

# 관상동맥의 인터랙티브 형상 분석을 위한 3 차원 골격의 자동 생성

이재진, 김정식, 최수미  
세종대학교 컴퓨터공학부  
{jjlee, jskim }@sju.ac.kr, smchoi@sejong.ac.kr

## 3D Automatic Skeleton Extraction of Coronary Artery for Interactive Shape Analysis

Jae Jin Lee, Jeong Sik Kim, Soo Mi Choi  
Department of Computer Engineering  
Sejong University

### 요 약

3 차원 관상동맥을 분석하기 위해서는 혈관의 분기점, 극단점, 혈관의 계층적 구조 관계를 함축적으로 표현하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 3 차원 CT 혈관 조영 영상으로부터 관상동맥의 3 차원 골격을 자동으로 추출하는 방법을 개발하였다. 먼저, CT 혈관 조영술에 의해 획득된 슬라이스 이미지로부터 3 차원 조작 및 수술 시뮬레이션 등을 위하여 혈관의 3 차원 표면에 대한 메쉬 모델을 생성한다. 생성된 메쉬 모델이 임의로 변형된 후에도 자동으로 골격을 쉽게 추출할 수 있도록 메쉬 모델을 복셀화하는 단계를 거친다. 이렇게 얻어진 복셀 모델로부터 표면복셀을 결정하고 표면 복셀로부터 객체 복셀까지의 유클리드 거리값을 계산하여 유클리드 거리맵(EDM)을 계산한다. 계산된 EDM 으로부터 객체 복셀이 가지게 되는 최대 내접 구를 계산하여 Discrete Medial Surface 을 생성하게 되는데 이것은 골격의 후보가 된다. 골격의 후보집합 복셀에 대하여 Dijkstra 최단 경로 결정 알고리즘을 적용하여 골격을 자동으로 추출하게 된다. 이렇게 추출된 3 차원 골격은 관상동맥 수술 시뮬레이션 등의 다양한 형상 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

Keyword : 3 차원 골격 추출, 관상동맥 분석, 형상 분석

## 1. 서론

심장질환 중에 인간의 생명과 직접적으로 관련된 관상동맥질환 (coronary artery disease)은 대개 심장에 혈액을 공급하는 관상동맥이 경화 현상에 의해서 막히거나, 좁아져서 발생한다. 이에 따른 징후로 심근경색증(혈액 공급이 잘 이루어지지 않아 심장 근세포가 파괴되는 질환)이나 협심증(관상동맥을 통한 심장의 혈액순환이 떨어지는 일시적인 증상)이 발생하게 된다 [1].

혈관조영촬영 (CTA - Computer Tomography Angiogram)은 비침습적인 관상동맥 촬영으로 별도의 도관 삽입 없이 혈관의 구조를 진단하기 위한 중요 정보를 제공하기 때문에 관상동맥 우회술

(By pass)이나 관상동맥확장술 (PTCA - Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty)의 시행 전과 후의 결과를 비교함으로써 임상학자들이 관상동맥 질환의 부위를 확인하거나 치료 계획 혹은 약물 치료 결과 등을 가능하게 한다. 이를 지원하기 위해서는 수술 전후의 관상동맥의 구조를 정확하게 이해하고 분석할 수 있어야 한다.

따라서 혈관의 주요 특징이 되는 트리 형태의 골격 정보, 분기점, 극단점 등의 위상 구조적인 특성들을 추출하고 그 결과를 분석하는 작업은 수술 전과 후의 질환 진단 및 평가, 그리고 계획 수립에 필수적이다. 2 차원의 혈관 조영도의 시각적인 분석과 해석은 임상학자들의 수작업에 의해 이루어 지기 때문에 정확성을 보장하지만 그와는 달리

분석을 위해 과중한 작업량과 시간이 소요된다. 또한 영상의 잡음으로 인한 오류로 인하여 해부학적으로 잘못된 이해를 동반하게 된다 [2].

