

Intracardiac Signal의 스펙트럼 분석을 통한 Atrial Tachycardia 및 Atrial Fibrillation 검출

論 文
55D-3-9

Detection of Atrial Tachycardia and Atrial Fibrillation Using Spectrum Analysis of Intracardiac Signal

申 伉 植[†] · 李 忠 根^{*} · 鄭 報 寧^{**} · 李 明 鎬^{***}
(Hangsik Shin · Chungkeun Lee · Boyoung Joung · Myoungho Lee)

Abstract - Detection methods for atrial tachycardia and atrial fibrillation on the time axis have the advantages of light operational load and are easy to apply to various applications. Despite these advantages, arrhythmia detection algorithm on the time axis cannot stand much noise such as motion artifacts, moreover the peak detection algorithm has high complexity. In this paper, we use a spectrum analysis method for the detection of atrial tachycardia and atrial fibrillation. By applying spectrum analysis and digital filtering on obtained electrogram signals, we can diagnose heart arrhythmia without using peak detection algorithm.

Key Words : Atrial Tachycardia, Atrial Fibrillation, Implantable Cardioverter Defibrillator, Pacemaker

1. 서 론

서맥(Bradycardia)과 빈맥(Tachycardia), 세동(Fibrillation) 등으로 대표되는 심장의 비정상적 박동에 대한 치료법은 부정맥의 원인에 따라 약물을 사용한 치료나 심장박동기(Pacemaker), 이식형제세동기(ICD: Implantable Cardioverter Defibrillator) 이식을 통한 치료로 나누어진다[1]. 일반적으로 부정맥의 원인이 심실의 위쪽에 존재하는 상심실성빈맥(SVT: supra ventricular tachycardia)인 경우에는 약물을 사용하여 치료가 가능하지만 그 이외의 빈맥이나 세동의 경우는 심장박동기나 이식형제세동기를 사용하여 심장의 부정맥을 제어하게 된다[2]. 현재의 심장박동기는 심방, 심실 양쪽에 전극을 삽입하여 체내심장신호(EGM: electrogram)를 측정하고 전기 자극을 주는 dual-chamber 형태 까지 발전되어 있으며 EGM 측정, 심장의 정상동작여부 판단, 전기자극의 과정을 거쳐 환자의 정상 심박동을 유도한다[3].

본 논문에서는 심방의 EGM에 대한 스펙트럼 분석을 통하여 심장박동기나 이식형 제세동기에 적용 가능한 심방빈맥, 심방세동 등의 부정맥 판단 알고리즘을 제안한다. 현재 상용화된 심장 박동기는 EGM의 최대점 관측(peak detection)을 통한 각 최대점간의 시간간격의 변화를 측정하여 심장이상을 판별하는 진단 알고리즘을 사용하고 있다. 하지만, 기존의 방법은 동잡음 등의 노이즈가 섞인 경우 최대점 검출에 오류가 발생할 가능성이 높고 시간간격 비교만으로 심방세동과 빠른-심방빈맥(Fast-Atrial Tachycardia)을 구별해내기 어렵다는

단점을 가지고 있다. 이에 비해, 스펙트럼 분석을 통한 진단 알고리즘은 스펙트럼 분석의 특성상 노이즈를 쉽게 분리해 낼 수 있고 최대점 검출을 수행하지 않으므로 시간간격을 측정하는 데서 발생하는 오류를 보정할 수 있다.

2. Spectrum 분석 알고리즘

2.1 전처리과정

효율적인 스펙트럼 분석을 위해서는 획득된 EGM신호에 대한 전처리 과정을 거쳐야 한다. 전처리 과정은 그림 1과 같은 필터단을 사용하여 구성하였다.

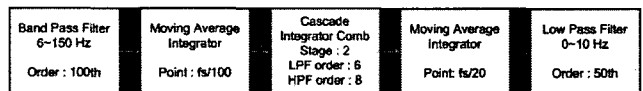


그림 1 심방 EGM 신호의 전처리 과정

Fig. 1 Pre-processing for the atrial EGM signal

2.2 Parametric analysis

스펙트럼 분석을 위해서는 필터링 후 신호에 대하여 시주파수 분석을 수행하여야 한다. 시주파수 분석에는 Hanning window를 사용하여 windowing한 뒤, 35차의 AR(Auto Regressive) model을 적용하였다. 이 때, 매 초마다 이전 3초간의 데이터를 가지고 분석을 수행하였기 때문에 N 초간의 데이터의 경우 N-1개의 분석 값을 가지게 된다.

