전역 및 국부 기하 특성을 반영한 메쉬분할

임정훈[1O], 하종성[2], 유관희[3]
[1,3]충북대학교 컴퓨터교육과, [2]우석대학교 게임콘텐츠학과
[1]ljh417@empal.com, [2]jsha@woosuk.ac.kr, [3]khyoo@chungbuk.ac.kr

Mesh Segmentation Reflecting Global and Local Geometric Characteristics

Jeong Hun Im[1O], Jong-Sung Ha[2], Kwan-Hee Yoo[3]
[1,3]Dept. of Computer Education, Chungbuk National University
[2]Dept. of Game and Contents, Woosuk University

요 약

본 논문에서는 텍스춰매핑, 재메쉬화, 메쉬의 단순화와 모핑 및 압축 등 다양한 분야에 적용되는 메쉬분할 문제를 다룬다. 메쉬분할은 주어진 삼차원 메쉬를 서로 떨어진 집합(disjoint sets)으로 분할하는 것으로서 여러 연구자들에 의해 많은 연구 결과들이 제시되어 왔다. 본 논문에서는 삼차원 메쉬가 가지고 있는 기하학적 특성을 고려하여 메쉬를 분할하는 방법을 제시하고자 한다. 먼저 메쉬의 국부적 기하 특성인 곡률 정보와 전역적 기하 특성인 볼록성을 이용하여 삼차원 메쉬를 구성하는 첨예정점을 추출하였고, 이들간의 거리 정보를 이용하여 이 첨예정점들을 군집화(clustering)하였다. 최종 메쉬분할을 위해 분할된 첨예정점에 속하지 않는 나머지 정점들에 대해 거리 정보를 이용하여 군집화를 수행하였다. 본 논문에서 제안한 메쉬분할 방법을 검증하기 위해 벤치마크로 공개된 여러 메쉬 모델에 대해 실험하여 그 결과를 보여 주었다.

1. 서 론

일반적으로 메쉬분할(mesh segmentation)은 주어진 메쉬와 제한조건 하에서 주어진 메쉬를 서로 떨어진 집합(disjoint sets)으로 분할하되 제시된 기준조건을 극대화하는 최적화문제로 볼 수 있다. 응용 목적에 따라서는 메쉬의 정점 집합, 간선 집합 혹은 면 집합을 분할하기도 한다. 만약 각 면을 그래프의 노드로 나타내고 그래프의 간선을 인접관계에 의하여 나타내면 메쉬분할 문제는 그래프 분할 문제로 볼 수 있으며 이는 NP-문제에 속한다[1]. 즉 같은 제한조건과 기준조건이 주어진다 하더라도 메쉬분할의 최적화를 위한 완전한 해결책은 없다. 더구나 각 응용에 따라 제한조건과 기준조건이 매우 다양하게 주어지고 있으므로 그 조건들을 어떻게 줄 것인가도 별도로 연구되어야 할 주제라고 할 수 있다. 메쉬분할은 형태에 따라 기하적 특성을 보이는 파트 유형(part-type)과 평평한 디스크 모양의 패치 유형(patch-type)으로 나누어 볼 수 있는데, 지금까지 많은 연구들이 텍스처 매핑, 재메쉬화, 메쉬 단순화, 모핑, 압축 등을 위한 패치 유형에 집중되어 있다[2,3].

본 논문에서는 주어진 메쉬를 구성하는 면, 간선과 정점의 형태에 따른 전역적 및 국부적 기하 특성을 반영하여 메쉬를 파트 유형으로 분할하는 기법을 제시하고자 한다. 제 2장에서는 메쉬분할과 관련된 기존 연구 결과를 언급한다. 제 3장에서는 본 논문에서 제시하는 전역적 기하 특성을 이용하여 주어진 메쉬의 첨예정점을 구하는 방법을 제시하고, 제 4장에서는 메쉬의 전역 특성을 나타내는 첨예정점들을 군집화하는 기법을 제시한다. 특히 첨예정점들을 군집화할 때 메쉬의 국부적 특성인 거리 정보를 이용하였다. 분할된 첨예정점들의 지식을 이용하여 나머지 첨예정점에 속하지 않는 정점들을 군집화하여 최종 주어진 메쉬를 분할하였다. 제 5장에서는 제안한 메쉬분할 기법의 실험 환경과 이 기법을 적용한 실험 결과를 보여주며, 마지막으로 제 6장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 언급한다.

