

論文97-34D-5-9

Angular 스펙트럼을 이용한 3차원 HPO 디지털 홀로그램의 합성

(Angular-spectrum based 3-D HPO Digital Hologram Synthesis)

楊勳其*, 金恩洙**

(Hoon-Gee Yang and Eun-Soo Kim)

요 약

본 논문에서는 2차원 수평단면들의 합으로 모델링된 3차원 물체에 대한 새로운 HPO 디지털 홀로그램의 합성 방법을 제시한다. 제시된 방법은 물체로부터 산란되는 광파의 공간 좌표 상의 분포를 angular 스펙트럼 평면상의 분포로 변환시킴으로써 3차원 영상을 구성하는 2차원 수평 영상에 대한 디지털 홀로그램을 합성할 때 FFT 루틴을 사용할 수 있도록 한다. 하나의 2차원 영상에 대한 디지털 홀로그램을 얻기 위해서 요구되는 샘플링 조건 및 구체적인 시뮬레이션 방법을 제시하고 인터폴레이션의 필요성도 지적한다. 시뮬레이션을 통해서 제시된 방법이 기존의 ray-tracing 방법에 비하여 FFT 루틴을 이용하므로써 계산시간을 획기적으로 단축시킬 수 있음을 보인다. 또한 제시된 방법은 angular 스펙트럼을 이용하므로써 위상오차를 포함하고 있지 않아 ray-tracing 방법과 유사한 정도의 성능을 지니고 있음을 보이며 인터폴레이션 과정에서의 파라메타 값의 선택에 따른 복원성능의 차이점을 보인다.

Abstract

In this paper, we present a new scheme to synthetically generate a HPO digital hologram for a three-dimensional image that is modelled as the horizontally stacked two-dimensional images. The proposed method transforms a lightwave field into the angular spectrum of planewaves, which enables this method to use FFT routines, rather than using numerous arithmetic calculations. Hence, this method may be able to not only lead to the dramatically less computation but provide relatively excellent performances due to the phase error free transformation. We present sampling constraints and implementation procedure to obtain a hololine for each image and also point out the necessity of interpolation. Simulation results are presented to show the comparison with the conventional method in terms of computation time and performances, including the behaviors resulting from the different selection of parameter values to be used in the interpolations.

1. 서 론

* 正會員, 光云大學校 電波工學科 新技術研究所

(Dept. of Radio Science & Eng., Institute of New Technology, Kwangwoon Univ.)

** 正會員, 光云大學校 電子工學科 新技術研究所

(Dept. of Electronic Eng., Institute of New Technology, Kwangwoon Univ.)

※ 본 연구는 정보통신부 대학기초연구 및 과학재단 목적기초 연구지원에 의해 연구되었다.

接受日字: 1996年10月23日, 수정완료일: 1997年5月2日

3차원 영상의 합성에 필수적인 디지털 홀로그래피 기술은 초고속 정보 통신망의 구축과 함께 차세대 고부가가치 서비스를 제공할 수 있는 핵심기술로서 주목을 받고 있다. 하지만 광소자의 해상도 및 디지털 시스템의 처리속도 등이 충분하지 않아서 디지털 홀로그래피 기술을 이용한 3차원 영상통신 기술은 당분간 실용화되기 어려운 형편이다.

3차원 영상을 합성하는 방법으로 3차원 TV에 응용

된 렌티큘라 시트 방식등이 제안되었지만 관찰자의 눈에 피로감을 주고 입체감을 충분히 주지 못하였다.^[11] 이 보다 입체감을 더 줄 수 있는 방법으로 홀로그래픽 스테레오그램 방식이 제안되어 다수의 2차원 의료 영상을 3차원으로 합성하는데 적용되었으며 스테레오그램의 해상도를 높이기 위해서 데이터를 보상하거나 스테레오그램을 압축하여 전송하는 방법 등이 연구되고 있다.^{[12] [13] [14]} 하지만 제시된 여러 가지 방법들은 현재의 소자 및 디지털 시스템의 한계로 인해 제안되었을 뿐 디지털 홀로그래피 방법 보다 더 완전한 3차원 영상을 제공할 수는 없다. 현재 디지털 홀로그래피 기술에서 가장 문제시 되고 있는 것은 홀로그램 합성 속도이다. 병렬처리 기술을 이용해서 하드웨어적으로 해결하려는 연구가 MIT 미디어 연구소를 중심으로 진행되었으며 이와는 별도로 합성 속도를 개선할 수 있는 알고리즘 개발에 관한 연구도 발표되었다.^[15] 후자에 대한 연구는 Fresnel 근사식을 이용하는 방법과 angular 스펙트럼을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. Fresnel 근사식을 이용하는 방법은 이미 오래전부터 이용되었지만 복원 영상과 홀로그램 사이의 거리가 충분히 커야 적용될 수 있으므로 백색광을 이용한 복원이 불가능하고 복원 성능도 좋지 않다. Angular 스펙트럼을 이용하는 방법은 Leseberg에 의해 이미지 홀로그램을 합성하는데 처음 이용되어 3차원 영상을 홀로그램 평면과 평행한 다수의 2차원 평면으로 모델링하여 angular 스펙트럼을 적용하였다.^{[16] [17]} 최근에는 angular 스펙트럼을 이용해서 2차원 물체에 대한 디지털 홀로그램을 합성하는 방법이 제안되어 복원성능 및 계산 속도면에서 기존 방법과의 비교 결과가 발표되었으며 또한 이 방법은 3차원 물체가 홀로그램 평면과 평행한 2차원 수직 단면의 합으로 모델링된 경우의 디지털 홀로그램 합성에 적용되었다.^{[18] [19]}

