

멀티뷰 스케치를 이용한 MAT 기반의 삼차원 형상 복원과 애니메이션 (MAT-Based 3D Shape Reconstruction and Animation Using Multi-View Sketches)

윤혜정[†] 이승용^{**}
(Hyejeong Yoon) (Seungyong Lee)

요약 캐릭터 스케치로부터 애니메이션을 제작하는 것은 흥미롭지만 도전적인 과제이다. 기존 연구들은 스케치로부터 정적인 형상을 복원하거나 애니메이션을 제작하였으나, 형상 또는 모션에 대한 사용자의 컨트롤이 어려워 캐릭터 디자인에 적합하지 않다는 한계가 있다. 본 연구에서는 멀티뷰 이미지 및 스켈레톤을 입력받아 삼차원 형상을 복원하고 애니메이션을 제작하는 프레임워크를 제안한다. MAT (Medial Axis Transform) 표현을 사용하여 역렌더링 방법으로 초기 스켈레톤의 구조를 보존하면서 형상을 복원한다. 또한, MAT의 특성을 활용한 거리 변환 형식의 렌더링과 스케치 형식의 렌더링 방법을 제시한다. 마지막으로, 형상의 스켈레톤을 이용한 기존 애니메이션 적용과 새로운 애니메이션 생성 방법을 제시한다. 실험을 통해, 본 논문에서 제시하는 방법을 이용해 쉽고 빠르게 캐릭터 스케치의 삼차원 모델 및 애니메이션 프로토타입을 제작할 수 있음을 보인다.

키워드: 삼차원 형상 복원, 스케치, 스켈레톤, 캐릭터, 애니메이션

Abstract Animating characters from sketches is an interesting but challenging task. Existing studies have proposed shape reconstruction methods or animating methods from sketches. However, they are not suitable for character design due to the lack of user controllability. In this paper, we propose a framework for reconstructing 3D shapes and creating animations from multi-view images and skeletons. Using Medial Axis Transform (MAT) representation, the shape can be reconstructed using an inverse rendering method while preserving the structure of the initial skeleton. In addition, we propose novel distance-transform style rendering and sketch style rendering methods using characteristics of MAT. Finally, we present methods for animation transfer and animation creation. Experimental results demonstrate that our framework can easily and quickly create 3D models and animation prototypes from character sketches.

Keywords: 3D shape reconstruction, sketch, skeleton, character, animation

· 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2023-00280400)을 받아 수행된 연구입니다.

· 이 논문은 2024 한국컴퓨터종합학술대회에서 '멀티뷰 스케치로부터 MAT 기반의 애니메이션 가능한 삼차원 형상 복원'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 비회원 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 학생
hjyoon02@postech.ac.kr

^{**} 종신회원 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수(POSTECH)
leesy@postech.ac.kr
(Corresponding author)

논문접수 : 2024년 8월 27일

(Received 27 August 2024)

논문수정 : 2025년 1월 18일

(Revised 18 January 2025)

심사완료 : 2025년 1월 24일

(Accepted 24 January 2025)

Copyright©2025 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
정보과학회 컴퓨팅의 실제 논문지 제31권 제4호(2025. 4)

1. 서론

캐릭터 그림에 생명을 불어넣어 움직이게 하는 것은 모든 아티스트에게 흥미로운 일이다. 최근 메타버스 및 개인 콘텐츠 시장의 확장에 따라 버추얼 아바타 등의 이차원 캐릭터 그림을 움직여 애니메이션을 만드는 작업에 대한 대중적인 흥미와 수요가 늘어나고 있다. 하지만 일반적으로 애니메이션 제작은 전문성 및 기술력, 노동력을 많이 요구한다.

모델링 또는 애니메이션 제작 과정을 간소화 및 자동화하기 위한 연구들은 스케치 입력을 기반으로 형상을 복원하거나 애니메이션을 제작한다. 형상 복원의 경우, 제한적인 정보를 담고 있는 스케치의 특성과 일관성이 부족한 멀티뷰 입력의 특성 때문에 형상이 의도대로 복원되지 않는 경우가 많다. 또한, 정적인 형상 복원을 목표로 수행되어 애니메이션 제작에 부적합하다. 한편, 스케치를 이용해 애니메이션을 제작하는 연구들은 단일 스케치를 입력으로 받기 때문에 옆모습 등 다른 뷰에서의 모습을 제어할 수 없다는 한계가 있다.

