

다중 채널 디지털 보청기 알고리즘의 고정 소수점 연산 최적화

이근상*, 백용현*, 박영철**

Fixed-point Optimization of a Multi-channel Digital Hearing Aid Algorithm

Lee Keun Sang*, Baek Yong Hyun*, Park Young Chul**

요 약

본 논문에서는 저 전력 시스템에 적합한 고정 소수점 연산기로 구현된 다중 채널 디지털 보청기 알고리즘의 최적화 기법을 제시한다. 먼저 입력 신호를 고속 MDCT(modified discrete cosine transform) 방법을 사용하여 주파수 대역 분할함으로써 알고리즘의 복잡도를 최소화 하였고, MDCT 출력을 비선형 대역 분할 과정을 거쳐 채널별 그룹핑을 한 다음, 각 채널 신호를 난청인의 청각 손실 정도에 따라 구성된 라우드니스 보상 함수(loudness compensation function: LCF)표를 이용하여 이득을 조절하고, 최종적으로 TDAC 기법을 구현하는 IMDCT(Inverse MDCT) 변환을 거쳐 보상된 출력을 합성한다. 모든 과정은 16비트 정수 연산으로 구현되며, 이득을 계산하기 위해 측정되는 로그 단위의 연산 과정은 미리 계산된 테이블과 고속 탐색 알고리즘을 이용하여 구현된다. 구성된 보청기 알고리즘의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가하였다.

ABSTRACT

In this study, multi-channel digital hearing aid algorithm for low power system is proposed. First, MDCT(Modified Discrete Cosine Transform) method converts time domain of input speech signal into frequency domain of it. Output signal from MDCT makes a group about each channel, and then each channel signal adjusts a gain using LCF(Loudness Compensation Function) table depending on hearing loss of an auditory person. Finally, compensation signal is composed by TDAC and IMDCT. Its all of process make progress 16-bit fixed-point operation. We use fast-MDCT instead of MDCT for reducing system complexity and previously computed tables instead of log computation for estimating a gain. This algorithm evaluate through computer simulation

Key Word

Multi-channel, digital hearing aid, fast-MDCT, 16-bit fixed-point, LCF

I. 서론

디지털 보청기는 보청기 기술의 커다란 진보를 의미한다. 이는 디지털 기술이 갖는 신뢰도 안정성 등의 기본적인 이유뿐만이 아니라, DPS기술이 갖는 무한한 잠재성이 보청기에 적용되어 실현될 것이라는 기대감 때문이다. 최근의 디지털 보청기

에서는 보다 복잡하고 기술적인 집약도가 높은 보청기의 형태로 실현 가능해 지고 있다. 그로인해 아날로그 보청기로 실현 할 수 없는 고도의 신호 처리 기술을 가능 하게한다.

디지털 보청기를 이루는 기본 기술은 아날로그 보청기와 마찬가지로 압축(compression)이다. 압축이란 난청자의 청각 범위에 맞도록 입력 신호의

* 연세대학교 전산학과 이학석사과정(ksang2@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 컴퓨터정보통신기술학부 교수(young00@yonsei.ac.kr)

#논문번호 : KIIECT2009-02-14

#접수일자 : 2009.05.26

#최종논문접수일자 : 2009.06.11

동적 영역(dynamic range)을 조절 하는 과정이다. 그러나 청력 손실은 사람에 따라 다양한 주파수 특성을 갖기 때문에 보청기도 여러 개의 주파수 대역에서 압축을 수행할 수 있어야 한다. 청력 손실은 비선형적인 라우드니스 특성(recruitment)을 동반하는 경우가 자주 있다. 이러한 비선형 특성에 대응하기 위해서는 압축 방법도 비선형적으로 이루어져야 한다. 이는 일반적으로 입력신호의 레벨에 따라 증폭도를 달리하는 기술인 WDRC(wide dynamic range compression)를 이용함으로써 각 주파수 대역별로 독립적인 이득 조절을 가능하게 한다. 이때 청력 손실 정도에 따라 산정된 이득을 정확히 얻기 위해서는 라우드니스 보상 함수(loudness compensation function : LCF)표를 구성하여 이득을 계산한다[1]. 계산된 이득이 취해진 출력은 최종적으로 출력 압축을 통해 출력을 제한하여 청력을 보상하게 된다.

