

DCT와 파워 스펙트럼의 에너지 비율을 이용한 PPG 신호의 이상 탐지

이현정, 김두식, 김민성, 김광용, 임길택

한국전자통신연구원

{ehj1224, doosik, kms5905, kimky, ktl}@etri.re.kr

Abnormal PPG signal detection using DCT and energy ratio of power spectrum

Hyeonjeong Lee, Doosik Kim, Minseong Kim, Kwangyong Kim, Kil-Taek Lim

Electronics and Telecommunications Research Center

요약

본 논문은 이산 코사인 변환(Discrete Cosine Transform, DCT)을 활용하여 PPG(Photoplethysmogram) 신호의 이상을 탐지하는 방법을 제안한다. 이 연구는 DCT를 활용한 PPG 신호의 주파수 분석으로 신속하면서도 효율적으로 이상 신호를 탐지할 수 있는 가능성을 제시하며, 심혈관 상태 모니터링 시스템의 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

I. 서론

광학 신호를 이용한 심박수 측정 기술, 특히 광용적맥파(PPG, Photoplethysmogram) 신호 분석은 현대의 건강 모니터링 시스템에서 중요한 역할을 하고 있다[1]. PPG 신호는 혈관의 용적 변화에 의해 발생하며, 이를 통해 심박수 및 심혈관 상태를 평가할 수 있다. 그러나 PPG 신호는 다양한 요인에 의해 왜곡될 수 있어, 신뢰성 있는 심박수 분석을 위해 신호의 이상을 조기에 탐지하는 것이 필수적이다[2].

PPG 신호의 정확한 분석을 위해서는 신호의 주파수 특성을 분석하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이산 코사인 변환(Discrete Cosine Transform, DCT)을 이용하여 PPG 신호의 주파수 분석을 수행하고, 이를 통해 PPG 신호의 이상을 효과적으로 탐지하는 방법을 제안한다. 즉 DCT를 활용하여 PPG 신호의 파워 스펙트럼을 분석하고 에너지 비율을 기반으로 신호의 이상을 탐지한다. 특히 DCT는 주파수 성분의 진폭 정보를 추출하면서도 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다.

PPG 신호의 정확한 이상 탐지는 심장 질환 및 기타 건강 문제를 조기에 발견하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 DCT 기반의 분석 방법은 효율적인 신호 분석을 가능하게 하여, 실시간 건강 모니터링 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

II. 본론

1. 이산 코사인 변환(Discrete Cosine Transform, DCT)

이산 코사인 변환(Discrete Cosine Transform, DCT)은 주파수 분석에 사용되는 중요한 변환 기법이다. 푸리에 변환(Fourier Transform)은 신호를 주파수 성분으로 분해하여 진폭과 위상 정보를 제공하는 반면, DCT[3]는 신호를 주파수 도메인으로 변환할 때 진폭 정보만을 제공한다.

DCT는 주어진 시간 도메인 신호 $x[n]$ 을 주파수 도메인 신호 $X[k]$ 로 변환하며, 수식은 다음과 같다:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right]$$

DCT는 실수만을 사용하며 주파수 성분의 진폭 정보를 얻는다.

2. 파워 스펙트럼 분석

파워 스펙트럼은 신호의 주파수 성분의 에너지 분포를 나타낸다. 신호의 에너지는 주파수 성분의 제곱으로 계산되며, 수식은 다음과 같다:

$$P[k] = X[k]^2$$

여기에서 $P[k]$ 는 k 번째 주파수 성분의 에너지, $X[k]$ 는 주파수 공간에서의 성분 값이다. 파워 스펙트럼은 신호의 주파수 성분별 에너지를 분석하여 신호의 특성을 이해하는 데 도움을 준다.

특정 주파수 범위의 에너지 비율은 신호의 특정 주파수 대역에서의 에너지를 전체 에너지로 나눈 값으로 정의되며, 계산식은 다음과 같다:

$$\text{Energy Ratio} = \frac{\sum_{f_{\min} \leq f \leq f_{\max}} P[f]}{\sum P[f]}$$

여기에서 $f_{\min}$ 과 $f_{\max}$ 는 관심 주파수 범위의 하한과 상한이다.

