

## An Efficient Sketch-Based Wrinkle Representation Method Using Kernel-Based Skin-Muscle Modeling

Jong-Hyun Kim\*

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

### [Abstract]

This study presents an intuitive and efficient sketch-based system for generating realistic facial wrinkles by leveraging kernel-based skin-muscle modeling. Motivated by the need for accessible yet expressive wrinkle creation tools in digital character design, the proposed method allows users to draw simple sketches on a facial model's normal map using a tablet. The system interprets these strokes in real time, reflecting underlying skin textures and region-specific wrinkle patterns. A user-defined age parameter further controls the depth and density of wrinkles, enabling automatic adjustment across a wide age spectrum. Experimental results demonstrate that even users without prior knowledge in 3D modeling can create natural-looking, age-aware wrinkles with minimal input. Compared to traditional approaches, our method improves usability, visual fidelity, and computational efficiency. Future work will explore integration with dynamic facial expressions and adaptation to diverse skin types for broader applicability in animation and interactive media.

▶ **Key words:** Wrinkle, Sketch, Normal map, Muscle contraction, Kernel, Skin-muscle

### [요 약]

본 연구는 커널 기반 피부-근육 모델링 기법을 활용하여, 사실적인 얼굴 주름을 직관적으로 생성할 수 있는 스케치 기반 인터페이스를 제안한다. 디지털 캐릭터 디자인 분야에서 전문 지식 없이도 자연스러운 주름을 표현할 수 있는 효율적인 도구의 필요성에 착안하여, 사용자가 태블릿을 통해 얼굴 모델의 노멀 맵 위에 간단한 스케치를 입력하면, 시스템은 피부 패턴과 부위별 주름 특성을 반영하여 실시간으로 주름을 생성한다. 또한 사용자가 입력한 나이 설정값을 기반으로 주름의 깊이와 밀도를 자동으로 조절함으로써, 다양한 연령대에 적합한 주름 표현이 가능하다. 실험 결과, 3D 모델링에 대한 사전 지식이 없는 사용자도 손쉽게 사실적인 주름을 생성할 수 있으며, 기존 방식에 비해 사용성, 시각적 자연스러움, 계산 효율 측면에서 우수한 성능을 보였다. 향후에는 표정 변화에 따른 동적 주름 표현, 다양한 피부 유형에 대한 대응 등을 통해 애니메이션 및 인터랙티브 미디어 분야에서의 활용 가능성을 더욱 확대할 계획이다.

▶ **주제어:** 주름, 스케치, 법선 맵, 근육 수축, 커널, 피부근육

- 
- 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. 06. 09, Revised: 2025. 07. 29, Accepted: 2025. 08. 01.

## I. Introduction

사람은 개개인의 피부 특성에 따라 고유한 질감과 패턴을 가지지만, 현재 가상현실 환경에서 이러한 개별적인 피부 특성을 반영하여 주름을 생성해주는 인터페이스는 거의 존재하지 않는다. 인간의 얼굴을 모델링하는 작업은 오랜 시간 동안 다양한 학문 분야에서 핵심적인 연구 주제로 다뤄져 왔다. 특히 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 얼굴 모델에서 나타나는 미세한 디테일을 정교하게 표현하는 것이 여러 응용 분야에서 중요한 과제로 여겨진다. 주름과 같은 얼굴의 세부적인 특징을 분석하고 재현하는 과정은, 인간 얼굴에 대한 지각이 매우 민감할 뿐 아니라, 그러한 디테일이 생리학·해부학적·환경적 요인 등 복합적인 요소에 의해 형성되기 때문에 상당한 난이도를 지닌다[1,2]. 특히 노화된 얼굴을 표현할 때는 이러한 요소들에 더해, 얼굴이 지닌 삶의 흔적이나 인물의 성격과 같은 주관적인 요소까지 고려해야 한다는 점에서 더욱 복잡하다[3]. 이처럼 사실적인 얼굴 디테일을 생성하려면 사용자가 주관적인 인식을 직접 반영할 수 있는 인터랙티브한 접근 방식이 필요하다. 하지만 지금까지 그래픽스 분야에서 제안된 대부분의 방법은 2D 이미지나 3D 얼굴 스캔을 기반으로 하여 이러한 디테일을 자동으로 생성하거나 전이하는 데 초점을 맞추고 있다[2-7].

사실적인 3D 인간 모델을 제작하기 위해서는 고가의 3D 스캐너 장비를 사용하거나, 전문 디자이너가 수작업으로 제작해야 하므로 일반 사용자가 접근하기에는 높은 진입 장벽이 존재한다. 이러한 방식은 비용 부담이 크고, 수정이 어렵다는 단점도 있다[8]. 지금까지 얼굴의 주름과 같은 세부 디테일을 인터랙티브하게 생성하는 방식은 대체로 실리곤 기반의 물리적 분장을 활용하는 번거로운 절차나[3], 범용적인 가상 조형 도구를 사용하는 방식에 국한되어 있었다. 그러나 이러한 방법들은 모두 사실적인 결과를 얻기 위해 많은 시간과 반복적인 수작업이 요구된다는 한계가 있다. 이에 비해 스케치는 주름의 패턴을 시각적으로 표현하는 데 있어 효율적인 수단으로, 법의학이나 특수 분장과 같은 분야에서 디테일을 설계하는 초기 단계로 자주 활용된다[3,9]. 예를 들어 영화나 드라마 제작 현장에서는 분장 아티스트들이 등장인물의 성격이나 설정에 맞춰 노화 분장을 설계할 때, 얼굴의 특징을 스케치하며 디자인을 구상한다[3]. 법의학에서도 스케치 작가는 목격자나 피해자의 진술을 바탕으로 몽타주를 그리거나, 실종자의 노화된 모습을 추정해 그림으로 표현하는 데 스케치를 이용한다[9]. 이처럼 목적에 맞게 제작된 스케치는 일반적으로 얼굴의 구조

를 단순화해 표현하기 때문에, 사실적인 얼굴 모델링에 그대로 적용하기엔 적합하지 않다. 이러한 스케치에서 유의미한 정보를 추출하는 일은 본질적으로 정의가 모호하고 해결이 어려운 과제로 여겨진다[10]. 특히 해당 스케치를 기반으로 주름을 합성하는 일은 더욱 복잡하며, 현재까지의 연구들은 대부분 명확하게 추출된 곡선이나 사선에 정의된 알고리즘 함수에 의존하고 있는 실정이다[6].

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하고자, 일반 사용자도 간단한 스케치만으로 피부 근육의 특성을 커널로 모델링하여 3D 모델에 사실적인 주름을 생성할 수 있는 인터페이스를 제안한다. 제안하는 방법은 가상현실 시장에서 활용도가 높은 CG 및 디지털 휴먼 분야에 적용 가능하며, 사용자에게 높은 몰입감과 편의성을 제공할 수 있다는 점에서 의미가 있다.

