
히스토그램 변환기법을 이용한 디지털 홀로그램의 잡음제거 알고리즘

최현준* · 서영호** · 김동욱*

Noise Reduction Algorithm of Digital Hologram Using Histogram Changing Method

Hyun-Jun Choi* · Young-Ho Seo** · Dong-Wook Kim*

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10199-0)지원으로 수행되었음.

요 약

본 논문에서는 디지털 홀로그램의 획득 및 전송과정에서 발생하는 잡음을 효율적으로 제거하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 디지털 홀로그램을 DCT(Discrete Cosine Transform)하여 주파수영역으로 변환한 후 객체영역과 배경영역으로 분리한다. 이후, 객체영역은 히스토그램 변환기법을 적용하고 배경영역은 '0'으로 치환하였다. 제안한 알고리즘을 적용한 결과 PSNR이 6dB 이상 향상되었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient noise reduction algorithm for digital hologram during acquisition and transmission. The proposed algorithm segment a digital hologram with object region and background region after DCT. Then, we adopt a histogram transition method for object region and zero-value change method for background region. The experimental results show that our algorithm has better performance than a natural image denoising algorithm.

키워드

digital hologram, noise reduction, CGH, noise, 3D

I. 서론

최근 아날로그 필름을 기반으로 하던 홀로그래피 기술은 디지털 컴퓨터의 성능과 CCD(charge coupled device) 카메라의 제조기술이 향상됨으로써 홀로그램을 디지털화하여 기록 및 재생할 수 있는 디지털 홀로그래피 기술로 발전하였다. 디지털 홀로그래피 기술은 아날

로그 필름에 기록되던 회절패턴을 CCD 카메라를 이용하여 디지털 데이터로 저장한 간섭패턴(혹은 디지털 홀로그램)을 수신단의 공간 광변조기(spatial light modulator, SLM)에 디스플레이하여 공간상에서 재생하는 기법이다[1].

디지털 홀로그램의 잡음은 CCD 카메라를 이용하여 간섭패턴을 획득하는 과정에서 카메라 주변의 환경과

* 광운대학교 3D Media Research Lab.

** 광운대학교 교양학부

센서의 상태에 의해 발생한다. 잡음은 공간상에서 복원되는 3차원 영상의 질을 떨어뜨리고, 원본 디지털 홀로그램의 엔트로피를 증가시켜 기존에 제안되었던 디지털 홀로그램 압축 알고리즘들[2-8]의 효율을 감소시킨다.

일반적인 2차원 영상들을 대상으로 잡음을 제거하는 기법들은 오래전부터 연구되었고, 우수한 성능의 잡음 제거 필터(filter)들도 상당히 많은 수가 발표되었다. 하지만, 디지털 홀로그램은 잡음으로만 구성된 영상과 매우 유사한 특성(noise-like)을 보이기 때문에 기존에 개발된 필터들로는 만족할 만한 성능을 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 DCT를 도입하여 디지털 홀로그램을 주파수 변환[9,10]한 후 데이터를 분석하여 효율적인 잡음 제거 알고리즘을 제안하였다.

본 논문의 2장에서는 디지털 홀로그램의 생성기법과 특성을 분석하고, 3장에서는 자연영상을 대상으로 개발되었던 기존의 잡음제거 알고리즘과 제안한 디지털 홀로그램의 잡음제거 알고리즘을 설명한다. 4장에서 제안한 알고리즘을 적용한 실험결과를 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 디지털 홀로그램

디지털 홀로그램은 CCD카메라를 이용하여 실제로 존재하는 객체에서 획득하는 방법과 가상의 객체를 컴퓨터 그래픽으로 생성하여 PC(personal computer)에서 수학적 계산을 통해(computer generated hologram, CGH) 획득하는 방법이 있다. 그림 1(a)에서 광학 시스템을 이용한 획득방법, 1(b)에서 PC에서 수학적 계산을 통해 획득하는 방법을 보이고 있다.

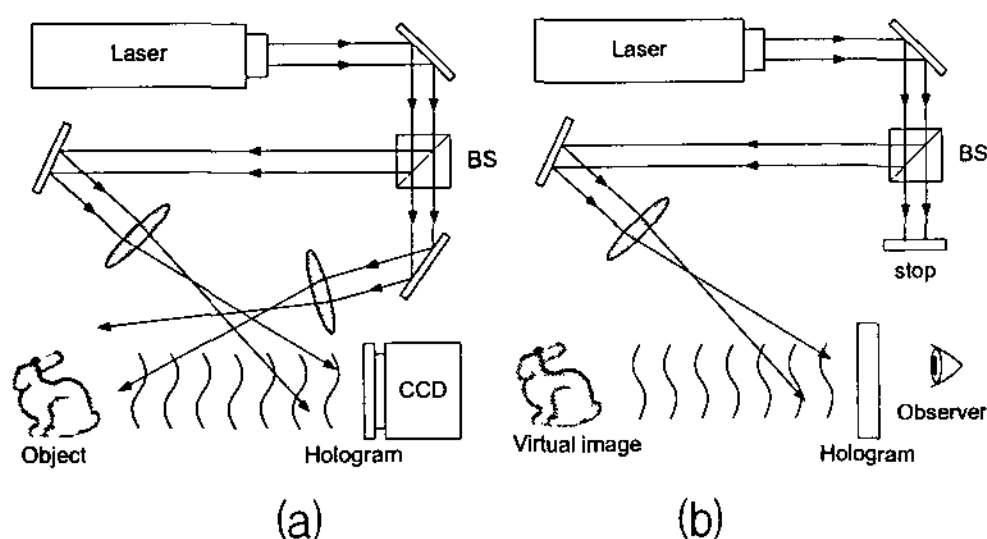


그림 1. 디지털 홀로그램 (a) 기록 (b) 복원
Fig. 1. Digital hologram (a) recoding, (b) reconstruction