MDCT(Modified Discrete Cosine Transform)라는 고해상도 변환 방법을 사용함으로써 기존의 보청기 보다 유연한 대역 분할 구조를 가질 수 있으며, 심리 음향 모델에서 주로 사용하는 임계 대역(critical band)에 따른 주파수 분할까지도 가능한 구조이다. MDCT가 비록 FFT에 비해 적은 계산량으로 효과적인 대역 분할을 할 수 있으나 여전히 디지털 보청기에서 요구하는 수준의 저 전력으로 구현하기 위해서는 부담이 되기 때문에 고속 MDCT 방법[2]을 사용함으로써 계산량 부담을 줄일 수 있다.

보청기는 한정된 배터리를 사용하기 때문에 보다 저전력에 적합한 방법을 사용해야 한다. 부동 소수점 이하의 연산은 보다 정확한 결과를 얻을 수 있지만 많은 연산량을 요구하는 반면에, 고정 소수점 연산은 부동 소수점 연산에 비해 오차가 발생 하지만 적고 빠른 연산 능력을 보인다. 보청기라는 특성을 이용하여 사람이 인지하는 범위 내에서의 오차를 허용한다면 고정 소수점 연산을 가능 하게 한다. 또한, envelope estimation으로부터 얻는 채널의 레벨에 대한 table과 이에 상응하는 이득값의 테이블을 미리 연산하여 로그연산을 탐색연산으로 제한하는 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 저 전력 시스템에 적합한 16비트 고정 소수점 연산을 기준으로 다중 채널 디지털 보청기 알고리즘을 최적화하였다. 최적화된 시스템의 성능을 부동 소수점 연산 결과와 비교함으로써 측정하였으며, 그 결과의 유용성을 검증하였다.

II. 다중 채널 디지털 보청기 알고리즘

본 논문에서 제안한 알고리즘은 <그림1> 에서와 같이 MDCT/IMDCT, Envelope추정을 통한 이득 계산으로 난청 보상을 하고, TDAC 과정을 거쳐 출력하는 구조로 이루어져 있다.

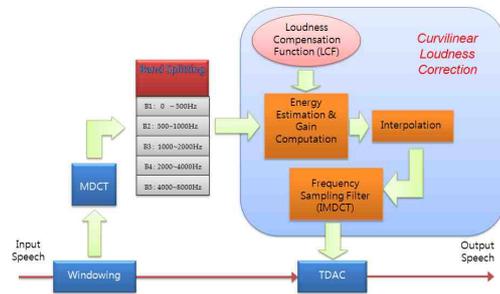


그림 1. MDCT를 기반으로 하는 제안한 다중 채널 디지털 보청기

Fig 1. Proposed multi channel digital hearing aid based on MDCT

2-1 MDCT/IMDCT 필터뱅크

MDCT알고리즘은 다채널의 압축 시스템을 갖는 보청기를 가능하게 하게 한다. 보통 N개의 데이터를 변환하기 위해서는 FFT를 사용할 경우 2N번의 연산이 필요하지만 FFT 기반의 고속 MDCT 방법 [2]은 odd-time, odd-frequency discrete fourier transform(O²DFT) 기법을 사용함으로써 (N/4)-point complex FFT로 구현이 가능하다[3]. 이때 시간축 윈도우간의 50% 중첩 과정에 의해 필터 뱅크의 분석단에서 발생하는 aliasing은 TDAC방법을 사용하여 최소화 한 뒤 신호를 복원할 수 있다 [4]. 입력 신호가 16kHz로 표본화될 경우, 128개의 입력 데이터를 변환하면 125Hz간격을 갖는 64밴

드로 분할된다. 이것을 인간의 심리 음향을 고려한 5개의 비선형 채널로 그룹핑한다. 한편, 5개의 채널은 독립적으로 신호의 이득과 압축 비율 (compression ratio) 및 압축 시작점(threshold knee-point)을 조절할 수 있도록 하였다.

2-2. 이득 계산

이득 계산은 MDCT에 의해 채널별로 나누어진 신호로부터 구할 수 있다. 먼저 신호의 크기를 구하기 위해 envelope를 추정한다. 이때, 갑자기 큰 입력 신호가 들어올 경우 attack time(AT)을 적용하고 작은 신호가 들어올 경우는 release time(RT)을 적용시킨다. attack/release 시간은 10msec/100msec로 하여 fast attack/slow release 형태로 설정하여, <그림2>와 같은 결과를 얻을 수 있다.

