

## 홀로그램 정보를 이용한 깊이위치 추출과 3차원 영상인식

김태근<sup>†</sup>

세종대학교 광공학과

Ⓣ 143-747 서울시 광진구 군자동 98번지

(2002년 8월 20일 받음, 2003년 1월 8일 수정본 받음)

물체의 홀로그램은 물체의 깊이위치에 대한 정보뿐 아니라 물체의 깊이분포에 대한 정보도 가지고 있다. 그러나 두 가지 정보는 프린지 패턴(fringe pattern)의 형태로 서로 섞여있어 홀로그램으로부터 물체의 깊이위치에 대한 정보를 분리해내기 어렵다. 본 논문에서는 물체의 깊이 및 위치분포에 대한 정보를 갖는 단일 결터 홀로그램(single-sideband hologram)으로부터 물체의 깊이위치에 대한 정보만을 가우시안 저대역 필터를 이용해 추출해내고 그를 수치적 방법으로 해석해 물체의 깊이위치를 얻어내는 알고리즘을 제안한다. 또한 추출된 깊이위치를 이용하여 물체의 깊이위치에서 홀로그램을 복원해낸다.

주제어 : three-dimensional pattern recognition, Gaussian low-pass filter, depth detection, Wigner distribution.

### I. 서 론

광 정보처리 분야에 있어 광 상관기(optical correlator)는 디지털 정보처리 방법과 달리 기본 속성상 병렬 실시간 처리라는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 광 상관기는 오랜 역사를 통해 2차원 영상인식과 2차원 공간에서의 물체 추적 시스템에 응용되어 왔다.<sup>[1-5]</sup> 실시간 병렬처리라는 광 상관기의 장점에도 불구하고 2차원 영상을 비교하는 광 상관기의 2차원 제한성은 지금 까지 광 영상인식분야를 2차원 영상인식과 2차원 공간에서의 물체 추적 시스템에 국한 시켜왔다. 그러나 실 공간은 3차원이고 물체는 3차원 공간에 위치하고 있어 3차원 영상인식과 3차원 공간에서 물체 추적에 대한 필요와 관심이 증가되고 있다. 또한 그의 응용범위는 공업제품의 정밀한 검사로부터 로봇 비전, 의료 영상인식, 원격탐지, 3차원 공간에서 적기식별 및 위치 추적 등의 응용까지 확대되고 있다.

영상인식 및 위치추적 시스템의 2차원 제한성은 비단 광 정보처리 분야만의 문제는 아니다. CCD 카메라와 같은 일반적인 영상 추출 방법은 3차원 물체의 2차원 면에 투사된 2차원 영상정보를 제공함에 따라 영상정보를 추출하는 방법이 2차원에 제한돼있다. 영상인식분야의 2차원 제한성의 근원은 우선 물체의 3차원 정보를 쉽게 추출해 낼 수 있는 방법이 없다는 것과 3차원 정보의 양이 방대하다는데 있다. 이러한 영상인식분야의 2차원 제한성을 극복하고 실 공간인 3차원에서 3차원 물체의 영상인식과 위치추적을 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 지금 까지도 3차원 영상인식과 위치추적은 영상인식분야에서 가장 도전적인 과제 중 하나로 남아있다. 최근에 영상인식의 3차원 확대에 대한 한 가지 접근 방법으로 Kim 과 Poon에 의해 3차원 영상인식과 3차원 공간에서 물체

추적을 위해 물체의 홀로그램 정보를 이용하여 물체를 표현하는 방법이 제안되었다.<sup>[6-9]</sup> 홀로그램은 일반적인 영상과 같이 2차원 평면 신호지만 2차원 평면 위에 프린지 패턴(fringe pattern)형태로 물체의 깊이정보를 갖고 있다. 따라서 단지 홀로그램의 2차원 비교만으로도 물체의 3차원 정보를 비교할 수 있으며 또한 홀로그램 정보의 분석을 통해 인식된 물체의 깊이위치도 알아낼 수 있다. 물체의 홀로그램 정보를 영상인식분야에 응용하기 위해서는 전기신호 형태로 물체의 홀로그램 정보를 추출해내는 것이 필요하다. 왜냐하면, 첫째 필름에 광 신호형태로 저장된 물체의 홀로그램 정보를 전기신호로 변환해 전자장비에서 이용하도록 하는 방법이 용의 하지 않고, 둘째 필름에 저장된 광 신호를 읽기 위해서는 현상과 인화라는 과정이 요구됨으로 필름을 이용해서는 실시간 처리가 불가능하기 때문이다. 전기신호형태로 홀로그램 정보를 얻어내는 방법으로 필름대신에 CCD 카메라를 이용하는 방법이 제안되었다. 그러나 홀로그램 정보를 추출하기 위해 CCD 카메라를 사용할 경우 홀로그램의 높은 공간 주파수를 분해하기 위해 막대한 양의 픽셀을 갖는 CCD 어레이가 필요하다. 뿐만 아니라 물체의 홀로그램을 얻기 위해서는 암실 환경 및 진동이 없는 환경이 필요하다. 왜냐하면 홀로그램은 빛의 간섭무늬이기 때문에 진동에 취약하고 동일 광원에서 나오는 레이저 빛만이 간섭무늬를 만드는데 기여하므로 다른 빛은 광 잡음으로 작용하기 때문이다. 광 잡음 과 진동에 취약한 점을 극복하고 비교적 큰 물체의 홀로그램 정보를 전기신호형태로 얻을 수 있는 방법이 Poon에 의해서 제안되었다.<sup>[10]</sup> 이 방법은 소위 광 스캐닝 홀로그래피(Optical Scanning Holography)라 불린다. 이 광 스캐닝 홀로그래피는 음향-광 변조기(Acousto-Optic Modulator)와 렌즈를 이용해 시-공간적으로 변조된 빛으로 대상 물체를 스캐닝 해 반사되는 빛을 광-검출기(photo-detector)를 이용해 전기신호로 변환하고 변환된 신호를 전기적 방법으로 복조해서 물체의 홀로그램 정보를 전기신호형태

