

논문 2004-41SP-4-5

## 웨이블릿 압축 동영상의 정칙화 기반 적응적 개선에 관한 연구

(Adaptive Regularized Enhancement of Wavelet Compressed Video)

정 정 훈\*, 기 현 중\*, 이 성 원\*\*, 백 준 기\*\*

(Jung Hoon Jung, Hyun Jong Ki, Seong Won Lee, and Joon Ki Paik)

## 요 약

움직임 보상을 고려한 3차원 웨이블릿 변환은 공간적, 시간적인 상관관계에 중복된 정보를 효과적으로 제거한다. 그러나 웨이블릿 방식으로 압축된 영상이라 하더라도 압축률이 높은 경우 고주파 서브밴드의 변환계수가 상당수 손실되어 압축복원 시에 링 현상과 같은 왜곡이 생긴다. 본 논문에서는 이러한 3차원 웨이블릿의 압축왜곡을 줄이기 위하여 적응적 반복 복원 기법을 사용하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 적응적 기법에서는 에지의 방향에 따라 서로 다른 고역통과필터를 정칙화 복원에 사용하였다.

## Abstract

The three-dimensional (3D) wavelet transform with motion compensation is suitable for very high quality video coding due to both spatial and temporal decorrelations. However, it still suffers from image degradation such as ringing artifact and afterimage because of the loss of high frequency components by quantization. This paper proposes an iterative regularized enhancement of the motion-compensated 3D wavelet coded video. We also propose the adaptive implementation of the constraints for the regularization. It selectively suppresses the high frequency component along only the corresponding edge direction.

**Keywords** : wavelet transform, image restoration, resolution enhancement, postprocessing, wavelet-compressed video

## I. 서 론

제한된 전송대역폭과 고가의 저장장치들은 현재의 MPEG과 같은 규격보다도 좀더 효과적인 영상 압축방법을 요구한다. 특히, 영상회의, 영상전화 등과 같은 낮은 데이터 전송률이 요구되는 환경에서의 고품질 영상 부호화는 더욱 높은 효율의 압축기법이 필요하다. 그러나 전송률이 낮을수록 영상의 화질은 저하되기 마련이다. 좋은 부호화기는 공간적, 시간적 상관관계에 의한 중복된 정보를 효과적으로 제거한다. 따라서 공간상의

웨이블릿 변환을 시간축으로 확장하는 3차원 웨이블릿 기반의 영상부호화기법들이 최근 제안되었다<sup>[1-5]</sup>.

웨이블릿 변환은 다른 변환에 비하여 높은 에너지 압축 효과가 있으며 이미 2차원 영상에 적용되어 높은 성능을 인정받은 바 있다<sup>[6][7]</sup>. 웨이블릿 기반의 부호화는 블록 DCT 기반의 부호화에 비하여 일반적으로 두 가지 장점을 가진다. 첫째, 영상을 블록으로 나누지 않고 전체를 부호화할 수 있으므로 블록화에 의한 화질열화를 피할 수 있다. 둘째, 웨이블릿 변환은 주파수 정보와 공간상의 위치정보를 동시에 부호화므로, 비정상적(non-stationary) 신호를 분석하기에 적합하다.

3차원 영상부호화에 있어서 웨이블릿 변환은 2차원의 공간축과 더불어 시간축으로도 변환이 이루어진다. 즉, 입력영상신호는 먼저 움직임 보상형 시간축 필터로, 그 다음 공간상의 웨이블릿 변환에 의하여 시공간의 서브밴드(subband)로 나누어진다. 움직임 보상형 시간축

\* 학생회원, \*\* 정회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 (Department of Image Engineering Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia, and Film, Chung-Ang University)

※ 이 논문은 2003학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

접수일자: 2004년3월31일, 수정완료일: 2004년5월18일

필터를 포함함으로써 얻는 3차원 웨이블릿 분할의 이점은 시간에 따라 변하는 영상정보의 높은 에너지 압축이 가능하다는 것 외에도 공간적, 시간적 스케일러빌리티 (scalability)가 가능하다는 것이다. 이러한 스케일러빌리티는 동영상 데이터를 여러 계층의 해상도를 가진 하나의 비트스트림(bit-stream)으로 부호화하여, 입력단에서 원하는 해상도로 영상을 쉽게 복원할 수 있게 한다 [5]

