디지털 액터 창조를 위한 연구 주제 몇 가지†

서울대학교 고형석*·최광진·최민규
탁세윤·최병원·송오영

1. 서 론

21세기 컴퓨터 그래픽 분야에서 가장 흥미로운 도전이라면 바로 디지털 액터를 창조하는 일일 것이다. 디지털 액터란 컴퓨터 그래픽스 기술로 만들어진 액터로, 사진으로 찍은 것인지 아니면 애니메이션인지 구별할 수 없을 정도로 실제 인간과 유사하게 보이는 것이 그 특징이다.

우리는 「스튜어트 리틀」[6]에 등장하는 동물 캐릭터를 디지털 액터라고 말하지는 않는다. 사실 동물 캐릭터를 애니메이션 하는 것은 디지털 액터를 애니메이션 하는 것보다 쉽다. 그것은 인간에게 가장 익숙한 존재가 바로 '인간'인 까닭에 관객들은 디지털 액터의 행동이나 표현이 조금이라도 어색할 경우 놀랄만큼 빨리 눈치를 채기 때문이다. 진정한 디지털 액터란 관객들이 그들을 실제 인간과 구별할 수 없을 정도로 정교하게 만들어져야만 한다. 예를 들어, 「토이스토리」[2]에 나오는 주인공 앤디는 영화에서는 인형이 아닌 인간이었음에도 불구하고 관객들에게 실제 인간으로 받아들여지지 못했다. 그런 의미에서 앤디는 디지털 배우라고 할 수 없다. 다른 예를 보자. 「타이타닉」[4]의 여러 장면 중에서 타이타닉호가 영국을 떠날 때 배 위에 타고 있었던 수천 명의 엑스트라들은 앤디와 마찬가지로 컴퓨터 그래픽으로 만들어졌다. 그러나 관객들은 그들을 실제 인간으로 받아들였고, 그 때문에 우리는 그들 엑스트라들을 디지털 배우라고 부를 수 있는 것이다.

디지털 액터를 만드는 일은 매우 어렵다. 컴퓨터 그래픽스의 거의 모든 분야가 동원되어야만 한다. 비록 디지털 액터 창조 기술의 잠재성을 「타이타닉」과 같은 영화에서 확인했다 하더라도, 아직까지는 실제 인간을 대신해서 영화의 주연 혹은 조연배우로 디지털 액터를 쓰기에는 그 기술력이 부족한 실정이다.

디지털 액터를 창조함에 있어 우리는 보다 핵심적인 부분에 관심을 집중시킬 필요가 있다. 그러므로 디지털 액터의 문제에서 인공지능이나 자율 행동 등은 배제하기로 한다. 애니메이터의 손을 직접 거친 작업과정이 들어가는 것도 지나치지 않다면 무방하다. 디지털 액터 연구의 초점은 결과적으로 얻어지는 디지털 액터의 외모와 동작의 사실성에 둔다.

서울대학교 그래픽스 & 미디어 랩에서는 디지털 액터 창조에 요구되는 기술을 개발하고 통합하기 위한 연구를 수행하고 있다. 특히 디지털 액터를 실제 인간과 유사하게 만드는 데 중요한 얼굴, 머리카락, 몸 등 신체 각 부분과 의상 애니메이션에 연구의 초점을 맞추고 있다. 이 글은 이러한 연구주제에 대한 본 랩의 연구 결과를 요약하고, 그동안 디지털 액터 연구에 적용된 접근방법을 보여주며, 앞으로 해결해야 할 또 다른 문제들을 소개하여 이 분야에 대한 관심을 환기시켜 줄 것이다.

2. 얼굴 애니메이션

디지털 액터 기술 분야에서 가장 흥미로운 부분은 사람의 얼굴을 사실적으로 재현해 내는 것이다. 얼굴은 사람의 몸 전체에서 작은 영역을 차지하고 있지만 캐릭터의 내적 상태 혹은 정보를 보여주는 핵심적인 역할을 하기 때문이다. 모든 사람은 가상의 캐릭터를 포함, 다른 사람들의 얼굴 표정을 아주

---

* 종신회원
† 본 글은 정보통신부, 서울대학교 자동화시스템 공동연구소(ASRI), BK21, 서울대학교 간접 연구 경비의 지원을 받아 수행되었다.

쉽게 알아볼 수 있는데, 이러한 이유로 디지털 액터의 얼굴을 모델링, 애니메이션, 렌더링 하는 작업에는 몸의 다른 부분보다 더욱 높은 수준의 정확도와 사실성이 요구 되어진다.

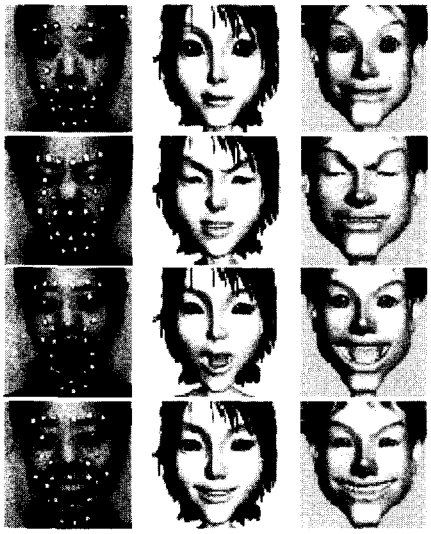


그림 1 실제 사람의 표정(왼쪽)과 이 표정을 다른 컴퓨터 모델들에게 전이시킨 결과(가운데와 오른쪽)

본 랩에서는 많은 연구 끝에 표정 캡처 데이터를 변형 기저(deformation basis)[16]의 선형 조합(liner combination)으로 분석하는 방법을 개발하였다. 변형 기저를 모델링 함에 있어 우리는 아티스트의 모델링 능력을 고려, 아티스트가 먼저 근육 작용 기저(muscle actuation basis)라고 불리는 얼굴 표정의 형상들을 직접 모델링하였다. 그림 1에서 그 결과를 볼 수 있다. 이 기저의 각 요소들은 하나의 표정근은 완전히 수축되고 다른 표정근들이 이완되었을 때의 얼굴 형상을 보여준다. 기저가 완성되면 (1) 기저 요소들의 가중치에 따른 표정을 재생해 낼 수 있고, (2) 그 가중치 값을 바꾸는 것만으로 표정을 편집할 수 있고, (3) 같은 구조의 변형 기저를 가진 다른 얼굴 컴퓨터 모델들에 분석된 가중치를 적용함으로써 다른 얼굴에 표정을 전이(retarget)할 수도 있다.

컴퓨터로 사람의 얼굴을 실제처럼 만들어 내기 위해서는 다음의 몇 가지 과제들이 해결되어야 한다.

