

거리 장 함수를 이용한 얇은 막과 유체의 예측 기반 상호작용 시뮬레이션

김보람 신승호 임재호 김창현⁰

고려대학교

chkim@korea.ac.kr

Interaction of Fluid and Thin Shell Structure with Signed Distance Fields

Po Ram Kim Seung Ho Shin Jea Ho Lim Chang Hun Kim⁰

Korea University

요 약

컴퓨터 그래픽스에서 입자 기반의 유체와 강체 모델과의 상호작용을 정확히 시뮬레이션 하는 것은 중요한 문제이다. 일반적으로 이러한 상호작용은 시간에 대해 연속적이지 않은 환경에서 시뮬레이션 되어왔다. 이로 인해 상호작용을 시뮬레이션하는 데 있어서 많은 오차가 있었다. 본 논문에서는 이러한 불연속적인 환경에서 발생하는 오차를 해결하는 방법을 제안한다. 강체 모델의 거리함수장인 음함수가 공간에 따라 연속적으로 증가하는 특성을 이용하여 입자 충돌을 예측하는 예측 기반 충돌 처리 기법을 제안한다. 유체입자와 강체 모델이 충돌할 때 정확한 충돌시점과 충돌 지점을 계산한다. 이를 통하여 유체와 강체가 실제 환경인 연속적인 환경에서와 같이 상호작용하도록 시뮬레이션 하였다.

Abstract

In Computer Graphics, interaction between a particle-based fluid and a rigid body is important. In General, this interaction has been simulated in a discrete environment. As a result, there have been lots of errors. The larger the time step is used, the bigger the error is. This paper describes how to minimize the error in a discrete environment. To be specific, the collision handling method is that estimates particle collision using a signed distance function increases continuously according to space. At the time a fluid particle and a rigid body model collide, the exact collision time and the position is estimated. Through this, we propose the method how to be simulated the interaction between a fluid and a rigid body model as a continuous environment.

키워드: SPH, 유체와 강체의 상호작용, 거리 장 함수

Keywords: SPH, Interaction of Fluid and Thin Shell Structure, Signed distance field

1. 서론

컴퓨터 그래픽스에서 유체와 강체 모델과의 상호작용은 중요하며 시뮬레이션에서 반드시 필요하다. 또한 실제적인 장면을 시뮬레이션 하기 위해 정확한 상호작용은 필수적이다. 지금까지 유체와 강체 모델의 시뮬레이션은 많은 연구가 진행되어왔다. 하지만 대부분의 시뮬레이션이 불연속적인 환경에서 시뮬레이션 되기 때문에 문제가 발생되어 왔다. 유체가 강체 모델을 감지하지 못하고 통과하는 현상이 발생했다. 이러한 문제는 타임스텝이 클수록 심각한 문제를 초래했다. 예를 들어, 입자가 강체를 통과하여 유체가 그릇에 담기는 장면을 시뮬레이션 할 경우 그릇 밖으로 유체가 새는 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 SPH 기반의 유체와 강체 모델과의 상호작용에 있어서 불연속적인 환경에서 발생하는 오차를 강체 모델의 거리 장 함수인 음함수를 이용하여 해결하고자 하였다. 거리 함수장인 음함수가 강체 모델의 표면에서는 '0'으로 정의 되어 있고 표면과 멀어지면 유클리디안 거리를 저장하고 있는 특성을 이용하였다. 본 논문에서는 이를 이용하여 유체와 강체와의 충돌을 예측하고 정확한 충돌반응을 계산하는 예측 기반의 충돌 처리하는 기법을 소개 한다.

