

Heart Rate Variability 신호의 시간 및 주파수 영역 분석

Analysis of Heart Rate Variability Signals in Time-Domain and Frequency-Domain

길 정 수* 권 호 열**
Kil, Jung-Su Kwon, Ho-Yeol

Abstract

Autonomic nervous systems play an important role of keeping our health as balancing homeostasis. But the abnormality of these abilities makes our presence be feeble. To obtain these information of body which helps for us to decide whether one is healthy or not, based on the study of Heart Rate Variability. In this paper, we presented HRV model and its processing steps to extract some information of human body. After that, some experimental results are presented in time-domain and frequency-domain.

Keywords : Heart Rate Variability

1. 서론

의지에 따라서 자유로이 운동하는 수의운동(隨意運動)은 뇌척수신경이 지배하고 있지만, 이와 반대로 의식을 떠나서 운동하는 것, 예를 들면 심장이나 위장의 운동은 불수의운동이라 하며, 이 운동을 지배하는 신경계가 자율신경계이다. 자율신경계(Autonomic nervous system)는 척추동물에서 의식적인 인지나 노력 없이 내부기관을 통제·조절하는 신경계의 일부분이다. 이러한 자율신경계는 교감신경계와 부교감신경계라는 길항작용을 하는 2종류의 신경계로 이루어져 있다. 교감신경계는 척수신경에 의해 내장기관과 뇌를 연결하고, 이 신경계가 자극을 받으면 심장박동률이 증가하고 근육으로 흐르는 혈액량이 증가하는 반면, 피부로 흐르는 혈액량이 감소함으로써 생물체는 긴장상태에 대비하게 된다. 부교감신경계의 신경섬유는 뇌신경 특히 미주신경(迷走神經)과 척수요신경(脊髓腰神經)으로서, 자극을 받으면 소화액의 분비가 증가하

고 심장박동은 감소된다. 이러한 자율신경계는 불수의적(involuntary)으로 작용하는 인체 장기의 기능을 자동적 또는 반사적으로 조절해 주며, 내·외적인 환경변화에 대하여 내적 환경의 균형을 유지하는 기능을 통하여 생명유지 활동 및 신체내의 항상성(homeostasis)을 유지하여 건강한 생활을 유지하는 역할을 수행한다.[1-3]

이러한 자율신경계가 스트레스나 기타 외부의 영향에 의하여 생리적인 조절 능력의 상실로, 교감신경이 부교감신경보다 우위를 차지하는 불균형 현상이 발생하면 혈압상승, 혈액순환 장애(혈류량 감소), 심장의 과부하, 발한증가, 소화불량, 변비, 고혈압, 중풍, 심부전, 협심증, 심근경색증 등의 고혈압과 급성 심장사와 같은 심혈관계 사망 사이에 밀접한 연관성이 있음을 발견한 것이다. 또한 현대인들이 노출되기 쉬운 스트레스는 인체는 각종 질병을 유발하게 되고 이러한 영향에 대하여 자율신경계의 활동 및 교감신경과 부교감신경의 균형 정도를 평가하는 의료 시스템의 필요성이 대두되었다.[4]

이러한 시스템을 통하여 심박동의 미세한 변화(Heart Rate Variability)를 파형 분석하여 자율신경계의 활동을 정량적으로 분석함으로써 스트레스에 대한 인체의 반응을 가시화하고 현재의 건강상태 및 정신 생리학적 안정 상태를 확인하는 의료 서비스를 제공하는 것이다.

* 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 석사과정

** 강원대학교 컴퓨터정보통신공학과 교수, 공학박사

본 논문에서는 자율신경계의 특이성을 고려하여 현재 입장에서는 심박 변이도(Heart Rate Variability)를 이용하여 인체의 이상 유무를 판단하는 시스템을 연구하였다. 이를 위하여 먼저 HRV 분석 방법에 대하여 설명하였으며, 얻어진 실험결과와 시간영역 및 주파수 영역분석에 대하여 평가하였다.

