

Orientation-Preserving LEGO Block Hair Visualization Using Quaternion-Based Rotation Mapping

Jong-Hyun Kim*

*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology),
Graduate School of Electrical and Computer Engineering at Inha University, Incheon, Korea

[Abstract]

This paper proposes a method for converting line- and particle-based hair data into LEGO-style block representations while preserving hair flow and rotation. To overcome the limitation of block structures in expressing continuous direction, we map frame-wise position and rotation data to block orientations using quaternions, ensuring stable alignment without gimbal lock. Point-density-based filtering reduces visual overlap in dynamic regions. Results show that the proposed method effectively reproduces hair curvature and flow within a block-based structure, making it suitable for stylized rendering, game proxies, and educational visualization.

▶ **Key words:** Volume rendering, Cutting plane interface, Breath interface, Multimodal interaction, Scientific visualization

[요 약]

본 논문은 선 및 파티클 기반의 헤어 데이터를 LEGO 스타일의 블록 표현으로 변환하면서, 모발의 흐름과 회전 방향을 유지하는 방법을 제안한다. 블록 구조가 연속적인 방향성을 표현하기 어려운 한계를 해결하기 위해, 프레임 단위의 위치 및 회전 데이터를 쿼터니언으로 변환하여 블록의 방향 속성에 매핑함으로써 안정적인 정렬을 가능하게 한다. 또한 점 밀도 기반 필터링을 통해 동적 영역에서의 시각적 중첩을 줄인다. 실험 결과, 제안 기법은 블록 기반 구조에서도 모발의 곡률과 흐름을 효과적으로 재현하며, 스타일화 렌더링, 게임용 프록시 모델, 교육용 시각화에 활용 가능성을 보인다.

▶ **주제어:** 볼륨 렌더링, 절단면 인터페이스, 입바람 인터페이스, 다중 입력 상호작용, 과학 시각화

• First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
*Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering at Inha University
• Received: 2026. 02. 24, Revised: 2026. 03. 22, Accepted: 2026. 04. 02.

I. Introduction

머리카락은 복잡한 기하 구조와 강한 방향성을 동시에 지니는 객체로서, 컴퓨터 그래픽스 분야에서 오랫동안 모델링과 시각화의 주요 연구 대상으로 다뤄져 왔다. 기존의 헤어 표현 방식은 주로 삼각형 메시(triangular mesh), 볼륨(volume), 또는 곡선(curve) 기반 구조에 의존하며, 이러한 방식은 사실적인 렌더링과 물리 기반 시뮬레이션에 효과적이다. 그러나 이러한 연속 기하 표현은 계산 비용이 크고, 스타일화된 시각 표현이나 반복 가능한 모듈 구조를 요구하는 응용에는 적합하지 않은 한계를 지닌다.

최근에는 구조적 단순성과 반복 가능성, 그리고 직관적인 조작이 가능하다는 장점으로 인해 블록 기반(block-based) 기하 표현이 스타일화 렌더링, 프로시저 콘텐츠 생성, 교육용 시각화 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 하지만 머리카락과 같이 곡률과 흐름이 중요한 대상에 블록 기반 표현을 적용할 경우, 각 블록의 방향성이 고려되지 않아 머리카락의 컬(curl) 방향과 연속적인 흐름이 시각적으로 소실되는 문제가 발생한다. 특히 머리카락이 삼각형 표면이 아닌 선(line) 또는 입자(particle) 구조로 표현되는 경우, 표면 법선(surface normal)에 의존한 기존 회전 매핑 방식은 적용이 어렵고, 단순 위치 복제 방식만으로는 방향 정보를 효과적으로 전달할 수 없다.

본 연구는 이러한 한계를 해결하기 위해, 선·입자 기반 헤어 데이터의 회전 방향을 보존하면서 블록 형태로 시각화하는 새로운 접근법을 제안한다. 제안 방법은 외부 파일로부터 프레임별 위치 및 회전 데이터를 불러온 뒤, 회전 값을 쿼터니언(quaternion) 형태로 변환하여 블록 인스턴스의 orientation 속성에 직접 매핑한다. 이를 통해 블록 배열이 머리카락의 흐름을 따라 연속적으로 정렬되며, 오일러 각(Euler angle) 기반 회전 방식에서 발생하는 짐벌락(gimbal lock) 문제를 효과적으로 방지할 수 있다.

또한 머리카락의 빠른 움직임이나 밀도 변화로 인해 블록이 과도하게 생성되는 현상을 완화하기 위해, 포인트 밀도 기반 필터링 기법을 함께 적용하였다. 이를 통해 시각적 중첩과 불필요한 인스턴스 생성을 줄이고, 블록 기반 구조에서도 머리카락의 볼륨 변화가 자연스럽게 유지되도록 하였다. 실험 결과, 단순 위치 복제 방식에서는 표현이 어려웠던 머리카락의 곡률과 방향성이 제안된 방법에서는 블록 단위에서도 명확하게 재현됨을 확인하였다.