<sup>†</sup>E-mail: takim@sejong.ac.kr

로 추출한다. 광 스캐닝 홀로그래피의 장점은, 첫째 스캐닝 방법을 이용하여 물체의 크기에 관계없이 물체의 홀로그램 정보를 추출할 수 있다는 것이다. 둘째 시-공간적 변-복조를 통해 광 잡음 및 진동에 대해 매우 안정적이라 암실 환경이 아니라 개방된 공간에서 진동 차단을 위한 특별한 기구 없이 물체의 홀로그램을 전기신호 형태로 직접 얻어낼 수 있다는 것이다. 홀로그램은 물체의 3차원 정보를 2차원 평면에 프린지 무늬 형태로 가지고 있다. 그러므로 위의 광 스캐닝 방법으로 얻어진 물체의 홀로그램 정보의 2차원 비교만으로도 물체의 3차원 영상을 비교할 수 있다. 그러나 물체의 3차원 영상이 서로 같은 물체라 하더라도 물체의 깊이 위치에 따라 물체의 홀로그램 정보는 서로 상이하다. 그러므로 물체의 3차원 영상이 서로 같아 하더라도 물체의 깊이 위치가 다른 경우에는 물체의 홀로그램을 직접비교해서는 물체의 3차원 영상이 서로 일치하는지 아닌지를 알 수 없다.<sup>[6,7]</sup> 다시 말하면 물체의 홀로그램정보의 상관함수를 이용해 물체의 3차원 영상을 비교하는 방법은 깊이 위치에 대한 자리이동 불변성이(shift invariance) 없다. 이를 극복하기 위해 두 홀로그램의 상관함수를 구한 후에 그를 깊이 위치에 대해 재생하는 방법<sup>[6]</sup> 그리고 상관함수를 수치적 방법으로 해석해 깊이 위치를 알아내는 방법이 제안되었다.<sup>[7]</sup> 그러나 물체의 홀로그램 정보를 이용한 영상인식에 대한 연구는 대상 물체의 회전이나 변형에 대해 취약했다. 일반적으로 인식 대상이 되는 물체는 기준 물체에 대해서 회전된 위치에 존재할 수 있으며 조금 변형될 수도 있다. 대상 물체가 기준 물체와 같은 물체라 하더라도 대상물체의 면하는 방향이 조금 회전되어있으면 같은 물체로 인식하지 못하는 단점이 있다. 즉 영상인식에 있어 회전 및 일그러짐 불변성이(rotation & distortion invariance) 없다는 단점이 있다. 이는 실제의 3차원 영상인식에 있어 결정적인 단점이 되어왔다. 왜냐하면 실제의 경우 임의로 위치한 대상물체의 면하는 방향이 항상 기준물체의 면하는 방향과 일치하기를 기대하기는 어렵기 때문이다. 이를 극복하기 위해 최근에는 물체의 홀로그램 정보를 해석해 물체의 깊이 위치를 먼저 알아낸 후 알려진 깊이 위치에 물체를 등록하고 등록된 위치에서 물체의 영상을 복원해내 복원된 2차원 영상을 회전 및 일그러짐 불변한 광 상관기를 이용해 비교함으로써 대상 물체의 회전 및 일그러짐 불변하게 물체의 2차원 영상을 인식하는 방법이 제안되었다.<sup>[11]</sup> 이를 위해서 우선 낮은 수치구경(numerical aperture, NA)를 가지는 프레넬 존 패턴(Fresnel zone pattern, FZP)으로 3차원 공간에 위치하는 물체를 스캐닝 해 물체의 깊이 위치에 대한 홀로그램 정보를 추출하고 그로부터 물체의 깊이 위치와 깊이 위치에서의 2차원 영상을 얻어낸다.<sup>[11]</sup> 그러나 제안된 방법으로는 물체의 깊이 위치에서 물체의 2차원 영상만을 얻어내 비교함으로써 물체의 3차원 패턴을 비교할 수 없어 물체의 3차원 영상인식은 불가능하다. 본 논문에서는 높은 수치구경을 갖는 프레넬 존 패턴으로 3차원 공간에 위치하는 물체를 스캐닝 해 물체의 높은 분해능을 갖는 단일 결미 홀로그램(single-side band hologram) 정보를 얻어내고 그를 수치적 방법으로 해석해 직접 물체의 깊이 위치를 추출하고 추출된 깊이 위치를 이용하여 깊이 위치에서의 물체의 홀로그램 정보를 복원하는 수치적 방법을 제안

한다. 이를 이용하여 3차원 공간에서 물체의 깊이 위치 뿐 아니라 추출된 깊이 위치에서 물체의 3차원 영상 정보를 홀로그램 형태로 얻어내고 그를 회전 및 일그러짐 불변한 광 상관기를 이용해 비교함으로써 대상 물체의 회전 및 일그러짐 불변하게 물체의 3차원 영상을 인식할 수 있다.