2.1. 디지털 홀로그램의 생성

객체로부터 디지털 홀로그램을 획득하는 과정을 수식으로 정리하면 다음과 같다. 먼저, 객체로부터 반사되어 입사되는 객체파(object wave)와 기준파(reference wave)의 복소진폭(complex amplitude)은 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다. 여기서 a 와 ϕ 는 각각 실수진폭(real amplitude)과 위상(phase)을 나타낸다.

$$E_0(x, y) = a_0(x, y)\exp(i\phi_0(x, y)) \quad (1)$$

$$E_R(x, y) = a_R(x, y)\exp(i\phi_R(x, y)) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 두 파에 의한 간섭패턴이 매질의 표면에 기록되는데, 그 크기(intensity)는 식 (3)으로 나타내고, 이를 홀로그램이라 한다.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_0(x, y) + E_R(x, y)|^2 \\ &= (E_0(x, y) + E_R(x, y))(E_0(x, y) + E_R(x, y))^* \\ &= E_0(x, y)E_0^*(x, y) + E_R(x, y)E_R^*(x, y) + E_0(x, y)E_R^*(x, y) + E_R(x, y)E_0^*(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

매질의 표면에 기록되는 양 $h(x, y)$ 은 매질의 특성에 따라서 달라질 수 있고, $I(x, y)$ 의 크기에 비례한다.

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y) \quad (4)$$

여기서 상수 β 는 감광물질의 노출특성에 따른 파의 진폭 전송률을 나타내고, τ 와 h_0 는 노출 시간과 노출되지 않은 부분이 진폭전송을 각각 나타낸다. CCD 카메라를 이용한 디지털 홀로그램에서는 h_0 의 영향이 무시된다. 홀로그램의 재생은 기준파를 기록된 홀로그램에 동일한 크기와 각도로 적용하여 얻으며, 이것은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} E_R(x, y)h(x, y) &= \\ [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_0^2)]E_R(x, y) &+ \beta\tau a_R^2 E_0(x, y) + \beta\tau E_R^2(x, y)E_0^*(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 첫 번째 항은 스케일링(scaling)된 기준파를 나타내고, 두 번째 항은 재생된 객체파를 나타낸다. 두 번째 항의 $\beta\tau a_R^2$ 은 단지 밝기에 영향을 미치는 양이다. Off-axis 홀로그램에서는 가상객체, 실제객체, 그리고 회

절과 등이 공간적으로 분리된다. 실제 객체영상이 왜곡되는 이유는 공간적으로 복소성분인 E_R^2 가 변화하기 때문인데, E_R^2 는 객체파의 공액복소인 E_R^* 를 형성하는 영상을 변조한다. 따라서 왜곡되지 않은 객체를 재생하기 위해서 식 (6)과 같이 E_R^* 을 사용한다.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R^*(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_O^*(x,y) + \beta\tau E_R^{*2}(x,y)E_O(x,y) \quad (6)$$

홀로그램을 광학 시스템을 이용하지 않고 위와 같은 원리를 수식화하여 PC에서 생성하는 것이 CGH이다. CGH는 가상의 객체를 자유롭게 제작하여 홀로그램을 생성할 수 있다는 장점을 갖지만, 많은 연산을 필요로 하기 때문에 홀로그램을 생성하는데 오랜 시간이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 CGH기법으로 생성한 디지털 홀로그램을 대상으로 실험을 수행하였다.

2.2. 디지털 홀로그램의 분석

앞서 언급하였듯이 디지털 홀로그램은 객체의 위상(phase)을 디지털 데이터로 기록하였기 때문에 일반적인 자연 영상들과는 상당히 다른 특성을 보인다. 일반적인 자연 영상들은 프랙탈 이론(Fractal theory)의 기반이 되는 자기 유사성(self-similarity)뿐만 아니라 인접한 화소(pixel)들 사이에도 강한 상관도(correlation)를 보인다. 하지만, 디지털 홀로그램은 마치 잡음 영상과 같이 매우 불연속적인 특징을 가지고 있는 비정상 신호이다. 이러한 자연 영상과 디지털 홀로그램의 예를 그림 2에서 보이고 있다.

그림 2(d)에서 확인하였듯이 디지털 홀로그램은 자연 영상들과는 다른 특성을 보인다. 따라서 자연 영상들을 대상으로 연구되어왔던 기존의 잡음 제거 알고리즘들을 디지털 홀로그램에 그대로 적용할 경우 높은 효과를 기대하기가 어려울 것이다. 본 연구팀은 이러한 특성을 고려하여 디지털 홀로그램에 DCT를 적용하여 주파수 영역으로 변환하였다.

본 논문에서 DCT를 도입한 이유는 2.1절에서 정리한 디지털 홀로그램의 생성 수식이 코사인(cosine) 함수를 기저(basis)로 하고 있기 때문에 DCT를 적용할 경우 원본 객체와 유사한 영상을 얻을 수 있을 것이라는 가정에서였다. 그림 3에서 디지털 홀로그램의 생성에 사용된 객

체영상, 생성한 디지털 홀로그램, 그리고 DCT를 수행한 결과를 보이고 있다. DCT는 식 (6)과 같이 영상 전체를 대상으로 하는 256×256 전역 DCT 기법을 사용하였다.