2. HRV 분석

2.1 HRV 신호의 유도

HRV 신호의 유도는 ECG(심전도)의 매 비트(Beat, 1박) 마다의 R-R 간격(R파와 다음 R파와의 시간차)의 변동으로서 적어도 8 ms 이상의 정밀도가 요구된다. 심박변동이란 동결질에 대한 자율신경계의 입력 변동을 주된 원인으로 하는 심주기의 변동을 의미하므로, 심박변동신호의 계측에는 연속한 정상 정동률(normal sinus rhythm)의 R-R 간격만을 사용한다. 이러한 인체의 R-R 간격을 5분간 기록하여 HRV 분석을 위한 기초 자료로 활용한다. 그러나 그림 1 및 그림 2에 보인 바와 같이 HRV의 시계열 데이터는 R-R time의 특성에 의해서 샘플간격이 등 간격이 아닌 데이터를 얻게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, HRV의 스펙트럼분석에서는 데이터의 보간(Interpolation)을 통해 일정한 시간에서의 R-R time을 얻고 일정한 시간 간격으로의 재-샘플링(Re-sampling)을 수행한다.

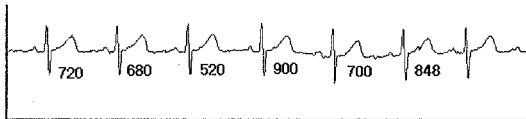


그림 1. PTG를 이용한 R-R time의 측정

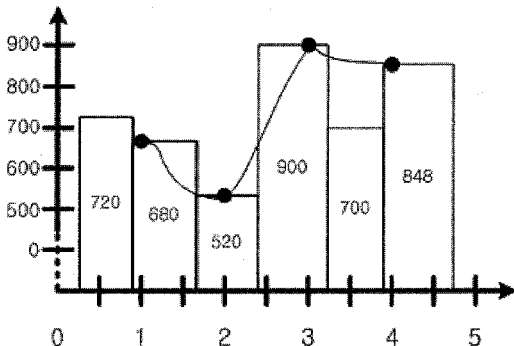


그림 2. R-R time의 정의

또한, 전력 스펙트럼 분석에 적용되는 R-R time의 데이터는 각각의 구간(segment)들이 그 구간의 길이 보다 더 긴 주기를 가지는 저주파 성분을 포함하고 있다. 이러한 저주파 성분을 '선형 성분(linear trend)'이라 부른다. 선형 성분은 전력 스펙트럼 상의 저주파 대역에서 중첩을 일으켜 스펙트럼의 왜곡을 일으킨다. 이러한 왜곡을 제거하기 위하여 재-샘플링된 데이터에 대하여 선형 성분을 제거한다.

2.2 시간영역 분석

심박 동수의 변이성은 여러 방법에 의해 평가될 수 있으며, 이를 수행하는 가장 간편한 방법은 시간영역 측정법이다. 이 방법에서는 시간상 특정 시점에서의 심박동수 또는 연속적인 정상 QRS complex 사이의 간격이 결정된다. 연속 심전도 기록에서 각각의 QRS complex가 인식되며, 소위 NN 간격(동결질 탈분극에 의해 생성된 QRS complex 사이의 모든 간격) 또는 순간 심박동수가 측정된다. 계산할 수 있는 간편한 시간 도메인 변수들은 평균 RR 간격 및 RR간격의 표준편차, 평균 심박동수, RR 간격 중에서 가장 긴 것과 가장 짧은 것 사이의 차이 등으로 측정된다.