3 차원 골격은 대상 객체의 중앙부에 위치하는 트리 구조의 1 차원적 표현으로, 복잡한 형태의 3 차원 객체에 대한 필수적인 기하 정보를 분기점, 극단점, 계층적 구조 관계 등으로 함축하여 표현하는데 유용하다. 관상동맥처럼 위상구조가 중요한 객체의 형상을 분석하기 위해서는 3 차원 골격 정보가 매우 중요하고, 관상동맥의 수술 시뮬레이션 등에 응용하기 위해서는 메쉬 모델과 복셀 데이터에 함께 적용할 수 있는 3 차원 골격 추출 방법이 필요하기 때문에 본 논문에서는 3 차원 CT 혈관 조영술로 촬영된 영상으로부터 3 차원 관상동맥 모델을 구축하고, 중간 복셀 데이터를 이용하여 3 차원 골격을 자동으로 추출하는 방법을 개발하고자 한다.

2 장에서는 3 차원 골격 생성 방법과 위상적인 형상 분석에 관련된 기존 연구들을 살펴본다. 3 장에서는 위상적 형상 분석을 위한 3 차원 골격 생성 방법들을 소개하고, 마지막으로 4 장에서는 본 논문의 결론을 맺고 향후 연구 방향을 제시한다.

## 2. 관련연구

3 차원 형상으로부터 골격을 추출하는 연구는 입력 데이터의 종류에 따라 크게 3 차원 메쉬 표현으로부터 골격을 추출하는 방법과 복셀 데이터로부터 골격을 추출하는 방법으로 나눌 수 있다.

3 차원 메쉬 모델로부터 골격을 추출하기 위한 대표적인 방법으로는 Wan-Chun Ma [2]이 제안한 RBF (Radial Basis Function) 를 이용한 골격화 연구를 들 수 있다. Ma 는 형상으로부터 표면 모델 (surface model)을 구축하여 골격을 추출했다. 먼저 RBF 를 사용하여 음함수 표면(implicit surfaces)을 구축한다. 모델 각각의 점에 gradient descent 알고리즘을 이용하여 벡터 필드 (vector field)를 구성한 후 국부적 최대치(local maxima)가 되는 대응 피크 점(corresponding peak point)를 찾는다. 최종적으로 이러한 점들을 Active contour model 을 적용하여 연결함으로써 최종 골격 표현을 생성한다. Ma 가 사

용한 음함수 표면은 비교적 단순한 객체를 표현하는데 용이하지만 관상동맥 등의 복잡한 객체의 표면을 표현하는데 어려움이 있다.

Wade [4]는 Ma 와 마찬가지로 입력 모델은 3 차원 메쉬 모델로 시작한다. 메쉬 모델을 복셀화의 단계를 거쳐 복셀모델을 획득한다. 객체 복셀에 대하여 EDM (euclidean distance map)을 구한 후, 이것으로부터 DMS (Discrete Medial Surface) 를 추출하고 Dijkstra 최단경로 알고리즘 (Dijkstra Shortest Path Algorithm)을 사용하여 골격추출을 했다. 골격추출 후 Wade 는 관절 형태의 골격으로 바꾸는 과정을 거쳐 애니메이션이 가능한 골격을 추출했다.

위상적인 형상 분석에 관련된 연구로는 먼저 Hilaga [5]는 3 차원 모델들을 표현하는 MRG (Multi-resolutional Reeb Graph)들을 비교함으로써 다해상도 모델에 대하여 빠르고, 정확히 그리고 자동적으로 유사성을 계산하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 단순히 닫혀진 형태의 다각형 메쉬 모델들뿐만 아니라 닫혀있지 않은 다각형 모델이나 구멍이 있는 모델들의 유사성을 평가하는데 유용하다. MRG 는 다해상도로 3 차원 형상의 골격이나 위상 기하학적인 구조를 표현하는데 강점을 갖는다. 형상 비교는 먼저 3 차원 형상 모델에 대한 MRG 를 생성하는 것이고, 둘째로 생성된 MRG 를 이용하여 3 차원 모델에 대한 유사성을 평가하는 것이다. 유사성 평가는 구축된 MRG 를 최상위 부모 단계로부터 최하위 자식 단계까지 순회하면서 다단계로 이루어진다. Hilaga 가 제안한 방법은 모델에 대한 정규화가 필요 없고, 비교적 정확한 위상 기하학적 특성을 반영한 형상 비교를 수행하지만 모델의 대칭 구별이 어렵다는 단점이 있다.

