

유체 시뮬레이션에서 부자연스러운 쇄파의 발생을 완화하기 위한 파티클 움직임 보간 방법

성수경, 이은석, 신병석
인하대학교 컴퓨터정보공학과
rebirth87@naver.com, elflee77@nate.com, bsshin@inha.ac.kr

Particle Motion Interpolation Method for Mitigating the Occurrence of Unnatural Wave Breaking in Fluid Simulation

Su-Kyung Sung, Eun-Seok Lee, Byeong-Seok Shin
Dept. of Computer Science and Information Engineering, Inha University

요 약

파티클 기반의 유체 시뮬레이션에서 파티클 들이 경계면에 부딪쳐 쇄파를 일으키는 경우 과도한 움직임으로 인해 자연스러운 흐름을 표현하기 어렵다. 파티클이 이동하는 시간 간격을 세분화하여 선형보간 함으로써 이 문제를 해결할 수 있다. 이렇게 하면 경계면에 모여 압력이 높아진 파티클 들의 가속도 벡터가 부드럽게 변한다. 하지만 보간을 하기 위한 최소 샘플수가 높기 때문에 파티클 들이 점성을 가진 액체처럼 멍치는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 가중치 보간 방식을 사용한다. 가중치 보간은 파티클의 현재 가속벡터와 이전 가속벡터에 서로 다른 가중치를 주며 차례로 더해 이동벡터를 구한다. 가중치 보간 방식을 쓰면 비슷한 흐름을 표현하는데 필요한 샘플수가 선형 보간 방식보다 적다. 그 결과로 점성을 가진 액체처럼 멍치는 선형보간 방식의 문제점을 해결할 수 있다.

ABSTRACT

In particle-based fluid simulation, applying sudden power to particle raise unnatural flow when wave is breaking. To solve this problem, we have used an linear interpolation technique that interpolate between fluid particle by subdividing the time interval in the previous work. Acceleration vector of the particle with increased pressure in boundary could change smoothly. However, particle looks like flow with viscosity because the number of the minimum samples to interpolate increases. We propose an weighted-interpolation technique to represent the realistic movement of fluid. it is accumulating that has added and assigned different weights to the previous acceleration vector and current one repeatedly. weighted-interpolation technique using less minium samples to flow than linear interpolation, so it can solve the problem which particle looks like flow with viscosity.

Keywords : fluid simulation(유체 시뮬레이션), SPH, weighted-interpolation(가변 가중치 보간)

Received: Apr. 15, 2014 Accepted: May. 08, 2014
Corresponding Author: Byeong-Seok Shin (Inha University)
E-mail: bsshin@inha.ac.kr

© The Korea Game Society. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ISSN: 1598-4540 / eISSN: 2287-8211

1. 서 론

게임이나 애니메이션 등에서 물체가 실감나게 폭발하는 장면이나, 물의 흐름 표현을 위해 유체 시뮬레이션이 사용된다. 하지만 다량의 입자로 구성된 물 데이터는 최신 하드웨어를 사용하더라도 실시간으로 렌더링 하기 어렵다.

