

3차원 혈관 모델에서 협착 및 팽창 영역 탐색 방안

박상진¹, 김재성¹, 박형준^{2*}

¹한국과학기술정보연구원 가상설계센터, ²조선대학교 산업공학과

Detecting Regions of Stenosis and Aneurysm in a 3D Blood Vessel Model

Sang-Jin Park¹, Jae-Sung Kim¹, Hyungjun Park^{2*}

¹Division of M&S Center, KISTI

²Department of Industrial Engineering, Chosun University

요약 혈관 질환 검사는 일반적으로 혈관 조영술(angiography)과 CT 혈관 조영술(CT angiography) 등을 통해 이루어지며, 대부분 검사자의 육안을 통한 주관적 판단에 의존하여 진단이 이루어진다. 본 논문에서는 의료영상으로부터 재구성된 3차원 혈관 내벽 모델로부터 대표적 혈관질환에 해당하는 협착과 팽창 질환 의심 영역을 탐색하는 방안을 제안한다. 먼저, 의료영상에서 재구성된 3차원 혈관 내벽 모델로부터 혈관에 대한 골격 곡선(curve skeletons)과 외곽선(contours)을 생성하고, 생성된 골격 곡선을 가지 단위로 분할한 후, 가지에 속하는 각 노드에 대한 외곽선의 면적을 계산한다. 그런 다음, 계산된 외곽선들의 면적에 대해 평균 면적 및 최대/최소 면적, 그리고 인접 노드들 간의 외곽선 면적 차이를 고려하여 협착 및 팽창 질환 의심 영역에 해당하는 노드들을 탐색한다. 다음으로 탐색된 의심 영역들을 적절하게 시각화함으로써 혈관질환의 진단을 지원한다. 제안된 방안을 구현하여 몇 가지 3D 인체 혈관모델에 적용한 결과 질환 의심 영역이 잘 찾아짐을 확인하였다. 이를 통해 제안된 방안의 유용성을 보인다.

Abstract Angiography and CT angiography are used widely for the examination of vascular diseases, but the diagnosis of such diseases is made mostly by the subjective judgment of the inspector. This paper proposes a method for detecting the suspicious regions of stenosis and aneurysm in the inner surfaces of 3D blood vessel models reconstructed from medical images. Initially, the 3D curve-skeletons of the blood vessel models and the contours at the nodes of the curve-skeletons were generated. Next, the 3D curve-skeletons were divided into a set of branches and the areas of normal contours of nodes located in each branch were calculated. The nodes whose contours contain suspicious regions were detected by taking into account the average area, maximum and minimum areas, and the area difference between the adjacent normal contours. The diagnosis of stenosis and aneurysm can be supported by properly visualizing the suspicious regions detected. The suspicious regions of the disease were identified by implementing and testing it using several data sets of human blood vessels, highlighting the usefulness of the proposed method.

Keywords : 3D Blood Vessels, Medical Images, Vascular Diseases, Curve Skeletons, Contour Areas, Region Detection.

1. 서론

혈관질환(vascular disease)은 고혈압, 동맥 경화, 당뇨 등의 선형질환과 흡연, 스트레스 등 환경적인 요인 또

는 유전적인 요인에 의해 주로 발생된다[1-3]. 대표적인 혈관질환으로는 협착(stenosis) 질환과 팽창(aneurysm) 질환이 있다. 협착 질환은 혈관의 가장 안쪽에 위치하는 대피세포가 손상되어 해당 부위에 콜레스테롤이 쌓이면

본 연구는 (2017년도) 한국과학기술정보연구원(KISTI) 주요사업 과제로 수행한 것입니다.

*Corresponding Author : Hyungjun Park(Chosun Univ.)

Tel: +82-10-6279-9931 email: hzpark@chosun.ac.kr

Received December 7, 2017

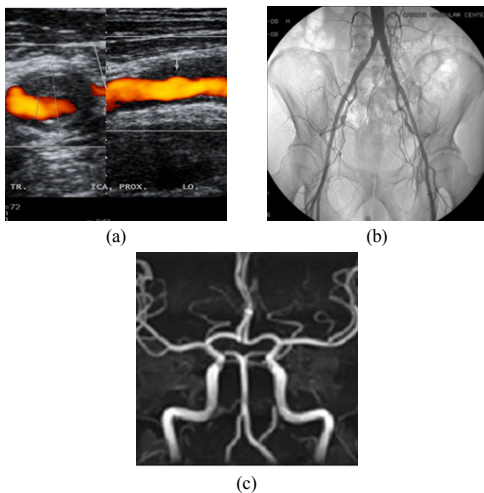
Revised January 2, 2018

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

서 혈관이 좁아지거나 막히는 것을 의미하며, 팽창 질환은 혈관의 팽창으로 인해 인접한 장기를 압박하여 폐쇄 증상을 유발시키거나, 혈관벽의 자극으로 통증 또는 과열에 이르는 것을 의미한다[3].

