

채널보상기법을 사용한 전화 음성 연속숫자음의 인식 성능향상*

김민성(경북대), 정성윤(경북대), 손종목(경북대), 배건성(경북대)

<차 례>

- | | |
|--|--|
| 1. 서론 | 2.4. MRTCN (Modified Real Time Cepstral Normalization) |
| 2. 채널보상기법 | 3. 인식시스템 및 음성 DB |
| 2.1. CMN (Cepstral Mean Normalization) | 3.1. 특징파라미터 추출 |
| 2.2. RTCN (Real Time Cepstral Normalization) | 3.2. 음향 모델 및 언어 모델 |
| 2.3. MCMN (Modified Cepstral Mean Normalization) | 3.3. 음성DB |
| | 4. 인식 실험 및 결과 |
| | 5. 결론 |

<Abstract>

Performance Improvement of Connected Digit Recognition with Channel Compensation Method for Telephone speech

Min Sung Kim, Sung Yun Jung, Jong Mok Son, Keun Sung Bae

Channel distortion degrades the performance of speech recognizer in telephone environment. It mainly results from the bandwidth limitation and variation of transmission channel. Variation of channel characteristics is usually represented as baseline shift in the cepstrum domain. Thus undesirable effect of the channel variation can be removed by subtracting the mean from the cepstrum. In this paper, to improve the recognition performance of Korea connected digit telephone speech, channel compensation methods such as CMN (Cepstral Mean Normalization), RTCN (Real Time Cepstral Normalization), MCMN (Modified CMN) and MRTCN (Modified RTCN) are applied to the static MFCC. Both MCMN and MRTCN are obtained from the CMN and RTCN, respectively, using variance normalization in the cepstrum domain. Using HTK v3.1 system, recognition experiments are performed for Korean connected digit telephone speech database released by SITEC (Speech Information Technology & Industry Promotion Center). Experiments have shown that MRTCN gives the best result with recognition rate of 90.11% for connected digit. This corresponds to the performance improvement over MFCC alone by 1.72%, i.e., error reduction rate of 14.82%.

* 주제어: 전화음성 연속숫자음 인식, 채널보상, CMN, RTCN, MCMN, MRTCN

* 본 연구는 한국전자통신연구원 네트워크기술연구소 음성정보연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

1. 서 론

음성인식 기술의 발달로 음성인식을 이용한 다양한 서비스가 제공되고 있고, 좀 더 다양한 환경에서 음성인식 기술을 도입하려는 시도가 행해지고 있다. 최근엔 음성다이얼링이나 증권 서비스, 전화 안내 서비스 등 전화망을 이용한 음성인식이 실용화되기도 했다. 하지만 전화음성 인식은 전화채널의 대역제한 특성으로 인한 신호 왜곡, 호 형성시마다 바뀌는 전화채널 특성 및 잡음으로 인해 마이크를 사용한 음성인식에 비해 인식률이 좋지 못하다. 또한 휴대폰, PCS, 무선전화, 무선전화 등의 여러 환경에서 만족할 만한 인식률을 얻지 못하고 있는 것이 사실이다[1-3].

