

SPH 기반의 사각 스플래팅 가시화 기법

신승호^o 윤종철 이 정 김창현
 고려대학교 컴퓨터학과
 (winstorm, alskay2k, airjung, chkim)@korea.ac.kr

Quadrangular Splatting based on SPH

Seung-Ho Shin^o Jong-Chul Yoon Jung Lee Chang-Hun Kim
 Korea University

요 약

물리 기반 그래픽스 기술은 연기, 물, 화염과 같은 자연현상을 계산 물리학으로 시뮬레이션하고 이를 가시화하는 기술이다. 본 논문에서는 시뮬레이션 된 다수의 파티클 유체 데이터를 사각 스플래팅을 이용하여 3차원으로 빠르게 가시화 하는 기법을 제안한다. SPH(Smoothed Particle hydrodynamics) 기법을 사용하여 스플래팅의 위치와 법선 벡터를 계산하고, 단절 현상을 줄이기 위해 사각뿔 형상으로 스플래팅을 재구성하고 가시화 한다. SPH 기법을 사용하는 유체 시뮬레이션 엔진에 적용하여 자연스러운 물의 유동 현상을 성공적으로 가시화 하였다.

Abstract

Physics-based graphic techniques are used when simulating and rendering natural phenomena such as smoke, water and flame with computational physics. We propose novel methods which render simulated particle data fast onto 3D using tetrahedron splat. We calculate the position and the normal vector of splat by SPH(smoothed particle hydrodynamics) method then we reconstruct splat into quadrangular pyramid to reduce seam. We implement this technique for SPH fluid simulation, and animate natural flow of water successfully.

키워드 : 스플래팅, SPH, 사각뿔, 파티클 데이터 가시화

Keywords : splatting, SPH, quadrangular pyramid, visualization of particle data

1. 서론

디지털 콘텐츠의 고품질화 요구에 의하여 영화, 애니메이션 그리고 게임 등에 자연현상과 영상특수 효과를 실사수준으로 끌어올려 그래픽으로 표현하려는 기술적 중요성이 강조되고 있는 시대이다. 물리 기반 그래픽스 기술은 연기, 물, 화염과 같은 자연 현상을 계산 물리적으로 시뮬레이션하고 실제처럼 보이도록 3차원으로 가시화하는 기술이다. 자연현상을 그래픽으로 표현하는 것은 매우 복잡하고 그래픽 디자이너가 직접 디자인하기 어렵고 많은 시간과 막대한 비용이 소요되기 때문에 계산물리학 및 수치해석 기법을 도입하여 슈퍼컴퓨터로 시뮬레이션하고 가시화하는 기술이 연구되어왔다.

계산물리학에 기반을 둔 고품질의 특수영상 제작기술과 실시간 처리기술은 상호 상충되는 기술이어서 종래에 사용 되어오던 물리 기반 그래픽스 엔진으로는 처리하기 어려워 새로운 패러다임의 실시간 물리 기반 그래픽스 기술의 중요성이 강조되고 있다.

SPH(smoothed particle hydrodynamics) 기법을 이용하여 물리 기반으로 빠르게 유체를 시뮬레이션 하는 기법이 제안된바 있다[1]. 파티클 주위의 밀도, 압력 값 등을 SPH 기반의 근사 함수로 계산 한다. SPH 기법을 사용하면, 비교적 적은 수의 입자로 시뮬레이션이 가능하고, 미분 값이 근사 함수에 의해 미리 계산되어 있기 때문에 연산 시간이 빠르다.

본 논문에서는 위와 같이 파티클을 사용하여 시물레이션 된 데이터를 효과적으로 가시화 하는 방법을 제안한다. 본 연구에서는 Point splatting 기법과 유사하게 메쉬가 아닌 각 파티클 기반 스플렛팅을 수행한다. SPH 를 사용하여 시물레이션 된 파티클을 메쉬 데이터로 재구성 하지 않고 직접 가시화 할 수 있다. SPH 근사 함수를 이용하여 스플렛의 법선 벡터와 위치를 구하고 이를 3 차원으로 가시화 한다. SPH 유체 시물레이션에 사용된 파티클의 밀도, 위치 데이터와 SPH 근사함수를 그대로 사용함으로써 가시화 수행 시 추가 연산이 적어 효율적이다. 또한 본 연구에서는 사각뿔 형상을 이용한 스플렛팅 기법을 제안하여 스플렛 간의 단절(aliasing, seam) 현상을 줄이고 고품질 영상을 얻었다.