1. 눈과 치아 등을 모두 포함한 얼굴 형상의 정확한 모델링
2. 피부의 반사 성질을 정확하게 반영한 얼굴 표면 렌더링
3. 실제 피부 변형에 근거를 둔 모든 표정의 애니메이션

2.1 3차원 형상 모델링

각 개인의 얼굴 형상을 얻어내기 위해서는 3차원 스캐너가 널리 이용된다. 3차원 스캐너는 조밀한 데이터를 만들어내므로 애니메이션과 같은 후속작업을 위해서는 간략화한 메쉬를 얻어내야 한다. Terzopoulos등은[77,50] 레이저 스캔 데이터에 적합하도록 일반적인 메쉬의 정점 좌표를 수정함으로써 인간의 얼굴 모델을 고안했다. Blanz와 Vetter는[8] 레이저 스캐너로 얻어진 3차원 형상 및 텍스터 데이터베이스를 이용하여 단지 한 두장의 사진만으로 3차원 얼굴을 재현해 냈다. 스캐너 사용에 대한 대안으로 Pighin등은[65] 영상 기반 모델링 기술을 소개하였는데, 5장의 사진으로부터 얼굴의 3차원 형상 및 텍스처를 재현해 냈다. 그러나 현재까지 눈, 치아, 혀 등은 수작업으로 모델링 되고 있다.

2.2 렌더링

기존에 제안되었던 렌더링 기술로는 플라스틱처럼 반짝거리는 얼굴이 만들어져 더 사실적인 렌더링 기술이 요구되고 있었다. 최근에 개발된 얼굴 렌더링 알고리듬들은 정교한 피부 반사 모델을 적용함으로써 사진처럼 사실적인 얼굴 렌더링이 가능하다는 것을 보여주었다. Pighin등은[65] 사진으로부터 세세한 주름까지 표현할 정도의 고화질 텍스처를 추출해 냈으나, 사진을 찍을 때와 다른 조명 환경에서는 얼굴을 정확하게 렌더링 할 수 없었다. 임의의 조명 조건에서 얼굴을 렌더링 하기 위해 Marschner 등은[57] 쌍방향 반사 분포 함수(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 모델을 이용하였는데, 이때 각 얼굴마다 알베도 맵(albedo map)을 측정하여 최종 렌더링 결과를 얻어내었다. Jensen 등은[38] 사람의 피부가 복잡한 표면 밑 분산(subsurface scattering)특성을 지니고 있음에 주목하고, 피부 표면 밑 분산 성분을 측정하여 쌍방향 표면 분산 분포함수(Bidirectional Surface Scattering Distribution Function, BSSRDF) 모델을 사용하여 보다 자연스러운 얼굴 렌더링 작업을 하였

다. Debevec등은[21] 개개인의 피부 반사 성질을 알아내기 위해 서로 다른 조명 환경과 시점에서 얼굴 이미지를 수집하였고, 이 이미지들을 이용하여 영상 기반 반사함수를 구성하였다. 이 영상 기반 함수를 이용하여 그들은 임의의 조명 환경과 시점에서 자연스러운 얼굴 렌더링 작업을 할 수 있었다.

2.3 애니메이션

Parke의[62] 선구적인 연구 이후, 많은 얼굴 애니메이션 알고리듬이 각 알고리듬에 사용될 변형 모델과 함께 제시되어 왔다. 이 분야의 선행 연구를 모두 소개하다 보면 이 글이 너무 방대해지므로, 최근 개발된 몇몇 혁신적인 연구들만을 소개하기로 한다. 보다 자세한 내용은 Parke와 Warers의[63] 책을 참고하기를 바란다.

- **물리 기반 애니메이션** - Waters는[86] 벡터 근육 모델을 이용하여 표정을 만들어 내는 해부학 기반 애니메이션 기법을 처음으로 제시하였다. Terzopoulos등은[77,50] 표정근 수축에 의한 얼굴 표면 변형을 질량 스프링 시스템에 기반을 둔 계층적 피부 모델을 사용하여 실험하였고, 입력 값인 근육의 수축 값을 스네익스(snakes)[78]를 사용하여 비디오에 녹화된 얼굴 표정으로부터 추출하였다. Essa등은[22,23] 유한요소 기법을 이용하여 피부 표면을 모델링하였고, 피드백 제어이론을 사용하여 피부 변형으로부터 근육의 수축 값을 찾아냈다. Kähler등은[39] 두개골 정보로부터 얼굴 전체를 복원해 내는 해부학 기반 얼굴 모델을 제시하였고, 역학 근육 모델을 이용하여 얼굴 애니메이션을 생성해 냈다.

- **연기(演技) 기반 애니메이션** - Williams는[87] 얼굴 표면의 소수 특징점들을 추적하여 얼굴 전체의 움직임을 근사해 내는 연기 기반 애니메이션을 최초로 도입했다. Guenter등은[31] 얼굴 표면 위의 아주 많은 점을 추적, 복잡한 피부 변형을 보여 주었다. Noh와 Neumann은[61] 광학식 캡처 장비를 통해 얻은 소수의 특징점의 동작으로부터 얼굴 표정을 복원해 냈고, 이 동작 벡터를 다른 형태의 메쉬를 지닌 얼굴 모델에 전이시키는 표정 변경 기술을 제시하였다.

- **형상 혼합 기술** - 형상 혼합(shape blending)은 상업 애니메이션 제작에 가장 널리 쓰이고 있는 기술 중 하나이다. 이 기술은 미리 만들어 놓은 기본 형상을 혼합하여 새로운 형상을 만들어 내는 것이다. Pighin등은[65] 얼굴의 주요 표정에 해당되는 기본 형상을 모델링한 다음 이를 혼합하여 새로운 얼굴 표정을 만들어 냈다. 얼굴 전체뿐만이 아니라 세부적으로 선택된 부분에도 혼합기법을 적용함으로써 적은 수의 기본 형상만으로 다양한 표정을 만들어 낼 수 있었다. 또한 비디오에 녹화된 얼굴 표정으로부터 혼합 가중치를 구해 냈다. Lewis등은[65] 기본 형상의 단순한 선형 조합이 얼굴 정점들의 원치 않은 동작으로 귀결될 수 있다고 지적하고, 표준적인 표정 공간을 사용할 것을 주장하였다. 이때 혼합 가중치는 그 표정 공간의 좌표 값이 된다. Kalberer와 Van Gool은[41] 수작업으로 표정 공간의 기본 요소들을 모델링 하는 대신, PCA(Principal Component Analysis)를 이용해서 자동적으로 변형 기저를 찾아냈다.

