

Subdivision Mesh의 품질 향상을 위한 MDVC 알고리즘

이영진 김창현

고려대학교 컴퓨터학과
{yglee, chkim}@cgvr.korea.ac.kr

MDVC Algorithm for the Improvement of Subdivision Mesh's Quality

Young-Gun Lee Chang-Hun Kim
Dept. of Computer Science & Engineering, Korea University

요 약

본 논문은 분할 메쉬의 품질을 향상시키기 위해 초기 메쉬의 위상을 최적화 시키는 MDVC(Modified Dynamic Vertex Connectivity) 알고리즘을 제안한다. 분할 메쉬는 초기 메쉬에 연속적인 분할 규칙이 적용된 메쉬로, 초기 메쉬의 위상에 따라 분할 메쉬의 모양과 부드러움이 좌우된다. 본 논문에서 제안하는 MDVC 알고리즘은 초기 메쉬의 위상과 aspect ratio를 개선시키므로, 기존의 분할 메쉬에서 발생하던 뒤틀림 현상을 방지할 수 있고, 초기 메쉬의 규칙점의 개수가 증가되도록 위상정보를 변경시켜 메쉬분할시 부드러움을 개선시킬 수 있다.

1. 서 론

3차원 모델링 분야중 분할 메쉬는 interactive graphics, 컴퓨터 애니메이션, 기하 디자인 응용 분야 등에서 인의 위상을 가진 메쉬 모델을 부드럽게 만들기 위해 사용되어지고 있는데, 메쉬분할법(subdivision)이란 간단한 메쉬의 각 모서리 및 면에 일정한 분할 규칙을 적용하여 새로운 점과 면을 생성시켜 부드러운 메쉬를 생성시키는 방법이다.

이런 메쉬분할법은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 첫째, 메쉬분할법은 간결한 분할 규칙을 이용해 초기메쉬를 부드럽게 만들 수 있다. 둘째, 메쉬의 각 점에 영향을 받는 부분이 일정 영역으로 국한된다. 셋째, 분할메쉬법을 매 단계마다 적용시 메쉬의 모든 점에 대해서 연속성이 보장된다.

메쉬분할 방법에는 여러 방법이 있는데, 크게 근사(approximating)기법과 보간(interpolating)기법으로 분류할 수 있다.[6].

근사기법은 메쉬분할로 생성되는 결과메쉬가 초기 기본메쉬의 정점을 지나지 않고 근사하게 되는 메쉬분할법이다. Loop 메쉬분할법[5]은 삼각메쉬를 사용하는 대표적인 근사 메쉬분할법으로 3-directional box 스플라인에 기반하였으며, 결과메쉬는 특징점(extraordinary)을 제외한 모든 규칙점(regular)지역에서는 C^2 연속성이 보장되며, 특징점에서는 C^1 연속성이 보장된다. Catmull-Clark 메쉬분할법[1]은 사각메쉬에 사용되는 기법으로, tensor product bicubic 스플라인에 기반한 기법이다. 연속성 성질은 Loop기법과 같으며, 임의의 다각형메쉬는 사각메쉬로 변환이 가능하므로 적용 대상이 많다.

보간기법은 매 단계 메쉬 분할마다 이전 레벨에 존재하던 정점의 위치는 변하지 않는 메쉬분할법이다. 본 기법은 메쉬 분할 결과로 축소화(Shrinkage)가 발생하지 않는다는 장점이 있으며, 초기 입력 데이터를 모두 지나

는 결과를 얻을 수 있으므로 CAD 데이터 등 정밀도를 요구하는 응용분야에서 활용될 수 있다. Dyn, Gregory, Levin이 제안한 Butterfly 메쉬분할법[2]은 삼각메쉬에 적용 가능한 메쉬분할법이며, 특징점을 제외한 지역에서 C^1 연속성이 보장된다. Kobbeit[3]는 사각메쉬에 적용 가능한 메쉬분할법을 소개 하였는데, 모든 지역에서 연속성이 보장되며 적응적(adaptive) 분할로 확장이 가능하다.