2. 관련연구

지난 20 년간 컴퓨터 그래픽스 분야에서 자연현상을 표현하기 위한 다수의 유체 시물레이션 기법이 제안 되었다. 입자 기반의 라그랑지안 기법의 시물레이션 기술을 이용하여 Desbrun, Cani 및 Tonnensen [2] 은 부드러운 객체를 애니메이션 하였다. 파티클은 implicit 표면을 제어하고 유체의 표면을 가시화 하는데 사용되었다. Müller 와 Charypar 와 Gross [1]는 SPH 를 사용하여 입자간의 밀도, 압력 값을 빠르게 계산하는 시물레이션 기법을 제안 하였다. 시물레이션 된 파티클을 3 차원 가시화 하기 위하여 마칭 큐브를 이용하여 표면을 삼각화 하거나 각 입자를 포인트 스플렛으로 가시화 하였다. 위에서 사용한 point splatting 기법은 빠르지만 하나의 법선 벡터를 가진 평면 스플렛을 사용하기 때문에 단절 현상이 발생하고 높은 퀄리티의 영상을 제공하지 못했다.

3 차원 가시화 방법으로 포인트 기반의 가시화 기법이 제안되었다[3]. ZWICKER[4]는 법선 벡터와 각 점에서의 반지름에 근거하여 이미지의 구멍을 방지하는 Surface splatting 기법을 제안 하였다. [4, 5, 6] 논문에서는 단절

현상이 없는 높은 질의 타원형 EWA splat 으로 가시화 하였다. Rusinkiewicz 와 Levoy [7]는 대규모 포인트 데이터를 가시화하기 위하여 포인트 기반의 자료구조를 만들고 포인트 스플렛으로 가시화 하였다.

그러나 위에서 제시한 방법들은 빛을 이용한 음영 계산을 할 때, 스플렛 당 하나의 법선 벡터만을 사용하므로 기본적으로 평면 셰이딩(constant shading) 효과가 나타난다. 본 논문에서는 SPH 기법을 이용하여 스플렛의 각 꼭지점 법선 벡터 계산하여 그래픽스 파이프라인 내에서 선형 보간을 수행하기 때문에 그로우 셰이딩 효과가 나타나므로 이미지의 질이 높다.

3. Smoothed Particle Hydrodynamics

SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)는 천체 물리학 분야에서 발전된 기법으로 파티클 시스템을 위한 보간 방법이다. SPH 를 사용하여 파티클의 분포 밀도, 미분 값을 계산할 수 있다. SPH 는 방사형으로 대칭인 smoothing 커널을 이용하여 각각의 파티클 근처의 필드 값을 보간 한다. SPH 에 따르면 r 위치에서 스칼라 필드 값 A 는 커널 반지름 h 영역내의 모든 파티클의 커널 값의 가중 합에 의해 보간 하여 구해진다. 식 (1)은 SPH 를 이용하여 임의의 스칼라 값 A 를 근사 계산 하는 식이다.

$$A_S(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (1)$$

$$\int W(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1 \quad (2)$$

커널 함수 W 는 식 (1)을 따르도록 정규화 되어 있으며, 본 논문에서는 [1]에서 제안한 식 (3)와 같은 커널을 사용하였다.

$$W_{poly6}(r, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - r^2)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

본 논문에서는 SPH 기법을 이용하여 유체 시뮬레이션을 수행하였고, 생성된 파티클 데이터를 3 차원 가시화도 SPH 를 사용하여 효과적으로 수행 하였다.

