적응 최적 임계화 방법의 CT영상에서의 치아 분리

허훈, 채옥삼
경희대학교 전자계산공학과

The Segmentation of Teeth in CT Images by Adaptive Optimal Threshold

Hoon Heo, Ok-Sam Chae
Dept. of Computer Engineering, Kyunghee University

요 약

CT영상으로 골조직이나 특정 기관의 3차원 모델을 재구성하는 연구는 큰 진전을 이루어 현재는 진료나 치료계획 수립에 없어서는 안될 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 기존의 방법으로는 교정이나 시술 시뮬레이션을 위해서는 치조골과 치아를 개별적으로 분리해서 모델링해야하는 치과분야의 요구를 만족시키는 데는 어려움이 있다. 치아와 치조골의 경계를 정확하게 분리하여 개별적으로 조작이 가능한 치아모델을 생성하기 위해서는 슬라스별로 두 영역을 분리할 수 있는 최적의 임계치가 결정되어야 한다. 본 연구에서는 좁은 간격으로 촬영한 연속적인 CT 영상 슬라이스들 사이에서 치아들의 형태와 임계값이 점진적으로 변하는 성질을 이용하여 각 슬라스별로 최적의 임계치를 결정하여 치아영역을 분리하는 적응적인 최적 임계화 방안을 제안한다.

1. 서론

일정 간격으로 연속적으로 촬영된 CT 영상 슬라스들로부터 구성된 치아나 골조직의 3차원 모델은 의료분야에서 없어서는 안될 중요한 역할을 하고 있다. 최근 치과분야에서도 임플란트를 비롯한 여러 진료와 치료계획 수립에 CT 영상으로부터 재구성된 3차원 모델이 활용되고 있다.[1,2,3] 치료와 시술계획을 위한 3차원 모델은 환자의 치아 상태를 정확하고 사실적으로 표현하여야 한다. 또한 교정과 같은 시술 시뮬레이션을 위해서는 치아가 개별적으로 조작될 수 있어야 하기 때문에 각 치아가 치조골과 독립적으로 정확히 모델링 되어야 한다. 각 치아를 개별적으로 정확하게 모델링하기 위해서는 각 슬라이스별로 치아와 치조골 영역을 정확하게 분리할 수 있어야 한다. 특히 치과병원에서 이루어지는 시술이 대부분 치아단위로 이루어진다는 것을 감안하면 치아단위의 정확한 분리가 이루어져야 한다. CT영상에서 치아가 정확히 분리되기 위해선 검출된 치아 경계에 치조골과 같은 다른 티슈의 경계가 섞이지 않아야 한다. 따라서 치아가 개별적으로 정확하게 분리될 수 있는 영역분할(segmentation) 알고리즘이 필요하다.

CT영상으로터 조직의 3차원 구조를 재구성하기 위한 기존의 연구는 주로 연조직(soft tissue)과 골조직(hard tissue)을 구분하는데 초점이 맞추어졌다. 따라서 재구성을 위한 영역분할 방법도 CT 영상에서 뚜렷한 밝기 차이가 나는 연조직과 골조직을 분리하기 위한 전역 임계화(global thresholding)이 주를 이루고 있다.[1,2] 그러나 유사한 밝기값을 가진 치조골과 접해있는 치아를 전역 임계화 방법으로 치조골로부터 분리하는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 Liu[2]는 연속적인 CT 영상들 사이에서 치아의 형태가 점진적으로 변한다는 사실을 이용하였다. 먼저 기준 프레임에서 치아의 경계를 추출하여 spline으로 근사화하고 다음 영상에서 치아 경계를 추출하는데 사용하였다. 그러나 이 경우에도 임계화를 통해서 추출된 치아의 경계를 바탕으로 spline 근사화가 이루어지기 때문에 치조골과 치아를 분리하는 임계치 결정은 여전히 문제로 남는다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하여 치조골과 같은 치아외의 조직에서 정확한 치아 경계를 얻기 위한 적응 최적 임계화 방안을 제시한다. 적응 최적 임

계화는 전역 임계화와 달리 치아마다 임계값을 동적으로 결정하여 영상내 모든 치아들을 정확하게 분리할 수 있도록 한다. 각 슬라이스에서 치아별로 결정된 임계값들은 연속된 다음 슬라이스에 전달되어 새로운 임계값을 결정할 수 있도록 함으로써 슬라이스마다 그리고 치아마다 치아와 치조골의 경계를 정확하게 분리할 수 있도록 하였다.

2. 치아 분리를 위한 임계값 결정

치아 영역을 정확하게 분리하기 위해서는 슬라스별로 그리고 각 치아별로 최적의 임계치를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위해서 다음 의사코드의 영역분할 방안을 제안한다.

