

# 심전도 신호의 정형 명세

권혁주\*, 권혁, 권기현  
\*경기대학교 컴퓨터과학과

e-mail: {hyuk7410, s191819, khkwon}@kgu.ac.kr

## Formal Specification of ECG Signal

Hyeokju Kwon\*, Hyuck Kwon, Gihwon Kwon  
\*Dept. of Computer Science, Kyonggi University, Suwon, Korea

### 요 약

본 논문에서는 심장의 전기활성도를 반영하는 ECG 신호 중 일부를 명세한다. 꾸준히 축적되었고 통용되는 ECG 신호의 비정형 명세를 정형 명세로 바꾸는 과정에서 선형 시제 논리보다 시간을 다루는 명세 및 양적 평가에 유리한 신호 시제 논리(Signal Temporal Logic)를 사용한다. ECG 신호를 감지했다는 가정하에 특징점을 추상화하여 신호를 명세했고, 양적으로 평가해주는 모델 기반 실시간 ECG 모니터링 시스템의 신속한 개발 필요성을 제시한다.

### 1. 서론

심장의 전기활성도(electrical activity)를 반영하는 ECG 파형은 심장질환 진단을 위해 널리 사용되는 도구이다. 심장질환 중에서 부정맥(Arrhythmia)은 심장의 리듬이 비정상적이므로 심박수가 매우 느려지거나 빨라진 상태를 말한다. 이런 부정맥이 심하거나 오래 지속될 경우 충분한 피가 몸 전체로 공급되지 않는다. 그래서 부정맥 질환을 가진 환자가 피곤해지고 머리가 몽롱한(lightheaded) 상태가 되며 의식을 잃게(pass out) 될 수도 있다. 심실 빈약 및 심실 세동 같은 일부 부정맥은 심장 돌연사와 관련이 있다[1]. 따라서 심전도 신호를 파형, 구간, 분절 별로 명세하면 부정맥의 전조현상이나 다른 심장 질환을 정확히 진단하는 등 ECG 데이터의 정확한 분석이 가능하다.

### 2. ECG 신호의 배경지식

정상인의 심전도에서 나타나는 ECG는 P 파, QRS 군, T 파로 구성되어 있다. P 파는 심방근의 탈분극(depolarization)에 의해 기록되며 동방결절에서 흥분이 시작되어 방실결절을 향하게 된다. QRS 군은 심실근의 탈분극에 의해 기록되며 Q, R, S 파를 합쳐서 기록하고 2 개 이상의 파가 심전도에 나타난다. T 파는 심실근의 재분극(repolarization)에 의해 기록된다.

#### 2.1 P 파(P Wave)

P 파는 동방결절에서 발생하는 자발적 흥분에 의해 개시되는 파형으로서 우심방과 좌심방으로 이루어진

"본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음"(IITP-2015-R0992-15-1014)

심방의 흥분에 의해 발생한다.

정상 P 파는 폭이 3mm 이내이며(0.09 ~ 0.11 초), 높이는 2.5mm(0.25mV)를 초과하지 않는다.

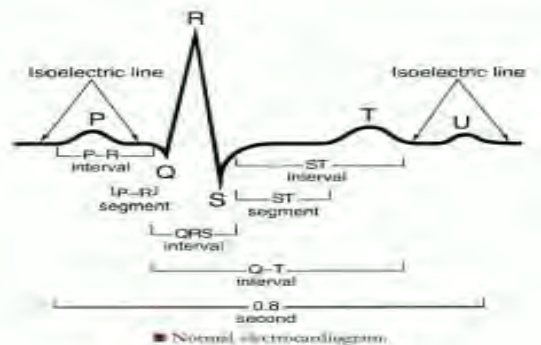
비정상 P 파는 P 파의 기간이 길어지고(> 0.11 초), P 파 높이가 높아 (> 2.5mm)진다. 기간과 높이가 동시에 증가한 경우를 좌우심방 확장(biatrial enlargement)이라 한다.

#### 2.2 PR 간격(PR Interval)

PR 간격은 흥분파가 심방, 방실결절 및 푸르킨예섬 유계를 통하여 전도되는 시간을 말한다.

정상적으로 PR 간격은 0.12 ~ 0.20 초이며, 정상범위 내에서 심박수가 증가하면 짧아지고, 심박수가 느려지면 길어진다.

PR 간격을 분석할 때 PR 간격이 연장(> 0.20 초)되면 방실차단, 만성대동맥판역류, 디지털리스 독성을 의심할 수 있다. 반대로, PR 간격이 축소(<0.12 초)되면 접합 부울동, 빈맥, WPW 증후군, LGL 증후군을 의심할 수 있다.



