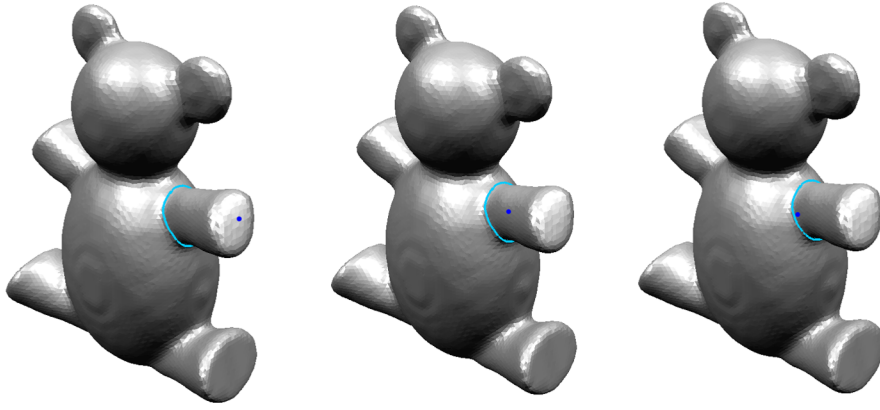


Figure 1: Segmentation boundaries (in cyan) generated from different user-clicked vertices (in blue).

본 논문에서는 하모닉 필드를 이용한 메쉬 위의 특징 영역을 선택하고, 생성된 분할 경계에 대한 최적화 작업을 진행하여 부드러운 분할 경계선을 생성하는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 단일 클릭(single-click)을 이용한 새로운 방법의 사용자 인터페이스로써 관심 있는 영역(region of interest)의 임의의 정점을 선택해도 유사한 분할 결과를 보장한다는 점에서 기존 연구 [3, 4]의 결과와 차이를 보인다. 그림 1은 제안된 기법을 이용하여 선택된 분할선을 보여준다. 관심 있는 영역을 Teddy 모델의 팔이라고 가정할 경우, 사용자가 팔 부분의 서로 다른 정점(파란색)을 선택해도 생성된 분할선은 비슷한 결과를 나타낸다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 메쉬 분할 기법에 관련된 기존 연구들에 대해서 소개하고, 3장에서는 하모닉 필드를 이용한 메쉬 분할 기법과 새로운 인터페이스인 3D Magic Wand 툴을 소개한다. 4장에서는 선택한 메쉬의 분할선을 부드럽게 생성하기 위한 방법을 설명하고, 5장에서는 제안된 기법을 활용한 다양한 실험 결과를 보여준다. 끝으로 6장에서 본 논문의 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 기존 메쉬 분할 방법에 대해 간단히 소개하고, 하모닉 필드를 이용한 메쉬 분할과 관련된 주요 연구들에 대하여 소개한다. 메쉬의 기하학적 특징을 이용한 영역 확장(region growing) 방법은 볼록 분할(convex decomposition) 알고리즘 [5]에서 착안된 기법으로 미리 정의된 조건(예: 볼록한 영역)을 만족하면서 시드(seed) 정점이나 삼각형에서 시작하여 이웃 영역을 확장해 나가는 방법이다. 유역 분할(watershed segmentation) 방법은 이미지 분할 및 분석 연구 [6]에서 제안된 알고리즘을 기반으로 Mangan 등 [7, 8]에 의해 처음 제안된 기법이다. 클러스터링(clustering) 방법은 k -평균 알고리즘 [9]을 기반으로 메쉬를 의미 있는 영역으로 분할하여 새로운 계층적 메쉬 분할을 제안하는 연구로 Katz와 Tal [10]이 제안하였다. 경계 분할 방법에는 곡률 기반 메쉬 특징 경계 추출 기법 등이 있다 [11, 12]. 이러한 기법은 사람의

시각에서 3차원 객체의 분할은 곡률의 최솟값에서 이루어진다는 Hoffman 등 [2, 13]의 이론을 기반으로 제안되었다.

Zheng과 Tai [3]는 사용자가 메쉬 분할 부분에 하나 이상의 선을 대략적으로 표현하는 인터페이스를 제안하였고, 이를 이용하여 하모닉 필드의 등위선을 통한 메쉬 분할을 수행하였다. 추가 연구 [4]에서는 오목한 정보만을 이용한 자동 메쉬 분할 알고리즘을 제시하고 있으며, 오목한 부분의 영역을 고려한 하모닉 필드를 생성하여 최적의 등위선을 선택하는 연구를 진행했다. 사용자 인터페이스인 Dot Scissor를 제안하는 연구 [14]에서는 사용자가 메쉬 분할 영역의 부분을 단일 클릭하는 인터페이스를 제안하였다. 이 연구에서는 사용자의 입력을 분할이 이루어지는 경계 부분으로 제한하는 단점이 있다.

본 논문에서는 관심이 있는 영역의 어떤 정점을 선택하더라도 자동으로 분할이 수행되는 인터페이스를 제안하며, 이러한 기술에 있어서 기존 결과 [14]와 차이를 보인다. 일반적인 메쉬 분할에 대한 연구뿐만 아니라 치아 모델의 경계 선택을 위한 연구 분야에서도 하모닉 필드를 사용한 분할 연구가 진행되고 있다. 치아 모델 같은 경우 임상 데이터마다 모양이 다르기 때문에 치아의 경계를 인식하여 분할하는 것은 어려운 문제로 인식된다 [15, 16].

기존 대부분의 기법들은 분할 경계선을 매끄럽게 하기 위한 후처리 과정이 필요하다. 이는 실제로 생성된 경계선은 분할이 이루어질 부분보다 메쉬의 특성과 형상에 의존하는 경향이 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 기존 경계 부분의 메쉬의 특징을 최대한 반영하면서 매끄러운 분할 경계선을 생성하는 방식을 제안한다.