본 연구의 핵심 기여는 커널 함수를 기반으로 한 피부-근육 모델링 기법을 도입함으로써, 사용자의 스케치 입력이 주변 영역까지 연속적으로 영향을 미치도록 공간적으로 확장하고, 이를 통해 보다 자연스럽고 사실적인 주름 형상을 생성하는 데 있다. 커널 함수는 입력 위치를 중심으로 국소적인 가중치를 분포시키는 수학적 메커니즘으로, 스케치의 강도, 방향, 길이 등 다양한 특성을 인접한 질점에 점진적으로 전파함으로써 주름 생성의 물리적 연속성을 보장한다. 이러한 커널 기반 접근은 단순한 드로잉 기반 주름 생성 방식과 달리, 근육 수축과 피부의 탄성 반응을 수치적으로 근사화할 수 있어, 시각적 자연스러움과 구조적 일관성을 동시에 확보할 수 있다는 점에서 차별성을 가진다. 따라서 본 논문에서는 커널 기반 모델링의 원리와 적용 방식에 대해 구체적으로 서술하고, 이를 활용한 스케치 기반 주름 생성 시스템의 설계 및 구현 과정을 상세히 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구들을 정리하며, 기존 주름 생성 기법, 스케치 기반 인터페이스, 커널 기반 모델링 기법 등을 중심으로 본 연구와의 차별성을 설명한다. 3장에서는 제안하는 커널 기반 피부-근육 모델링 기법의 이론적 배경과 모델링 구조를 상세히 기술하며, 스케치 입력이 주름 형상에 어떻게 반영되는지를 수식 및 알고리즘으로 제시한다. 4장에서는 전체 시스템의 구현 과정과 사용자 인터페이스 설계를 설명하고, 실제 입력에 따른 주름 생성 절차를 단계별로 소개한다. 5장에서는 다양한 실험을 통해 제안 기법의 효과성을 정량적 및 정성적으로 분석하고, 기존 방식과의 비교를 통해 성능 우수성을 검증한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론을 정리하고, 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

## II. Related Work

주름은 진피 내의 탄성 섬유나 안면 근육과 같은 물리적 구조와 밀접하게 연결되어 있다 [1, 3, 11]. 이러한 특성으로 인해, 얼굴의 기본적인 구조를 단순화한 물리 모델을 바탕으로 주름이나 표정에 따른 변형을 예측하려는 다양한 접근 방식이 제안되어 왔다. 일부 연구는 노화로 인한 주름 [12,13]이나 일반적인 피부 주름[14]을 정밀하게 재현하는 것을 목표로 하며, 다른 연구들은 표정 변화에 따른 얼굴의 세부적인 움직임을 애니메이션으로 표현하는데 중점을 둔다 [15-20]. 이러한 물리 기반 모델은 사실적인 주름 표현에 효과적이지만, 얼굴 구조 외의 다양한 요인을 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 더불어 생성된 주름을 자유롭게 조절하거나 수정하기 어렵다는 점도 단점으로 지적된다.

주름 생성을 위한 또 다른 접근법으로는, 주름의 형상을 결정하는 함수나 에너지 항을 정의한 뒤 이를 몇 가지 파라미터, 노드, 또는 곡선을 통해 제어하는 방식이 있다. 일부 기법은 곡선이나 파라미터로 조정 가능한 에너지 기반 모델에 의존하며 [21-23], 또 다른 방법들은 스케치하거나 이미지에서 추출한 곡선과 주름 형태를 정의하는 함수들을 활용하여 보다 직접적인 제어를 가능하게 한다 [6,24-28]. 하지만 이러한 방식들은 사용자 입장에서 사실감 있고 표현력 있는 얼굴 모델을 구현하기 위한 적절한 파라미터 값을 추정하기 어렵고, 직관성 또한 떨어진다는 한계가 있다 [6]. 이에 반해 본 논문에서 제안하는 기법은 곡선이나 파라미터의 명시적인 지정 없이, 사용자가 자유롭게 선을 그리는 것만으로도 자신의 스케치에 부합하는 사실적인 주름을 효과적으로 생성할 수 있도록 설계되었다.

3D 모프러블 모델은 얼굴의 형상을 정밀하게 근사하는데 유용하다는 사실이 다양한 연구를 통해 입증되었다 [29,30]. 이러한 개념은 대규모 노화 효과의 시뮬레이션 [31]이나 스케치를 기반으로 한 3D 얼굴 모델 생성 [32] 등에도 활용된 바 있다. 또한, 기존의 얼굴 변형 데이터를 바탕으로 새로운 얼굴 디모예이션을 유도하기 위한 학습 기반 기법들도 제안되었대[33,34]. 그러나 이러한 접근들은 대부분 얼굴의 거시적 구조를 재현하는 데 집중되어 있으며, 사실적인 표현을 위한 미세한 디테일은 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다. 이러한 사실감을 높이기 위한 디테일 및 주름의 합성을 위해서는, 예제 얼굴 표면에서 추출한 국소 통계[4], 피부 변형과 디테일 간의 상관관계를 학습한 모델[35], 모션 캡처 데이터[36], 고해상도 지오메트리를 갖춘 얼굴 리깅 시스템[37], 또는 정밀한 동적 얼굴

퍼포먼스 캡처 기법[38] 등이 사용될 수 있다. 이와 같은 기법들은 얼굴의 특성을 반영한 디테일 전이나 합성에 효과적이지만, 생성된 주름을 사용자 의도에 맞게 조절하거나 연출하는 데에는 제약이 따른다. 이에 본 연구에서는 복잡한 스케치 기반 드로잉으로부터 사실적인 주름을 생성할 수 있도록 설계된 새로운 통계적 지표를 제안하며, 이를 통해 보다 유연하고 예술적 연출이 가능한 주름 합성이 가능하도록 한다.

스케치는 물체를 처음부터 모델링하거나 기존 모델에 구조를 추가하거나 변형할 때 매우 직관적인 표현 수단으로 널리 활용된다[39]. 이러한 특성 덕분에, 선을 기반으로 3D 모델을 생성하거나[40-43], 스케치를 이용해 모델을 수정·보완하는 다양한 기법들이 개발되어 왔다[27,44-47]. 그러나 이러한 방식들은 일반적인 모델링을 위한 것으로, 얼굴의 주름 패턴을 손쉽게 효율적으로 생성하는 데에는 한계가 있다. 기존 방식들은 대체로 명확한 곡선이 포함된 정제된 스케치를 전제로 하며, 원하는 선을 추출하기 위한 스케치 정제 과정이 필수적으로 요구된다[48]. 하지만 실제 환경에서 생성된 복잡한 스케치 드로잉에서 의미 있는 곡선이나 고수준의 의미 정보를 정확히 식별하는 일은 매우 까다롭고 애매한 문제이다[10]. 이로 인해 지금까지 제안된 주름 생성용 스케치 시스템들은 대부분 간단한 곡선을 통해 주름 위치를 정의하는 방식에 의존해 왔다[22,27]. 하지만 이러한 단순한 스케치 기반의 방법조차도 사실적인 디테일을 반영한 주름 패턴을 생성하기에는 여전히 사용자에게 부담이 크다[6]. 반면, 본 논문에서 제안하는 방법은 복잡하고 러프한 스케치도 그대로 활용 가능하며, 피부 근육의 특성을 고려하여 설계된 커널 기법을 적용함으로써 사실적인 주름을 자동으로 합성할 수 있도록 설계되었다.

