

논문 2009-46SP-6-3

수리형태학적 분석을 통한 계단응답 추출 및 반복적 정칙화 방법을 이용한 점확산함수 추정 및 영상 복원

(Morphology-Based Step Response Extraction and Regularized Iterative
Point Spread Function Estimation & Image Restoration)

박 영 욱*, 전 재 환*, 이 진 희*, 강 남 오**, 백 준 기***

(Younguk Park, Jaehwan Jeon, Jinhee Lee, Namoh Kang, and Joonki Paik)

요 약

본 논문은 수리형태학적 분석을 통한 계단응답 추출 및 반복적 정칙화 방법을 이용한 점확산함수 추정 방법을 제안한다. 제안된 점확산함수 추정 기법은 입력 영상의 윤곽을 추출하기 위하여 캐니 에지 추출법을 사용하고, 윤곽에 대한 수리형태학적 분석을 위해서 Hit-or-Miss 변환을 통해 추정 조건을 만족하는 수평 및 수직 에지를 추출한다. 이렇게, 추출된 에지들을 평탄화 및 정규화 시켜서 최적의 계단응답으로 만들고, 반복적 정칙화 방법을 통해 점확산함수를 추정하는 과정을 보인다. 또한, 추정된 점확산함수를 사용하여 영상 복원한 결과를 보인다. 제안하는 점확산함수 추정 방법은 기계적 초점 렌즈를 사용하지 않는 디지털 자동초점 시스템에 적용하여 디지털 입력 장치의 부가가치를 높이는 데 기여할 수 있다.

Abstract

In this paper, we present morphology-based step region extraction and regularized iterative point-spread-function (PSF) estimation methods. The proposed PSF estimation method uses canny edge detector to extract the edge of the input image. We extract feasible vertical and horizontal edges using morphology analysis, such as the hit-or-miss transform. Given extracted edges we estimate the optimal step-response using flattening and normalization processes. The PSF is finally characterized by solving the equation which relates the optimal step response and the 2D isotropic PSF. We shows the restored image by the estimated PSF. The proposed algorithm can be applied a fully digital auto-focusing system without using mechanical focusing parts.

Keywords : 점확산함수 추정, 디지털 자동초점, 반복적 정칙화 알고리즘, Hit-or-Miss 변환

I. 서 론

디지털 영상이 멀티미디어의 핵심 매체로 자리 잡게 되면서 그의 입력 장치인 카메라의 디지털화가 급속하게 진전했다. 특히 기존의 카메라나 캠코더 등과 더불어 최근 모바일 카메라폰의 등장으로 디지털 카메라의

수요가 급속히 증가하는 추세이다. 하지만 이와 같은 영상 입력 장치들의 영상품질은 여러 가지 요인에 의해 저하되는 경우가 흔히 발생한다. 영상품질을 저해하는 요인으로는 사용자의 작동 미숙, 부정확한 초점거리 조절에 따른 초점 열화(Out-of-focus blur), 객체와 영상 획득 장치간의 상대적 운동에 의한 움직임 열화(Motion blur), 그리고 대기의 이상기류나 빛의 산란으로 인한 대기 불안정 열화(Atmosphere instability blur) 등을 들 수 있다^[1~2]. 이런 여러 가지 열화 요인 중에서 영상형성 과정에서 피할 수 없는 초점열화를 제거하기 위하여 현재 상용화된 대부분의 제품에서는 다양한 자동초점(auto-focusing; AF)시스템을 채용하고 있다.

* 학생회원, ** 정회원, *** 평생회원, 중앙대학교
첨단영상대학원

(Dept. of Image Engineering, Graduate School of
Advanced Image Science, Multimedia, and Film,
Chung-Ang University)

※ 이 논문은 2007년도 중앙대학교 박사 후 연수과정
(Post Doc.) 지원사업에 의한 것임.

접수일자: 2009년8월3일, 수정완료일: 2009년10월22일

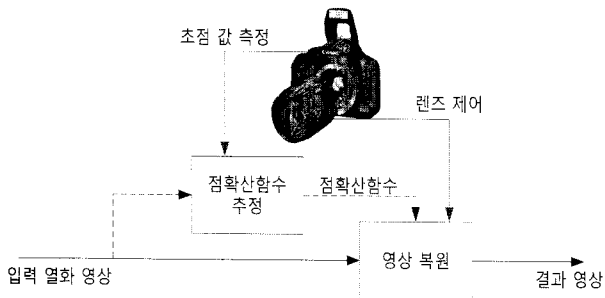


그림 1 FDAF 방식의 자동초점 알고리즘 블록도
Fig. 1. The block diagram of auto-focusing algorithm of FDAF method.

현재 상용화 되었거나 연구개발 중인 초점조절 방식들은 수동초점(manual focusing; MF), 적외선 자동초점(infrared auto-focusing; IRAF), 반 디지털 자동초점(semi-digital auto-focusing; SDAF), 완전 디지털 자동초점(fully digital auto-focusing; FDAF) 등으로 분류된다. MF, IRAF, SDAF 방식은 각각 초점 값 측정에 사용자의 주관성 포함, 기계적 부가장치 필요, 초점 거리 추정과정의 시간지연 및 불안정성의 문제가 큰 단점으로 지적되고 있다. 반면 FDAF 방식은 그림 1에서 보는 바와 같이, 초점 정도를 측정하고 초점을 제어하는 두 과정이 모두 디지털 신호처리에 의해 구현되기 때문에, 기존 방식들의 단점을 보완할 수 있는 장점을 가진다^[3-4]. 보다 구체적으로 FDAF 방식은 초점 정도를 측정하기 위해서 피사체의 거리를 측정하는 대신 입력영상에서 점확산함수(point spread function; PSF)를 추정하고, 영상복원 기술을 이용하여 초점이 맞는 영상을 제공한다.

