

광 스캐닝 홀로그래프 현미경에서 부분 영역 해석을 통한 자동 초점

김유석 · 김태근[†]

세종대학교 광전자공학과
☎ 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98번지

(2010년 10월 1일 받음, 2011년 2월 7일 수정본 받음, 2011년 2월 14일 게재 확정)

본 논문에서 홀로그래프의 일부 영역만을 선택하여 자동 초점 맺는 방법을 제안하고 이를 실험적으로 보였다. 먼저 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 복소 홀로그래프를 추출한다. 그 다음 홀로그래프의 일부 영역만을 선택하고 가우시안 저대역 필터링, Real-only 홀로그래프 합성, Power fringe-adjusted 필터링, 주파수축 변환 등의 과정을 통해 깊이 정보를 추출한다. 이렇게 추출된 깊이 위치를 이용하여 홀로그래프를 자동적으로 복원하게 된다.

Auto-focus of Optical Scanning Holographic Microscopy Using Partial Region Analysis

You Seok Kim and Taegeun Kim[†]

Department of Optical Engineering, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

(Received October 1, 2010; Revised manuscript February 7, 2011; Accepted February 14, 2011)

In this paper, we propose an auto-focusing algorithm which extracts a depth parameter by analyzing a selected part of a hologram, and we use experimental results to show that the algorithm is practical. First, we record a complex hologram using Optical Scanning Holography. Next we select some part of hologram and extract depth information through Gaussian low pass filtering, synthesizing a real-only hologram, power fringe-adjusted filtering and inverting to a new frequency axis. Finally, we reconstruct the hologram automatically using the extracted depth location.

Keywords: Digital holography, Holography, Optical scanning holography, Auto-focusing

OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (070.0070) Fourier optics and signal processing

I. 서 론

홀로그래프 기술을 현미경에 응용하고자 하는 시도는 1948년 Gabor에 의해서 최초로 제안되었다.^[1] 이후 홀로그래프 기술을 현미경에 응용하고자 하는 많은 연구가 이루어졌지만 물체광과 기준광의 간섭, 스펙클 잡음, 쌍 영상 잡음, 배경 잡음과 같은 문제 때문에 생체 현미경 분야의 광범위한 응용은 불가능하였다. 하지만 최근 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 스펙클 잡음, 쌍 영상 잡음, 배경 잡음 없이 형광체의 홀로그래프 정보를 추출할 수 있게 되었다.^[2] 또한 FINCHSCOPE의 홀로그래프 촬영 기법을 이용하여 형광체의 홀로그래프 정보를 추출할 수 있게 되었다.^[3] 이와 같은 형광체의 홀로그래프 정보를 추출할 수 있는 새로운 시스템의 개발로 인하여 머지

않은 시기에 홀로그래프 기술이 생체 현미경 분야에 광범위하게 응용될 것이라 기대된다. 홀로그래프 기술은 물체의 크기 정보와 위상 정보를 한 번의 촬영으로 추출하기 때문에 물체의 3차원 정보를 고속으로 추출할 수 있을 뿐만 아니라 수차를 제거하거나 단층 영상만을 추출하는 등과 같은 디지털 연산이 가능하다는 장점이 있다.^[4] 최근 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 추출한 물체의 3차원 정보를 자동으로 초점을 맺는 디지털 연산 방법이 개발되었다.^[5, 6] 하지만 기존의 디지털 연산 방법들의 경우 홀로그래프 전체 영역을 대상으로 연산을 해야 하기 때문에 연산 시간이나 연산 양이 많다는 단점이 있다.^[7-9] 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 홀로그래프의 일부 영역만을 선택하여 디지털 연산하는 방법을 제안하고자 한다. 2장에서는 실제 물체의 홀로그래프

[†]E-mail: takim@sejong.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

정보를 추출하는 광 스캐닝 홀로그래피에 대해서 소개하고 3장에서는 초점 위치를 모르는 홀로그래피로부터 깊이 정보를 추출하여 자동으로 초점을 맺는 알고리즘에 대해서 소개하고자 한다. 4장에서는 홀로그래피의 전 영역이 아닌 일부 영역만을 대상으로 초점을 맺어도 되는 이론적 배경에 대해서 소개하고자 한다.

II. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 3차원 현미경

그림 1은 광 스캐닝 홀로그래피를 나타낸 것이다.^[10] 광 스캐닝 홀로그래피는 2차원 스캐닝을 통해서 3차원 정보를 추출할 수 있는 시스템으로 3차원 현미경에 응용이 이미 제안되었다.^[11] 여기서는 광 스캐닝 홀로그래피에 대해 간단하게 소개하고자 한다. 레이저에서 나온 빛은 빔 분할기(BS1)를 통과하면서 두 개의 경로로 나뉘어진 후 음향 광 변조기를 통과하면서 각각 특정 주파수로 변조된다. 변조된 두 빛은 빔 분할기(BS2)에서 서로 합쳐서 간섭 패턴을 만들게 된다. 이 때 생기는 간섭 패턴을 프레넬 운대판이라고 한다. 프레넬 운대판 패턴의 빛을 이용하여 임의의 물체를 스캔한다. 스캔 된 빛은 렌즈를 통해 광 검출기로 집광되고 Lock-in 증폭기를 통과한 후 디지털 컴퓨터에 저장된다. 임의의 물체의 공간분포를 $I_0(x, y, z)$ 라고 했을 때 디지털 컴퓨터에 저장되는 정보, 즉 홀로그래피 데이터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{com}(x, y) = \int_{-z_0-(1/2)\delta z}^{-z_0+(1/2)\delta z} I_0(x, y, z) \otimes \frac{j}{\lambda z} \exp\left[\left(\frac{-\pi}{a(z)^2} - j\frac{\pi}{\lambda z}\right)(x^2 + y^2)\right] dz \quad (1)$$

Z_0 는 임의의 물체로부터 렌즈(L1)로 생성된 구면파의 초점까지의 거리이다. $a(z)$ 는 물체의 깊이를 나타낸다. δZ 는 프레넬 운대판의 반경을 결정하는 항으로 $a(z) = NA \times z$ 이다. 위의 식을 살펴보면 홀로그래피의 위상항에 물체의 깊이 정보에 해당하는 z 가 저장되어 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 우리가 원하는 깊이 위치인 z_0 만 있는 것이 아니라 모든 깊이 위치인 z 에 대한 정보가 담겨있다. 다음 장에서 여러 깊이 정

보를 담고 있는 홀로그래피에서 우리가 원하는 초점 영역인 z_0 만을 추출하는 디지털 연산 방법을 소개하고자 한다.

III. 부분 선택법

최근 저장된 홀로그래피로부터 디지털 연산을 통해 깊이 위치를 찾아내는 방법이 제안되었다. 이 방법들은 탐색 알고리즘이나 검색 알고리즘 등을 통해서 홀로그래피 복원되는 깊이 위치를 찾아내는 방식들이다^[15-9]. 하지만 기존에 제안된 방식들은 모두 홀로그래피 전 영역을 대상으로 디지털 연산을 진행한다. 전 영역의 많은 데이터를 처리해야 하기 때문에 데이터 연산 양이 많고 연산 시간도 오래 걸린다. 본 논문에서는 이 문제점을 극복하기 위하여 홀로그래피의 특정 부분만 선택하여 깊이 위치를 알아내는 방식을 제안한다.

그림 2는 홀로그래피의 촬영 단계를 나타낸 그림이다. 홀로그래피는 기준광과 물체광의 간섭 패턴을 필름 혹은 CCD에 저장하는 것을 말한다. 그림 3은 일반적인 2차원 이미징 시스템의 촬영 단계를 나타낸 그림이다. 그림 3을 보면 알 수 있듯이 일반적인 2차원 이미징 시스템의 경우 물체의 정보를 렌즈를 통해 초점을 맺어 특정 영역에 저장하게 된다. 하지만 홀로그래피의 경우 그림 2와 같이 물체의 정보를 저장 매질의 전 영역에 확산하여 저장을 하게 된다. 즉, 물체에 대한 정보를 저장 매질의 전 영역에 저장하는 것이다. 따라서 물체의 홀로그래피 정보형태로 인코딩 된 물체의 깊이 정보는

