

3차원 관상동맥의 위상적인 형상분석을 위한 골격 추출*

이재진[○] 김정식 최수미

세종대학교 컴퓨터공학부

{ijlee[○], jskim}@sju.ac.kr, smchoi@sejong.ac.kr

Skeleton Extraction of 3D Coronary Artery for Topological Shape Analysis

Jaejin Lee[○] Jeongsik Kim Soomi Choi

School of Computer Engineering Sejong University

요 약

3차원 관상동맥처럼 위상 구조가 중요한 객체의 형상을 분석하기 위해서는 혈관의 분기점, 극단점, 혈관의 계층적 구조 관계 등의 정보를 함축적으로 표현할 수 있는 골격 추출이 매우 중요하다. 본 논문에서는 3차원 CT 혈관조영술(3D CT Angiography)로 촬영된 영상으로부터 관상동맥의 3차원 골격을 추출하는 방법을 개발하였다. 먼저, CT 혈관조영술부터 획득한 슬라이스 이미지로부터 3차원 조각 및 수술 시뮬레이션 등을 위하여 혈관의 3차원 표면에 대한 메쉬 모델을 생성한다. 생성된 메쉬 모델이 임의로 변형된 후에도 자동으로 골격을 쉽게 추출할 수 있도록 메쉬 모델을 복셀화하는 단계를 거친다. 이렇게 얻어진 복셀모델로부터 유클리디언 거리 맵을 구성하여 discrete medial surface (DMS)를 생성하고 최종적으로 골격을 추출하게 된다. 이렇게 추출된 3차원 골격은 관상동맥 수술 시뮬레이션 등에서 다양한 형상 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

1. 서 론

관상동맥질환은 대개 심장에 혈액을 공급하는 관상동맥이 경화로 막히거나 좁아져 발생하는데, 심근 경색증과 협심증 등이 이에 해당한다[1]. 3차원 CT 혈관조영술(3D CT Angiography: CTA)으로부터 얻어진 영상은 혈관의 구조를 진단하기 위한 주요 정보를 제공한다. 의사는 이러한 영상 내 혈관 구조를 관찰함으로써 관상동맥 우회시술(coronary artery bypass graft: CABG)이나 관상동맥 확장술(percutaneous transluminal coronary angioplasty: PTCA)의 수술 시행 전과 후의 결과를 비교하거나 약물 치료의 반응 등을 확인할 수 있다.

2차원 혈관조영영상의 시각적인 분석과 해석은 임상학자들의 수작업에 의해 이루어지기 때문에 정확한 분석이 이루어지지만 반면에 과도한 작업량으로 인하여 작업 시간이 많이 소요된다. 또한 영상의 잡음으로 인하여 해부학 구조에 대한 잘못된 이해를 동반하기도 한다.

3차원 골격은 대상 객체의 중앙부에 위치하는 트리 구조의 1차원적 표현으로, 복잡한 형태의 3차원 객체에 대한 필수적인 기하 정보를 분기점, 극단점, 계층적 구조 관계 등으로 함축하여 표현하는데 유용하다. 또한 혈관 구조에 대한 효과적인 분석을 위해서는 혈관 영상으로부터 3차원 골격을 추출하는 작업이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 2차원 영상 기반의 방법들이 갖는 한계점을 극복하고자 혈관의 극단점, 분기점, 계층적 관계 정보를 포함하는 3차원 골격 표현을 생성하여 3차원 관상동맥 형상에 대한 자동화된 분석을 지원하고자 한다.

2. 관련연구

3차원 형상으로부터 골격을 추출하는 연구는 입력 데이터의 종류에 따라 크게 3차원 메쉬 모델로부터 골격을 추출하는 방법과 복셀 데이터로부터 골격을 추출하는 방법으로 나눌 수 있다. Wu[2]는 RBF(Radial Basis Function)를 이용한 골격추출 방법을 제안하였다. 우선 형상으로부터 음함수 표면(implicit surface)을 만들고 gradient descent 알고리즘을 이용하여 벡터 필드를 구성한 후 국부적 최대치에 위치하는 점을 찾는다. 마지막으로 활성 외곽선 모델(active contour model)을 적용하여 이러한 점들을 연결함으로써 최종 골격 표현을 생성한다. Wu가 사용한 음함수 표면은 비교적 단순한 객체를 표현하는데 용이하지만 혈관이나 위상적으로 복잡한 객체의 표면을 나타내는데 어려움이 있다.

