

적응 정칙화 연산자를 이용한 영상복원

김 태 선, 박 차 훈
경운대학교 컴퓨터전자정보 공학부

Image Restoration using Adaptive Regularization Operator

Tae-Sun Kim, Cha-Hun Park
Department of Electronic Engineering, Kyungwoon University

요 약

영상을 처리하는 과정에서 광학시스템과 전기시스템의 특성으로 인해 흐려지고 잡음으로 훼손된 영상을 복원하는 경우에 일반적으로 정칙화 반복복원방법이 사용된다. 기존의 방법은 영상의 국부적인 특성을 고려하지 않고 영상전체에 일률적으로 정칙화 연산자를 사용함으로써 윤곽부분에서는 리플잡음을 초래하고 평면부분에서도 잡음증폭을 피할 수 없으며, 또한 시각적으로 효율적이지 못한 면이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 영상의 국부적인 특성을 고려하여 적응 정칙화 파라메타와 적응 정칙화 연산자를 사용하여 평면영역과 윤곽영역의 방향특성에 따라 적응적으로 처리하는 반복복원방법을 제안한다. 제안한 방법은 기존의 방법과 비교하여 평면영역에서의 잡음 평활화가 개선되고 시각적으로 중요한 윤곽부분 복원에 효율적임을 실험결과를 통해 알 수 있었으며 ISNR 면에서도 우수하였다.

1. 서 론

영상은 영상처리 시스템에 의해 형성되고 기록되는 과정에서 여러 가지 훼손요인에 의해 흐려진다. 또한 흐려진 영상에 잡음이 가산된다면 더욱 심하게 훼손된다.

이러한 과정을 통해 훼손된 영상은 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$g = Hf + n \quad (1)$$

여기서, g , f , n 은 각각 훼손영상, 원 영상, 가산 잡음을 나타내는 벡터이다. H 는 점 확산함수(point spread function)을 나타내는 행렬이다.

영상복원의 궁극적인 목적은 (1)의 모델에서 영상의 훼손요인을 찾아낸 후 그 요인을 제거하여 영상의 품질을 개선하여 원 영상에 가까운 영상을 얻는 과정이다. 영상의 훼손종류에 따라 여러 가지 복원방법들이 많이 제안되어 있다. 특히 반복처리방법은 시간이 많이 걸리고 처리가 어려운 주파수 영역에서 처리하는 것이 아니라 단순히 공간영역에서 처리하는 방법으로서 영상을

흐려지게 하는 점 확산함수(point spread function)의 역 행렬을 구할 필요가 없을 뿐 아니라, 약 조건에서도 해를 구할수 있다는 장점을 가지기 때문에 많이 사용되는 방법[2]이다.

그러나 반복복원방법은 잡음에 의해 훼손되고 흐려진 영상의 복원하는 경우에는 이동 흐림 현상이나 비 조점 흐림 현상과 같이 위상변화가 심할 때 원하는 해를 얻을 수 없다. 특히 잡음이 가산된다면 반복횟수가 증가함에 따라 잡음의 증폭이 발생한다. 또한 잡음을 평활화하는 경우에는 윤곽도 같이 평활화되며 윤곽을 복원하는 경우에는 잡음도 동시에 강조되는 문제점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 정칙화 방법이 도입되었고 최근까지도 연구가 진행되고 있다.

Biemond, Lagendijk[3] 그리고 Katsaggelos[4] 등은 기존의 반복처리방법에 정칙화 이론을 적용함으로써 리플현상(ripple effect)등과 같은 복원오차를 감소시키고 라플라시안 정칙화 연산자를 반복복원방법에 적용한 방법을 제안하였고, Steven[5]등은 영상의 국부특성을 고려한 적응 정칙화 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 방법들은 정칙화 연산자로 라플라시안 연산자를 사용하여, 영상의 국부적인 특성을 고려하지 않고

영상전체에 일괄적으로 정칙화를 행함으로써 윤곽부분에 리플잡음이 발생하고 평면부분에서도 잡음증폭을 피할 수 없으며, 또한 시간적으로 중요한 윤곽부분의 복원에 효율적이지 못한 문제점이 있었다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 영상을 평면영역과 4방향을 갖는 윤곽영역으로 나누어 윤곽방향을 고려한 방향성 정칙화 연산자를 사용하여 평면영역과 윤곽영역의 방향특성에 따라 적응적으로 처리하는 반복복원방법을 제안한다. 이는 영상으로부터 방향성정보를 추출하여, 평면영역에서는 기존의 라플라시안 정칙화 연산자를 사용하여 잡음의 증폭을 효과적으로 억제하고, 윤곽부분에서는 복원효과를 증대시키기 위하여 윤곽의 방향특성에 맞는 방향성 정칙화 연산자를 사용하여 윤곽부분의 해상도를 향상시키고자 한다.