심박수는 보통 분당 비트 수(BPM, Beats Per Minute)로 표현된다. 정상 심박수 범위가 보통 60 ~ 100 BPM이므로, 이를 주파수로 변환하면 1.0 ~ 1.7 Hz에 해당한다. 아래의 파이썬 코드는 PPG 신호의 파워 스펙트럼을 분석하고 특정 주파수 범위의 에너지 비율을 계산하는 예제이다.

```
import numpy as np
from scipy.fftpack import dct # use scipy for DCT transform

fs = 125 # sampling rate of PPG signal
signal = read_ppg_data() # read PPG. shape=(485, 1000)
dct_signal = dct(signal, type=2) # perform DCT transform
freqs = np.arange(len(signal)) * \
        fs / (len(signal) * 2) # calculate frequency range
magnitudes = np.abs(dct_signals) # get magnitude
magnitudes[:, 0] = 0 # set zero for 0 Hz frequency
energy = magnitudes ** 2 # calculate energy
freq_mask = (1.0 <= np.abs(freqs)) & (np.abs(freqs) <= 1.7)

ratio = np.sum(energy[:, freq_mask], axis=1) / \
        np.sum(energy, axis=1) # calculate energy ratio
```

III. 실험 결과 및 분석

MIMIC-III 데이터셋[4] 중 p000333 환자의 PPG 신호 데이터를 5초 길이로 나누어 총 485개의 PPG 신호를 추출하였다. 그림 1은 PPG 신호로부터 분석한 1.0 ~ 1.7 Hz 구간의 에너지 비율을 그린 히스토그램으로, 약 56%에 해당하는 PPG 신호의 에너지 비율이 0.7보다 크을 알 수 있다.

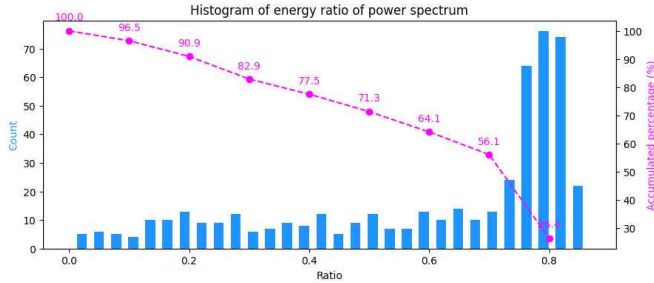


그림 1. PPG 신호의 에너지 비율에 대한 히스토그램 분포.

그림 2는 에너지 비율이 낮은 PPG 신호부터 에너지 비율이 높은 PPG 신호까지 순서대로 보였다. 에너지 비율이 클수록 정상적인 맥박 파형을 보이는 것을 알 수 있다.

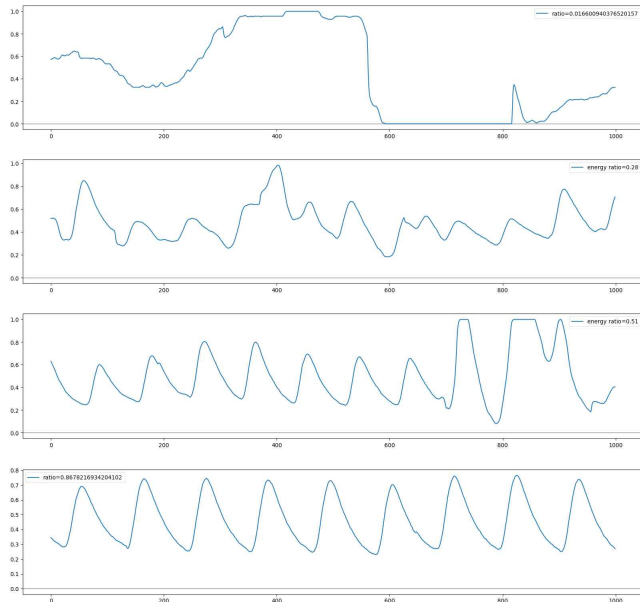


그림 2. PPG 신호의 예시(에너지 비율의 크기 순서).

그림 3은 PPG 신호에서 얻은 피크 통계와 파워 스펙트럼의 에너지 비율을 그래프로 도시하였다. 5초 길이 PPG 신호가 정상 맥박을 갖는 경우 피크 수는 8 이상이며, 피크 수가 8보다 작을 때의 에너지 비율은 모두 0.2 미만으로 비정상적인 신호임을 알 수 있다.