이전 연구에서는 강체 모델에 가상의 입자가 있다고 가정하여 가상의 물체에 있는 입자와 유체입자와의 충돌을 검색하는 방법이 있었다.[Monaghan et al. 2003 ; Seungtaik Oh et al. 2009] 이 방법의 알고리즘 복잡도는 $O(n*m)$ 이다. 여기서 n 은 유체입자의 개수이고, m 은 강체 모델에 있는 가상의 입자 개수를 의미한다. 이러한 방법을 사용하면 충돌을 검사하는 과정에서 계산량이 많아 시뮬레이션의 전체속도가 저하된다. 또한 강체 모델에 있는 가상의 입자를 세밀하게 설정하지 않으면 충돌을 정확하게 감지할 수 없다. 따라서 물체 속으로 들어가는 유체입자가 있을 수 있다. SPH 기반의 유체 모델과 거리 장 함수인 음함수로 표현된 강체 모델과의 상호작용이 소개되었다.[Adams et al. 2007 ; Kai Bao et al. 2009]. [Adams et al. 2007 ; Kai Bao et al. 2009]에서는 유체입자와 강체 모델과의 거리를 측정하여 일정 음함수 값 이하이면 충돌이라고 감지했다. 하지만 타임 스텝이 클 경우 얇은 막과 같은 물체에서는 입자가 얇은 막 안으로 들어가지 않을 경우, 즉 그냥 통과 할 경우 충돌을 예측할 수 없었다. 또한 충돌한 정확한 시점을 알 수 없었다. 따라서 얇은 막과 같은 강체 모델에서 타임스텝이 클 경우, 유체입자가 강체 모델을 통과하는 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 유체 입자와 강체 모델과의 상호작용에 있어서 정확한 위치를 예측하는 방법을 제안한다. 이전까지의 연구에서는 충돌의 정확한 위치를 예측하기 어려웠기 때문에 그림 4 (a)와 같이 입자가 강체 모델과 충돌할 때 한 타임스텝 동안 움직이는 경로 사이에 물체가 있을 경우 충돌을 감지하지 못했다. 전통적인 충돌 검사에서 빠르게 움직이는 입자는 싱글 타임 스텝(single time step)동안 얇은 막과 같은 강체를 통과한다. 이 효과는 터널링(tunneling)으로 알려져 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 연속적인 충돌검사(Continuous Collision Detection)로 알려진 기술이 필요하다. CCD 는 불연속 위치들에서 충돌을 검사하는 대신, 타임 스텝 동안의 물체의 모션을 나타내는 가상의 공간(extruded volume)을 만들어 공간 안에 물체가 있는지 검사한다. 만약 충돌이 검출되면 충돌 시간을 계산할 수 있고 입자의 위치도 계산된다. 다른 방법으로, 타임스텝을 매우 작게 하여 어느 정도 해결할 수 있으나 유체가 큰 힘을 받아 입자의 속도가 커지면 여전히 같은 문제가 발생한다. 뿐만 아니라 타임스텝을 작게 했기 때문에 전체 시뮬레이션의 속도가 느려진다. 이러한 충돌 탐색 방법은 계산이 복잡하다.

본 논문에서는 유체와 강체 모델과의 정확한 충돌지점과 충돌시점을 강체 모델의 거리 장인 음함수를 이용하여 예측하는 방법을 제안한다. 우리의 예측기반 모델은 입자의 움직임이 시간에 연속적인 환경에 따른다고 가정하고, 타임스텝 기반의 불연속적인 시간이 아닌, 정확한 충돌 시간을 계산할 수 있다.

2. 관련연구

컴퓨터 그래픽스에서 유체 시뮬레이션 연구는 두 가지 방향으로 진행되어왔다. 첫 번째는 Navier-Stokes equation 을 governing equation 으로 하는 유체의 움직임을 FDM 을 이용해 풀이낸 방식이다.[Foster et al. 1996] 두 번째는 유체가 세밀한 입자로 구성되어있다고 가정하여 Navier-Stokes equation 을 SPH 기법을 사용하여 풀이낸 방식이다.[Muller et al. 2003]

입자 기반의 유체 시뮬레이션을 소개한 논문에서 유체와 강체 모델과의 상호작용 기법들이 소개되었다. 유체 시뮬레이션에서 유체입자와 강체 모델의 바운더리에 주고 받는 힘을 정의한 기법이 소개 되었다. 이 기법에서 유체와 강체 모델과의 상호작용은 강체 모델의 바운더리에 가상의

