

메쉬 병합을 통한 관상동맥의 삼각 표면 메쉬 모델 생성

장영걸* · 김동환** · 한동진*** · 장혁재****

Generation of Triangular Mesh of Coronary Artery using Mesh Merging.

Yeonggul Jang*, Dong Hwan Kim**, Dongjin Han*, Hyuk-Jae Chang**

Abstract : Generating a 3D surface model from coronary artery segmentation helps to not only improve the rendering efficiency but also the diagnostic accuracy by providing physiological informations such as fractional flow reserve using computational fluid dynamics (CFD). This paper proposes a method to generate a triangular surface mesh using vessel structure information acquired with coronary artery segmentation. The marching cube algorithm is a typical method for generating a triangular surface mesh from a segmentation result as bit mask. But it is difficult for methods based on marching cube algorithm to express the lumen of thin, small and winding vessels because the algorithm only works in a three-dimensional (3D) discrete space. The proposed method generates a more accurate triangular surface mesh for each singular vessel using vessel boundary points estimated during the process of coronary artery segmentation as the input. Then, the meshes that are overlapped due to branching are processed by mesh merging and merged into a coronary mesh.

1. 서 론

최근 관상동맥 영역화 결과로부터 삼차원 표면 모델을 생성함으로써 혈관 구조적 정보의 렌더링 효율성의 증대뿐만 아니라 전산유체역학을 이용한 혈류 역학 시뮬레이션을 통해 혈류분획예비력과 같은 생리적 정보들을 획득하는 연구들이 활발히 진행되고 있다.^{(1), (2), (3)}

본 연구에서는 혈관 영역화 과정에서 획득한 혈관 구조 정보를 입력 데이터로 사용하여 관상동맥의 삼차원 삼각 표면 메쉬 모델을 생성하는 방법을 제안한다.

관상동맥 영역화 결과로부터 삼각형 표면 메쉬 모델을 만드는 방법으로는 Marching cube 알고리즘에 기반한 방법들이 있지만 이산적인 영상 공간에서 수행되는 알고리즘으로 가늘고 다양한 굴곡을 갖는 혈관

경계를 표현하기 힘들다.^{(4), (5)}

제안하는 방법은 추적 기반의 관상동맥 영역화 과정을 수행하는 과정에서 추정된 혈관 경계점들을 입력 데이터로 활용하여 삼각 표면 메쉬를 생성함으로써 굴곡면을 가지는 각각의 혈관가닥들을 정교하게 표현할 수 있다.

그리고 분기혈관은 주혈관 중심축을 따른 추적 과정에서 감지되어 주혈관 내부에서부터 추적이 시작될 뿐만 아니라 분기혈관 추적 시에 시작점 부근에서 원단면 근사 오차가 증가하기 때문에 주혈관 내로 침습이 발생하는 문제가 있다. 이 문제는 삼각 표면 메쉬 생성 후 메쉬 병합 기술을 통해 침습 영역을 감지하여 제거하고 그 틈을 부드럽게 메워 연결함으로써 처리된다. 단일 가닥의 혈관 메쉬들은 제안하는 병합 방법을 통해 합쳐져 하나의 통합된 삼각 표면 메쉬가 된다.

2. 본 론

2.1. 단일 가닥 혈관의 삼각 표면 메쉬 생성

* 연세대학교 의과대학 의과학과
** 한국과학기술연구원 로봇연구단 선임연구원
*** 연세의료원 심혈관연구소 교수
**** 연세대학교 의과대학 내과학교실 심장내과

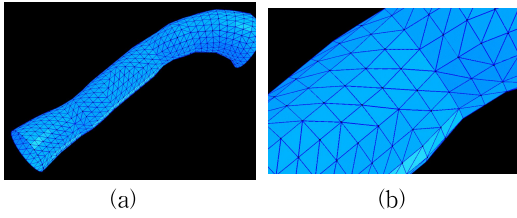


그림 1. Triangulation with Zig-zag pattern.
(b), (c) Triangular surface mesh generated by the proposed method in a single vessel and The close-up mesh

2.1.1 입력데이터

입력 데이터는 주 혈관 및 분기혈관을 포함한 N_v 개의 혈관들에 대하여 각 혈관 $k(k=1,2,\dots,N_v)$ 에서 일정 길이 간격마다 얻은 N_k 개의 혈관 단면 정보들로 구성된다. 이때, 각 혈관 단면 정보는 일정 각도로 혈관 경계점을 샘플링한 점들로 구성된다.

2.1.2 Zig-zag 패턴의 삼각화

서로 인접한 i 와 $i+1$ 혈관 단면의 샘플링된 점들을 Zig-zag 패턴으로 연결하여 face들을 형성함으로써 단일 가닥 혈관에 대한 삼각 표면 메쉬를 생성한다. (그림 1)

2.2. 메쉬 병합

메쉬 병합 과정은 크게 두 과정으로 나눌 수 있는데, 먼저 OBB(Oriented Bounding Box) Tree를 이용하여 두 메쉬간의 충돌하는 face들을 빠르게 검사하여 중첩 메쉬를 제거한다. 두 메쉬간 중첩 메쉬를 제거한 후 들로네 삼각화(Delaunay triangulation)알고리즘을 이용한 Gap filling을 수행하여 두 메쉬를 연결하는 삼각형들을 생성하여 중첩 메쉬 제거 후 발생된 틈을 메운다.

