

스테레오 음향학적 에코 제거를 위한 Soft Decision 기반 필터 확장 기법

이철민*, 배수현*, 김정훈*, 김남수°

Spectro-Temporal Filtering Based on Soft Decision for Stereophonic Acoustic Echo Suppression

Chul Min Lee*, Soo Hyun Bae*, Jeung Hun Kim*, Nam Soo Kim°

요 약

본 논문은 스테레오 환경에서 발생하는 음향학적 에코 신호를 효율적으로 제거하기 위하여 시간 및 주파수 상관관계 (spectro-temporal correlation) 를 고려한 필터링을 제안하였다. 기존의 에코 패스를 직접 추정하는 방식에서 벗어나 동시 통화 검출 기법 없이 에코 스펙트럼을 추정하는 음향학적 에코 억제 기법 (acoustic echo suppression, AES) 을 적용하였다. 개선된 에코 추정을 위해 확장된 파워 스펙트럼 밀도 행렬 (extended power spectrum density matrix) 과 에코 과추정 조절 행렬 (echo overestimation control matrix) 을 도입하였다. 또한, 주파수 영역에서 음성이 존재하지 않을 확률을 적용한 soft decision 기반의 본 기법을 통해 스테레오 환경에서의 음향학적 에코 신호 제거 성능이 기존 기법에 비해 보다 향상됨을 확인하였다.

Key Words : Acoustic echo cancellation, stereophonic acoustic echo suppression, spectro-temporal correlation, signal-to-echo ratio, soft decision

ABSTRACT

We propose a novel approach for stereophonic acoustic echo suppression using spectro-temporal filtering based on soft decision. Unlike the conventional approaches estimating the echo paths directly, the proposed technique can estimate stereo echo spectra without any double-talk detector. In order to improve the estimation of echo spectra, the extended power spectrum density matrix and echo overestimation control matrix are applied on this method. In addition, this echo suppression technique is based on soft decision technique using speech absence probability in STFT domain. Experimental results show that the proposed method improves compared with the conventional approaches.

* 본 연구는 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터육성 지원사업 (NIPA-2014-H0301-14-1019) 및 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2012R1A2A2A01045874)을 받아 수행된 연구임.

♦ First Author : Seoul National University, Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, cmlee@hi.snu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Seoul National University, Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, nkim@snu.ac.kr, 종신회원

* Seoul National University, Department of Electrical and Computer Engineering and Institute of New Media and Communications, shbae@hi.snu.ac.kr, 학생회원, jhkim@hi.snu.ac.kr

논문번호 : KICS2014-09-372, Received September 30, 2014; Revised November 6, 2014; Accepted November 6, 2014

I. 서 론

일반적으로 음향학적 에코는 하나의 마이크와 하나의 스피커 사이에서 스피커의 소리가 마이크로 들어가는 음향학적 커플링으로 인해 발생하며 전달하고자 하는 신호를 왜곡시키는 요소 중 하나이다. 이를 제거하기 위해 적응 필터를 사용하여 음향학적 에코 패스를 추정하여 제거하는 방법이 많이 연구되었다^[1,2]. 특히 최근에는 스마트 디바이스의 사용 및 텔레컨퍼런스 와 같은 다채널 환경에서의 통신이 많아지면서 단일 채널 음향학적 에코와는 다르게 여러 개의 스피커와 마이크 사이의 음향학적 커플링이 동시에 발생하므로 이를 효율적으로 제거하는 방법이 필요하다. 그 중에서 스테레오 환경은 다채널 환경의 가장 기본적인 형태라 할 수 있으며 실시간 통화를 요구하는 이와 같은 환경에서는 더 빠르고 정확하게 깨끗한 음성을 전달할 수 있는 기법이 요구된다.

