

광용적맥파 신호 최대 dV/dt 검출 알고리즘 개발

신항식

전남대학교 의공학과

Maximum dV/dt Detection Algorithm for Photoplethysmography Waveform

Hangsik Shin

Department of Biomedical Engineering, Chonnam National University

Abstract - 본 연구의 목적은 광용적맥파 해석에 중요하게 사용되는 최대 상승기울기(maximum dV/dt) 지점 검출 알고리즘 개발로, 미분 및 필터링을 통한 전처리 과정, 극점 검출과정, 역탐색 등의 후처리 과정으로 구성되는 알고리즘을 구현하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 총 74,225개의 맥파파형을 사용한 검증을 수행하였으며, 동시에 측정된 심전도 QRS지점을 기준으로 최대 dV/dt 측정 위치 정확성을 관정하였다. 시뮬레이션 결과, 적용형 임계치 극점 검출 방법과 함께 사용하였을 때, 제안된 알고리즘은 기존 광용적맥파 상단, 하단극점 검출 알고리즘과 유사한 성능인 98.57%, 99.98%의 민감도와 특이도, 0.02%의 오검출율을 가지는 것으로 나타났다.

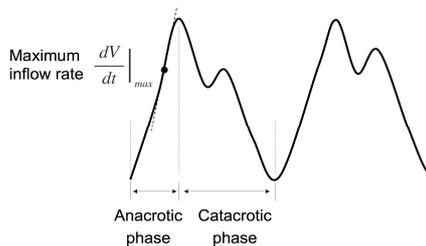
1. 서 론

광용적맥파는 비침습적 특성으로 인하여 맥박수 검출과 같은 간단한 생체신호 측정에 그 사용도가 매우 높은 측정 기술이다. 특별히, 최근 개인용 피트니스 기기, 웨어러블 헬스케어 기기 등에 그 활용도가 높아 관련 기술에 대한 관심 또한 지속적으로 커지고 있다. 광용적맥파는 심장 박동에 의한 혈액의 이동을 반영하므로 심장의 수축 및 이완 시점을 알 수 있도록 해줄 뿐 아니라 혈관 및 혈압 특성과도 밀접하게 관련되어 다양한 생리적, 임상적 해석 관점을 제공할 수 있다[1]. 광용적 맥파의 해석에 가장 중요한 부분은 파형중 특징점 검출로 대부분의 광용적 맥파 활용은 검출된 특징점을 기준으로 수행된다. 예를 들어, 맥박수 계산, 혈관경직도에 관련된 지표인 경직지수(SI, Stiffness Index)[2], 관류지수(PI, Perfusion Index)[3]등의 도출을 위해서는 광용적맥파 신호의 상단극점이나 하단극점 등의 검출이 선행되어야 한다. 본 연구는 광용적 맥파 해석에 필수적인 주요 특징점 중 최대 상승기울기(dV/dt)지점 검출알고리즘 개발을 그 목적으로 한다. 최대 dV/dt 지점에 대한 해석은 다양한 연구에서 이미 사용되고 있으나, 성능이 검증된 검출 기법들에 대한 기존연구사례가 거의 없으므로 본 연구를 통해 활용도 높은 검출 기법을 제안할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 광용적맥파 파형 특성

광용적맥파는 헤모글로빈의 광학적 특성에 기반하여 인체말단 부위에서 혈액의 변동을 기록한 신호이다. 광용적맥파의 파형은 일반적으로 <그림 1>과 같은 형태를 가지게 되며 심실 박출에 의한 혈액량의 증가를 의미하는 상행파형(anacrotic)과 심실이완, 혈액량의 감소를 의미하는 하행파형(catacrotic)으로 크게 구분된다. 광용적맥파의 해석에 주로 사용되는 특징점으로는 상행파형 중 혈액 유입 속도가 최고조에 이르는 순간을 의미하는 최대 dV/dt 지점, 심실의 완전이완을 의미하는 valley (또는 foot), 심실의 완전 수축을 의미하는 peak (또는 head)가 있다.