초기 메쉬의 꼭지점들은 규칙점(regular)과 특징점(extraordinary)으로 구분되어 질 수 있는데, 삼각메쉬에서 규칙점은 이웃하는 점의 개수가 6인 점이고 사각메쉬는 4인 점이다. 그리고 규칙점이 아닌 나머지 점들을 특징점이라고 하는데, 분할 메쉬의 규칙점이 특징점보다 높은 연속성을 가진다.

이러한 분할메쉬의 연속성은 주어진 초기 메쉬의 위상에 따라 좌우되기도 한다. 이는 초기 메쉬를 구성하는 삼각형의 aspect ratio가 좋지 않으면, 초기 메쉬에 연속적으로 분할 규칙을 적용시킬 때, 계속 좋지 않는 aspect ratio를 갖는 삼각형이 생성되므로 분할 메쉬에 뒤틀림 현상이 나타난다.

본 논문은 기존에 remeshing에서 다단계 메쉬 모양을 최적화 시키기 위해 사용되었던 DVC 알고리즘[4]을 변형시켜, 메쉬분할의 초기 단계에 적용함으로써 초기 메쉬의 위상이 최적화 되고 분할 메쉬의 품질을 향상시킨다.

2. MDVC(Modified Dynamic Vertex Connectivity)

본 논문에서는 DVC 알고리즘이 정의하는 연산 edge collapse, edge split, edge flip을 수정하여 초기 메쉬의 edge를 제거, 분할, 위상정보를 바꾸어 줌으로 초기 메쉬의 aspect ratio를 개선시켰으며, 또한 메쉬의 규칙점의 개수를 증가시키기 위해 새로운 edge regularity 연산을 추가시켜 MDVC 알고리즘을 제안한다. MDVC 연산은 다

음과 같다. Edge collapse 연산은 입력 메쉬의 edge 길이를 계산하여 사용자가 준 최소값보다 작은 길이의 edge를 선택하여 collapse 시킨다. Edge split 연산은 edge collapse를 적용시킨 입력 메쉬에 사용자가 준 최대값보다 긴 길이의 edge를 선택하여 split 시킨다. 그리고 edge flip 연산은 edge의 이웃하는 두개 삼각형 점들의 이산곡률 값과 valence 합을 구해 전체 합이 작아지도록 edge를 flip 시킨다. 위의 3개의 연산을 메쉬의 위상이 최적화 될 때까지 여러 번 적용시킨다. 마지막으로, edge regularity 연산은 edge의 이웃하는 두 삼각형 점의 valence를 이용해 edge split와 edge collapse 적용시킴으로 초기 메쉬의 규칙점 개수를 증가시킨다. 논문의 전체 시스템 구성도는 그림 1과 같다.

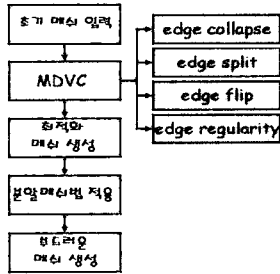


그림 1. 시스템 구성도

2.1 연산 1 : Edge Collapse

Edge collapse 연산은 메쉬의 edge 중 길이가 사용자가 지정해 준 ϵ_{min} 보다 작은 길이의 edge를 하나의 점으로 축약시켜주는 연산이다. 작은 길이의 edge는 메쉬분할 후 뒤틀림 현상을 초래할 수 있기 때문에 collapse 시켜준다. 또한 collapse 시킬 edge를 선택할 때, 낮은 valence를 갖는 꼭지점들을 제거할 수 있도록 선택한다.



그림 2. Edge collapse 연산

2.2 연산 2 : Edge Split

Edge split 연산은 메쉬의 edge 중 길이가 사용자가 지정한 ϵ_{max} 보다 긴 길이의 edge 중심에 하나의 점을 추가시켜 두 인접하는 삼각형을 분할시키는 연산이다. 긴 길이의 edge를 포함하는 삼각형의 aspect ratio는 0에 가깝기 때문에 split 연산을 이용해 aspect ratio가 큰 삼각형으로 분할시킴으로 부드러움을 개선시킨다.