2.2.1 OBB(Oriented Bounding Box) Tree를 이용한 충돌 영역 검사 및 중첩 메쉬 제거

OBB 트리는 BVH (Bounding Volume hierarchy)의 한 종류로서 물체의 바운딩 볼륨을 직육면체의 형태로 표현한 이진 트리 구조이다.⁽⁶⁾ 이러한 트리 구조를 통해 충돌 검사를 빠르게 수행할 수 있다. 본 연구에서는 OBB 트리를 이용하여 충돌되는 볼륨을 빠르게 검사하고 Leaf node에 속하는 face들에 대하여 T.Moller

의 삼각형 교차 판단 방법을 사용하여 충돌하는 face들을 제거한다. 충돌하는 face를 제거한 후 혈관 내부에 남아있는 잔여 face들은 face간 연결요소분석을 통해 제거된다.

2.2.1 들로네 알고리즘을 이용한 Gap filling

Gap filling 과정에서는 2장에서 서술한 zig-zag 패턴의 삼각화 방법과 다르게 들로네 삼각화(Delaunay triangulation) 알고리즘⁽⁷⁾을 적용하여 메쉬를 생성한다. 먼저 중첩 영역이 제거된 부분에서 두 메쉬의 경계 사이클(boundary cycle)을 검출한 후, 이를 지역적으로 2차원 평면 근사화를 수행하고 들로네 삼각화 알고리즘을 적용하여 두 메쉬를 연결하는 삼각형들을 생성함으로써 틈을 메운다.

2.3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 관상동맥 삼각 표면 메쉬 생성 방법을 평가하기 위해서 CT에서 획득된 관상동맥 조영 영상(Coronary Computed Tomography Angiography)을 사용하여 실험을 수행하였다. 입력 데이터로 사용되는 혈관의 중심라인과 법선벡터 그리고 직경 정보들은 자체 개발한 추적기반 관상동맥 영역화 알고리즘을 사용하여 획득되었다.

그림 2(a)는 입력 데이터로부터 단일 혈관 메쉬들을 생성한 것을 동시에 가시화한 것으로 분기되는 지점에서 메쉬들간에 서로 중첩이 일어난다. 그림 2(b)는 제안된 메쉬 병합 기술을 분기가 일어나는 혈관들에 대하여 반복적으로 적용하여 하나로 통합된 좌관상동맥 메쉬를 만든 결과를 보여준다. 또한, 우관상동맥 메쉬도 좌관상동맥과 동일한 과정으로 생성되었다.

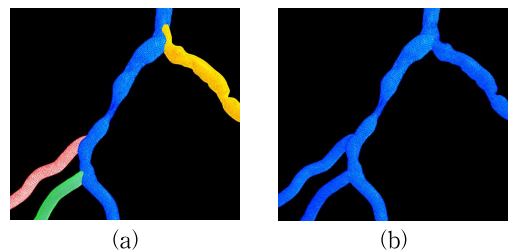


그림 2. The process of generating the left coronary artery triangular surface mesh. (a) Meshes of all vessels, (b) the mesh combined into one through mesh merging

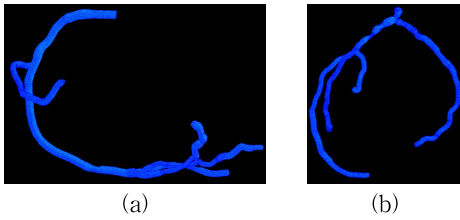


그림 3. Left/Right coronary artery triangular surface meshes (a) Right coronary artery mesh, (b) left coronary artery mesh

3. 결론

본 논문에서는 삼차원 관상동맥 조영 영상에서 관상 동맥 영역화 작업을 수행하며 획득한 각 혈관의 경계점들을 입력 데이터로 받아 관상동맥을 삼각 표면 메쉬로 표현하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 높은 품질의 전체 관상동맥 메쉬를 정확하게 생성하였고 혈관 구조 렌더링 및 역학 시뮬레이션 분야 등에 다양하게 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- (1) Steinman, David A., "Image-based computational fluid dynamics modeling in realistic arterial geometries," *Annals of biomedical engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 483-497, 2002.
- (2) Steinman, D. A., D. A. Vorp, and C. R. Ethier, "Computational modeling of arterial biomechanics: insights into pathogenesis and treatment of vascular disease," *Journal of Vascular Surgery*, Vol. 37, No. 5, pp. 1118-1128, 2003.
- (3) Soulis, Johannes V., et al., "Wall shear stress in normal left coronary artery tree," *Journal of Biomechanics*, Vol. 39, No. 4, pp. 742-749, 2006.
- (4) Lorensen, William E., and Harvey E. Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," *ACM siggraph computer graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
- (5) Newman, Timothy S., and Hong Yi, "A survey of the marching cubes algorithm," *Computers and Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 854-879, 2006.

- (6) Gottschalk, Stefan, Ming C. Lin, and Dinesh Manocha, "OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection," *Proc. of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, pp. 171-180, 1996.
- (7) Fang, Tsung-Pao, and Les Piegl, "Delaunay triangulation in three dimensions," *Computer Graphics and Applications*, IEEE, Vol. 15, No. 5, pp. 62-69, 1995.