

스펙트럼 분석에 의한 광영상복원에 관한 연구

(A Study on the Optical Image Deblurring by Spectrum Analysis)

李丞玄*, 金恩洙*, 楊仁應*

(Seung Hyun Lee, Eun Soo Kim and In Eung Young)

要 約

일반적으로 광영상복원은 손상된 시스템의 blurred PSF (point spread function)을 모델링하여 인버스 필터를 제작함으로써 이루어진다.

본 논문에서는 알 수 없는 요인으로 손상된 사진의 복원을 위해 defocus로 가정된 손상된 사진 자체의 푸리에 스펙트럼을 분석함으로써 blurred PSF를 구하고 이로부터 진폭과 위상정보를 동시에 지니며, 감마값 2를 갖는 positive transparency로 구성된 단일 인버스필터를 제작하여 광영상복원을 실현하였다.

Abstract

A holographic inverse filter has been used for optical image deblurring by modeling the PSF (point spread function) of a blurred system. This paper presents the optical image restoration of an accidentally blurred photograph by using a single inverse filter which is obtained from a blurred PSF by analyzing the Fourier spectrum of the supposedly defocused photograph itself. The filter, a positive transparency having gamma of 2, has amplitude and phase informations simultaneously.

I. 序 論

광정보처리의 한 분야인 손상된 2차원의 광영상에 대한 복원은, 넓은 대역폭과 실시간처리의 장점을 지니고 있어^[1,2] 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

사진의 초점이 벗어난 경우나 선형적인 움직임으로 훼손된 경우, 혹은 알 수 없는 요인으로 손상된 경우 등과 같이 시스템이 선형이고 공간불변일 때의 영상복원은, 그 손상 요인을 모델링하여 인버스필터를 구성하고 이를 이용한 간단한 광학 시스템으로써 실행될

수가 있다.^[3]

여기서, 인버스필터는 bipolar이며 infinite poles의 함수이므로 실제로 실현이 어려우나 광학적인 복소 (complex) 필터로 제작함으로써 어느정도 해상력상의 손실을 가정할 때 이러한 문제는 해결될 수 있다. 즉 인버스필터를 제작하기 위한 방법으로는 일반적으로 진폭필터와 위상필터로 구성되는 복합필터가 사용되었는데, 1960년 Tsujiuchi는 처음으로 진폭변조와 위상변조된 마스크들을 샌드위치한 복합필터를 구성하였고,^[4] 1967년 Stroke와 Zech는 홀로그래프에 의한 복합필터를 제작하여 사용한 바 있다.^[5]

그러나, 광영상복원에 있어 복합필터를 사용하는 경우 진폭필터와 위상필터를 공간주파수에 대하여 서로 정확히 겹쳐야 하며, 이 두개의 필터로부터 산란되는 광에 의한 speckle noise를 갖는 등의 단점을 갖게 된

*正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwang Woon Univ.)
接受日字 : 1985年 9月 24日

다. 따라서, 최근 하나의 필터에 진폭과 위상정보를 동시에 기록하는 인버스필터의 단일화에 대한 연구가 이루어지고 있는데 1980년에 Vasu와 Rogers는 Doubly blurred image에 의한 방법⁽⁸⁾을, 1982년 Zetzsche는 Modified Fourier hologram에 의한 방법을,⁽⁷⁾ 그리고 1985년 Cho와 Lee는 Doubly blurred PSF에 의한 방법⁽⁹⁾ 등을 제안하였다.

일반적으로 인버스필터에 의한 광영상복원을 행하는데 있어서는 손상된 사진의 강도분포, 원래 사진의 강도분포, blurred PSF(point spread function)의 세 요소를 필요로 하며 필터의 제작을 위한 시스템의 blurred PSF를 구하기 위해서는 손상 시스템을 알 수 있어야 한다.

그러나 손상된 사진들의 대부분은 손상시스템으로부터 blurred PSF를 구하기가 불가능하며 이와같이 실질적으로 손상시스템을 알 수 없는 경우도 광영상복원이 가능해야 할 것이다.