- **음성으로부터 유도된 애니메이션** - 일반적으로 사람들은 음성과 얼굴 표정의 상호작용에 대해 매우 민감하게 반응한다. 따라서 음성 신호에 입술과 혀 등의 움직임뿐만 아니라 얼굴의 다른 부분도 정확하게 동기화(同期化)하는 기술을 개발하는 것은 매우 중요하다. Bregler등과[10] Ezzat 등은[25] 입력 음성 신호에 따라 2차원 이미지 공간에서 입 주변 영역을 합성하여 사실적인 2차원 얼굴 애니메이션을 만들어 냈다. 또한 Brand는[9] 음성 신호에 들어 있는 표정 정보를 이용하여 얼굴 전체의 움직임을 생성하는 시스템을 제시하였다. 그러나 이러한 연구 결과에도 불구하고 대다수의 애니메이션 스튜디오에서는 립싱크 작업 대부분을 애니메이터의 수작업으로 진행하고 있다. 얼굴 표정의 제어가 창조적인 작업으로 인식되는 것과는 반대로 립싱크는 단순 반복 노동으로 취급되는 경향이 짙어 사실적인 립 싱크를 자동적으로 만들어 내는 기술 개발은 디지털 액터 창조에 매우 중요한 역할을 할 것이다.

- **눈 움직임 애니메이션** - 눈의 움직임은 얼굴 표

정에서 매우 중요하다. 눈 움직임의 중요성을 고려해 볼 때 지금까지 눈동자의 운동을 정확하게 모델링 하려는 연구가 거의 이루어지지 않고 있었다는 것은 매우 놀라운 일이다. 눈 움직임에서 보이는 인공적인 요소는 아주 쉽게 찾을 수 있다. 지금까지 제작된 애니메이션, 심지어 영화수준의 고화질 애니메이션에서도 인간 캐릭터의 눈 움직임은 사실적이지 않았다. 살아있는 듯한 디지털 액터를 만들기를 원한다면 자연스러운 눈 움직임을 만들어내는 것을 아주 중요한 과제로 삼아야 할 것이다. 최근에 Lee등은[49] 불연속적인 눈의 움직임, 즉 사카드(saccade)운동 모델과 눈 움직임 데이터를 분석하여 얻은 확률 모델에 기반을 둔 눈 움직임 모델을 고안하였다.

3. 머리카락 애니메이션

디지털 캐릭터를 실제 인간으로 보이도록 하려면 머리카락의 사실적 표현 또한 필수적이다. 그동안 머리카락 애니메이션과 렌더링을 위한 몇몇 알고리듬이 제안되었으나, 아직 많은 시간과 수작업을 필요로 하기 때문에 상업용 애니메이션의 제작에는 적합하지 않다. 머리카락 애니메이션에 있어 가장 큰 어려움은 사람의 머리카락이 매우 가늘고 그 수가 아주 많다는 점이다.[69]

서울대학교 그래픽스 & 미디어 랩은 인간의 다양한 헤어스타일을 모델링 하고, 머리카락이 머리의 움직임과 외부의 힘에 따라 적절히 반응하며 움직이도록 하는 물리 기반의 기법을 개발하였다.[46] 이 기법에서는 머리카락 하나 하나가 긴 직렬 체인으로 모델링 되며, 중력과 바람, 공기저항, 머리카락 사이의 마찰력, 머리와의 마찰력을 계산할 수 있도록 운동 방정식을 만들어 머리카락의 움직임을 구한다. 그림 2에서는 본 랩의 기법을 이용하여 만들어낸, 바람이 부는 상황에서의 머리카락의 움직임을 보여주고 있다.

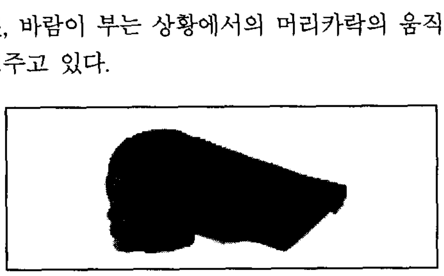


그림 2 바람이 부는 상황에서의 머리카락 움직임

실제 머리카락의 움직임은 현재의 캡처 기술로는 구해내기가 어렵다. 가장 적합한 방법은 물리식에 기반을 두고 계산적으로 구하는 것일 터이다. Anjyo[6], Deldegan[20], Lee[46]등은 간략화 된 동역학식으로 수많은 머리카락 각각을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나 오히려 간략화 때문에 머리카락 사이 사이 또는 머리카락과 외부 환경 사이에 복잡한 상호작용이 있을 경우 사실적이지 않은 결과를 보여줄 수도 있다. 머리카락 애니메이션을 만들 때 가장 많은 시간을 요하는 부분은 충돌 처리이다. Lee와 Ko는[46] 머리와 머리카락 그리고 머리카락과 머리카락 사이의 충돌을 효과적으로 찾기 위해 계층적 외피(layered hull) 기법을 개발하였다. Chang등은[15] 일부 중요한 머리카락 사이의 상호작용만을 계산하여 전체 머리카락 사이의 상호작용을 효과적으로 시뮬레이션 하였다. Hadap과 Magnenat-Thalmann은 통합된 연속체 기술(contimuum mechanics)을 이용하여 머리카락 사이의 상호작용과 움직임을 계산하였다.

디지털 액터의 머리카락이 사실적으로 보여지려면 얼굴을 고려하여 정확하게 렌더링 되어야 한다. Kajiya와 Kay's의 머리카락 렌더링 모델[40]이 소개된 이후 많은 렌더링 기법이 개발되고 있다.[64,45,84,30,13] 최근에는 Marschner등이[58] 실제 머리카락으로부터 분산된 정도를 측정하여 Kajiya와 Kay's의 논문에서 가정한 분산도가 실제와 차이가 있음을 밝혀냈다. 이 분산도를 바탕으로 그들은 실제 머리카락에서 보이는 복잡한 분산 효과를 렌더링 할 수 있는 실용적인 기법을 제안하였다. 머리카락 하나의 굵기는 대개 픽셀 한 개보다도 작기 때문에 머리카락 렌더링은 최종 이미지 합성에 세심한 주의를 기울여야 한다. Lee와 Ko[46], Kim등은[43] 계단 현상(aliasing effect)을 제거할 수 있는 방법을 고안하였고, Lokovic등과[55] Kim등은[43] 머리카락 사이의 그림자 효과를 만들수 있는 방법을 생각해 냈다.

머리카락 모델링과 스타일링도 중요한 문제이다. Watanabe와 Suenaga는[85] 머리카락 모델링에 편리한 다발 개념을 도입했다. 다발은 세 개의 주요 머리카락으로부터 삽입된 머리카락의 술, 그룹을 말한다. Xu와 Yang은[90] 일반화된 실린더 개념에 기반을 둔 상호작용 머리카락 모델링 시스템을 개발하였다. Kim등은[43] 사용자가 손쉽게 다양한 헤어스타일을 만들어 낼 수 있도록 다중 해상도(multi-resolution) 기법에 근거를 둔 머리카락 모델링 시스템을 제안

하였다.

사실적인 머리카락 표현을 위해 직면하고 있는 연구과제의 첫째는 중력이 있는 상황에서 사실적인 헤어스타일을 모델링 할 수 있는 기법을 개발하는 일이다. 여기서는 적절한 충돌처리도 이루어져야 한다. 둘째는 모든 다이나믹한 요소(중력, 관성, 공기저항, 충돌 처리)를 고려한 머리카락 움직임의 시뮬레이션 기법을 개발하는 일이다. 셋째는 머리카락의 사진처럼 사실적인 렌더링 기법을 개발하는 일이다.