그러나 웨이블릿 방식으로 압축된 영상이라 하더라도 압축률이 높은 경우 고주파 서브밴드의 변환계수가 상당수 손실되어 압축복원 시에 링 현상과 같은 왜곡이 생긴다. 이때 주로 손실되는 고주파 변환계수는 시간적으로도 공간적으로도 상관관계가 적은 성분으로, 상관관계가 큰 성분이 에너지 쏠림(energy compaction) 원리에 의하여 저주파 대역으로 이동하면서 큰 절대값을 갖는 것에 반하여 고주파 대역으로 이동하면서 작은 절대값을 갖게 되므로 양자화 과정에서 쉽게 제거가 되기 때문이다. 링 현상은 저역통과필터의 결과영상에서 에지 주변에 작은 물결무늬 형태로 나타난다. 3차원 웨이블릿의 경우 시간축 상의 압축에서는 연속한 프레임에서 공간적으로 같은 위치의 화소값이 갑자기 변하게 되면, 시간적 변화를 따라가지 못해 발생하는 잔상 현상과 움직임 열화(motion blur)가 나타난다. 움직이는 물체의 에지 주변에서는 공간적인 원인에 의한 링 현상과 시간적인 원인에 의한 잔상 현상이 동시에 일어난다.

본 논문에서는 이러한 3차원 웨이블릿의 압축왜곡을 줄이기 위하여 적응적 반복 복원 기법을 사용하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안된 적응적 기법에서는 에지의 방향에 따라 서로 다른 고역통과필터를 정칙화 복원에 사용하였다.

본 논문은 다음과 같이 이루어져 있다. II장에서는 3차원 웨이블릿 영상압축 시스템의 전반적인 소개와 3차원 압축영상에 대한 복원알고리즘이 제안된다. 끝으로, III장과 IV장에서는 실험결과와 결론을 각각 다루고 있다.

## II. 본 론

### 1. 3차원 웨이블릿 기반 영상압축 시스템

3차원 웨이블릿 기반 영상압축<sup>[2-4]</sup>의 화질 열화에 대한 모델은 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$y = Dx \tag{1}$$

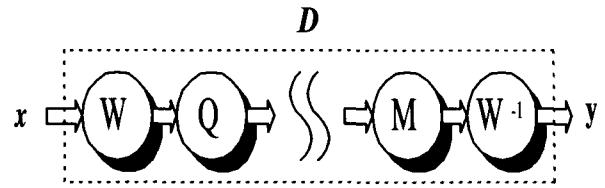


그림 1. 3차원 웨이블릿 영상압축시스템의 열화모델  
Fig. 1. The degradation model for 3D wavelet video compression system.

여기서  $x$ 는 원본 영상을 의미하며,  $y$ 는 압축된 영상,  $D$ 는 전체 부호화과정에 따른 3차원 열화 과정을 나타낸다. 전체 3차원 웨이블릿 영상압축 시스템의 열화모델이 그림 1에 도시되었다.

그림 1에서  $W$ 는 움직임 보상형 3차원 웨이블릿 변환을 나타내며,  $Q$ 는 양자화과정,  $M$ 은 역양자화과정, 그리고  $W^{-1}$ 은 움직임 보상형 역 웨이블릿 변환을 뜻한다. 움직임 보상형 웨이블릿 변환은 먼저 두 연속하는 프레임 선택하여 움직임 보상을 하며, 보상된 영상을 이용하여 시간적 웨이블릿 변환을 한다. 그다음 변환된 각 프레임에 대하여 공간적 웨이블릿 변환을 수행한다.

자세히 살펴보면, 움직임 보상형 시간적 분할은 동작의 궤적을 따라 시간적 필터링이 수행된다<sup>[1][2]</sup>. 시간적 분할에서는 프레임들을 2차 Haar 웨이블릿에 의하여 분해한다. 반면, 공간적 분할의 경우 Daubechies 9/7 필터<sup>[6]</sup>를 주로 사용한다. Haar 웨이블릿은 그 짧은 길이로 인하여 짧은 신호의 분해에 적합하다. 높은 차수의 필터는 실제적 구현에 있어서 프레임 복원 시에 지연문제를 일으킬 가능성이 높다.

연속적인 영상 프레임을 사용하여 두 번째 프레임이 움직임 보상된 상태인 두 영상을 시간축으로 저주파(L) 서브밴드와 고주파(H) 서브밴드로 분해한다. 시간축으로 에너지는 저주파 서브밴드에 모이게 되므로, 다음 단계에서는 두 개의 L 프레임을 모아 다시 LL과 LH로 분해한다. 대부분의 에너지는 가장 낮은 주파수 밴드(LL)에 모이게 된다. 이 가장 낮은 주파수 밴드에서 움직임 보상 예측을 LL 서브밴드간에 적용한다<sup>[1]</sup>.