이동전화 사용이 증가하고 정보통신 기술의 발전으로 유무선 전화망에서의 음성인식 기술이 중요시됨에 따라 전화음성 인식의 문제점들을 해결하려는 연구가 많이 진행되어 왔다. 요즘에는 기존 전화음성의 인식률 향상에 대한 연구뿐만 아니라 무선 전화망 및 인터넷 전화음성 등 여러 환경에서의 인식 성능향상을 위한 연구도 이루어지고 있다[4]. 특히, 전화망에서의 연속 숫자음 인식은 정보 서비스에서의 신분확인이나 신용거래의 비밀번호 확인에 많이 이용되므로 전화망의 채널 왜곡이나 잡음으로 인한 인식성능 저하를 막아 인식률을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 일반적으로 전화채널 왜곡에 의한 영향을 보상하는 기법에 대한 연구는 cepstrum 영역에서 채널의 영향이 가산 형태로 나타나므로 cepstrum의 평균을 제거함으로써 채널의 영향을 줄이는 방향으로, 시간영역에서 채널의 특성이 음성신호에 비해 느리게 변화하는 특성을 이용하여 필터링을 통해 채널의 영향을 줄이고자 하는 방향으로 이루어져 왔다. 예를 들어, 왜곡된 cepstrum의 평균을 구하여 빼 줌으로써 채널왜곡을 보상하는 기법으로는 CMN (Cepstral Mean Normalization), RTCN (Real Time Cepstral Normalization), LCMS (Local Cepstral Mean Subtraction) 등이 있으며, 필터링기법을 이용한 채널보상 방법에는 RASTA (RelAtive SpecTrAl) 등이 있다[2-4]. 본 논문에서는 한국어 연속숫자음의 인식성능 향상을 위한 기초 연구로서 채널왜곡 보상기법에 따른 인식 성능을 비교하였다. 이를 위해 MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficient)를 기본 특징파라미터로 하는 인식시스템을 윈도우즈 환경에서 HTK (Hidden Markov Model Toolkit)를 이용하여 구현하고, 채널왜곡을 보상하는 기법으로는 기존의 CMN과 RTCN, cepstrum의 차수별 표준편차를 이용해 분산을 정규화시킨 MCMN (Modified Cepstral Mean Normalization)과 MRTCN (Modified Real Time Cepstral Normalization) 기법을 적용하여 성능을 비교하였다. 본 논문의 구성은 2장에서는 전화음성 인식 성능향상을 위해 적용한 채널보상 기법들에 대해 설명하고, 3장에서는 구현한 인식시스템 및 4연 숫자음 전화음성 DB에 대해 기술한다. 그리고 4장에서는 인식 실험 및 결과에 대해 설명한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 채널보상기법

전화음성 연속숫자음의 인식 성능향상을 위해 본 연구에서는 전화 채널의 영향을 받은 왜곡된 음성신호에서 MFCC 특징파라미터를 추출한 후 채널보상기법인 CMN, RTCN, MCMN, MRTCN를 적용하였다.

2.1. CMN (Cepstral Mean Normalization)

CMN의 기본 개념은 시간영역에서 컨벌루션의 형태로 나타나는 채널특성이 cepstrum 영역에서 합인 형태로 나타나며, 채널특성은 단시간에 큰 변화가 생기지 않고 거의 일정하게 나타나기 때문에 cepstrum 영역에서는 전체 cepstrum의 평균값으로 볼 수 있다. 전화채널의 영향을 줄이기 위해 음성 구간이 충분히 길고 깨끗한 음성의 cepstrum 평균이 0이라고 한다면 전체 cepstrum의 평균값을 빼줌으로써 전화채널에 의한 영향을 줄일 수 있다. 따라서 CMN 보상기법은 일정 구간에서 왜곡된 음성의 cepstrum 평균을 구하고, cepstrum에서 평균을 빼줌으로써 채널에 의한 영향을 보상하는 기법이다. 적은 연산량으로 만족할 만한 성능을 보이는 채널보상기법이다. 식 (1)과 같이 표현되는데, $c_p(t)$ 는 왜곡된 p 번째 음성신호에서 t 번째 프레임의 cepstrum 벡터, $\hat{C}_p(t)$ 는 보상기법이 적용된 p 번째 음성신호의 t 번째 프레임에 대한 cepstrum 벡터를 나타낸다. 따라서 p 는 음성신호의 인덱스이고, t 는 프레임 인덱스가 된다. T 가 왜곡된 p 번째 음성신호의 프레임 수라 하면, $\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_p(t)$ 는 주어진 음성신호에 대한 cepstrum 평균으로 전화채널의 특성을 나타낸다고 볼 수 있다.

$$(1) \quad \hat{C}_p(t) = c_p(t) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_p(t), 0 \leq t < T$$

2.2. RTCN (Real Time Cepstral Normalization)

전화채널 보상기법으로 CMN을 적용할 때 cepstrum 평균을 구하여 채널왜곡 특성으로 가정하게 된다. 하지만, 음성신호가 충분한 길이를 가지지 못하는 경우, 음성신호 자체의 특성을 채널왜곡 특성으로 처리하여 오히려 음성신호 특성을 왜곡시키는 경우가 발생한다. 때문에 CMN 적용시 음성신호의 길이가 충분해야 하지만 음성인식 적용분야에 따라 그렇지 못한 경우도 많다. 이에 반해, RTCN 보상기법에서는 일정 구간의 음성마다 cepstrum을 추정하고, 추정된 전체 cepstrum 평균을 왜곡된 음성신호의 cepstrum에서 빼줌으로써 채널왜곡에

