

회전각 보간에 기반한 실시간 인체 변형

신승협 신성용

한국과학기술원 전자전산학과 전산학전공

{slime, syshin}@jupiter.kaist.ac.kr

Real-time Human Body Deformation based on Rotation Angle Interpolation

Seunghyup Shin Sung-Yong Shin

Division of Computer Science, Dept. of EECs, KAIST

요약

최근 실시간 가상 인물 애니메이션 시스템이 활발하게 보급되면서 피부 모양을 자연스럽게 유지하면서도 고속으로 동작할 수 있는 인체 변형 방법이 요구되고 있다. 본 논문은 가상 인물을 구성하는 메쉬의 정점들을 회전 연산만으로 이동시켜 실시간에 인체를 변형하는 모델을 제안한다. 인체 변형의 전처리 과정으로 드로니 삼각화를 이용하여 각 정점의 회전 기준이 될 관절을 찾는 방법을 제시하고, 사원수 형태로 입력된 동작을 회전축의 방향에 따라 분해한 후 각 정점에 차등적으로 적용하여 피부를 자연스럽게 변형할 수 있음을 보인다.

1 서론

최근 가상 인물을 이용한 TV 쇼, 컴퓨터 게임 등의 실시간 영상물 제작이 부쩍 늘고 있다. 특히 동작 포착(motion capture)과 같은 사실적 동작 생성 기술이 등장함에 따라 실시간 가상 인물 애니메이션 시스템은 더욱 활발하게 보급되고 있다. 한편, 가상 인물을 자연스럽게 표현하기 위한 방법으로 인체 변형 기법(human body deformation)이 연구되어 왔다. 인체 변형 기법에서는 3차원 메쉬로 제작된 가상 인물과 원하는 동작이 입력되면 메쉬의 각 정점을 개별적으로 이동시켜 피부를 변형한다. 따라서 실시간 애니메이션 시스템에서 인체 변형 기법을 이용하기 위해서는 뼈대의 움직임이 피부 메쉬의 각 정점에 어떤 방식으로 영향을 미치는지 정의하고, 정점이 이동될 위치를 빠른 속도로 계산할 수 있어야 한다.

인체 변형과 관련하여 다양한 접근 방법이 제안되어 왔다. Chadwick 등[2], MacCracken과 Joy[4]는 자유 형태 변형 기법(free form deformation : FFD)[7]을 이용하여 인체를 변형하는 방법을 제시하였다. 자유 형태 변형 기법을 통한 인체 변형은 비교적 계산량이 적고 결과가 직관적이지만, 다양한 형태의 관절에 적용하였을 때 자유 형태 변형 공간(FFD space)의 제어점을 이동하는 방법이 명확하지 않다. Teichmann과 Teller[9], Thalmann 등[10]은 정점과 뼈대 간에 가상적인 힘을 설정하고 이 힘이 평형을 이루도록 정점들을 움직여 인체 모델을 변형하였다. 이러한 물리적 시뮬레이션은 근육과 피부의 팽창, 수축을 잘 표현할 수 있지만 평형 상태 방정식을 푸는 데는 오랜 시간이 걸린다. Scheepers 등[6], Wilhelms와 Gelder[11]는 해부학에 기반, 인체를 매우 사실적으로 모델링하여 힘줄의 변화와 같은 세부적인 표현을 가능하게 했다. 그러나 여러 계층의 내부 구조로부터 피부 메쉬를 얻는데 드는 계산량이 많다. Jianhua

등[3], Magnenat-Thalmann 등[5]은 각 정점에 지역적인 좌표계를 할당하고 각 좌표계의 방향을 뼈대의 회전각에 따라 변화시켜 빠른 속도로 인체를 변형하였다. 그러나 이들은 구부러짐(bending)과 뒤틀림(twist)이 혼합된 복잡한 회전시의 피부 변형 방법은 제시하지 않았다.

인체 변형에 관한 기존 연구들은 여러가지 장점에도 불구하고 다양한 관절에서의 자연스러운 변형과 실시간 환경에서의 동작을 동시에 보장하지 못하였다. 본 논문은 실시간 가상 인물 애니메이션 시스템에 적용할 수 있는 새로운 인체 변형 방법을 제안한다. 먼저 인체 변형의 전처리로서 드로니 삼각화(Delaunay triangulation)를 이용하여 각 관절 부위에 속하는 피부 영역을 분할하는 과정을 보인다. 또한 사원수(quaternion)로 표현된 회전각을 회전축에 따라 분해하고, 분해된 회전각을 보간하여 정점을 회전시킴으로써 인체를 변형하는 방법을 제시한다.