매 16개의 프레임을 GOF(Group Of Frame)으로 묶어 각 GOF마다 독립적으로 3차원 웨이블릿을 적용한다. 각 GOF에는 인트라(intra) t(temporal)-LL, 예측(predictive) t-LL, t-LH, t-H 네 가지 종류의 프레임이 존재한다. 그다음 이 각각의 프레임에 공간적 분할을 진행한다. 결과적으로, 공간상관성은 2차원 웨이블릿 변환을 움직임 보상된 시간적 서브밴드에 적용함으로써 제거된다. 그림 2는 시간적 웨이블릿 분할의 단계를 보여

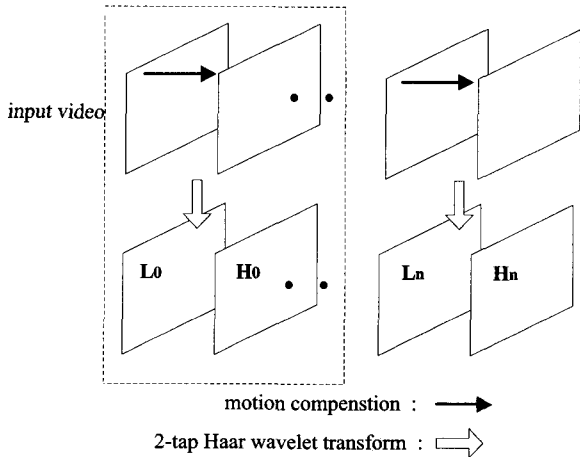


그림 2. 움직임 보상형 시간적 분할의 첫 단계  
Fig. 2. The first stage of the motion-compensated temporal analysis.

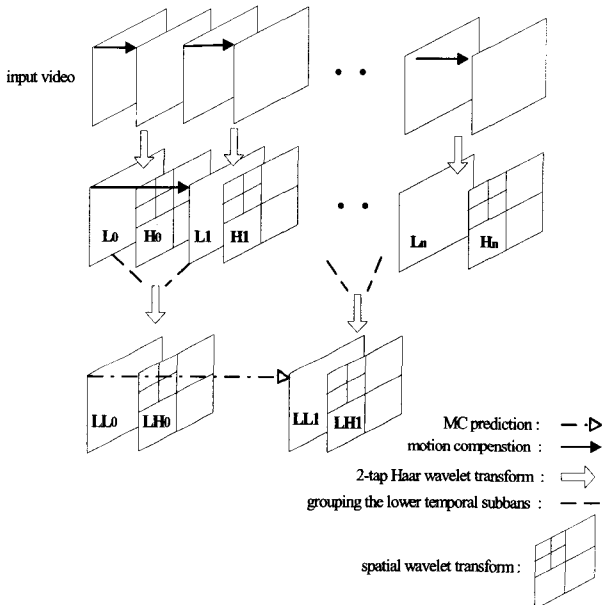


그림 3. 3차원 웨이블릿 영상압축시스템의 전체상  
Fig. 3. Overview of the 3D wavelet video compression system.

주고 있다. 점선으로 표시된 부분은 압축과정에 필요한 두 프레임을 표시하고 있다. 전체 분할과정은 그림 3에 나타나있다.

## 2. 개선 알고리즘

3차원 웨이블릿 압축영상은 양자화에 의하여 공간과 시간상의 고주파 서브밴드의 변환계수를 잃음으로써 압축복원된 영상에 링 현상에 의한 왜곡이 생긴다. 링 현상은 에지 근처에서 작은 물결 형태로 나타나며, 잔상 현상은 운동궤적을 따라 나타난다. 이러한 부호화 왜곡을 제거하기 위하여 정칙화 기법을 통하여 식 (1)의 해를 구한다.