### 1.1. 광 스캐닝 홀로그램

광 스캐닝 홀로그램에 대한 정밀한 수학적 해석은 참고문헌 [10]을 통해 발표되었으므로 본 절에서는 시스템에 대한 간략하고 직관적 이해를 위해 시스템의 개략적 설명을 제시한다. 그림 1은 광 스캐닝 홀로그램 시스템을 보여준다. 레이저 빛은 빔 스플리터(beam splitter), BS1에 의해서 위, 아래 광로로 나뉘어 진다. 위 광로를 따르는 빛은 음향-광 주파수 편이기(acousto-optic frequency shifter)에 의해서 시간 주파수가  $\Omega$ 로 편이 되고 빔 확대기(beam expander)를 거쳐 빔이 확대되나 그 크기는 한정되어 있다. 확대된 빔은 렌즈  $L$ 을 통해 빔 스플리터 BE2에서 초점을 맺어진다. 아래 경로를 따르는 빛은 빔 확대기, BE2를 거쳐 역시 한정된 크기로 확대된 빔 스플리터 BS2에서 위 경로를 거친 빔과 중첩된다. 중첩된 빛의 세기는 두 가지 성분으로 구성된다 하나는 각각 광로를 통과한 빛의 세기 패턴이고 다른 하나는 각각 광로를 통과한 빛의 크로스 텀(cross term)이다. 이때 크로스 텀은 시간적으로는 음향-광 주파수 편이기에 의해 인가된 시간 주파수  $\Omega$ 로 진폭변조 되어있으며 공간적으로는 구면파와 평면파의 중첩에 의해 프레넬 존 패턴(Fresnel zone pattern, FZP)이 된다. 이때 중첩된 빛의 크로스 텀인 FZP의 크기는 스캐닝 빔의 수치구경(numerical aperture, NA) 다시 말하면 FZP의 진행에 의해 진행방향에 대해 원뿔형태를 이루는 원뿔각의 절반의 역 sine에 의해 제한되어 있으며 이에 따라 구면파 초점으로부터  $z$ 만큼 떨어진 위치에서 FZP의 반지름은  $a_z = (NA)z$ 로 제한되어 있다. 중첩된 빛의 세기로 그림 1에서처럼 스캐닝 거울로부터 거리에 위치한 대상 물체  $I_o(x, y, z)$ 를 래스터 패턴(raster pattern)으로 스캐닝 한다. 이때 반사된 빛을 영역 적분 광 검출기(area-integrating photodetector)를 통해서 집광 한다. 광 검출기는 집광된 빛의 세기에 비례해서 전류를 만들어 주고 만들어진 전류는 밴드 패스 필터(band pass filter)를 통해 필터링된다. 이때 출력전기신호,  $i_\Omega(x, y)$ 중 스캐닝 빔의 크로스 텀 부분이 물체에 반사된 빛에 의한 전류만이 시간 주파수  $\Omega$ 로 헤테로다인 진폭변조 되어 있다. 그러므로 출력전기신호를 각각  $\cos\Omega t$ 와  $\sin\Omega t$ 에 의해서 복조하고 그를 스캐닝 위치에 따라  $x-y$  평면에 나타내면 아래와 같이 각각 스캐닝 빔의 크로스 텀인 FZP의 허수부인 Sine FZP와 물체의 영상 그리고 실수부인 Cosine FZP와 물체의 영상과의 컨볼루션(convolution)이 된다:

$$i_r(x, y) = \int_{z_o - (1/2)\delta z}^{z_o + (1/2)\delta z} \frac{A_z(x, y)}{\lambda z} \sin\left\{\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right\} \otimes I_o(x, y, z) dz \quad (1a)$$

$$i_i(x, y) = \int_{z_o - (1/2)\delta z}^{z_o + (1/2)\delta z} \frac{A_z(x, y)}{\lambda z} \cos\left\{\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right\} \otimes I_o(x, y, z) dz \quad (1b)$$

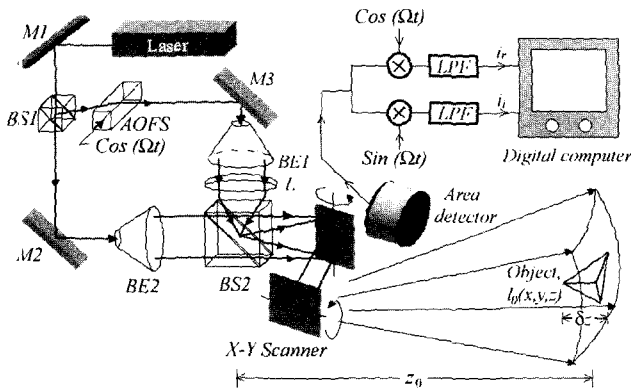


그림 1. 광 스캐닝 홀로그램 시스템(BPF @Ω: bandpass filter tuned at frequency Ω BS, BS1: beam splitters, AOFS: acousto-optic frequency shifter, M1, 2, 3, 4: mirrors, L: lens).

여기서  $z_0$ 은 구면파의 초점에서부터 물체까지의 평균거리 그리고  $\delta z$ 는 물체의 깊이방향 폭을 나타내고  $A_z(x, y)$ 는 수치구경에 의해 결정되는 FZP의 크기제한 요소로 반지름을 갖는 가우시안 인벨로프(Gaussian envelope)이다. 즉  $A_z(x, y) = \exp[-(\pi/a_z^2)(x^2+y^2)]$ 이다. 위 식에서 반사된 빛의 세기는 스캐닝 빔의 세기와 물체의 영상과의 컨볼루션임을 알 수 있다. 수식 (1a,b)에서  $\otimes$ 는 아래와 같이 정의되는 2차원 컨볼루션을 나타낸다.

$$g(x, y) \otimes h(x, y) = \iint g(x', y') h(x-x', y-y') dx' dy' \quad (2)$$

식 (1a, b)는 각각 물체의 영상의 sine FZP 홀로그램과 cosine FZP 홀로그램이다. 이를 아래와 같이 복소수 합성한다:

$$F^c(x, y) = i_r(x, y) - j i_i(x, y) \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) \otimes \left\{ \frac{j A_z(x, y)}{\lambda z} \exp[-j(\pi/\lambda z)(x^2+y^2)] \right\} dz \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) \otimes h_z(x, y) dz \quad (3)$$

