

스플라인을 이용한 인체 손 형상 변형 *

이지은^o, 윤승현, 김명수

서울대학교

{jelee,shyun}@3map.snu.ac.kr mskim@cse.snu.ac.kr

Human Hand Deformation with Splines

Ji-Eun Lee^o, Seung-Hyun Yoon and Myung-Soo Kim

Seoul National University

요약

본 논문에서는 피부 변형 방법의 일종으로 스플라인 곡선과 곡면을 이용한 손 형상의 모델링 및 변형 기술을 소개한다. 손 형상의 골격 구조를 근사하는 스윙에 손 형상 메쉬 정점들을 바인딩하여 관절의 변화에 따라 변형된 손 형상을 얻고, 손 자세 변형에 따라 손바닥 형상이 돌출되고 손금이 생기는 등 기존 연구에서 부족했던 손바닥 형상 변형의 사실성을 얻기 위해 손바닥 형상 변형을 제어하는 닙스 곡면을 생성하고 이용하였다. 손바닥 표면의 정점들을 보간하여 생성된 닙스 곡면은 사실적인 손바닥 변형을 위해 소수의 보간 점들만 미리 정의된 방법으로 변경하면 되기 때문에 사용하기가 용이하다. 손금은 손바닥 곡면에 대한 차이값으로 구현되어 손형상 자세에 부합하게 변형되며, 사람에 따라 다른 다양한 손금 형태를 지원할 수 있다. 연구 결과는 사실적인 형상 변형 결과를 보였으며, 실시간 실행이 가능하다.

1. 서론

사람은 일상생활에서 일할 때나 식사할 때, 운동할 때, 글을 쓰거나 취미로 악기를 연주하고 그림을 그리는 등 하루 종일 손을 쓰고 있다고 해도 과언이 아니다. 사람의 손은 인체의 다른 여러 부분중에서도 복잡한 구조를 가지고 있으며, 매우 정교하게 움직이는 형상이다. 사람의 활동 공간이 실세계에서 가상 현실, 3차원 게임 등 가상의 공간으로 확대됨에 따라 인간 캐릭터 제작이 활기를 띠고 있는 이 때에, 사용자 인터페이스나 사용자들간의 의사소통에 있어 필수적이며 가장 자연스러운 역할을 담당할 수 있는 손 형상의 모델링이나 변형, 동작 생성 방법에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

현재 인체의 형상 모델링과 변형에 대한 많은 연구가 수행되고 있으나, 대부분 인체의 몸통, 팔, 다리나 얼굴에 대한 연구이며, 손에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다. 특히 해부학적 지식과 인체의 생체 역학적 지식을 기반으로 한 사실적인 동작 시뮬레이션에 대한 연구가 최근의 주류인데 비해, 사실적인 형상 변형에 대한 연구는 상대적으로 미비하다. 몇몇 예제 기반 방법들과 해부학 기반 방법들이 제한된 자세에서 사실적인 형상 변형 결과를 보여 주고 있으나, 주먹 자세와 같이 최대로 변형된 자세나 손바닥의 변형과 같은 결과는 제시하지 못하고 있다. 손 동작 시뮬레이션에 대한 연구들도 그 성능에 있어서는 실시간 처리에 못 미치는 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구는 어떠한 상태의 손 자세라도 사실적으로 생성해 낼 수 있고, 실시간에 손 동작 애니메이션이 가능한 손 형상 모델링 및 변형 기술 개발을 목표로

하였다.

1.1 이전 연구

본 연구에 대한 내용을 기술 하기에 앞서 손 형상 모델링과 변형, 동작 생성에 대한 이전 연구를 소개하면 다음과 같다.

1988년 Magnenat-Thalmann 등 [1]은 관절 종속적인 피부 변형 모델을 소개하였다. 이는 손 모델의 정점들을 영향을 받는 관절들에 대해 거리(distance)와 두께(thickness), 법선벡터의 정보로 표현하여 관절의 움직임에 따라 형상 변형이 일어나는 골격 구조 기반 방법(Skeleton-driven techniques) 방법이며 손가락과 달리 손바닥처럼 여러 관절에 영향을 받는 부분을 구분하여 변형 위치를 정점 블렌딩 기법으로 결정하였다. 1989년 Gourret 등 [2]은 유한 요소법을 사용하여 그래스핑(grasping) 동작시 인간 손과 물체 사이의 신축성있는 피부 변형을 표현하였다. Allen 등 [6]은 인체 상반신 형상에 대해 골격 구조에 의해 제어되는 서브디비전 곡면들을 설계하고 실제 형상 데이터에 바인딩하여 골격 기반 형상 변형이 가능한 방법을 소개하였다. [6]은 다양한 예제 자세의 스캔 데이터를 이용하여 모델의 변형 정보를 결정하였다.

이에 앞서 예제 기반 방법은 [4], [5]등에서 소개된 바 있다. 2002년 Kry 등 [7]은 여러 자세에서 얻은 손 골격 구조와 피부간의 차이값(displacement)을 PCA(Principle component analysis)를 적용하여 eigendisplacements를 구하고, 그래픽스 하드웨어를 이용하여 애니메이션을 수행함으로써 실시간 형상 변형 결과를 제시하였다. 2002년 Wang 등 [8]은 피부 정점들 각각에 대해 변형에 영향을 주는 관절들의 변형 행렬(transformation matrix)의 각 요소마다 다른 가중치를 주는

*본 연구는 정보통신부 주관 ITRC on CGVR 프로그램의 지원으로 수행되었음.

방법을 제안하였다. 여기서 가중치는 여러 개의 예제 데이터로부터 최소제곱근사법(least squares approximation)을 통해 결정하였다. 2003년 Mohr 등 [9]는 [8]와 유사한 스킨 블렌딩(skin blending) 방법을 제안하였는데, [8]에서 형상 변형이 틀어지는 문제를 해결하기 위해 정점마다 여러 개의 가중치를 둔 것에 비해, 부가적인 관절들을 두어 해결하였다. 2004년 Kurihara 등 [10]은 의료영상을 이용하여 정확한 골격 구조를 추출하고, 몇몇 자세에서 골격 변형과 피부 변형의 예를 획득한 후 가중치를 적용한 자세 공간 변형 방법으로 손 동작 결과를 생성하였다. 저자들은 주어진 예제의 개수가 주는 한계를 극복하기 위해, 관절마다 예제에 대한 가중치를 다르게 적용하였다. 이는 사실적인 결과를 주고 있으나, 의료영상을 이용해야 한다는 단점이 있다. 예제 기반 방법은 예제 자세를 미리 만드는데 드는 전처리 과정에 많은 노력이 들고 주어진 자세 공간에 제한적인 형상 변형 결과를 얻는다는 단점이 있다. 일반적으로 주먹 자세와 같이 예제를 얻기 어려운 변형에 대한 결과는 제시하지 못하고 있다.

