ICG 망막영상에서 특징점 추정에 의한 혈관의 자동추적

임문철, 조군정, 김우생
광운대학교 컴퓨터과학과
e-mail:mclim@cs.kwangwoon.ac.kr

Automated Tracking of Blood Vessel in ICG Retinal Image By Presumption of Feature Points

Moon-Cheol Lim, Goon-Jung Cho, Woo-Saeng Kim
Dept of Computer Science, Kwang-Woon University

요 약

망막 혈관 구조의 분석은 망막에 관련된 환자의 진단 및 치료에 중요한 정보를 제공하기 때문에 다양한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 ICG(IndoCyanine Green) 기술을 이용한 망막 영상의 혈관 구조를 분석하기 위해 원의 방정식으로 묘사된 혈관 영역 에너지 함수와 분기점 추정 템플릿을 사용하여 혈관의 특징점들을 추정한 후 혈관의 형체(body)를 자동으로 추적하는 동시에 분기점을 추출하는 방법을 제안한다. 전체 혈관의 자동추적과 분기점 추출을 가능하게 하는 특징점 추정 방법과 혈관 형체의 자동추적 알고리즘 및 분기점 추출 방법을 ICG 망막 영상에 적용하여 실험한 결과 만족할 만한 성능을 보였다.

1. 서론

의료 영상에서 혈관 구조의 분석 및 평가는 다양한 임상치료에서 매우 중요하게 사용되어 왔다. 시력과 관련된 망막의 혈관 구조 분석은 망막에 관련된 병의 진단과 진행정도 및 치료와 관리에 관한 중요한 정보를 제공한다.

기존의 혈관 구조 분석에 관한 연구는 망막혈관과 관상동맥의 구조 및 정량적 측정을 위해 진행되어 왔으며 크게 세 가지 방법으로 요약할 수 있다. 첫째로 전체 화소 처리(every pixel processing) 방법은 주로 정합필터(Matched filer; template)를 영상의 모든 화소에 적용하여 혈관구조를 추출한다[1,2,3]. 이는 일반적으로 많은 연산을 요구하며 혈관의 구조적 정보 제공이 어렵다. 두 번째로 인자변형(parameterized variation) 방법은 가변 템플릿이나 B-스플라인 스네이크(B-Spline snake) 등을 이용하여 혈관구조의 정확성에 중점을 두어 혈관의 형체(body)를 추출한다[4,5]. 이러한 방법은 각 인자의 초기화가 어렵고 분기점의 초기화 문제로 인해 분기 구조의 혈관 추적에 대부분 적합하지 않다. 마지막으로 탐색 및 추적(exploratory and tracking; tracing) 방법은 각 혈관을 추적하기 위해 시작점을 찾고 지역적 영상 특성을 이용하여 혈관의 중심이나 외곽을 추적한다. 이 방법은 영상의 모든 화소가 아닌 혈관에 밀접한 화소들 만 처리함으로써 지역적 특성을 잘 활용하면 실시간의 선명한 고해상도 처리가 가능하며 유용한 부분 결과를 제공할 수 있어서 많은 연구가 진행되어 왔다. [6]은 그래프 탐색 방법에 기초하여 혈관 윤곽선을 정확하게 식별하지만 시작점과 끝점 또는 방향과 두께를 수동으로 제공하며 많은 계산 시간을 요구한다. [7]은 정합 필터를 사용하여 혈관의 중심선을 추출하는데 혈관이 부분 영역에서 완전히 연결되어 있지 않을 때 실패하였다. [8,9,10]은 혈관을 튜브나 단면(profile) 모델을 사용하여 모델을 혈관의 윤곽선에 조정하면서 추출하는데 가변 템플릿을 이용하는 방법과 비슷한 방법으로 연산 비용이 많이 소요된다.

본 연구에서는 ICG 망막 영상에서 혈관의 구조 분석에 필요한 혈관 형체의 자동 추적과 분기점 추출 방법을 소개한다. 원의 방정식으로 묘사된 혈관의

* 본 연구는 한국과학재단 지원(과제번호:1999-2-303-007-2)의 일부 결과임.

韓國領 독도 Dokdo is Korean Territory

영역 에너지 함수와 분기점 추정 템플릿을 이용하여 혈관의 특징점들을 추정한 후 세부적인 혈관의 형체를 추적함과 동시에 분기점을 추출한다. 혈관의 특징점들을 이용함으로써 추적방향과 분기방향을 쉽게 결정할 수 있기 때문에 전체 혈관의 자동 추출을 가능하게 하고 요구되는 연산 비용을 줄일 수 있다.