본 논문에서는 홀로그램 합성 시간을 더욱 획기적으로 단축시키기 위해서 3차원 물체를 2차원수평단면들의 합으로 모델링한 후 angular 스펙트럼 개념을 이용해서 각 2차원 단면에 대한 새로운 디지털 홀로그램 합성 알고리즘을 제시하고자 한다. 제시된 방법에서 각 단면에 대한 디지털 홀로그램 패턴 즉 홀로라인 값을 계산하는 과정은 angular 스펙트럼을 이용하는 고해상도 SAR(Synthetic Aperture Radar) 신호처리 알고리즘을 변형하므로써 유도되었다. II절에서는 2차원 수평단면에 대한 새로운 디지털 홀로그램 합성 알고리즘

을 제시하였고 III절 및 IV절에서는 알고리즘을 실행시키는 구체적 방법 및 인터폴레이션 과정을 각각 설명하였으며 V절에서는 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

II. 알고리즘

그림 1에서 처럼 (x, y) 평면과 평행한 수평단면들의 합으로 모델링된 가상의 3차원 물체에 대한 HPO (horizontal parallax only) 디지털 홀로그램 합성 과정을 생각하자. HPO 홀로그램에서는 광파가 (x, y) 평면과 평행한 방향으로만 진행한다고 가정하므로 z 방향으로의 방향 벡터 k_z 는 0이 되고 또한 $z=Z_i$ 인 평면상의 점광원은 홀로그램 평면 (u, v) 에서 $v=Z_i$ 인 홀로라인으로만 산란되는 것으로 간주할 수 있다.^[15]

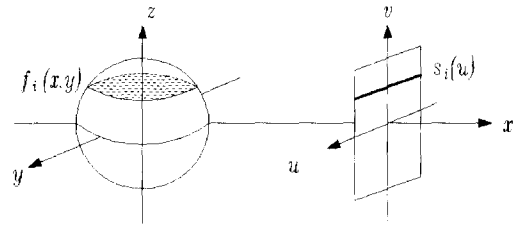


그림 1. 수평방향으로 슬라이스된 3차원 물체
Fig. 1. Horizontally sliced 3-D object.

그림 2는 $z=Z_i$ 인 평면을 위에서 내려본 것으로 2차원 단면상의 각 점은 구면파의 수평 단면, 즉 부채꼴 형태의 2차원 파를 산란한다고 가정할 수 있다. 이 때 $v=Z_i$ 에 도달한 광파 $s_i(u)$ 은

$$s_i(u) = \iint f_i(x, y) \frac{\exp[jkr(x, y, u)]}{r(x, y, u)} dx dy \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, $f_i(x, y)$ 는 $z=Z_i$ 인 단면을 나타내는 함수이고 $r(x, y, u)$ 는 점광원과 홀로그램 평면 사이의 거리로서

$$r(x, y, u) = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (u - y)^2} \quad (2)$$

이며 X_1 은 원점에서 홀로그램 평면까지의 거리다. 식(1)에서 $1/r(x, y, u)$ 은 광파의 진폭 감쇄를 나타내는 성분으로서 복원결과에 영향을 거의 안 미치므로 영향을 무시하고 식(2)를 식(1)에 대입하면

$$s_i(u) = \iint f_i(x, y) \exp[jk\sqrt{(X_1 - x)^2 + (u - y)^2}] dx dy \quad (3)$$