4. 의상 애니메이션

디지털 액터에게 입혀질 옷을 사실적으로 애니메이션하고 시뮬레이션 하는 것은 디지털 액터를 인간처럼 보이게 하기 위해 중요한 요소이다. 그럼에도 불구하고 아직까지 옷 시뮬레이션 기술의 부족으로 인해 대부분의 애니메이션 제작사에서는 옷을 생략하거나 단순화된 옷 애니메이션을 사용하고 있다.

서울대학교 그래픽스 & 미디어 랩에서는 옷의 움직임을 더욱 사실적으로 표현하고, 안정적으로 시뮬레이션 하기 위해, 상당한 양의 시간과 노력을 물리학에 기반한 기술의 개발에 쏟아왔다. 그림 3은 본 랩의 기술로 만들어진 옷 시뮬레이션 모습을 보여준다.

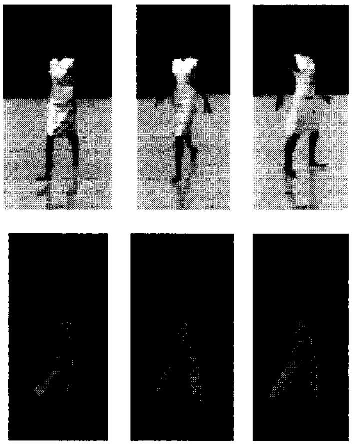


그림 3 옷 시뮬레이션 스냅 사진

4.1 물리적 모델과 시뮬레이션

공학적인 관점에서 볼 때 옷의 물리학적 모델의 정확성과 타당성은 매우 중요하다. 그러나 컴퓨터 그래픽의 관점에서는 알고리듬의 실행속도가 실제적인 면에서 볼 때 오히려 더 중요하다. 계산상의 불안정성은 빠른 시뮬레이터의 실행을 방해하는 주요 장애물이라는 것은 이미 다 알려진 사실이다. 이 문제에 대해 Baraff와 Witkin은[7] 이전 방법들에 비해 계산과정을 줄이고 안정성을 증대시켜 의상 애니메이션의 시각적 효과를 높이는 반암시적(semi-implicit) 적분법을 제안하였다. 이후 이들의 연구는 의상 시뮬레이션 관련 연구가 진보하는 가운데 세세히 분석되고 개선되고 단순화 되었다.[80,81,59,24,32,42]

반암시적 방법에 의해 계산상의 불안정성은 어느 정도 극복할 수 있었지만, 다른 차원의 불안정성이 존재함을 발견하게 되었다. 이 새로이 대두된 불안정성은 좌굴 불안정성으로 불리며, 옷이 주름의 형태를 가질 때 발생한다. 이는 얇은 물체가 갖는 고유의 물리적 특성이기 때문에 계산 방법을 수정하는 것으로는 피할 수 없는 문제이다. Choi와 Ko는[18] 좌굴 불안정성 문제의 해결 방법으로 즉좌굴 모델을 제안하였다. 이 즉좌굴 모델의 핵심은 압축에 의해 수축이 어느 정도 진행된 후 주름이 생기는 것이 아니고, 압축에 의해 즉시 주름이 생기게 된다는 것이다. 즉좌굴 가정하에 만들어진 시뮬레이션은 좌굴의 불안정성에 대한 문제를 해결하여 사실적이고 처리속도가 향상된 주름을 만들어 냈다.

옷의 움직임에 사실성을 증가시켜 줄 수 있는 의상 모델링 연구의 방향은 아직 구체화 되고 있지 않다. 다만, 앞으로 연구되어야 할 가치 있고 중요한 부분은 옷이 움직일 때 나타나는 옷의 성질인 비선형과 탄성을 어떻게 하면 정확하게 모델링 할 것인가 하는 문제라는 데에 반대하는 이는 아마도 없을 것이다.

4.2 충돌 처리

충돌 처리는 의상 시뮬레이션에 있어 매우 중요한 요소이다. 복잡한 옷을 시뮬레이션 할 때 전체 계산 시간의 70% 이상이 충돌 처리를 하는 데에 쓰인다. 옷의 시뮬레이션에서 도중에 발생한 충돌을 검출하지 못한 채로 진행하게 되면 다시 올바른 상태로 되돌리는 것이 무척 어렵다. 그래서 충돌 처리 과정 중 일어난 모든 충돌을 빠뜨리지 않고 검출해야 하는 것은 매우 중요한 문제이다.

Volino와 Thalmann은[82] 표면 곡률의 연속성을 이용하여 충돌 검사 횟수를 효율적으로 줄이는 기법을 제안하였다. Provot 역시 비슷한 기법을 제안한 바 있다.[68] 그 외에 충돌 검사 횟수 감소 기법으로는 계층적 바운딩 박스와[83,11,60] 균일공간 분할법[34,18]등이 널리 쓰인다. Provot와[68] Bridson등은[11] 시간 단계 사이의 삼각형 각 점들의 움직임을 선형으로 가정하였는데, 이러한 가정은 충돌 검사 문제를 3차 다항식의 해를 구하는 것으로 귀결하도록 하였다. 같은 문제를 해결하기 위해 Huh등은[35] 스위핑 볼륨 기법을 이용하였다.

Volino와 Thalmann은[83] 충돌 반응 모델로서 기하학적 보정 기법에 기반을 둔 방법을 사용하였다. 그 모델은 다중 충돌 처리가 가능하며, 인접한 삼각형 점들간의 연속적인 충돌 반응을 생성하기 위해 중심 좌표계를 사용하였다. Provot는[68] 임팩트 존이라는 개념을 도입하여 다중 충돌 문제를 해결하였다. 그의 접근 방법은 충돌이 발생한 국소 영역의 질점들을 묶어서 하나의 강체로 다루도록 하는 것이다. Huh등도[35] 또한 임팩트 존을 이용하여 다중 충돌을 해결하였다. 그들은 임팩트 존의 질점들을 여러 개의 클러스터로 분할하고, 계속해서 발생할 수 있는 충돌을 막기 위해 클러스터간의 다중 충돌 반응을 선형시스템을 푸는 것으로 동시에 해결하였다. 그러나 Huh등의 충돌 반응 모델은 Volino와 Thalmann의[83] 방법과는 달리 선형 모멘텀을 보존하도록 하였다. Bridson 등은[11] 반발력과 기하학적 보정법, 임팩트 존 기법을 결합하여 안정적이고 정확한 충돌 처리 기법을 제안하였다. 그들은 또한 영상의 사실성을 증가시키기 위해 후처리 단계로서 충돌 회피 면분할법을 제안하였다.