완전 디지털화의 장점에도 불구하고 FDAF 방식은 초점이 맞지 않는 영상 데이터만 사용해서 점확산함수를 추정해야 하기 때문에 블라인드 영상복원 문제를 수반하게 된다. 블라인드 영상복원 문제를 해결하기 위한 방법들은 이미 많은 연구에서 제안되었다^[5]. 이들 각각의 기능과 특징을 표 1에 요약하였다.

표 1에서 보는 바와 같이, 제로교차점기반(zero crossing) 점확산함수 추정방법은 초기 추정에 대한 부정확한 수렴과 잡음에 매우 민감하다는 단점이 있다. 또한 자기 회귀 이동 평균 방법(Autoregressive moving average)모델^[6]과 비계수적 반복적 복원 기법(Non-parametric iterative restoration)^[7] 방법은 각기 응용분야에 합당한 가정들 하에 초점 복원 결과를 제공하지만 최적화에 필요한 계산의 복잡성, 수렴에 대한 불확실성으로 인해 실시간 시스템 구현에 부적합한 단

표 1. 블라인드 영상복원 알고리즘 분류
Table 1. Classification of blind image restoration algorithm.

알고리즘	복잡성	수렴성	잡음에 대한 민감도
제로교차점기반 점확산함수 추정	높음	초기 추정에 대한 부정확한 수렴	높음
자기 회귀 이동 평균 방법	약간 높음	초기 추정에 대한 부정확한 수렴	적당함
비계수적 반복적 복원 기법	약간 낮음	초기 추정에 대한 부정확한 수렴	약간 높음
사전 점확산함수 추정	매우 낮음	비반복적 방법	약간 높음

점이 있다.

반면 사전 점확산함수 추정 방식을 사용한 추정 방식은 반복적 계산과정 등을 포함하지 않아 효율적인 구현에 적합하여 이미 선행연구가 수행된 바 있다^[2-4]. 이 방법들에 의하면, 초점열화에 의해 흐려진 물체의 윤곽으로부터 열화 과정을 결정하는 점확산함수에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 방법들은 점확산함수 추정을 위해 사용되는 과도한 계산과 시스템 구성에 필요한 하드웨어를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 영상복원에서 핵심이 되는 점확산함수 추정 과정에서 사용된 가정이 실제 영상시스템과 거리가 있어서 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 초점이 맞지 않은 입력 영상의 경계에서 계단응답을 추출하고, 이를 이용하여 점확산함수를 추정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 캐니 에지 추출법과 Hit-or-Miss 변환을 통하여 1차원 계단함수를 추출하고, 이를 2차원 임펄스 응답과의 연관성을 통해서 점확산함수를 추정한다. 또한, 점확산함수의 계수를 추정할 때 잡음이 증폭되는 문제를 해결하기 위해 반복적 정칙화 방법(regularized iteration)을 사용한다. 이로써 기존의 점확산함수 추정에서 정확도가 떨어지는 단점을 보완하는 새로운 점확산함수 추정 방법을 제시한다. 제안된 방법은 기계적 초점 렌즈를 사용하지 않는 디지털 자동초점 시스템에 적용 가능한 장점이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 점확산함수의 이론적 배경을 소개하고, III장에서는 입력영상에 대한 최적의 계단응답을 생성하는 방식을 설명한다. IV장에서는 반복적 정칙화 방법을 이용한 점확

산함수 추정 방법에 대해 알아본다. V장에서는 제안한 알고리즘에 대한 실험결과를 보여주고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 점확산함수의 이론적 배경

본 장에서는 점확산함수 추정의 이론적 배경에 대하여 기술한다. 실제 영상복원에서는 초점이 맞지 않는 영상 자체로부터 점확산함수를 추정해야 하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서 점확산함수에 대한 몇 가지 제약 조건을 사용하여 문제의 범위를 좁히고 최적의 해를 구하는 방법에 대하여 설명한다.

본 논문에서 제안된 점확산함수 추정은 세 가지 가정에 의하여 이루어진다. 첫째, 초점열화에서의 점확산함수는 유한영역이고, 등방성 혹은 대칭성의 형태를 가진다. 그림 2는 점확산함수에 대한 근사 모델의 기하학적인 구조를 나타낸다. $r(0)$ 는 동심원의 중심 값을 나타내고, $r(1) \sim r(3)$ 는 각각 반지름이 1~3일 때 점확산함수의 계수를 나타낸다.

둘째, 균일 격자 형태의 영상평면에서 동심원 위에 있지 않는 P 와 같은 계수들은 선형 보간(linear interpolation)을 통하여 다음과 같이 계산된다.

$$P(i, j) = \alpha r(k) + (1 - \alpha)r(k - 1) \quad (1)$$

이때, i 와 j 는 각각 가로, 세로 좌표, k 는 P 위치에 반지름의 정수 부분, α 는 P 에서 P 를 포함하는 동심원까지의 거리를 나타내고, 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha = r(k) - (\sqrt{i^2 + j^2}), 0 < \alpha < 1. \quad (2)$$

셋째, 초점열화는 원영상과 점확산함수의 중첩적분(Convolution)으로 이루어지고 다음과 같이 2차원 선형 공간불변시스템의 출력으로 표현 된다^[1].

$$g(i, j) = f(i, j) * h(i, j) + \eta(i, j) \quad (3)$$

여기서 $g(i, j)$ 는 열화 영상, $f(i, j)$ 는 원영상, $h(i, j)$ 는 점확산함수, 그리고 $\eta(i, j)$ 은 평균이 0이고 정규분포를 가진 부가적 잡음을 의미한다.