2. 관련 연구

메쉬분할 방법들이 분류될 수 있는 몇 가지 기준이 있을 수 있는데 기법에 따라 메쉬의 면을 점진적으로 병합해가는 상향식(bottom-up) 방식[4]과 메쉬를 계속적으로 나누어가는 하향식(top-down) 방식[5,6]이 있다. 많은 기존의 연구들 중에 본 논문과 같이 인간이 물체의 어떠한 영역의 경계를 인지하는 데에는 주곡률(principal curvature)의 음의 최소값 또는 오목한 주름이며 오목성의 깊이가 인식에 직접 영향을 준다는 인지과학적인 연구 결과[7,8]에 기반하여 첨예정점과 같은 특징점을 이용하여 메쉬를 분할하는 기존 연구 결과를 살펴본다.

자동 또는 임의로 극점(extreme point)의 하나를 루트(root)로 정하고 그로부터 측지거리(geodesic) 트리를 만들고 국부적 극점이나 새들(saddle)등의 특징점을 구하여 후위범람 (backward flooding) 알고리즘을 사용하여 메

쉬를 분할하는 방법이 Zhou와 Huang[9]에 의하여 제시되었다. 이후 Katz 등[10]는 포즈(pose)에 불변인 표현 방법인 다차원 신축(multi-dimensional scaling)으로 메쉬를 변환하여 측지거리에 의한 특징점을 추출하고 구면반사(spherical mirroring)이라는 볼록성과 오목성의 이원성(duality)를 이용하여 핵심구성요소를 먼저 찾아내는 기법을 제시하였다. 최근에는 볼록성을 주로 이용하는 앞의 두 방법과 달리 오목성을 주로 이용하는 방법으로 Lien과 Amato[11]이 오목성의 정량화를 정의하고 가장 오목성이 큰 부분을 인식하여 반복적으로 분할해나가는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 주어진 메쉬의 국부적 기하 특성인 곡률과 전역적 기하 특성인 볼록성을 이용하여 특징점을 찾아내고 이들을 먼저 군집화하고 나머지 정점들을 군집화함으로써 메쉬를 분할하는 다른 특징점 기반 메쉬분할 방법을 제시하고 이를 실험한다.

3. 주어진 메쉬의 첨예정점 구하기

일반적으로 메쉬분할은 첨예정점 (sharp vertex) 및 첨예간선 (sharp edge, feature edge, crestline 등으로 불림) 등을 결정하여 분류하고 분류된 정점과 간선을 기반으로 면을 병합함으로써 이루어진다. 따라서 효과적인 메쉬분할을 위해서는 첨예정점을 찾는 것이 매우 중요하다. 이번 장에서는 근사곡률을 이용하여 국부적 기하를 반영하는 첨예정점뿐만 아니라 전역적 기하를 반영하는 기하적 연산을 이용한 첨예정점을 결정하는 방법을 제시한다.