다양한 자세에서 사실적인 손 형상을 얻기 위한 연구 뿐 아니라 사실적인 손 동작을 생성하기 위하여 해부학과 생체역학적 지식을 토대로 한 여러가지 연구들이 있었다. 2003년 Albrecht 등 [11]은 해부학적 지식에 기반하여, 손 골격을 모델링하고 손 형상 변형에 중요한 손수의 근육을 물리적 기법으로 시뮬레이션하는 손 형상 모델링 및 애니메이션 기술을 소개하였다. 그러나 물리적 시뮬레이션 기법은 계산 속도가 느리다는 단점이 있다. Rijpkema 등 [12]과 Sanso 등 [13]은 그래스핑 동작에 대해 대상 물체를 매개변수로 하여 적절한 손 형상 변형을 수행하는 지식 기반 방법을 소개하였고, Huang 등 [14]은 3차원 공간에서 그래스핑 동작시 충돌감지 방법을 연구하였다. Pollard 등 [15]은 모션 캡처 데이터 예제를 이용하여 물리 기반 그래스핑 시뮬레이션 결과를 제시하였다. Tsang 등 [16]은 제약적으로 명세된 역동력학 해법을 고안하여 손과 팔의 움직임을 보였다. Ip 등은 [17]과 [18]에서 손 근육들의 수축 이완 정보를 계층적으로 코드화 하여 근육의 상태 변화로 원하는 손 자세를 생성하는 방법에 대한 연구를 하였다. ElKoura 등 [19]은 손 관절간의 독립성을 조사하고 손 관절 움직임의 속도를 고려하여 손 동작을 생성하는 방법을 악기를 연주하는 자연스러운 손 동작에 응용하였다. Sibille 등 [20]은 골격 구조와 힘줄을 설계하여, 힘줄의 역학에 따라 골격이 움직이며, 이때 매스-스프링 시스템을 적용한 손 조직이 변형되도록 한 손 형상 변형 시스템을 개발하였다.

드물게 스플라인(Spline)을 이용하여 손 및 인체 형상을 모델링하고 변형하는 방법도 소개되었다. Komatsu [21]은 피부를 4차 베지어 곡면 (biquartic Bézier surface)으로 표현하고, 관절 각도에 따라 곡면 제어점들을 변경하여 피부 변형을 표현하였다. Hyun 등 [22]은 위치 곡선, 방향 곡선, 크기 곡선으로 정의되는 스윙 곡면으로 형상을 근사한 후 실제 형상에 바인딩하여, 스윙 곡면의 변형으로 인체 형상 변형을 제어하는 방법을 제안하였다. 본 연구는 [22]의 스윙 기반 형상 매개화 방법을 이용하고 있다.

기타 특색 있는 연구로 2002년 Bando 등 [23]은 손과 얼굴의 주름을 잔주름(fine-scale wrinkles)과 굵은 주름(large-scale wrinkle)으로 구분하여 손등과 손가락 관절 부분의 주름을 생성하였다. 이 주름들은 피부가 늘어나거나 오그라들 때 높이(amplitude)가 변화되도록 제어하였으나, 이는 손 자세의

변형에 부합되지 않는 정적인 형태이다.

1.2 개요

앞서 기술한 바와 같이 본 연구는 어떠한 상태의 손 자세라도 사실적으로 생성해 낼 수 있고, 실시간에 손 동작 애니메이션이 가능한 인체 손 형상 모델링 및 변형 기술 개발을 목표로 하였다. 이를 달성하기 위해 기본적으로 [22]의 스윙 곡면 기반 인체 형상 모델링 및 변형 방법을 손 형상에 적용하였고, 손 형상 변형시 손바닥에 나타나는 찌그러짐을 해결하고 손금을 사실적으로 생성하기 위하여 추가적으로 넙스 곡면 기반 손바닥 모델링 및 형상 변형 기법을 개발하였다. 이와 같이 본 연구에서 제시하는 스플라인을 이용한 손 형상 모델링 및 변형 기술은 스윙 구조를 이용한 손 형상 변형과 넙스 곡면을 이용한 손바닥 및 손금 형상 변형의 두 부분으로 크게 구분된다.

본 연구의 손 형상 변형 과정은 그림 1과 같이 요약될 수 있다. 먼저 그림 1(a)의 3차원 손 형상의 폴리곤 메쉬 데이터에 그림 1(b)와 같이 손 형상의 골격 구조를 명세하고, 이 골격 구조를 기반으로 그림 1(c)와 같이 손목에서 각 손가락 끝으로 이어지는 5개의 스윙 구조를 생성하여 손 형상 메쉬의 정점들을 스윙에 바인딩 한다. 다음에 그림 1(d)에 보여지듯 손바닥 변형을 제어하기 위한 넙스 곡면을 생성하여 손바닥 정점들을 바인딩 한다. 마지막으로 손 형상 변형시 생성되는 손금을 표현하기 위해 그림 1(e)와 같이 손바닥에 손금 형태를 생성한다. 그림 1(f)는 기술한 모든 과정을 통해 최종적으로 얻어지는 손 형상 변형 결과이다.

본 논문의 기여점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 기존 연구에서 불가능 했던 최대한의 관절 변화 자세 가능. 예) 주먹 자세
- 기존 연구에서 부족했던 손바닥 돌출과 손금 생성을 포함한 사실적인 손바닥 변형 가능.
- 실시간 처리 가능.

상세한 연구 내용은 스윙 기반 손형상 모델링 및 변형과 넙스 곡면 기반 손바닥 형상 모델링 및 변형, 손금 생성을 각각 2, 3, 4절에서 기술하였다.