입자가 있다고 가정하여 유체입자와 강체 모델 입자와의 상호작용을 계산하였다. [Monaghan J] et al. 2003 ; Seungtaik Oh et al. 2009] 유체와 강체 모델과의 상호작용에 있어서 다른 기법들도 이전에 소개되었다. 유체를 표현할 때 사실상 유체는 셀 수 없이 많은 입자로 구성되어 있기 때문에 해상도를 높여서 많은 입자를 사용해야 한다는 한계점이 있다. 입자를 많이 사용할 경우 시뮬레이션의 속도가 매우 느려질 뿐 아니라 실제와 같이 수억 개의 입자를 사용할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 표면이 날카롭고 표면의 모형변화가 심한 곳에서는 작은 입자를 많이 사용하고 그렇지 않은 부분에서는 적은 수의 큰 입자를 사용한 기법이 소개되었다.[Adams et al. 2007] 이 논문에서 강체 모델과 유체와의 상호작용에서 강체 모델의 거리 장인 음함수를 이용하였다. 그 후 입자기반 유체 시뮬레이션의 한계점인 압축성 유체에 대한 문제를 보완하는 기법이 소개 되었다.[Kai Bao et al. 2009] 여기서 강체 모델과의 상호작용 역시 강체 모델의 거리함수장인 음함수를 이용하였다.

앞에 소개되었던 것과 같은 입자와 강체 모델과의 상호작용은 유체 시뮬레이션에서만 사용되지 않는다. 입자 기반의 옷감 시뮬레이션에서도 사용된다. 입자 기반의 옷감과 강체 모델과의 상호작용에 있어서 강체 모델의 거리함수장인 음함수를 이용한 기법이 소개 되었다.[Arnulph Fuhrmann et al. 2003] 하지만 이 기법에서 한계점은 옷감에 사용된 입자와 강체 모델과의 정확한 충돌 지점을 예측하지 못해 통과되는 현상이 일어나게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이 기법에서는 강체 모델에 공간적으로 약간의 허용범위인 쓰래시 홀드를 주어 해결하고자 했다. 또한 정확한 충돌지점을 예측하기 위해서 입자의 한 타임스텝에서 움직이는 경로를 잘게 쪼개어 예측할 수 있지만 시뮬레이션의 속도가 느려지기 때문에 정확한 충돌지점은 예측하지 않았다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결 하고자 하였다.

본 논문에서 소개되는 기법은 이러한 옷감과 강체 모델과의 상호작용에서 정확한 충돌 지점을 예측하는 시뮬레이션에도 쓰일 수 있다.

3. 입자기반 유체 시뮬레이션

본 논문에서는 유체 시뮬레이션을 위해 SPH 기법을 사용한다. 본 논문에서는 유체가 세밀한 입자 집합 $P = \{p_i | i = 1 \sim \text{입자 개수}\}$ 로 구성되어 있다고 가정하고 이 기법에 적용한다. 유체 입자는 위치 x_i , 질량 m_i , 부피 V_i 와 밀도 $\rho_i = m_i / V_i$ 를 가진다. 각 입자가 주고 받는 상호작용 힘을 계산하기 위해 식(1)과 같은 SPH 방정식을 이용하여 유체의 움직임을 계산한다.

$$A(\mathbf{X}) = \sum_j V_j A_j W(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}, h) \quad (1)$$

커널 함수 $W(\mathbf{X}_j - \mathbf{X}, h)$ 는 방사형의 대칭구조를 가진다. h 는 커널 함수의 정의역의 범위를 나타낸다. $A(\mathbf{X})$ 는 입자가 위치 \mathbf{X} 에서 가지는 값을 의미한다. 이 식에서는 SPH 기법을 이용하여 구하고자 하는 밀도나 압력과 같은 값을 나타낸다. j 는 주변 입자의 개수만큼 탐색한다.

우리의 유체 시뮬레이션은 [Muller et al. 2003]을 기반으로 하였다. 유체 시뮬레이션을 위한 운동방정식(Navier-Stokes 방정식)은 식(2)와 같다.

