

Studies of Automatic Dental Cavity Detection System as an Auxiliary Tool for Diagnosis of Dental Caries in Digital X-ray Image

Jangyong Huh*, Haewon Nam[†], Juhae Kim*, Jiman Park[‡], Sukyoung Shin*, Rena Lee[§]

*Medical Research Institute, Ewha Womans University, Seoul, [†]Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University, Incheon, [‡]Department of Dentistry, Ewha Womans University Medical Center, Seoul, [§]Department of Radiation Oncology, Ewha Womans University Medical Center, Seoul, Korea

The automated dental cavity detection program for a new concept intra-oral dental x-ray imaging device, an auxiliary diagnosis system, which is able to assist a dentist to identify dental caries in an early stage and to make an accurate diagnosis, was to be developed. The primary theory of the automatic dental cavity detection program is divided into two algorithms; one is an image segmentation skill to discriminate between a dental cavity and a normal tooth and the other is a computational method to analyze feature of an tooth image and take an advantage of it for detection of dental cavities. In the present study, it is, first, evaluated how accurately the DRLSE (Direct Regularized Level Set Evolution) method extracts demarcation surrounding the dental cavity. In order to evaluate the ability of the developed algorithm to automatically detect dental cavities, 7 tooth phantoms from incisor to molar were fabricated which contained a various form of cavities. Then, dental cavities in the tooth phantom images were analyzed with the developed algorithm. Except for two cavities whose contours were identified partially, the contours of 12 cavities were correctly discriminated by the automated dental caries detection program, which, consequently, proved the practical feasibility of the automatic dental lesion detection algorithm. However, an efficient and enhanced algorithm is required for its application to the actual dental diagnosis since shapes or conditions of the dental caries are different between individuals and complicated. In the future, the automatic dental cavity detection system will be improved adding pattern recognition or machine learning based algorithm which can deal with information of tooth status.

Key Words: Dental caries, Automatic dental cavity detection system, Level set methods, DRLSE

서 론

치아 우식증(Dental caries) 판별을 위해 가장 오래되고 일반적인 방법은 치과의사의 육안에 의존하는 것이다. 그러

나 이 방법은 눈으로 파악하기 어려운 초기 충치 변화, 치아 내부에 숨겨진 충치에 대해서는 병변 검출에 한계가 있고 치과의사의 주관에 많이 의존하게 된다. 그렇기 때문에 보다 객관적이고 정확한 병변 정보를 제공해 줄 수 있는 다양한 우식증 검출 시스템들이(caries detection system) 개발 되어왔다.¹⁾ 이러한 충치 검출 시스템에는 치아 조직에 따른 저항 특성을 이용한, Electronic caries monitor (ECM), 정상 치면과 탈회(demineralization)된 치면의 빛의 산란 특성을 이용한 fibre optic transillumination (FOTI), 형광(fluorescence light)을 이용한 qualitative light-induced fluorescence (QLF), 초음파를 이용한 ultrasonic caries detector (UCD), 그리고 물질 특성에 따른 X-선 흡수율을 이용한 X-ray 영상법이 있다.²⁾

디지털 X-선 방사선촬영술은(Radiograph) 치아 병변 진단을 위해서 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 그러나 X-

This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (10035527) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, KOREA), and the Nuclear Power Core Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No.20131510400050).

Received 10 March 2015, Revised 16 March 2015, Accepted 18 March 2015

Correspondence: Rena Lee (renalee@ewha.ac.kr)

Tel: 82-2-2650-5337, Fax: 82-2-2654-0363

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선 영상에서 주어진 정보는 다른 치아 우식증 검출 시스템들과 마찬가지로 노이즈와 영상외곽을 포함한 다양한 입력 정보로 얽혀져 있기 때문에(Convoluted image) 올바른 진단을 위해 필요한 치아 정보를 얻기 위해서는 결국 영상 분석이라는 과정이 요구된다.

