

論文2002-39SP-2-3

표면 법선 기반의 삼각형 메쉬 영역화 기법

(Triangular Mesh Segmentation Based On Surface Normal)

金東煥*, 尹逸東**, 李商郁*

(Dong Hwan Kim, Il Dong Yun, and Sang Uk Lee)

요약

본 논문에서는 삼각형으로 이루어진 3차원 메쉬 데이터의 영역화에 대한 알고리즘을 서술한다. 제안하는 알고리즘은 메쉬 표면을 구성하는 삼각형들의 방향성에 기반한 것으로, 인접한 삼각형 쌍들의 반복적인 병합을 이용한다. 메쉬 표면은 각각의 영역이 비슷한 법선 벡터를 가지는 삼각형들로 구성되도록 여러 개의 영역으로 영역화된다. 따라서 각 영역은 평면 조각으로 근사될 수 있으며, 각 영역의 경계선은 인간이 전체 메쉬 모델을 시각적으로 이해하는데 있어서 중요한 기하학적인 정보를 포함한다. 실험 결과는 제안하는 알고리즘이 효율적으로 동작하고 있음을 보여준다.

Abstract

This paper presents an algorithm for segmentation of 3D triangular mesh data. The proposed algorithm uses iterative merging of adjacent triangle pairs based on the orientation of triangles. The surface is segmented into patches, where each patch has a similar normal property. Thus, each region can be approximated to planar patch and its boundaries have perceptually important geometric information of the entire mesh model. The experimental results show that the proposed algorithm is performed efficiently.

Key Word : Mesh, Segmentation, Surface Normal Vector

1. 서론

컴퓨터 비전 분야에서는 공간부호화 거리측정기나 레이저 스캐너 등을 이용하여 취득한 3차원 데이터를

효율적으로 표현하기 위하여, 취득한 거리 데이터를 일반적으로 삼각형 메쉬로 모델링한다. 그러나 이러한 삼각형 메쉬 모델은 삼각형을 구성하는 점들 사이의 연결 정보만 가지고 있을 뿐이며, 메쉬 표면의 특성이나 전체 모델의 구조에 대한 고수준(high-level)의 정보를 담고 있지 못하다. 메쉬 모델에 이러한 고수준의 구조적인 정보를 부여하는 한 가지 방법은 전체 모델을 인접한 영역과의 연결 정보를 가지는 영역들의 집합으로 나누는 것이다. 그러나 삼각형들의 연결 정보 이외에 물체의 구조에 대한 어떠한 정보도 없다면, 메쉬 자체의 형태 정보로부터 영역과 연결 정보를 추출할 수밖에 없다. 이와 같이 3차원 물체의 표면을 나타내는 메쉬 데이터를 의미있는 연결된 영역들로 나누는 과정을 메쉬 영역화라고 한다. 대상 물체에 대한 분석적, 체계적인 인식을 위하여 2차원 영상에서 경계선 탐색(edge

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部
(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

** 正會員, 韓國外國語大學 電子制御工學部
(School of Electrical and Control Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

※ 이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-99-041-E00276)†

接受日字: 2001年8月31日, 수정완료일: 2002年1月18日

detection) 및 영역화를 수행하는 것이 중요한 것처럼, 3차원 메쉬 모델의 이해 과정에 있어서도 영역화는 매우 중요하다.

지금까지 3차원 데이터의 영역화는 주로 점으로 취득된 거리데이터에 대하여 집중적으로 연구되어져 왔다 [1] - [5]. 그러나 3차원 거리데이터는 특정 시각 방향에서 보이는 물체의 일부에 대한 정보만을 가지는 영상에 불과하다. 즉, 화소값으로 밝기 정보 대신 깊이 정보를 가지고 있는 2차원 영상과 동일하게 생각할 수 있기 때문에, 균일한 격자 구조로 이루어진 2차원 밝기 영상에서 이용하던 영역화 기법을 큰 무리 없이 적용해서 사용할 수가 있다. 그러나 이와는 달리, 물체 전체의 기하학적인 정보를 가지는 3차원 메쉬 데이터는 균일한 2차원 격자 구조로 표현할 수가 없기 때문에 기존의 거리 영상의 영역화 기법을 그대로 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 3차원 메쉬 데이터의 영역화를 위해서는 기존의 거리 영상의 영역화 기법 [1] - [5]과는 다른 새로운 접근 방식이 필요하다.

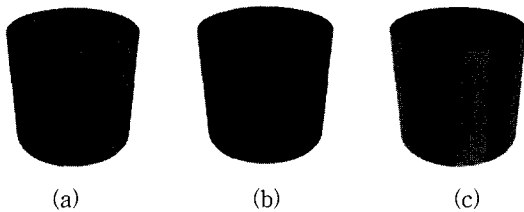


그림 1. 메쉬 영역화. (a) 입력 메쉬. (b) 영역화된 메쉬(영역 3개). (c) 영역화된 메쉬(영역 14개)
Fig. 1. Mesh segmentation. (a) input mesh. (b) segmented mesh(3 regions). (c) segmented mesh(14 regions).

