

디지털 홀로그램 노이즈 제거 기술

□ 조총상, 최병호 / 전자부품연구원

1. 서론

본 원고에서는 고화질 디지털 홀로그램을 위한 디지털 홀로그램 노이즈 제거 기술에 대해 소개한다. 디지털 홀로그램은 3D 영상이 부각되면서 점점 많은 관심을 받고 있다[1]. 기존 스테레오 3D 등이 갖는 문제점에 대해서 홀로그램은 실제 물체의 3차원 정보를 정확하게 제공함으로써 기존의 3D가 갖는 문제점에 대해서 자유롭다[1]. 홀로그램 생성을 위한 광학 구조에 따라서 두 가지 홀로그램 생성 구조로 나누어지며, 각기 서로 다른 장단점을 갖고 있다. 첫 번째 구조는 <그림 1>과 같은 in-line 홀로그램이고, 두 번째 구조는 <그림 2>와 같은 off-axis 홀로그램이다. 디지털 홀로그램 복원에서 off-axis 홀로그램은 in-line 홀로그램과 비교하였을 때 역

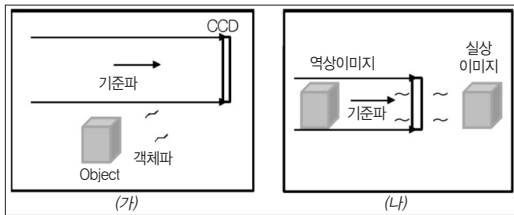
상이미지를 쉽게 제거할 수 있는 장점이 있다. 하지만 off-axis 홀로그램은 역상 이미지 제거를 위해 밴드폭의 절반을 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 in-line 홀로그램은 넓은 밴드폭을 갖는 커다란 장점을 갖고 있으나 역상 이미지가 실상 이미지와 중첩되는 문제를 갖고 있다. 그러므로 넓은 밴드폭을 갖는 in-line 홀로그램의 장점을 살리기 위해서는 in-line 홀로그램에서 역상 이미지를 제거하는 것이 필요하다[2]. 또한 홀로그램은 간섭성을 갖는 빛을 사용하기 때문에 간섭성에 의해 물체 표면에서 빛이 랜덤하게 요동하며 흩어지는 특성을 갖는다. 이러한 성질에 의해 복원된 디지털 홀로그램 결과에서 밝고 어두운 반점이 발생하는 스펙클 노이즈가 발생하며, 이러한 노이즈는 홀로그램 생성 광학 구조에 상관없이 발생하므로, 두 가지 구조 모두 스펙

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [K001810039169, 3차원 공간 정보 획득 및 재현을 위한 디지털 홀로그래픽 3D 영상 시스템용 원천 기술 개발]

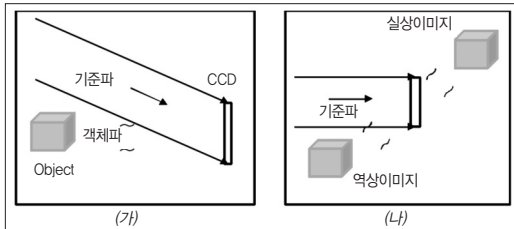
클 노이즈 제거에 대한 방법을 고려해야 한다. 그러므로 고화질 디지털 홀로그램 복원을 위해서는 이러한 노이즈 제거에 대한 방법들이 고안되어야 한다.

II. 디지털 홀로그램 노이즈

홀로그램 생성과 복원 구조는 <그림 1>, <그림 2>에서와 같이 간단히 표현될 수 있다.