Hiransakolwong [6]은 2 차원 객체의 형상 인식에 사용되는 골격 그래프들에 대한 다 대 다의 형상 매칭 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 2 차원 객체의 생성된 골격으로부터 signature, ID, 노드 세부항목으로 이루어진 signature 테이블을 구축하여 위상 구조를 갖는 그래프 형태의 자료구조를 생성한다. Hiransakolwong 은 생성된 그래프들의 매칭 작업을 통해 형상의 인식에 사용했다.

본 연구에서는 메쉬 모델과 복셀 데이터에 함께

적용할 수 있는 3 차원 골격추출과 위상적인 자료 구조 구축을 위해 Wade 의 방법과 Hiransakolwong 의 방법을 혼합하여 구현했다.

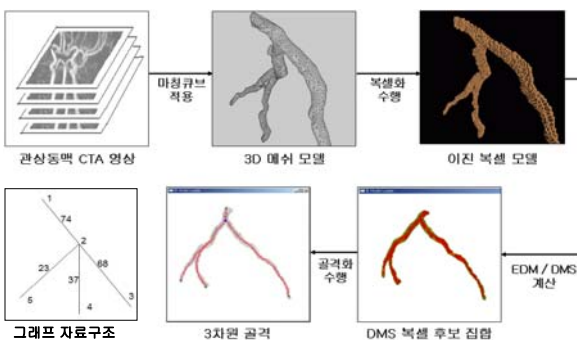
### 3.3 차원 골격의 자동 생성

3 장에서는 위상적 형상 분석을 위한 형상 표현을 하기 위한 과정을 설명한다. 3-1 에서는 형상 표현을 위한 전체 구조에 대해 살펴보고 3-2 에서는 유클리드 거리맵(EDM)과 Discrete Medial Surface 를 구성하여 3 차원 골격 추출 하는 방법을 설명한다. 3.3 절에서는 추출된 골격으로부터 위상적인 형상 표현하는 방법을 설명한다.

#### 3-1 3 차원 골격 추출의 개요

본 논문에서 위상적인 형상 분석을 위한 골격 추출을 위해 먼저 심혈관에 대한 CTA 영상으로부터 3 차원 데이터로부터 3 차원 메쉬 모델을 생성하고 하드웨어 깊이버퍼 기반의 복셀화 단계를 거쳐 복셀 모델을 생성하고 마지막으로 복셀 모델로부터 EDM 과 DMS 를 유클리드 거리맵(EDM)과 Discrete Medial Surface 를 구성한 후 최단 경로 알고리즘을 수행하여 골격점들을 추출한다.

아래의 그림은 골격 추출하는 전체 구성도를 나타낸다.