노멀맵 기반의 주름 표현 기법은 게임 및 애니메이션 분야에서 오랜 시간 동안 저비용 고효율의 표준적인 방식으로 활용되어 왔다. 특히 고해상도 지오메트리를 직접 구현하지 않고, 표면의 시각적 굴곡을 텍스처 기반으로 표현함으로써 렌더링 효율을 높이는 방법이 일반화되어 있다. 그러나 대부분의 기존 방식은 정적 텍스처 제작에 의존하며, 사용자 입력에 따라 주름이 동적으로 생성되거나 조정되는 기능은 제한적이었다. 또한 피부 반응이나 부위 특성을 반영하지 못하는 점에서 시각적 일관성과 표현의 유연성에 한계가 존재한다. 본 연구는 이러한 기존 방식과의 차이를 바탕으로, 사용자 스케치 기반의 실시간 주름 생성, 커널 기반 피부 반응 모델링, 연령 및 부위별 자동 조절 기능을 통해 기술적 차별성을 확보하고자 한다.

### III. The Proposed Scheme

제안하는 기법은 단순히 입력된 스케치를 노말맵에 반영하는 것에 그치지 않고, 커널 함수를 활용하여 입력 위치에서 주변 영역으로 시각적 영향을 확산시킴으로써 실제 피부와 근육의 물리적 반응을 근사화한다. 또한 연령 파라미터를 기반으로 주름의 깊이와 밀도를 자동 조절하며, 얼굴 부위별 주름 특성에 따라 동일한 입력이라도 위치에 따라 상이한 주름 형상을 생성한다. 이러한 접근은 기존 노말맵 기반 주름 표현 방식과 차별화되는 요소로, 사용자의 입력에 따른 높은 반응성과 시각적 자연스러움을 동시에 달성할 수 있다. 본 논문에서 제시한 플로우차트는 다음과 같다 (Fig. 1 참조).

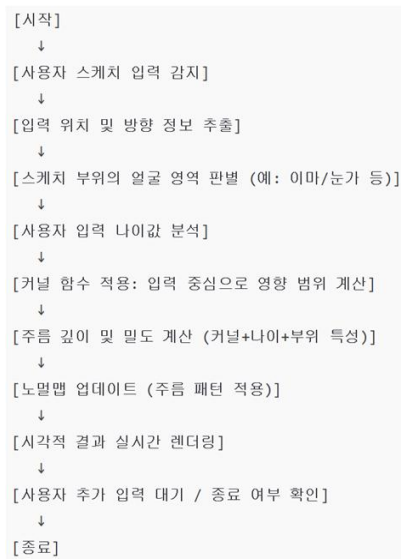


Fig. 1. Flowchart of the our method.

사용자의 스케치를 입력받기 위해, 먼저 스케치를 자유롭게 그릴 수 있는 사용자 인터페이스를 제작하였다. 화면 구성은 다음과 같다.

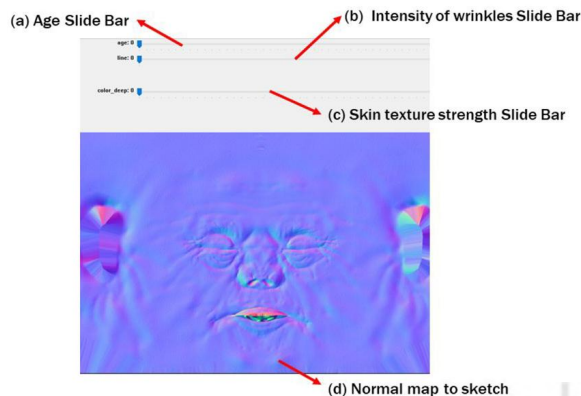


Fig. 2. Wrinkle sketch interface.

Fig. 2a는 모델의 나이를 설정할 수 있는 슬라이드 바로, 설정된 나이에 따라 주름의 형태가 달라진다. Fig. 2b는 주름의 진하기를 조절하는 슬라이드 바이며, 값이 0이면 짙은 주름이, 1이면 옅은 주름이 생성된다. Fig. 2c는 주름에 따른 그림자 효과를 skin texture에 적용하는 슬라이드 바로, 수치를 높일수록 texture의 색상이 어두워진다. Fig. 2d는 사용자가 직접 스케치를 입력하는 영역으로, 주름을 추가하고 싶은 부위에 선을 그리는 방식으로 조작된다. 이와 같은 방식으로 인터페이스가 구성되어 있으며, 사용자가 각 슬라이드 값을 설정한 뒤 스케치를 완료하면, 시스템이 이를 기반으로 자동으로 주름을 계산하여 스케치를 반영한 노말 맵 이미지와 skin texture를 생성한다. 이렇게 생성된 결과물은 Unity에서 3D 모델에 적용되며, 최종적으로 가상현실 환경에서도 주름이 반영된 3D 모델을 확인할 수 있다.

#### 1. Basic Form of Wrinkles

주름이 형성되는 원리는 노화로 인한 세포 기능 저하와 자외선 등의 외부 요인으로 진피 구조가 손상되기 때문이

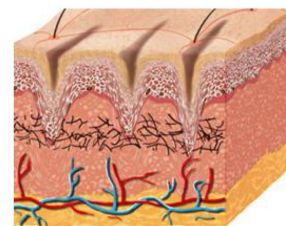


Fig. 3. Principle of wrinkle formation.

다. 이로 인해 Fig. 3과 같이 피부가 뽀족하게 파이는 형태로 주름이 나타난다. 이러한 주름의 형태를 노말 맵 상에 재현하기 위해, 먼저 Fig. 4과 같이 주름이 계산될 영역을 설정한다. 살구색으로 표시된 영역(Fig. 4a)은 계산을 위한 임의의 범위이며, 검은색 선(Fig. 4b)은 사용자가 실제로 그린 주름 스케치이다. 이때, 살구색 영역 내의 한 점을 현재 점(Fig. 4c), 이 점과 가장 가까운 검은색 선 위의 점을 기준점(Fig. 4d)이라 정의한다. 이 두 점 간의 관계를 기반으로 노말 벡터들을 회전시켜, 뽀족하게 들어간 주름 형태를 만들어낸다.

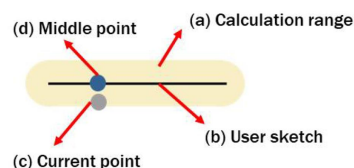


Fig. 4. Wrinkle calculation area.

주름이 자연스럽게 파여 보이기 위해서는, 노말 벡터들이 Fig. 4b를 향해 회전되어야 하며, 그 회전 강도는 기준 점과의 거리와 반비례해야 한다. 이를 위해 벡터 (Fig. 4d ~ Fig. 4c)를 사용해 회전 방향을 결정하고, Fig. 4b와 가까울수록 노말 벡터는  $z=0$  방향으로 더 많이 회전된다. 즉, 거리가 멀수록 가중치는 작아져 노말 벡터의 회전이 적고, 가까울수록 가중치가 커져 더욱 크게 회전하게 된다. 이와 같은 방식으로 주름의 형태를 만들어내며, 주름 생성을 위한 계산 벡터  $C^v$ 는 다음의 수식과 같이 정의된다 (수식 1 참조).

$$C^v = Nd_m + (M_{xyz} - N_{xyz})(1 - d_m) \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 현재 점 위치의 노말 벡터,  $d_m$ 은 중심점과 현재 점과의 거리,  $M_{xyz}$ 은 중심점 위치의  $(x, y, z)$ 벡터,  $N_{xyz}$ 은 현재 점 위치의  $(x, y, z)$ 벡터이다. 결과적으로, 사용자가 노말 맵 상에 주름을 스케치하면 Fig. 5와 같이 중심 라인을 기준으로 자연스럽게 파인 형태의 주름이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

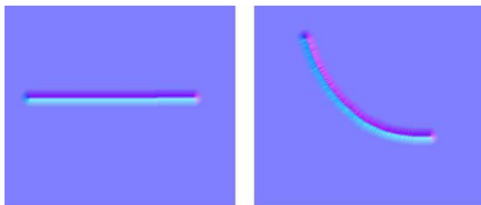


Fig. 5. The shape of wrinkles along the distance.