3.1 근사곡률 기반의 첨예정점 결정

삼차원 물체 표면의 곡률은 분할 각 과정의 결과에 영향을 미치는 가장 중요한 값이다. 그러나 메쉬에서 정점의 곡률은 수식으로 정의되는 표면과 달리 정의되지 않으므로 근사 곡률을 구하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 그 방법들은 크게 두 가지 방식으로 나누어지는데, 첫째 주어진 정점에 이웃한 정점들을 매개변수화한 곡면으로 적합(fitting)시키는 수식을 구하여 그 수식에서 해석학적으로 주요 곡률 및 방향을 구하는 연속적 근사 방식과, 둘째 주어진 정점에 속한 간선 방향으로 정규곡률(normal curvature)들을 구하여 대수적인 근사식으로 주요 곡률 및 방향을 구하는 이산적 근사 방식이 있다[12,13]. 연속적 방식에서는 구하여진 곡면과 주어진 정점들의 거리에 따라 정밀도가 달라지며 일반적으로는 밀집 메쉬에서 좋은 결과를 나타내지만 정점 분포의 비정규적인(degeneracy) 경우에 안정적이지 않다. 이산적 근사 방식 중에는 정점 분포에 관계없이 안정적인 계산 방법이 많으며 두 가지 방식 모두 여러 응용에서 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 곡면과 다각형면에 각각 연속적 방식과 이산적 방식을 적용할 수 있는 방법을 사용한다. 이 방법은 곡률텐서를 계산하기 위하여 미분기하학의 정규사이클(normal cycle) 이론을 적용한 것[14]으로 효율적이고 신뢰도가 높아서 곡면의 들로니(Delaunay) 삼각화한 다각형면의 근사곡률의 오차범위를 한정시킨다.

3.2 전역적 첨예정점 결정

기존의 첨예 간선 추출 연구[2,6,7]는 대부분 곡률 정보만을 이용하고 있으나 곡률 정보는 기하적인 면에서 국부적 속성만을 반영하고 있으므로 다음 단계에서 형상정합에 필요한 돌출 및 함몰 부분을 추출하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 곡률로부터 얻는 국부적 첨예정점 및 첨예간선뿐만이 아니라, 그리고 기하적 연산으로부터 얻는 전역적 첨예정점 및 첨예간선 등의 기하적 정보를 동시에 이용한다. 이것은 사람의 인식에서 분별력에 가장 큰 영향을 주는 기하적 요소 중 하나가 전역적인 첨예정점과 첨예간선이라는 사실에 근거를 두고 있다. 먼저 전역적 특징을 찾아내기 위하여 하나의 기하적 요소로 볼록 연결요소(convex connected component)를 정의한다. 볼록 연결요소는 오목연결요소(concave connected surface)[15]와 대응되는 것으로 내부각이 180^o보다 작은 인접한 면들을 연결한 메쉬의 부분집합이다. 그림 2에서 보여주고 있는 포켓(pocket)과 리드(lid)는 주어진 삼차원 물체와 그 볼록껍질(convex hull)과의 차인 디피션시(deficiency)를 계산하는 기하학 연산으로 얻을 수 있으며 이 경계 간선은 전역적으로 고려한 첨예간선과 관련이 있다고 보는 것이 매우 합리적이다. 본 논문에서는 얻어진 각 볼록 연결요소의 포켓과 리드를 구하여 전역적인 기하 속성을 나타내는 속성을 표 1과 같이 각 정점에 대해 표시한다.

표 1. 정점의 전역적 기하 속성

전역적 속성 마크	정점의 설명
EXTREME	볼록껍질의 극점임
IN_POCKET_FACE	포켓의 어느 면에 속함
IN_HULL_FACE	원래의 메쉬에 속하면서 껍질인 어느 면에 속함
IN_LID_FACE	리드의 어느 면에 속함
IN_BOUNDARY_EDGE	나누어진 볼록 연결요소의 경계 간선에 속함

표 1의 정점의 전역적인 기하 속성은 EXTREME을 제외하고는 그 정점이 어느 면 또는 간선에 속하는지에 표시된 것이다. 따라서 이 하나의 정점이 동시에 다른 속성을 가질 수도 있고 어떠한 속성은 서로 배타적이다. 즉 EXTREME이면 그 정점이 IN_HULL_FACE, IN_LID_FACE, IN_BOUNDARY_EDGE 중 하나이다. 역으로 IN_HULL_FACE 이거나 혹은 IN_LID_FACE이면 EXTREME이지만 IN_BOUNDARY_EDGE라고 반드시 EXTREME은 아니다. 또한 IN_POCKET_FACE이면서 IN_HULL_FACE, IN_LID_FACE, IN_BOUNDARY_EDGE일 수도 있다.