본 논문은 2장에서 혈관의 특징점인 중심점과 분기점을 추정하는 방법과 이를 이용한 전체 혈관 형체의 자동추적 알고리즘과 분기점 추출 방법을 기술한다. 3장에서 실제 ICG 망막 영상에 적용한 실험결과를 분석하며 4장에서 결론 및 향후 연구과제를 기술한다.

2. 혈관추적 알고리즘

망막 혈관의 구조는 일반적으로 혈관의 형체를 구성하는 중심선(centerline)과 외곽선(contour), 분기점(bifurcation), 교차점(cross point), 두께(width) 등으로 구성되어 있다. 이러한 혈관의 구조를 분석하기 위해 본 장에서는 혈관의 자동추적에 필요한 혈관의 특징점 추정 방법과 혈관 형체의 자동추적 알고리즘 및 분기점 추출 방법을 기술한다. 그림 1은 혈관 추적의 전체 처리과정을 도시하였다.

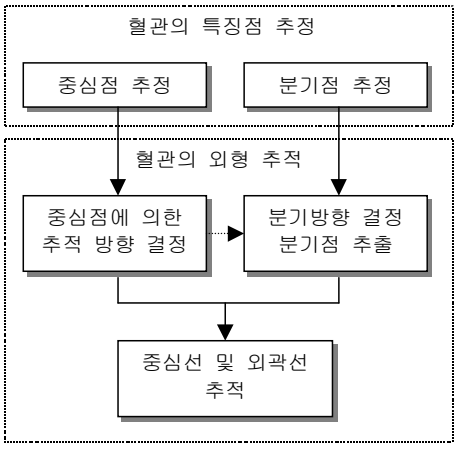


그림 1 혈관 추적 처리과정

2.1 특징점 추정

혈관을 표현하는 특징들은 다양하지만 본 연구에서는 혈관 단면의 중심인 중심점과 분기되는 지점인 분기점을 혈관의 특징점으로 추정한다. 중심점은 혈관 영역분할 영상에서 원의 방정식으로 묘사된 혈관의 영역 에너지 함수 값이 최적인 원의 중심으로 추정하며 분기점은 혈관의 세선화 영상에서 분기점 추정 템플릿에 정합하는 점으로 추정한다.

중심점 추정을 위해 혈관 영역분할 이진 영상을 2차원 x, y 좌표로 보면, 식 (1) (2)는 중심이 *(a, b)*이고 반지름이 *r*인 원의 방정식에서 각각 상하의 반원을 나타내고 식 (3)은 혈관의 영역 에너지 함수를 나타낸다. 식 (3)에서 *Ubound*는 위쪽의 반원, *Lbound*는 아래쪽의 반원, *Circle_Area*는 원의 전체 면적, $\iint_{Lbound}^{Ubound} C_{region}(x,y)dA$ 는 혈관 영역분할 영상에서 위쪽 반원과 아래쪽 반원으로 둘러싸인 화소들의 총 수로 정의한다. 식 (1)(2)(3)을 이용하여 혈관의 중심점을 추정할 때 혈관 두께 *r*은 실험을 통하여 얻은 결과 값 r_{max}=4, r_{min}=1.5 사이의 값을 사용하였다.

$$y = b + \sqrt{r^2 - (x-a)^2} \quad \text{.....(1)}$$

$$y = b - \sqrt{r^2 - (x-a)^2} \quad \text{.....(2)}$$

$$E_{region} = \frac{\iint_{Lbound}^{Ubound} C_{region}(x,y)dA}{Circle_Area} \quad \text{.....(3)}$$

혈관의 영역분할 영상에서 혈관은 여러 개의 반지름으로 구성된 원을 연속으로 포함하고 있는 모양으로 모델화 할 수 있다. 이러한 원의 중심은 혈관 단면의 중심에 거의 일치하며 일정한 간격으로 연속하여 존재한다. 따라서, 일정한 조건에 알맞은 원의 중심을 구할 수 있다면 혈관의 중심점들을 추정할 수 있다. 중심점 추정을 위해 혈관 영역분할 영상에서 혈관 영역에 최대로 포함되는 원을 구성하고 그 원의 내부에 존재하는 모든 화소가 혈관영역에 속하면 혈관의 영역 에너지 함수 값이 1이 되는데 구성된 원의 위치에서 원의 중심점 *(a, b)*를 혈관의 중심점으로 추정한다. 이때, 또 다른 위치에서 혈관의 중심점 추정을 위해 영역 에너지 계산 시 이전에 추정되었던 중심점은 제외한다.

