

삼차원 영상의 시각 디스플레이를 위한 이미지 홀로그램의 합성

正會員 楊 勳 其*, 金 恩 洙**

Synthesis of image hologram for visual display of a 3-D image

Hoon-Gee Yang*, Eun-Soo Kim** *Regular Members*

※본 논문은 1996년도 학술진흥재단 자유공모과제 연구비에 의해서 연구 되었음

요 약

본 논문에서는 홀로그램 평면과 평행한 이차원 단면들의 합으로 3차원 물체를 모델링하여 이미지 홀로그램을 합성하는 기존의 방법과는 달리 3차원 물체를 수평단면들의 합으로 모델링하여 이미지 홀로그램을 합성하는 새로운 방법을 제시한다. 제시된 방법은 최근에 Leseberg가 제시한 방법과 수식적으로는 동일하게 유도될 수 있으며 Leseberg 방법처럼 angular 스펙트럼을 사용하지만 홀로그램 평면과 수직 방향으로도 FFT를 사용하므로써 계산량을 획기적으로 감소시킬 수 있음을 보인다. 제시된 방법과 기존의 방법들과의 계산량의 차이를 수치적으로 분석하고 시뮬레이션에 의해 각 방법의 성능의 차이를 비교한다.

ABSTRACT

This paper presents a new method to calculate an image hologram pattern for a 3-D object modeled as a stack of horizontally sliced 2-D images, which is new in that existing methods were based on a 3-D model composed of 2-D images parallel to the hologram. It is shown that the proposed method manipulates data on the angular spectrum domain, just as a recently presented method by Leseberg which can be derived as the mathematically equivalent form of the proposed method. We also show that it differs from the Leseberg's method in that it utilizes FFT in the direction perpendicular to the hologram plane as well as parallel to it, which reduces the computational load considerably although additional computation like interpolation is required. We finally provide some

*광운대학교 전자공학과 신기술연구소

**광운대학교 전자공학과 신기술연구소

論文番號: 97283-0814

接受日字: 1997년 8월 14일

comparisons between the proposed method and the existing methods in terms of computational complexities and performances by computer simulation.

I. 서 론

광학적 이미지 홀로그래프는 마스터(master) 홀로그래프에 의해 실상(real image)이 복원되는 위치에 홀로그래프 플레이트를 놓고 간섭파 등을 이용해서 실상을 기록한 후 간섭파를 다시 조사하여 홀로그래프 평면 주위에 영상을 복원하는 기법이다. 그러므로 복원영상이 홀로그래프 평면 주위에 나타나는 점과 이로 인해 광원의 코히어런스 요구조건이 상당히 완화되어 백색광에 의해서 복원이 가능하다는 두가지 장점을 지니고 있다.^{[1][2]}

디지털 이미지 홀로그래프는 광학적 이미지 홀로그래프와는 달리 두단계의 기록 과정은 필요 없으며 이를 수학적으로 보상해 주면 되므로 합성과정은 일반적인 디지털 홀로그래프 정도의 복잡성을 지니지만 광학적 이미지 홀로그래프가 지닌 두가지 장점을 그대로 지니고 있어서 많은 주목을 받아왔다. 이미지 홀로그래프에서는 홀로그래프 평면과 복원영상 사이의 거리가 가까워서 기존의 Fresnel 근사식을 사용할 수 없으므로 근사식이 포함되어 있지 않은 알고리즘이 필요하였다. 그러므로 근사식이 없는 ray-tracing 방법을 적용하여야 했으며 이에 따른 많은 계산량으로 인해서 주로 2차원 물체에 대한 이미지 홀로그래프 합성 방법이 제시되었다.^{[3][4]} 최근 들어 디지털 시스템의 처리 속도가 크게 향상되어 3차원 물체에 대한 디지털 이미지 홀로그래프를 ray-tracing방법에 의해 계산 할 수는 있지만 이는 아주 간단한 물체에만 적용가능하며 현재로서는 거의 실용성이 없다.

