

論文98-35D-8-11

디지털 홀로그램에서 샘플링 조건 완화를 위한 홀로그램 Segmentation

(Hologram Segmentation for Relaxing Sampling Constraint in Digital Hologram)

楊勳其*, 柳致淵**, 金恩洙***

(Hoon-Gee Yang, Ryu Chi-Yeon, and Eun-Soo Kim)

요 약

본 논문은 홀로그램을 세그먼트함으로써 샘플링 조건을 상당히 완화시켜 기존의 LCD 소자 해상도를 만족시키면서 3차원 디스플레이를 가능하게 하는 새로운 디지털 홀로그램 합성 방법을 제시한다. 물체로부터 산란되어 한 세그먼트 홀로그램에 도달한 광파는 평면파로 근사화 시킬 수 있으며 이를 이용한 알고리즘 유도결과 제시된 방법은 프로젝션 과정이 필요없으며 대신 3차원 물체를 구성하는 2차원 수평단면에 대해 직접 2차원 푸리에 변환을 적용하면 됨을 보인다. 또한 제시된 방법은 홀로그래픽 스테레오그램 방식과는 달리 깊이 정보의 손실이 없으며 기존의 디지털 홀로그램 방법 보다 데이터량이 훨씬 적으므로 광각시야를 제공하는 홀로그램을 합성하는데 유리함을 보이며 최종적으로 시뮬레이션에 의해 두방법을 비교한다.

Abstract

This paper presents a new method to synthesize a digital hologram that meets the resolution of a currently manufactured LCD while capable of displaying a 3-D object. That is accomplished by segmenting a hologram, resulting in relaxed sampling constraint. we show that the segmentation of a hologram enables us to utilize the planewave approximation and, unlike in a holographic stereogram, it does not require projection process, but directly takes Fourier transform of horizontally sliced 2-D images that constitute a 3-D object, which makes it possible to reconstruct a higher resolution image with depth information. We also show that proposed hologram contains data significantly smaller than the conventional hologram does, which is quite useful for constructing wide-viewing hologram. Finally, simulation results obtained by both methods are compared.

I. 서 론

* 正會員, 光云大學校 電波工學科

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

** 正會員, 光云大學校 電子通信工學科

(Dept. of Electronic & Telecommunication, Kwangwoon Univ.)

*** 正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

※ 본 논문은 정보 통신부 대학기초 과제의 연구비 지원하에 이루어 졌음

接受日字:1998年1月12日, 수정완료일:1998年6月26日

홀로그램의 합성방법은 광 신호처리 기술에 의해 구현되는 광홀로그래피 방법과 가상의 물체를 컴퓨터를 이용하여 디지털적으로 합성하는 디지털 홀로그래피 방법이 있다.^{[1][2]} CGH(Computer Generated Hologram)라 불리는 디지털 홀로그래피는 광각시야를 제공할 수 있는 3차원 영상을 합성하기 위해서 약 0.5 μm 정도의 샘플링 간격을 가진 홀로그래픽 프린지 패턴을 계산해야 하므로 과도한 데이터량 및 이에 따른 계산 시간으로 인해 3차원 영상을 합성하고 재현

하는데 근본적인 한계를 지니고 있었다.^{[3] [4]}

최근들어 합성 속도를 개선하기 위해서 MIT 미디어 연구소에서는 하드웨어적인 접근으로 병렬 컴퓨터를 이용하여 합성시간을 줄이는 방법을 연구하였다.^[5]

소프트웨어적 방법으로는 ray-tracing 방법을 사용하지 않고 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용해서 프런지 패턴을 계산하는 새로운 합성 알고리즘을 개발하여 계산 속도를 상당히 향상시킬 수 있었다.^[6]

[7]

홀로그램 데이터량을 줄이는 연구는 오래전 부터 이루어졌다. 우선 수직 양안시차를 고려하지 않고 수평 양안시차를 고려하는 HPO(horizontal parallax-only) 홀로그램 방법을 이용하여 가상의 물체를 수평 단면들의 합으로 모델링하므로써 입체감에 큰 저해없이 100배 정도의 데이터량을 줄일 수 있었다.^{[8] [9]}

