컨텐츠의 저작권 보호를 위한 DWT영역에서의 디지털 워터마킹 기법

서영호* · 최현준** · 김동욱***

Digital Watermarking Technique in Wavelet Domain for Protecting Copyright of Contents

Young-Ho Seo* · Hyun-Jun Choi** · Dong-Wook Kim***

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발지원사업(000384410109)을 통해 개발된 결과물임

요 약

본 논문에서는 웨이블릿 변환 영역에서 구성된 부대역간의 트리구조와 공간 영역에서의 영상 형태 정보를 이용하여 워터마크의 삽입 위치를 결정한 후에 워터마크를 삽입하는 기법을 제안하였다. 웨이블릿 영역에서 높은 주파수를 가지는 부대역을 다수의 영역으로 나누고 각 블록에 대한 에너지와 전체 에너지의 평균값 등을 이용하여 워터마킹을 위한 후보영역을 얻는다. 또한 공간 영역에서 얻어진 영상의 경계 정보를 이용하여 워터마크가 삽입될 후보영역을 구한다. 무작위 난수와 웨이블릿 영역에서 이웃 웨이블릿 계수간의 관계를 이용하여 워터마킹 후보영역 내에 워터마크를 삽입한다. 마지막으로 역 웨이블릿 변환을 수행하여 워터마크가 삽입된 영상을 생성한다. 제안된 워터마킹 알고리즘은 JPEG과 같은 압축과 블러링, 선명화, 그리고 가우시안 잡음 등의 공격에 대해서 우수한 특성을 보였다.

ABSTRACT

In this paper we proposed the watermarking technique using the markspace which is selected by tree-structure between the subbands in the wavelet domain and feature information in the spatial domain. The watermarking candidate region in the wavelet domain is obtained by the markspace selection algorithm divides the highest frequency subband to several segments and calculates their energy and the averages value of the total energy of the subband. Also the markspace of the spatial domain is obtained by the boundary information of a image. The final markspace is selected by the markspaces of the wavelet and spatial domain. The watermark is embedded into the selected markspace using the random addresses by LFSR. Finally the watermarking image is generated using the inverse wavelet transform. The proposed watermarking algorithm shows the robustness against the attacks such as JPEG, blurring, sharpening, and gaussian noise.

키워드

워터마킹, 웨이블릿, 비가시성, 강인성, 윤곽선 추출

Keyword

digital watermarking, copyright protect, wavelet transform, edge detection, random sequence, LFSR, energy

* 광운대학교 (제1저자)
** 안양대학교
*** 광운대학교 (교신저자, dwkim@kw.ac.kr)

접수일자 : 2010. 01. 28
심사완료일자 : 2010. 04. 06

I. 서 론

인터넷의 급속한 발전으로 유/무선을 통한 디지털 데이터의 이동 및 저장이 쉽고 빨라지고 있다. 그러나 디지털 데이터는 복제 및 변조가 쉽고 원본과 복사본의 구분이 어렵다. 이러한 디지털 데이터의 불법 복제 및 배포가 확산됨에 따라 지적소유권 문제는 이미 오래전부터 중요한 사회적 문제점으로 크게 부각되고 있다. 이를 해결하기 위해 디지털 워터마킹(digital watermarking)은 지적재산권을 보호하고 저작권을 주장할 수 있는 근거를 제시할 수 있도록 하는 기술로서 현재 많은 연구와 실제적 응용으로의 접근이 이루어지고 있다.

기존의 방식에 비해 주파수 특성과 공간 영역의 특성을 동시에 가지고 있는 웨이블릿 영역의 도입을 통해 워터마크의 삽입이 더욱 효율적으로 수행됐다. 주파수 영역에서의 워터마킹은 주파수 계수를 변화시켜 워터마크를 삽입하는 것으로 Cox[1]와 Barni[2] 등은 이산코사인변환을 이용하여 주파수 영역의 중요한 계수를 추출해 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 그리고 Ruanidh[3]는 이산푸리에변환을 이용하여 위상에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였고 Zhang[4]과 Lin[5] 등은 이산웨이블릿변환(discrete wavelet transform, DWT)을 이용한 방법을 제안하였다. 또한 최근 들어서는 웨이블릿 변환 후 Embedded Zerotree Wavelet(EZW)을 이용해 부대역들이 가지는 상관도를 이용한 방식들이 많이 연구되고 있다[6].