의한 영향을 보상한다. p 번째 음성 신호의 전체 cepstrum 평균벡터 추정은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(2) \quad \widehat{m}_p = (1 - \alpha) \widehat{m}_{p-1} + \alpha \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_p(t) \right]$$

여기에서 α 는 추정 계수이며, 추정한 전체 cepstrum 평균이 현재 음성 구간의 cepstrum 평균에 민감하게 반응하지 않도록 0.125로 설정하였다. \widehat{m}_p 는 p 번째 음성구간에서 추정된 전체 cepstrum 평균 벡터를 나타내며 RTCN 보상기법은 식 (3)과 같으며, $\widehat{X}_p(t)$ 는 RTCN이 적용된 p 번째 음성 신호의 t 번째 프레임에 대한 cepstrum 벡터이다.

$$(3) \quad \widehat{X}_p(t) = c_p(t) - \widehat{m}_p$$

2.3. MCMN (Modified Cepstral Mean Normalization)

MCMN은 왜곡된 음성신호의 cepstrum의 각 차수별 표준편차를 구하고 CMN 보상기법을 적용한 후에 앞에서 구한 표준편차를 차수별로 나누어주는 보상기법이다. 이는 cepstrum의 분산을 정규화 시키므로 높은 차수의 cepstrum의 영향을 강조시킬 수 있고, 음향 모델을 훈련시킬 때, 가우시안 모델링이 더 잘 되는 장점이 있다[6]. MCMN을 적용하는 방법은 식 (4)와 같으며, 각 차수별 분산을 구하여 사용하였다.

$$(4) \quad \widehat{C}_p(t) = [c_p(t) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_p(t)] / \sqrt{V_p}$$

식 (4)에서 V_p 는 p 번째 음성신호에 대한 cepstrum의 각 차수별 분산을 가지는 벡터를 나타내며, MCMN의 적용은 CMN을 적용한 cepstrum에서 각 차수별로 표준편차로 나누어주는 방식으로 이루어졌다.

2.4. MRTCN (Modified Real Time Cepstral Normalization)

MCMN과 마찬가지로 cepstrum의 각 차수별 표준편차로 정규화 시키지만 단 구간의 차수별 표준편차를 구하는 것이 아니라, 일정 구간의 표준편차로 전체 음성 cepstrum의 표준편차를 추정하여 사용한다. 전체 추정 cepstrum 분산은 식 (5)와 같이 구해지며 α 는 추정 계수으로써 현재 음성 구간의 측정 분산보다 추정

된 캡스트럼 분산이 더 많이 영향을 미치도록 0.125 값을 사용하였다. \widehat{V}_p 은 p 번째 음성 구간에서 추정된 캡스트럼 분산 벡터를 나타내며, MRTCN의 적용은 식 (6)과 같이 추정된 표준편차로 정규화하는 방식으로 이루어진다.

$$(5) \quad \widehat{V}_p = (1 - \alpha) \widehat{V}_{p-1} + \alpha V_p$$

$$(6) \quad \widehat{C}_p(t) = [c_p(t) - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T c_p(t)] / \sqrt{\widehat{V}_p}$$

3. 인식시스템 및 음성 DB

본 논문에서는 공개소프트웨어인 HTK를 이용하여 윈도우즈 환경에서 인식 시스템을 구현하였다. 음향 모델의 생성과 훈련 및 인식과정을 HTK 툴을 이용하였으며, 특징파라미터 추출부분은 다양한 조건에서 기본 특징파라미터인 MFCC를 추출하기 위해 HTK에서 제공되는 툴을 사용하지 않고 별도로 구현한 프로그램을 이용하였다.

