

움직임 추정 오류 잡음 적응적 고해상도 영상 복원 알고리즘

Registration Error-Noise Adaptive Regularized High-Resolution Image Reconstruction

이은실, 임원배, 강문기

연세대학교 전기 컴퓨터공학과

Eun Sil Lee, Won Bae Lim, Moon Gi Kang

Dept. of Electric and Electronic Engineering, Yonsei Univ.

요약

디지털 영상 저장 과정에서 일어나는 문제점은 영상 저장부 센서계의 한계로 나타낼 수 있다. 센서계의 충분하지 못한 집적도는 물리적으로 피할 수 없는 현상이다. 이러한 현상을 디지털 신호 처리 기술을 적용하여 극복할 수 있다. 센서계의 한계로 인한 문제는 디지털 영상의 가장 큰 문제 중의 하나이며, 이러한 한계를 극복하는 고해상도 영상 복원 방법들은 많은 학자들에 의해 제안되어 왔다. 본 논문에서는, 기존의 고해상도 영상 복원 방법들과는 달리 원영상의 공간적 고주파 성분의 특성을 분석과, 주어진 저해상도 영상들의 부화소 단위 움직임 추정 오류에 대한 분석을 통해 영상 복원과정에 이러한 분석들의 결과를 반영한다. 위에서 언급한 추정 오류는 우리에게 하나의 잡음 형태로 나타날 수 있다. 이 잡음은 추정이 이루어지는 축에 따라 그 양이 다르게 나타나게 되고, 이러한 현상은 목적이 되는 영상의 공간적 고주파 성분의 분포와 밀접한 관련이 있다. 우리는 복원 과정에 기존의 영상복원 방법중의 하나인 정규화 방법을 도입한다. 위에서 분석된 현상을 이 복원 과정에 반영하여 기존의 고해상도 영상 복원 방법보다 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

결론적으로, 제안하는 알고리즘은 부화소 단위 움직임 추정 오류의 분석 결과를 반영하므로 이러한 추정 오류에 강한 알고리즘이다.

I. 서론

고해상도 영상을 복원하는 것은 주어진 센서로 얻은 저해상도 영상들로부터 고해상도 영상을 만들어내는 것이다. 이 경우 만일 하나의 영상만을 이용할 수 있다면 고해상도 영상을 복원하는 것은 불량위치(ill-posed)문제가 된다. 하지만 비디오 카메라에서 얻은 영상들처럼 다수의 저해상도 영상들을 이용할 수 있다면 고해상도 영상을 복원하는 것이 가능하다.

고해상도 영상을 복원하기 위하여 고려해야 할 문제 중에는 영상을 획득하는 과정에서 생기는 해상도 저하가 있다. 해상도 저하는 여러

가지로 나타나는데 우선 샘플링 주기가 크기 때문에 저해상도 영상에 나타나는 앨리어싱(aliasing)을 들 수 있다. 두 번째로 저해상도 센서의 물리적인 한계로 인해 나타나는 원영상의 열화현상이 있다. 비록 앨리어싱 문제가 해결되었다고 하더라도, 고해상도 영상을 복원하기 위해 필요한 고주파 성분들은 스펙트럼의 앨리어싱된 부분에 포함되어 있고, 센서의 열화는 고주파 성분들에 대한 정보를 압축하기 때문에 고해상도의 문제는 복잡해진다.

고해상도 영상을 복원하는 연구는 크게 보간법(interpolation)을 이용하는 방법[1], 주파수 영역을 이용하는 방법[1][2], 투영을 기본으로 하는 방법[3] 등으로 나누어질 수 있다. 보

간법을 이용하는 방법은 고해상도 영상 복원을 균일하지 않은 샘플링 문제로부터 연속적인 영상을 재구성하는 방법으로 해석하는 것이다. 여기서 저해상도 영상을 형성하는 과정은 물리적인 해상도 저하를 고려하지 않는다. 그리고 주파수 영역을 이용한 방법은 고해상도 영상을 복원하기 위해 주파수 영역에서 나타나는 저해상도 영상들의 엘리어싱 관계를 이용한다. 그리고 저해상도 영상의 열화나 노이즈를 고려하여 고해상도 영상을 복원한다. 또한 투영방법은 저해상도 센서의 기하학적인 측면을 고려하기 위하여 POCS(projections onto convex sets) 방법을 사용한다.