또한 수평방향으로의 데이터량을 줄이기 위해서 작은 크기의 element 홀로그램을 얻은 후 차례대로 배열하여 최종적인 홀로그램을 합성하는 composite 홀로그램 방법이 연구되었다.^[10] 1970년 King 과 Noll은 2차원 프로젝션 영상이 연속적으로 보이도록 하여 눈의 움직임에 의해 입체감을 주는 홀로그램과는 전혀 다른 개념의 3차원 디스플레이 방식인 홀로그래픽 스테레오그램을 제안하였다.^[11] Yatagai는 이들이 제안한 방법을 디지털적으로 합성하였으며 특히 보는 각도에 따른 프로젝션 영상 모델링과정 뿐만 아니라 홀로그램을 합성하는 과정까지 모두 디지털적으로 수행하였다.^[12] 이 방법은 광각시야를 갖기 위해 많은 샘플링이 필요한 기존의 디지털 홀로그램에 비해 훨씬 적은 계산량을 요구하였지만 깊이 정보를 표현하는데 한계를 지니고 있었다. 홀로그래픽 스테레오그램의 위상 정보를 보상하는 방법으로 element 홀로그램의 위치에 의존하는 상대적 위상을 보상한 phase added 스테레오그램 및 이를 실수 푸리에 변환에 의해 구현한 Integral 홀로그램이 Yoshikawa에 의해 연구되었다.^{[13] [14]}

본 논문에서는 홀로그래픽 스테레오그램 기법을 적용해서 디지털 홀로그램에 비해 데이터량을 획기적으로 감소시킬 수 있으면서도 광각시야 및 깊이정보를 제공할 수 있는 새로운 합성 알고리즘을 제안하였다. II장에서는 평면과 근사식을 이용하여 알고리즘을 유도하였으며 III장에서는 시뮬레이션 과정을 구체적으로 설명하였고 결과 분석을 하였다.

II. 광각시야 홀로그램 합성 알고리즘

디지를 홀로그램을 합성하기 위해서는 우선 3차원 영상의 모델링 과정이 필요하다. 본 논문에서는 수직 방향으로의 양안시차가 사람의 눈에 입체감을 주는데 거의 영향을 주지 못하므로 HPO 홀로그램 방법을 사용하여 계산량을 획기적으로 줄이고자 한다. 즉 그림 1과 같이 3차원 영상을 수평방향의 2차원 단면들의 합으로 모델링한 후 입력 물체에 의해 산란된 물체파가 (x, y) 평면과 수직 방향으로 진행하지 않고 평행한 방향으로만 진행한다고 가정하므로 $z=Z$ 인 평면 $f(x, y)$ 상의 점광원들은 홀로그램 평면 (u, v) 에서 $v=Z$ 인 홀로라인으로만 산란되는 것으로 간주할 수 있다.

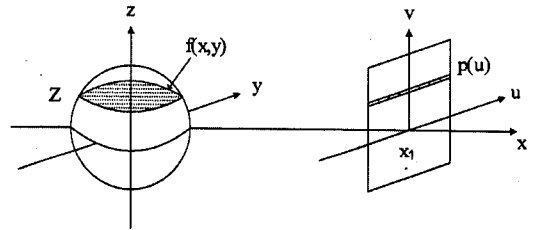


그림 1. HPO 홀로그램
Fig. 1. HPO Hologram.