본 논문에서 제안하고자 하는 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 웨이블릿 변환 후 생성되는 부대역의 트리구조에서 고주파 대역의 에너지 분포에 따라 상대적으로 저주파 영역의 에너지 분포를 예측하고 공간영역에서 영상의 형태 정보를 검출한다. 이 두 가지 영역에서의 정보를 이용하여 워터마크 삽입을 위한 부대역내 위치를 선정한다. 그리고 선택된 영역에서 비밀키와 LFSR(Linear Feedback Shift Register)를 통해서 무작위적이고 불규칙적으로 워터마크 영상을 삽입한다.

II. 제안한 워터마킹 기법

제안한 워터마킹 방식은 워터마크를 삽입할 위치를

선택하는 과정과 워터마킹을 삽입하는 과정으로 나뉜다. 워터마크를 삽입할 위치를 선택하는 과정은 공간 영역과 주파수 영역에서 동시에 이루어지고 워터마크를 삽입하는 과정은 선택된 위치에 보안성을 부가하며 워터마킹을 하는 것이다.

2.1. 워터마킹 절차

웨이블릿 영역의 LH_1 부대역에서 LH_3 부대역의 중요 정보를 갖는 주파수 성분을 예측한다. 이것은 두 부대역간의 상관성이 높다는 가정을 기초로 한다. 그리고 공간영역에서 영상 내의 경계 정보를 이용하여 영상을 구성하는 형태 정보를 얻는다. 이 두 영역에서의 정보를 바탕으로 워터마킹을 삽입하기 위한 영역을 선정하는 것이다. 워터마크는 웨이블릿 영역에서 LH_3 부대역에 삽입된다. 제안한 알고리즘을 그림 2에 도식적으로 요약하였다.

저주파 부대역에서 고주파 부대역으로 상관성을 추적하는 방식과 고주파 부대역에서 저주파 부대역으로 한번의 과정만으로 상관성을 찾아가는 방식 사이에는 오차가 있다. 그러나 영상압축을 위한 응용분야와 달리 이러한 오차는 워터마킹을 위한 영역선택 알고리즘에 사용되는 분야에서는 크게 중요하지 않다. 3-레벨 웨이블릿 변환 이후에 부대역의 구조를 그림 3에 나타냈다. 그림 2에서 LH_1 , HL_1 , 및 HH_1 이 가장 주파수가 높은 부대역들이고 LH_3 , HL_3 , 및 HH_3 가 가장 주파수가 낮은 영역이다. 또한 LL_3 는 DC 영역에 해당한다. 먼저 LH_1 과 LH_2 의 상관성을 찾고, LH_2 와 LH_3 간의 상관성을 찾아서 한번의 갱신과정을 거치는 것이 기본 방법일 것이다. 그러나 LH_1 에서 LH_2 를 건너뛰고 LH_3 의 상관성을 직접 구하는 것도 결과에는 큰 차이가 없었다. 따라서 본 논문에서는 후자의 방법을 이용하였다.

워터마크는 LH_3 부대역에 삽입하는 것이라 가정하였는데 그 이유는 두 가지이다. 일반적으로 LH_3 가 공격에 가장 강인하면서 비가시성이 높기 때문이다. 강인성에 대한 성능은 표 1과 같이 간단한 실험을 통해서도 확인할 수 있다. 표 1은 500개의 정지 영상에 대해 리프팅 변환 후 JPEG 압축의 강도를 조절하면서 각 부대역 별로 강인성을 살펴 본 것이다. 결과에서 보이듯이 LH_3 의 부대역이 LL_3 를 제외하고는 가장 강인한 특성을 보이고 있는데 압축율이 높아질수록 LH_3 부대역이 더욱 좋은 특성을 나타냈다.