최근에 근사식을 사용하지 않으면서도 푸리에 변환을 이용하여 계산량을 상당히 단축시킨 방법이 발표되었다.^[5] 여기서 Leseberg는 3차원 물체를 홀로그래프 평면과 평행한 단면들의 합으로 모델링하였고 각 단면에 대한 angular 스펙트럼을 홀로그래프 평면으로 변환시키는 방법에 의해서 이미지 홀로그래프를 합성하였다. 이 방법은 위상성분에 대한 근사식이 포함되어 있지 않으며 푸리에 변환을 주로 사용하므로 복원 결과가 우수하면서도 신속히 이미지 홀로그래프를 합

성할 수 있었다. 하지만 자연스러운 입체감을 주기 위해서 2차원 단면의 개수를 늘이면 계산량이 상당히 늘어나는 단점이 있다. Jendral은 Leseberg 방법이 렌즈를 사용하지 않고서도 복원 가능함을 수학적으로 분석하였고 실험 결과를 제시하였다.^[6]

본 논문에서는 Leseberg가 제시한 방법 처럼 근사식을 사용하지 않고 angular 스펙트럼을 사용하면서도 Leseberg 방법 보다 한단계 더 계산량을 개선시킨 새로운 방법을 제시하고자 한다. II절에서는 ray-tracing 방법으로 부터 출발하여 알고리즘을 유도하였고 III절에서는 수식 및 계산량의 관점에서 기존의 방법들과 비교하였으며 IV절에서는 시뮬레이션에 의해서 기존의 방법들과 복원 성능면에서 비교하였고 V절 결론 부분에서는 추가적으로 이루어져야 할 연구내용을 제시하였다.

II. 알고리즘

그림 1에서 처럼 (x, y, z) 공간 좌표상에서 홀로그래프가 $x=0$ 즉 (y, z) 평면상에 위치해 있으며 복원시켰을 때 홀로그래프 평면을 중심으로 홀로그래프 평면 및 평면 앞, 뒤에서 3차원 영상이 복원되도록 하는 이미지 홀로그래프를 합성하고자 한다. 데이터량을 최소화하기 위해 HPO(Horizontal Parallax Only)이미지 홀로그래프를 합성하는 경우를 생각하자. HPO 홀로그래프에서는 3차원 물체를 수평 방향으로 슬라이스된 이차원 단면들의 합으로 모델링하므로 여기서는 $z=Z$ 인

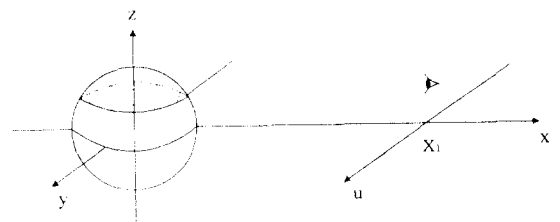


그림 1. 이미지 홀로그래프의 시스템 geometry
Fig. 1. System geometry of image hologram

단면을 나타내는 함수가 $f(x, y)$ 라 하고 $f(x, y)$ 에 대한 이미지 홀로그램 패턴값을 계산하고자 한다.

그림 1에서 X_1 은 원점으로 부터 관찰자의 눈까지의 거리를 나타내며 u 축은 $x=X_1$ 에서 y 축과 평행한 축을 나타낸다. $f(x, y)$ 를 구성하는 점광원으로 부터 산란되어 u 축에 도달했을 때의 산란 패턴 $s_1(u)$ 은

$$s_1(u) = \iint f(x, y) \exp[jk \sqrt{(X_1-x)^2 + (u-y)^2}] dx dy \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다(식(1)에서 광파의 진폭감쇄 성분은 복원결과에 영향을 미치지 않으므로 생략하였음). 한편 (y, z) 평면에 위치한 이미지 홀로그램의 $z=Z$ 에서의 데이터 값이 $h(y)$ 라 할 때 $h(y)$ 로 부터 산란되어 u 축에 도달한 광파 $s_2(u)$ 는

$$s_2(u) = \int h(y) \exp[jk \sqrt{X_1^2 + (y-u)^2}] dy \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 이미지 홀로그램으로 부터 산란된 광파는 물체로 부터 산란된 광파를 정확히 표현해야 하므로 $s_1(u) = s_2(u)$ 이 만족되어야 한다. 식(1)의 구면파를 나타내는 함수 $\exp(jk(\cdot))$ 을 평면파들의 합으로 분해하면

$$s_1(u) = \iint f(x, y) \exp[j\{\sqrt{k^2 - \alpha^2}(X_1 - x) + \alpha(u - y)\}] dx dy d\alpha \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다.^[7] 식(3) 좌우를 u 에 관해 푸리에 변환하면

$$S_1(k_u) = \iiint f(x, y) \exp[j\{\sqrt{k^2 - \alpha^2}(X_1 - x) - \alpha y\}] \delta(k_u - \alpha) dx dy d\alpha \quad (4)$$

