

Novel GPU Framework for Representing Exaggeration of Triangular Mesh with Boost Filtering

Jong-Hyun Kim*

*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University,
Incheon, Korea

[Abstract]

This paper proposes a GPU-based framework for stably exaggerating the shape of triangular meshes using a boost filter. The framework is based on the high-boost mesh filter from digital signal processing, which influences the normal vectors of the triangular mesh and updates the vertex positions to adapt to the exaggerated normal vectors. However, this process introduces noise in the vertices, which previous methods attempted to minimize using an averaging filter. To address this issue, this paper applies a bilateral filter to the high-boost filtering algorithm to remove noise and accelerate the process using a GPU, generating results in an average of 0.0006 to 0.0008 seconds. Through various experiments, the proposed method demonstrates its effectiveness in the shape exaggeration process of 3D meshes.

▶ **Key words:** High-boost mesh filter, Computed unified device architecture, Bilateral filter, Triangular mesh, GPU optimization, Mesh exaggeration

[요 약]

본 논문에서는 삼각형 메쉬의 형태를 부스트 필터(Boost filter)를 사용하여 안정적으로 과장하기 위한 GPU 기반 프레임워크를 제안한다. 이 프레임워크는 디지털 신호 처리의 하이 부스트 필터(High-boost mesh filter)를 기반으로 하며, 삼각형 메쉬의 법선 벡터에 영향을 미치고 메쉬의 정점 위치를 갱신하여 과장된 법선 벡터에 적응되도록 변형한다. 그러나 이로 인해 정점에 노이즈가 나타나며, 이전 기법에서는 평균 필터를 사용하여 이 노이즈를 최소화하려고 했다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 하이 부스트 필터링 알고리즘에 양방향 필터(Bilateral filter)를 적용하여 노이즈를 제거하고 GPU 기반으로 고속화하며 평균 0.0006~0.0008초 만에 결과를 만들어 낸다. 이를 통해 다양한 실험을 통해 3D 메쉬의 형상 과장에 효과적인 기술임을 보여준다.

▶ **주제어:** 하이 부스트 필터, 쿠다, 양방향 필터, 삼각형 메쉬, GPU 최적화, 메쉬 과장

• First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
*Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology),
Inha University
• Received: 2025. 01. 13, Revised: 2025. 02. 12, Accepted: 2025. 02. 12.

I. Introduction

하이 부스트 메쉬 필터는 영상과 디지털 신호 처리에서 사용되는 샤프닝(Sharpening) 알고리즘을 기반으로 개발된 기술이다[1]. 이 방법은 법선 벡터를 이용하여 3차원 삼각형 메쉬의 특징적 형태를 유지하면서 필터링을 통해 과장하는 방법이다. 하이 부스트 메쉬 필터를 적용한 결과물은 원래 메쉬의 형태보다 특징이 과장된 모습을 보인다. 그러나 계단현상(Aliasing)과 메쉬 불규칙성(Mesh irregularization)이 발생하기 때문에 라플라시안 스무딩(Laplacian smoothing)을 적용하여 이를 보완해야 한다[2]. Fig. 1은 메쉬 정점의 개수에 따른 하이 부스트 메쉬 필터의 CPU 연산 시간을 보여주는 그림이다. 그림에서 보듯이 고해상도의 메쉬일수록 노이즈뿐만 아니라 연산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다 (Fig.1에서 '양방향 필터(Bilateral filter)'만 제외하면 이전 기법과 동일[1]). 여기서 보여주고자 하는 내용은 다음과 같다: CPU 기반에서는 알고리즘 복잡도가 메쉬의 크기에 의존하기 때문에 정점의 개수가 많을수록 계산시간도 오래 소요된다는 것이다.

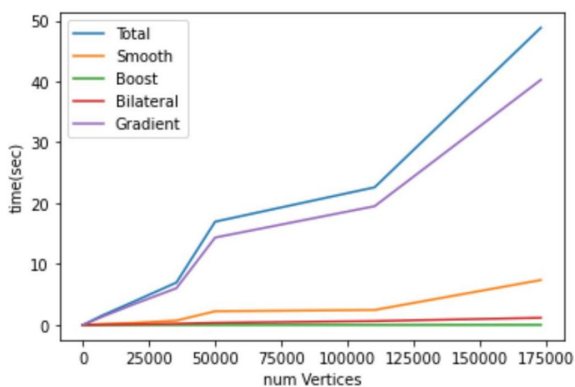


Fig. 1. Calculation time for each function of high-boost mesh filtering on the CPU.