수평단면 물체 $f(x, y)$ 에 의해 산란된 물체파가 수평으로 진행하여 HPO 홀로그램의 (u, v) 평면위의 $v=Z$ 인 홀로라인에 도달하는 광파의 산란 패턴 분포 $p(u)$ 는

$$p(u) = \iint f(x, y) \frac{\exp[ik r(x, y, u)]}{r(x, y, u)} dx dy \quad (1)$$

나타낼 수 있다. 여기서 $r(x, y, u)$ 는 (x, y) 평면에 있는 점광원과 홀로그램 평면의 픽셀까지의 거리로서 $r(x, y, u) = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (u - y)^2}$ 와 같이 나타낼 수 있으며 이때 X_1 은 원점에서 부터 홀로그램 평면까지의 거리이다. 식 (1)에서 분모에 있는 진폭성분 $r(x, y, u)$ 는 복원과정에 거의 기여하지 않으므로 이후 유도과정에서는 생략하였다. $z=v=Z$ 인 평면을 위에서 보면 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며 광각시야 특성을 갖는 새로운 홀로그램을 합성하기 위해서 전체 홀로그램을 N 개의 세그먼트 홀로그램으로 나누었다. 그러므로 $p(u) = \sum_{i=1}^N p_i(u)$ 로 나타낼 수 있으며 i 번

제 세그먼트 홀로그래 평면상의 한점 $(X_1, Y_i + u)$ 에 도달한 광파의 산란 패턴은

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

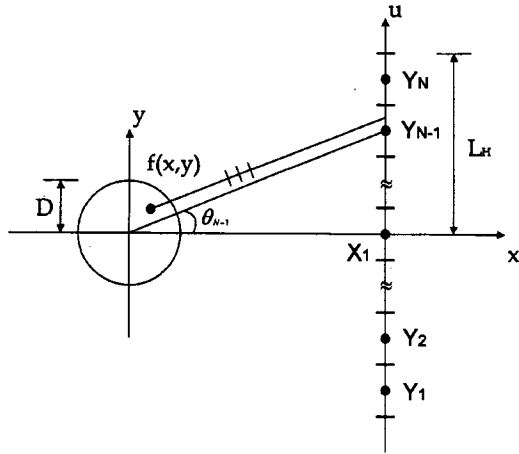


그림 2. Planewave 근사식을 사용한 세그먼트 홀로그래
Fig. 2. Planewave approximation-based segment hologram.

로 나타낼 수 있다. 여기서 Y_i 는 u 축상에서 i 번째 세그먼트 홀로그래의 중심 좌표를 나타내고 있으며 L_h 가 세그먼트 홀로그래의 크기라 할때 식 (2)에서 u 는 $|u| \leq L_h/2$ 의 값을 갖는다. 식 (2)에서 구면파를 나타내는 함수 $\exp[jk(\cdot)]$ 은 평면파들의 합으로 분해 할 수 있으므로

$$p_i(u) = \int \int f(x, y) \exp[j(\sqrt{k^2 - k_u^2}(X_1 - x) + k_u(Y_i + u - y))] dx dy dk_u \quad (3)$$

이 되며 여기서 k_u 는 u 의 공간주파수를 나타내고 $(\sqrt{k^2 - k_u^2}, k_u)$ 는 평면파의 x 축 및 y 축 방향으로의 방향벡터가 된다.^[7] 물체와 세그먼트 홀로그래의 크기가 물체와 세그먼트 홀로그래 사이의 거리에 비해서 충분히 작다면 점광원으로부터 산란되어 세그먼트 홀로그래에 도달하는 광파는 거의 평면파로 근사화가 가능하다. 즉 i 번째 세그먼트 홀로그래에 도달한 광파는 y 축 방향으로의 방향벡터 k_y 가 $k \sin \theta_i$ 인 성분이 가장 두드러지며 k_x 는 k_u 와 같으므로 식 (3)은 아래 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$p_i(u) \approx \int \int f(x, y) \times \exp[j(\sqrt{k^2 - k_u^2}(X_1 - x) + k_u(Y_i + u - y))] \delta(k_x - k \sin \theta_i) dx dy dk_u \quad (4)$$

식 (4)를 정리하면

$$p_i(u) \approx \int \int f(x, y) \exp[j(k \cos \theta_i(X_1 - x) + k \sin \theta_i(Y_i + u - y))] dx dy \quad (5)$$

