효율적인 2차 오차 함수를 이용한 입자 기반 Extended Marching Cubes

권유빈O, 김종현*
O인하대학교 소프트웨어융합대학 디자인테크놀로지학과,
*인하대학교 소프트웨어융합대학 디자인테크놀로지학과
e-mail: jonghyunkim@inha.ac.kr

Particle-Based Extended Marching Cubes with Efficient Quadratic Error Function

Yu-Bin KwonO, 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

● 요 약 ●

본 논문에서는 효율적인 2차 오차 함수를 이용하여 입자 기반에서 EMC(Extended Marching Cubes) 알고리즘을 구현할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다. Smoothing 커널(Kernels)을 통해 계산한 입자 평균 위치에서 레벨셋(Level-set)을 계산해 스칼라장을 구축한다. 그리고 난 뒤 SPH(Smoothed particle hydrodynamics)기반의 커널을 통해 밀도, 입자 평균 위치를 계산한다. 스칼라장을 이용해 등가 곡면(Isosurface)을 찾고 음함수로 표현된 표면을 구성한다. SPH 커널을 공간에서 미분하면 공간상의 어느 위치에서나 기울기를 계산할 수 있고, 이를 통해 얻어진 법선벡터를 이용하여 일반적인 EMC나 DC(Dual contouring)에서 사용하는 2차 오차 함수를 효율적으로 설계한다. 결과적으로 제안하는 방법은 메쉬와 같이 연결정보다 없는 입자 기반 데이터에서도 EMC 알고리즘을 구현하여 볼륨(Volume) 손실을 줄이고, 복잡한 음함수 표면을 표현할 수 있게 한다.

키워드: 마칭 큐브(Marching Cube), 듀얼컨투어링(Dual contouring), 확장된 마칭 큐브(Extended Marching Cubes), 등가곡면(Isosurface), 레벨셋(Level-set), 커널(Kernel)

I. Introduction

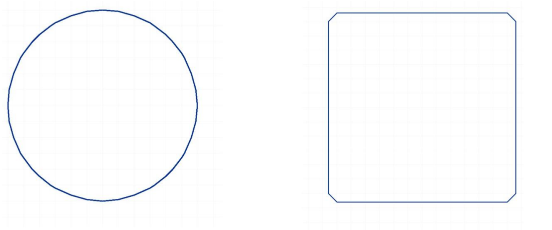
본 논문에서는 2차 오차 함수를 이용하여 입자 기반에서 EMC(Extended Marching Cubes) 알고리즘을 효율적으로 구현할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시한다[1,2]. MC(Marching Cubes) 알고리즘의 확장된 형태인 EMC 알고리즘을 이용하여 입자로 이루어진 공간에서 음함수 표면을 찾는 과정은 법선벡터의 부정확성과 연결정보가 없는 입자 기반 데이터셋이기 때문에 사실상 2차 오차 함수에 대한 정확도가 현저히 떨어지게 된다. 본 논문에서는 DC[3]와 EMC[2]에서 사용하는 2차 오차 함수를 입자 기반으로 새롭게 모델링하고, 수치 수렴을 개선하여 입자 기반에서 EMC가 안정적으로 계산될 수 있도록 알고리즘 개선한다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Marching cubes

MC는 스칼라장에서 등가 곡면을 추출해 표면을 찾는 알고리즘이며, William Lorensen 과 Harvey E. Cline에 의해 제안되었다[1]. 공간상의 한 점에서 특정 표면까지의 거리를 나타내는 부호화된 거리를 이용하여, 표면 내부에서는 음수, 표면에서는 0, 표면 외부에서는 양수를 갖는 특징이 있다. 음함수를 갖는 원과 사각형 방정식을 MC 알고리즘으로 표현하면 다음과 같이 표면을 찾을 수 있다. (Fig. 1 참조). 상대적으로 곡률(Curvature)이 작은 원은 표면이 매끄럽게 잘 나타나지만, 사각형의 꼭짓점과 같은 날카로운 특징(Sharp feature)은 제대로 표현되지 못하는 한계점을 가지고 있다.

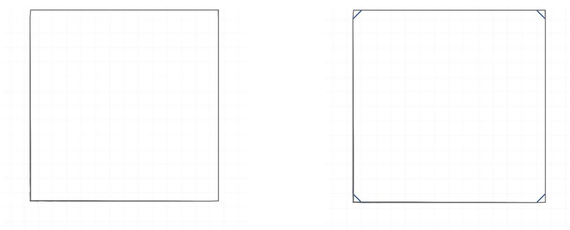


(a) (b)

Fig. 1. Surface extraction with MC.