2.3 Decision algorithm

심방빈맥이나 심방세동의 판정을 위한 진단 알고리즘은 그림 2와 같다. AR model을 사용하여 주파수 대역을 구하고 정상동율동(Normal Sinus Rhythm), 심방빈맥, 심방세동에 해

[†] 교신저자, 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 博士課程
E-mail : glory@yonsei.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 博士課程

^{**} 正 會 員 : 延世大學 醫科大學 助教授 · 醫博

^{***} 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 政教授 · 工博

接受日字 : 2005年 11月 11日

最終完了 : 2006年 1月 20日

당하는 주파수 대역의 파워 P_N, P_T, P_F 를 구한다. 이후 각각의 스펙트럼 파워를 다른 성분의 파워의 합과 비교하여 최대 값을 가지는 것을 심장의 상태로 판단하게 된다.

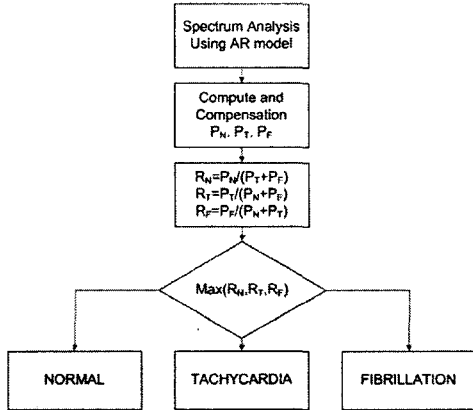


그림 2 스펙트럼 분석을 사용한 진단 알고리즘
Fig. 2 Diagnosis algorithm using spectrum analysis

3. 시뮬레이션 및 결과분석

3.1 EGM 획득 및 시뮬레이션

심방의 EGM을 획득하기 위하여 중량이 25~30 kg인 개 9 마리의 우심방에 리드를 삽입하여 신호를 획득하였으며, 부정맥 유발을 위해 0.5 ms duration을 가지는 3 V unipolar 신호를 30 초 동안 10회 반복하여 가해주었다(burst pacing). 신호의 측정에는 BIOPAC MP150을 사용하였고 초기 필터단에서는 0.05~35 Hz 대역의 필터를 사용하여 신호를 획득하였다. (Gain: 1000). 전기자극은 STM100C 모듈을 사용하여 발생 시켰다. 리드는 4개의 전극을 가지는 EP catheter를 사용하였는데, 각각 2개씩의 전극을 할당하여 전기자극과 신호 측정을 동시에 수행하였다. 그림 3은 획득한 심방신호를 나타낸 것이며, 표 1은 실험에서 획득한 정상동율동, 심방빈맥, 심방세동 신호에 대한 정보 및 중심 주파수 특성을 나타낸다.

표 1 획득한 EGM data의 특성

Table 1 Characteristics of obtained EGM data

No.	Canine	전문외소견	중심주파수	평균/분산/샘플수
F1	2	심방세동	7.89 Hz	mean: 8.05 Hz std: 0.38 Hz N=3
F2	2		7.79 Hz	
F3	8		8.5 Hz	
T1	8	심방빈맥	6.94 Hz	mean: 6.74 Hz std : 0.53 Hz N=4
T2	8		7.08 Hz	
T3	7		5.93 Hz	
T4	8		6.79 Hz	
R1	1	정상동율동	1.7 Hz	mean: 1.82 Hz std : 0.19 Hz N=9
R2	2		1.7 Hz	
R3	3		1.83 Hz	
R4	1		2.05 Hz	
R5	4		2 Hz	
R6	5		2.04 Hz	
R7	4		1.75 Hz	
R8	6		1.85 Hz	
R9	8		1.9 Hz	
R10	9		1.85 Hz	
R11	7		1.6 Hz	
R12	8		1.86 Hz	