이러한 혈관질환은 발병률이 높으나 조기 진단율이 저조하고, 정확한 진단을 위해서는 복잡한 과정이 요구되며, 이에 따른 의료비용이 발생하게 된다. 혈관질환을 검사하기 위한 방법으로는 혈관 초음파(sonography), 혈관 조영술(angiography), CT 혈관조영술이 주로 활용된다[4]. 혈관 초음파 검사는 혈관에 초음파를 보내 반사되어 오는 정보를 분석하여 이를 영상으로 시각화함으로써 혈관을 구성하고 있는 모든 구조물의 구조와 기능을 평가할 수 있는 비침습적(non-invasive) 검사 방법이다. 혈관 조영술은 조영제를 사용하여 방사선(X-선)으로부터 얻어지는 영상을 통해 혈관의 상태를 확인할 수 있는 방법으로 카테터(catheter)를 검사하고자 하는 혈관에 위치시킨 후, 일정한 양의 조영제를 주사하여 조영제의 흐름으로부터 질환의 위치 및 진행 정도를 확인할 수 있으며, 검사와 함께 시술이 가능하다는 장점이 있다. CT혈관 조영술은 조영제를 주사하여 영상을 얻는 측면에서 혈관 조영술과 유사하며, 혈류의 흐름과 같은 정보를 확인할 수 없으나, 인체 전체에 대한 혈관 영상 획득이 가능하고, 획득한 영상정보에 대한 보정을 통해 3D 모델로 재구성할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1(a)는 혈관 초음파를 통해 얻은 결과를 나타내며, (b)와 (c)는 혈관 조영술과 CT 혈관조영술을 통해 얻은 결과를 나타낸다.



(a) sonography, (b) angiography, (c) CT angiography

Fig. 1. Methods for Vascular Examination

대부분의 검사 방법들은 2차원 영상으로 정보를 제공하거나 단순한 3차원 모델만을 제공하기 때문에 검사를 위한 정보가 부족하여 정확한 진단이 어려우며, 분석능력에 따른 신뢰도의 차이로 인해 검사자에 매우 의존적인 단점을 가지고 있다[4-6].

이러한 단점을 보완하고자 복부 대동맥류 탐색을 위해 CT 영상에서 대동맥을 찾고, 팽창 질환이 발생한 영역을 분할하여 이를 3차원 모델로 복원하는 방안[7]이 제안되었으며, 3차원 혈관 모델을 분석하여 혈관의 중심선을 찾고 중심선을 토대로 혈관 단면의 지름을 계산한 후, 계산결과를 그래프로 표현하는 방안[8]도 제안되었다. 또한, 재구성된 3차원 혈관 모델에 대해 곡률을 고려하여 모델을 곡면 단위로 분해한 후, 미리 정의된 혈관 형태와의 비교를 통해 주위에 비해 심하게 부풀어 오른 팽창 영역만을 탐색하는 방안[9]도 제안되었다. 그러나, 이러한 기존 방안들은 의료영상 및 3차원 혈관 모델에서 팽창 질환 영역만을 찾거나, 혈관 모델의 형태분석 정보만을 제공하여 진단을 위한 해석이 추가적으로 요구된다는 문제점을 가지고 있다. 아울러, 자동화된 혈관 질환 탐색과 관련된 연구가 많이 이루어지고 있지 않은 실정인데, 이는 진단의 전문성과 분석의 복잡성 및 정확도에 인한 것으로 사료된다.

본 논문에서는 3D 혈관 모델을 활용하여 협착 또는 팽창에 해당하는 혈관질환 의심 영역의 탐색 방안을 제안한다. 제안된 방안에서는 3D 혈관 내벽 모델로부터 생성된 3D 골격 곡선(curve-skeletons)의 노드들과 각 노드에 해당하는 외곽선(contour)이 활용된다. 기본 아이디어는 혈관 내벽 모델로부터 생성된 골격 곡선을 가지 단위로 분할한 후, 분할된 가지에 속하는 각 노드의 외곽선에 대한 면적을 계산한다. 그런 다음, 계산된 면적들을 활용하여 해당 가지에 대한 외곽선 평균 면적 및 최대/최소 면적, 그리고 인접 노드들 간의 면적 차이를 고려하여 혈관 의심 영역을 탐색하고 적절하게 시각화하는 것이다. 제안된 방안을 구현하여 몇 가지 3D 인체 혈관 모델에 적용해 봄으로써 제안된 방안의 유용성을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 협착 및 팽창 영역 탐색 방안의 전체적 과정을 설명하고, 혈관질환 영역 탐색을 위한 세부 과정들에 대해 설명한다. 3-4장에서는 제안된 방안의 구현환경 및 실제 인체 혈관 모델에 적용한 사례를 보이고, 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 혈관질환 의심 영역 탐색 방안

Fig. 2는 본 논문에서 제안하는 3D 혈관 모델 기반의 협착 및 팽창 영역 탐색을 위한 전체적 과정을 나타낸다. 먼저, 의료영상으로부터 혈관 영역을 추출하여 혈관의 복셀(voxel) 모델과 3D 메쉬 모델을 생성한다. 다음으로, 복셀 모델과 3D 메쉬 모델에 대해 복셀 세션화(voxel thinning)[10]와 함께 혈관 구조분석 과정을 수행하여 혈관에 대한 초기 3D 골격 곡선을 생성한 다음, 골격 곡선 노드(node)에 대한 외곽선을 얻는다. 이후, 획득한 외곽선들을 가지 단위로 분할하고, 분할된 가지에 속하는 외곽선에 대한 면적을 계산한다. 이를 활용하여 해당 가지의 외곽선 평균 면적 및 최대/최소 면적, 그리고 인접 면적과의 차이를 고려하여 혈관의 협착 및 팽창 질환 의심 영역을 탐색하여 시각화한다.