메쉬 데이터는 그 목적에 따라 여러 가지 기준으로 분할할 수 있다. 메쉬 영역화를 수행하는 목적에 따라 그 기준은 얼마든지 바뀔 수 있으며, 영역이 잘 분할되었는지 아닌지의 판단 또한 그 목적에 종속적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 물체의 분석적인 이해를 위하여, 각 영역이 비슷한 기하학적인 성질을 가지는 삼각형들로 구성되도록 메쉬 표면의 법선 벡터를 이용하여 영역화를 수행하였다. 그림 1a와 같은 많은 삼각형들로 이루어진 메쉬 모델이 그림 1b와 같이 영역화가 되었다면, 입력 메쉬 모델을 비슷한 기하학적인 성질을 가지는 3개의 영역, 즉, 윗면, 아랫면, 옆면으로 나누어 생각할 수 있기 때문에, 각 영역의 기하학적인 특성과 영

역 사이의 연결 정보를 통하여 전체 물체를 분석적으로 이해할 수 있게 된다. 또한 그림 1a의 메쉬 모델은 그림 1c와 같이 평면 조각으로도 영역화될 수 있으며, 이 결과는 다중해상도 모델링 기법과 같은 분야로 쉽게 적용할 수 있다. 제안하는 메쉬영역화 기법은 이 두 가지 형태의 영역화를 모두 지원하며, 메쉬 모델을 분석적, 체계적으로 이해하는 인식의 틀을 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 기존의 영역화 기법을 고찰하고, 제 3장에서 새로운 메쉬영역화 기법을 제안한다. 그리고 다양한 메쉬 데이터에 대한 모의 실험결과를 제 4장에 제시하며, 결론 및 향후 연구 방향을 제 5장에 서술한다.

II. 기존의 연구

3차원 메쉬 데이터를 대상으로 하는 메쉬 영역화 기법을 그 목적에 따라 살펴보면 다음과 같다. 먼저, Yan 등 [6]은 3차원 그래픽 모델의 부호화를 위하여 메쉬영역화를 수행하였다. 이들은 여러 개의 초기 점(seed vertex)으로부터 인접한 메쉬의 연결선(edge)을 따라 이동하면서, 단지 인접한 삼각형들이 아직 다른 영역에 포함되지 않은 점인 경우에만 같은 영역으로 병합하는 방법을 제안하였다. 그러나 이들이 수행한 메쉬 영역화의 목적은 각 영역에서 독립적인 인코딩, 디코딩이 가능하도록 함으로써 부호화 중에 발생할 수 있는 에러를 각 영역 내에서 제한하기 위함이다. 이들의 영역화 기법은 물체의 형태에 대한 고수준 정보를 담고 있지 못하며, 영역의 크기 또한 물체의 형태 정보와 무관한 채널(channel)의 에러 발생 비율(error rate)에 따라 결정된다. 따라서 이들의 메쉬 영역화 기법은 물체의 형태 정보를 이용하는 다른 방면의 응용에 적용하기에는 무리가 있다. Couzu [7]는 형태 영역화를 위한 알고리즘을 제안하였다. 이들의 영역화 기법에서는 분할할 영역의 개수를 미리 알고 있어야 하며, 여러 방향에서 대상 물체를 바라본 2차원 영상이 필요하다. 이와 같이 이들의 영역화 기법은 입력 메쉬 이외의 부가적인 정보가 많이 필요하기 때문에, 입력 메쉬 자체만을 이용하는 메쉬 영역화 기법에는 적합하지 못하다.

반면, Mangan과 Whitaker [8]는 각 영역이 물체의 형태 정보를 담고 있도록 메쉬 영역화를 수행하였는데, 2차원 밝기 영상의 영역화에 이용되는 watershed 알고리즘을 3차원 메쉬 데이터에서도 이용할 수 있도록 일

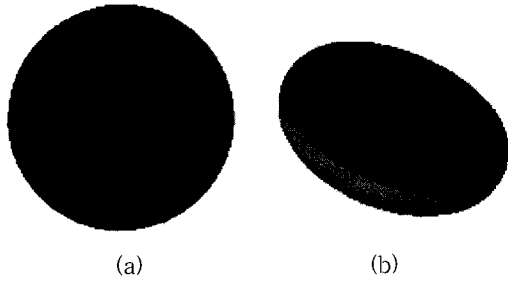


그림 2. watershed 알고리즘을 이용한 메쉬 분할. (a) 구(1 영역). (b) 토러스(2 영역)
 Fig. 2. Mesh partitioning using watershed algorithm. (a) sphere(1 region). (b) torus (2 regions).