<그림 1> in-line 홀로그램 생성과 복원에 대한 단순 구조도; (가) 생성, (나) 복원



<그림 2> off-axis 홀로그램 생성과 복원에 대한 단순 구조도; (가) 생성, (나) 복원

홀로그램 생성 구조는 <그림 1>, <그림 2> (가)에서 보이는 바와 같이 기준파와 객체파가 간섭을 일으켜서 간섭 패턴을 생성하게 되고, 객체에 대한 정보를 포함하고 있는 간섭 패턴이 CCD(Charge Coupled Device)에 저장되어 디지털 홀로그램 데이터가 획득된다. 이러한 과정을 수식적으로 표현하기 위하여, 기준파와 객체파는 각각 수식 (1)에서와 같이 E_R 와 E_O 로 표현된다.

$$E_o = a_o \exp[i\phi_o], E_R = a_R \exp[i\phi_R] \quad (1)$$

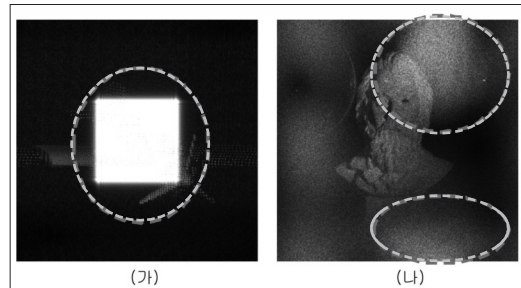
여기서 a_R 는 기준파의 에너지, a_o 는 객체파의 에너지, ϕ_R 는 기준파의 위상 그리고 ϕ_o 는 객체파의 위상이다.

간섭에 의한 홀로그램 데이터는 기준파와 객체파의 간섭으로 발생하므로 이러한 과정을 수식으로 표현하면 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$I(x, y) = |E_R + E_O|^2 \quad (2) \\ = a_R^2 + a_o^2 + E_O E_R^* + E_R E_O^*$$

수식 (2)에서 홀로그램 데이터가 생성될 때 기준파와 객체파의 비회절된 성분인 DC(Direct Current)항, $a_R^2 + a_o^2$ 이 발생하고 역상 이미지 항과 실상 이미지 항이 발생된다. 생성된 홀로그램 데이터에서 DC항과 역상 이미지 항은 필요없는 데이터로서 디지털 홀로그램 복원시 노이즈에 해당하게 된다.

실제 디지털 홀로그램을 복원하여 결과를 보면 <그림 3>(가)에서와 같이 복원 결과의 가운데 영역에 비회절된 성분인 DC 노이즈가 강하게 나타나며, <그림 3>(나)를 보면 점선으로 표시된 영역처럼 역상 이미지가 블러되어 뿌연 연기처럼 보이는 영역을 확인할 수 있다. 또한 광학적으로 취득된 홀로그램 데이터는 앞에서 설명된 간섭성이 있는 광원의 사용



<그림 3> 디지털 홀로그램 복원에서 발생하는 홀로그램의 대표적 노이즈; (가) DC 노이즈, (나) 역상 이미지

에 의해 스펙클노이즈가 발생한다.

그러므로 넓은 밴드폭을 제공하면서, 고화질 디지털 홀로그래를 복원하기 위해서는 앞에서 설명된 DC 노이즈, 역상 이미지, 스펙클 노이즈를 제거하기 위한 방법을 고안해야 얻을 수 있다.

III. 고화질 디지털 홀로그래를 복원을 위한 노이즈 제거 기술

1. DC 노이즈를 제거하기 위한 기술

디지털 홀로그래 생성에서 DC 노이즈 발생은 앞에서 설명된 홀로그래 생성 수식을 기반으로 항상 발생함을 알 수 있으며, 고화질 디지털 홀로그래 복원을 위해서는 제거 되어야 한다.

디지털 홀로그래 복원에서 DC 노이즈를 제거하기 위한 방법으로 DC신호가 갖는 주파수 성질을 바탕으로 전체 홀로그래 신호의 평균 강도를 구하고 수식 (3)에서와 같이 저장된 홀로그래 취득 데이터, $I(x,y)$ 에서 평균값을 차감하여 DC 노이즈에 의해 바이어스된 정도를 낮춤으로써 DC 노이즈에 의한 영향을 감소시킨다.

$$I'(x,y) = I(x,y) - \frac{1}{N \times M} \sum_x \sum_y I(x,y) \quad (3)$$

여기서 N 과 M 은 프린지 패턴 데이터의 열과 행의 샘플 수이다.