4. 첨예정점들을 이용한 메쉬분할

이 장에서는 제 3장에서 선택된 첨예정점들을 이용하여 효과적으로 메쉬를 분할하는 방법을 소개한다. 주어진 메쉬의 정점은 첨예정점과 경계 정점으로 분류되며, 우선순위에 관계없이 이들 첨예정점들을 이용하여 메쉬를 분할한다. 이를 위해 본 논문에서는 다음과 같은 두 단계를 거친다. 먼저 첫 번째 단계로 선택된 첨예정점들에 대해 가장 널리 사용되는 k-평균군집화(k-means clustering) 기법[16]을 적용하여 군집화를 수행하고, 다음으로 두 번째 단계에서 분할된 첨예정점의 정보를 이용하여 첨예정점이 아닌 나머지 메쉬 정점들을 분할한다.

첫 번째 단계에서 주어진 메쉬로부터 선택된 첨예정점이 입력정보로 사용된다. 논의를 시작하기 전에 주어진 메쉬로부터 m 개의 첨예정점들이 선택되었다고 가정하자. m 개의 첨예정점들을 k 개의 군집으로 분할하기 위해 본 논문에서는 널리 사용되는 k-평균군집화 기법을 적용하였다. 여기서 m 은 k보다 충분히 크다고 가정한다. k-평균군집화 기법을 적용하기 위해 초기에 m 개의 주어진 첨예정점들 중 임의의 k개의 첨예정점을 선택하여 k 개의 군집 각각의 중심점(centroid)으로 설정한다. 각 첨예정점에 대해 가장 가까이 존재하는 군집의 중심점을 결정하여 그 점을 해당 첨예정점의 군집 번호로 명시한다. 군집의 유사성을 측정하기 위해 k-평균군집화 기법에서는 같은 군집에 속하는 모든 점들에 대한 평균점을 계산하여 그 점을 새로운 중심점으로 설정한다. 이러한 과정을 k 개의 모든 군집에 적용하여 각 군집에 대한 중심점을 새로 구한다.

위의 작업을 완료한 후, k-평균군집화 기법에서는 주어진 첨예정점에 대한 군집화 정도를 판단하기 위해 각 군집에 대해 이전의 중심점과 새로 구한 중심점간의 거리를 계산하고, 만약 이들 거리의 합이 주어진 경계값보다 크면 군집화가 잘 이루어 지지 않았다고 판단하고 위의 과정을 반복하고, 그렇지 않은 경우 잘 된 군집화라고 판단한 후 위의 과정을 종료한다. 여기서 k는 사전에 정의된 군집의 수를 의미한다.

k-평균군집화 방법을 이용하여 메쉬의 표면상에 존재하는 정점들을 군집화할 때, 가장 중요한 요소는 메쉬 표면상에 존재하는 두 정점사이의 거리를 계산하는 방법이다. 본 논문에서는 메쉬 표면에 있는 두 정점 $v_p=(p_x,p_y,p_z)$와 $v_q=(q_x,q_y,q_z)$사이의 거리로 식 (1)과 같이 삼차원 공간에서 널리 사용되는 유클리디언(Euclidean) 거리를 사용하였다.

$$d(v_p,v_q)=\sqrt{(p_x-q_x)^2+(p_y-q_y)^2+(p_z-q_z)^2} \quad \text{---} \ (1)$$

또한 각 군집에 대해 이전 중심점과 새로 구한 중심점간의 거리를 구해야 하는데 본 논문에서는 이 거리 또한 유클리디언 거리를 이용하였다. 이들 거리 정보를 가지고 모든 군집의 중심점들에 대해 각 군집의 이전 중심점과 새로 구한 중심점간의 거리 합이 일정 수준 이하일 때까지 반복된다.

첫 번째 단계인 제 3장의 기법을 통해 선택된 m 개의 첨예정점들만을 군집화를 완료한 후, 두 번째 단계인 첨예정점을 제외한 나머지 메쉬 정점들의 군집화는 매우 간단한 기법을 통해 처리하였다. 첨예정점이외의 나머지 각 정점과 첨예정점들의 군집화 결과로부터 얻어진 k 개의 중심점과의 유클리디언 거리를 구한다. 각 정점으로부터 이들 거리 중 가장 가까이 존재하는 중심점이 속한 군집 번호를 그 정점의 군집 번호로 부여하였다.