위 식에서  $h_z(x, y) = j A_z(x, y)/\lambda z \exp[-j(\pi/\lambda z)(x^2+y^2)]$ 는 자유공간 임펄스 함수임으로 위의 합성된 복소수 패턴은 자유공간에서 물체의 빛 세기의 복소수 회절패턴이며 이에 따라 물체의 단일 결미 홀로그램이 된다.<sup>12)</sup>

## II. 가우시안 저-대역 필터링(Gaussian low-pass filtering)과 깊이 위치 추출

깊이 위치 추출을 위한 실수-유일 스펙트럼 홀로그램(real-only spectrum hologram)의 합성을 위한 기존의 방법에서는 스캐닝 패턴인 FZP의 크기가 충분히 작아 다시 말하면 FZP의 수치구경이 충분히 작아 물체의 깊이 방향에 대한 폭( $\delta z$ )이 FZP의 Rayleigh 영역 내에 위치해야만 했다.<sup>11)</sup> 그렇기 때문에 기존의 깊이 위치 추출 방법은 원격감지로 그의 응용이 제한되어 있었으며 물체의 깊이위치에서 복원된 영상도 물체의 3차원 정보를 갖고 있지 않아 복원된 영상으로는 물체의 3차원 영상을 비교할 수 없었다.<sup>11)</sup> 이에 본 연구에서는 스캐닝 빔의 제한조

건인 수치구경이 충분히 작아 물체의 깊이 방향에 대한 폭( $\delta z$ )이 FZP의 Rayleigh 영역 내에 위치해야만 한다를 극복해서 FZP의 수치구경에 관계없이 물체의 단일 결미 홀로그램으로부터 물체의 깊이 위치를 추출해 내는 알고리즘을 제안한다.

### 2.1. 가우시안 저-대역 필터링(Gaussian low-pass filtering)

본 분절에서는 가우시안 저-대역 필터링을 이용하여 높은 수치구경을 갖는 홀로그램으로부터 물체의 깊이분포에 대한 홀로그램 정보를 필터링 해내 높은 수치구경을 갖는 홀로그램으로부터 물체의 깊이위치에 대한 홀로그램 정보만을 추출해 내는 방법을 제안한다.

단일 결미 홀로그램의 스펙트럼은 아래와 같이 식(3)을 푸리에 변환(Fourier transformation)해서 얻는다:

$$H^c(k_x, k_y) = F\{H^c(x, y)\} \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} F\{I_o(x, y, z)\} \times F\left\{ \frac{j A_z(x, y)}{\lambda z} \exp[-j\frac{\pi}{\lambda z}(x^2+y^2)] \right\} dz \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} I_o(k_x, k_y, z) A_z(k_x, k_y) \exp\left[-j\frac{\lambda z}{4\pi}(k_x^2+k_y^2)\right] dz \quad (4)$$

위 식에서  $F\{\cdot\}$ 는  $F\{u(x, y)\}_{k_i} = \iint u(x, y) \exp(jk_x x + jk_y y) dx dy = u(k_x, k_y)$ 와 같이 정의된 푸리에 변환 연산자를 나타낸다.  $I_o(k_x, k_y, z) = F\{I_o(x, y, z)\}$ 는 물체의 영상의 푸리에 변환 그리고  $A_z(k_x, k_y) = \exp[-(1/4\pi)(\lambda z/a_z^2)(k_x^2+k_y^2)]$ 는 스캐닝 빔의 크기제한에 따른 주파수 공간에서 크기제한 요소이다. 위 식에서  $a_z = (NA)z$ 이므로 스캐닝 빔의 크기는 스캐닝 빔의 수치구경에 의해서 결정된다. 그러므로 홀로그램에서 낮은 수치구경을 갖는 홀로그램을 아래의 가우시안 저-대역 필터를 이용해 추출 해낸다. 공간 주파수영역에서 가우시안 저-대역 필터링은 다음과 같다:

$$G_{low\ pass}(k_x, k_y) = \exp\{-1/(4\pi a_g^2)(k_x^2+k_y^2)\} \quad (5)$$

위 식에서  $a_g$ 는 가우시안 저-대역 필터의 컷오프 주파수(cutoff frequency)를 결정하는 파라미터이다.

주파수 영역에서 필터링된 출력 홀로그램은 입력 홀로그램의 스펙트럼, (식 4)과 가우시안 저-대역 필터의 곱으로 아래와 같이 얻어진다:

$$H^{Gc}(k_x, k_y) = H^c(k_x, k_y) \times G_{low\ pass}(k_x, k_y) \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} I_o(k_x, k_y, z) G_{low\ pass}(k_x, k_y) A_z(k_x, k_y) \exp\left[j\frac{\lambda z}{4\pi}(k_x^2+k_y^2)\right] dz \\ = \int_{z_0-(1/2)\delta z}^{z_0+(1/2)\delta z} I_o(k_x, k_y, z) A_z^{low\ NA}(k_x, k_y) \exp\left[j\frac{\lambda z}{4\pi}(k_x^2+k_y^2)\right] dz \quad (6)$$