기존 연구에서는 일반적으로 적응 필터를 확장하여 스테레오 에코 신호의 패스를 각각 추정하는 방법을 활용했다. 하지만, 두 신호의 강한 상관관계로 인하여 각각의 에코 패스를 유일하게 찾을 수 없는 단점이 존재하고 이를 해결하기 위한 방법으로 다양한 de-correlation 방법들이 모색되었다^[3]. 이런 방법들은 두 신호를 독립적으로 분리할 수 있으나 별도의 계산량과 음성 왜곡을 피할 수 없는 단점을 지닌다. 이런 단점을 피하기 위한 방법으로 제안된 스테레오 음향학적 에코 억제 기법 (stereophonic acoustic echo suppression, SAES) 은 사전 (a priori) 및 사후 (a posteriori) 신호 대 에코비 (signal-to-echo ratio, SER) 를 활용하여 Wiener 필터를 통해 각 원단 신호에서 발생한 스테레오 에코를 순차적으로 제거한다. 에코 패스를 직접 추정하지 않고 각각의 에코 스펙트럼 성분을 추정하는 것이 특징이다. 또한, 에코 제거 과정에서 이전에 요구되었던 동시 통화 구간 검출기가 없이도 에코가 제거된다는 점이다^[4].

본 논문에서는 스테레오 음향학적 에코를 보다 정확하고 효율적으로 제거하기 위하여 시간 및 주파수 성분의 상관관계를 고려한 확장된 형태의 필터링 기법을 제안하였다. 주파수 영역에서 하나의 주파수만 고려하지 않고 인접해 있는 성분들을 고려한 확장된 형태의 파워 스펙트럼 밀도 (power spectrum density, PSD) 행렬을 정의하여 각각의 에코 신호를 추정하는데 활용된다. 잔여 에코 신호를 보정하기 위하여 에코 과추정 조절 행렬 (echo overestimation control matrix) 을 도입하였고 이득이 동시 통화 구간에서 발

산하지 않도록 음성이 존재하지 않을 확률을 활용한 soft decision이 적용되었다.^[5,6] 이를 통해 시간 및 주파수 성분들의 상관관계를 고려한 본 기법이 기존 기법보다 향상된 스테레오 음향학적 에코 제거를 할 수 있음을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 필터 확장 기법이 적용된 스테레오 음향학적 에코 제거 기법

수신 공간에서 마이크로 들어오는 전체 신호를 $y(n)$, 스피커에서 재생되는 원단 신호 (far-end signal) 을 $x_i(n)$, 스테레오 에코 패스를 $h_i(n)$, 복원하고자 하는 근단 음성 신호 (near-end speech signal) 를 $s(n)$ 이라고 할 때, $y(n)$ 은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{i=1}^2 h_i(n) * x_i(n) + s(n) \quad (1)$$

시간 및 주파수 성분의 상관관계를 고려한 스테레오 음향학적 에코 제거를 위해 기존 SAES 기법과 달리 확장된 형태의 원단 신호를 활용하기 위해 원단 신호를 인접한 시간 및 주파수 성분으로 묶어 하나의 슈퍼 벡터를 다음과 같은 형태로 이용한다.

$$\mathbf{X}_i(n, k) = [X_i(n-T, k) X_i(n-T+1, k) \dots X_i(n-1, k) X_i(n, k-K) \dots X_i(n, k+K)]^T \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

위의 슈퍼 벡터에서 차원이 $T+2K+1$ 이며 기존 연구에서 해당 벡터가 에코 제거에 좋은 성능을 보였음을 확인하여 이를 활용하였다^[7]. 즉, 현재 프레임에서의 해당 주파수 성분과 인접한 $2K$ 개의 주파수 성분을 결합하고 인접한 이전 프레임에서 현재 주파수 성분과 동일한 성분을 T 개 채택하여 정확한 에코 스펙트럼 추정에 활용한다.