3. 메쉬 특징 영역 선택 기법

3.1 하모닉 필드 기반 메쉬 분할

하모닉 필드는 메쉬 위에서 정의된 특별한 스칼라 필드로 모든 정점의 라플라스 값이 0을 만족한다. 메쉬 위에서 한 정점에 대한 라플라스는 메쉬 위의 스칼라 장이 정의되어 있다고 가정을 했을 때, 주변 평균과의 차이로 정의된다. 라플라스 값이 0

을 만족하는 것은 각 정점의 함숫값이 주변 평균과 같다는 것을 의미한다. 정점(V), 에지(E), 삼각형(F)으로 정의되는 삼각 메쉬 $M = (V, E, F)$ 에 대하여 정점 위에서 정의된 스칼라 함수를 $f: V \rightarrow R$ 라고 할 때, f 가 하모닉 필드가 되기 위해 $\Delta f_i = 0$ 조건을 이용한다 [17]. 이때 Δ 는 라플라스 연산자(laplacian operator)이며 정점 \mathbf{p}_i 에 대하여 다음과 같이 정의된다:

$$\Delta f(\mathbf{p}_i) = \Delta f_i = \sum_{f_j \in N_1(i)} w_{i,j}(f_j - f_i), \quad (1)$$

여기서 $w_{i,j}$ 는 차이에 대한 가중치이며, f_i 는 정점 \mathbf{p}_i 의 함숫값 그리고 $N_1(i)$ 는 \mathbf{p}_i 의 1-링 이웃 정점의 집합이다. 이는 정점 \mathbf{p}_i 의 값과 주변 평균의 차이를 나타내고 다음과 같은 선형 시스템으로 계산될 수 있다:

$$L\mathbf{f} = \mathbf{b}, L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{b}' \end{bmatrix}, \quad (2)$$

여기서 L 은 라플라스 행렬이며 L_2 와 \mathbf{b}' 는 하모닉 필드의 제약 조건(constraint)에 의해 정의된다. 이와 같은 선형 시스템을 계산하여 메쉬 위의 하모닉 필드를 구할 수 있다. 그림 2(a)는 일반적으로 사용되는 코탄젠트 가중치를 활용한 결과이며, 하모닉 필드가 부드럽게 생성이 되어 메쉬 위의 분할 영역에 대한 의미 있는 구별이 어려운 문제가 있다. 따라서 특징 영역에서 하모닉 필드의 값이 크게 변하는 필드를 생성해야 메쉬 분할에 활용을 할 수 있다.

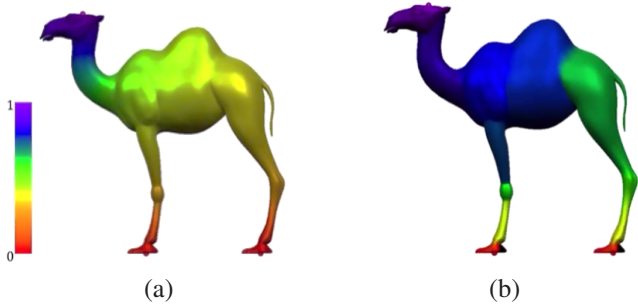


Figure 2: Harmonic fields generated by (a) cotangent weights and (b) feature-sensitive weights.

특징 영역에서 하모닉 필드의 값이 크게 변하는 필드를 생성하기 위해 특징 추출 가중치를 활용한 하모닉 필드를 생성하고, 이를 이용하여 메쉬의 의미 있는 영역을 구별한다. 메쉬의 영역에서 분할이 일어나는 부분은 최소 주곡률 방향으로 영역 간의 경계를 생성하고 오목한 주름(concave crease)에서 영역 분할이 이루어진다는 Hoffman의 결과 [2, 13]를 이용한다.

우선 오목한 영역의 정점들을 추출하고 오목한 영역의 정점들과 연결된 에지의 가중치를 작은 값으로 설정한다. 상대적으로 작은 가중치로 연결된 두 정점은 하모닉 필드 생성 시, 이를 보상(compensation) 하기 위해 큰 차이를 갖는 값이 할당된다. 이와

같이 하모닉 필드를 경계 부분에서 큰 차이를 갖도록 생성하는 원리를 이용하여 메쉬를 분할한다. 오목한 영역의 정점을 검출하기 위한 식은 다음과 같다:

$$(\hat{\mathbf{p}} - \mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{n}_i > \epsilon (= 10^{-6}), \quad (3)$$

여기서 \mathbf{n}_i 는 정점 \mathbf{p}_i 의 법선 벡터이고, $\hat{\mathbf{p}}$ 은 정점 \mathbf{p}_i 의 주변 정점들의 평균 위치를 나타낸다. 특징 추출을 위한 가중치는 다음과 같이 정의된다:

$$w_{i,j} = \begin{cases} -\sum_{k \in N_1(i)} w_{i,k}, & i = j, \\ \frac{\gamma_{i,j} \|e_{i,j}\|}{|K_i| + |K_j|}, & (i, j) \in E, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 정점 \mathbf{p}_i 와 \mathbf{p}_j 가 연결이 되어있을 경우 $\gamma_{i,j}$ 를 곱하여 계산하며 $\gamma_{i,j}$ 는 오목한 영역에 놓인 경우 상대적으로 작은 값인 0.01을 할당하고 아닌 경우 1을 할당한다. 이때 $|K_i|$ 와 $|K_j|$ 는 두 정점의 가우스 곡률이며 $\|e_{i,j}\|$ 는 에지의 길이이다. 그림 2(b)는 식 (4)로 정의되는 가중치를 이용하여 하모닉 필드를 생성한 결과이다. 생성된 하모닉 필드에서 값의 크게 변화하는 부분을 조사하여 메쉬의 분할 경계선을 찾을 수 있다.