그러나 Fig. 6a에서 실제 주름의 단면을 살펴보면 단순히 들어간 형태만이 아니라, 중심이 약간 볼록하게 올라온 형태임을 확인할 수 있다. 이러한 특징을 반영하기 위해, 실제 주름의 형상과 유사한 곡선 그래프를 찾아내고, 거리 값과 해당 그래프의 수식을 활용하여 주름 형태를 볼록하게 변형한다. Fig. 6b의 값을 적용한 결과, Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 주름의 중심부는 가장 깊고, 가장자리로 갈수록 점차 완만해지는 그래프 형태의 그래디언션이 형성된 것을 볼 수 있다.

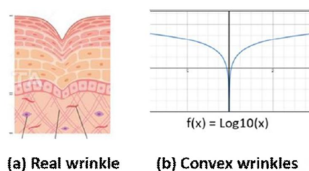


Fig. 6. Wrinkles form.

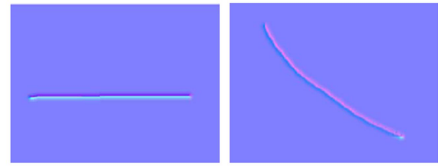


Fig. 7. Convex wrinkle application result.

## 2. Wrinkle Deformation

Fig. 3에서 주름의 표면을 자세히 보면, 실제 주름은 Fig. 7처럼 균일한 폭을 가지기보다는 양 끝에서 얇게 시작해 중앙에서 가장 넓은 형태를 띠고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 주름의 뾰족한 양 끝을 표현하기 위해 추가적인 설정 값을 적용하였다.

Fig. 8e의 분홍색 점은 주름 계산 영역의 양 끝점을 나타내며, 하늘색 선(Fig. 8f)은 주름을 절반으로 나누는 기준선으로, 중심을 기준으로 좌우 대칭의 뾰족한 형태를 만들기 위한 기준선이다. 주름을 뾰족하게 만들기 위해 계산 영역을 반으로 나눈 후, 각 영역 내에서 분홍색 점을 기준으로 마름모 형태, 즉 양 끝이 가늘고 중앙이 넓은 구조로 변형된다.

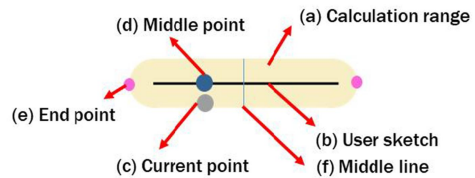


Fig. 8. Sharp wrinkle calculation area.

이러한 형태를 구현하기 위해, 수식 1에서 사용된 벡터  $(M_{xyz} - N_{xyz})$ 를 수정하여 주름의 모양을 조정한다. 이 벡터는 현재 점의 위치에서 시작하여  $z = 0$  방향으로 생성되며, 노말 벡터와 곱해져 주름 형성을 위한 계산 벡터를 만드는 데 사용된다. 주름 끝을 뾰족하게 하기 위해, 이 벡터에 Fig. 8e와 Fig. 8c 사이의 거리 값을 반영하여 형태에 변화를 주며, 구체적인 식은 수식 2에 제시되어 있다.

$$(M_{xyz} - N_{xyz})d_p + (0, 0, 1)(1 - d_p) \quad (2)$$

여기서  $d_p$ 는 Fig. 8e와 Fig. 8c 사이의 거리이다. 이 값을 바탕으로,  $(0, 0, 1)$ 벡터를 기준으로 하여 거리  $d_p$ 에 따라  $(M_{xyz} - N_{xyz})$ 벡터에 가중치를 부여한다. 그 결과, Fig. 7e에 가까울수록 벡터는  $(0, 0, 1)$ 에 가까운 방향으로 계산되고, 반대로 멀어질수록  $z = 0$ 평면상의

$(M_{xyz} - N_{xyz})$ 방향에 가까워지도록 조정된다. 이와 같은 가중치를 적용한 후 계산 벡터의 식을 새롭게 정의하면 다음과 같다 (수식 3 참조).

$$C^v = Nd_m + ((M_{xyz} - N_{xyz})d_p + (0,0,1)(1-d_p))(1-d_m) \quad (3)$$

결과적으로, Fig. 8e와의 거리가 가까운 경우에는 노말 벡터가 원래의 방향과 유사한 형태를 유지하고, 거리가 멀어질수록  $z=0$ 평면의 벡터 영향을 더 많이 받아 점점 수평에 가까운 방향으로 변하게 된다. 이러한 방식으로 주름을 계산하면, 사용자가 노말 맵에 스케치를 했을 때 Fig. 9 과 같이 중심이 안쪽으로 깊게 파이고 양 끝이 뾰족하게 마무리된 자연스러운 주름 형태가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

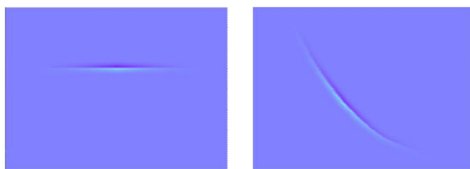


Fig. 9. Pointed at both ends wrinkle.

### 3. Texture Skin

가상현실 환경에서 보다 자연스러운 주름 표현을 위해, skin texture에 그림자를 추가하여 3D 모델에 적용했을 때 현실감 있는 결과가 나타나도록 구성하였다. 아래는 원본 이미지에 그림자 정보를 더해 생성한 변형 이미지이다. 주름 그림자의 색상은 실제 피부의 어두운 부분에서 추출하였으며, 주름 형태를 계산하는 방식과 동일한 방식으로 그림자도 주름의 곡선을 따라 자연스럽게 표현된다. 이로 인해 주름의 중심부는 어둡고, 가장자리로 갈수록 점점 열리는 형태의 그림자가 형성된다. 또한, 사용자 인터페이스를 통해 그림자의 진하기를 직접 조절할 수 있어, 강조하고자 하는 특정 주름을 선택적으로 더 뚜렷하게 표현할 수 있다.

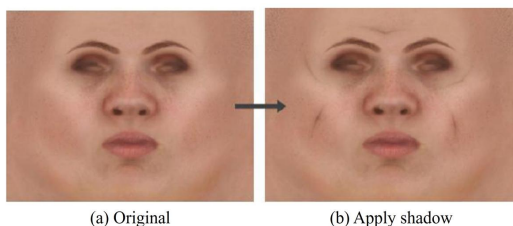
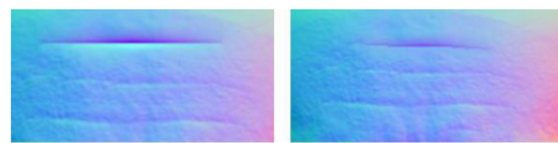


Fig. 10. Skin texture.