이를 고려한 short-time Fourier transform (STFT) 영역에서의 스테레오 에코 제거를 위해 최소 평균 제곱 에러 (minimum mean-square error, MMSE) 기준 (criteria)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$J_1 = E[|Y(n, k) - \mathbf{H}_1^H(n, k)\mathbf{X}_1(n, k)|^2] \quad (3)$$

$$J_2 = E[|Y_1(n, k) - \mathbf{H}_2^H(n, k)\mathbf{X}_2(n, k)|^2] \quad (4)$$

$Y(n, k)$ 은 STFT 영역에서의 $y(n)$ 을 의미하며 $H_i(n, k)$ 는 STFT 영역에서 확장된 최적 가중 벡터를 의미한다. 또한, $Y_1(n, k)$ 는 수식 (3)에서 $Y(n, k)$ 에서 추정된 첫 번째 에코 신호를 제거한 신호를 의미한다. 최적 가중 벡터를 구하기 위해서 수식 (3), (4)를 모두 미분을 취하면 다음과 같은 최적의 가중 벡터를 얻을 수 있다.

$$H_1(n, k) = \Phi_{X_1 X_1}^{-1}(n, k) \Phi_{X_1 Y}(n, k) \quad (5)$$

$$H_2(n, k) = \Phi_{X_2 X_2}^{-1}(n, k) \Phi_{X_2 Y_1}(n, k) \quad (6)$$

여기서 $\Phi_{XX}(n, k)$ 및 $\Phi_{XY}(n, k)$ 는 확장된 PSD 행렬과 cross-PSD 벡터이며 이는 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi_{XX}(n, k) = E[X(n, k)X^H(n, k)] \quad (7)$$

$$\Phi_{XY}(n, k) = E[X(n, k)Y^*(n, k)] \quad (8)$$

위의 과정을 통해 추정된 에코 스펙트럼이 주어지면 왜곡된 원단 신호를 복원하기 위해 위너 필터 (Wiener filter) 를 활용한 최종적인 이득 $G(n, k)$ 추정 및 향상된 신호 $\hat{S}(n, k)$ 를 다음과 같이 얻어낸다.

$$\hat{S}(n, k) = G(n, k) Y(n, k) \quad (9)$$

2.2 잔여 에코 성분 억제를 위한 에코 과추정 조절 행렬

각 에코 신호를 추정하는데 잔여 에코 성분이 남는 경우가 존재한다. 제안하는 음향학적 에코 제거 기법은 선형적인 접근을 통해 에코를 추정하므로 비선형성으로 인해 발생한 에코는 제거되기 어렵기 때문이다. 또한 제안하는 필터가 잡음과는 달리 빠른 시변의 특징을 가지는 에코이기 때문에 항상 최적의 가중 벡터를 찾는 것은 현실적으로 불가능하다. 이를 보완하기 위하여 추정하는 에코 스펙트럼에 별도의 가중치 행렬을 곱하여 인접한 주파수간의 강한 상관관계로 남은 에코 성분과 비선형적 에코 성분을 모두 억제할 수 있도록 한다. 제안하는 에코 과추정 조절 행렬은 다음과 같은 대각 성분을 갖는 대각 행렬로 구성된다.

$$b_m = \alpha \exp(-\beta_f |n - n_m| - \beta_f |k - k_m|) \quad (10) \quad (m = 1, \dots, M)$$

M 은 제안한 슈퍼벡터의 차원이며 위 식의 각각의 파라미터는 학습 데이터를 이용하여 언거나 발견법 (heuristic method)을 통해 구할 수 있다. 본 논문에서는 grid search 방법^[8]을 통해서 최적에 가까운 파라미터를 찾도록 하였다.

2.3 Soft decision을 통한 이득 함수 개선

제안하는 에코 제거 기법에서 활용하는 Wiener 이득은 signal-to-echo (SER) ratio를 활용하여 계산할 수 있다. 사전 (a priori) SER $\xi(n, k)$ 및 사후 (a posteriori) SER $\gamma(n, k)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\xi(n, k) \equiv \frac{\lambda_S(n, k)}{\lambda_D(n, k)} \quad (11)$$

$$\gamma(n, k) \equiv \frac{|Y(n, k)|^2}{\lambda_D(n, k)} \quad (12)$$

λ_S, λ_D 는 각각 근단 음성 신호의 PSD와 전체 에코 신호의 PSD를 뜻한다. 이를 이용하여 음성 신호 처리에서의 일반적인 잡음 향상 기법은 decision-directed 기법을 사용하면 사전 및 사후 SER를 계산할 수 있고 다음과 같은 잔여 이득을 얻을 수 있다.