이 된다. 식(3)의 제곱근은 Fresnel 근사식을 이용하여 전개가능하나 그 경우 위상오차가 발생하게 되므로 여기서는

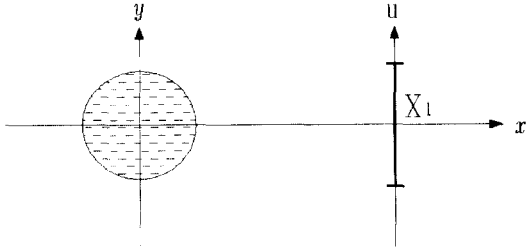


그림 2. 3차원 물체의 2차원 수평단면
Fig. 2. 2-D cross section of 3-D object.

구형과 특성을 나타내는 지수함수 $\exp[ik\sqrt{(X_1-x)^2+(u-y)^2}]$ 를 x 축 및 y 축 방향으로 방향 벡터가 $(\sqrt{k^2-a^2}, a)$ 인 평면파들의 합으로 전개한다. 즉,

$$s_i(u) = \iint dx dy da \frac{\exp[j\sqrt{k^2-a^2}(X_1-x)+a(u-y)]}{\sqrt{k^2-a^2}} \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다.^[10] 여기서 a 는 방향벡터를 결정하는 값이므로 $|a| \leq k$ 을 만족해야 한다 식(4)를 u 에 관해서 다시 푸리에 변환하면

$$S_i(k_u) = \iint dx dy da \frac{\exp[j\sqrt{k^2-a^2}(X_1-x)-ay]}{\sqrt{k^2-a^2}} \delta(k_u-a) \quad (5)$$

이 되며, 여기서 k_u 는 u 의 푸리에 변수를 나타낸다. 식(5)를 다시 정리하면

$$S_i(k_u) = \iint dx dy \frac{\exp[j\sqrt{k^2-k_u^2}(X_1-x)-k_u y]}{\sqrt{k^2-k_u^2}} \quad (6)$$

이 되고 식(6)을 정돈하면

$$S_i(k_u) = \frac{\exp[j\sqrt{k^2-k_u^2} X_1]}{\sqrt{k^2-k_u^2}} F_i(\sqrt{k^2-k_u^2}, k_u) \quad (7)$$

이 되며 여기서 $F_i(\cdot, \cdot)$ 는 $f(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환이다.^[11] 따라서, 식(7)을 이용해서 $f_i(x, y)$ 을 2차원 푸리에 변환하여 $F_i(\cdot, \cdot)$ 를 얻은 후 $\exp[j\sqrt{k^2-k_u^2} X_1]/\sqrt{k^2-k_u^2}$ 를 곱하므로써 $S_i(k_u)$ 를 얻을 수 있고 1차원 역푸리에 변환에 의해서 $s_i(u)$

값을 얻을 수 있다.

III. 알고리즘의 실행

식 (7)에서 $F_i(\sqrt{k^2-k_u^2}, k_u)$ 가 (x, y) 의 2차원 푸리에 변환 평면인 (k_x, k_y) 에서 차지하는 궤적은 $k_x = \sqrt{k^2-k_u^2}$ 이고 $k_y = k_u$ 이므로 $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ 이 되어 반지름이 k 인 원의 일부분을 차지하게 된다. 여기서 일부분이라고 말한 이유는 홀로그램 평면의 샘플간격 Δ_u 가 유한하므로 DFT(Discrete Fourier Transform) 성질에 의해서 $|k_u| = |k_y| \leq 2\pi/2\Delta_u$ 이 되기 때문이다. 그림 3의 오른쪽에 있는 실선 곡면은 반지름이 k 인 원을 나타내고 있으며 원상의 점들은 $S_i(k_u)$ 를 계산하는데 필요한 $F_i(\cdot, \cdot)$ 의 데이터 값들의 위치를 나타내고 있다. 홀로그램 플레이트 크기가 $2u_0$ 라면 $k_u = m\Delta_{k_u}$ ($\Delta_{k_u} = 2\pi/2u_0, m: 정수$)인 위치에서의 $S_i(k_u)$ 의 데이터 값이 필요하며 이는 (k_x, k_y) 평면에서 $(\sqrt{k^2-(m\Delta_{k_u})^2}, m\Delta_{k_u})$ 의 위치에서의 $F_i(\cdot, \cdot)$ 의 함수값을 알아야 한다. 이 함수값들을 찾는 방법을 설명하기 위해 $f_i(x, y)$ 의 푸리에변환 함수 및 $f_i(x, y)$ 을 샘플링한 함수의 2차원 DFT한 함수를 각각 $F_\delta(k_x, k_y)$ 과 $F_\delta(k_x, k_y)$ 로 정의하자. 이때 함수 $F_\delta(k_x, k_y)$ 는