이와 같은 평균값 차감 방법은 낮은 복잡도를 갖는 장점은 있지만 DC 노이즈 제거 성능이 상당히 제한적인 단점을 갖고 있다.

DC 노이즈를 제거하기 위한 또 다른 방법으로, 고대역 통과 필터를 사용하는 방법이 있다. 고대역

통과 필터를 사용하는 방법은 수식 (4)와 같이 프린지 패턴 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해서 주파수 영역으로 변환하고, 주파수 영역에서 고대역 통과 필터, $H(u,v)$ 를 적용하여 프린지 패턴의 주파수 영역에서 저대역 부분, 즉 DC 노이즈 부분을 제거한다. 주파수 영역에서의 필터 결과는 역FFT를 통해서 DC 노이즈가 감소된 프린지 패턴으로 변환된다.

$$I'(x,y) = F^{-1} \{ F [I(x,y)] \cdot H(u,v) \} \quad (4)$$

$$H(u,v) = [0 \text{ if } D(u,v) \leq D_0, 1 \text{ otherwise}]$$

여기서 F 는 FFT를 나타낸다.

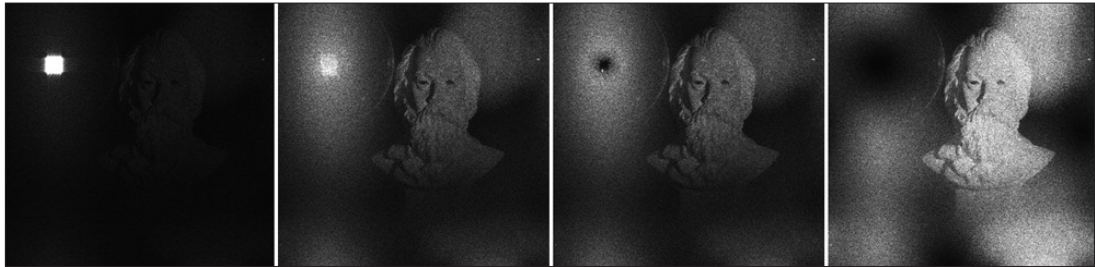
고대역 통과 필터를 사용하는 방법은 고대역 통과 필터의 차단주파수를 결정해야 하는 문제가 있다. 즉, 정확한 차단주파수를 사용하면 높은 DC 노이즈 제거 성능을 보이지만, 그렇지 못한 경우 디지털 홀로그래를 통해 복원된 결과에서 이미지 데이터 손실이 발생할 수 있는 단점을 갖고 있다.

프린지패턴에서 직접 DC 노이즈를 제거하는 방법으로 수식 5와 같이 라플라스연산 모듈을 사용하는 방법이 있다[3].

$$I'(x,y) = \nabla^2 I(x,y) \quad (5)$$

여기서 ∇^2 은 라플라스 연산 기호이다.

라플라스연산 모듈을 사용하는 방법은 미분 연산자의 성질을 사용하는 방법으로, 지수함수(exponential function)에 적용 되었을 때 지수함수의 크기만 변화 시킬 뿐 함수의 원형을 유지하는 특성과, 천천히 변하는 DC에 가까운 성분은 미분연산에 의해 제거 또는 감소시키는 특성을 사용한 방법이다. 또한 2차 미분이 이루어지므로 위상과 크기의 부호가 항상 원형과 동일하게 유지되는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 DC 노이즈 제거 방법의 성능 비교; (가) DC 노이즈가 제거 적용안함, (나) 평균값 차감법 사용, (다) 고대역 통과 필터 사용, (라) 라플라시안 연산자 사용방법

DC 노이즈 제거 방법들의 성능을 비교한 결과가 〈그림 4〉에 보여진다. 〈그림 4〉(가)는 DC 노이즈가 제거되지 않은 결과이고, 〈그림 4〉(나)는 평균값 차감법, 〈그림 4〉(다)는 고대역 통과 필터, 〈그림 4〉(라)는 라플라스 모듈이 사용된 결과이다.