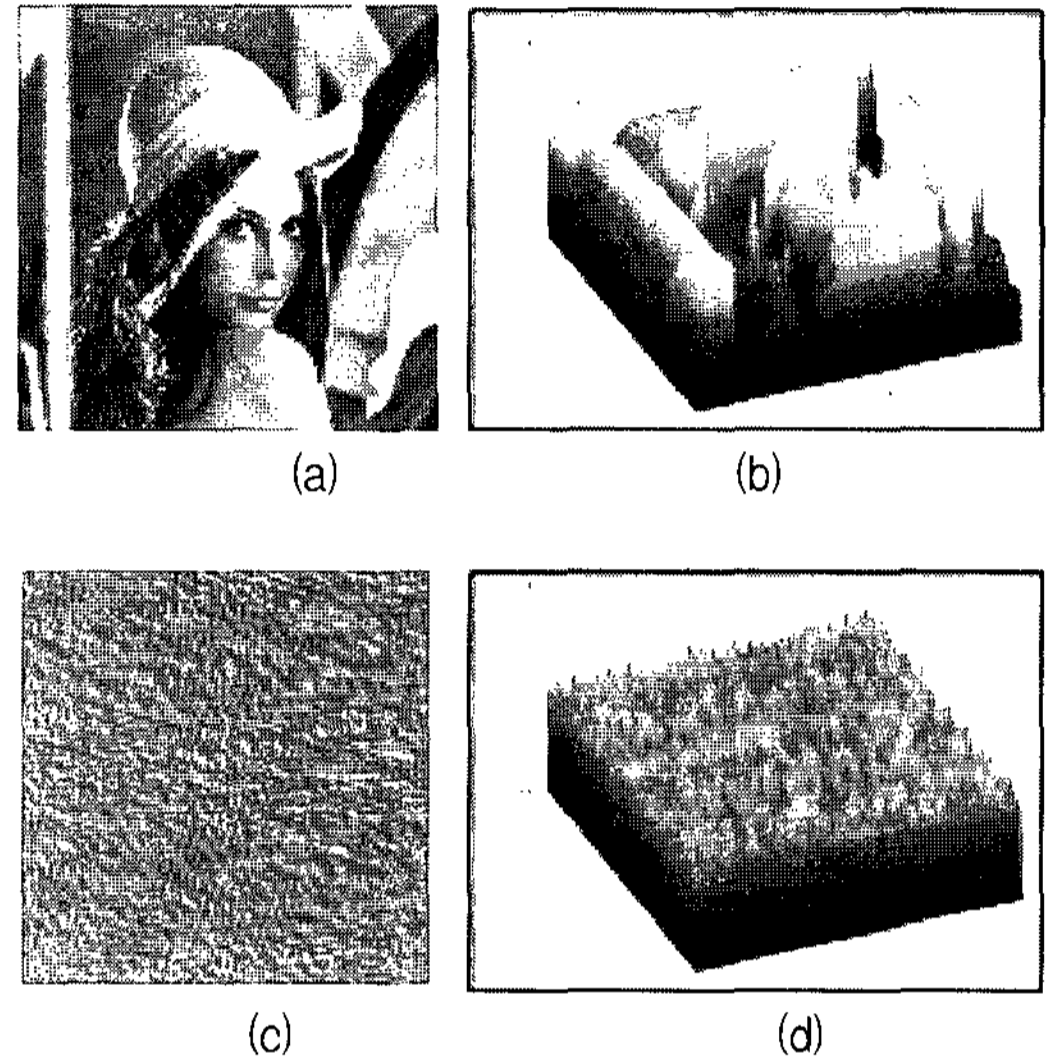


그림 2. 영상의 예; (a) 자연 영상, (b) (a)의 화소값 분포도, (c) 디지털 홀로그램, (d) (c)의 화소값 분포도
Fig. 2. Example image; (a) natural image, (b) pixel distribution of (a), (c) digital hologram, (d) pixel distribution of (c)

$$T(u,v) = \frac{2}{N} C(u)C(v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right]$$

$$C(u), C(v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}} & , u, v = 0 \\ 1 & , otherwise \end{cases} \quad (6)$$

여기서 u, v 는 주파수 변환 영역의 좌표, x, y 는 원본 영상의 좌표, 그리고 N 은 2차원 DCT를 수행할 화소 수를 의미한다.

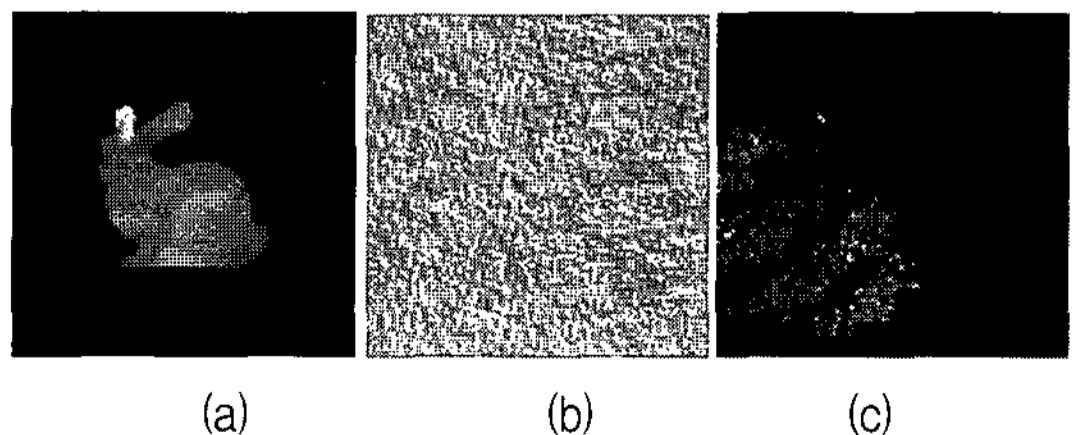


그림 3. (a) 객체 영상, (b) (a)의 디지털 홀로그램, (c) (b)의 256×256 전역 DCT 결과
Fig. 3. (a) object image, (b) digital hologram of (a), (c) 256×256 global DCT result of (b)

III. 잡음제거 알고리즘

3.1. 잡음모델(noise model)

원본 객체 영상 $o(x, y)$ 를 CGH기법으로 디지털 홀로그램 $h(i, j)$ 로 변환하고, $N(0, \sigma^2)$ 가우시안 잡음(Gaussian noise)을 첨가하여 잡음이 섞인 디지털 홀로그램 $h'(i, j)$ 를 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$h'(i, j) = h(i, j) + n(i, j) \quad (7)$$

$n(i, j)$ 는 평균이 0인 백색 가우시안 잡음으로 가정한다. 식 (7)에서 설명한 잡음 첨가 모델을 그림 4에서 보이고 있다.