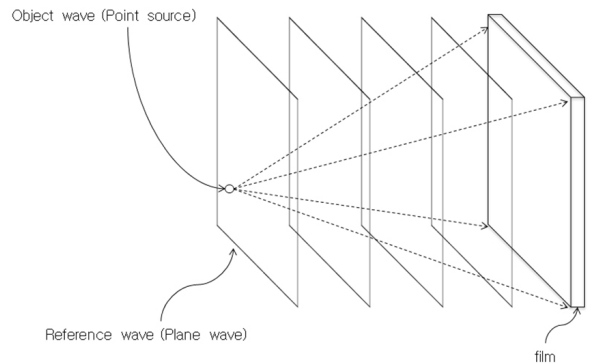


FIG. 2. Recording stage of hologram imaging system.

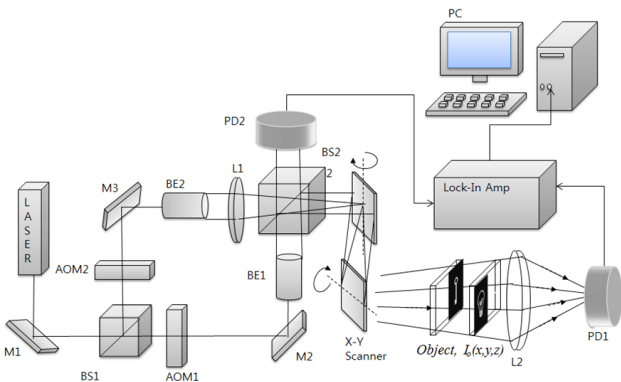


FIG. 1. Optical Scanning Holography(M's : Mirror, AOM : Acousto-Optics Modulator, L's : Lens, BS's : Beam Splitter, BE's : Beam Expander, PD : Photo Detector).

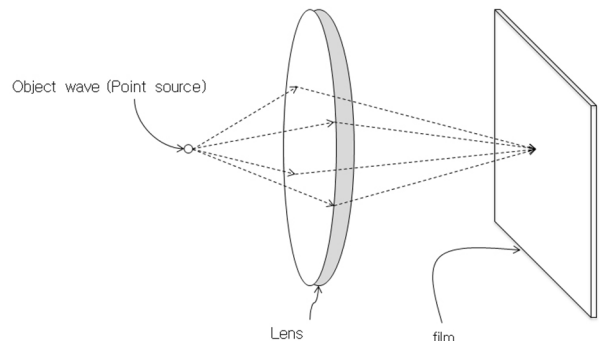


FIG. 3. Recording stage of two-dimensional imaging system.

홀로그래프 전 확산 영역 내에 분산되어 있다. 이에 본 연구에서는 홀로그래프의 확산 영역 중 일부 영역만을 디지털 연산 방법으로 해석하여 물체의 깊이 위치를 찾아내고 이를 이용하여 자동으로 홀로그래프를 초점 맺게 한다. 이 방법을 이용하면 홀로그래프의 일 부분만을 해석함으로 연산 양이나 연산 시간을 줄일 수 있게 된다. 광 스캐닝 홀로그래프의 경우, 홀로그래프 확산 영역은 물체 공간분포와 인코딩되는 프레넬 운대판의 수치구경(NA)과 스캐닝 빔의 초점위치에서 물체까지의 거리에 의해서 결정된다. 3차원 물체를 점들의 중첩으로 이해할 때 물체영역에서 물체를 구성하는 점에 의한 홀로그래프 영역에서의 프레넬 운대판의 방사상 범위는 $r=NA \times z_0$ 이다. 이에 따라 물체영역에서 (x_0, y_0, z_0) 위치에 존재하는 점에 의한 홀로그래프 정보는 홀로그래프 영역에서 $\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2} \leq r$ 를 만족하는 영역에 위치한다. 즉 광 스캐닝 홀로그래프의 홀로그래프 영역에서 확산영역은 $\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2} \leq r$ 을 만족하는 (x, y) 의 영역이다. 따라서, 물체영역에서 (x_0, y_0, z_0) 를 포함한 물체의 깊이 위치를 알기 위해서는 홀로그래프 영역에서 $\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2} \leq r$ 를 만족하는 홀로그래프 영역 내의 부분영역을 선택하여 아래 ‘IV. 자동 초점’절의 자동초점 알고리즘을 적용한다. 추출하는 부분영역의 방사상의 크기를 Δr 이라 하면, 그에 따라 추출한 부분영역에서의 인코딩된 프레넬 운대판의 실질적인 수치구경은 $NA_{vir}=\Delta r/z_0$ 으로 대응하는 Rayleigh 영역이 증가해 깊이 분해능이 감소한다. 그러나 깊이 위치의 검출 문제는 깊이 분해 문제와 달리 최대값을 검출하는 방법으로 Rayleigh 영역보다 정밀하게 검출할 수 있다.^[12]