III. 수리형태학적 분석을 통한 계단응답 영역 추출

본 장에서는 열화된 입력 영상의 에지 성분을 추출하

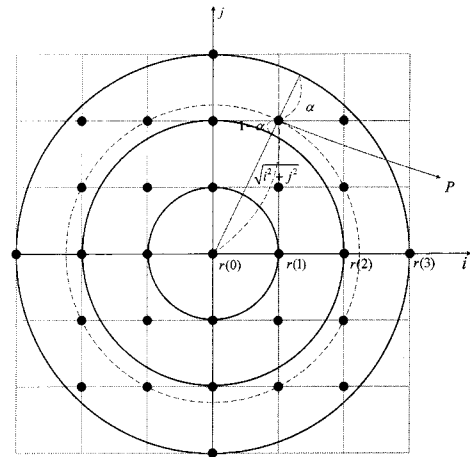


그림 2. 반지름의 길이가 3인 2차원 등방성 점확산함수
Fig. 2. Two-dimensional (2D) PSF of radius 3 characterized by the center and three concentric circles.

여 1차원 계단응답 영역을 추출하는 알고리즘을 제안한다. 그림 3은 제안된 자동초점 시스템 전체의 구성을 보이고, 그 중에서 첫 번째 단계인 1차원 계단응답 영역 추출에 관해서 설명한다.

일반적으로 점확산함수를 추정하기 위해서는 점광원을 입력하고, 입력 된 점광원이 초점 열화에 의해서 퍼져나간 영상을 측정하면 된다. 그러나 영상에 이상적인 점광원을 입력 시키는 실험이 실제 불가능하기 때문에, 확산원의 크기를 구하기 위해서 보다 현실적인 점확산함수 추정 알고리즘이 필요하다.

영상의 에지 부분에서는 화소의 밝기값이 급격하게 변하게 되며 이것은 점광원의 경우와 유사한 특징을 갖게 된다. 영상의 에지 부분을 추출 하기 위하여 제안된 알고리즘에서는 캐니 에지 검출기를 사용하여 영상의 에지를 추출한다^[8]. 캐니 에지 검출기는 잡음에 강하며, 단 하나의 위치 값만이 검출되기 때문에 실제 에지 주변에서 잡음에 의해 생기는 지역 최고값들의 수를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 캐니 에지 검출기를 통해 생성된 윤곽 영상 안에는 많은 에지가 존재하게 된다. 많은 에지 중 점확산함수의 크기를 결정하기 위해 사용되는 에지는 다음과 같이 Hit-or-Miss 변환을 통하여 추출한다^[9].

$$\begin{aligned} E_x &= (M \ominus D) \cap (M^c \ominus [W_x - D_x]) \\ E_y &= (M \ominus D) \cap (M^c \ominus [W_y - D_y]) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 E_x 와 E_y 는 각각 추출된 수평 및 수직 에지, M

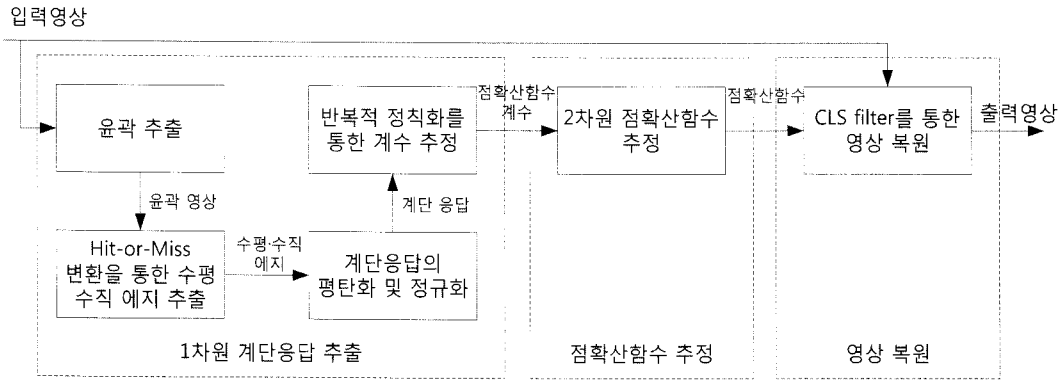


그림 3. 제안하는 알고리즘을 이용한 디지털 자동초점 시스템 블록도
 Fig. 3. The block diagram of digital auto-focusing system using the proposed algorithm.

은 윤곽 영상, M^c 은 윤곽 영상의 반전 영상, 그리고 \ominus 는 침식 연산을 나타낸다. 또한, D_x, D_y, W_x, W_y 는 차례대로 다음과 같이 정의된다.

$$D_x = [111], D_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$W_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, W_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

식 (5)에서는 1×3 과 3×1 의 크기의 마스크를 예로 들었지만, 실제 영상에서 사용할 때에는, D_x, D_y 의 크기가 가장 긴 길이의 에지를 포함할 수 있도록 해야 한다. 또한 식 (6)에서는 식(5)의 크기를 포함하고, 에지들 간의 영향을 최소화 할 수 있도록 충분한 범위를 갖는 크기로 지정해야 한다.