일반적으로 치아우식증에 대한 진단은 관찰 가능한 치아 와동을 통해서 이루어진다. 그러나 치아우식증의 단계를 설명하기 위하여 Pitts에 의해서 사용된 빙산이론의 의하면 치아우식증은 와동이 형성되기 이전부터 시작되며,³⁾ 치아우식증의 초기 단계인 non-cavitated caries lesion 경우에는 x-선 영상에 의해서 판별이 불가능하다.⁴⁾

본 연구에서는 치아 우식증이 초기 단계를 벗어나 와동을 형성하기 시작하는 3 mm² 이상의 면적을 가지는 병변의 검출을 목표로 자동 치아 병변 검출 알고리즘을 구현하여 본 연구팀이 개발중인 신개념 강내형 치과 진단 장치에서 촬영한 X-선 디지털 영상 분석에 적용하였다.⁵⁾ 3 mm² 이상의 병변 크기는 국제 충치탐지 평가시스템[International Caries Detection and Assessment System (ICDAS)]의⁶⁾ 검출코드의 임상학적 score 2 이상의 와동을 탐지 할 수 있는 값이다.

치과 진단뿐만 아니라, 생의학이나 생의학정보학 분야에서 자동화된 계산 모형을(computational method) 이용해서 디지털 영상을 분석 하려는 많은 연구들이 있어 왔다. 적용되는 방법들은 필요로 하는 정보에 따라 다른 접근 방식을 요구하며 그와 관련하여 발생 되는 문제점들도 다른 특징을 가지고 있는데, 디지털 치과영상 분석에서는 다음과 같은 문제들이 자동 병변 검색을 어렵게 만든다. 대조도가 좋지 않거나 해상도가 낮아 영상의 질이 떨어지거나 복잡한 형태의 병변이나 치아 모형 그리고 치아와 병변 사이 또는 배경과의 모호한 경계면으로 인하여 영상 분할(segmentation)이 어려운 경우이다.⁷⁾ 최근 영상처리와 컴퓨터 비전 분

야에서는 이러한 복잡한 유형의 영상에서 공통된 특징을(textural features) 영상 분할하기 위한 방법으로 LSM (Level Set Method)^{8,9)}과 그것의 문제점을 보완한 DRLSE (Direct Regularized Level Set Evolution)¹⁰⁾ 알고리즘이 주목 받고 있다.

본 연구에서는 컴퓨터 기반의 치과 병변 자동 알고리즘을 개발하여 치과의사들의 치아 우식증 진단을 보조할 수 있는 치아 와동 검출 프로그램(dental cavity detection program)을 개발하려 하였다. 치아의 X-선 영상은 치아 와동과 주변과의 경계면이 모호하고 같은 조직 안에서도 치아의 두께 차이 등으로 인해 대조도가 다르기 때문에 치아 와동의 윤곽선을 정확하게 분별하기는 쉽지가 않다. 치아 우식증을 보다 빠른 단계에서 인지하고 정확한 진단을 보조할 수 있는 자동 검출 프로그램을 개발하기 위해서는 앞서 언급한 치아 영상들이 가지는 고유 특성 정보를 분석 처리하고 그것을 기반으로 능동적으로 병변을 탐지할 수 있는 추가적인 알고리즘이 필요하다.

그러나 이번 연구에서는 그에 앞서, 먼저, 수치해석 모형들 중 디지털 영상 분할에서 이미 검증된 받고 있는 DRLSE 방법을 적용하여 병변과 정상 치아 사이의 경계면 분할 성능을 테스트 하였다. 추후 연구에서는, 그러한 치아 영상의 특성 정보를 분석하고 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하고 영상 분할 프로그램과도 연계하여 치아 와동 검출 시스템의 성능 향상을 도모 할 예정이다.

재료 및 방법

1. 와동을 포함하고 있는 치아 팬텀 제작

치아 와동 자동 검출 프로그램은 구강 내 병변 진단 및 치료를 보조하는 시스템으로 촬영된 디지털 X선 영상에 대해서 3 mm² 이상의 치아 와동의 위치와 윤곽선(contour)