IV. 자동 초점

홀로그래프의 위상 정보에는 물체의 깊이 위치에 대한 정보가 담겨있다. 따라서 홀로그래프를 자동 초점 맺기 위해서는 홀로그래프 데이터로부터 물체가 초점을 맺는 위치에 대한 깊이 정보를 추출해야 한다. 초점 맺는 위치에 대한 깊이 정보를 추출하는 방법에 대해서는 이미 제안된 디지털 연산 방법이 있다.^[5, 6] 본 논문에서는 이 방식에 대해 간단히 소개하고자 한다.

그림 4는 홀로그래프 데이터로부터 물체의 깊이 정보를 추출하는 과정을 나타낸 플로우 차트이다. 우선 광 스캐닝 홀로그래프 시스템을 이용하여 추출한 복소 홀로그래프에 가우시안 저대역 필터링, $G(k_x, k_y) = \exp\left[-\pi\left[\frac{\lambda}{2\pi NA_g}\right]^2(k_x^2 + k_y^2)\right]$, 을 해준다. 가우시안 저대역 필터링을 한 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 NA_g 는 가우시안 저대역 필터의 컷 오프 주파수를 결정하는 파라미터이다.^[5, 6]

$$H_{com}^{LP}(x, y) = F^{-1}\{F\{H_{com}(x, y)\} \times G(k_x, k_y)\} \\ = \int_{z_0-(1/2)\Delta z}^{z_0+(1/2)\Delta z} I_0(x, y, z) \otimes \frac{j}{\lambda z} \exp\left[\left(\frac{-\pi}{a_p(z)^2} - j\frac{\pi}{\lambda z}\right)(x^2 + y^2)\right] dz \quad (2)$$