이 된다. 여기서 k_u 는 u 의 푸리에 변수를 나타낸다. $\delta(\cdot)$ 함수 성질에 의해서 식(4)는

$$S_1(k_u) = \iint f(x, y) \exp[j\{\sqrt{k^2 - k_u^2}(X_1 - x) - k_u y\}] dx dy d\alpha \quad (5)$$

이 되고

$$S_1(k_u) = F(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u) \exp[\sqrt{k^2 - k_u^2} X_1] \quad (6)$$

로 간소화된다. 식(2)에 대해서도 식(3)-(6)까지의 과정을 반복하면

$$S_2(k_u) = H(k_u) \exp[j\sqrt{k^2 - k_u^2} X_1] \quad (7)$$

이 되며^[8] $S_1(k_u) = S_2(k_u)$ 이어야 하므로

$$H(k_u) = F(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u) \quad (8)$$

이 되어 이미지 홀로그램의 데이터값 $h(y)$ 은

$$h(y) = IFT_{(k_u)}[F(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u)] \quad (9)$$

이 된다. 여기서 IFT 는 역푸리에 변환을 나타내고 있으며 u 와 y 는 1대 1 대응하므로 식 (9)에서 k_u 의 역푸리에 변수를 y 로 나타내었다. 식(9)의 $h(y)$ 가 $f(x, y)$ 에 대한 이미지 홀로그램 패턴값이다. 그러므로 서로 다른 높이에 있는 여러 단면들에 대해서 이미지 홀로그램 패턴값을 계산한 후 각 단면과 같은 높이에 배열함으로써 이미지 홀로그램을 얻을 수 있다.

III. 기존의 방법과 비교

디지털 이미지 홀로그램은 기존의 디지털 홀로그램 패턴을 계산할 때와 같이 ray-tracing 방법으로 계산할 수 있다. 2차원 수평단면 $f(x, y)$ 가 주어지고 이 단면에 대한 이미지 홀로그램 패턴을 $h(y_1)$ 라고 하면

$$h(y_1) = \iint f(x, y) \exp[jk \sqrt{x^2 + (y_1 - y)^2}] dx dy \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 이 방법은 상당히 많은 계산량이 요구되는 단점을 지니고 있으며 최근에 Leseberg가 계산량을 대폭 줄인 새로운 방법을 제시하였다. III절에서는 본 논문에서 제시된 방법이 Leseberg 방법과 수식적으로는 동일하게 표현되지만 Leseberg 방법보다 계산량을 대폭 줄인 방법임을 설명하고자 한다. Leseberg 방법은 HPO 홀로그램뿐 아니라 일반적인 홀로그램에 적용 가능한 방법이므로 3차원 물체를 홀로그램 평면과 평행한 단면들의 합으로 모링하나 제

시된 방법과 수식적으로 비교하기 위해서 3차원 물체가 수평단면들의 합으로 모델링되었다고 가정하고 Leseberg 방법을 적용시켰다(뒷부분에서 계산량을 비교할 때는 이와같은 가정없이 일반적인 경우에 대해서 설명하였음). 그러므로 식(1)의 $f(x, y)$ 을 홀로그래프와 평행한 1차원 단면들의 합으로 모델링한다. 즉,

