

완전디지털 자동초점 시스템을 위한 부화소단위 점확산함수 추정 *

황 성 현, 신 정 호, 백 준 기
 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과
 시각 및 지능시스템 연구실

Sub-pixel Point Spread Function Estimation for Fully Digital Auto-Focusing System

Sunghyun Hwang, Jeongho Shin, and Joonki Paik
 Image Processing and Intelligent Systems Laboratory
 Department of Image Engineering

Graduate School of Advanced Imaging Science, Multimedia, and Film, Chung-Ang University
 e-mail : dejavu@wm.cau.ac.kr

Abstract

In this paper we propose a sub-pixel point spread function (PSF) estimation method for a fully digital auto-focusing system. We assume that the amount of out-of-focus is the same along the concentric circle. In order to estimate the accurate PSF, sub-pixel information is considered in the proposed PSF estimation procedure. The feasibility of the proposed algorithm is experimentally demonstrated.

I. 서론

현재 디지털 카메라나 캠코더에서 사용되고 있는 자동 초점 조절 방법에는 능동적 적외선 방식과 반 디지털 초점 조절 방식의 두 종류가 있다. 이와 같은 방식을 채용한 기존의 디지털 영상 시스템에서 초점 정도를 추정하는 부분을 해석모듈(analysis module)이라 하고 초점거리에 맞게 렌즈를 움직이는 부분을 제어모듈(control module)이라 한다. 자동 초점조절 방식 중에서 적외선 방식은 해석모듈에서의 피사체 선택 및 제어모듈에서 모터 구동부의 필요성이 약점으로 지적되고, 반 디지털 방식은 해석모듈에서 고주파 성분과 초점과의 관계에 대한 신뢰성 및 제어모듈에서 렌즈의 움직임에

* 본 연구는 교육부의 BK21 사업과, 과학기술부의 국가 지정연구실 사업 지원으로 이루어 졌습니다.

표 1. 다양한 초점 조절 방식의 분류

초점 방식	해석모듈 기준	제어모듈 조절 방식
적외선	과장의 왕복거리	렌즈의 기계적 이동
반 디지털	고주파성분 계산	렌즈의 기계적 이동
완전 디지털	PSF 추정	디지털 영상복원

따른 모터 구동부의 필요성과 초점 영상을 찾아가는 동안의 시간 지연이 문제로 인식된다. 이런 기존 방식의 약점을 보완하고 개선하기 위해서 완전 디지털 자동 초점조절 시스템이 제안되었다[1, 2]. 표 1에서 여러 가지 초점 방식들을 비교해서 정리했다.

본 논문에서는 완전 디지털 자동 초점조절 시스템을 개선하기 위해서 부화소단위의 점확산함수를 추정하는 연구를 수행하려 한다. 제안하는 개선된 완전 디지털 자동 초점조절 시스템을 그림 1에서 블록다이어그램으로 나타냈다.

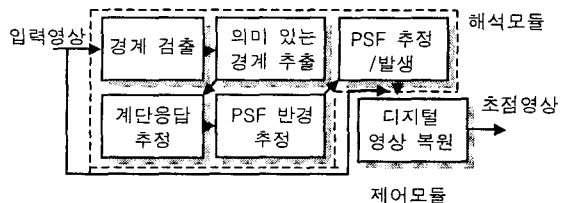


그림 1. 완전 디지털 자동 초점조절시스템의 블록다이어그램.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 절에서는 부화소 단위의 점확산함수 추정 방법을 제안한다. III 절에서는 II 절에서 추정된 점확산함수를 사용한 디지털 영상복원 기술을 소개하고, 마지막으로 실험의 결과와 결론을 각각 IV 절과 V 절에서 제시한다.

II. 부화소단위의 점확산함수 추정

본 절에서는 영상 시스템에서의 초점열화모델과 이에 해당하는 점확산함수의 추정 방법에 대해 설명한다. 카메라 모델에서 영상 시스템으로 입력되는 초점이 맞지 않은 점 광원은 영상평면에서 점이 아니라 면적을 가진 확산된 원의 형태로 나타난다. 영상의 초점에 관한 광학적 카메라 모델의 기본적인 구조를 그림 2에 나타냈다 [5].