4. 스플렛 생성

스플렛을 이용하여 3 차원 가시화 하기 위해서 포인트 데이터의 표면을 찾고, 스플렛의 위치, 크기, 법선 벡터를 계산해야 한다. SPH 기법을 사용하여 파티클의 밀도 값을 근사하고, 계산된 밀도 값이 특정 임계 값 이하 일 때 표면이라고 정의 한다. 표면 외부일 경우 파티클이 존재 하지 않으므로 밀도가 작아지고 내부일 경우 파티클의 밀도가 높다. 따라서 파티클의 밀도가 높아지는 특정 임계 값 영역을 표면이라고 가정하고 계산한다. 각 파티클의 밀도가 임계 값보다 작으면 이면 표면 파티클 이다. 임계 값은 전체 파티클의 평균 밀도와 관계 있고 파티클 시뮬레이션 데이터마다 다르다. 본 논문에서는 시뮬레이션 데이터에 따라 사용자가 임의로 설정한다.

표면이 계산되면 결정된 표면 위에 스플렛을 생성한다. SPH 를 이용하여 계산된 파티클 밀도를 이용하여 스플렛 표면의 법선 벡터 값을 계산 할 수 있다. 표면의 법선 벡터를 계산하기 위해 [1]에서 제안한 color field 와 유사한 방법을 사용한다. 밀도를 사용하여 표면의 법선 벡터를 계산 할 수 있다. 식 (4), (5)와 같이 SPH 커널을 이용하여 분산된 밀도의 그라디언트를 이용하여 표면의 법선 벡터를 계산 한다. D_s 는 임의의 위치에서의 밀도 값이며 SPH 기법을 이용하여 D_s 의 그라디언트 값을 계산할 수 있다. 밀도(D_s)는 표면에서 멀어질수록 감소 하기 때문에, 밀도의 그라디언트 값은 표면에서의 법선 벡터와 같다.

$$\nabla D_s(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{1}{\rho_j} \nabla W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = \nabla D_s \quad (5)$$

그림 1의 오른쪽 그림과 같이, 각 파티클 위치에서 계산된 \mathbf{n} 을 법선 벡터로 하는 평면 스플렛을 각각의 파티클에서 h 만큼 법선 벡터 방향으로 떨어진 위치에 생성한다.

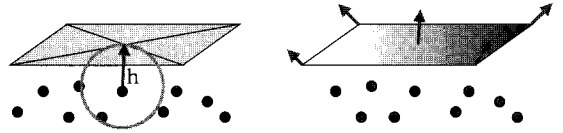


그림 1. 스플렛의 위치 및 법선 벡터 계산

스플렛은 [그림 1]의 오른쪽 그림과 같이 4 개의 삼각형으로 이루어진 폴리곤으로 만들어진다. 3 차원 렌더링시 각 스플렛 사이의 단절을 최소화 하기 위해서 스플렛의 각각의 꼭지점에서의 법선 벡터를 SPH 를 이용하여 계산한다. 스플렛의 각각의 삼각형을 일반적인 그래픽스 파이프라인의 그로우 셰이딩을 이용하여 음영을 계산한다. 이는 그래픽 하드웨어를 이용하므로 매우 빠르게 연산 된다.

5. 사각 스플렛 보정

평면 스플렛을 이용하여 가시화 하면, 곡률이 큰 부분에서 스플렛끼리 서로 교차하면서 스플렛 위치상의 기하학적 단절이 일어난다. 본 논문에서는 이를 최소화 하기 위해서 평면 스플렛이 아닌 사각뿔 형상의 스플렛을 제안한다. 그림 2와 같이 스플렛의 꼭지점의 위치를 각 꼭지점의 \mathbf{n} 방향으로 이동하여 조정해 준다. 조정되는 사각뿔 아랫면의 각 꼭지점의 위치는 각 점의 밀도와 표면으로 상정한 표면의 밀도를 이용한 식 (6)으로 계산 된다

$$\mathbf{P}_{tp} = \mathbf{P}_p + \{h \cdot (SD - PD) / (ID - PD)\} \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

식 (6)에서 \mathbf{p}_p 는 스플렛의 각 꼭지점의 위치이며 \mathbf{P}_{tp} 는 사

각 보정 후, 사각뿔의 꼭지점의 위치이다. SD 는 가시화하고자 하는 형상 표면의 밀도이다. SD 는 4장에서 정의한 표면 입계 값을 사용한다. ID 는 전체 파티클의 평균 밀도이다. PD 는 스플랫을 생성하는 기준 파티클의 밀도이다. 식 (6)을 사용하면 표면과 가까운 위치에 사각뿔의 꼭지점을 위치 시킬 수 있다.