본 논문은 하이 부스트 메쉬 필터에서 사용되는 부스트된 법선 벡터에 양방향 필터를 통합하여 메쉬 필터 기반의 프레임워크를 새롭게 제안함으로써 계단현상과 노이즈 문제를 해결한다. 또한, GPU로 최적화하여 알고리즘을 병렬화하여 알고리즘 속도를 개선한다.

본 논문의 기술적 기여도는 다음과 같다 : 1) 부스트 필터로 인해 메쉬 정점에서 노이즈와 계단현상이 나타나는 문제를 양방향 필터를 통해 해결할 수 있는 새로운 부스트 메쉬 필터를 제안한다. 2) 이 과정을 GPU로 최적화하여 계산 속도를 가속화한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 메쉬 과장과 메쉬 부스트 필터와 관련된 기존 연구들을 살펴보고, 3장에

서는 하이 부스트 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 노이즈 현상 문제를 보완한 알고리즘과 GPU 기반으로 구현한 결과를 기존 기법과 비교하고 분석한다.

II. Related Work

표면 최적화의 일반적인 방법은 에너지 최소화 흐름을 기반으로 하며, 주어진 표면을 점진적으로 진화시켜 원하는 표면 특성 에너지를 만족하는 표면을 모델링하는 것이다. Taubin은 이산 표면(Discrete surfaces)의 지역 통과 필터링(Low-pass filtering)을 위한 표면 확산을 구현하기 위해 반복적인 라플라시안 방식을 활용했다[3]. Desbrun 등은 평균 곡률 흐름을 이용하여 표면의 기하학적 노이즈를 제거하고 계산을 안정화하기 위한 암시적 방법(Implicit method)을 제안했다[4]. Ohtake 등은 메쉬 법선에 확산을 적용하고 피팅(Fitting) 접근법을 사용하여 부드러운 표면을 재구성할 수 있는 방법을 제안했다[5]. Bobenko와 Schröder는 연속적인 공간에서의 대칭성을 보존하기 위한 접근법인 윌모어 흐름(Willmore flow)의 이산적인 버전을 새롭게 제안하며, 표면 최적화에 활용할 수 있게 했다[6]. Pushkar와 Sequin은 곡면을 설계하기 위한 함수를 윌모어와 곡률 에너지의 최소 변화를 통해 모델링 했다[7]. Pinkall과 Polthier은 마찬가지로 에너지 흐름을 최소화하는 면적을 기반으로 이산 최소 곡면을 처리할 수 있는 방법을 제시했다[8].

다양한 연구자들은 메쉬 기반의 흐름 진화에 대한 더 직접적인 제어를 추가하기 위해 형상 최적화(Shape optimization) 방법을 확장했다. Hildebrandt와 Polthier는 이방성 평균 곡률 흐름을 기반으로 표면 메쉬에서 특징을 보존하는 노이즈 제거 방법을 제시했다[9]. 이 방법을 사용하면 평균 곡률을 흐름 진화의 목표로 지정할 수 있다. Eckstein 등은 기본 벡터장의 내적분을 특정 응용 분야의 요구 사항에 맞게 조정하여 기하학적 표면 흐름을 일반화했다[10]. 이 확장은 흐름을 제어하기 위한 설계 도구를 제공하며, 이는 표면 페어링과 변형 가능한 형상 매칭에 적용되었다. Tosun 등은 목표 반사 함수 기울기(Target reflection function gradient)를 지정하여 표면을 수정할 수 있는 반사선과 이를 활용한 형상 최적화 알고리즘을 제안했다[11]. 이 방법에서는 지정된 반사 필드와 가장 잘 일치하는 표면을 찾기 위해 최적화 과정을 계산한다. Lipman 등은 이산화 형태에 기반한 강제 불변 표면 표현 기법을 제안함으로써 표면을 효율적으로 재구성할 수 있는 방법을 제시했다[12].