5. 구현 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 메쉬분할 기법은 PC의 Microsoft Windows와 Visual Studio .NET 2003 환경에서 CGAL(computational geometry algorithm library)를 사용하여 구현되었다. 구현된 결과를 시험하기 위해 사용된 메쉬 데이터는 Princeton Shape Benchmark로 부터 얻어졌으며, 실제 시험 데이터는 하나의 요소로 구성되어 있는 하프에지(half-edge) 자료구조로 표현되어 있는 삼차원 모델들이다.

본 논문에서는 세 가지 모델, 삼차원 개 메쉬 모델, 삼차원 물고기 메쉬 모델을 사용하여 제안한 기법을 실험하였다. 실험하기 전에 이들 메쉬에 대한 정점, 간선과 면의 수에 대한 정보를 알아보았고, 또한 이들 메쉬에 대해 제 3장에서 제안된 주어진 메쉬로부터 첨예정점 추출한 결과를 알아보았다. 그 결과가 표 2에 잘 나타나 있다. 표에서 보는 바와 같이 삼차원 개 메쉬 모델은 1,618개의 정점, 4,830개의 간선과 3,220개의 면으로 구성되어 있고, 추출된 첨예정점의 수는 127으로 전체 정점 수의 약 7.8%이다. 물고기 메쉬 모델은 1,604개의 정점, 4,812개의 간선과 3,208개의 면으로 구성되어 있고, 추출된 첨예정점의 수는 107개로 전체 정점 수의 약 6.7%이다. 이상의 결과로부터 기존 정점 수의 약 10% 정도가 첨예정점으로 선택된다.

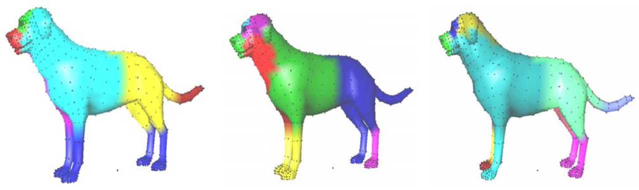
표 2. 삼차원 메쉬 모델 정보 및 첨예정점의 수

모델	정점의 수	간선의 수	면의 수	첨예정점의 수
개	1618	4830	3220	127
물고기	1604	4812	3208	107

본 논문에서 제안한 전역 및 국부 특성을 이용한 메쉬분할 결과가 개, 물고기모델에 대해 각각 그림 1과 그림 2에 나타나 있으며, 분할된 메쉬의 부분이 색깔에 의해 구분되어 가시화되어 있다. 그림에서 보이는 것처럼 같은 색상을 갖는 메쉬 부분이 같은 영역에 속함을 알 수 있다.

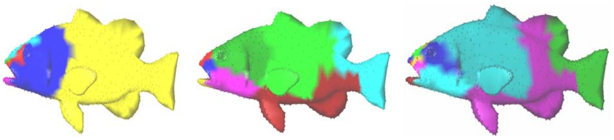
그림 1(a)는 첨예정점에 대해 k-평균군집화 기법을 적용할 때, 주어진 $k=7$로 설정하고, 그림 1(b)는 $k=10$으로, 그림 1(c)는 $k=15$으로 설정하여 처리한 메쉬분할 결과를 보여주고 있다. 물고기모델에 대해 각각 $k=7,10,15$으로 설정하여 본 논문에서 제안한 메쉬분할

기법을 수행하여 처리한 결과가 각각 그림 2의 (a), (b)와 (c)에 나타나 있다.