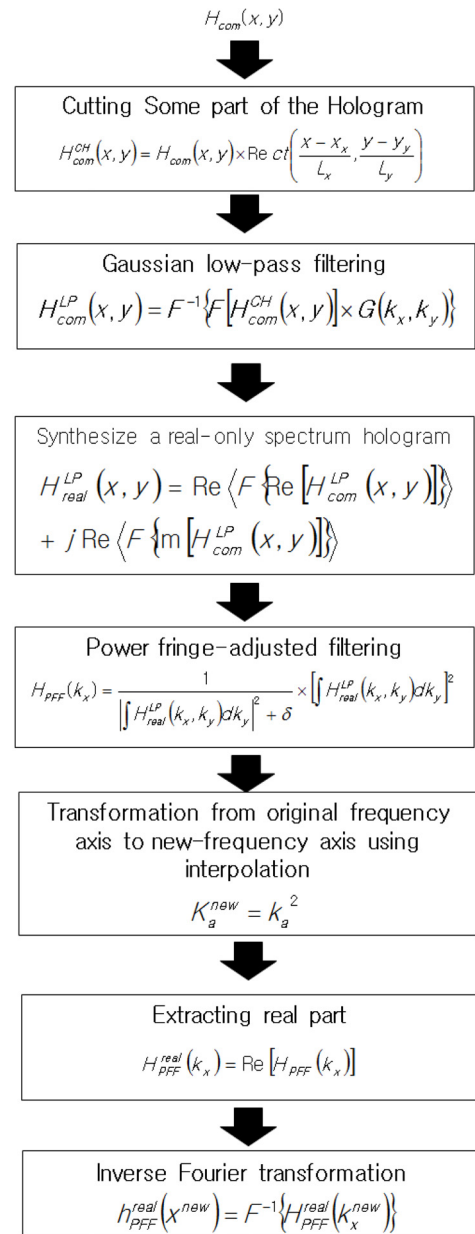


FIG. 4. Flow chart of auto-focusing algorithm.

여기서 z_0 은 물체의 깊이 위치, Δz 는 물체의 깊이 방향으로의 범위를 나타낸다. $F\{\}$ 는 푸리에 변환을 나타내며 $F\{u(x, y)\}_{k_x, k_y} = \iint u(x, y) \exp[j(k_x x + k_y y)] dz dy = u(k_x, k_y)$ 과 같이 나타낼 수 있다. k_x 와 k_y 는 공간주파수를 나타낸다. 식 (2)의 $a_p(z)$ 는 가우시안 저대역 필터의 반경을 결정하는 항으로 $a_p(z) = NA_g NA / \sqrt{NA^2 + NA_g^2} \times z$ 로 나타낼 수 있다. 가우시안 저대역 필터링에서 프레넬 운대판의 Rayleigh 범위를 나타내는 NA_g 값을 물체의 깊이 범위보다 크게 설정하면, 즉 $\Delta z \geq \Delta z_0$ 로 설정하면 물체의 깊이 정보를 가진 프레넬 운대판의 반경은 상수로 근사화 할 수 있다. 즉, 다음 식과 같이 깊이 범위 내에서 상수로 나타낼 수 있다.

$$a_p(z) \approx a_p(z_0) = NA_p \times z_0 \quad (3)$$

이렇게 가우시안 저대역 필터링 된 홀로그래프는 위상 정보에 초점 위치에 대한 정보만을 담고 있기 때문에 초점 위치의 추출이 가능하게 된다. 가우시안 저대역 필터링 후 실수 데이터만을 가진 Real-only 홀로그래프로 합성하여 준다. Real-only 홀로그래프로 합성하는 과정은 다음과 같다.^[12-15]

$$H_{real}^{LP}(k_x, k_y) = \text{Re}\{F[\text{Re}[H_{com}^{LP}(x, y)]]\} + j \text{Re}\{F[\text{Im}[H_{com}^{LP}(x, y)]]\} \quad (4)$$

위의 식에서 Re[]과 Im[]은 각각 실수 부분과 허수 부분만을 추출하는 것을 나타낸다. 합성된 Real-only 홀로그래프를 Power fringe-adjusted 필터링을 해준다. Power fringe-adjusted 필터링을 해주면 다음 식과 같이 깊이 정보를 담고 있는 1차원 프레넬 운대판을 얻게 된다.^[12-15]

$$H_{PF}^{LP}(k_x) = \frac{1}{\left[\int |H_{real}^{LP}(k_x, k_y)|^2 dk_y \right] + \delta} \times \left[\int H_{real}^{LP}(k_x, k_y) dk_y \right] \approx \exp\left(j \frac{\lambda z_0}{2\pi} k_x^2 \right) \quad (5)$$

위의 과정을 통해 얻은 1차원 프레넬 운대판에서 깊이 정보를 바로 얻기 위하여 새로운 주파수 축의 설정이 필요하다.^[6] k_x^2 에 따라 선형적으로 변하면서 아래의 관계를 만족하는 새로운 주파수 축을 설정하고:

$$k_x^{new} = k_x^2 \quad \text{for } k_x \geq 0 \quad (6)$$

Interpolation을 이용하여 수식 (5)의 Power fringe-adjusted 필터링 된 출력을 새로운 주파수 축으로 변환하면 새로운 축에서 설정된 프레넬은 다음과 같다.