2. 스윙 기반 손 형상 변형

2.1 골격 구조 추출

스윙 기반 손 형상 모델링의 첫 번째 단계는 손 형상의 골격 구조를 정의하는 것이다. 본 논문에서 사용한 손의 골격 구조는 그림 2와 같다. 그림 2의 골격 구조는 실제 사람 손의 골격 구조와는 차이가 있으나, 본 논문에서는 실제로 손 형상을 변형하는데 필요한 관절만을 사용하여, 제어하는 것이 용이하면서도 사실적인 손 형상 변형을 이룰 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용한 손의 관절은 손목 위에 위치한 수근중수관절(Carpometacarpal Joint)들과 손가락 분기 지점에 위치한 중수지골관절(Metacarpophalangeal Joint : MP Joint)들, 엄지손가락의 중간관절인 지절관관절(Interphalangeal Joint : I P Joint), 엄지를 제외한 네 손가락의 첫마디인 근위지절관관

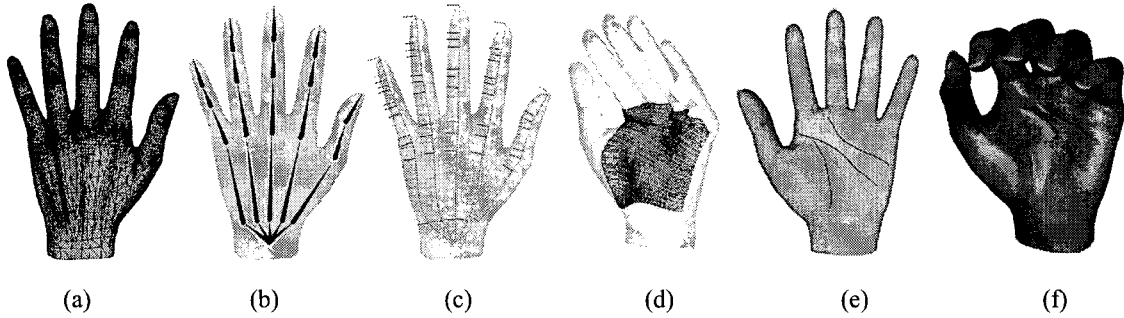


그림 1: 손형상 모델링 및 변형 시스템의 개요 (a)폴리곤 메쉬 모델 (b)골격 구조 추출 (c)제어 스위프 구조 생성 (d)제어 넘스 곡면 생성 (e)손금 생성 (f)손형상 변형 결과

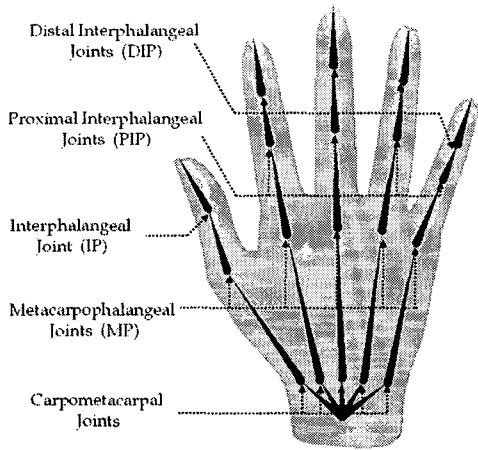


그림 2: 본 논문에 사용된 손 골격 구조

질(Proximal Interphalangeal Joint : PIP Joint)들, 마지막 마디인 원위지절간 관절(Distal Interphalangeal Joint : DIP Joint)들이다.

2.2 제어 스위프 구조 생성

다음 단계는 손 형상의 골격 구조의 정의를 토대로 손 골격 형상을 근사하는 스위프 구조를 설계하는 것이다. 손 형상의 스위프 구조는 [22]의 인체 형상의 스위프 곡면 정의와 유사한 방법으로 정의한다. 그림 3에서 보여지듯 손 형상에는 손목과 각 손가락 관절을 통과하여 손가락 끝을 연결하는 다섯 개의 스위프 구조가 생성된다. 하나의 스위프 구조는 위치 곡선과 방향 곡선으로 정의되는데, 스위프 구조를 정의하기 위해서는 기본 자세에서 손 관절과 관절 전후로 특정 위치를 키(key - 적색으로 표시)로 사용하여 키들의 위치의 궤적을 나타내는 곡선과 방향의 궤적을 나타내는 곡선을 보간법에 의해 구한다. 위치 곡선은 3차 B-Spline 곡선으로 보간하여 얻고, 키 단면(cross-sectional plane)의 방향을 나타내는 쿼터니언들을 1차 piecewise B-Spline 곡선으로 보간하여 방향 곡선을 계산한다.

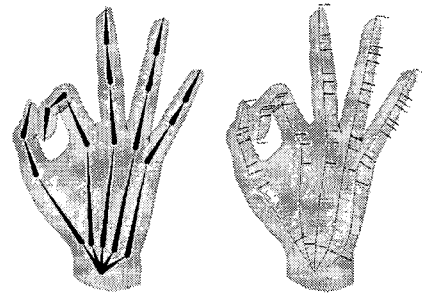


그림 3: 손 형상의 골격 구조에 따른 스위프 구조의 설계와 변형

2.3 정점 바인딩

본 연구에서 스위프는 연속적으로 움직이는 좌표계(continuously moving frame)로 간주할 수 있다. 그리고 손 형상 정점을 스위프에 바인딩하는 과정은 스위프로부터 이 정점이 해당되는 좌표계를 복원하고 이 좌표계의 상대좌표로 정점을 재매개화(reparameterization) 하는 것을 의미한다.

손 형상 메쉬 상의 정점 V 는 하나의 스위프 S 에 대해 (t, θ, d) 의 매개변수로 표현된다. 매개변수 t 는 스위프의 위치 곡선 $T(t)$ 와 방향곡선 $R(t)$ 의 매개변수 t 값으로, 이는 정점 V 를 곡선 $T(t)$ 상에 투영하여 계산된다. 어떤 정점 V_i 에 대해 매개변수 t 가 t_i 로 결정되면, 정점 V 에 대한 좌표계의 위치는 $T(t_i)$ 로, 방향은 $R(t_i)$ 로 결정된다. 매개변수 θ 는 곡선 $T(t)$ 의 단면을 원주좌표계(cylindrical coordinate system)로 보았을 때 정점 V 가 놓여있는 방향에 대한 각도이며, 매개변수 d 는 원좌표계 중심으로부터 정점 V 사이의 거리이다. 따라서 스위프 S 에 (t_i, θ_i, d_i) 로 바인딩 된 정점 V_i 의 3차원 직교 좌표계의 위치는 다음의 식(1)로 복원된다.