이러한 연산의 결과를 그림 4에 보인다. 그림 4(a)는 반지름이 2인 임의의 점확산함수로 중첩적분 된 열화 영상이고, 그림 4(b)는 캐니 에지 검출기로 추출된 윤곽 영상이다. 그리고 그림 4(c) 에지 중 일정길이 이상, 그리고 에지 간의 일정 크기 이상의 거리를 둔 에지만 추출한 영상이다. 이때 사용된 식 (5)의 마스크 크기는 1×56 이고, 식 (6)의 마스크 크기는 43×58 이다. 마스크 크기에 사용된 길이가 가장 긴 에지의 크기는 56으로 고려하여 수행하였다.

이렇게 얻어진 수평 및 수직 에지를 기준으로 각각을 라벨링 하고 라벨링 된 영역 안에 각 에지의 중간 위치에서 직각 방향으로 화소값을 추출한다. 이 때 추출을 하는 위치는 식 (6)의 마스크 중간 위치가 된다.

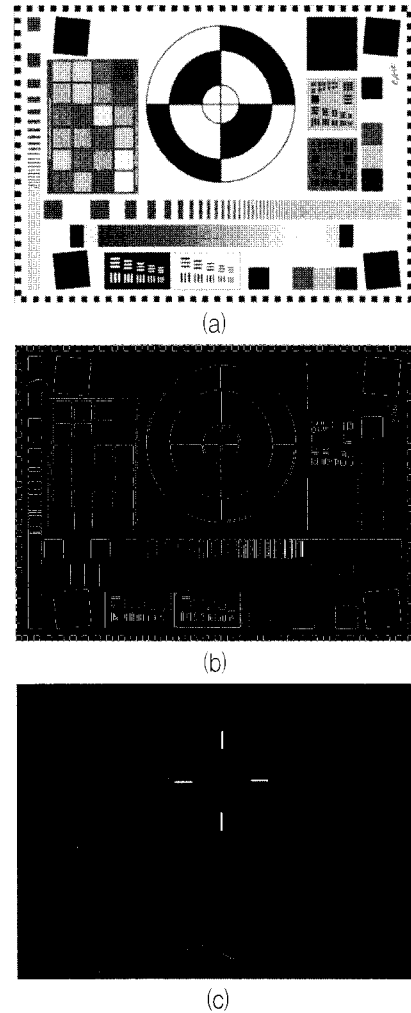


그림 4. (a) 반지름 2인 점확산함수가 중첩적분 된 열화 영상, (b) 캐니 에지 추출법으로 추출된 윤곽 영상, (c) Hit-or-Miss 변환을 통하여 추출된 수평 및 수직 에지
 Fig. 4. (a) Blurred image by the PSF of radius 2, (b) extracted edge map by using Canny edge detector, and (c) vertical and horizontal edges by Hit-or-Miss transformation.

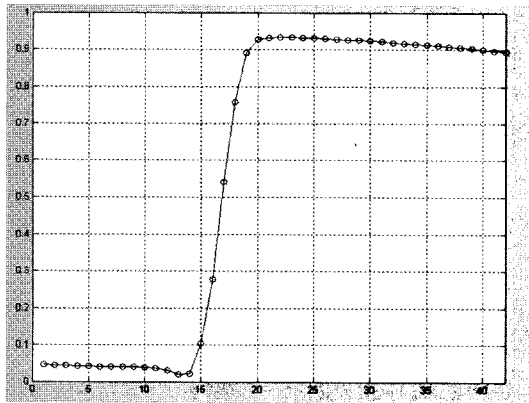


그림 5. 추출된 계단응답의 한 예
Fig. 5. An example of the extracted step response.

즉 그림 4(c)에서 사용된 마스크의 크기가 43×58 이 기 때문에, 22번째 위치에 화소로부터 수직의 화소값을 추출한다. 이때 추출한 화소값들은 각각의 라벨링 영역 안의 값들끼리 평균을 계산함으로써 라벨링 된 개수만큼의 계단응답을 얻을 수 있다. 구해진 계단응답의 예는 그림 5와 같다.

가로축은 중심 화소에서 -21만큼 떨어진 위치를 0으로 하여 42개 화소의 위치를 나타내며, 세로축은 그때의 화소값을 나타낸다. 이렇게 구해진 각 계단응답의 비교를 위해 평탄화 및 정규화 과정을 거친다. 평탄화 과정에서는 처음으로 최소값이 나오기 직전의 값은 모두 최소값으로 대체하고 최대값이 나온 이후의 값은 최대값으로 평탄화 시킨다. 또한, 정규화 과정에서는 식 (7)을 이용하여 평탄화된 계단응답 값을 정규화 해준다.

$$\text{정규화값} = \left(\frac{\text{해당픽셀값} - \text{최대값}}{\text{최대값} - \text{최소값}} \right). \quad (7)$$

정규화 과정을 거친 계단응답은 그림 6에 보인다.

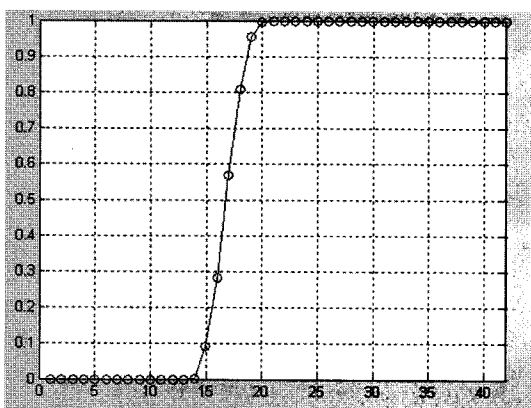


그림 6. 정규화 및 평탄화 된 계단 응답
Fig. 6. Regularized & flatted step response.