그림 1. 제안한 워터마킹 알고리즘
Fig. 1. Proposed watermarking algorithm

그림 2. 웨이블릿 영역에서 부대역간의 상관성
Fig. 2. Subband correlation in wavelet domain

표 1. JPEG 압축에 대한 부대역별 강인성
Table 1. Subband robustness after JPEG attack

JPEG Quality	Error Ratio (%)			
	LL ₃	LH ₃	HL ₃	HH ₃
12	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.5
8	0.0	0.3	0.3	20.9
6	0.0	3.6	3.3	34.3
4	2.9	23.8	24.7	55.5
2	1.6	43.0	48.8	69.2
0	36.7	58.2	65.4	76.1

2.2. 워터마킹 삽입 영역의 선택

먼저, LH_1 부대역을 4×4 크기의 영역으로 분할하고 각 영역들을 제곱의 평균, 즉 주파수 영역에서의 에너지를 구한다. 전체 영상의 크기를 $N \times M$ 이라하면 LH_1 의 크기는 $(N/2) \times (M/2)$ 이다. 4×4 크기의 영역에 대한 에너지값들의 평균값을 계산하여 T_{seg} 라 명칭하고 이를 임계값으로 설정한다. 즉, 이 값은 LH_1 부대역에서 4×4 단위의 단위 영역에 대해 구해진 에너지들을 LH_1 부대역에 대해 평균을 구한 값이다. 임계값을 스케일링한 후에 각각의 4×4 영역의 에너지값들을 비교하여 웨이블릿 영역에서의 워터마킹 후보영역으로 선택한다. 웨이블릿 영역에서의 워터마킹 후보영역은 $(N/8) \times (M/8)$ 의 크기이고, 비트평면(bitplane) 형태이다. 에너지값을 비교하여 비트평면을 구성하는 방법은 비교적 간단한데 스케일링된 임계치(αT_{seg})보다 에너지값이 크면 비트평면의 비트값을 1로 두고 작다면 비트값을 0으로 설정한다. 여기서 α 는 스케일링 성분해에 해당하고 0에서 1사이의 값을 갖는다. 그림 3에 웨이블릿 영역에서 워터마킹 후보영역을 선택하는 알고리즘을 흐름도로 정리하였다.

그림 3 워터마킹영역 선택 알고리즘
Fig. 3. Watermarking position selection

웨이블릿 변환에 의한 주파수 대역에서 에너지 분포에 따라 키를 생성하였는데 이 에너지 분포 매트릭스는 여러 잡음에 대한 특성까지 포함하고 있다. 따라서 배경 무늬 같은 잡음에 의한 키 생성을 막고 공간영역에서의 Mach 밴드 효과를 이용하고자 경계 검출 알고리즘을 도입하여 키맵의 생성에 이용한다. 즉, 워터마크를 삽입할 때 공간영역에서 HVS를 이용하여 워터마킹 후보영역을 결정하는 데 이용한다.

만일 잡음, 즉 영상의 시각적 특성에 큰 영향을 주지 않는 고주파 성분을 경계로 검출하여 그 부분에 대한 웨이블릿 영역에서의 워터마킹을 수행한다면 DFT 및 DCT 기반의 알고리즘으로 압축하는 것과 같은 주파수 제거를 통한 영상 압축 공격을 했을 경우에 불필요한 고주파 성분의 제거와 함께 워터마크도 제거되어 공격에 매우 약한 특성을 보일 것이다. 즉, 공간 영역에서의 경계 정보를 주파수 영역으로 도입하기 위해서는 일차적으로 잡음이 제거된 상태에서 경계 정보가 추출되어야 할 것이다. 따라서 캐나 마스크를 도입하여 워터마크 삽입을 위한 경계 검출 알고리즘으로 이용한다.

공간영역에서 워터마킹 대상영역을 선정하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 가우시안 마스크를 이용해서 잡음을 제거하고 소벨 필터를 이용해서 경계를 찾아낸다. 그리고 미리 구해진 임계값을 이용해서 경계정보를 나타내는 이진영상을 만든다. 본 논문에서는 경계를 위한 임계값으로 110을 사용하였다. 이 값은 반복적인 실험을 통해 가장 정확한 경계정보를 찾아내는 값으로 정했다. 다음으로 이진영상을 8×8 크기의 단위영역으로 나눈 후 단위영역 내에 1의 값을 가지는 원소의 개수를 구한다. 그리고 1의 개수와 경계개수 임계값(T_{edge})과의 비교를 통해서 단위영역 내에 얼마만큼의 경계 정보가 포함되어 있는지를 구한다. 1의 개수가 T_{edge} 보다 많다면 비트 1로 설정하고, 그렇지 않다면 비트 0으로 설정한다. 이 비트를 모아서 비트평면을 구성하고, 이를 공간영역에서의 워터마킹 후보영역이라 한다. 공간영역에서의 워터마킹 후보영역도 LH_3 와 동일한 $(N/8) \times (M/8)$ 의 크기를 갖는다. 그림 4에 워터마킹 후보영역을 선정하는 알고리즘을 간략히 요약하였다.