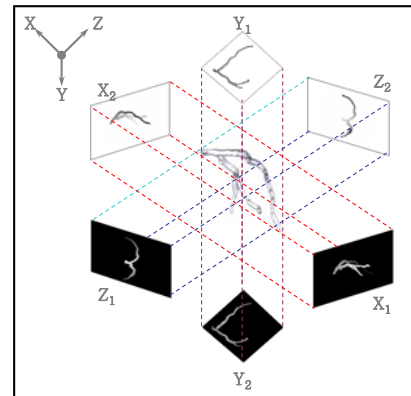
[그림 1] 골격 추출을 위한 전체 구성도

#### 3-2 EDM 과 DMS 를 이용한 3 차원 골격 추출

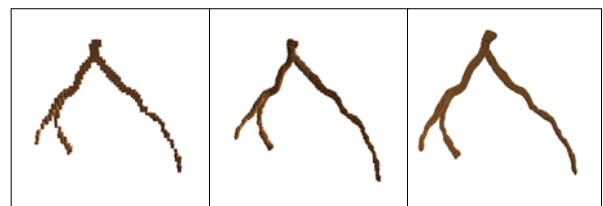
먼저 복셀 데이터를 얻기 위해 심혈관의 CTA 슬라이스 데이터로부터 마칭큐브 알고리즘[7]을 적용하여 생성된 3 차원 메쉬 모델을 기본 입력 데이터로 받아들인다. 본 연구에서는 오리지널 볼륨 데이터를 가지고 있지만, 메쉬 모델의 변형을

고려하여 중간 복셀 모델을 즉시 생성하기 위해 메쉬 모델로부터 복셀화를 수행한다.

OpenGL 하드웨어 깊이 버퍼 기반의 복셀화 단계를 수행하기 위해 먼저 하드웨어 깊이 버퍼를 활용하여 3 개의 뷰(front, side, top)로부터 투영된 깊이 정보들을 사용하여 모델의 볼륨 데이터를 생성하고 모델의 바운딩 박스를 결정하여 6 개의 깊이 버퍼를 생성한다. 하나의 축에 직교하는 한 쌍의 면에 존재하는 모든 픽셀에 대하여 3 차원 모델에 대한 최소 최대거리를 구하고 나면, 임의로 주어진 하나의 복셀 중심은 하나의 축에 대하여 세 개의 값을 갖게 된다. 결국 x, y, z 축 모두에 대하여 복셀의 위치가 내부에 위치한다면 복셀은 모델의 내부로 결정한다.



[그림 2] 6 개의 면의 깊이맵을 생성하는 그림



[그림 3] 다해상도 혈관 복셀 모델

복셀 모델로부터 EDM 을 계산하기 위해 먼저 표면 복셀을 결정하게 된다. 모델을 구성하는 모든 복셀에 대하여, 복셀의 값이 1 인 경우를 객체 복셀이라 하고, 0 인 경우를 배경 복셀이라고 했을 때, 객체 복셀 중에서 26 방향의 이웃 복셀을 검사했을 때 어느 한 곳이라도 배경 복셀이 된다면 그 복셀은 표면 복셀로 결정하게 된다.

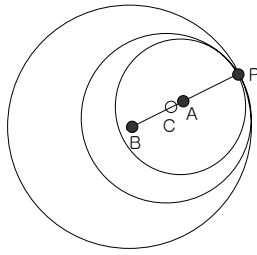
객체 복셀에 대하여 유클리드 거리값을 계산하

는 방법은 각각의 객체 복셀에 대하여 모든 표면 복셀들과의 유클리드 거리중 최소 거리가 되는 값을 해당 복셀의 최종 유클리드 거리 값으로 결정하게 된다.

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

식 1 에서  $F$  는 객체 복셀,  $F'$  는 배경 복셀,  $p$  는  $F$  의 각각의 복셀,  $v$  는 표면 복셀의 원소이다.

EDM 을 구성한 후 골격 후보를 결정하기 위해 DMS 를 생성한다. DMS 를 정의하기 위해 먼저 최대 내접원의 정의를 해준다.



[그림 4] 최대 내접원을 표현하는 그림

그림에서 어떤 점  $p$  에 접하게 되는 disk A, C 가 있을 때 disk C 가 disk A 를 포함한다면 disk C 의 중심 C 는 최대 내접원이 중심이 되고 disk C 는 최대 내접원이 된다. 이를 간단히 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$EDM(C) \geq EDM(A) + d(A, C) \quad (2)$$

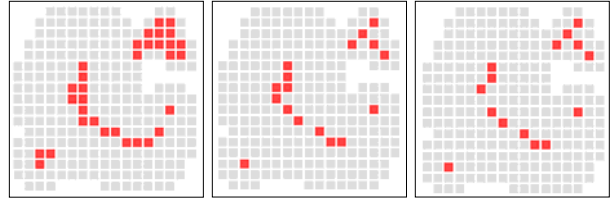
본 논문에서 3 차원 골격을 추출하기 위해 DMS 를 계산하는 방법은 다음과 같다.