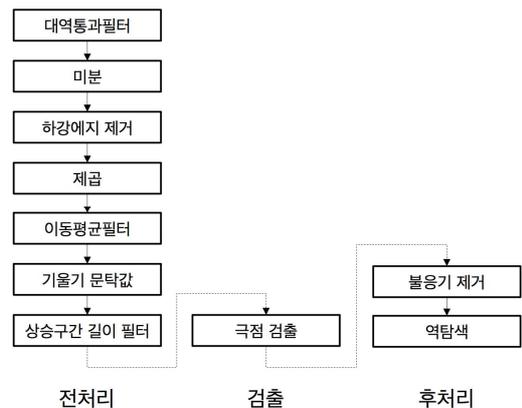


<그림 1> 광용적맥파 파형 특성

2.2 Pre-Processing

광용적맥파 상승파형의 최대기울기를 의미하는 최대 dV/dt 검출 알고리즘의 전처리 단계는 다음과 같다. 먼저, 측정된 광용적맥파신호는 박

출의 불균일성 또는 외부 잡음에 의하여 신호의 진폭이 크게 변화할 수 있으므로 이를 보상하게 위하여 진폭안정화[4]를 수행한다. 이 후 광용적맥파의 주요성분을 추출하기 위하여 0.5~10 Hz 통과대역을 가지는 FIR 대역통과 필터를 적용한 뒤, 파형의 기울기를 추출하기 위하여 미분연산을 수행하였다. 다음 단계에서 광용적맥파 파형 중 하강파형을 제거하기 위하여 미분 결과가 0이하인 값을 0으로 강제 변환 한다. 이 후 제곱연산을 수행하여 값의 편차를 증가 시켰다. 이상은 광용적맥파의 1차 도함수를 전처리하는 과정으로 하강파형이 제거된 상승파형 신호만을 생성한다. 하지만, 이 신호에는 고주파잡음이나 동잡음으로인하여 생성된 상승파형들이 포함되어 있을 수 있으므로 광용적맥파 성분의 상승파형만을 구별해내기 위한 추가 처리가 요구된다. 이 과정에는 먼저 이동평균필터를 통해 신호의 고주파 성분을 억제한 뒤, 문턱값을 적용하여 작은 변화를 가지는 광용적맥파의 상승파형을 제거한다. 본 연구에서는 광용적맥파 고유의 상승파형 구간을 대략 100 ms로 설정하고 이에 해당하는 길이의 이동평균 필터를 설계 하였고, 이동평균 필터링 된 신호의 표준편차를 노이즈에 의한 상승에지를 제거하기 위한 문턱값으로 설정 하였다. 광용적맥파의 파형에서 상승파형은 대개 일정 범위 존재하기 때문에 상승파형이 발생하는 구간의 길이가 특정 범위를 벗어나는 경우를 노이즈로 판단하도록 하였다. 이를 위해 적용된 상승파형 기간 기반 필터링에서는 상승파형 구간의 길이가 평균길이의 절반 미만 이거나 1.5배 이상인 경우를 광용적맥파의 상승파형이 아닌 노이즈로 인한 상승파형으로 판단하고 제거하였다.



<그림 2> 최대 dV/dt 검출 과정

2.2 dV/dt Detection

신호처리된 dV/dt 파형에서 극점을 검출하기 위해서 전체 신호를 특정 길이의 윈도우 세그먼트로 분할한 후 각 구간에서의 최대값을 검출하는 방식의 LM(local maxima)방법[5]과 적용형 문턱치 곡선을 이용하여 극점을 검출하는 방법인 AT(adaptive threshold) 알고리즘[6]을 사용하였다. 각 측정 방법에 따른 성능 차이는 성능평가 부분에서 비교한다.

2.3 Post-Processing

후처리 단계에서는 잘못 검출된 극점을 제거하거나, 역추적을 통해 놓친 극점을 재검출하는 과정을 수행한다. 후처리 과정에는 극점 검출 기법에 의하여 검출된 극점 위치가 이전 극점의 불응기 내에 존재하는 경우에 해당 극점을 제거하는 불응기 극점 제거 과정을 거치고, 검출된 극점간 간격이 평균 극점간격의 1.5배 이상인 경우 검출에 실패한 것으로 여기고 재검출을 위한 역탐색을 수행하였다. 역탐색 과정에서는 극점 검출에 실패한 것으로 간주되는 극점 사이의 최대값을 극점으로 설정하는 과정을 반복 수행하였다.