표1. HRV의 시간영역 파라미터

변수	설명
ARR	Average of all R-R intervals
AHeart	Average of all Heart Rate
Diff	difference of Max R-R and Min R-R

2.3 주파수영역 분석

심박 동수의 변이성(HRV)의 주파수 분석 방법으로서 전력 스펙트럼 밀도(PSD) 분석은 전력(즉, 분산)가 주파수의 함수로 어떻게 분포하는지에 관한 기본적인 정보를 제공한다. HRV를 주파수로 나누어 분석하기 위해서는 일반적으로 전력스펙트럼분석 방법을 사용한다. 안정시의 HRV의 스펙트럼에는 세 가지의 주요한 성분의 peak가 관찰되는데 이는 각각 VLF (Very Low Frequency), LF (Low Frequency), HF (High Frequency)의 주파수 대역으로 나눌 수 있다.

또한 비모수적 방법에 의한 HRV 신호의 전력스펙트럼 분석은 FFT 알고리즘을 이용하여 계산할 수 있다. FFT 알고리즘에 대한 분석을 통해서 R-R 간격이 갖고 있는 0Hz ~ 0.4Hz 까지의 각 주파수별 전력스펙트럼 분석을 알 수 있고, VLF,

표 2. HRV의 주파수 영역 파라미터

변수	단위	설명	주파수 범위 (Hz)
5분 전력	ms ²	R-R 간격의 변동	$0 \leq f \leq 0.4$
VLF	ms ²	신호전력 (VLF 범위)	$f \leq 0.04$
LF	ms ²	신호전력 (LF 범위)	$0.04 \leq f \leq 0.15$
HF	ms ²	신호전력 (HF 범위)	$0.15 \leq f \leq 0.4$
LF/HF		LF/HF의 비율	

LF, HF의 분포와 피크 값을 알 수 있다. 이러한 스펙트럼 분석을 위하여 Auto-Regressive(자기회귀) 모델을 사용한다.

3. 실험결과 및 검토

실험에 사용하는 데이터는 HRV-ECG 측정 장비를 이용하여 성인 남성 2명의 5분간의 심박변동률을 측정하여 데이터를 생성하고 데이터의 시간영역과 주파수영역에 대하여 분석을 실시하였다.

3.1 시간영역 분석

본 논문에서는 HRV 시간영역 분석에 있어 5분간의 단기간 데이터를 분석하는 방법으로 시간영역에 대한 분석을 실시하였다. 분석 방법은 표2의 3가지 항목에 대하여 R-R 간격의 정보를 이용하여 ARR, AHeart, ADiff의 결과를 Case 1과 Case 2에 대하여 측정하였다. 또한 Case1 신호의 지연시간에 따른 위상궤적의 변화를 실험하였다.

변수	Case 1	Case 2
ARR	1050 (ms)	972 [ms]
AHeart	61.8 (ms)	61.45 [ms]
Diff	347 (ms)	524 [ms]

표 3. 시간영역 분석 결과

3.2 주파수영역 분석

주파수영역 분석은 Auto-Regressive 모델에 의한 전력스펙트럼 추정을 사용하여 측정 데이터에 존재하는 HLF, LF, VLF의 주파수 분포 그래프를 실험하였고, 실험은 AR 모델링에 사용하는 Burg,

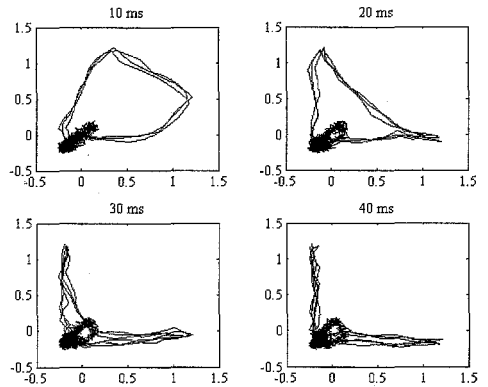


그림 3. 지연시간 변화에 따른 위상궤적

Covariance, Modified Covariance, Yule-Walker 알고리즘에 대하여 각각의 알고리즘 차수를 22~50까지 증가시키면서 실시하였다.

그림 4는 Case 1의 심박변동을 5분간 측정하여 R-R time 데이터를 얻고, 얻어진 데이터의 시간 간격을 일정하게 하기 위하여 데이터 보간을 한다. 데이터가 보간된 R-R time 데이터에 대해 선형성분을 제거하는 cubic-spline 알고리즘을 적용하면 본 논문에 적용되는 R-R time 데이터를 얻게 된다.