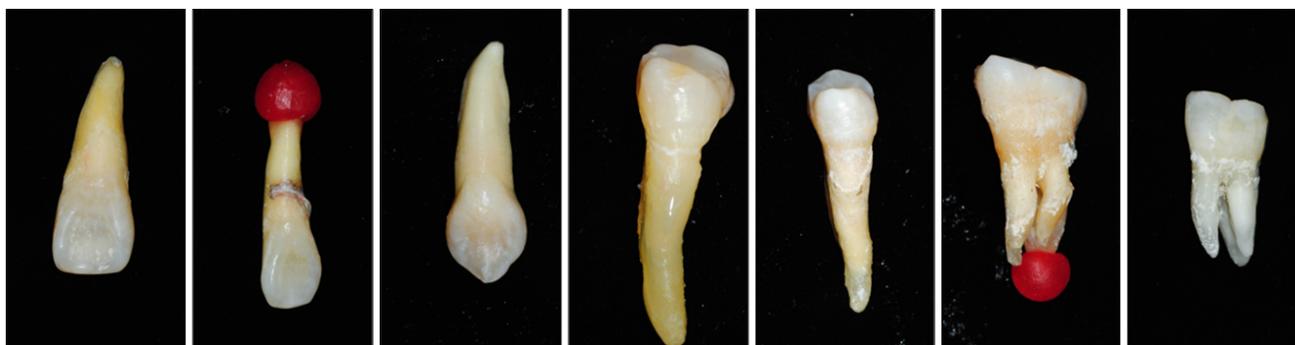
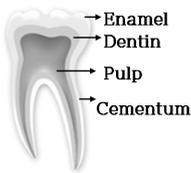


Fig. 1. Seven tooth phantoms: all contain cavities inside.

Table 1. Tooth status corresponding to ICDAS and four stages of tooth decay.

ICDAS score	0	1	2	3	4	5	6
Lesion stage		Initial Lesion		Moderate Lesion		Extensive Lesion	
Tooth status	Sound	Discoloration on enamel	Lesion on enamel	Caries on enamel	Discoloration on dentin	Lesion on dentin	Extension of lesion to pulp
Stages of tooth decay		C1		C2		C3	C4
							

을 구하고 치아 와동의 경계를 보여주는 것을 목표로 하였다. 개발된 영상 분할 알고리즘의 성능 테스트를 확인하기 위해서 Fig. 1에서 보듯이 서로 다른 형태와 모형을 가지는 치아 와동을 포함하고 있는 7개의 팬텀 치아를 제작하였다.

치아 와동은 크기는 일반적으로 치과에서 사용되고 있는 치아 와동 진행 4단계를 참조 하였다. Table 1은 치아와동 진행 4단계와 국제 충치탐지 평가시스템(ICDAS)에서 정의 되어 있는 와동 탐지 기준을 비교 하고 있다. ICDAS 스코 어 1에서는 충치(cavity)가 생성되기 전으로 법랑질의 변색으로 인해서 치아와동의 전조 증상이 나타나지만 X-선 영상에서는 구별이 되지 않는다. 이번 연구는 X-선 영상에서 인지가 되는 치아와동 진행 C1에서 C3 단계의 치아와동 팬텀을 제작하였다(C4 단계는 육안으로 쉽게 구별이 되기 때문에 제외하였다). 전치 2개, 견치 1개, 소구치 2개와 대구치 2개, 총 7개 치아에 대해 각각 C1에서 C3 단계의 충치 2개씩 14개를 임의로 삽입/제작하였다.

2. 치아 x-선 영상에 따른 치아 와동의 위치와 윤곽선 추출 알고리즘

치아 영상을 보고 바로 와동의 위치를 추정하기는 쉽지 않다. 와동의 위치 추정을 위하여 일단 치아의 전체 부분을 세분화하여 윤곽을 그린다. Fig. 2와 같이 외곽 경계치를 구한 뒤 외곽으로부터 시작되는 안으로 들어가는 작은 윤곽선의 위치를 추정한다.

3. 치아 와동의 윤곽선 알고리즘

충치의 윤곽선 추출 알고리즘은 세분화 알고리즘의 대표적인 방법인 동적 윤곽선(active contour) 방법으로 접근하였다.¹¹⁾ 동적 윤곽선 방법 중의 하나인 레벨셋(level set) 함수

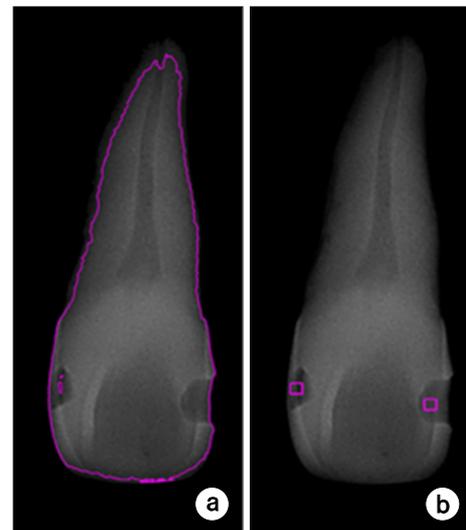


Fig. 2. (a) Contour of the tooth. (b) Initial points in the cavities where the rectangular contour starts to evolve outside of the cavities.