반화하여 적용하였다. 이 경우 메쉬로 표현된 물체 표면의 한 점에 대한 인접점은 메쉬의 연결선(edge)을 따라 연결된 점들로 결정된다. 이들은 watershed 알고리즘을 하향적 과정으로 적용하였으며, 대상 함수로는 삼각형 메쉬를 구성하는 각 꼭지점에서의 곡률을 계산하여 사용하였다. 그러나 watershed 알고리즘은 그 자체가 물체 표면의 노이즈(noise)나 작은 굴곡에까지도 민감하기 때문에, 모든 국소치들을 각각의 영역으로 나누게 될 경우, 영역으로 나누는 자체가 의미를 가지지 못할 정도로 많은 부분들로 분할되는 문제가 있다. 따라서 이들은 잘게 나누어진 영역들을 의미있는 영역들로 병합하기 위하여, watershed 깊이(depth)에 대한 문턱값을 설정하고 주어진 문턱값 이내의 watershed 깊이를 가지는 영역을 모두 하나의 영역으로 병합하는 방법을 제안하였다. 그러나 이들의 메쉬 영역화 기법은 물체 표면의 곡률을 이용하기 때문에 균일한 곡률을 가지는 물체에 대해서는 그림 2와 같은 영역화만 가능하며, 평면 조각으로는 분할하지 못하는 단점이 있다.

III. 제안하는 알고리즘

제안하는 메쉬 영역화 기법은 입력 메쉬 모델의 분석적, 체계적인 이해를 위하여, 각 영역이 비슷한 기하학적인 특성을 가지는 삼각형들로 구성되도록 입력 메쉬 모델을 분할한다. 이 때, 인접한 삼각형들이 같은 영역으로 영역화되는지의 여부를 판단하기 위한 기준으로는 물체 표면의 법선 벡터를 이용한다.

제안하는 알고리즘은 영역화를 적용하는 목적에 따라 다양한 영역화 결과를 지원하는 장점이 있다. Mangan과 Whitaker [8]가 제안한 곡률을 이용하는 영

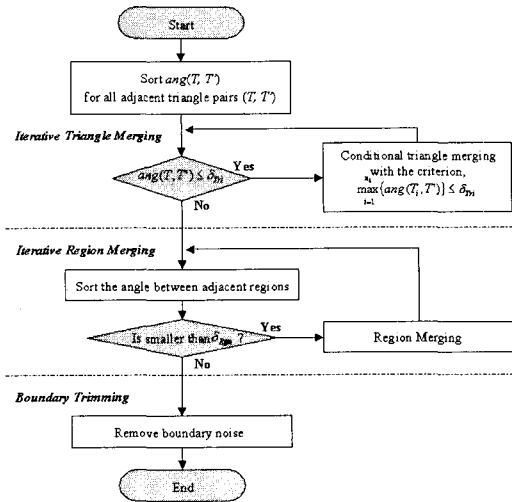


그림 3. 제안하는 알고리즘의 순서도
 Fig. 3. Block diagram of the proposed algorithm.

역화 알고리즘은 구와 같은 균일한 곡률을 가지는 물체를 오직 하나의 영역으로만 영역화할 수 있다. 이에 반해 제안하는 알고리즘은 간단한 제한조건 설정을 통하여 구와 같은 물체를 하나의 영역으로 영역화할 수 있을 뿐 아니라, 구의 표면이 근사 평면 조각으로 분할되도록 영역화할 수도 있다. 또한 근사 평면 조각의 곡면 근사 오차를 조절할 수 있기 때문에, 복잡한 수준에서부터 간단한 수준으로까지 다양한 해상도의 물체 표현이 필요한 다중해상도 모델링기법에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 제안하는 알고리즘의 전체적인 순서도를 그림 3에 도시하였다.

1. 반복적인 삼각형 병합(iterative triangle merging)
 제안하는 메쉬 영역화 기법은 메쉬 표면의 법선 벡터를 이용하여 기하학적인 특성이 비슷한 인접 삼각형들을 반복계산을 통하여 차례로 병합한다. 이를 위하여 본 절에서는 인접한 삼각형 쌍(pair)에 대한 삼각형 병합 연산자(triangle merging operator)를 제안한다. 제안하는 기법에서는 반복계산의 각 단계에서 제안하는 삼각형 병합 연산자를 이용하여 인접 삼각형들을 병합함으로써, 초기 삼각형(seed triangle)으로부터 영역을 확장시켜나가는 방법과는 달리, 주어진 제한 조건에서 항상 유일한 영역화 결과를 얻을 수 있다.

삼각형 병합 연산자는 먼저, 인접한 두 삼각형의 법선 벡터 사이의 각도를 주어진 예러 수준과 비교한다. 여기서 예러는 같은 영역으로 분할된 삼각형들의 법선 벡터 사이의 각도를 의미하는 것으로, 그 허용 범위는

각도 문턱값(angle threshold)으로 주어진다. 각도 문턱값은 메쉬 모델의 해상도에 따라 실험적으로 결정하는데, 해상도가 높으면 작은 값으로, 해상도가 낮으면 높은 값으로 설정한다. 만약 두 삼각형의 법선 벡터 사이의 각도가 에러 수준에서 벗어난다면 두 삼각형을 서로 다른 영역으로 분리하며, 이 때 인접한 두 삼각형의 공통 선분(edge)은 두 영역의 경계선이 된다. 인접한 두 삼각형의 각도가 에러 수준 내에 들어올 때는 다음의 세 가지 경우로 나누어 영역화를 수행한다.