4.3 복잡한 의상의 모델링

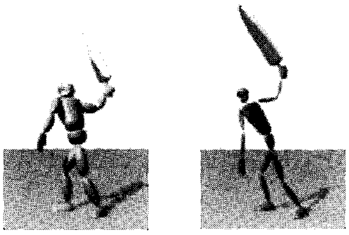
의상 시뮬레이션 분야에서 모델링에 대한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않고 있다. 옷을 디자인하는 어려움은 2차원 형태인 패턴으로 3차원 형태의 캐릭터에 입혀질 옷을 디자인한다는 데 있다. 원하는 디자인을 추구하면서 주어진 캐릭터에 꼭 맞는 옷을 디자인하는 것은 매우 많은 시간을 필요로 하는 작업이며, 대부분의 애니메이터들은 이러한 작업을 좋아하지 않는다. 최근에는 여러 개의 상용 패턴 CAD가 사용되고 있다. 그러나 이들 대부분이 전문 패턴 디자이너를 대상으로 개발된 것이어서, 비전문가들이 사용하기에는 매우 어렵게 되어 있다. 그런 까닭으로 아직까지는 다양한 옷을 시뮬레이션하기 위해 옷을 디자인 할 경우에는 전문 패턴 디자이너의 도움을 받아야만 한다. 결국, 비전문가도 사용하기에 적합한 옷 디자인 기법을 개발하는 것은 옷 시뮬레이션 분야에 있어서 매우 중요한 과제가 되고 있다.

5. 몸 동작 애니메이션

디지털 액터의 몸 동작을 만들어내기 위한 3차원 모션 캡쳐(motion capture)는 동작의 아주 세세한 부분까지 보존하여 양질의 데이터를 얻을 수 있다는 점에서 가장 중요한 원천으로 여겨지고 있다. 그러나 많은 경우에 모션 캡쳐 데이터는 그 데이터가 사용되어지는 상황에 따라 적절히 편집되어야 한다. 이러한 이유로 최근에는 기존의 동작을 다른 캐릭터의 동작으로 수정하거나 변경시키는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

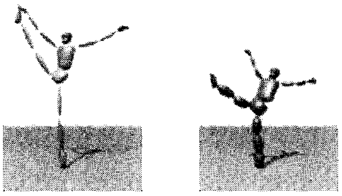
과거 몇 년 동안 서울대학교 그래픽스 & 미디어 랩은 원래의 동작에 대한 유사성을 이용하여 동작의 불규칙성을 해결하는 프레임 단위의 역운동학(inverse kinematics) 알고리듬[17]을 개발하였다. 더불어 동작의 동적 균형을 잡아주는 동작 균형 필터링 알고리듬[73]도 개발하였다. 최근에는 운동학적(kinematic), 동역학적(dynamic)인 제약 조건을 동시에 다룰 수 있도록 인터렉티브한 동적 제약 조건[74]을 고안하였다. 기존의 최적화 기반 방법들과는 달리, 본 랩의 기술은 입력 동작을 프레임 단위로 받아들인 다음 안정적인 속도로 출력하여 동작의 스트림을 생성해 내는 일종의 필터로 동작한다. 그림 4, 5, 6은 본 랩의 기술로 얻어진 결과물들이다. 그림 4에서는 무거운 칼을 휘두르는 동작이 마른 캐릭터의 동작으로 전이된 것을 보여주고 있다. 결과 동작에서 캐릭터가 무거운 칼의 움직임을 상쇄하기 위해서 상체를 앞뒤로 크게 움직이는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 발레 댄서의 발레 동작을 키가 작고 통통한 캐릭터로 전이하는 것을 보여준다. 결과 동작에서 캐릭터는 발레리나만큼 발을 높이 올리지 못하고 있다. 그림 6에서는 정상적인 걷기 동작을 림보동작으로 전이시킨 결과들을 보여준다. 첫 번째

캐릭터는 림보 바를 정상적으로 통과할 수 있었지만, 두 번째 캐릭터는 비대해진 상체 때문에 허리를 젖힐 수 없어 림보를 실패하고 있다.



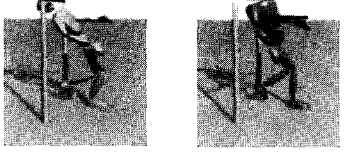
(a) (b)

그림 4 무거운 칼을 휘두르는 동작
(a) Original 동작
(b) (a)의 동작을 마른 캐릭터에게 전이시킨 모습



(a) (b)

그림 5 발레하는 동작
(a) Original 동작
(b) (a)의 동작을 키가 작고 통통한 캐릭터에게 전이시킨 모습



(a) (b)

그림 6 정상적인 걷기 동작을 림보 동작으로 전이시킨 모습
(a) 정상적인 torso
(b) 비대해진 torso

지금까지 동작 편집에 대한 연구는 꽤 많이 이루어져 왔으며, 초창기에는 주로 신호 처리 기술에 기반한 것들이었다. Bruderlin과 Williams는[12] 많은 신호 처리 기술들을 동작 데이터에 응용하였고, Unuma등은[79] 푸리어(Fourier) 시리즈를 이용하였으며, Witkin과 Popovi는[89] 동작 워핑 기술을, Lee와 Shin은[48] 다중해상도 분석 기법을 사용하였다.

제약조건에 기반을 둔 동작 편집 기법(constraint-based motion editing)은 지금까지 다양한 형태로 제안되어 왔다. Gleicher는[28,29] 기구학적 동작 편집을 시공간 최적화 문제로 수식화하여 해결하였고, Lee와 Shin은[47] 프레임 단위로 역운동학을 계산하고 곡선 맞춤을 통해 동작의 부드러움을 확보하였다. Shin등은[72] 끝단(end-effectors)의 동적 중요도를 이용한 온라인 전이 기술을 소개하였다. 이러한 기구학적 동작 편집 기술들은 대부분 만족할 만한 결과를 보여주었지만, 원래의 동작과 목표 동작 사이에 동적인 조건의 차이가 클 경우라면 몸의 질량 분포나 관절의 세기 등과 같은 물리적인 특성을 반영할 필요가 있다.

물리학 기반의 동작 편집 기술에 있어서도 많은 연구가 있어 왔다. Pollard등은[66] 간단한 힘 비율 조절을 통한 동작 변환 기법을, Komura등은[44] 다중 뼈대 모델을 이용한 방법을 제안하였다. 또한 Yamane와 Nakamura는[91] 주어진 동작을 물리적으로 모순이 없는 동작으로 필터링 하는 방법을 제안하였고, Popovi와 Witkin은[67] 시공간 최적화 기법에 기반한 동작 변환 기술을 제안하였다.

한편 모션 캡쳐를 사용하지 않고 동작을 생성하는 기법에는 두 가지 중요한 접근방법이 있는데, 시공간 최적화 방법(spacetime constraints)과 동역학 시뮬레이션(dynamic simulation)이 그것이다. 시공간 최적화 방법은 처음에 Witkin과 Kass가[88] 제안하였고, 그 뒤 다른 연구원들이[19,54,70,53] 그 응용성을 향상시키기 위해 노력하였다. 동역학 시뮬레이션을 위해서는 콘트롤러 스케일링 기술[33], 자동 콘트롤러 합성[27], 모션 캡쳐 데이타를 이용한 시뮬레이션 기법[92] 등 다양한 기술들이 제안되었다.

