Fresnel 변환영역에서 디지털 홀로그램의 주파수 특성분석

최현준* · 서영호** · 김동욱**

A Frequency Characteristic Analysis of Digital Hologram in Fresnel Transform Domain

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

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아
수행된 연구임(NRF-2010-0026245)

요 약

컴퓨터 생성 홀로그램을 통해 생성된 디지털 홀로그램은 그 데이터량이 방대하기 때문에 저장, 전송 및 처리를 위해서는 데이터량을 줄일 필요성이 있다. 하나의 객체를 나타내기 위한 디지털 홀로그램의 데이터량을 줄이는 가장 효율적인 방법은 부호화를 수행하는 것이다. 본 논문에서는 효율적인 부호화를 위해 디지털 홀로그램을 Fresnel 변환을 도입하여 주파수 영역에서 분석하였다. 이 분석결과는 추후 디지털 홀로그램을 위한 부호화 기술의 개발 시 중요한 데이터가 될 것이다.

ABSTRACT

Since digital hologram includes an amount of data as can be seen at the process of digitization, it is necessary that the data representing digital hologram is reduced for storing, transmission, and processing. As the efforts that are to handle hologram with a type of digital information have been increased, various methods to compress digital hologram called by fringe pattern are groped. Suitable proposal is encoding of digital hologram. This paper analyzed the properties of digital hologram using tools of frequency transform, assuming that a generated digital hologram is a 2D image by introducing Fresnel Transform. The analysis results of digital hologram to be proposed in this paper are being expected to be used as the core techniques for an encoding of digital hologram.

키워드

디지털 홀로그램, 컴퓨터 생성 홀로그램, Fresnel 변환, 프링지 패턴

Key word

Digital Hologram, Computer Generated Hologram, Fresnel Transform, Fringe Pattern

* 종신회원 : 목포해양대학교 전자공학과

접수일자 : 2012. 02. 08

** 종신회원 : 광운대학교 실감미디어 연구소 (교신저자: dwkim@kw.ac.kr)

심사완료일자 : 2012. 03. 12

I. 서 론

홀로그램은 은염 사진필름을 사용하여 물체의 영상을 기록하여 재생한다. 다만 이때 사용되는 홀로그램 필름은 물체의 세밀한 부분까지 기록할 수 있도록 분해능(sampling rate)이 크다는 것이 일반 사진과 다를 뿐이다. 그러나 사진이 3D로 물체를 재생하지 못하는 이유는 물체의 밝고 어두운 모습만 기록할 뿐, 물체의 위치, 즉 사람의 눈으로부터 물체의 여러 부분까지의 거리를 기록하지 못하기 때문이다. 물체의 밝고 어두운 정도를 광파의 진폭으로 나타낸다면 물체의 위치는 그 광파의 위상으로 나타낼 수 있는데, 이 진폭과 위상을 모두 기록할 수 있어야 완전한 입체영상을 재현할 수 있다. 사진이 자연광 또는 형광등 등의 실내등 같은 공간섭성(coherence)이 낮은 광을 사용하여 카메라 렌즈로 필름에 상을 집속시켜 기록하는데 반하여 홀로그램은 간섭이라는 광학적 원리를 이용하여 물체를 필름에 기록한다.

따라서 홀로그램을 위해서는 레이저와 같은 공간섭성이 높은 빛을 사용한다. 간섭무늬의 형태로 물체의 영상이 기록된 사진필름을 홀로그램이라 하며 홀로그램을 기록하여 입체영상을 복원하는 기술을 홀로그래피라고 한다. 홀로그램에 기록된 간섭무늬(interference fringe)에 담겨진 물체의 정보는 회절(diffraction)이라는 광학적 원리를 이용하여 실제 공간상에 입체영상으로 재생시킬 수 있다[1].