먼저 EDM 을 유클리드 거리 값의 내림차순으로 정렬한다. 그리고 exposure 를 계산하게 되는데 이것은 객체 복셀이 DMS 인지 아닌지를 결정하는 요소가 된다. 어떤 객체 복셀  $v_i$  의 exposure 값은

$v_i$  의 유클리드 거리 값에  $v_i$  와 이웃 복셀  $v_n$  중심 사이의 거리를 더한 다음  $v_n$  의 유클리드 거리 값을 빼준다. 모든 이웃 복셀에 대해 계산한 exposure 의 최소 값을 선택한다. 다음의 식은 exposure 를 계산하는 수식이다.

$$e(v_i : v_n) = \sqrt{d_i} + \text{distance}(v_i, v_n) - \sqrt{d_n} \quad (3)$$

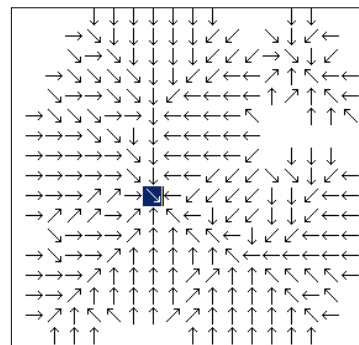
위의 방법으로 모든 객체 복셀에 대해 exposure 값을 모두 구한 후 어떠한 임계치 이상인 복셀을 DMS 로 선택하게 된다.



[그림 5] 임계치를 달리하여 DMS 를 구한 결과

위의 그림은 2 차원에서 각각 임계치 0.5, 0.9, 1.0 을 적용하여 DMS 를 구한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 exposure 만으로 골격 후보를 결정하기는 어렵다. 다음의 Dijkstra 알고리즘을 적용하기 위해서는 모든 골격 후보 복셀들이 연결되어야 한다. 다음으로 최대 ascent 값을 계산한다. Ascent 값은 어떤 객체 복셀의 26 방향의 이웃 복셀에 대한 아래의 식을 사용하여 ascent 값을 계산하고 그중 최대값인 이웃 복셀의 위치를 저장하고 현재 프로세싱 되고 있는 복셀에서 그때의 이웃 복셀로의 방향이 연결 방향으로 결정된다.

$$\text{ascent}(v_i : v_n) = \frac{\sqrt{d_i} - \sqrt{d_n}}{\text{distance}(v_i, v_n)} \quad (4)$$



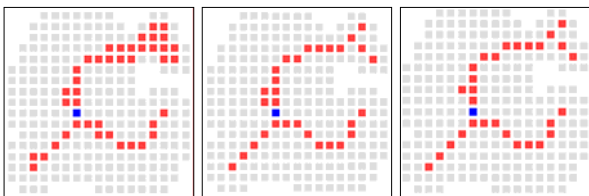
[그림 6] ascent 값을 계산하여 나타낸 연결 방향

ascent 를 계산하는 것은 exposure 를 계산할 때 동시에 이루어지게 되고 앞에서 모든 객체 복셀들을 거리 값으로 내림차순 하여 정렬했기 때문에 가장 큰 거리 값을 가진 복셀로부터 프로세싱이

이루어지게 된다. 스텝이 진행 될때 마다 인접 그룹(adjacent group)을 생성하게 되는데 생성하는 방법은 아래와 같다.

- 1) DMS, 연결 복셀(bridging voxel)로 선택된 복셀들을 모두 저장한다.
- 2) 어떤 복셀에 대하여(저장된 자료에서 지우고 새로운 인접그룹에 저장) 이웃 복셀을 검사하여 DMS, 연결 복셀일 경우 저장한다.
- 3) 주변에 DMS 복셀이나 연결 복셀이 없는 경우 하나의 인접그룹을 만드는 과정이 끝난다.
- 4) 남은 복셀에 대하여 위의 방법을 반복한다.