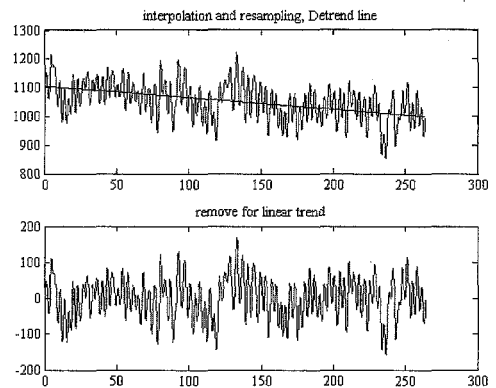
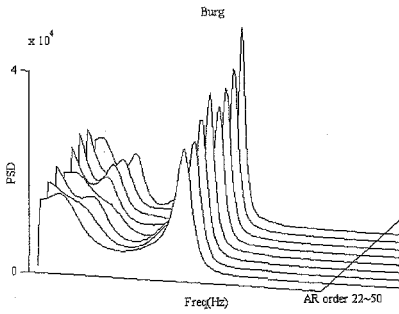


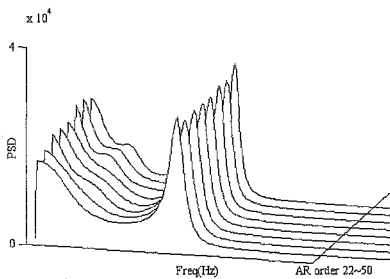
그림 4. 데이터 보간과 재-샘플링

R-R time 데이터의 주파수 영역을 분석하기 위해서 Auto-Regressive 모델을 사용하였다. 이러한 모델을 적용함으로써 데이터가 어떠한 주파수 대역에 대하여 분포하는지를 알 수 있다. 그림 5는 Burg 알고리즘을 적용하였을 때, 각 차수별 주파수 성분의 분포를 시뮬레이션 한 결과이다. 차수가 높을 수록, 보다 자세한 데이터를 얻게 되지만 연산의 복잡도는 높아지게 된다.

AR 모델을 구성하는 4가지 알고리즘은 각기 다



(a) Burg



(b) Yule-Walker

그림 5. AR 모델의 차수에 따른 변화

른 장·단점을 갖고 있다. 본 논문의 HRV 분석에는 Burg 알고리즘이 사용되었다. 이것은 Burg 알고리즘이 다른 알고리즘에 비하여 데이터 윈도우가 필요치 않고, 차수의 증가와 감소에 따라 일정한 HF, LF, VLF의 주파수 성분을 모델링하며, HRV 데이터와 같이 길이가 짧은 데이터에 대해서도 높은 해상도를 제공하기 때문이다. Burg 알고리즘에 의한 VLF, LF, HF의 주파수 성분은 그림6을 통하여 알 수 있으며 이러한 성분 분포를 통해 자율신경계의 생리적인 조절능력의 고·저를 파악할 수 있다.

그림6은 AR 모델의 4가지 알고리즘에 대하여 차수가 30일 때의 모델링 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 각 알고리즘은 주파수 대역에 대하여 VLF, LF, HF의 주파수 대역에 대한 주파수 성분의 분포를 보여주고 있다. R-R time의 데이터의 크기 및 특성에 대하여 알맞은 AR 모델을 적용하는 것이 필요하다.