### 가. 정칙화과정의 수식화

정칙화 이론에 따르면 다음 범함수(functional)를 최소화함으로써 정칙화된 결과를 얻을 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$f(x) = |y - Dx|^2 + \lambda |Cx|^2 \quad (2)$$

여기서  $D$ 는 3차원 웨이블릿 영상압축의 열화모델을,  $C$ 는 고역통과 필터를 그리고  $\lambda$ 는 정칙화 매개변수를 나타낸다. 두 번째 항은  $\lambda$ 에 의해 조정되는 평탄화(smoothness) 제약조건(constraint)을 나타낸다. 3차원 웨이블릿 압축된 영상의 화질을 개선하기 위하여 고역통과 필터를 공간과 시간상으로 분리하여 고려해야 한다. 따라서 식 (2)에 대한 추가적인 제약조건이 필요하다

$$f(x) = |y - Dx|^2 + \lambda_1 |C_s x|^2 + \lambda_2 |C_t x|^2, \quad x \in P \quad (3)$$

여기서  $C_s$ 는 공간상에 적용된 고역통과필터를 나타내며,  $C_t$ 는 시간축을 따라 적용된다.  $P$ 는 클리핑(clipping) 함수와 같은 하드(hard) 제약조건을 나타낸다. 클리핑 함수는 양자화에 의해 정의되는 범위 내에서 각 화소의 밝기값이 원래값을 찾아갈 수 있도록 매 반복이 끝날 때마다 조정해 준다.

열화모델의 대칭성( $D^T y = y$ )을 이용하여 식 (3)을 최소화하는 해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$x^{k+1} = x^k + \beta \{y - (D + \lambda_1 C_s^T C_s + \lambda_2 C_t^T C_t) x^k\} \quad (4)$$

### 나. 적응형 필터에 의한 왜곡 보상

제한된 알고리즘에서는 방향성 고역통과필터<sup>[9][10]</sup>를 이용한 공간 적응적 제한조건을 구현하였다. 제한된 방법에서는  $m = 1, \dots, M$ 인  $M$ 개의 서로 다른 고역통과 필터  $C^m$ 들의 집합을 사용한다. 이때  $M$ 은 에지방향의 수와 같다. 이것은 해당 에지방향에 대하여만 선택적으로 고주파성분을 제한한다. 첫 정칙화 계수  $\lambda_1$ <sup>[8]</sup>를 적응적으로 바꾸기 위하여 고주파 밴드들의 웨이블릿 변환 계수들을 사용했다. 또한 변환계수들을 비교하여 방향을 결정하는 방향성필터들 사용함으로써 적응적으로 고역통과필터  $C^m$ 을 구현했다<sup>[13]</sup>. 예를 들면, 영상의 각 화소들은 평탄영역, 수평 에지, 수직 에지, 그리고 대각선 에지 등으로 구분된다. 이러한 구분에 따라 적응적인 방법으로 해를 구한다.

$$x^{k+1} = x^k + \beta \left( y - \sum_{m=1}^M I_m T_m x^k \right) \quad (5)$$

$$T_m = D + \lambda_1 C_s^m T C_s^m + \lambda_2 C_t^T C_t \quad (6)$$

여기서  $I_m$ 은 대각선 성분들이 1또는 0인 행렬이며, 해당 에지를 따라 적절한 고역통과필터를 선택하게 한다.

#### 다. 움직임에 의한 왜곡

압축에 의한 열화과정에 있어서 시간축 상의 움직임 벡터를 얻을 수 있으며,  $\lambda_2$ 를 움직임 벡터의 크기에 반비례하도록 조정하여 시간적 제약조건이 화질개선 과정에 미치는 영향력의 크기를 조정할 수 있다. 이렇게 조정하는 이유는, 움직임 벡터가 발생한 영역은 시간적인 상관성이 적고 그렇지 않은 영역은 크기 때문이다. 움직임 벡터는 두 연속하는 프레임에서 생성되기 때문에, 시간적 제약조건인  $C_t$ 는 연속한 두 개의 프레임에 적용된다. 본 논문에서는 시간적 제약조건을 Haar 웨이블릿 필터로 구현하였다.

$$C_t = \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

### III. 실험

실험에는 표준 실험영상인 QCIF 해상도의 Suzie영상과 Foreman영상이 사용되었다. 제안된 개선 알고리즘이 16 프레임의 동영상에 적용되었다. 움직임 보상된 시간적 분할에 2차 Harr 웨이블릿이 사용되었으며 공간적 분할에는 Daubechies 9/7 필터를 이용한 웨이블릿이 사용되었다. 이때 2단계의 시간적 분할과 3단계의 공간적 웨이블릿 분할을 수행하였다. 개선 알고리즘의 계수들은 suzie영상의 경우  $\beta=0.5$ ,  $\lambda_1=0.6$ , 그리고  $\lambda_2=0.3$ , foreman영상의 경우는  $\beta=0.2$ ,  $\lambda_1=0.1$ , 그리고  $\lambda_2=0.3$  을 사용하였는데, 이것은 여러 가지 값을 가지고 실험한 결과 가장 나은 결과를 내는 값들로 결정된 것들이다. 일반적인 정칙화 기반 영상복원의 경우  $\lambda$ 를 조절하는 방법은 논문 [14] 등에 설명이 되어 있는데, 영상의 특성에 따라서 고주파 성분이 많은 영상에는 낮게 그렇지 않은 영상에는 높게 주어진다. 그림 5는 움직임이 있는 부분에 움직임 열화와 에지 근처에 링 현상이 있는 3차원 웨이블릿 압축된 프레임이다.