$$H_{PF}^{LP}(k_x^{new}) = \exp\left(j \frac{\lambda z_0}{2\pi} k_x^{new} \right) \quad (7)$$

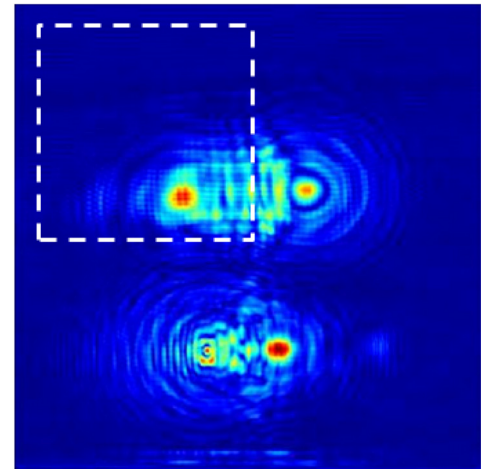
위의 식을 보면 위상항의 주파수가 깊이 정보에 비례하는 단일 주파수로 변환된 것을 알 수 있다. 위의 식에서 실수항만 취해서 역푸리에 변환 과정을 거치면 초점 위치의 깊이 정보를 추출 할 수 있게 된다. 이 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$H_{PF}^{real}(x^{new}) = F^{-1}\left[\text{Re}\{H_{PF}^{LP}(k_x^{new})\}\right] = \frac{1}{2}\delta\left(x^{new} - \frac{\lambda z_0}{2\pi}\right) + \frac{1}{2}\delta\left(x^{new} + \frac{\lambda z_0}{2\pi}\right) \quad (8)$$

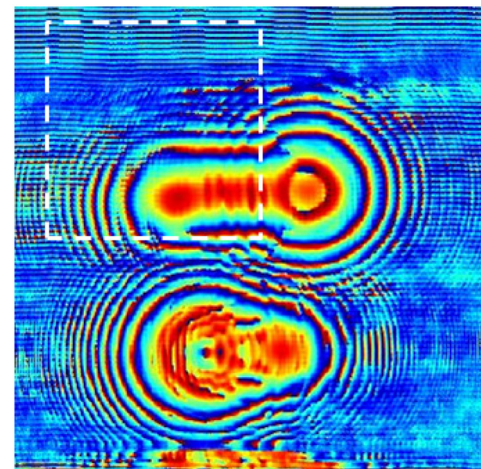
위에 소개한 과정을 통해서 깊이 정보를 추출한 후에 추출한 깊이 위치를 이용하여 깊이 위치에서부터 물체의 깊이 범위에 대한 복원을 실시해 물체의 3차원 영상을 복원할 수 있다. 따라서 제안하는 방식으로 물체의 깊이 위치를 찾아내면, 깊이 전 영역에 대해 초점 위치를 찾는 수동의 작업을 회피할 수 있다.

V. 실험 결과

앞서 소개한 그림 1의 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 실제 물체의 홀로그래프 정보를 추출하였다. 실제 물체는 열쇠와 지구 모양의 투과형 슬라이드 필름을 제작하여 실험을 진행하였다. 그림 5의 (a)와 (b)는 광 스캐닝 홀로그래피 시스템을 이용하여 얻은 홀로그래프의 크기와 위상을 나타낸다. 홀로그래프의 사이즈는 대략 1.1 cm × 1.1 cm이며 두 슬라이드 필름 사이의 간격은 20 cm이다. 본 실험에서는 630 nm의 He-Ne 레이저를 사용하였으며 구면파를 만드는 렌즈는 초점 거리가 500 mm인 렌즈를 사용하였다. 스캐닝 빔의 반경은 약 7.5 mm이다. 스캐닝 빔의 수치구경은 $NA=r/f=0.015$ 이다. 스캐닝 빔의 수치구경과 파장에 의해 결정된 스캐닝 빔의 Rayleigh 범위는 $z_r \approx 2\lambda/\pi NA^2=1.79$ mm이다. 실제 물체는 구면파의 초점으로부터 약 85 cm 떨어져 있다. 프레넬 운대판의 방사상 영역은 $r=NA \times z_0=1.425$ cm로 홀로그래프 확산영역이 홀로그래프 크기 1.1 cm × 1.1 cm 보다 크므로 홀로그래프의 모든 영역에는 물체의 정보가 담겨있다. 따라서, 홀로그래프의



(a)



(b)

FIG. 5. (a) Intensity of complex hologram (b) Phase of complex hologram.