$$\begin{aligned}
 V_i &= S(t_i, \theta_i, d_i) \\
 &= R(t_i) [d_i \cos \theta_i \quad d_i \sin \theta_i \quad 0]^T + T(t_i) \\
 &= \begin{bmatrix} r_{11}(t_i) & r_{12}(t_i) & r_{13}(t_i) \\ r_{21}(t_i) & r_{22}(t_i) & r_{23}(t_i) \\ r_{31}(t_i) & r_{32}(t_i) & r_{33}(t_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_i \cos \theta_i \\ d_i \sin \theta_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x(t_i) \\ T_y(t_i) \\ T_z(t_i) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

손 형상의 정점 바인딩의 경우 하나의 정점은 손 형상에 있

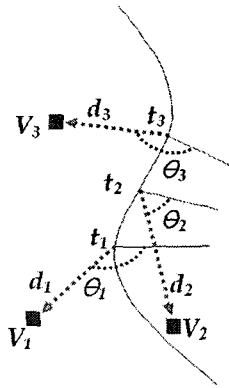


그림 4: 스위프에 대한 정점 바인딩

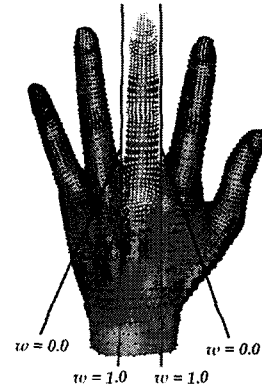


그림 6: 스위프에 대한 정점 가중치 할당

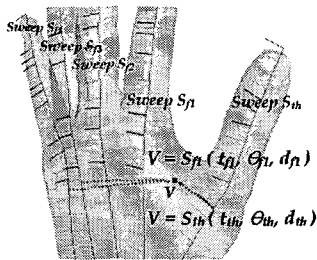


그림 5: 손 형상 스위프들에 대한 정점 바인딩



그림 7: 좌로부터 소지 스위프, 약지 스위프, 중지 스위프, 검지 스위프, 엄지 스위프에 대한 정점들의 가중치

는 다섯개의 스위프들에 대해 하나 이상 동시에 바인딩이 될 수 있다. 손가락에 해당되는 정점들은 해당 손가락을 지나는 하나의 스위프에만 바인딩 되지만, 손등과 손바닥의 정점들은 여러 개의 스위프에 동시에 바인딩된다. 예를 들어 그림 5의 붉은 색으로 표현된 정점 V 는 엄지손가락의 스위프 S_{th} 에 대해 매개변수 $(t_{th}, \theta_{th}, d_{th})$ 로 바인딩되고, 검지 손가락 스위프 S_{f1} 에 대해서는 매개변수, $(t_{f1}, \theta_{f1}, d_{f1})$ 로 바인딩 되었다. 또한 다른 손가락 스위프에 대해서도 각각 바인딩 되어 고유의 매개변수로 표현된다. 이는 손가락 정점들은 해당 스위프의 변형에 만 영향을 받게 되며, 손등이나 손바닥 정점들은 여러 스위프의 변형에 대해 복합적으로 영향을 받게 된다는 것을 의미한다.

2.4 스위프 가중치 할당

다음 과정은 스위프와 정점들 간의 가중치를 할당하는 과정이다. 위 그림 5에서 w_{th} 와, w_{f1} 로 표현된 값이 정점 V 의 스위프 S_{th} 와 스위프 S_{f1} 에 대한 가중치이다. 가중치는 하나의 정점에 대해 각 스위프들에 대한 고유의 값으로 표현되는데, 이는 손형상 변형의 근간이 되는 스위프의 변형에 대해 정점이 어느 정도의 영향을 받는가를 나타낸다. 하나의 정점이 각 스위프에 대해 갖는 가중치의 합은 1.0이다. 가중치 배정은 그림 6과 같이 손가락이 시작되는 부분을 중심으로 칼대기 형태의 공간에 대해 중심축에서의 거리에 반비례한 값으로 지정하였다.

다섯개의 스위프 각각에 대해 정점들의 가중치 할당이 끝나 후, 가중치의 합이 1.0이 되도록 정규화 작업을 추가 한다. 그

림 7은 다섯 개의 스위프에 대해 메쉬 정점들의 가중치를 표현한 것이다. 가중치 범위를 0.0 ~ 1.0으로 하였을 때, 새끼 손가락에 스위프에 대해 검은색 점들은 가중치가 0.0인 점들이고 파란색 점들은 가중치가 1.0인 점들이며, 중간색 점들은 이들 사이값을 가중치로 갖는 점들이다. 다른 손가락들도 녹색, 노란색, 주황색, 붉은 색으로 가중치가 최고가 되는 점들을 표시하였다.

가중치 배정의 결과로 그림 7에서 볼 수 있듯이, 손가락에 해당되는 정점들은 해당 스위프에 대한 가중치가 최대이고, 다른 스위프에 대한 가중치는 갖지 않는다. 손등과 손바닥에 해당되는 정점들은 위치적으로 가까운 스위프에 대해 가중치가 높다. 위 그림 5에서 엄지와 검지 스위프에 바인딩된 정점 V 가 w_{th} 와 w_{f1} 의 가중치를 각각 갖는다고 했을 때, 다음 그림 8에서 처럼 손형상 변형으로 엄지와 검지의 스위프가 변형 되었을 때, 스위프 매개변수를 통해 복원된 점 V'_{th} 와 V'_{f1} 는 가중치를 적용한 합으로 최종 위치 V' 로 계산된다. 만일 정점 V 의 엄지스위프에 대한 가중치 w_{th} 가 w_{f1} 보다 크다면, V' 는 V'_{th} 에 보다 가까운 값이 될 것이며, 이는 정점 V 가 엄지손가락 변형에 더 많은 영향을 받고 있음을 의미하는 것이다.

2.5 자기 교차 처리

스위프를 이용하면 손가락의 관절부위의 자기 교차(Self-intersection)를 쉽게 탐지하고 처리할 수 있다. 자기 교차점은 손가락의 지절관 관절의 스위프 매개변수로 스위프 단면(cross-sectional plane)을 그림 9의 (b)와 같이 계산한 후, 다음의 조건을 검사하여 탐지한다.