이 되며 여기서 θ_i 는 물체의 중심과 i 번째 세그먼트 홀로그래의 중심점을 연결하는 선이 x 축과 이루는 각도로서 $\theta_i = \tan^{-1} \frac{Y_i}{X_1}$ 로 정의된다. 식 (5)를 정리하면

$$p_i(u) \approx \exp[j(k \cos \theta_i X_1 + k \sin \theta_i Y_i)] \times \exp(jk \sin \theta_i u) \times \int \int f(x, y) \exp[-j(k \cos \theta_i x + k \sin \theta_i y)] dx dy \quad (6)$$

이 되며 결국

$$p_i(u) \approx \exp[j(k \cos \theta_i X_1 + k \sin \theta_i Y_i)] \times \exp(jk \sin \theta_i u) \times F(k \cos \theta_i, k \sin \theta_i) \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $F(\cdot, \cdot)$ 는 $f(x, y)$ 의 2차원 푸리에 변환을 나타낸다. 따라서 $p_i(u)$ 를 계산하기 위해서는 2차원 영상 $f(x, y)$ 을 2차원 푸리에 변환한 후 (x, y) 의 2차원 푸리에 변환 평면 (k_x, k_y) 상의 $(k \cos \theta_i, k \sin \theta_i)$ 위치에 존재하는 함수값 $F(\cdot, \cdot)$ 를 찾는 다음 여기에 $\exp[j(k \cos \theta_i X_1 + k \sin \theta_i Y_i)] \times \exp(jk \sin \theta_i u)$ 를 곱하므로써 데이터 값을 얻을 수가 있다. 각 세그먼트 홀로그래마다 θ_i 값이 정해지므로 이에 대응하는 (k_x, k_y) 평면상의 함수값 $F(\cdot, \cdot)$ 와 $\exp[j(k \cos \theta_i X_1 + k \sin \theta_i Y_i)]$ 및 u 값에 따라 변하는 $\exp[jk \sin \theta_i u]$ 값들을 찾을 수 있다. 그러므로 각 세그먼트 홀로그래의 산란패턴 $p_i(u)$ 를 찾을 수 있으며 세그먼트 홀로그래의 산란패턴들을 차례대로 배열하면 디지털 홀로그래와 유사한 광각시야 홀로그래 패턴을 계산할 수 있다.

III. 시뮬레이션

제시한 방법의 성능분석을 위해서 3차원 물체를 구

성하는 하나의 수평단면에 대해서 디지털 홀로그램 및 광각시야 홀로그램의 산란패턴 계산 및 복원 과정을 IMSL 라이브러리를 제공하는 Fortran Power-Station을 통해 시뮬레이션하였다. 수평단면은 그림 3 과 같이 128×128 화소를 가지며 4개 점으로 구성되어 있는 크기가 0.002m인 2차원 영상으로 모델링하였으며 물체와 홀로그램 평면사이의 거리는 0.1m로 하였다. 디지털 홀로그램의 산란패턴 계산은 식 (1)을 이 용하였고 제시된 방법의 산란패턴 계산은 식 (7)을 이용하였다. 복원 과정의 시뮬레이션은 근 사식을 포함 하지 않은 식 (1)을 이용하였으며 이때는 계산된 산란 패턴 값이 식 (1)의 적분안에 들어간다.

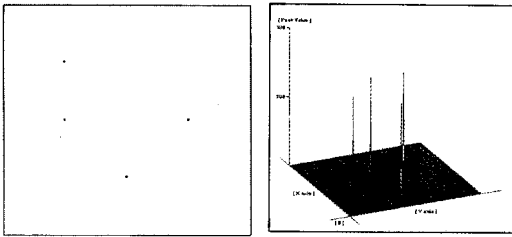


그림 3. 입력영상
Fig. 3. Input image.