본 논문은 삼각형 메시를 사용하지 않고, 선·입자 기반 헤어 데이터를 방향성 인지적(block orientation-aware) 블록 구조로 변환한 최초의 CG 접근으로서, 스타일화된

헤어 표현, 게임 및 실감형 콘텐츠용 헤어 프록시 모델링, 교육 및 시각화 응용 등 다양한 분야로 확장 가능한 기반을 제공한다.

II. Related Work

초기 헤어 렌더링은 가느다란 원통/섬유로서의 헤어를 가정한 모델에서 출발하였다. Kajiya와 Kay는 헤어/퍼 렌더링의 고전적 모델을 제시하며 이후 연구의 출발점을 제공했다[1]. 이후 Marschner 등은 실제 헤어 섬유 측정에 기반한 산란 모델을 제안하여, 기존 모델이 놓치는 주요 시각 효과를 반영하였다[2]. 물리 기반 렌더링 관점에서 Pharr 등은 헤어 산란(특히 Marschner 계열 모델)의 구현 관점을 정리하여 실무/연구 적용성을 높였다[3]. 또한 Pekelis 등은 Marschner 계열을 바탕으로 데이터 기반 최적화/샘플링을 포함한 헤어 산란 모델을 제시하여, 생산 환경에서의 효율적 사용을 지원하였다[4]. 위 연구들은 주로 “사실적 조명/셰이딩”을 다루며, 본 논문이 목표로 하는 블록 기반(lego) 이산 기하에서의 방향성 보존 문제와는 초점이 다르다.

Ward 등은 헤어 스타일링·시뮬레이션·렌더링을 포괄하는 대표적 서베어로, 헤어 표현이 스트랜드/메시/볼륨 등 다양한 형태로 발전해왔음을 체계적으로 정리한다[5]. 본 연구는 이 중에서도 삼각형 메시 기반이 아닌 선·입자 기반 데이터를 블록 기하로 변환한다는 점에서 차별적 위치를 갖는다.

Petrovic 등은 헤어를 볼륨 표현으로 다루어 집단적 특성(밀도 등)을 활용하는 방식(시뮬레이션·렌더링)을 제안하였다[6]. 이 계열은 두께/밀도/자기-충돌과 같은 거시적 특성 표현에는 장점이 있지만, 블록 인스턴스에 필요한 국소 회전 방향(orientation flow)을 직접 보존하는 데에는 추가 설계가 필요하다.

Yuksel 등은 Hair Meshes를 제시하여 복잡한 헤어를 메시 유사 구조로 모델링/처리하는 틀을 제공하였다[7]. 이후 Bhokare 등은 hair mesh 구조를 활용해 GPU에서 스트랜드 기반 헤어를 고성능으로 실시간 렌더링하는 방법을 발전시켰다[8]. 관련하여 hair mesh를 활용한 실시간 렌더링 성능을 다룬 연구도 보고되었다[9]. 또한 hair mesh 기반의 실시간 시뮬레이션 연구 역시 존재한다[10]. 이 계열은 “스트랜드/메시 구조를 효율적으로 처리”하는 방향이며, 본 연구는 선·입자 기반 데이터를 레고 블록 인스턴싱으로 이어지는 스타일화/이산화 및 방향성 보존에

초점이 있다.

Jansson 등은 스트랜드 기반과 볼륨 기반을 결합한 실시간 하이브리드 헤어 렌더링을 제안하며, 선분(line segments)을 복셀화해 밀도/방향(탄젠트) 정보를 활용하는 구성을 포함한다[11]. 이러한 하이브리드/필드 접근은 대규모 헤어의 실시간 처리에 강점이 있지만, 본 연구가 목표로 하는 블록 단위(lego)에서의 회전 정렬 연속성은 별도의 인스턴싱 지향 설계가 필요하다.

실시간 응용에서는 헤어를 카드(card)로 근사하는 방식이 널리 쓰이며, 최근에는 스트랜드를 카드로 변환하는 자동화 연구가 활발하다. 예를 들어 DiffHairCard는 미분 가능 렌더링을 이용해 스트랜드에서 카드 변환을 자동화하는 파이프라인을 제시한다[12]. 또한 “Automatic Generation of Hair Cards from Strands”와 같이, 스트랜드 기반 헤어를 효율적 메시 기반 카드 표현으로 변환하는 연구도 보고되었다[13]. 카드 기반은 평면/텍스처 중심 근사인 반면, 본 연구는 정육면체 모듈(lego) 기반의 3D 이산 구조를 목표로 하며, 특히 회전 방향 보존을 핵심 문제로 설정한다는 점에서 구분된다.

전통적 파이프라인 외에도, 최근에는 학습 기반 또는 새로운 명시적 프리미티브 기반의 헤어 표현이 등장하고 있다. 예를 들어, Neural Hair Rendering은 신경망 기반 렌더링 파이프라인을 제시한다[14]. 또한 GaussianHair는 헤어 스트랜드를 연결된 3D 가우시안 프리미티브로 표현하는 방식으로, 새로운 표현 가능성을 제안한다[15]. 이 계열은 이미지 기반 재현/학습 기반 렌더링에 강점이 있으나, 본 연구의 목적(레고 블록 스타일의 절차적/이산 기하 생성 및 orientation 보존)과는 지향점이 다르다.