다음으로 각각의 평탄화 및 정규화 된 계단응답들을 식 (8)을 통해 최적의 계단응답을 찾는다.

$$S = \sum_{i=0}^N [S_c(i) - S_M]^2. \quad (8)$$

여기서 $S_c(i)$ 는 각각의 계단응답을 나타내고, S_M 은 각각의 계단응답들을 평균한 평균 계단응답을 나타낸다. 식 (8)을 통해 나온 결과 값 중, 작은 값을 가진 계단응답들을 모두 평균하여 하나의 계단응답을 만든다. 최종적으로 만들어진 계단응답은 다음 절 점확산함수 추정단계에서 사용된다.

VI. 반복적 정칙화 방법을 이용한 점확산함수 추정

3절에서 얻은 계단응답을 이용하여 점확산함수를 추정하기 위하여, 다음과 같은 연립방정식

$$Ar = S, \quad (9)$$

의 해를 구한다. 이 때, A 는 $D \times (R+1)$ 의 행렬이고 그 원소는 그림 2의 요소들의 누적 값으로 정의 된다. r 은 $(R+1) \times 1$ 의 벡터로 그 원소는 정수배 반지름일 때 점확산함수의 값을 나타내고, s 는 $D \times 1$ 의 벡터로 그 원소는 계단응답으로 정의된다. $D > (R+1)$ 이고, 식 (9)는 미지수보다 방정식이 더 많기 때문에 반복적 정칙화 방법

$$f(r) = \frac{1}{2} \|S - Ar\|^2 + \frac{\lambda}{2} \|Cr\|^2, \quad (10)$$

을 통하여 r 을 구할 수 있다. 이 때, C 는 고역 통과 필터를 나타내고, λ 는 평활도의 제약조건의 양을 조절하는 정칙화 매개 변수를 나타낸다. 식 (10)을 미분한 결과는

$$\nabla f(r) = -A^T S - (A^T A + \lambda C^T C)r, \quad (11)$$

이다. r_k 를 k 번 반복되어 추정된 결과라고 하면, 다음 r_{k+1} 은

$$r_{k+1} = r_k + \beta(b - Tr_k), \quad (12)$$

와 같이, 미분의 반대 방향으로 누적 부분을 적용함으로써 결정할 수 있다. 이때 $b = A^T s$ 이고, $T = A^T A + \lambda C^T C$ 이다. β 는 수렴속도를 조절하는

상수로 $2/\lambda_{\max}$ 보다 작게 선택한다. 여기서 λ_{\max} 는 $A^T A + \lambda C^T C$ 행렬의 최대 고유치(eigenvalue) 를 나타낸다. 결과적으로 $r = [r(1), \dots, r(k)]^T$ 같이 r 이 주어지면, 점확산함수는 그림 2와 같이 구할 수 있다.

V. 실험 결과

본 절에서는 제안된 점확산함수 추정 방법의 실험 결과를 보이고, 추정의 정확성을 확인하기 위한 영상복원 결과를 함께 제시한다. 그림 7(a)는 256×256 크기의 정초점 영상이고, 그림 7(b)는 반지름이 1인 균일하게 분산된 등방성(uniformly distributed isotropic) 점확산함수를 중첩 적분 하여 얻은 열화 영상이다.

그림 7(b)에 대한 점확산함수 추정 결과는 기존의 방법과 비교 분석하기 위해, 비계수적인 EM 방법^[10]과 참고문헌^[2]에서 제안한 방법의 결과를 함께 표 2에 나타냈다. 표 2의 결과에 따르면, 제안된 방법이 그림 7(b)에 중첩 적분한 균일하게 분산된 등방성 점확산함수와 가장 근사한 결과를 나타내었다. 그림 8은 표 2에서 추정된 각각의 점확산함수와 그림 7(b)를 제약적 최소제곱(constraint least square; CLS) 복원필터로 복원한 결과이다. 결과의 비교를 위하여 다음과 같이 정의되는 신호대잡음개선비(improvement in signal-to-noise ratio; ISNR) 값을 함께 표시하였다.

$$ISNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - g(x,y)]}{\sum_{x,y} [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]} \right\} [dB], \quad (13)$$

여기서 $\hat{f}(x,y)$ 는 복원 영상을 나타낸다.

다음 실험으로, 그림 9(a)는 Kodak 표준 칼라영상^[11]으로 768×512 크기의 초점이 맞은 영상을 나타낸

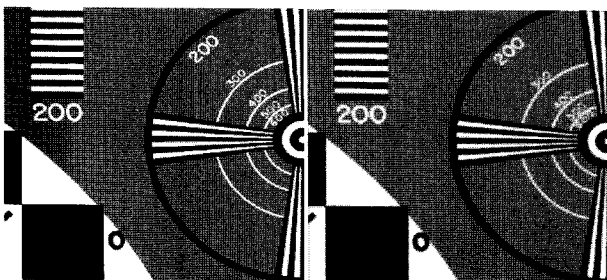


그림 7. (a) 초점이 맞는 원영상, (b) 열화 된 영상
Fig. 7. (a) The well-focused original image and (b) its degraded version.

표 2. 반지름이 1인 균일하게 분산된 등방성 점확산 함수에 대한 다양한 알고리즘의 추정 결과
Table 2. Estimated results of the uniformly distributed isotropic PSF of radius 1 by using various algorithms.