3.2 3D Magic Wand 툴

3D Magic Wand 툴은 사용자 단일 클릭을 통해 메쉬의 특징 영역을 선택하는 기법이다. 관심이 있는 영역의 임의의 점을 선택한다는 부분에 있어서 기존의 특징 영역의 경계 부분을 선택하는 연구 결과 [14]와는 차이를 보인다. 그리고 3D Magic Wand 툴은 관심 있는 영역의 다른 점을 선택해도 동일한 선택 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 3D Magic Wand 툴의 선택 메커니즘은 다음과 같다:

- **검사 영역 정의:** 메쉬의 검사할 부분 영역은 사용자가 단일 클릭으로 하나의 정점을 선택한 후, 그 정점의 N -링 이웃 영역을 검사 영역으로 지정을 한다.
- **제약 정점의 결정 및 하모닉 필드 생성:** 사용자가 선택한 정점과 그 이웃 정점은 제약 정점으로 1값을 할당하고 N -링에 해당하는 영역의 경계 정점은 0값을 할당하여 하모닉 필드를 생성한다.
- **하모닉 필드 분석을 통한 분할 경계선 결정:** 생성된 하모닉 필드에서 샘플링된 등위선들의 스코어를 정의하고, 가장 높은 스코어를 갖는 등위선을 선택한다.

메쉬 전체에 대하여 조사하는 것은 시간 소요가 많아 비효율적므로 메쉬의 검사 영역을 정의해야 한다. 검사 영역은 사용자가 선택한 하나의 정점으로부터 N -링 이웃 영역에 해당한다. N -링은 사용자의 정의에 따라 다르며 마우스 스크롤을 통해 실시간

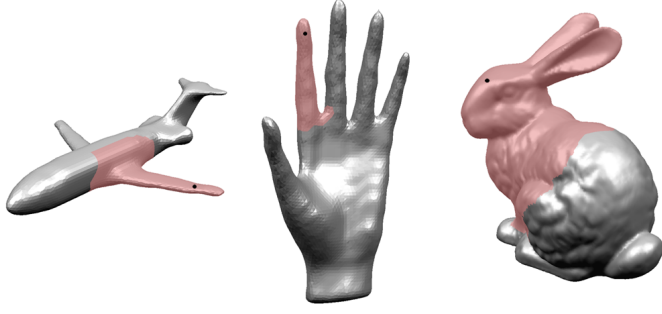


Figure 3: 20, 30, 80-ring neighboring regions of user-clicked vertices (in black).

으로 제어할 수 있다. 이때 검사 영역의 크기는 선택하려는 특징 영역을 모두 포함해야 한다. 그림 3에서는 3D Magic Wand 툴의 N -링 조절을 통해 다양한 메쉬에서 검사 영역을 효율적으로 선택할 수 있음을 보여준다.

메쉬 위에서 하모닉 필드를 정의하기 위한 몇 가지 제약 조건을 설정하여 선형 시스템의 형태로 표현할 수 있다 [4, 14]. 검사 영역이 정해진 후, 특징 추출을 위한 하모닉 필드 생성을 위해서 제약 정점에 제약 조건을 할당한다(그림 4(a)). 이때 제약 조건으로 선택된 정점과 주변 1-링 정점에 1값을 할당하고 검사 영역의 경계 부분에 있는 정점들에 대하여 0값을 할당하여 하모닉 필드를 생성한다. 특징 추출 가중치에 의해 오목한 영역, 즉 경계 부분에서 큰 차이를 보이는 하모닉 필드(그림 4(b))가 생성이 되고 하모닉 필드 값이 같은 등위선(그림 4(c))을 추출할 수 있다.

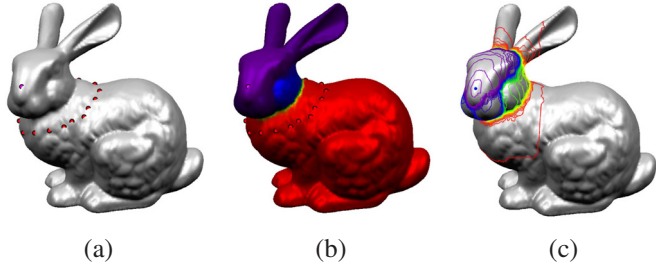


Figure 4: Harmonic field and isolines: (a) constraints, (b) harmonic field and (c) uniformly sampled isolines.

메쉬 특징 영역을 선택하기 위해 생성된 여러 가지 등위선 중에서 최적의 분할 경계에 해당하는 등위선을 선택해야 한다. 이는 삼각형 내부에서 하모닉 필드의 그라디언트(gradient) 값을 이용하여 선택할 수 있다 [4, 14]. 삼각형 내부의 그라디언트 값은 하모닉 필드 변화율의 최대 방향이며 삼각형 내부에서 일정한 값을 가진다. 삼각형 T 의 그라디언트는 다음과 같이 계산된다:

$$\nabla f_T = \frac{1}{2A_T} \sum_{i=1}^3 f_i \mathbf{e}_i^\perp, \quad (5)$$

여기서 f_i 는 정점의 하모닉 필드 값이고, \mathbf{e}_i^\perp 는 삼각형이 포함된 평면에서 에지의 수직인 방향 벡터이고, A_T 는 삼각형의 면적을

나타낸다. 추출된 등위선 Γ_i 의 스코어 S_{Γ_i} 는 다음과 같이 정의된다:

$$S_{\Gamma_i} = \frac{\sum_T \|\nabla f_T\|}{L(\Gamma_i)}, \quad (6)$$

여기서 $L(\Gamma_i)$ 는 등위선 Γ_i 의 길이, T 는 Γ_i 와 교차하는 삼각형을 나타낸다. S_{Γ_i} 는 등위선 Γ_i 에 대하여 단위 길이 당 등위선이 지나가는 삼각형들의 그라디언트의 변화를 대표하는 값으로 생각할 수 있으며, 가장 높은 스코어를 선택하여 그 값에 대응되는 등위선을 특징 분할 경계선으로 선택할 수 있다. 하지만 이렇게 선택된 등위선은 부드럽지 못한 경계를 보이는 문제가 있다. 따라서 매끄러운 경계선 생성을 위한 후처리 과정으로 선택된 등위선이 지나가는 삼각형의 스코어를 이용한 새로운 측지선을 생성하는 과정을 수행한다.