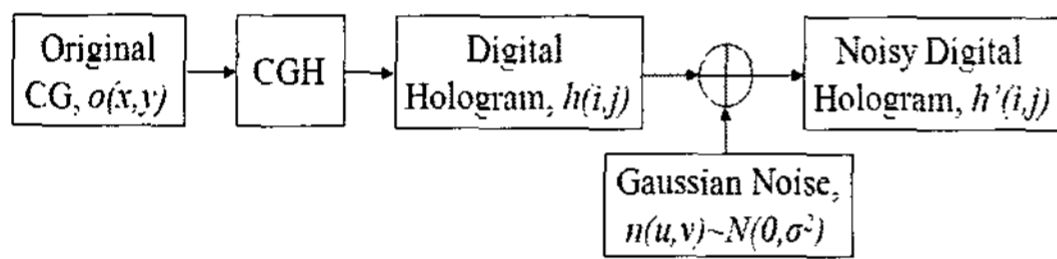


그림 4. 잡음 모델
Fig. 4. Noise model

3.2. 자연 영상의 잡음 제거 기법

지금까지 자연 영상을 대상으로 제안된 잡음 제거 알고리즘은 크게 선형 필터와 비선형 필터들로 나눌 수 있다. 선형 필터에는 평균 필터와 가우시안(Gaussian) 필터 등이 있다. 이들은 구현이 비교적 간단하지만, 영상의 에지, 코너, 텍스처(texture) 부분과 같은 고주파 영역에서 영상의 블러링(blurring) 현상이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 이런 선형 필터의 단점을 개선하기 위해 필터링되고 있는 화소들을 정렬하여 중간값으로 바꾸는 중간값 필터, 추정된 잡음의 분산값을 이용하여 주변 화소와 중심 화소의 차이가 임계치(threshold) 이하일 경우에만 평균값으로 바꾸는 시그마 필터, 그리고 중심 화소와 주변 화소와의 차이에 따라 가중치(weight)를 다르게 주는 AWA(adaptive weight average) 필터 등의 비선형 필터들이 제안되었다. 이러한 비선형 필터들은 선형 필터에 비하여 고주파 성분들에 영향을 덜 주지만 필터링 강도가 강해지면 블러링 현상이 발생한다.

이러한 잡음 제거 알고리즘들은 자연 영상을 대상으로 하기 때문에 영상 전체에 걸쳐 고주파 성분이 분포되어 있는 디지털 홀로그램의 잡음 제거에는 적당하지 않다.

3.3. 디지털 홀로그램을 위한 잡음 제거 알고리즘

그림 3(C)에서 확인하였듯이 디지털 홀로그램을 대상으로 전역 DCT를 수행하면 주파수 영역에서 객체 영상과 매우 유사한 계수의 분포가 관찰된다. 본 연구팀은 이런 주파수 영역의 계수값들의 분포를 자연 영상으로 가정하여 새로운 잡음 제거 알고리즘을 제안하고자 한다.

그림 5에서는 원본 디지털 홀로그램과 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램의 256×256 전역 DCT 결과, 그리고 이들의 계수값 분포를 보이고 있다. 그림 5(c)와 (d)에서 보이듯이 주파수 영역에서 관찰되는 객체내의 화소값들은 주변 화소와의 상관도가 매우 낮고 객체 외부는 비교적 작은 화소값들이 분포하고 있다. 본 연구팀은 이런 화소값들의 분포 특성을 이용하기 위해 주파수 영역에서의 객체와 배경을 분리한 후 각각 다른 잡음 제거 기법을 제안한다. 그림 6에서 객체와 배경을 분리하기 위해 생성한 객체 윤곽선 지도(contour-map)를 보이고 있다.

그림 6의 객체 윤곽선 지도는 전역 DCT된 디지털 홀로그램의 대상으로 에지영역을 탐색한 후 임계값을 설정하여 이진화한 영상이다. 본 논문에서는 임계값을 200으로 설정하였다.

본 논문에서는 디지털 홀로그램의 주파수 영역에서 객체 윤곽선 지도를 구한 후 다음과 같은 4가지 기법의 잡음 제거 알고리즘을 제안한다.

- Method 1: 배경영역을 '0'으로 치환
- Method 2: 배경영역을 '0'으로 치환한 후 객체영역에 sigma 필터[11]를 적용
- Method 3: 주파수 영역 전체를 대상으로 히스토그램 변환기법을 적용
- Method 4: 객체와 배경영역을 분리한 후 각각에 히스토그램 변환기법을 적용