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

SPH 기법을 이 방정식에 적용하여 풀어냈다. 여기서 \mathbf{v} 는 속도, P 는 압력, μ 는 점성, \mathbf{g} 는 중력을 나타낸다.

따라서, SPH를 사용하여 유체 시뮬레이션을 수행하면, 각 시뮬레이션 타임스텝에서의 속도가 계산되며, 입자의 위치는 $\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \mathbf{v}^* dt$ 로 갱신된다. 갱신된 입자의 속도와 위치에 따라 강체와의 충돌 감지 및 반응 처리를 수행하여 유체와 강체의 상호작용을 시뮬레이션 한다. 우리는 정확한 강체와 유체 입자의 충돌 감지 및 반응 기법을 4장에서 제안한다.

4 거리 함수장을 이용한 충돌처리

본 논문에서는 강체 모델을 거리 함수장인 음함수로 표현하여 강체 모델과 유체와의 충돌감지를 빠르게 계산하는 기법을 사용한다.[Adams et al. 2007; Kai Bao et al. 2009] 현재의 입자 위치에서 삼차원 선형 보간법(trilinear interpolation)을 사용하여 강체 모델의 표면과의 거리를 빠르게 계산한다. 입자의 현 위치에서 물체표면과의 거리를 계산하여 일정한 값보다 작으면 충돌을 감지한다.

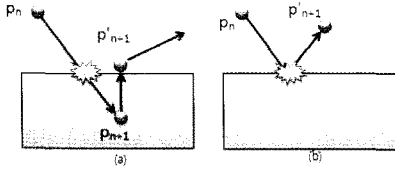


그림 1 : (a) p_{n+1} 의 위치에서 강제 모델과의 거리 값이 음수, 즉 표면 내부 이므로 입자는 충돌을 감지하여 표면 밖으로 입자의 위치를 조정한다.[Arnulph Fuhrmann et al. 2003] (b) 실제 입자와 강제 모델과의 충돌 했을 때 입자의 위치이다.

[Arnulph Fuhrmann et al. 2003]에서는 유체와 물체와의 충돌 반응에 있어서 정확한 충돌 지점을 아는 것은 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 정확한 충돌 지점을 계산하지 않고 충돌이 감지 되었을 때 대략적인 충돌처리를 한다. 그림 1의 (a)와 같이 입자가 충돌하여 물체 안으로 파고든 깊이를 측정하여 파고든 길이만큼 물체의 법선 방향으로 위치를 이동시키는 방법이다. 충돌 후 입자의 위치를 식(3)과 같이 계산한다.

$$p'_{n+1} = p_{n+1} + n * d \quad (3)$$

p_{n+1} 는 입자의 위치, p'_{n+1} 는 충돌처리 후 입자의 위치를 의미한다. 파고든 길이 d 는 p_{n+1} 에서 입자가 가지는 강제 모델과의 거리의 절대값을 의미한다. 입자가 강체의 표면에서 가지는 법선벡터 N 은 강제 모델의 거리 장 함수인 음함수의 Crank-Nicolson method 를 이용하여 구할 수 있다.

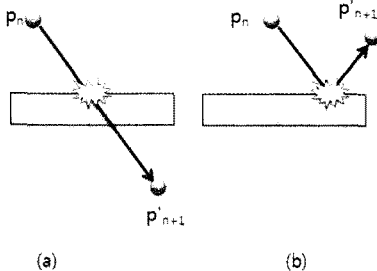


그림 2 : (a) p_{n+1} 의 위치에서 강제 모델과의 거리 값이 양수이므로 충돌이 발생했음에도 불구하고 충돌을 감지할 수 없다. (b)그림 2의 (a)의 움직임이 타임스텝이 '0'에 가까운 실제 환경에서는 일어난다면 충돌이 발생한다.