3차원 모델이 주어지면, Cignoni 등은 렌더링된 단일 이미지에서 기하학적 불연속성을 강조하기 위해 법선 벡터 방향으로 객체를 이동시키는 방법을 제안했다[13]. 이 접근 방식에서 과장된 강도는 메시의 기하학적 특징이 얼마나 선명하게 처리되는지에 따라 제어된다. Rusinkiewicz 등은 최대 대비를 얻기 위해 메시의 정점별로 지역 조명을 배치하여 형상의 특징과 표면 디테일을 노출시키는 새로운 조명 모델을 제안했다[14].

복잡한 기하학 및 다중 객체 장면에서의 과장 기법은 다양한 객체의 공간적 배열과 서로간의 관계를 고려하여 결정된다. 분자(Molecules) 렌더링이나[15] 의료용 체적 데이터에서는 기울기를 개선시켜 렌더링 특징을 더 자세하게 포착하려는 시도가 있었다[16]. 또한, 이러한 특징을 앰비언트 오클루전(Ambient occlusion)에 적용하여 렌더링 특징을 강조하려는 시도도 있었다[17]. 하지만 앞서 언급한 방법들은 렌더링된 이미지에서 특징을 과장하려는 시도였으며, 실제 지오메트리의 형상을 변형하지는 않았다. 이에 반해, 본 논문에서 접근하는 방식은 렌더링된 이미지가 아닌, 3차원 공간에서 메시의 정점을 최적화된 흐름에 따라 위치를 변형하는 표면 최적화와 유사한 방식이다.

최근에는 인공지능을 이용하여 지오메트리 모델링을 수행하는 데에도 다양한 연구가 이루어지고 있다. Fan 등은 단일 이미지에서 3D 재구성 문제를 효율적으로 해결하기 위해 포인트 클라우드 형태로 좌표를 생성하는 방법을 제안했다[18]. Yang 등은 단일 장면에서 3D 객체를 복원하는 과정에서 발생하는 노이즈가 많은 배경과 심한 폐색을 줄일 수 있는 방법을 제안했다[19].

이들은 이미지에서 누락된 정보를 보완하기 위해 이미지-복셀 쌍 형태로 명시적으로 구성할 수 있는 방식을 사용했다. Wen 등은 RGBD 비디오 시퀀스에서 실시간으로 객체를 추적할 수 있는 방법을 제안했다[20]. 이 방법은 시각적 텍스처가 거의 없는 경우에도 잘 동작한다. 그러나 위에서 언급한 인공지능 기반 3D 객체 생성 및 제어 방법들은 대부분 이미지로부터 3차원 객체를 모델링하고 인식하는 수준에 머무르고 있기 때문에, 표면을 디테일하게 복원하거나 특징을 과장시키기에는 충분하지 않다.

III. The Proposed Scheme

1. High-Boost Mesh Filtering in Triangular Mesh

3D 오브젝트의 메쉬를 과장하기 위한 방법은 범프 맵핑과 유사하게 3D 공간에서 법선 벡터를 과장하는 것이다.

평활화된 법선 벡터인 $n^{(k)}$ 는 평균 필터링 기반으로 아래와 같은 방식으로 계산된다 (수식 1 참조).

$$n^{(k)}(T) = \frac{1}{\sum A(U_i)} \sum_{i \in N(T)} A(U_i) n(U_i) \quad (1)$$

여기서 k 는 반복 횟수, T 는 메쉬를 구성하는 삼각형, U_i 는 1링으로 구성된 인접 삼각형, A 는 삼각형의 넓이를 계산하는 함수이다. 즉, 이 식은 인접 삼각형의 넓이 가중치를 고려한 평균 필터링을 통해 부드러운 법선 벡터인 $n^{(k)}$ 를 계산하는 것이다. T 와 $n^{(k)}$ 를 사용하여 부스트된 법선(Boosted normal)을 계산한다 (수식 2 참조).

$$m(T) = \frac{(1 + \alpha)n(T) - \alpha n^{(k)}(T)}{\| (1 + \alpha)n(T) - \alpha n^{(k)}(T) \|} \quad (2)$$

여기서 α 는 부스트의 강도를 조절하는 임계값으로, 이 값을 통해 표면 형태의 강화 정도를 조절할 수 있다. 마지막으로, 부스트된 법선 벡터와 삼각형의 법선 벡터 간의 오차를 최소화하도록 기울기를 계산하고, 이를 통해 정점을 이동시킨다 (수식 3 참조).