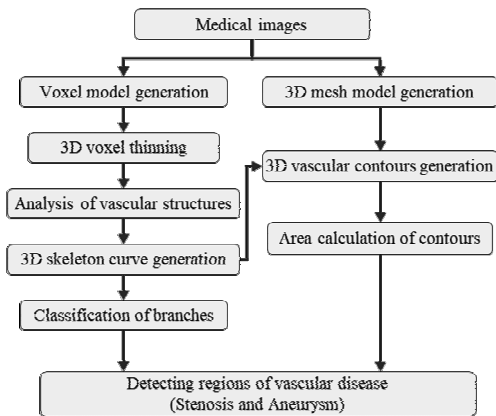


Fig. 2. Procedure for Detecting Regions of Stenosis and Aneurysm in a 3D Blood Vessel Model.

2.1 골격 곡선 및 외곽선 생성

혈관의 골격 곡선 및 외곽선은 혈관에 대한 복셀 모델과 3D 메쉬 모델로부터 생성이 가능하며, 이들 모델들은 의료영상으로부터 생성될 수 있다. 본 논문에서는 의료영상에서 특정 혈관에 해당하는 명암값(intensity) 영역을 찾고, 편집할 수 있는 간단한 GUI와 함께 영상처리 기술을 활용하여 혈관 영역을 추출한다. 그런 다음, 추출된 혈관 영역에 대해 이진화(binazation) 및 복셀화(voxelization)[11]를 수행하여 혈관 복셀 모델을 생성하고, 마칭큐브(marching cube) 방법[12]을 적용하여 혈관에 대한 3D 메쉬 모델을 생성한다.

의료영상으로부터 복셀 모델과 3D 메쉬 모델이 생성되면, 이들로부터 혈관에 대한 골격 곡선과 외곽선을 생성할 수 있다. 우선, 복셀 세션화를 통해 복셀 모델에 대한 골격 복셀 모델(thinned voxels)을 생성하고, 이를 분석하여 혈관의 골격 구조(가지점, 끝점, 분기점)를 파악한 다음, 골격 복셀 모델을 가지들(branches)로 분할한다. 가지의 양 끝점은 분기점 또는 끝점이 되며, 가지의 내부는 26-인접 복셀 수가 2개 이상인 복셀들로 이루어진다. 이후, 분할된 가지들에 대해 샘플링(sampling)과 평활화(smoothing) 과정을 거쳐서 3D 골격 다각형을 생성한다. 그런 다음, 생성된 3D 골격 다각형을 구성하는 노드들 중 분기점을 제외한 각 노드에서의 접선과 수직인 평면을 정의한 후, 평면과 3D 메쉬 모델간의 교차 외곽선들(contours) 중 해당 노드 점에서 가장 가까운 외곽선을 얻고, 이를 해당 노드에 대한 외곽선으로 정의한다. 이렇게 찾아진 외곽선을 활용하여 유효한 노드와 유효하지 않은 노드로 분류하는데, 유효한 노드의 경우 해당 외곽선에 대한 삼각화(triangulation)[13]를 이용하여 혈관 중심선에 가깝도록 노드 위치를 개선하고, 분기점 및 유효하지 않은 노드의 경우, 주변의 개선된 유효한 노드들을 활용하여 위치를 수정한다. 혈관 모델 생성 및 골격 곡선과 외곽선 생성에 대한 자세한 내용을 Park[14]이 제시한 혈관 골격 곡선 생성 방안을 참조 바란다.

2.2 혈관질환 의심 영역 탐색

혈관질환은 여러 가지 이유로 인해 관 모양을 띄는 혈관 내벽의 외형이 변형되는 것인데, 대표적인 혈관질환으로는 Fig. 3에서와 같이 혈관이 좁아지는 협착과 넓어지는 팽창이 있으며, 심장에서 혈액을 내보내는 동맥에서 주로 발생할 수 있다.

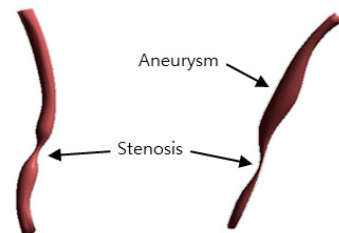


Fig. 3. Examples of typical vascular diseases.