Eulerian 방법[1]은 복잡한 대규모 유체의 현실감 있는 표현을 위해 유클리드 공간에 격자를 만들고 격자 상에서 계산된 속도 벡터를 이용해 파티클을 이동시킨다. 이 방법을 사용하면 유체의 대류 등 자연현상을 현실감 있게 표현할 수 있지만, 연산량이 급증하여 실시간 처리에는 적합하지 않다. 특히나 컴퓨터 게임에는 실시간 처리가 필수적이기에 일반적으로 연산량이 적은 Lagrangian 방법[2]을 주로 사용한다. Lagrangian 방법은 유체 파티클을 직접 모사하는 방법으로써 주변 환경보다는 파티클 자체에 중점을 두어 시뮬레이션 한다. 이 중에서도 최근에 관심이 집중되고 있는 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 기법[3]은 천체물리학 분야에서 발전된 것으로 Navier-Stokes 방정식을 적용한 기존 파티클 시스템에서 많이 사용되는 보간 방법이다. 이것은 하나의 파티클이 가진 커널 범위 내에 존재하는 이웃 파티클 들이 비슷한 성질을 갖게 한다. 또한 Eulerian 방식에 비하여 이류단계에서 복잡성이 줄어들기 때문에 고품질의 영상을 실시간으로 만들 수 있다. 하지만 SPH는 일정한 시간 간격에 물 입자로 표현되는 파티클의 가속도 연산이 진행되기 때문에, 입자가 물체의 경계에 부딪혀 쇄파(파도가 연안 가까운 수심이 얇은 곳에 이르면 파장이 짧아지고 파고가 높아져 파도의 앞쪽이 낭떠러지처럼 되었다가 부서지는 것)를 일으키는 경우에는 충돌 직전이나 직후의 입자 위치를 정확하게 계산하기 어렵다. 이 때문에 충돌직후 반대방향으로 튕겨나가는 입자의 흐름이 비정상적으로 보이게 된다. 시뮬레이션에서 각 프레임의 계산 시간 간격을 좁게 설정하면 쇄파를 일으킬 때 입자들의 위치를 정밀하게 계산하

여 자연스러운 흐름을 표현할 수는 있지만, 그와 동시에 연산량이 증가하므로 실시간 시뮬레이션이 불가능하게 되는 문제가 발생한다.

쇄파 발생 지점에서의 부자연스러운 움직임 문제를 해결하기 위해 고안된 방법 중 하나가 선형 보간 방법이다[4]. 선형 보간을 하면 연속된 두 개의 샘플점 사이의 단위 시간 간격을 세분화하여 가상의 중간 샘플들을 만들 수 있다. 이전 샘플 점에서 파티클의 가속도 벡터 값과 현재 샘플 점에서 파티클의 가속도 벡터 값을 선형 보간 하면 가상 샘플 점들에서 파티클의 위치를 좀 더 사실적으로 표현하여 쇄파 발생 경계면에서 파티클이 과도하게 비산하는 현상을 완화시킬 수 있다.

선형 보간 방법은 보간 전 원본 샘플들을 비교적 넓은 시간 간격(단위시간)으로 렌더링 하여도 보간 과정에서 세분화된 가상 샘플점마다 값을 계산할 수 있으므로 기존 시뮬레이션에서 단위 시간 간격을 좁게 설정했을 때와 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 선형 보간 시 가상 샘플 점의 간격이 지나치게 좁으면 파티클 위치의 보간이 필요 이상으로 많이 이루어져서 쇄파를 일으키는 입자들이 점성을 가진 액체와 같이 뭉쳐서 흐르게 되는 문제가 발생한다.

이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 가변가중치를 이용한 보간 방법을 이용한다. 단위 시간 간격에서의 연속된 두 개의 샘플 점을 세분화 하고 이전 샘플 점과 현재 샘플 점에 서로 다른 가중치를 주어 계산 한다 이때 파티클이 경계에 부딪혀 쇄파를 일으키는 순간 변화되는 벡터의 가속도 값을 누적 하여 속도를 표현한다. 이 방법은 기존의 선형보간 방법보다 가상 샘플 점의 간격을 비교적 넓게 하여 렌더링 해도 보간 연산 시에 발생하는 파티클의 뭉침 현상이 해결되어 자연스러운 표현이 가능하다.

이 논문의 2절에서는 관련 연구들을 소개하고 3절에서는 과도한 파티클의 비산현상을 줄이는 선형 보간 방법과, 거기서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 가변가중치 적용 보간 방식을 설명한다. 4절

에서 실험결과를 보인 후 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

여기서는 파티클 기반의 실시간 유체 시뮬레이션에서 파티클 들의 비현실적인 움직임을 복잡한 추가연산 없이 빠른 속도로 안정화 시키는 SPH 방법을 자세히 설명한다.

