

비디오 기반 동적 메쉬 압축을 위한 노말 벡터를 이용한 메쉬 세분화 및 리프팅 웨이블릿 변환 방법

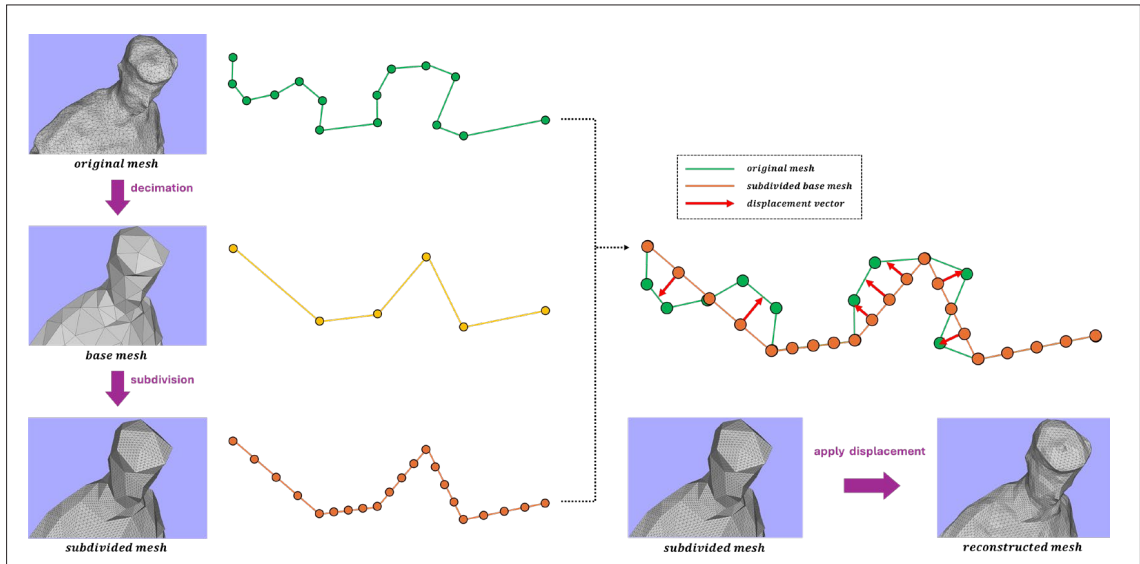
김민태 / 광운대학교 영상처리시스템연구실(IPSL)

3차원 데이터를 생성, 취득, 처리, 시각화하는 기술이 발전함에 따라, 증강현실/가상현실, 자율주행, 게임 산업, 의료 산업 등의 다양한 산업 분야에서 3차원 데이터를 활용하기 위한 응용 기술 및 연구들이 증가하고 있다. 3차원 데이터의 대표적인 예시 중 하나인 동적 메쉬는 기하 정보와 색상 정보를 갖는 정점들, 다각형 면 구성을 위한 정점 간 연결 정보 등으로 구성된다. 이와 같이 3차원 정보를 표현하기 위한 다양한 구성 요소를 갖는 동적 메쉬는 일반적으로 이미지, 비디오와 같은 2D 데이터 대비 큰 데이터 크기를 갖는다. 따라서, 데이터 크기가 큰 동적 메쉬를 다양한 분야에서 활용하기 위해서는, 메쉬의 전송 및 저장 간 이를 효과적으로 압축할 수 있는 압축 기술이 필수적으로 요구된다. 이러한 요구에 따라, 국제 표준화기구 MPEG (Moving Picture Expert Group)에서는 동적 메쉬를 효과적으로 압축하기 위한 V-DMC (Video-based Dynamic Mesh Coding) 기술의 표준화를 진행하고 있다.

V-DMC 기술의 기본 아이디어는 <그림 1>과 같이 입력된 고해상도의 메쉬를 입력 메쉬의 형태를 유지하면서 단순화한 저해상도 베이스 메쉬 (Base Mesh)와 베

이스 메쉬의 세분화 및 입력 메쉬와의 피팅 과정을 통해 계산된 고해상도 변위 벡터 (Displacement Vector) 보상 정보로 근사화하여 메쉬를 압축 및 복원하는 것이다. 해당 압축 과정에서 베이스 메쉬의 기존 정점들을 기반으로 새로운 정점들을 생성하는 베이스 메쉬 세분화 (Subdivision) 과정이 수행되어 세분화된 메쉬가 생성되며, 세분화된 메쉬와 원본 메쉬 표면 간의 차이 정보로 변위 벡터가 계산된다. 이후 변위 벡터는 에너지 집중도를 높이기 위해 기존 변위 벡터 신호를 저주파 신호와 고주파 신호로 변환하는 리프팅 웨이블릿 변환 (Lifting Wavelet Transform) 과정을 거친 후 압축된다. 본 연구에서는 V-DMC 기술의 압축 성능 향상을 위해 정점의 노말 벡터 (Normal Vector) 정보를 활용하여 베이스 메쉬 세분화 과정과 변위 벡터 리프팅 웨이블릿 변환 과정을 수행하는 방법을 제안한다.

