삼각형 메쉬 모델의 효율적 이산 곡률 근사 +

전성환*, 권영수**, 서정근*,***, 최유주*,***
*서울미디어대학원대학교 뉴미디어콘텐츠학과 공학전공
**(주)인텔리코리아
***서울미디어대학원대학교 실감미디어연구소
e-mail : alexchun78@gmail.com, ykwon@cadian.com, jksuh@smit.ac.kr, yjchoi@smit.ac.kr

Efficient Approximation of Discrete Curvature of Triangular Mesh Model

Sung-Hwan Chun*, Youngsoo Kwon**, Jung-Keun Suh, Yoo-Joo Choi*,***
*Dept. of Newmidia Content, Seoul Media Institute of Technology
**IntelliKorea Ltd.
***Immersive Media Lab., Seoul Media Institute of Technology

요 약

본 논문에서는 실시간 메쉬 모델의 형태 분석 처리가 가능하도록 하기 위한 효율적 이산 곡률 근사 방법을 제안한다. 메쉬 이산 곡률을 계산하는 기존 방법들의 경우, 각 정점(vertex) 별로 인접면(face)에 대한 인접 순서등 인접 정점과 인접면과의 관계에 대한 사전 분석이 요구된다. 또한, 인접 정점과의 관계 분석을 위하여 고유치 분석 등 높은 계산 비용을 요구한다. 이에 비해, 제안 방법은 각 정점별로 정렬되지 않은 인접 정점의 위치 정보만으로 이산 곡률을 계산함에 따라 계산 부담이 적은 반면, 기존에 Taubin의 방법을 적용한 결과에 비해 정확한 곡률 계산 결과를 보여 주었다. 곡률 계산의 정확성은 다양한 형태의 메쉬 모델들에 대한 기존 방법과의 비교 실험을 통하여 입증하였다.

1. 서론

메쉬 모델에서 표면의 이산 곡률(discrete curvature)은 모델의 분할(mesh segmentation)[1,2]과 간략화(simplification)[3]등에 필요한 모델의 위상학적, 기하학적 형태 분석을 위하여 요구되는 특성(feature) 이다. 이러한 메쉬 모델에 대한 형태분석 기술들은 최근 관심을 모으고 있는 3D 프린팅등의 분야에서 프린팅 퀄리티를 효율적으로 높이기 위한 접근 방법으로 활용되고 있다[4].

메쉬 모델에 대한 이산 곡률은 3D 모델의 다면체 표면을 구성하는 정점(Vertex)별로 인접 정점과 이루는 표면의 굽은 각도를 나타내는 값으로 다면체 표면의 특징을 표현하기 위하여 널리 사용되는 특성이다.

곡률 근사 방법[5,6]으로는 여러 가지가 있는데, 대표적인 것으로는 이면각, 모서리의 길이, 모서리가 이루는 면 등으로 지역적 특성을 나타내는 이산적 근사방법과 다항식으로 버텍스의 x, y, z 좌표를 변환하여 관련된 포물선으로 곡률을 근사하는 파라미터 근사 방법, 최적 형상에 대한 곡률 적분을 최소 또는 평균화하는 곡률 근사 방법, 가우시안 분포를 활용하여 각 정점에 연결된 삼각형 표면의 면적에 따른 가중치 부여 및 고유치 분석 등을 통한 곡률 근사방법[6]이 있다. 이 중에서 표면 곡률의 기하학적 정보를 사용하여 정점(Vertex)을 중심으로 구성된 삼각형 형태의 표면의 가우시안 곡률 근사 방법[6]은 Taubin에 의해 1995년 제안되었다. Taubin의 방법은 곡률 계산의 복잡성으로 인해, 3D 모델을 구성하는 정점의(Vertex) 수가 증가할수록 곡률 계산에 대한 수행시간이 크게 증가하게 된다.