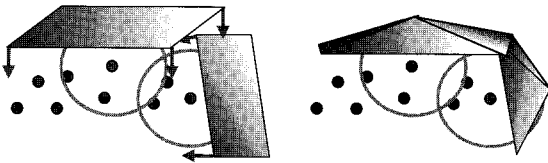


그림 2. 사각 스플랫 생성. 스플랫의 꼭지점의 위치를 조절하여 사각뿔 형상의 스플랫을 생성한다. 스플랫 사이의 단절 현상 없이 부드럽게 연결 된다.

6. SPH를 이용한 유체 시뮬레이션

SPH 기법을 사용하여 자연스러운 유체 유동 현상을 시뮬레이션 하였다. 파티클을 이용하여 나비에-스톡스 방정식을 수치 해석하여 구현하고 라그랑지안 방법을 활용하여 파티클을 이루 시킨다.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (7)$$

위 식 (7)은 유체의 유동을 설명하는 나비에-스톡스 방정식이다. 식(7)을 풀이할 때 존재하는 다이버전스 및 그라디언트 값을 SPH 근사 방법을 이용하여 계산한다. 식에서 계산된 가속도를 이용하여 각 파티클의 속도를 계산하고 파티클을 이루 시키면 물리기반의 자연스러운 유동을 표현 할 수 있다. 이렇게 구해진 파티클 정보를 기반으로 2~4 장에서 제시한 사각 스플랫 가시화 기법을 사용하여 3차원 물의 유동을 가시화 할 수 있다.

SPH 유체 시뮬레이션에 사용된 파티클의 밀도, 위치 데이터와 SPH 근사함수를 그대로 사용함으로써 가시화 수행 시 추가 연산이 적어 효율적이다.

7.3차원 가시화 결과

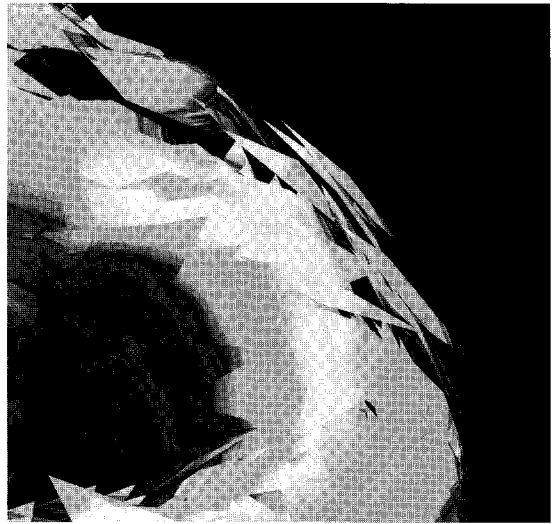
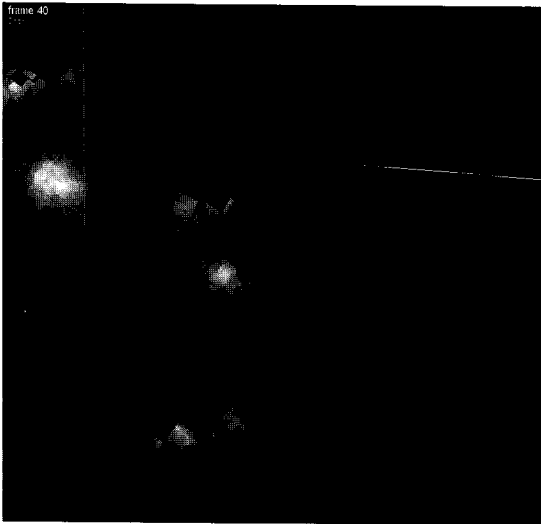
본 논문의 가시화 프로그램은 CPU 3.2 GHz, 2GB RAM 의 PC 에서 수행 하였고, OpenGL 과 C++ 언어를 사용하여 구현 하였다.