4. 분할 경계 최적화

4.1 최적의 분할 경계점 선택

선택된 등위선을 부드럽게 만들기 위해서 분할 경계에 대해 최적화를 수행한다. 최적화에 이용할 소수의 정점을 선택하기 위해 등위선 위의 정점마다 다음과 같은 스코어 값 $S_{\mathbf{p}_i}$ 를 계산한다:

$$S_{\mathbf{p}_i} = \frac{\|\nabla f_{T_{i-1}}\| + \|\nabla f_{T_i}\|}{l_{i-1} + l_i}, \quad (7)$$

여기서 l_{i-1} 은 정점 \mathbf{p}_i 에서 이전 정점까지의 거리, l_i 는 다음 정점까지의 거리를 나타낸다(그림 5). 그리고 $\|\nabla f_{T_{i-1}}\|$ 와 $\|\nabla f_{T_i}\|$ 는 정점 \mathbf{p}_i 를 공유한 양쪽 삼각형에서 계산된 하모닉 필드의 그라디언트 크기이다. 이 값은 메쉬의 특징 영역과 관련이 있는 정점에서 상대적으로 높은 스코어를 가지게 된다. 선택된 등위선이 지나가는 각 정점마다 할당된 스코어 값을 기준으로 정점을 내림차순으로 정렬한다. 스코어가 높은 정점들은 서로 가깝게 있기 때문에 높은 스코어의 정점만 선택하는 방법은 비효율적이다. 따라서 정점들 사이의 일정 간격을 두어 필요한 정점만 선택하는 작업을 수행한다.

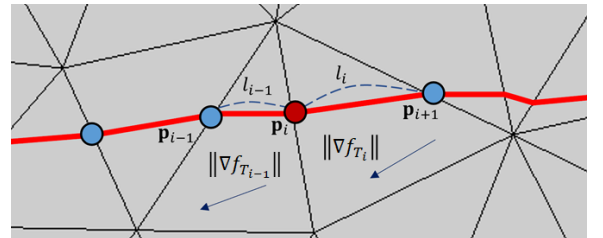


Figure 5: Score of the intersecting point \mathbf{p}_i .

우선 스코어가 가장 높은 정점을 선택한다. 사용자가 원하는 소수의 정점의 개수를 k 개라고 했을 때, 선택된 정점을 기준으로 등위선의 k 개의 구간에서 가장 높은 스코어를 갖는 정점을 선택한다. 구간별로 선택된 정점은 해당 구간에서 메쉬의 특징을

가장 잘 나타내는 정점이며, 이를 비등방 측지선으로 연결하여 분할 경계선을 생성한다.

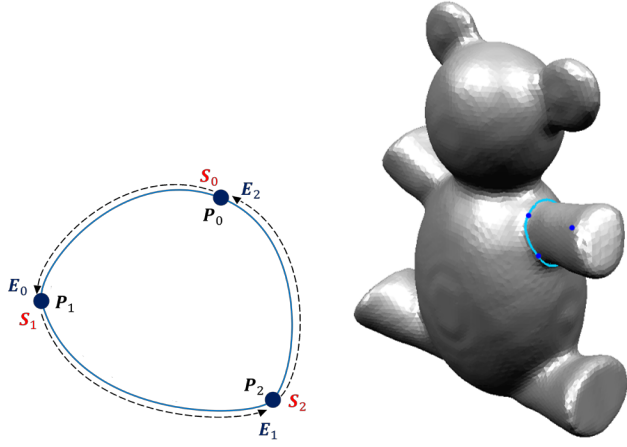


Figure 6: Segmentation boundary from anisotropic geodesic ($k = 3$).

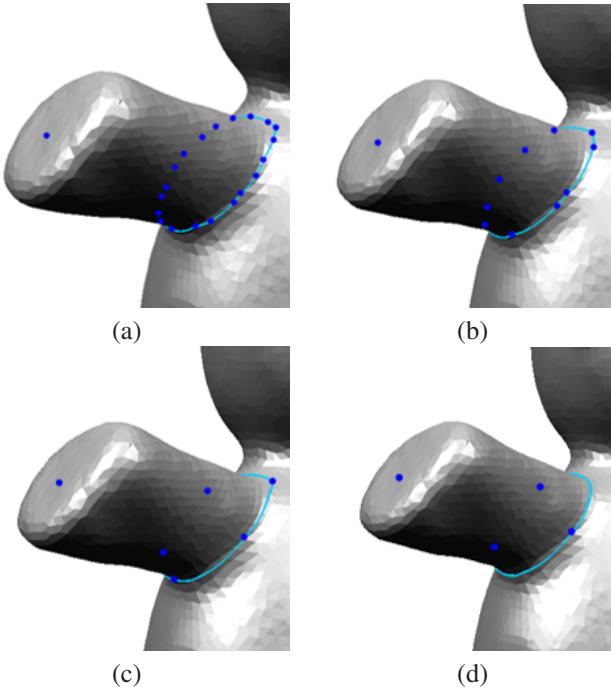


Figure 7: Anisotropic geodesics from different number of feature points: (a) $k = 20$, (b) $k = 10$, (c) $k = 5$ and (d) $k = 3$.

4.2 비등방 측지선을 이용한 분할 경계선

메쉬 위의 측지선이 메쉬 특징을 따라 생성되도록 하기 위해 비등방 거리 함수를 이용한다. 비등방 거리 함수는 최대 주곡률 방향으로 거리를 늘리고 최소 주곡률 방향으로 거리를 줄이는 원리를 가진다. 본 논문에서는 등위선에서 선택된 최적의 분할 경계점을 연결하는 비등방 측지선은 생성하고, 이를 최종 분할 경계선으로 사용한다.