지금까지는 주로 인버스필터 제작의 단일화에 그 연구가 집중되어 왔으며 손상시스템의 blurred PSF이미 구해져 있다고 가정(또는 손상시스템을 알고있는 경우)하고 인버스필터 제작을 단일화 하는것에 그 연구목적이 있었다.

그러나 단일 인버스필터를 보다 실질적으로 범용성 있게 응용하기 위해서는 일반적으로 전혀 알 수 없는 손상시스템에 의해 손상된 경우 사진 자체로부터 blurred PSF를 구하는 방법이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 1975년 Stroke에 의해 발표된 손상요인에 따라 푸리에 스펙트럼이 달리 나타난다는 간단한 실험결과⁽¹⁾를 Zetzsche의 단일 인버스필터 이론⁽⁷⁾에 적용하여 보다 범용성있는 단일 인버스필터에 의한 광영상복원에 대한 실험결과에 대해서 논하고자 한다.

II. 理 論

1. 단일 인버스필터 이론⁽⁷⁾

손상된 광학 시스템이 선형이고 공간불변임을 가정하면, 손상된 광영상의 강도분포 $g(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x', y') h(x-x', y-y') dx' dy' = o(x, y) * h(x, y) \tag{1}$$

여기서 $o(x, y)$ 는 본래의 영상, $h(x, y)$ 는 blurred PSF이며 *는 convolution, 그리고 x, y 는 spatial coordinate를 의미한다.

식(1)을 푸리에 변환하면 다음과 같이 표현된다.

$$G(p, q) = O(p, q) H(p, q) \tag{2}$$

윗식에서 p 와 q 는 spatial frequency coordinate이며 각각 $x/\lambda f, y/\lambda f$ 이고 λ 는 광원의 파장, f 는 렌즈의 초점거리, $H(p, q)$ 는 $|H(p, q)| \exp[j\Phi]$ 이다.

식(2)에 인버스필터 $1/H(p, q)$ 을 적용시켜 복원된 푸리에 스펙트럼을 얻는다.

$$G(p, q) \frac{1}{H(p, q)} = O(p, q) \tag{3}$$

식(3)을 역 푸리에 변환하여 본래의 복원된 영상을 얻을 수 있다. 이와같이 원래의 영상이 손상되고, 손상된 영상을 복원하는 일반적인 모델은⁽¹⁰⁾ 그림1과 같으며, 이 때 출력인 $o'(x, y)$ 는 실제로 있어서 완전한 복원($o(x, y)$ 가 이루어질 수 없음에 따른 최적의 복원된 영상을 나타낸다.⁽¹¹⁾

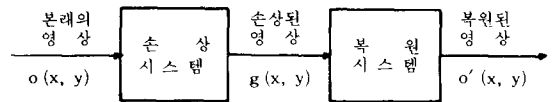


그림 1. 영상복원 계통도
Fig. 1. Image deblurring system diagram.

이러한 이론을 토대로 초기의 인버스필터는 진폭필터와 위상필터를 샌드위치하여 사용하였으나 본 논문에서는 Zetzsche의 이론에 따른 진폭과 위상정보를 동시에 갖는 단일 인버스필터를 제작하고자 한다.⁽⁷⁾

먼저, photographic recording equation

$$t(p, q) = c(|H(p, q)|^2 \Delta t)^{-\gamma/2} \tag{4}$$

$t(p, q)$; 진폭투과율, c ; 상수

γ ; H-D곡선 선형영역의 기울기, Δt ; 노출시간으로부터 그림2의 초점평면 x 에 제작된 pin-hole h 를 위치시키고 초점평면 x' 에서 노출된 필름의 감마값을 1로 조절하여 진폭투과율이 $|H|$ 에 비례하는 진폭필터인 식(5)를 얻을 수 있다.