몸의 형체 변형은 디지털 액터를 사실적으로 보이게 하는데 있어서 매우 중요하다. 관절체의 외면을 변형하는 가장 보편적인 기법은 관절체의 뼈대나 또는 몇 개의 제어 변수들을 관절체의 외면과 연관짓는 것이다. Sederberg와 Parry가[71] 도입한 자유

변형(FFD: free form deformation) 기법은 상용 애니메이션 패키지에서 형체 변형을 지원하는데 널리 쓰인다. FFD는 관절체의 외면을 나타내는 곡면을 곡면 그 자체보다 쉽게 매개 변수화 할 수 있는 도메인에 끼워 넣는다. MacCracken과 Joy는 FFD의 응용 범위를 넓히기 위해서 임의의 기하구조를 가진 제어 격자(control lattice)를 사용할 수 있게 하였고[56], Faloutsos 등은[26] FFD에 동역학을 추가하여 애니메이션을 생성하는데 사용할 수 있도록 하였다.

최근 들어서는 보다 사실적인 변형 결과를 얻기 위해 예제 기반의 기법들이 제안되고 있다. Lewis 등은[51] 방사 기저 함수(radial basis function)에 근거하고 분산 자료 보간(scattered data interpolation)을 이용한 포즈 공간 변형(pose space deformation) 기법을 제안하였다. Allen등은[5] 보다 사실적인 결과를 얻기 위해서 실제 사람으로부터 포착한 레인지 스캔 데이터에서 가장 가까운 k개의 점을 보강하는 기법을 제안하였다.

인체 변형[36]을 위한 또 다른 기법으로는 Terzopoulos 등이[75,76] 처음으로 시도한 물리 기반 동적 시뮬레이션이 있다. 물리 기반 시뮬레이션을 통해 관절체를 변형시키기 위한 연구는 Capell 등과[14], James와 Pai에[14] 의해 제안되었다.

현재까지의 기술 발달에도 불구하고, 위에서 언급한 어떠한 기법들도 디지털 액터의 몸 형체 변형을 아주 만족스럽게 생성하지는 못하고 있다. 결국, 인체의 정확한 기하학적 모델을 얻기 위한 기술 개발이 시급하다. 또한 진동과 같은 인체 피부의 동적인 변형과 근육의 수축 및 이완과 같은 기구학적인 변형을 위한 연구가 절실히 요구된다.

6. 결 론

지금까지 디지털 액터를 창조하기 위해 당면한 문제들과 이러한 문제들의 해결 방안 그리고 완벽한 디지털 액터를 창조하기 위해 더 연구가 필요한 기술들에 대해 알아보았다.

디지털 액터는 이미 실제적인 목적으로 또는 실험적인 목적으로 다양한 영화에 포함되어 있다. 인기 애니메이션 「화이널 환타지」[1]는 디지털 액터를 창조하기 위한 하나의 선구적인 시도였다. 디지털 액터 기술은 유명인의 디지털 복제 인간 창조를 가능하게 하는 등 잠재적으로 커다란 상업적 실용성을 가지고 있다. 현재 여러 영화 프로젝트에서 브루스 리 같은 예전 영화 배우를 소생시키기 위한 시도가 조심스럽게 진행되고 있기도 하다.

앞으로 디지털 액터의 영향력은 막대할 것이다. 영화 산업이 눈부시게 발전할 것이고, 인간 문화도 이에 커다란 영향을 받을 것이다. 디지털 액터 창조 기술의 촉진을 위해 서울대학교 그래픽스 & 미디어 랩은 세계인이 모두 참여하는 디지털 액터 컨테스트를 개최할 것을 제안한다. 그리고 그 컨테스트의 키워드는 당연히 인간 캐릭터의 외모와 행동의 사실성이어야 할 것이다.

참고문헌

[1] http://www.finalfantasy.com/. 7

[2] http://www.pixar.com/featurefilms/ts/. 1

[3] http://www.sonypictures.com/movies/stuartlittle/. 1

[4] http://www.titanicmovie.com/. 1

[5] B. Allen, B. Curless, and Z. Popovi. Articulated body deformation from range scan data. ACM Transactions on Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2002), 21(3):612-619, 2002. 7

[6] Ken-Ichi Anjyo, Yoshiaki Usami, and Tsuneya Kurihara. A simple method for extracting the natural beauty of hair. In Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), pages 111-120, July, 1992. 4

[7] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. In Proceedings of SIGGRAPH 98, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 43-54. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1998. 4

[8] Volker Blanz and Thomas Vetter. A morphable model for the synthesis of 3D faces. In Alyn Rockwood, editor, Proceedings of SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 187-194. Addison Wesley Longman, August, 1999. 2

[9] Matthew Brand. Voice puppetry. In Alyn Rockwood, editor, Proceedings of SIGGRAPH 99, ComputerGraphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 21-28. Addison Wesley Longman, August, 1999. 3

[10] Christoph Bregler, Michele Covell, and Malcolm Slaney. Video rewrite: Driving visual speech with audio. In SIGGRAPH 97 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 353-360. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August, 1997. 3
[11] Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw, and John Anderson. Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation. In SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 594-603. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2002. 5
[12] A. Bruderlin and L. Williams. Motion signal processing. In Computer Graphics (SIGGRAPH 95 Proceedings), 1995. 6
[13] Armin Bruderlin. A method to generate wet and broken-up animal fur. In Pacific Graphics '99, pages 242-249, 1999. 4
[14] S. Capell, S. Green, B. Curless, T. Duchamp, and Z. Popovi. Interactive skeleton-driven dynamic deformations. ACM Transactions on Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2002), 21(3):586-593, 2002. 7
[15] Johnny T. Chang, Jingyi Jin, and Yizhou Yu. A practical model for hair mutual interactions. In ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, July, 2002. 4
[16] Byoungwon Choe and Hyeong-Seok Ko. Analysis and synthesis of facial expressions based on hand-generated muscle actuation basis. In Proceedings of Computer Animation 2001 Conference, pages 12-19, November, 2001. 1
[17] K. Choi and H. Ko. On-line motion retargetting. Journal of Visualization and Computer Animation, 11(5):223-235, 2000. 5
[18] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko. Stable but responsive cloth. In SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 604-611. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2002. 4, 5
[19] M. F. Cohen. Interactive spacetime constraint for animation. In Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 92), 26,2, pages 293-302. ACM, 1992. 6
[20] Agnes Daldegan, Nadia Magnenat-Thalmann, Tsuneya Kurihara, and Daniel Thalmann. An integrated system for modeling, animating and rendering hair. In Eurographics'93, pages 211-221, 1993. 4
[21] Paul Debevec, Tim Hawkins, Chris Tchou, Haarm-Pieter Duiker, Westley Sarokin, and Mark Sagar. Acquiring the reflectance field of a human face. In Kurt Akeley, editor, Proceedings of SIGGRAPH 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 145-156, July, 2000. 2
[22] Irfan Essa, Sumit Basu, Trevor Darrell, and Alex Pentland. Modeling, tracking and interactive animation of faces and heads using input from video. In Proceedings of Computer Animation'96 Conference, June, 1996. Geneva, Switzerland. 3
[23] Irfan A. Essa and Alex P. Pentland. Coding, analysis, interpretation and recognition of facial expressions. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19(7):757-763, July, 1997. 3
[24] Olaf Etzmuss, Bernhard Eberhardt, and Michael Hauth. Implicit-explicit schemes for fast animation with particle systems. In Computer Animation and Simulation '00, Eurographics, pages 137-151. Springer-Verlag Wien New York, 2000.
Proceedings of the Eurographics Workshop in Interlaken, Switzerland, August 21-22, 2000. 4
[25] Tony Ezzat, Gadi Geiger, and Tomaso Poggio. Trainable videorealistic speech animation. ACM Transactions on Graphics(Siggraph 2002), 21(3):388-398, July, 2002. 3
[26] P. Faloutsos, M. Van De Panne, and D. Terzopoulos. Dynamic free-form deformations for animation synthesis. IEEE Transactions on Visulaization and Computer Graphics, 3(3):201-214, 1997. 7
[27] P. Faloutsos, M. van de Panne, and D.

