ECG 압축 방법들의 코딩 성능 비교 분석

장 승진, 송 상하, 윤 영로
연세대학교 보건과학대학 의공학과, 재택건강관리 연구 센터

Comparative Analysis of Coding Performance of Several ECG Compression Methods

Department of Biomedical Engineering, Health & Science College, Yonsei University,
Home Healthcare Management System Research Center

Abstract - 수많은 방식의 ECG 압축 코딩 알고리즘이 개발되어왔고 현재도 개발 중이지만 각자의 알고리즘의 성능에 유리한 특정 데이터만을 분석하고 압축율이 다름으로 인해 다른 알고리즘과의 성능 비교를 객관화하고 있지 못하였다. 본 연구에서는 기존의 MIT-BIH에서 제공하는 ECG 신호와 달리 시뮬레이션된 ECG 신호를 기반으로 각각의 알고리즘에 대한 성능비교를 하여 ECG신호의 특성에 따른 코딩 알고리즘의 압축율 및 평균 오차 에러의 정도를 분석비교하였다. 비교 대상 알고리즘으로는 상용화되어 널리 사용되는 Delta 코딩 방식의 문턱치를 갖는 Discrete Pulse Code Modulation과 Discrete Cosine Transform, Lifting Wavelet Transform 과 Wavelet 기반 Linear Prediction 4가지 알고리즘을 대상으로 분석하였다. Compression Ratio (CR)을 2,4로 고정하고 Percentage of Root-mean-square difference (PDR)를 분석한 결과, EMG 잡음의 진폭변화에는 0.1mV이하의 경우 DCT, Wavelet Lifiting Tranform이 낮은 PDR을 보였고, 0.1mV이상의 경우 Wavelet based Linear Prediction (WLP)이 낮은 PDR을 보였다. Heart Rate의 간격에 변화를 주어 불규칙성이 있는 경우 WLP가 가장 안좋은 PDR 결과를 보였으며, DCT가 가장 낮고 안정된 PDR 결과를 보였다. DPCM은 노이즈와 진폭간격의 변화에 상관없이 압축율에 의해 크게 PDR 성능 결과가 변화함을 나타내었다.

Abstract - Compression Coding, DPCM, DCT, Wavelet

1. 서 론

현존하는 수많은 의료기기들은 IT 기술의 발전과 더불어 효율적으로 관리할 수 있는 충분히 큰 용량의 메모리 공간을 가지게 되었다. 하지만, 진단용 홀터 ECG와 같은 경우 최소 12비트 샘플 데이터와 360Hz 샘플링율을 갖고 있다고 가정할 때 12시간 데이터를 기록하게 될 경우 채널 당 약 24MB의 용량이 소요되게 된다. 그렇기 때문에 데이터를 압축하는 것이 보다 효율적으로 데이터 공간을 관리할 수 있게 된다.

본 연구에서는 기존의 여러 가지 압축 코딩 방법들 중 실용적으로 많이 사용되는 4가지 알고리즘을 대상으로 시뮬레이션된 ECG와 실제의 ECG 데이터에 적용하여 어떠한 압축 코딩 방식이 보다 효율적으로 ECG 신호를 압축할 수 있는가에 대해서 비교 분석하였다.

2. Compression Techniques And Performance Parameters

2.1 ECG 압축 방식

ECG 압축 방식은 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째는 원 신호를 가지고 직접 데이터 압축을 하는 direct data compression coding 방식이고, 두 번째는 ECG 신호를 주파수 또는 시간-주파수 도메인으로 변환시켜 압축시키는 transform coding 방식이 존재하고, 마지막으로 ECG 신호에서 시간 도메인에서의 특정 파라미터들을 추출하여 압축하는 parameter extraction coding 방식이 있다. direct data compression coding 방법으로는 Amplitude Zone Time Epoch Coding (AZTEC), Coordinate Reduction Time Encoding System (CORTES), Differential Pulse Code Modulation (DPCM) 등이 있고, transform coding 방법으로는 Karhunen-Loeve Transform (KLT), Discrete Cosine Transform (DCT), Wavelet을 이용한 방법들이 있으며, Parameter extraction coding 방식에는 Cycle-Pool-Based Compression (CPBC), Linear Prediction을 이용한 방법들 및 neural-network와 같은 비선형 회귀 분석기를 이용한 방법들이 존재한다 [3].