- 스위프 매개변수 t 값이 관절의 t 값보다 작으면서 관절의 스위프 단면 위에 놓여 있는 점, 또는

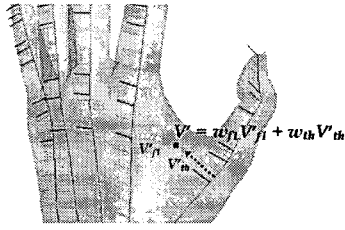


그림 8: 정점 가중치를 이용한 위치 복원

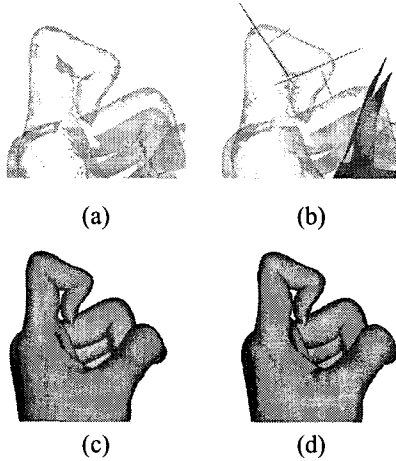


그림 9: 스윙을 이용한 자기 교차 처리 (a)검지 손가락의 자기 교차(투명) (b)손가락 관절의 스윙 단면을 이용한 자기 교차점 투영 (c)검지 손가락의 자기 교차 (d)자기 교차가 처리된 결과

- 스윙 매개변수 t 값이 관절의 t 값보다 크면서 관절의 스윙 단면 아래 놓여 있는 점

위 조건으로 자기 교차점이 탐지되면, 자기 교차점들을 관절의 스윙 단면에 투영하여 자기 교차를 처리한다. 그림 9의 (c)와 (d)는 자기 교차가 처리되기 전과 처리된 후의 비교 결과이다.

2.6 손 형상 변형

지금까지 설명한 과정이 스윙 기반 손 형상 모델링 과정이며, 스윙 기반 손 형상 변형은 그림 2의 관절의 각도값을 조정할 수 있는 사용자 인터페이스에 의해 이루어진다. 관절의 변형은 그림 3와 같이 스윙의 변형을 일으키며, 스윙의 변형은 스윙에 바인딩된 점정들의 위치를 변화시키게 된다. 그림 10은 스윙 기반 손 형상의 변형 결과이다. 그림 10(a)는 손가락을 구부려 주먹 자세를 만들 때 손등 점의 이동 결과를 나타낸 것으로, 실제 피부의 변형과 같이 피부가 신축성 있게 늘어나는 것을 보여주고 있다.

3. 넵스 곡면을 이용한 손바닥 형상 변형

스윙 기반 손 형상 모델링 및 변형 방법은 손가락과 손등의 변형에는 사실적인 결과를 보이나, 손바닥 형상의 변형에는

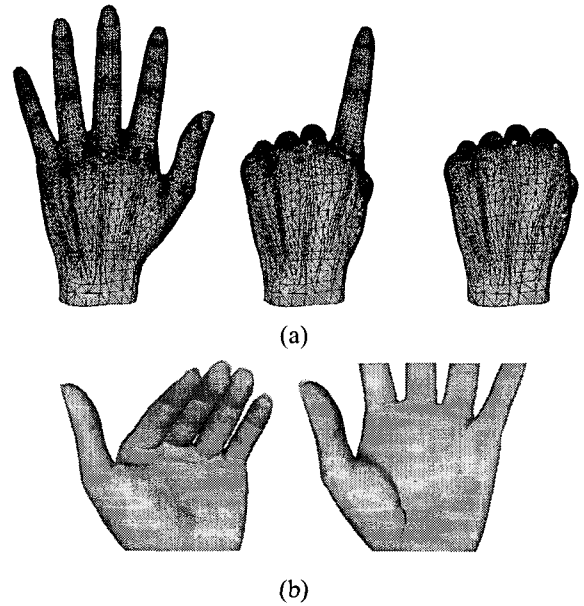


그림 10: 스윙 기반 손형상 모델의 변형 결과 (a)손 자세 변화에 따른 피부 변형 (b)스윙 기반 방법의 문제점

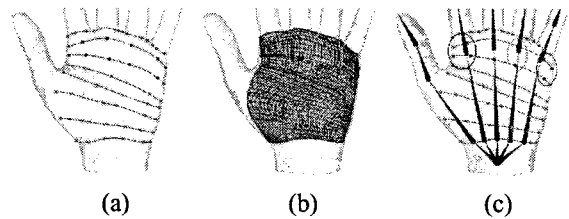


그림 11: 손바닥 제어 넵스 곡면 (a)고정보간 정점들(녹색)과 가변 보간 정점들(적색) 및 보간 넵스 곡선들 (b)보간 넵스 곡면 (c)가변 보간 정점들과 관절의 바인딩

그림 10(b)와 같이 손바닥이 찌그러지는 문제점이 있었다. 이는 손의 관절이 안으로 구부러질 때, 손바닥은 오히려 돌출되는 손 형상 변형의 특징을 스윙 기반 형상변형이 반영하지 못하는 것에 기인한 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 손바닥 변형을 제어하는 넵스 곡면(NURBS Surface)을 생성하여 손바닥 정점들을 바인딩하고, 제어 넵스 곡면의 변형을 통해 사실적으로 손바닥을 변형하는 기술을 제안하였다. 특히 제어 스윙 구조와 제어 넵스 곡면은 손 형상의 변형을 독립적으로 담당하는 것이 아니라, 스윙의 변형 결과를 이용하여 넵스 곡면을 정의하는 방법을 통해 두 제어 도구가 유기적으로 전체 형상 변형에 작용할 수 있도록 하였다.

3.1 손바닥 형상 변형을 위한 제어 넵스 곡면 생성

손바닥 넵스 곡면을 생성하기 위해서는 먼저 손바닥 위에 있는 몇 개의 점들을 보간 정점으로 이용하여 보간 곡선들을 정의하여야 한다. 그림 11(a)에서 녹색과 적색으로 표시된 점들이 보간 정점이며, 이 정점들은 손목과 손가락 시작위치

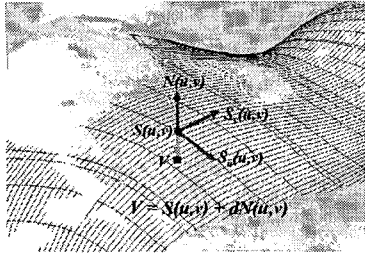


그림 12: 손바닥 정점 V 의 손바닥 넙스 곡면 $S(u, v)$ 로의 바인딩

를 기준으로 미리 정해진 위치로 지정된다. 손가락이 시작되는 부분에는 비교적 많은 수의 정점을 선택하여야 손바닥 형상변형을 충분히 표현할 수 있는 곡면이 만들어진다. 다음이 정점들을 지나는 보간 곡선들을 그림 11(a)의 청색 곡선과 같이 3차원 B-Spline 곡선으로 생성한다. 보간 곡선은 보간 정점들에 대한 코드 길이(chord length)값에 기반하여 만들어진다. 이 보간 곡선들을 다시 3차원 B-Spline 곡면으로 보간하여 손바닥 형상 변형을 제어하는 넙스 곡면을 얻는다. 그림 11(b)는 생성된 보간 곡면이다.