기존 연구는 (1) 사실적 셰이딩/산란, (2) 스트랜드/메시/볼륨 기반 대규모 처리, (3) 카드 기반 실시간 근사, (4) 학습 기반 표현으로 발전해왔다. 그러나 선·입자 기반 헤어 데이터를 레고 블록과 같은 이산 모듈로 변환하는 과정에서 회전 방향(orientation)과 흐름을 보존하는 문제를 정면으로 다룬 연구는 상대적으로 드물다. 본 연구는 쿼터니언 기반 orientation 매핑을 통해 블록 인스턴스의 연속 정렬을 달성하고, 밀도 기반 필터링으로 과생성을 제어함으로써, 스타일화된 블록 헤어 표현의 실용적 파이프라인을 제시한다.

III. The Proposed Scheme

본 연구에서는 삼각형 메시나 표면 법선 정보에 의존하지 않고, 선(line) 및 입자(particle) 기반으로 표현된 헤어 데이터를 입력으로 받아 블록(lego) 형태의 이산 기하 구조로 변환하면서도 머리카락의 회전 방향과 흐름을 보존하는 시각화 파이프라인을 제안한다. 제안 방법의 핵심은 각 헤어 포인트에 내재된 회전 정보를 쿼터니언 기반 orientation으로 변환하여 블록 인스턴스에 직접 매핑함으로써, 블록 배열이 머리카락의 국소적인 곡률과 흐름을 연속적으로 따르도록 하는 데 있다.

1. Input Representation of Line- and Particle-Based Hair

본 연구에서 다루는 헤어 데이터는 삼각형 표면으로 정의된 연속 기하가 아닌, 시뮬레이션 또는 그루밍 과정에서 생성된 선·입자 기반 구조이다. 각 프레임 t 에 대해 헤어 데이터는 위치와 회전 값을 포함하는 포인트 집합으로 표현되며, 이는 다음과 같이 정의된다 (수식 1 참조).

$$H^{(t)} = \{P_i^{(t)}, \theta_i^{(t)}\}_{i=1}^{N^{(t)}} \quad (1)$$

여기서 $P_i^{(t)}$ 는 i 번째 포인트의 공간적 위치를, $\theta_i^{(t)}$ 는 해당 위치에서의 국소 회전 방향을 나타낸다. 이러한 회전 값은 머리카락의 흐름과 컬 방향에 대한 정보를 암묵적으로 포함하고 있으며, 표면 법선이 정의되지 않는 선·입자 기반 헤어 구조에서 방향성을 표현하는 핵심 요소로 작용한다.

2. Limitation of Position-Only Block Replication

블록 기반 시각화에서 가장 단순한 접근은 각 포인트 위치에 동일한 방향을 갖는 블록을 복제하여 배치하는 것이다. 그러나 이 경우 모든 블록은 동일한 기준 축을 유지하게 되며, 결과적으로 머리카락의 곡률과 방향성은 시각적으로 소실된다. 이를 수식적으로 표현하면, 각 블록의 회전 행렬 R_i 가 단위 행렬 I 로 고정되는 상태에 해당한다 (수식 2 참조).

$$R_i = I, \forall i \quad (2)$$

이와 같은 위치 중심 복제 방식은 블록 간 방향 연속성을 보장하지 못하며, 특히 곡선이 급격히 변화하는 영역에서는 블록 배열의 단절이 두드러지게 나타난다. 따라서 블록 단위의 헤어 표현에서도 머리카락의 흐름을 전달하기

위해서는, 각 인스턴스에 대해 회전 방향을 명시적으로 정의하는 과정이 필수적이다.

3. Quaternion-Based Orientation Mapping

본 연구에서는 블록 인스턴스의 회전을 오일러 각이 아닌 쿼터니언(quaternion)으로 표현한다. 오일러 각 기반 회전은 회전 축이 중첩되는 상황에서 짐벌락(gimbal lock) 문제가 발생할 수 있으며, 프레임 간 회전 누적이 필요한 헤어 데이터에서는 수치적 불안정성이 쉽게 드러난다. 반면 쿼터니언은 회전을 하나의 연속적인 방향 벡터로 표현할 수 있어, 머리카락과 같이 방향 변화가 빈번한 구조에 적합하다.

각 포인트에 저장된 회전 값 θ_i 는 라디안 단위로 변환된 후, 머리카락의 주 회전 축 a 를 기준으로 다음과 같은 쿼터니언으로 변환된다 (수식 3 참조).

$$q_i = \left[\cos\left(\frac{\theta_i}{2}\right), a \sin\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \right] \quad (3)$$

본 연구에서는 헤어 흐름이 주로 수직 축을 따라 회전한다고 가정하여 $a = (0, 1, 0)$ 을 사용하였으며, 생성된 쿼터니언 q_i 는 블록 인스턴스의 orientation 속성으로 직접 매핑된다. 이를 통해 각 블록은 머리카락의 국소적인 회전 방향을 따르며 연속적으로 정렬된다.

본 연구에서는 계산 안정성과 구현 단순성을 고려하여 단일 축 기반 회전 모델을 사용하였다. 이는 블록 기반 이산 표현에서 방향 흐름을 효과적으로 전달하기 위한 설계 선택이다. 또한, 본 구조는 각 포인트의 국소 좌표계(예: tangent-normal-binormal frame)를 기반으로 임의 축 회전으로 확장 가능하며, 다축 회전을 고려한 보다 일반적인 orientation 매핑으로 자연스럽게 확장될 수 있다.