를 이용하여 윤곽선을 구성하는 Chan-Vese 모델을 사용하였다.¹²⁾ 도메인 Ω 위에서의 주어진 영상을 $u_0 : \bar{\Omega} \rightarrow R$ 라고 할 때 영상을 세분화하기 위하여 함수 $\phi : \Omega \rightarrow R$ 를 레벨셋 함수라고 정의한다. 함수 ϕ 로 세분화 되는 영역은 위의 그림에서와 같이 함수 $\phi > 0$ 일 때를 윤곽선의 안쪽 부분, $\phi < 0$ 인 영역을 윤곽선의 바깥 부분, 그리고 경계를 $\phi = 0$ 이라고 정의한다. 이 방법의 가장 큰 장점은 윤곽선의 성질에 관계 없이 초기 윤곽선을 잡아도, 그림과 같이 위상공간(topological) 성격이 다른 영역으로도 수렴한다는 점이다. 우리가 구하고자 하는 충치의 윤곽선은 레벨셋 함수 $\phi = 0$ 을 찾고자 한다.

기본 에너지 함수(based energy functional)영역 세분화를

위한 에너지 함수는 DRLSE를 사용하였다. DRLSE는 거리 정규화(distance regularized) 항을 에너지 함수에 포함시켜 LSM에서 필요한 재초기화(reinitialization) 과정을 생략하여 수렴의 안정성과 시간을 향상시킨 개선된 LSM으로 다음과 같이 정의한다.

$$E(\phi) = \mu R_p(\phi) + E_{ext}(\phi)$$

여기서 $R_p(\phi)$ 는 정규화 부분이고, μ 는 양의 상수, 외부 에너지 함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$E_{ext}(\phi) = \int_{\Omega} |u_o - c_1|^2 H(\phi) dx + \int_{\Omega} |u_o - c_2|^2 (1 - H(\phi)) dx$$

위의 식에서 함수 H는 Heaviside 함수이고, 상수 c_1, c_2 는 그 영역에서의 평균값을 의미한다. 정규화 함수 $R_p(\phi)$ 는 에너지밀도 함수 p를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$R_p(\phi) = \int_{\Omega} p(|\nabla \phi|) dx$$

에너지 최소화 알고리즘에 의해서 레벨셋 함수를 구하고, 그에 따른 영역을 구할 수 있다.

4. 에지 기반의 동적 윤곽선(edge-based active contour) 모델¹³⁾

영상분할의 효과를 극대화하기 위한 선행 작업으로 영상

에지(edge)에 대한 최적화 작업이 필요하다. 에지 함수를 정의하고 에지 정보를 넣어 준다. 에지 함수는

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla G_{\sigma} * u_0|^2}$$

로 정의 하였다. 여기서 G_{σ} 는 가우시안 함수를 의미한다. 에지 함수 g는 에지에서 0에 가까운 함수값을 갖는다. 에지를 조금 더 세밀하게 찾기 위해 가우시안 스무딩(Gaussian smoothing)을 하는 대신 일관성 필터(coherence filter)를 사용하여 에지를 보존하면서 스무딩을 하고, 에지 함수를 적용하였다. 일관성 필터는 이미지의 기울기(gradient) 방향으로 스무딩하여, Fig.에서의 에지를 무너뜨리지 않고 스무딩하는 기법이다. Fig. 3a의 이미지의 가우시안 스무딩을 이용한 에지 함수 Fig. 3b와 일관성 필터를 이용한 에지 함수 Fig. 3c를 비교해 보면 Fig. 3c의 경우에 세밀한 에지를 잘 찾는 결과를 확인할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 알고리즘에서의 에너지 함수는 최종적으로 다음과 같이 정의 되었다.