기존 V-DMC의 베이스 메쉬 세분화 과정은 여러 번의 세분화 단계를 통해 수행될 수 있으며, 각 세분화 단계에서는 인접한 두 정점의 평균 위치로 새로운 정점을 생성하는 중간점 세분화 방법 (Midpoint Subdivision Method) 또는 인접한 정점들 간 필터링을 통해 새로운

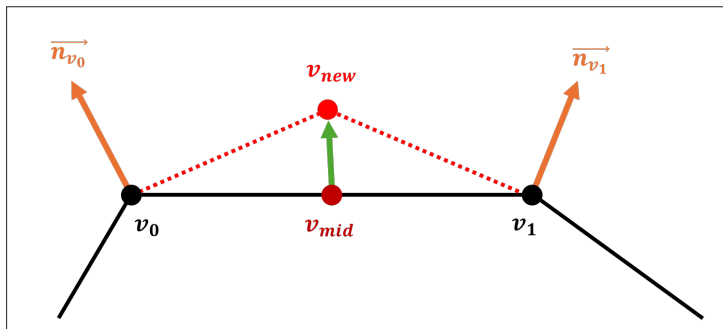


<그림 1> V-DMC 베이스 메쉬와 변위 벡터의 개념

정점을 생성하고 기존 정점을 재조정하는 루프 세분화 방법 (Loop Subdivision Method)이 사용될 수 있다. 이때, 중간점 세분화 방법은 베이스 메쉬의 단순한 기하 형태를 동일하게 유지하면서 새로운 정점을 생성하기 때문에, 일반적으로 굴곡지고 유기적인 표면을 갖는 입력 원본 메쉬를 효과적으로 표현하지 못해, 세분화된 베이스 메쉬와 입력 원본 메쉬 표면 간 차이로 계산되는 변위 벡터의 테

이터량이 증가하고 부·복호화 후 복원되는 메쉬의 품질이 하락할 수 있다는 한계점이 존재한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 베이스 메쉬 세분화 과정 간 메쉬 정점의 노말 벡터 정보를 활용하여 메쉬 세분화를 수행하는 방법을 제안한다. 제안하는 노말 기반 세분화 방법은 <그림 2>와 식 (1)과 같이 기존 메쉬의 인접한 두 정점의 평균 위치에서, 해당 두



<그림 2> 노말 기반 세분화 방법

정점의 노말 벡터를 기반으로 계산한 보정 벡터를 적용한 위치로 새로운 정점을 생성함으로써, 베이스 메쉬가 굴곡지고 유기적인 형태의 표면을 갖도록 세분화를 수행한다. 식 (1)에서 w 는 세분화된 메쉬 표면의 매끄러움을 결정하는 가중치 파라미터이다. 제안하는 방법을 통해 굴곡지고 유기적인 표면을 갖는 입력 원본 메쉬를 효과적으로 표현할 수 있도록 메쉬 세분화가 수행되어, 변위 벡터의 데이터량이 감소되고 복원되는 메쉬의 품질이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

$$v_{new} = \frac{1}{2} \cdot (v_0 + v_1) + w \cdot (d_{v_0} \cdot \vec{n}_{v_0} + d_{v_1} \cdot \vec{n}_{v_1}), \quad (1)$$

where $d_{v_0} = \frac{1}{2}(v_0 - v_1) \cdot \vec{n}_{v_0}$, $d_{v_1} = \frac{1}{2} \cdot (v_1 - v_0) \cdot \vec{n}_{v_1}$