2.4 성능평가 및 검증방법

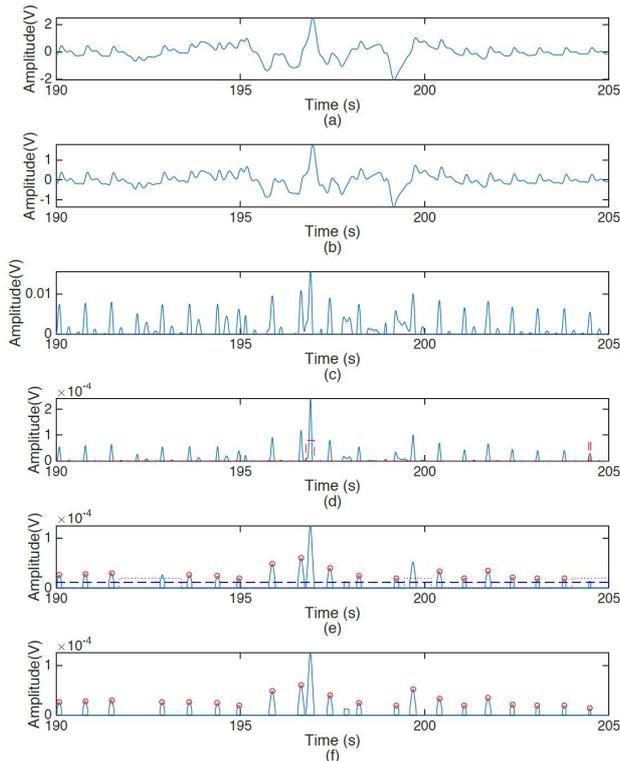
개발된 알고리즘의 성능평가를 위해 독립적으로 획득된 두 종류의 광용적맥파 데이터베이스를 사용하였다. 첫 번째 데이터베이스는 22명(남 11, 여 11)의 피험자에게 획득된 118개의 데이터로 앉거나 누운 자세에서 측정되었다. 첫 번째 데이터베이스에 포함된 피험자의 나이는 22.0 ± 3.5 세이고, 키, 체중, 체질량지수(BMI)는 각각 166.2 ± 9.0 cm, 62.8 ± 12.6 kg, 22.5 ± 2.7 kg/m²이다. 두 번째 데이터베이스는 28명의 피험자(남 17, 여 11)에게서 측정된 총 84개 데이터로 피험자의 나이, 키, 체중, BMI는 각각 20.8 ± 0.96 세, 169.5 ± 7.4 cm, 63.5 ± 13.9 kg, 22.0 ± 3.8 kg/m²이다. 데이터베이스1, 데이터베이스2의 모든 데이터는 1 kHz 샘플링률과 5분 길이를 가진다.

검출된 최대 dV/dt 지점이 올바른지 평가하기 위하여 광용적맥파와 동시에 측정된 심전도의 QRS지점과 비교를 수행하였다. QRS군이 발생된 후 광용적맥파의 시작지점이 발생하기까지의 시간을 의미하는 맥파도달 시간(Pulse Transit Time)은 이전 연구에서 0.11초~0.475초로 알려져 있었고 dV/dt 가 포함되어 있는 상승파형 구간의 길이를 0.2초로 가정하여 QRS이후 0.11초~0.675초 사이에서 dV/dt 가 검출되는 경우 올바르게 검출되는 것으로 간주하였다.

최대 dV/dt 검출성능을 평가하기 위하여 TP(True Positive), FP(False Positive), FN(False Negative)를 분류하였고, 이를 바탕으로 민감도(SE, Sensitivity), 양성예측값(PPV, Positive Predictivity Value), 오검출률(FDR, Failed Detection Rate)을 도출하여 검출 알고리즘의 성능을 비교 평가하였다. 여기서 SE는 $TP/(TP+FN)$, PPV는 $TP/(TP+FP)$, FDR은 $FP/(TP+FP)$ 의 백분율로 계산하였다.

2.5. 시뮬레이션 결과

<그림 3>은 본 연구에서 제시된 최대 dV/dt 검출 알고리즘의 단계별 실행 결과를 보여준다. 먼저 <그림 3(a)>, <그림 3(b)>는 원신호 파형과 대역통과 필터를 통과한 결과를 보여준다. 또한, 그림 <그림 3(c)>는 미분 후 하향파형이 제거된 결과물, <그림 3(d)>는 제곱이후의 결과 파형과 상승구간 길이가 지정범위를 벗어나는 지점을 보여준다(파선). <그림 3(e)>는 이동평균 필터링된 파형과 극점 검출 기법에 의해 검출된 극점의 위치를 나타낸 것으로 파선은 기울기 문턱치, 점선은 역탐색 구간을 나타낸다. <그림 3(f)>는 이상의 과정을 통해 획득된 최종 검출 지점을 보여준다.