$$F_\delta(k_x, k_y) = F_i(k_x, k_y) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(k_x - m\Delta_k) \delta(k_y - n\Delta_k) \quad (8)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 $\Delta_{k_x}, \Delta_{k_y}$ 는 k_x 및 k_y 축 상에서 샘플링 간격으로서 $f_i(x, y)$ 의 샘플링된 함수의 크기가 x 축 및 y 축으로 L_x 및 L_y 라면 $2\pi/L_x$ 과 $2\pi/L_y$ 에 의해 각각 정해지는 값이다. 또한 (k_x, k_y) 평면에서 $F_\delta(k_x, k_y)$ 함수값이 존재하는 범위는 $f_i(x, y)$ 의 샘플링 함수의 x 축 및 y 축 방향으로의 샘플 간격이 각각 Δ_x, Δ_y 라고 할때

$$|k_x| \leq \frac{2\pi}{2\Delta_x}, |k_y| \leq \frac{2\pi}{2\Delta_y} \quad (9)$$

이 된다. 그림 3에서 정사각형 그리드(grid)의 각 교차점은 DFT 에 의해 $F_\delta(k_x, k_y)$ 함수값이 주어진 위치를 나타내고 있다. 그림 3에서 보여 주듯이 $F_\delta(k_x, k_y)$ 은 (k_x, k_y) 평면에서 기저대역 영역에 있고 함수값이 요

구되는 $F_i(\cdot, \cdot)$ 는 대역통과 영역에 있으므로 필요한 데이터를 찾을 수는 없다. 이것을 해결하는 방법으로서 $f_i(x, y)$ 에 $\exp(jkx)$ 을 곱한 함수를 생각하자. 이 함수를 $g_i(x, y)$ 라하면 $g_i(x, y) = f_i(x, y) \exp(jkx)$ 로 나타낼 수 있다.

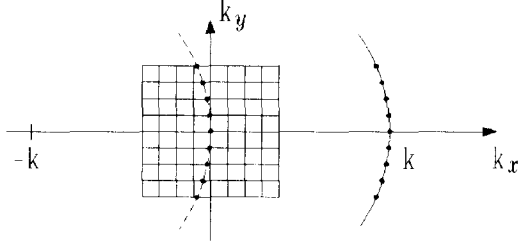


그림 3. (k_x, k_y) 평면에서의 데이터의 궤적
Fig. 3. Data trajectory in (k_x, k_y) domain.

$g_i(x, y)$ 에 대해서 식(3)으로부터 식(7)까지의 과정을 되풀이 하면

$$S_i(k_u) = \frac{\exp[j\sqrt{k^2 - k_u^2} X_1]}{\sqrt{k^2 - k_u^2}} G_i(\sqrt{k^2 - k_u^2} - k, k_u) \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다. 이때 식(10)의 $G_i(\cdot, \cdot)$ 함수가 (k_x, k_y) 평면에서 차지하는 궤적은 $(k_x + k)^2 + k_y^2 = k^2$, 즉 그림 3에서 점선으로 표시한 부분에 해당한다(지금부터 이 점선과 그리드의 수평라인과 교차되는 점들의 집합을 U 라고 명명할 것이다). 그러므로 $g_i(x, y)$ 를 2차원 DFT하여 얻어진 데이터를 이용해서 U 위치에서의 함수값을 인터폴레이션(interpolation)에 의해 얻는다면 원하는 위치에서의 $F_i(\cdot, \cdot)$ 함수값과 같게 된다. 그러므로 식(10)을 이용해서 $S_i(k_u)$ 을 계산할 수 있고 결과적으로 산란패턴 $s_i(u)$ 를 계산할 수 있다.