$$E(\phi) = \mu R_p(\phi) + \lambda L_g(\phi) + \alpha A_g(\phi)$$

$$L_g(\phi) = \int_{\Omega} g \delta(\phi) |\nabla \phi| dx$$

$$A_g(\phi) = \int_{\Omega} g H(-\phi) dx$$

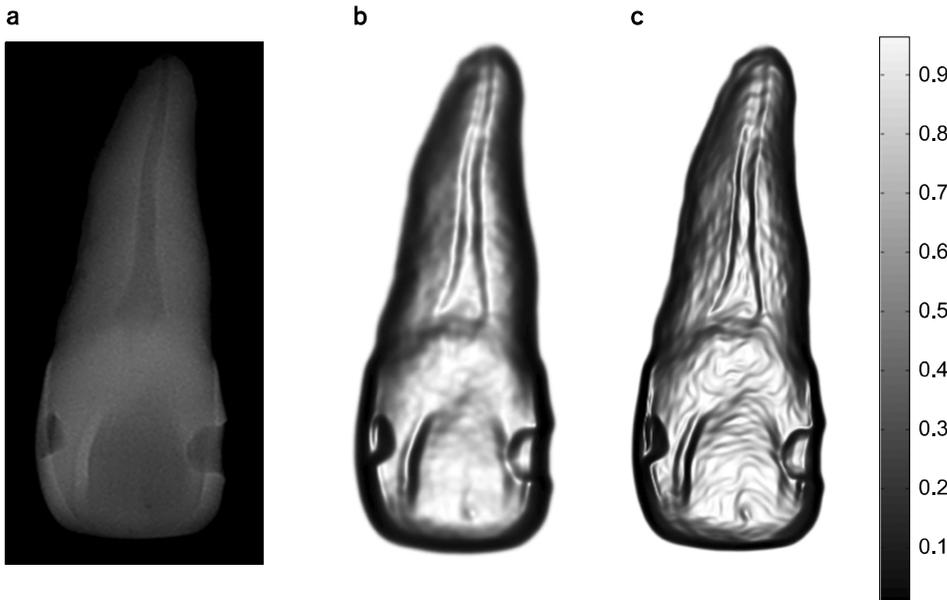


Fig. 3. (a) Dental X-ray image, (b) Edge function by Gaussian smoothing, and (c) Edge function by coherent filter.

결 과

서로 다른 형태의 치아 와동을 포함하고 있는 치아 번호 1번부터 7번까지의 팬텀 치아에 대하여 개발된 치아 와동 자동 검출 프로그램을 사용하여 치아 와동의 윤곽선을 측

출 하고자 하였다. 각기 다른 치아 종류와 내부 조직 그리고 치아 와동 모양을 가지도록 제작된 치아 팬텀은 불균일하고 다양한 대조도와 선명도를 가진 x-선 영상을 생성하여 Fig. 4에서 보듯이 실제 치아 영상과 최대한 유사한 영상을 만들어 냈으며, 개발된 치아 병변 자동 검출 프로그램의 실효성과 유연성 테스트를 위한 유용한 데이터를 제공