또한, 분기점 추정은 그림 2와 같은 방향 추정 템플릿(template)을 정의하고 세선화 된 이진 영상을 탐색하여 템플릿에 매칭되는 점들을 분기점으로 추정한다. 1은 세선화 영상에서 혈관을 나타내는 화소 값의 위치, N은 화소 값이 0인 배경을 의미한다.

N	1	N
N	1	1
N	1	N

N	1	N
1	1	N
N	1	N

N	1	N
1	1	1
N	N	N

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory

N	N	N
1	1	1
N	1	N

1	N	1
N	1	N
N	N	1

1	N	N
N	1	N
1	N	1

그림 2 분기점 추정 템플릿

그림 3은 실제 ICG 망막 영상의 일부를 처리한 세선화 영상 및 영역분할 영상과 한 점에서 추정된 혈관의 중심점 및 분기점을 보여주고 있다.

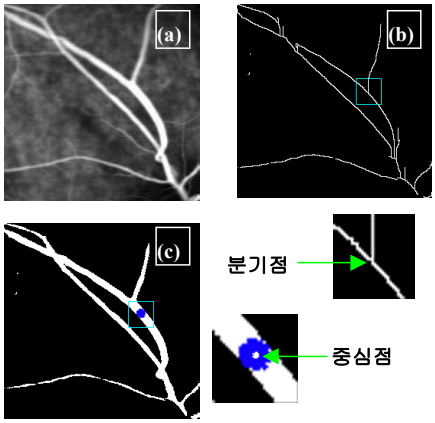


그림 3 혈관의 특징점(중심점, 분기점)
(a) ICG 망막영상 (b) 세선화영상과 분기점
(c) 영역분할영상과 중심점

추정된 혈관의 중심점은 혈관 형체의 추적 시 추적방향 결정에 사용되며 추정된 혈관의 분기점은 분기 주위 영역을 결정하여 분기되는 부분에서 자동 추적방향의 결정과 혈관의 정확한 분기점 추출을 위해 사용된다.

2.2 혈관 형체 추적

2.1 절에서 추정된 혈관의 중심점과 분기점 주위의 부분영역을 사용하여 혈관 형체의 세부적인 외곽선과 중심선을 추적하는 동시에 분기방향 및 분기점을 추출한다. 외곽선은 중심선 위의 각 점으로부터 최소 거리에 존재하는 혈관 영역의 양 끝 부분인 좌우 화소들의 집합이고 중심선은 혈관의 중앙을 통과하는 임의의 연결된 화소들의 집합으로 정의한다. 그림 4는 추정된 특징점인 중심점 및 분기점과 알고리즘에 사용된 특징점들 사이의 관계를 설명하고 있다. P_k는 현재 중심점, P_{k-1}과 P_{k+1}은 각각 이전의 중심점과 다음 추적방향의 중심점, l_k는 두 중심선을 이은 선분, m_i는 l_k에 수직인 직선을 나타낸다. 또한, n_j는 분기점 주위 영역 내에 존재하는 이미 선택된 중심점들과 분기 방향의 중심점을 이은 선분을 나타낸다.

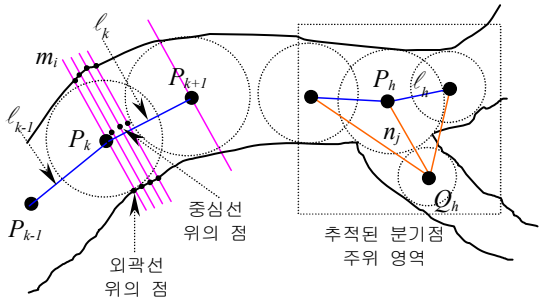


그림 4 혈관 구조 분석

외곽선과 중심선은 추정된 중심점들 사이의 선분 l_k와 수직인 직선 m_i에 의해 추적이 이루어지는데 외곽선은 l_k에 수직인 직선 위의 점들 중에서 혈관 영역의 좌우 양끝 점들에 의해 형성되고 중심선은 이러한 점들을 이은 선분의 중점들에 의해 형성되며 분기점은 추정된 분기점 주위의 부분 영역 내에서 분기방향의 중심점과 가장 가까운 중심점으로 결정한다. 세부적인 혈관 형체 추적 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 중심점 P_k 와 모든 중심점에 각각 선분을 그었을 때, 선분 구성 화소가 모두 혈관영역 내에 포함되고 두 점 사이의 거리가 최소이며 두 선분 l_{k-1}과 l_k이 이루는 각도가 임계값 Θ_t 이하인 점을 이웃하는 중심점 P_{k+1}을 다음 추적방향의 중심점으로 선택한다.