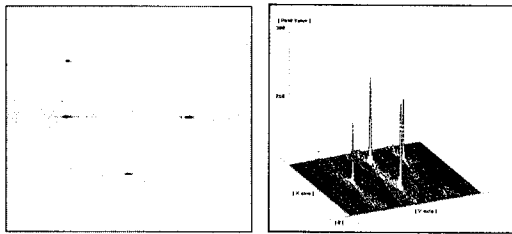


그림 4. ray-tracing 방법으로 합성된 홀로그램의 복원 영상
Fig. 4. Reconstructed image from ray-tracing based hologram.

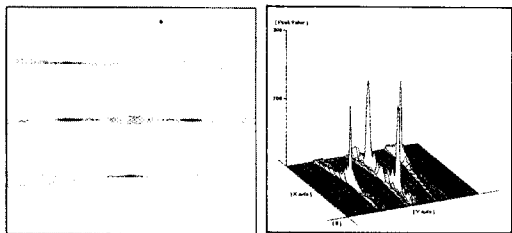


그림 5. 제시된 알고리즘에 의해 합성된 홀로그램의 복원 영상
Fig. 5. Reconstructed image from proposed hologram.

그림 4는 디지털 홀로그램 방법에 의해서 산란패턴

을 계산하고 복원시킨 결과로서 홀로그램의 수평방향 (u 축 방향)크기는 0.0025m로 하였고 그안에 일정한 간격으로 1024개의 프린 지패턴 데이터가 있었다. 복원된 영상은 깊이 방향으로 해상도가 떨어지는 것처럼 보이나 홀로그램 합성 및 복원과정에서 근사식을 전혀 사용하지 않았으므로 ray-tracing 방법에 의해 얻은 디지털 홀로그램 복원 영상의 광세기 분포가 그림 4와 같으면 실제 사람의 눈에는 충분히 입체감을 느낄 수 있다고 가정할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방법으로 홀로그램 패턴을 계산하기 위해서는 식 (7)에 나타난 것처럼 3개의 인수 값들을 계산하여야 한다. 첫 번째 인수인 $\exp[\cdot]$ 함수 값은 θ_i 가 상수 값이므로 간단히 계산할 수 있으며 두 번째 인수인 u 에 따라 변하는 함수 $\exp(jk\cos\theta_i u)$ 은 $k\cos\theta_i$ 가 상수이므로 간단히 찾을 수 있다. $F(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 값을 찾기 위해서는 $f(x, y)$ 를 2-D FFT하여 k_x 축 및 k_y 축으로 일정한 간격에서의 함수 값을 찾은 후 인터플레이션에 의해 $(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 위치에서의 함수 값을 찾으된다. 만약 θ_i 값이 지나치게 커서 $(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 값이 2-D FFT에 의한 (k_x, k_y) 영역 밖에 위치하게 되면 $F(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 의 채적을 몇 개의 블록으로 나누는 후 블록별로 $F(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 값을 찾아야 한다. 블록의 중심이 (k_{xm}, k_{ym}) 이라면 $f(x, y)$ 에 대한 2-D FFT를 수행하기 전에 $f(x, y) \times \exp[j(k_{xm}x + k_{ym}y)]$ 연산을 하여 블록의 중심을 (k_x, k_y) 평면상의 원점에 위치하도록 하여야 한다(그림 6 참조). 참고로 블록으로 나누지 않고서 $F(k\cos\theta_i, k\sin\theta_i)$ 값을 찾을 수 있는 경우는 2-D FFT에 의한 최대 k_y 좌표 값인 $2\pi/2\Delta_y$ 값이 θ_i 가 가장 클때의 $k\sin\theta_i$ 값보다 크면 된다. 그림 5는 제시된 방법에 의해서 홀로그램 패턴을 계산한 후 복원시킨 것으로 세그먼트 홀로그램 크기는 $58.6\mu m$ 이고 그안에 2개의 샘플을 가지고 있도록 하였다. 또한 세그먼트 홀로그램의 개수를 512개로 하여 전체 홀로그램의 크기가 0.03m 이고 샘플 개수를 1024개로 하였다.