Wade[3]는 3차원 복셀 데이터로부터 EDM(Euclidean Distance Map)을 구하고 이것으로부터 DMS(Discrete Medial Surface)를 추출하여 애니메이션이 가능한 골격을 추출하는 방법을 개발하였다. 복셀 형태의 골격은 모델의 복잡도와 무관하게 다양한 해상도로 표현될 수 있기 때문에 형상의 위상적 특성을 coarse-to-fine 스타일로 추출하여 계층적 형상 분석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 이진 복셀 모델로부터 3차원 골격을 추출하기 위한 방법으로 Wade의 연구를 기반으로 본 연구의 최종 목표가 되는 위상구조 형상 분석을 위한 형상 표현을 구축한다.

3. 3차원 위상적인 형상분석을 위한 골격 추출

자동화된 3차원 위상적인 형상분석을 지원하는 골격 추출은 크게 세 단계로 구성된다. 첫째, 관상동맥에 대한 CTA 영상으로부터 마칭큐브 알고리즘을 적용하여 3차

* 이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-205-D00105).

원 메쉬모형을 생성한다[4]. 둘째, 재구축된 메쉬모형으로부터 OpenGL 깊이맵 기반의 복셀화 알고리즘을 이용하여 복셀 모델을 생성한다[5]. 마지막으로 Wade의 방법을 적용하여 관상동맥의 위상구조를 표현하는 골격점들을 추출한다[3]. 그림 1은 관상동맥의 CTA영상으로부터 3차원 골격 표현을 추출하는 전체 과정을 나타낸다.

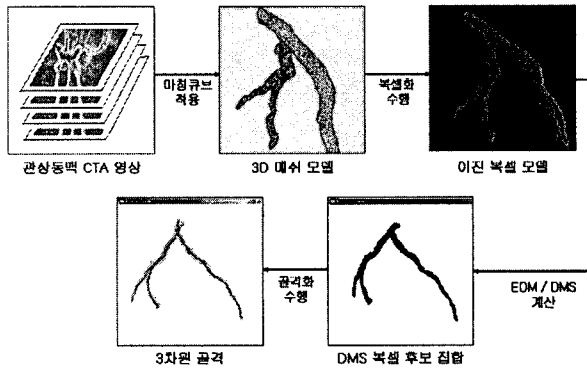


그림 1 3차원 골격 추출을 위한 전체 흐름도

관상동맥의 CTA 영상으로부터 마칭 큐브 알고리즘에 의해 3차원 메쉬 모델을 생성하기 위해서는 우선 룩업 테이블(look-up table)을 구성한 후, 미리 입력받은 index 값에 대한 매칭 과정을 수행하여 저장된 배열값에 대하여 룩업 테이블을 참조하여 등가면(iso-surface)을 생성한다. 이렇게 생성된 등가면은 각각의 정점 intensity를 이용하여 각 삼각형에 대한 노말 벡터값을 계산하고, 그것을 슬라이스 단위로 저장하여 최종 메쉬 모델을 완성한다.

이진 복셀 모델 생성은 OpenGL 하드웨어 깊이버퍼(depth-buffer)기반의 복셀화 방법을 적용하여 수행된다. 우선 3차원 메쉬 모델을 둘러싸는 정육면체를 계산하고, 각 면을 뷰 평면으로 하는 곳에 모델의 상을 투영함으로써 총 여섯 개의 깊이맵을 생성한다. 최종적으로 세 개의 축 각각에 작교하는 세 쌍의 면에 존재하는 모든 픽셀들에 대하여 3차원 모델에 대한 최소거리와 최대거리 내부를 보간하여 오브젝트 복셀들의 위치값들을 결정하고 각각의 위치를 1로 설정함으로써 최종 복셀 모델을 생성한다.

이진 복셀 모델로부터 3차원 골격을 추출하는 과정은 크게 네 단계로 이루어진다. 첫째, 이진 복셀 모델로부터 EDM을 계산한다. 둘째, 골격 후보 집합인 DMS (Discrete Medial Surface)를 결정하고, 셋째, 골격의 분기점이 되는 중심점과 극단점들을 찾는다. 마지막으로 중심점으로부터 각각의 극단점들에 이르는 경로를 Dijkstra 최단 경로 알고리즘을 적용하여 결정함으로써 최종 골격 표현을 완성한다.