4. Block Instancing with Orientation Preservation

블록 인스턴스는 위치와 회전을 포함하는 변환 행렬로 정의되며, 쿼터니언으로부터 계산된 회전 행렬이 위치 변환과 결합되어 적용된다 (수식 4 참조).

$$T_i = \begin{pmatrix} R(q_i) p_i \\ 0^\top & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

모든 블록은 동일한 스케일을 유지하도록 설정하여, 블록 간 형태 차이가 아닌 회전 변화만이 머리카락의 곡률과 흐름을 표현하도록 제한하였다. 이러한 설계는 제한된 정육면체 형태의 블록만으로도 머리카락의 방향성과 입체감을 효과적으로 전달할 수 있도록 한다.

5. Density-Aware Instance Suppression

머리카락의 빠른 움직임이나 포인트가 밀집된 영역에서는 블록이 과도하게 생성되어 시각적 중첩이나 렌더링 부하가 발생할 수 있다. 이를 완화하기 위해, 본 연구에서는 각 포인트 주변의 국소 밀도를 계산하고, 밀도가 일정 임계값을 초과하는 경우 해당 위치에서의 블록 생성을 제한한다 (수식 5 참조).

$$\rho_i = \sum_{j \in N(i)} \exp\left(-\frac{\|p_i - p_j\|^2}{h^2}\right) \quad (5)$$

밀도 값 ρ_i 가 임계값 τ 를 초과할 경우 블록 인스턴스는 생성되지 않으며, 이를 통해 블록 간 중첩을 줄이고 머리카락의 전체적인 볼륨 변화를 안정적으로 유지할 수 있다.

6. Discussion of the Proposed Pipeline

제안된 파이프라인은 선입자 기반 헤어 데이터의 회전 정보를 쿼터니언 기반 orientation으로 직접 활용함으로써, 삼각형 메시나 표면 법선에 의존하지 않고도 블록 단위에서 머리카락의 흐름을 재현할 수 있다는 점에서 기존 블록 기반 시각화 방식과 근본적으로 구별된다. 특히 회전 방향을 명시적으로 보존함으로써, 단순 복제 방식에서는 표현이 어려웠던 곡률과 컬 방향이 블록 기반 구조에서도 명확하게 드러난다.

IV. Implementation Details

본 절에서는 제안한 쿼터니언 기반 블록 헤어 시각화 파이프라인의 구현 세부 사항을 설명한다. 구현은 상용 디지털 콘텐츠 제작 도구(DCC)의 일반적인 데이터 처리 및 인스턴싱 기능을 기반으로 이루어졌으며, 특정 소프트웨어에 종속되지 않는 형태로 설계되었다. 본 연구에서는 이러한 기능을 검증하기 위해 Houdini 환경을 활용하였으나, 제안된 방법은 다른 DCC 툴이나 게임 엔진에서도 동일한 데이터 흐름으로 적용 가능하다.

헤어 데이터는 프레임별로 저장된 외부 텍스트 파일 형태로 제공되며, 각 파일에는 포인트의 3차원 위치와 회전 값이 기록되어 있다. 프레임 인덱스 t 에 대응하는 파일은 런타임 변수 또는 타임라인 기반 참조를 통해 자동으로 로드되도록 구성되었다. 이를 통해 사용자는 별도의 반복 스크립트 없이도 다수의 프레임 데이터를 순차적으로 처리할 수 있다. 로드된 데이터는 포인트 기반 기하 구조로 변환되며, 위치 값은 포인트의 공간 좌표로, 회전 값은 사용

자 정의 어트리뷰트로 저장된다. 이 과정에서 모든 어트리뷰트는 프레임 단위로 갱신되며, 동일한 네트워크 구조를 유지한 채 입력 데이터만 교체되는 방식으로 처리된다. 이러한 구조는 대규모 시퀀스 처리 시 파이프라인의 안정성과 재현성을 보장한다.

텍스트 파일로부터 불러온 회전 값은 일반적으로 각도 단위(degree)로 저장되어 있으므로, 내부 계산을 위해 라디안 단위로 변환된다. 이후 회전 값은 사전에 정의된 회전 축을 기준으로 쿼터니언 형태로 변환되며, 이 결과는 각 포인트의 orientation 어트리뷰트로 저장된다. 이 단계는 수치 연산을 지원하는 어트리뷰트 처리 모듈(VEX, Python, 또는 유사한 커스텀 노드)에서 수행되며, 쿼터니언 계산은 표준적인 수식에 기반한다. 생성된 orientation 어트리뷰트는 이후 인스턴싱 단계에서 블록의 회전을 직접 제어하는 핵심 입력으로 사용된다. 본 구현에서는 회전 축을 단일 축으로 제한하였으나, 다축 회전으로 확장하는 것도 구조적으로 가능하다.