그림7은 본 논문에서 사용된 Burg 알고리즘을 사용하여 차수가 30일 때, 각 주파수에 대하여 VLF, LF, HF 성분의 분포를 나타낸 것이다. 이를 통하여 각 주파수 성분의 분포 정도를 쉽게 파악할 수 있게 된다. 이것이 중요한 것을 이를 통하여 우리의 신경계에 작용하는 교감신경과 부교감신경의 신체 내 작용 비율을 판단할 수 있고, 이를 통하여 의학적인 판단의 자료로 사용될 수 있기 때

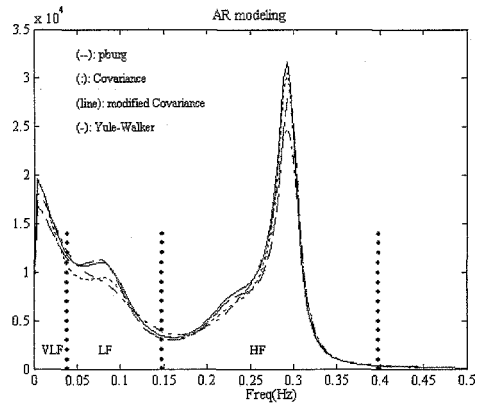


그림 6. AR 알고리즘의 비교

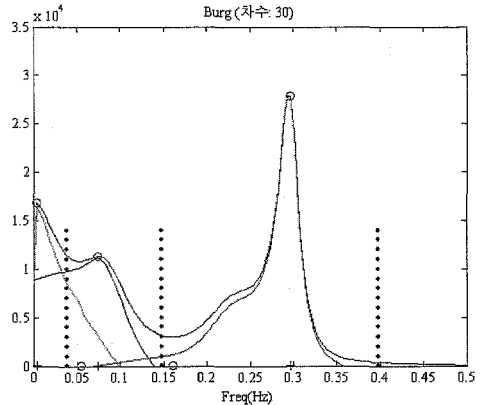


그림 7. Burg에 의한 주파수성분 모델

문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 이상의 실험 결과를 통하여, ECG 측정 장비에 의해 측정된 HRV 데이터의 VLF, LF, HF의 주파수 성분을 모델링 하였다. 모델링을 함으로써 심혈관계에 유동적으로 작용하는 자율신경계의 활동을 분석할 수 있었고, 또한 자율신경계의 작용과 반작용의 현상을 이해하기 위하여 이를 분석하는 방법을 연구하였다.

이러한 모델링 결과는 우리 몸의 자율신경계를 구성하는 교감신경과 부교감신경의 생리적인 조절 능력과의 연관관계를 분석하기 위한 시스템의 기초 자료로 사용될 것이다. 또한 본 논문의 결과들의 의로 시스템에 적용함으로써, 이러한 시스템은 심박동의 미세한 변화(Heart Rate Variability)를 과학 분석하여 자율 신경계의 활동을 정량적으로 분석함으로써 스트레스에 대한 인체의 반응을 가시

화하고 현재의 건강 상태 및 정신 생리학적 안정 상태를 확인하는 것이다. 이러한 시스템을 통하여 돌연사와 같은 급격한 건강의 악화 여부를 예견하고, 신체의 건강지수를 손쉽게 측정하는 시스템을 개발할 수 있게 된다.

참 고 문 헌

- [1] Schneider RA, Costiloe JP, "Relationship of sinus arrhythmia to age and its prognostic significance in ischemic heart disease", Clinical Research, Vol. 13, pp.229, 1965
- [2] Markad V. Kamath, Ph.D. and Ernest L. Fallen, "Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability: A Noninvasive Signature of Cardiac Autonomic Function", Critical Reviews in Biomedical Engineering, 21(3):245-311, 1993
- [3] Takayuki Kageyama, Michinori Kabuto, "Accuracy of Pulse Rate Variability Parameters Obtained from Finger Plethysmogram: A Comparison with Heart Rate Variability Parameters Obtained from ECG", J Occup Health 1997; 39: 154 - 155
- [4] 이정환, "자율신경계 작용 평가를 위한 심박변동 신호의 시주파수 분석 시스템 설계", 1999
- [5] 길정수, 권호열, 강두식, 이수량, Heart Rate Variability 분석 시스템 설계 및 구현, 2002 시스템 및 제어 Society 합동 추계 학술대회 논문집, 서울 2002. 11.30.