비등방 거리 함수는 기존 연구 [18]에서 제안한 방법을 이용하여 계산한다. 메쉬 위의 각 정점 \mathbf{p} 의 접평면에서 거리 함수 $g_{\mathbf{p}}$ 는 다음과 같이 표현된다:

$$g_{\mathbf{p}}(\mathbf{v}) = \sqrt{\mathbf{v}^T M_{\mathbf{p}} \mathbf{v}}, \quad (8)$$

여기서 \mathbf{v} 는 접평면에서 정의된 접벡터이고, 유클리드 거리 함수인 경우 $M_{\mathbf{p}}$ 가 단위행렬이 되며, 비등방 거리 함수의 경우 $M_{\mathbf{p}}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$M_{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 \end{bmatrix}^{-1}, \quad (9)$$

여기서 \mathbf{e}_1 은 최대 곡률을 갖는 주방향이고 \mathbf{e}_2 는 최소 곡률을 갖는 주방향이고, $M_{\mathbf{p}}$ 에 대한 고유값은 다음과 같이 정의된다:

$$\lambda_1 = 1 + \gamma S_x, \lambda_2 = \frac{1}{\lambda_1}, \quad (10)$$

여기서 γ 는 사용자가 정의한 상수로 논문 [18]에서는 0.01로 할당을 했고 S_x 는 $|\kappa_1| - |\kappa_2|$ 로 주곡률의 절댓값의 차이를 나타낸다. 이 값은 ridges와 valleys 부근일 경우 차이를 크게 보이며 평면 가까울수록 0값에 수렴한다. 이러한 거리 함수를 이용하여 곡률이 최대인 \mathbf{e}_1 방향으로 길이를 늘리고 곡률이 최소인 \mathbf{e}_2 방향으로 길이를 줄일 수 있다.

메쉬 위의 각 정점에 대해서 위와 같은 방법으로 생성된 비등방 거리 함수를 이용하여 메쉬 에지 길이를 변경할 수 있다. 에지 길이는 에지의 두 정점에서 정의된 거리 함수의 평균을 사용한다. 이는 실제 3차원 모델의 에지 길이가 변경되는 것은 아니고 내부적으로 변경된 에지 값을 가지고 있는 형태이다. 측지 경로 계산 알고리즘 [19, 20, 21, 22, 23]을 사용하여 변경된 에지 길이를 갖는 메쉬 위에서 최적의 분할 경계점을 연결하는 닫힌 측지선을 계산하여 부드러운 분할 경계선을 생성할 수 있다. 그림 6은 세 개의 분할 경계점($k = 3$)을 연결하여 생성된 측지 경로(분할 경계선)을 나타내며, 그림 7은 k 값에 따른 결과의 차이가 크지 않다는 것을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 기존 분할 결과의 특징을 반영하면서 비등방 측지선을 효율적으로 계산하기 위해 최소한의 정점으로 k 의 개수를 3으로 설정했다.

5. 실험 결과

5.1 실험 환경

본 논문에서 제안된 3D Magic Wand 메쉬 분할 기법은 C++ 언어를 사용하여 구현하였으며, 모든 실험은 Intel Core i5-10400 Processor 2.90GHz CPU, 16GB 메모리와 NVIDIA GeForce GTX 1650 GPU가 설치된 PC 환경에서 수행되었다. 다양한 실험의 렌더링 결과는 OpenGL을 기반으로 구현하였으며, 삼각 메쉬를 효과적으로 표현하기 위해 하프 에지(halfedge) 자료구조를 이용하

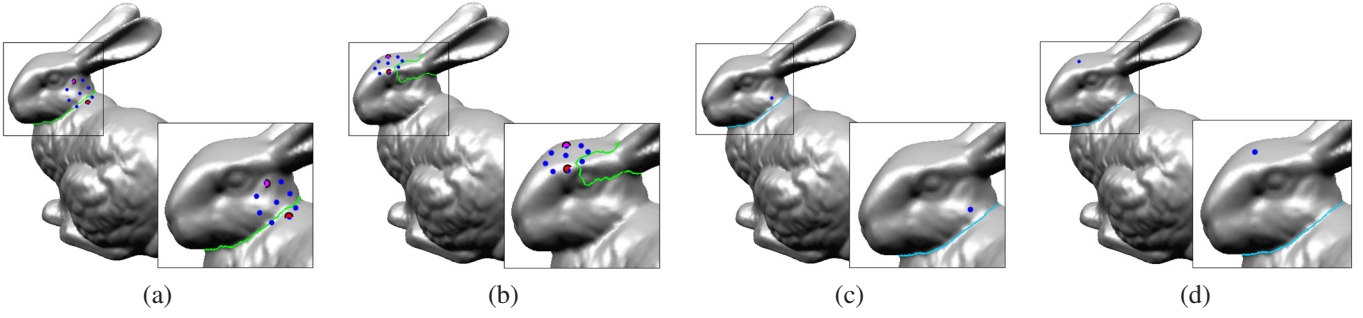


Figure 8: Comparison results: (a),(b) Dot Scissor [14] and (c), (d) our method.