어떤 복셀이 인접그룹들을 연결하는 연결 복셀로 결정 되었을 때 그때의 복셀을 DMS 로 결정하고 연결된 그룹을 하나로 만든다. 현재 프로세스 되고 있는 복셀이 임계치 이상일 경우 연결 방향을 검사하여 프로세스 되었는지 검사하여 이미 프로세스 되었다면 DMS 가 아닐 경우 DMS 로 결정하고 아직 프로세스 되지 않았다면 무시하게 되고, 임계치 미만일 경우 26 방향의 이웃 복셀에 대한 인접 그룹을 검사하여 서로 다른 그룹일 경우 DMS 로 결정하게 된다.



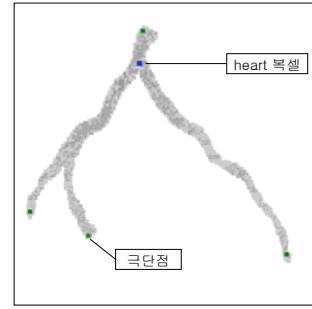
[그림 7] 최종적으로 DMS 를 구한 결과

골격 후보가 되는 복셀 집합을 구한 후 Dijkstra 최단경로 알고리즘을 적용하여 골격을 추출하게 되는데 Dijkstra 알고리즘의 루트에 해당하는 heart 복셀과 극단점을 결정하는 작업이 요구된다.

본 논문에서는 최대 EDM 값을 가진 복셀을 heart 복셀로 결정하고 극단점(extreme voxel)을 결정하기 위해서 객체 복셀에 대해 너비우선 탐색 알고리즘을 사용하여 국부적 최대치(Local maxima)가 되는 복셀을 극단점으로 선택하게 된다

골격을 추출하기 위한 마지막 과정으로 heart 복셀로부터 모든 극단점들에 이르는 최단 경로를 결

정하게 된다. 다음은 본 논문에서 사용한 Dijkstra 알고리즘을 단계적으로 설명한 것이다.



[그림 8] 복셀 모델의 heart 복셀과 극단점

var : 최단경로가 확정이 되지 않은 노드의 집합 U, 확정이 된 노드의 집합 V

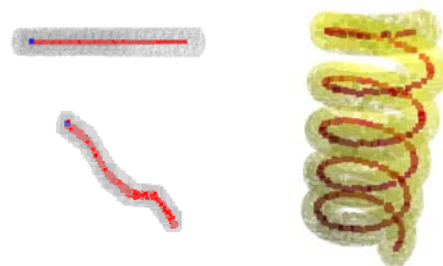
- 1) 중심 복셀 (최대 유클리드 거리 값을 갖는 복셀)을 Start 로 설정한다.
- 2) 26 개의 이웃 복셀에 대해 거리 값에 가중치 (Weight)와 비용을 더한다.
- 3) 기존의 거리 값보다 작다면 경로와 거리 값을 갱신한다.
- 4) U 의 어떤 노드의 거리 값보다 현재의 거리 값이 작다면 V 에 삽입
- 5) V 의 마지막에 들어간 노드를 현재노드로 설정
- 6) V 의 모든 노드가 U 에 들어갈 때까지 2~5 단계 반복

Dijkstra 알고리즘에서 사용된 비용은 복셀과 복셀 중심사이의 거리가 되고 가중치는 아래의 식을 사용했다.

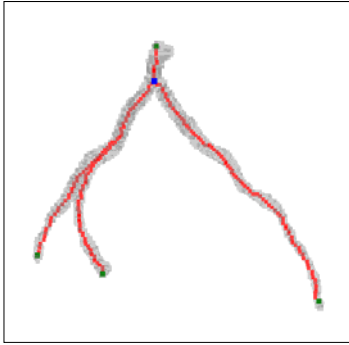
$$Weight_p = \sum_{Vi \in P} \frac{1}{d_i^3} \quad (5)$$

$d_i$  : 유클리드 거리 값

수식에서 가중치는 골격이 단일 경로를 가질 때 센터라인에 가까워지도록 한다.