$$E_n = \sum_{i \in F_1(P)} A(R_i) (n(R_i) - m(R_i))^2 \quad (3)$$

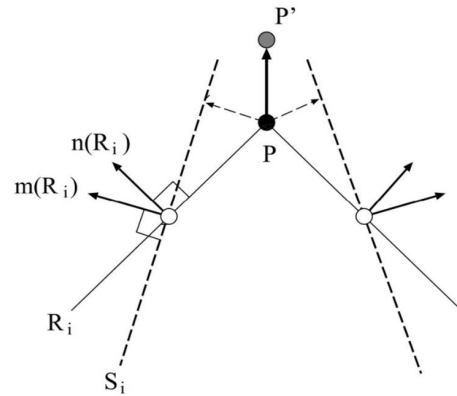
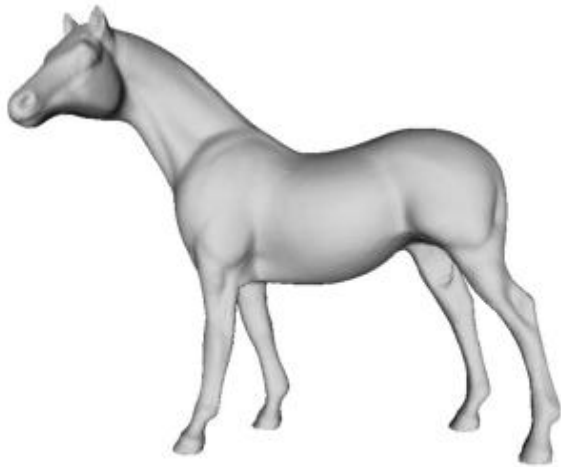
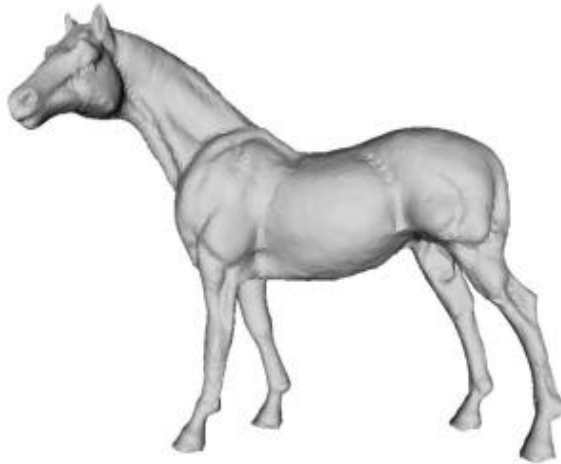


Fig. 2. Normal-based error minimization in high-boost mesh filtering.

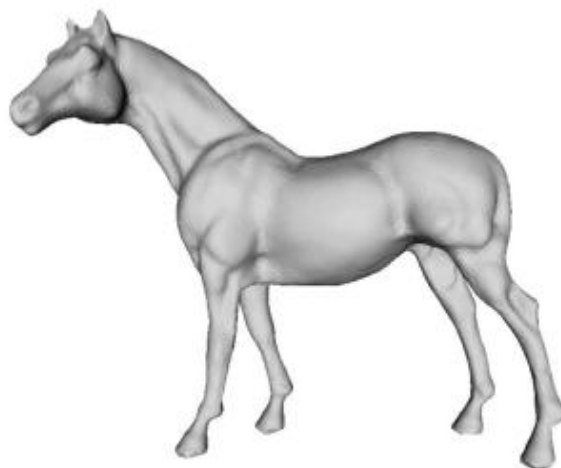
Fig. 2는 오차를 최소화하는 알고리즘을 나타냅니다. R_i 는 삼각형을 의미하며, S_i 는 부스트된 법선을 가지는 평면에 R_i 를 투영하여 얻은 삼각형을 의미한다. 정점 P 의 1링 인접 삼각형들에 대해 R_i 와 S_i 의 넓이를 계산하고, 그 차이를 최소화하는 기울기를 계산하여 P 의 위치를 P' 로 이동시킨다 (수식 4 참조).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Comparison of results between the previous method [1] and our method.

$$P' = P - \lambda \sum_i \left(\frac{\partial A(R_i)}{\partial P} - \frac{\partial A(S_i)}{\partial P} \right) \quad (4)$$