이러한 혈관질환은 의료영상 또는 복원된 3D 혈관 모델의 외곽선을 통해 확인할 수 있다. 본 논문에서는 3차

원 혈관 모델로부터 생성된 골격 곡선과 외곽선 정보를 토대로 가지 노드의 외곽선 면적 변화 추이를 활용한 휴리스틱(heuristic) 탐색 기법을 고안하여 협착 및 팽창 질환 의심 영역을 찾는다. 여기서, 노드는 골격곡선에서 샘플링된 위치정보를 의미한다.

골격 곡선을 이루는 노드를 $p_i (0 \leq i \leq n)$ 라고 할 때, 노드 p_i 는 인접한 노드 간의 외곽선 면적 차이에 의거하여 협착 노드 또는 팽창 노드로 판정될 수 있다. 혈관의 협착 및 팽창 질환과 관련된 의심 영역 탐색은 다음과 같은 과정을 거친다.

- 1) 모든 노드 p_i 에 대한 외곽선의 면적 $A(p_i)$ 을 계산한다.
- 2) 면적 $A(p_i)$ 이 허용오차 식(1)보다 작은 경우, p_i 를 협착 질환 후보 노드 리스트에 저장하고, 식(2)보다 큰 경우 팽창 질환 후보 노드 리스트에 저장한다.

$$A_{st} = \alpha_{st} \times A_{avg} \quad (1)$$

$$A_{an} = \alpha_{an} \times A_{avg} \quad (2)$$

여기서, A_{avg} 는 혈관의 각 가지에 포함된 노드들에 대한 외곽선 평균 면적을 의미한다.

- 3) 협착 질환 후보 노드 리스트에 포함된 노드 p_i 에 대해 다음 조건을 만족하는 p_i 를 제거한다.

$$|A(p_{max}) - A(p_i)| \leq D_{st} \quad (3)$$

$$D_{st} = |A_{max} - A_{min}| \times \delta_{st} \quad (4)$$

여기서, $A(p_{max})$ 는 노드 p_i 와 인접한 노드들 $p_j (i-d \leq j \leq i+d)$ 중 가장 큰 면적을 가지는 노드를 나타낸다. 그리고, A_{max} 와 A_{min} 은 각각 혈관의 가지에 포함된 노드들에 대한 최대, 최소 외곽선 면적을 의미한다.

- 4) 팽창질환 후보 노드 리스트에 포함된 노드 p_i 에 대해 다음 조건을 만족하는 p_i 를 제거한다.

$$|A(p_i) - A(p_{min})| \leq D_{an} \quad (5)$$

$$D_{an} = |A_{max} - A_{min}| \times \delta_{an} \quad (6)$$

여기서, $A(p_{min})$ 은 노드 p_i 와 인접한 노드들 $p_j (i-d \leq j \leq i+d)$ 중 가장 작은 면적을 가지는 노드를 나타낸다.

위 절차에서 α_{st} 와 α_{an} 는 평균 면적 대비 협착/팽창률을 의미하는 것으로 각각 $0 \leq \alpha_{st} \leq 1$ 이고, $\alpha_{an} > 1$

이다. 그리고, δ_{st} 와 δ_{an} 는 면적 차이에 따른 분류를 위한 허용 면적 차이로 각각 $\delta_{st} < 1$ 이고, $\delta_{an} < 1$ 이고, d 는 면적 비교를 위한 p_i 의 인접노드 수를 나타낸다. Fig. 4는 Fig. 3의 혈관 모델에 대한 질환 영역 탐색 예제를 나타낸다.

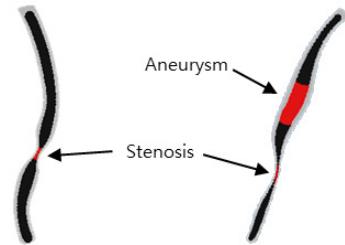


Fig. 4. Results of the detected regions.

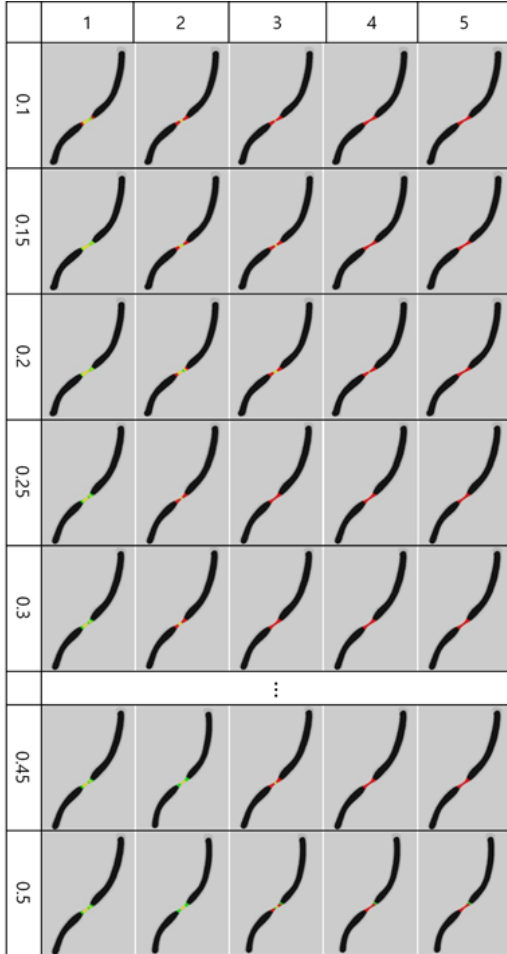
이러한 혈관질환 탐색을 위한 휴리스틱 탐색 방법은 몇 가지 파라미터들이 활용되며, 이들 파라미터는 범위에 따라 탐색 결과에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 적절한 파라미터의 범위 결정이 요구된다.

