

헤어의 가닥 움직임을 효율적으로 제어하기 위한 PBD기반 프레임워크

박도희^o, 김종현^{*}

^o인하대학교 소프트웨어융합대학(디자인테크놀로지학과),

^{*}인하대학교 소프트웨어융합대학(디자인테크놀로지학과)

e-mail: jonghyunkim@inha.ac.kr

PBD-based Framework for Efficiently Controlling the Movement of Strands in Hair

Dohee Park^o, Jong-Hyun Kim^{*}

^oCollege of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University,

^{*}College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University

● 요약 ●

본 논문에서는 위치기반 동역학(Position-based dynamics, PBD)으로 계산된 헤어의 움직임을 가닥(Strand)단위로 제어하는 효율적인 프레임워크를 제안한다. 시뮬레이션된 데이터로부터 추적한 위치와 속도를 기반으로, 헤어 입자의 속도 변화, 루트-팁(Root-Tip)관계, 그리고 추적 가닥과의 위치 관계를 헤어 움직임을 제어하는 기준치로 반영하여 자연스럽게 팔랑거리는 가닥 움직임을 갖도록 제어한다. 이를 통해서 정적인 제어 방식이 아닌, 헤어가 가지고 있는 탄력성인 특징은 유지하면서 제어되는 결과를 보여준다.

키워드: 헤어 시뮬레이션(Hair simulation), 위치기반 동역학(Position-based dynamics), 추적 해법(Tracking solution), 가닥(Strand)

I. Introduction

본 논문은 PBD[1]로 시뮬레이션 된 헤어 가닥의 위치를 추적하여 다수의 헤어 가닥을 효율적으로 제어하는 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 모든 헤어 가닥을 시뮬레이션하는 것이 아닌, 가이드 가닥의 움직임으로부터 헤어의 움직임을 제어하기 때문에 물리 기반 시뮬레이션보다 적은 연산으로 복잡한 헤어의 움직임을 표현할 수 있다. 이 과정에서 나타나는 부자연스러운 움직임을 개선하기 위해 속도 변화에 따른 적응형 기준치를 적용한다. 사용자는 이 값을 조정하여 헤어 가닥의 움직임을 팔랑거리도록 자연스럽게 분산시킨다.

그리고 그 입자가 제약 조건 함수를 만족하도록 위치를 보정하고, 이전 프레임과 현재 프레임 사이의 위치 차이를 이용하여 속도를 계산한다.

이 기법은 헤어뿐만 아니라 옷감, 강체 유체 등 다양한 시뮬레이션 대상에 적용할 수 있다[3,4]. 또한, 길이 제약조건으로 스트레칭(Stretching)을 방지하거나, 이면각(Dihedral angle)을 제약조건으로 굽힘을 제어하는 등 원하는 함수를 제약조건으로 이용할 수 있어 다양한 시뮬레이션에 확장 및 활용할 수 있다.

2. Tracking Solution

2.1 Coarse-to-fine correspondence

추적 해법(Tracking solution)은 물리 연산으로 시뮬레이션 되는 가이드(Guide) 헤어와, 이와 대응 관계를 맺으며 위치를 추적하는 디테일(Detail) 헤어로 헤어의 움직임을 표현하는 기법이다[2]. 이러한 가이드 헤어와 디테일을 헤어의 위치 관계를 *Coarse-to-fine correspondence*라고 하며, 가이드 헤어는 상대적으로 적은 가닥 개수와 입자 수의 다소 거친 시뮬레이션으로 연산되며, 디테일 헤어는

II. Preliminaries

1. Position-Based Dynamics

PBD는 주어진 제약 조건을 만족하도록 보정된 위치를 기반으로 물리 연산을 진행하는 시뮬레이션 방법이다. 하나의 입자에 대한 PBD 시뮬레이션을 예로 들면, 입자에 작용하는 외력에 대해 오일러(Euler) 스텝을 이용해서 다음 프레임의 속도와 위치를 계산한다.

상대적으로 많은 가닥과 입자들로 구성되어있어 부드러운 가닥의 움직임이 표현된다.