1.2 Extended marching cubes

Fig. 2는 음함수를 미분하여 얻은 법선벡터를 통해 EMC 알고리즘을 구현한 결과다[2]. 한 점과 법선벡터를 알면 평면을 정의할 수 있으므로, $n \cdot (x-p)$로 표현되는 연립 방정식을 풀어 두 평면을 교차점을 찾을 수 있다. Fig. 2를 보면 MC에서는 볼륨이 손실되는 현상이 EMC에서는 나타나지 않고 있다. 이처럼, EMC 알고리즘을 사용하여 메쉬의 표면 정확도를 높일 수 있다.



(a) (b)

Fig. 2. Comparison of MC vs. EMC : (a) EMC, (b) MC (The black line is the EMC).

1.3 Smoothing kernels

입자기반에서 스칼라장은 부드러운 커널(Smoothing kernels)를 통해 계산된다. 커널은 주변 입자들의 값을 평균화하여 MC에서 사용되는 레벨셋 값에 대해 근사치를 계산한다. 본 논문에서는 Zhu와 Bridson에서에서 제안된 kernels를 사용하였다[4].

$$k(s) = \max\left(0, \left(1-s^2\right)^3\right) \tag{1}$$

Fig. 3는 수식 1을 통해 거리 s에 따라 변화하는 값을 시각화한 결과이다. 정규분포 형태의 곡선 그래프로, 입자와 거리가 가까우면 값이 크고, 멀어질수록 값이 작아지는 특징을 가진다.

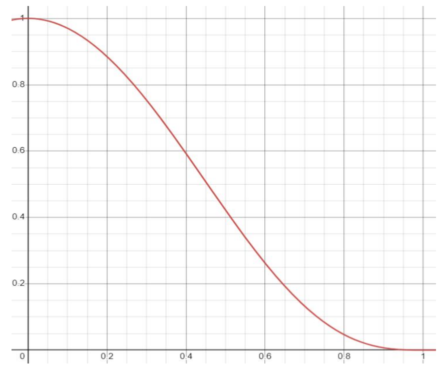


Fig. 3. Chart showing the change for s (vertical axis : kernel value, horizontal axis : distance).

이 커널을 통해 입자들의 평균위치를 계산하고, 수식 2를 이용하여 공간에서 표면으로부터 떨어지는 거리 값에 밀도를 기반으로 근사 계산한다 (수식 2 참조).

$$\phi(x) = \left(x - \bar{x}\right) - r \tag{2}$$

여기서 $\bar{x}$는 입자들의 평균 위치를 의미하고, 이 과정은 수식 3과 수식 4를 통해 계산된다. 계수 r은 평균 반지름이지만, 본 논문에서는 인접 입자의 기준이 되는 거리 R의 2배 이상이 되는 상수로 정의하여 사용한다.

$$W_i = \frac{\left(\left|x - x_j\right| / R\right)}{\sum_j \left(\left|x - x_j\right| / R\right)} \tag{3}$$

$$\bar{x} = \sum_i W_i x_i \tag{4}$$

III. The Proposed Scheme

1. Calculating Normal in Particles

공간상에 입자를 sampling 한 후, 커널을 이용해 입자의 밀도와 법선 벡터을 시각화하면 다음과 같이 나타난다 (Fig. 4 참조).

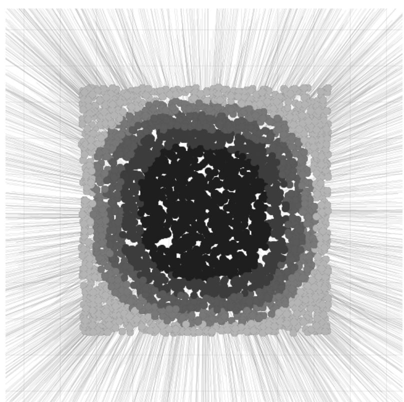


Fig. 4. Normal visualization with kernel gradient.

Fig. 4에서 입자의 색은 밀도를 나타내며, 밀도가 높을수록 색이 진해진다. 커널을 공간에서 미분하면 스칼라장에서의 기울기를 통해 법선 벡터를 계산할 수 있다. 도형의 음함수와는 달리 입자를 사용하는 경우 입자의 분포와 인접 입자의 개수에 따라 법선 벡터의 정확도가 달라지기 때문에 2차 오차 함수를 그대로 사용할 수 없으며, 본 논문에서는 이 문제를 완화화기 위한 새로운 방식을 통해 표면의 정점 위치를 계산한다.

2. Projection to Virtual Plane

일반적으로 인접 입자의 개수가 부족한 표면 근처에 위치한 입자들은 법선 벡터의 정확도가 현저히 떨어진다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 노드 내에 있는 입자들로부터 평균위치를 계산하고 (Fig. 4에서 노란색 입자), 여기서 법선 벡터를 계산한다.