3.2 손바닥 정점 바인딩

다음 단계는 손바닥에 해당되는 정점들을 손바닥 넙스 곡면에 바인딩하는 것으로, 손바닥 정점 V 를 넙스 곡면에 대해 (u, v, d) 로 매개화하는 것이다. 그림 12에서 보듯 손바닥 위의 정점 V 는 곡면 $S(u, v)$ 와 곡면의 u 방향으로의 접선 벡터 $S_u(u, v)$ 와 v 방향으로의 $S_v(u, v)$ 에 대해 다음의 식(2)를 만족하는 점이다.

$$\begin{cases} \langle V - S(u, v), S_u(u, v) \rangle = 0 \\ \langle V - S(u, v), S_v(u, v) \rangle = 0 \end{cases} \quad (2)$$

위 (2)식을 만족하는 곡면의 매개변수 (u, v) 를 찾으면, 정점 V 와 곡면 상의 점 $S(u, v)$ 와의 차이 d 를 계산하여 최종적으로 V 를 (u, v, d) 의 매개변수로 표현한다. 이렇게 바인딩된 정점 V 는 손 형상 변형에 의해 곡면 $S(u, v)$ 가 변형될 때, 다음 식(3)으로 복원된다. 식(3)에서 $N(u, v)$ 는 곡면 $S(u, v)$ 에서의 법선벡터이다.

$$V = S(u, v) + dN(u, v) \quad (3)$$

3.3 손바닥 형상 변형

손 형상 변형에 따라 적절하게 손바닥 곡면을 변형하는 방법은 다음과 같다. 먼저 손바닥 보간 점들 중에서 그림 11(a)의 적색으로 표시된 점들과 같이 손바닥 변형시 스윙 변형에 의존하지 않고 독자적인 변형경로를 가지는 가변 보간점(changeable interpolation point)들을 지정한다. 손가락의 중수지골 관절(MP joint)들을 구부릴 때 찌그러지는 부분의 보간점들이 이에 해당된다. 본 연구에서는 그림 11(c)와 같이 10개라는 적은 수의 가변 보간 점들을 지정하고, 검지, 중지, 약지, 소지의 중수지골 관절(MP joint)에 각각 3개, 2개, 2개, 3개의 점을 바인딩 하였다. 관절에 바인딩된 각 가변 보간 점들은 해당 관절이 구부러질 경우 주변 부분이 돌출되

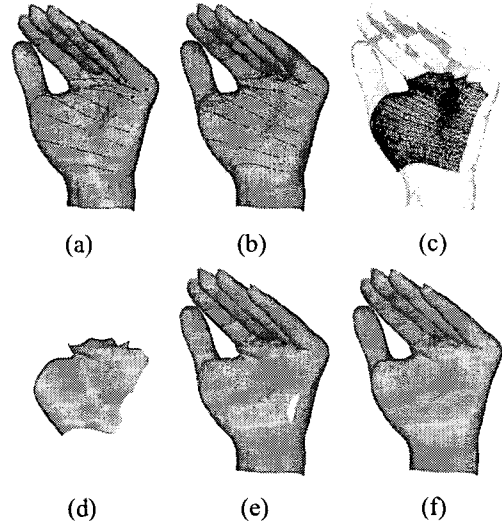


그림 13: 손바닥 변형 과정 (a)스윙 곡면상에 놓인 가변 보간 점들 (b)손 변형에 적절한 위치로 이동된 가변 보간 점들 (c)와 (d)보간점과 보간 곡선으로 만들어진 손바닥 넙스 곡면 (e)손바닥 넙스 곡면과 손바닥 정점들의 변형 (f)손바닥 변형 결과

도록 하기 위해 손바닥 위쪽으로 튀어나오도록 해부학적 자료 [24]를 토대로 하여 그 변형 경로가 미리 지정된다. 먼저 손가락이 구부러질 때, 고정 보간점들이 스윙 변형에 대응되는 위치로 복원되는데 반해, 가변 보간점들은 그림 13(a)와 같이 스윙에 대한 복원 위치가 아닌 그림 13(b)처럼 지정된 경로로 이동된다. 가변 보간점들의 이동은 그림 13(b)처럼 새로운 보간 곡선을 만들게 되며, 새로운 보간 곡선을 보간하여 그림 13(c)와 (d)에서 보여지듯 새로운 손바닥 넙스 곡면이 생성된다. 변형된 넙스 곡면에 대해 바인딩된 손바닥의 정점들을 식(3)으로 복원하면 최종적으로 그림 13(f)와 같이 변형된 손바닥 형상을 획득하게 된다. 이 과정에서 새로 만들어진 넙스 곡면에 대한 보간 점들과 손바닥 정점들의 매개변수 값은 최초로 바인딩된 값으로 고정되어야 한다.

제어 넙스 곡면을 생성하기 위한 보간점 중 대부분을 차지하는 고정 보간점들은 스윙 복원 위치에 대해 상대적으로는 고정되어 있으나, 실제 복원 위치는 제어 스윙을 따라 변하고 있으며, 따라서 결과로 만들어지는 제어 넙스 곡면 또한 제어 스윙의 변형에 유기적으로 연관된다. 즉, 제어 스윙이 제공하는 골격 기반 형상 변형의 특징이 손바닥 변형에서도 일관되게 유지되는 것이다.

또한 본 방법은 가변 보간 점들이 그룹화되어 각 중수지골 관절에 독립적으로 바인딩 되기 때문에 손가락 개개의 자세 변형이 손바닥 변형에 미치는 결과를 반영할 수 있다. 그림 14는 엄지, 검지, 약지의 중수지골 관절을 변형하였을 때 손바닥의 해당 관절의 주변부만 돌출되는 결과를 보여준다.