$(N/8) \times (M/8)$ 의 동일한 크기를 갖는 웨이블릿 영역에서의 워터마킹 후보영역과 공간영역에서의 워터마킹 후보영역은 각각 비트평면으로 구성되어 있다. 이 두 가지 후보영역을 논리곱을 통해서 최종적인 워터마킹 후보영역을 구한다. 원 영상의 크기가 512×512 이라면 워터마크가 삽입될 영역인 LH_3 의 크기는 64×64 이다. 이 영역은 4096개의 웨이블릿 계수가 포함되어 있다. 4096개의 계수에 1024개의 화소로 구성된 32×32 의 크기를 가지는 이진 영상을 워터마크로 삽입한다. 삽입될 영역보다 워터마크로 사용되는 정보가 4배 크지만 워터마크 중에서 실제로 유효 워터마크에 해당하는 것은

10%에서 30%정도에 해당된다]. 따라서 유효 워터마크 대비 삽입영역의 크기는 약 20배에 해당하는 것으로 볼 수 있다.

그림 4. 공간영역에서 워터마킹영역 선택알고리즘
Fig. 4. Watermarking position selection in spatial domain

2.3. 워터마크의 삽입과 추출

워터마크를 삽입하기 이전에 워터마크의 보호를 위한 방법으로 워터마크를 암호화하거나 해시함수(Hash function) 등을 이용해서 그 입력을 추적할 수 없는 데이터 형태로 압축 혹은 변형시킨다. 본 논문에서는 LFSR을 이용해서 간단히 워터마크의 위치를 치환한다. 본 논문에서 제안하는 LFSR을 이용한 워터마크의 치환은 3개의 4비트 크기의 LFSR을 사용한다. LFSR의 병렬 출력을 이용하여 x축과 y축으로 구성된 무작위 주소를 생성하는 방식으로 워터마크를 모두 치환한다. LFSR을 이용한 워터마크 치환방식을 그림 5에 나타냈다.

그림 5. LFSR을 이용한 무작위 주소발생
Fig. 5. Random address generation using LFSR

생성된 워터마킹 후보영역의 비트평면과 암호화된 워터마크를 이용하여 워터마킹을 수행하고 역 리프팅 과정을 거쳐 워터마킹 과정이 완료된다. 워터마킹은 LH_3 부대역에서 적용이 된다. 워터마크는 0에서 255의 값을 갖는 회색 영상이고, 크기는 $(N/16) \times (N/16)$ 이다. 앞서 설명한 것과 같이 크기만 비교한다면 LH_3 부대역의 약 25%의 크기만큼 워터마킹이 삽입되는 것으로 예측할 수 있지만 유효 워터마크 개수를 고려하면 5% 정도만 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 워터마킹의 삽입은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$x'(i,j) = x(i,j) + k(i,j) \cdot \beta(2W(i,j) - 1) \quad (1)$$

여기서 “.”는 논리곱을 나타내고 β 는 워터마크의 강인성을 나타내는 스케일링 성분으로 영상에 따라서 2에서 15사이의 값을 갖는다. $k(i,j)$ 는 워터마킹 후보영역을 나타내는데 값이 1이면 워터마크가 삽입되고 0이면 삽입되지 않는다. $W(i,j)$ 는 워터마크인테 값에 따라서 값을 더하거나 빼는 동작이 수행된다. 워터마크가 모두 삽입된 영상은 역 리프팅 변환을 통해서 공간영역의 영상으로 복원되고 워터마킹 과정은 완료된다.