(a) $k=7$ (b) $k=10$ (c) $k=15$

그림 1. 삼차원 개 메쉬 모델에 대한 분할



(a) $k=7$ (b) $k=10$ (c) $k=15$

그림 2. 삼차원 물고기 메쉬 모델에 대한 분할

6. 결론

본 논문에서는 주어진 메쉬에서 곡률과 같은 국부적 기하 특성과 주어진 메쉬에 대한 볼록성과 같은 전역적 특성을 모두 사용하여 주어진 삼차원 메쉬를 분할하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저 주어진 메쉬를 구성하는 특징 정보를 잘 표현하는 첨예정점을 구하였다. 특히 본 논문에서는 효과적으로 메쉬분할을 하기 위해 우선적으로 첨예정점을 k-평균군집화 기법을 k 개의 군집으로 분할한 후, 분할된 정보를 이용하여 첨예정점이외의 나머지 메쉬 정점을 분할하는 방법을 취하였다.

본 논문에서는 k-평균군집화 기법을 적용할 때, 단순하게 두 정점사이의 거리를 유클리디언 거리를 이용하였다. 그러나 두 정점을 연결하는 직선이 메쉬의 표면에 존재하지 않아 메쉬 상의 거리 개념을 정확히 반영하고 있지 못하다. 따라서 향후 연구 과제로 메쉬를 구성하는 두 정점사이의 거리를 좀 더 정확히 나타낼 수 있는 측정치를 이용하여 위의 기법을 적용할 필요가 있다. 다음으로 주어진 메쉬로부터 추출된 첨예정점이 수준별로 분석되어 있으므로 이들 수준 정보를 고려하여 첨예정점을 분할하는 기법을 고려하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지원(KRF-2006-D00413) 및 2007년 정부(산업기술자원부, 한국산업기술재단)의 지역혁신인력양성재원 지원을 받아 수행된 연구임

참고문헌

[1] B. Chazelle, *et al.*, "Strategies for polyhedral surface decomposition: an experimental study," *Computational Geometry: Theory and Applications*, 7, pp.327-342, 1997.

[2] M. Attene, S. Katz, M. Mortara, G. Patane, M. Spagnuolo, and A. Tal, "Mesh segmentation - a comparative study," IEEE Int. Conf. on Shape Modeling and Applications, pp.14-25, 2006.

[3] A. Shamir, "A formulation of boundary mesh segmentation," Proceedings of 2nd Int. Sym. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT'04), pp.82-89, 2004.

[4] D. L. Page, A. F. Koschan, and M. A. Abidi, "Perception based 3d triangle mesh segmentation using fast matching watersheds," Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.27-32, 2003.

[5] M. Garland, A. Willmott, and P. S. Heckbert, "Hierarchical face clustering on polygonal surfaces," Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.49-58, 2001.

[6] S. Katz and A. Tal, "Hierarchical Mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts," ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol.22, No.3, pp.954-961, 2003.

[7] D. D. Hoffman and W.A. Richards, "Parts of recognition," *Cognition* 18, 1984

[8] D. D. Hoffman and M. Singh, "Salience of visual parts," *Cognition* 63, 1997.

[9] Y. Zhou and Z. Huang, "Decomposing polygon meshes by means of critical points," *Proc. of MMM'04*, 2004.

[10] S. Katz, G. Leifman and A. Tal, "Mesh segmentation using feature points and core extraction," *Visual Computer 21*, 2005.

[11] J. M. Lien and N. M. Amato, "Approximate convex decomposition of polyhedra," Technical Report TR06-002, *Dept. of Computer Science*, Texas A&M University, 2006.

[12] G. Turk, "Re-tiling polygonal surfaces," ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH '92), Vol.26, No.2, pp.55-64, 1992.

[13] G. Taubin, Estimating the tensor of curvatures of a surface from a polyhedral approximation, Proc. of International Conf. on Computer Vision, 1995.

[14] D. Cohen-Steiner and J.M. Morvan, "Restricted Delaunay triangulations and normal cycle", In proc. of 19th Annual ACM Sym. on Computational Geometry, pp.237-246, 2003.

[15] 하종성, "삼차원 제조성에 응용할 수 있는 다면체 단조성의 특성화", 한국정보과학회 논문지(A), 제24권 11호, pp. 1051-1058, 1997.

[16] T. Kanungo, et al., "An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 881-892.