

젖은 머리카락의 효율적인 표현을 위한 적응형 샘플링 방식

윤주영⁰, 김동희*, 김종현*
⁰강남대학교 소프트웨어응용학부,
*강남대학교 소프트웨어응용학부
e-mail: jonghyunkim@kangnam.ac.kr

Adaptive Sampling Approach for Efficient Representation of Wet Hairs

Ju-Young Yun⁰, Donghui Kim*, Jong-Hyun Kim*
⁰School of Software Application, Kangnam University,
*School of Software Application, Kangnam University

● 요약 ●

본 논문에서는 젖은 머리카락의 응집력을 효율적으로 표현할 수 있는 적응형 샘플링 기법을 제안한다. 젖은 헤어는 인접 머리카락과 달라붙어 머리카락 하단으로 뭉치는 응집력 형태를 지닌다. 헤어 동역학은 수많은 입자 구조로 연결되어있으며 머리카락의 상호작용을 고려하는 젖은 헤어의 경우 응집력 계산이 개별적인 머리카락 단위로 표현되기 때문에, 이를 위한 계산과정을 효율적으로 풀어내는 것은 중요하다. 본 논문에서는 젖은 헤어의 시뮬레이션을 효율적으로 계산하기 위해 밀도와 각도, 그리고 포화도를 고려한 적응형 샘플링 기법을 제안한다. 이는 속도와 메모리 측면에서 최적화가 가능하며 헤어 입자의 추가와 삭제를 통해 사실적인 젖은 머리카락의 응집력 표현을 실시간으로 표현할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방법은 실제 젖은 헤어와 유사한 결과를 보여주며, 실시간 프로그램에서 사람의 젖은 모발 또는 동물의 젖은 털의 특징 등을 표현하는데 응용할 수 있다.

키워드: 젖은 헤어(Wet hair), 헤어 시뮬레이션(Hair simulation), 굽힘 스프링(Bending spring), 적응형 샘플링(Adaptive Sampling)

I. Introduction

헤어의 동역학을 통한 사람의 모발과 동물의 털 표현은 가상 캐릭터의 스타일을 가시적으로 표현할 수 있는 중요한 특징으로써 애니메이션 및 메타버스 분야의 높은 수요에 따라, 오랜 기간 다뤄온 주제이다 [1,2,3]. 하지만, 젖은 머리카락의 복잡한 상호작용을 표현하는 방법은 상대적으로 초기 단계에 해당하며, 헤어의 2차 효과(Secondary effects)에 의해 표현되기 때문에 상대적으로 계산량이 크다[4]. 본 논문에서는 젖은 헤어가 갖는 성질인 응집력에 대한 적응형 샘플링 기법을 제안한다. 이를 표현하기 위해 헤어는 수중에 잠긴 다공성 매질 형태로 가정하며[5], 다공성 매질의 헤어는 응집력에 따라 서로 달라붙어 뭉치를 형성한다. 응집력은 각 헤어 입자의 포화도에 따라 결정된다. 이때, 헤어의 뻣뻣함(Stiffness)을 제어하기 위해 밀도와 포화도가 높은 부분의 각도를 기반으로 굽힘이 크게 발생한 부분에 입자를 추가하여 부드러운 곡선을 표현하는 적응형 샘플링 기법을 적용한다. 이를 구현하기 위한 본 논문의 기여도는 다음과 같다:

- 젖은 헤어의 응집력 표현
- 젖은 헤어의 적응형 샘플링 기법

II. The Proposed Scheme

본 논문에서 제안하는 젖은 머리카락의 적응형 샘플링 방식은 헤어 동역학을 실시간으로 표현하기 위해 PBD(Position-based dynamics) 기반의 DFIL(Dynamic follow-the-leader) 알고리즘을 이용한다[6,7]. PBD는 위치 기반 알고리즘으로 현재 위치, 이전 상태의 위치, 프레임 갱신 시간을 바탕으로 물리 연산을 계산한다. 각 머리카락은 수분을 흡수한 포화 상태의 다공성 입자로 샘플링된다. 하나의 다공성 입자는 질량, 밀도, 포화도, 위치, 힘, 속도 요소들을 포함한다.