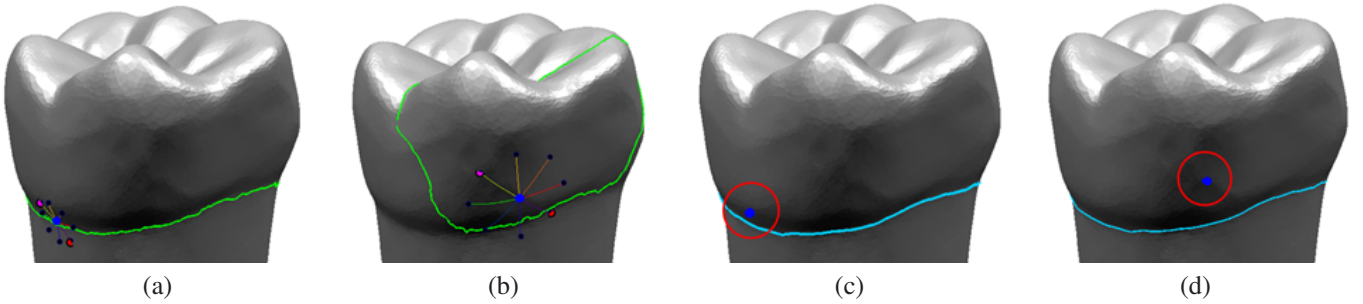


Figure 9: Comparison results: (a),(b) Dot Scissor [14] and (c), (d) our method.

였다.

5.2 3D Magic Wand 툴 비교 실험

본 논문에서 제안하고 있는 인터페이스인 3D Magic Wand 툴과 기존 연구의 Dot Scissor [14]에 대하여 비교 실험을 진행하였다. Dot Scissor는 메쉬 분할을 위한 기법으로 하모닉 필드를 활용하고 사용자의 인터페이스로 단일 클릭 방법을 사용한다는 점에서 본 논문의 3D Magic Wand 툴과 유사한 인터페이스이다. Dot Scissor 이후 하모닉 필드를 이용한 스케치 기반 인터페이스 연구 [24]가 있었지만, 인터페이스 기법이 본 논문에서 제안한 방법과 차이를 보였다. 따라서 Dot Scissor와 비교 실험을 통해 3D Magic Wand 툴의 일관성 있는 결과를 보여주었다. Dot Scissor는 선택한 정점으로부터 일정한 거리에 있는 8개의 제약 정점을 사용하여 하모닉 필드를 만들고 제약 정점 사이의 분할 경계선 중에서 최종 분할 경계선을 선택한다. 따라서 선택한 정점이 메쉬의 분할이 이루어지는 부분이나 근처에 있을 경우에만 메쉬 분할 경계선이 의미 있게 생성되었다. 그림 7은 Bunny 모델의 머리 영역을 각각의 인터페이스로 선택한 비교 결과이다. 그림 8(a)와 8(b)는 Dot Scissor의 결과로 초록색 분할 경계선을 생성하였고, 그림 8(c)와 8(d)는 3D Magic Wand 툴의 결과로 파란색 분할 경계선을 생성하였다. 그림 8(a)에서는 선택한 정점이 분할 영역 근처에 있었지만, 그림 8(b)처럼 분할 영역이 아닌 임의의 정점을 선택할 경우 의도와 다른 분할 경계선이 생성되었다. 이에 비해 3D Magic Wand 툴은 그림 8(c)와 8(d)처럼 메쉬 분할 영역 내의 어느 부분을 선택해도 분할 경계선이 안정적으로 잘 생성되는 것을 볼 수 있다. 이는 사용자가 메쉬 분할을 위해 더욱 간편하고

직관적인 인터페이스를 이용할 수 있다는 이점을 보여준다.

그림 9는 치아 모델을 이용하여 치관과 치근 영역 사이의 분할 경계를 선택한 비교 결과이다. 그림 8과 마찬가지로 Dot Scissor는 초록색 분할 경계선을 사용하였고, 3D Magic Wand 툴은 파란색 분할 경계선을 사용하였다. Dot Scissor는 그림 9(a)처럼 선택한 정점이 분할 영역 근처에 있는 경우 의미 있는 분할 결과를 보였다. 하지만 메쉬 표면이 울퉁불퉁한 특성이 있는 경우 불안정한 결과를 보였다. 그림 9(b)처럼 그림 9(a) Dot Scissor의 영역을 2배로 넓혀 분할 경계 영역을 포함하더라도 울퉁불퉁한 메쉬 표면의 특성에 따라 분할 경계선이 생성되었다. 3D Magic Wand 툴은 그림 9(c)와 9(d)의 빨간색 원으로 표시한 Dot Scissor와 같은 정점뿐만 아니라 다른 임의의 정점을 선택해도 동일한 결과를 보여주었다. 이는 울퉁불퉁한 메쉬 표면에서 정점을 선택하더라도 의미 있는 메쉬 분할 경계선이 생성된다는 것을 보여준다. 또한 3D Magic Wand 툴은 메쉬 분할을 위한 특징 추출 하모닉 필드 생성 시, 메쉬 전체에 대해 연산을 수행하지 않고 지정된 특정 영역만을 계산하기 때문에 메쉬 특징 영역 검사에 있어서 효율적인 성능을 보여준다.

5.3 부드러운 등위선 생성

분할 경계 최적화 기법을 통해 선택된 등위선으로부터 부드러운 경계선을 생성할 수 있다. 그림 10은 선택된 등위선과 비등방 측지선으로 개선된 경계를 나타낸다. 그림 10(a)와 같이 파란색 정점을 기준으로 메쉬 특징 영역을 포함하는 검사 영역(분홍색 영역)에 대하여 10(b)의 개선된 분할 경계선(파란색)과 10(c)의 초기 등위선(빨간색)을 생성하였다. 선택된 등위선과 비교하였

을 때 개선된 분할 경계선(파란색)이 더 나은 결과를 보여준다.