### 4. Wrinkle Magnitude

실제 주름은 얼굴의 부위나 크기에 따라 깊이나 강도가 다르게 나타나므로, 사용자에게 주름의 강도를 조절할 수 있는 기능을 제공한다. 주름의 강도는 현재 위치의 노말 벡터에 적용되는 가중치를 조정함으로써 제어된다. 계산 시 이 가중치가 클수록 노말 벡터는 기존 방향과 큰 차이를 보이지 않으며, 반대로 가중치가 작을수록 벡터의 변화 폭이 커져 더 뚜렷한 주름이 형성된다. 이러한 특성을 활용해 사용자가 주름을 더 진하게 또는 더 약하게 조절할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 11에서 확인할 수 있다.



(a) Deep wrinkle (b) Weak wrinkle

Fig. 11. Wrinkles according to intensity.

### 5. Controlling Shape of Wrinkle

앞서 언급했듯이 주름은 생성 위치나 연령에 따라 형태가 달라진다. Fig. 12a은 일반적인 주름 형태를 보여주며, 피부가 팽팽한 경우 보통 이와 같은 모양으로 나타난다. 반면, 나이가 들어 피부가 처지거나 해당 부위에 살이 많은 경우에는 Fig. 12b와 같이 주름이 볼록하게 형성되는 경향이 있다. 각 그래프는 이러한 주름 형태를 수학적으로 표현하기 위한 함수와 그에 따른 곡선이다.

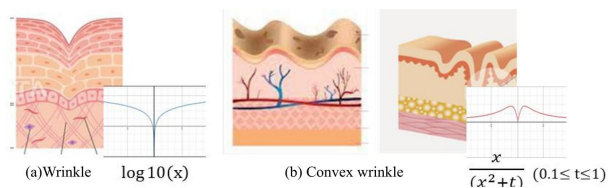


Fig. 12. Form of wrinkles.

Fig. 12a은 기존에 적용된 함수로, Fig. 6에서 설명한 것과 동일한 방식이다. 하지만 이 함수만으로는 피부가 두껍거나 처진 부위의 특징을 충분히 반영하기 어렵기 때문에, Fig. 12b에서는 별도의 그래프와 함수를 정의하여 적용한다. Fig. 12b의 함수를 사용한 결과는 Fig. 13에서 확인할 수 있으며, 주름이 들어갔다 다시 올라오는 형태가 Fig. 12a와는 다르게 표현됨을 볼 수 있다. 이때 주름의 볼록한 정도는 일정하지 않고, 연령이나 부위에 따라 달라지기 때문에 Fig. 13b에서는 변수  $t$ 를 통해 이러한 차이를 반영한다.  $t$ 의 값이 작을수록 주름이 더 볼록하게 표현되며, 값이 커질수록 평평한 형태로 나타난다.

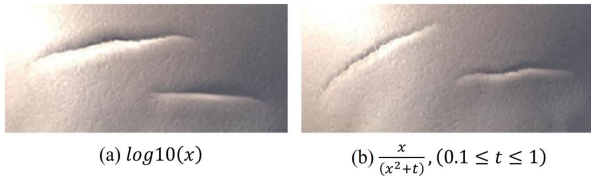


Fig. 13. Shape modeling test of wrinkles.

### 6. Fine Wrinkles

사람의 피부에는 깊은 주름 주변에 자연스럽게 열린 잔주름이 함께 형성되는 특징이 있다. 특히 눈가, 입가, 이마처럼 자주 움직이는 부위에 이러한 잔주름이 많이 나타난다. 이러한 특성을 반영하기 위해, 본 시스템에서는 주요 주름 주변에 잔주름을 자동으로 생성하는 기능을 구현하였다.

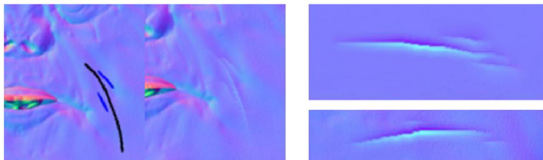


Fig. 14. Find wrinkles.

잔주름은 깊은 주름과 유사한 방향성을 가지며 형성되기 때문에, 기존의 진한 주름 일부를 기반으로 만들어진다. 구체적으로는, 주요 주름의 일부분을 무작위로 선택해 복사한 후, 계산 범위 내의 랜덤한 위치에 잔주름을 생성하여 적용한다. 이를 통해 Fig. 14와 같이 깊은 주름의 흐름과 유사한 방향을 가진 짧고 열린 잔주름이 자연스럽게 나타나게 된다. 잔주름의 개수는 사용자의 나이에 따라 0개에서 최대 7개까지 자동으로 조절된다.

### 7. Localization

얼굴의 부위마다 주름이 형성되는 방식이 다르기 때문에, 앞서 구현한 잔주름 생성 방식이나 볼록한 주름 형태를 모든 얼굴 부위에 동일하게 적용하는 것은 적절하지 않다. 예를 들어, 잔주름은 주로 눈가, 입가, 이마 등에 나타나며, 볼록한 주름 형태는 볼 부위에 적용되어야 자연스럽게 사실적인 표현이 가능하다.

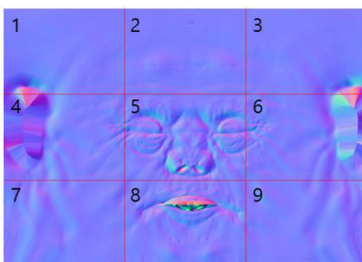


Fig. 15. Split 9 faces.

이를 위해 Fig. 15와 같이 얼굴을 9개의 영역으로 분할하여, 주름이 그려진 위치를 판단할 수 있도록 하였다. 잔주름은 영역 2, 4, 6, 7, 9에 적용되며, 볼록한 주름 형태는 주로 7번과 9번 영역에 반영된다. 주름의 위치는 그 중심 좌표를 기준으로 해당 영역을 판별하여 적용하게 된다.

## IV. Experiment and Results

본 절에서는 제안하는 커널 기반 피부-근육 모델링 기법의 실제 적용 가능성과 성능을 평가하고자 한다. 특히 스케치 기반 주름 생성에서의 사실성, 사용 편의성, 계산 효율성을 중심으로 검증하며, 기존 방식과의 비교를 통해 제안 기법의 우수성을 입증한다.

실험은 다음과 같은 환경과 조건에서 수행되었다.

| 항목         | 내용  |
|------------|---|
| 하드웨어 사양    | Intel Core i7-12700K, 32GB RAM, NVIDIA RTX 3060 GPU |
| 운영체제 및 플랫폼 | Windows 11, Unity 2022 기반 테스트 환경                    |
| 참가자 구성     | 총 10명 (디자인 전공자 5명, 일반 사용자 5명)                       |
| 테스트 구성     | 기본 얼굴 모델의 이마, 눈가, 입가 등 3개 부위에 대해 동일한 스케치 입력 수행      |
| 비교 대상 기법   | (1) 전통적인 브러시 기반 모델링 툴<br>(2) 단순 스케치 드로잉 방식          |

### 1. Qualitative Evaluation

입력된 스케치에 대해 주름 생성 결과를 시각적으로 비교하였다.