$$\sum_{i=1}^N f(x, y) \delta(x-x_i) = \sum_{i=1}^N f(x_i, y) \delta(x-x_i) = \sum_{i=1}^N f_i(y) \delta(x-x_i) \quad (11)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 N 은 단면의 개수이고 x_i 는 i 번째 단면의 x 좌표를 나타낸다. Leseberg 방법에서는 $x=x_i$ 에서 광파의 분포가 $f_i(y)$ 인 함수를 $x=0$ 인 홀로그래프 평면에서의 광파의 분포로 변환하기 위해 angular 스펙트럼을 이용하였다. $f_i(y)$ 의 angular 스펙트럼은 푸리에 변환에 의해서 $F_i(k_u)$ 이 되며 x_i 만큼 떨어진 두 평면 사이의 공간을 나타내는 변환함수(transfer function)는 $\exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 으로 표현할 수 있으므로 $x=0$ 인 평면에서의 angular 스펙트럼은 $F_i(k_u) \exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 으로 나타낼 수 있다.¹⁾ 그러므로 N 개의 단면을 고려하면 $h(y)$ 는

$$h(y) = IFT_{(k_y)} \left[\sum_{i=1}^N F_i(k_u) \exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}] \right] \quad (12)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식(11)이 Leseberg가 제안한 방법으로 이 방법에 의해 이미지 홀로그래프 패턴을 계산하는 과정은 우선 각 단면(여기에서는 $f_i(y)$)에 대한 푸리에 변환 값에 위상성분 $\exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 을 곱해서 홀로그래프 평면에서의 angular 스펙트럼으로 변환한다. 변환된 스펙트럼들은 합산되고 합 angular 스펙트럼은 역푸리에 변환되어 홀로그래프 패턴 $h(y)$ 가 된다. 식(11)에서 $F_i(k_u)$ 는 $f(x, y)$ 를 y 에 관해서만 푸리에 변환한 것이므로 $F_y(x, k_u)$ 로 표현할 수 있으며, 이 함수에 $\exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 이 곱해지고 \sum 이 된 것은 근사적으로 $\exp[jx \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 이 곱해지고 \int 이 된 것과 같으므로 식(11)은

$$h(y) \simeq IFT_{(k_y)} \left[\int F_y(x, k_u) \exp[jx \sqrt{k^2 - k_u^2}] dx \right] = IFT_{(k_y)} \left[F(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u) \right] \quad (13)$$

로 변환 가능하여 본문에서 제시된 방법과 같다. 그러므로 Leseberg 방법에서는 y 축 방향으로만 FFT(Fast Fourier Transform)을 사용하고 x 축 방향으로는 FFT 대신 식(12)에서 제시한 바와 같이 $\exp[jx_i \sqrt{k^2 - k_u^2}]$ 을 곱하는 연산을 수행하며, 반면에 본 논문에서 제시한 방법은 x 축 방향으로도 FFT 루틴을 사용하는 것으로 여기에 인터플레이션 과정이 부수적으로 추가되지만 전체적인 계산량의 관점에서는 훨씬 유리하다.

제시된 방법과 Leseberg 방법을 계산량의 관점에서 비교하기 위해 3차원 영상이 x, y 및 z 방향으로 M_1, M_2, M_3 개의 샘플 데이터를 가진 $M_1 \times M_2 \times M_3$ 개의 샘플로 구성되어 있다고 가정하자. Leseberg 방법에서는 $M_2 \times M_3$ 개로 구성된 2차원 영상이 M_1 개 있는 것으로 3차원 물체를 모델링하며 각 2차원 영상에 대해 2-D FFT한 후 여기서 얻어진 $M_2 \times M_3$ 개의 모든 샘플값에 서로 다른 $\exp(\cdot)$ 함수값을 곱하는 과정을 2차원 영상 개수만큼, 즉 M_1 번 반복하여 $M_2 \times M_3$ 어레이 크기를 갖는 angular 스펙트럼 매트릭스(matrix) M_1 개를 얻는다. M_1 개의 매트릭스에 대해서 매트릭스 덧셈 연산을 하여 합 angular 스펙트럼을 얻은 후 이를 역푸리에 변환하여 이미지 홀로그래프를 얻는다. 한편 제시된 방법에서는 $M_1 \times M_2$ 크기를 갖는 2차원 영상 M_3 개가 수직으로 쌓여있는 것으로 3차원 물체를 모델링한다. 여기서는 우선 $M_1 \times M_2$ 크기의 2차원 영상에 대해서 2-D FFT를 취한다. 다음으로 2-D FFT를 취해서 얻어진 공간주파수 데이터(IV절에서 $F_s(k_x, k_y)$ 로 표현했음)를 이용해서 $k_x - k)^2 + k_y^2 = k^2$ 상의 데이터 값을 인터플레이션에 의해서 찾으면 이 값들이 홀로그래프 패턴값이 된다(이유는 IV절에서 설명하였음). 이 과정은 한 평면에 대한 홀로그래프 패턴값이며 이 과정을 M_3 번 반복하여 이미지 홀로그래프를 합성한다. 앞에서 제시한 M_1, M_2, M_3 값의 상대적 크기는 모델링된 물체의 크기에 따라 정해지는 값이지만 일반적으로 눈의 시각 시스템은 수평방향으로 입체감을 느끼며 또한 광각시야를 얻기 위해서는 M_2 값이 M_1, M_3 에 비해 훨씬 큰 값이어야 한다. M_1 와 M_3 가 같다면 두 방법에서 2-D FFT 하는데 요구되는 계산량은 동일하다. 2-D FFT 계산량이 같다고 할 때 두 방법의 차이점은 Leseberg 방법의 경우 $\exp(\cdot)$ 값 계산을 $M_1 \times M_2 \times M_3$ 번 행하고 그외에도 $M_1 \times M_2 \times M_3$