하이 부스트 메쉬 필터링의 단점 중 하나인 계단 현상 (Aliasing)은 메쉬의 형태를 강화할 때 노이즈가 포함되는 문제가 있다. 따라서 잡음은 제거하되 윤곽선을 보존하며 강화하기 위해 본 논문에서는 삼각형 기반 양방향 필터를 사용한다. 일반적으로 양방향 필터는 잡음 제거 알고리즘 중 하나로, 블러 알고리즘을 기반으로 가우시안 필터를 개선한 방법이다[21]. 기준 픽셀과 이웃 픽셀의 거리와 값 차이를 고려하여 블러링 정도를 조절한다 (수식 5 참조).

$$I_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) \quad (5)$$

여기서 p 는 출력 픽셀의 좌표를 의미하고, q 는 p 의 주변 픽셀의 좌표를 의미하며, W_p 는 정규화 상수이다. 두 개의 가우시안 함수는 각각 p 와 q 간의 거리와 픽셀 값의 차이를 고려하여 계산된다. 가우시안 함수는 σ 를 통해 조절할 수 있다.

하이 부스트 필터링은 삼각형의 부스트된 법선을 사용하여 메쉬의 형태를 강화한다. 따라서 본 논문에서는 양방향 필터를 부스트된 법선 벡터에 적용한다. 양방향 필터를 적용할 범위는 각 삼각형에 대해 1-링 인접 삼각형으로 설정한다. 수식 5의 주변 픽셀과의 거리와 픽셀 값의 차이 대신, 주변 삼각형의 중심 좌표 간의 거리와 부스트된 법선 벡터의 차이를 각각 가우시안 함수로 계산한다.

Fig. 3은 Horse 모델을 사용하여 삼각형 메쉬 기반의 양방향 필터 적용 여부에 따른 하이 부스트 메쉬 필터링 결과를 비교한 그림이다. Fig. 3b와 3c는 동일한 조건에서 하이 부스트 메쉬 필터링을 적용한 결과이다. 원형인 3a보다 강화된 결과를 보이지만, 잡음도 함께 강화된 3b보다 양방향 필터로 윤곽선은 강화되며 잡음이 제거된 3c가 더 안정적인 결과를 보인다.

2. GPU Optimization

하이 부스트 메쉬 필터링의 전체 연산 시간을 각각 *평활화된 법선(Smoothed normal)*, *부스트된 법선(Boosted normal)*, *양방향 필터*, *기울기 연산 함수*로 나눠보면 Fig. 1과 같다. *기울기 연산 함수*가 가장 많은 시간을 차지하고 *평활화된 법선 연산 함수*가 두 번째로 많은 시간을 차지하며 고해상도 메쉬일수록 연산 시간이 더욱 증가한다. 대부분의 시간을 차지하는 *기울기 연산 함수*와 *평활화된 법선*

연산 함수만 GPU로 구현할 경우, CPU와 GPU 간에 데이터를 복사하는 과정이 증가해 비효율적이다. 따라서 하이 부스트 메쉬 필터링 알고리즘 전체를 GPU에서 구현한다. CPU와 GPU 간의 데이터 복사는 연산에 필요한 메쉬 데이터를 CPU에서 GPU로 복사하는 초기 단계와 기울기 연산까지 모두 마친 후 변경된 위치 데이터를 GPU에서 CPU로 복사하는 마지막 단계에서만 일어난다.

하이 부스트 메쉬 필터링 연산에 필요한 데이터 중 1링 인접 삼각형 데이터는 각 삼각형 및 정점마다 데이터의 크기가 달라 GPU로 옮기기 까다로운 데이터이다. GPU에서 사용할 삼각형과 정점의 1링 인접 삼각형 데이터를 해시 테이블을 이용해 구현한다. 고해상도 메쉬인 경우는 경계상자 대각선 길이의 $\frac{1}{100}$ 범위 안에 들어오는 인접 삼각형들을 이용한다.