SPH는 방사형으로 대칭인 평활화(smoothing) 커널을 이용하는데, 커널 안에 있는 파티클 들의 필드 값(밀도와 압력, 점성 등)은 이웃한 커널과 겹치는 파티클 들의 필드 값을 보간 하여 사용한다. 식(1)은 SPH를 이용하여 임의의 스칼라 값 A 를 근사하는 수식이다. r 위치에서 스칼라 필드 값 A 는 반지름이 h 인 커널 영역 내의 모든 파티클 들에 가중치를 곱해서 더함으로써 특정 파티클에 적용되는 힘을 계산 한다. 유체 시뮬레이션에서 널리 사용되는 함수 W 는 poly6와 viscosity 커널[3] 또는 spiky 커널[5]이 사용된다.

$$A(r) = \sum m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|r - r_j|, h) \quad (\text{eq. 1})$$

일반적인 유체 시뮬레이션에서 물과 같은 액체는 비압축성 유체로 가정하여 계산하다, 커널을 이용하는 SPH 기법에서의 유체들은 힘의 균형과 운동량의 보존과 같은 물리적 특성을 보장하지 못하여 압축성을 갖게 된다. 따라서 표현하려는 액체의 특성과 다르게 파티클 들은 비사실적인 움직임을 보일 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 M.Becker 등은 Tait 방정식을 통해 압축률을 조절하는 WCSPH(weakly-compressible SPH) 기법을 제안하였다[6]. Solenthaler 등은 prediction-correction scheme을 사용한 PCISPH(predictive corrective incompressible SPH) 기법[7]으로 압축성이 나타나지 않게 하고 파티클의 위치와 속도를 안정적으로 계산하는 방법을 제안하였다. 그중에서 PCISPH는 파티클의 현

재 속도를 이용하여 다음 샘플에서의 파티클 위치를 예측한다. 예측된 위치에서 측정된 파티클의 밀도를 초기 밀도와 비교하여 그 변화량을 측정 한 후, 자코비 반복법을 통하여 밀도의 변화량이 사용자가 정의한 허용기준보다 작을 때까지 반복한다. 밀도의 변화량은 압력을 의미하므로 이렇게 구한 압력으로부터 힘을 계산한 후 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 파티클 들의 속도와 위치를 구한다.

3. 보간법을 이용한 파티클의 움직임 개선

유체 시뮬레이션에서 파티클 들이 경계에 부딪혀 쇄파를 발생시킬 때 입자의 밀도가 급격히 높아지면서 압력이 증가한다. 그 결과 서로 다른 방향으로 힘을 받는 단일 커널 내 파티클들 사이에서 인력이 유지되지 못하고 분산되는 문제가 발생한다. 여기서는 기존의 선형 보간법에 대해 설명하고, 선형 보간 방법에서 생기는 문제점을 보완한 가변가중치 적용 보간 기법을 통해 부자연스러운 파티클의 움직임을 개선하는 방법을 소개한다.

파티클 들은 서로간의 인력을 유지하는 형태를 취하며 인력은 파티클이 유체로서 자연스러운 외관을 표현하는데 필수적인 요소로 작용한다. 파티클이 외력에 작용 받아 기존의 흐름과 정반대 방향의 압력 변화가 발생하는 경우, 파티클 들은 기존에 유지하고 있던 커널의 형태가 깨어져 비산현상을 보이게 된다. 자연현상 에서 유체는 반대 방향의 강한 압력을 받는 경우에, 입자간 인력이 쉽게 깨어지지 않고 완만한 흐름을 나타내기 때문에 비산현상을 억제하는 것은 필수적이다.

기존 SPH 기반 유체시뮬레이션에서 비산현상이 나타나는 것은 각 프레임의 시간 계산 간격이 넓기 때문이다. 반대 방향의 압력이 작용 하였을 때, 수많은 커널에서 파티클 들의 필드 값의 변화가 일어난다. 7 msec 이상의 넓은 시간 간격은 커널의 변화에 즉각적으로 대응하지 못하고 나누어진 프레임에서의 결과만 연산하게 된다. 그 결과로 반

대방향으로 압력을 받은 파티클 들이 이웃한 파티클의 커널 범위를 벗어나게 되어 인력이 깨어진 비산현상을 나타내게 된다.