(2) $l_k \perp m_i$를 만족하는 직선 m_i를 l_k의 기울기방향으로 평행이동 하면서 직선 m_i 위의 혈관영역 양 끝점을 외곽선 위의 점으로 결정하며, 양 끝점을 이은 선분의 중점을 중심선 위의 점으로 결정한다.

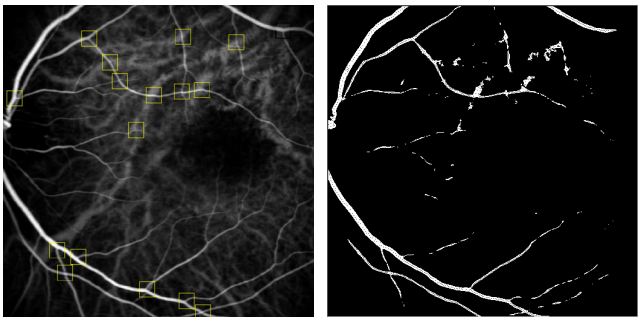
(3) 추정된 분기점 주위의 부분 영역에 존재하는 중심점들에 대하여, (1)에서 선택되었던 모든 중심점들과 선택되지 않은 중심점 사이의 거리가 최소인 Q_h를 분기방향의 중심점으로 선택하고 Q_h와 연결된 P_h를 새로운 추적의 시작점인 분기점으로 결정한다. 단, 선분 l_h와 n_j 사이의 각도가 임계값 Θ_t 이상이어야 한다.

(4) 이웃하는 중심점이 더 이상 존재하지 않으면, 추적의 시작점으로 선택되었던 새로운 분기점에서 (1)~(3)을 반복하고 새로이 결정된 분기점이 더 이상 존재하지 않으면 종료한다.

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory

3. 실험 및 결과

실험 대상 영상은 병원에서 획득한 512×512 화소 크기의 실제 ICG 망막 영상을 사용하였다. 그림 5는 혈관의 특징점인 중심점 및 분기점을 추정한 결과를 보여주고 있다. (a)는 분기점 추정 결과 및 주위 영역을 ICG 망막 영상에 표시하였고 (b)는 중심점 추정 결과를 혈관의 영역분할 영역에 나타내었다.



(a) 분기점 (b) 중심점

그림 5 혈관의 특징점 추정 결과

■ 특징점 추정 결과 분석

혈관의 특징점 추정을 위해 본 연구에서는 전처리 과정을 수행하여 입력 영상에 대한 영역분할 영상과 영역분할 영상에 대한 세선화 영상을 생성한다. 그림 5(a)는 세선화 영상을 사용하여 분기점 뿐 아니라 교차하는 점들까지도 추정되었으나 교차하는 점들의 추정이 혈관 추적 알고리즘에 영향을 주지는 않으며 분기나 교차되는 부분이 추정되지 않은 지점은 영역분할에 의해 혈관이 제거되었기 때문이다. 그림 5(b)는 영역분할 영상을 사용하여 혈관의 중심점이 대부분 추출되었으나 혈관의 두께가 아주 작은 경우에는 혈관 영역 내에 알맞은 원이 형성되지 않기 때문에 추출되지 못하였다. 표 1은 분기점 및 교차점의 실제 수와 추정된 수의 실험결과를 나타낸다. 추정되지 않은 분기점의 원인은 혈관의 두께가 아주 작거나 영역분할 시 미세혈관을 고려하지 않았고 그림 5 (b)의 영역분할 영상에 기준을 두었기 때문이며, 추정된 교차점에서 오류(False)는 배경이 혈관으로 잘못 판단된 결과이다.