홀로그램의 제작 및 복원이 아날로그 필름에 간섭패턴을 기록하는 형태로 이뤄지던 종래의 기술이 최근 광학 장치들이 디지털화 됨에 따라 디지털 홀로그래피(digital holography)로 발전하고 있다. 디지털 홀로그래피는 아날로그 필름에 간섭패턴(interference pattern)을 기록하던 기존의 방식과는 달리 디지털 카메라와 같은 광학 획득장치를 이용해 간섭패턴을 디지털 데이터로 저장한다.

이 데이터를 디지털 홀로그램(digital hologram)이라고 한다. 디지털 홀로그램은 앞서 기술한 바와 같이 광학 획득장치를 이용해 실사공간(real-world)으로부터 획득할 수도 있지만, CG(computer graphic)로 제작한 가상의 객체로부터 수학적 계산을 이용해 생성할 수도 있다[1]. 이를 컴퓨터생성 홀로그램(computer-generated

hologram, CGH)이라고 한다. 광학 획득장치 혹은 CGH 기법으로 디지털 홀로그램을 획득하기 위해서는 상당한 자원(하드웨어, 연산시간 등)을 필요로 한다. 따라서 디지털 홀로그램은 고부가가치 콘텐츠라고 볼 수 있다. 이런 고부가가치 콘텐츠의 저작권을 보호하기 위해 워터마킹, 암호화와 같은 기술들이 연구되고 있다[1-6]. 또한 현재 출시된 최고 성능의 재생장치를 이용해 한 장의 디지털 홀로그램(1,920x1,080[pixel2])을 복원했을 경우 약 1[cm2] 수준의 해상도를 보이는 홀로그래픽 복원영상을 디스플레이 할 수 있다. 이는 신호처리, 특히 데이터 압축분야를 전공으로 하는 연구자들에게는 상당한 동기부여가 되고 있다[5].

본 논문에서는 디지털 홀로그램의 효율적인 신호처리 기술을 개발하기 위해 Fresnel 변환영역에서의 주파수 특성을 분석한다. 이를 위해, CGH 기법으로 생성한 디지털 홀로그램을 대상으로 자체적으로 구현한 Fresnel 변환 프로그램을 이용해 디지털 홀로그램이 Fresnel 변환 영역에서 갖는 고유의 특성을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Fresnel 변환에 대해 설명하고, 3장에서는 Fresnel 영역에서의 주파수 특성을 분석하여 그 결과에 대대하여 논의한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. Fresnel 변환

Fresnel 변환은 파동의 Fresnel 회절(Fresnel diffraction)의 기술이 도입된 변환으로, 그림 1에서 보이고 있는 것처럼 입력공간과 출력공간 사이의 거리를 이용해 정변환(Fresnel transform, FT)과 역변환(Inverse Fresnel transform, IFT)이 가능하다.

Fresnel 변환 $E(x,y,z)$ 는 다음과 같은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$E(x, y, z) = E_0 * h(x, y, z) \quad (1)$$

그림 1. Fresnel 변환 모델
Fig. 1 Model of Fresnel transform

여기서 Impulse 응답 $h(x, y, z)$ 는,

$$h(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp\left(\frac{\pi i}{\lambda z} [x^2 + y^2]\right) \quad (2)$$

와 같이 정의된다.

따라서 Fresnel 변환은 다음의 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$E(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint E(\xi, \eta, 0) \exp\left(\frac{\pi i}{\lambda z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right) d\xi d\eta \quad (3)$$

여기서 η, ξ 는 입력공간의 좌표, x, y 는 출력공간의 좌표를 의미한다. z 는 입력공간에서 출력공간까지의 거리, λ 는 주파수를 의미한다.