복셀 모델로부터 EDM을 계산하는 과정은 다음과 같다. 우선 복셀 모델로부터 표면 복셀 집합을 계산한다. 표면 복셀 집합의 구성을 위해 우선 복셀 모델의 각각의 복셀 값이 1인 경우를 객체 복셀이라고 하고, 0인 경우를 배경 복셀로 설정한다. 객체 복셀 중에서 26개의 이웃 복셀 가운데 적어도 한 개 이상의 배경 복셀이 존재할 경우 해당 복셀을 표면 복셀로 결정한다. 그런 후 표면 복셀 집합을

제외한 모든 오브젝트 복셀들에 대하여 모든 표면 복셀들과의 유클리디언 거리(Euclidean distance)중 최소값을 해당 객체 복셀의 유클리디언 거리 복셀로 결정하게 된다. 다음의 식 1은 EDM 복셀 모델로부터 EDM을 계산하는 수식을 정의한 것이다.

$$EDM(p) = \begin{cases} \min_{v \in F} d(p, v) & (\text{if } p \in F) \\ 0 & (\text{if } p \in F') \end{cases} \quad (\text{식 1})$$

식 1에서 F 는 객체 복셀 집합을 나타내고 F' 는 배경 복셀 집합을 나타낸다. 그리고 p 는 F 의 원소들이 되고, v 는 표면 복셀 집합을 나타낸다.

3차원 골격 후보 집합인 DMS를 구하기 위하여 모든 객체 복셀에 대하여 해당 복셀이 최대 내접하는 구를 갖는지를 결정해야 한다. 복셀 p 가 최대 내접하는 구를 갖기 위해서는 모든 이웃 복셀에 대하여 식 2의 조건을 만족해야 한다.

$$EDM(p) \geq EDM(n) + d(n, p) \quad (\text{식 2})$$

식 2에서 복셀 p 의 유클리디언 거리 값이 현재 복셀 p 의 주변 26개의 이웃 복셀(n)에 대한 유클리디언 거리 값과 p 와 n 사이의 직선거리 값을 합한 것보다 크거나 같다면 현재 복셀 p 를 DMS의 요소로 결정한다.

골격 표현의 주요 특징이 되는 중심점은 유클리디언 거리 값이 가장 큰 DMS 복셀이 되며, 극단점들은 중심점으로부터 DMS 집합에 대하여 너비우선탄색 알고리즘을 적용하여 국부적 최대치를 갖는 복셀들로 이루어진다. 그림 2는 DMS로부터 결정된 중심점과 극단점들을 보여준다.

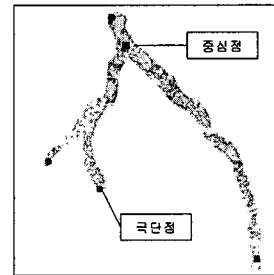


그림 2 복셀 모델의 중심점과 극단점

마지막으로 Dijkstra 최단경로 알고리즘을 사용하여 중심점과 극단점들에 이르는 경로를 찾는다. 우선 객체 복셀 집합에 대하여 각 복셀을 노드로, 복셀과 복셀간 연결 관계를 에지로 설정하여 그래프화 한다. 그리고 나서 각 노드와 에지에 경로 길이(path length)와 경로 비용(path cost) 값을 설정함으로써 Dijkstra 최적 경로 추적을 위한 가중치로 적용한다. 본 논문에서 사용된 경로 길이는 선택된 복셀과 이웃 복셀 사이의 거리를 사용하고 경로 비용은 유클리디언 거리 값을 사용한다. 식 3은 최단 경로 추적에 적용한 가중치 수식을 정의한 것이다. 식 3에서 d 는 유클리디언 거리 값으로 지수부는 경험적 수치로 결정되어진다.

$$Weight_p = \sum_{v \in P} \frac{1}{d_i^3} \quad (\text{식 3})$$

4. 실험 및 결과

본 논문의 실험에서는 세 가지의 복셀 해상도에 따른 복셀 데이터로부터 EDM 구성 결과, EDM으로부터 DMS 계산, 극단점 선택 후 골격 추출 결과가 제시된다. 실험은 데스크탑 CPU 펜티엄 3.0C, 메모리 1GB, 그래픽카드 QUADRO FX1000에서 수행되었다.