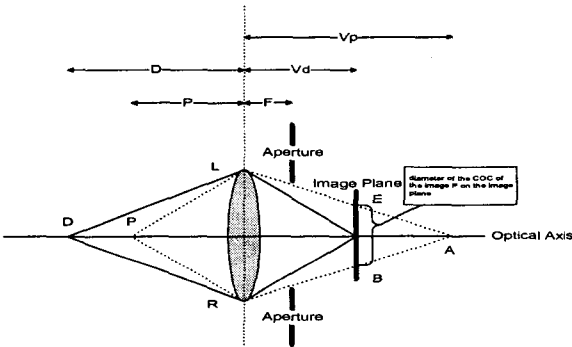


그림 2. 카메라 모델에서 점 광원(P)의 영상 평면에서 확산(EB)

초점이 맞지 않은 영상을 디지털 영상처리 기술을 사용하여 복원하기 위해서는 카메라에서 나타나는 초점 열화 모델을 정확하게 추정하고 그 열화과정을 수학적 으로 모델링 할 필요가 있다. 일반적으로 영상시스템의 열화와 복원 과정을 그림 3과 같이 표현할 수 있다 [4]. 그림 3에서 열화 시스템 H 는 해석모델에서 추정 하려는 점확산함수를 나타내며, 복원 필터 G 는 초점이 맞는 영상을 얻기 위한 제어모듈에 해당한다.

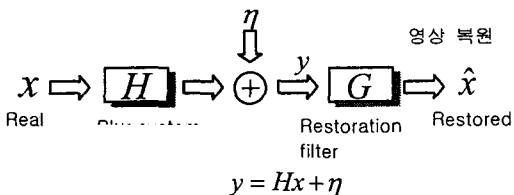


그림 3. 영상 열화와 복원 과정

영상 열화 시스템 H , 즉 점확산함수를 추정하기 위해서는 입력 영상에서 경계(edge)를 검출하고, 검출한 경계에서 단일 방향의 계단 응답을 추출하고, 궁극적으로 1 차원 계단 응답을 이용해서 2 차원 등방성 (isotropic) 점확산함수를 추정하는 과정이 필요하다.

2.1 경계 검출에 의한 유효 경계 검출

본 절에서 수행하는 경계의 검출은 점확산함수를 추정하기 위한 전처리 단계로서 첫째, 경계 검출 방법으로 영상 전체로부터 유효 경계를 추정하고 둘째, 점확산함수의 영향을 받는 유효범위 내에서 단일 방향의 단일 경계를 추출해 낸다. 이때 본 논문에서는 공간성 분과 주파수 성분을 최적으로 제한하는 경계를 검출하는 Canny 방법을 사용하였지만[3] 경계 검출에 있어서는 다른 어떤 방식을 사용해도 무관하다.

유한범위 내에 속한 연속한 경계가 유일하게 존재하고 방향이 일정할 때 그 경계에 대해 일관성을 정의한다. 일관성의 구체적인 판단은 유한 범위 내에 존재하는 경계 점이 경계의 방향을 따라 연속적으로 이어지고 그 개수가 적정의 한계를 넘는가를 판별해서, 넘을 경우 그 경계의 중심점에 대해서 유한범위 내 방향의 일관성을 인정한다.

2.2 1-차원 계단 응답의 추정

1 차원 계단 응답은 2.1 절에서 일관성을 인정 받은 경계에 대해 수직인 방향의 표본 값들이다. 이들은 이상적인 계단함수에 대한 초점열화 응답으로써 나타난다.

그리고 각 경계를 중심으로 추출한 계단 응답은 시스템에서 발생하는 잡음(noise)에 의해 다음의 식과 같이 왜곡 될 수 있다.

$$S_k(n) = S_o(n) + \eta(n) \quad (1)$$

여기서 S_o 는 노이즈가 없는 이상적인 계단응답을 나타내고, $\eta(n)$ 는 평균이 0 이고 분산이 σ_n^2 인 백색잡음 (white noise)을 나타낸다. 이런 잡음을 줄이기 위해 다음과 같이 평균을 취한다.

$$S(n) = \frac{1}{M} \sum_{k \in E} S_{o,k}(n) + \bar{\eta}(n) \quad (2)$$

여기서 M 은 일관성을 인정 받은 경계의 총수, E 는 일관성을 인정 받은 경계 점들의 집합을 나타낸다. 그리

고 잡음 $\bar{\eta}(n)$ 은 평균이 0 이고 분산이 σ_n^2/M 이다.