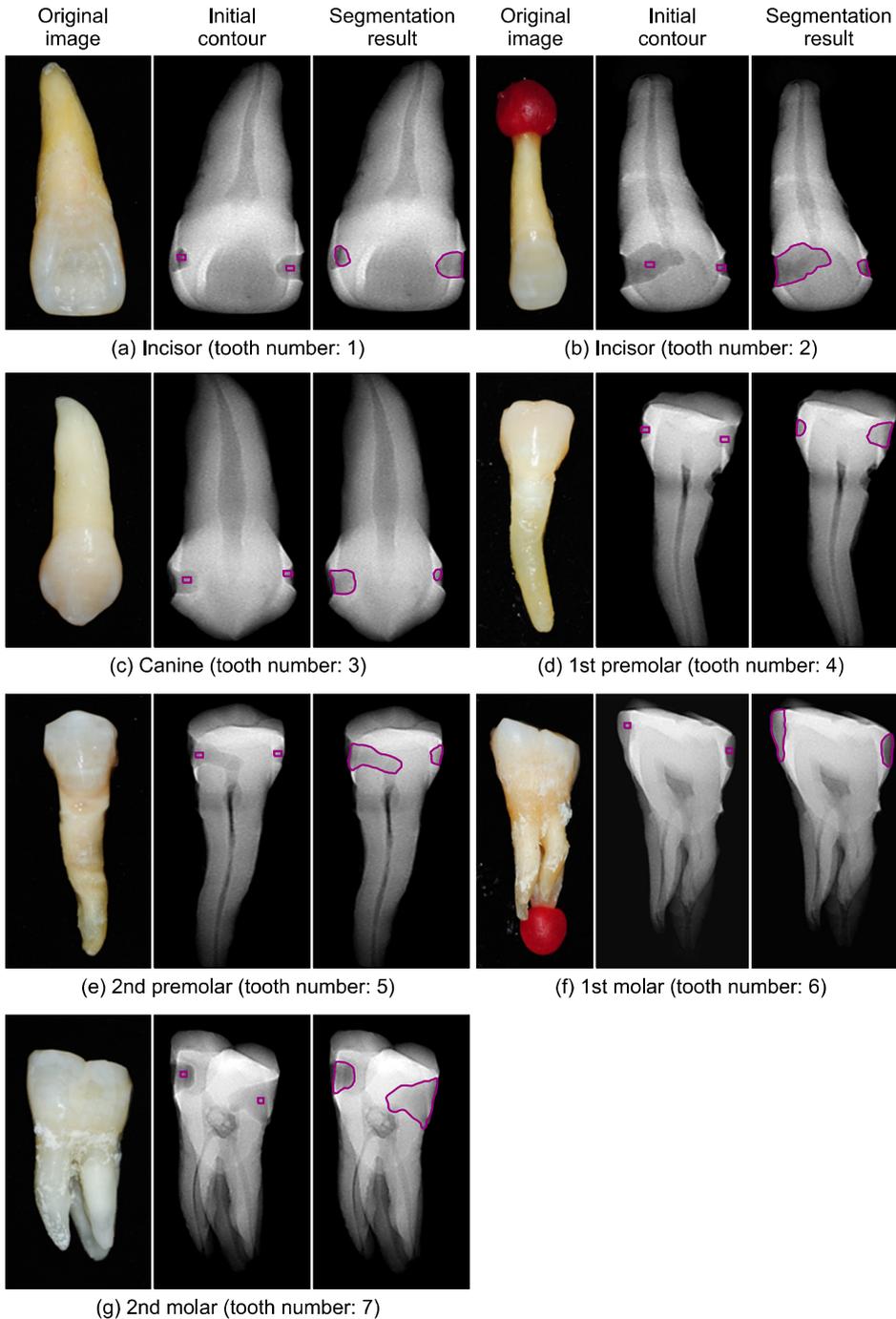


Fig. 4. The dental cavities of the 7 tooth phantoms are segmented from the 7 tooth phantoms after being applied edge-based active contour algorithm.

하였다.

불균일한 대조도, 혹은, 뚜렷하지 못한 선명도에 의하여 와동과 치아 부근에서의 경계면의 불분명한 윤곽선을 강화하기 위하여 먼저 일관성 필터를 적용하였다. 이를 통해서 균일하지 못한 와동 조직 내부 혹은 치아 조직을 개별적으로 스무딩 처리하여 두 조직 사이의 경계면이 뚜렷하게 구분될 수 있도록 하였다. 그렇게 함으로써 와동 내부에 주어진 초기 윤곽선이 와동 경계면까지 멈추진 않고 확장할 수 있도록 하였다. Fig. 4a에서 4g 까지 보듯이 이러한 와동 검출 방법은 팬텀 치아에 대해서는 매우 효과적으로 작용하여 정확하게 와동의 경계면을 인식하였다. 그러나 Fig. 4a의 좌측과 4c 우측에 형성된 와동의 경우처럼 내부 조직 내에 현저한 대조도의 단절면이 형성되었을 때에는 일관성 필터에 의한 스무딩이 효과를 발휘하지 못하여 초기 윤곽선이 와동 경계면까지 확장을 하지 못하고 와동 내의 단절면에서 멈추어 버렸다. 이 경우는 DRLSE 방법에서의 에너지 함수 파라미터 값인 μ , λ , α 등을 조절하여도 정확한 와동 윤곽선을 찾지 못하였다. 이러한 알고리즘에서 나타나는 오류에 대한 원인은 다음 2가지로 분류 할 수가 있겠다. 첫 번째는 치아에서 와동 내에서의 intensity 차이가 커서 층치의 일부만 찾는 경우이며, 두 번째는 위치 추정에서 와동의 중간을 찾지 않고 경계부분을 찾았을 경우, 와동의 경계를 넘어 치아의 부분까지 찾는 경우이다. 이러한 경우를 제외하고는 치아 와동 자동 검출 프로그램에 사용된 수치해석 알고리즘은 치아 와동의 경계를 정확히 찾았다.