본 논문의 구성은 2장에서 정칙화 반복복원방법에 대한 일반적인 이론을 제시하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 적응 정칙화 연산자를 이용한 영상복원을 설명하며, 4장에서는 제안한 방법을 적용한 실험 및 그 결과를 분석하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 정칙화 반복복원방법

정칙화 방법은 해의 집합으로부터 적합한 복원해를 구하기 위한 기준을 정의한다. 복원해가 만족하기 위하여는 다음과 같은 식(2)과 식(3)의 기준을 만족해야 한다.

$$\phi(\hat{f}) = \|g - H\hat{f}\| \leq \|n\| = \epsilon \quad (2)$$

여기서, \hat{f} 는 복원된 해이고 ϵ 은 잡음 상수이다.

$$\Omega(\hat{f}) = \|C\hat{f}\| \leq E \quad (3)$$

C 는 정칙화 연산자로서 고주파 통과 필터의 성질을 갖는 선형연산자로, 잡음증폭을 억제하는데 사용된다. 이때 E 는 상수이다. 정칙화 해는 식(2)의 조건을 만족하는 상태에서 식(3)을 최소화함으로써 구할 수 있다.

$$\Omega(\hat{f}) = \|g - H \cdot \hat{f}\|^2 + \alpha \|C \cdot \hat{f}\|^2 \leq 2\epsilon^2 \quad (4)$$

의 정칙화 기준을 만족하는 해를 구한다. 여기서 α 는 정칙화 파라메타로 상수이다.

복원해 \hat{f} 에 대하여 식(4)의 정칙화 기준을 미분함으로써 정칙화 오차를 최소로 하는 복원해 \hat{f} 를 구할 수 있다.

$$\hat{f} = (H^T H + \alpha C^T C)^{-1} H^T g \quad (5)$$

식(5)를 연속치환(successive substitution) 방법을 적용하여 다시 정리하면 다음과 같은 Tikhonov-Miller 반복복원 방법을 얻을 수 있다.

$$\hat{f}_{k+1} = \hat{f}_k + \beta [H^T g - (H^T H + \alpha C^T C)\hat{f}_k] \quad (6)$$

여기서, β 는 이완 파라메타로 사용되는 상수로서 수렴속도를 조절하기 위해 사용하며, $0 \leq \beta \leq 2$ 의 범위 내에서 수렴조건을 만족한다. 또한 α 는 정칙화 파라메타로서 잡음의 평활화와 윤곽영역의 복원을 최적으로 조절하기 위해 사용된다.

3. 적응 정칙화 연산자를 이용한 영상복원

3.1 윤곽 방향정보 추출

윤곽 방향정보를 추출하는 방법에는 여러 가지 방법이 있으나 잡음이 섞인 흐려진 영상에서의 윤곽 방향정보 추출은 잡음성분에 의한 영향을 최대한 줄이기 위하여 본 논문에서는 prewitt 연산자에 의한 템플릿 매칭 방법을 사용하여 윤곽 방향정보를 추출한다. 그림 1과 같이 윤곽의 방향에 대응하는 8종류의 마스크를 이용하여 식(7)과 같이 각 화소에 대해 반복시켜 최대의 값을 나타내는 $d_{i,j}$ 의 마스크의 방향을 윤곽 방향 후보로 정하고 그 화소가 윤곽으로 판정된 경우에 윤곽 방향정보 $\theta(i, j)$ 로 결정한다.

$$d_{i,j} = \text{Max} | \sum_{k=1}^8 \sum_{l=1}^8 p_k(\theta) x_{i-k, j-l} | \quad (7)$$

여기서 $\theta = \{0, 45, 90, 135, \dots\}$ 는 방향을 나타내는 각이고 $p_k(\theta)$ 는 방향미분 연산자이다.