시뮬레이션 과정 중 k_y 의 최대값은 $k_y = 2\pi/2\Delta_y = 201.1 \times 10^3$ 의 값을 가지며 홀로그램의 중심에서 가장 먼 세그먼트 홀로그램의 $k\sin\theta_i$ 의 값은 $2\pi \cdot \sin\theta_i / \lambda = 1,490 \times 10^3$ 이므로 대략 8개의 블록이 필요하며 8번의 2-D FFT를 하였다. 블록으로 나누는 과정이

번잡한 경우에는 2차원 영상의 픽셀 개수를 늘이면 되나 이는 2-D FFT 하는 데이터의 크기가 커지는 문제점이 발생하게 된다.

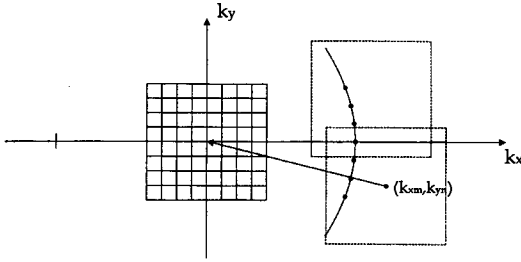


그림 6. 평면 (k_x, k_y) 에서의 데이터의 궤적
Fig. 6. Data trajectory in (k_x, k_y) domain.

제시된 알고리즘에 의해 복원된 그림 5의 경우 홀로그래프 평면상에서 샘플링 주기를 크게했으면서도 aliasing 현상이 나타나지 않았다. 그 이유는 홀로그래프를 세그먼트함으로써 각 세그먼트의 대역폭이 상당히 적어져 각 세그먼트 홀로그래프 내의 데이터 샘플링 조건이 완화되었기 때문이다. 사실상 그림 5의 결과는 그림 4에 비해서 더 좋아졌다. 그 이유는 그림 5의 경우 데이터량은 같지만 샘플링 조건이 완화되어 홀로그래프의 수평방향 크기가 상대적으로 커졌기 때문이다. 그림 7은 그림 5에서 사용했던 홀로그래프 크기 및 샘플링 조건을 그대로 사용하여 ray-tracing 방법으로 디지틀 홀로그래프의 산란패턴을 합성한 후 복원하였다. 이 경우 그림 7을 얻을 때 사용된 파라미터값은 샘플링 조건을 만족시키지 못하므로 복원 영상에 aliasing 현상이 나타나 있다. 그림 8은 세그먼트 홀로그래프 크기를 두배로 하여 제시한 방법을 적용시킨 것으로서 이 경우 식 (4)에 나타난 근사식에 오차가 많이 나타나므로 복원 영상의 결과가 나빠졌다.

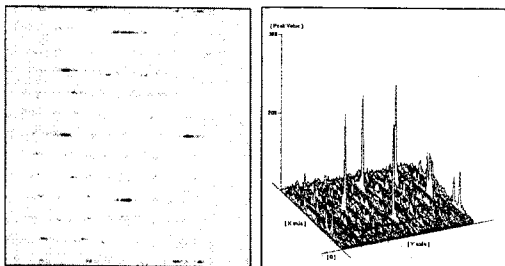


그림 7. 샘플링이 충분하지 않은 경우의 복원영상
Fig. 7. Reconstructed image from undersampled hologram.

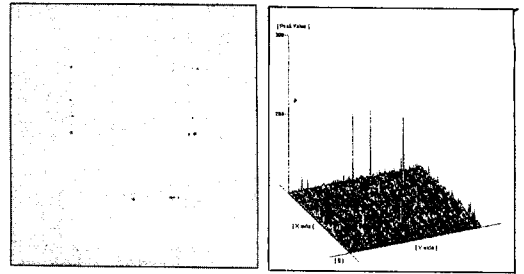


그림 8. 근사 오차가 큰 홀로그래프의 복원 영상
Fig. 8. Reconstructed image from hologram containing large approximation error.

