

논문 2008-45SP-6-10

# 웨이블릿 변환을 이용한 영상복원의 물결현상 제거 방법

## ( Ringing Artifact Removal in Image Restoration Using Wavelet Transform )

윤진영\*, 유윤종\*, 전신영\*, 신정호\*\*, 백준기\*\*\*

( Jinyoung Youn, Yoonjong Yoo, Sinyoung Jun, Jeongho Shin, and Joonki Paik )

### 요약

디지털 영상이 멀티미디어의 핵심 매체로 자리를 잡게 되면서 영상의 열화요인을 제거하여 원래의 품질에 가깝게 개선하는 영상복원기술의 활용분야가 더욱 늘어나고 있다. 그러나 영상복원을 수행할 때 영상의 열화(degradation)가 선형공간불변이라고 가정하기 때문에 주파수영역에서 영상복원을 수행하면 그 결과 에지와 같이 밝기값의 변화가 큰 영역 주변에서 물결현상(ringing)이 나타나는 단점이 있다. 본 논문은 물결현상 제거를 위해 새로운 적응적 후처리 필터링 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 웨이블릿 변환을 사용하여 영상을 해석하고 에지맵을 추출하고 영역을 나누어 에지영역과 물결현상을 검출한 후 이를 쌍방향필터(bilateral filter)를 이용해 제거한다. 실험결과를 통해서 제안하는 방법이 효과적으로 물결현상을 제거하는 동시에 중요한 에지를 보존할 수 있음을 확인할 수 있다.

### Abstract

Digital image find own level core media in multimedia as image restoration technology fields, which remove degradation factor for image enhancement, have been growing. Linear space-invariant image restoration algorithms often introduce ringing artifacts near sharp intensity transition areas. This paper presents a new adaptive post-filtering algorithm for reducing ringing artifact. The proposed method extracts an edge map of the image using wavelet transform. Based on the edge information, ringing artifacts are detected, and removed by an adaptive bilateral filter. Experimental results show that the proposed algorithm can efficiently remove ringing artifacts with edge preservation.

**Keywords:** ringing artifacts reduction, restoration, wavelet transform, bilateral filter

### I. 서론

디지털 영상복원의 연구는 주로 군사 및 항공우주 분

야의 응용을 목적으로 시작 발전되어 왔다 그러나 1980년대에 들어서 냉전이 종식되면서, 전 세계가 경제 및 산업기술적인 면에서 무한 경쟁 상태에 놓이게 되면서 군사적인 목적으로 시작되었던 영상복원 기술은 산업용이나 가정용 영상기기로 그 응용이 확대 되었다<sup>[1]</sup>.

최근에는 핸드폰 카메라 모듈과 디지털 카메라가 보편화되면서 다양한 휴대용 디지털 영상매체가 일상생활의 필수품이 되었고, 급속하게 발전하는 반도체 기술도 고성능의 연산과 대용량의 기억 장치를 경제적으로 제공하면서, 영상복원기술의 대중화를 뒷받침 할 것으로 기대된다. 이러한 환경에서, 디지털 영상복원의 목표는 일련의 영상처리 과정에서 발생하는 영상의 열화요인을 찾아낸 후, 그 요인을 제거하여 원래의 품질에 가깝게 개선하는 것이다<sup>[2]</sup>.

\* 학생회원, \*\*\* 평생회원, 중앙대학교 첨단영상대학원 (Dept. of Image Engineering, Graduate School of Advanced Image Science, Multimedia, and Film, Chung-Ang University)

\*\* 정회원, 한경대학교 웹정보공학과 (Dept. Web Information Engineering, Hankyong National University)

\* 본 연구는 서울시 산학연협력사업으로 구축된 서울 미래형콘텐츠컨버전스 클러스터 지원 및 2008년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터(홈네트 워크연구센터) 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

접수일자: 2008년8월20일, 수정완료일: 2008년10월10일

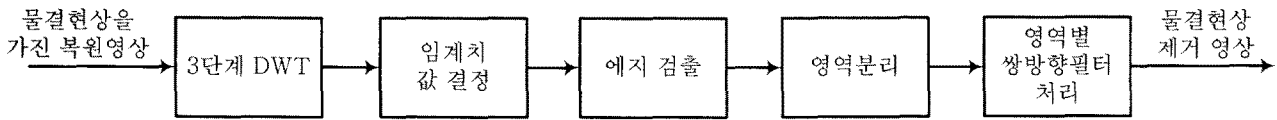


그림 1. 전체 흐름도  
Fig. 1. Overview of the proposed method.

많은 디지털 영상복원 방법들은 연산량의 대부분을 차지하는 중첩적분(convolution)을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT)을 이용하여 처리속도를 향상시키는데 주력하고 있다. 주파수 영역에서의 영상처리는 영상의 열화가 선형공간불변(linear space-invariant; LSI)의 특성을 가지고 있다는 가정 하에 적용이 가능하다. 이 때 고주파 대역 신호의 손실에서 흐림현상은 해당 고주파 대역을 복원함으로써 제거할 수 있고, 그 결과 선명한 영상을 얻을 수 있다. 하지만 이와 같은 고주파 대역의 복원이 전체 영상에 동시에 적용되기 때문에 강한 에지 주변에서는 물결현상(ringing artifact)과 같은 부작용을 초래한다<sup>[3]</sup>. 따라서 본 논문은 주파수 영역에서 영상복원을 수행하면서 발생할 수 있는 부작용인 물결현상에 대한 분석과 효과적인 제거 방법을 제안한다.