하지만 이와 같은 방법은 실제 입자의 충돌과 다르다. 실제 입자의 충돌은 그림 1의 (b)와 같다. 그림 1의 (a)와 비교해보면 충돌 후 입자의 위치가 다른 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 기존의 방법으로 충돌 후 입자의 위치를 계산하게 되면, 그림 2의 (a)와 같은 얇은 막의 경우는 충돌을 감지할 수 없고, 입자가 물체를 통과하게 된다. 실제 연속체적인 움직임으로 살펴보면, 이러한 경우 입자는 물체와 충돌하여 그림 2의 (b)와 같은 위치로 이동 해야 한다. 실제 환경인 연속적인 환경에서의 움직임은 타임스텝이 0에 가까운 상태이므로 얇은 막과 입자가 충돌하게 된다. 우리는 예측기반의 충돌 탐색 기법을 제안하여, 얇은 막과 입자의 충돌을 감지하고 상호작용을 시뮬레이션 한다. 우리의 기법은 타임스텝이 크기와 상관없이 정확하며 빠르다.

5. 예측 기반 상호작용 시뮬레이션

5.1 유체와 강제 모델과의 예측 기반의 충돌 감지

본 논문에서는 강제 모델과 유체입자와의 충돌에 있어서 새로운 기법을 제안한다.

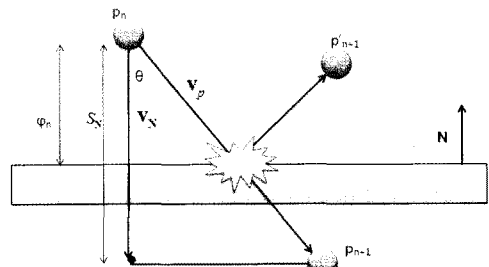


그림 3 : 입자와 강제 모델 사이의 예측 기반 충돌 모델.

거리 함수장은 법선 벡터 방향으로 증가하는 유클리드 거리를 저장하고 있다. 입자 시뮬레이션을 수행 할 때, 입자의 위치의 거리 함수장 값과 입자의 속도를 이용하면 입자가 물체와 충돌하는 시점을 예측 할 수 있다. 거리 함수 장이 법선 벡터 방향으로 일정하게 증가하는 특성과, 입자가 물체의 법선 벡터 방향으로 일정한 속도로 다가간다는 가정을 하여 충돌 시점을 예측한다.

\mathbf{v}_N 은 입자가 물체 표면의 수직방향으로 다가가는 속도이다. 따라서 \mathbf{v}_N 의 방향은 물체의 법선 벡터의 반대이다. \mathbf{v}_N 의 크기는 아래와 식과 같다.

$$|\mathbf{v}_N| = |\mathbf{v}_p| * \cos \theta \quad (4)$$

\mathbf{v}_p 는 입자의 속도이며, $\cos \theta$ 는 그림 3에서와 같이, 물체의 법선벡터와 입자의 입사 속도 벡터와의 입사각이다.

물체의 법선 벡터 방향으로 입자가 움직인 거리 S_N 은 $|\mathbf{v}_N| * dt$ 로 예상할 수 있다. 따라서 우리는 거리 함수 장을 이용한 유체입자와 강체 모델과의 거리(φ_n) 보다 움직인 거리 S_N 이 크면 충돌이라고 정의한다.

5.2 유체와 강체 모델과의 예측 기반의 충돌 반응

우리의 예측 기반 모델로 정확한 충돌 시점을 예측 할 수 있다. 우리는 dt 의 극소 시간에서 입자가 등속 운동을 하고 있다고 가정 하고, 정확한 충돌 시간 dt_c 을 계산한다. dt 보다 작은 연속된 환경에서의 실제 충돌 시간 dt_c 은 아래와 같다.

$$dt_c = \frac{\varphi_n}{\varphi_n + \varphi_{n+1}} * dt \quad (5)$$

계산된 충돌시간 dt_c 를 사용하여 충돌 후 입자의 위치를 알 수 있다. dt_c 는 현재의 입자가 충돌한 지점까지 이동하는데 소요된 시간을 의미한다. (그림 4) 한 타임스텝을 dt 라고 가정했을 때, 타임스텝 dt 에서 충돌한 지점까지 입자가 이동하는데 소요된 시간을 빼주면 충돌 후 입자가 움직이는 시간을 계산할 수 있다.