본 논문에서 제안하는 프레임워크는 멀티뷰 스케치로부터 삼차원 형상 복원 및 애니메이션 제작을 동시에 지원한다. 캐릭터 디자인에 일반적으로 사용되는 4가지 뷰의 스케치를 입력으로 받으며, 애니메이션 적용에 적합하도록 간단한 2D 스켈레톤 입력을 추가로 활용한다. 복원된 형상은 스켈레톤을 활용해 애니메이션을 적용 또는 생성할 수 있다. 제안하는 프레임워크는 스케치로부터 애니메이션 제작까지의 과정을 최소한의 사용자 입력만을 활용해 자동화하므로, 2D 아티스트는 캐릭터 디자인 과정에서 삼차원의 시각적 가이드를 제시하는 프로토타이핑 툴로써 본 프레임워크를 활용할 수 있다.

본 연구에서는 애니메이션 가능한 삼차원 형상의 복원을 위해 MAT 표현을 사용한다. MAT (Medial Axis Transform)는 스켈레톤의 각 점에 표면까지의 거리를 저장하는 표현이다[1]. MAT의 스켈레톤은 바깥 방향으로 팽창시켜 본래의 형상을 재구성할 수 있어 입력 스켈레톤을 보존하면서 형상을 최적화할 수 있다. 또한, MAT의 형상은 기본 도형들의 합으로 근사 가능하므로 형상 최적화를 위한 미분 가능한 거리 변환 형식의 렌더링과 시각화를 위한 스케치 형식의 렌더링을 쉽게 구현할 수 있다. 마지막으로, 스켈레톤의 포즈가 변형되었을 때 대응되는 MAT 형상을 재구성할 수 있기 때문에 직관적인 애니메이션 제작 파이프라인을 구축할 수 있다.

2. 관련 연구

멀티뷰 스케치로부터 삼차원 형상을 복원하는 연구들

은 주로 정적인 형상을 복원한다. 과거에는 삼차원 팽창(inflation) 알고리즘을 이용해 스케치로부터 삼차원 모델링을 하는 연구들이 주를 이루었다[2,3]. 한편, 최근의 딥러닝을 이용한 연구들은 멀티뷰 이차원 스케치 이미지로부터 모델링 과정 없이 삼차원 형상을 복원한다. 스케치를 잠재 코드로 인코딩한 후 복셀 점유율[4]이나 노멀 맵과 깊이 맵[5]으로 디코딩하는 방법이 있고, 최근에는 대형 삼차원 데이터셋을 이용해 훈련한 삼차원 에셋 생성 모델[6]도 등장하였다. 하지만 기존 방법들은 합성 데이터로 훈련되어 사람이 그린 부정확한 스케치에 대해 실패하는 경향을 보인다. 또한, 복원된 형상에서 팔과 몸통과 같이 분리되어야 할 파트가 붙어있는 등(그림 7(b)) 일부 파트의 연결 정보가 사용자의 의도와 다르게 복원된다. 따라서 결과 형상이 애니메이션 제작에 적합하지 않다.

스케치로부터 애니메이션을 제작하는 연구들은 스케치의 이차원 변형 또는 복원된 형상의 삼차원 변형으로 애니메이션을 제작한다. Animated Drawings[7]는 아이들이 그린 그림에 이차원 ARAP 변형을 적용하여 애니메이션을 만든다. 이처럼 이차원의 변형만을 활용하는 연구는 다른 시점의 모습을 예측할 수 없다는 한계가 있다(그림 10). 한편, Monster Mash[8]는 스케치를 팽창(inflation)하여 삼차원 형상을 복원한 후 컨트롤 포인트를 이용한 모션 제작 파이프라인을 제시한다. 손쉬운 모션 제작을 지원하지만, 옆면 드로잉 하나만으로 형상을 복원하기 때문에 만들 수 있는 형상의 종류가 한정적이다. 애니메이션 제작 연구들은 주로 한 장의 스케치만을 이용해 정해진 모션의 애니메이션을 만들기 때문에, 캐릭터 디자인 시 사용자가 형상 및 모션을 제어하기 어렵다.

3. MAT 표현

MAT (Medial Axis Transform)는 형상의 표현 방식 중 하나로, 형상의 중심에 있는 스켈레톤과 스켈레톤 위의 각 점에서 표면과 내접하는 구의 반경 함수로 정의된다[1]. 삼차원 상의 닫힌 표면은 정보의 손실 없이 MAT로 변환 가능하며, 반대로 MAT로부터 삼차원의 형상이 유일하게 결정된다. 이러한 특성을 이용해 과거에는 메시지를 표현하는 MAT[9] 또는 스켈레톤[10]을 찾아내는 연구들이 진행되었고, 최근에는 MAT를 활용해 이미지로부터 삼차원 물체를 복원하는 연구[11]도 진행되었다. 한편, 본 논문에서는 일관성이 부족한 멀티뷰 스케치 입력으로부터 정확한 스켈레톤을 가진 형상을 복원하기 위해 MAT를 사용한다.