영상 입력 장치의 점확산함수(point spread function; PSF)와 부가적 잡음에 화질이 저하된 관측영상  $g(m,n)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$g(m,n) = h(m,n) * f(m,n) + \eta(m,n) \quad (1)$$

여기에서  $h(m,n)$ 은 유한한 크기를 갖는 점확산함수를 나타내고  $f(m,n)$ 은 크기가  $M \times N$ 인 입력영상을 나타낸다. 마지막 항인  $\eta(m,n)$ 는 평균이 0이고 정규분포를 가진 부가 잡음을 나타낸다.  $h(m,n)$ 은 역함수를 갖는다는 보장이 없고, 역함수가 존재하더라도 유일하지 않거나 수치적으로 불안정하다<sup>[3]</sup>. 또한 주파수 영역처리를 하기 위해 가정하는 선형 공간 불변 열화가 실제상황과 일치하지 않는 문제가 발생한다<sup>[3]</sup>. 다시 말해서 FFT를 이용함으로써 영상복원 과정의 연산량을 획기적으로 감소시킬 수 있으나, 열화 영상이 주기적이라는 가정 하에 순환 중첩적분에 기반한 처리에 의해서 강한 에지 주변에서 물결형태가 발생하는 부작용을 초래하며, 이 현상은 점확산함수가 부정확할 때 더욱 심화되는 경향을 보인다<sup>[4]</sup>. 물결현상은 에지에 관한 주기적 오버슈트(overshoots) 또는 언더슈트(undershoots)로 정의한다. 이는 열화함수의 크기에 따라 주기적으로 발생하며, 에지로부터 멀어지면서 점점 감쇄한다<sup>[5]</sup>.

기존 방법으로는 반복적인 방법으로 복원 전 열화영상의 지역적 특성을 고려하여 고주파수 영역과 저주파수 영역으로 나누어 복원 시에 적응적 매개변수의 값을 매 반복 시 마다 획득하여 계산하는 방법이 있다<sup>[6-7]</sup>. 이는 에지에 대한 적응적 처리가 가능하나, 계산량이 많고 반복 해에 제약을 가지는 단점이 있다. 따라서 본 논문은 물결현상을 복원 영상에서 물결현상을 제거하는 후처리 방법을 제안한다.

영상의 에지는 사물의 윤곽, 위치, 크기 등을 표현하는 한 가지 수단이 되기 때문에 영상처리에 있어서 에지의 보존은 중요한 의미를 가진다<sup>[4]</sup>. 그러므로 복원영상의 에지를 보존하면서 물결현상을 제거하는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 웨이블릿 변환을 이용하여 에지 영역과 물결현상 영역을 분리하고, 이를 쌍방향(bilateral) 함수를 사용하여 질감(texture)을 살리면서도 잡음과 물결현상을 억제하는 방법을 제안한다.

제안하는 알고리즘은 이산 웨이블릿 변환으로 3단계까지 변환한 후에 에너지로 각 밴드의 정보량을 측정하고 그에 따른 임계치를 설정하여 에지영역과 물결현상 영역을 검출한다. 검출된 결과 값으로 영역을 나눈 후 영역별로 필터크기가 다른 쌍방향 필터를 적용해 물결현상을 제거한다. 그림 1은 제안하는 방법의 전체 흐름도를 나타낸다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 웨이블릿 변환의 이론을 설명하고 III장에서는 에지영역 검출을 위한 임계치 설정 및 영역분리 방법을 설명하고 IV장에서는 후처리 방법으로 쌍방향 필터를 이용한 영역별 적응적 처리를 제안한다. V장에서는 제안된 알고리즘에 대한 실험결과를 제시하고, 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 하나의 영상을 그 영상의 정보를 담고 있는 여러 개의 부대역 영상으로 분리할 수 있다. 웨이블릿 분화과정을 근사값(approximation)과 세부값(details)을 만드는 과정이라고 말할 수 있다. 근사값은

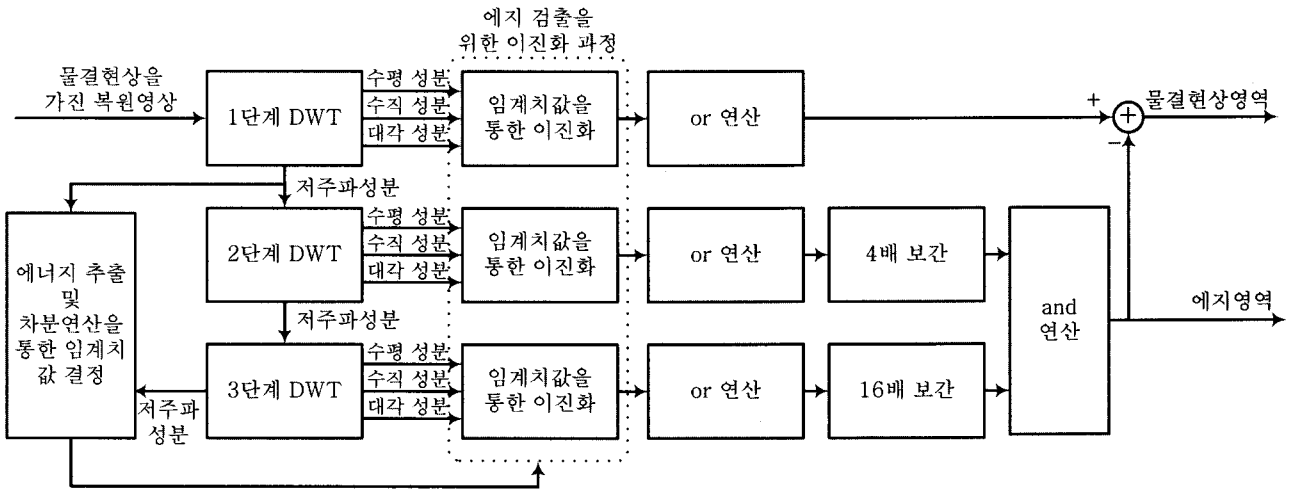


그림 3. 에지 영역 검출을 위한 임계치 설정 및 영역분리 흐름도

Fig. 3. Flowchart about defining thresholding value and region classification for edge detection.