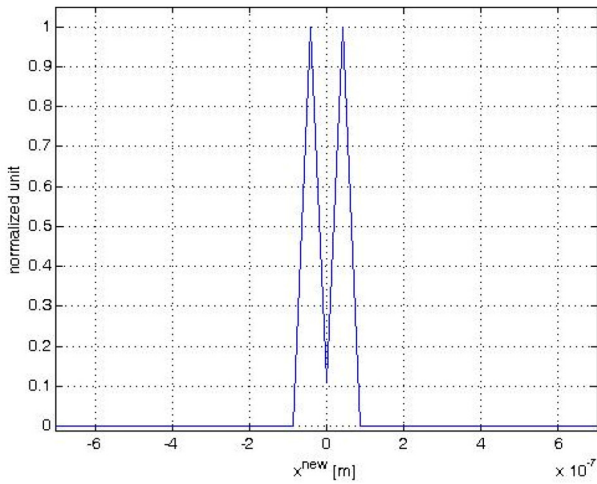


FIG. 6. Distance Parameter.

임의의 부분 영역을 추출해도 물체의 깊이에 대한 정보를 추출할 수 있고 이에 따라 본 실험에서는 좌측 상단 부를 추출하였다.

그림 5의 복소 홀로그램 데이터를 앞서 소개한 그림 4의 디지털 연산 과정을 통해 우리가 원하는 깊이 정보를 추출할 수 있다. 여기서 그림 4는 제안하는 깊이 위치 추출 알고리즘의 플로우 차트이다. 그림 5의 하얀 네모 박스는 자동 초점 디지털 연산을 위해 선택한 홀로그램의 일부 영역을 나타낸다. 본 실험에서는 $N\lambda_g=0.00116$ 으로 설정해 주었다. 그림 4의 처리 과정을 통해 추출된 깊이 정보는 식 (8)에 의해 약 $z_0 = \frac{2\pi X^{new}}{\lambda} \approx 95$ cm라는 값을 얻었다. 이때의 $X^{new} \approx 95.7$ cm이다. 이를 그림으로 나타낸 것이 그림 6이다.

식 (8)에 의해 얻은 깊이 정보를 기준으로 하여 식 (9)와 같 cm은 범위에서 초점을 맺으면 그림 7과 같이 초점 맺은 영상을 얻을 수 있게 된다.

$$z_0 - \left(\frac{1}{2}\right)\delta z \leq z \leq z_0 + \left(\frac{1}{2}\right)\delta z \quad (9)$$

VI. 결 론

본 논문에서는 홀로그램 데이터의 일부분을 선택하여 자동 초점을 맺는 디지털 연산 방법을 소개하였다. 기존에 제안되었던 자동 초점 디지털 연산 방식과는 달리 홀로그램의 일부 영역만을 선택하여 깊이 정보를 추출하기 때문에 처리하는 데이터의 양이나 연산 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 홀로그램의 일부 영역을 선택하여 깊이 정보를 추출하여도 홀로그램을 복원하는데 문제 없음을 실험을 통해 보였다. 본 논문에서 제안한 깊이 위치 추출 방법은 자동초점 뿐 아니라, Optical Sectioning 및 수평 시차 유일 홀로그램 변환에서 필요한 기준 위치를 수치적 방법으로 수동의 작업 없이 구할