그림 3 은 8,000 개의 파티클로 시뮬레이션 된 유체 데이터를 사각 스플랫을 이용하여 가시화한 화면이다. 스플랫의 각 꼭지점에서 정확한 법선 벡터가 계산되고, 그로우 웨이딩 기법을 이용하여 보간 하여 렌더링 되기 때문에 거친 부분 없이 매끈한 표면으로 가시화된다. 환경 맵핑을 사용하여 반사 효과를 주었다.

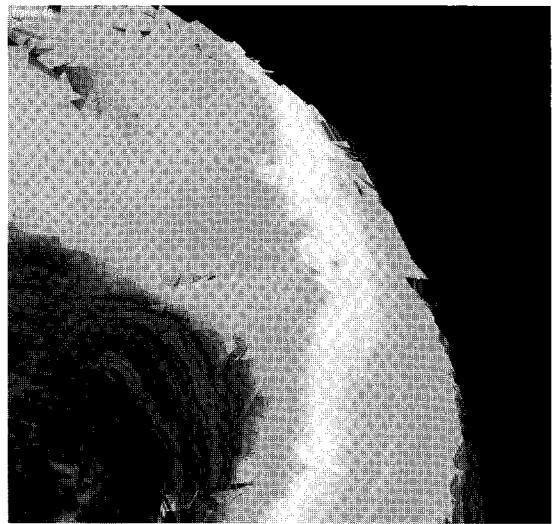
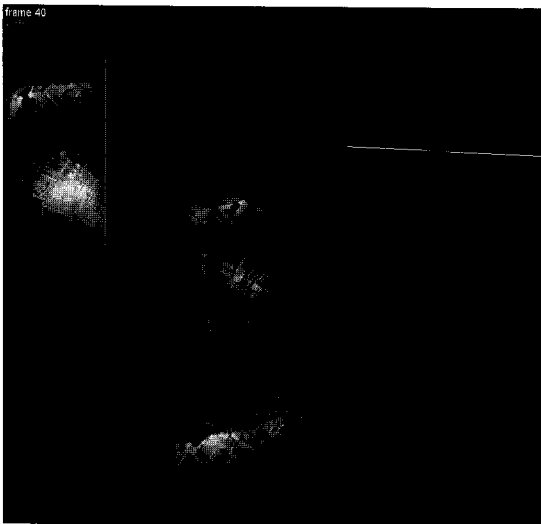


그림 3. 사각 스플랫 기법을 사용하여 가시화한 화면

그림 4 는 평면 스플랫과 본 논문에서 제시한 사각 스플랫의 비교 화면이다. 사각 스플랫이 단절 없이 매끄러운 표면을 보이는 것을 확인 할 수 있다.



(a) 평면 스플랫 사용



(b) 사각뿔 형상의 스플랫으로 보정 후

그림 4. 평면 스플랫과 사각 스플랫의 비교. (a)는 평면 스플랫을 사용하여 가시화한 그림이다. 스플랫 사이의 단절 현상이 나타나며 표면이 거칠다. (b) 사각뿔 형상으로 보정한 스플랫을 사용하여 가시화한 그림이다. 스플랫이 꼭지점이 표면 가까이 존재하고 단절 현상이 줄어들었다.