번의 곱셈 및 덧셈이 필요하다(마지막으로 역 2-D FFT를 한번 하는 과정은 무시될 정도의 계산량으로 제외 시켰음). 후자의 경우는 $M_1 \times M_2$ 개의 값을 찾기 위해 인터플레이션 과정이 요구된다. 시뮬레이션 결과 하나의 값을 찾기 위해 주위 4개의 데이터만 이용하여도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있었으므로 여기서는 4개의 데이터에 스케일링(scaling) 값들을 곱하고 각각을 합하여 인터플레이션한다고 가정하자. 이때 스케일링 값들을 안다면 여기서는 $4 \times M_2 \times M_3$ 개의 곱셈 및 $3 \times M_2 \times M_3$ 개의 덧셈이면 충분하다. 또한 한 2차원 수평단면에서 사용된 $4 \times M_2$ 개의 스케일링 값들은 다른 단면에서 그대로 재사용할 수 있다. 본 논문에서는 스케일링 값을 찾기위해서 궤적상의 원하는 위치와 주위 4점사이의 거리를 $\sin c(\cdot)$ 함수에 넣어 간단히 찾을 수 있었다(본 논문에서 사용한 방법외에도 nearest neighbor나 linear 인터플레이션의 경우는 계산이 더 간단함).¹⁰⁾

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 이미지 홀로그래프 패턴을 계산하기 위해서는 $f(x, y)$ 함수를 2차원 푸리에 변환하여 $F(k_x, k_y)$ 를 우선 얻어야 하며 이 함수로부터 식(8)의 $H(k_u)$ 를 계산하기 위해서는 $F(k_x, k_y)$ 의 함수값 중에서 $k_x = \sqrt{k^2 - k_u^2}$, $k_x = k_u$ 즉 $k_x^2 + k_y^2 = k^2$ 인 궤적상의 이산적인 위치에서의 함수 값을 얻어야 한다. 그림 2에서 실선 궤적상의 ‘·’로 표시한 점이 $H(k_u)$ 를 찾기 위해서 필요한 $F(k_x, k_y)$ 의 함수값이다. $f(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환을 위해서 $f(x, y)$ 를 x 축 및 y 축 방향으로 Δ_x, Δ_y 간격으로 균일하게 분포된 점광원으로 구성되어 있는 이산함수로 모델링하고 2-D FFT를 적용하였다. 얻어진 함수를 $F_\delta(k_x, k_y)$ 라 하면

$$F_\delta(k_x, k_y) = \sum_m \sum_n F(k_x, k_y) \delta(k_x - m \Delta_k, k_y - n \Delta_k) \quad (14)$$