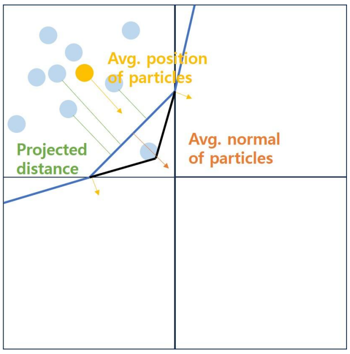
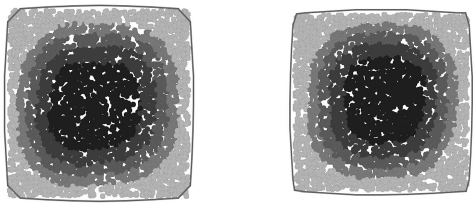


Fig. 4. Projecton process.

자유표면(Free surfaces) 근처에 위치한 입자의 법선벡터보다 표면 내부에 위치한 입자의 법선 벡터가 정확하기 때문에 논 논문에서는 이러한 방식을 이용하였다. 이렇게 결정된 가상의 평면(Virtual plane)으로부터 가장 멀리 떨어진 입자를 찾고, 이 과정은 평면에서 수직거리가 가장 먼 입자를 찾는 계산이기 때문에 평면의 방정식을 이용하면 쉽게 찾을 수 있다. 이 거리가 가정 먼 입자의 위치를 새로운 정점의 위치로 설정하여 EMC를 적용하였다. 이 과정을 통해 법선 벡터의 정확도가 떨어지는 문제를 보정하여 입자 데이터에서 EMC를 온전히 계산될 수 있도록 했다.

IV. Results

본 논문에서 제안한 방법과 MC 알고리즘을 통해 구현한 결과를 비교해보면, 날카로운 부분에서 우리의 방법이 볼륨 손실이 적은 것을 확인할 수 있다. (Fig. 5 참조).



(a) MC (b) Our method

Fig. 5. Comparison of the results of particle-based EMC using our method and MC.

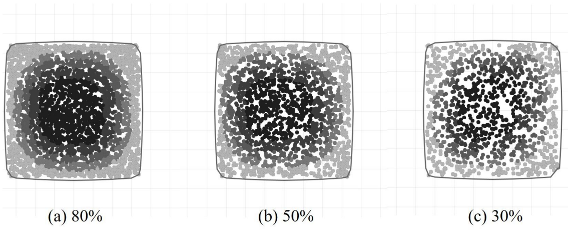


Fig. 6. Surface extraction results for different particle counts.

Fig. 6은 Fig. 5에서 실험한 입자의 개수를 각각 80%, 50%, 30%로 줄여가며 표면 추출을 실험한 결과이다. 입자에서 표면을 추출할 때는 입자의 개수가 정확도를 좌우하기 때문에 중요하지만, 제안하는 방법은 입자 개수의 변화가 크더라도 음함수 표면을 안정적으로 추출했으며, EMC의 특징은 날카로운 부분의 표면을 잘 보존했다.

V. Conclusions

본 논문에서는 입자 기반 데이터 셋에서 2차 오차 함수를 안정적으로 표현할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안했다. 우리의 방법은 일반적으로 MC 알고리즘을 개선했기 때문에, MC를 활용할 수 있는 대부분의 산업에서 이용할 수 있다. 특히, 입자로부터 표면 추출이 필요한 자율 주행, 입자 기반 유체 시뮬레이션, 데이터 시각화 부분에서 활용 가능하다.

우리의 방법은 명시적으로 비등방성커널(Anisotropic kernel)이나, 자코비 반복법을 이용한 SVD(Singular value decomposition) 같은 계산량이 큰 과정이 필요 없고, 법선 벡터의 정확도가 떨어지는 입자 데이터에서 안정적으로 EMC로 인한 표면과 날카로운 특징을 잘 표현했다. 향후, 해당 알고리즘을 통해 유체 시뮬레이션에서 복잡한 표면을 추출할 수 있도록 알고리즘을 확장할 계획이다.

REFERENCES

[1] Lorensen, William E., and Harvey E. Cline. "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm." In Seminal graphics: pioneering efforts that

shaped the field, pp. 347-353. 1998.
[2] Kobbelt, Leif P., Mario Botsch, Ulrich Schwanecke, and Hans-Peter Seidel. "Feature sensitive surface extraction from volume data." In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 57-66. 2001.
[3] Ju, Tao, Frank Losasso, Scott Schaefer, and Joe Warren. "Dual contouring of hermite data." In Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 339-346. 2002.
[4] Zhu, Y., & Bridson, R. (2005). Animating Sand as a Fluid. ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 24, No. 3, pp. 965-972, July 2005.