이에 본 논문에서는 인접 정점과의 기울기 및 거리 변화량에 따라 이산 곡률을 근사하는 새로운 방법을 제안한다. 제안 방법에 대한 평가를 위하여, 기존에 널리 사용되고 있는 Taubin 방법과의 비교 실험을 통하여 이산 곡률 근사의 결과 정확도와 수행속도가 현저히 개선됨을 다양한 메쉬 모델을 이용한 실험을 통하여 입증한다.

2. 제안 이산 곡률 근사

본 논문에서는 각 정점별로 인접한 정점들의 법선 벡터(normal vector)와 기준 정점를 통과하는 평면을 정의하고 인접한 정점들과 평면이 이루는 기울기

+ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음. [R0126-15-1016, 국내 보급형 3D 프린터 맞춤형 스마트 슬라이서 개발].
* 교신저자 : 최유주 (yjchoi@smit.ac.kr)

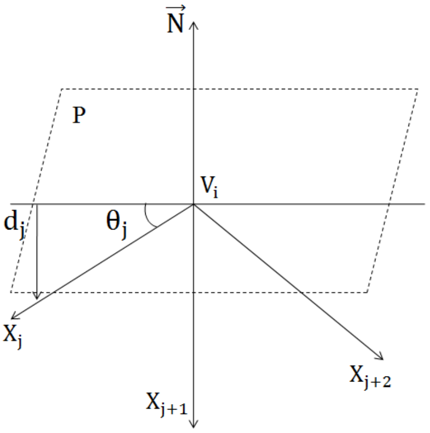
(Θ)의 sin 값의 총합을 인접정점의 수로 나눈 평균값을 이산 곡률 근사값(discrete curvature approximation value)으로 정의하였다.

제안 이산 곡률 근사값을 계산하기 위한 수식은 다음과 같다. 우선, 식 (1)과 같이 각 정점별로 인접한 평면들의 법선 벡터들의 평균을 구하여 그 값을 기준이 되는 정점 $V_i=(V_x, V_y, V_z)$의 법선 벡터 $\overrightarrow{N}=(N_x, N_y, N_z)$로 정의하였다.

$$\overrightarrow{N}=\frac{1}{n}\sum_{f_j\in neighbor(V_i)} N(f_j) \qquad (1)$$

여기서, f_i는 기준 정점 V_i의 인접평면을 의미하고, $N(f_j)$는 인접평면 f_i의 법선 벡터를 의미한다. n은 인접평면의 수를 의미한다. $\overrightarrow{N}$을 법선 벡터로 가지면서, 기준이 되는 정점 V_i를 지나는 평면은 식 (2)와 같이 정의 된다. 그림 1은 정의된 평면과 기준 정점, 인접 정점간의 관계를 보여 주고 있다.

$$N_x x+N_y y+N_x z-(N_x V_x+N_y V_y+N_z V_z)=0 \qquad (2)$$



(그림 1) 정점 V_i를 지나는 $\overrightarrow{N}$에 수직인 평면 P와 인접 정점과의 관계

식 (2)에 의하여 정의된 평면과 인접한 정점 X_j과의 거리 d_j 는 식 (3)과 같이 계산할 수 있고, 이를 이용하여, 평면과 인접한 정점 X_j 와 이루는 기울기 각도 Θ에 대한 sin 값은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$d_j = X_j \cdot \overrightarrow{N} - V_i \cdot \overrightarrow{N} \qquad (3)$$

$$\sin\theta=\frac{\| d_j \|}{\| X_j - V_i \|} \qquad (4)$$

식 (4)의 값을 기반으로 정점 V_i 에 대한 이산 곡률 근사값 $C(V_i)$은 식 (5) 와 같이 구한다.

$$C(V_i)=\frac{1}{m}\sum_{j=1..m}\sin\theta_j \qquad (5)$$

여기서, m는 기준 정점 V_i의 인접정점의 수를 의미하고, θ_j는 인접정점 X_i와 식(2)의 평면 P 이루는 기울기 각도를 의미한다.