본 논문에서는 기존의 고해상도 영상 복원 방법들과는 달리 원영상의 공간적 고주파 성분의 특성을 분석과, 주어진 저해상도 영상들의 부화소 단위 움직임 추정 오류에 대한 분석을 통해 영상 복원과정에 이러한 분석들의 결과를 반영한다. 위에서 언급한 추정 오류는 우리에게 하나의 잡음 형태로 나타날 수 있다. 이 잡음은 추정이 이루어지는 축에 따라 그 양이 다르게 나타나게 되고, 이러한 현상은 목적이 되는 영상의 공간적 고주파 성분의 분포와 밀접한 관련이 있다. 우리는 복원 과정에 기존의 영상복원 방법중의 하나인 정규화 방법을 도입하였다.

II. 영상 모델링

고해상도 영상이 $L_1N_1 \times L_2N_2$ 의 크기를 가지고 있다고 하자. 이를 사전배열식으로 나타낸 벡터를 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$, $N = L_1N_1 \times L_2N_2$ 라 하자. 즉 \mathbf{x} 는 나이퀴스트 비율로 샘플링할 원영상이고, L_1 과 L_2 는 각 축에 대한 다운샘플링 요소이다. 그러므로 저해상도 영상들은 $N_1 \times N_2$ 의 크기를 가지고 있다. 여기서 k 번째 저해상도 영상을 사전배열식으로 나타낸 벡터를 $\mathbf{y}_k = [y_{k,1}, y_{k,2}, \dots, y_{k,M}]^T$, $k = 1, 2, \dots, p$ 이고 $M = N_1 \times N_2$ 이다. p 개의 주어진 저해상도 영상들을 하나의 벡터 \mathbf{y} 로 나타내면 다음과 같

은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_p^T]^T = [y_1, y_2, \dots, y_{pM}]^T \quad (1)$$

저해상도 영상의 화소는 고해상도 영상의 화소들을 가중치를 주어서 합하고 노이즈를 첨가하여 구할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$y_{k,m} = \sum_{r=1}^N w_{k,m,r}(\mathbf{s}_k)x_r + \eta_{k,m} \quad (2)$$

여기서 $m = 1, 2, \dots, M$ 이고 $k = 1, 2, \dots, p$ 이다. 가중치 $w_{k,m,r}(\mathbf{s}_k)$ 는 k 번째 저해상도 영상에 있는 m 번째 화소에 대한 r 번째 고해상도 영상의 기여도이다. $\mathbf{s}_k = [s_{k,1}, s_{k,2}, \dots, s_{k,M}]^T$ 으로 움직임 정보를 나타내는데, 저해상도 영상들을 획득하는 동안 수직, 수평축의 쉬프트(h_k, v_k)를 제외하고 항상 일정함을 유지한다고 가정하므로 $\mathbf{s}_k = [h_k, v_k]^T$ 이라고 간단히 나타낼 수 있다. 그리고 $\eta_{k,m}$ 는 분산 σ_η^2 을 가지고 있는 가우시안 잡음이다.

위의 식을 주어진 저해상도 화소들의 전체 집합으로 나타내면 다음과 같다.

$$y_m = \sum_{r=1}^N w_{m,r}(\mathbf{s})x_r + \eta_m, \quad m = 1, 2, \dots, pM \quad (3)$$

이를 행렬로 표현하면,

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}_s \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

이다.