2 피부 영역 분할

인체를 변형시키기 위해서는 우선 각 정점들이 어떤 관절의 영향하에 있는지 결정해야 한다. 이처럼 인체 메쉬를 이루는 정점들을 해당 관절에 따라 분류하는 작업을 피부 영역 분할이라 정의한다. 이때 가상 인물은 단일 피부 메쉬(one-skin mesh)의 형태로 주어지고 각 정점은 오직 하나의 피부 영역에만 속한다고 가정한다. 일반적으로 각 정점은 대부분 직선 거리(Euclidean distance)상으로 가까운 관절의 영향을 받지만, 예외의 경우 또한 존재하므로 직선 거리의 비교로는 피부 영역을 안정적으로 분할할 수 없다. 한편, Teichmann과 Teller는 질점-용수철 모델(mass-spring model)로 인체를 변형하는 과정에서 드로니 삼각화를 이용하여 뼈대 위의 표본점들과 메쉬의 정점 간에 용수철 구조를 생성하였다[9]. 본 논문은 이 방법을 응용하여 각 관절 중심

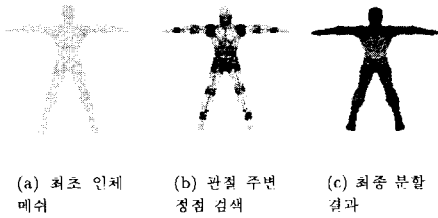


그림 1: 피부 영역 분할

에 가깝게 위치한 정점들을 찾고, 메쉬 상의 선분을 추적하여 나머지 정점들의 해당 관절을 알아낸다.

피부 영역 분할의 첫번째 단계에서는 드로니 삼각화를 이용하여 관절과 가까운 정점들을 찾는다. 먼저 인체 메쉬의 모든 정점과 모든 관절의 중심점들을 입력으로 3차원 드로니 삼각화를 수행한다. 드로니 삼각화는 인체 메쉬의 볼록 껍질(convex hull)을 사면체들로 분할하며 정점들과 관절 중심점들의 사이를 잇는 선분들을 생성한다. 이때 각 정점에 대하여 관절 중심점과 직접 연결되었는지의 여부를 검사하고, 연결된 관절 가운데 직선 거리상으로 가장 가까운 쪽에 포함시킨다(그림 1(b)). 드로니 삼각화의 결과로 얻어지는 사면체의 외접구 내부에는 다른 정점이 포함되지 않는 성질이 있으므로, 메쉬가 촘촘하게 표본화(sampling)된 경우 관절과 그 주변 정점은 안정적으로 연결된다. 또한 표본화 비율이 낮은 경우라도 Amenta 등이 제안한 법선 필터링(normal filtering)을 사용하여 잘못된 연결을 방지할 수 있다[1].

피부 영역 분할의 두번째 단계에서는 드로니 삼각화에 의하여 관절과 연결되지 않은 나머지 정점들이 포함될 관절 부위를 결정한다. 이러한 나머지 정점 중에는 이미 소속이 결정된 정점과 이웃하는 것들이 존재한다. 이들을 가장자리 정점이라 정의하고, 소속이 결정된 이웃 정점과 같은 관절 부위에 포함시킨다. 단일 피부로 구성된 인체 모델을 사용하므로, 가장자리 정점을 검색하고 관절 부위에 포함시키는 과정을 계속 반복하면 메쉬를 이루는 모든 정점의 소속 관절이 정해지며 피부 영역 분할은 종료된다(그림 1(c)).

3 회전각 보간에 의한 인체 변형

인체를 변형시키기 위해서는 가상 인물의 동작과 각 정점 위치의 관계가 정의되어야 한다. 본 논문에서는 3차원 상에서의 회전 표현에 적합한 것으로 알려진 사원수로 뼈대의 동작을 나타내고[8], 이를 구부러짐과 뒤틀림 성분으로 분해하여 정점의 이동에 사용한다. 이를 위해 주어진 사원수로부터 구부러짐 및 뒤틀림 성분을 분해하는 과정을 보이고, 분해된 회전각을 보간하여 정점을 회전시키는 인체 변형 방법을 제시한다.