각 화소의 윤곽영역과 평면영역의 판단여부는 화소의 국부 분산값을 구하여 문턱값과 비교하여 결정한다. 여기서 문턱값(T)는 매 반복시 평면영역에서 구한 잡음 분산값으로 설정하였다. 식(7)을 이용하여 윤곽 방향정보 $\theta(i, j)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\theta(i, j) = \begin{cases} d_{i,j}, & \sigma_{f(i,j)}^2 \geq T \text{ (윤곽영역)} \\ 360^\circ, & \sigma_{f(i,j)}^2 < T \text{ (평면영역)} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $\sigma_{f(i,j)}^2$ 는 국부 분산값이고, 360° 는 평면영역을 나타낸다.

1	1	1	-1	-1	-1
1	-2	1	1	-2	1
-1	-1	-1	1	1	1

(a) 0°

1	1	1	-1	-1	1
1	-2	-1	-1	-2	1
1	-1	-1	1	1	1

(b) 45°

1	1	-1	-1	1	1
1	-2	-1	-1	-2	1
1	1	-1	-1	1	1

(c) 90°

1	-1	-1	1	1	1
1	-2	-1	-1	-2	1
1	1	1	-1	-1	1

(d) 135°

그림 1. 방향미분 연산자(prewitt 연산자)

3.2 적응 정칙화 파라메타

정칙화 파라메타는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \left(\frac{\epsilon}{E}\right)^2 = \frac{\|g - H\hat{f}\|^2}{\|C\hat{f}\|^2} \quad (9)$$

위의 (9)식에서 정칙화 파라메타 α 는 신호대 잡음비에 반비례하는 특성을 가진다. 즉 신호의 분산값이 작은 평면영역에서는 정칙화 파라메타는 큰 값을 갖게되

어 잡음의 증폭을 억제하고, 신호의 분산값이 큰 윤곽영역에서는 정칙화 파라메타는 작은 값을 갖게되어 윤곽의 복원을 향상시킨다. 그러므로 여기에서는 평면영역에서의 잡음증폭을 억제하고 윤곽영역에서의 흐려짐을 방지하기 위하여 다음과 같은 적응 정칙화 파라메타[6]를 사용한다.

$$\alpha_k(i, j) = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{f(i,j)}^2}{\sigma_n^2}} \quad (10)$$

위 식에서 $\alpha_k(i, j)$ 는 복원된 영상의 분산값이 잡음의 분산값보다 큰 윤곽영역의 경우, $\alpha_k(i, j)$ 는 0에 근사하게 되며, 복원된 영상의 분산값이 잡음의 분산값보다 작은 평면영역의 경우, $\alpha_k(i, j)$ 는 1에 근사하는 값을 갖게 된다. 또 잡음이 섞인 윤곽영역의 경우 복원영상의 국부 분산비와 잡음의 분산비에 따라 0~1사이의 값을 가지며, 잡음과 복원영상의 국부 분산비가 일치할 경우 0.5의 값을 가지게 된다. 따라서 윤곽영역에서는 흐려짐을 방지하고 평면영역에서는 잡음증폭을 억제한다. σ_n^2 는 매 반복횟수마다 복원된 영상내의 5×5 크기의 평면영역으로부터 추출하고, 복원된 영상의 분산값 $\sigma_{f(i,j)}^2$ 은 화소 (i, j) 를 중심으로 5×5 의 사각창을 적용한 반복 복원된 영상 \hat{f}_k 에서 추출한다.

3.3 방향성 정칙화 연산자

평면영역에서의 잡음증폭을 효과적으로 억제 시켜주고 윤곽영역에서의 해상도 향상과 윤곽과 같은 방향으로 나타나는 리플잡음을 줄일 수 있도록 영상을 평면영역과 4방향을 갖는 윤곽영역으로 나누어 윤곽방향을 고려하여 그림 2에 나타낸 방향성 정칙화 연산자를 제안한다. 이 연산자는 기존의 라플라시안 정칙화연산자에 비해 윤곽방향을 처리할 때 주변화소 중에서 유사성이 높은 윤곽방향만의 화소들만을 처리함으로써 윤곽을 효율적으로 복원하고 윤곽방향으로 나타나는 리플잡음을 억제하는 효과를 가진다. 또한 평면영역에서는 주변화소들 모두 이용함으로써 잡음증폭을 억제한다.