III. 영상 움직임 추정

다수의 저해상도 영상들로부터 고해상도 영상을 재구성할 때, 이동된 영상들의 움직임을 추정해야한다. 여기서 획득한 저해상도 영상 사이에 부화소 단위의 움직임만 있다고 가정하자. 우선 저해상도 영상들 중에서 기준영상을 임의로 선택한다. 이 기준영상에 대한 k 번째 저해상도 영상들의 움직임 파라미터를 각 축에 대하여 h_k, v_k 라 하자. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k(x, y) = y_1(x + h_k, y + v_k), \quad k = 2, 3, \dots, p \quad (5)$$

여기서 테일러 급수를 사용하면,

$$y_k(x, y) \approx y_1(x, y) + h_k \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} + v_k \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} \quad (6)$$

와 같이 식을 전개할 수 있다. 그리고 움직임 파라미터를 추정하기 위하여 최소자승을 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_k, v_k = \arg_{h_k, v_k} \min E_k(h_k, v_k) \quad (7)$$

여기서

$$E_k(h_k, v_k) = \sum \left[y_k(x, y) - y_1(x, y) - h_k \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} - v_k \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} \right]^2 \quad (8)$$

이다. 그리고 위 식(7)의 최소화를 풀기 위하여 $E_k(h_k, v_k)$ 를 h_k, v_k 에 대하여 각각 편미분하여 0이라 하고 정리하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.[4]

$$MR_k = V_k \quad (9)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} \sum \left[\frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} \right]^2 & \sum \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} \\ \sum \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} & \sum \left[\frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} \right]^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_k = [h_k, v_k]^T, \quad (11)$$

$$V_k = \begin{bmatrix} \sum (y_k(x, y) - y_1(x, y)) \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial x} \\ \sum (y_k(x, y) - y_1(x, y)) \frac{\partial y_1(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

이다. 따라서 움직임 파라미터 벡터 R_k 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_k = M^{-1} V_k \quad (13)$$

그러나 실제로 움직임 추정 알고리즘을 적용해보면 여전히 어느 정도의 움직임 추정 오류를 가지고 있다. 이 움직임 추정 오류는 잡음의 형태로 나타나는데 영상의 고주파 성분의 분포와 밀접한 관련이 있다. 이는 다음의 실험을 통해 알 수 있다.

3가지 다른 영상들을 가지고 실험을 하였다. 첫번째 영상은 모든 화소들이 하나의 값만 가지고 있고, 두번째 영상은 선들이 나란히 있는 영상이며, 마지막 영상은 가우시안 랜덤 잡음을 가지고 있다. 위의 세 영상들을 다운샘플링 요소 2로 다운샘플링하고 위의 알고리즘을 적

용해보았다. 정확한 움직임은 $(h_k, v_k) = (0.5, 0.5)$ 이다. 그러나 각각의 결과는 $(h_k, v_k) = (0.0, 0.0)$, $(h_k, v_k) = (0.5, 0.0)$, $(h_k, v_k) = (0.5, 0.5)$ 이었다. 이를 통해 움직임 추정 오류는 주어진 영상의 공간적인 고주파 성분의 분포와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 그림1은 움직임 추정 오류 잡음의 히스토그램을 나타낸 것이다. 이 모델을 보면 잡음은 각 축에 대하여 각각 가우시안 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

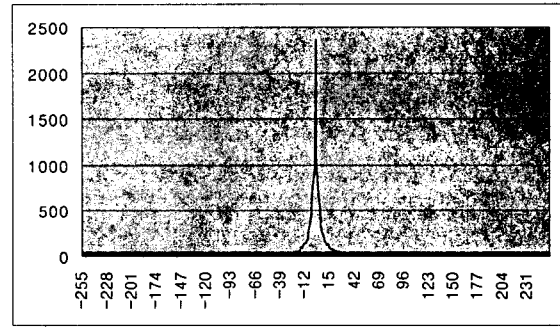


그림1 . 움직임 추정 오류 잡음의 히스토그램

IV. 움직임 추정 오류 잡음에 적응적인 고해상도 영상 복원

주어진 저해상도 영상 y 와 위에서 추정된 움직임 정보로부터 고해상도 영상 x 를 복원한다. 그러나 고해상도 영상을 복원하는 것은 일반적으로 불량위치문제(ill-posed problem)이므로 적절한 정규화 방법을 통하여 이를 해결할 수 있다. 위 식(3)으로부터 다음과 같이 고해상도 영상을 복원하기 위한 식을 세울 수 있다.