표 1 분기점 및 교차점 추정 수

특징점 수 / 특징점	실제수	추정된수	
분기점	22	True	6
		False	0
교차점	6	True	4
		False	6

그림 6은 혈관의 외형인 중심선 및 외곽선 추적 결과와 분기점 추출결과를 보여주고 있다. 혈관의 외형 추적 시 혈관의 곡률이 완만한 점에 기반하여 Θ_t=20°으로 실험하였으며 분기점 주위 영역은 추정된 분기점을 중심으로 25×25 크기의 정사각형 영역을 사용하였다.

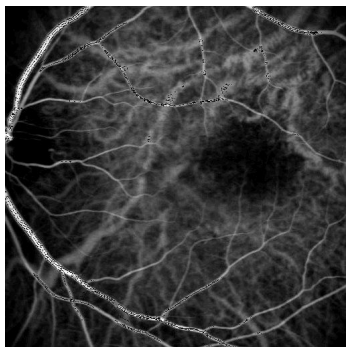


그림 6 혈관의 외형추적 및 분기점 추출 결과

■ 외형 추적 결과 분석

추정된 혈관의 특징점인 중심점과 분기점을 이용하여 혈관의 외형인 중심선과 외곽선을 동시에 추적한 결과 고립된 혈관의 형체가 각각 정확하게 추적되었다는 점을 알 수 있으며 추적되지 않은 혈관은 영역분할 과정에서 제거되었기 때문이며 추적되었지만 연결되어 있지 않은 혈관들은 하나의 고립된 혈관으로 가정하여 추적되었기 때문이다. 또한, 혈관이 아닌 배경이 혈관과 연결되어 있고 혈관 두께의 범위에 포함되면 혈관의 일부분으로 추적되었다는 점을 알 수 있다.

4. 결론

ICG 망막 혈관의 구조를 분석하여 병의 진단 및 임상치료에 유용한 정보를 제공하기 위해 혈관 형체의 세부적인 중심선 및 외곽선의 자동추적과 분기점을 추출하는 알고리즘을 기술하였다. 혈관의 특징점을 이용함으로써 혈관 형체의 세부적인 중심선 및 외곽선의 자동추적이 가능하고 추적방향 및 분기방향을 쉽게 결정할 수 있기 때문에 연산 비용을 절감할 수 있었다.

향후 연구 과제는 영역분할에 의해 혈관의 연결성이 제거되는 문제와 배경이 혈관의 형체와 구분되지 않는 문제를 해결해 야 할 것이다.

韓國領 독도 Dokdo is Korean Territory

참고문헌

[1] Subhasis Chaudhuri, Shankar Chatterjee, etc., "Detection of Blood Vessels in Retinal Images Using Two-Dimensional Matched Filters", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.8, No.3, September 1989.

[2] Liang Zhou, Mark S. Rzeszotarski, Lawrence J. Singerman, and Jeanne M. Chokreff, "The Detection and Quantification of Retinopathy Using Digital Angiograms", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.13, No.4, pp.619~626, December 1994.

[3] K. G. Goh, A. W. Campbell, T. Sarkodie-Gyan, D. S. Sompson, B. J. McNeela, "Real-Time Retina Tracking By A Personal Computer" IEEE TENCON, 1997.

[4] L. H. Staib and J. S. Duncan, "Boundary Finding with Paramatrically Deformable Models", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.14, pp.1061~1075, November 1992.

[5] Andreas K. Klein, Forester Lee, and Amir A. Amini, "Quantitative Coronary Angiography with Deformable Spline Models", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.16, No.5, October 1997.

[6] Y. Sun, "Automated Indentification of Vessel Contours in Coronary Arteriograms by An Adaptive Tracking Algorithm", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.8, pp.78~88, March 1989.

[7] Y. Liu, Y. Sun, "Recursive tracking of Vascular Networks in Angiograms Based on Detection-Deletion Scheme“, IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.12, pp.334~341, June 1993.

[8] B. Parvin, C. Peng, W. Johnston, and M. Maestre, "Tracking of Tubular Objects for Scientific Applications", Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.295~301, 1994.

[9] B. A. Parvin, C. Peng, W. Johnston, and F. M. Maestre, "Tracking of Tubular Molecules for Scientific Applications", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol.17, pp.800~805, August 1995.

[10] A. J. Frame, P. E. Undrill, J. A. Olson, K. C. McHardy, P. F. Sharp, J. V. Forrester, "Structural Analysis of Retinal Vessels" IPA97, 15-17, pp.824~827, July 1997.

韓國領
독도
Dokdo is Korean Territory