DRLSE 방법에 의한 와동 영상 분할이 보다 효과적 이기 위해서는 먼저 경계면에 대한 윤곽선이 명확하게 구분 되어져야 한다. 와동 내에 intensity 차이가 커서 같은 조직 내에서도 경계면이 뚜렷이 발생하는 경우에는 일관성 필터 만으로는 와동 조직을 균일하게 만들 수가 없다. 치아 와동 윤곽선을 효과적으로 분할하기 위해서는 일관성 필터 같은 영상 처리 기법 이외에도 다양하고 많은 치아와 와동 데이터 축적과 그것의 분석 방법 개발을 통해서 같은 조직 내의 intensity 차이와 다른 조직 간의 intensity 차이를 구별할 수 있는 알고리즘이 요구되어 진다.

고찰 및 결론

본 연구에서는 표면 또는 경계면의 운동을 수치해석 모형으로 구현한 DRLSE 모형을 이용하여 구내 병변 자동진단을 위한 치아의 병변 분할 알고리즘을 개발하여 치아 병

변 자동 시스템에서 활용 가능성을 알아보았다. 기본적인 영상 분석 과정은 먼저, 원본 영상(raw image)의 불균일한 영상의 처리를 위하여 일관성 필터를 전처리로 행하여 에지 함수를 구하고, 주어진 치아 와동의 초기 위치를 바탕으로 snake 모델에 기반한 Chan-veese 모델을 이용하여 세분화 알고리즘을 수행하였으며 DRLSE 모델을 이용하여 병변 경계면의 윤곽선을 찾아 표시하였다.

선택된 팬텀의 와동의 경계면은 명확하게 구분 하였으나 와동내의 대조도의 차이가 크게 나타나는 경우에는 일부분만을 찾는 오류가 발생하는 것을 확인 하였다. 이 처럼 정확하게 경계면을 찾지 못한 두개의 와동의 경우는 병변 내에서도 대조도의 차이가 발생할 수 있다는 것을 고려하지 않았기 때문에 대조도 차가 있는 경계면을 에지로 인식해서 발생한 것으로 생각된다.

와동 자동 검출 시스템은 디지털 x-선 장비로부터 얻어진 영상을 컴퓨터 자동화 알고리즘을 통해서 분석하여 보다 정확하고 빠르게 진단 및 치료 과정을 지원하는 시스템으로써 본 연구에서는 DRLSE 모형을 치아 팬텀 모델에 적용하여 병변 윤곽선 추출에 대한 성능을 테스트 하였다. 실제 치아구조는 보다 복잡하고 같은 병변 안에서도 대조도가 다르기 때문에, 향후 연구에서는 대상 치아에 대한 사전 정보(prior information) 데이터베이스를 구축하고 패턴 인식(pattern recognition) 혹은 기계학습(machine learning) 알고리즘을 추가하여 보다 효과적이고 정확한 병변 알고리즘으로 개선할 예정이다. 또한, 병변 검출 시간을 줄이기 위해서 초기 병변 위치 값이 주어지는 반자동 검출 방식에서 초기 위치 값이 없이도 전체 영상을 조사하여(scan) 자동으로 병변 검출을 하는 알고리즘을 개발할 예정이다.