$$\hat{x} = \arg_x \min M(x) \quad (14)$$

여기서

$$M(x) = \sum_{m=1}^M \left(y_m - \sum_{r=1}^R w_{m,r} x_r \right)^2 + \alpha \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\sum_{l=1}^L c_{l,i,j} \right)^2 \quad (15)$$

α 는 정규화 파라미터이고, $c_{l,i,j}$ 는 움직임 추정 오류 잡음에 적응적인 정규화 파라미터이다. 우변의 앞쪽은 주어진 저해상도 영상과 고해상도 영상으로 예측한 저해상도 영상 사이의 차이를 줄여주는 부분이고, 우변의 뒤쪽은 움직임 추정 잡음을 보정해주는 부분이다. 이

를 정규화 파라미터 α 를 가지고 적절히 가중치를 준다. 움직임 추정 잡음을 각 축에 대하여 각각 나누어서 생각할 수 있으므로, 수직 수평축에 대하여 따로 적용을 한다. 또한 움직임 추정 노이즈는 고해상도 영상의 공간적 고주파 성분의 분포와 밀접한 관련이 있으므로 고주파 통과 필터를 사용한다.

식(14)에서 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$[W_s^T W_s + \alpha C^T C]x_M = W_s^T y. \quad (16)$$

만일 W_s 와 C 가 순환블록(block-circulant)이라면 주파수영역에서 해를 구할 수 있다. 하지만 주파수영역에서 해를 구할 수 없는 경우에는 연속적인 근사화 반복법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k + \beta(W_s^T y - (W_s^T W_s + \alpha C^T C)x_k) \quad (17)$$

여기서 β 는 수렴을 보장해주고 수렴의 속도를 제어하는 파라미터이다.

V. 실험 결과

저해상도 영상들로부터 하나의 고해상도 영상을 복원하는 실험을 하였다. 4개의 저해상도 영상들은 원영상으로부터 다운샘플링 요소 2로 다운샘플링하여 얻은 영상들이다. 이렇게 얻은 각각의 저해상도 영상들에 30dB의 가우시안 잡음을 첨가하였다. 아래 그림2와 그림3은 원영상과 다운샘플링된 영상을 나타내었다.

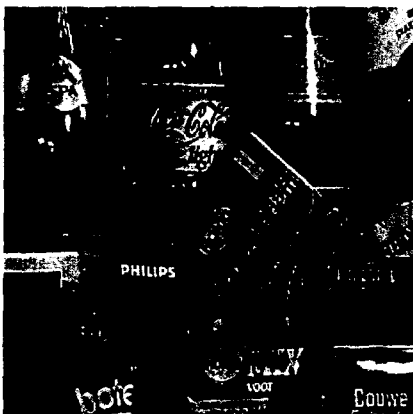


그림2 . 원영상

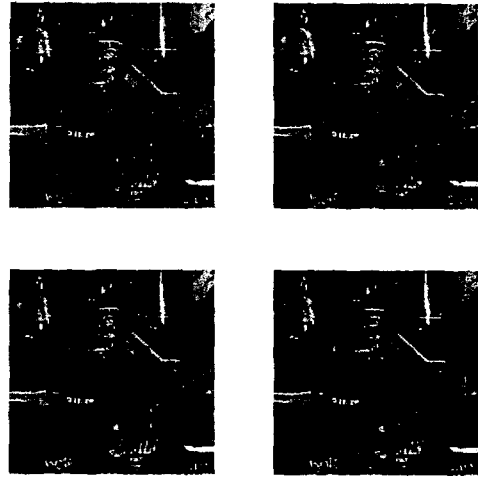


그림3. 4개의 다운샘플링된 영상들

4개의 저해상도 영상들의 움직임은 각각 $(h_k, v_k) | k=0, \dots, 3=(0.0,0.0), (0.25,0.0), (0.0,0.25), (0.25,0.25)$ 이다. 위의 움직임 추정 알고리즘을 사용하여 표1과 같은 움직임 정보를 얻을 수 있었다.