3.1 관절 회전의 분해

인체 관절 가운데 가장 복잡한 것은 어깨와 같이 자유도가 3인 관절이며 그 움직임은 하나의 사원수로 표현된다. 이에

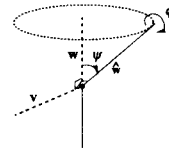


그림 2: 구부러짐과 뒤틀림 성분의 분해

비해 자유도가 낮은 관절의 움직임도 회전축의 방향이 제한된 경우로 해석할 수 있으므로 역시 하나의 사원수로 표현 가능하다. 한편 사원수로 표현된 뼈대 회전에는 구부러짐과 뒤틀림 성분이 혼합되어 있다. 구부러짐은 관절 중심을 지나고 뼈대 방향에 수직인 축을 회전 중심으로 하는 성분이며 뒤틀림은 뼈대가 회전 중심인 성분으로, 이들이 정점에 영향을 주는 정도는 다르다. 따라서 관절 회전은 정점 이동에 사용되기 전에 구부러짐과 뒤틀림 성분으로 분해되어야 한다. 단위 사원수 q 가 단위 벡터 w 를 축으로 ϕ 만큼 뒤틀린 후 다시 단위 벡터 v 를 축으로 ψ 만큼 구부러지는 회전을 나타낸다면(그림 2),

$$q = e^{\psi v/2} e^{\phi w/2} \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 관절 회전 q 와 뒤틀림 회전축 w 을 알고 있을 때 w 와 구부러짐 회전축 v 가 직교한다는 사실을 이용하면 식 (1)로부터 구부러짐의 회전축(v)과 회전각(ψ), 뒤틀림의 회전각(ϕ)을 알아낼 수 있다. 먼저 w 를 q 로 회전시키면 $e^{\phi w/2}$ 의 효과는 사라지고 $e^{\psi v/2}$ 에 의한 회전, 즉 구부러짐의 효과만 남게 된다. $\hat{w} = qwq^{-1}$ 이라 하면

$$\psi = \cos^{-1}(w \cdot \hat{w}) \quad (0 < \psi < \pi)$$

이다. v 는 w 와 \hat{w} 에 직교하므로

$$v = \frac{w \times \hat{w}}{\|w \times \hat{w}\|}$$

와 같다. 마지막으로 ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = 2w \log(e^{-\psi v/2} q) \quad (-\pi < \phi < \pi)$$

3.2 회전각 보간 모델

피부 모양의 변화는 뼈대의 회전과 밀접한 관계를 갖지만 뼈대의 움직임이 피부에 그대로 대응되지는 않는다. 구부러짐 회전의 경우 해당 관절과 상위 관절 사이의 피부는 거의 움직이지 않는데 비해 하위 관절에 가까운 피부는 뼈대의 구부러짐 회전각에 가깝게 움직인다. 또한 뒤틀림 회전의 경우에는 해당 관절 주변보다 하위 관절 근처의 피부가 더욱 뼈대의 뒤틀림 회전각에 근접하게 움직임을 알 수 있다.

이러한 관찰에 의해 본 논문은 주어진 회전각을 정점의 위치에 따라 차등적으로 적용하여 인체를 변형하는 회전각 보간 모델을 제안한다. 우선, 피부가 변화되는 모습은 관절

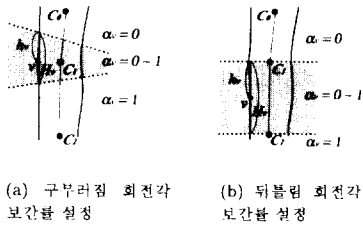


그림 3: 회전각 보간를 설정

의 모양, 크기, 위치 등에 따라 매우 다양하므로 각 관절마다 구부러짐 회전각과 뒤틀림 회전각을 보간할 고유의 영역을 설정한다(그림 3의 회색 영역(C_0, C_1, C_2 는 관절 중심)). 회전각 보간 영역이 정해지면 그 내부의 각 정점에 대한 회전각 보간를 계산한다. 회전각 보간를은 0과 1사이의 실수로, 뼈대의 회전각을 어느 정도의 비율로 정점에 적용할 것 인지를 결정하는 매개 변수이다. 즉, 뼈대가 임의의 축을 중심으로 ϕ 만큼 회전하면 회전각 보간들이 α 인 정점은 동일한 축을 중심으로 $\alpha\phi$ 만큼 회전하게 된다. 따라서 회전각 보간를은 정점이 회전각 보간 영역의 상위 경계에 가까울수록 0에, 하위 경계에 가까울수록 1에 근접한다.