삽입된 워터마크를 추출하기 위해서는 다음과 같은 과정이 수행된다. 리프팅을 이용해서 웨이블릿 변환을 수행한 후 LH_3 부대역의 계수와 원래 영상의 웨이블릿 변환 계수와의 차를 취한다. 그리고 워터마킹 후보영역에 대한 정보와 LFSR 초기치의 정보를 이용하여 워터마크를 추출한다. 워터마크 추출과정을 그림 6에 나타냈다. $W'(i,j)$ 가 추출된 워터마크에 해당한다.

그림 6. 워터마크 추출방식
Fig 6. Watermark extraction

III. 실험 및 결과

제안된 알고리즘은 C++언어를 이용하여 구현하여 실험되었다. 실험에 사용된 영상은 500개의 512×512 크기의 영상이다. 워터마크는 LFSR을 이용해서 발생된 랜덤 시퀀스를 사용하였고 LFSR의 입력키는 0x12345678로 고정하여 사용하였다. JPEG 압축을 비롯하여 Blurring, sharpening, 그리고 가우시안 노이즈와 같은 공격을 적용하였다.

워터마크가 삽입된 영상의 질을 관찰하기 위해서 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)를 사용하였다. 추출된 워터마크의 특성을 분석하기 위해서 유효한 워터마크에 대해 NC(Normalized correlation)를 사용하였다.

표 2는 β 의 값이 8인 경우에 워터마크가 삽입된 영상에 공격을 가하여 영상의 PSNR과 추출된 워터마크의 NC를 구한 결과이다. 표에 나타난 것과 같이 다양한 공격에 대해서 워터마크가 잘 추출되는 것을 볼 수 있다.

표 2. 공격에 대한 강인성 결과
Table 2. Robustness result after attack

Attack		PSNR	NC
JPEG Quality	12	44.78	1
	8	43.85	1
	4	41.29	1
	0	38.97	1
Week Blur		36.29	1
Strong Blur		36.29	1
Week Sharpen		35.28	1
Strong Sharpen		34.99	0.99
Gaussian Noise 10%		34.41	0.96
Gaussian Noise 20%		29.67	0.87
Week Sharpen+Blur		37.73	0.96
Strong Shapen+Blur		34.66	0.97

그림 7에서 대표적으로 Lena 영상에서 β 값이 16의 경우에 대해 워터마크가 삽입된 영상을 나타내고 있다. β 값이 16인 경우에는 시각적으로 워터마크에 의한 영상의 왜곡이 발견되는 것을 볼 수 있다. 시각적으로 관찰할 때 β 값이 15정도부터 시각적으로 왜곡이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 영상에 따라서 조금의 차이는 있을 수 있겠지만 β 은 15이하로 설정하는 것이 적당한 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능 확인을 위해 [6]에서 수행한 다양한 공격 수검결과 중 본 논문에서 수행한 공격방식과 일치하는 JPEG 압축과 Sharpening을 선택하여 비교하였다. JPEG 공격은 JPEG Quality 12~0까지 수행하였고 이 수는 약 1.3:1~15:1 정도의 압축률을 의미한다. Sharpening은 포토샵에서 1회 수행한 결과이다. 표에서 확인할 수 있듯이 제안한 워터마킹 알고리즘은 [6]의 결과와 비교하여 우수한 성능을 보인다.

그림 7. 워터마크 삽입 (a) 원영상 (b) $\beta=16$
Fig. 7. Watermarking image (a) original (b) $\beta=16$

표 3. 제안한 기법과 [12]의 비교
Table 3. Comparison with [12]

Attacks		[12]'s	Proposed
JPEG Quality	12	1	1
	8	1	1
	4	1	0.98
	0	1	0.95
Strong Sharpen		0.99	0.99

IV. 결 론

본 논문에서는 웨이블릿 영역에 구성된 부대역 구조와 공간 영역에서의 형태 정보를 이용하여 워터마크를 삽입할 영역을 결정한 후에 워터마크를 삽입하는 알고리즘을 제안하였다. 먼저 고주파 성분의 부대역에서 저주파 성분을 갖는 부대역으로 중요 주파수 영역을 예측하였다. 주파수 영역에서 구해진 에너지 특성에 공간 영역에서 얻어진 영상의 경계 정보를 더하여 최종적인 워터마크가 삽입될 영역을 선정하였다. 워터마크는