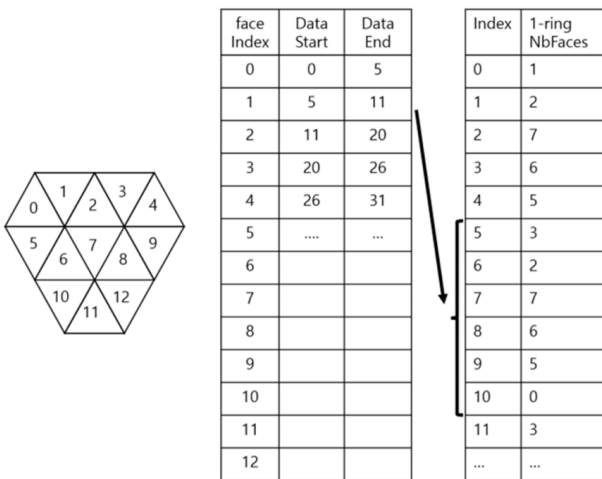


Fig. 4. Hash table data structure for 1-ring neighborhood faces.

Fig 4는 GPU에서 삼각형에 대한 1링 인접 삼각형 데이터 구조를 나타낸다. 삼각형의 1링 인접 삼각형 데이터 전체를 하나의 배열에 저장한다. 삼각형의 인덱스를 키, 데이터의 시작과 끝 위치를 값으로 한다. GPU에서 기울기 연산을 할 때, 연산할 삼각형의 인덱스 값으로 데이터의 시작과 끝 위치를 알아내 이웃 정보가 저장된 배열에서 해당하는 위치에 있는 데이터를 사용한다.

평활화된 법선, 부스트된 법선, 양방향 필터를 연산하는 커널에 사용하는 총 스투드 개수는 삼각형 개수와 동일하고, 기울기를 연산하는 커널에 사용하는 총 스투드 개수는 정점 개수와 동일하다.

IV. Experiment and Results

본 연구의 결과들을 만들기 위해 실험한 환경은 Intel Core i7-7700K CPU, 32GB RAM, Geforce GTX 1080Ti GPU가 탑재된 컴퓨터를 이용하였다. 본 논문에서 제안하는 하이 부스트 메쉬 필터링은 법선과 부스트된 법선 벡터 사이의 오차가 최소가 되는 위치로 정점을 이동시킬 뿐 정점의 개수를 늘리거나 이동 시 주변과의 관계를 고려하지 않는다. 따라서 비정규화(Irregularization)는 여전히 발생하고 이를 해결하기 위한 평활화(Smoothing) 과정이 필요하다. 평활화를 사용하지 않을 때 하이 부스트 메쉬 필터링은 저해상도 보다 고해상도에서 더 좋은 결과를 보인다.

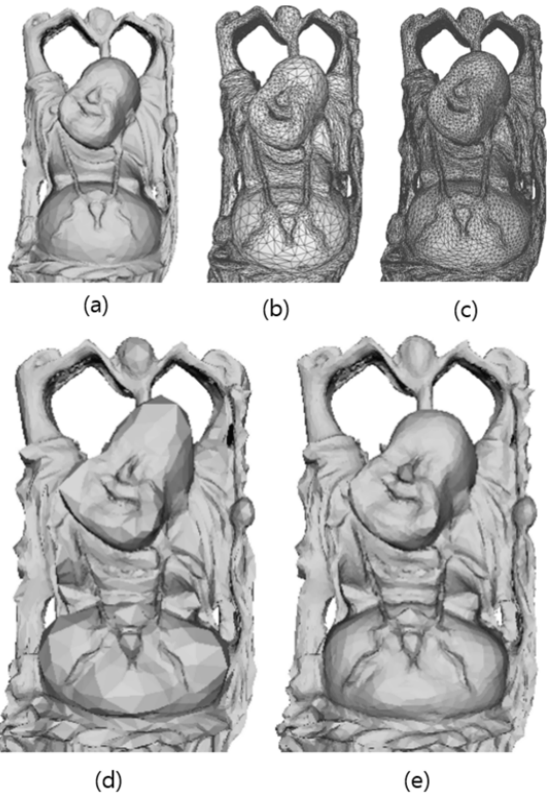


Fig. 5. Boosted mesh using our method: (a) Original input model (Buddha), (b) Input model (vertices: 49,990, faces: 100,000), (c) Input model (vertices: 67,031, faces: 134,082), (d) High-boost mesh filtering applied to (b), (e) High-boost mesh filtering applied to (c).