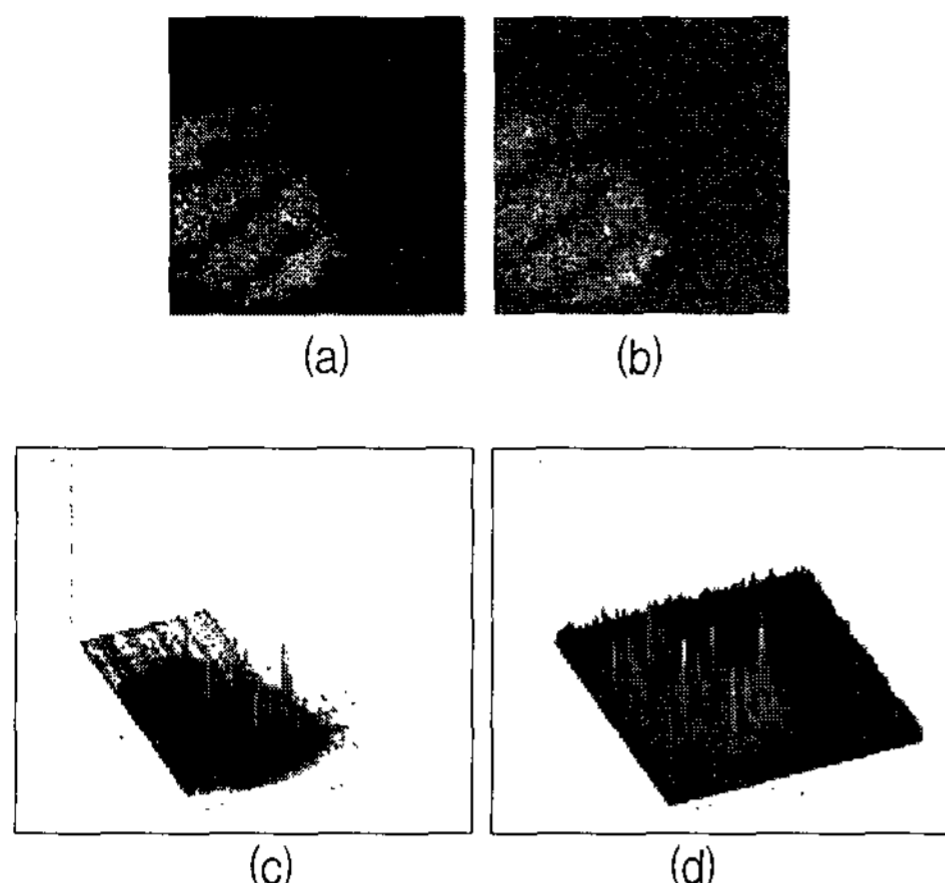


그림 5. (a) 원본 디지털 홀로그래ムの DCT 결과, (b) 잡음이 첨가된 디지털 홀로그래ムの DCT 결과, (c) (a)의 화소값 분포도, (d) (b)의 화소값 분포도
 Fig. 5. (a) DCT result of original digital hologram, (b) DCT result of noisy digital hologram, (c) pixel distribution of (a), (d) pixel distribution of (b)

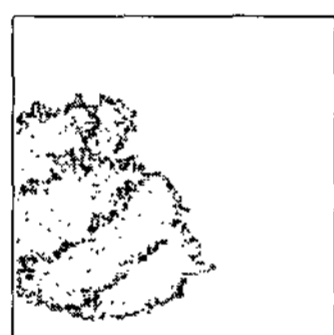


그림 6. 주파수 영역에서의 객체 윤곽선 지도
 Fig. 6. Object contour-map of frequency-domain

Method 1은 전역 DCT된 디지털 홀로그래ము를 객체 윤곽선 지도를 기반으로 객체영역과 배경영역으로 분리한 후 복원 영상의 화질과 상관도가 작은[10] 배경영역을 모두 '0'으로 치환하여 영상 전체에 퍼져있는 잡음의 양을 줄이는 기법이다. Method 2는 객체영역과 배경영역을 분리한 후 배경영역을 '0'으로 치환하고, 객체영역은 필터링 윈도우 내 화소들 중에서 중심 화소와 유사한 값을 갖는 화소들의 평균으로 복원하는 sigma 필터를 적용하였다. sigma 필터는 아래의 식 (8)과 같다.

$$r(m,n:i,j) = \begin{cases} 1 & |h'(i,j) - h(m,n)| \leq \Delta \\ 0 & |h'(i,j) - h(m,n)| \geq \Delta \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $R(m,n:i,j)$ 는 잡음 제거한 화소값, $h'(i,j)$ 는 잡음이 첨가된 디지털 홀로그래ムの 화소값, 그리고 $h(m,n)$ 은 주변 화소값을 의미한다. 따라서 객체영역처럼 중심 화소와 주변 화소의 차이가 큰 경우 블러링 현상을 줄일 수 있다. 임계값 Δ 는 예측된 잡음의 분산(variance) 값을 이용하여 결정한다.

Method 3과 4는 디지털 홀로그래ము를 전역 DCT한 후 계수들의 통계적인 히스토그램 분포 특성을 파악하여 잡음 제거에 적용하였다. 통계적인 히스토그램 분포 특성을 구하기 위해 컴퓨터 그래픽으로 제작한 100개의 객체영상들에 CGH기법을 적용하여 생성한 디지털 홀로그래ము들을 사용하였다. 100개의 객체영상들 중에서 대표적인 객체영상 4가지를 그림 7에서 보이고 있다.

그림 8에서는 전역 DCT한 디지털 홀로그래ము들의 통계적인 히스토그램 특성을 보이고 있다. 전역 DCT는 256×256 화소 전체를 대상으로 수행하였다.

본 논문에서는 디지털 홀로그래ము의 주파수 영역에서 계수들의 통계적인 히스토그램 분포를 비교해 잡음의 스펙트럼을 추정한다. 이후 그림 8(b)와 같은 잡음 영역의 히스토그램 분포도를 그림 8(a)와 같은 원본 디지털 홀로그래ము의 히스토그램 분포와 비슷한 분포로 변형하여 잡음으로 예측되는 계수값들을 복원하였다.

Method 3은 영상 전체에 대해 히스토그램 처리기법을 적용하였고, Method 4는 객체영역과 배경영역을 분리한 후 배경영역을 '0'으로 치환하고 객체영역만을 대상으로 히스토그램 처리기법을 적용하였다. 히스토그램 처리기법은 다음의 식 (8)과 같다.

$$r_s[n] = \begin{cases} h_s[n] \times \frac{h_s[n] - c}{h_s[n]} & (c = 128/\sigma), h_s[n] < 128 \\ 0 & , h_s[n] \geq 128 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $r_s[n]$ 은 이동된 히스토그램 분포, $h_s[n]$ 은 노이즈가 첨가된 히스토그램, c 는 가중치(weighting factor), σ 는 분산을 의미한다.