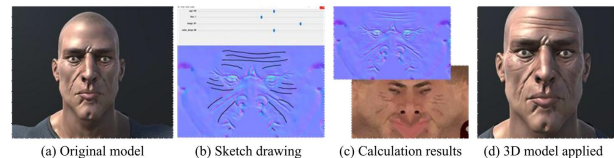


Fig. 16. Overall process and end result.

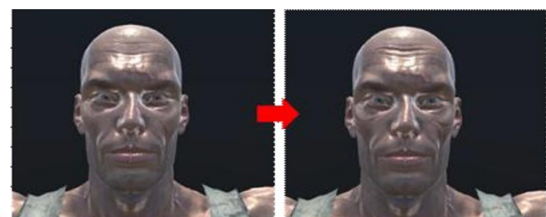


Fig. 17. Another result1.

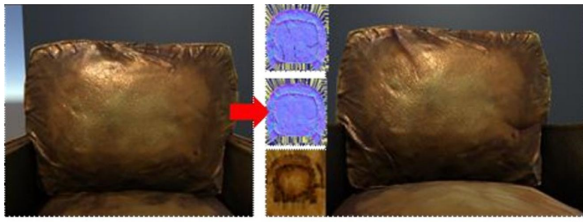


Fig. 18. Another result2.

제안 기법은 커널 함수에 기반하여 입력 주변 영역에 자연스러운 곡률 변화가 발생하며, 실제 피부 패턴과 방향을 잘 반영한 주름이 생성됨을 확인하였다 (Figure 16~18 참조).

Fig. 16부터 Fig. 18은 제안한 커널 기반 주름 생성 시스템을 통해 생성된 실제 결과물로, 입력된 스케치에 따라 주름이 어떻게 생성되고, 그것이 기존 방식과 비교해 어떤 시각적 차이를 가지는지를 보여준다. 각 결과는 눈가, 입가, 이마 등 주요 부위에서 생성된 주름의 시각적 자연스러움과 구조적 정합성을 강조하며, 다음과 같은 특징과 장점을 확인할 수 있다.

Fig. 16에서는 사용자가 입력한 스케치 선이 커널 함수를 통해 주변 영역으로 확산되며, 해당 부위의 노멀 맵 및 스킨 텍스처가 부드럽고 연속적인 주름 형태로 변형된 결과를 보여준다. 기존 방식의 경우 단순한 굴곡 표현에 그치거나 주름 경계가 경직되어 보이는 반면, 제안 기법은 스케치의 방향성과 굽기를 반영하여 시각적으로 부드럽고 신체 구조에 부합하는 주름이 형성된다.

Fig. 17과 Fig. 18은 눈가와 입가, 그리고 쿠션처럼 곡률이 큰 영역에서의 결과를 제시한다. 특히 곡면이 강조되는 눈가 부위에서는 기존 기법이 평면 기반의 일률적 주름 표현에 그친 반면, 제안 기법은 커널의 지역 확산 효과에 의해 곡면의 방향성을 보존하면서도 주름의 굴곡이 자연스럽게 표현된다. 이는 얼굴의 해부학적 특성과 일치하는 주름 흐름을 생성할 수 있음을 의미하며, 입체적 표면 대응 능력 측면에서 제안 기법이 우수함을 보여준다.

세 그림 모두에서 제안 기법은 단순한 선형 굴곡이 아닌, 실제 피부 조직의 물리적 특성과 방향성에 부합하는 결과를 생성한다. 이는 커널 함수가 단순한 스케치 선에만 반응하는 것이 아니라, 주변 질점 간의 공간적 연계성 (spatial continuity)을 고려함으로써 입력 대비 풍부한 시각적 디테일을 자동으로 생성할 수 있기 때문이다.

기존 브러시 기반 방식이나 단순 스케치 드로잉 방식은 주름 형태를 정밀하게 구현하기 위해 많은 수작업이 필요했던 반면, 제안된 시스템은 간단한 스케치 입력만으로도 높은 시각적 완성도를 보장할 수 있다. 이는 Fig. 16~18의 결과에서 명확히 드러나며, 특히 사용자 경험(User

Experience) 측면에서 작업 효율성과 편의성의 향상을 입증하는 근거가 된다.

## 2. Quantitative Evaluation

제안한 기법의 정량적 성능을 평가하기 위해 주름 생성 시간과 시각적 유사도(visual similarity)를 중심으로 기존 방식과 비교 실험을 수행하였다. 먼저 주름 생성 시간 측면에서는 제안 기법이 평균 1.2초( $\pm 0.3$ 초)로 측정되었으며, 이는 기존 브러시 기반 방식의 평균 2.1초( $\pm 0.5$ 초), 그리고 단순 스케치 기반 방식의 평균 1.8초( $\pm 0.4$ 초)에 비해 약 40% 이상 빠른 처리 속도를 보였다. 이러한 결과는 실시간 상호작용이 중요한 인터페이스 환경에서 제안 기법의 우수한 반응성을 입증한다.

또한, 주름의 시각적 품질을 평가하기 위해 SSIM(Structural Similarity Index)을 활용한 유사도 분석을 수행하였다. 이상적인 주름 패턴을 기준으로 비교한 결과, 근육 수축을 고려하는 커널 기반 모델인 제안 기법은 평균 0.87의 높은 유사도를 보인 반면, 기존 방식은 평균 0.73 수준에 그쳐 시각적 정밀도 측면에서도 제안 기법의 우수성이 확인되었다.

## 3. Summary and Interpretation of Results

실험 결과, 제안한 커널 기반 모델링 기법은 기존 방식에 비해 시각적 사실성과 생성 속도, 사용자 편의성 측면에서 전반적으로 우수한 성능을 보였다. 특히 커널 함수를 통해 입력 스케치의 공간적 영향이 주변 영역으로 확산되어, 피부 표면에 연속적으로 연결된 주름이 형성되는 구조적 특성이 시각적으로도 높은 일관성을 제공하였다. 이는 피부의 물리적 특성과 시각적 자연스러움을 동시에 반영하는 데 효과적인 접근임을 입증한다.

본 연구는 전통적인 의미의 실시간 렌더링 성능(예: 프레임률 향상, GPU 셰이더 최적화 등)을 직접적으로 다루고 있지는 않지만, 사용자 입력에 대해 즉각적인 시각 피드백을 제공하는 인터랙티브 반응성을 핵심 목표로 하고 있다. 이에 따라, 제안 기법의 효율성과 실용성을 입증하기 위해 입력 스케치에 대한 평균 처리 시간, 시스템 자원 사용량, 사용자 체감 반응 속도 등을 기반으로 하는 경량화 성능에 대한 자세한 분석이 함께 수행되어야 한다.

향후 연구에서는 다양한 하드웨어 환경에서의 반응 시간 측정과 더불어, 입력 복잡도에 따른 처리 부하 변화, 유사 기법과의 연산량 비교 등도 병행하여 제안 기법의 계산 효율성과 접근 방식의 당위성을 보다 구체적으로 정량화할 계획이다. 이러한 분석은 제안 시스템이 고성능 그래픽

환경뿐만 아니라, 실시간 응답이 요구되는 인터랙티브 콘텐츠 제작 도구로서도 충분한 실용성을 갖추고 있음을 입증하는 데 기여할 것으로 기대된다.