$$\mathbf{p}'_{n+1} = \mathbf{p}_n + \mathbf{v}_p * dt_c + \mathbf{v}_r * (dt - dt_c) \quad (6)$$

입자의 움직임의 계산은 식(6)과 같이 n 번째 타임스텝에서의 유체 입자가 충돌지점인 p_c 까지는 n 번째 입자의 속도 \mathbf{v}_n 로 dt_c 동안의 움직임을 계산하고, p_c 부터 $dt-dt_c$ 시간 동안은 충돌 후 계산된 충돌 반응 속도 \mathbf{v}_r 로 움직이도록 계산한다. 충돌 후 계산된 반응 속도 \mathbf{v}_r 은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_p + \mathbf{N} * (-2) * (\mathbf{N} \cdot \mathbf{v}_p) \quad (7)$$

따라서, 유체 입자와 강체가 충돌 할 경우 $n+1$ 타임스텝의 입자 위치 \mathbf{p}_{n+1} 은 \mathbf{p}'_{n+1} 로 갱신된다.

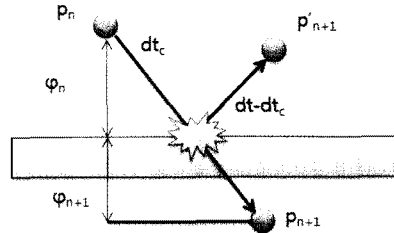


그림 4 : 본 논문에서 제안한 기법을 사용하여 상호작용했을 경우 입자의 움직임 모델링.

6. 결과

본 논문은 강체 모델의 거리 장 함수인 음함수를 이용하여 유체입자와 강체 모델과의 정확한 상호작용에 대한 방법을 제안했다. 이 기법은 유체와 강체 모델과의 상호작용에 있어서 시간을 디크릿화한 환경에서 시뮬레이션 되는 유체를 그림 2의 (b)에서와 같이 아날로그 환경에서의 입자의 움직임처럼 보이도록 한다.

입자의 움직임에 있어서 연속적인 환경에서의 위치와 본 논문의 기법과 이전에 사용되었던 기법을 사용했을 때 충돌 후 입자의 위치를 비교하면 표 1과 같다. 본 논문에서 제안한 기법을 사용하면 기존에 예측 기반을 사용하지 않은 방법으로 위치를 계산했을 때 보다 오차가 작았다. 표 1을 보면 기존 방법의 경우 타임스텝이 커지면 오차가 증가한다. 반면에 우리가 제안한 예측 기반 기법은 타임스텝에 상관없이 오차가 일정하다. 여기서 발생하는 오차는 삼차원 보간법 사용시 발생하는 수치적 손실이라 예상된다. 따라서 본 논문의 기법을 사용하면 타임스텝이 큰 환경에서도 정확한 상호작용을 할 수 있다.

그림 5는 기존 기법을 사용했을 한 경우이다. 타임스텝을 0.2로 크게 한 경우이다. 얇은 막에서 유체 입자 얇은 막과 충돌을 체크하지 못하고 얇은 막 밖으로 새어 나온다. 그림 6은 그림 5와 같은 타임스텝을 사용 했으나 얇은 막에서 유체입자가 얇은 막과 충돌을 체크하여 입자가 얇은 막 밖으로 새어 나오지 않는다.

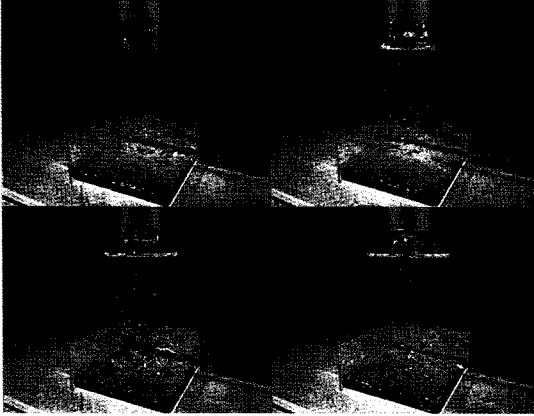


그림 5 : 기존 기법. 파이프 관에서 유체가 얇은 막으로 떨어지는 모습. time step = 0.07.