삼차원 MAT는 일차원 선과 이차원 면 그리고 교차

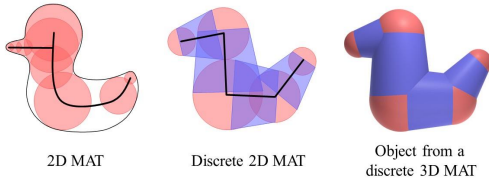


그림 1 MAT의 예시

Fig. 1 Examples of Medial Axis Transform (MAT)

점을 가지는 메조 스켈레톤(meso-skeleton)을 갖는다. 하지만 Q-MAT[9]에서 단순화된 MAT로도 형상을 효과적으로 근사할 수 있음을 보였기 때문에, 본 연구에서는 일차원 성분과 교차점만을 가지는 스켈레톤을 사용하여 사용자 입력의 직관성을 높인다.

일반적으로 MAT의 명시적인 수학적 표현은 찾을 수 없기 때문에 메시와 유사하게 정점과 에지를 이용해 이산적으로 표현한다. MAT의 이산적 표현을 형상으로 변환하기 위해 이차원에서는 정점과 에지를 각각 원과 다각형으로, 삼차원 MAT의 경우 구와 일반화된 원기 등으로 근사하여 표현할 수 있다(그림 1).

4. MAT 기반의 형상 복원

본 연구에서는 렌더링 과정을 역으로 추적하는 역렌더링(inverse rendering) 방법으로 형상과 삼차원 스트로크를 복원한다. 역렌더링 방법은 렌더링된 이미지와 정답 이미지 간의 손실 함수 미분값을 역전파하여 목표 변수를 최적화한다. 4.1절에서는 초기 MAT 생성 과정을 설명하고, 4.2절에서는 형상 최적화를 위한 렌더링 방법, 4.3절에서는 형상의 최적화 방법을 서술하며, 4.4절에서는 삼차원 스트로크의 복원 방법을 서술한다.

4.1 초기 MAT 생성

사용자의 입력은 그림 2와 같은 멀티뷰의 이차원 스케치와 스켈레톤으로 구성된다. 스케치는 이미지로, 스켈레톤은 이차원 정점 위치와 연결 관계로 입력받으며, 멀티뷰 스켈레톤의 정점 간 일치 관계도 함께 입력받는다.

입력받은 이차원 스켈레톤을 기반으로 삼차원 초기 스켈레톤을 생성하여 MAT를 만든다. 먼저, 일치하는 이차원 스켈레톤 정점들에 대하여 각 시점에서 역투영

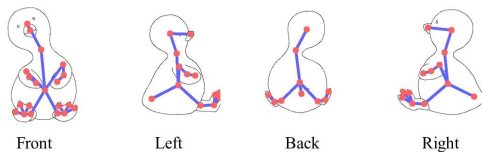


그림 2 사용자의 멀티뷰 스케치와 스켈레톤 입력

Fig. 2 Multi-view sketches and skeleton input

(unprojection) 하였을 때의 L1 오차가 최소가 되도록 삼차원 정점을 배치한다. 다음으로, 이차원 정점들의 연결 관계를 이용해 삼차원 스켈레톤의 에지를 생성한다. 마지막으로 스켈레톤의 각 정점에 임의의 초기 반경을 부여하여 초기 MAT를 생성한다(그림 6(a)).

4.2 거리 변환 형식의 미분 가능한 렌더링

역렌더링으로 형상을 최적화하려면 렌더링 과정이 미분 가능해야 한다. 기존 연구들은 메시를 실루엣[12] 또는 스케치 형식[13,14]으로 렌더링하는 방법을 제시했으나 두 방법 모두 손실 함수의 미분값이 형상의 경계에 해당하는 픽셀에서만 발생한다는 한계가 있다.

본 연구에서는 이미지 전체에서 손실 함수의 미분값이 발생할 수 있도록, MAT에 특화된 거리 변환 형식의 새로운 미분 가능한 렌더링 방법을 제시한다. 거리 변환(distance transform)은 이미지의 각 픽셀에서 형상 경계까지의 거리를 계산하는 방법이다. 입력 스케치로부터 실루엣 마스크를 추출한 후 거리 변환을 거쳐 정답 이미지를 만들 수 있다. 거리 변환 이미지에서 형상의 중앙, 즉 스켈레톤의 위치에 있는 픽셀은 주변 픽셀과 비교해 국소 최대값을 가지며, 이 값은 이차원으로 투영된 MAT의 반경과 일치한다. 따라서 거리 변환 이미지를 이용해 MAT의 스켈레톤과 반경 함수를 모두 효과적으로 최적화할 수 있다.