(1). 기준영상 분할 및 초기화
(2). 다음 영상의 치아별 임계화, 경계추출
(3). 최적 임계치 계산
(4). 임계치 예측
(5). 다음 영상의 처리를 위해 단계(2)로 이동

제안된 방법에서는 영상 슬라이스들 중에서 치조골이 존재하지 않고 치아들이 분리되어 있는 중간 슬라스를 기준 프레임으로 선택하여 각 치아별 기준 영역을 초기화한 다음 시작된다. 초기화 과정에서는 각 치아별로 추출된 경계정보를 바탕으로 최적의 임계치를 계산하여 다음 슬라이스의 임계화 과정으로 전달한다. 임계화 과정에서는 전달된 임계치를 바탕으로 치아별로 경계가 추출되고 이 정보는 다음 슬라이스를 위한 새로운 임계치 계산을 위해서 전달된다. 임계치는 슬라이스간 임계치가 점진적으로 변한다는 사실에 근거하여 현재 슬라이스의 임계치와 이전 슬라이스의 임계치를 바탕으로 다음 슬라이스의 임계치가 예측된다. 다음에 현재 슬라이스에서 분할된 치아정보를 바탕으로 다음 슬라이스를 위한 임계치 결정 방법을 간단하게 기술한다.

2.1 치아와 치아 외부의 히스토그램 생성

현재 영상 슬라이스를 위한 임계치가 주어지면 이것을 이용하여 해당 치아영역이 분할된다. 치아영역이 성공적으로 분할되면 분할된 영역정보와 입력영상을 바탕으로 현 슬라이스에서 치아와 비치아를 분할하기 위한 최적의 임계치를 구할 수 있다. 임계치가 구해지면 이를 바탕으로 다음 슬라이스에서의 임계치를 예측할 수 있다. 전 슬라이스에서 전달된 임계치는 전 슬라이스의 치아정보를 바탕으로 예측된 것이기 때문에 현 슬라이스에서는 최적의 임계치라 할 수는 없다. 따라서 다음 슬라이스를 위한 임계치를 계산하기 위해서는 보다 정확한 임계치를 구할 필요가 있다. 정확한 임계치 계산을 위해서 본 연구에서는 분할된 치아영역의 안쪽과 바깥쪽 영역의 밝기 분포를 바탕으로 하는 최적임계화 방법[4]을 채택하였다.

정확한 임계치 결정을 위해서는 경계의 밖과 안의 분포가 bimodal 형태를 갖는 것이 바람직하다. 이를 위해서 그림1(a)와 같이 분할된 치아의 경계를 따라 추적하면서 경계 양쪽 영역의 화소들을 취해서 치아와 비치아 영역의 히스토그램을 생성한다. 단 뚜렷한 bimodal 분포를 생성하기 위해서 경계에서 일정 거리에 있는 화소를 취함으로서 경계상의 화소가 히스토그램에 들어가는 것을 배제하였다.

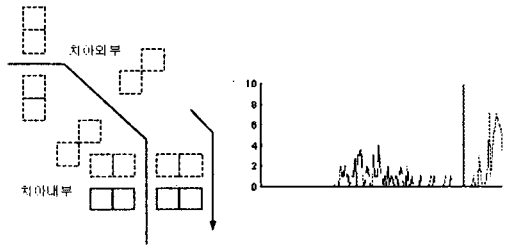

그림 1. (a). 경계를 추적하면서 치아 내부와 외부 화소의 결정 (b). 치아경계 영역의 히스토그램

그림1(a)에서 보는 것처럼 치아 경계의 방향이 결정되면 경계 내부와 외부의 화소를 자동으로 구별하여 할당할 수 있다. 본 연구에서는 FMILL tangents로 치아 경계의 방향을 구하였다.[5] 즉, 치아 내부의 화소 2개와 치아 외부의 화소2개의 위치를 정하여 경계를 추적하면서 이 화소들을 치아 내부와 외부의 화소 그룹으로 나눈다. 그림1(b)는 이렇게 생성된 히스토그램의 예를 보여준다.