가이드 헤어 가닥 g_i 와 디테일 헤어 가닥 d_j 의 대응은 아래 수식 1에서 최소 합숫값을 가지는 가이드 헤어로 이루어진다. 디테일 헤어는 자신을 이루는 입자 $d_{j,k}$ 와 $prox(d_{j,k}, g_i)$ 가 반환하는 $d_{j,k}$ 와 가장 가까운 가이드 헤어의 입자 g_i 간의 거리의 합을 모두 더해, 가장 적은 거리 합 $d(d_j, g_i)$ 값을 가진 가이드 헤어의 입자를 추적할 가이드 헤어로 대응시킨다.

$$d(d_j, g_i) = \sum_k \| d_{j,k} - prox(d_{j,k}, g_i) \|^2 \quad (1)$$

실제 추적은 입자와 입자 간에 이루어지는데, 이때 가이드 헤어의 입자와 디테일 헤어들의 입자는 1:N의 대응 관계를 맺는다. 이러한 관계에서 시뮬레이션을 효과적으로 표현하기 위해 하나의 가이드 헤어 입자에 디테일 헤어 입자들의 질량 중심점을 계산하여 대응시킨다.

2.2 Dynamic constraint targets

추적 해법으로 연산된 움직임을 더욱 매끄럽게 표현하기 위해서, 입자의 위치는 스플라인 곡선으로 보간하는 방식을 이용한다. 특히 *Coarse-to-fine* 대응관계를 맺는 헤어 시뮬레이션의 경우, 디테일 헤어들이 가이드 헤어의 거친 움직임을 그대로 추적한다면 부자연스럽고 상대적으로 거친 움직임을 가지게 된다. 이를 적용하기 위해 헤어 입자들의 위치를 곡선 보간 하여 시뮬레이션 결과에 반영한다.

2.3 Spread control

가이드 헤어 하나에 여러 디테일 헤어가 대응되는 경우, 이 디테일 헤어들은 모두 동일한 움직임을 갖는다. 이렇게 헤어가 한 뭉치처럼 표현되는 부자연스러운 문제를 해결하기 위해, 결과 움직임을 스프레드처럼 퍼지도록 제어하기 위해 최적화 함수에 수식 2과 같은 항을 추가한다.

$$P_{j,k} = k_v (V_{j,k} - \bar{V}_{j,k})^2 \quad (2)$$

여기서 $V_{j,k}$ 는 현재의 분산, $\bar{V}_{j,k}$ 는 목표 분산, k_v 는 페널티 계수이다. 이 값은 다음과 같이 계산한다 (수식 3 참조).

$$V_{j,k} = \sum_{(i,l) \in C_{j,k}} \| c_{j,k} - d_{l,i} \|^2 \quad (3)$$

디테일 헤어 입자들의 질량 중심점 c 와 각 입자 d 들의 거리 합으로 나타난다. $\bar{V}_{j,k}$ 는 초기 분산 값 v_0 가 기본 연산 값으로 이용되지만, 사용자가 $2.5v_0$ 등으로 조정하여 원하는 움직임을 얻을 수 있다. 하지만 이러한 접근법은 상대적으로 계산량이 크기 때문에 실시간 애플리케이션 활용하기 어렵다는 한계가 있다. 본 논문에서는 실시간으로 동역학 계산이 가능한 PBD 기반으로 헤어를 제어시킬 수 있는 평량화된 알고리즘에 대해 제안한다.

III. The Proposed Scheme

1. Setting up a Tracking Relationship between Hair Strands

시뮬레이션의 초기 단계에서 전체 헤어 가닥의 시뮬레이션 기준이 될 타겟(Target) 가닥과 그 움직임에 따라 제어될 고스트(Ghost) 가닥을 생성한다. 생성 후 타겟 가닥과 고스트 가닥의 대응 관계를 설정한다. 한 개의 타겟 가닥에는 한 개 이상의 고스트 가닥이 대응될 수 있다. 이러한 경우에는 여러 고스트 가닥의 공간 평균 위치, 즉 가닥을 이루는 노드들의 질량 중심점 위치가 타겟 가닥을 추적한다. Fig. 1은 고스트 가닥들의 질량 중심점과 타겟 노드 간의 대응 관계를 나타내고 있는 그림이다.

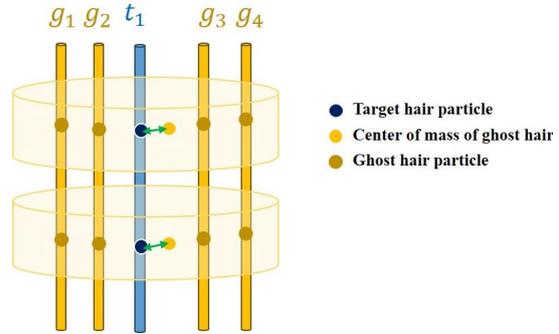


Fig. 1. Correspondence between center of mass and target particle.