2. 역상 이미지를 제거하기 위한 기술

In-line 홀로그래프 구조에서 발생하는 역상 이미지는 in-line 홀로그래프 구조가 갖는 커다란 문제점이다. 이를 제거하기 위한 M. Kujavinska의 연구로 역상 이미지에 초점을 맞추어 복원된 결과에서 역상 부분을 제거하는 방법이 사용되었다. 〈그림 5〉에서와 같이 역상 이미지에 초점을 맞추어 복원한 후, 역상

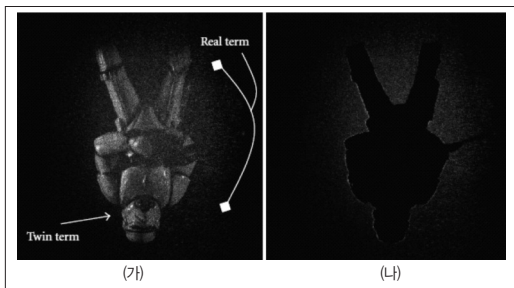
이미지 영역을 마스크로 제거하는 방식을 연구하였다. 역상이미지가 제거된 결과는 홀로그램 평면으로 변환되고, 다시 실상에 초점이 맞추어져 복원된다.

비슷한 방식으로 T.J. Naughton도 접근하였으며, 이들의 연구에서는 역상 이미지 영역을 찾기 위하여 $n \times n$ 블록 기반의 오버랩 이동을 이용하여 블록의 변화량을 연산한다. 변화량으로 초점이 맺혀진 정도가 분석되며, 초점이 맺혀진 영역과 초점이 맺혀지지 않은 영역은 수식 (6)과 같이 임계값을 이용하여 결정하게 된다. 초점이 맺혀진 영역은 역상 이미지 영역으로 제거되어야 하는 부분이고, 그 외의 영역은 유지 되어야 하는 영역이다.

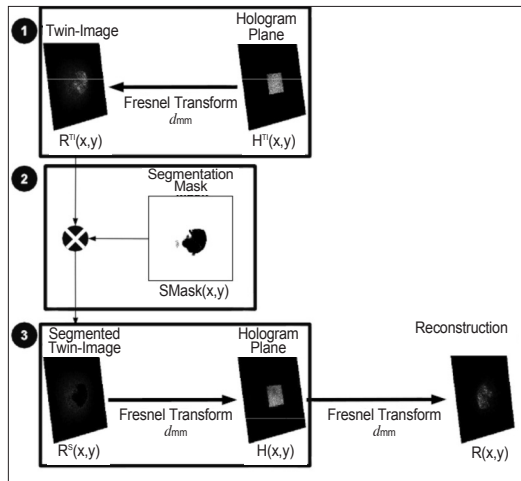
$$SMask(k, l) = 0 \text{ if } V(k, l) < \tau; 1 \text{ if } V(k, l) \geq \tau \quad (6)$$

변화량을 이용하여 역상이미지 영역을 추출하는 방식의 정밀도를 높이기 위해서는 큰 사이즈의 블록을 사용해야 하며, 블록사이즈가 증가할수록 연산량이 급격히 증가한다. 또한 임계값에 의해 두 영역 분리 성능이 결정되므로 임계값 결정이 전체 성능에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 변화량에 의한 초점 영역 추출은 성능적 한계를 갖고 있다.