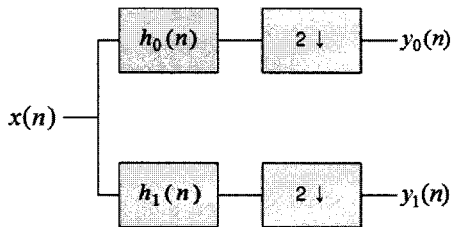


그림 2. 1차원 신호에 대한 필터뱅크를 이용한 웨이블릿 분해과정

Fig. 2. A wavelet decomposition.

신호의 저주파 성분을 말하고, 세부값은 고주파 성분을 말한다<sup>[8]</sup>. 필터뱅크를 이용한 1차원 신호에 대한 웨이블릿 분해 과정은 그림 2에 나타내었다.

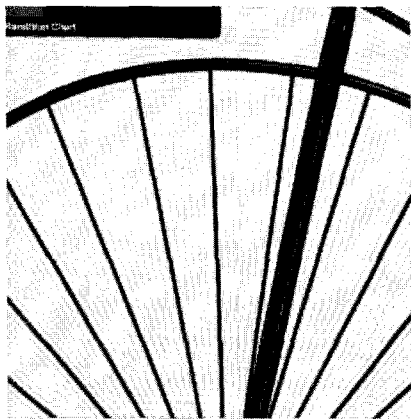
여기서  $x(n)$ 은 이산 신호를 의미하고,  $h_0(n)$ 과  $h_1(n)$ 은 각각 저대역 통과 필터와 고대역 통과필터를 의미한다. 이 신호열의 처음  $y_0(n)$ 은 근사정보(coarse information)를 포함하고, 두 번째  $y_1(n)$ 은 상세정보(detail information)를 포함하고 있다. 또한 웨이블릿 변환은 다단계 분해가 가능하여 저주파 성분인 LL 부대역을 다시 한 번 같은 방법으로 웨이블릿 분해하고, 계속해서 LL부대역을 필요한 수준으로 분해할 수 있다. 따라서 다해상도 웨이블릿 변환은 하나 이상의 해상도에서 영상의 표현과 분석에 관계가 있으며, 하나의 해상도에서 발견되지 않는 특징들이 다른 해상도에서는 쉽게 발견될 수 있다. 웨이블릿 변환에서 1차원 입력신호를  $x$ 라 하면, 임펄스 응답(impulse response)  $l$ 을 갖는 저대역 통과 필터(low pass filter)를 통과한 출력신호를 다음과 같이 중첩합으로 표현할 수 있다.

$$y[n] = (x * l)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]l[n-k] \quad (2)$$

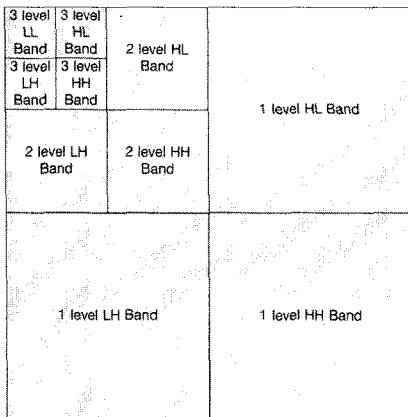
여기서  $n$ 은 이산 신호 샘플의 위치를 의미한다. 입력 신호  $x$ 에서 저대역 통과 필터를 통과한  $y$ 성분을 제거한 신호는 고대역 통과 필터(high pass filter)를 통과한 신호로 생각할 수 있다. 따라서 입력신호  $x$ 는 고대역 통과 필터와 저대역 통과 필터로 이루어진 직각 위상 대칭 필터(quadrature mirror filter)를 통과한 세밀한 부분과, 이를 제외한 나머지 대역의 신호로 분리 된다. 이렇게 필터링된 신호는 대역이 제한되어 있기 때문에 정보의 손실이 없으며, 역 웨이블릿 변환으로 각 부대역을 합성하여 오차 없이 원본 영상을 복원할 수 있다<sup>[8]</sup>. 따라서 에지검출에 웨이블릿 변환을 이용하면 기존의 주파수 도메인 분석을 통한 물결현상 제거 후처리 알고리즘<sup>[9~10]</sup>에 비해 에지의 위치정보 파악이 용이하고 영상의 대역별 분석이 가능하다는 장점이 있다. 다음 세부 절에서는 제안하고자 하는 웨이블릿 변환을 이용한 에지 검출 방법에 대하여 설명한다.

### III. 에지 영역 검출을 위한 임계치 설정 및 영역 분리

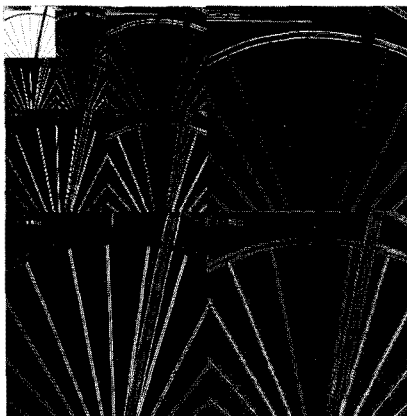
그림 3은 에지영역을 검출하기 위한 임계치 설정 및 영역 분리의 흐름도를 나타낸다. 첫 번째로, 3단계 이상 웨이블릿 변환을 수행하고 이를 통해 얻어진 1단계 저주파 부대역과 3단계 저주파 부대역의 에너지 차로 임계치값을 설정해 각 밴드별 임계치값을 적용하여 이진화 데이터를 얻는다. 그 결과 값을 제안된 연산을 통해



(a)



(b)

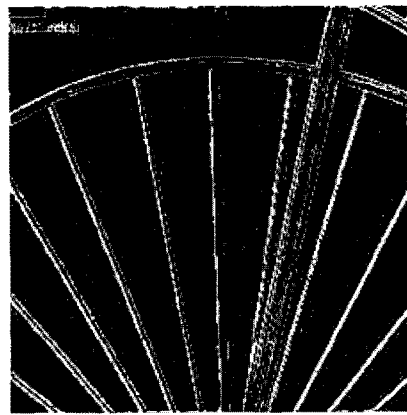


(c)

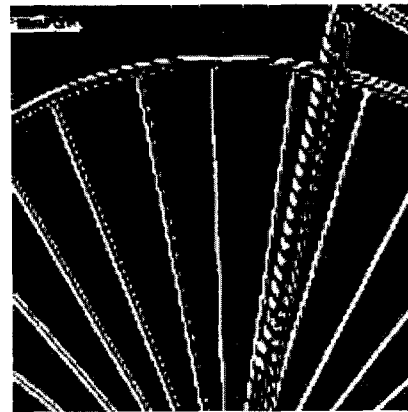
그림 4. 웨이블릿 변환 결과 (a) 물결현상을 가진 입력 영상, (b) 각 주파수 대역의 정의, (c) 웨이블릿 3 단계 변환 결과

Fig. 4. The result of wavelet transform (a) Restored image with ringing, (b) the resulting decomposition, (c) the three level wavelet transform image.