추적 과정에서 타겟 가닥은 PBD 기반으로 실시간 시뮬레이션되며, 같은 타겟 가닥에 대응된 고스트 가닥끼리는 같은 움직임을 가진다. 이 문제는 이전 연구에서도 유사하게 나타난 문제이다[2]. 고스트 가닥들은 자신에게 대응되는 타겟 가닥의 속도를 가지며, 이 속도를 적분하여 위치를 결정한다.

2. Weights for Elastic Strand Movement

앞에서 언급했듯이 추적 해법의 단점은 같은 타겟 가닥을 기준으로 하는 고스트 가닥끼리 동일한 움직임을 갖는다는 것이다. 특히 헤어가 좌우로 흔들리는 경우 자연스럽게 찰랑거리기보다는 고스트 가닥이 한 덩어리처럼 움직이는 어색한 형태를 보인다. 더욱 자연스러운 움직임을 위해서는 팁 부분의 움직임을 개선해야 한다. 찰랑거리라는 탄력적인 가중치인 W^* 은 각 헤어 노드의 이전 속도와 현재 속도의 변화를 통해 설계한다 (수식 4 참조).

$$W^* = (v \cdot v_0) \times 0.5 + 0.5 \quad (4)$$

위 수식에서 이전 속도와 현재 속도를 내적 하면, 벡터 사잇각에 따른 코사인 세타를 얻을 수 있다. 이 값을 노드의 위치를 계산하는 과정에 추가하여 속도 변화가 상대적으로 큰 곳에서 움직임이 과장되도록 설계한다 (수식 5 참조).

$$pos^* = pos + v(W^* + (w_{tip} + w_{cm})) \quad (5)$$

여기서 pos^* 는 가중치가 적용된 입자의 위치이다. 조금 더 화려한 움직임을 부여하기 위해서는 팁(Tip)에 가까운 정도에 비례하는 가중치 w_{tip} 를 더해준다. 이 가중치를 이용하면 팁 부분의 찰랑거림을 과장할 수 있다.

또한, 하나의 타겟 가닥에 여러 고스트 가닥이 대응되는 경우 고스트 가닥들의 분산을 제어하는 가중치를 줄 수 있다. 타겟 노드를 추적하는 고스트 노드 그룹의 질량 중심점의 위치와, 각 노드의 위치 간의 거리에 비례한 값인 w_{com} 을 가중치에 더해주는 방식이다. 질량 중심점에 가까운 고스트 가닥일수록 적은 가중치를 주어 적게 찰랑거리게 하고, 그렇지 않을수록 큰 값을 가중치에 더해 더 크게 찰랑거리도록 제어하였다.

3. Smooth hair using Bezier Curves

헤어 가닥은 각각의 위치와 속도, 질량을 가지는 노드들로 구성되어 있다. 이때 매끄러운 헤어 가닥을 표현하기 위해 하나의 가닥 당 노드의 개수를 늘리는 방법이 있다. 그러나 헤어 시뮬레이션은 많은 개수의 가닥이 필요하기 때문에, 적은 수의 헤어 입자들인 노드들로 움직임을 계산하는 것이 효과적이다. 이때 적은 수의 노드 위치를 선으로 이어서 표현하기보다는, 점들의 위치를 곡선으로 근사해 그리는 방법을 이용한다. 수식 6은 3차원 베지어 곡선 수식이다.

$$\begin{cases} pos_x = (1-t)^3x_1 + 2(1-t)^2tx_2 + 3(1-t)t^2x_3 + t^3x_4 \\ pos_y = (1-t)^3y_1 + 2(1-t)^2ty_2 + 3(1-t)t^2y_3 + t^3y_4 \\ pos_z = (1-t)^3z_1 + 2(1-t)^2tz_2 + 3(1-t)t^2z_3 + t^3z_4 \end{cases} \quad (6)$$

각 고스트 가닥의 노드들을 4개씩 그룹 지어 3차 베지어 곡선을 생성한다. 고스트 가닥의 노드가 베지어 곡선의 제어점이 되어 곡선을 그리기 때문에 가닥을 매끄럽게 표현할 수 있다.

IV. Results

본 논문에서는 많은 개수의 헤어 가닥을 효과적으로 시뮬레이션하기 위해 기준이 되는 타겟 가닥의 움직임을 대응시키는 방법을 이용한다. 하지만 이러한 접근법은 고스트 가닥들의 움직임이 모두 같아 부자연스럽다는 문제점을 가진다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위해서 각 노드의 속도에 찰랑거리라는 가중치를 적용하였다.