1. Representation of cohesiveness of wet hair

젖은 헤어는 마른 헤어와 달리 가까운 머리카락과 달라붙어 상호작용을 하는 특징이 있다. Fig. 1을 통해 헤어가 물에 젖었을 때, 응집력에 의해 하단으로 머리카락이 뭉치는 현상이 나타난다는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 1b 참조).



Fig. 1. Comparison of dry hair and wet hair.

머리카락 사이에 발생하는 응집력은 수식 1을 이용하여 헤어 입자 i, j 의 응집력을 계산한다.

$$F_{i-j}^{dumping} = -\delta \bar{S} U^{atten} \rho_i \rho_j C(|x_i - x_j|) \frac{x_i - x_j}{|x_i - x_j|} \quad (1)$$

위 수식을 통해 응집력은 거리와 포화도에 비례한다는 점을 알 수 있다. 응집력을 사실적으로 표현하기 위해 자착력 계수인 δ 는 0.08 값으로 설정한다. 각 모발 입자의 포화도는 0과 1 사이의 값으로 젖은 머리카락 사이의 접착력 강도를 나타내며, \bar{S} 는 헤어 입자들의 평균 포화도를 의미한다. Fig. 1a는 마른 헤어로 포화도 값을 0으로 설정하여 응집력이 없는 반면, Fig. 1b는 젖은 헤어로 하단으로 갈수록 포화도 값을 크게 설정하여 응집력 형태를 표현한다. U^{atten} 은 수중 머리카락에 대한 감쇠 계수(Damping coefficient)이다. 수식 1의 $C(r)$ 는 스플라인 함수 기반의 커널로 다음과 같다 (수식 2 참조). 이 수식에서 R 은 헤어 입자인 i 와 j 의 반지름의 합을 의미하며, h 는 커널의 반지름이다.

$$C(r) = \frac{32}{h^9} \begin{cases} (h-q)^3 q^3 & r > R \wedge r \leq h \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

$$q(r) = (r + \frac{h}{2} - R) \frac{R}{h}$$

$$R = r_a + r_b$$

이 커널에 대한 그래프를 시각적으로 표현하면 다음과 같다 (Fig. 2 참조). 머리카락 사이 거리가 0.03보다 작은 경우 매우 가까우므로 머리카락이 하나로 겹쳐진 상태로 간주하며, 이때 자착력은 0으로 적용하지 않는다. 거리가 0.03부터 점차 증가하면서 자착력도 비례하게 증가한다. 커널 값이 $\frac{h}{2}$ 인 0.5를 넘어가는 경우 머리카락 간격이 상호작용이 불가할 정도로 멀리 떨어진 경우이기 때문에 자착력을 적용하지 않는다.

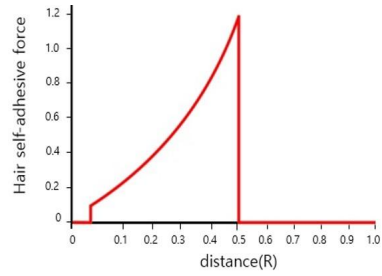


Fig. 2. C-spline kernel graph.