그러나 회전각 보간 영역의 경계면과 정점 간의 거리가 회전각 보간를과 정확히 비례하지는 않는다. 인체 관절을 관찰해 보면 회전각 보간 영역의 경계 근처에서는 회전각 보간를의 변화가 완만한 반면, 회전각 보간 영역의 중심 부위에서는 회전각 보간를이 급격하게 변화함을 알 수 있다. 이를 반영하기 위하여 단순한 선형식 대신 양끝의 기울기가 0인 3차 허미트 곡선(Cubic Hermite curve)을 사용하여 회전각 보간를을 계산한다. 즉, 그림 3에서 정점 v 의 회전각 보간를 α_v 는 다음과 같다(H_v 는 v 를 지나고 상하위 경계를 잇는 최단 선분, h_v 는 H_v 와 평행하고 v 와 상위 경계를 잇는 선분).

$$\alpha_v = -2t_v^3 + 3t_v^2 \quad (t_v = \frac{|h_v|}{|H_v|})$$

한편 회전각 보간 영역의 상위 경계 바깥에 있는 정점에는 회전각 보간를 0, 하위 경계의 바깥에 있는 정점에는 1을 설정하여 회전각 보간 영역 내·외부의 피부가 자연스럽게 이어지도록 한다.

4 실험 결과

실험 환경은 Iris Performer로 개발되었고, 두 개의 R10000 CPU와 512MB의 메모리를 탑재한 SGI Onyx IR2에서 구동되었다. 머리와 손, 발 등은 메쉬로부터 분리된 뒤 강체 모델(rigid body model)과 같은 방법으로 움직여 성능을 높일 수 있었다. 그림 4는 공을 던지는 모습의 동작 포착 정보를 사용하여 인체 메쉬를 변형시킨 결과이다. 실험 결과, 약 4000개의 정점으로 이루어진 인체 모델을 변형시켰을 때 초당 25 프레임 이상의 속도를 얻을 수 있었다.

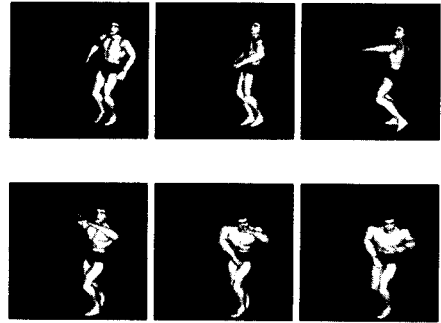


그림 4: 애니메이션 결과

5 결론

본 논문은 인체 메쉬의 각 정점에 보간된 회전각을 적용하는 실시간 인체 변형 모델을 제안하였다. 인체 변형을 위한 전처리로서 드로니 삼각화법 이용한 안정적인 피부 영역 분할 방법을 제시하였고, 사원수로 표현된 뼈대의 회전을 구부러짐과 뒤틀림으로 분해하여 움직임이 복잡한 관절 주변에서도 피부를 자연스럽게 표현하였다. 향후에는 근육의 팽창 및 수축과 자체 침투 문제를 실시간으로 처리하는 방법에 관하여 연구하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Nina Amenta, Marshall Bern, and Manolis Kamvyselis. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm. In *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, July 1998.
- [2] John E. Chadwick, David R. Haumann, and Richard E. Parent. Layered construction for deformable animated characters. In *Computer Graphics*, July 1989.
- [3] Shen Jianhua, Nadia Magnenat-Thalmann, and Daniel Thalmann. Human skin deformation from cross-sections. In *Computer Graphics Int. '94*, 1994.
- [4] Ron MacCracken and Kenneth I. Joy. Free-form deformations with lattices of arbitrary topology. In *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, August 1996.
- [5] Nadia Magnenat-Thalmann, Richard Laperriere, and Daniel Thalmann. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping. In *Proceedings of Graphics Interface '88*, June 1988.
- [6] Ferdi Scheepers, Richard E. Parent, Wayne E. Carlson, and Stephen F. May. Anatomy-based modeling of the human musculature. In *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, 1997.
- [7] T. W. Sederberg and S. R. Parry. Free-form deformation of solid geometric models. In *Computer Graphics*, August 1986.
- [8] K. Shoemake. Animating rotation with quaternion curves. In *Computer Graphics*, 1985.
- [9] Marek Teichmann and Seth Teller. Assisted articulation of closed polygonal models. In *Conference abstracts and applications: SIGGRAPH 98*, July 1998.
- [10] Daniel Thalmann. Deformable surfaces using physically-based particle systems. In *Computer Graphics International '95*, 1995.
- [11] Jane Wilhelms and Allen Van Gelder. Anatomically based modeling. In *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, August 1997.