Terzopoulos. Composable controllers for physics-based character animation. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, pages 251-260. ACM, ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2001. 6

[28] M. Gleicher. Motion editing with spacetime constraints. In Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, 1997. 6

[29] M. Gleicher. Retargetting motion to new characters. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 98, Computer Graphics Proceedings, pages 3342. ACM, ACM Press/ ACM SIGGRAPH, 1998. 6

[30] Dan B. Goldman. Fake fur rendering. In Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), pages 127-134, 1997. 4

[31] Brian Guenter, Cindy Grimm, Daniel Wood, Henrique Malvar, and Frdric Pighin. Making faces. In SIGGRAPH 98 Conference Proceedings, pages 55-66, July, 1998. 3

[32] M. Hauth and O. Etzmufl. A high performance solver for the animation of deformable objects using advanced numerical methods. In A. Chalmers and T.-M. Rhyne, editors, Proc. Eurographics 2001, volume 20(3) of Computer Graphics Forum, pages 319-328, 2001. 4

[33] J. K. Hodgins and N. S. Pollard. Adapting simulated behavior for new characters. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, Computer Graphics Proceedings, pages 153-162. ACM, ACM Press/ACM SIGGRAPH, 1997. 6

[34] Dornal H. House and David E. Breen. Cloth Modeling and Animation. A K Peters, Ltd., 2000. 5

[35] Suejung Huh, Dimitris Metaxas, and Norman Badler. Collision resolutions in cloth simulation. In Computer Animation 2001, 2001. 5

[36] D. L. James and D. K. Pai. ArtDefo-accurate real time deformable objects. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH '99), 33:65-72, 1999. 7

[37] D. L. James and D. K. Pai. DyRT: Dynamic response textures for real time deformation simulation with graphics hardware. ACM Transactions on Graphics(Proc. ACM SIGGRAPH 2002), 21(3):582-585, 2002. 7

[38] Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy, and Pat Hanrahan. A practical model for subsurface light transport. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 511-518, August, 2001. 2

[39] Kolja Khler, Jrg Haber, and Hans-Peter Seidel. Reanimating the dead:Reconstruction of expressive faces from skull data. ACM Transactions on Graphics(Siggraph 2003), 22, July, 2003. 3

[40] James T. Kajiya and Timothy L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. In Computer Graphics(SIGGRAPH '89 Proceedings), pages 271-280, July, 1989. 4

[41] Gregor A. Kalberer and Luc Van Gool. Face animation based on observed 3D speech dynamics. In Proceedings of Computer Animation 2001 Conference, pages 20-27, November, 2001. 3

[42] Young-Min Kang and Hwan-Gue Cho. Bilayered approach for efficient animation of cloth with realistic wrinkles. In Computer Animation 2002, 2002. 4

[43] Tae-Yong Kim and Ulrich Neumann. Interactive multiresolution hair modeling and editing. In SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 620-629. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July, 2002. 4

[44] T. Komura, Y. Shinagawa, and T. L. Kunii. Creating and retargeting motion by the musculoskeletal human body model. The Visual Computer, 16:254-270, 2000. 6

[45] Andre M. LeBlanc, Russell Turner, and Daniel Thalmann. Rendering hair using pixel blending and shadow buffers. The Journal of

Visualization and Computer Animation, 2:92-97, 1991. 4
[46] Doo-Won Lee and Hyeong-Seok Ko. Natural hairstyle modeling and animation. In Human Modeling and Animation, pages 11-21, June, 2000. 3, 4
[47] J. Lee and S. Y. Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, pages 39-48. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1999. 6
[48] J. Lee and S. Y. Shin. A coordinate-invariant approach to multiresolution motion analysis. Graphical Models, 63(2):87-105, 2001. 6
[49] Sooha Park Lee, Jeremy B. Badler, and Norman I. Badler. Eyes alive. ACM Transactions on Graphics(Siggraph 2002), 21(3):637-644, July, 2002. 3
[50] Yuencheng Lee, Demetri Terzopoulos, and Keith Waters. Realistic modeling for facial animation. In Proceedings of SIGGRAPH 95, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 55-62, Los Angeles, California, August 1995. ACM SIGGRAPH / Addison Wesley. ISBN 0-201-84776-0. 2, 3
[51] J. P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong. Pose space deformations: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2000), 34:165-172, 2000. 7
[52] J. P. Lewis, Matt Cordner, and Nickson Fong. Pose space deformations: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. Proceedings of SIGGRAPH 2000, pages 165-172, July, 2000. 3
[53] C. K. Liu and Z. Popovic. Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations. ACM Transactions on Graphics, 21(3):408-416, 2002. 6
[54] Z. Liu, S. J. Gortler, and M. F. Cohen. Hierarchical spacetime control. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 94, Computer Graphics Proceedings, pages 35-42. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1994. 6
[55] Tom Lokovic and Eric Veach. Deep shadow maps. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2000), 34:385-392, 2000. 4
[56] R. MacCracken and K. I. Joy. Free-form deformations with lattices of arbitrary topology. Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH'96), 30:181-188, 1996. 7
[57] Stephen Marschner, Brian Guenter, and Sashi Raghupathy. Modeling and rendering for realistic facial animation. In Rendering Techniques 2000: 11th Eurographics Workshop on Rendering, pages 231-242, June, 2000. 2
[58] Stephen R. Marschner, Henrik Wann Jensen, Mike Cammarano, Steve Worley, and Pat Hanrahan. Light scattering from human hair fibers. ACM Transactions on Graphics (Siggraph 2003), 22(3), July, 2003. 4
[59] Mark Meyer, Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, and Alan H. Barr. Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality. The Journal of Visualization and Computer Animation, 12(1):112, 2001. 4
[60] Johannes Mezger, Stefan Kimmerle, and Olaf Etzmufl. Improved Collision Detection and Response Techniques for Cloth Animation. Technical Report WSI-2002-5, Universität Tbingen, 2002. 5
[61] Jun-Yong Noh and Ulrich Neumann. Expression cloning. In Proceedings of SIGGRAPH 2001, pages 21-28, August, 2001. 3
[62] Frederic I. Parke. Computer generated animation of faces. In ACM National Conference, pages 451-457, 1972. 2
[63] Frederic I. Parke and Keith Waters. Computer facial animation. 1996. 2
[64] Ken Perlin and Eric M. Hoffert. Hypertexture. In Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings), pages 253-262, July, 1989. 4
[65] Frdric Pighin, Jamie Hecker, Dani Lischinski, Richard Szeliski, and David H. Salesin.