수식 1의 ρ_i 와 ρ_j 는 헤어 입자 i 와 j 의 밀도를 나타내며, 젖은 헤어의 응집력 현상에서 밀도는 머리카락의 입자 위치의 조밀한 정도에 따라 계산된다. 위치 x_i 의 입자 밀도는 수식 3을 이용하여 계산하며, d_0 은 입자 사이 초기 거리, x_j 와 m_j 는 각각 입자 j 의 위치와 질량을 의미한다. 그리고 α 는 스케일링 상수로 본 논문에서는 4.0으로 설정하였다.

$$\rho(x_i) = \sum_j m_j W_{smooth}(x_j - x_i, \alpha d_0) \quad (3)$$

$$W_{smooth}(r, h) = \begin{cases} 1 - \|r\|^2/h^2 & 0 \leq \|r\| \leq h \\ 0 & otherwise. \end{cases}$$

여기서 $W_{smooth}(r, h)$ 는 인접 입자들의 평균을 계산하기 위해 사용된다. 입자 밀도 ρ 를 계산하기 위해 해시 테이블(Hash table)을 사용하여 모든 입자를 정렬하고 인접 입자를 빠르게 수집하였다. 머리카락의 상호작용을 계산하기 위해서는 각 헤어 입자들의 물리적 속성이 중요하다. 젖은 머리카락 입자에 응집력을 적용하여 주위 머리카락과 뭉치는 자착력 현상을 동적으로 시뮬레이션하기 위해서는 Fig. 3과 같이 최소 2가닥 이상의 머리카락이 필요하다. Fig. 3은 2가닥의 머리카락에 대한 응집력 시뮬레이션 결과를 간단하게 표현한 결과이다. 머리카락의 입자 상호작용 계산에 있어 중첩 반복문 사용의 비효율성을 개선하기 위해 본 연구에서는 해싱 자료구조를 사용하였으며, 전체 범위가 아닌 부분적으로 인접 입자에 대해 계산하였다.



Fig. 3. Comparison of results for cohesion force.

2. Adaptive sampling for wet hair

Fig. 4는 적응형 샘플링이 적용되지 않은 경우(Fig. 4a와 4c)와 적응형 샘플링이 적용된 경우(Fig. 4b와 4d)에 대한 결과를 나타낸다.

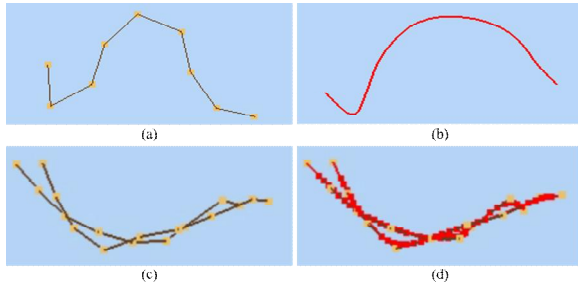


Fig. 4. Adaptive strand in hair simulation (yellow particle & brown line : input data, red particle & red line : refined data).

본 논문에서는 적응형 샘플링은 굽힘을 부드럽게 표현하기 위해 2차 베지에 곡선(Bezier curve)을 그린다. Fig. 4a는 입력 데이터이며, 이것은 가이드 입자와 라인을 그릴 것이고, Fig. 4b는 적응형 샘플링이 적용된 베지에 라인만을 그릴 결과이다. Fig. 4c와 4d는 동일한 머리카락의 움직임에서 적응형 샘플링을 비교한 결과이다. 헤어 입자 9개를 지닌 두 가닥의 머리카락을 표현한 Fig. 4c의 데이터에서 총 54개의 헤어 입자가 적응적으로 추가되어 Fig. 4d가 되었으며, 추가된 입자를 바탕으로 곡선을 그려 헤어의 부드러운 굽힘을 표현할 수 있다.

베지에 곡선은 이전 입자 P_0 , 현재 입자 P_1 , 다음 입자 P_2 이 있을 때 $t : (1-t)$ 로 나누는 내분점을 활용하여 부드러운 곡선을 표현한다 (수식 4 참조). 적응형 샘플링에서 고려하는 조건은 다음과 같다.