2.3 2-차원 점확산함수의 모델과 그 반경 추정

본 논문에서는 일반적인 카메라 모델에서 초점 열화 시스템을 표현하는 2 차원 점확산함수를 등방성의 대칭적 에너지 확산함수로 가정한다 [4]. 이산적으로 근사화한 점확산함수의 구체적인 형태는 점확산함수가 등방성의 2 차원 대칭 함수라는 선형적 지식을 바탕으로 2.4 절에서 정의한다.

점확산함수의 반경, r 은 2.2 절의 1 차원 계단응답과 점확산함수의 등방성에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = (C-1)/2, \quad (3)$$

여기서 C 는 계단 응답의 수렴 위치를 나타낸다. 이상적인 계단 응답의 수렴 위치를 그림 4에서 나타냈다.

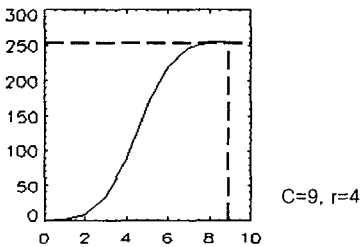


그림 4. 이상적인 계단 응답과 그것의 수렴

2.4 2-차원 대칭 등방성의 점확산함수 추정

본 절에서는 2.2 절에서 얻은 1 차원 계단 응답으로부터 2 차원 점확산함수를 추정하는 과정을 제안한다.

초점 열화시스템은 공간적으로 불변하고 선형적인 변환 함수이다. 이산적인 공간에서, 2 차원 영상이 초점 열화시스템에 의해 열화된 형태는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(m,n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} h(m-k, n-j) x(k,j), \quad (4)$$

여기서 h 는 점확산함수 나타내며, x 는 이상적인 영상을 나타낸다. 그리고 1 차원 계단 응답과 2 차원 점확산함수와의 관계식을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$S(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} h(n-k, -j) u(k,j), \quad (5)$$

여기서 u 는 식 (7)과 같다.

$$u(k,j) = \begin{cases} 1 & k \geq 0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (6)$$

본 논문에서는 점확산함수의 등방성을 고려해서,

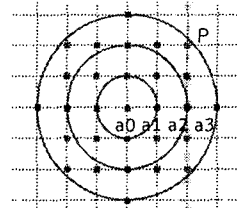


그림 5. 부화소 단위 2 차원 점확산함수의 등방성 구조

그림 5와 같이 수평(수직)축을 벗어난 임의의 방향에 대한 부화소 단위 점확산함수의 표본값을 추정한다. 임의의 위치에서 제한하는 점확산함수의 표본값은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$PSF(m,n) = \begin{cases} (M+1-\sqrt{m^2+n^2})a_M \\ + (\sqrt{m^2+n^2}-M)a_{M+1}, & \sqrt{m^2+n^2} \leq r \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (7)$$

여기서 $M = \lfloor \sqrt{m^2+n^2} \rfloor$, 이고 a_M 은 수평(수직)축에서 M 번째 화소에서 점확산함수의 표본값이다.

결과적으로 추정된 반경에 대한 전체적인 점확산함수는 아래와 같은 행렬 형태로 근사화할 수 있다.

$$h(m,n) = \begin{bmatrix} PSF(-r,r) & \dots & PSF(0,r) & \dots & PSF(r,r) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ PSF(-r,0) & \dots & PSF(0,0) & \dots & PSF(r,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ PSF(-r,-r) & \dots & PSF(0,-r) & \dots & PSF(r,-r) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

그리고 식 (5)과 (7) 그리고 (8)에 의해 화소와 중첩되는 점확산함수의 표본값, a_k 는 다음 연립 방정식에 의해 추정된다. 단, $k = 0, \dots, r$.

$$\begin{aligned} S(0) &= S(r-r) = PSF(r,0) = a_r \\ &\vdots \\ S(k) &= S(r-m) = S(r-m-1) + PSF(m,0) + \\ &\quad 2 \times \{PSF(m,1) + \dots + PSF(m, N_m)\} \end{aligned}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &\vdots \\ S(r) &= S(r-0) = S(r-1) + PSF(0,0) + \\ &\quad 2 \times \{PSF(0,1) + \dots + PSF(0,r)\} \end{aligned}$$

여기서 $S(k)$ 는 계단 응답이고 $N_m = \lfloor \sqrt{r^2 - m^2} \rfloor$.

III. 디지털 영상 복원

본 절에서는 II 절에서 추정된 점확산함수를 가지고 제약적최소제곱(CLS) 영상 복원 필터를 이용해서 초점이 맞지 않은 영상을 복원하는 과정을 제안한다.