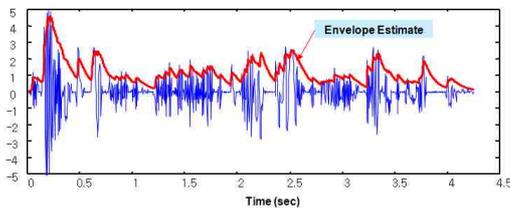


그림 2. Attack time 과 release time의 적용
Fig 2. Apply to attack time and release time

Envelope을 구한 후에는 입력신호의 파워를 구해 보상할 증폭 이득을 계산하게 된다. 이때 난청인의 가청 범위가 정상인의 것보다 좁기 때문에 난청인의 청력을 보상해 주기 위해서는 정상인의 가청범위를 난청인에 맞게 압축해야 한다. 보청기에서의 압축은 WDRC에 의해 수행되는데 이는 각 주파수 밴드별 혹은 채널별로 이득의 조절이 가능하다는 장점을 갖는다. WDRC는 입력신호의 레벨에 따라 이득을 달리하는 즉, 압축 시작점 (threshold knee-point)을 넘어서는 입력신호에 대하여 신호 레벨이 증가할수록 이득을 감소시키는 방법으로 설계된다. WDRC를 이용하여 난청인의 청력을 보상해주기 위해서는 정상인과 난청인의 청력 데이터로부터 LCF표를 구성해야 한다. LCF

표는 각 채널별로 청각 손실 정도에 맞는 이득을 구하기 위해 비선형 압축 방식으로 설계하였다. <그림3>에서처럼 정상인과 난청인의 음성인지 영역이 다르게 나타난다. 정상인의 경우 입력신호에 대해 비례 하듯 분포 되지만, 난청인의 경우는 동적 영역의 범위가 축소된다. 그렇기 때문에 입력신호에 대해 난청인의 음성 인지 영역으로 압축해주는 과정이 필요 하다.

III. 16비트 고정 소수점 연산 디지털 보청기 알고리즘

실수 연산으로 수행 되는 부분을 고정 소수점 연산으로 바꾸게 되면 부동소수점 이하의 부분을 무시하고 수행 하는 결과를 얻게 되어 에러가 발생하게 된다. 단순 연산 작업이면 어느 정도의 에러는 무시 할 수 있지만 복잡한 연산 작업을 수행 하면 에러는 축적되어 무시 할 수 없을 정도의 큰 에러를 발생 하게 된다. 하지만, 정수 연산은 속도가 빠르고, 한정된 전력을 사용 하는 환경에 적합 하기 때문에 이를 적용하기 위하여 에러 발생을 극복하는 방법을 제안 한다. 본 연구에서는 16비트 고정 소수점 연산을 기반으로 하는 보청기 알고리즘을 구성하였다. 고정 소수점 연산에 의해 영향을 받는 신호 처리 블럭은 MDCT/IMDCT 필터뱅크 와 로그 연산을 필요로 하는 이득 계산 및 적용 과정이다.

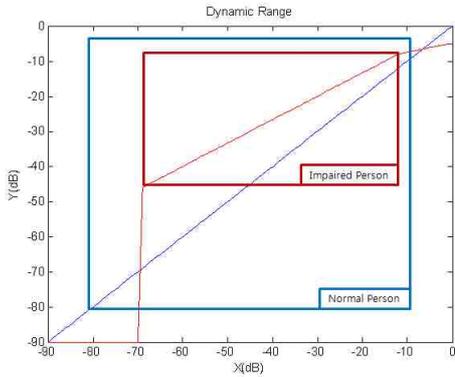


그림 3. 동적 영역 압축
Fig 3. Wide Dynamic Range Compression

3-1. MDCT/IMDCT 필터뱅크 구현

MDCT/IMDCT 연산은 사칙연산과 삼각함수 연산으로 이루어지는데 이들 연산을 16비트 고정 소수점 연산으로 변환 하여 부동 소수점 연산과의 오차를 최소화 하는 것을 제안 한다. 본 연구에서는 삼각함수 연산을 미리 16 비트 고정 소수점 연산이 가능하도록 변환된 값을 테이블화 하고 사칙연산 또한 16비트 고정 소수점 연산이 가능하게 미리 함수를 만든다. 덧셈과 곱셈의 경우 오버플로(overflow)가 발생하면 16비트의 최대값으로 취해준다. 각 채널의 평균 파워를 구할 때 고정 소수점 연산으로 할 경우 16비트 범위를 넘어가 오버플로가 발생하기 때문에 ifft에서 fft포인트로 나누어 주는 연산을 미리 수행하여 오버플로를 방지한다.