거리 변환 형식의 렌더링 방법은 다음과 같다. 먼저 MAT를 이차원에 투영하여 정점과 에지를 각각 원과 다각형으로 나타낸다(그림 3(a, b)). 다음으로, 각 도형을 거리 변환 형식으로 렌더링하기 위해 스켈레톤에 해당하는 꼭짓점에는 반경 함수의 값을, 형상의 경계에 해당하는 꼭짓점에는 0의 값을 부여한다. 꼭짓점의 색은 삼각형 내부에서 보강되므로 내부의 픽셀은 표면까지의 거리에 해당하는 값을 가지게 된다. 마지막으로 각 픽셀에서 모든 도형의 렌더링 이미지의 최소값을 취하여 그

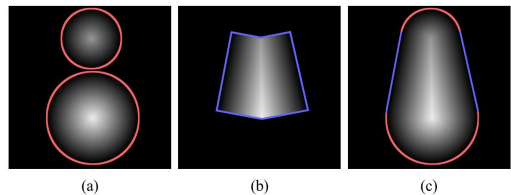


그림 3 MAT의 거리 변환 형식 렌더링 과정. (a) MAT 정점, (b) MAT 에지, (c) MAT 전체 (색이 있는 선으로 경계를 표시함)

Fig. 3 Distance-transform-style rendered images. (a) MAT vertices, (b) MAT edges, (c) Whole MAT. Boundaries are highlighted with colored lines

림 3(c)와 같이 MAT에 대한 거리 변환 형식 렌더링 이미지를 생성한다.

4.3 역렌더링을 이용한 형상 복원

역렌더링 방법으로 스케레톤에 해당하는 MAT 정점 위치와 형상에 해당하는 MAT 정점 반경을 교차 최적화한다. 추가적인 최적화 변수로써 사용자 입력의 비밀관성을 보완하는 변수들을 사용한다. 먼저, 시점별 카메라의 이동과 스케일링(scaling)을 예측하는 변수 t_i , s_i 를 두어 입력 스케치들 간의 크기와 위치를 보정한다. 또한, 시점별 MAT의 각 정점 위치와 반경의 오차를 예측하는 변수 B_i 를 두어 자세와 형태의 비밀관성을 모델링한다. 수식 1에서 V 는 최적화하는 MAT, V_i 는 시점별 변형된 MAT이다.

$$V = \{v_i^j\}, B_i = \{b_i^j\}, V_i = \{s_i v_i^j + t_i + b_i^j\} \text{ for } 0 \leq j \leq N \quad (1)$$

MAT 정점의 위치 최적화에 사용되는 손실 함수는 세 가지이다. 첫째, 변형된 MAT를 거리 변환 형식으로 렌더링한 이미지와 정답 이미지 사이의 L1 오차를 계산한다(수식 2). 둘째, 변형된 MAT 정점을 각 시점으로 투영하여 입력 스케레톤과의 L2 오차를 계산한다(수식 3). 마지막으로, 시점별 이동 벡터들이 최소가 되도록 L2 오차를 계산한다(수식 4). 최종 손실 함수는 실험적으로 찾은 가중치를 각 함수에 곱한 후 더하여 계산한다(수식 5). 아래 수식에서 E 는 MAT의 에지, I_i^{GT} 와 P_i 는 시점별 정답 이미지와 투영 행렬, V_i^{GT} 는 입력 스케레톤 정점이다.

$$L_{img} = \sum_i \|DTrender(MAT(V_i, E)) - I_i^{GT}\|_1, \quad (2)$$

$$L_{skel} = \sum_i \|P_i V_i - V_i^{GT}\|_2, \quad (3)$$

$$L_{reg} = \sum_i \|B_i\|_2 + \lambda \sum_i \|t_i\|_2, \quad (4)$$

$$L_{position} = L_{img} + \lambda_{skel} L_{skel} + \lambda_{reg} L_{reg} \quad (5)$$

MAT 정점의 반경 최적화에는 이미지 손실 함수(수식 2)와 함께 MAT 제약 함수들을 사용한다. 제약 함수는 MAT의 반경이 음수이거나 다른 도형의 내부에 포함될 경우 페널티를 부여한다(수식 6-8). 아래 수식에서 M 과 N 은 각각 MAT의 정점과 에지의 개수, r_v 와 p_v 는 MAT 정점의 반경과 위치, $h(v, e)$ 는 MAT의 정점 v 에서 에지 e 에 내린 수선의 발이다.