그림 6: 제안기법. 파이프 관에서 유체가 얇은 막으로 떨어지는 모습. time step = 0.07.

본 논문의 기법은 두 가지 제한점을 가진다. 첫 번째로 거리장 함수인 음함수를 세밀한 격자를 사용하여 정의하지 않았을 경우 충돌 지점에서의 정확한 법선 벡터를 구할 수 없어 정확한 충돌을 감지하기 어렵다. 그러므로 세밀한 격자를 사용하여 정의한 거리장 함수를 이용해 일반적인 복잡한 모양의 강체에서도 정확한 충돌처리를 할 수 있다. 두 번째로 위와 같이 세밀한 격자를 사용하였음에도 타임스텝이 매우 클 경우 마찬가지로 정확한 법선 벡터를 구하기 어렵다. 본 논문의 기법은 법선 벡터를 이용하여 충돌을 예측한다. 이러한 법선 벡터는 충돌 지점에서의 법선 벡터를 사용한다는 가정을 전제로 한다. 하지만 타임스텝이 매우 커서 입자가 가지는 법선 벡터와 충돌 지점에서의 법선 벡터 사이에 오차가 발생한다면 복잡한 강체 모델에서 충돌 처리시 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 Runge-Kutta 와 같은 기법을 사용하여 해결할 수 있다. 입자가 움직이는 방향으로 일정거리 다가간 지점에서의 법선 벡터를 충돌을 예측할 때 사용한다.

본 논문에서는 정확한 충돌 지점과 시간을 구하기 위해 법선 벡터를 사용한다. 이 기법은 연립 방정식의 해를 구하는 기법 중 하나인 conjugate gradient 기법과 유사하다. conjugate gradient 기법에서 근사해를 구하기 위해 미분 값을 이용하듯이 본 논문의 기법 역시 법선 벡터를 이용하였다. 이와 같이 미분 값을 이용하면 보다 정확한 충돌 지점과 시점을 구할 수 있다.

7. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 입자 기반의 유체와 강체 모델과의 상호작용에 있어서 정확한 기법을 제안한다. 강체 모델의 거리 장 함수인 음함수를 이용하여 입자와의 충돌에 있어서 정확한 시점과 정확한 충돌 지점을 계산한다. 이 기법을 사용하여 얇은 막이나 옷감과 같은 모델과 입자 기반 유체와의 상호작용을 정확하게 할 수 있다. 기존 기법과 달리 유체 입자가 옷감이나 얇은 막을 통과하지 않는다.

하지만 입자와 강체 모델 사이의 한 방향 상호작용 이므로 양방향 상호작용이 가능 하도록 앞으로 연구할 필요가 있다. 강체 모델이 유체의 충돌하여 이동하거나 회전 운동 할 경우 강체 모델의 거리 장 함수에 대한 변화를 연구하면 다양한 결과를 낼 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안한 기법을 이용하여 병렬처리 하면 실시간 시뮬레이션이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 2010년도 문화콘텐츠산업기술지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

또한 본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No.2010-0027656) 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 '2 단계 BK21 사업'의 지원비를 받았습니다.