· 경우 1) 두 삼각형 모두 아직 어떠한 영역으로도 분류되지 않은 경우:
두 삼각형을 새로운 같은 영역으로 분류한다.

· 경우 2) 두 삼각형 중 하나는 아직 영역으로 분류되지 않았고 나머지 하나는 이미 영역으로 분류되어 있는 삼각형인 경우:
아직 다른 영역에 포함되지 않은 삼각형을 T' , 나머지 삼각형이 포함되어 있는 영역을 $S_k = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 이라 할 때, 다음의 식 (1)을 만족시키면 T' 를 S_k 에 병합시킨다.

$$\max_{i=1}^n \{ang(T_i, T')\} \leq \delta_{Tri} \quad (1)$$

여기서 δ_{Tri} 는 각도 문턱값을 의미하며, $ang(T_i, T')$ 는 삼각형 T_i 와 T' 의 법선 벡터 사이의 각도를 의미한다. 만약, 삼각형 T' 가 식 (1)을 만족시키지 않으면 T' 를 새로운 영역으로 분류한다. 이 경우 두 삼각형의 공통 선분은 두 영역의 경계선이 된다.

· 경우 3) 두 삼각형이 각각 서로 다른 영역에 포함되어 있는 경우:
각 삼각형과 나머지 삼각형이 포함된 영역에 대하여 식 (1)을 적용한다. 만약 두 삼각형 모두 식 (1)의 조건을 만족시킨다면 두 삼각형이 포함된 영역을 같은 영역으로 병합하며, 그렇지 않을 때는 병합하지 않는다.

반복적인 삼각형 병합 알고리즘은 각 단계마다, 모든 인접 삼각형 쌍(pair)들 중에서 법선 벡터 사이의 각도가 가장 작은 삼각형 쌍을 선택하여 삼각형 병합 연산자를 반복적으로 적용한다. 그러므로, 주어진 에러 수준 내에서 항상 유일한 영역화 결과를 얻을 수 있다.

만약, 물체 표면의 법선 벡터가 연속적으로 변하는 구와 같은 물체를 하나의 영역으로 영역화하고자 한다면, 식 (1) 대신에 각 영역 내에서의 전체 에러 수준을 제한하는 max 연산자를 제거한 다음의 식 (2)를 사용한다.

$$ang(T_i, T') \leq \delta_{Tri} \quad (2)$$

이와 같은 경우를 지역적인 형태 제한(LSC : Local Shape Constraint)이 없는 경우의 영역화라고 하며, LSC OFF로 표기한다. 그리고 지역적인 형태 제한이 있는 경우는 LSC ON으로 표기한다.

2. 반복적인 영역 병합(iterative region merging)

반복적인 삼각형 병합 알고리즘은 비슷한 법선 벡터를 가진 인접한 삼각형들을 효과적으로 병합하여 영역화를 수행한다. 그러나 지역적인 형태 제한이 있는 경우(LSC ON)의 영역화에서는, 에러 수준이 낮은 경우에 표면의 굴곡에 민감한 알고리즘의 특성 때문에, 메쉬 표면이 영역화의 의미가 없을 정도로 많은 영역들로 나누어지게 된다. 따라서 과도하게 분할된 작은 영역들을 다시 비슷한 법선 벡터를 가지는 인접 영역들로 병합시켜나가는 과정이 필요하다.

제안하는 메쉬 영역화 알고리즘에서는 영역 병합 과정 또한 반복적으로 적용함으로써, 주어진 에러 수준에서 최적의 영역화 결과를 얻고자 하며, 이를 위하여 영역 병합 연산자(region merging operator)를 제안한다. 영역 병합 연산자는 평균 법선 벡터 사이의 각도가 에러 수준 내에 들어오면 두 영역을 하나의 영역으로 병합하고, 그렇지 않으면 병합하지 않는다. 영역 병합 연산자에서의 에러 수준을 결정하는 각도 문턱값은 삼각형 병합 연산자의 각도 문턱값, δ_{Tri} 와 구별하여 δ_{Rgn} 으로 표기하며, 그 값은 메쉬 모델의 해상도에 따라 실험적으로 결정한다. 반복적인 영역 병합 과정에서는 먼저 각 영역의 평균 법선 벡터를 구하고, 인접한 영역과의 평균 법선 벡터 사이의 각도가 가장 작은 영역 쌍(pair)부터 차례로 영역 병합 연산자를 적용시킨다.