$$L_{negative} = \frac{1}{N} \sum_{v \in V} \min(0, -r_v), \quad (6)$$

$$L_{caten} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{v, w \in V} \min(0, |r_v - r_w| - \|p_v - p_w\|_2) +$$

$$\frac{1}{NM} \sum_{v \in V, e \in E} \min(0, |r_v - r_{h(v, e)}| - \|p_v - p_{h(v, e)}\|_2), \quad (7)$$

$$L_{radius} = L_{img} + \lambda_{negative} L_{negative} + \lambda_{caten} L_{caten} \quad (8)$$

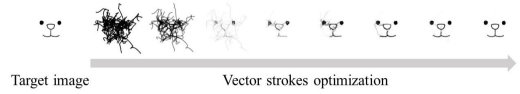


그림 4 이차원 곡선 벡터 최적화 과정

Fig. 4 Optimization process for 2D vector strokes

4.4 삼차원 스트로크 복원

입력 스케치 중 얼굴 표정 등에 해당하는 내부 스케치는 삼차원 스트로크로 복원한다. 사용자가 전면 스케치에서 내부 스케치 영역을 선택하면 이차원 곡선 벡터를 생성한 후 삼차원으로 변환한다.

먼저, 이차원 곡선 벡터 생성을 위해 스케치에 해당하는 픽셀들을 시작점으로 갖는 임의의 베지어 곡선을 생성하여 초기화한다. 벡터 그래픽의 미분 가능한 렌더링 [15]을 활용하여 곡선들의 렌더링된 이미지가 입력 스케치와 같아지도록 곡선의 조정점 좌표 및 투명도 값을 최적화한다(그림 4). 최소의 곡선 개수로 입력 이미지를 정확히 재현하기 위해, 충분한 개수로 곡선을 초기화하여 최적화한 후 투명도 값이 0에 가까워진 곡선은 삭제하는 전략을 취하였다.

생성된 이차원 곡선 벡터들을 복원된 삼차원 형상의 표면에 투영하여 삼차원 스트로크를 생성한다. 삼차원 곡선들은 렌더링 시 새로운 뷰 평면으로 투영되어 이차원 곡선 벡터들로 변환될 수 있다.

5. 스케치 형식 렌더링

MAT가 이차원 도형들의 함으로 나타난다는 특성을 이용하여, 거리 변환 형식의 렌더링(4.2절)과 유사하게 형상을 스케치 형식으로 렌더링할 수 있다. 먼저 이차원에 투영된 MAT의 정점과 에지를 원과 다각형을 이용해 나타내고, 각 기본 도형들을 뷰 시점과의 거리에 따라 정렬한 후 뒤에서부터 순차적으로 렌더링하여 폐색(occlusion)에 의한 효과를 구현한다. 그림 5는 정점이 3개인 MAT의 기본 도형들을 순차적으로 렌더링하는 과정을 보여준다. 각 도형에 대해 하얀색으로 채워진 내부 및 검은색의 테두리를 순차적으로 렌더링하며, 다각형의 경우 바깥쪽의 직선 부분만을 렌더링한다.

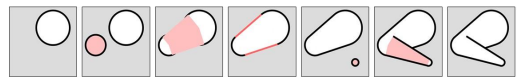


그림 5 스케치 형식의 벡터 그래픽 렌더링 과정 (추가된 도형을 붉은색으로 나타냄)

Fig. 5 Sketch-style rendering process for vector graphics (red colors on newly added shapes)

삼차원 스트로크는 시점에 따라 이차원 곡선 벡터로 변환된 후 형상을 나타내는 이차원 도형들과 함께 거리 순으로 렌더링된다. 스트로크 및 도형은 모두 벡터 그래픽으로 저장되므로 해상도 변경이 자유롭고 벡터의 스타일 변형이 가능하다는 장점을 가진다. 스타일화의 예시로, 노이즈 필터를 이용해 스트로크에 불규칙한 두께 변화를 주면 손으로 그린 그림의 스타일로 렌더링할 수 있다(그림 8).

6. 스켈레톤 기반 애니메이션 제작

6.1 스켈레톤 전이를 통한 애니메이션 적용

입력 스켈레톤이 사람 스켈레톤과 유사하며 T 포즈(T-pose)를 취하고 있을 경우, 스켈레톤 전이를 통해 미리 정의된 모션 애니메이션을 적용할 수 있다. 모션 데이터를 가진 스켈레톤을 표준 스켈레톤, 사용자가 입력한 스켈레톤을 입력 스켈레톤, 입력 스켈레톤에 맞게 변형된 표준 스켈레톤을 전이 스켈레톤으로 정의한다.