역상이미지에 초점을 맞추어 마스크를 생성하는 방식을 통하여 역상이미지를 제거하는 과정은 〈그림 6〉과 같다. 먼저 프린지패턴 데이터를 역상 이미지에



〈그림 5〉 역상 이미지를 마스크를 이용하여 제거하는 연구에 대한 결과[4]; (가) 역상 이미지에 초점이 맞추어 복원된 결과, (나) 역상 이미지 영역을 마스크로 제거된 결과



〈그림 6〉역상 이미지 분리마스크를 이용한 역상 이미지 제거 구조도[5]

초점을 맞추어 복원한 후, 역상에 초점을 맞추어 복원된 결과에 분리 마스크가 적용되어 역상 이미지 영역을 제거한다. 역상 이미지가 제거된 데이터는 프린지 패턴 데이터로 변환하고, 최종 단계에서 실상 이미지에 초점을 맞추어 디지털 홀로그램 복원을 수행한다.

분리 마스크를 이용하는 방법의 핵심은 분리 마스크를 얼마나 잘 생성하느냐에 달려있다. 이러한 분리 마스크를 blind separation의 기본 개념을 바탕으로 하는 연구가 C. Cho에 의해 수행되었다[2].

Blind separation을 이용한 방법은 〈그림 7〉과 같이 실상과 역상에 초점이 맺어진 데이터를 기반으로 구성되며, 얻어진 두 이미지를 다음 수식 (7)과 같은 모델을 통해서 표현한다.

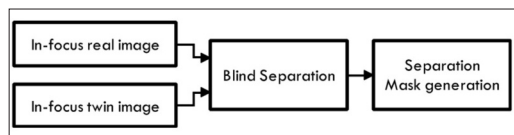
$$I = AS \tag{7}$$

여기서 I 는 실상 이미지에 초점이 맞추어진 데이터와 역상 이미지에 초점이 맞추어진 데이터로 구성된 2×1 매트릭스, S 는 실상 이미지와 역상 이미지 데이터로 구성된 2×1 매트릭스, A 는 S 의 I 데이터가 데이

터가 될 때 내부 시스템을 표현하는 매트릭스이다.

이러한 선형시스템으로 표현된 경우 S 에 대한 값은 A^{-1} 을 얻은 경우 쉽게 $A^{-1}I$ 를 이용하여 얻을 수 있다. 이러한 개념에서 역상의 영역을 분리하기 위해서는 A^{-1} 찾으면 가능하며 이를 Blind separation 매트릭스라 불린다[2].

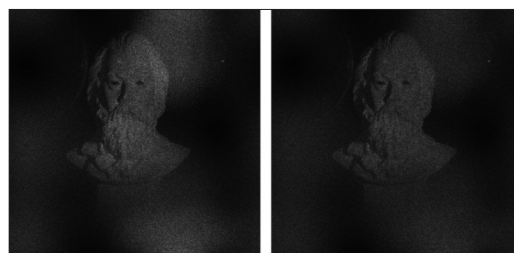
DC 노이즈 제거 방법이 적용되어 얻어진 실상과 역상에 초점이 맺혀진 이미지에 blind separation 방식을 적용하여 S 를 구하면 〈그림 8〉과 같이 역상과 실상의 영역을 분리할 수 있다. 분리된 이미지에 비선형 양자화 방식을 적용하여 역상 이미지를 제거하기 위한 분리 마스크를 생성한다. 분리 마스크



〈그림 7〉 blind separation 매트릭스를 사용한 역상과 실상 영역 분리 결과



〈그림 8〉 blind separation 매트릭스를 사용한 역상과 실상 영역 분리 결과



〈그림 9〉 blind separation 기반 분리 마스크를 이용한 역상 이미지 감소 결과; (가) 원본 분원 결과, (나) blind separation기반의 분리마스크 사용 결과

를 <그림 5>의 구조에 적용하면 <그림 9>와 같이 역상이미지가 감소된 결과를 획득할 수 있다.