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{(a) } 0^\circ & \text{(b) } 45^\circ \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix} \\ \text{(c) } 90^\circ & \text{(d) } 135^\circ \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & -0.25 & 0 \\ -0.25 & 1 & -0.25 \\ 0 & -0.25 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{(e) } 360^\circ \end{matrix}$$

그림 2. 방향성 정칙화 연산자

4. 실험 결과 및 분석

실험에 사용된 표준영상은 256×256 크기의 "Lena" 영상이며, 사용된 PSF(point spread function)는 동적 흐려짐(motion blur) 점 확산함수로서 움직임 길이는 9 화소로 하였다. 훼손영상은 동적 흐려짐 PSF에 의해 흐려진 영상에 20dB의 BSNR(Blurred SNR)을 갖는 의사 가우시안 백색잡음이 첨가된 영상이다.

화질의 평가적도는 k번째 반복하여 복원된 영상의 객관적인 개선정도를 판단할 수 있는 ISNR(Improved SNR)을 사용하였다. 복원된 결과는 각 반복횟수에 따라 기존의 방법과 비교하였다.

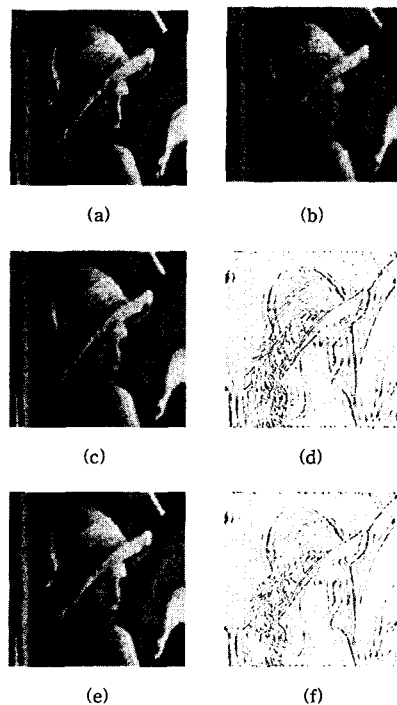
제안한 방법과 기존의 Katsaggelos방법[4]와 Steven방법[5]를 비교 분석하였다. 본 논문에서 제안된 방법으로 식(10)의 적용 정칙화 파라메타, 제안한 방향성 정칙화 연산자를 사용하여 개선효과를 확인하였다. 이완 파라메타 β 는 1.0으로 고정하였다.

"Lena" 영상에 대하여 기존의 방법을 이용하여 복원한 결과와 제안한 방법을 이용한 복원방법의 결과 및 그에 대한 오차영상을 그림 4에 나타내었다. 그림(a)는 원 영상이며 그림(b)는 훼손영상이다. 그림(c)는 기존의 방법1에 의하여 처리한 결과이고 그림(d)는 그림(c)의 오차영상으로 윤곽부분에 리플잡음이 많고 평면영역에 잡음이 남아있음을 알 수 있다. 그림(e)는 기존의 방법2를 사용한 방법으로 평면영역에서의 해상도가 증가되었으나 윤곽영역에서의 리플잡음이 남아있음을 알 수 있었다. 그림(f)는 그림(e)의 오차영상이다. 그림(g)는 본 논문에서 제안한 방법으로 모자의

윤곽부분, 오른쪽 배경의 윤곽부분이 개선되었고 윤곽부분에 리플잡음이 많이 줄었으며 배경쪽의 평면영역의 잡음이 감소했음을 알 수 있었다. 그림(h)는 그림(g)의 오차영상으로 기존의 방법에 비해 윤곽부분에 오차가 많이 줄어들어 윤곽부분의 해상도가 향상되었음을 알 수 있었다.