## V. Conclusion

본 논문에서는 기존의 얼굴 주름 생성 방식들이 가지는 한계를 극복하고, 사용자의 직관적인 스케치 입력을 기반으로 피부 질감과 근육 구조를 고려한 사실적인 주름을 자동 생성하는 효율적인 인터페이스를 제안하였다. 제안된 시스템은 복잡한 파라미터 조정이나 고가의 스캐닝 장비 없이도, 단순한 스케치 입력만으로 고해상도의 얼굴 모델에 정밀한 주름을 표현할 수 있도록 지원한다.

특히, 본 연구에서는 커널 기반의 피부-근육 모델링을 도입함으로써, 사용자 스케치의 위치와 방향성을 기반으로 노멀 맵을 실시간으로 변형하고, 피부의 깊이, 굴곡, 그림자 효과 등을 정밀하게 반영하였다. 또한, 얼굴의 영역을 세분화하여 부위별로 다른 주름 형태를 적용하고, 나이 파라미터를 통해 잔주름 및 볼록한 주름의 형태를 자동 조절할 수 있도록 하여 더욱 자연스러운 결과를 도출하였다. 이러한 방식은 실제 피부의 생리적 구조와 노화 과정을 시뮬레이션하는 데에도 유용하며, 시각적 사실감 및 사용자 편의성 모두를 만족시키는 성과를 거두었다.

실험 결과, 본 시스템은 다양한 연령대 및 표정에 따른 주름을 효과적으로 재현할 수 있었으며, 단순한 사용자 입력만으로도 높은 수준의 몰입감과 표현력을 제공하였다. 더 나아가, 본 기술은 디지털 휴먼 제작, 가상현실 기반 콘텐츠, 게임 캐릭터 디자인, 특수 분장 시뮬레이션, 법의학적 얼굴 복원 등 다양한 분야에 적용 가능성을 지니고 있다.

본 연구에서는 커널 기반 피부-근육 모델링 기법을 바탕으로, 사용자 스케치 입력에 따라 사실적이고 직관적인 얼굴 주름을 실시간으로 생성할 수 있는 시스템을 제안하였다. 실험을 통해 제안 기법의 시각적 자연성과 사용 편의성을 확인할 수 있었으나, 실험 설계 및 결과 분석 측면에서 일부 제한점이 존재함을 확인하였다. 특히, 다양한 스케치 유형에 따른 주름 반응, 얼굴 부위별 특성 반영, 연령대에 따른 주름 표현의 적절성 등을 다각도로 검증하기 위한 체계적인 실험 구성이 미흡하였으며, 결과의 일반성과 재현 가능성을 평가하기 위한 통계적 분석 또한 향후 보완이 필요한 부분이다. 따라서 후속 연구에서는 다양한 입력 조건(스케치 패턴, 부위, 연령 등)을 조합한 정량적 실험 설계를 수행하고, 전문가 평가 및 사용자 인지 실험

을 병행함으로써, 제안 기법의 기술적 유효성과 실용적 적용 가능성을 보다 심층적으로 입증할 계획이다. 이러한 확장은 제안 방식의 범용성과 학문적 기여를 한층 강화하는데 기여할 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 현재 시스템의 정밀도와 실시간 성능을 더욱 향상시키고, 머신러닝 기반의 사용자 스케치 해석 기능을 도입함으로써 더욱 지능적이고 자동화된 주름 생성 프레임워크로 확장할 계획이다. 또한, 피부 색조 변화나 탄성 표현 등 피부의 복합적인 시각 요소를 통합하는 방안도 고려하고 있으며, 이를 통해 더욱 사실적이고 몰입감 높은 가상 얼굴 표현 기술을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

The National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2023-00254695, Contribution Rate : 50%). This work was 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), Contribution Rate : 50%)

## REFERENCES

- [1] Serup, Jorgen, Gregor BE Jemec, and Gary L. Grove. Handbook of non-invasive methods and the skin. CRC press, 2006.
- [2] Fu, Yun, Guodong Guo, and Thomas S. Huang. "Age synthesis and estimation via faces: A survey." *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 32.11, pp. 1955-1976, 2010. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.36
- [3] Makeup, Best. "Special Makeup Effects for Stage and Screen." DOI: 10.4324/9781315169835
- [4] Golovinskiy, Aleksey, et al. "A statistical model for synthesis of detailed facial geometry." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 25.3, pp. 1025-1034, 2006. DOI: 10.1145/1179352.114198
- [5] Bickel, Bernd, et al. "Multi-scale capture of facial geometry and motion." *ACM transactions on graphics (TOG)* 26.3, pp. 33, 2007. DOI: 10.1145/1276377.1276419
- [6] Li, Li, et al. "Realistic wrinkle generation for 3D face modeling based on automatically extracted curves and improved shape