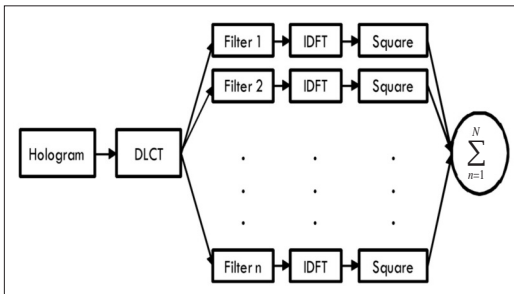
3. 스펙클노이즈를 제거하기 위한 기술

스펙클노이즈는 홀로그램에서 간섭성을 갖는 빛을 사용하기 때문에 발생하는 노이즈로 거친 표면에서 간섭성이 있는 빛이 적용되었을 경우 표면에서 랜덤하게 요동하며 흩어지는 빛의 특성에 의해 어둡고 밝은 반점이 발생하는 노이즈이다.

영상 신호처리 분야에서는 스펙클노이즈와 유사한 다양한 노이즈를 제거하기 위한 필터링 방법들이 많이 연구되었다[6]. 영상처리 분야에서 많이 사용되는 필터링 방법으로 Median 필터와 Wiener 필터 등이 있지만, 이러한 방법은 영상의 세부 분석도가 손실되는 문제점과 영상의 경계지점에서 윤곽선이 흐려지는 문제를 갖고 있다[6]. 이러한 문제점들의 영향을 줄이면서, 스펙클 노이즈를 제거하기 위한 방법으로 수식 (8)과 같은 공간 필터와 영역 필터의 조합으로 구성된 Bilateral 필터링 방식이 사용되었다[2].

$$H_b = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{d(\xi, x)}{\sigma_s} \right]^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\delta(\xi, x)}{\sigma_r} \right]^2 \right\} \quad (8)$$

여기서 ξ 과 x 는 영역의 중심에 해당하는 인덱스



<그림 10> 주파수 도메인에서 이동형 필터를 이용한 스펙클 노이즈 제거 구조[8]

와 주변의 인덱스를 나타내고, d 와 δ 은 유클리디언 거리와 값의 크기 차이를 나타낸다.

이러한 bilateral 필터는 저대역 통과필터의 성질을 갖고 있으면서, 영상의 윤곽선 영역은 보존하는 특성을 포함하고 있으므로 스펙클 노이즈 제거에 좋은 성능을 보인다.

또 다른 접근 방식으로 스펙클노이즈의 상관 관계를 기반한 이동형 조리기 구조를 디지털 홀로그램 복원에 적용한 방법이 있다[7-9]. 이동형 조리기 개념을 사용하여 각 밴드를 독립적으로 복원할 경우 통계적으로 독립적인 스펙클 노이즈 필드를 갖는다. 통계적으로 독립적인 경우는 데이터를 중첩하면, 노이즈에 해당하는 성분의 합은 중첩되는 필드의 갯수가 증가할 수록 zero에 근접해 가는 특성을 보인다. 이러한 접근은 J.C. Dainty에 의해서 먼저 수행되었으며, 이러한 방법은 지속적으로 이용되어서 <그림 10>과 같이 디지털 홀로그램 복원에서 여러 밴드로 데이터가 독립적으로 복원된 후 중첩되는 방식으로 스펙클 노이즈를 제거하고 있다. 또한 이러한 스펙클 노이즈 제거 방법은 역상이미지에서도 유사한 성능을 보이며, 여러장의 결과를 중첩 시킬 경우 스펙클 노이즈와 역상이미지 데이터가 감소되는 것을 볼 수 있다. 하지만 밴드 통과 필터 개수가 증가할 수록 복원결과의 이미지 분해도가 감소하여 복원 결과에 블러링이 증가하는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 원고에서는 홀로그램 생성 구조 및 홀로그램 생성에서 발생하는 DC 노이즈, 역상 이미지, 스펙클 노이즈의 발생 원인에 대해서 설명했다. 또한