3. 경계선 다듬기

제안하는 메쉬 영역화 알고리즘은 반복적인 삼각형 병합 과정, 반복적인 영역 병합 과정을 차례로 수행함으로써, 주어진 오차 범위 내에서 최적의 영역화 결과를 얻는다. 그러나 지역적인 형태 제한이 있는 경우(LSC ON)의 영역화에서는, 영역 내의 다른 삼각형들

과 비교해 볼 때, 상대적으로 법선 벡터의 오차가 큰 삼각형이 포함되어 있는 경우에 영역 사이의 경계에서 잡음(noise)이 생기기도 한다. 여기서 잡음이란, 경계부분의 삼각형이 인접한 삼각형과의 법선 벡터 사이의 각도로만 판단하면 같은 영역에 포함되어야 하는 것이 옳지만, 그 영역에 존재하는 법선 벡터의 오차가 큰 삼각형 때문에, 식 (1)을 만족시키지 못하여 다른 영역으로 분류된 경우를 의미한다. 그리고 법선 벡터의 오차 때문에 다른 영역으로 분류되었지만, 사람이 인식하기에 같은 영역으로 분류되는 것이 합리적인 경우 또한 잡음이 생긴 것으로 생각한다. 메쉬 영역화에서의 경계선 다듬기는 바로 이와 같은 경계에 발생하는 잡음을 제거하여, 영역의 경계가 전체 물체의 형태 정보를 효율적으로 표현하도록 하는 것을 목적으로 한다. 경계선 다듬기의 대상이 되는 부분은 그림4 (a)에서 검정색으로 표시된 경계선에서 돌출된 부분으로, 최종적으로 그림4 (c)와 같이 수정하는 것을 목적으로 한다.

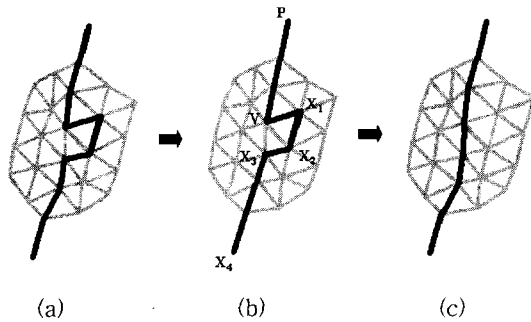


그림 4. 경계선 다듬기. (a) 잡음이 있는 경계선. (b) 영역 선분 추출. (c) 잡음이 제거된 경계선

Fig. 4. Boundary trimming. (a) noisy boundary. (b) extraction of segment-edge. (c) noise-removed boundary.

제안하는 경계선 다듬기 알고리즘을 서술하기에 앞서, 먼저 몇 가지 용어를 설명한다. 영역의 경계선을 구성하는 점들 중에서 영역의 전체적인 형태를 결정하는 점을 영역 꼭지점(segment-vertex)으로 정의하고, 인접한 영역 꼭지점들을 연결한 선분을 영역 선분(segment-edge)으로 정의한다. 영역 꼭지점은 각 점에서의 ABV(Angle of Boundary Vertex)를 통하여 결정한다. ABV는 각 영역의 경계선을 구성하는 점에서 정의되는 값으로, 그림5 (a)와 같이 그 점과 연결된 선분 사이의 각도를 의미한다. 영역 꼭지점의 추출 과정에서

는 Choo 등 [9]이 제안한, 선분 기반 점 제거(edge-based vertex-remove) 연산자를 이용한 메쉬 단순화 기법을 변형하여 적용한다. 영역 꼭지점의 추출 알고리즘은 다음과 같다.

- (i) 각 영역의 경계선을 구성하는 모든 점들을 영역 꼭지점 후보 집합으로 설정한다.
- (ii) 오직 두 영역 사이의 경계점들 중에서 ABV값이 180° 에 가장 가까운 점을 선택하고, 다음의 식 (3)을 만족시키면 후보 집합에서 제거하고, 그림5 (b)와 같이 새로이 인접점에서의 ABV를 결정한다.

$$|180^\circ - ABV| \leq \delta_B \quad (3)$$

여기서 δ_B 는 각도 문턱값으로 메쉬 모델의 해상도에 따라 $10 - 20^\circ$ 정도의 범위에서 결정한다.

- (iii) 식 (3)을 만족시키는 점이 없을 때까지 (ii)의 과정을 반복한다. 최종적으로 후보 집합에 남아 있는 점들이 영역 꼭지점이 된다.

제안하는 경계선 다듬기 알고리즘에서는 먼저 각각의 영역에서 영역 꼭지점과 영역 선분을 추출한 후, 각각의 영역 꼭지점에서 영역 선분을 따라 영역 선분의 방향성을 조사하면서 경계선에 섞인 잡음을 찾는다. 예를 들어, 그림4 (b)의 영역 꼭지점 V에서 조사를 한다고 가정하자. 이러한 경우, 영역 꼭지점 V의 영역 선분을 기준으로 할 때의 n 차 근방 구조의 영역 꼭지점 X_n 의 차수를 증가시키면서 영역 선분 VP와 VX_n 사이의 각도가 180° 에 가까운 지를 조사한다. 이를 두 벡터 VP와 VX_n 의 내적으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\langle VP, VX_n \rangle \leq \cos(180^\circ - \delta_B) \quad (4)$$

여기서 δ_B 는 영역 선분을 추출할 때 이용한 식 (3)의 값과 동일하다. 식 (4)를 만족시키는 영역 꼭지점 X_n 이 영역 꼭지점 V의 메쉬 선분을 기준으로 할 때의 n 차 근방 구조 이내의 점이 될 때, 잡음 영역 $VX_1 \dots X_n$ 을 인접 영역으로 포함시킴으로써 그림 4 (c)와 같이 경계선에 생긴 잡음을 제거한다. 이 때 제거되는 잡음 영역의 영역 꼭지점 X_1, \dots, X_{n-1} 은 두 영역의 경계점이야 하며, 그렇지 않은 경우는 제거하지 않는다.