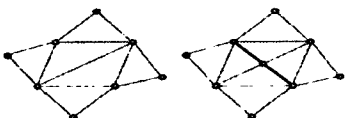


그림 3. Edge split 연산

2.3 연산 3 : Edge Flip

Edge flip 연산은 그림 4와 같이 한 edge에 인접한 삼각형 $\triangle(A,B,C)$, $\triangle(C,B,D)$ 의 꼭지점에 대해서 이산곡률 값들의 합과 total valence $\sum_{p \in A, B, C, D} (valence(p) - 6)^2$ 의 값이, 대각선 \overline{BC} 를 flip 시켰을 때 값보다 크면 대각선 \overline{BC} 를 flip 시키는 연산이다. Total valence 값이 줄어들도록 edge flip 시켜주면 인접 점 A,B,C,D들의 valence가 규칙점에 가까워질 수 있다. 그리고 이산곡률 값이 줄어들도록 edge를 flip 시켜주면 주변의 곡률값이 작아져서 부드러움을 개선시킬 수 있다.

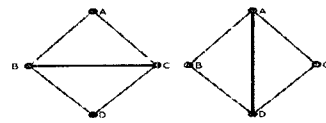


그림 4. Edge flip 연산

2.4 연산 4 : Edge Regularity

Edge regularity 연산은 edge split와 edge collapse를 적용시킨 연산으로, 그림 5(a)와 같이 한 edge의 인접한 삼각형 $\triangle(A,B,C)$, $\triangle(C,B,D)$ 에서 각 점의 valence 중에서 점 A,D의 valence가 5이면 split시킴으로 두 개의 규칙점으로 변환시켜 주고, 그림 5(b)와 같이 점 B,D의 valence 합이 10이 되면 collapse를 적용시켜 두 개의 특징점을 하나의 규칙점으로 변환시켜준다. Edge regularity 연산은 메쉬의 규칙점의 개수를 증가시킴으로 메쉬의 연속성을 개선시킨다.

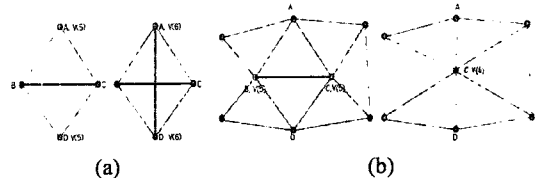


그림 5, (a) Edge split을 이용한 edge regularity 연산
(b) Edge collapse을 이용한 edge regularity 연산

3. 실험 및 결과

실험 환경은 Pentium III 866CPU 512M의 PC이며, Inventor library와 Visual C++을 사용하여 구현하였다. MDVC를 적용한 결과는 표 1과 그림 6, 7, 8과 같다. 본 논문에서는 비너스, 기계부품 모델과 Loop 메쉬 분할법을 이용하여 실험하였다. 그림 6, 7는 연산 1,2,3을 여러 번 적용시켜서 초기 메쉬의 aspect ratio를 개선시킨 결과 그림이다. 그림의 동그라미 부분처럼 메쉬분할 적용후의 메쉬 뒤틀림 현상을 개선하였다. 그림 8는 연산 1,2,3,4를 적용하여 메쉬의 규칙점의 수를 증가시킨 결과 그림이다. 표 1은 비너스 초기 메쉬의 규칙점의 비율을 측정한 결과이다. 원본 초기 메쉬의 규칙점의 비율은 연산 1,2,3을 적용한 초기 메쉬의 규칙점의 비율보다 작고, 이 또한 연산 1,2,3,4를 적용한 초기 메쉬보다 규칙점의 비율이 작음을 나타내는 표이다. 초기메쉬의 규칙점의 비율이

많으면 많을수록 메쉬의 연속성은 좋아진다.