본 논문에서 제안 이산 곡률 근사 알고리즘은 아래와 같다. 알고리즘 1에서 F, V 는 각각 메쉬 모델을 표현하는 평면과 정점 리스트를 의미하고, E는 에지 정보를 표현한 행렬로서, 정점의 개수를 Nv 라고 할 때, Nv x Nv 로 구성된 2차원 행렬을 의미한다. E 행렬에서 $E[V_i][V_j]$ 의 값은 $\overrightarrow{V_iV_j}$ 에지가 존재하는 경우, 에지 $\overrightarrow{V_iV_j}$ 를 포함하는 삼각형(face)의 F 에서의 인덱스를 포함한다. 알고리즘 1의 라인 1에서 기준 정점의 인접면을 추출하고, 라인 2에서 인접면의 법선 벡터의 평균을 계산하여 기준 정점의 법선 벡터를 계산한다. 라인 3에서 라인 8의 반복문에서 인접 정점과 식 (2)의 평면이 이루는 기울기 각도를 계산하고, 이에 대한 sin 값의 총합을 구한 후, 인접정점의 수로 나눈 평균값을 이산 곡률 근사값으로 구한다.

Algorithm 1. 기준정점에 대한 이산 곡률 근사

Input :
  Vj : 기준 정점
  F : 메쉬 평면 리스트 (Face list)
  V : 메쉬 정점 리스트 (Vertex List)
  E : 2차원 에지 어레이 (Edge Array)
Output:
  C(Vj) : 기준 정점 Vj 에 대한 이산 표면곡률 근사

1 $F=\{f_j \mid f_j=E[V_i][X_j], X_j\in neighbor(V_i) \text{ and } f_j\neq -1\}$
2 $\overrightarrow{N}=\frac{1}{n}\sum_{f_j\in N(V_i)} N(f_j)$
3 C = 0;
4 while(j < neighbor_vertex_count){
5   TA ← ‖ Xj - Vi ‖
6   TB ← $\| X_j \cdot \overrightarrow{N} - V_i \cdot \overrightarrow{N} \|$
7   sinTheta ← TB / TA
8   C += sinTheta
9 }
10 C = C / neighbor_vertex_count;

4. 실험 및 결과

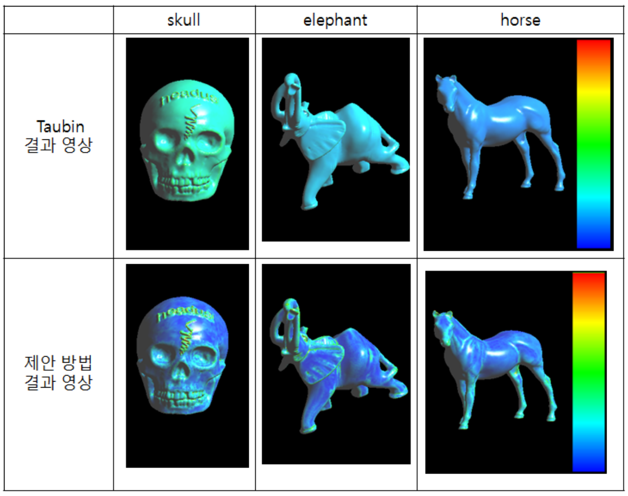
제안 알고리즘을 구현하여 해골과 코끼리, 말 모델에 적용하였다. 각 모델의 구성 정점과 페이스 수는

표 1과 같다. 제안 방법의 효율성과 정확성을 검증하기 위하여 정확한 표면 곡률을 계산하는 것으로 알려진 Taubin의 방법과 비교 실험을 수행하였다. 우선, 세 가지 모델에 대하여 Taubin의 방법과 제안 방법의 수행시간을 비교하였다. 본 논문에서 제안한 수행 방법이 수행시간이 세 가지 모델에 적용하였을 때, 평균 26.56배 빨라짐을 확인할 수 있었다. 모델별 수행시간의 차이는 표 1과 같다. 표 1과 같이 수행시간이 크게 단축됨을 확인할 수 있었고, 곡률 근사 정확도 측면에서는 Taubin의 방법에 비해 보다 명확한 이산 곡률 근사값이 계산 됨을 표 2와 같이 가시적 평가 방법으로 확인할 수 있었다.