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2t(1+t) P_1 + t^2 P_2 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (4)$$

- 두 입자 사이의 각도가 10° 이상인 경우
- 현재 입자 밀도가 다음 입자 밀도보다 낮은 경우
- 포화도 값이 0 이상인 경우

본 논문에서는 위 조건을 만족하는 경우 베지에 곡선을 그려 실제 헤어와 유사한 부드럽고 연속적인 머리카락을 표현한다.

III. Results

본 논문에서는 젖은 헤어의 응집력을 효율적으로 표현할 수 있는 적응형 가닥 샘플링 기법을 제시하였다. 우리의 방법은 앞에서 언급한 3가지 조건에 따라 젖은 헤어의 경우 하단 부분은 밀도가 높아 적응형 샘플링이 적용되지 않는다.

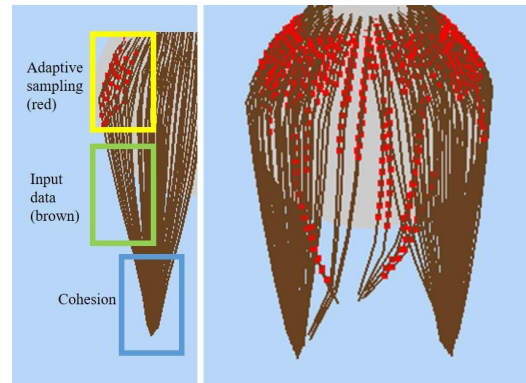


Fig. 5. Adaptive wet hair adaptive sampling with our method.

Fig. 5는 헤어의 움직임에 따라 각도 변화에 의해 굽힘이 생기면서 헤어의 밀도가 상대적으로 낮은 상단 부분에서 적응형 샘플링이 적용되었으며, 빨간색 입자가 새롭게 추가된 헤어 입자를 확인할 수 있다. 특히 일부 뭉치지 않은 머리카락의 경우 밀도가 상대적으로 낮아져 자동으로 헤어 입자가 추가되고 적응형 샘플링이 적용되어 부드러운 헤어의 특성을 온전하게 표현하는 것을 볼 수 있다.

IV. Conclusions

본 논문에서는 젖은 머리카락의 효율적인 표현을 위한 적응형 헤어 시뮬레이션의 새로운 방식을 제안하였다. 제안하는 방법은 각도만 고려하였던 기존 적응형 샘플링 기법에 비해 각도, 포화도, 밀도를 모두 고려하므로 젖은 헤어의 상호작용에 따른 응집력 특성을 두드러지게 표현할 수 있다. 향후, 젖은 헤어가 고체와 상호작용할 때 불거나 물 내부에서 부력에 의해 표현되는 헤어의 움직임을 효율적으로 표현할 수 있는 방법에 대해 연구를 진행할 계획이다.

REFERENCES

- [1] Lin, Wei-Chin. "Coupling hair with smoothed particle hydrodynamics fluids." (2014).
- [2] Rungjiratananon, Witawat, Yoshihiro Kanamori, and Tomoyuki Nishita. "Wetting effects in hair simulation." In Computer Graphics Forum, vol. 31, no. 7, pp. 1993-2002. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2012.
- [3] Selle, Andrew, Michael Lentine, and Ronald Fedkiw. "A mass spring model for hair simulation." In ACM SIGGRAPH 2008 papers, pp. 1-11. 2008.
- [4] Kim, Jong-Hyun, Wook Kim, Young Bin Kim, Jaeho Im, Jung Lee, and Sun-Jeong Kim. "Robust handling of clumping and stiffness in wet hair animation." Computer Animation and Virtual Worlds 28, no. 6 (2017): e1796.
- [5] Lenaerts, Toon, Bart Adams, and Philip Dutré. "Porous flow

- in particle-based fluid simulations." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 27, no. 3 (2008): 1-8.
- [6] 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.
- [7] Müller, Matthias, Tae-Yong Kim, and Nuttapong Chentanez. "Fast Simulation of Inextensible Hair and Fur." *VRIPHYS* 12 (2012): 39-44.