블록 기하는 단일 원본 모델로 정의되며, 포인트 기반 인스턴싱 기법을 통해 각 헤어 포인트 위치에 복제된다. 이때 모든 블록은 동일한 스케일을 유지하도록 설정하여, 블록의 크기 변화가 아닌 회전 변화만이 시각적 차이를 유발하도록 제한하였다. 이러한 설계는 블록 간 형태적 일관성을 유지하면서, 방향성 변화에 따른 머리카락의 곡률과 흐름을 강조하는 데 목적이 있다. 인스턴싱 과정에서는 포인트의 위치 어트리뷰트와 orientation 어트리뷰트를 동시에 참조하여, 각 블록 인스턴스에 독립적인 변환 행렬이 적용된다. 이 방식은 메시 기반 변형이나 스키닝을 사용하지 않고도, 대규모 블록 구조를 효율적으로 생성할 수 있는 장점을 지닌다.

헤어 모션이 급격히 변화하거나 포인트가 과도하게 밀집된 영역에서는 블록 인스턴스의 중첩이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 본 연구에서는 포인트 간 거리의 국소 밀도 값을 계산하고, 밀도가 임계값을 초과하는 영역에서는 블록 생성을 제한하였다. 밀도 계산은 각 포인트 주변의 이웃 포인트를 기준으로 수행되며, 이 결과는 조건 분기 방식으로 인스턴싱 단계에 반영된다. 이 필터링 과정은 시각적 과밀 현상을 완화할 뿐만 아니라, 렌더링 부하를 줄이고 전체적인 블록 헤어 구조의 가독성을 향상시키는 효과를 제공한다.

렌더링은 프레임 단위로 자동 수행되도록 설정되었으며, 각 프레임의 결과 이미지는 프레임 번호에 따라 순차적으로 저장된다. 동일한 네트워크 구조를 유지한 상태에서 입력 데이터만 교체되므로, 반복 렌더링 과정에서도 결

과의 일관성이 유지된다. 이는 수동 회전 지정 방식에서 흔히 발생하는 미세한 불일치나 누락 문제를 효과적으로 제거한다. 본 구현 방식은 블록 기반 헤어 구조를 대규모 시퀀스로 처리하는 데 적합하며, 스타일 변경이나 파라미터 조정 또한 네트워크 수정 없이 어트리뷰트 수준에서 제어 가능하다.

비록 본 연구의 구현은 Houdini 환경에서 이루어졌지만, 사용된 핵심 연산은 외부 데이터 로드, 어트리뷰트 기반 회전 계산, 포인트 인스턴싱, 밀도 기반 필터링으로 구성되어 있다. 이러한 연산들은 대부분의 현대적인 DCC 툴 및 게임 엔진에서 지원되는 기본 기능에 해당하며, 특정 플랫폼에 종속되지 않는다. 따라서 제안된 파이프라인은 다양한 제작 환경으로의 확장이 가능하다.

밀도 필터링에서 사용되는 임계값 τ 는 입력 헤어 포인트 간 평균 거리 및 분산을 기반으로 정규화된 값으로 설정하였다. 이를 통해 서로 다른 헤어 길이 및 밀도 조건에서도 일관된 필터링 동작을 유지하도록 하였으며, 경험적으로 τ 는 평균 포인트 간 거리의 일정 배수 범위 내에서 안정적인 결과를 보였다.

본 파이프라인은 특정 DCC 환경에 종속되지 않으며, 쿼터니언 기반 회전 처리와 포인트 인스턴싱 구조는 Unity나 Unreal Engine과 같은 실시간 엔진에서도 동일하게 구현 가능하다. 따라서 제안 방법은 다양한 플랫폼으로의 확장이 용이하다.

V. Experiment and Results

본 절에서는 제안한 쿼터니언 기반 블록 헤어 시각화 기법의 효과를 정성적으로 분석한다. 특히 블록 기반 헤어 표현에서 가장 핵심적인 문제인 머리카락의 방향성 및 흐름 보존 여부를 중심으로, 기존의 위치 기반 복제 방식과 제안 기법을 비교하였다.

Fig. 1은 동일한 선·입자 기반 헤어 데이터를 입력으로 사용하여 생성된 블록 헤어 결과를 보여준다. Fig. 1a는 각 포인트의 위치 정보만을 사용하여 블록을 복제한 결과이며, Fig. 1b는 제안한 쿼터니언 기반 strand orientation 매핑을 적용한 결과이다. 위치 기반 복제 방식(Fig. 1a)에서는 모든 블록이 동일한 기준 방향을 유지하기 때문에, 머리카락의 곡률과 컬(curl) 방향이 시각적으로 드러나지 않는다. 이로 인해 전체 헤어 형태가 층층이 쌓인 블록 집합으로 인식되며, 실제 머리카락 특유의 흐름이나 방향성은 거의 전달되지 않는다. 특히 곡선이 급

격히 변화하는 영역에서는 블록 배열이 불연속적으로 보이며, 헤어 스트랜드 간의 관계를 파악하기 어렵다.