영상을 에지영역과 물결현상영역, 평탄영역으로 분리한다. 제안된 알고리즘에서 사용하는 3단계 이산 웨이블릿 변환을 그림 4와 같다. 그림 4의 (a)는 입력영상인



(a)



(b)

그림 5. 1, 2단계 웨이블릿 변환의 비교 (a) 1단계 웨이블릿 변환 대각 부대역의 이진화 결과, (b) 2단계 웨이블릿 변환 대각 부대역의 이진화 결과

Fig. 5. The comparison of 1-level DWT and 2-level DWT (a) the binary image of 1-level DWT Diagonal band, (b) the binary image of 2-level DWT Diagonal band.

물결현상을 가진 복원영상이며, (b)는 각 주파수 대역의 정의 (c)는 영상의 변환 결과를 보여준다.

그림 5에서 보는 바와 같이 근사정보를 사용하는, 2단계의 웨이블릿 변환과 비교해 볼 때, 1단계 웨이블릿 변환으로 얻어진 대각 부대역 성분에는 고주파로 분류된 잡음 신호와 물결현상이 다른 부대역에 비해 많이 포함되어 있기 때문에 실제 에지와 구분 어렵다. 또한 2단계 웨이블릿 변환만으로는 에지 가까이의 강한 물결현상과 에지의 구분이 힘들고 임계치 결정에 사용하는 1단계 저주파 에너지와의 상위 단계 저주파 에너지 비교한 차이가 적어 연산이 무의미해 질 수 있으므로 본 논문에서는 3단계 하아(Haar) 웨이블릿 변환을 사용하여 그 효과를 명확히 하고자 하였다. 그러므로 1단계 웨이블릿 변환으로 얻어진 고주파 대역은 에지 주

변의 강한 에지를 찾는 데 이용하고, 2, 3단계의 웨이블릿 변환으로 얻어진 고주파 대역을 이용하여 영상의 에지영역을 찾는다.

에지영역  $e_i$ 을 찾기 위해 다음 식 (4)와 같은 이진화 과정을 거친다.

$$e_i[m, n] = \begin{cases} 1, & \text{if } |y_i[m, n]| > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

for  $i \in \{HL, LH, HH\}$

여기서  $y_{HL}, y_{LH}, y_{HH}$ 는 차례로 웨이블릿 변환 된 수평, 수직, 대각 주파수 대역신호를 뜻하며 그 절대값이 임계치(threshold)  $T$ 보다 클 때 이를 에지로 간주한다. 임계치 값은 공간별 데이터에 대하여 차등적으로 적용되며 이는 웨이블릿 변환 후 부대역의 정보량으로 결정된다. 기준이 되는 임계치는 웨이블릿 필터의 에너지 정보량을 고려해 가중치를 준다.

다음으로 본 논문에서 임계치를 결정하는 요소인 웨이블릿 필터의 에너지 정보량에 대해서 설명한다.

웨이블릿 변환에 의해 분리된 부대역 영상은 각각 다른 정보량을 가지게 되는데 실험영상이 섬세한 부분을 얼마나 가지느냐에 따라 그 값이 변한다. 따라서 각각 부대역의 정보량을 조사하기 위해 그림 6와 같이 여섯 개의 물결현상을 가진 복원된 실험영상을 이용한다. 보는 바와 같이 이 중 아래쪽인 (d), (e), (f)는 (a), (b), (c)에 비해 더 많은 섬세 정보를 포함한 영상이다.

각 부대역의 에너지를 구하기 위해 다음 식 (4)와 같이 각 부대역계수의 제곱합을 계산한다.  $E_i$ 는 부대

역의 에너지를 의미한다.

$$E_i = \sum_i y_i^2, \quad \text{for } i \in \{LL, LH, HL, HH\} \quad (4)$$

각 단계의 전체 에너지 가운데 각 단계별 부대역이 차지하는 정보량계산을 위해 식(5)과 같이 처리한다.  $A_i$ 는 각 부대역의 에너지양을 나타낸다.

$$A_i = \frac{E_i}{\sum_i E_i} \times 100, \quad (5)$$

for  $i \in \{LL, HL, LH, HH\}$

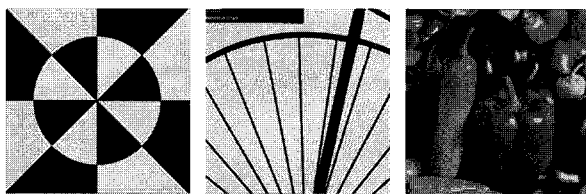
웨이블릿 변환 후 저주파 대역의 정보량이 제일 높으므로 저주파 대역을 비교하기로 한다. 식 (5)에서 얻어진 각 단계별 부대역 에너지 중 비교 대상인 1단계 저주파 대역, 에너지와 3단계 저주파 대역의 에너지와 두 에너지의 차를 표 1에 나타내었다. 표1에서 보는 바와 같이 1단계 저주파 대역의 에너지는 고주파인 물결현상과 잡음의 영향으로 그림 6의 (e), (f)와 섬세 부분을 많이 포함한 영상이나 그림 6 (a) 영상과 같이 예지만 가진 영상이나 큰 차이가 없지만, 섬세한 부분이 많이 포함될수록 1단계 저주파 대역의 정보량과 3단계 저주파 대역의 정보량의 차의 값이 감소한다. 이는 단계가 올라갈수록 각 단계의 저주파가 갖는 정보량이 감소하게 되는데 그림 6의 (e), (f)와 같이 섬세한 부분이 많은 영상일수록 3단계 저주파 단계로 가더라도 그 정보량을 잃는 양이 적기 때문이다.