3.1. 특징파라미터 추출

입력 전화음성은 분석 프레임 단위로 전처리 과정 및 창함수를 거친 후 FFT (Fast Fourier Transform)를 취하고, 그 결과에 M개의 필터뱅크를 씌워 각 필터뱅크의 로그 에너지를 구한다. M개의 필터뱅크 구성은 멜주파수 영역에서 등간격으로 (M+1)개로 나누고 이를 선형주파수로 바꾸어서 각 필터뱅크의 중심주파수를 구하였다. 표 1에 8 kHz로 샘플링된 신호에 대해 19개의 필터뱅크를 사용할 경우에 대한 각 필터뱅크의 중심주파수를 나타내었다. 선형주파수에서 멜스케일로의 변환은 식 (7)을 사용하였다.

$$(7) \quad mel = 2597 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right)$$

여기서, 식 (7)의 mel 은 멜주파수를 나타내며 f 는 선형주파수를 나타낸다.

각 필터뱅크의 출력값에 로그를 취한 후에 DCT (Discrete Cosine Transform) 하여 D 차의 MFCC를 구하였다. 구해진 D차의 MFCC와 1차의 에너지를 이용하여 차분 특징파라미터와 차분-차분 특징파라미터를 구하였다. 이때, 차분 특징파라미터는 식 (8)을 이용하여 구해지는데, d_n 은 n 번째 차분 특징파라미터, d_w

는 현재 프레임에 대한 앞뒤 프레임 수를 나타낸다. 또한 c_n 는 n 번째 프레임의 캡스트럼이다. 본 논문에서는 $d_w=2$ 로 정하여 현재 프레임의 앞뒤 2 프레임을 고려하여 차분 특징파라미터 성분을 구하였다. 따라서, 기본 인식시스템에 사용된 특징파라미터로는 19개의 필터뱅크 출력을 DCT하여 얻은 12차의 static MFCC와 1차의 에너지 성분을 포함하여 총 38차의 MFCC를 사용하였다.

$$(8) \quad d_n = \frac{\sum_{w=1}^{d_n} w(c_{n+w} - c_{n-w})}{2 \sum_{w=1}^{d_n} w^2}$$

<표 1> 필터뱅크의 중심주파수

필터뱅크	중심주파수(Hz)	필터뱅크	중심주파수(Hz)
1번째	62	11번째	1281
2번째	140	12번째	1484
3번째	218	13번째	1703
4번째	312	14번째	1937
5번째	421	15번째	2203
6번째	531	16번째	2484
7번째	656	17번째	2812
8번째	781	18번째	3156
9번째	937	19번째	3546
10번째	1093		

3.2. 음향 모델 및 언어 모델

음향 모델로는 CHMM (Continuous Hidden Markov Model)을 사용했으며 트라이폰 단위로 인식실험을 하였다. HMM의 상태수는 5개, 상태 당 mixture의 수는 9개까지 변화시켜 가며 인식 실험하였다. 상태천이 모델로는 Bakis 모델을 적용하였다. 본 논문에서 정의한 기본 유사 음소는 개별 숫자음 11개(“영”, “일”, “이”, ..., “공”)를 참조하여 표 2와 같이 묵음모델(sil)과 짧은 묵음모델(sp)을 포함하여 연속 숫자음에서 발생하는 음소를 기준으로 총 17개를 정의하였다. 트라이폰을 사용함에 따라 훈련시켜야 할 모델의 수가 많아지는데 반해 훈련데이터의 수는 제한되어 있으므로 모델별 훈련데이터의 수를 확보하기 위해 TBC (Tree Based Clustering)을 이용하였다[7]. 또한 연속 숫자음의 발음 시 앞뒤 숫자음의 영향을 고려하기 위해 음향 모델의 훈련 및 인식과정에서 crossword를 적

용하여 실험하였다.

언어 모델은 연속 숫자음 인식의 경우 개별 숫자음들의 나열이기 때문에 네트워크 구조가 간단하므로 FSN (Finite State Network)을 적용하였다.