본 논문에서는 근방 구조의 최대 차수를 3으로 제한하여, 4차 이상의 경우에는 식 (4)를 만족시킨다 하더

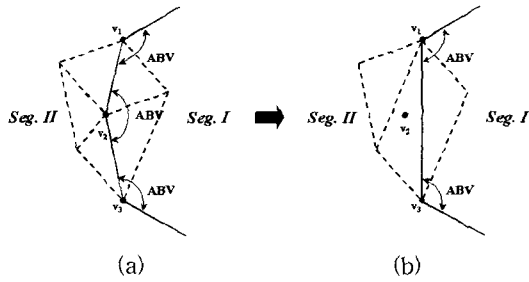


그림 5. 영역 꼭지점, 영역 선분 추출
Fig. 5. Extraction of segment-vertex and segment-edge.

라도 잡음으로 생각하지 않고 영역의 중요한 형태를 결정하는 영역 선분으로 판단하여 제거하지 않도록 하였다.

IV. 실험 결과

제안하는 메쉬 영역화 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 표준편차가 식 (5)과 같은 가우시안 잡음이 첨가된 정이십면체 모델에 대한 모의 실험을 수행하였다.

$$\sigma = D_m \times \frac{X}{100} \tag{5}$$

여기서, D_m 은 입력 메쉬 모델의 평균 선분(edge) 거리를 의미하며, X 는 퍼센트 단위의 비율을 의미한다.

일반적으로 메쉬 모델은 캐드(CAD)로부터 생성되어 왔기 때문에 잡음이 없는 것으로 생각되어져왔다. 그러나 최근에는 메쉬 모델이 레이저 스캐너 등으로 직접 취득되는 경우가 많아졌다. 레이저 스캐너로 메쉬 데이터를 취득하는 경우, 여러 방향에서 취득된 데이터들의 시점을 일치시키고 데이터를 병합하는 과정이 필요한데, 이 과정에서 오차가 축적되어 결과적으로 얻어지는 메쉬 모델에는 잡음이 포함되는 경우가 많다. 따라서, 잡음이 있는 메쉬 모델에 대한 실험이 필요하다.

실험에 사용된 정이십면체 모델은 2562개의 점과 5120개의 삼각형으로 구성되어 있으며, $X = 10$ 인 가우시안 노이즈를 포함한다. 이를 그림 6a에 도시하였다. 그림 6b는 지역적인 형태 제한이 있는 경우에, 에러 범위(δ_{Tri})를 20° 로 하여 반복적인 삼각형 병합 과정을 수행한 결과 영상으로, 모두 1256개의 영역으로 과도하게 분할되어 있음을 보여준다. 이 결과에 에러 범위(δ_{Rgn})를 30° 로 하여 반복적인 영역 병합 과정을 수행

한 결과, 작은 영역들이 모두 54개의 영역으로 병합되었으며, 이를 그림 6c에 도시하였다. 그림 6d는 그림 6c의 결과에 경계선 다듬기 과정을 수행한 것으로, 모두 22개의 영역으로 구성된 최종적인 영역화 결과를 얻을 수 있었다. 이로부터 정이십면체 모델에 잡음이 첨가되어 왜곡이 있더라도, 우리가 일반적으로 인식하는 바와 같이 정이십면체 모델이 영역화됨을 알 수 있다.

그림 7, 8은 팬(fan) 모델에 대한 영역화 결과 영상이다. 그림 7a는 실험에 사용된 팬 모델을 도시한 것으로, 모두 1375개의 점과 2750개의 삼각형으로 이루어져 있다. 그림 7b는 지역적인 형태 제한이 있는 경우에, 에러 범위(δ_{Tri})를 20° 로 하여 반복적인 삼각형 병합 과정을 수행한 결과 영상으로, 모두 313개의 영역으로 분할되어 있음을 보여준다. 이 결과에 에러 범위(δ_{Rgn}) 25° 로 반복적인 영역 병합 과정을 수행하고, 경계선