임계치의 값을 차의 값에 비례하게 조절한다. 우선 경험적 실험치의 기준을 Bike영상으로 정하였는데 이는 에지와 물결현상의 구분이 가장 쉬운 영상이기 때문이다. 이렇게 Bike영상을 기준으로 보아 그 이상일 때 상

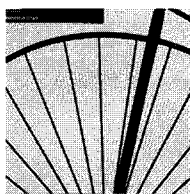
표 1. 1단계 저주파 부대역과 3단계 저주파 부대역의 정보량과 차

Table 1. The amount of information for 1 Level low band, 3 Level low band and difference.

영상	1단계 저주파 대역	3단계 저주파 대역	차
Test	99.1519	96.2415	2.9104
Bike	98.8996	96.2872	2.6124
Pepper	99.4886	97.2413	2.2473
Lena	99.5675	97.8775	1.6900
Baboon	99.4548	98.6058	0.8490
Citrus	99.7781	98.9660	0.8121



(a) Test



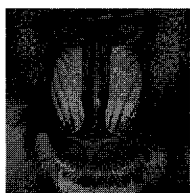
(b) Bike



(c) Pepper



(d) Lena



(e) Baboon



(f) Citrus

그림 6. 부대역 정보량 조사를 위한 테스트 영상

Fig. 6. Test sample images to investigate the amount of information for sub-band.

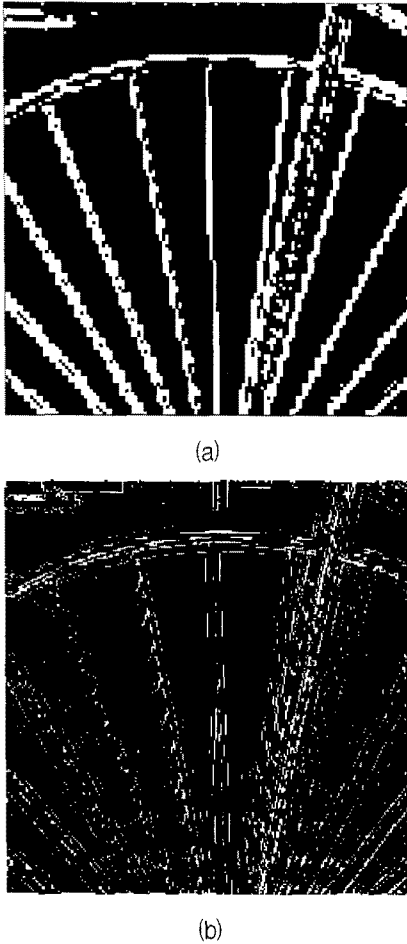


그림 7. 제안하는 알고리즘을 적용해 찾아낸 에지와 물결현상 결과 (a) 에지영역, (b) 에지 주변부의 강한 물결현상영역.  
 Fig. 7. The result images using proposed algorithm of edge and ringing (a) edges, (b) ringing area of near to edges.

세 부분이 더 많이 포함되어 있으므로 복원 된 영상에서 상세부분의 선명도 손실을 최소화 할 수 있기 때문에 임계치를 낮춰 상세부분이 에지에 포함될 수 있도록 하였다.

이렇게 식(3)에서 얻어진 대역별 이진화 데이터는 각 단계에서 식 (6)와 같이 합집합 연산을 통해 대표적인 2, 3단계의 두 개의 이진화 에지맵으로 통합된다.

$$e_L(m, n) = e_{LH}(m, n) \cup e_{HL}(m, n) \cup e_{HH}(m, n) \quad (6)$$

$L$ 은 각 단계를 뜻하며  $e_{LH}, e_{HL}, e_{HH}$ 는 식 (3)에서 구한 각 수평, 수직, 대각성분의 에지 데이터를 뜻한다. 각 단계를 대표하는 2단계 3단계의 에지맵 데이터는 이미 저대역 통과 필터를 2회 거친 신호의 고주파 상세 성분이기 때문에, 1단계의 고주파 신호들에 비하여 많

은 상세 부분이 제거되어 있을 확률이 높다. 따라서 2, 3단계로 얻어진 에지맵을 이용해 통합에지를 만드는데 그 크기가 서로 다르므로 최근접 이웃 보간법(nearest neighborhood interpolation)을 사용해 서로 같은 크기로 보간한다. 보간된 2단계 에지맵과 3 단계 에지맵의 통합에는 다음과 같이 교집합연산을 사용한다.

$$e(m, n) = e_{2L}(m, n) \cap e_{3L}(m, n) \quad (7)$$

에지 주변부의 강한 물결현상 영역을 구하기 위해 식 (6)을 이용해 1단계 에지맵 데이터에서 통합에지로 판정된 식 (7)의 결과를 제외한 나머지로 결정한다. 이로써 에지영역, 물결현상영역을 구하고 어디에도 속하지 않는 영역을 평탄영역으로 구분한다.

이렇게 해서 얻어진 그림 7의 결과를 보면 (a)는 식 (7)을 수행한 에지영역의 결과이고, (b)는 1단계 웨이블릿에서 결과로부터 나온 에지와 에지 주변부의 강한 물결현상 부분에서 (a)의 에지 영역을 제외시킨 결과이다.

#### IV. 쌍방향 필터를 이용한 영역별 적응적 처리

본 절에서는 물결현상이 포함된 복원영상에서 영상의 에지는 보존하면서 물결현상 만을 제거하기 위해서 분할된 영역에 대하여 적응적으로 쌍방향 필터를 적용한다.