3-2. 이득 추정

Envelope estimation을 통하여 획득한 각 채널의 레벨을 로그 스케일로 변환하여 이득을 구한다. 이때 로그 연산은 16비트 고정 소수점 연산 에서 계산이 불가능하기 때문에 <그림4>에서와 같이 미리 0에서 90dB까지의 범위를 가지는 로그 테이블을 만들어둔다. 각 채널의 레벨 값이 들어오면 해당 로그값을 이진 탐색방법으로 찾아 반환하며 최악의 경우에 대하여 8번의 탐색이 필요하다. 획득한 파워의 log값을 이용하여 난청인에 따른 LCF 테이블을 기반으로 미리 계산된 linear scale의 이득을 찾아 구하게 된다.

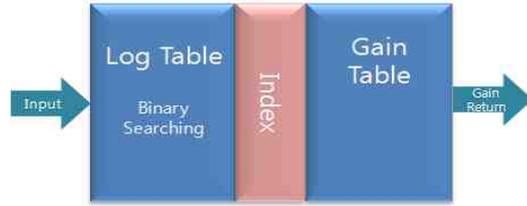


그림 4. Log와 이득에 대한 테이블
Fig 4. Table regarding as log and Gain

compressor는 90dB의 범위를 넘는 큰 레벨의 신호가 들어왔을 때 이를 90dB범위내로 줄여주는 역할을 하여 16비트 연산 범위를 넘는 오버플로를 방지한다. 최종 출력은 실제 실수로 연산을 한 것과 비교하여 차이를 보이지만 log scale을 기준으로 보면 최대 0.5dB의 차이밖에 가지지 않기 때문에 사람의 귀가 그 차이를 인지하지 못한다. 제안한 알고리즘은 사람의 청각이 인지하지 못하는 예외의 범위 안에서 table을 이용하여 연산 속도를 높이고 계산 복잡도를 줄일 수 있다.

3-3. 난청 보상 및 음성 출력

앞에서 추정한 이득은 각 채널별로 구한 최대 이득으로 보고 64개의 MDCT값에 이득을 곱해준다. 이때 발생 되는 aliasing을 최소화하기 위한 방법으로 보간법을 사용하며, 이것을 통하여 획득한 64개의 이득을 MDCT값에 곱하여 입력신호를 증폭시키고 TDAC 와 IMDCT 과정을 거쳐 디지털 보청기의 16비트 pcm 데이터 신호로 변환되어 출력한다.

IV. 실험 및 결과

샘플링 주파수 16Khz로 녹음한 음성 신호를 입력으로 사용하며 5개의 채널로 나눈다. 이득은 첫 번째 채널에서 5dB를 증폭시키고 순서대로 5dB씩 증가시켜 마지막 채널에서 25dB를 증폭시켜서 실험하였다. <그림6>, <그림7>과 같은 음악 신호와 음성 신호를 사용하여 실수 연산으로 획득한 출력과 정수 시뮬레이션으로 획득한 출력을 비교하여 본다.

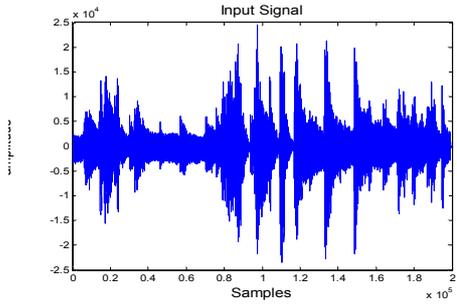


그림 6. 입력신호(music)
Fig 6. Input signal(Music)

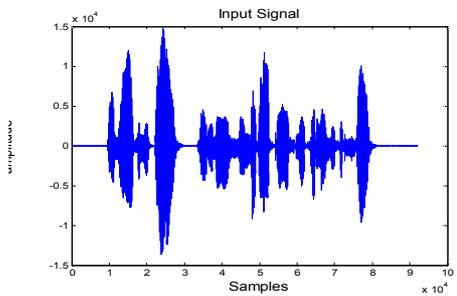


그림 7. 입력 신호(음성신호)
Fig 7. Input signal(Voice)