$$G(n, k) = \frac{\xi(n, k)}{1 + \xi(n, k)} \quad (13)$$

하지만 수식 (13)과 같은 이득 함수는 고려하는 프레임에 음성이 얼마나 존재하는지에 대한 고려가 되어있지 않으므로 근단 신호의 음성을 왜곡할 수 있는 가능성이 존재한다. 이를 개선하기 위해 각 프레임에서 음성이 존재하지 않을 확률 $p(n, k)$ 를 계산하여 soft decision을 통한 이득 함수 적용을 통해 다음과 같은 최종 근단 음성 신호를 얻는다.

$$\hat{S}(n, k) = [1 - p(n, k)] G(n, k) Y(n, k) \quad (14)$$

주의할 점은 $p(n, k)$ 가 작을수록 음성이 존재할 확률이 커지지만 음성이 존재하는 경우에는 $p(n, k)$ 로 인해 원래 이득보다 낮게 추정되어 약간의 음성 손실이 발생할 수 있으며 이는 음질 저하에 큰 영향을 미치므로 적절한 문턱값 (threshold) 을 통해 음성이 존재하지 않을 확률값을 보정하는 과정이 요구된다. 해당 확률을 보정하기 위해 음성이 존재하지 않은 확

를 과거 프레임들에서 구한 확률값과 비교한다. 이전 확률값과 비슷한 경우는 이전 상태를 유지하도록 하며 각 과정에서는 평활화 과정(smoothing)을 수행한다. 이전 값들보다 현재 구한 확률값이 크게 변화한 경우에는 음성이 존재하지 않을 확률이 특정값보다 확실히 높은 경우에만 음성이 없다고 판단하여 음성 구간을 놓치는 부분이 없도록 하는 후처리 과정을 도입하였다. 알고리즘에 맞는 최적의 문턱값들은 실험적으로 정했다. $p(n, k)$ 는 일반적으로 많이 활용되는 잡음 환경에서의 음성 구간 검출에 활용되는 기법을 활용하였다^{5,6)}.

III. 실험

제안하는 알고리즘의 비교를 위해 이미지 기법을 이용한 시물레이션을 수행하였다. TIMIT 데이터를 이용하여 남녀 화자 비율이 동일한 에코 및 근단 음성 신호가 섞인 데이터를 구축하였고 그 길이는 약 300 초이다. 데이터는 16kHz 샘플링되었고 반향 시간은 200ms였으며 윈도우는 해밍(hamming) 윈도우를 이용하였다. 에코만 존재하는 구간(single-talk)에서는 echo return loss enhancement (ERLE), 동시 통화 구간이 존재하는 데이터에서는 perceptual evaluation of speech quality (PESQ)⁹⁾를 이용하여 결과를 분석하였다.

표 1은 제안한 기법에서 인접한 시간 및 주파수 정보가 얼마나 에코 제거에 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 다른 T , K 값을 사용하여 ERLE 및 PESQ 수치를 확인하였다. 잡음이 없는 구간에서 실험을 수행하였고 오버랩은 50%로 적용하였다. 인접한 시간 및 주파수 상관관계를 이용하면 보다 향상된 스테레오 음향학적 에코 억제가 가능했으며 ERLE는 T , K 값이 올라감에 따라 꾸준히 증가하는데 비해 PESQ는 $T=1$, $K=1$ 에서 가장 좋은 성능을 보였다. 인접한 성분들을 고려해서 필터링 할 때 너무 많

표 1. 인접한 시간 및 주파수 성분을 고려한 제안한 기법의 ERLE 및 PESQ 비교
Table 1. ERLE and PESQ performance of the proposed method incorporating adjacent spectro-temporal components

ERLE (dB)			PESQ (score)				
TK	0	1	TK	0	1	2	
0	13.62	23.37	27.83	0	2.50	2.78	2.86
1	27.20	33.80	36.08	1	2.82	2.89	2.88
2	28.21	35.00	37.51	2	2.81	2.87	2.86

은 성분을 고려하면 상관관계가 적은 성분들이 추정하고자 하는 에코 성분을 왜곡시켜 근단 음성 신호 향상에 방해가 되는 것으로 보인다.