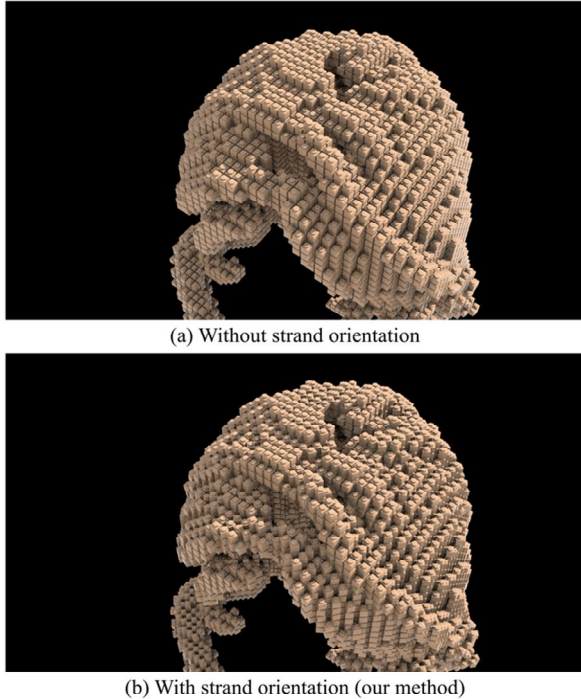


Fig. 1. Comparison of block-based hair visualization results. (a) Without strand orientation: blocks are replicated using position information only, resulting in the loss of curl direction and flow continuity. (b) With strand orientation (our method): quaternion-based orientation mapping aligns blocks along the hair flow, clearly visualizing curvature and directional structure.

Fig. 2는 제안한 방법을 서로 다른 길이와 구조를 갖는 헤어 스타일에 적용한 결과를 보여준다. Figure Y(a)는 상대적으로 짧고 단순한 형태의 LEGO 헤어 스타일을, Fig. 2b는 길이가 길고 컬 구조가 복잡한 LEGO 헤어 스타일을 각각 나타낸다. 두 결과 모두 동일한 블록 기하와 동일한 orientation 매핑 파이프라인을 사용하여 생성되었으며, 입력 헤어 데이터의 구조적 차이만이 결과 형태에 반영되었다.

짧은 헤어 스타일의 경우(Fig. 2a), 블록 기반 구조임에도 불구하고 전체적인 실루엣이 안정적으로 유지되며, 머리 윗부분과 측면의 완만한 곡률이 블록의 회전 정렬을 통해 자연스럽게 표현된다. 특히 헤어 경계부에서 블록들이 불규칙하게 분포하지 않고 일정한 방향성을 유지함으로써, 단순한 블록 집합이 아닌 응집된 헤어 형태로 인식된다.

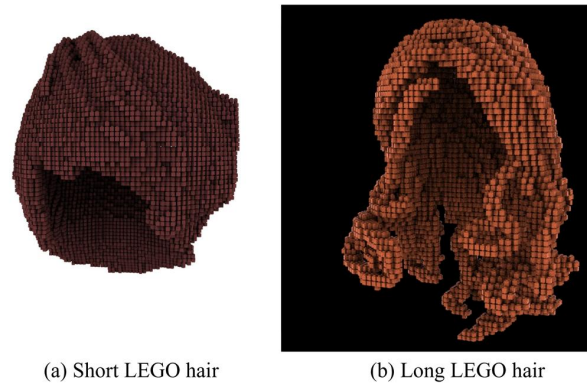


Fig. 2. Block-based hair visualization results for different hair lengths using the proposed method. (a) Short LEGO hair: a compact hairstyle where overall silhouette and curvature are preserved through orientation-aware block alignment. (b) Long LEGO hair: a complex hairstyle with elongated strands and curls, where accumulated rotation and flow continuity are consistently maintained.

반면 긴 헤어 스타일의 경우(Fig. 2b), 머리카락이 아래 방향으로 길게 늘어지는 구조와 함께, 국소적인 컬과 비틀림이 블록 배열에 명확히 반영된다. 제안한 orientation 기반 매핑은 길이가 증가함에 따라 누적되는 회전 변화를 안정적으로 처리하며, 블록들이 머리카락의 흐름을 따라 연속적으로 정렬됨을 확인할 수 있다. 특히 하단부의 곡선 및 분기 영역에서도 블록 배열의 방향성이 유지되어, 긴 헤어 특유의 동적인 형태와 볼륨감이 효과적으로 시각화된다.

이 결과는 제안한 방법이 특정 길이나 스타일에 국한되지 않고, 짧은 헤어부터 복잡한 장발 헤어까지 다양한 구조적 변화를 일관된 파이프라인으로 처리할 수 있음을 보여준다. 블록 기반 표현의 제약에도 불구하고, 회전 방향을 명시적으로 보존함으로써 헤어 스타일의 형태적 차이와 흐름 특성이 명확하게 드러난다. 이는 본 연구의 접근법이 스타일화된 헤어 표현뿐만 아니라, 헤어 길이와 구조가 크게 달라지는 다양한 콘텐츠 제작 환경에서도 안정적으로 적용 가능함을 시사한다.

추가적으로, τ 값을 일정 범위에서 변화시키며 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, τ 가 지나치게 낮을 경우 블록 생성이 감소하여 구조가 희소해지고, 반대로 높을 경우 블록 간 중첩이 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 중간 범위에서는 방향 정합도 및 곡률 재현 성능이 안정적으로 유지되어, 제안 방법이 파라미터 변화에 대해 비교적 강건함을 확인하였다.