<그림 3> 제안된 dV/dt 검출 과정에 따른 신호 변화 (a)원신호, (b)대역통과필터링 후, (c)미분, 하향파형 제거 후, (d)제곱된 신호와 부적절 상승파형길이(파선) 검출, (e)이동평균 필터링 결과 및 기울기 문턱값(파선), 역탐색 윈도우(점선), (f)최종 최대 dV/dt 검출 결과

<표 1>은 제안된 알고리즘의 정량적 평가 결과로 두 종류 데이터베이스에 대하여 두 종류의 극점 검출 알고리즘을 적용하여 평가한 결과를 보여준다. 제안 알고리즘은 극점 검출 기법에 따라 성능의 차이가 큰 것으로 나타났다. 먼저 LM기법을 적용한 경우에는 98.86%의 민감도와 81.38%의 특이도를 보였고 오검출율은 18.62%로 나타났다. 반면, AT기법을 적용한 경우 98.57%의 민감도, 99.98%의 특이도를, 0.02%의 오검출율을 보이는 것으로 확인되었다. 두 결과를 종합하면 의하면 LM기법을 적용한 경우 AT기법에 비해 민감도가 0.09% 높았으나 특이도가 18.6% 낮고, 오검출율이 18.6% 높은 것으로 나타났다. AT기법을 적용한 경우 LM기법을 적용한 경우에 비해 민감도가 미세하게 낮았으나 전반적으로 99%에 가까운 민감도와 특이도를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

<표 1> 제안된 알고리즘 성능 비교

| Method | Database | Beats | TP | FP | FN | SE (%) | PPV (%) | FDR (%) |
|--------|-----------|-------|-------|-------|------|--------|---------|---------|
| LM | Database1 | 33722 | 33521 | 6138 | 201 | 99.40 | 84.52 | 15.48 |
| | Database2 | 40503 | 39859 | 10655 | 644 | 98.41 | 78.91 | 21.09 |
| | Total | 74225 | 73380 | 16793 | 845 | 98.86 | 81.38 | 18.62 |
| AT | Database1 | 33722 | 33650 | 3 | 72 | 99.79 | 99.99 | 0.01 |
| | Database2 | 40503 | 39512 | 15 | 991 | 97.55 | 99.96 | 0.04 |
| | Total | 74225 | 73162 | 18 | 1063 | 98.57 | 99.98 | 0.02 |

3. 결 론

본 연구에서 제안된 최대 dV/dt 검출 알고리즘은 7만개 이상의 맥파 데이터를 적용한 테스트에서 최대 98.5%이상의 민감도와 99.9%이상의 특이도를 가지는 것으로 확인 되었다. 이 결과는 기존에 제안된 맥파 상단 및 하단 극점검출 알고리즘의 성능과 유사 또는 상회하는 것으로 제안된 알고리즘 성능의 우수성을 보여준다. 본 연구에서 제안된 최대 dV/dt 검출 기술은 광용적맥파 해석의 기본 기술로 다양한 광용적맥파 응용에 활용될 수 있다. 특히, 최근 등장한 여러 개인용 스마트 헬스케어 기기 또는 피트니스 기기들이 광용적맥파를 기반으로 다양한 정보를 제공하려 하는 추세임을 고려할 때, 향후 본 연구 결과의 폭넓고 다양한 활용이 기대된다.

[감사의 글]

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2015-H8601-15-1009)

[참 고 문 헌]

- [1] Allen J, "Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement.", *Physiological Measurement*, 28(3), R1-39, 2007
- [2] Millasseau, S. C., et al. "Contour analysis of the photoplethysmographic pulse measured at the finger." *Journal of hypertension*, 24(8), 1449-1456, 2006
- [3] Ginosar, Y., et al. "Pulse oximeter perfusion index as an early indicator of sympathectomy after epidural anesthesia." *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 53(8), 1018-1026, 2009
- [4] Shin, H., "Photoplethysmographic Signal Level Stabilization Method to Reduce Amplitude Fluctuation", *Proceeding in IEEE EMBC*, 2015 [submitted]
- [5] Lu, S., et al. "Can photoplethysmography variability serve as an alternative approach to obtain heart rate variability information?." *Journal of clinical monitoring and computing*, 22(1), 23-29, 2008
- [6] Shin, H., Lee C., and Lee. M. "Adaptive threshold method for the peak detection of photoplethysmographic waveform." *Computers in Biology and Medicine* 39(12), 1145-1152, 2009