$f_i(x, y)$ 에 $\exp(jkx)$ 를 곱하는 과정은 사실상 불필요하며 그 이유를 설명하기 위해 참고로 식(7)을

$$S_i(k_u) = \frac{\exp[j\sqrt{k^2 - k_u^2} X_1]}{\sqrt{k^2 - k_u^2}} F_i(\sqrt{k^2 - k_u^2} - k_p, k_u) \quad (11)$$

와 같이 변형해 보자. 식(11)에서의 $F_i(\cdot, \cdot)$ 가 (k_x, k_y) 평면상에서 차지하는 궤적은 $(k_x + k_p)^2 + k_y^2 = k^2$ 이며 이것은 $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ 의 궤적을 k_x 축으로 $-k_p$ 만큼 이동시킨 것과 같다. k_p 를 k 값 근처의 값

으로 택한다면 $(k_x + k_p)^2 + k_y^2 = k^2$ 의 궤적은 정사각형 그리드 내에 존재하게 되며 인터폴레이션에 의해서 $F_i(\cdot, \cdot)$ 값을 찾을 수 있다. 여기서 찾아진 값을 식(11)에 대입하여 $S_i(k_u)$ 를 찾고 그로부터 $s_i(u)$ 를 찾는다면 이 홀로그래프 패턴으로부터 복원된 영상은 $f_i(x, y) \exp(-jk_p x)$ 가 되며 결과적으로 진폭정보인 $f_i(x, y)$ 가 관찰된다.

IV. 인터폴레이션

함수 $F_\delta(k_x, k_y)$ 가 주어졌을 때 인터폴레이션에 의해 U 위치에서의 함수값을 찾는 과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 식(8)에서 델타함수는 Poisson's sum 공식에 의해서

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(k_x - m\Delta_k) = \frac{1}{\Delta_k} \sum_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp[j\frac{2\pi m}{\Delta_k} k_x] \quad (12)$$

와 같이 표현할 수 있으므로 식(8)은

$$F_i(k_x, k_y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_i(k_x, k_y) \exp[j2\pi(\frac{m}{\Delta_k} k_x + \frac{n}{\Delta_k} k_y)] \quad (13)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $f_i(x, y)$ 를 완전히 포함하는 정사각형의 한 면이 길이가 $2D$ 라면 $\Delta_k = \Delta_{k_x} = 2\pi/2D$ 가 된다. 식(13)을 k_x, k_y 에 대해서 2차원 역푸리에 변환을 하면

$$f_\delta(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_i(x - \frac{2\pi}{\Delta_k} m, y - \frac{2\pi}{\Delta_k} n)$$

이 되며 $f_\delta(x, y)$ 함수에

$$i(x, y) = \begin{cases} 1 & \sqrt{x^2 + y^2} \leq D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

으로 정의된 $i(x, y)$ 를 곱하면 $2\pi/\Delta_k = 2\pi/\Delta_{k_x} = 2D$ 이므로 $f_i(x, y)$ 를 얻을 수 있다. 이 관계는 컨볼루션(convolution) 정리에 의해서

$$F_i(k_x, k_y) = F_\delta(k_x, k_y) ** I(k_x, k_y) \quad (15)$$

와 같이 표현될 수 있다. 식(15)에서 **는 2차원 컨볼루션을 나타내고 있으며 $I(k_x, k_y)$ 는 식(14)에서 정의된 $i(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환으로서

$$I(k_x, k_y) = D^2 \cdot \frac{J_1(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} D)}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2} D} \quad (16)$$

으로 정의된 함수이며 여기서 $J_1(\cdot)$ 은 1종 1차 Bessel함수를 나타낸다. 식(15)를 정리하면 인터플레이션에 이용할 수 있는 결과식

$$F_i(k_x, k_y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_i(m\Delta_k, n\Delta_k) I(k_x - m\Delta_k, k_y - n\Delta_k) \quad (17)$$

을 얻을 수 있다. 식(17)에서 $F_i(m\Delta_k, n\Delta_k)$ 는 $f_i(x, y)$ 로 부터 DFT 에 의해 얻을 수 있는 데이터이며 $I(\cdot, \cdot)$ 는 Bessel 함수 테이블로 부터 찾을 수 있는 값이므로 식 (17)에서 U 위치, 즉 (k_x, k_y) 가 $(\sqrt{k^2 - m\Delta_k^2} - k, m\Delta_k)$ 인 위치에서의 $F_i(\cdot, \cdot)$ 값을 계산할 수 있다. 다만 식(17)을 이용할 때 m, n 이 모든 정수를 포함하므로 인터플레이션을 하는데 시간이 상당히 걸리나 $I(\cdot, \cdot)$ 함수는 m, n 의 절대값이 0에서 멀어짐에 따라 무시될 정도의 함수값을 가지므로 윈도우 함수를 이용해서 인터플레이션에 사용되는 데이터 갯수를 줄일 수 있다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