2.2 개별 치아의 최적 임계화

치아 경계를 중심으로 치아 내부와 외부의 히스토그램이 얻어지면 최적 임계화 방법으로 치아와 치아 주위의 조직을 분리하는 임계값을 다음과 같이 구할 수 있다. 치아 외부와 내부의 히스토그램을 각각 확률밀도 함수 $p_1(z)$와 $p_2(z)$라 하면, 치아 외부의 히스토그램에서 치아의 히스토그램이 발생할 확률과 치아 내부의 히스토그램에서 치아 외부의 히스토그램이 발생할 확률은 각각, $E_1(T)=\int_{-\infty}^{T} p_2(z)dz$와

$E_2(T)=\int_T^{\infty} p_1(z)dz$ 이다. 따라서, 전체적으로 에러가 나타날 확률은, $E(T)=P_2E_1(T)+P_1E_2(T)$ 인데, 위 식을 최소화시키는 T가 최적 임계값이 된다. 여기서,

$$p(z)=\frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left[-\frac{(z-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right]+\frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[-\frac{(z-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$

이다. 그림1(b)는 이렇게 구한 임계치를 보여주고 있다.

3. 개별 치아 단위의 분리

최적의 임계치로 치아영역을 임계화해도 여러 치아가 밀접하게 붙어있는 경우에는 하나로 영역으로 분할되는 경우가 많다. 이러한 경우에는 치아단위로 영역을 분할하기 위한 후처리가 필요하다. 후처리과정은 치아별로 탐색영역을 한정하는 bounding box의 설정과 형태학적 정보를 이용한 치아분리로 구성된다.

3.1 Bounding box 설정 및 경계추출

Bounding box는 기준 슬라이스에서 초기화되어 다음 슬라이스로 전달된다. 각 슬라이스에서는 치아별로 Bounding box내 영역을 전달받은 임계값으로 임계화하고 경계 추출을 한다. Bounding box의 크기는 이전 영상에서 검출된 치아 크기의 2배로 설정하여 치아 크기가 갑자기 커지는 경우도 대응할 수 있도록 하였다. 이러한 Bounding box내에는 이웃 치아의 경계와 해당 치아의 경계가 다양한 형태로 나타나는데 해당하는 치아의 경계만 추출하기 위해 전의 영상에서 전달받아 치아 경계를 추출하고 다음 영상으로 전달되는 데이터는 다음과 같다.

- 영상에서 분리된 개별 치아의 중심점
- 개별 치아의 임계값
- Bounding box를 결정하기 위한 개별 치아의 크기

3.2 이웃 치아와 연결된 치아의 분리

치아가 인접한 이웃치아와 붙어 있는 경우 치아의 화소값을 이용하여 분리하기가 어려우므로 치아 형태학적 정보를 이용하여 다음과 같이 분리한다.

이웃치아와 붙어있는 치아의 경우 그림2에서 보는 바와 같이 치아의 연결부위에 계곡점(valley point)을 갖게 된다. 이웃 치아와 연결된 치아의 계곡점 v_1, v_2는 두 치아가 만나는 부분에 형성되어 있다. 따라서 우리는 이 v_1, v_2를 지나는 직선을 찾아 치아의 분리를 하면 된다.

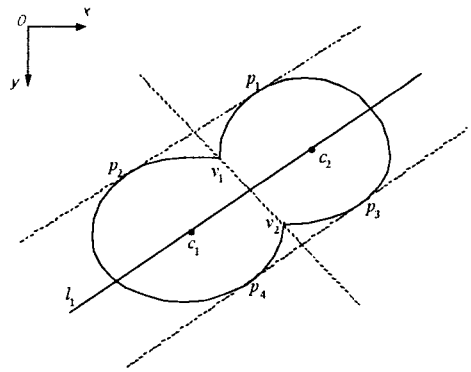

그림 2. 이웃 치아와 연결된 치아의 geometry

그림2에서 치아의 두 중심점 c_1, c_2를 지나는 직선 l_1에서 거리가 최대인 4개의 경계상의 점을 p_1, p_2, p_3, p_4라 할때 p_1과 p_2를 지나는 직선에서 v_1을 포함하는 p_1과 p_2를 지나는 경계의 점들 중 거리가 최대인 점이 v_1이 된다. 마찬가지로 v_2도 p_3와 p_4를 지나는 직선에서 v_2를 포함하는 p_3와 p_4의 경로의 점들중 거리가 최대인 점이다.

4. 실험결과

그림3은 제안된 분할방법을 적용하여 얻은 결과의 일부를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 각 슬라이스에서 치아가 정확하게 분할됨을 알 수 있다. 특히 밀접하게 붙어있는 치아가 개별적으로 분리됨을 볼 수 있다.