"Lena" 영상을 복원하는 과정에서 기존의 방법, 그리고 제안한 방향성 정칙화 연산자를 사용한 방법과 본 논문에서 제안한 방법과의 객관적인 비교를 위하여 매 반복시의 ISNR을 그림 5에 나타내었다. 각 반복횟수 10, 20, 30, 40, 50번째에서의 ISNR을 서로 비교하면 기존 방법 1의 ISNR은 2.29, 2.75, 2.86, 2.87, 2.87dB이고 방법 2의 ISNR은 2.29, 2.79, 2.91, 2.92, 2.92dB이다. 본 논문에서 제안한 방법에서는 ISNR이 2.29, 2.79, 2.99, 3.07, 3.09dB이었다. 본 논문에서 제안한 방법이 "Lena" 영상에서는 기존 방법에 비해 ISNR이 개선됨을 알 수 있었다.

기타 몇 가지 영상에 대하여 제안한 방법을 적용하여 본 결과 "Lena" 영상에서와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법보다 윤곽부분에서 해상도를 증가시키고 평면영역에서의 잡음을 억제할뿐 아니라 ISNR면에서도 개선효과가 있음을 알 수 있었다.



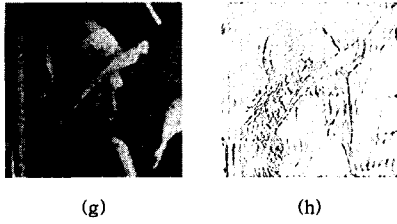


그림 3. "Lena" 영상에 대한 복원된 영상과 오차영상 (a) 원 영상 (b) (a)의 훼손된 영상 (c) 기존방법 1의 복원영상 (d) (c)의 오차영상 (e) 기존방법 2의 복원영상 (f) (e)의 오차영상 (g) 제안방법의 복원영상 (h) (g)의 오차영상

5. 결론

본 논문에서는 영상의 국부적인 특성을 이용하여 신호 대 잡음비에 반비례하는 특성을 갖는 적응 정칙화 파라메타를 윤곽과 평면영역에 적용하였다. 또한 영상을 평면영역과 4가지의 방향을 갖는 윤곽영역으로 나누어, 윤곽방향을 고려한 방향성 정칙화 연산자를 사용하여 평면영역과 윤곽영역의 방향 특성에 따라 적응적으로 처리하는 반복복원방법을 제안하였다. 실험결과 제안한 방법은 기존의 방법에 비하여 평면영역에서의 잡음 평활화가 개선되고 시각적으로 중요한 윤곽영역의 리플잡음을 억제함으로써 윤곽부분복원에 효율적임을 알 수 있었으며 ISNR 면에서도 우수하였다.

향후 연구과제로서 잡음영상에서 윤곽영역과 평면영역을 판단하는 효율적인 방법과 윤곽방향 정보 추출방법을 개선한다면 더 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

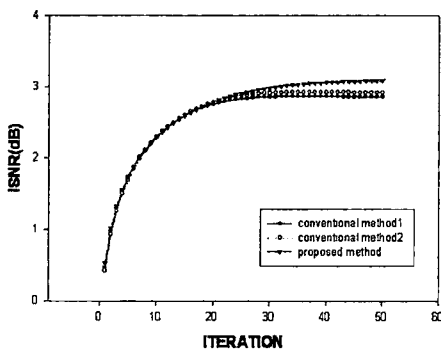


그림 4. "Lena" 영상에 대한 ISNR

참고 문헌

- [1]. H. C. Andrews and B. R. Hunt. *Digital Image Restoration*. Prentice-Hall, NewYork, 1977
- [2]. A. K. Katsaggelos. *Iterative Image Restoration Algorithms*. Optical Engineering, 28(7): 735-748, July 1989
- [3]. R. L. Lagendijk, J. Biemond, and D. E. Boeke, "Regularized Iterative Image Restoration with Ringing Reduction," *IEEE Trans. ASSP*, vol. 36, no. 12, pp. 1874-1888, Dec. 1988
- [4]. A. K. Katsaggelos, J. Biemond, R. W. Schafer, and R. M. Mersereau, "A Regularized Iterative Image Restoration Algorithm," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39, no.4, pp. 914-929, April 1991
- [5]. Steven S. O. Choy, Yuk-Hee Chan and Wan-Chi Siu, "Optimal Choice Local Regularization Weights in Iterative Image Restoration," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS'96)*, vol. II, pp. 604-607, May 1996
- [6]. 李泰鴻 外, "弛緩 파라메타を用いたボケ画像の正則化反復復元," *日本電子情報通信學會誌 D-II* vol. J79-D-II no. 11 pp. 1782-1789, Nov. 1996.