제시한 방법의 성능분석을 위해서 3차원 물체의 한 수평단면에 대한 디지털 홀로그래ムの 합성 및 복원 과정을 SPARC 2 워크스테이션에서 IMSL 라이브러리를 이용하여 시뮬레이션하였다. 수평단면은 그림 4와 같이 3개 점으로 구성되어 있는 2차원 영상이며 홀로그래ム 플레이트는 크기가 0.04 m가 되도록 하였다. 물체를 구성하는 3개의 점은 원점을 중심으로 $(-0.01, 0.006)(m)$, $(0., -0.006)(m)$, $(0.01, 0.)(m)$ 에 각각 위치하는 것으로 가정하였으며, 원점으로 부터 홀로그래ム 평면까지의 거리는 0.1(m)로 하였다. 또한 복원시킬 때 사용하는 레이저 광원의 파장은 실제 He-Ne 파장보다 500배 크다고 가정하였는데 그 이유는 다음과 같다. 홀로그래ム 픽셀 간격을 Δ_u 라고 하면 Δ_u 는 $Z_i \lambda / 2(D+L_H)$ (여기서 L_H 은 홀로그래ム 플레이트 크기의 반을 나타냄) 값보다 작아야 한다.¹⁸⁾ L_H 이 D 와 같은 경우 위에서 제시한 파라메타 값을 사용한다면 홀로그래ム 상의 한 홀로라인에 5000개의 픽셀이 존재해야 한다. 이 경우 $k_u = k_v$ 이므로 2차원 단면의 y축 방향

으로도 5000개와 같거나 이것의 정수배에 해당하는 점들이 존재해야 하며 만약 같은 수의 점이 있다면 $f_i(x, y)$ 를 5000×5000 어레이로 표현해야 한다. 이 정도의 데이터 크기라도 제시된 방법으로 디지털 홀로그래ム을 합성하는 경우 기존의 컴퓨터로 충분히 계산이 가능하나 복원 과정을 시뮬레이션 하는데는 엄청난 시간이 소요된다. 그러므로 여기서는 파장을 스케일링하여 Δ_u 가 충분히 커도 샘플링 조건에 위배되지 않도록 하였다. 파장을 스케일링한 결과 한 홀로라인에 64개의 픽셀이 있어도 샘플링 조건에 위배되지 않았으므로 여기서 모델링된 영상(그림4) 및 복원 영상(그림5, 6, 7, 8)들은 모두 64×64 개의 픽셀로 구성되어 있다. 그림 5는 식(3)에서 제시된 ray-tracing 방법으로 디지털 홀로그래ム을 합성한 후 복원시킨 결과이다. 깊이방향(그림에서 x축방향)으로의 해상도가 떨어지는 것처럼 보이나 홀로그래ム 합성 및 복원과정에서 근사식을 전혀 사용하지 않은 것이므로 디지털 홀로그래ム 복원 영상의 광세기 분포가 그림 5와 같다면 실제 사람의 눈에는 충분히 입체감이 나타난다고 예상할 수 있다.

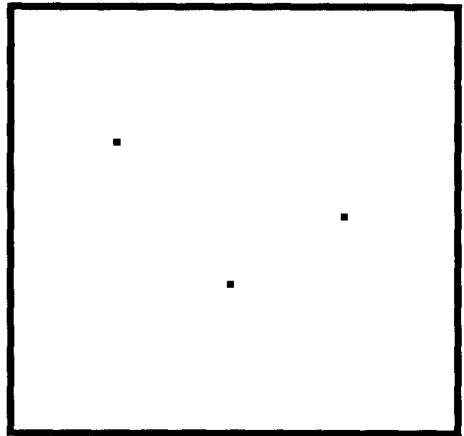


그림 4. 테스트 영상
Fig. 4. Test image.

그림 6 부터 그림 8까지는 제시된 알고리즘을 이용해서 디지털 홀로그래ム을 합성한 후 복원시킨 결과로서 각각은 인터플레이션에 의해서 함수값 $F_i(\sqrt{k^2 - m\Delta_k^2} - k, m\Delta_k)$ 을 계산할 때 이용한 데이터의 범위에 따라 구분된 것이다. 그림 6의 경우 하나의 샘플값을 얻는데 원하는 위치에서 가장 가까이 있는 그리드 데이터를 사용한 경우이고 그림 7은 반경이 $2\Delta_k$ (Δ_k : 그리드의 픽셀 간격)인 원에 포함된 데이터를 이용해서

샘플값을 인터폴레이션한 경우이며 그림 8은 반경이 $10\Delta_k$ 인 원에 포함된 데이터를 이용한 결과이다. 3장에서 설명한 것처럼 $I(\cdot, \cdot)$ 함수는 m, n 이 클때는 0에 가까우므로 반경이 $2\Delta_k$ 또는 $3\Delta_k$ 인 원내에 포함된 데이터를 이용하여 인터폴레이션을 하여도 반경이 $10\Delta_k$ 의 데이터를 이용한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