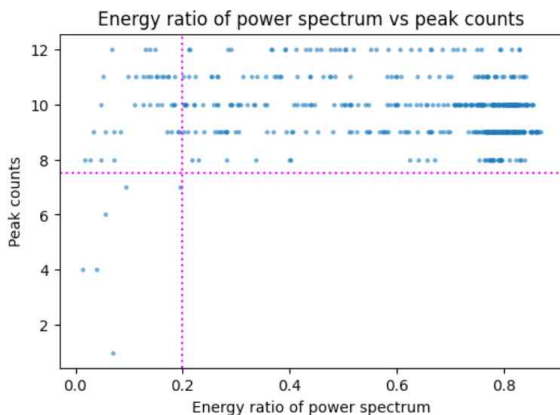


그림 3. PPG 신호의 에너지 비율과 피크 수

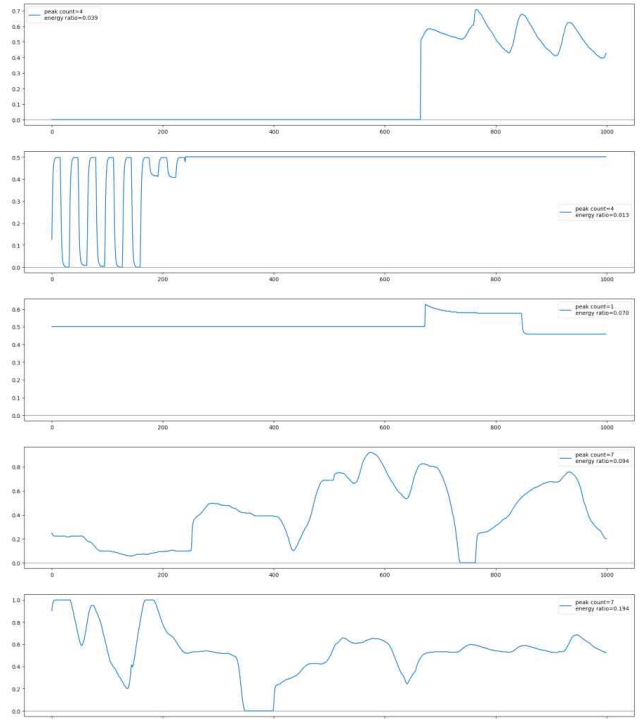


그림 4. 피크 카운트가 8보다 작은 PPG 신호

III. 결론

본 논문에서는 이산 코사인 변환(Discrete Cosine Transform, DCT)을 활용하여 PPG 신호의 이상을 탐지하는 방법을 제안하였다. PPG 신호는 혈관의 용적 변화를 통해 심박수 및 심혈관 상태를 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

DCT는 주파수 도메인에서 신호의 진폭 정보를 효율적으로 추출하며, 계산 속도가 빠르고 메모리 사용량이 적어 대규모 데이터 처리 및 실시간 신호 분석에 적합하다. 실험 결과, MIMIC-III 데이터셋을 사용한 분석에서 에너지 비율의 히스토그램 분석을 통해, PPG 신호의 정상 상태와 이상 상태를 구분하는 데 있어 DCT 기반의 파워 스펙트럼 분석이 유용함을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 DCT 기반의 PPG 신호 분석 방법은 심박수 및 심혈관 상태 모니터링 시스템의 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국전자통신연구원 기본사업(24ZD1100) 및 학연협력플랫폼구축 시범사업(RS-2023-00304776)의 지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] P. H. Charlton et al., "The 2023 wearable photoplethysmography roadmap," *Physiol. Meas.*, vol. 44, no. 11, p. 111001, Nov. 2023.
- [2] M. Elgendi, "Optimal Signal Quality Index for Photoplethysmogram Signals," *Bioengineering (Basel)*, vol. 3, no. 4, p. 21, Sep. 2016.
- [3] E. Feig and S. Winograd, "Fast algorithms for the discrete cosine transform," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, no. 9, pp. 2174 - 2193, Sep. 1992.
- [4] A. E. W. Johnson et al., "MIMIC-III, a freely accessible critical care database," *Sci Data*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, May 2016.