먼저, 사용자로부터 표준 스켈레톤과 입력 스켈레톤에서 대응되는 정점들의 쌍을 입력받아 최소 대응 관계를 만든다. 두 스켈레톤의 범위를 정규화한 후, 대응되는 정점들의 위치는 일치하면서 나머지 정점들은 스켈레톤 에지의 길이 및 각도가 최소한으로 변형되도록 ARAP 변형으로 정점들을 이동하여 전이 스켈레톤을 만든다.

애니메이션 적용을 위해, 전이 스켈레톤의 T 포즈에서 입력 스켈레톤 정점들의 상대적 위치를 찾은 후 모션 프레임별 변형된 포즈에 적용하여 변형된 MAT 정점의 위치를 찾는다. 삼차원 스트로크는 투영된 형상에 해당하는 정점의 위치 및 각도에 맞게 이동 및 회전된다. 프레임마다 포즈가 변형된 MAT 정점과 스트로크를 함께 렌더링하여 애니메이션을 생성한다.

6.2 포즈 변형 및 보간을 통한 애니메이션 생성

독자적 스켈레톤을 가진 캐릭터의 경우 사용자가 직접 키프레임을 생성하고 프레임 보간을 통해 애니메이션을 제작할 수 있다. 먼저, 키프레임 생성을 위해 이동하고자 하는 정점들의 이동된 위치를 입력받는다. 프레임 간격에 따라 이동 정점의 위치를 선형 보간하여 각 프레임에서의 위치를 결정한다. 다음으로, 프레임마다 스켈레톤에서 말단 노드와 분기 노드의 위치를 고정하고 나머지 연결 노드들의 에지의 길이와 각도가 일정하게 유지되도록 ARAP 변형으로 정점의 위치를 찾는다. 프레임마다 정점을 이동 후 렌더링하여 애니메이션을 만든다.

7. 실험 결과 및 분석

7.1 삼차원 형상 복원 결과 및 비교

그림 6은 그림 2의 입력으로부터 복원된 결과를 보여

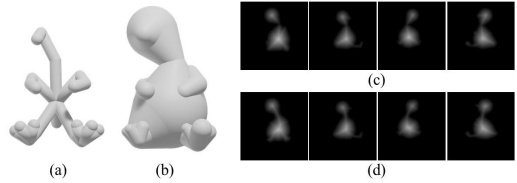


그림 6 형상 복원 결과. (a) 초기 MAT, (b) 최적화된 MAT, (c) 최적화된 형상의 시점별 거리 변환 렌더링 이미지, (d) 정답 이미지

Fig. 6 Reconstruction results. (a) Initial MAT, (b) Optimized MAT, (c) Rendered images of the optimized shape in distance-transform style, (d) Ground truth images

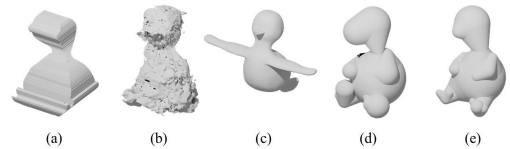


그림 7 비교 실험 결과. (a) 복셀 조각법, (b) Lun et al. [5] 결과, (c) Xiang et al. [6] 결과, (d) 역 렌더링, (e) 본 논문 제시 방법

Fig. 7 Comparison results. (a) Voxel carving, (b) Lun et al. [5], (c) Xiang et al. [6], (d) Inverse rendering, (e) Ours

준다. (a)는 그림 2의 입력으로부터 얻은 초기 MAT이고, (b)는 복원된 삼차원 형상이다. (b)에서 MAT의 위치와 반경이 적절하게 최적화된 것을 볼 수 있다. 또한, 최적화된 MAT의 거리 변환 렌더링 이미지(c)가 입력 스케치로부터 얻은 시점별 거리 변환 이미지(d)와 일치하므로 최적화된 형상이 입력 이미지를 잘 따르는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 2의 입력으로부터 다양한 방법으로 형상을 복원한 결과이다. (a)는 고전적 복셀 조각법(voxel carving)으로 복원한 형상으로, 스케치의 개수가 적고 시점별 스케치의 위치에 오류가 있어 형상을 제대로 복원하지 못하였다. (b)는 딥러닝을 사용한 Lun et al.[5]의 방법으로 복원한 형상으로, 앞쪽과 오른쪽 스케치를 입력으로 캐릭터 카테고리로부터 사전 훈련된 네트워크를 거쳐 결과를 얻었다. 복원 결과, 훈련에 사용된 데이터와의 도메인 격차 때문에 노멀 맵과 깊이 맵을 빠르게 예측하지 못하였고 이로 인해 부정확한 형상이 복원되었다. (c)는 대형 삼차원 에셋 생성 모델[6]을 이용해 복원한 형상이다. 입력이 오리 그림인 것을 인식하여 오리 형상을 복원하였으나, 이미지 생성 모델을 활용하는

과정에서 정보가 손실되어 복원된 형상이 입력 스케치를 잘 따르지 못한다. (a), (b), (c) 모두 스켈레톤 없이 복원되었기 때문에 사용자가 의도한 형상의 구조를 정확하게 예측하지 못하였고 포즈 변형이 불가능하다.