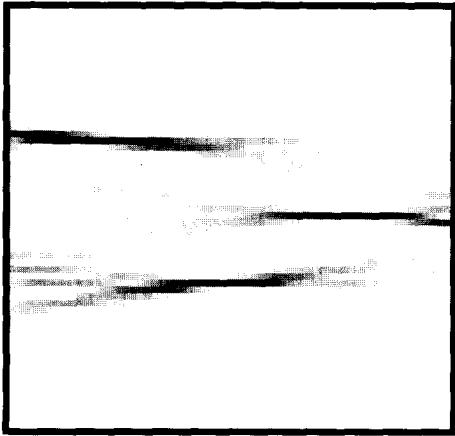


그림 5. ray-tracing 방법에 의해 합성된 홀로그래프의 복원 영상

Fig. 5. Reconstructed image from ray tracing based hologram.

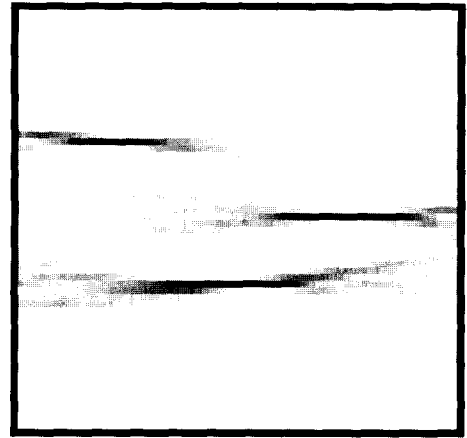


그림 7. 제시된 알고리즘에 의해 합성된 홀로그래프의 복원영상(mm=2)

Fig. 7. Reconstructed image from proposed hologram. (mm=2)

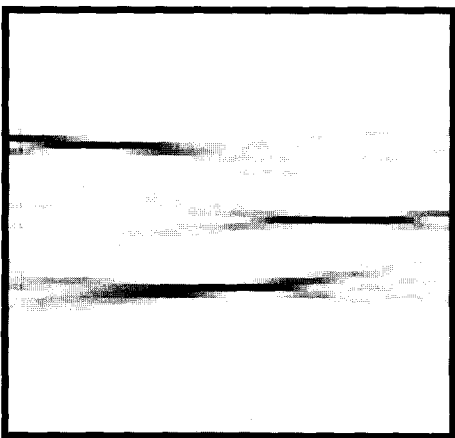


그림 6. 제시된 알고리즘에 의해 합성된 홀로그래프의 복원영상(mm=1)

Fig. 6. Reconstructed image from proposed hologram (mm=1)

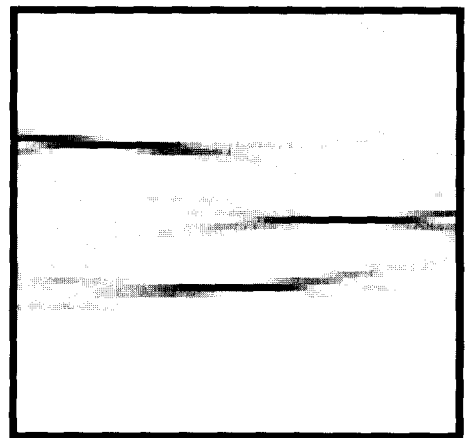


그림 8. 제시된 알고리즘에 의해 합성된 홀로그래프의 복원영상(mm=10)

Fig. 8. Reconstructed image from proposed hologram. (mm=10)

각각의 방법으로 디지털 홀로그래프를 합성하는데 소요되는 시간을 비교하기 위해서 2차원 단면을 좀더 복잡하게 256×256 픽셀로 구성된 것으로 모델링하였다.

지금까지 설명한 시뮬레이션에 의한 복원과정은 코딩 및 간섭파 (reference wave) 의 사용을 고려하지 않았다. 하지만 광학적으로 복원하기 위해서는 코딩과정

이 필요하므로 간단한 Burch 코딩을 이용하여 계산된 on-axis 산란패턴을 복원시키는 방법을 생각하자.¹⁶⁾ 복소수 형태의 산란패턴 $s_i(u)$ 가 계산되면 Burch 코딩에서는 $s_i(u)$ 의 실수부만 택하며 이와 같이 하여 코딩된 on-axis 디지털 홀로그램은 그림 9에서 보여준 시스템에 의해 복원시킬 수 있다. 그림 9에서 컴퓨터에 의해 계산된 산란패턴 $s_i(u)$ 는 LCD에 디스플레이되며 평면파에 의해 조사된다. 복원 결과를 관찰할 때 on-axis 홀로그램에서는 DC성분이 문제가 되므로 퓨리에 변환 렌즈를 이용하여 주파수 평면에서 DC blocking을 하였다.