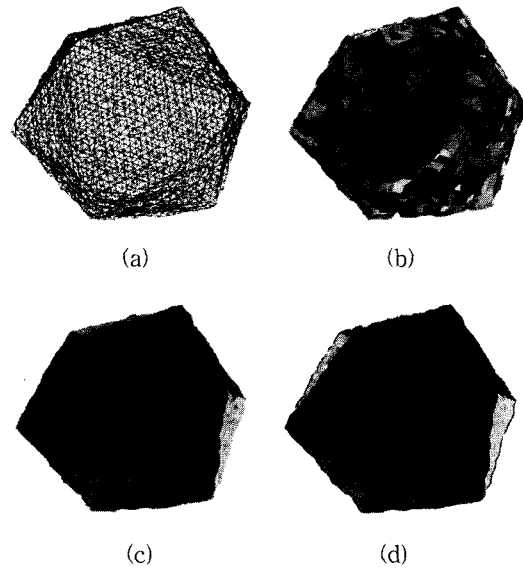


그림 6. 10% 가우시안 잡음이 첨가된 정이십면체 모델의 영역화. (a) 입력 메쉬 모델(점 2652개, 면 5120개). (b) LSC ON, $\delta_{Tri} = 20^\circ$ 인 경우의 반복적인 삼각형 병합(1256개 영역). (c) $\delta_{Rgn} = 30^\circ$ 인 경우의 반복적인 영역 병합(54개 영역). (d) 경계선 다듬기(22개 영역)

Fig. 6. Segmentation of icosahedron with 10% gaussian noise. (a) input mesh model(2652 vertices, 5120 faces). (b) iterative triangle merging with LSC ON and $\delta_{Tri} = 20^\circ$ (1256 regions). (c) iterative region merging with $\delta_{Rgn} = 30^\circ$ (54 regions). (d) boundary trimming(22 regions).

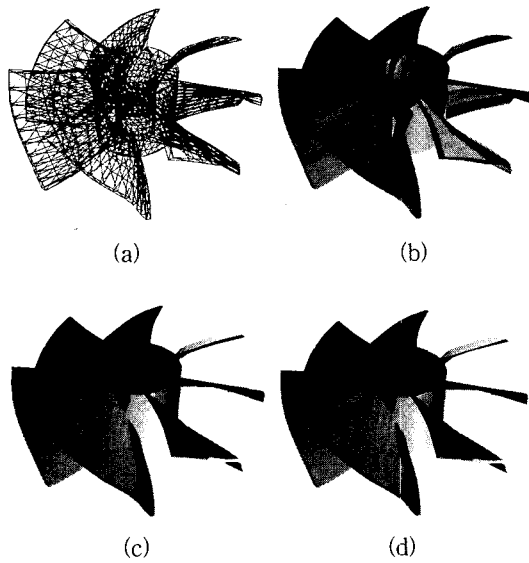


그림 7. 팬 모델의 영역화. (a) 입력 메쉬 모델(점 1375개, 면 2750개). (b) LSC ON, $\delta_{Tri} = 20^\circ$ 인 경우의 반복적인 삼각형 병합(313개 영역). (c) $\delta_{Regn} = 25^\circ$ 인 경우의 반복적인 영역 병합(68개 영역). (d) 경계선 다듬기(68개 영역)

Fig. 7. Fan segmentations. (a) input mesh model (1375 vertices, 2750 faces). (b) iterative triangle merging with LSC ON and $\delta_{Tri} = 20^\circ$ (313 regions). (c) iterative region merging with $\delta_{Regn} = 25^\circ$ (68 regions). (d) boundary trimming(68 regions).

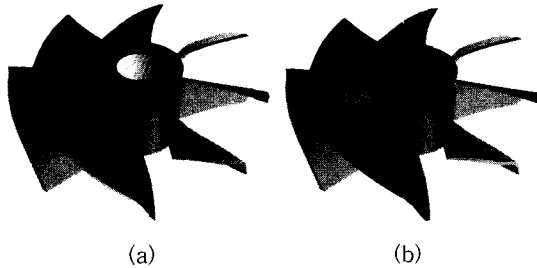


그림 8. 다양한 옵션에 따른 팬 모델의 영역화. (a) LSC OFF, $\delta_{Tri} = 20^\circ$ 인 경우의 영역화(31개 영역). (b) LSC ON, $\delta_{Tri} = 20^\circ$, $\delta_{Regn} = 35^\circ$ 인 경우의 영역화(38 regions)

Fig. 8. Fan segmentations with various option. (a) iterative triangle merging with LSC OFF, $\delta_{Tri} = 20^\circ$ (31 regions). (b) segmentation with LSC ON, $\delta_{Tri} = 20^\circ$, $\delta_{Regn} = 35^\circ$ (38 regions).

다듬기까지 수행한 결과 영상을 각각 그림 7c, 7d에 도시하였다. 이 경우 팬 모델은 각각 68개의 영역으로 표

현된다. 그림 8a는 지역적인 형태 제한이 없는 경우에, 에러 범위(δ_{Tri})를 20° 로 하여 반복적인 삼각형 병합 과정을 수행한 결과를 도시한 것으로, 모두 31개 영역으로 영역화되었다. 지역적인 형태 제한이 없기 때문에, 그림 7의 결과와 달리 팬 모델의 각 날개와 중심의 원기둥 부분의 표면이 각각 하나의 영역으로 영역화되었음을 알 수 있다. 그림 8b는 그림 7b의 결과에 에러 범위(δ_{Regn}) 35° 로 반복적인 영역 병합 과정을 수행하고, 경계선 다듬기를 수행한 결과 영상을 도시한 것으로 모두 38개의 영역으로 영역화되었다. 그림 7d와 비교해 볼 때, 증가한 에러 범위로 인하여 팬의 날개 표면의 꺾이는 부분이 하나의 영역으로 영역화되어, 그림 8a와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