위 식에서  $A_z^{low\ NA}(k_x, k_y) \equiv \exp[-(1/4\pi)\{\lambda z/(a_g a_z)\}^2(k_x^2+k_y^2)]$ 로 가우시안 저-대역 필터링된 홀로그램의 주파수 공간에서 크기제한요소이며  $a_g a_z = a_g NAz$ 이다.  $a_z' \equiv a_g a_z$ 로 그리고  $NA' = a_g NA$ 로 정의한다면  $H^{Gc}(k_x, k_y)$ 는 스캐닝 빔의 크기가  $NA'$ 으로 한정된 스캐닝 빔으로 스캐닝해서 만들어진 홀로그램의 스펙트럼과 같다. 그에 따라 Rayleigh 영역( $\lambda/NA^2$ )이 대상 물체의 깊이 영역 길이  $\delta z$ 보다 길게  $a_g$ 를 선택하면 즉  $a_g \leq \frac{1}{NA} \sqrt{\frac{\lambda}{\delta z}}$

를 만족하는  $a_g$ 를 선택하면 대상물체의 스캔영역에 대해서 스캐닝 빔의 반경과 프레넬 수(Fresnel number)가 상수인 즉,  $a_z' = a_o = (NA)z_o$ ;  $F(z) \approx F = a_o^2/\lambda z_o^2$ 인 스캐닝 빔으로 스캐닝 한 홀로그램과 같은 홀로그램으로 대상물체의 영역 내에서 자유공간 임펄스함수의 스펙트럼은 상수이다. 즉 대상물체의 영역 내에서 자유공간 임펄스함수의 스펙트럼은  $H_z(k_x, k_y) = H_{z_o}(k_x, k_y) = A_{z_o}^{low NA}(k_x, k_y)\exp[j(\lambda z_o/4\pi)(k_x^2 + k_y^2)]$ 이다. 그러므로 가우시안 저-대역 필터링 된 대상물체의 홀로그램의 스펙트럼(식 6)은 아래와 같이 주어진다:

$$H^{Gc}(k_x, k_y) = \left\{ \int_{z_o-(1/2)\delta z}^{z_o+(1/2)\delta z} I_o(k_x, k_y, z) dz \right\} \times \left\{ A_{z_o}^{low NA}(k_x, k_y) \exp \left[ j \frac{\lambda z_o}{4\pi} (k_x^2 + k_y^2) \right] \right\} \quad (7)$$

위 식에서 가우시안 저-대역 필터링을 통해 홀로그램으로부터 물체의 깊이분포에 대한 정보를 제거하고 오직 물체의 깊이 위치에 대한 정보만을 홀로그램 정보 형태로 추출해 냈음을 알 수 있다. 또한 홀로그램 정보는 오로지 홀로그램의 위상에만 담겨있음을 알 수 있다. 그러나 홀로그램의 위상에는 물체의 깊이 위치에 대한 홀로그램적 정보뿐 아니라 대상물체의 스펙트럼도 섞여있다. 위 홀로그램의 위상으로부터 물체의 스펙트럼의 위상을 제거하기 위해 홀로그램으로부터 실수-유일 스펙트럼 홀로그램이라 불리는 홀로그램을 합성하고 그를 결-조정 파워 필터링(power fringe-adjusted filtering)한다. 결-조정 파워 필터링 된 출력을 Wigner 분산으로 해석해 물체의 깊이 위치를 추출해 낼 수 있다. 다음 분절에서는 가우시안 저-대역 필터링 된 출력으로부터 대상 물체의 깊이 위치를 추출하는 방법에 대해서 기술한다.

**2.2. 실수-유일 스펙트럼 홀로그램 합성과 깊이 위치 추출**

가우시안 저-대역 필터링 된 단일 결피 홀로그램의 공간 영역에서의 분포는 홀로그램의 스펙트럼(식 7)을 역 푸리에 변환해 다음과 같이 얻어진다:

$$H^{Gc}(x, y) = F^{-1} \{ H^{Gc}(k_x, k_y) \} = F^{-1} \left\{ \int_{z_o-(1/2)\delta z}^{z_o+(1/2)\delta z} I_o(k_x, k_y, z) dz \right\} \otimes F^{-1} \left\{ A_{z_o}^{low NA}(k_x, k_y) \exp \left[ j \frac{\lambda z_o}{4\pi} (k_x^2 + k_y^2) \right] \right\} = \left\{ \int_{z_o-(1/2)\delta z}^{z_o+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) dz \right\} \otimes \frac{j A_{z_o}^{low NA}(x, y)}{\lambda z_o} \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda z_o} (x^2 + y^2) \right] \quad (8)$$

위 식에서  $A_{z_o}^{low NA}(x, y) = \exp[-(\pi/a_z'^2)(x^2 + y^2)]$  이고  $a_z' = a_z a_g$ 으로  $z = z_o$ 에서 공간영역의 가우시안 저-대역 필터링 된 크기제한요소이다.

필터링 된 단일 결피 홀로그램의 실수 부분과 허수 부분을 추출하여 나타내면 각각 아래와 같다:

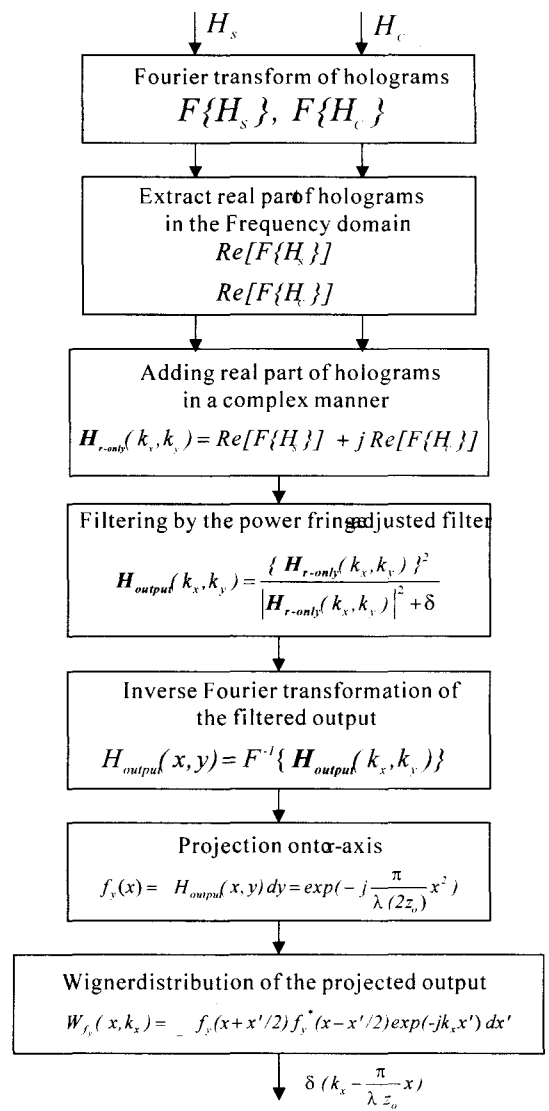


그림 2. 가우시안 저-대역 필터링된 홀로그램으로부터 물체의 깊이 위치를 추출하는 알고리즘 순서도.

$$H_s = Re(H) = \left\{ \int_{z_o-(1/2)\delta z}^{z_o+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) dz \right\} \otimes \frac{A_{z_o}^{low NA}(x, y)}{\lambda z_o} \sin \left[ \frac{\pi}{\lambda z_o} (x^2 + y^2) \right] \quad (9a)$$

$$H_c = Im(H) = \left\{ \int_{z_o-(1/2)\delta z}^{z_o+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) dz \right\} \otimes \frac{A_{z_o}^{low NA}(x, y)}{\lambda z_o} \cos \left[ \frac{\pi}{\lambda z_o} (x^2 + y^2) \right] \quad (9b)$$

위 식에서  $Re(\cdot)$ 과  $Im(\cdot)$ 는 각각 식 (8)의 실수 부분과 허수 부분을 나타낸다. 낮은 수치구경의 자유공간 임펄스 함수로 인코딩된 홀로그램으로부터 물체의 깊이 위치를 추출하는 알고리즘에 대한 자세한 수학적 설명은 참고문헌 [11]에 발표되었으므로 본 분절에서는 알고리즘의 간단한 설명을 그림 2의 순서도를 이용하여 기술하고자한다. 그림 2의 첫 번째 블록에서는 단일 결피 홀로그램의 실수 부분과 허수 부분(식 9a,b)을 각각

푸리에 변환한다. 두 번째 그리고 세 번째 블록에서는 푸리에 변환된 각각 홀로그램의 실수 부분만을 추출하여 세 번째 블록에서처럼 복소 합성한다. 세 번째 블록의 결과물이 실수-유일 스펙트럼 홀로그램이라 불리는 홀로그램이다. 이를 네 번째 블록에서 정의된 결-조정 파워 필터를 이용해 필터링 해낸다. 이때 결-조정 파워 필터의 분모에 있는  $\delta$ 는 필터의 가능한 pole 문제를 방지하기 위해 첨가된 작은 값의 수로 상수가 지나 혹은  $k_x, k_y$ 에 대한 함수이다. 필터링 된 출력은 다섯 번째 블록에서 푸리에 역 변환 되 공간 영역으로 전환된다. 이때 공간영역으로 전환된 출력은 공간영역에서의 자유공간 임펄스 함수이며 그의 프린지 패턴의 간격은 물체의 깊이 위치  $z_0$ 에 의해 결정된다. 이 출력은 여섯 번째 블록에서  $x$ 축으로 투영된다. 일곱 번째 블록에서는 투영된 결과 출력의 Wigner 분포를 구한다. Wigner 분포 결과로 공간-주파수 맵(space-frequency map)에 임펄스 라인(impulse line),  $\delta(k_x - \frac{\pi}{\lambda z_0} x)$ 를 얻을 수 있다. 이 임펄스 라인의 기울기,  $\pi/\lambda z_0$ 로부터 대상 물체의 깊이위치,  $z_0$ 을 알아낸다.

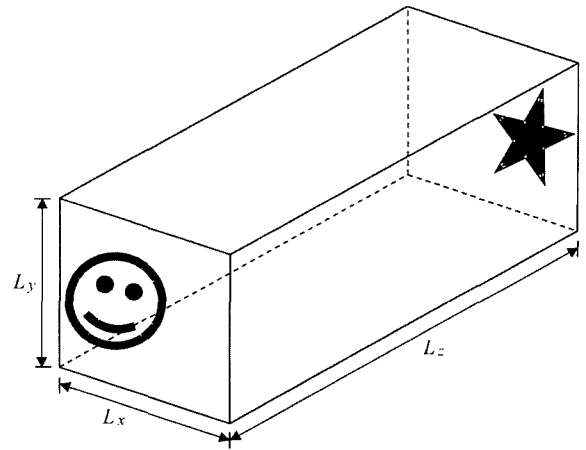


그림 3. 3차원 물체 ( $L_x = L_y = 1$  cm 그리고  $L_z = 10$  cm).