상기의 식 (3)의 수식에 의한 디지털 홀로그램의 Fresnel 변환한 결과를 그림 2에서 보이고 있다. 그림 2(a)는 CGH 기법으로 생성한 디지털 홀로그램, 그림 2(b)는 Fresnel 변환 후 얻은 실수부, 그림 2(c)는 허수부, 2(d)는 (b),(c)를 이용해 생성한 절대값 영상이다. 이 영상들은 모두 시각적인 관측을 위해 주파수 값들을 0~255 사이의 값들로 재조정(normalization)한 결과들이다. 그림 2의 (d)에서 확인할 수 있듯이 Fresnel 영역에서는 복원객체의 모양이 시각적으로 판별 가능할 정도로 뚜렷하기 때문에 일반영상과 유사한 방법으로 워터마킹 알고리즘을 개발한 후 적용해 볼 여지가 있다. 그림 3에서는 대표적인 자연영상인 Lena와 그림 2(d)의 절대값 영상의 화소분포를 보이고 있다. 그림 2(a)에서 보이고 있는 디지털 홀로그램은 인접화소간의 상관도가 매우 낮은 잡음과 유사한 형태였지만, 그림 3(b)를 보면 인접화소들 간

의 상관도가 2(a)에 비해 높아진 것을 직관적으로 확인할 수 있다.

그림 2. 디지털 홀로그램의 Fresnel 변환 결과;
(a) 실수부, (b) 허수부, (c) (a)와 (b)를 이용해 생성한 절대값 영상

Fig. 2 Results of Fresnel transform of digital hologram;
(a) digital hologram, (b) Real, (c) Imaginary,
(d) Absolute value of real and imaginary

그림 3. 자연영상과 절대값 영상의 화소분포
(grid 크기=32); (a) lena의 화소분포도,
(b) 절대값 영상의 화소분포도

Fig. 3 Pixel distribution of natural image and digital hologram(grid size=32); (a) pixel distribution of Lena,
(b) pixel distribution of Fig. 2(d)

III. 주파수 특성분석

본 절에서는 디지털 홀로그래프의 효율적인 신호처리 기술을 개발하기 위해 홀로그래프 영역과 주파수 영역에서 디지털 홀로그래프의 특성을 분석한다. 분석을 위한 디지털 홀로그래프들은 다양한 실험데이터를 대상으로 하기 위해 PC에서 CGH 기법으로 생성한 데이터들을 사용한다.

CGH를 생성하기 위하여 컴퓨터 그래픽에 의해 만들어진 3D 모델을 이용한다. 이와 같이 3D 모델을 이용하는 이유는 CGH를 생성하기 위한 정보를 쉽게 얻을 수 있다는 이점이 있기 때문이다. 컴퓨터 그래픽으로 제작한 깊이정보(depth image)를 CGH를 생성하기 위한 정보로써 이용하였다. 제작한 깊이정보로부터 CGH를 생성하기 위해 객체의 3D 정보인 x, y, z축의 좌표 값과 좌표 값에 대한 빛의 강도를 추출하였다. 본 논문에서 컴퓨터 그래픽으로 제작한 깊이 정보들을 그림 2에서 보이고 있다.

그림 4. 깊이정보의 예
(a) 토끼, (b) 오리, (c) 스프링, (d) 주전자
Fig. 4 Example of depth images
(a) rabbit, (b) duck, (c) spring, (d) teapot

컴퓨터 그래픽으로 제작한 깊이정보(200×200 [pixel²])는 회색조 영상이며, 각 영상의 화소 값은 광원으로부터 객체까지의 거리를 의미한다. 즉 깊이정보를 8-비트로 나타낼 경우 가까운 객체에 대한 깊이정보는 255에 가까

운 값을 가지며, 멀리 있는 객체의 깊이정보는 0에 가까운 값을 갖는다.

3.1. Fresnel 영역에서의 특성분석 방법

디지털 홀로그래프의 Fresnel 영역에서의 주파수 특성 분석순서를 그림 5에서 보이고 있다. CGH 기법으로 생성한 디지털 홀로그래프를 FT 후 주파수 공간에서 Cloud, DC, Object의 세 영역을 선정하였다. 선정한 세 영역의 주파수 값들을 임의로 조작한 후 IFT를 수행하여 다시 홀로그래프 영역으로 변환한다. 이렇게 변환된 홀로그래프를 홀로그래픽 복원영상으로 재생한 후 변환하지 않은 원본 홀로그래프의 홀로그래픽 복원영상과 비교하여 화질의 열화정도를 측정하였다. 화질열화를 측정하는 도구는 일반적으로 사용되는 화질측정 방법인 PSNR (peak-signal to noise ratio)과 NC(normalized correlation) 값을 구하는 것으로 하였다.