균일하게 분산된 등방성 점확산함수	참고논문 ^[2] 의 방법
$\begin{bmatrix} 0 & 0.2000 & 0 \\ 0.2000 & 0.2000 & 0.2000 \\ 0 & 0.2000 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.1704 & 0 \\ 0.1704 & 0.3185 & 0.1704 \\ 0 & 0.1704 & 0 \end{bmatrix}$
비계수적인 EM 방법 ^[10]	제안한 방법
$\begin{bmatrix} 0.0366 & 0.1623 & 0.0295 \\ 0.1634 & 0.2480 & 0.1634 \\ 0.0295 & 0.1623 & 0.0366 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0.2000 & 0 \\ 0.2000 & 0.2001 & 0.2000 \\ 0 & 0.2000 & 0 \end{bmatrix}$

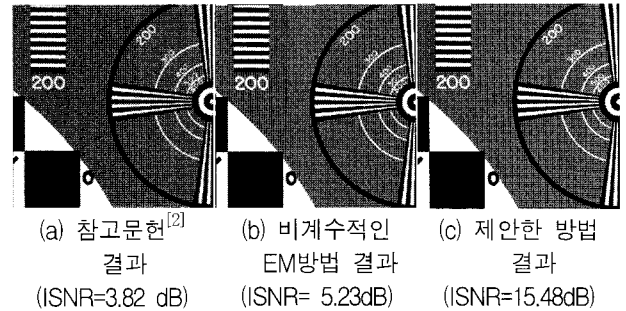


그림 8 기존의 방법과 제안된 방법의 복원 결과
Fig. 8. Comparison of restoration performance of the algorithm with existing methods.

다. 그림 9(b)는 반지름이 3인 임의의 점확산함수를 보이고, 이를 중첩 적분한 열화 영상은 그림 9(c)에 나타낸다. 그림 9(d)는 캐니 윤곽 추출법으로 얻어진 윤곽 영상이고, 그림 9(e)는 Hit-or-Miss 변환을 통하여 추출된 수평 및 수직에지 영상이다. 그림 9(f)는 평탄화 및 정규화를 통해 얻어진 1차원 계단응답이고, 이를 토대로 만들어진 2차원 점확산함수는 그림 9(g)이다. 마지막으로, 그림 9(h)는 그림 9(g)에서 추정된 점확산함수를 CLS 필터로 복원한 결과 영상이다.

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 그림 10(a)에 다양한 점확산함수를 중첩적분하고, 제안된 방법을 적용시켰다. 다양한 점확산함수에 대한 복원 결과의 복원성능을 표 3에 최대신호대잡음비(Peak to signal to noise ratio; PSNR)로 나타내었다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{M \times N \times 255^2}{\| f(x,y) - \hat{f}(x,y) \|} [dB], \quad (14)$$

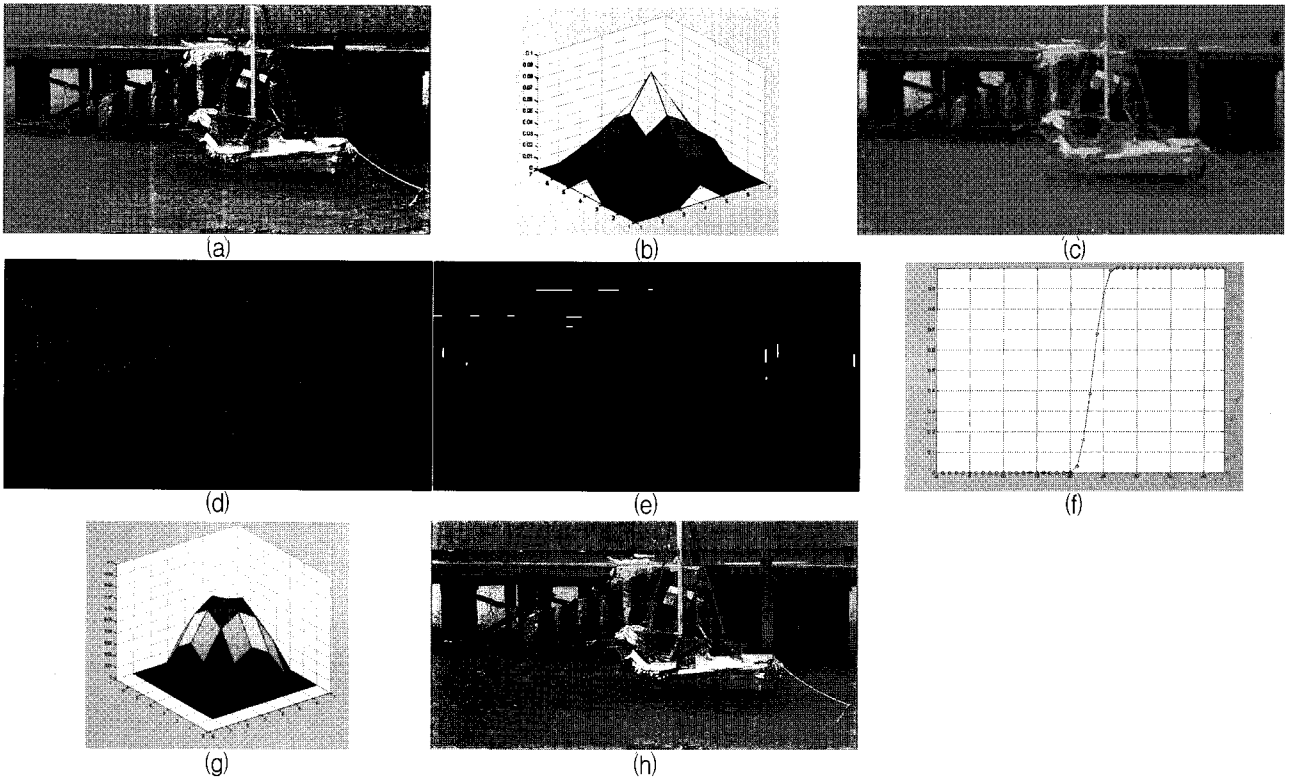


그림 9. (a) 768X512 크기의 초점 영상, (b) 반지름 크기가 7인 점확산함수, (c) 열화 영상, (d) 윤곽 영상, (e) Hit-or-Miss 변환을 통해 추출된 수평 및 수직 예지, (f) (e)에서 추출한 1차원 계단응답, (g) 추정된 2차원 점확산함수, (h) 복원 영상