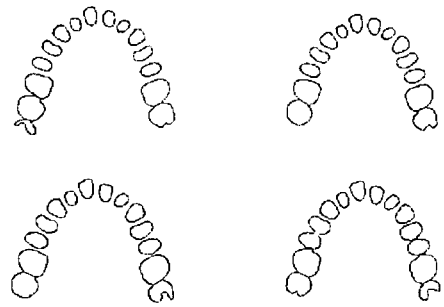

그림3. 제안된 방법으로 분리된 개별 치아들

그림 4는 제안된 임계치 계산 방법의 특징을 보여주기 위한 그래프이다. 그림의 x축은 연속적인 슬라이스 번호를 나타내고 아래와 위의 실선 그래프는 해당 치아를 분리시키는 최소 임계값과 최대 임계값의 그래프이다. 즉 특정 슬라이스에서 인터랙티브하게 임계치를 조정하면서 특정 치아의 임계화를 시도했을 때, 정확한 치아영역을 유지하는 임계치의 상한값과 하한값이다. 따라서 최적의 임계치는 이 두 값의 중간값이라 할 수 있다. 상한값과 하한값의 간격이 큰 슬라이스에서는 치아와 배경의 밝기차가 커서 쉽게 임계화 될 수 있고 간격이 좁은 슬라이스는 임계화가 어렵다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 제안된 방법의 임계값이 최소임계값과 최대임계값사이를 지나가는 것을 볼 수 있다. 반면에 슬라이스에 따라서 임계치가 달라지기 때문에 기존 3D 재구성에서 사용하는 전역 임계치로는 슬라이스별로 정확한 치아영역 분할이 어려움을 알 수 있다.

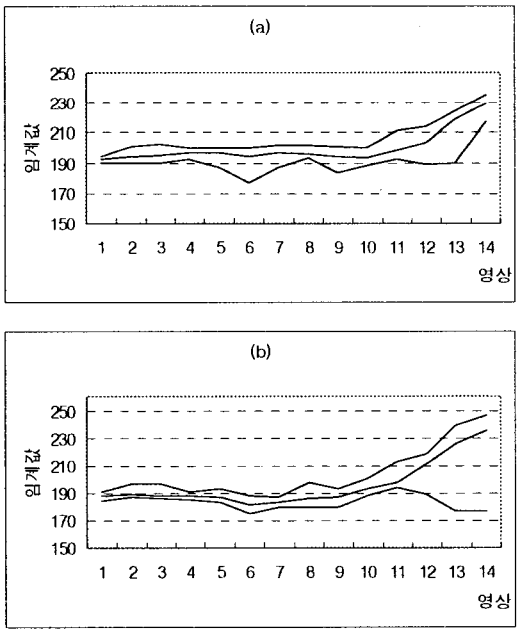

그림4. 치아에 대한 연속된 영상별 임계값 변화

5. 결론

본 연구에서 치조골과 같은 조직에서 정확히 치아를 검출하기 위해 치아가 놓여진 환경을 고려하여 최적의 임계값을 정하고 이러한 임계값을 연속된 다음 영상에 전달하여 전의 영상에서 분리된 정보를 최대한 활용하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 분리 알고리즘의 임계값은 개별치아마다 결정되므로 치아 단위 분리를 가능하게 하여 개별 치아 단위로 이루어지는 치아와 턱뼈의 3차원 재구성을 가능하게 한다. 이러한 개별 치아의 분리 알고리즘은 개별치아 단위로 이루어지고 있는 치과 치료 및 진료의 시술을 시뮬레이션해 보이는 3차원 치아 재구성을 위한 근간이 되는 기반 기술이다. 따라서 본 연구에서 제안된 3차원 치아 재구성을 위한 분리 알고리즘은 기존의 가시화를 목적으로한 분리 알고리즘보다 활용가치가 높고 적응 최적 임계화방법으로 정확하고 효율적인 치아와 턱뼈의 모델링을 가능하게 하였다. 추후 본 연구의 결과를 바탕으로 치아에 보철과 같은 다양한 형태의 금속을 사용한 경우의 치아 분리가 향후 연구 과제로 남아 있다.

[참고문헌]

[1] Jae Hun Ryu, Hyun Soo Kim and Kwan H. Lee, "Contour based algorithms for generating 3D medical models", Scanning Congress 2001: Numerization 3D session, Paris, France, April 4-5, 2001

[2] S.Liu, W.Ma,"Seed-growing segmentation of 3-D surfaces from CT-contour data", Computer-Aided Design 31, 1999, p517-536

[3] Gunter Bohm, Christian Knoll, Vicente Grau Colomer, Mariano Alcaniz-Raya, Salvador Albalat, "Three-dimensional segmentation of bone structures in CT images", SPIE Vol.3661, San Diego, California, 2,1999 ,p277-286

[4] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Digital Image Processing, Addison Wesley, p447-452

[5] Gerald Farin, Curves and Surfaces for CAGD, p118-120