4. 손금의 표현

손금의 표현은 손바닥 형상 변형을 제어하는 넙스 곡면을 생성함으로써 쉽게 얻어지는 장점으로 그림 15와 같이 손

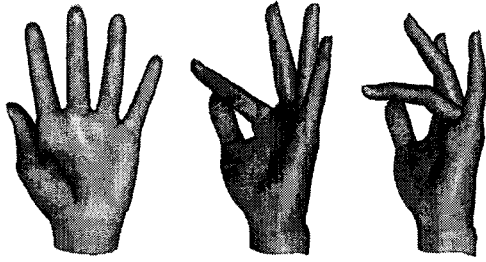


그림 14: 엄지, 검지 약지를 구부리는 자세와 손바닥 변형 결과

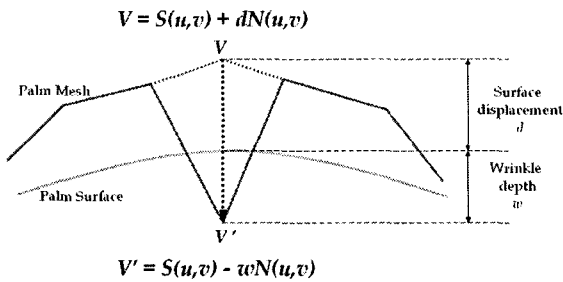


그림 15: 손금의 표현

바닥 정점을 손바닥 곡면을 기준으로 복원할 때 음의 차이 값(displacement)을 더해 주어 표현한다.

손금의 형태는 사람마다 다른 독특한 특징으로 본 연구에서는 간단한 스케치 인터페이스를 제공하여 사용자가 원하는 형태로 자유롭게 지정할 수 있도록 하였다. 이는 손바닥을 손바닥 전체를 포함하는 하나의 넓스 곡면으로 표현하였기 때문에 가능하다. 그림 16과 같이 사용자는 손바닥 곡면의 어느 부분에도 손금을 그려 넣을 수가 있다.

본 연구에서는 손바닥의 변형이 인접한 관절의 변화에 따라 지역적으로 돌출되는 것과 같이, 손금이 패이는 정도도 인접한 관절의 변화에 따라 지역적으로 달라지도록 고안하였다. 즉, 엄지를 구부리면 엄지와 검지 사이를 지나는 손금만 깊게 패이고 다른 손금들은 나타나지 않으며, 손바닥을 가로로 가로지르는 손금이 있을 때, 구부러진 손가락의 아래 부분만 손금이 패이고 다른 부분은 패이지 않는다. 이를 구현하기 위해서 손금은 변형이 일어나는 관절의 변화 뿐만

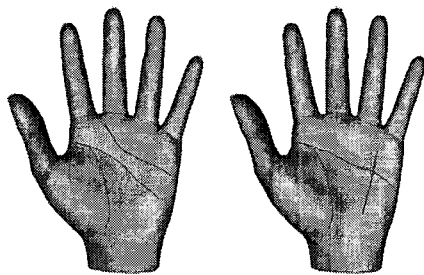
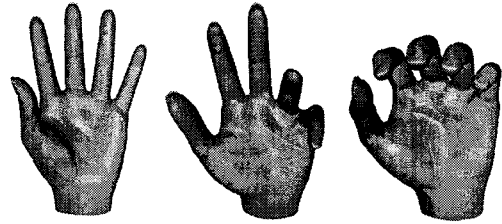
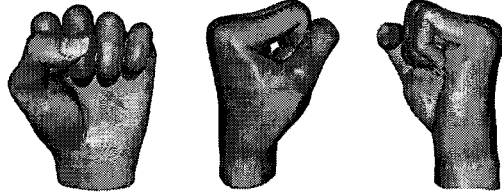


그림 16: 사용자가 입력한 손금의 예



(a)



(b)

그림 17: 손금이 표현된 손 형상 변형 결과 (a)손 자세에 따른 손금 형태 변화 (b)주먹 자세의 손 형상 변형

아니라 해당 스윙의 영향을 동시에 고려하여 생성한다. 아래 식(4)는 손금 부분으로 지정된 어떤 정점 V_i 의 손금 깊이 값을 계산하는 것이다. 식(4)에 따르면 엄지 손가락 부근의 손금 정점들은 엄지 스윙에 대한 가중치가 높으므로, 엄지의 중수지골 관절(ThMP)의 변화 정도에 따라 깊이 변화의 영향을 많이 받고, 다른 손가락의 중수지골 관절의 변화 정도의 영향은 적게 받게 된다.

$$WrkDepth(V_i) = MAX_WRK_DEPTH \times \left(\frac{Ang(ThMP)}{MAX_ANG_ThMP} \times Wgt(V_i, S_{th}) + \frac{Ang(F1MP)}{MAX_ANG_F1MP} \times Wgt(V_i, S_{f1}) + \frac{Ang(F2MP)}{MAX_ANG_F2MP} \times Wgt(V_i, S_{f2}) + \frac{Ang(F3MP)}{MAX_ANG_F3MP} \times Wgt(V_i, S_{f3}) + \frac{Ang(F4MP)}{MAX_ANG_F4MP} \times Wgt(V_i, S_{f4}) \right) \quad (4)$$

그림 17는 각 손가락의 중수지골 관절을 변형하였을 때 해당 관절의 주변부만 손금이 패이는 손금 변형 결과를 보여준다.

5. 실험 결과

그림 17는 다양한 손 자세를 연출한 결과이다. 스윙 기반 손 형상 모델링 및 변형 기술과 넓스 곡면 기반 손바닥 모델링 및 변형, 손금 생성 기술을 모두 적용하여 사실적인 손 형상 변형 결과를 얻을 수 있었다. 결과에는 이전 연구에서 제시된 바 없는 주먹 자세에 대한 형상 변형 결과도 포함되었다.

실행속도의 병목구간은 손 자세 변형에 의해 손바닥 형상 제어 넓스 곡면이 변할 때, 정점과 바인딩된 곡면상의 위치를 계산(evaluation)하는 단계인데, 이 계산의 속도 향상을 위

해, 정점의 바인딩 정보 이외에 넵스 곡면의 기저함수(basis function) 값을 동시에 저장하여 이용하였다. 실험 결과 펜티엄IV 3.4GHz CPU와 NVIDIA GeForce FX 5900XT를 장착한 시스템에서 실험에 사용된 7,524개의 정점과 15,017개의 면으로 이루어진 손 형상 모델의 자세 변형 애니메이션을 처리한 경우 다음과 같은 실시간 처리 속도를 보였다.