그림 7의 (d)는 실루엣 렌더링을 사용한 역렌더링 방법[12]으로 MAT를 최적화한 결과이다. 스켈레톤 기반으로 형상이 복원되므로 스켈레톤 수정을 통해 자연스러운 자세 변형이 가능하다. 하지만 이미지의 경계면에서 발생한 미분값이 적절한 파트로 전파되지 못하여 형상의 말단부가 비대해지고 오른팔이 거의 사라지는 등의 오류가 발생했다. 반면, 본 논문이 제안한 방식의 결과인 (e)는 형태와 구조가 스케치를 잘 따르는 것을 볼 수 있다.

7.2 스케치 형식의 렌더링 결과

그림 8은 고양이 캐릭터에 대한 입력 이미지와 스켈레톤 및 복원된 결과의 스케치 형식 렌더링을 보여준다. 스켈레톤 기반으로 형상이 복원되어 새로운 시점에서도 자연스러운 이미지를 얻을 수 있다. 내부 스케치를 삼차원 곡선 벡터로 표현하므로 새로운 시점에서도 일관성 있게 스케치를 렌더링할 수 있다. 또한, 여러 스타일을 적용 가능하여 다양한 시각적 느낌을 전달할 수 있다.

7.3 애니메이션 적용 결과 및 비교

그림 9는 두 가지 캐릭터 입력에 대한 입력 이미지 및 스켈레톤의 일부와 그로부터 복원된 형상에 애니메이션을 적용한 결과이다. Mixamo[16]에서 제공하는 사람 스켈레톤을 두 캐릭터에 전이하고, 동일한 모션을 적용하여 각각 애니메이션을 생성하였다. 캐릭터마다 7쌍

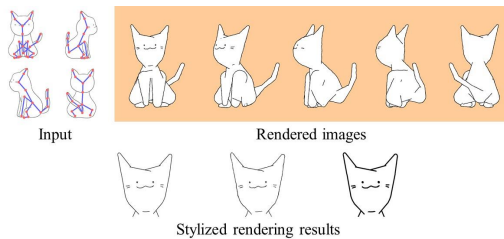


그림 8 스케치 형식의 렌더링 결과
Fig. 8 Rendered images in sketch style

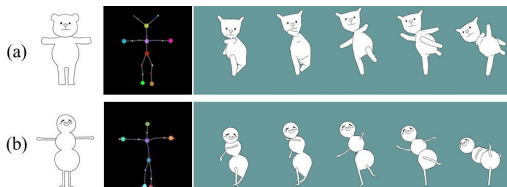


그림 9 애니메이션 적용 결과
Fig. 9 Animation transfer results

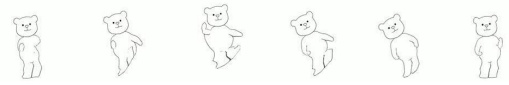


그림 10 Animated Drawings [7]의 애니메이션 결과
Fig. 10 Animating results with Animated Drawings [7]

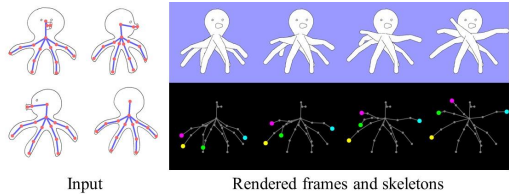


그림 11 포즈 보간을 통한 애니메이션 생성 결과
Fig. 11 Animation creation results using pose interpolation

의 최소 대응 관계 입력만으로 애니메이션이 적용되어 간단하게 애니메이션 프로토타입을 제작할 수 있다.

그림 10은 그림 9(a)의 입력 캐릭터에 대한 Animated Drawings[7]의 유사 애니메이션 적용 결과이다. 이차원 이미지에 ARAP 변형을 적용해 일부 파트의 형태가 일그러지고, 얼굴 각도가 변하지 않아 삼차원의 시각적 가이드를 제공하지 못한다. 반면, 본 논문의 결과는 스켈레톤을 기반으로 형상이 복원되어 각 파트의 형태가 유지되고, 다른 각도에서도 현실감 있게 렌더링 된다.