본 연구에서의 어플리케이션은 512X512 관상동맥 CTA 슬라이스 이미지 123장을 입력 데이터로 사용한다. 이것을 마칭큐브 알고리즘을 사용하여 3차원 메쉬 모델을 생성하고, 이것으로부터 OpenGL 깊이맵 기반의 복셀화 알고리즘을 이용하여 복셀 모델을 생성한다.

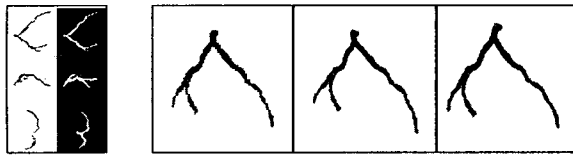


그림 3 관상동맥 모델의 복셀화 수행 결과 a) 깊이맵, b) 다해상도 복셀 모델

표 1은 위의 과정으로 생성된 복셀 모델로부터 EDM을 구성할 때 복셀 해상도에 따른 결과를 보여준다.

표 1 관상동맥 복셀 모델의 EDM 계산 수행 시간

복셀 해상도	객체 복셀 수	수행 시간(초)
64X64X64	510	0.34
128X128X128	4,469	2.39
256X256X256	37,228	135.00

다음은 EDM으로부터 DMS를 구하기까지 수행한 결과이다.

표 2 EDM으로부터 DMS 구성 수행 시간

복셀 해상도	DMS 복셀 수	수행 시간(초)
64X64X64	250	0.10
128X128X128	768	1.20
256X256X256	855	1.68

마지막으로 DMS로부터 너비우선탐색 알고리즘을 사용하여 극단점을 결정하고 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 최종적으로 골격을 추출한 결과이다.

표 3 극단점, 골격추출 시간

복셀 해상도	극단점 갯수	수행 시간(초)
64X64X64	4	0.84
128X128X128	4	3.77
256X256X256	4	4.64

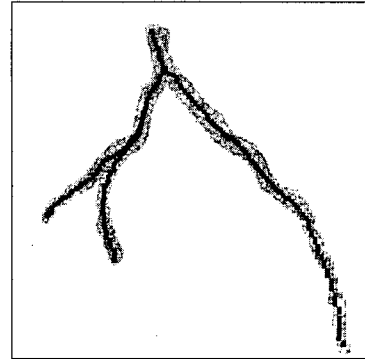


그림 4 Dijkstra 알고리즘을 적용한 골격추출 결과

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 관상동맥과 같은 위상구조가 중요한 객체의 메쉬 모델에 대하여 3차원 골격을 추출하는 방법을 제시하였다. 모델의 복잡도와 무관하게 다양한 해상도로 표현할 수 있는 복셀 형태의 골격을 추출했고, 입력 데이터로부터 복셀화를 수행하고 골격을 추출하기까지 모두 자동으로 수행하도록 하였다.

향후 연구로는 혈관의 위상구조적인 형상분석을 위해, 현재 추출된 골격을 혈관 구조의 위상 구조적인 특성을 반영할 수 있고 전체적인 비 유사정도와 노드 단위의 대응 작업이 가능한 그래프 형태의 자료구조로 재구축하고 형상간의 비교를 위한 매칭 작업을 수행할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

참고문헌

[1] http://www.nlm.nih.gov/health/dci/Diseases/Cad/CAD_ALL.html

[2] W. Fu-Che, *et.al.*, "Skeleton Extraction of 3D Objects with Radial Basis Functions", Shape Modeling International 2003, pp. 207-216, 2003

[3] L. Wade, *et.al.*, "Fast Fully-Automated Generation of Control Skeltons for Use in Animation", Computer Animation 2000, pp.164-169, 2000

[4] W.E. Lorensen, *et.al.*, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm.", Computer Graphics, Vol.21. No. 4. pp. 163-169, 1987

[5] E. A. Karabassi, *et.al.*, "A Fast Depth-Buffer-Based Voxelization Algorithm", Journal of Graphics Tools ACM, Vol.4. No. 4, pp. 5-10, 1999