Fig 5는 Buddha 모델을 사용해 해상도에 따른 결과를 보여준다. Fig. 5b는 원본 Buddha의 간략화 모델이며, 5c는 5a의 해상도를 세분화(Subdivision)로 높인 메쉬이다. 그리고 5d와 5e는 각각 5b와 5c에 하이 부스트 메쉬 필터링을 적용한 결과이다. Fig. 5b에서 해상도가 낮은 Buddha의 배와 얼굴 부분은 비정규화로 인해 5d와 같이 형태는 강화되지만 부자연스럽게 변하며 평활화를 필요로

한다. 해당 부분의 해상도를 높인 5c의 결과인 5e는 평활화 없이도 5d보다 자연스러운 결과를 만들었다.

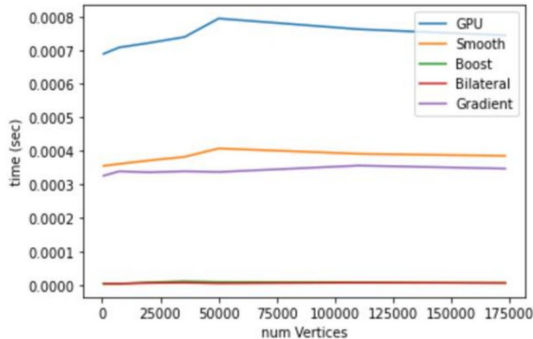


Fig. 6. Computation time for each function of our method on the GPU.

Fig. 6은 GPU 기반으로 구현한 하이 부스트 메쉬 필터링의 연산 시간을 나타내며, 평활화된 법선과 기울기 연산 반복 횟수를 각각 100으로 설정하여 측정되었다. 이 결과, 평균 0.0006에서 0.0008초의 연산 시간이 소요되며 메쉬의 해상도에 따른 차이가 크지 않았다. 이 알고리즘은 CPU보다 연산 시간이 매우 단축되어 메쉬에 실시간으로 적용할 수 있을 정도로 빨라졌다. 또한, 메쉬의 해상도에 따른 연산 시간의 차이가 크지 않아 고해상도 메쉬에서 평활화 과정을 사용하지 않고도 비정규화를 어느 정도 보완할 수 있는 성능을 보여준다.

V. Conclusion

본 논문에서는 하이 부스트 메쉬 필터링 알고리즘에 삼각형 메쉬에서 동작하는 새로운 양방향 필터를 적용하여 계단 현상을 해결하고, GPU를 활용한 병렬 처리로 알고리즘 속도를 개선하였다. 그 결과, CPU에 비해 실시간 적용이 가능한 수준으로 연산 시간이 단축되었으며, 잡음 문제를 해결하여 더 자연스러운 형태로 강화된 결과를 얻을 수 있었다. 다만, 비정규화 문제는 여전히 해결되지 않아 평활화 과정이 필요하기 때문에 연산량이 증가될 수 있다. 현재 하이 부스트 메쉬 필터링 알고리즘은 삼각형 메쉬를 기반으로 하고 있지만, 향후 쿼드 메쉬와 다면체 메쉬, 그리고 의료3D영상에서도 활용할 수 있도록 해법을 확장할 계획이다. 또한 일반적으로, 인공지능을 이용한 3D 모델링 연구들은 주로 LLM(Large Language Model)이나 단일 이미지를 사용하여 3D 모델을 복원하는 데 초점을 맞추고 있다. 그러나, 특징을 학습하여 과장시키는 3D 모델 연구

는 아직까지 보고되지 않았다. 본 논문에서는 제안된 방법을 통해 학습을 위한 데이터셋 구축이 가능함을 보여주며, 이를 통해 향후 학습을 통한 특징의 과장 효과를 기대할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00254695, Contribution Rate : 50%). This work was partly supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2022-00155915, Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (Inha University)) and Korea Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT) grant funded by the Korea government(MOTIE) (Contribution Rate: 50%)

REFERENCES

- [1] Yagou, Hirokazu, A. Belyaevy, and D. Weiz. "High-boost mesh filtering for 3-D shape enhancement." *Journal of Three Dimensional Images*, vol. 17, no. 1, pp. 170-175, 2003.
- [2] Vollmer, Jörg, Robert Mencl, and Heinrich Mueller. "Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes." In *Computer graphics forum*, vol. 18, no. 3, pp. 131-138, 1999. DOI: 10.1111/1467-8659.00334.
- [3] Taubin, Gabriel. "A signal processing approach to fair surface design." In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 351-358, 1995. DOI: 10.1145/218380.2184
- [4] Desbrun, Mathieu, Mark Meyer, Peter Schröder, and Alan 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*, pp. 317-324, 1999. DOI: 10.1145/311535.311576
- [5] Ohtake, Yutaka, Alexander G. Belyaev, and Hans-Peter Seidel. "Mesh Smoothing by Adaptive and Anisotropic Gaussian Filter Applied to Mesh Normals." *Vision, Modeling, and Visualization*, vol. 2, 2002.