그림 4와 그림 5를 얻을 때 사용했던 파라미터 값을 기준으로 하나의 홀로그래프에 있는 홀로그래프 데이터량을 비교해보면 viewing zone이 같은 경우, 즉 수평방향 홀로그래프 크기가 같은 경우 제시된 방법이 12배 만큼 데이터량이 적다. 홀로그래프의 크기가 커질수록 디지틀 홀로그래프의 경우 데이터량은 기하급수적으로 늘어나지만 제시된 방법에서는 홀로그래프의 크기에 비례하여 데이터량이 증가하게 되므로 광각시야를 제공하는 경우 즉, 수평방향 홀로그래프의 크기가 커질수록 데이터량의 차이가 더욱 커지게 된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 2차원 수평 단면들의 합으로 모델링된 3차원 물체에 대해서 홀로그래픽 스테레오그램 기법을 이용해서 디지틀 홀로그래프를 합성하였다. 제시된 방법은 2차원 투영 영상들에 의해 3차원 영상을 표현하는 기존의 홀로그래픽 스테레오그램 기법과는 달리 투영 영상 대신 3차원 영상을 그대로 이용하여 프린트 패턴을 구하므로 디지틀 홀로그래프 처럼 깊이감이 표현되었다. 더우기 디지틀 홀로그래프 기법에서 광각시야를 표시하기 위해서는 홀로그래프의 크기도 커져야하고 홀로그래프 픽셀사이의 간격도 좁아져야 하므로 데이터량이 기하급수적으로 증가하지만 제시된 방법에서는 픽셀간격이 좁아질 필요가 없이 광각시야 정도에 비례해서 데이터량이 증가하게 되었다.

참 고 문 헌

[1] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, 1968.

- [2] R. Collier, et.al., *Optical Holography*, Academic Press, 1971.
- [3] W-H Lee, "Computer-Generated Hologram: Techniques and Application," *Progress in Optics*, vol. 16, 1978.
- [4] Mark Lucente, "Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth," *Computer Graphics*, May 1997.
- [5] M. Lucente, "Optimization of hologram computation for real-time display," *Proc. SPIE*, vol. 1667, 1991.
- [6] 양훈기, 김은수, "Waveform Decomposition에 의한 새로운 디지털 홀로그램 합성 방법," *대한전자공학회*, 제 33권, A편, 제 1호, 1996. 1
- [7] H. Yang and Eun-Soo Kim, "Waveform decomposition based algorithm for horizontal parallax only display CGH," *Optics Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 510-512, April 1996.
- [8] C. B. Burckhardt, "Information Reduction in Holograms for Visual Display," *J. Opt. Soc.*, 58, 241, 1968.
- [9] 양훈기, 김은수, "Angular 스펙트럼을 이용한 3차원 HPO 홀로그램의 합성," *전자공학회 논문지* 제 34 권 제 5 호 D편, pp. 67-74, 1997. 5
- [10] L. H. Lin, "A Method of Hologram Information Reduction by Spatial Frequency Sampling," *Appl. Phys. Lett*, 12, 176, 1968.
- [11] M. C. King, A. M. Noll, and D. H. Berry, "A New Approach to Computer-Generated Holograph" *Appl. Opt.*, 9, 471, 1970.
- [12] Toyohiko Yatagai, "Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 11, 1976. 11.
- [13] Masahiro Yamaguchi, Hideshi Hoshino, Toshio Honda, and Nagaaki Ohyama, "Phase added stereogram," *Proc. SPIE*, vol. 1914, pp. 25-31, 1993.
- [14] Hiroshi Yoshikawa, Hirokazu Kameyama, "Integral Holography," *Proc. SPIE*, vol. 2406, pp. 226-234, 1995.

 저 자 소 개

楊 勳 其(正會員) 第 34卷 第 10號 參照

柳 致 淵(正會員)

1972년 7월 15일생. 1996년 2월 광운대학교 전파공학과 (공학사). 1998년 2월 광운대학교 대학원 전자통신학과 (공학석사). 1998년 3월 ~ 현재 대한전선 정보통신 2연구부 연구원. 관심분야는 디지털 통신 시스템, 광대역 통신

金 恩 洙(正會員) 第 35卷 第 2號 參照