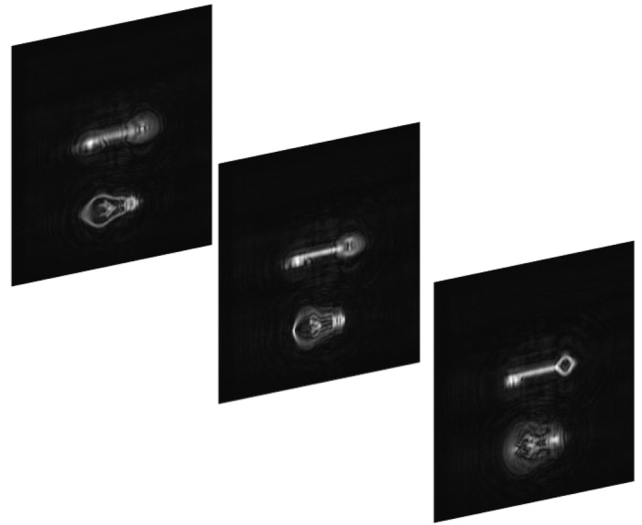


FIG. 7. Focused 3D image.

수 있어 Optical Sectioning 및 수평 시차 유일 홀로그램 변환 요소 연산으로 적용할 수 있다.^[16, 17]

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2009-0087476).

References

1. D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature* **161**, 777-778 (1948).
2. G. Indebetouw, T. Kim, T.-C. Poon, and B. W. Schilling, "Three-dimensional location of fluorescent inhomogeneities in turbid media by scanning heterodyne holography," *Opt. Lett.* **23**, 135-137 (1998).
3. J. Rosen and G. Brooker, "Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy," *Nat. Ph.* **2**, 190-195 (2008).
4. T. Kim, "Optical sectioning by use of optical scanning holography and wiener filter," *Appl. Opt.* **45**, 872-879 (2006).
5. T. Kim and T.-C. Poon "Autofocusing in optical scanning holography," *Appl. Opt.* **48**, H153-H159 (2009).
6. T. Kim and Y.-S. Kim, "Extraction of a distance parameter in optical scanning holography using axis transformation," *J. Opt. Soc. Korea* **14**, 104-108 (2010).
7. P. Ferraro, G. Coppola, S. D. Nicola, A. Finizio, and G. Pierattini, "Digital holographic microscope with automatic focus tracing by detecting sample displacement in real time," *Opt. Lett.* **28**, 1257-1259 (2003).
8. M. Liebling and M. Unser, "Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion," *J. Opt. Soc. Am. A* **21**, 2424-2430 (2004).
9. P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen, and G. von Bally,

- “Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging,” *Appl. Opt.* **47**, D176 (2008).
10. T.-C. Poon, M. Wu, K. Shinoda, and Y. Suzuki, “Optical scanning holography,” *Proc. IEEE* **84**, 753-764 (1996).
 11. G. Indebetouw, P. Klysubun, T. Kim, and T.-C. Poon, “Imaging properties of scanning holographic microscopy,” *J. Opt. Soc. Am. A* **17**, 380-390 (2000).
 12. P. Klysubun, G. Indebetouw, T. Kim, and T.-C. Poon, “Accuracy of three-dimensional remote target location using scanning holographic correlation,” *Opt. Comm.* **184**, 357-366 (2000).
 13. T. Kim and T.-C. Poon, “Extraction of 3-D location of matched 3-D object using power fringe-adjusted filtering and Wigner analysis,” *Opt. Eng.* **38**, 2176-2183 (1999).
 14. T. Kim and T.-C. Poon, “Experiments of depth detection and image recovery of a remote target using a complex hologram,” *Opt. Eng.* **43**, 1851-1855 (2004).
 15. T. Kim, T.-C. Poon, and G. Indebetouw, “Depth detection and image recovery in remote sensing by optical scanning holography,” *Opt. Eng.* **41**, 1331-1338 (2002).
 16. T. Kim, “Optical sectioning by use of optical scanning holography and Wiener filter,” *Appl. Opt.* **45**, 872-879 (2006).
 17. T. Kim, Y. S. Kim, W. S. Kim, and T.-C. Poon, “Algorithm for converting full-parallax holograms to horizontal-parallax-only holograms,” *Opt. Lett.* **34**, 1231-1233 (2009).