영상	y1	y2	y3	y4
h_k	0.00000	0.23358	0.00505	0.22759
v_k	0.00000	-0.00175	0.27160	0.26054

표1. 움직임 추정 알고리즘을 통한 움직임정보

위에서 얻은 움직임 정보를 가지고 고해상도 영상을 복원하였다. 고해상도 영상을 얻기 위하여 연속적인 근사화 반복법을 사용하였는데 반복을 마치기 위한 조건으로는 현재 나온 결과와 이전에 나온 결과를 정규화시킨 것이 10^{-8} 보다 작게 되거나 반복횟수가 500번을 넘지 않도록 하였다. 그림4는 움직임 추정 오류 잡음을 고려하지 않고 고해상도 영상을 복원한 것이다. 그리고 그림5는 움직임 추정 오류 잡음을 고려하여 고해상도 영상을 복원한 것이다. 아래의 그림에서 알 수 있듯이 움직임 추정 오류 잡음을 고려하면 그렇지 않은 경우와 비교하여 잡음에 매우 안정함을 확인할 수 있다. 그리고 경계부분이나 자세한 구조를 나타내는 부분에서 세부적인 영상의 향상을 얻을 수 있었다.

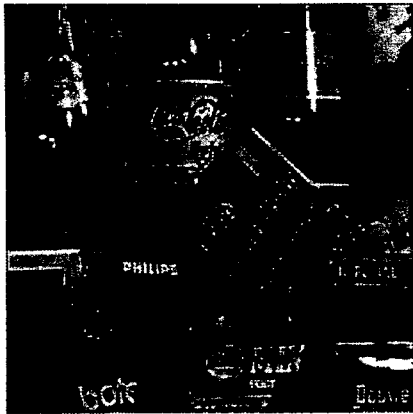


그림4. 움직임 추정 오류 잡음을 고려하지 않고 복원된 고해상도 영상



그림5. 움직임 추정 오류 잡음을 고려하여 복원된 고해상도 영상

VI. 결론

본 논문에서는 부화소 단위의 움직임 추정 오류에 대한 잡음을 고려하여 고해상도의 영상을 복원하는 알고리즘을 제안해 보았다. 고해상도 영상을 복원하는데 정확한 움직임 정보는 아주 중요한 요소이다. 하지만 움직임을 추정하는 과정에서 많은 오류가 발생하므로 이에 대한 보정이 필요하다. 움직임 추정 과정에서 발생한 오류에 대하여 이를 하나의 잡음 형태로 나타낼 수 있으며, 이 잡음은 추정이 이루어지는 축에 따라 그 양이 다르게 나타나게 되고 영상의 고주파 성분의 분포와 밀접한

관련이 있음을 알 수 있었다. 그러므로 제안된 알고리즘은 움직임 추정 오류 잡음에 매우 안정하고, 연속적인 반복법을 사용하고 있으므로 원영상과 잡음에 대한 사전 지식이 필요하지 않게 된다. 또한 제안된 알고리즘을 통해 경계 부분이나 자세한 구조를 나타내는 부분에서 세부적인 영상의 향상을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. Y. Tsai and T. S. Huang, "multiple frame image restoration and registration," in *Advances in Computer Vision and Image Processing*, T. S. Huang, Ed., vol. 1, pp.317-339, JAI Press Inc.,1984.
- [2] S. P. Kim, N. K. Boss, and H. M. Valenzuela, "Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframes," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 38, pp.1013-1027, June, 1990.
- [3] H. Stark and P. Oskoui, "High resolution Image Recovery from Image-plane Arrays, Using Convex Projections," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 6, pp.1715-1726, 1989.
- [4] R. C. Hardie, K. J. Barnard, E. E. Armstrong, and E. A. Watson, "High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system," *Opt. Eng.*, vol. 37, no.1, pp.247-260, Jan., 1998.
- [5] A. K. Katsaggelos, J. biemond, R. W. Schafer and R. M. Mersereau, "A regularized iterative image restoration algorithm," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39, pp.914-929, April, 1991.