2.3 주요 파라미터 범위 결정

평균 면적 대비 협착 및 팽창률 α_{st} , α_{an} 은 사용자에 의해 질환 진행 정도를 결정하는 요소로 적절한 범위 결정이 요구되지 않으나, 주변 인접 노드 수 d 와 허용 면적 차이 δ_{st} 와 δ_{an} 은 인접 노드 면적 비교와 밀접한 관련이 있는 파라미터로 효과적인 혈관질환 의심 영역 탐색을 위해서는 적절한 범위 결정이 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 혈관 모델을 적용하여 이들 파라미터에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석을 위해 주변 인접 노드 수 d 의 범위를 1~5로 설정하고, 각 질환에 대한 허용 면적 차이 α_{st} , α_{an} 의 범위를 0.1~0.5로 설정한 후, 질환이 포함된 혈관 모델에 대해 d 는 1단위씩, α_{st} , α_{an} 은 0.05 단위씩 증가시켜 가며 각 파라미터의 변화에 따른 탐색 결과를 확인하였다. Table. 1과 2는 Fig. 2의 혈관 모델들에 대한 파라미터 변화에 따른 의심 영역 탐색 결과를 나타내는 것으로, 탐색결과는 후보 노드 영역과 후보 노드와 인접한 노드들 중 최소/최대 영역, 그리고 최종 탐색된 질환 의심영역으로 나뉘어 시각화 된다.

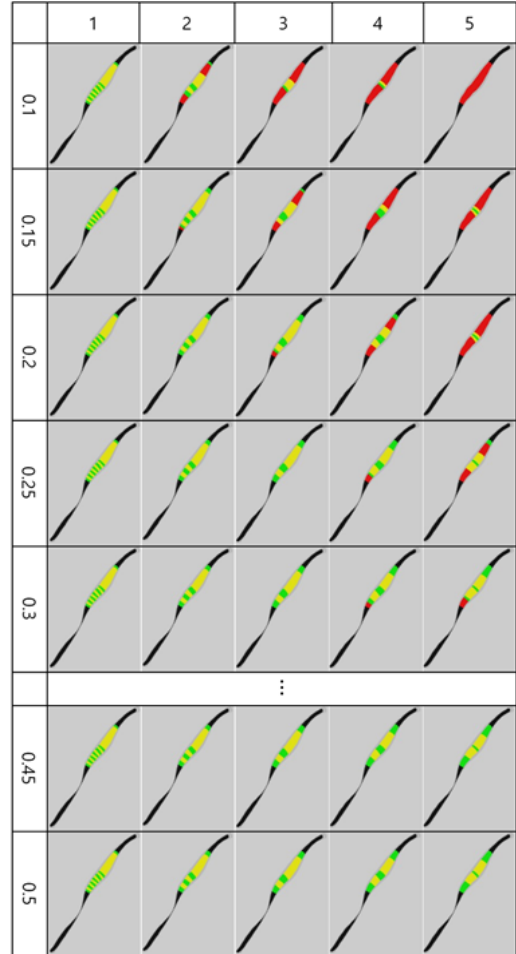
Table 1. Sensitivity analysis for stenoptic area



민감도 분석결과 주변 인접 노드 수 d 가 증가함에 따라 질환 의심 노드가 포함된 영역이 정확하게 탐색되는 반면, 각 질환에 대한 허용 면적 차이 α_{st} , α_{an} 가 증가할 수록 질환 의심 노드가 포함된 영역이 감소됨을 확인할 수 있다. 또한, 협착 및 팽창 영역을 탐색하기 위한 범위가 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 협착 질환과 팽창 질환을 탐색하기 위한 파라미터들의 범위가 다르게 적용되어야 하며, 각 질환에 맞는 적절한 범위가 요구됨을 의미한다.

협착 질환 의심 영역은 Table. 1에서와 같이 d 와 α_{st} 가 각각 2~5와 0.1~0.25 범위를 가질 때 대체적으로 정확하게 찾아지는 것을 알 수 있으며, d 가 커질수록 더 큰 α_{st} 의 범위가 요구됨을 알 수 있다. 또한, Table. 2의 팽창 질환 의심 영역의 경우, 좁은 범위의 $d(3\sim5)$ 와 α_{an}

Table 2. Sensitivity analysis for aneurysm area



(0.1~0.2)에서 탐색됨을 알 수 있다. 이는 좁은 영역을 가지는 협착 질환에 비해 팽창 질환은 질환 범위가 넓어 노드 면적 간의 차이가 크지 않기 때문으로 사료된다.