<그림8>은 음악 신호를 입력으로 하여 MDCT와 Envelope 추정을 정수 연산한 결과와 실수 연산한 결과의 차이이다. 양쪽 모두 최대 2비트의 에러를 가짐을 알 수 있다. <그림9>는 5개 밴드 각각의 평균파워와 그로부터 획득한 이득의 차이이다. 평균 파워 또한 최대 2비트의 에러가 발생하였고 이득은 최대 8비트까지 크게 에러가 발생하지만 이것은 이득 table로 인한 에러로 decibel단위로는 최대 0.5dB이상 차이가 나지 않는다.

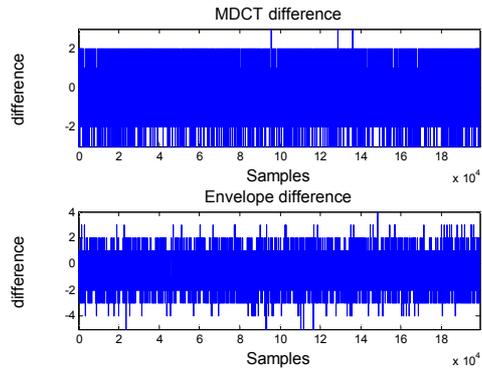


그림 8. 위, MDCT 연산 차이
아래, Envelope estimation 차이
Fig 8. Difference between Floating and Fixed with MDCT and Envelope estimation

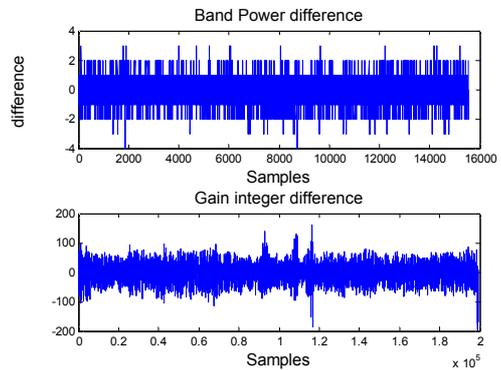


그림 9. 위, 밴드 파워 연산 차이
아래, 이득 차이
Fig 9. Difference between Floating and Fixed with Bands Power and Gain

입력 신호를 음성 신호로 하여 실제 증폭되는 보청기의 출력을 시뮬레이션 하였다. <그림10>은 실제 증폭된 음성의 출력을 그린 것으로 입력신호에 비하여 크기가 증폭되었음을 알 수 있다. <그림11>은 시간 영역에서의 두 입력 신호의 실수 연산 출력과 정수 연산 출력의 차이를 나타낸 것이고 <그림12>는 주파수 영역에서의 차이를 나타낸 것이다. 시간영역에서는 그림에서와 같이 두 출력의 차이가 크게 나타나지만 주파수 영역에서의 두 출력이 가지는 주파수 성분이 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 사람이 두 출력을 들었을 때 서로

의 차이를 인지하지 못하게 된다.

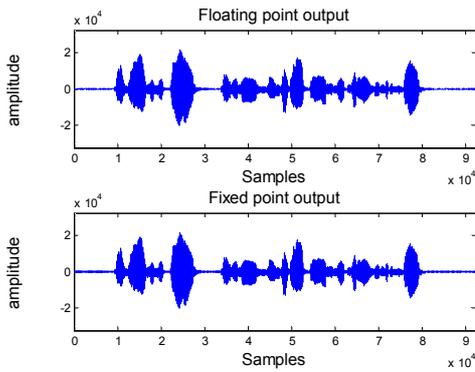


그림 10. 위, 실수 연산을 통해 얻은 출력(음성)
아래, 정수 연산을 통해 얻은 출력(음성)
Fig 10. Output signal of floating point & fixed
point computation

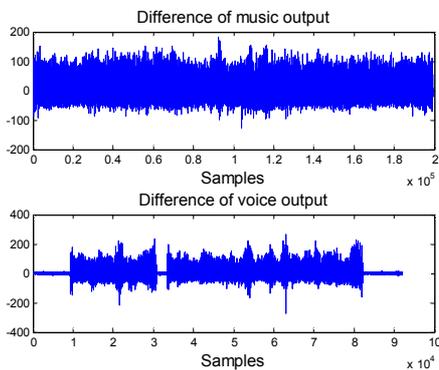


그림 11. 음악 신호 출력과 음성 신호 출력의
차이
Fig 11. Different of between musing signal
and speech signal