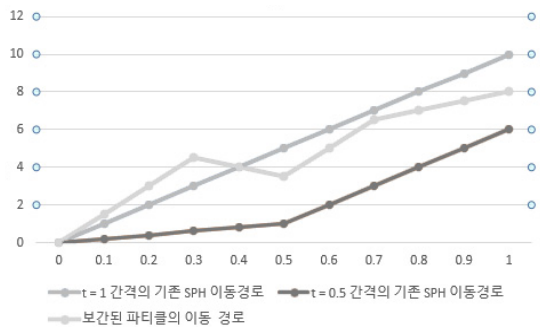
연산되는 프레임의 계산 시간 간격을 0.5 msec 이하로 매우 좁게 하면 반대방향의 압력을 받는 도중에도 각 이웃한 파티클의 커널범위 내에서 필드 값이 계산되어 비산현상을 해결할 수 있다. 하지만 많은 샘플 점들에서 파티클의 위치와 속도를 측정하기 위한 운동방정식을 계산하여야 하므로 실시간 처리가 불가능하다.

선형 보간은 일정 시간 간격을 가지는 연속한 두 샘플 점에서 파티클의 움직임을 선형적으로 보간 하여 유체의 비산현상을 방지하기 위한 방법이다. 샘플 점을 늘려서 운동방정식을 계산하는 대신에 기존 샘플 점 에서 계산된 위치(좌표)와 속도(벡터)를 보간 하여 보간 된 샘플 점에서의 위치와 속도를 간단하게 계산한다. 이는 렌더링에서의 Gouraud shading과 Phong shading기법의 차이와 같다.

(eq. 2)에서와 같이 t시간 간격을 m 만큼 세분화 하여 m번째 샘플에서의 가속도 벡터 a_{m-1} 과 m+1번째 샘플에서의 가속도 벡터 a_m 을 선형 보간한다. 이전 샘플에서의 가속도 벡터에 보간 된 가속도 벡터를 차례로 더하면 (eq. 2)와 같이 각 보간 점에서의 이동 벡터 V_n 을 구할 수 있다. 결국 기존 시간 간격 t에서 파티클의 위치와 이동방향을 더 사실적으로 표현할 수 있다. 파티클의 급격한 변화가 생길 때는 대부분 움직이던 방향이 바뀐다. 방향 차이가 큰 두 가속도 벡터를 보간 하여 누적하면 벡터 연산의 특성상 각도가 완만해진다. 이렇게 방향이 바뀌게 된 파티클의 움직임은 기존에 갖고 있던 이전의 가속도 벡터와 보간 되면서 상쇄되고, 그 결과로 비사실적인 움직임을 효과적으로 개선할 수 있다.

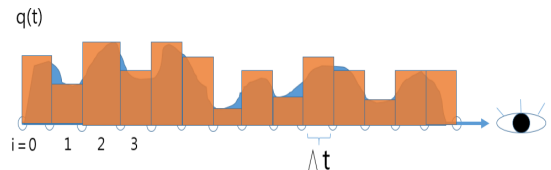
$$V_n = \frac{t}{m} \sum_{n=1}^m \left(\frac{i a_n}{m} + \frac{(m-i) a_{n-1}}{m} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

선형 보간을 이용한 방법은 쇄파가 발생했을 때 벽면에 많은 파티클이 밀집되어 압력이 증가되는 부분을 보간 하기 때문에 기존 시뮬레이션에서 발생하는 과도한 움직임이 완화되어, 시간 간격을 조밀하게 하여 시뮬레이션 한 것과 유사한 결과를 낸다. 하지만 이전 가속도 벡터와 현재 가속도 벡터가 보간 되는 부분에서 가상 샘플 점의 간격이 좁을수록 점성을 지닌 것처럼 뭉쳐서 이동하는 문제가 발생한다.



[Fig. 1] Blue line represents a movement path of the particle using previous SPH method(t = 1). Orange line indicates a movement path of the particle using previous SPH method(t = 0.5). Gray line shows a movement of particle with interpolation method(m = 3). Particle which sampled in unit interval is accumulated with direction and movement of the previous particle. As a result, the excessive movement of the particle was reduced.