Fig. 9. (a) The 768X 512 Well-focused image, (b) PSF of radius 7 (c) blurred image by simulation, (d) the edge classification result, (e) vertical and horizontal edges by Hit-or-Miss transformation, (f) 1D step response extracting from (e), (g) the estimated 2D PSF, and (h) the restored image.

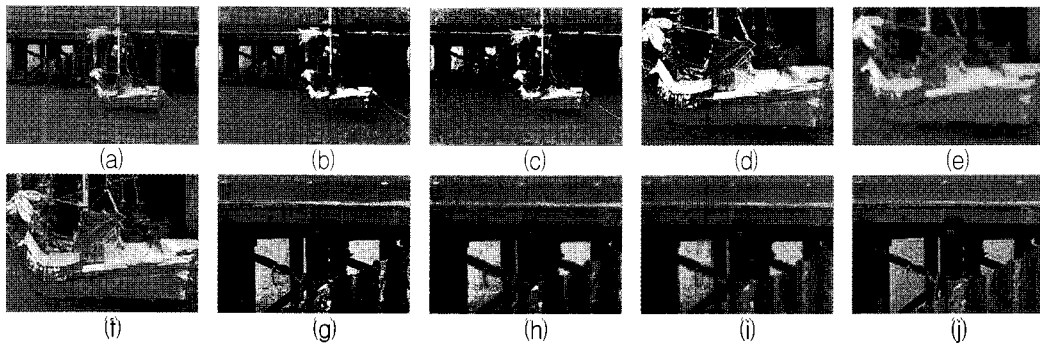


그림 10. (a) 원 영상, (b) 열화 영상, (c) 복원된 영상, (d) (a)의 배 영역 확대영상, (e) (b)의 배 영역 확대영상, (f) (c)의 배 영역 확대영상, (g) (a)의 다리 영역 확대영상, (h) (b)의 다리 영역 확대영상, (i) (c)의 다리 영역 확대영상

Fig. 10. (a) Original image, (b) Out-of-focus blur image, (c) restoration image, (d) cropped image of ship region of (a), (e) cropped image of ship region of (b), (f) cropped image of ship region of (c), (g) cropped image of bridge region of (a), (h) cropped image of bridge region of (b), and (i) cropped image of bridge region of (c).

여기서 $M \times N$ 은 영상의 크기를 나타낸다.

복원된 결과의 성능 분석을 위해 부분 영역을 확대한 결과를 그림 10에 정리하였다. 그림 10(a), 10(b), 그리고 10(c)는 차례대로 그림 9(a), 9(c), 9(h)를 나타낸다. 그림 10(d), 그림 10(e), 그림 10(f)는 각각 그림 10(a),

그림 10(b), 그림 10(c)의 배를 포함한 점선 영역을 확대한 영상을 나타낸다. 또한, 그림 10(g), 그림 10(h), 그림 10(i)는 각각 그림 10(a), 그림 10(b), 그림 10(c)의 다리 부분을 포함한 점선 영역을 확대한 영상을 나타낸다. 그림 11은 실제 초점이 안 맞은 카메라로 촬영한 영



그림 11. (a) 초점 열화된 실제 영상, (b) (a)에 점선 영역 확대 영상, (c) 제안한 방법으로 복원한 영상, (d) (d)에 점선영역 확대 영상, (e) 초점 열화된 실제 영상, (f) (e)에 점선 영역 확대 영상, (g) 제안한 방법으로 복원한 영상, (h) (g)에 점선영역 확대 영상

Fig. 11. (a) out-of-focus blur image, (b) cropped image of (a), (c) the restored image by the proposed image, (d) cropped image of (c), (e) out-of-focus blur image, (f) cropped image of (e), (g) the restored image by the proposed image, and (h) cropped image of (g).

표 3. 실험을 위해 사용된 요소와 복원된 결과의 PSNR 값

Table 3. The parameters used for the experiment and the corresponding PSNR values.

영상	열화 크기	복원 필터	PSNR
Kodak Image (그림 9(a))	3×3	CLS 필터	39.853108 dB
	5×5	CLS 필터	34.520282 dB
	7×7	CLS 필터	27.677926 dB
	9×9	CLS 필터	27.569488 dB

상으로부터 점확산함수를 추정된 결과를 보인다. 그림 11(a)는 초점 열화가 포함된 실제 영상을 나타내고, 그림 11(b)는 그림 11(a)의 점선 영역을 확대한 영상을 나타낸다. 제안한 방법으로 점확산함수를 추정하여 그림 11(a)를 CLS 필터로 복원한 결과는 그림 11(c)에서 보는 바와 같다. 그림 11(d)는 그림 11(c)의 점선 영역을 확대한 결과이다. 또한, 그림 11(e)은 초점 열화가 포함된 실제 영상을 나타내고, 그림 11(f)는 그림 11(e)의 점선영역을 확대한 영상을 나타낸다. 그림 11(g)에서는 추정된 점확산함수와 그림 11(e)를 계산하여 CLS 복원필터로 복원한 결과를 보인다. 마지막으로 그림 11(h)는 그림 11(g)의 점선부분을 확대한 영상이다.