<표 2> 기본 유사음소

기호	음소	기호	음소
g	ㄱ(초성)	l	ㄹ(초성)
s	ㅅ(초성)	nge	ㅇ(중성)
ch	ㅊ(초성)	me	ㅁ(중성)
p	ㅍ(초성)	ge	ㄱ(중성)
o	ㅓ	le	ㄹ(중성)
i	ㅣ	yu	ㅠ
a	ㅏ	u	ㅓ
sil	묵음	yeo	ㅋ
		sp	짧은묵음

3.3. 음성 DB

인식 실험을 위한 음성 DB는 음성정보기술산업지원센터(SITEC)에서 제작한 전화음성 4연 숫자음 DB를 사용하였다[8]. DB는 총 2000명 화자의 음성으로 이루어졌으며 녹음 환경에 따른 구성은 표 3과 같다. 유선/무선 전화 및 cellular, PCS 음성으로 구성되어 있으며 연구실과 사무실, 가정집의 환경에서 녹음되어 8 kHz, 16 bits, Linear PCM (Pulse Code Modulation)으로 저장되어 있다. 녹음된 4연 숫자음의 종류는 1620개이며, 숫자 6을 발음에 따라 “륙”과 “육”으로 구분하여 레이블링해 놓았다. 1620개의 4연 숫자음을 50등분하여 화자 당 32개 정도의 4연 숫자음을 녹음하여 훈련데이터로는 1800명의 58388개의 4연 숫자음이, 테스트용으로는 200명의 6468개의 4연 숫자음이 있으며 테스트데이터에 포함된 4연 숫자음은 훈련데이터에 모두 포함되어 있다.

<표 3> SITEC 전화음성 DB의 구성

구분	훈련용(남/녀 화자 수)	테스트용(남/녀 화자 수)
유선	228/239	25/25
무선	217/226	25/25
Cellular	220/230	25/25
PCS	215/225	25/25
총 4연 숫자음 수	58388	6468

4. 인식실험 및 결과

인식 실험에서는 4연 숫자음 DB를 이용하여 38차 MFCC를 특징파라미터로 사용하는 인식시스템을 구현하고, 특징파라미터에 채널보상기법을 적용한 경우에 대해 전화음성 연속숫자음의 성능을 확인하였다. 특징파라미터 추출과정에서 전처리 계수는 0.97로 하였으며, 음성 프레임의 길이는 20 ms, 분석 프레임의 이동은 10 ms로 하였다. 분석 프레임은 프레임 길이의 절반을 중첩시켜 이동되었으며, 프레임별로 해밍 윈도우를 사용하였다.

CMN의 적용은 4연 숫자음 단위로 캡스트럼의 평균을 구하고 왜곡된 음성의 캡스트럼에서 빼주는 방식으로 하였다. 보상기법 중 MCMN은 4연 숫자음 캡스트럼의 각 차수별 표준편차를 구하고, CMN을 적용한 후 특징파라미터의 차수별로 표준편차를 이용해 나누어주는 방식으로 적용하였다. RTCN 보상기법은 4연 숫자음 단위로 전체 캡스트럼 평균을 추정하고 그 추정된 캡스트럼 평균을 왜곡된 음성의 캡스트럼에서 빼 주는 것으로 적용하였다. 마찬가지로 MRTCN은 4연 숫자음 단위로 전체 캡스트럼 표준편차도 추정하여 RTCN을 적용한 후, 각 차수별로 표준편차를 이용하여 나누어주는 방식으로 적용하였다. RTCN과 MRTCN에서 전체 캡스트럼 평균과 표준편차를 추정할 때의 계수는 0.125를 사용하였다.

음향 모델로는 트라이폰 모델을 사용하였으며, CHMM의 상태수는 5개로 고정하고 상태 당 mixture의 수는 1개에서 9개까지 늘려가면서 결과를 확인하였다. 언어 모델로는 FSN을 사용하였다.

훈련데이터로는 58388개의 4연 숫자음을 사용하고 테스트데이터로는 6468개의 4연 숫자음을 사용한 실험 결과를 표 4에 나타내었다. Mixture 수 9개일 때, MFCC를 특징파라미터로 사용한 경우 88.39%의 문장인식률을, CMN을 적용한 경우에는 89.75%의 문장인식률을 나타내어 1.39%의 인식 성능향상을 나타냈다. RTCN과 MCMN을 적용한 경우에도 약 1.0%의 인식 성능향상을 보였으며, 특히 MRTCN을 적용한 경우 90.11%로 MFCC를 특징파라미터로 사용한 인식시스템보다 1.72%의 문장인식률 향상을 가져왔다. 실험 결과 전화 음성 4연 숫자음 인식에서는 MRTCN 채널보상기법을 적용할 경우 가장 좋은 성능을 보였다.