CLS 필터의 주파수 응답은 다음과 같다.

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

여기서 H 와 G_{CLS} 는 각각, 점확산함수 $h(m,n)$ 와 복원 필터 g_{CLS} 의 2 차원 이산 푸리에 변환(DFT)을 나타내고 C 는 고주파 통과 필터 c 의 임펄스 응답을 나타낸다. 그리고 λ 는 평탄 조절 정칙화 매개변수다[4].

IV. 실험 결과

실험에 사용한 디지털 카메라는 Cannon 사의 'Power Shot G1' 이라는 제품이고, 전체적인 실험에서 카메라의 셔터 스피드는 1/60 초, F 수치는 2.8, 그리고 카메라와 피사체 사이의 거리는 30cm 로 고정한다.

실험 과정은 다음과 같다. 우선 이상적인 흑백 계단 영상을 그림 6(a)와 같이 초점이 맞지 않게 촬영하여 얻는다. 획득한 영상에서 계단 응답을 그림 6 (c)와 같이 추정하고 부화소단위 점확산함수를 생성한다 (그림 6 (d)). 그리고 카메라의 환경을 종전과 동일하게 유지하고 실제 영상을 촬영하면 그림 7(a)와 같이 초점이 맞지 않은 영상을 얻는다. 최종적으로 이미 생성한 점확산함수를 이용해서 CLS 필터를 구성하고 영상을 복원한 것이 그림 7(b)다. 그리고 그림 7 (c), (d) 는 다른 사진을 촬영하여 복원한 결과다.

V. 결론

본 논문에서 제안한 부화소 단위 점확산함수 추정 알고리즘은 기존의 점확산함수를 수평, 수직의 격자에 서뿐만 아니라 임의의 방향에 대해서 부화소 단위 점확산함수의 표본 값을 보간함으로써 보다 정확한 등방성의 점확산함수를 추정할 수 있었다.

반면, 제안한 알고리즘은 초점의 열화 정도가 큰 영상에 대해서는 불안정한 해를 생성했고 복원이 용이하지 못 한 결점을 드러냈다. 이에 해를 구하는 과정에서 잡음의 영향을 고려하고 복수 해를 가질 가능성에 대해 검토해 볼 필요가 있다.

참고문헌

[1] S. K. Kim, T. K. Kim, and J. K. Paik, "A fully digital auto focusing system based on image restoration," *Proc. 1997 IEEE Region10 Annual Conf.*, Vol.1, pp.13-16, December 1997.

[2] S. K. Kim and J. K. Paik, "Out-of-focus blur estimation and restoration for digital auto-focusing system," *Electronics letters*, vol. 34, no. 12, pp. 1217-1219, June 1998.

[3] J. S. Yoon, J. H. Shin, C. N. Cho, and J. K. Paik, "Enhancement of Out of Focused Image using Fusion-based PSF Estimation and Restoration," *Proc. SPIE Visual Comm., Image Proc.*, vol. 4310, pp. 819-829, San Jose, January, 2001.

[4] H. C. Andrews and B. R. Hunt, *Digital image restoration*, Prentice Hall, 1977.

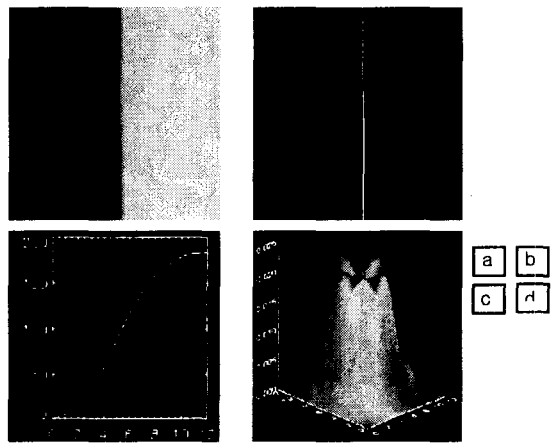


그림 6. (a) 초점 열화된 계단 영상, (b) (a)의 유효경계, (c) 유효경계를 기준으로 추출한 계단 응답의 평균, (d) 제안한 방식으로 추정된 점확산함수



(a) 초점 열화 영상 (b) 복원된 영상, $\lambda = 0.6$



(c) 초점 열화 영상 (d) 복원된 영상, $\lambda = 0.2$

그림 7. 초점이 맞지 않은 영상과 그것을 복원한 결과 (λ 는 CLS 필터의 평탄 조절 정칙화 매개변수).