- 제어 스윙만 이용한 경우: 17.7 fps
- 제어 스윙과 제어 넵스곡면을 이용한 경우: 19.1 fps
- 제어 스윙과 제어 넵스곡면을 이용하고 자기 교차를 처리한 경우: 18.7 fps

6. 결론

본 논문에서는 사실적이고 자연스러운 손 형상 변형 결과와 실시간 손 동작 생성을 위하여 스윙과 넵스 등 스플라인 기반 재매개화 기법으로 손 형상을 모델링하고 변형하는 기술을 소개하였다. 손의 골격 구조에 대응되는 스윙 구조는 손 형상을 골격 기반으로 변형할 수 있게 하며, 손바닥을 근사한 넵스 곡면은 손 형상 변형시 어려운 문제였던 손바닥의 찌그러짐을 해결하고 돌출, 꺼짐, 손금 생성 등 사실적인 손바닥 변형이 가능하게 하였다. 연구 결과는 일반적인 형상 변형 뿐 아니라 이전 연구에서는 불가능했던 주먹 자세 등 관절 변화가 최대인 형상 변형에서도 사실적인 변형 결과를 보여 주었다. 또한 스윙 기반 재매개화 방법은 정점 복원이 간단하고 넵스기반 재매개화 방법은 기저함수를 이용하여 정점 복원을 가속화할 수 있기 때문에, 본 연구에서 생성된 손 동작 애니메이션은 실시간 처리가 가능하였다.

본 연구는 본문에서 결과로 만들어진 손 모델을 템플릿으로 하고 주어진 손 이미지를 토대로 손 모델의 형태를 변경하는 방법으로 사용자의 손 형태에 대한 맞춤 모델을 생성하는 방법에 응용될 수 있다. 또한 본 논문의 스윙 구조와 넵스 곡면은 메쉬의 변형을 독립적으로 담당하는 것이 아니라, 두 제어 도구가 유기적으로 전체 형상 변형에 작용할 수 있도록 고안되었는데, 이는 기존의 스윙 기반 형상 변형 기술이 원통형에 유사한 형상의 매개화에만 효율적이었던 제한점에서 벗어나, 복잡한 부분은 넵스 곡면으로 근사하여 변형을 제어할 수 있음을 의미한다. 추후 이 기법을 복잡한 형상 모델링 및 변형 기술 개발에 응용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] N. Magnenat-Thalmann, R. Lempereire, and D. Thalmann. Joint-Dependent Local Deformations for Hand Animation and Object Grasping. In Proc. Graphics Interface '88, pages 26-33. 1988.
- [2] J.-P. Gourret, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. Simulation of Object and Human Skin Deformations in a Grasping Task. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '89), volume 23, pages 21-30. 1989.
- [3] G. Elkoura, and K. Singh. Handix: Animating the human hand. In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation, volume 22, pages 110-119. 2003.
- [4] J. P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong. Pose space deformations: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 165-172. 2000.
- [5] P.-P. J. Sloan, C. Rose, and M. F. Cohen. Shape by example. In 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pages 135-144. 2001.
- [6] B. Allen, B. Curless, and Z. Popović. Articulated Body Deformation from Range Scan Data. ACM Transactions on Graphics, volume 21, number 3(July 2002), pages 612-619. 2002.
- [7] P. G. Kry, D. L. James, and D. K. Pai. Eigenskin: Real Time Large Deformation Character Skinning in Hardware. In ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (July 2002), pages 153-160. 2002.
- [8] X. C. Wang, and C. Phillips. Multi-Weight Enveloping: Least-Squares Approximation Techniques for Skin Animation. In ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (July 2002), pages 129-138. 2002.
- [9] A. Mohr, and M. Gleicher. Building Efficient, Accurate Character Skins from Examples. ACM Transactions on Graphics, volume 22, number 3 (July 2003), pages 562-568. 2003.
- [10] Tsuneya Kurihara, and Natsuki Miyata. Modeling Deformable Human Hands from Medical Images. In Proceedings of 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pages 355-363. 2004.
- [11] I. Albrecht, J. Haber, and H.-P. Seidel. Construction and Animation of Anatomically based Human Hand Models. In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, Eurographics Association, pages 98-109. 2003.
- [12] H. Rijkema and M. Girard. Computer Animation of Knowledge-Based Human Grasping. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '91), volume 25, pages 339-348. 1991.
- [13] R. Mas Sanso and D. Thalmann. A Hand Control and Automatic Grasping System for Synthetic Actors. Computer Graphics Forum, volume 13, number 3, pages 167-177, 1994.
- [14] Z. Huang, R. Boulic, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction. In Proc. CGI '95, pages 235-254, 1995.

- [15] Nancy S. Pollard, and Victor B. Zordan. Physically Based Grasping Control from Example. In Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2005.
- [16] Winnie Tsang, Karan Singh, and Eugene Fiume. Helping Hand: An Anatomically Accurate Inverse Dynamics Solution For Unconstrained Hand Motion. In Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2005.
- [17] H. Ip, S. Chan, and M. Lam. HACS: Hand Action Coding System for Anatomy-Based Synthesis of Hand Gestures. In Proceedings of International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 1998, pages 1307-1312. 1997.
- [18] H. Ip, S. Chan, and M. Lam. Hand Gesture Animation from Static Postures Using an Anatomy-Based Model. In Proceedings of Computer Graphics International 2000, pages 29-36, 2000.
- [19] George ElKoura and Karan Singh. Handrix: Animating the Human Hand. In Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, volume 22, pages 110-119. 2003.
- [20] L. Sibille, M. Teschner, S. Srivastava, and J.-C. Latombe. Interactive Simulation of the Human Hand. In CARS '02, pages 7-12. 2002.
- [21] K. Komatsu. (1988) Human skin model capable of natural shape variation. *The Visual Computer*, volume 3, pages 265-271. 1988.
- [22] Dae-Eun Hyun, Seung-Hyun Yoon, Jung-Woo Chang, Joon-Kyung Seong, Myung-Soo Kim, and Bert Juttler. Sweep-based Human Deformation. *The Visual Computer*, volume 21, number 8-10, pages 542-550. 2005.
- [23] Yosuke Bando, Takaaki Kuratate, Tomoyuki Nishita. A Simple Method for Modeling Wrinkles on Human Skin, 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'02), pages 166-175. 2002.
- [24] P. Brand, R. Beach, and D. Thompson. Relative tension and potential excursion of muscles in the forearm and hand. *Journal of Hand Surgery*, volume 6, number 3, pages 209-219. 1981.