결과적으로 협착 질환과 팽창 질환은 d 와 α_{st} , α_{an} 의 범위가 각각 2~5와 0.1~0.25일 때와 3~5와 0.1~0.2일 때 탐색될 가능성이 높음을 알 수 있다. 그러나, 이렇게 도출된 파라미터 범위는 상황에 따라 다양한 크기의 영역을 가지는 혈관질환에 대한 정확한 탐색을 보장하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 질환 영역이 주요 파라미터 범위를 벗어나더라도 2.2절의 과정에 의해 탐색된 질환 후보 노드 영역(녹색)과 후보 노드 중에서 최소 또는 최대 면적을 가지는 노드 영역(노란색)을 통해 의심 영역을 시각화함으로써 질환 의심 영역을 인지 할 수 있도록 하였다. 이를 통

해 사용자는 제시된 파라미터 범위 내에서 간단하게 질환 의심 영역을 찾을 수 있다.

3. 제안된 방안 구현

본 논문에서는 Windows 기반의 C++와 OPENGL [15]을 활용하여 제안된 협착 및 팽창질환 의심 영역 탐색 방안의 테스트베드를 구현하였다. 테스트베드 구현을 위해 STL포맷 읽기/쓰기 기능, 분석 기능(삼각형들 간 인접관계, 모서리간 인접관계, 정점-삼각형, 정점-모서리 관계 등), 분석 정보를 활용한 골격곡선 생성 기능, 골격 분할 및 노드 생성 기능, 외곽선 면적계산 기능, 혈관질환 의심 영역 탐색 기능 등을 구현하였으며, 질환 탐색 결과의 즉각적인 인지를 위해 입력된 혈관 정보와 분석 결과 정보를 각각 시각화하였고, 각 기능들에 활용되는 파라미터들은 용이한 제어를 위해 UI를 통해 노출되도록 하였다. Fig. 5는 구현 결과를 나타낸다.

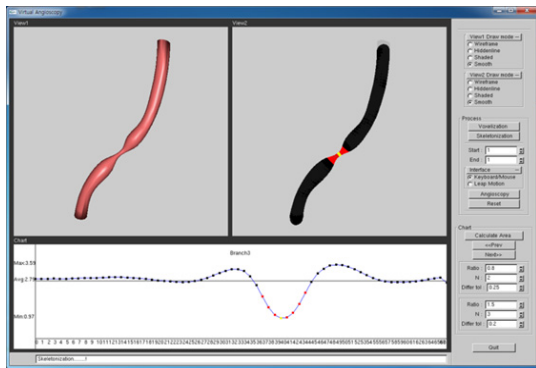


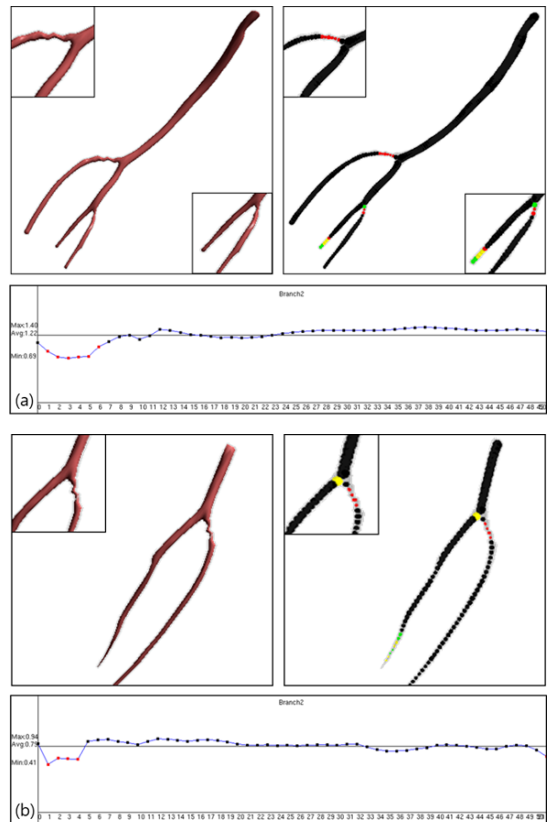
Fig. 5. Testbed for detecting the regions of vascular diseases.

Fig. 5의 하단에서와 같이 해당 가지의 최대, 최소, 평균과 각 노드에 대한 외곽선 면적 그래프를 분석결과로 생성하고, 이를 시각화한다. 또한, 탐색된 질환 영역의 위치를 3차원 공간상에서 혈관 모델과 함께 세 가지 영역(질환 의심 후보 영역, 후보 영역 중 최소/최대 영역, 질환 영역)으로 구분하여 시각화함으로써 직관적인 질환 영역 탐색을 지원할 수 있도록 하였다. 구현된 테스트베드에서 사용자는 범위가 제한된 몇 가지 주요 파라미터 (α_{st} , α_{an} , δ_{st} , δ_{an} , d)들을 조절하여 협착 및 팽창 질환 의심 영역을 탐색할 수 있으며, 시각화된 탐색 결과를 통

해 다양한 각도에서 확인하고, 면적 그래프를 토대로 질환의 진행 정도를 확인할 수 있다.