Synthesizing realistic facial expressions from photographs. In SIGGRAPH 98 Conference Proceedings, Annual Conference Series, pages 75-84. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July, 1998. 2, 3

[66] N. S. Pollard and F. Behmaram-Mosavat. Force-based motion editing for locomotion tasks. In Proceedings of the IEEE ICRA, volume 1, pages 663-669, 2000. 6

[67] Z. Popovic and A. Witkin. Physically based motion transformation. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, pages 11-20. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1999. 6

[68] Xavier Provot. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garments. In Graphics Interface '97, pages 147-154, 1997. 5

[69] Clarence R. Robbins. Chemical and Physical Behavior of Human Hair.Springer-Verlag, third edition, 1994. 3

[70] C. Rose, B. Guenter, B. Bodenheimer, and M. F. Cohen. Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 96, Computer Graphics Proceedings, pages 147-154. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1996. 6

[71] T. W. Sederberg and S. R. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. Computer Graphics, 20(4):151-160, 1986. 7

[72] H. J. Shin, J. Lee, S. Y. Shin, and M. Gleicher. Computer puppetry: An importance-based approach. ACM Transactions on Graphics, 20(2):67-94, 2001. 6

[73] S. Tak, O. Song, and H. Ko. Motion balance filtering. Computer Graphics Forum (Eurographics 2000), 19(3):437-446, 2000. 5

[74] S. Tak, O. Song, and H. Ko. Spacetime sweeping: An interactive dynamic constraints solver. In Proceedings of Computer Animation 2002, pages 261-270, 2002. 5

[75] D. Terzopoulos and K. Fleischer. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. Computer Graphics. (Proc. ACM SIGGRAPH '88), 22(4):269-278, 1988. 7

[76] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformable models. Computer Graphics, 21(4):205-214, 1987. 7

[77] Demetri Terzopoulos and Keith Waters. Physicallybased facial modelling, analysis, and animation. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1:73-80, 1990. 2, 3

[78] Demetri Terzopoulos and Keith Waters. Analysis and synthesis of facial image sequences using physical and anatomical models. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(6):569-579, June, 1993. 3

[79] M. Unuma, K. Anjyo, and R. Takeuchi. Fourier principles for emotion-based human figure animation. In Computer Graphics (SIGGRAPH 95 Proceedings), 1995. 6

[80] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Implementing fast cloth simulation with collision response. In Proceedings of the Conference on Computer Graphics International (CGI-00), pages 257268, June, 19-24, 2000. 4

[81] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation. In Proceedings of the Conference on Computer Graphics International(CGI-01), July, 2001. 4

[82] Pascal Volino and Nadia Magnenat Thalmann. Collision and self-collision detection:Efficient and robust solutions for highly deformable surfaces. In Computer Animation and Simulation '95, pages 5565. Eurographics, Springer-Verlag, September, 1995. ISBN 3-211-82738-2. 5

[83] Pascal Volino and Nadia Magnenat Thalmann. Accurate collision response on polygonal meshes. In Computer Animation, May, 2000. 5

[84] Yasuhiko Watanabe and Y. Suenaga. A trigonal prismbased method for hair image generation. IEEE Computer Graphics and Applications, 12(1):47-53, Jan, 1992. 4

[85] Yasuhiko Watanabe and Yasuhito Suenaga. A trigonal prism-based method for hair image

generation. IEEE Computer Graphics & Applications, 12(1):47-53, January, 1992. 4

[86] Keith Waters. A muscle model for animating threedimensional facial expression. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87), volume 21, pages 17-24, Anaheim, California, July, 1987. 2

[87] Lance Williams. Performance-driven facial animation. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90), pages 235-242, August, 1990. 3

[88] A.Witkin and M. Kass. Spacetime constraints. In Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 88), 22,4, pages 159-168. ACM, 1988. 6

[89] A. Witkin and Z. Popovic. Motion warping. In Computer Graphics(SIGGRAPH 95 Proceedings), 1995. 6

[90] Zhan Xu and Xue Dong Yang. V-hairstudio: an interactive tool for hair design. May, 2001. 4

[91] K. Yamane and Y. Nakamura. Dynamics filter: Concept and implementation of online motion generator for human figures. In Proceedings of the IEEE ICRA, volumel, pages 688-694, 2000. 6

[92] V. B. Zordan and J. K. Hodgins. Motion capture-driven simulations that hit and react. In 2002 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pages 89-96, 2002. 6

고 형 석

1985 서울대학교 계산통계학과 전산학(학사)
1987 서울대학교 계산통계학과 전산학(석사)
1994 미국 펜실버니아대학교 컴퓨터그래픽스(박사)
1994. 2~1995. 12 미국 아이오와대학교 조교수
1996. 9~2000. 9 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 조교수
1997. 9~2000. 9 서울대학교 휴먼애니메이션연구단 단장
2000. 9~현재 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 부교수
E-mail : ko@graphics.snu.ac.kr

최 광 진

1996 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(학사)
1998 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스(석사)
2003 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스(박사)
2003. 3~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스 박사 후 연구원
E-mail : kjchoi@graphics.snu.ac.kr

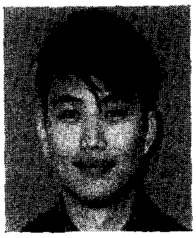
최 민 규

1996 한국과학기술원 전산학(학사)
1998 한국과학기술원 전산학(석사)
2003 한국과학기술원 전산학(박사)
2003. 3~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스 박사 후 연구원
E-mail : mgchoi@graphics.snu.ac.kr

탁 세 윤

1997 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(학사)
1999 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스(석사)
1999. 3~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스 박사 과정
E-mail : tak@graphics.snu.ac.kr

최 병 원



1997 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(학사)
1999 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스(석사)
1999. 3~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스 박사 과정
E-mail : choe@graphics.snu.ac.kr

송 오 영

1998 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(학사)
2000 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스(석사)
2000. 3~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 컴퓨터그래픽스 박사 과정
E-mail : tsitfel@graphics.snu.ac.kr