<표 4> 채널보상기법과 mixture 수에 따른 문장인식률(%)

구분/mixture 수(개)	6	7	8	9
MFCC	86.55	87.43	88.10	88.39
MFCC+CMN	87.60	88.71	89.36	89.78
MFCC+RTCN	88.39	88.91	89.36	89.78
MFCC+MCMN	87.62	88.81	89.50	89.81
MFCC+MRTCN	88.44	89.27	89.84	90.11

5. 결 론

본 논문에서는 전화채널의 영향으로 전화음성 연속숫자음의 인식 성능저하를 막기 위해 캡스트럼 영역에서 채널보상기법을 적용하였다. SITEC에서 제작한 전화음성 4연 숫자음 DB를 이용하여 MFCC를 특징파라미터로 하는 인식 시스템을 구현하였다. 채널보상기법으로 CMN, RTCN, MCMN, MRTCN을 적용하였다. 실험 결과 38차의 MFCC를 사용하고, HMM의 상태수는 5개, 상태 당 mixture 수가 9개 일 때, 88.39%의 문장(4연 숫자음)인식률을 얻은 데 반해 채널보상기법을 적용한 경우 1.39%에서 1.72%의 인식률 향상을 얻었다. 특히, MRTCN을 적용한 경우 가장 좋은 결과를 보였는데, 같은 조건에서 90.11%의 문장인식률을 보여 MFCC 기반의 시스템에 비해 1.72%의 인식률 증가를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Moreno (1992), Speech Recognition in Telephone Environment, Master Thesis, Carnegie Mellon University.
- [2] Hermansky, H. & N. Morgan (1994), RASTA Processing of Speech, *IEEE Trans. Speech Audio Processing* 2(4), pp.578~589.
- [3] Veth, J.D. & L. Boves (1996), Comparison of Channel Normalization Technique for Automatic Speech Recognition Over the Phone, *Proc. ICSLP*, pp.2332~2335.
- [4] 김성탁, 김상진, 정호영, 김회린, 한민수(2002), 전화망 환경에서의 연속숫자음 인식성능평가, 「한국음향학회」 21(1), pp.253~256.
- [5] 김상진, 서영주, 한민수(2001), LCMS를 이용한 한국어 연속 숫자인식에 관한 연구, 「한국음향학회」 20, pp.43~46.
- [6] Caremen Benitez & Lukas Burget (2001), Robust ASR Front-end using Spectral-based and Discriminant Features : experiments on the Aurora Tasks, *International Computer Science Institute, Berkeley*.
- [7] Beulen, K. & H. Ney (1998), Automatic Question Generation For Decision Tree Based Tying, *IEEE*.
- [8] <http://www.sitec.or.kr/index.asp>.
- [9] Steve Young, Gunnar Evermann and D. Kershaw, *The HTK Book (for HTK Version 3.1)*, Cambridge University Engineering Department.

접수일자: 2002년 10월 22일

게재결정: 2002년 12월 12일

▶ 김민성(Min-Sung Kim)

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교 공과대학 전자공학과 10호
관 724호

소속: 경북대학교 전자공학과 신호처리연구실

전화: 053) 940-8627

Fax: 053) 950-5505

E-mail: kmslove@mir.knu.ac.kr

▶ 정성운(Sung-Yun Jung)

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교 공과대학 전자공학과 10호
관 724호

소속: 경북대학교 전자공학과 신호처리연구실

전화: 053) 940-8627

Fax: 053) 950-5505

E-mail: yunij@mir.knu.ac.kr

▶ 손종목(Jong-Mok Son)

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교 공과대학 전자공학과 10호
관 724호

소속: 경북대학교 전자공학과 신호처리연구실

전화: 053) 940-8627

Fax: 053) 950-5505

E-mail: sjm@palgong.knu.ac.kr

▶ 배건성(Keun-Sung Bae)

주소: 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370번지 경북대학교 공과대학 전자공학과 10호
관 719호

소속: 경북대학교 전자공학과 신호처리연구실

전화: 053) 950-5527

Fax: 053) 950-5505

E-mail: ksbae@ee.knu.ac.kr