LFSR을 이용하여 발생된 무작위적인 주소로 치환된 후에 웨이블릿 영역 내의 선정영역에 삽입된다. 최종적으로 역 웨이블릿 변환을 취함으로써 워터마크가 삽입된 영상을 생성한다. 제안된 워터마킹 알고리즘은 JPEG과 Blurring, Sharpening, 그리고 가우시안(Gaussian) 잡음 등의 공격에 대해서도 기존의 방식들에 비해 좋은 특성을 보인다. 제안한 알고리즘은 여러 공격에 대해 강인성을 가지면서도 비가시성이 높았다. 본 연구에서 제안된 워터마크 기법은 일반적인 영상처리 공격에 대해 강인성을 가짐으로써 영상을 다루는 분야에서 저작권 보호나 소유권 인증 등의 응용에 사용될 수 있을 것으로 사료된다

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발지원사업(000384410109)을 통해 개발된 결과물입니다.

참고문헌

- [1] I. J. Cox, J. Killian, T. Leighton and T. Shamoon, "Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia," *IEEE Trans. on Image Processing*, 6, 12, pp. 1673-1687, 1997
- [2] M. Barni, "Image Watermarking of Secure Transmission over Public Networks", *Proc. of COST 254 Workshop on Emerging Techniques for Communication Terminals*, Toulouse, France, pp. 290~294, July, 1997
- [3] J. O. Ruanaidh, W. J. Dowling, and F. M. Boland, "Phase Watermarking of Digital Images", *Proc. of IEEE Conf. in Image Processing*, vol. 3, pp.239~242, 1996.
- [4] H. Zhang, T. W. S. Chow, and M. K. M. Rahman, "A novel dual wing harmonium model aided by 2-D wavelet transform subbands for document data mining", *Expert System with Applications*, vol. 37, Issue 6, pp. 4403~4412, June 2010.

- [5] W. H. Lin, Y. R. Wang, S. J. Horng, T. W. Kao, and Y. Pan, "A blind watermarking method using maximum wavelet coefficient quantization", *Expert System with Applications*, vol. 36, Issue 9, pp. 11509~11516, Nov. 2009.
- [6] W. H. Lin, Y. R. Wang, and S. J. Horng, "A wavelet-tree-based watermarking method using distance vector of binary cluster", *Expert Systems with Applications*, vol. 36, Issue 6, August 2009.

저자소개

서영호(Young-Ho Seo)

1999년 2월 : 광운대학교 전자재료
공학과 졸업 (공학사)
2001년 2월 : 광운대학교
일반대학원 졸업(공학석사)

2004년 8월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
2003년 6월~2004년 6월 : 한국전기연구원 연구원
2005년 9월~2008년 2월 : 한성대학교 조교수
2008년 3월~현재 : 광운대학교 교양학부 조교수
※ 관심분야: 2D/3D 영상 및 비디오 처리, 디지털
홀로그램, SoC 설계, 워터마킹/암호화

최현준(Hyun-Jun Choi)

2003년 2월 : 광운대학교 전자재료
공학과 졸업(공학사)
2005년 2월 : 광운대학교
일반대학원 졸업(공학석사)

2009년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
2009년 3월 ~ 2010년 2월 : 광운대학교 연구교수
2010년 3월 ~ 현재 : 안양대학교 정보통신공학과
조교수
※ 관심분야: 영상압축, 워터마킹, 암호학, FPGA/ASIC
설계, Design Methodology

김동욱(Dong-Wook Kim)

1983년 2월 : 한양대학교
전자공학과 졸업(공학사)
1985년 2월 : 한양대학교 대학원
졸업(공학석사)

1991년 9월 : Georgia 공과대학 전기공학과 졸업
(공학박사)
1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과
정교수
2000년 3월 ~ 2001년 12월 : 인티스닷컴(주) 연구원
2007년 3월 ~ 현재 : (사)실감미디어산업협회 이사
2009년 3월 ~ 현재 : 실감미디어연구소 소장
※ 관심분야: 디지털 VLSI Testability, VLSI, CAD, DSP
설계, Wireless Communication