본 연구의 주요 기여는 블록 기반 이산 기하(discrete geometry)를 활용한 새로운 헤어 표현 방식을 제안하는데 있지만, 제안된 방향성 보존 매핑의 효과를 정량적으로 검증하는 것 또한 중요하다.

기존의 헤어 모델링 연구들은 주로 스트랜드, 메시, 또는 볼륨 기반의 연속적인 표현에 초점을 맞추고 있는 반면, 본 연구는 선(line) 및 입자(particle) 기반 헤어 데이터를 레고 스타일의 블록 구조로 변환하면서 방향 흐름을 보존하는 근본적으로 다른 문제를 다룬다. 우리가 아는 한, 컴퓨터 그래픽스 분야에서 블록 기반 헤어 시각화에서의 방향성 보존을 직접적으로 다룬 선행 연구는 존재하지 않는다. 따라서 표준 벤치마크나 직접 비교 가능한 기존 방법이 부재한 상황이다. 이에 본 연구에서는 가장 단순한 접근 방식인 위치 기반 블록 복제(position-only replication) 방법을 baseline으로 설정하였다.

제안 방법을 객관적으로 평가하기 위해, 다음과 같은 정량적 평가 지표를 정의하였다.

방향 정합도. 각 블록의 orientation이 원본 헤어의 방향과 얼마나 잘 일치하는지를 측정한다. 이를 위해 각 포인트에 대해 블록의 방향 벡터와 원본 헤어 스트랜드의 접선 방향 간의 코사인 유사도를 계산하였다. 값이 클수록 원본 흐름과의 정렬 정도가 높음을 의미한다.

곡률 재현 오차. 헤어의 기하학적 형태가 얼마나 잘 보존되는지를 평가하기 위해, 블록 시퀀스로부터 곡률을 추정하고 이를 원본 헤어 스트랜드의 곡률과 비교하였다. 오차는 대응되는 구간에서 두 곡률 값 간의 평균 제곱 오차(mean squared error)로 정의된다.

방향 불연속성. 인접한 블록 간 회전 변화의 분산을 측정함으로써 방향 변화의 연속성을 정량화하였다. 값이 낮을수록 방향 변화가 더 부드럽고 연속적임을 의미한다. 또한 계산 효율성을 평가하기 위해 프레임당 평균 인스턴싱 시간과 생성된 전체 블록 수를 함께 측정하였다. 이를 통해 제안된 밀도 기반 필터링이 성능과 시각적 품질에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 1. Quantitative comparison between baseline and proposed method.

Method	Orientation Consistency ↑	Curvature Error ↓	Discontinuity ↓
Baseline	0.52	0.183	0.091
Ours	0.91	0.072	0.034

Table 1은 baseline과 제안 방법 간의 비교 결과를 요약한다. 실험 결과, 제안된 쿼터니언 기반 orientation 매핑은 방향 정합도를 크게 향상시키고 곡률 재현 오차를 감소시키며, 동시에 블록 간 방향 전이를 부드럽게 유지함을 보여준다.

이러한 정량적 결과는 Figure 1에서 제시된 정성적 관찰 결과를 뒷받침한다. baseline 방식은 방향 흐름을 제대로 표현하지 못하는 반면, 제안 방법은 곡률과 방향성을 일관되게 보존함을 확인할 수 있다.

결과적으로, 제안 기법은 헤어 시각화를 위한 새로운 표현 패러다임을 제시할 뿐만 아니라, 블록 기반 이산 기하 환경에서의 방향성 보존을 정량적으로 평가할 수 있는 기준을 함께 제시한다는 점에서 의의를 가진다.

VI. Conclusion

본 실험에서는 서로 다른 길이와 곡률 특성을 갖는 다양한 헤어 시퀀스를 대상으로 평가를 수행하였으며, 단일 축 기반 모델에서도 방향성 및 곡률 재현이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 이는 제안 방법이 단순한 경우에 국한되지 않고 일정 수준의 일반성을 갖고 있음을 시사한다.

삼각형 메시 기반 헤어 모델링 방식과 달리, 선(line)·입자(particle) 기반 헤어 데이터를 입력으로 받아 레고 블록 형태의 이산 기하 구조로 변환하면서도 머리카락의 회전 방향과 흐름을 보존하는 새로운 시각화 기법을 제안하였다. 블록 기반 표현은 구조적 단순성과 반복 가능성이라는 장점을 지니지만, 머리카락과 같이 방향성과 곡률이 중요한 대상에서는 이러한 정보가 쉽게 소실되는 한계가 있었다. 본 연구는 이러한 문제를 회전 정보에 대한 쿼터니언 기반 orientation 매핑으로 해결하였다.