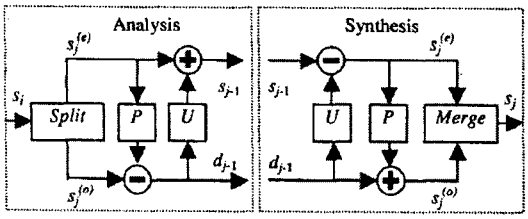

그림 1. Schematic Diagram of Lifting Wavelet Transform with encoding (left) and decoding (right)

본 논문에서는 DPCM, DCT, Wavelet Lifting Transform (Wavelet)과 Wavlet based Linear Prediction (WLP) 4가지 방법들을 가지고 비교 분석하였다. DPCM은 문턱치 방식의 Delta 코딩을 적용하였으며, 본 연구에서는 CR을 2 또는 4로 고정하여 분석하였다. DCT는 discrete cosine transform 후에 특정 CR만큼 압축 정도를 조절한 후 그 이후의 값은 0으로 채워서 다시 inverse discrete cosine transform을 취하여 복원 성능을 계산하였다. Wavelet은 그림 1과 같이 lifting wavelet transform을 이용하여 split과 prediction 과정을 거쳐 압축, 복원을 적용하는 변환을 이용하였다 [2].

원 신호 s_j에 대하여 even, odd 서열의 샘플로 분리하여 d_{j-1}계수를 구하기 위해 odd 샘플에서 even 샘플의 예측치를 빼고 다시 d_{j-1}에 대한 업데이트에 even 샘플을 더하여 분석하고 이를 다시 역으로 변환하는 과정을 거쳐 신호를 복원하게 된다.

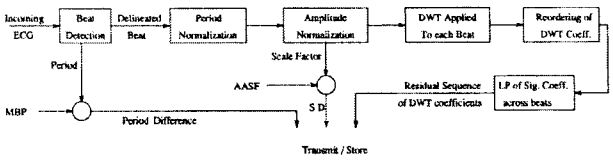

그림 2. Encoding Process of Wavelet based Linear Prediction

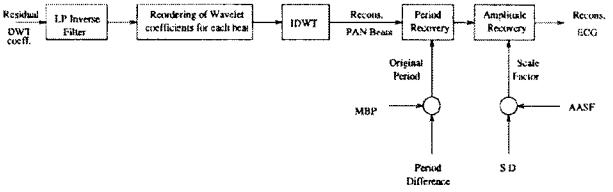

그림 3. Decoding Process of Wavelet based Linear Prediction

Wavelet based Linear Prediction [2]은 그림 2, 3과 같은 encoding/decoding과정을 거치게 된다. 선형 예측을 하기 위하여 신호에 대해 구간을 일정하게 만들어 주고 진폭을 일정하게 만들어주는 normalization과정과 이후 wavelet transform 과정이후 LP 분석 계수를 통해 얻은 신호의 특징 값들을 가지고 encoding 과정을 거치며, 그림 3에서와 같이 역으로 LP역변환과 각각의 비트에서 구한 wavelet 변환의 계수를 가지고 wavelet 역변환을 구하여 여기에 다시 구간 길이를 복원하기 위해 구간 길이를 곱하고 다시 진폭에 대한 scale factor를 곱하여 원 ECG 신호를 복원하게 된다.

2.2 ECG 압축 성능 기준

분석 방법은 Compression Ratio (CR), 신호 복원율을 평가하기 위한 PRD (Percent of Root-mean-square Difference)을 이용하였다 [1]. CR은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$CR = \frac{Segment\ Size_{original}}{Segment\ Size_{compression}} \tag{1}$$

하지만, CR은 PRD에 의한 압축 신뢰성에 종속적인 결과를 보이게 된다. 즉, CR이 증가할수록 PRD 또한 증가하게 되고, 반대로 CR이 작을수록 PRD가 감소하게 된다. PRD는 식 (2)와 같이 정의된다. x_i은 원 신호, $\hat{x}_i$는 압축된 신호, M은 압축 구간의 길이를 의미한다.

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}(x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^{M} x_i^2}} \times 100(\%) \tag{2}$$

일반적으로 PRD 값이 0≤PRD<2%일 경우 성능이 매우 우수하다고 평가하며, 2≤PRD<5%의 경우 우수, 5≤PRD<10% 보통, 10≤PRD<20%의 경우를 좋지 않음으로 평가하고 있다.