타임스텝	실제 위치 (A)	기존 기법 (B)	제안 기법 (C)	오차- 기존기법(A-B)	오차- 제안기법(A-C)
0.4	(-2.000, 5.900, 0.000)	(-2.000, 4.012, 0.000)	(-2.000, 5.899, 0.000)	1.887972	0.000695
0.3	(-2.500, 5.400, 0.000)	(-2.500, 4.004, 0.000)	(-2.500, 5.399, 0.000)	1.395908	0.000695
0.1	(-3.500, 4.400, 0.000)	(-3.500, 4.007, 0.000)	(-3.500, 4.399, 0.000)	0.392411	0.000695
0.05	(-3.750, 4.150, 0.000)	(-3.750, 4.003, 0.000)	(-3.750, 4.149, 0.000)	0.146380	0.000695
0.03	(-3.850, 4.050, 0.000)	(-3.850, 4.002, 0.000)	(-3.850, 4.049, 0.000)	0.047967	0.000695
0.01	(-3.950, 4.050, 0.000)	(-3.900, 4.001, 0.000)	(-3.950, 4.050, 0.000)	0.048760	0.000000

<표1> 실제 계산한 위치와 기존기법(예측 기반 사용하지 않았을 경우 위치)의 오차와, 본 논문에서 제안한 기법과의 오차 비교

참고 문헌

- [1] ADAMS B., PAULY M., KEISER R., GUIBAS L. J. "Adaptively sampled particle fluids," *ACM Transactions on Graphics*, pp. 48.2007
- [2] MÜLLER M., CHARYPAR D., GROSS M. "Particle based fluid simulation for interactive applications," *SCA*, pp. 154–159. 2003
- [3] MONAGHAN J. , "Smoothed particle hydrodynamics," *Annual Revision on Astronomy and Astrophysics* 30, 543–574, 1992.
- [4] MONAGHAN J. J.: "Smoothed particle hydrodynamics," *Reports on Progress in Physics* 68, pp.1703–1759, 2005.
- [5] MONAGHAN J. J. "Fluid motion generated by impact," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, pp.250–259,2003.
- [6] GUENDELMAN E., SELLE A., LOSASSO F., FEDKIWR. , "Coupling water and smoke to thin deformable and rigid shells," *ACM Transactions on Graphics*, pp. 973–981,2005.
- [7] STAM J.: "Stable fluids," *ACM Transactions on Graphics*, pp. 121–128,1999.
- [8] MÜLLER M., SOLENTHALER B., KEISER R., GROSS M. "Particle - based fluid-fluid interaction," *SCA*, pp.237–244, 2005.
- [9] SEUNGTAIK OH, YOUNGHEE KIM, BYUNG SEOK ROH "Impulse-based rigid body interaction in SPH," *Computer Animation and Virtual Worlds* 20, pp. 215–224, 2009.
- [10] KAY BAO, HUI ZHANG, ENHUO WU, "Pressure corrected SPH for fluid animation," *Computer Animation and Virtual Worlds* 20, pp. 215–224, 2009.
- [11] FOSTER N., METAXAS D. , "Realistic animation of liquids," *Graphical Models and Image Processing*. Vol 58, issue5, pp. 471–483, 1996.
- [12] ARNULPH FUHRMANN, "Distance Fields for Rapid Collision Detection in Physically Based Modeling," *In Proceedings of GraphiCon 2003*, 2003.

〈저자 소개〉



김보람

- 2009년 세종대학교 정보통신공학과 학사
- 2011년 고려대학교 영상정보처리협동과정 석사
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 물리기반 시뮬레이션, 유체 시뮬레이션



신승호

- 2005 고려대학교 컴퓨터학과 이학 학사
- 2007 고려대학교 컴퓨터학과 이학 석사
- 2011 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 공학박사
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 가상현실, 영상특수효과



임재호

- 2010 숭실대학교 미디어학부 이학학사
- 2010년~현재 고려대학교 컴퓨터학과 석사과정
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 렌더링, 유체 시뮬레이션



김창현

- 1979년 고려대학교 경제학과 학사
- 1988년 University of Tsukuba 전자정보 박사
- 1995년 5월~현재 고려대학교 컴퓨터학과 교수
- 2005년 11월~현재 고려대학교 컴퓨터과학기술대학원 원장
- 2005년 1월~2006년 3월 한국정보과학회 이사
- 2008년 3월~2010년 2월 한국컴퓨터그래픽스학회 회장
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 물리기반 시뮬레이션, Mesh Processing