이 되며 여기서 Δ_k, Δ_k 는 DFT(Discrete Fourier Transform) 성질에 의해서 $f(x, y)$ 의 x 축 및 y 축 방향 크기가 각각 D_x, D_y 라고 할 때 $\Delta_k = 2\pi/D_x, \Delta_k = 2\pi/D_y$ 에 의해 정해지는 (k_x, k_y) 평면에서의 샘플간격이다. $F_\delta(k_x, k_y)$ 는 (k_x, k_y) 평면의 기저대역(그림 2에서는

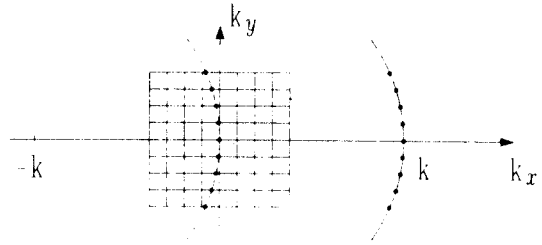


그림 2. 데이터 궤적
Fig. 2. Data trajectory

정사각형 그리드(grid)로 나타내었음)에 있고 $H(k_u)$ 를 찾기 위해 요구되는 함수값은 대역통과 영역에 있으므로 $F_\delta(k_x, k_y)$ 로부터 원하는 함수값을 찾을 수는 없다. 원래의 2차원 단면 함수를 $f(x, y)$ 가 아니라 $f(x, y) \times \exp(jkx)$ 로 정의된 $g(x, y)$ 라 하자. 영상이 복원될 때는 진폭 정보만 관찰되므로 $g(x, y)$ 의 이미지 홀로그래프로 부터 복원되는 영상이나 $f(x, y)$ 의 이미지 홀로그래프로 부터 복원되는 영상은 시각적으로는 같은 것이다. 그러므로 식(3)에 $f(x, y)$ 대신 $g(x, y)$ 를 사용하면, 식(8)은

$$H(k_u) = G(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u) \quad (15)$$

이 되고 $f(x, y)$ 와 $g(x, y)$ 의 관계식에 의해서 식(15)는

$$H(k_u) = F(\sqrt{k^2 - k_u^2} - k, k_u) \quad (16)$$

이 된다. 즉 $H(k_u)$ 값을 찾기 위해서는 $k_x = \sqrt{k^2 - k_u^2} - k, k_y = k_u$ 인 궤적, 즉 그림 2의 점선 상의 ‘·’로 표시한 위치에서의 $F(k_x, k_y)$ 의 함수값을 알면 되며 이 궤적이 기저 대역에 위치하므로 인터플레이션을 이용해서 $F_\delta(k_x, k_y)$ 로부터 계산할 수 있다.¹¹⁾ 참고로 이 과정을 거쳐서 얻어진 $H(k_u)$ 를 역푸리에 변환하여 얻어진 이미지 홀로그래프는 $f(x, y)$ 가 아니라 $g(x, y)$ 의 이미지 홀로그래프이나 시각적으로 관찰할 때 복원결과와는 같다.

그림 3과 같이 3개의 점광원으로 구성된 2차원 수평 단면에 대해서 제시한 방법과 Leseberg 방법 및 오차가 없는 ray-tracing 방법으로 이미지 홀로그래프의