[그림 9] 인공 모델의 골격 추출 결과



[그림 10] 혈관 모델의 골격 추출 결과

### 3-3 3 차원 골격의 자료구조 생성

본 연구에서는 혈관의 위상구조와 형상적 차이를 분석하기 위하여 비연결 3 차원 골격점으로부터 그래프를 구축하고, 형상 분석을 위한 위상 구조적인 정보를 수집한 후에, 최종적으로 그래프 매칭 방법을 적용하여 최종 형상적 차이 계산을 위한 자료구조를 구축한다. 트리 형태의 그래프는 말단 노드들로부터 루트로 진행하면서 표현된다. 그래프를 구성하는 각각의 노드들은 형상의 위상 구조적 특성을 표현하는 정보를 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 위상 구조를 표현하는 여섯 가지의 속성들을 관리한다. 표 1 은 이러한 속성들을 보여준다. 표 1 에 명시된 속성들은 signature 테이블이라는 자료구조에 저장되어 형상 매칭 작업 시에 활용된다.

[표 1] 위상 구조를 표현하는 속성

속성	설명
Neighbors	현재노드에 이웃한 노드들의 정보를 설정한다.
Relationship	이웃 노드들과의 관계를 나타낸다.
Edge_length	이웃 노드와의 연결을 정의하는 에지의 길이를 설정한다.
Node_level	현재 노드의 차수를 설정한다.
Node_radius	노드가 가지게 되는 유클리드 거리값이 최대 내접하는 구의 반지름을 정의한다.
Node_angle	두갈래 혹은 세갈래 이상 갈라지는 노드의 경우 나뉘는 에지 사이의 각도를 설정한다.

heart 복셀로부터 모든 극단점까지의 1 차원 복셀들을 최종적으로 signature 테이블을 구축하여 트리 구조형태의 골격으로 재구성 한다.

## 4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 관상동맥과 같은 위상구조가 중

요한 객체의 메쉬 모델에 대하여 3 차원 골격을 추출하는 방법을 제시하였다. 먼저 3 차원의 슬라이스 이미지로부터 메쉬 모델을 획득하고 여기에 복셀화 단계를 거쳐 복셀 모델을 생성해냄으로써 메쉬 모델이 어떠한 형태로 변형되어도 중간 복셀 모델을 즉시 생성해 낼 수 있다는 장점이 있다. 또한, 혈관의 위상구조적인 형상분석을 위해, 현재 추출된 골격을 혈관 구조의 위상 구조적인 특성을 반영할 수 있는 그래프 형태의 자료 구조로 재구축하였다.

향후 연구로는 전체적인 비 유사정도와 노드 단위의 대응 작업이 가능한 매칭 작업을 수행할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

### 참고문헌

- [1] [http://www.nhlbi.nih.gov/health/dci/Diseases/Cad/CA D\\_All.html](http://www.nhlbi.nih.gov/health/dci/Diseases/Cad/CA D_All.html)
- [2] K. Haris, S.N. Efstratiadis, "Automatic Artery Skeleton Extraction", 1997, Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE
- [3] W. Ma, "Skeleton Extraction of 3D Objects with Radial Basis Functions", 2003, Proceedings of the Shape Modeling International 2003, pp207-216
- [4] L. Wade, R. E Parent, "Fast, Fully-Automated Generation of Control Skeletons for Use in Animation", Computer Animation 2000. Proceedings, 3-5 May 2000 Page(s):164-169
- [5] H. Sundar, D. Silver, N. Gagvani, S. Dickinson, "Skeleton based shape matching and retrieval", In. Proc. SMI, Seoul, Korea, 2003.
- [6] N. Hiransakolwong, K. Vu, K. Hua, and S-D. Lang, Many-to-Many Skeletal-Graphs Matching Approach to Shape Recognition, To appear in the International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, 2004.
- [7] Lorensen W.E., Cline, H.E. : Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics, Vol. 21. No. 4. (1987) 163-169