References

1. **Bennett T. Amaechi**: Emerging technologies for diagnosis of dental caries: The road so far, J. Appl. Phys. VOL 105 (2009) 102047-1 - 102047-9
2. **Iain A. Pretty**: Caries detection and diagnosis: Novel technologies, Journal of Dentistry, VOL 34 (2006) 727-739
3. **Nigel B. Pitts et al**: Clinical Diagnosis of Dental Caries: A European Perspective, J. Dent. Educ., VOL 65, NO. 10, (2001) 972-978
4. **Juliana Gomez, et al**: Non-cavitated carious lesions detection methods: a systematic review, Community Dent. Oral. Epidemiol., VOL 41, (2013) 55-66
5. **Sungho Cho, et al**: Introduction of Dental X-ray Imaging with New Concept - intra Oral x-ray Tube, J. Inst. Electron Eng. Korea SC, VOL 48, NO.4, (2011), 94-101

6. Nigel B. Pitts and Kim R. Ekstrand: International Caries Detection and Assessment System (ICDAS) and its International Caries Classification and Management System (ICCMS) – methods for staging of the caries process and enabling dentists to manage caries, Community Dent. Oral. Epidemiol., VOL 41, (2013) e41–e52
7. Shuo Li, et al: An automatic variational level set segmentation framework for computer aided dental X-rays analysis in clinical environments, Comput. Med. Imaging Graphics, VOL 30. (2006) 65–74
8. Stanley Osher and James A. Sethian: Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton–Jacobi formulations, J. Comput. Phys. VOL 79, (1988) 12–49
9. Stanley Osher and Ronald P. Fedkiw: Level set methods: an overview and some recent results. J. Comput. Phys. VOL 169, (2001) 463–502
10. C. Li, et al: Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation. IEEE Transactions on Image Processing, VOL. 19, No.12 (2010) 3243–3254
11. Michael Kass, et al: Snake: Active Contour Models, Int. J. Computer Vision, VOL 1, NO. 2(1988) 321–331
12. Tony F. Chan and Luminita A. Vese: Active contours without edges, IEEE Trans. Image, VOL 10, NO. 2(2001) 266–277
13. Caselles Vincent, et al: Geodesic active contours, Int. J. Computer Vision, VOL 22, NO. 2(1997) 61–79

디지털 X-선 영상을 통한 치아우식증 진단 보조 시스템으로써 치아 와동 자동 검출 프로그램 연구

*이화여자대학교 의과학과, †연세대학교 글로벌 융합 기술원, ‡이화여자대학교 목동병원 치과,
§이화여자대학교 의과대학 이대목동병원 방사선종양학교실

허장용* · 남혜원† · 김주혜* · 박지만‡ · 신석영* · 이레나§

본 연구팀이 개발한 신개념 강내형 치과 진단 장치에서 촬영한 X선 치아영상으로부터 치아 우식증을 조기 단계에서 판별하고 치과의사의 정확한 진단을 돕기 위해서 병변진단 보조시스템인 치아 와동 자동 검출 프로그램을 개발하고자 하였다. 치아 와동 자동 검출 시스템을 구성하고 있는 기본 알고리즘은 치아 와동과 정상 치아를 구분 할 수 있는 영상 분별 알고리즘과 치아 영상의 고유 특성 정보를 분석하고 이를 병변 검출에 적용할 수 있는 알고리즘으로 나눌 수가 있는데, 본 연구에서는 먼저, DRLSE 방법을 적용하여 병변과 정상치아 사이의 윤곽선 분할 성능을 테스트 하였다. 개발된 알고리즘의 와식 판별 성능을 테스트하기 위해서 다양한 형태의 와식을 포함하는 전치, 견치, 소구치 등의 7개의 치아 팬텀을 제작하고 치아 와식 분별을 실시하였다. 총 14 개의 와식 중에 와식의 경계를 부분적으로 식별한 2개를 제외하고는 12개 와식의 경계를 정확하게 구별하여 개발된 자동 치아 병변 알고리즘의 가능성을 입증하였다. 그러나 실제 치아 와식의 형태는 개개인마다 다르고 복잡하기 때문에 무작위로 선택된 실제 치아에 적용하기 위해서는 보강된 알고리즘이 필요하다. 향후에는 치아에 대한 사전정보를 처리하고 적용하는 패턴 인식 혹은 기계학습 알고리즘을 추가하여 보다 효과적이고 정확한 병변 알고리즘으로 개선할 예정이다.

중심단어: 치아 우식증, 치아 와동 자동 검출 시스템, 레벨셋 방법, 거리정규화레벨셋