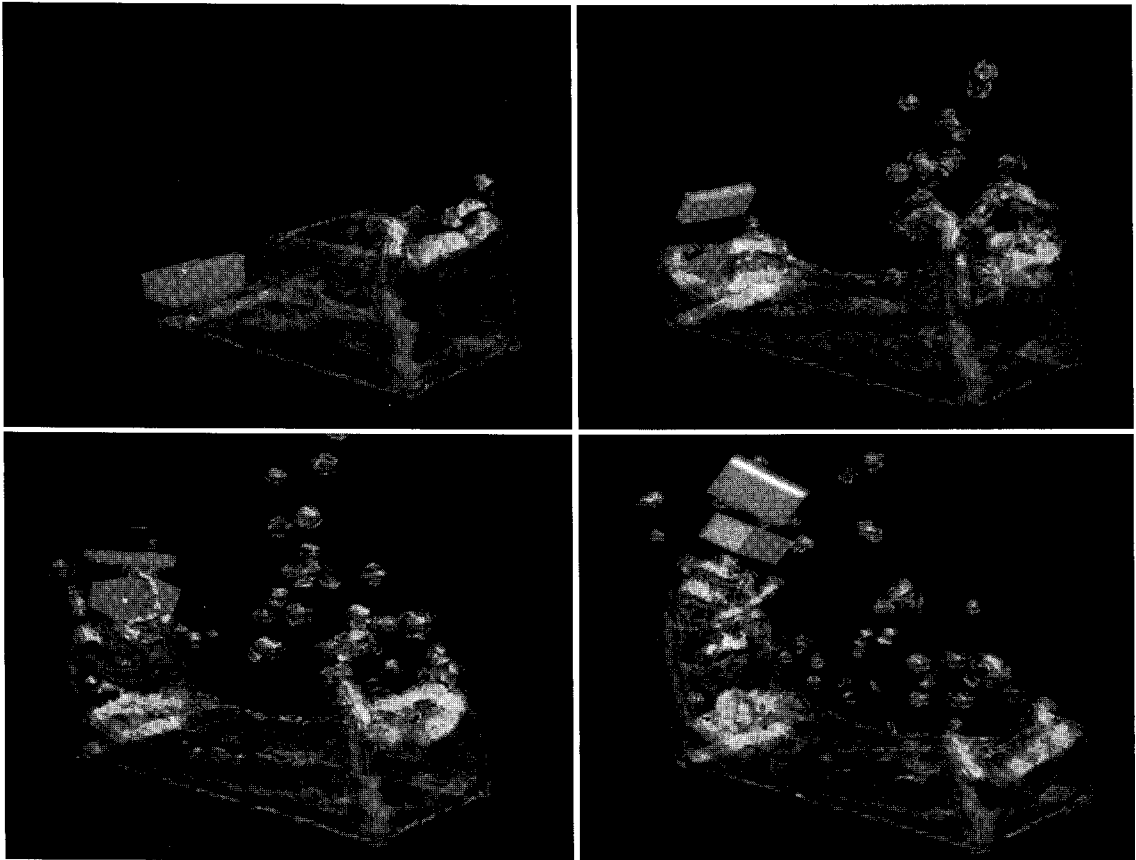


그림 5. 시뮬레이션 파티클 데이터를 사각 스플랫 기법을 사용해 제작한 애니메이션

그림 5 는 SPH 를 사용하여 시뮬레이션 한 파티클 유체 데이터에 본 가시화 기술을 적용한 결과이다. 물과 같이 보이도록 환경 맵핑과 알파 블렌딩을 사용하였다. 자연스러운 물의 유동 현상을 보여준다. 그림 6 은 물을 컵에 따르는 영상을 사각 스플랫 기법으로 가시화 한 것이다. 물의 표면의 유동이 매끄럽게 효과적으로 가시화 되었다.

표 1 은 하나의 법선 벡터만을 사용하여 가시화하는 Point 스플랫 기법과 본 논문에서 제안한 사각 스플랫 기법의 계산 시간을 비교한 것이다. 본 논문에서는 파티클 시뮬레이션 된 데이터를 가시화 하는 것을 목적으로 하므로, 렌더링 시간에 파티클의 법선 벡터를 계산 하는 시간이 포함된다. 표 1 에서 Point 스플랫의 계산 시간은

SPH 를 이용한 법선 벡터 계산이 가장 큰 비중을 차지 한다. 사각뿔 형상으로 가시화 하기 위해서는 사각뿔 아랫면 4 점의 법선 벡터를 계산해야 한다. 사각 스플랫 가시화 시 추가되는 시간은 대부분 4 점의 법선 벡터를 계산하는 시간이다. 평면을 4 각뿔 형상으로 4 점 위치를 보정하는 시간은 0.01 초 이하로 매우 작으며 사각 스플랫 계산시간에 포함되어 있다.