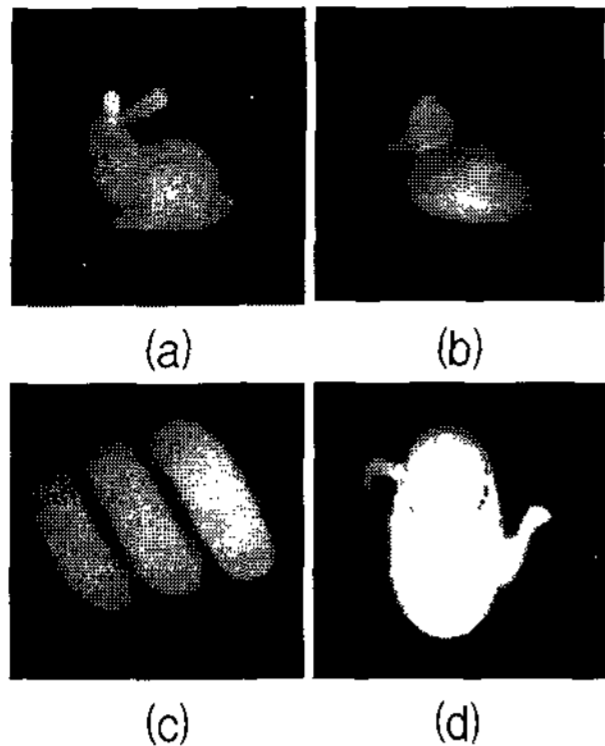


그림 7. 객체영상의 예; (a) 토끼, (b) 오리, (c) 스프링, (d) 주전자

Fig. 7. Example of object image; (a) rabbit, (b) duck, (c) spring, (d) teapot

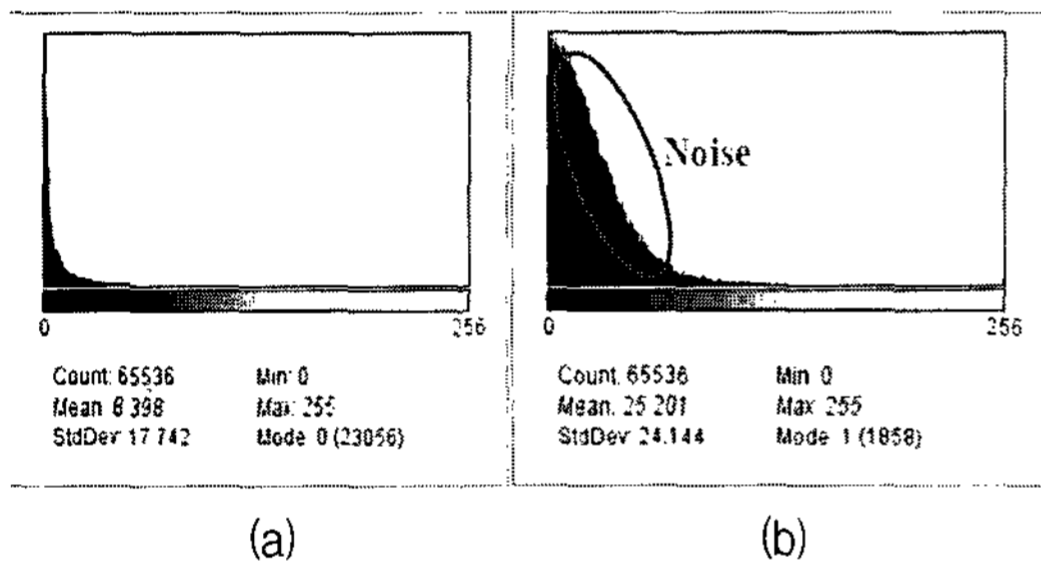


그림 8. 디지털 홀로그램의 주파수 영역에서의 통계적인 히스토그램 분포; (a) 원본 디지털 홀로그램, (b) 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램
Fig. 8. statistical histogram distribution of digital hologram in frequency domain; (a) original digital hologram, (b) noisy digital hologram

IV. 실험 및 고찰

본 절에서는 잡음이 섞인 디지털 홀로그램을 Sigma 필터와 본 연구팀이 제안한 4가지 기법들을 적용하였다. 잡음 제거 기법을 적용한 후 PC 시뮬레이션 (HoloVision[12])으로 복원한 3차원 홀로그래피 영상들의 주관적인 화질과 PSNR을 측정하였다.

실험환경은 다음과 같다.

- 디지털 홀로그램 크기: 256×256 [pixel²]
- SLM의 화소크기: 10.4μm×10.4μm
- 광원의 파장: 633nm
- 복원되는 거리: 1,000mm

4.1. 기존 잡음 제거 알고리즘을 적용한 결과

자연영상의 잡음 제거에 사용되던 sigma 필터를 토끼 영상 디지털 홀로그램의 잡음 제거에 적용하여 보았다. 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램의 홀로그램 영역과 전역 DCT된 주파수 영역에서 각각 필터링을 수행하였다. 그림 9에서 실험결과들을 보이고 있다.

그림 9에서 보이듯이 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램을 자연영상에서 사용되던 sigma 필터로 잡음 제거하였을 경우 오히려 복원영상의 화질이 떨어지는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 객관적인 화질평가를 위해 PSNR을 측정된 결과 원본 복원영상과 비교하여 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램의 복원영상은 24.35dB, sigma 필터로 잡음을 제거한 복원영상은 21.53dB로 측정되었다. 실험결과 자연영상의 잡음제거를 위해 개발된 알고리즘을 디지털 홀로그램에 그대로 적용할 경우 오히려 복원영상의 화질이 떨어지는 것을 확인하였다.