기존 논문과의 비교를 위해 Yang¹⁴⁾의 에코 제거 기법을 구현하고 제안한 기법과 동일한 환경에서 비교한 결과 ERLE는 12.22 dB, PESQ는 2.49 가 나음을 확인하였다. 기존 기법이 약간의 반향 환경에서 취약함을 확인할 수 있었고 제안한 기법이 이에 비해 훨씬 개선된 성능을 보였다. 특히 함께 고려한 에코 과추정 조절 행렬과 soft decision에 활용한 음성이 존재하지 않을 확률을 통해서 SER 기반의 스테레오 음향학적 에코 억제 기법이 크게 향상되었음을 확인하였다.

또한, 음성이 존재하지 않을 확률을 고려한 soft decision 기반의 본 기법이 윈도우 오버랩(window overlap)을 얼마나 고려하느냐에 따라 영향을 미치는 지에 따른 실험을 수행하였다. 표 2의 실험 결과를 통해 soft decision 기반의 본 기법이 윈도우 오버랩을 87.5% 고려했을 때 음성이 존재하지 않을 확률을 고려한 이득 함수 영향이 가장 좋은 것으로 확인할 수 있다. 이는 고려하는 프레임간의 오버랩이 적으면 각 프레임간의 음성이 존재하지 않을 확률이 높은 확률로 불연속해지거나 불안정할 가능성이 있음을 생각할 수 있다. 그러나 너무 많은 윈도우 오버랩은 음성이 존재하지 않을 확률 변화에 큰 영향을 주지 않아 일정 수준 이상의 오버랩은 성능 개선 대비 계산량만 증가할 가능성을 가지고 있다.

기존 기법은 SAES 기법¹⁴⁾과 soft decision이 적용되기 전 필터 확장 기법이 적용된 스테레오 에코 제거 기법(ESAES)¹⁷⁾, 그리고 본 논문에서 제안한 기법이 실제 잡음 환경에서 얼마나 개선이 되는지에 대한 비교 실험을 수행하였다. 잡음은 백색 가우시안 잡음을 사용하였고 신호 대 잡음비(signal-to-noise, SNR)는 30dB, 20dB, 10dB로 나누어 실험하였다.

표 3을 통하여 기존 기법들에 비해 제안한 기법이 에코만 있는 환경과 동시 통화 구간이 있는 환경 모두 개선된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특히 SNR이 높은 환경에서 기존 기법들에 비해 음질이 크게 개선됨을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안한 soft

표 2. 윈도우 오버랩에 따른 ERLE 및 PESQ 성능 변화
Table 2. ERLE and PESQ performance with different overlapping windows

Overlap	50 %	75 %	87.5 %
ERLE (dB)	33.80	38.79	39.66
PESQ (score)	2.89	3.01	3.01

표 3. 잡음 환경에서 제안한 기법과 기존 기법들과의 성능 비교

Table 3. Performance comparison among the proposed technique and the conventional methods in different SNR conditions

	SNR	SAES	ESAES	Proposed
PESQ (score)	30	2.72	2.85	2.95
	20	2.50	2.61	2.67
	10	1.90	1.92	1.95
ERLE (dB)	30	19.47	27.97	32.65
	20	17.84	21.22	22.09
	10	10.98	11.25	11.31