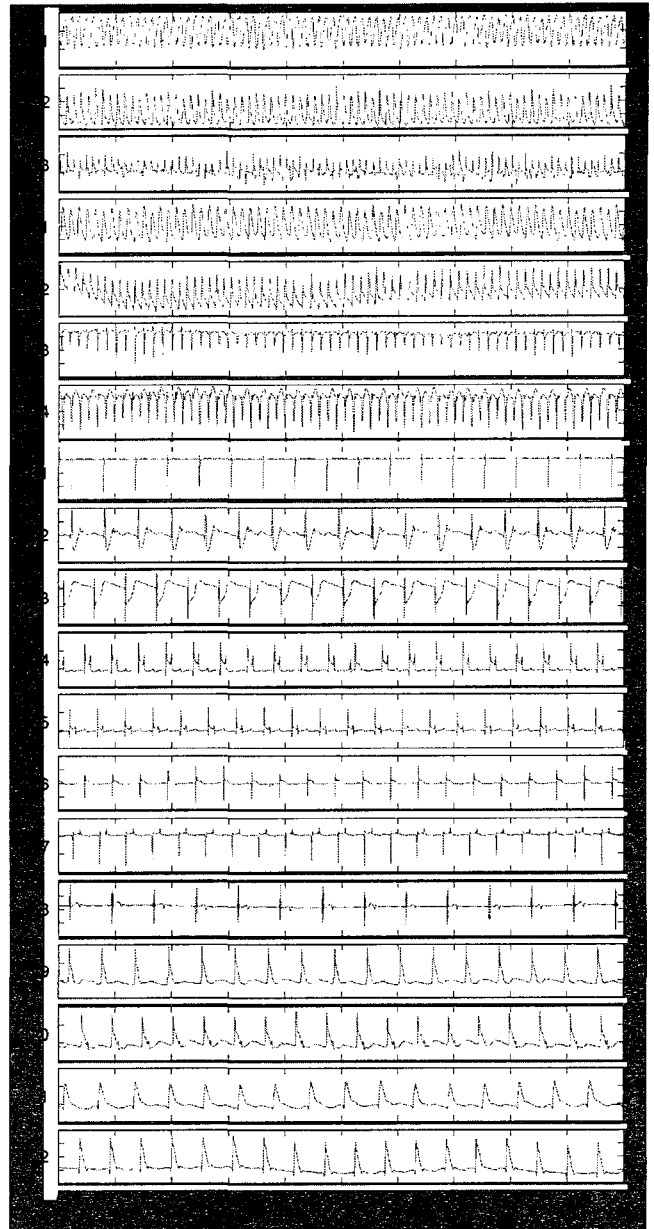


그림 3 획득한 EGM (F1~F3 : 심방세동, T1~T4 : 심방빈맥, R1~R12 : 정상동율동)

Fig. 3 Obtained EGM (F1~F3 : Atrial fibrillation, T1~T4 : Atrial tachycardia, R1~R12 : Normal sinus rhythm)

3.2 Power estimation을 통한 부정맥 진단

표 1에서는 획득된 정상동율동, 심방빈맥, 심방세동 신호가 각각 다른 중심주파수 대역을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 반복 실험결과로부터 결정된 각 상태에 따른 심방 신호의 주파수 범위는 정상동율동일 때 $f_N=0.05\sim3.5\text{ Hz}$, 심방빈맥일 때 $f_T=3\sim7.3\text{ Hz}$, 심방세동일 때 $f_F=6.5\sim10\text{ Hz}$ 이다.