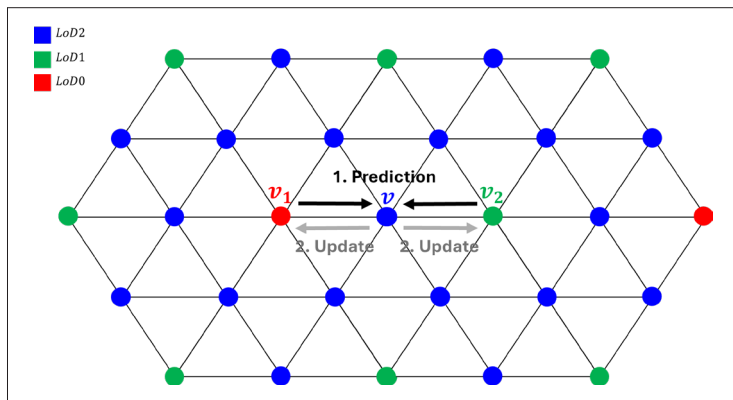
V-DMC의 베이스 메쉬 세분화 과정을 통해 생성되는 세분화된 메쉬는 각 정점이 생성된 세분화 단계에 따라 LoD (Level of Details) 구조를 갖는다. V-DMC의 변위 벡터 리프팅 웨이블릿 변환 과정에서는 <그림 3>과 같이 LoD 단위로 예측과 업데이트 동작을 수행하여 변위 벡터를 저주파 신호와 고주파 신호로 변환한다. 예측 과정에서는 하위 LoD의 변위 벡터를 사용해 상위 LoD의 변위 벡터를 예측하여 고주파 신호를 생성하며, 업데이트 과정

에서는 생성된 고주파 신호로 예측에 사용된 하위 LoD의 변위 벡터 (저주파 신호)를 보상해 주는 동작이 수행된다. 이때, 예측 과정에서 모든 정점에 대해 동일하게 고정된 예측 가중치가 적용됨에 따라 정점별 특성이 반영되지 않을 수 있다는 한계점이 존재한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 변위 벡터 리프팅 변환 과정 간 메쉬 정점의 노말 벡터 정보를 활용하여 예측 및 업데이트를 수행하는 방법을 제안한다. 제안하는 노말 벡터 기반 변위 벡터 리프팅 변환은 식 (2)의 예측 단계와 식 (3)의 업데이트 단계를 통해 수행될 수 있으며, 변환 대상 정점들의 노말 벡터 간 내적 연산을 통해 노말 벡터의 유사도를 측정하고 유사도가 낮은 경우 예측과 업데이트 가중치를 조정하여 변환 과정을 수행한다. 식 (2)와 식 (3)에서 R 은 가중치 조정 파라미터이며, $[0 - 1]$ 범위의 실수 값을 갖는다. 제안하는 방법을 통해 리프팅 변환 간 메쉬 정점의 특성이 고려되어 변위 벡터의 압축 성능이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

$$Signal(v)' = Signal(v) - (w_1 \cdot Signal(v_1) + w_2 \cdot Signal(v_2))$$

$$where w_i = \begin{cases} 0.5 \times R & \text{if } n[v] \cdot n[v_i] \leq 0.5 \\ 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$



<그림 3> V-DMC 변위 벡터 리프팅 웨이블릿 변환 과정

$$\begin{aligned}
Signal(v_1)' &= Signal(v_1) + w_1 \times \left(\frac{1.5}{valence[v_1]} \right) \times (0.75)^{maxLoD-curLoD} \times Signal(v)', \\
Signal(v_2)' &= Signal(v_2) + w_2 \times \left(\frac{1.5}{valence[v_2]} \right) \times (0.75)^{maxLoD-curLoD} \times Signal(v)' \\
\text{where } w_i &= \begin{cases} 1.0 \times \frac{1}{R} & \text{if } n[v] \cdot n[v_i] \leq 0.5 \\ 1.0 & \text{otherwise} \end{cases}
\end{aligned} \tag{3}$$

본 연구의 성능 평가를 위해 V-DMC 참조 소프트웨어 모델 TMM v9.0을 기준으로 제안하는 방법을 구현하여 실험을 진행하였다. 해당 실험은 V-DMC CTC (Common Test Condition)에서 정의하고 있는 AI (All Intra), LD (Low Delay) 환경과 5가지의 목표 비트율 R1 ~ R5 조건에서, 8종류의 동적 메쉬 데이터로 구성된 V-DMC 테스트 시퀀스를 사용하여 진행하였다. 실험 결

과 제안하는 방법은 기존 V-DMC v9.0 anchor 대비 AI 환경에서 point cloud 기반 D1 & D2 PSNR BD-rate가 평균 -1.8%, image 기반 Geom PSNR BD-rate가 평균 -1.5%, LD 환경에서 point cloud 기반 D1 & D2 PSNR BD-rate가 평균 -1.9%, image 기반 Geom PSNR BD-rate가 평균 -0.8%의 향상된 성능을 보임에 따라, 동적 메쉬의 압축 성능이 향상됨을 확인하였다.



김민태

- 2023년 2월 : 광운대학교 컴퓨터정보공학부 학사
- 2025년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2025년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : 3D 데이터 압축, 영상압축, 영상처리