쌍방향 필터는 비선형 필터로 입력영상의 가중평균치로 출력영상을 결정한다. 이는 공간 커널의 밝기값과 근방의 화소값이 차이가 클수록 작은 가중치를 부여하여 에지를 보존하면서 평탄화를 수행하는 필터이다<sup>[11]</sup>. 식 (8)은 화소  $s$ 에 대한 쌍방향 필터의 출력에 관한 식이다.  $p$ 는 가우시안 필터 영역크기의 기준 화소  $s$  근방의 화소들을 뜻하며,  $I_s$ 는 화소  $s$ 의 밝기값을 의미한다.

$$J_s = \frac{1}{k(s)} \sum_{p \in \Omega} f(p-s)g(I_p - I_s)I_p \quad (8)$$

여기에서  $k(s)$ 를 정규화하면 다음과 같이 정의된다.

$$k(s) = \sum_{p \in \Omega} f(p-s)g(I_p - I_s) \quad (9)$$

여기에서  $f$ 는 공간 영역(spatial domain)의 가우시안을 뜻하며,  $g$ 는 앞서 설명한 전처리 과정을 거친 입력 영상에서의 화소값 차이에 대한 가중치를 갖는 가우시안 뜻한다. 그러므로 화소  $s$ 의 가중치는 근방의 화소가 유사한 밝기값을 가지면 영향을 받게 된다. 즉, 단순히



그림 8. (a) 원영상, (b) 열화영상(11X11, 잡음 50dB), (c) 반복적인 방법 (d) 적응적 정칙화 변수를 사용한 반복적인 방법 (e) 물결현상이 있는 복원영상, (f) 쌍방향필터 처리영상: 시그마 2, (g) 쌍방향필터 처리영상: 시그마20, (h) 제안된 영역분리 방법에 적응적 가우시안필터 처리영상, (i) 제안된 물결현상 제거 처리영상

Fig. 8. (a) original image, (b) Blurred image with 11X11 uniform blur and 50dB gaussian noise, (d) Restored image by iterative method, (d) Restored image by adaptive iterative method, (e) Restored image by CLS filter with ringing artifact, (f) Bilateral filtering image with sigma 2, (g) Bilateral filtering image with sigma 20, (h) The result using proposed region classification and adaptive gaussian filtering (i) The result using roposed algorithm.

계 가우시안 필터로 평탄화 시켜서 잡음을 없앤 결과에 비해 쌍방향 필터링된 결과에서 평탄한 영역 및 에지 근처의 잡음은 잘 제거된 동시에 영상의 에지는 잘 보존되게 된다. 또한, 쌍방향 필터를 사용함으로써 잘못된

영역 구분의 오차를 줄일 수 있으며 선명도를 살리면서도 서로 다른 영역과의 재구성이 자연스럽게 되는데 이를 실험결과에서 확인 할 수 있다. 본 논문에서는 에지 영역, 물결현상영역, 평탄영역으로 나누게 되는데 이때

에지영역은 입력영상의 값을 그대로 취하게 되고, 물결 현상영역에서는 시그마 값을 낮추고 평탄영역에서는 시그마 값을 높게 적용하여 물결현상으로 판정된 영역과 평탄영역으로 판정된 영역과의 오차를 줄이도록 하였다. 다음 장에서는 제안된 방식을 사용한 실험 결과를 도시한다.

### V. 실험 결과

본 절에서는 제안한 물결현상제거 알고리즘의 실험 결과를 제시한다. 이번 실험에서는 물결현상 제거에 대한 정확한 효과를 확인하기 위해 전처리 과정으로 50dB의 약한 잡음을 부가하였다. 전처리 과정을 마친 영상 점확산함수에 대한 정보는 알고 있다는 가정 하에 다음 식 (10)와 같이 잘 알려진 제약적 최소제곱 필터로 복원한다. 제약적 최소제곱 필터는 원영상의 스펙트럼 정보를 사용하지 않고, 잡음의 통계적 특성과 영상이 단지 대역 제한되어있다는 조건만 가지고 복원을 수행할 수 있기 때문에 널리 실용화 되고 있는 복원 기술 중의 하나이다.

$$G_{cls}(k,l) = \frac{H^*(k,l)}{\|H(k,l)\|^2 + \lambda \|C(k,l)\|^2} \quad (10)$$

$H(k,l)$ ,  $C(k,l)$ 과  $H^*(k,l)$ 는 각각 PSF  $h(i,j)$ 와 고주파통과필터  $c(i,j)$ 의 DFT,  $H(k,l)$ 의 켈레 복소수를 나타낸다.  $\lambda$ 는 결과영상의 부드럽고 날카로움을 조절하는 정칙화 매개변수이다<sup>[4]</sup>. 이 실험에서 필터의 정칙화 매개 변수  $\lambda$ 는 0.04를 사용하여 에지주변부의 날카로운 물결현상이 잘 나오도록 처리하였다.

그림 8은 제안된 알고리즘을 적용한 결과이다. (a)영상은 원본영상이고, (b)는 11X11크기의 정규 열화 PSF를 이용하여 열화시킨 후, 가우시안 노이즈 50dB를 더한 열화영상이다. 본 논문에서 PSF에 대한 정보는 알고 있다고 가정한다. 그림 8(c)는 열화영상을 반복적인 방법<sup>[7]</sup>으로 복원한 결과이며, (d)는 적응적 정칙화 매개 변수를 이용해 반복적인 방법으로 복원한 결과이다. 그림에서 반복적인 방법은 계산량이 많으면서도 에지 주위의 물결현상이 완전히 제거되지 않음을 확인할 수 있다. 그림 8(e)는 열화영상을 CLS필터로 복원한 결과영상이다. CLS필터의 정칙화 매개변수는 앞에서 언급한 실험치인 0.04를 사용하였다. 그림 8(f)는 공간영역의 시그마 크기 2와 선택되는 화소수 6의 쌍방향필터로 처리한 영상이다. 섬세부분이 열화되고 물결현상이 여전히

표 2. 그림 8의 PSNR 비교  
Table 2. The PSNR comparison in figure 8.