부정맥 진단을 위해서는 스펙트럼 분석을 통하여 획득한 주파수 영역에 대한 파워를 구하고 수식(1)~(3)에 따라 정상동율동, 심방빈맥, 심방세동에 해당하는 각각의 파워를 전체 파워와 비교한 비율을 구한다.

$$R_N = P_N / (P_T + P_F) \tag{1}$$

$$R_T = P_T / (P_N + P_F) \tag{2}$$

$$R_F = P_F / (P_T + P_N) \tag{3}$$

본 연구에서는 R값을 비교하여 R_N 이 최대인 경우에는 정상동율동, R_T 가 최대인 경우에는 심방빈맥, R_F 가 최대인 경우에는 심방세동으로 평가하고 각각 0, 1, 2로 맵핑하여 나타내었다. 그림 4는 획득한 신호를 제안하는 알고리즘을 사용하여 진단한 결과인데 그림에서 확인 할 수 있듯이 제안하는 알고리즘은 3초간의 데이터를 주파수 분석하여 진단을 내리게 되므로 초기 3초의 훈련(training)구간이 요구된다.

3.3 시간간격 측정 알고리즘과의 비교

본 논문에서 제안하는 알고리즘과 기존 부정맥 진단에 주로 사용되는 시간간격 부정맥 진단 알고리즘을 비교한 결과는 표 2와 같다. 시간간격비교 알고리즘을 사용하여 심방의 부정맥을 진단할 때는 박동의 Cycle Length(CL)에 따라 CL이 400 ms 이상이면 정상동율동, CL이 140 ms ~ 400 ms이면 심방빈맥, CL이 140 ms 미만이면 심방세동으로 판정하도록 설정하였다. 이 때, EGM의 피크 검출은 체외 심전도 검출에 주로 사용되는 pan-tompkins 알고리즘[5]을 변형하여 적용하였고 최소 98% 이상의 정확도를 가지고 피크를 검출하였다.

결과에서 확인할 수 있듯이 정상동율동의 경우 R1 sample의 경우를 제외하고는 두 알고리즘 모두에서 정확한 측정을 내리고 있음을 알 수 있고 부정맥 신호에 대해서는 두 방법

표 2 시간간격 측정방법과 주파수분석방법의 검출율 비교

(N: Normal, AT: Atrial Tachycardia, AF: Atrial Fibrillation TD: Total Detection FD: False Detection)

Table 2 Comparison of detection ratio between time-interval analysis method and spectrum analysis method

No.	시간간격분석방법사용				주파수분석방법사용			
	N	AT	AF	ERR(%)	N	AT	AF	ERR(%)
F1	0	0	1267	0	0	0	159	0
F2	0	0	628	0	0	0	78	0
F3	35	21	166	25.23	6	2	17	32
T1	0	231	5	2.13	0	32	0	0
T2	0	883	311	26.05	27	129	10	22.29
T3	5	710	4	1.256	2	124	0	1.59
T4	16	352	0	4.35	0	113	0	0
R1	52	0	0	0	24	7	0	22.58
R2	50	0	0	0	31	0	0	0
R3	54	0	0	0	31	0	0	0
R4	42	0	0	0	31	0	0	0
R5	60	0	0	0	31	0	0	0
R6	71	0	0	0	48	0	0	0
R7	63	0	0	0	31	0	0	0
R8	32	0	0	0	31	0	0	0
R9	50	0	0	0	31	0	0	0
R10	54	0	0	0	30	0	0	0
R11	48	0	0	0	31	0	0	0
R12	56	0	0	0	31	0	0	0
오차율	$\frac{FD}{TD} = \frac{37}{526} = 7.54\%$				$\frac{FD}{TD} = \frac{51}{1087} = 4.97\%$			