(그림 1) 정상 ECG

### 2.3 QRS 군(QRS Complex)

QRS 군은 심실의 흥분에 의해 발생하며 심실 흥분은 푸르킨예섬유계를 통하여 매우 빠르게 전달되므로 심방의 흥분시간과 비슷한 시간에 일어나게 된다.

정상 QRS 군의 기간은 0.11 초 이내이며, 엄격히 말하면 0.06~0.10 초 내에 발생한다. R 파의 높이는 12 유도 심전도 중 사지유도에서 5mm 이상, 흉부유도에서 10mm 이상으로 나타난다.

비정상적인 QRS 군은 일부 유도에서 QRS 군이 넓고 이상하게 나타나며, 사지유도에서 QRS 군은 모양은 일정하지만 기간이 길게( $\geq 0.12$  초) 나타난다. 비정상 Q 파라는 것은 넓이가 1mm 보다 더 넓으며( $> 0.04$  초) Q 파의 높이가 해당 유도의 QRS 군 크기를 1/3 초과하는 경우를 말한다.

### 2.4 T 파(T Wave)

T 파는 각 유도에서 QRS 군의 주된 방향과 그 방향이 동일하며 앞쪽 절반의 경사가 뒤쪽 절반보다 더 완만한 비대칭 모양을 가진다.

정상적인 T 파의 높이는 최소 R 파 높이의 1/10 이상 이면서 2/3 미만이어야 한다. 사지유도에서  $< 6\text{mm}$ , 흉부유도에서  $< 12\text{mm}$  이다.

T 파를 분석했을 때 비정상적으로 역전(inversion)되어 있으면 심근허혈, Q 파 심근경색, 비 Q 파 심근경색, 각차단, 좌심실비대 등을 의심할 수 있다. 또, 모양을 관찰했을 때 움푹 패인 경우 어린이에게서 정상적으로 나타날 수 있고 퀴니딘 효과, 급성 심낭염을 의심할 수 있다. 비대칭 모양을 가져야 할 T 파가 대칭적인 경우라면 심근경색, 고칼륨혈증, 심근염 등을 의심할 수 있다. 높이를 관찰했을 때 크고 뾰족하면 급성 Q 파 심근경색, 고칼륨혈증, 심근허혈 등을 의심할 수 있다. 반대로 납작하거나 하강하였을 경우 저칼륨혈증, 긴장양상, 심근염 등을 의심할 수 있다.

### 2.5 QT 간격(QT Interval)

QT 간격은 QRS 군 시작 시점부터 T 파 종류 시점까지의 기간이며, 심실의 탈분극과 재분극을 모두 합친 기간이다. QT 간격은 심박수가 느려지면 길어지므로 QT 간격을 측정할 때는 심박수를 고려해야 한다.

일반적으로 QT 간격은 0.36~0.44 초 사이에 있어야 하며 RR 간격의 절반 이상을 차지하면 안된다[2].

### 2.6 정상인에 대한 ECG 참조 모델

위에서 봤듯이, 항상 관찰되지 않을 수 있는 U 파를 제외하고 심전도 신호의 파형, 간격, 분절 별로 정상인 수치가 존재한다. 따라서 <표 1>과 같은 정상인에 대한 ECG 참조 모델이 존재[1]한다. 이를 토대로 정형 명세 방법론 중 신호 시제 논리(STL)를 이용해 ECG 신호 중 일부를 명세할 수 있다.

<표 1> 정상인에 대한 ECG 참조 모델

인자	참조 값
P파	0.09초 < 기간 < 0.12초 진폭 < 0.25mV
PR간격	0.12초 < 기간 < 0.20초
QRS군	0.06초 < 기간 < 0.11초 진폭 > 0.5mV (사지유도) 진폭 > 1mV (흉부유도)
T파	진폭 < R파 높이의 2/3 진폭 > R파 높이의 1/10 진폭 < 0.6mV (사지유도) 진폭 < 1.2mV(흉부유도)
QT간격	0.36초 < 기간 < 0.44초

## 3. ECG 신호의 정형 명세

### 3.1 STL 을 통한 정형 명세의 필요성

주어진 시물레이션 트레이스를 만족하는 논리적 속성  $\phi$ 를 효율적으로 테스트하는 것은 중요한 문제이다. 실시간 시제 논리를 사용하는 속성들을 명시하기 위해 신호 시제 논리(Signal Temporal Logic)나 구간 시제 논리(Metric Temporal Logic)를 사용하는 것이 점점 보편화되고 있다. 오프라인 모니터링 방식은 완전한 시물레이션 트레이스(즉, 0 초에서 시작하고 사용자가 명시한 시간대(T)까지의 경로)하에 결과로부터 원인을 분석하는 것이 수반된다. 오프라인 모니터링에 관한 이론적 및 실용적 결과는 트레이스 길이에 관한 기능과 속성  $\phi$ 를 대표하는 식(formula)의 크기로서의 모니터링 효율성에 집중하고 있다.