이 문제를 해결하기 위해 (ea. 3)과 같이 볼륨 광선투사법(volume ray casting)[8]에서 사용되는 back-to-front ray integration식을 활용한다.



[Fig. 2] Example of back-to-front method (ray's color & opacity values are accumulated from starting point to view point.)

$$C_i = C_i + (1 - A_i)C_{i-1} \quad (\text{eq. 3})$$

기존 선형 보간 방식은 경계면에 부딪혀 반대 방향의 벡터를 갖는 첫 샘플 점이 이전 샘플 점과 지나치게 보간 되어 모든 파티클이 비산현상을 나타내지 않는 문제점이 있다. 물이 가지고 있는 인력을 유지하여 부드러운 흐름을 보이는 것이 중요하지만 실제 자연현상은 일정 량 비산되는 물 분자들도 분명히 존재한다. 가중치 방식은 기존 선형 보간의 세분화 방식을 이용 하되 시간 간격을 보간 하여 만든 각각의 가상 샘플 점 에서 연산을 할 때 가중치 k 값을 이전 가속도 벡터와 현재 가속도 벡터에 각각 다른 값으로 분할하여 적용한다.

$$V_n = \frac{t}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{k a_i}{m} + \frac{(1-k) a_{i+1}}{m} \right) \quad (\text{eq. 4})$$

$$k_{n+1} = k_n \times k_n$$

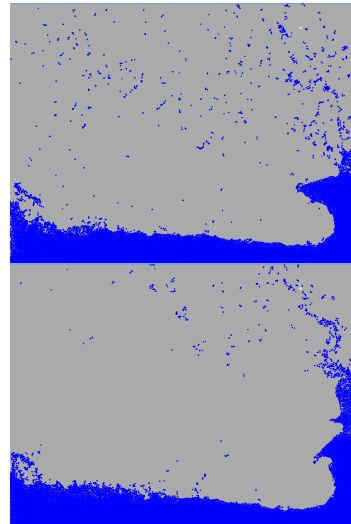
(eq. 4)는 이 논문에서 제안하는 가속도 벡터의 보간 방법이다. 단위 시간 t 를 m 개로 세분화하여 m 번째 샘플에서의 가속도 벡터 a_i 와 $i+1$ 번째 샘플에서의 가속도 벡터 a_{i+1} 을 선형 보간 한다. 이전 샘플에서의 가속도 벡터에 보간 된 가속도 벡터를 차례로 더하면 각 보간 점에서의 이동 벡터 V_n 을 구할 수 있다. 이때 각각의 가상 샘플 점에서 연산을 하기 위한 가중치 k 는 이전과 현재 샘플 점 벡터 사이에서 가상 샘플 간격 위치에 따라 각기 다른 값으로 적용된다.

4. 실험 결과

실험은 Intel Core i5 3세대 3570 3.4GHz CPU 에 12GB의 주 메모리를 갖는 시스템에서 수행했다. 그래픽 카드는 2GB의 메모리를 갖는 nVidia Geforce 660Ti을 사용하였고 DirectX11 라이브러리를 사용하였다. DirectX11의 웨이더 파이프라인에서 지원하는 파티클의 최대 개수는 65536개이지만 여기서는 파티클을 16384개로 설정하였다. 실험

은 기존의 SPH시뮬레이션에서 쇄파를 일으켰을 때의 형상과, 선형 보간 방법 및 제안하는 방법으로 시뮬레이션 된 쇄파의 형상을 비교하였다. 또한 실시간 시뮬레이션 여부를 판별하기 위해 프레임율(fps)을 비교 하였다.