$$t_A(p, q) = k_A \frac{1}{|H|} \tag{5}$$

$t_A(p, q)$; 진폭필터의 투과율, k_A ; 상수

다음, 그림3과 같이 렌즈의 초점평면 x' 위에 제작된 진폭필터를 정치시키고 그 바로 뒤에 노출이 안된 필름 p 를 위치시키며, 초점평면 x 의 광축 상에는 blurred PSF h 를 놓고 x 축으로 a 만큼 떨어진 거리에 점광원 δ 를 위치시킨다. 이때 진폭필터로 입사되는 blurred OTF (Optical Transfer Function) $H(p, q)$ 와 진폭필터 $1/|H|$ 의 공간주파수를 정확히 일치시킬 경우 필름 p 로 입사되는 광의 강도분포 $I(p, q)$ 는 다음과 같다.

$$I(p, q) = \frac{k_1^2}{|H|^2} (H + e^{j\phi}) (H^* + e^{-j\phi}) \quad (6)$$

식(6)의 강도분포가 필름의 진폭투과율 $t_p(p, q)$ 에 비례하도록 positive transparency를 구성하는데, 최대의 dynamic range를 얻기위해 식(7)과 같이 두번의 현상($\gamma_{n1}=1, \gamma_{n2}=2$)을 행한다.^[12]

$$t_p(p, q) = k_p I(p, q)^{\gamma_{p/2}} \quad (7)$$

($\gamma_p = \gamma_{n1} \cdot \gamma_{n2}, k_p$; 상수)

결론적으로 positive transparency는

$$\begin{aligned} t(p, q) &= I(p, q) \\ &= \frac{1}{|H|^2} (HH^* + 1 + He^{-j\phi} + H^*e^{j\phi}) \\ &= 1 + \frac{1}{|H|^2} + \frac{1}{H^*}e^{-j\phi} + \frac{1}{H}e^{j\phi} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)이 되며 마지막 항은 $1/H$ 에 비례하므로 인버스필터의 역할을 하게된다. 그림 4는 제작된 단일 인버스필터를 이용한 광영상복원 시스템이며, 입력평면에 손상된 영상을 위치시키고 제작된 단일 인버스필터를 필터평면에 놓으므로 영상복원이 행하여진다.

이때 출력평면에는 광축상과, $x = \pm a$ 인 위치에 영상이 나타나게 되는데, 식(8)의 마지막항인 우리가 원하는 복원된 영상은 x 축으로 $-a$ 만큼 떨어진 거리에 위치하게 된다.

2. 스펙트럼 분석^[13]

일반적으로 인버스필터에 의한 광영상복원을 행할지는 복합 인버스필터이던 혹은 단일 인버스필터이던 손상시스템의 blurred PSF을 알아야 그 제작이 가능하다.

손상시스템을 알 경우는 물론 blurred PSF을 쉽게 구할 수 있으나 인버스필터를 보다 실질적으로 범용성 있게 응용하기 위해서는 전혀 알 수 없는 손상시스템에 의해 손상된 경우 사진 자체로부터 blurred PSF을 구하는 방법이 필요하다.

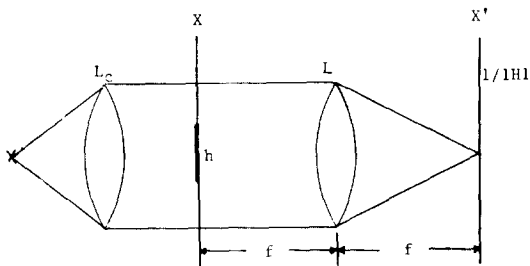


그림 2. 진폭필터의 제작을 위한 광학 시스템 (h; blurred PSF)
Fig. 2. Optical system of generating an amplitude filter (h; blurred PSF).

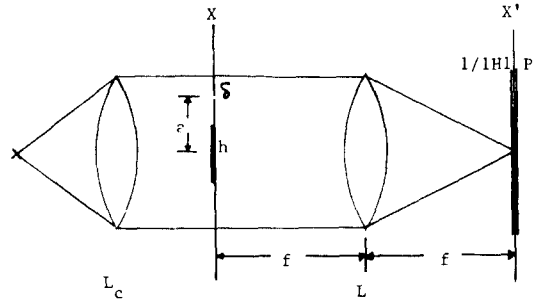


그림 3. 단일 인버스필터 제작을 위한 광학 시스템
Fig. 3. Optical system of making a single inverse filter.