그림 5. 디지털 홀로그래프의 주파수 특성분석 순서
Fig. 5 Analysis procedure in frequency domain of digital hologram

이처럼 주파수 공간에서 세 영역을 선정하는 이유는 디지털 홀로그래프를 FT하였을 경우 주파수 공간에서는 그림 2(d), 3(b)와 같이 타 영역과 확연히 구분되는 특성을 보이는 영역이 존재한다. 이렇게 선택한 세 영역을 그림 6에서 보이고 있다.

그림 6. FT후 주파수공간에서의 영역 설정
Fig. 6 Three region in Fresnel domain

이 영역의 값들을 임의로 조작한 후 IFT하여 복원된 디지털 홀로그램에 미치는 영향을 분석하기 위함이다. Fresnel 영역에서의 데이터 조작은 다음의 식 (4)와 같이 수행한다.

$$f'(u,v)=f(u,v)*\alpha \quad (4)$$

여기서 f 는 원본 주파수 계수 값, f' 은 변형된 주파수 계수 값, α 는 가중치를 의미하고 실제로 0, 0.01, 0.1, 0.5, 2, 4, 8로 한다.

각 영역별로 식 (4)와 같이 가중치를 변경하여 주파수 값들을 조작한 후 IFT를 수행하여 디지털 홀로그램으로 변환한다. 그 후 홀로그램의 복원영상으로 재생하여 시각적인 특성 및 객관적인 화질열화 정도를 측정한다.

3.2. Fresnel 영역에서의 특성분석 실험결과

가중치 변화에 따른 복원영상의 화질측정 실험은 복원영역 전체에 대한 화질변화량과 복원영상에서 주 관심영역에 해당하는 객체영역의 화질변화량을 각각 측정하였다.

그림 7에서 정량적인 화질측정을 위한 실험의 대상이 되는 복원영역과 객체영역의 예를 각각 보이고 있다. 그림 7(a)에서는 디지털 홀로그램을 복원한 복원영역의 전체영상을 보이고 있고, 그림 7(b)는 7(a)의 일부분, 즉 객체영역만을 보이고 있다.

그림 8에서는 세 영역의 가중치를 변경해가며 홀로그램의 복원영상의 전체화질을 측정한 결과를 보이고 있다.

그림 7. 복원영역; (a) 전체, (b) 객체
Fig. 7 Reconstruction domain; (a) Whole, (b) Object

(a)

(b)

그림 8. 가중치에 따른 PSNR과 NC 값(복원영역);
(a) NC, (b) PSNR

Fig. 8 PSNR and NC value according to change of weight(reconstruction domain); (a) NC, (b) PSNR

그림 8에서 확인할 수 있듯이 세 영역 중에서 'DC' 영역의 계수 값의 변화가 복원화질에 많은 영향을 주었고, 'Cloud'와 'Object' 영역의 계수 값은 상대적으로 덜 민감하다는 것을 확인할 수 있었다. 가중치의 경우 원래의 주파수 계수 값보다 더 큰 값으로 변경할 경우 복원화질에 많은 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9에서는 복원영상의 객체영역만을 별도로 선정하여 NC와 PSNR 값을 측정한 결과를 보이고 있다. 객체 영역의 경우에도 그림 8에서 보였던 복원영역 전체의 NC와 PSNR 값과 유사한 경향성을 보인다. 하지만 객체 영역의 NC와 PSNR 값은 전체적으로 낮은 값을 보이고 있어, 객체영역이 Fresnel 영역에서의 주파수 값 변화에 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

그림 9. 가중치에 따른 PSNR과 NC 값(객체영역);
(a) NC, (b) PSNR
Fig. 9 PSNR and NC value according to change of weight(object domain); (a) NC, (b) PSNR

그림 10에서는 영역별로 가중치를 조절해가며 계수 값들을 조작한 후 복원한 홀로그래픽 복원영상의 예를 보이고 있다. 그림 10에서는 조작하지 않은 원본영상과 'Cloud'영역에서 가중치를 '0.5'로 두고 조작한 후 복원한 영상을 예로 들어 보이고 있다.