<표 1> 실험 모델별 수행시간 비교

모델명	vertex수	face 수	Taubin 실행시간 (단위:ms.)	제안 방법 실행시간 (단위:ms.)
skull	20,002	40,000	105.67	3.88039
elephant	24,955	49,918	113.928	4.49886
horse	19,851	39,698	99.6245	3.6662

<표 2> Taubin 방법과 제안 방법의 곡률 근사 정확도 비교



5. 결론

3D 프린팅 분야 및 3D 모델을 기반으로하는 실시간 인터랙티브 콘텐츠 제작 분야에서 효율적인 메쉬 모델의 기하학적 형태 분석의 요구가 높아짐에 따라, 계산 비용이 적으면서 모델의 형태 특성을 보다 명확하게 구분지어 줄 수 있는 평가 척도의 필요성이 높아지고 있다. 이에 본 논문에서는 인접 정점과의 거리와 기울기 변화량에 따른 효율적인 이산 곡률 근사방법을 제안하였다.

제안 방법의 성능 분석을 위하여 곡률의 정확성이 높다고 평가 받고 있는 Taubin의 방법과 비교 실험을 진행하였다. Taubin의 방법은 인접한 각 페이스마다 면적을 구하고 면적에 따른 가중치(weight) 적용 및 고유치 분석까지 해야 하기 때문에 정확하긴 하지만, 구성 정점의 개수가 증가할수록 계산량이 많아 속도저하가 필연적이다. 정점의 수가 2만개가 넘는 3개의 모델을 이용한 비교 실험에서 제안 방법은 평균 25.56 배의 수행속도 향상을 보였으며, 가시적 평가 방법에 의한 곡률 근사의 정확성면에서 Taubin의 방법에 비해 보다 명확한 곡률 근사 결과를 보여 주었다.

향후 연구로 메쉬 모델의 돌출점 추출(mesh saliency)[7] 및 메쉬 분할의 연구에 본 논문에서 제안하고 있는 곡률 근사 방법을 적용하여 곡률 근사 방법의 효용성을 검증하고자 한다.

참고문헌

[1] J. Vanek, J.A. Galicia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. S. Miller, "PackMerger: A 3D Print Volume Optimizer", Computer Graphics Forum, Vol. 33, Issue 6, pp. 322-332, 2014.

[2] 김선정, “이산 곡률과 Quick Shift를 이용한 메쉬 분할 알고리즘”, 한국정보기술학회 논문지, Vol. 11, No. 12, pp.245-254, 2013.

[3] A. Taime, A. Saaidi, K. Satori, "Comparative Study of Mesh Simplification Algorithms", Proc. of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies 2015, LNEE, Vol. 380, pp. 287-295, 2016

[4] L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewcziz, W. Matusik, "Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable Parts", ACM Transactions of Graphics, Vol. 31, Issue 6, 2012.

[5] 김선정, 임수일, 김창헌, “LOD 메쉬 생성을 위한 새로운 이산 곡률 오차 척도”, 정보과학회논문지:시스템 및 이론, 제27권, 제3호, pp. 245-254, 2000.

[6] G. Taubin, “ESTIMATING THE TENSOR OF CURVATURE OF A SURFACE FROM A POLYHEDRAL APPROXIMATION”, Proc. of ICCV 95, pp. 902-907, 1995.

[7] C. H. Lee, A. Varshney, D. W. Jacobs. “MESH SALIENCY”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 24, Issue 3, pp. 659-666, 2005.