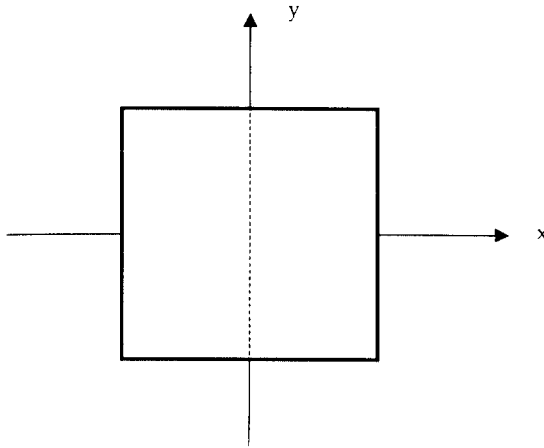


그림 3. 2차원 수평단면 영상
Fig. 3. 2-D horizontally sliced image

합성 및 복원 과정을 시뮬레이션하였다. 그림 3은 (x, y) 평면에 평행한 한 수평단면으로 이 단면에 대한 이미지 홀로그램은 그림 3에서 점선으로 표시한 y 축상에 위치한다. 이미지 홀로그램의 수평 방향 크기(그림 3에서 점선 길이에 해당)는 $0.04m$ 로 가정하였다. 계산량을 줄이기 위해서 2차원 단면은 64×64 어레이로 구성되어 있고 홀로그램 안에 64개의 픽셀이 있는 것으로 시뮬레이션 하였으며 그 대신 샘플링 조건에 위배되지 않도록 레이저 광원의 파장을 스케일링하였다. ray-tracing 방법은 식(10)을 이용해서 계산하는 것이지만 단순히 식(10)을 적용시켜서는 안된다. 그 이유는 그림 4에서 y 축 오른쪽에 있는 점광원은 홀로그램 평면에 대해서 $+x$ 축 방향으로 diverse하는 산란파이고 y 축 왼쪽에 있는 점광원은 홀로그램 평면에 대해서 $+x$ 축 방향으로 diverse하는 산란파이기 때문이다. 본 논문에서는 홀로그램 평면 왼쪽에 있는 점광원에 대한 산란 패턴을 계산할 때 식(10)을 적용시켰고 오른쪽에 있는 점광원에 대해서는 식(10)의 $\exp(\cdot)$ 함수 대신 공액 함수인 $\exp(-jk\sqrt{x^2 + (y_1 - y)^2})$ 을 사용하였다. 제시된 방법으로 이미지 홀로그램 패턴을 계산하는 과정에서는 인터플레이션이 필요하므로 본 논문에서는 최근에 사용한 Bessel함수를 이용하였다. 한점을 인터플레이션하기 위해서 주위에 있는 4개의 데이터를 이용하였다. 복원과정 시뮬레이션은 오차를 포함하지 않는 ray-tracing을 재차 이용했다.

그림 4, 그림 5, 그림 6은 각각 ray-tracing 방법, 제시된 방법, Leseberg 방법에 의해 합성된 이미지 홀로그램의 복원 결과이다. Ray-tracing 방법은 근사식을 포함시키지 않고 수식을 그대로 사용한 것이므로 광학적 복원 결과에 대한 광세기 분포를 그대로 시뮬레이션했다고 말할 수 있다. 제시된 방법은 계산량을 줄이기 위해 Leseberg 방법을 근사화시켰다고 말할 수 있으며 두 결과가 거의 동일하므로 4개의 데이터를 이용한 인터플레이션이 효과적임을 알 수 있다.