### III. 깊이위치에서 홀로그램정보 등록

제2절에서는 단일 결때 홀로그램으로부터 물체의 깊이 위치를 추출하는 방법에 대해서 논했다. 본 절에서는 추출한 깊이 위치를 이용하여  $x, y, z$  좌표계 원점위치에 물체의 홀로그램을 등록하는 방법에 대해서 논한다. 원점위치에서 홀로그램은 홀로그램을 얻어낸 깊이위치만큼 깊이 방향에 대해 편이 시켜 구한다. 깊이편이는 아래와 같이 깊이 위치에서의 자유공간 임펄스 함수의 결레 복소수와 홀로그램을 콘볼루션한 결과이다:

$$\begin{aligned}
 H_z^c(x, y) &= H^c(x, y) \otimes h_z^*(x, y) \\
 &= \left[ \int_{z_0 - (1/2)\delta z}^{z_0 + (1/2)\delta z} I_o(x, y, z) \otimes h_z(x, y) dz \right] \otimes h_z^*(x, y) \\
 &= \int_{-(1/2)\delta z}^{+(1/2)\delta z} I_o(x, y, z) \otimes h_z(x, y) dz \quad (10)
 \end{aligned}$$

위 식에서  $H_z^c(x, y)$ 는 좌표 계의 원점 위치에서 물체의 홀로그램이다. 그러므로 이 홀로그램은 물체의 깊이 위치에 관계없이 동일한 3차원 영상을 갖는 물체에 대해서 동일하다. 또한 홀로그램은 2차원 영상으로 물체의 3차원 정보를 갖고 있으므로 원점위치에서 두 물체의 홀로그램의 상관함수를 구함으로써 두 물체의 3차원 영상의 일치여부를 깊이 위치에 관계없이 판별 할 수 있으며 또한 상관연산은 본질적으로 2차원 편이에 무관하므로 횡 방향 편이에 대해서도 무관하게 일치여부를 알아낼 수 있다. 뿐만 아니라 회전 및 일그러짐 불변한 광 상관기를 이용해 대상 물체의 회전 및 일그러짐 불변하게 3차원 영상을 비교 할 수 있다.<sup>[13,14]</sup> 위치 추출의 관점에서 보면 광 상관기의 출력으로부터 물체의 횡 방향 위치를 알 수 있으므로 추출된 깊이위치와 함께 물체의 3차원 위치를 알아낼 수 있다.

### IV. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 3차원 물체는 그림 3에서 보여

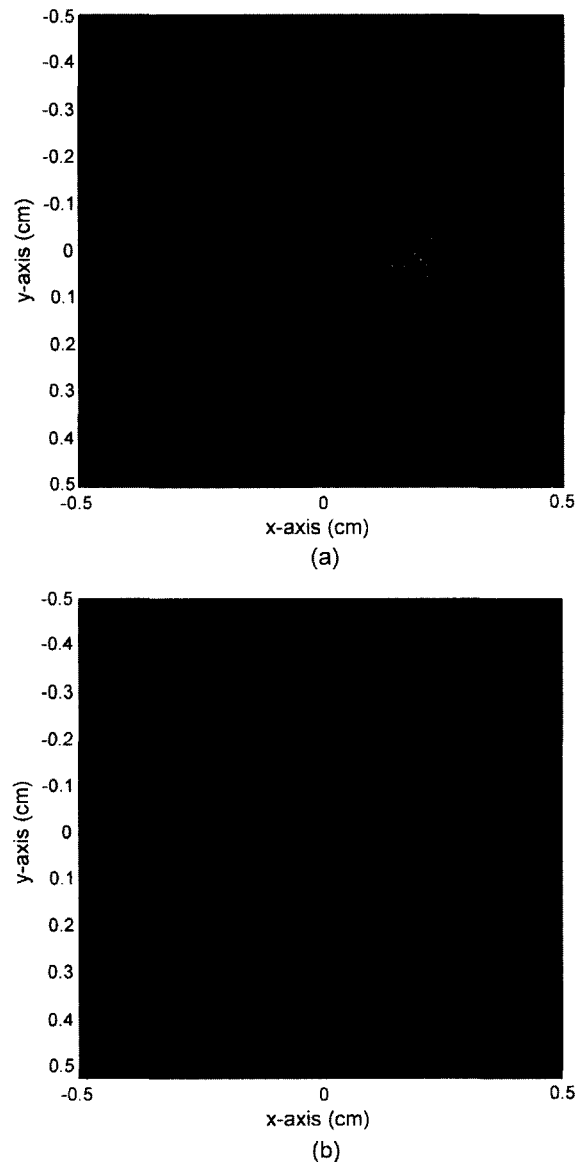


그림 4. (a) 대상 물체의 단일 결때 홀로그램의 실수부분, (b) 대상 물체의 단일 결때 홀로그램의 허수부분.

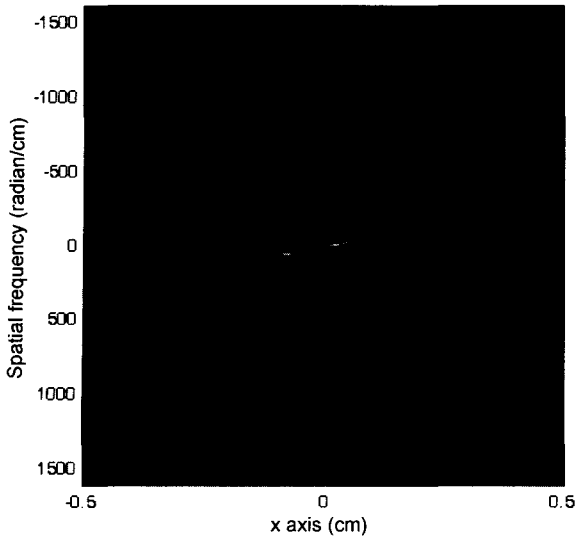


그림 5. Wigner 분산 출력.