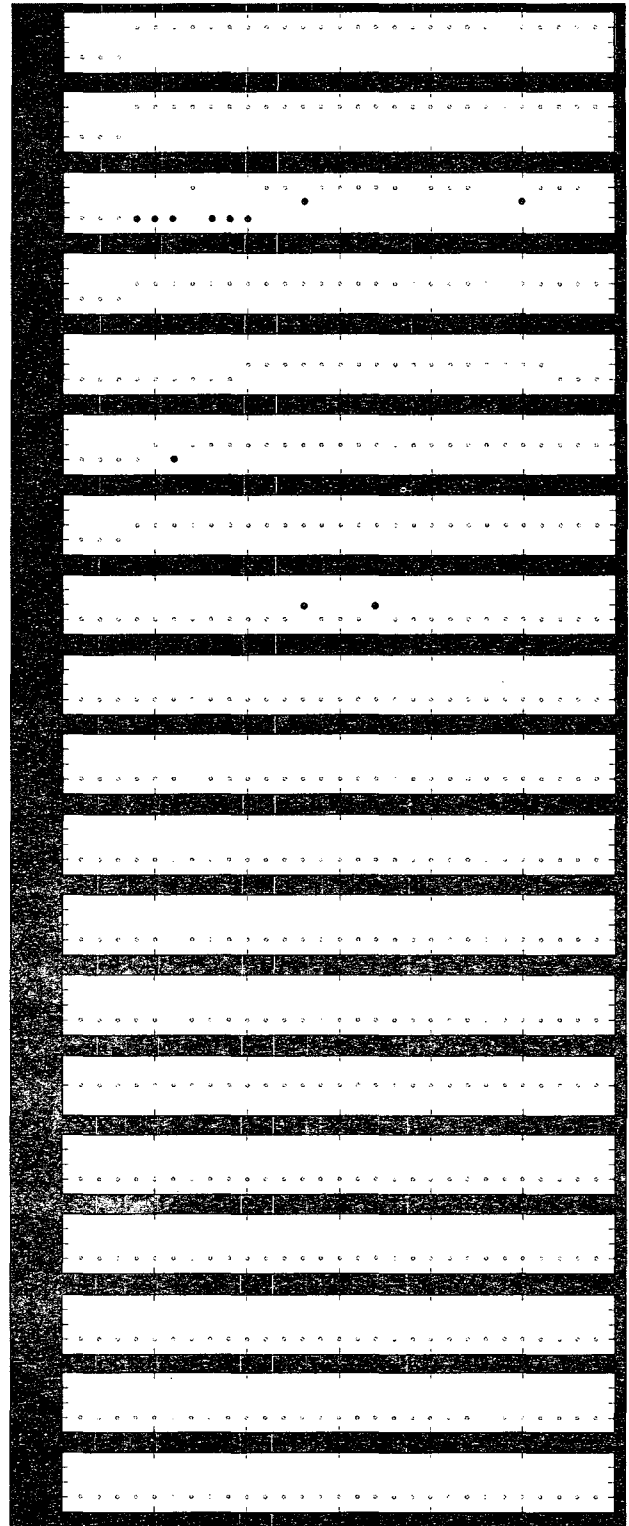


그림 4 심방 EGM에 대한 부정맥진단 결과. 파란점(◦)은 정상적으로 판단한 경우, 검은점(●)은 잘못 판단한 경우를 나타냄. 처음 3초는 훈련구간으로 이때에는 진단을 내리지 않음.

Fig. 4 The result of arrhythmia diagnosis using atrial EGM. Blue dots(◦) mean correct decision. Black dots (●) mean incorrect decision. First 3 seconds are training period, in this period decision is not meaningful.

모두 오차를 포함하고 있음을 확인 할 수 있다. 부정맥 신호 판별에 있어서 시간간격 분석방법은 심방빈맥을 심방세동으로 오인하는 예러가 주로 발생하였으며 주파수 분석방법은 심방 빈맥을 정상동율동으로 오인하는 예러가 주로 발생하였다. 이것은 시간간격 측정의 경우 측정된 빈맥 데이터가 빠른 심방 빈맥(Fast Atrial Tachycardia: FAT)일 때 심방세동과 CL의 차이가 거의 없다는 이유에서 발생한 오차라고 생각되고 주파수 분석방법의 경우 하모닉스(harmonics)가 잡음 성분으로 작용하거나 보정계수의 오차 때문인 것으로 생각된다.

3.4 스펙트럼 분석법의 시간지연

심장박동기의 진단 알고리즘에서 가장 중요한 사항중의 하나는 심장이상 발생 후 얼마나 빠르게 심장의 이상을 감지할 수 있는가이다. 따라서 진단알고리즘의 시간지연은 알고리즘을 실제 적용하는데 있어 매우 중요한 요소가 된다[6]. 그림 5(a)는 진단 값이 변화하는 경우에 변화된 값을 측정하여 측정까지의 지연 시간을 보기위한 테스트 패턴을 나타내었다. 테스트 패턴은 심방세동에서 정상동율동으로 회복되는 파형으로 테스트 패턴의 심방세동-정상동율동의 변이 구간을 관찰하여 지연시간을 측정하였다.