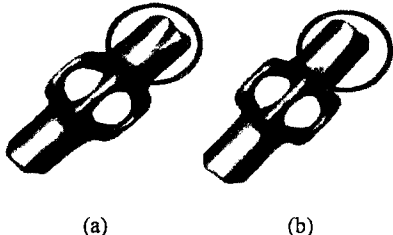


그림 6. (a) 원본 초기 메쉬에 메쉬분할한 결과
(b) 연산 1,2,3을 적용한 초기 메쉬에 메쉬분할한 결과

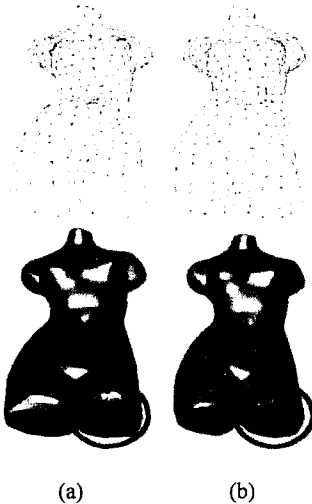


그림 7. (a) 원본 초기 메쉬에 메쉬분할한 결과
(b) 연산 1,2,3을 적용한 초기 메쉬에 메쉬분할한 결과

표 1. 비너스 모델에 대한 규칙점 비율

	원본 메쉬	연산 1,2,3 후	연산 1,2,3,4 후
꼭지점	711	696	600
면	1418	1388	1196
규칙점	251	301	386
규칙점/ 꼭지점	35%	43%	64%

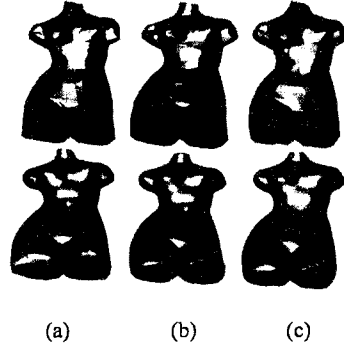


그림 8. (a) 원본 초기 메쉬에 메쉬분할한 결과
(b) 연산 1,2,3 적용 메쉬에 메쉬분할한 결과
(c) 연산 1,2,3,4 적용 메쉬에 메쉬분할한 결과

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 분할메쉬 품질 향상을 위해 초기 메쉬의 위상정보와 aspect ratio을 개선시키는 방법을 제안하였다. 제안된 MDVC 알고리즘이 적용된 초기 메쉬를 이용한 분할메쉬는 메쉬의 뒤틀림 현상을 방지할 수 있었으며, 메쉬에 regularity를 증대시키므로 연속성이 개선된 메쉬를 얻을 수 있었다.

향후 연구로는 edge collapse 연산에 의해 생성될 수 있는 윤곽선(feature) 제거에 대해서 보완된 MDVC 알고리즘을 연구할 필요가 있다.

5. 참고문헌

- [1] E. Catmull and J. Clark. *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*. Computer-Aided Design, 10:350-355, September 1978.
- [2] N. Dyn, J. Gregory, and D. Levin, *A Butterfly Subdivision Scheme for Surface Interpolation with Tension Control*. ACM Trans. Graph. 9, pp. 160-169, 1990.
- [3] L. Kobbelt, *Interpolatory Subdivision on Open Quadrilateral Nets with Arbitrary Topology*. Eurographics 96 Proceeding, pp. 409-420, 1996.
- [4] L. Kobbelt, *Multiresolution Shape Deformation for mesh with Dynamic Vertex Connectivity*, Eurographics 2000 Proceeding, pp. 249-259, 2000.
- [5] C. Loop. *Smooth subdivision surfaces based on triangles*. Masters thesis, Department of Mathematics, University of Utah, August 1987.
- [6] D. Zorin and P. Schroder. *Subdivision for modeling and animation*. SIGGRAPH 2000 Course notes, August 2000.