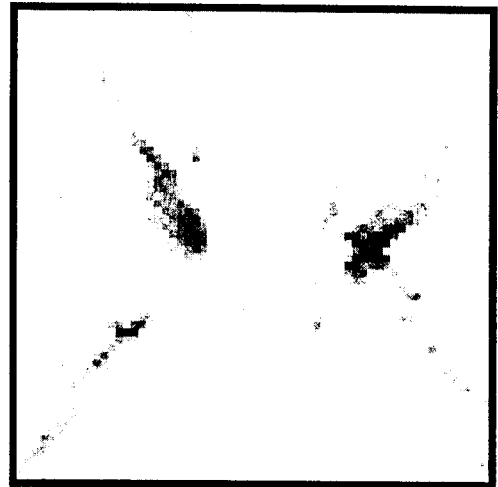


그림 4. Ray-racing 방법
Fig. 4. Ray-tracing method

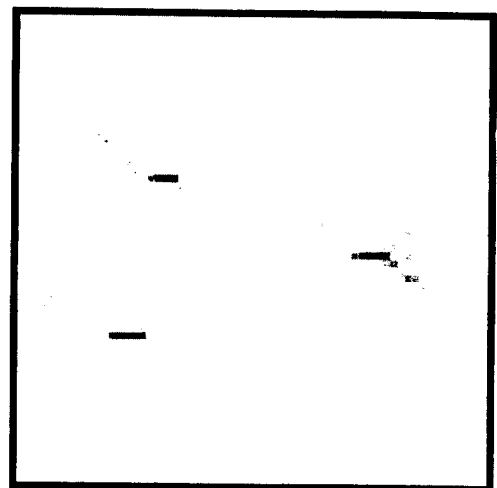


그림 5. 제시된 방법
Fig. 5. Proposed method

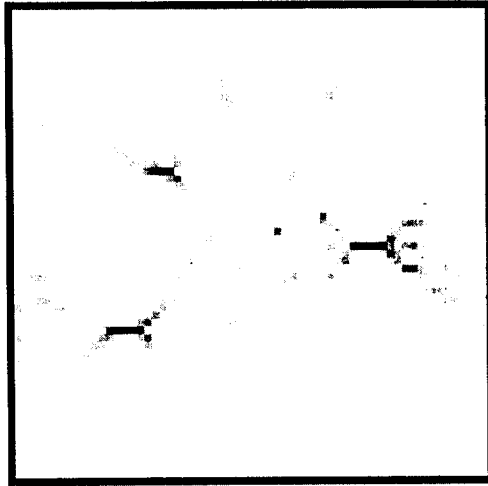


그림 6. Leseberg 방법
Fig. 6. Leseberg method

V. 결 론

본 논문은 3차원 물체를 2차원 수평단면들의 합으로 모델링하므로써 기존의 방법보다 계산량을 획기적으로 단축시킨 새로운 이미지 홀로그램 합성방법을 제시하였다. 제시된 방법은 최근에 발표된 Leseberg 방법처럼 angular 스펙트럼을 이용하며 수식적으로 동일하게 유도되지만 실행시키는 과정에서는 홀로그램 평면과 수직방향으로도 FFT 루틴을 사용하여 인터플레이션이 추가되지만 계산량을 획기적으로 단축시켰다. 한 단면에 대해서 기존의 ray-tracing 방법, Leseberg 방법 및 제시된 방법에 의해 이미지 홀로그램을 합성하고 복원시키는 과정을 시뮬레이션 하였으며 제시된 방법은 한 값을 인터플레이션에 의해 찾기 위해서 주위의 4개 값만 이용하였지만 근사식을 사용하지 않은 Leseberg 방법과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 실제 광학적 복원보다는 새로운 알고리즘 제시에 중점을 두었다. 현재 준비중인 논문은 실제 광학적 복원을 고려해서 스펙트럼(본 논문에서 $H(k_u)$ 로 나타낸 함수)을 off-axis로 만드는 문제, 관찰자의 어느 정도의 움직임에도 같은 정도의 복원 영상을 관찰할 수 있도록 스펙트럼을 변형하는 문제 등을 다룰 예정이다.

참 고 문 헌

1. R. J. Collier, C. B. Burckhardt, and L. H. Lin, *Optical Holography*, Academic, New York, 1971.
2. W. T. Cathey, *Optical Information Processing and Holography*, Wiley, New York, 1974.
3. L. Rosen, "Focused-image holography with extended sources", *Applied Physics Letters*, Vol. 9, pp. 327-339, 1966.
4. O. Bryngdahl and F. Wyrowski, "Digital holography/computer generated holograms", *Progress in Optics*, Vol. 28, pp. 1-86.
5. D. Leseberg, "Computer-generated three-dimensional image holograms", *Applied Optics*, Vol. 31, pp. 223-229, 1992.
6. A. Jendral, R. Brauer, O. Bryngdahl, "Synthetic image holograms: computation and properties", *Optics Comm.*, Vol. 109, pp. 47-53, 1994.
7. P. Morse and H. Feshback, *Methods of Theoretical Physics*, New York: Mc Graw Hill, 1968.
8. H. Yang and Eun-Soo Kim, "Waveform-decomposition based algorithm for horizontal parallax only display computer generated holograms", *Optics Letters*, vol. 21, pp. 510-512, 1996.
9. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, pp. 48-54, 1968.
10. A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice Hall, pp. 26-30, 1975.
11. 양훈기, 김은수, "Angular 스펙트럼을 이용한 3차원 HPO 디지털 홀로그램의 합성", *전자공학회 논문지*, 제34권 D편 제5호, pp. 67-74, 1997.

楊勳其(Hoon-Gee Yang)

정회원

제19권 5호 참조

金恩洙(Eun-Soo Kim)

정회원

제19권 5호 참조