비교영상	PSNR(dB)
(b) 열화영상	24.41
(c) 반복적인 방법	27.89
(d) 반복적인 방법2	27.91
(f) 쌍방향 필터처리1	28.22
(g) 쌍방향 필터처리2	27.85
(h) 에지적응적 가우시안 필터처리	29.48
(i) 제안하는 방법	30.04

표 3. 그림 9의 PSNR 비교  
Table 3. The PSNR comparison in figure 9.

비교영상	PSNR(dB)
(b) 열화영상	16.30
(c) CLS필터 처리	23.12
(d) 제안하는 알고리즘	24.13

히 남아있는 것을 확인 할 수 있다. (g)는 공간영역의 시그마 크기 20과 선택되는 화소수 10의 쌍방향필터로 처리한 영상이다. 물결 현상은 모두 제거되었으나 그와 함께 섬세부분이 열화되어 모자와 이마 사이의 경계까지 모호해진 상태이다.

그림 8(h)는 제안한 영역분리를 사용하되 물결제거 필터를 쌍방향 필터가 아닌 가우시안필터를 사용해 얻은 결과이다. 이때 사용한 적응적 가우시안 필터는 평탄영역에 7X7의 가우시안 필터를 사용하였고, 물결현상 영역에 5X5의 가우시안 필터를 사용하였다. 이때, 앞의 (f), (g)의 결과에 비해 섬세부분이 열화되지 않았지만, 에지부분이 잘못된 부분에서 오차가 발생하여 자연스럽게 못한 처리가 이루어 졌다. 영상의 모자 끝 부분의 에지부분에서 이를 확인할 수 있다. 또한 모자 뒷부분 배경에 여전히 물결현상이 희미하게나마 남아있는 것을 확인할 수 있다.

그림 8 (i)는 제안된 방법을 사용하여 후처리한 결과 영상이다. 눈 부분과 모자 깃털 부분의 섬세부분이 열화되지 않으면서도 모자 뒤 강함 물결현상 부분이 효과적으로 제거된 것을 확인할 수 있다. 또한 머릿결 부분에서는 일정 패턴이 반복되기 때문에 물결현상 부분으로 간주되어 질감이 약간 흐려졌으나 그림 8의 (f), (g)에 비해 좋은 성능을 보인다.

결과적으로 제안된 방법은 실제 물결현상을 가진 복원 영상 (e)와 시그마 크기가 다른 쌍방향필터처리영상인 (f), (g)를 영역별로 적용해 얻어낸 영상이다. 표 2는 각 영상에 대한 신호대 잡음비(Peak signal to noise



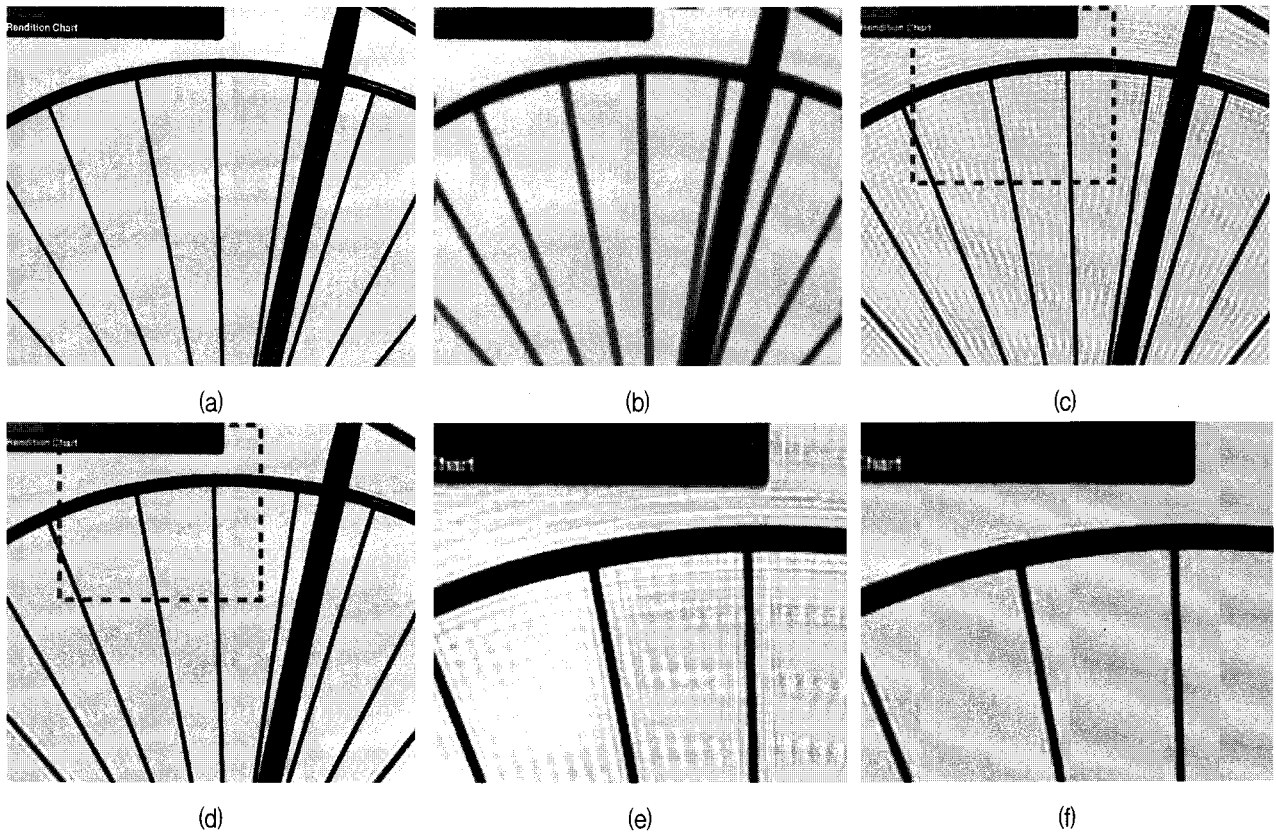


그림 9. (a) 원영상, (b) 열화영상(11X11, 잡음 50dB), (c) a물결현상을 가진 영상복원 결과, (d) 제안하는 알고리즘으로 물결현상 제거 처리한 결과, (e) (c) 영상의 실제크기, (f) (d)영상의 실제크기  
 Fig. 9. (a) original image, (b) Blurred image with 11X11 uniform blur and 50dB gaussian noise, (c) The restored image with ringing artifact, (d) The result image using proposed algorithm. (e) Crop by 258X222 image from (c), (f) Crop by 258X222 image from (d).

ratio: PSNR)<sup>[4]</sup>를 이용하여 실험 결과를 객관적으로 비교할 수 있도록 하였다.