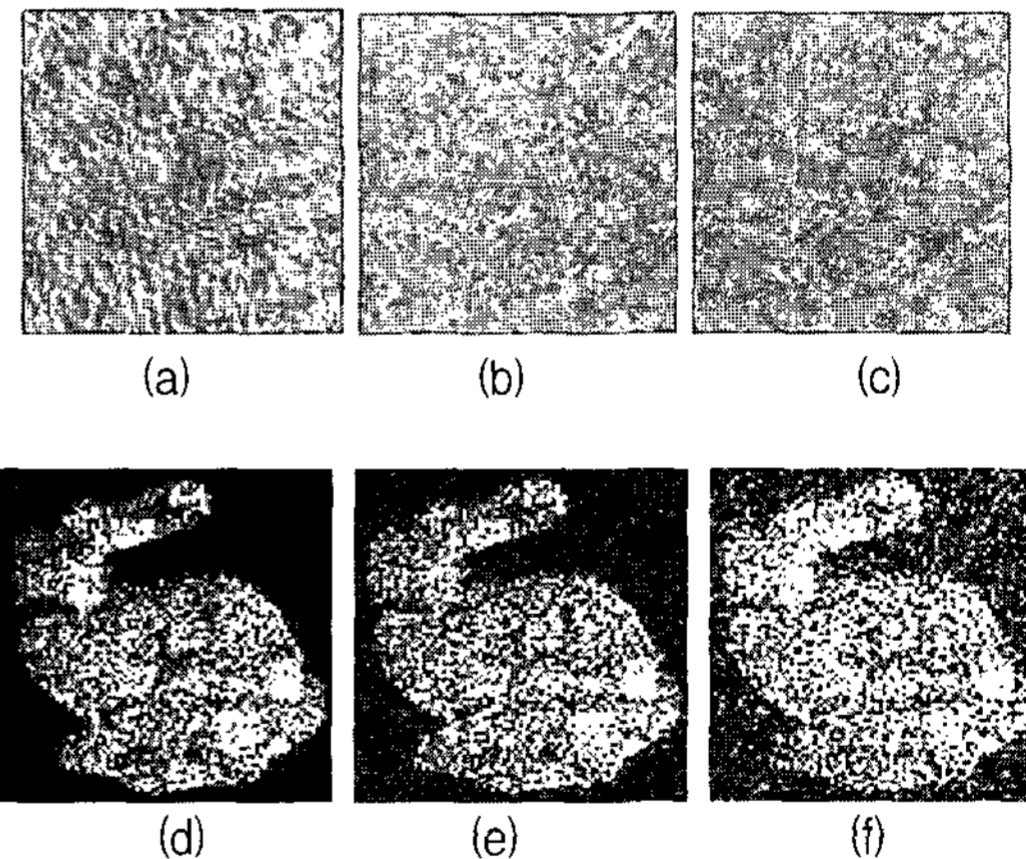


그림 9. sigma 필터로 잡음 제거한 결과 ; 디지털 홀로그램 (a) 원본, (b) 잡음이 첨가된, (c) 잡음 제거된, 복원 결과 (d) 원본, (e) 잡음이 첨가된, (f) 잡음이 제거된.
Fig. 9. Results of noise reduction by sigma filter; digital hologram (a) original, (b) noisy, (c) noise reduction, reconstructed image (d) original, (e) noisy, (f) noise reduction.

4.2. 제안한 알고리즘을 적용한 결과

3.3절에서 설명했던 4가지 기법들을 이용하여 잡음 제거한 결과를 표 1에서 보이고 있다. 원본 디지털 홀로그램을 기준으로 잡음이 첨가된 디지털 홀로그램과 잡음 제거 기법들을 적용하여 측정된 PSNR 값들을 보이

고 있다. 표에서 확인할 수 있듯이 Method 4의 기법을 적용한 결과 PSNR이 약 6dB 이상 향상되는 결과를 보였다.

그림 10에서는 잡음 제거 결과의 주관적인 화질측정을 위해 PC에서 시뮬레이션한 복원영상들을 보이고 있다.

표 1. 제안한 잡음 제거 기법의 PSNR 결과
Table 1. PSNR results of proposed noise reduction methods

Methods	Noisy digital hologram	Denoising digital hologram
1	24.35dB	26.55dB
2		26.75dB
3		29.63dB
4		30.47dB