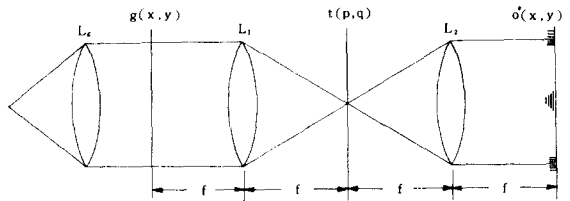


그림 4. 광영상복원 시스템
Fig. 4. Optical system for image deblurring.

이는 blurred transparency에 평행한 레이저 빔을 조사하고 transparency를 통과한 후 푸리에 변환 렌즈의 초점평면에서 그 회절패턴(스펙트럼)을 분석함으로써 행할 수 있다.

예를들면, 선형적인 움직임으로 훼손된 영상의 스펙트럼은 slit의 스펙트럼의 경우와 유사하게 나타나게 되어 이 스펙트럼으로부터 근사 길이의 slit aperture를 만들어 인버스필터를 제작함으로써 광영상복원이 행하여진다.^[1]

또한 사진의 초점이 벗어난 경우를 가정할때 defocus된 영상의 푸리에 스펙트럼은 마치 원래 초점이 맞은 정확한 영상이 defocus된 만큼의 pin-hole을 통과시켜 회절된 패턴으로 나타나게 된다.

이때 필름위에 형성되는 blurred 점광원의 직경을 do 라하면 blurred PSF h와 blurred OTF H는 (9)식으로 표시된다. (그림5)

$$\begin{aligned} h(r) &= \text{circ}\left(\frac{r}{d_0/2}\right) \\ H(\rho) &= \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \frac{J_1(\pi d_0 \rho)}{d_0 \rho/2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 함수 $\text{circ}(r/d_0/2)$ 는 r 이 $d_0/2$ 보다 작거나 같을때 1의 값을 갖고 그렇지 않을때 0이다. r 와 ρ 는 aperture 평면과 푸리에평면에서의 radius coordinate이며, $J_1(\cdot)$ 은 제 1종 1차 Bessel 함수 이다.

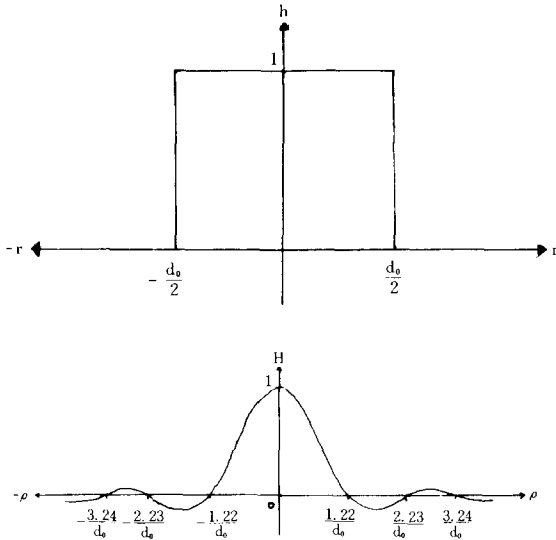


그림 5. 초점이 벗어난 영상의 PSF(h)와 OTF(H)
 Fig. 5. Blurred PSF(h) and OTF(H) for defocusing blur.

식(9)로부터 직경 d_0 인 circular aperture에 평면파를 조사함에 따른 Fraunhofer 회절패턴의 강도분포 I 는 다음과 같다.

$$I = I_0 \left[2 \frac{J_1(\pi d_0 \rho)}{\pi d_0 \rho} \right]^2 \quad (10)$$

I_0 ; 상수

식(10)의 강도분포는 연속적인 maxima와 minima를 포함하게 되는데 이를 Airy 패턴¹¹⁾이라 한다.

$$\Delta r_0 = \frac{1.22 \lambda f}{d_0} \quad (11)$$

Δr_0 ; first minimum까지의 반경

d_0 ; circular aperture 직경

식(11)로부터 first minimum 반경을 측정하여 circular aperture의 직경을 얻으며, Δr_0 와 d_0 사이에는 역비례 관계가 있음을 알 수 있다.