3. Coding Performance Test

3.1 시뮬레이션 ECG 신호

본 연구에서 사용되는 각각의 Coding 방법들은 샘플의 특성에 따라 성능 결과가 달라질 수 있다. 즉, EMG 노이즈와 같은 잡음 및 R-peak의 불규칙성에 의해서 CR, PRD의 결과 값이 달라질 수 있다. 이러한 실험 분석을 위하여 ECGSYN[4]이라는 컨트롤이 가능한 시뮬레이터된 ECG를 사용하여 각각의 코딩 알고리즘들의 성능을 비교 분석하였다. 그림 4는 ECGSYN을 통해 생성된 시뮬레이션된 ECG 신호의 예이다.

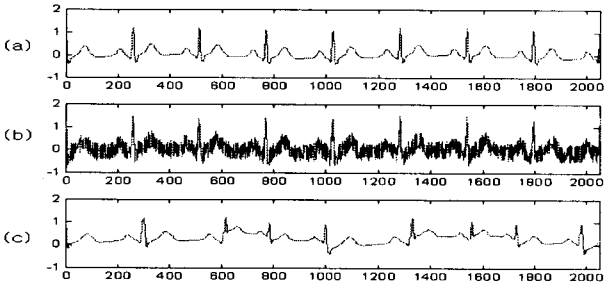

그림 4. ECG신호(2048 샘플) 256Hz (a) STD of EMG Noise= 0, STD of HR/min= 0, (b) STD of EMG Noise= 0.4, STD of HR/min= 0, (c) STD of EMG Noise = 0, STD of HR/min= 12

3.2 EMG Noise 변화에 의한 성능 비교 분석

그림 4에서 볼 수 있듯이 CR을 고정 시켜두고 (CR=2/4) $R_{p,p}$에 대한 EMG 잡음에 대한 표준 편차를 변화시키면서 PDR에 대한 변화를 분석하였다. 분석에 의해 CR=2에서는 DPCM의 PDR 변화가 거의 없지만, 다른 모든 알고리즘은 EMG Noise 진폭 증가에 따라 PDR이 비례적으로 증가한다는 사실이다. 또한 DCT와 Wavelet의 결과 값이 거의 일치하는 반면 WLP는 이들 보다는 안정적으로 증가하기 때문에 Noise에는 robust한 특성을 나타내었다. CR=4에서는 CR=2에서 보다는 모든 알고리즘이 PDR이 증가함을 나타내었다. 특히 DPCM의 경우 가장 높은 PDR을 보였으며, EMG noise의 진폭 증가에 따라 단조 감소하는 것으로 보아 미분 특성에 따른 양자화 값의 오차가 다소 감소하여 생기는 현상으로 보여진다. CR=2,4에서 모두 살펴본 결과 WLP 알고리즘이 0.1 mv의 표준 편차 이상의 EMG Noise에서는 강건한 결과를 보이는 반면, 그 이하의 경우 DCT, Wavelet 알고리즘이 더 우수한 것으로 판명되었다.

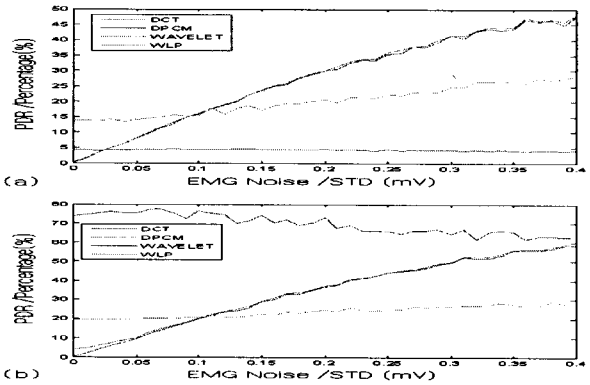

그림 4. (a) CR=2, (b)=CR=4, R wave의 진폭에 대한 EMG Noise의 진폭의 표준 편차에 따른 PDR 변화

3.3 Heart Rate 변화에 의한 성능 비교 분석

EMG Noise 변화 분석과 마찬가지로 그림 5에서 볼 수 있듯이 CR을 고정 시켜두고 (CR=2/4) $R_{p,}$에 대한 간격에 대한 표준 편차를 변화시키면서 PDR에 대한 변화를 분석하였다. 분석에 의해 CR=2에서는 다른 알고리즘에서는 PDR 변화가 거의 없지만, WLP에서는 다른 알고리즘보다 매우 큰 PDR을 보였으며, 완전히 선형적으로 비례하지는 않지만 다소 증가하는 것으로 결과가 도출되었다. 이것은 선형예측의 성능이 좋지 못해서 발생한 결과로 예측된다. CR=4에서도 마찬가지로 WLP는 다소 증가하는 패턴을 보였다. DPCM의 경우 CR=2보다 매우 크게 증가한 PDR을 보였으며 단조 감소하는 패턴을 나타내었다. Wavelet 또한 8% 안으로 변화를 보이면서 PDR이 변화하는 반면 DCT는 HR 변화에 상관없이 일정하게 최저의 PDR을 보여서 가장 robust한 알고리즘으로 판명되었다.