정수 연산은 16비트 연산으로 가비트를 사용하지 않기 때문에 실수연산과의 오차는 필연적으로 발생한다. 이러한 오차를 사람의 청각이 인지하지 못하는 수준까지 줄임과 동시에 테이블을 사용하여 더욱 빠른 연산 속도를 획득하고 계산 복잡도를 줄임으로써 디지털 보청기의 최대 이슈라고 할 수 있는 저전력 소모를 달성할 수 있다.

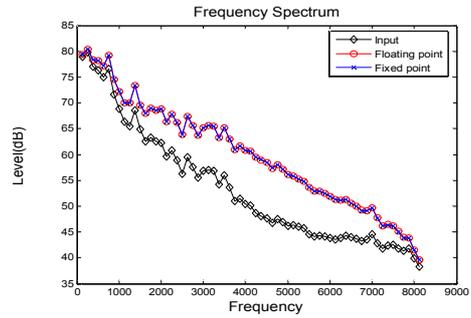


그림 12. 출력의 주파수 스펙트럼(음악 신호)
Fig 12. Spectrum of output music signal

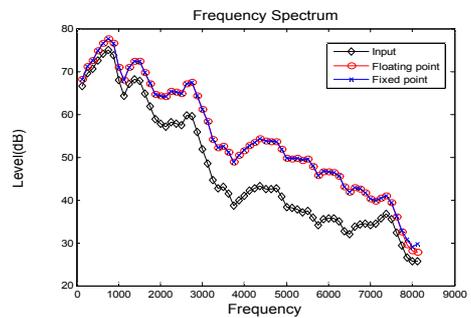


그림 13. 출력의 주파수 스펙트럼(음성 신호)
Fig 13. Spectrum of output speech signal

V. 결론

본 연구에서 제안한 방법은 저전력에 적합한 16 비트 고정 소수점 연산을 통하여 연산량을 줄임과 동시에 성능의 저하가 발생하지 않는 효과를 얻는 것을 목표로 하였다. 삼각함수, 로그, LCF 테이블을 만들어 연산량을 줄였고, 많은 계산량이 요구되는 MDCT/IMDCT부분의 연산량을 줄이는 방법으로 고속 MDCT/IMDCT방법을 적용하여 16비트 고정 소수점 연산이 가능하도록 하였다. 하지만 필연적으로 발생하게 되는 오차를 사람이 인지하는 범위 이내로 한정 하여 성능을 평가 하였다. 본 연구에서는 16비트 고정 소수점 연산이 가능하도록 연산량을 줄임과 동시에 동일한 성능을 가지는 것에 초점을 두었다.

참고문헌

[1] Mu-Huo Cheng and Yu-Hsin Hsu, "Fast IMDCT and MDCT Algorithms-A Matrix Approach", IEEE Trans. on Sign. Proc. Vol. 51, No. 1, Jan 2003

[2] Y. C. Park et al. "High Performance Digital Hearing Aid Processor with Psychoacoustic Loudness Correction", ICCE'97, Chicago, IL, June 1997

[3] K. Sayood, Introduction to Data Compression, Morgan Kaufmann Publishers, 1966

[4] Princen. J. and Bradley. A., "Analysis/Synthesis filter bank design based on time domain aliasing cancellation", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 34, No. 5, Oct 1986

저자약력

이근상 (Lee Keun Sang)



2006년 연세대학교 컴퓨터정보통신기술학부 공학사
2006년-현재 연세대학교 전산학과의학석사과정

<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호처리, 적응 필터, ECG

백용현 (Baek Yong Hyun)



2009년 연세대학교 컴퓨터 정보통신 기술학부 공학사
2009년-현재 연세대학교 전산학과의학석사과정

<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호처리, 적응 필터, PPG

박영철 (Park Young Chul)

1986년 연세대학교 전자공학과 공학사

1988년 연세대학교 전자공학과 공학석사

1993년 연세대학교 전자공학과 공학박사

2002년~현재 연세대학교 컴퓨터정보통신기술학부 교수



<관심분야> 디지털 신호처리, 음성/오디오 신호처리, 적응 필터, 3D 오디오