즉, 신호성분은 defocus된 만큼의 circular aperture 내에 포함되어 스펙트럼 분석시에 나타나는 Airy disk의 background가 되며, defocus된 정도가 클 경우 Airy disk의 first minimum 반경은 매우 작게 된다.

III. 실험 및 결과고찰

H-D 곡선 선형영역의 기울기인 photographic 감마는 감광유제, 현상액, 현상시간에 의존한다.¹²⁾

본 실험에서는 HRP(High Resolution Plate) 대신 상용 HR-II 마이크로필름에 현상액 copinal을 사용하

여 현상시간에 따른 감마값을 측정하였는데, 현상시간을 여러 단계로 나누어 노출시간에 따른 감광밀도를 구한 결과 현상시간 5분과 15분에 감마값 1과 2를 얻을 수 있었다.

Defocus된 영상의 푸리에 스펙트럼은 원래의 영상이 defocus된 만큼의 pin-hole(즉, circular aperture)을 통과한 회절패턴으로 나타나게 되며, 신호성분은 aperture내에 포함되어 스펙트럼 이론에서 설명한 바와 같이 circular aperture의 회절패턴인 Airy disk의 background로 나타나게 된다.

Defocus로 가정하여 제작된 손상사진이 푸리에 변환렌즈($f=100\text{mm}$)를 통과한 스펙트럼은 그림 6과 같다.

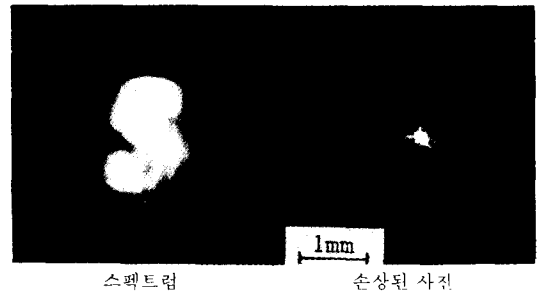


그림 6. 손상된 사진과 스펙트럼
 Fig. 6. Blurred photograph and spectrum.

여기서, first minimum반경 ($\Delta r_0 \approx 0.18\text{mm}$)을 측정하여 식(11)로부터 단일 인버스필터의 제작을 위한 pin-hole 직경 ($d_0=0.43\text{mm}$)을 얻고 이는 곧 hypothesized blurred PSF이 된다.

First minimum 반경이 매우 작아 측정이 어려운 경우는 가시적으로 확인된 반경으로부터 여러개의 blurred PSF으로 제작된 인버스필터를 사용하여 영상복원을 행하므로 최적의 blurred PSF을 구하여 역으로 이에대한 first minimum 반경을 유추할 수 있다.

그림 2의 초점평면인 x에 위치한 blurred PSF h가 렌즈를 통과한 후 초점평면 x'에서 노출된 필름의 감마값을 1로 현상하여 진폭필터 $I/|H|$ 을 제작하였다.(그림7)

단일 인버스필터의 제작을 위한 구성은 그림 3과 같으며 단일 인버스필터인 positive transparency 에서 넓은 dynamic range를 얻기 위해 노출된 필름 p의 감마값을 1이 되게 현상(recording)한 다음, 현상된 필름을 노출이 되지 않은 필름에 밀착시켜 강도가 균일한 광을 입사시키고, 여기서 노출된 필름을 감마값이 2가 되도록 현상(printing)하여 단일 인버스필터의 제

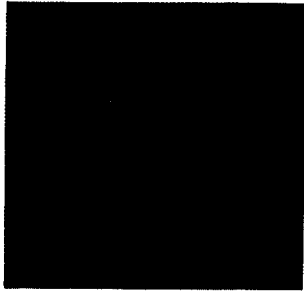


그림 7. 진폭필터 (I/|H|)
Fig. 7. Amplitude filter.

작을 행하였다.

Blurred PSF h 와 점광원 δ 사이의 간격 a 는 7mm로 하였으며, $\gamma_p = \gamma_{n1} \gamma_{n2} = 2$ 의 감마값을 갖는 단일 인버스필터를 그림 8에 보인다. 그림 9는 손상된 영상과 복원된 영상 그리고 원래의 영상이다.