- control functions." *Computers & Graphics* 35.1, pp. 175-184, 2011. DOI: 10.1016/j.cag.2010.08.003
- [7] Graham, Paul, et al. "Measurement-based synthesis of facial microgeometry." *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*. pp. 1, 2012. DOI: 10.1145/2343045.234305
- [8] Kim, H. J., Oeztireli, A. C., Shin, I. K., Gross, M., & Choi, S. M. "Interactive generation of realistic facial wrinkles from sketchy drawings". In *Computer Graphics Forum*, vol. 34, no. 2, pp. 179-191, 2015. DOI: 10.1111/cgf.12551
- [9] Mancusi, Stephen. *The police composite sketch*. Springer Science & Business Media, 2010. DOI: 10.1007/978-1-60761-832-4
- [10] Noris, Gioacchino, et al. "Smart scribbles for sketch segmentation." *Computer Graphics Forum*. vol. 31. no. 8. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2012. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03224.x
- [11] Igarashi, Takanori, Ko Nishino, and Shree K. Nayar. "The appearance of human skin: A survey." *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, vol. 3, no. 1, pp. 1-95, 2007. DOI: 10.1561/06000000013
- [12] Boissieux, Laurence, et al. "Simulation of skin aging and wrinkles with cosmetics insight." *Computer Animation and Simulation 2000: Proceedings of the Eurographics Workshop in Interlaken, Switzerland, August*, pp. 21-22, 2000. DOI: 10.1007/978-3-7091-6344-3\_2
- [13] Magnenat-Thalmann, Nadia, et al. "A computational skin model: fold and wrinkle formation." *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, vol. 6, no. 4, pp. 317-323, 2002. DOI: 10.1109/TITB.2002.806097
- [14] Li, Pengbo, and Paul G. Kry. "Multi-layer skin simulation with adaptive constraints." *Proceedings of the Seventh International Conference on Motion in Games*. 2014. DOI: 10.1145/2668064.266808
- [15] Terzopoulos, Demetri, and Keith Waters. "Physically-based facial modelling, analysis, and animation." *The journal of visualization and computer animation*, vol. 1, no. 2, pp. 73-80, 1990. DOI: 10.1002/vis.4340010208
- [16] Wu, Yin, Nadia Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. "A plastic-visco-elastic model for wrinkles in facial animation and skin aging." *Fundamentals of Computer Graphics*. pp. 201-213, 1994.
- [17] Waters, Keith. "A muscle model for animation three-dimensional facial expression." *Acm siggraph computer graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 17-24, 1987. DOI: 10.1142/9789814503860\_0013
- [18] Zhang, Yu, Edmond C. Prakash, and Eric Sung. "Real-time physically-based facial expression animation using mass-spring system." *Proceedings. Computer Graphics International*, pp.347-350, 2001. DOI: 10.1109/CGI.2001.934696
- [19] Zhang, Yu, Edmond C. Prakash, and Eric Sung. "A new physical model with multilayer architecture for facial expression animation using dynamic adaptive mesh." *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, vol. 10, no. 3, pp. 339-352, 2004. DOI: 10.1109/TVCG.2004.1272733
- [20] Zhang, Yu, et al. "Anatomy-based face reconstruction for animation using multi-layer deformation." *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 17, no. 2, pp. 126-160, 2006. DOI: 10.1016/j.jvlc.2005.10.002
- [21] Venkataraman, Kartik, Suresh Lodha, and Raghu Raghavan. "A kinematic-variational model for animating skin with wrinkles." *Computers & Graphics*, vol. 29, no. 5, pp. 756-770, 2005. DOI: 10.1016/j.cag.2005.08.024
- [22] Wang, Yu, Charlie CL Wang, and Matthew MF Yuen. "Fast energy-based surface wrinkle modeling." *Computers & Graphics*, vol. 30, no. 1, pp. 111-125, 2006. DOI: 10.1016/j.cag.2005.10.010
- [23] Rohmer, Damien, et al. "Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles." *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, vol. 29, no. 6, pp. 1-8, 2010. DOI: 10.1145/1882261.18661
- [24] Bando, Yosuke, Takaaki Kuratate, and Tomoyuki Nishita. "A simple method for modeling wrinkles on human skin." *10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp. 166-175, 2002. DOI: 10.1109/PCCGA.2002.1167852
- [25] Larboulette, Caroline, and M-P. Cani. "Real-time dynamic wrinkles." *Proceedings Computer Graphics International*, pp. 522-525, 2004. DOI: 10.1109/CGI.2004.1309258
- [26] Zhang, Yu, and Terence Sim. "Realistic and efficient wrinkle simulation using an anatomy-based face model with adaptive refinement." *International 2005 Computer Graphics*, pp. 3-10, 2005. DOI: 10.1109/CGI.2005.1500352
- [27] Cutler, Lawrence D., et al. "An art-directed wrinkle system for CG character clothing." *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 117-125, 2005. DOI: 10.1145/1073368.10733
- [28] Li, Yi-bo, Hong Xiao, and Sen-yue Zhang. "The wrinkle generation method for facial reconstruction based on extraction of partition wrinkle line features and fractal interpolation." *Fourth International Conference on Image and Graphics (ICIG 2007)*, pp. 933-937, 2007. DOI: 10.1109/ICIG.2007.96
- [29] Blanz, Volker, and Thomas Vetter. "A morphable model for the synthesis of 3D faces." *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*, vol. 2, pp. 157-164, 2023. DOI: 10.1145/311535.311556
- [30] Paysan, Pascal, et al. "A 3D face model for pose and illumination invariant face recognition." *2009 sixth IEEE international conference on advanced video and signal based surveillance*. pp. 296-301, 2009. DOI: 10.1109/AVSS.2009.58
- [31] Scherbaum, Kristina, et al. "Prediction of individual non-linear aging trajectories of faces." *Computer Graphics Forum*. Vol. 26. No. 3. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, vol. 26, no. 3,

- pp. 285-294, 2007. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2007.01050.x
- [32] Sucontphunt, Tanasai, et al. "Crafting 3d faces using free form portrait sketching and plausible texture inference." *Proceedings of graphics interface*, pp. 209-216, 2010.
- [33] Feng, Wei-Wen, Byung-Uck Kim, and Yizhou Yu. "Real-time data driven deformation using kernel canonical correlation analysis." *ACM SIGGRAPH 2008 papers*. pp. 1-9, 2008. DOI: 10.1145/1360612.1360690
- [34] Ma, Xiaohan, Binh Huy Le, and Zhigang Deng. "Style learning and transferring for facial animation editing." *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. pp. 123-132, 2009. DOI: 10.1145/1599470.159948
- [35] Bickel, Bernd, et al. "Pose-Space Animation and Transfer of Facial Details." *Symposium on computer animation*. pp. 57-66, 2008. DOI: 10.2312/SCA/SCA08/057-066
- [36] Ma, Wan-Chun, et al. "Facial performance synthesis using deformation-driven polynomial displacement maps." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 27, no. 5, pp. 1-10, 2008. DOI: 10.1145/1457515.1409074
- [37] Alexander, Oleg, et al. "The digital emily project: Achieving a photorealistic digital actor." *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 20-31, 2010. DOI: 10.1109/MCG.2010.65
- [38] Bermano, Amit H., et al. "Facial performance enhancement using dynamic shape space analysis." *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 33, no. 2, pp. 1-12, 2014. DOI: 10.1145/2546276
- [39] Ding, Chao, and Ligang Liu. "A survey of sketch based modeling systems." *Frontiers of Computer Science*, vol. 10, pp. 985-999, 2016. DOI: 10.1109/CGIV.2014.27
- [40] Akeo, Makoto, et al. "Computer Graphics System for Reproducing Three-Dimensional Shape from Idea Sketch." *Computer Graphics Forum*. vol. 13. no. 3. pp. 477-488, 1994. DOI: 10.1111/1467-8659.1330477
- [41] Zeleznik, Robert C., Kenneth P. Herndon, and John F. Hughes. "SKETCH: An interface for sketching 3D scenes." *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*. pp. 9, 2006. DOI: 10.1145/237170.237238
- [42] Igarashi, Takeo, Satoshi Matsuoka, and Hidehiko Tanaka. "Teddy: a sketching interface for 3D freeform design." *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, pp. 11, 2006. DOI: 10.1145/311535.311602
- [43] Gingold, Yotam, Takeo Igarashi, and Denis Zorin. "Structured annotations for 2D-to-3D modeling." *ACM SIGGRAPH Asia 2009*, pp. 1-9, 2009. DOI: 10.1145/1661412.1618494
- [44] Olsen, Luke, et al. "Sketch-Based Mesh Augmentation." *SBM*. pp. 43-52, 2005. DOI: 10.1109/SIBGRAP.2011.31
- [45] Zhou, Kun, et al. "Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian." *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. pp. 496-503, 2005. DOI: 10.1145/1073204.1073219
- [46] Nealen, Andrew, et al. "Fibermesh: designing freeform surfaces with 3d curves." *ACM SIGGRAPH 2007 papers*. pp. 41, 2007. DOI: 10.1145/1276377.1276429
- [47] Kraevoy, Vladislav, Alla Sheffer, and Michiel Van De Panne. "Modeling from contour drawings." *Proceedings of the 6th Eurographics Symposium on Sketch-Based interfaces and Modeling*. pp. 37-44, 2009. DOI: 10.1145/1572741.1572749
- [48] Olsen, Luke, et al. "Sketch-based modeling: A survey." *Computers & Graphics*, vol. 33, no. 1, pp. 85-103, 2009. DOI: 10.1016/j.cag.2008.09.013

## 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.