홀로그램 생성 구조의 장단점을 설명하였고, 넓은 밴드폭을 사용하면서, 고화질 디지털 홀로그램을 복원하기 위하여 필요한 노이즈 제거 방법들을 설명했다. 현재 디지털 홀로그램 복원에서 화질을 향상시키기 위하여 지속적으로 노이즈 제거 방법들이 연구되고 있으나, CCD를 통해 취득된 홀로그램 데

이터를 기반으로 디지털 홀로그램 복원된 데이터에서 노이즈를 완벽히 제거할 수 있는 방법은 아직 존재하지 않는다. 그러므로 고화질 디지털 홀로그램 복원은 앞에서 언급된 노이즈 제거 문제가 해결 될 때까지는 항상 열려있는 연구 영역으로 남을 것이다.

참고문헌

- [1] L. Onural, F. Yaras, and H. Kang, "Digital holographic three-dimensional video displays," Proc. IEEE, vol. 99, no. 4, pp. 576-589, Apr. 2011.
- [2] C. Cho, H. Choi, H. Kang, and S. Lee, "Numerical twin image suppression by nonlinear segmentation mask in digital holography," Opt. Express, vol. 20, pp. 22454-22464, Sep. 2012.
- [3] C. Cho, H. Choi, H. Kang, and S. Lee, "Laplace Operation-Based DC Noise Reduction in Digital Holography," IEEE Phot. Lett. vol. 25, no. 12, pp. 1188-1191, June. 2012.
- [4] D. P. Kelly, D. S. Monaghan, N. Pandey, T. Kozacki, A. Michalkiewicz, G. Finke, B. M. Hennelly, and M. Kujawinska, "Digital holographic capture and optoelectronic reconstruction for 3D displays," Int. J. Digital Multimedia Broadcasting 2010, pp. 1-14, 2010.
- [5] C. McElhinney, B. M. Hennelly, L. Ahrenberg, and T. J. Naughton, "Removing the twin image in digital holography by segmented filtering of in-focus twin image," in Optics and Photonics for Information, Proc. SPIE 7072,707208 (2008).
- [6] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, 3rd ed. (Pearson, 2010).
- [7] J. C. Dainty and W. T. Welford, "Reduction of Speckle in Image Plane Hologram Reconstruction by Moving Pupils," Optics Comm., vol. 3, no. 5, pp. 289-294, July 1971.
- [8] J. Maycock, B. M. Hennelly, and J. B. McDonald, "Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 24, no. 6, pp. 1617-1621, June 2007.
- [9] D. S. Monaghan, D. P. Kelly, N. Pandey, and B. M. Hennelly, "Twin suppression in digital holography by mean of speckle reduction," In Proceedings China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies, (Kildare, Ireland, 2009), 237-240.

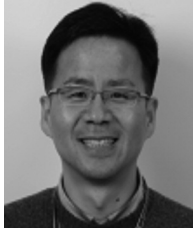
필자소개



조충상

- 2006년 : 수원대학교 공학사
- 2008년 : 광주과학기술원 공학석사
- 2012년 ~ 현재 : 중앙대학교 첨단영상대학원 박사과정
- 2008년 ~ 현재 : 전자부품연구원 멀티미디어IP연구센터 전임연구원
- 주관심분야 : 고속/고화질 디지털 홀로그램 생성/복원, 디지털 영상 처리 및 segmentation, Stereo image processing

필자소개



최병호

- 1991년 : 한양대학교 공학사
- 1993년 : 한양대학교 공학석사
- 2010년 : 중앙대학교 첨단영상대학원 박사
- 1993년 ~ 1997년 : 엘지전자 근무
- 1997년 ~ 현재 : 전자부품연구원 멀티미디어IP연구센터 센터장
- 주관심분야 : 디지털 홀로그램, Multi-view video, 실감방송