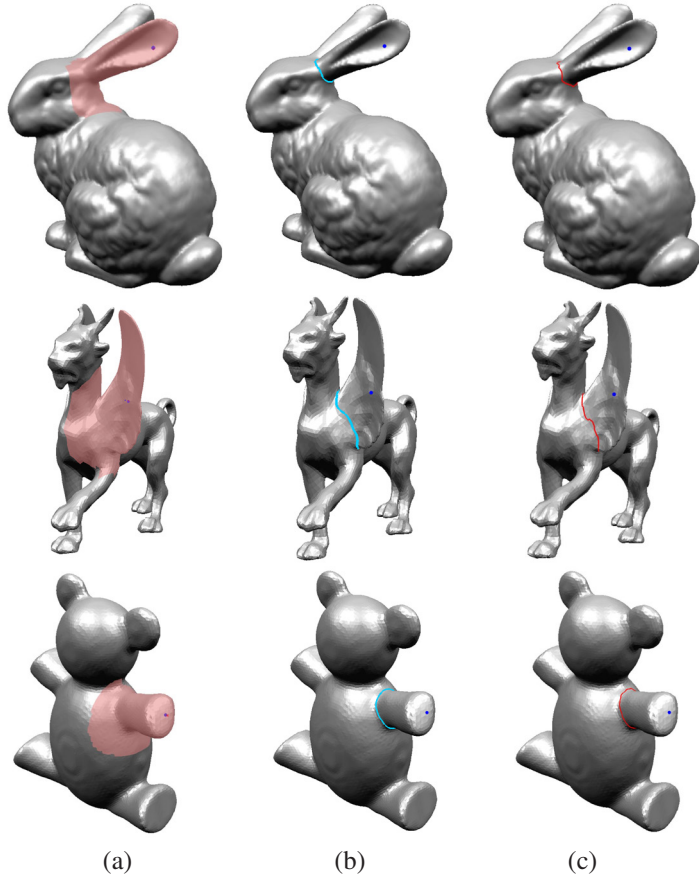


Figure 10: Segmentation boundaries: (a) N -ring neighboring regions, (b) final segmentation boundaries and (c) initial isolines.

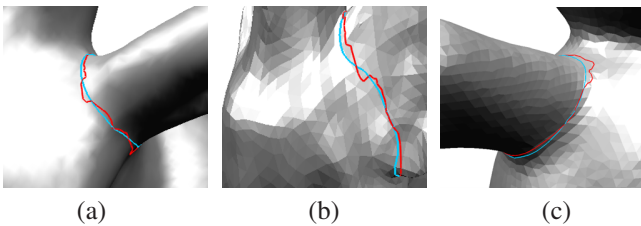


Figure 11: Comparison of segmentation boundaries.

그림 11는 초기 등위선(빨간색)과 개선된 경계선(파란색)의 비교 결과를 나타낸다. 초기 등위선은 메쉬의 형상에 따라 울퉁불퉁하게 생성되었지만, 비등방 측지선을 이용한 분할 경계선은 메쉬의 특징을 따라 부드럽게 생성되었다. 기존의 Yang 등 [25]의 치아 모델 분할 연구는 개선한 비등방 측지선을 이용한 3D Intelligent Scissors를 제안하였다. 이는 기존의 비등방 측지선 [18]의 인터페이스와 동일한 형태이며 비등방 측지선의 부드러움의 강도를 조절하여 메쉬 분할을 수행하였다. 본 논문의 개선된 분할 경계선은 Yang과 Wang의 개선한 비등방 측지선과 유사한 연구 결과를 보여주며 비교적 직관적인 인터페이스를 통해 더욱 간단한 선택이 가능하다. 그림 12는 개선된 분할 경계선을 활용하여

경계 부분을 따라 특징 영역을 부드럽고 자연스럽게 선택한 결과를 나타낸다.

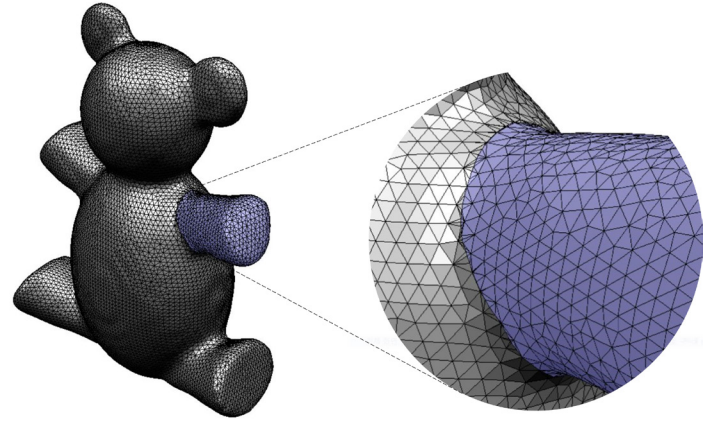


Figure 12: Mesh cutting with segmentation boundary.

6. 결론

본 논문에서는 특징 추출 하모닉 필드를 이용한 메쉬 특징 영역 선택을 지원하는 새로운 사용자 인터페이스인 3D Magic Wand 툴을 제안하였다. 3D Magic Wand 툴을 이용하여 관심이 있는 영역의 어떠한 정점을 선택하더라도 비슷한 메쉬 특징 영역이 선택되는 결과를 보였다. 또한 선택된 메쉬 영역의 분할 경계에 대한 후처리 과정을 진행하여 기존보다 매끄러운 경계선을 생성할 수 있는 방법을 제안하였다. 생성한 메쉬 분할 경계선을 이용하여 메쉬 분할, 텍스처 할당, 형상 검출 등 다양한 응용 분야에 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

본 논문에서 새로운 인터페이스를 사용하여 메쉬 분할이 효율적으로 수행된다는 것을 다양한 실험 결과를 통해 알 수 있었지만, 제안 방법은 현재 사용자의 단일 클릭을 통해 처음 선택된 영역에서 메쉬 분할이 수행되고 있다. 기존 선택한 검사 영역을 확장하고 축소할 수 있는 기능에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 인터페이스에 기반이 되는 특징 추출 하모닉 필드에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 하모닉 필드 생성 시에 메쉬의 특징을 추출할 수 있는 기법들은 기존 연구들을 바탕으로 수행되었다. 향후 연구에서는 인터페이스 추가 연구와 하모닉 필드에 필요한 메쉬의 오목성 판단 및 특징 추출 가중치에 대한 추가 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1048472, No. 2020X1A3A1093880, No. 2021R1A2C2012663).