그림 4. Suzie 영상의 원래 프레임  
Fig. 4. Original frame of Suzie sequence.



그림 5. 3차원 웨이블릿 영상압축시스템에 의해 열화된 프레임(suzie)  
Fig. 5. The degraded frame by 3D wavelet video compression system(suzie).

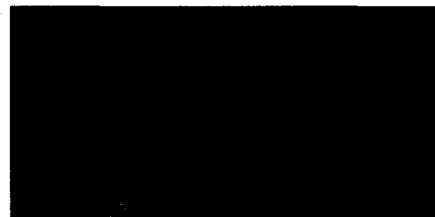


그림 6. 제안된 개선 알고리즘에 의해 복원된 프레임(suzie)  
Fig. 6. The reconstructed frame by the proposed enhancement algorithm(suzie).

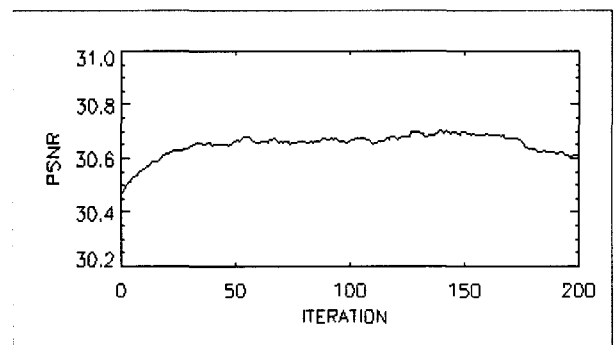


그림 7. PSNR과 반복회수 (suzie)  
Fig. 7. PSNR vs. iteration(suzie).

개선된 프레임은 그림 6에 제시되어 있다. 그림 5에 비하여 복원된 프레임은 선명하며 오른손과 수화기 근처의 링 현상이 감소된 것을 알 수 있다. PSNR은 30.437에서 30.696으로 증가되었으며 그림 7에 나타나 있다. 그림 8, 9, 10, 11은 마찬가지로 foreman영상에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 마지막으로 그림 12는 두 GOF의 다른 PSNR을 보여주고 있다.



그림 8. Foreman 영상의 원래 프레임  
Fig. 8. Original frame of Foreman sequence.



그림 9. 3차원 웨이블릿 영상압축시스템에 의해 열화된 프레임 (foreman)  
Fig. 9. The degraded frame by 3D wavelet video compression system (foreman).



그림 10. 제안된 개선 알고리즘에 의해 복원된 프레임 (foreman)  
Fig. 10. The reconstructed frame by the proposed enhancement algorithm (foreman).

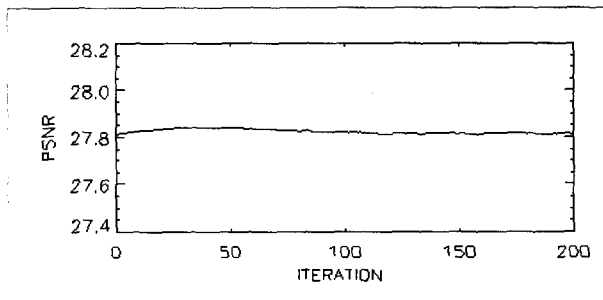


그림 11. PSNR과 반복회수 (foreman)  
Fig. 11. PSNR vs. iteration (foreman).

#### IV. 결 론

본 논문에서 우리는 3차원 웨이블릿 부호화 영상을 개선하기 위한 움직임 보상형 적응적 정칙화 알고리즘을 제안하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘은 부호화에 따른 열화를 줄일 뿐 아니라 효율적으로 열화된 영상을 개선시킬 수 있다. 동영상의 압축 방법이 정지영상에 비하여 복잡하기 때문에 계산량 또

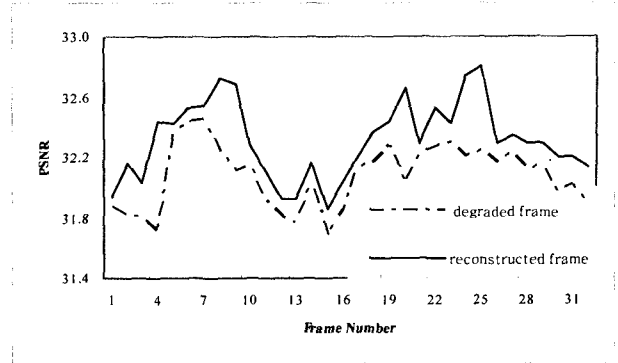


그림 12. 두 GOF에서의 PSNR들 (suzie)  
Fig. 12. PSNRs in two GOF (suzie).