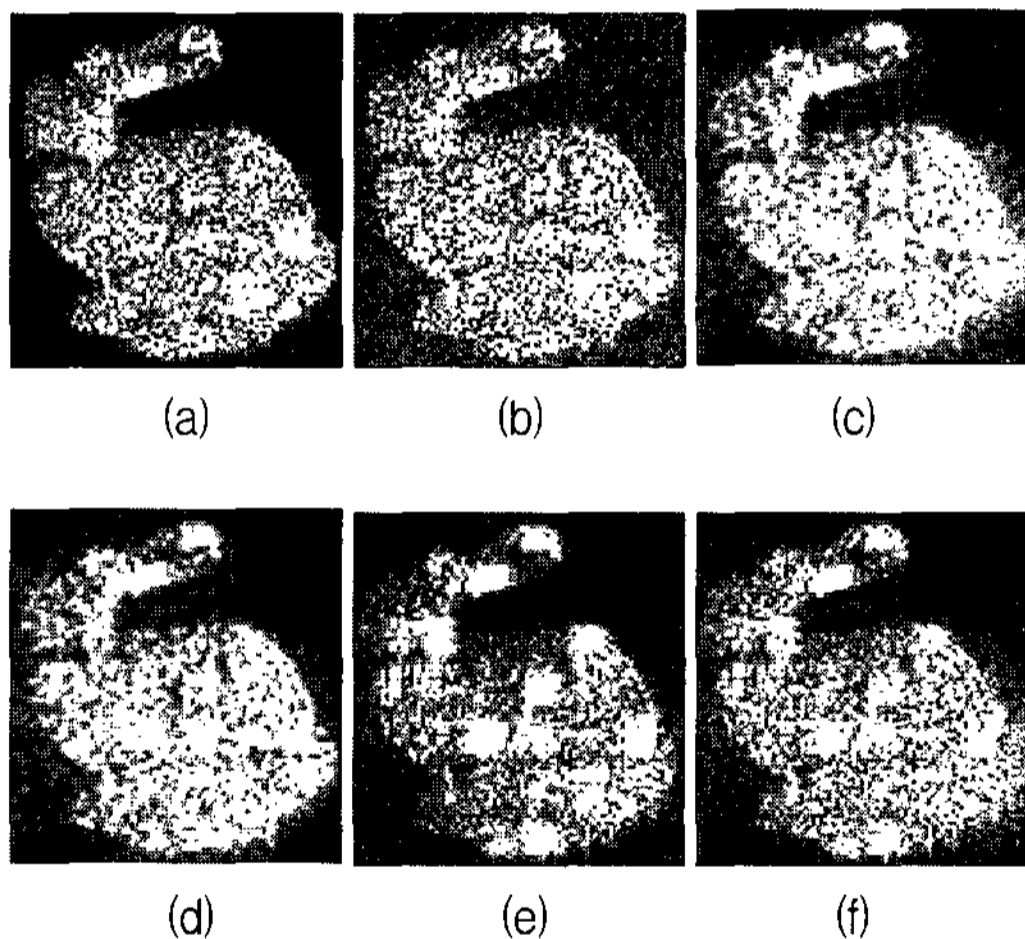


그림 10. 잡음 제거한 복원 영상들 (a) 원본, (b) 잡음이 첨가된 (c) Method 1 (d) Method 2 (e) Method 3 (f) Method 4.

Fig. 10. Reconstructed images with noise reduction (a) original, (b) noisy, (c) Method 1, (d) Method 2, (e) Method 3, (f) Method 4.

V. 결론

디지털 홀로그램의 획득 과정에서 발생하는 잡음은 홀로그래피 영상 복원시 화질을 떨어뜨린다. 이런 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 디지털 홀로그램의 잡음을 제거하는 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서는 디지털 홀로그램의 잡음을 제거하기 위해 전역 DCT를 이용하여 주파수 변환하였다. 주파수 영역을 자연영상으로 취급하여 객체영역과 배경영역으로 분리한 후 4가지 기법의 잡음 제거 알고리즘을 제안하였다. 실험결과 객체영역은 히스토그램 처리기법을 적용하고 배경영역은 '0'으로 치환하는 기법의 성능이 가장 좋았다.

참고문헌

- [1] 이영희, "디지털콘텐츠에 관한 연구", 한국정보과학회 논문지, Vol. 20-5, pp. 100-106, May 2004.
- [2] Digital, C., "Digital Contents Course-ware," IEEE Multimedia, Vol. 10-7, pp. 100-110, July, 2004.
- [3] B. Javidi and F. Okano, Three Dimensional Television, Video, and Display Technologies, Springer Verlag Berlin. March 2002.
- [4] T. J. Naughton, Y. Frauel, B. Javidi and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object recognition," SPIE Proc. Vol 4471, pp. 280-289, 2001.
- [5] T. J. Naughton, Y. Frauel, B. Javidi and E. Tajahuerce, "Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition," Appl. Opt. 41, No. 20, pp. 4124-4132. Jul, 2002.
- [6] T. J. Naughton and B. Javidi, "Compression of Encrypted Three-dimensional Objects using Digital Holography," Optical Engineering, vol. 43, no. 10, pp. 2233-2238, October 2004.
- [7] T. J. Naughton, Y. Frauel, E. Tajahuerce, and B. Javidi, "Compression of Digital Holograms for Three-Dimensional Object Reconstruction and Recognition," Applied Optics, vol. 41, no. 20, pp. 4124-4132, July 10, 2002.
- [8] T. J. Naughton, J. B. Mc Donald, and B. Javidi, "Efficient compression of Fresnel fields for Internet transmission of three-dimensional images," Applied Optics-Information Processing, vol. 42, no. 23, pp. 4758-4764, 10 August 2003.

- [9] Y. H. Seo, H. J. Choi, and D. W. Kim, "Lossy Coding Technique for Digital Holographic Signal", SPIE Optical Engineering, vol. 45, no. 6. pp. 5802-1~5802-10, June 2006.
- [10] 최현준, 서영호, 유지상, 김동욱, "전역 2차원 DCT를 이용한 디지털 홀로그래프의 분석 및 워터마킹 기법", 한국해양통신학회논문지, 제 11권 7호, pp. 202-207, July 2007.
- [11] J. S. Lee, "Digital Image Smoothing and the Sigma Filter", Computer Graphics and Image Processing, pp.255-269, 1983.
- [12] <http://www2.edge.no/projects/index.php?expn=2&target=holovision/abo>

저자소개

최 현 준(Hyun-Jun Choi)



2003년 2월 광운대학교 전자재료 공학과 졸업(공학사)
2005년 2월 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)

2005년 3월~현재 : 광운대학교 일반대학원 박사과정
※관심분야: 영상압축, 워터마킹, 암호학, FPGA/ASIC 설계, Design Methodology

서 영 호(Young-Ho Seo)



1999년 2월 광운대학교 전자재료 공학과 졸업(공학사)
2001년 2월 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)

2000년 3월~2001년 12월 인티스닷컴(주) 연구원
2004년 8월 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
2003년 6월~2004년 6월 한국전기연구원 연구원
2004년 12월~2005년 8월 유한대학 연구교수
2005년 9월~2008년 2월 한성대학교 전임강사
2008년 3월~현재 : 광운대학교 교양학부 조교수
※관심분야: 2D/3D 영상 및 비디오 처리, 디지털 홀로그램, SoC 설계, 워터마킹/암호화

김 동 욱(Dong-Wook Kim)



1983년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1985년 2월 한양대학교 대학원 졸업(공학석사)

1991년 9월 Georgia공과대학 전기공학과 졸업(공학박사)
1992년 3월~현재 광운대학교 전자재료공학과 정교수. 광운대학교 신기술 연구소 연구원
2000년 3월~2001년 12월 인티스닷컴(주) 연구원
※관심분야: 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP 설계, Wireless Communication