그림 5은 부정맥 테스트패턴을 사용하여 개발한 알고리즘의 시간 지연을 나타낸 그림으로 부정맥 발생에서 부정맥 진단까지 대략 1초 내외의 시간지연이 발생함을 알 수 있다.

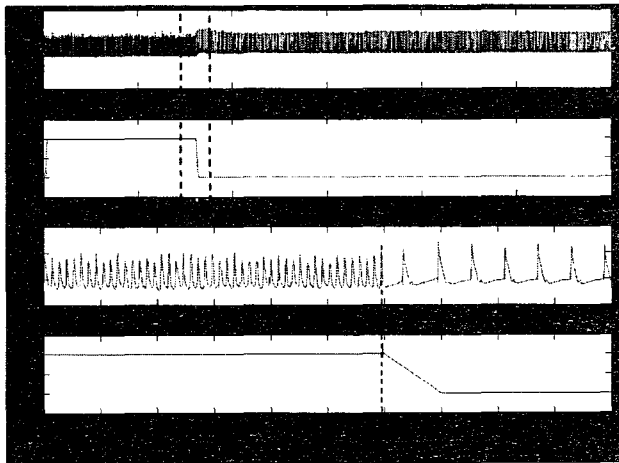


그림 5 제안하는 알고리즘의 시간지연. (a)부정맥 테스트 패턴, (b)제안한 알고리즘을 사용하여 (a)에 대한 부정맥 판단결과, (c)부정맥 테스트패턴의 관심영역, (d)진단결과의 관심영역 (c,d는 점선내부를 확대한 파형)

Fig. 5 Time-delay of the proposed algorithm (a) Arrhythmia test pattern, (b) Arrhythmia detection of (a) using proposed algorithm, (c) Interesting region of (a), (d) interesting region of (b) ((c),(d) are magnification of dashed line)

4. 결 론

제안하는 알고리즘이 상용 심장박동기에 적용되기 위해서는 전력소모 문제에 대한 해결 방법 및 운동량에 따라 심박수를 조절하는 rate response 등의 고급 기능들에 대한 추가 연구가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 최적화나 고급 기능의 추가 이전 단계에서의 주파수 분석을 통한 부정맥 판정 가능 여부를 고려하였다.

제안된 주파수 분석을 통한 부정맥 판별 알고리즘은 기존 알고리즘과 비교하여 노이즈에 강인하고 진단이 간단하다는 장점이 있지만, 주파수 분석에 따른 연산량의 증가와 하모닉스 등의 주파수 성분들이 노이즈로 작용할 수 있다는 문제점등을 가지고 있다. 또한 동물실험을 통한 결과이므로 임상에 적용을 위해서는 보다 많은 Human EGM 샘플에 대한 추가 연구 및 이에 최적화된 알고리즘을 개발하는 연구가 수행되어야만 한다.

감사의 글

본 논문은 정통부 및 정보통신연구진흥원의 정보통신선도 기반기술개발사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Mohammad H. Asgarian, "Design of Cardiac Pacemakers - Artificial Pacing", IEEE, p.111~128, 1995
- [2] Jose L. Rojo-Alvarez, Angel Arenal-Maiz, Antonio Artes-Rodriguez, "Discriminating Between Supraventricular and Ventricular Tachycardias from EGM Onset Analysis", IEEE January/February 2002
- [3] Janice M. Jenkins, Stephanie A. Caswell, "Detection Algorithms in Implantable Cardioverter Defibrillators", IEEE, 1996
- [4] T. Kokama, S. Nakamura, H. Hoshino, "An efficient RR interval detection ECG monitoring system", IEICE Trans. Inf. & Syst., vol. E82-D, no. 10, pp. 1425-1432, Oct., 1999
- [5] J. Pan and W. J. Tompkins, "A real-time QRS detection algorithm". IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-32, No. 3, pp. 230-236, 1985
- [6] U Achleitener, et al, " waveform of external defibrillators: analysis and energy contribution, Resuscitation, vol. 41, pp. 193-200, 1999