4. 적용 결과

제안된 협착 및 팽창 질환 의심 영역 탐색 방안의 유용성을 확인하기 위해 CT 혈관조영술을 통해 얻은 실제 의료 영상을 토대로 복원한 몇 가지 혈관 모델을 적용하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 협착 질환이 있는 하지동맥(종아리부위)과 슬와동맥(무릎부위) 일부에 대한 결과를 나타내며, Fig. 6(c)와 (d)는 협착과 팽창 질환이 있는 슬와동맥과 총장골동맥(골반부위) 일부에 대한 입력 모델과 탐색 결과 및 질환 영역이 존재하는 일부 가지에 대한 면적 그래프를 각각 나타낸다.



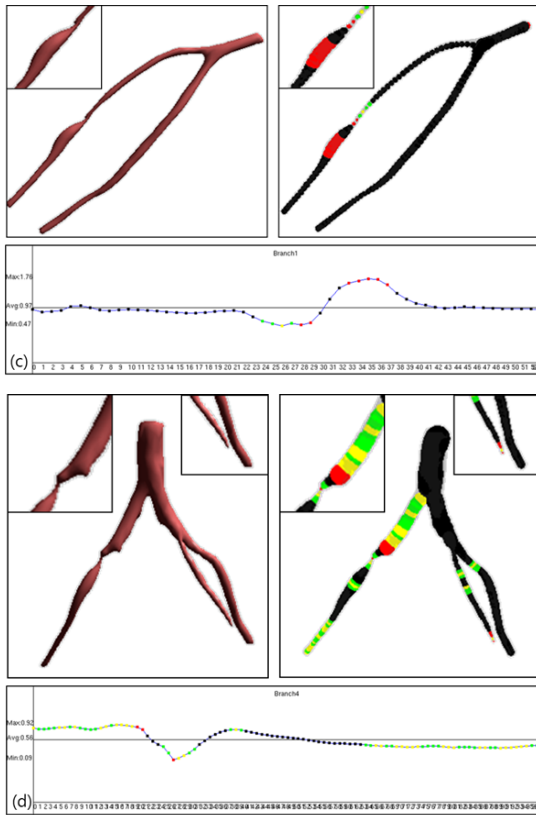


Fig. 6. Results of the detected regions of vascular diseases using the proposed method.

입력 모델로부터 협착 및 팽창 질환 의심 영역 탐색을 위해 파라미터(α_{st} , α_{an} , δ_{st} , δ_{an} , d)는 2.3절의 민감도 분석 결과를 토대로 동일한 범위를 적용하였다.

적용 결과, 다양한 형태의 혈관에 대해 동일한 파라미터 범위 값을 활용하여 찾고자하는 질환에 대한 탐색이 가능함을 확인 하였으며, 탐색 결과를 몇 가지 영역으로 구분하여 시각화함으로써 사용자는 정확한 혈관 질환 의심 영역을 보다 빠르고 쉽게 찾을 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

혈관질환인 협착 질환과 팽창 질환의 효과적 탐색을 위해서는 정확한 형태 분석과 함께 분석결과에 대한 직관적인 정보 전달이 요구되는데, 현재 시행되고 있는 대부분의 검사 방법들은 2차원 영상으로 정보를 제공하거나 단순한 3차원 모델만을 제공하기 때문에 검사를 위한

정보가 부족하여 정확한 진단이 어려우며, 분석능력에 따른 신뢰도의 차이로 인해 검사자에 매우 의존적인 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 의료영상으로부터 재구성된 3D 혈관 내벽 모델의 구조 및 형태 분석을 통해 생성된 골격 곡선과 외곽선을 활용하여 협착 및 팽창 질환 의심 영역을 효과적으로 탐색하는 방안을 제시하였다.

제안된 방안에서는 의료영상으로부터 혈관에 대한 복셀 모델과 3D 매쉬 모델을 재구성한 후, 분석을 통해 골격 곡선과 외곽선을 추출한다. 또한, 골격 곡선 상에 위치한 노드들의 외곽선에 대한 면적을 계산하고, 평균 면적, 최대/최소 면적, 인접 노드들과의 면적 차이를 고려한 간단한 휴리스틱 탐색 방법을 통해 협착 및 팽창 의심 영역을 탐색 한다. 질환 의심 영역 탐색 결과를 3차원 공간상에 혈관 모델과 함께 시각화하고, 가지 단위 면적 그래프를 제공해 줌으로써 빠르고 정확한 탐색을 지원한다.

제안된 방안을 토대로 테스트베드를 구현하였으며, 실제 혈관질환이 포함된 혈관 모델들에 적용하여 질환 의심 영역을 탐색해 봄으로써 유용성을 확인하였다. 제안된 방안은 기존의 2차원 영상으로 정보를 제공하거나 단순한 3차원 모델만을 제공하는 방안을 보완 및 대체할 수 있으리라 사료된다.