7.4 포즈 보간을 통한 애니메이션 생성 결과

그림 11은 문어 캐릭터에 대한 입력 이미지와 스켈레톤, 그리고 포즈 변형을 통해 제작한 애니메이션의 결과이다. 스켈레톤 중 4개의 점에 대한 변형된 위치를 입력 받고 프레임 보간을 통해 중간 스켈레톤이 생성되었다. 입력하지 않은 정점들의 위치도 최적화되어 자연스럽게 포즈가 변형된 것을 볼 수 있다. 또한, 선형 보간을 통해 자연스러운 애니메이션이 생성된 것을 확인할 수 있다.

8. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 멀티뷰 이차원 스케치와 스켈레톤을 이용해 삼차원 형상을 복원 및 렌더링하여 애니메이션을 제작하는 프레임워크를 제시하였다. MAT 표현을 거리 변환 형식으로 렌더링하여 역렌더링 방법으로 삼차원 형상이 최적화됨을 보였다. 또한, 복원된 형상의 스켈레톤 조정을 통해 기존 애니메이션을 적용하거나 새로운 애니메이션을 생성할 수 있음을 확인하였다. 하지만 복원 과정에서 스켈레톤의 위상이 변하지 않기 때문에 복잡한 형상의 경우 세부 정보를 표현하지 못한다

는 한계가 있다.

향후 연구로써, 본 연구의 방법으로 복원된 형상을 이용해 더욱 고도화된 복원 방법을 제시할 수 있을 것이다. 구체적으로, 복원된 형상을 SDF (Signed Distance Function)로 변환 후 표면의 세부 정보를 더욱 정확히 복원할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 입력 범위를 스케치에서 채색된 드로잉으로 확장한다면 프레임워크의 적용 분야가 더욱 넓어질 수 있다.

References

[1] H. Blum, "A transformation for extracting new descriptors of shape," *Models for the Perception of Speech and Visual Form*, pp. 362-380, 1967.

[2] A. Nealen et al., "Fibermesh: Designing freeform surfaces with 3d curves," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 26, No. 3, pp. 41-es, 2007.

[3] R. Schmidt et al., "Shapeshop: Sketch-based solid modeling with blobtrees," *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, pp. 43-es, 2006.

[4] J. Delanoy et al., "3D sketching using multi-view deep volumetric prediction," *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-22, 2018.

[5] Z. Lun et al., "3D shape reconstruction from sketches via multi-view convolutional networks," *2017 International Conference on 3D Vision (3DV)*, pp. 67-66, IEEE, 2017.

[6] J. Xiang et al., "Structured 3D Latents for Scalable and Versatile 3D Generation", *arXiv, No. 2412.01506*, 2024.

[7] H. J. Smith et al., "A method for animating children's drawings of the human figure," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, No. 3, pp. 1-15, 2023.

[8] M. Dvorožňák et al., "Monster Mash: A single-view approach to casual 3D modeling and animation," *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 39, No. 6, pp. 1-12, 2020.

[9] P. Li et al., "Q-mat: Computing medial axis transform by quadratic error minimization," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-16, 2015.

[10] Z. Dou et al., "Coverage axis: Inner point selection for 3d shape skeletonization," *Computer Graphics Forum*, Vol. 41, No. 2, pp. 419-432, 2022.

[11] J. Hu, "IMMAT: Mesh reconstruction from single view images by medial axis transform prediction," *Computer-Aided Design*, Vol. 150, No. 103304, 2022.

[12] S. Laine et al., "Modular primitives for high-performance differentiable rendering," *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 39, No. 6, pp. 1-14, 2020.

[13] B. Kim et al., "Deep reconstruction of 3d smoke

densities from artist sketches," *Computer Graphics Forum*, Vol. 41, No. 2, pp. 97-110, 2022.

[14] J. Zhou et al., "GA Sketching: Shape modeling from multi view sketching with geometry aligned deep implicit functions," *Computer Graphics Forum*, Vol. 42, No. 7, pp. 1-15, 2023.

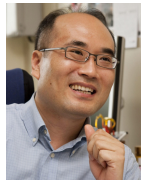
[15] T. M. Li et al., "Differentiable vector graphics rasterization for editing and learning," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 39, No. 6, pp. 1-15, 2020.

[16] Mixamo, <https://www.mixamo.com>, 2024.



윤혜정

2023년 2월 포항공과대학교 IT융합공학과 (학사). 2023년~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석박사 통합 과정. 관심분야는 3D 모델링 및 애니메이션, 3D 복원



이승용

1988년 2월 서울대학교 계산통계학과(학사)
1995년 2월 한국과학기술원 전산학과(박사)
2003년 8월~2004년 7월 독일 Max-Planck-Institut für Informatik 방문교수
2010년 10월~2011년 9월 미국 Adobe Systems 방문교수. 1996년 10월~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수. 관심분야는 3D 복원, 휴먼 아바타, 3D 모델링, 영상처리