References

- [1] R. S. Rodrigues, J. F. Morgado, and A. J. Gomes, “Part-based mesh segmentation: a survey,” *Computer Graphics Forum*, vol. 37, no. 6, pp. 235–274, 2018.
- [2] D. D. Hoffman and M. Singh, “Salience of visual parts,” *Cognition*, vol. 63, no. 1, pp. 29–78, 1997.
- [3] Y. Zheng and C.-L. Tai, “Mesh decomposition with cross-boundary brushes,” *Computer Graphics Forum*, vol. 29, no. 2, pp. 527–535, 2010.
- [4] O. K.-C. Au, Y. Zheng, M. Chen, P. Xu, and C.-L. Tai, “Mesh segmentation with concavity-aware fields,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 7, pp. 1125–1134, 2011.
- [5] B. Chazelle, D. P. Dobkin, N. Shouraboura, and A. Tal, “Strategies for polyhedral surface decomposition: An experimental study,” *Computational Geometry*, vol. 7, no. 5-6, pp. 327–342, 1997.
- [6] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, Inc., 1983.
- [7] A. P. Mangan and R. T. Whitaker, “Surface segmentation using morphological watersheds,” in *Proceedings of IEEE Visualization*, 1998.
- [8] —, “Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 5, no. 4, pp. 308–321, 1999.
- [9] S. Lloyd, “Least squares quantization in PCM,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129–137, 1982.
- [10] S. Katz and A. Tal, “Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 22, no. 3, pp. 954–961, 2003.
- [11] Y. Lee, S. Lee, A. Shamir, D. Cohen-Or, and H.-P. Seidel, “Intelligent mesh scissoring using 3D snakes,” in *Proceeding of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 2004, pp. 279–287.
- [12] —, “Mesh scissoring with minima rule and part salience,” *Computer Aided Geometric Design*, vol. 22, no. 5, pp. 444–465, 2005.
- [13] D. D. Hoffman and W. A. Richards, “Parts of recognition,” *Cognition*, vol. 18, no. 1-3, pp. 65–96, 1984.
- [14] Y. Zheng, C.-L. Tai, and O. K.-C. Au, “Dot scissor: a single-click interface for mesh segmentation,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 8, pp. 1304–1312, 2011.
- [15] B.-j. Zou, S.-j. Liu, S.-h. Liao, X. Ding, and Y. Liang, “Interactive tooth partition of dental mesh base on tooth-target harmonic field,” *Computers in Biology and Medicine*, vol. 56, pp. 132–144, 2015.
- [16] S.-h. Liao, S.-j. Liu, B.-j. Zou, X. Ding, Y. Liang, and J.-h. Huang, “Automatic tooth segmentation of dental mesh based on harmonic fields,” *BioMed Research International*, vol. 2015, 2015.
- [17] M. Desbrun, M. Meyer, P. Schröder, and A. H. Barr, “Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow,” in *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1999, pp. 317–324.
- [18] Y. Zhuang, M. Zou, N. Carr, and T. Ju, “Anisotropic geodesics for live-wire mesh segmentation,” *Computer Graphics Forum*, vol. 33, no. 7, pp. 111–120, 2014.
- [19] J. S. Mitchell, D. M. Mount, and C. H. Papadimitriou, “The discrete geodesic problem,” *SIAM Journal on Computing*, vol. 16, no. 4, pp. 647–668, 1987.
- [20] V. Surazhsky, T. Surazhsky, D. Kirsanov, S. J. Gortler, and H. Hoppe, “Fast exact and approximate geodesics on meshes,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 24, no. 3, pp. 553–560, 2005.
- [21] J. Chen and Y. Han, “Shortest paths on a polyhedron,” in *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Computational Geometry*, 1990, pp. 360–369.
- [22] S.-Q. Xin and G.-J. Wang, “Improving Chen and Han’s algorithm on the discrete geodesic problem,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 28, no. 4, pp. 1–8, 2009.
- [23] M. Campen, M. Heistermann, and L. Kobbelt, “Practical anisotropic geodesy,” *Computer Graphics Forum*, vol. 32, no. 5, pp. 63–71, 2013.
- [24] V. Lucquin, S. Deguy, and T. Boubekur, “Seamcut: interactive mesh segmentation for parameterization,” in *SIGGRAPH Asia 2017 Technical Briefs*, 2017, pp. 1–4.
- [25] S. Yang, R. Wang, W. Zhao, and Y. Ke, “3D intelligent scissors for dental mesh segmentation,” *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2020, 2020.

〈 저 자 소 개 〉



문 지 혜

- 2021 동국대학교 멀티미디어공학과 학사
- 2021 ~ 현재 동국대학교 멀티미디어공학과 석사과정
- 관심분야: 컴퓨터그래픽스, 기하모델링, 가상/증강현실
- <https://orcid.org/0000-0002-6688-5863>



박 상 훈

- 1993 서강대학교 수학과 학사
- 1995 서강대학교 컴퓨터학과 석사
- 2000 서강대학교 컴퓨터학과 박사
- 2000 ~ 2002 University of Texas at Austin 박사후연구원
- 2002 ~ 2005 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통신공학부 조교수
- 2011 University of California, Davis 방문연구원
- 2005 ~ 현재 동국대학교 멀티미디어학과 교수
- 관심분야: 실시간 렌더링, 사실적 렌더링, 과학적 가시화, 고성능 컴퓨팅 등
- <https://orcid.org/0000-0001-5383-7005>



윤 승 현

- 2001 한양대학교 수학과 학사
- 2007 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2007 ~ 현재: 동국대학교 멀티미디어공학과 교수
- 2013 ~ 2014: Victoria University, Wellington, 방문 교수
- 관심분야: 컴퓨터그래픽스, 기하모델링, 가상/증강현실
- <https://orcid.org/0000-0002-0015-8305>