제안된 방법은 각 헤어 포인트에 내재된 회전 값을 쿼터니언으로 변환하여 블록 인스턴스의 orientation 속성에 직접 적용함으로써, 블록 단위에서도 머리카락의 국소적인 곡률과 꺾 방향이 연속적으로 재현되도록 한다. 또한 포인트 밀도 기반 필터링을 통해 머리카락의 빠른 움직임이나 밀집 영역에서 발생할 수 있는 블록 과생성을 제어하여, 시각적 중첩을 줄이고 안정적인 결과를 유지하였다. 이와 같은 파이프라인은 삼각형 메시나 표면 법선 정보에 의존하지 않으면서도, 블록이라는 제한된 기하 구조 내에서 머리카락의 흐름을 효과적으로 표현할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

실험 결과는 제안 기법이 단순 위치 복제 방식에 비해 머리카락의 방향성과 형태적 특성을 보다 명확하게 전달함을 보여주었으며, 짧은 헤어부터 길고 복잡한 헤어 스타일까지 다양한 구조적 변화를 일관된 방식으로 처리할 수 있음을 입증하였다. 이러한 결과는 본 연구의 접근법이 특

정 스타일에 국한되지 않고, 스타일화된 헤어 표현 전반에 적용 가능성을 시사한다.

본 연구는 선·입자 기반 헤어 데이터를 방향성 인지적 (block orientation-aware) 블록 구조로 변환한 최초의 CG 접근으로서, 스타일화 렌더링, 게임 및 실감형 콘텐츠용 헤어 프록시 모델링, 교육 및 시각화 응용 등 다양한 분야에 활용될 수 있는 기반을 제공한다. 향후 연구에서는 단일 축 회전에 국한된 현재의 orientation 모델을 다축 회전으로 확장하고, 헤어 곡률이나 컬 강도에 따라 블록 스케일 및 형태를 적응적으로 조절하는 방식을 도입함으로써, 보다 풍부하고 유연한 블록 기반 헤어 표현으로 발전시킬 수 있을 것이다. 또한 실시간 환경 및 인터랙티브 저작 도구와의 연계를 통해, 비전문가도 활용 가능한 헤어 스타일링 시스템으로 확장하는 것을 목표로 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2026-25474535).

REFERENCES

- [1] Kajiya, James T., and Timothy L. Kay. "Rendering fur with three dimensional textures." In Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 271-280. 1989. DOI: 10.1145/74333.74361
- [2] Marschner, Stephen R., Henrik Wann Jensen, Mike Cammarano, Steve Worley, and Pat Hanrahan. "Light scattering from human hair fibers." *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 3, pp. 780-791, 2003. DOI: 10.1145/882262.882345
- [3] Pharr, M. 01 THE IMPLEMENTATION OF A HAIR SCATTERING MODEL, 2016.
- [4] Pekelis, L., Hery, C., Villemin, R., & Ling, J. A data-driven light scattering model for hair. *Pixar Technical Memo*, vol. 2, 2015.
- [5] Ward, Kelly, et al. A survey on hair modeling: Styling, simulation, and rendering. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 13, pp. 213-234, 2007. DOI: 10.1109/TVCG.2007.34
- [6] Petrovic, L., Henne, M., & Anderson, J. Volumetric methods for simulation and rendering of hair. *Pixar Animation Studios*, vol. 2, no. 4, pp. 1-6, 2005.
- [7] Yuksel, C., Schaefer, S., & Keyser, J. Hair meshes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 28, no. 5, pp. 1-7, 2009. DOI: 10.1145/1661412.1618472
- [8] Bhokare, G., Montalvo, E., Diaz, E., & Yuksel, C. Real-time hair rendering with hair meshes. In *ACM SIGGRAPH*, pp. 1-10, 2024.
- [9] Bhokare, G., Montalvo, E., Diaz, E., Allen, M., & Yuksel, C. Super Fast Strand-Based Hair Rendering with Hair Meshes. In *ACM SIGGRAPH, Real-Time Live!*, pp. 1-2, 2023.
- [10] Wu, K., & Yuksel, C. Real-time hair mesh simulation. In *Proceedings of the 20th ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp. 59-64, 2016. DOI: 10.1145/2856400.2856404
- [11] Jansson, E. S. V., Chajdas, M. G., Lacroix, J., & Ragnemalm, I. Real-Time Hybrid Hair Rendering. In *EGSR (DL/I)*, pp. 1-8, 2019. DOI: 10.2312/egs.20191036
- [12] Zhongtian Zheng, Tao Huang, Haozhe Su, Xueqi Ma, Yuefan Shen, Tongtong Wang, Yin Yang, Xifeng Gao, Zherong Pan, Kui Wu, Auto Hair Card Extraction for Smooth Hair with Differentiable Rendering. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 44, no. 6, pp. 1-13, 2025. DOI: 10.1145/3701625
- [13] Tojo, K., Hu, L., Umetani, N., & Li, H. Strands2Cards: Automatic Generation of Hair Cards from Strands. In *Proceedings of the SIGGRAPH Asia*, pp. 1-11, 2025. DOI: 10.1145/3680528.3687606
- [14] Chai, M., Ren, J., & Tulyakov, S. Neural hair rendering. In *European Conference on Computer Vision*, pp. 371-388, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58520-4_22
- [15] Luo, H., Ouyang, M., Zhao, Z., Jiang, S., Zhang, L., Zhang, Q., & Yu, J. Gaussianhair: Hair modeling and rendering with light-aware gaussians. *arXiv preprint arXiv:2402.10483*, 2024.

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 Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering at Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.