제안된 방안의 경우, 혈관 모델 분석을 위해 수행되는 복셀 세션화 결과가 탐색결과에 많은 영향을 미치며, 이를 위한 개선된 복셀 세션화가 요구된다. 따라서, 추후 연구에서는 안정적인 혈관 모델 분석을 위해 복셀 세션화 과정을 개선하고자 하며, 사용자 친화적인 기능의 개선을 통해 제안된 방안의 성능과 품질을 높이고, 전문가 및 의료기관과의 협업을 통해 질환이 포함된 다양한 혈관 모델을 확보하여 적용해봄으로써 기존 방안과 비교를 통해 정확도 및 품질을 확인해보고자 한다.

References

- [1] T. Ishii, N. Asuwa, S. Masuda, Y. Ishikawa, "The effects of a myocardial bridge on coronary atherosclerosis and ischaemia", *Journal of pathology*, vol. 185, no. 1 pp. 4-9, May, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9896\(199805\)185:1<4::AID-PATH50>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9896(199805)185:1<4::AID-PATH50>3.0.CO;2-3)
- [2] J. Shepherd, et al., "Pravastatin in elderly individuals at risk of vascular disease (PROSPER): a randomised controlled trial", *The Lancet*, vol. 360, no. 9346 pp. 1623-1630, November, 2002.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11600-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11600-X)

- [3] R. Clarke, L. Daly, K. Robinson, E. Naughten, S. Cahalane, B. Fowler, I. Graham, "Hyperhomocysteinemia: an independent risk factor for vascular disease", *New England Journal of Medicine*, vol. 324, Issue.17, pp. 1149-1155, April, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJM199104253241701>
- [4] J. K. Lee, Y. M. Kim, D. Y. Kim, "Segmentation and Visualization of Human Anatomy using Medical Imagery", *Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 191-197, 2013.
- [5] D. J. Brenner, E. J. Hall, "Computed tomography-an increasing source of radiation exposure", *New England Journal of Medicine*, vol. 357, no. 22, pp. 2277-2284, November, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMra072149>
- [6] R. R. Edelman, S. Warach, "Magnetic resonance imaging", *New England Journal of Medicine*, vol. 328, no. 10, pp. 708-716, 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJM199303113281008>
- [7] J. Dehmeshki, H. Amin, M. Ebadian-Dehkordi, A. Jouannic, S. D. Qanadli, "Computer Aided Detection and Measurement of Abdominal Aortic Aneurysm using Computed Tomography Digital images", *ICDS'09 Third International Conference*, pp. 339-342, February, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDS.2009.65>
- [8] J. Dehmeshki, A. Ion, T. Ellis, S. D. Qanadli, "Computer Aided Detection and Measurement of Peripheral Artery Disease", *Studies in Health Technology and Informatics*, pp. 1153-1157, August, 2014.
- [9] A. Chowriappa, et al, "3D Vascular Decomposition and Classification for Computer-Aided Detection", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60, no. 12, pp. 3514-3523, July, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2272721>
- [10] K. Palagyi, A. Kuba, "Directional 3D Thinning Using 8 Subiterations". *Proceedings Discrete Geometry for Computer Imagery. Springer Berlin Heidelberg*, pp. 325-336, April, 1999.
- [11] D. Haumont, N. Warzee, "Complete polygonal scene voxelization", *Journal of Graphics Tools*, vol. 7, no. 3, pp. 27-41, April, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10867651.2002.10487563>
- [12] W. E. Lorensen, H. E. Cline, "Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm". *ACM siggraph computer graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 163 - 169, July, 1987.
DOI: <https://doi.org/10.1145/37402.37422>
- [13] L. P. Chew, 1989, Constrained Delaunay Triangulations, *Proceeding SCG '87 Proceedings of the third annual symposium on Computational geometry*, pp. 97-108, June, 1987.
- [14] S. J. Park, H. Park, "Virtual Navigation of Blood Vessels using 3D Curve-Skeletons", *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 89 - 99, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7315/CDE.2017.089>
- [15] OPENGL, <https://www.opengl.org/>.

박 상 진(Sang-Jin Park)

[정회원]



- 2012년 8월 : 조선대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 조선대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2017년 4월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 박사후연구원

<관심분야>

VR/AR based post-processing, CAD/CAM Applications, 3D Model Construction Using Medical Images, Dental Biometrics, Virtual Angioscopy

김 재 성(Jae-sung Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2013년 2월 : 한국과학기술정보연구원 선임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원

<관심분야>

Modeling & Simulation, Product design, 슈퍼컴퓨팅, 제조 혁신

박 형 준(Hyungjun Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 2001년 2월 : 삼성 전자 중앙연구소 책임연구원
- 2008년 7월 ~ 2010년 2월 : UCLA 전산학과 방문교수
- 2014년 7월 ~ 현재 : 조선대학교 대학원 문화학과 겸임교수
- 2001년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 산업공학과 교수

<관심분야>

Geometric Modeling and Processing, Virtual Prototyping of Engineered Products, 3D Shape Reconstruction and Understanding, Mixed Reality, Biomedical Engineering Applications, CAD/CAM/CG Applications