다음으로 그림 9는 앞서 언급한 물결현상과 에지의 구분이 용이한 Bike영상에 제안한 알고리즘을 적용한 결과이다. 그림 9의 (a)는 원본영상이고, (b)는 11X11 크기의 정규열화PSF를 이용하여 열화시킨 영상이다. (c)는 후처리 전 물결현상을 가진 영상복원 영상이다. 평탄영역에서 심한 물결현상이 나타남을 확인할 수 있다. (d)는 제안하는 알고리즘을 사용하여 물결현상을 제거시킨 결과이다. (e)와 (f)는 상세영역이 얼마나 사라지지 않으면서 물결현상을 효과적으로 제거했는지 확인하기 위해 (c)와 (d)에 표시된 점선사각형으로 잘라 실제크기로 확대한 영상이다. 표 3은 PSNR을 이용하여 객관적으로 비교하였다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 고속으로 영상을 복원하기 위하여 FFT를 사용하여 주파수 영역에서 처리하면서 발생되

는 부작용들 중에서 물결현상에 대해 분석하고 이를 효과적으로 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 영상복원과 정에서 발생하는 중요한 두 가지 문제를 보면, 하나는 영상복원과정에서 많은 계산량을 필요로 한다는 문제와 다른 하나는 공간불변의 영상복원방법을 사용함으로써 부작용들이 발생한다는 문제이다. 본 논문에서 제안한 방법은 후처리를 통하여 에지정보의 손실을 최소화하고 효과적으로 물결현상을 제거하였다. 그 결과 PSNR수치로 다른 방법에 비해 좋은 성능을 보였고, 웨이블릿 변환을 이용하여 에지맵을 얻는 방식으로 압축영상에서의 부작용 제거에도 효율적으로 이용될 수 있으며, 추가로 향상될 수 있는 가능성을 제시하였다. 향후에 확률적 모델을 물결현상으로 열화된 영역의 추정에 적용한다면 보다 좋은 결과를 가져올 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. Paik, "New application areas of image restoration: a perspective," Proc. Asia-Pacific

Conf. Comm., vol. 2, pp.775-778, August 1993.

[2] M. Banham and A. Katsaggelos, "Digital image restoration," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 24-41, March 1997.

[3] A. Tikhonov and V. Arsenin, Solution of ill-posed Problems, Winston, 1977.

[4] R. Gonzalez and R. Woods, Digital image processing, 2nd ed., PrenticeHall, 2001.

[5] M. Tekalp, H. Kaufman, and W. Woods, "Edge adaptive Kalman filtering for image restoration with ringing suppression," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 37, no. 6, pp. 892-899, June 1989.

[6] L. Kah, Y. Weimiao, and L. Shay, "Ringing reduction of image restoration," International Conference on Signal Processing, pp. 1757-1761, 2002.

[7] L. Lagendijk, J. Biemond, and E. Boeke, "Regularized iterative image restoration with ringing reduction," IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 36, no. 12, pp. 1874-1883, December 1988.

[8] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, New York: Academic Press, 1998.

[9] I. Popovici and W. Douglas, "Locating edges and removing ringing artifacts in JPEG images by frequency-domain analysis," IEEE Trans. Image Processing, vol. 16, no. 5, pp. 1470-1474, May 2007.

[10] J. Hu, N. Sinaceur, F. Li, K. Tam, and Z. Fan, "Removal of blocking and ringing artifacts in transform coded images," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 4, no. 21-24, pp. 1085-2568, April 1997.

[11] S. Paris and F. Durand, "A fast Approximation of the bilateral filter using a signal processing approach," European Conference on Computer Vision, vol. 3954, pp. 268-580, July 2006.

저 자 소 개



**윤진영**(학생회원)  
 2007년 상명대학교 미디어학과  
 학사 졸업.  
 2008년 현재 중앙대학교 첨단영상  
 대학원 석사과정 재학중.  
 <주관심분야 : 영상복원, 고해상  
 도영상, 영상압축>



**유윤종**(학생회원)  
 2005년 중앙대학교 전자전기  
 공학부 학사 졸업.  
 2007년 중앙대학교 전자전기  
 공학부 석사 졸업.  
 2008년 현재 중앙대학교 첨단영상  
 대학원 박사과정 재학중.  
 <주관심분야 : 영상복원, 영상압축>



**전신영**(학생회원)  
 2008년 중앙대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2008년 현재 중앙대학교 첨단영상  
 대학원 석사과정 재학중.  
 <주관심분야 : 영상복원, 영상안정  
 화>



**신정호**(정회원)  
 1994년 중앙대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1998년 중앙대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 2001년 중앙대학교 첨단영상  
 대학원 영상공학과  
 박사 졸업  
 2008년 현재 한경대학교 웹정보공학과 교수.  
 <주관심분야 : 영상처리, 영상복원, 고해상도영상,  
 영상융합, 컴퓨터 시각>



**백준기**(평생회원)  
 1984년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.  
 1987년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사 졸업.  
 1990년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.  
 2008년 현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 교수.  
 <주관심분야: 영상복원, 신호처리, 반도체>