decision을 활용한 에코 제거 기법이 보다 스테레오 에코 추정을 정확하게 하는 것을 보이는 결과로 해석할 수 있다. 잡음이 많은 경우에는 제안한 기법이 잡음을 동시에 처리하지 못하기 때문에 다른 이전 기법들과 많은 차이가 나진 않지만 소폭 개선됨을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다채널 환경의 기본이 되는 스테레오 환경에서 발생하는 음향학적 에코를 제거하기 위하여 인접한 시간 및 주파수 성분을 고려한 에코 억제 기법을 제안하였다. 기존에 널리 사용되었던 에코 패스 추정 방식이 아닌 에코 스펙트럼을 추정하고 SER 기반의 에코 억제 기법을 도입하였다. 특히 스테레오 에코 추정 성능을 개선하기 위하여 별도의 슈퍼벡터를 도입하고 에코 과추정 조절 행렬과 음성이 존재하지 않을 확률을 이용, soft decision을 통한 Wiener 이득을 계산하고 최종적으로 근단 신호를 향상시켰다. 인접한 성분들이 고려될수록 성능 향상이 확인되었고 기존 기법에 비해서도 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 특히 잡음이 적은 구간에서 다른 기법에 비해 음성 손실 없이 에코를 억제하여 PESQ 성능이 크게 개선됨을 확인할 수 있었다. 본 기법은 별도의 동시 통화 구간 검출기 없이도 향상된 근단 음성 신호를 얻을 수 있다는 장점을 지니며, 다채널로 확장하기 간단한 구조를 지니고 있어 최근 다양한 모바일 및 스마트 기기에서 활용되는 다채널 시스템에서 신호 향상을 위한 전처리 과정으로 활용 가능하다.

References

[1] H. M. Yoon and H. W. Lee, "A new adaptive

algorithm for the acoustic echo canceller," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 26, no. 6, pp. 77-81, Jun. 2001.

[2] C. M. Lee, Y. G. Jin, T. G. Kang, and N. S. Kim, "A study of acoustic echo cancellation using subband adaptive Kalman filtering in frequency domain," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2012 (KICS ICC 2012)*, pp. 346-347, Jeju Island, Korea, Jun. 2012.

[3] J. Benesty, D. R. Morgan, and M. M. Sondhi, "A better understanding and an improved solution to the specific problems of stereophonic acoustic echo cancellation," *IEEE Trans. Speech, Audio. Process.*, vol. 6, no. 2, pp. 156-165, Mar. 1998.

[4] F. Yang, M. Wu, and J. Yang, "Stereophonic acoustic echo suppression based on Wiener filter in the short-time Fourier transform domain," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 227-230, Apr. 2012.

[5] Y. S. Park and J. H. Chang, "Residual echo suppression based on tracking echo-presence uncertainty," *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 34, no. 10, pp. 955-960, Oct. 2009.

[6] S. Y. Lee and N. S. Kim, "A statistical model based residual echo suppression," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 758-761, Oct. 2007.

[7] C. M. Lee, J. W. Shin, and N. S. Kim, "Stereophonic acoustic echo suppression incorporating spectro-temporal correlations," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 316-320, Mar. 2014.

[8] J. Bergstra and Y. Bengio, "Random search for hyper-parameter optimization," *J. Machine Learning Research*, vol. 13, pp. 281-305, 2012.

[9] ITU-T, "Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs," *ITU-T Rec.*, p. 862, 2000.

이 철 민 (Chul Min Lee)



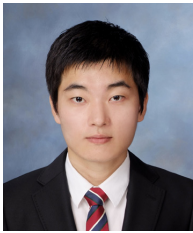
2008년 8월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 졸업
2009년 3월~현재 : 서울대학교
전기·정보공학부 석박사통
합과정 박사과정
<관심분야> 음성 신호처리, 통
계적 신호처리, 음향학적 에
코 제거, 음향학적 이벤트 인식

김 정 훈 (Jeung Hoon Kim)



2013년 2월 : 서울대학교 물리
교육과 졸업
2013년 3월~현재 : 서울대학교
전기·정보공학부 석박통합
과정
<관심분야> 음성 신호처리, 입
체 음향

배 수 현 (Soo Hyun Bae)



2012년 2월 : 인하대학교 정보
통신공학부 졸업
2012년 3월~현재 : 서울대학교
전기·정보공학부 석박통합
과정 박사과정
<관심분야> 음성 신호처리, 통
계적 신호처리

김 남 수 (Nam Soo Kim)



1988년 2월 : 서울대학교 전자공
학과 졸업
1990년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 석사
1994년 8월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 박사
1998년 3월~현재 : 서울대학교
교수

<관심분야> 음성 신호처리, 음성 인식, 통계적 신호
처리, 패턴 인식, 휴먼 인터페이스