오프라인 모니터링이 적합하지 않은 많은 상황들이 존재한다. 실제 시스템에서 잘못된 행위를 감지하기 위해 배치된 모니터의 경우를 생각해 보자. 시물레이션을 통해 속성을 모니터링 하는 경우, 감지된 속성을 만족하거나 위반하게 되면 보통 시물레이션을 멈추는 것이 합리적이다. 이러한 경우 뚜렷하게 차이나는 요구사항들을 가진 온라인 모니터링 알고리즘이 요구된다. 특별히, 좋은 온라인 모니터링 알고리즘은 반드시 부분적인 신호들을 기반으로 속성을 만족하는 중간 추정치를 만들어낼 수 있어야 하고, 데이터 저장 공간을 최소화해야 하며, 실시간 설정에서 충분히 빨리 실행할 수 있어야 한다.

선형 시제 논리(Linear Temporal Logic)나 구간 시제 논리(MTL)처럼 논리를 위한 온라인 모니터링 알고리즘에 관한 대부분의 연구들이 부분적인 신호들로 참, 거짓 속성 명세(Boolean satisfaction of properties)하는 것에 집중했다. 최근 연구는 MTL 이나 STL, 규격품으로(off-the-shelf) 최적화된 강력한 툴을 이용해 해결될 수 있는 버그 찾기, 파라미터 합성 및 견고한 분석(robustness analysis)과 같은 문제들처럼 실시간 논리에 양적 의미(Quantitative semantic)를 부여하는 것을 보이고 있다. 양적 의미란 속성  $\phi$  및 트레이스  $x(t)$ 를 견고하게 만족하는 값(robust satisfaction value)으로 알려진, 실수(real number)로 매칭시키는 기능을 정의한다. 양의 값이 크다는 건  $x(t)$ 가 쉽게 속성  $\phi$ 를 만족한다는 것이고, 0에 근접한 양의 값은  $x(t)$ 가 속성  $\phi$ 를 위반하기 직전이라는 것이며 음의 값은 속성  $\phi$ 를 위반

했다는 것을 말한다. 양적 의미의 계속되는(recursive) 정의는 자연스럽게 견고한 만족 값들을 계산하기 위한 오프라인 모니터링 알고리즘을 정의하는 반면, 같은 일을 하는 온라인 모니터링 알고리즘에 관한 연구는 제한적이다[4].

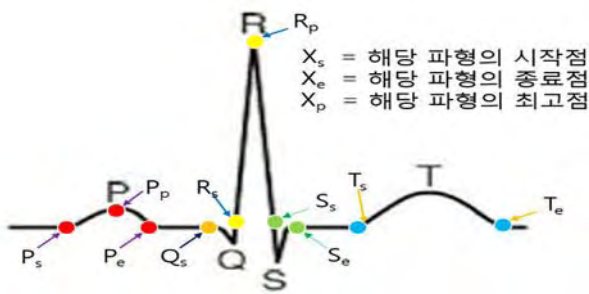
적합한 모델이 선택되고 나면 속성  $\phi$  을 명세한 식의 만족 가능성을 모델 체킹 툴을 사용하여 양적으로 평가할 수 있고, 비슷한 명세를 한 식들 내에서 합리적 선택을 할 수 있게 된다[5].

이 논문에서는 심전도 미가공 데이터(raw data)의 Denoising 과 종잡을 수 없는 기저선(baseline)을 제거하는 등 전처리(preprocessing)와 그것을 기반으로 필터링 된 데이터를 가지고 파형, 간격, 분절 등을 감지하는 것은 기존 연구된 결과와 향후 연구로 미룬다. 본 논문에서는 심전도 신호를 파형, 간격, 분절 별로 특징점을 추상화하여 명세하는 것으로 마무리한다.

### 3.2 신호 시제 논리 구문

STL 의 문법은 LTL 에서 확장된 형태를 보인다. 신호 시제 논리 구문에 관한 문법과 자세한 내용은 [3] 에서 확인할 수 있다.

### 3.3 파형, 간격 별 STL 명세



(그림 2) ECG 파형 특징점 추상화

본 논문에서는 ECG 데이터의 전처리와 필터링 및 파형 감지를 하지 않으므로 해당 파형의 시작점과 종료점, 최고점을 감지했다고 가정하고 그림 2 와 같이 ECG 파형을 특징점 별로 추상화를 하였다.

정상인에 대한 ECG 참조 모델을 바탕으로 신호 시제 논리식을 작성하면 다음과 같다.  $U(t)$ 는 ECG 신호 그래프의 식이다. 예를 들어  $U(P_s)$ 는 P 파의 시작점일 때 ECG 신호 그래프의 y 축(진폭, mV)에 해당하는 값을 의미한다.