- [6] Bobenko, Alexander I., and Peter Schröder. "Discrete willmore flow." *ACM SIGGRAPH*, pp. 5, 2005. DOI: 10.2312/SGP/SGP05/101-110
- [7] Joshi, Pushkar, and Carlo Séquin. "Energy minimizers for curvature-based surface functionals." *Computer-Aided Design and Applications*. vol. 4, no. 5, pp. 607-617, 2007. DOI: 10.1080/16864360.2007.10738495
- [8] Pinkall, Ulrich, and Konrad Polthier. "Computing discrete minimal surfaces and their conjugates." *Experimental mathematics*. vol. 2, no. 1, pp. 15-36, 1993. DOI: 10.1080/10586458.1993.10504266
- [9] Hildebrandt, Klaus, and Konrad Polthier. "Anisotropic filtering of non-linear surface features." *Computer Graphics Forum*, vol. 23, no. 3, pp. 391-400, 2004. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2004.00770.x
- [10] Eckstein, Ilya, J-P. Pons, Yiyang Tong, C-CJ Kuo, and Mathieu Desbrun. "Generalized surface flows for mesh processing." In *Eurographics Symposium on Geometry processing*, pp. 183-192, 2007. DOI: 10.2312/SGP/SGP07/183-192
- [11] Tosun, Elif, Yotam I. Gingold, Jason Reisman, and Denis Zorin. "Shape optimization using reflection lines." In *Symposium on Geometry Processing*, pp. 193-202, 2007. DOI: 10.1145/1281991.1282018
- [12] Lipman, Yaron, Olga Sorkine, David Levin, and Daniel Cohen-Or. "Linear rotation-invariant coordinates for meshes." *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 479-487, 2005. DOI: 10.1145/1073204.1073217
- [13] Cignoni, Paolo, Roberto Scopigno, and Marco Tarini. "A simple normal enhancement technique for interactive non-photorealistic renderings." *Computers & Graphics*, vol. 29, no. 1, pp. 125-133, 2005. DOI: 10.1016/j.cag.2004.11.012
- [14] Rusinkiewicz, Szymon, Michael Burns, and Doug DeCarlo. "Exaggerated shading for depicting shape and detail." *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, pp. 1199-1205, 2006. DOI: 10.1145/1179352.1142015
- [15] Tarini, Marco, Paolo Cignoni, and Claudio Montani. "Ambient occlusion and edge cueing for enhancing real time molecular visualization." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, no. 5, pp. 1237-1244, 2006. DOI: 10.1109/TVCG.2006.115
- [16] Bruckner, Stefan, and Eduard Gröller. "Enhancing depth-perception with flexible volumetric halos." *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 13, no. 6, pp. 1344-1351, 2007. DOI: 10.1109/TVCG.2007.70555
- [17] LANDIS, H. 2002. "RenderMan in Production". In *ACM SIGGRAPH*, 2002.
- [18] Fan, Haoqiang, Hao Su, and Leonidas J. Guibas. "A point set generation network for 3d object reconstruction from a single image." In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 605-613. 2017. DOI: 10.1109/CVPR.2017.264
- [19] Yang, Shuo, Min Xu, Haozhe Xie, Stuart Perry, and Jiahao Xia. "Single-view 3d object reconstruction from shape priors in memory." In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3152-3161. 2021. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00317
- [20] Wen, Bowen, Jonathan Tremblay, Valts Blukis, Stephen Tyree, Thomas Müller, Alex Evans, Dieter Fox, Jan Kautz, and Stan Birchfield. "Bundlesdf: Neural 6-dof tracking and 3d reconstruction of unknown objects." In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 606-617. 2023. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00066
- [21] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," in *Proc. ICCV*, pp. 839-846, 1998. DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815

Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology) in Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.