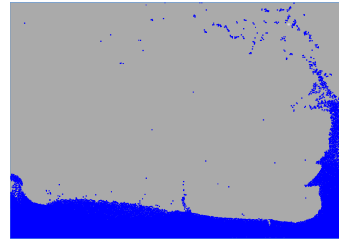
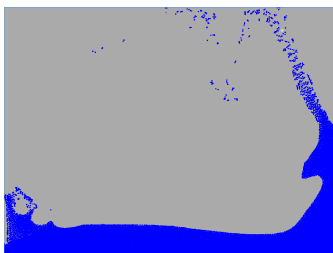
[Fig. 3]은 기존 SPH에서 서로 다른 샘플 간격으로 실험했을 때 2D 유체 시뮬레이션에서의 쇄파를 비교한 것이다. 시간 간격이 7 msec일 때 쇄파가 일어나는 지점에서 파티클 들이 과도하게 비산되는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 시간 간격을 0.5 msec로 하면 실제 물과 유사한 자연스러운 흐름을 보이게 된다. 하지만 시간 간격을 7 msec 하면 평균 프레임 율이 58 fps (표준편차 2fps)로서 실시간 처리에 적합하지만 0.5 msec로 하면 평균 프레임 율이 6fps (표준편차 1fps)가 되므로 실시간으로 처리하기가 어렵다.



[Fig. 3] The comparison result images of wave breaking generated in previous SPH method. (Time interval 7 msec(top) & 0,5 msec(bottom))

[Fig. 4]는 기존의 SPH 시뮬레이션이 갖는 문제점을 해결하기 위해 선행연구에서 제안한 선형 보간 방법[4]과 선형 보간 시에 발생하는 문제점을 해결한 가중치 기반의 보간 방법을 적용했을 때

쇄파 발생 형태를 비교한 것이다. 선형 보간을 하면 쇄파가 발생될 때 경계에 부딪히기 이전과 이후의 벡터가 세밀하게 보간됨으로써 움직임이 부드럽게 완화되고 파티클 간의 일관된 움직임이 유지된다. 이러한 특징은 앞서 실험에서 시간 간격을 0.5 msec로 설정한 SPH시뮬레이션의 결과와 유사하다. 이는 선형 보간이 일상적인 경우에는 파티클의 움직임을 실시간에 사실적으로 표현할 수 있음을 의미한다. 하지만 선형 보간은 쇄파가 발생하는 경우 파티클이 점성을 지닌 덩어리처럼 뭉치는 경우가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 보간 되는 가상 샘플 점의 간격을 조절하기 위해 특정 가중치를 가상 샘플들의 간격에 따라 다르게 적용하는 보간 방식을 제안하였다. 기존의 선형 보간법은 7 msec의 시간 간격인 시뮬레이션 환경에서 유체가 쇄파를 일으킬 때 경계에 부딪힌 파티클끼리 실제의 물과 같은 일관성을 유지하면서 흐르는 형태를 표현하는 데에 가상 샘플 점 간격이 최소 20이 필요하다. 하지만 제안하는 방법은 동일한 7 msec의 시간 간격에서 기존 선형 보간법과 달리 유체가 쇄파를 일으킬 때 일관성 있는 흐름의 형태를 표현하는 데에 가상 샘플 점 간격을 10으로만 설정해도 가능하다. 샘플 점 간격의 차이에 따른 평균 프레임 율은 특정 가중치 보간 방식이 102fps (표준편차 6fps)으로 기존 선형 보간법의 평균 프레임 율 58fps (표준편차 2fps) 보다 약 80%의 증가된다. 제안하는 방법의 흐름 형태는 바닥과 벽면에서 모두 시간 간격을 0.5 msec로 했을 때의 SPH시뮬레이션 결과에 근접하였다.



[Fig. 4] The comparison result images of wave breaking generated in linear interpolation method(top) & weight interpolation method(bottom)

[Table 1] The Experimental result of linear interpolation method & weight interpolation method

Method	Time interval	Average (fps)
linear interpolation	7 time steps with 20 samples	58 (standard deviation 2fps)
Weight interpolation	7 time steps with 10 samples	102 (standard deviation 5.7fps)