Fig 2a와 2b는 가중치 적용 전후의 차이를 나타내고 있다. 분홍색 라인으로 나타난 부분이 가중치가 적용된 가닥이며, 이에 수직으로 연결된 빨간색 라인은 가중치가 적용되지 않는 헤어 가닥과의 차이를 나타내고 있다. 가중치가 적용된 헤어 가닥은 이산 시간 단위 전후의 속도 차이가 클수록 더 빠른 속도로 움직이며 효과적으로 찰랑거림을 확인할 수 있다 (Fig. 2a 참조). 하나의 타겟 가닥에 여러 고스트 가닥이 대응된 경우인 Fig. 2b와 2c에는 고스트 가닥의 각 노드와 질량 중심점 간의 거리에 비례한 크기의 속도 가중치를 추가로 적용해 결과이다. 이를 통해서 헤어 가닥이 모두 같은 움직임을 가지는 것이 아니라 자연스러운 분산되는 형태로 제어한 결과를 보여주었다 (Fig. 2c 참조).

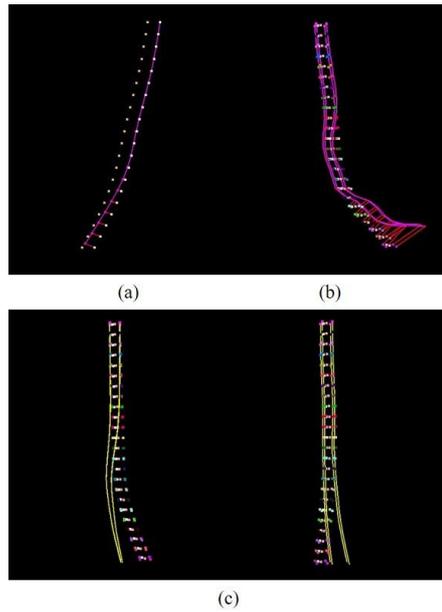


Fig. 2. Before and after weighting adjustment : (a) target-ghost 1-to-1 correspondence, (b) target-ghost 1-to-4 correspondence, (c) ghost strands with reasonable spread (yellow).

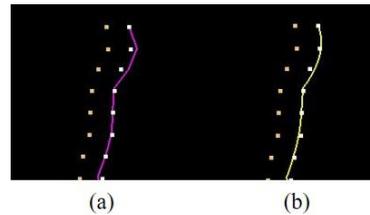


Fig. 3. Before and After Bézier curve adjustment : (a) before Bézier curve adjustment, (b) after Bézier curve adjustment

Fig 3은 베지어 곡선 근사를 적용한 헤어의 가닥을 나타낸 결과이다. 본 논문에서는 적은 개수의 노드로 표현된 헤어를 부드럽게 나타내기 위해 베지어 곡선의 이용한다. 베지어 곡선 수식을 통해 각 노드의 위치를 제어점으로 갖는 곡선이 생성된다.

V. Conclusions

본 논문에서는 많은 개수의 헤어 가닥의 움직임을 추적 해법을 기반으로 탄력적 가중치를 적용하여 효율적으로 제어하는 방법을 제안하였다. 모든 헤어 가닥에 PBD 알고리즘을 적용하지 않더라도, 각 헤어 가닥이 흔들림 등의 외력에도 자연스럽게 반응하고, 찰랑거리 는 형태로 제어되는 결과를 보여주었다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 타겟 가닥과 고스트 가닥을 이루는 노드가 1:1로 대응될 때는 효과적이다. 하지만 1:N 대응과 같이 노드의 개수가 다른 경우, 베지어 곡선 근사가 부자연스러운 움직임을 갖는 문제가 나타난다. 향후, 이를 개선하기 위해서 노드 간 스프라인 보간 등 적절 곡선 보간 방식을 적용하여 알고리즘을 확장할 계획이다.

REFERENCES

- [1] Müller, Matthias, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff. "Position based dynamics." *Journal of Visual Communication and Image Representation* 18, no. 2 (2007): 109-118.
- [2] Milliez, Antoine, Robert W. Sumner, Markus Gross, and Bernhard Thomaszewski. "HairControl: a tracking solution for directable hair simulation." In *Computer Graphics Forum*, vol. 37, no. 8, pp. 115-123. 2018.
- [3] Müller, Matthias, Tae-Yong Kim, and Nuttapong Chentanez. "Fast Simulation of Inextensible Hair and Fur." *VRIPHYS* 12 (2012): 39-44.
- [4] Macklin, Miles, and Matthias Müller. "Position based fluids." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 32, no. 4 (2013): 1-12.