파티클 개수/시간	Point 스플랫	사각 스플랫
25503	2.422 초	4.359 초
10962	0.75 초	1.33 초
3555	0.109 초	0.125 초

표 1. Point 스플랫과 사각 스플랫 기법의 계산시간 비교.

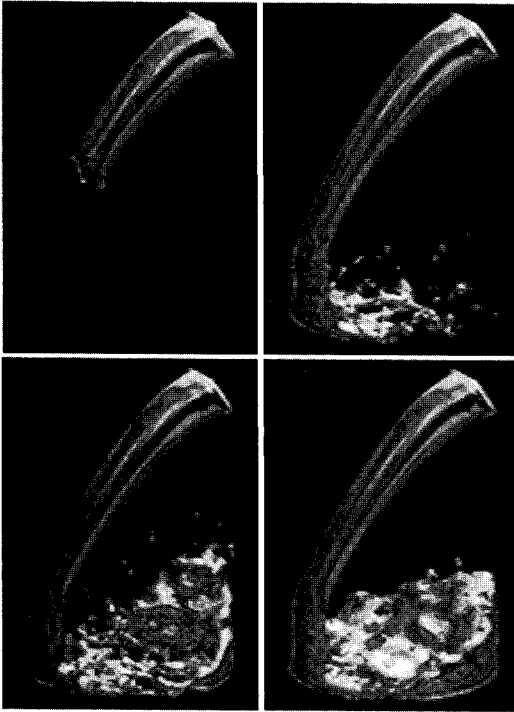


그림 6. 액체 애니메이션

7. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 사각 스플랫을 사용하여 다수의 파티클 데이터를 효과적으로 빠르게 3차원 가시화 하였다. SPH 기법을 이용하여 사각 스플랫의 위치와 법선 벡터를 계산하였으며 사각 스플랫을 사용 함으로서 단절 현상을 줄였다. 하지만 본 기법은 입력 받은 파티클 데이터의 상태에 따라 SPH 커널의 크기, 표면 임계 값 상수를 수동으로 조절해주어야 하는 단점이 있다. 따라서 향후, 본 기법에 요구되는 상수를 자동으로 계산하는 알고리즘을 개발할 것이다.

Acknowledgements

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NO.R01-2008-000-20855-0) 이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21사업'의 지원비를 받았음.

참고 문헌

- [1] M. Müller, D. Charypar, M. Gross, "Particle-based fluid simulation for interactive application," *Symposium on Computer Animation*, pp, 154-159, 2003.
- [2] M. Desbrun and M. P. Cani, "Smoothed particles: A newparadigm for animating highly deformable bodies," *In Computer Animation and Simulation '96 (Proceedings of EG Workshop on Animation and Simulation)*, pages 61-76. Springer-Verlag, Aug 1996.
- [3] M. LEVOY, T. WHITTED, "The use of points as display Primitives," *Tech. rep., CS Departement, University of North Carolina at Chapel Hill*, January 1985.
- [4] M. ZWICKER, H. PFISTER, J. VAN BAAR, M. GROSS, "Surface splatting," *In Proc. of Siggraph 01*, pp. 371-378, 2001.
- [5] L. REN, H. PFISTER, M. ZWICKER, "Object space ewa surface splatting: A hardware accelerated approach to high quality point rendering," *In Proc. Of Eurographics 02*, pp. 461.470, 2002.
- [6] M. ZWICKER, J. RÄSÄNEN, M. BOTSCH, C. DACHSBACHER, M. PAULY, "Perspective accurate splatting," *In Proc. of Graphics Interface 04*, 2004.
- [7] S. RUSINKIEWICZ, M. LEVOY, "QSplat: a multiresolution," *point rendering system for large meshes. InProc. of Siggraph 00*, pp. 343-352,2000.
- [8] M. ZWICKER M, M. PAULY, O. KNOLL, M. GROSS, "PointShop 3D: An Interactive System for Point-Based Surface Editing," *In Proc. of Siggraph 02*, 2002.