5. 결 론

파티클 기반의 기존 유체 시뮬레이션 논문들은 주로 유체가 얼마나 자유표면의 흐름을 현실감 있게 표현 하는가에 맹점을 두었다. 파티클의 흐름에 영향을 미치는 외력 중 압력을 가해 틀 안에 고여 있는 유체가 출렁임 효과를 가지며 동시에 쇄파 현상도 나타내기 때문에 제안하는 논문과 비슷하게 보일 수 있다. 하지만 대량의 파티클의 이동을 연산해야 하는 유체 시뮬레이션의 특성상 연산되는 프레임의 시간 간격을 넓게 설정한다. 그 결과 파티클이 경계에 부딪혀 쇄파를 일으킬 경우 자연현상과 다른 과도한 비산현상이 나타난다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 프레임 간 파티클의 움직임을 나타내는 가속도 벡터에 각기 다른 가중치를 두어 보간 한다. 제안하는 방법은 시간 간격을 조밀하게 하여 시뮬레이션 한 결과와 유사하면서도 계산시간을 크게 단축한다.

본 연구의 결과로 컵이나 상자에 물을 쏟는 자

유 낙하 시뮬레이션을 진행할 때 기존의 유체 시뮬레이션 보다 물이 표면에 부딪혔을 때의 현실감 있는 표현을 기대해 볼 수 있다. 향후에는 현재의 방법을 개선하여 좀 더 사실적인 렌더링이 가능하게 할 예정이다. 먼저 물 이외에도 자유낙하 하여 쇄파 현상을 일으키는 다양한 매질을 렌더링 하기 위해 SPH 시뮬레이션의 점성력을 조절 할 수 있는 기능을 추가할 예정이다. 현재 SPH 시뮬레이션의 점성력은 속도의 발산을 억제하여 파티클의 움직임을 둔화시키는 정도지만 점성액체의 특이성인 탄성 도를 적용하면 점성을 가진 액체가 자유낙하 하여 경계면에 쇄파를 일으킬 때 정밀도를 높일 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (No. 2011-0015779).

REFERENCES

- [1] N. Foster, and R. Fedkiw, "Practical animation of liquids." Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, pp.23-30, 2001.
- [2] C. W. Hirt, J. L. Cook and T. D. Butler, "A Lagrangian method for calculating the dynamics of an incompressible fluid with free surface." Journal of Computational Physics, pp. 103-124, 1970.
- [3] M. Müller, D. Charypar, and Markus Gross. "Particle-based fluid simulation for interactive applications." Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. Eurographics Association, pp. 154-159, 2003.
- [4] Sung Su Kyung, Lee Eun Seok, Shin Byeong Seok, "A realistic flow of fluid simulation by interpolating movement of particles." Korea HCI conference, pp. 109-112, 2014.
- [5] M. Desbrun, and M. P. Gascuel, "Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies. In Computer Animation and Simulation." Springer Vienna, pp. 61-76, 1996.
- [6] M. Becker, and M. Teschner. "Weakly compressible SPH for free surface flows." Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation. Eurographics Association, pp. 209-217, 2007.
- [7] B. Solenthaler, and R. Pajarola. "Predictive-corrective incompressible SPH.". ACM transactions on graphics (TOG), Vol. 28, No. 3, pp. 40, 2009.
- [8] H. Ray, H. Pfister, D. Silver, and T. A. Cook. "Ray casting architectures for volume visualization." Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, pp. 210-223, 1999.



성 수 경 (Sung, Su-Kyung)

2013년 3월 인하대학교 컴퓨터공학부(학사)
2013년-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부(석사)

관심분야 : 유체시뮬레이션, SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)



이 은 석 (Lee, Eun-Seok)

2008년 2월 인하대학교 컴퓨터공학부(학사)
2010년 8월 인하대학교 컴퓨터정보공학부(석사)
2011년 2월-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부(박사)

관심분야 : 실시간렌더링, 상세단계 선택, 차세대컴퓨팅



신 병 석 (Shin, Byeong-Seok)

1990년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
1992년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
1997년 2월 서울대학교 컴퓨터공학과(박사)
2000년-현재 인하대학교 컴퓨터정보공학부 교수

관심분야 : 볼륨그래픽스, 차세대컴퓨팅, 실시간렌더링