한 많다. 따라서, 향후 연구에서는 프레임 단위의 처리를 통해 계산량을 줄이기 위한 방법을 제안할 것이다. 또한, 열화모델에 따른 추가적인 제약조건들이 고려될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S.J. Choi and J.W. Woods, "Motion-Compensated 3-D Subband Coding of Video," IEEE transactions on image processing, vol.8, no.2, pp. 155-167, Feb. 1999.
- [2] J.R. Ohm, "Three Dimensional Subband Coding with Motion Compensation," IEEE transactions on image processing, vol.3, no.5, pp. 559-571, Sept. 1994.
- [3] C.I. Podilchuk, N.S. Jayant and N. Farvardin, "Three-Dimensional Subband Coding of Video," IEEE transactions on image processing, vol 4, no.2, Feb. 1995.
- [4] I.K. Levy and R. Wilson, "Three Dimensional Wavelet Transform Video Compression," Proceedings of the IEEE Multimedia Systems '99, vol. 2, pp. 924-928, June 1999
- [5] B. Pesquet-Popescu, M. Benetiere and V. Bottreau, "Embedded Color Coding For Scalable 3D Wavelet Video Compression," Proc. SPIE Visual Commun. Image Processing, 2000
- [6] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform," IEEE transactions on Image Processing, vol. 1, pp. 205-220, April 1992.
- [7] Jerome M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," IEEE transactions on Signal Processing, vol. 41, no. 12, pp. 3445-3462, Dec. 1993
- [8] A. K. Katsaggelos, "Iterative Image Restoration Algorithms," Optical Engineering, vol. 28, no.7,

pp. 735-748, July 1989

[9] A.K. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice-Hall, 1989.

[10] S. Mallat, S. Zhong, "Characterization Of Signals From Multiscale Edges," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 14, no.7, July 1992.

[11] J. H. Jung, J. H. Shin, and J. K. Paik, "Spatio-temporally adaptive image sequence interpolation," Proc. 1998 Int. Tech. Conf. Circuits, Systems, Computers, Communications, vol. 1, pp. 43-46, July 1998.

[12] J. H. Jung, S. C. Joung and J. K. Paik, "Regularized constrained restoration of wavelet compressed image," Proc, SPIE Visual Commn. Image Processing, 2000

[13] 정정훈, 정시창, 백준기, "웨이블릿 압축된 영상의 정칙화 기반 후처리에 관한 연구," 대한전자공학회 논문지, 36권 11호, pp. 1290-1299, 1999년 11월.

[14] M. G. Kang and A. K. Katsaggelos, "General choice of the regularization functional in regularized image restoration," IEEE Trans. Image processing, vol. 4, no. 5, pp. 594-602, May 1995.

저 자 소 개



**정 정 훈**(학생회원)  
 1997년 중앙대학교 전자공학과 졸업.  
 1999년 중앙대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2004년 현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 박사과정 재학.

<주관심분야: 영상처리, 웨이블릿, 3D 컴퓨터 비전, 객체 추적>



**기 현 중**(학생회원)  
 2003년 중앙대학교 전기전자공학부 졸업  
 2003년~현재 중앙대학교 첨단 영상대학원 영상공학과 석사과정

<주관심분야: 영상복원, 웨이브릿, 객체 추적>



**이 성 원**(정회원)  
 1988년 서울대학교 제어계측 공학과 졸업(공학사).  
 1990년 서울대학교 제어계측 공학과 석사졸업  
 2003년 University of Southern California 전기공학과 박사졸업

현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 연구교수.

<주관심분야: 미디어프로세서 및 SOC설계, 멀티 미디어 신호처리, Power-Aware Computing>



**백 준 기**(정회원)  
 1984년 서울대학교 제어계측 공학과 공학사 졸업.  
 1987년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사졸업.  
 1990년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.

현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 교수

<주관심분야: 영상복원, 신호처리, 반도체>