제안하는 알고리즘은, 같은 메쉬 모델이라도 파라미터(parameter)를 조정함으로써 꼭면으로 이루어진 부분을 사용자의 필요에 따라 그림 7, 8과 같이 다양하게 영역화할 수 있도록 하였다. 이는 제안하는 영역화 기법을 다양한 응용 분야에 적용하는데 있어서 범용성을 갖게 해 줄 것이며, 다양한 측면에서 대상 물체를 이해하는데 큰 도움을 줄 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 메쉬 표면의 법선 벡터를 이용하는 메쉬 영역화 기법을 제안하였다. 제안하는 알고리즘에서는 법선 벡터가 비슷한 인접 삼각형들을 같은 영역으로 병합함으로써, 물체 표면의 기하학적인 성질이 크게 변하는 부분이 각 영역의 경계선이 되도록 하였다. 또한, 시각적으로 인식하는 바와 같은 영역화 결과를 얻을 수 있음을 실험으로 확인하였다.

이러한 메쉬 영역화의 결과는 낮은 해상도의 물체를 만들어 내는 과정에서 전체 물체의 형태 유지가 무엇보다 중요한 다중해상도 모델링 기법에 쉽게 적용할 수가 있다. 제안하는 알고리즘에서는 전체 물체의 형태 정보가 각 영역의 경계선으로 표현되기 때문에, 이를 보존하면 효율적으로 낮은 해상도의 물체를 생성해 낼 수 있게 된다. 또한, 제안하는 메쉬 영역화를 통하여 분할된 각 영역들 사이의 연결 정보는, 전체 메쉬 모델에 대한 분석적이고 체계적인 인식의 틀을 제공하기 때문에, 이를 이용하는 메쉬 탐색(mesh detection), 메쉬 인식(mesh recognition) 등의 문제들이 향후 연구 과제로서 다루어질 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] M. A. Wani and B. G. Batchelor, "Edge-Region-Based Segmentation of Range Images," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 16, no. 3, pp. 314~319, Mar. 1994.

[2] R. Krishnapuram and S. Gupta, "Morphological Methods for Detection and Classification of Edges in Range Images," Mathematical Imaging and Vision, vol. 2, pp. 351~375, 1992.

[3] D. J. Langridge, "Detection of Discontinuities in the First Derivatives of Surfaces," Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 27, pp. 291~308, 1984.

[4] P. Checchin, L. Trassoudaine, and J. Alizon, "Segmentation of Range Images into Planar Regions," Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, May, 1997.

[5] A. Hoover, G. Jean-Baptiste, X. Jiang, P. J. Flynn, H. Bunke, D. B. Goldgof, K. Bowyer, D. W. Eggert, A. Fitzgibbon, and R. B. Fisher, "An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 18, no. 7, pp. 673~689, Jul. 1996.

[6] Z. Yan, S. Kumar, J. Li, and C.-C. Jay Kuo, "Robust Coding of 3D Graphic Models Using Mesh Segmentation and Data Partitioning," Proc. IEEE International Conference on Image Processing, vol. 4, pp. 352~356, Kobe, Japan, Oct. 1999.

[7] F. Cutzu, "Computing 3D Object Parts from Similarities among Object Views." Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 95~100, South Carolina, Jun. 2000.

[8] A. P. Mangan and R. T. Whitaker, "Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 5, no. 4, pp. 308~321, Oct.-Dec. 1999.

[9] K. W. Choo, I. D. Yun, and S. U. Lee, "Edge-based Approach to Mesh Simplification," Proceedings of Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 368~377, Oct. 1999.

저 자 소 개



金 東 煥(正會員)

1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사. 2001년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사. 2001년 3월~현재 : 서울대학교 전기공학부 박사과정. <주관심분야 : 3차원 데이터 취득 및 모델링 기법>



尹 逸 東(正會員)

1989년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1991년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 석사. 1996년 8월 : 서울대학교 제어계측공학과 박사. 1996년 9월~1997년 2월 : 대우전자 영상연구소 선임연구원.

1997년 3월~현재 : 한국외국어대학교 전자제어공학부 조교수. <주관심분야 : 영상신호처리, 3차원 데이터 취득 및 모델링 기법, 내용기반의 영상/3D 데이터 처리>



李 商 郁(正會員)

1973년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사. 1976년 5월 : Iowa State University 전기공학과 석사. 1980년 2월 : Univ. of Southern California 전기공학과 박사. 1980년 1월~1981년 10월 : General Electric

Co. 연구원. 1981년 10월~1983년 2월 : M/A-COM 연구소 선임연구원. 1983년 3월~현재 : 서울대학교 전기공학부 교수. <주관심분야 : 영상부호화, 컴퓨터비전, 영상처리 등>