광영상복원 시스템 구성을 위한 점광원은 6328A* He-Ne레이저 빔을 40배 대물렌즈로 25 μ m pin-hole에 집속하여 사용하였고, 사용된 렌즈의 초점거리는 300mm였다.

제작된 단일 인버스필터를 필터평면에 설치하여 손상된 영상의 복원을 하는 경우에 필터의 위치가 조금만 변해도 영상회복이 제대로 이루어지지 않으므로 공간주파수에 대하여 필터를 정확히 일치시켜야 한다.



그림 8. 단일 인버스필터 (I/H)
Fig. 8. Single inverse filter.

IV. 結 論

손상된 사진들의 대부분은 그 손상시스템 혹은 손상된 정도를 알기가 어려우며, 이러한 경우 회절패턴에 관한 지식으로부터 손상된 사진의 푸리에 스펙트럼을 분석하여 영상복원을 실행할 수 있다.

본 논문에서는 알 수 없는 요인으로 손상된 사진의 복원을 위하여 초점이 벗어나 손상된 경우로 가정된



그림 9. 손상된 영상과 복원된 영상 및 원래의 영상
Fig. 9. Blurred, deblurred image, and original image.

사진의 푸리에 스펙트럼을 분석하여 blurred PSF을 유추함으로써 제작된 보다 범용성있는 단일 인버스필터를 이용한 광영상복원을 실행하였다.

단일 인버스필터는 상용 마이크로 필름을 사용하여 넓은 범위의 dynamic range를 갖도록 감마값 2로 조절된 positive transparency로 구성하였다.

선형적인 움직임에 의한 손상, 사인파적인 움직임에 의한 손상, 그리고 static defocusing에 의한 손상등과 같이 blurred PSF이 공간불변인 손상영상들에 따른 단일 인버스필터 제작과 손상된 사진의 푸리에 스펙트럼 분석과의 연결은 알 수 없는 형태로 훼손된 영상에 대한 손쉽고 간단한 영상복원을 행하여 줄 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

[1] A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-10, pp. 139-145, 1964.
[2] A. Vander Lugt, "Coherent Optical Processing," *Proc. of IEEE*, vol. 62, no. 10, pp. 1300-1319, 1974.

- [3] G.W. Stroke and M.Halioua, "A new method for rapid realization of the high-resolution extended-range holographic image-deblurring filter," *Phys. Lett.*, vol. 39A, pp. 269-270, 1972.
- [4] J. Tsujiuchi, "Correction of optical images by compensation of aberrations and by spatial frequency filtering," in *Progress in Optics*, II, E. Wolf(ed.), Noth-Holand, Amsterdam, pp. 133-180, 1963.
- [5] G.W. Stroke and R.G. Zech, "A Posteriori image-correcting deconvolution by holographic Fourier-transform division," *Phys. Lett.*, vol. 25A, pp. 89-90, 1967.
- [6] R.M. Vasu and G.L. Rogers, "Deblurring with a positive only filter after further blurring," *Optics Comm.*, vol. 35, pp. 175-178, 1980.
- [7] C. Zetzsche, "Simplified realization of the holographic inverse filter; a new method," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 1077-1079, 1982.
- [8] Jae Cheol Jo and Sang Soo Lee, "Unconstrained single inverse deblurring filter made from blurred PSF and doubly blurred PSF," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 1, 1983.
- [9] G.W. Stroke et al., "Retrieval of good images from accidentally blurred photographs," *Science*, vol. 189, pp. 261-263, 1975.
- [10] T.S. Huang, W.F. Schreiber, and O.J. Tretiak, "Image Processing," *Proc. of IEEE*, vol. 59, no. 11, pp. 1586-1609, 1971.
- [11] F.T.S. Yu, "Image Restoration, Uncertainty, and Information," *Appl. Opt.*, vol. 8, pp. 53-58, 1969.
- [12] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, pp. 141-197, 1968.
- [13] G.W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, New York, second ed., pp. 97-180, 1969.
-