V. 결 론

본 논문에서는 초점 열화된 영상의 계단응답을 분석함으로써 점확산함수를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 열화된 영상으로부터 특별한 사전 정보 없이 점확산함수에 대한 추정이 가능했다. 열화된 입력 영상의 열화 정도를 측정하기 위해 캐니 에지 추출법으로 영상의 경계를 추출하였고, 추출된 경계 중 일정 길이 이상, 에지 간의 일정 크기 이상의 거리를 둔 에지만 추출하기 위하여 Hit-or-Miss 변환을 사용하여 계단응답을 추출하였다. 추출된 계단응답의 계수에 대해 반복 정칙화 방법을 사용함으로써, 정확한 점확산함수를 추정할 수 있었다.

실험 결과를 통해 보였듯이 점확산함수 추정에 있어서 기존의 방법들보다 우수한 성능을 보였고, 실험적 영상뿐 아니라 초점열화를 포함한 실제 영상에서도 만족할 만한 복원 결과를 나타내었다. 기존의 자동초점에서 초점 정도를 측정하기 위해 기계적인 부분을 필요로 하고, 이에 따라 시스템의 크기가 커지게 되는 단점은 본 논문에서 제안한 방법을 사용함으로써 해결할 수 있

을 것이다.

그러나 본 논문이 제안한 점확산함수 추정 기법은 영상 내의 윤곽이 존재하지 않는 경우나, 수평 및 수직 에지를 포함하지 않을 경우에는 점확산함수 추정이 불가능하다는 단점이 있다. 따라서, 향후 연구과제는 입력되는 영상에 무관하게 정확한 점확산함수를 추정할 수 있는 알고리즘 개발과 실시간 처리가 가능하도록 연산량을 줄일 수 있는 방법 등이 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] H. Andrews and B. Hunt, *Digital image restoration*, Prentice-Hall, New Jersey, 1977.
- [2] S. Kim and J. Paik, "Out-of-focus blur estimation and restoration for digital auto-focusing system," *Electronic Letters*, vol. 34, no. 12, pp. 1217-1219, June 1998.
- [3] S. Kim, T. Kim, and J. Paik, "A fully digital auto-focusing system based on image restoration," *Proc. 1997 IEEE Region 10 Conference*, vol. 1, pp. 13-16, December 1997.
- [4] J. Yoon, J. Shin, C. Cho, and J. Paik, "Enhancement of out of focused image using fusion-based PSF estimation and restoration," *Proc. SPIE Visual Communication & Image Processing*, vol. 4310, pp. 819-829, January 2001.
- [5] D. Kundur and D. Hatzinakos, "Blind image deconvolution," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 4, pp. 43-64, May 1996.
- [6] A. Tekalp and H. Kaufman, "On statistical identification of a class of linear space-invariant image blurs using nonminimum-phase ARMA models," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. 36, no. 8, pp. 1360-1363, August 1988.
- [7] B. McCallum, "Blind deconvolution by simulated annealing," *Optics Communications*, vol. 75, pp. 101-105, February 1990.
- [8] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis, Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679-697, November 1986.
- [9] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital image processing, 2nd ed.*, Prentice Hall, 2001.
- [10] R. Lagendijk, J. Biemond, and D. Boeke, "Identification and restoration of noisy blurred image using the expectation-maximization algorithm," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. 38 no. 7, pp. 1180-1191,

July 1990.

[11] Kodak Lossless True Color Image Suite,
<http://r0k.us/graphics/kodak/>.

— 저 자 소 개 —



박 영 욱(학생회원)
2008년 강남대학교 전자공학과
학사 졸업.
2009년 현재 중앙대학교 첨단영상
대학원 석사과정 재학 중.
<주관심분야 : 자동초점, 영상안
정화, 고해상도영상>

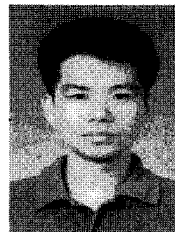


전 재 환(학생회원)
2009년 수원대학교 정보통신학과
학사 졸업.
2009년 현재 중앙대학교 첨단영상
대학원 석사과정 재학 중.
<주관심분야 : 자동초점, 영상안정
화, 고해상도영상>



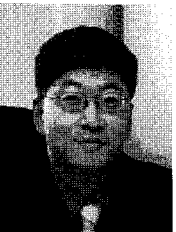
이 진 희(학생회원)
2001년 중앙대학교 전자전기
공학부 학사 졸업.
2004년 중앙대학교 전자전기
공학부 석사 졸업.
2009년 현재 중앙대학교 첨단영상
대학원 박사과정 재학 중.

<주관심분야 : 영상복원, 영상안정화>



강 남 오(정회원)-교신저자
1997년 중앙대학교 컴퓨터공학과
학사 졸업.
2000년 중앙대학교 컴퓨터공학과
석사 졸업.
2006년 중앙대학교 컴퓨터공학과
박사 졸업.

2007년 중앙대학교 첨단영상대학원 박사 후 과정.
<주관심분야 : 객체 세그먼테이션, 객체 추적, 영
상 인식>



백 준 기(평생회원)
1984년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.
1987년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사 졸업.
1990년 노스웨스턴대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.
2009년 현재 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 교수.
<주관심분야: 영상복원, 신호처리, 반도체>