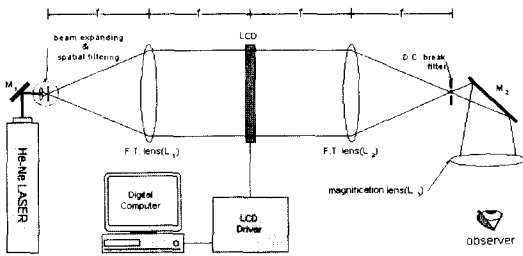


그림 9. 광학적 복원시스템의 개략도
Fig. 9. Schematic diagram of optical reconstruction system.

VI. 결 론

본 논문에서는 2차원 수평단면들의 합으로 모델링된 3차원 영상에 대한 새로운 디지털 홀로그램 합성 알고리즘을 제시하였다. 제시된 방법은 3차원 물체를 수직 방향이 아닌 수평방향으로 슬라이스된 2차원 단면들의 합으로 모델링함으로써 HPO 홀로그램의 장점을 이용하였을 뿐 아니라 angular 스펙트럼을 이용해서 구면파를 평면파들의 합으로 분해함으로써 FFT 루틴의 사용을 가능하게 하여 계산량을 획기적으로 단축시켰다. 계산과정에서는 FFT 루틴 외에도 인터폴레이션 과정이 요구되므로 대역제한 신호에 많이 사용되는 인터폴레이션 방법을 2차원으로 확장시켜 사용하였다. 인터폴레이션에 사용되는 파라메타 값에 따라 계산시간이 달라지나 1종 1차 Bessel 함수의 과형을 고려할 때 한 점을 인터폴레이션 하는데 그점 주위의 서너개의 데이터를 사용하여도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 2차원 단면 크기를 64×64로 모델링하여 제시된 방법 및 ray-tracing 방법으로 합성 및 복원 과정을 시뮬레

이션 하였다. 그 결과 제시된 방법이 ray-tracing 방법에 비해 계산 시간을 획기적으로 단축시키면서도 거의 비슷한 정도의 복원 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Okoshi, "Three-dimensional displays", *Proc. IEEE*, vol. 68, no. 5, pp. 548-564, 1980.
- [2] T. Yatagai, "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms", *Appl. Opt.*, vol. 15, pp. 2722-2729, 1976.
- [3] M. Yamaguchi, H. Hoshino, T. Honda and N. Ohya, "Phase added stereogram : calculation of hologram using computer graphic technique", *Proc. SPIE*, vol. 1914, pp. 25-41, 1993.
- [4] H. Yoshikawa and J. Tamai, "Holographic image compression by motion picture coding", *Proc. SPIE*, vol. 2652, pp. 2-9, 1996.
- [5] M. Lucente, "Optimization of hologram computation for real-time display", *Proc. SPIE*, vol.1667, pp.32-43, 1991.
- [6] D. Leseberg, "Computer-generated three-dimensional image holograms", *Appl. Opt.*, vol. 31, pp. 223-229, 1992.
- [7] A. Jendral, R. Brauer and O. Bryngdahl, "Synthetic image holograms : computation ang properties", *Opt. Comm.*, vol. 109, pp. 47-53, 1994.
- [8] H. Yang and Eun-Soo Kim, "Waveform-decomposition based algorithm for horizontal parallax only display computer generated holograms", *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 510-512, 1996.
- [9] 양훈기, 이상이, 김은수, "다수의 이차원 단층영상으로 부터 삼차원 영상을 합성하기 위한 angular 스펙트럼의 적용", *통신학회 논문지*, 제 21권 제 7호, 1668-1676, 1996, 7
- [10] P. Morse and H. Feshback, *Methods of Theoretical Physics*, New York: Mc Graw Hill, 1968.
- [11] H. Yang and M. Soumekh, "Blind-velocity SAR/ISAR imaging of a moving target in

a stationary background”, *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 2, pp. 80-95, January, 1993.

[12] S. Haykin, *Communication system*, John Wiley & Sons, 3rd ed., 1994.

— 저 자 소 개 —

楊勳其(正會員) 第 33卷 12號 參照

金恩洙(正會員) 第 33卷 12號 參照