- P 파:  $\square \diamond ((P_e - P_s < 0.12s) \wedge (P_e - P_s > 0.09s)) \wedge \square \diamond_{[P_s, P_e]} (U(t) < 0.25mV)$
- PR 간격:  $\square \diamond (Q_s - P_s < 0.20s) \wedge (Q_s - P_s > 0.12s)$
- QRS 군 <홍부유도>:  $\square \diamond ((S_e - Q_s < 0.11s) \wedge (S_e - Q_s > 0.06s)) \wedge \square \diamond_{[Q_s, S_e]} (U(t) > 0.5mV)$
- QRS 군 <사지유도>:  $\square \diamond ((S_e - Q_s < 0.11s) \wedge (S_e - Q_s > 0.06s)) \wedge \square \diamond_{[Q_s, S_e]} (U(t) > 1.0mV)$
- T 파 <홍부유도>:  $\square \diamond_{[T_s, T_e]} ((U(t) < U(R_p) * \frac{2}{3}) \wedge (U(t) > U(R_p) * \frac{1}{10}) \wedge (U(t) < 1.2mV))$

- T 파 <사지유도>:  $\square \diamond_{[T_s, T_e]} ((U(t) < U(R_p) * \frac{2}{3}) \wedge (U(t) > U(R_p) * \frac{1}{10}) \wedge (U(t) < 0.6mV))$
- QT 간격:  $\square \diamond (T_e - Q_s < 0.44s) \wedge (T_e - Q_s > 0.36s)$

### 4. 결론 및 향후 과제

선형 시제 논리보다 시간을 다루는 명세 및 양적 평가에 유리한 신호 시제 논리를 사용해 정상인에 대한 ECG 참조 모델의 내용을 명세하였다. 여전히 잡음(noise)이 섞인 미가공 ECG 데이터를 전처리하고 파형을 감지하는 것은 기존 연구 결과로부터 나온 알고리즘과 기법에 의존할 수 밖에 없다. 하지만, 각종 파형, 간격, 분절 별로 명세한 모델 기반 ECG 실시간 모니터링 시스템에서 비정상적인 파형을 가진 환자를 즉시 검출하고 비정상적인 파형을 양적으로 평가하여 심장 전문가가 정밀 분석을 하기 전에 명세한 속성만큼은 정확히 진단해준다는 점과 실시간으로 환자의 상태를 알 수 있다는 점에서 ECG 데이터를 신호 시제 논리로 명세할 필요성이 대두된다.

명세를 한 논리식의 품질 자체는 절대적으로 도메인 지식에 의존적이다. 명세를 하기 위한 도메인 지식이 부족하거나 없으면 명세 자체에 큰 의미를 부여하기 어렵기 때문이다. 예를 들어, ECG 데이터를 명세한 경우 전문가들이 파형, 간격, 분절 등을 분석한 기존 연구 결과를 기반으로 관심 있는 속성을 명세한 것이기 때문이다. 현재는 다른 파형이나 간격에 비해 상대적으로 ST 분절을 해석하는 것이 여러 변수들이 작용함으로 인해 전문가들 사이에서도 선명하지 않다. 하지만 심전도 신호의 전반적인 사이클과 각 파형, 간격, 분절 별로 일반적인 수치를 통한 해석이 통용되고 있다. 그래서 특별히, 신호 시제 논리를 사용하여 양적으로 평가해주는 모델 기반 실시간 ECG 모니터링 시스템의 신속한 개발이 필요하다는 것이 이 논문의 요지다.

이러한 모델 기반 실시간 ECG 모니터링 시스템은 인도와 같은 개발 도상국들이 대면하고 있는 전문 의료진의 부족 현상[1]과 이로 인해 전문 진료를 받을 기회가 부족한 환자들에게 큰 도움을 줄 수 있다고 생각된다.

### 참고문헌

- [1] Mhatre, Amruta, and Sadhana Pai. "Temporal analysis and remote monitoring of ECG signal." *Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE), 2015 International Conference on.* IEEE, 2015.
- [2]한재희, 강다원, 장인석. "심전도 =  $\beta$ Principles of electrocardiogram", 범문에듀케이션, 2011.
- [3]권혁, 권기현. "신호 시제 논리를 사용한 순음 생성기", 한국정보처리학회, 2015.
- [4] Deshmukh, Jyotirmoy V., et al. "Robust Online Monitoring of Signal Temporal Logic." *arXiv preprint arXiv: 1506.08234* (2015).
- [5] Bartocci, Ezio, Luca Bortolussi, and Guido Sanguinetti. "Learning temporal logical properties discriminating ECG models of cardiac arrhythmias." *arXiv preprint arXiv: 1312.7523* (2013).