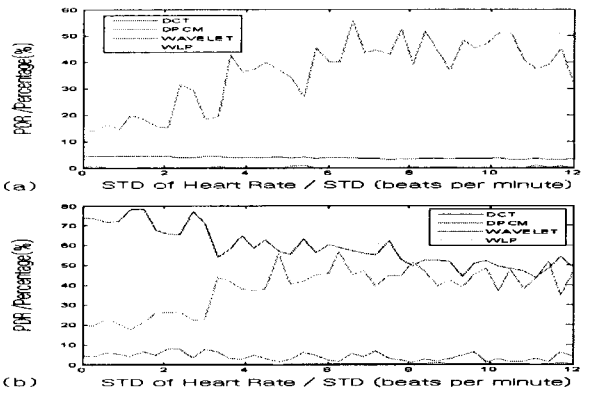

그림 5. (a) CR=2, (b)=CR=4, 분당 심박동 수의 표준 편차에 따른 PDR 변화

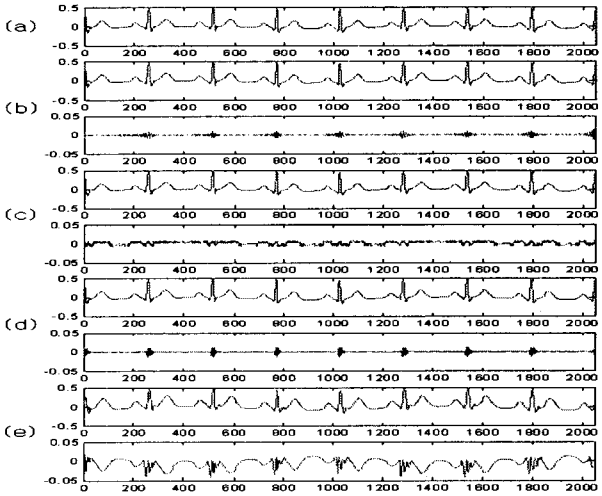

그림 6. Episodes of comparative performance analysis (a) original signal with 256Hz, STD of EMG Noise = 0, STD of HR change = 0, (b) reconstruction signal and errors of DCT, (c) reconstruction signal and errors of DPCM, (d) reconstruction signal and errors of Lifting Wavelet Transform, (e) reconstruction signal and errors of Wavelet based Linear Prediction

3. 결 론

EMG 노이즈의 진폭 변화와 심박동 간격의 변화에 따른 기존의 상용적으로 널리 사용되는 ECG 압축 코딩 알고리즘들의 성능 평가를 수행하였다. 본 연구 결과 노이즈 진폭의 경우 0.1mV를 기준으로 이하의 경우 DCT, Wavelet 알고리즘이 낮은 PDR 결과를 보였으며 0.1mV이상의 경우 WLP가 우수한 결과를 보였다. 심박동 간격 변화의 경우 DCT가 가장 낮은 PDR 결과를 보였으며, WLP의 경우 좋지 않은 성능을 보였으며, 이는 선형 예측의 한계점 때문이라 예측 된다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임.(A020602).

[참 고 문 헌]

[1] S. M. S. Jalaleddine, C. G. Hutchens, R. D. Strattan and W. A. Coberly., "ECG Data Compression Techniques - A Unified Approach", IEEE Trans. on Biomedical Eng., vol. 37, 4, pp. 329-341, 1990

[2] Ramakrishnan, A.G., Saha, S., "ECG coding by wavelet-based linear prediction", Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, Vol. 44, 12, pp. 1253 - 1261, 1997

[3] Duda, K., Turcza, P., Zielinski, T.P., "Lossless ECG compression with lifting wavelet transform", Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 1, 21-23, pp. 640 - 644, 2001

[4] McSharry PE, Clifford GD, Tarassenko L, Smith L. "A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals",.IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 50, 3, pp. 289-294, 2003.