실험결과를 정리하면 디지털 홀로그래프의 Fresnel 영역에서 주파수 계수 값들을 조작할 경우 DC 영역보다는 Cloud나 Object 영역의 계수 값들을 조작하는 것이 시각적인 화질열화를 줄여줄 가능성이 커 보였다. 또한 계수

값의 조작 범위는 원본 값을 기준으로 0.5배 내외가 적절할 것으로 보인다.

그림 10. 계수 값 조작 후 복원한 영상의 예;
(a) 원본, (b) Cloud='0.5'
Fig. 10 Example of holographic reconstruction image after artificial manipulation; (a) original, (b) Cloud='0.5'

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 홀로그래프를 주파수변환한 후 주파수 영역에서의 특성을 분석하였다. 주파수 변환도구로는 광학분야에서 널리 사용되고 있는 광파 전달 모델인 Fresnel 변환을 이용하였다.

분석결과 Fresnel 영역의 DC영역의 계수 값을 조작하는 것은 홀로그래픽 복원영상의 화질에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 만약 디지털 홀로그래프에 부호화와 같은 신호처리 기술을 적용하기 위해서는 Fresnel 변환영역에서 DC 계수 값을 제외한 영역의 값들을 조작하는 것이 복원화질에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 방법으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 손정영, “홀로그래피의 원리와 응용”, 봉명, 2004.
- [2] 최현준, 서영호, 유지상, 김동욱, “전역 2차원 DCT를 이용한 디지털 홀로그래프의 분석 및 워터마킹 기법” 한국정보통신학회 논문지, 제 11권 제 7호, pp. 1267-1274, 2007년 7월.
- [3] L. Z. Cai, M. Z. Me, L. Qing, and X. L. Yang, “Digital Image Encryption and Watermarking by Phase-shifting Interferometry,” *Applied Optics*, Vol. 43, No. 15, pp. 3078-3084, May 2004.
- [4] H. Kim and Y. Lee, “Optimal Watermarking of Digital Hologram of 3-D Object,” *Optics Express*, Vol. 13, o. 8, pp. 2881-2886, April 2005.
- [5] 최현준, 서영호, 이운혁, 김동욱, “디지털 홀로그래프의 복원영역에서의 워터마킹 알고리즘”, 2011년 한국방송공학회 추계학술대회, 2011년 11월.
- [6] H. J. Choi, Y. H. Seo, J. S. Yoo, and D. W. Kim, “Digital watermarking technique for digital holography interference patterns in a transform domain,” *Optics and Lasers Engineering*, Vol. 46, pp. 343-348, Jan. 2008.

저자소개

최현준(Hyun-Jun Choi)

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

2009년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
2009년 3월 ~ 2009년 8월 : 광운대학교 실감미디어 연구소 박사후 연구원
2009년 9월 ~ 2010년 2월 : 광운대학교 실감미디어 연구소 연구교수
2010년 3월 ~ 2011년 7월 : 안양대학교 조교수
2011년 8월 ~ 현재 : 목포해양대학교 전자공학과 조교수
※ 관심분야 : 영상압축, 워터마킹, 암호학, FPGA/ASIC 설계, 디지털 홀로그래피

서영호(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 부교수
※ 관심분야 : 2D/3D 영상 및 비디오 처리, 디지털 홀로그래프, SoC 설계, 워터마킹/암호화

김동욱(Dong-Wook Kim)

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

1991년 9월 : Georgia공대 전기공학과 졸업(공학박사)
1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 정교수.
광운대학교 신기술 연구소 연구원
2000년 3월 ~ 2001년 12월 : 인티스닷컴(주) 연구원
2009년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 실감미디어연구소장
※ 관심분야 : 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP 설계, Wireless Communication