지듯이 서로 다른 두 개의 깊이위치에 위치한 두개의 슬라이드로 구성된 3차원 물체이다. 시뮬레이션에서 물체의 크기는 횡 방향에 대해서  $L_x=L_y=1\text{ cm}$  종 방향에 대해서  $L_z=10\text{ cm}$  ( $\delta z=5\text{ cm}$ )이며 물체의 중앙의 위치는 스캐닝 빔의 구면파의 초점으로부터  $z_0=78\text{ cm}$  떨어진 곳에 위치하였다. 스캐닝 빔의 파장은 HeNe laser의 파장인  $\lambda=633\text{ nm}$  그리고 반경은  $a_0=1$ 로 선택하였다. 그에 따라 스캐닝 빔의 수치구경은  $NA=a_0/z_0=0.0128$ 이고 스캐닝 빔의 Rayleigh 영역은  $\lambda/NA^2=0.3864\text{ cm}$ 이다. 시뮬레이션에서는 물체의 깊이 영역( $2\delta z$ )이 빔의 Rayleigh 영역보다 크게 선택해 홀로그램에 물체의 깊이 분포에 대한 정보가 포함되도록 파라미터들을 선택하였다. 그림 4(a)와 4(b)는 각각 물체를 광 스캐닝 홀로그램의 결과로 얻어진 단일 결 때 홀로그램의 실수 부분 과 허수 부분을 나타낸다. 이 단일 결 때 홀로그램을 가우시안 저대역 필터링 한 후 그림 2의 순서도에 따라 해석한 결과 그림 5의 공간-주파수 맵에 임펄스 라인( $\delta(k-\frac{\pi}{\lambda z_0}x)$ )을 얻을 수 있다. 임펄스 라인의 기울기로

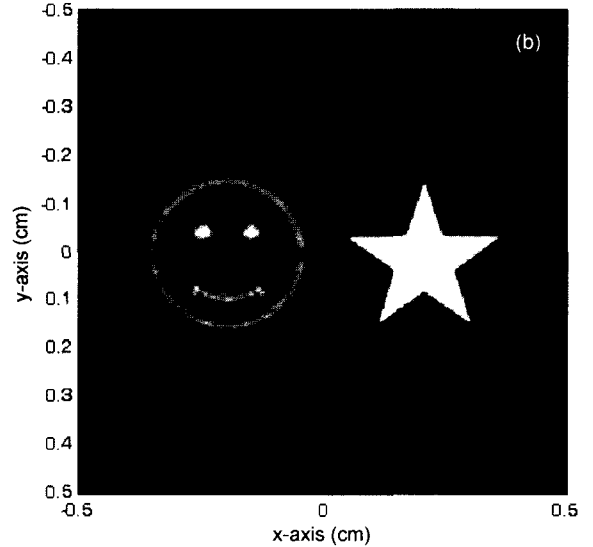
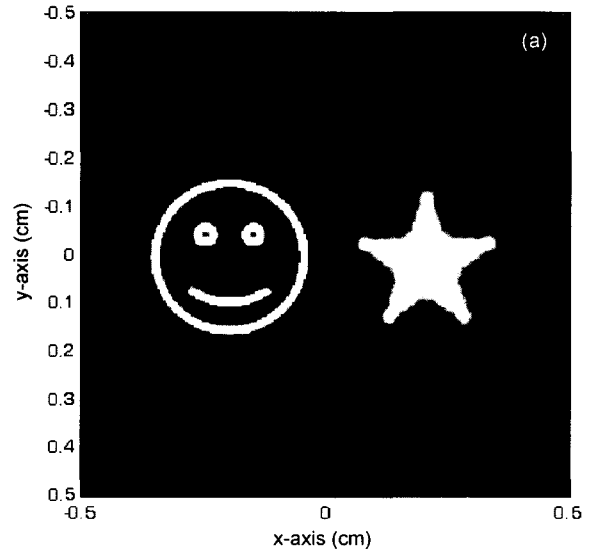
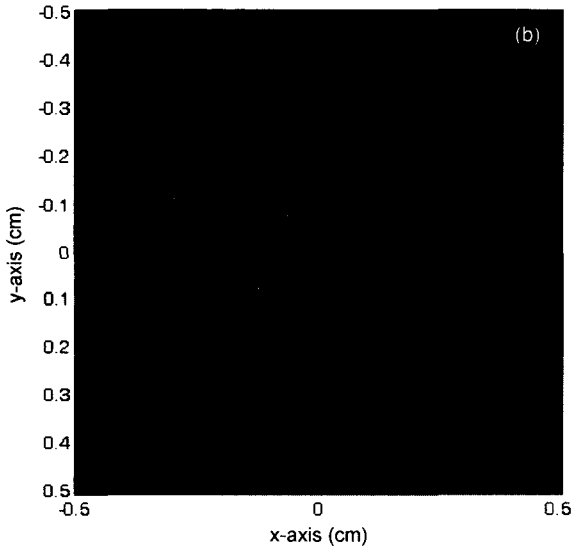
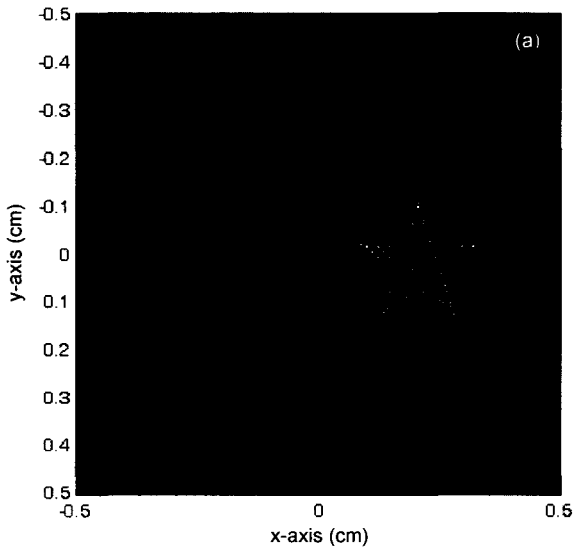


그림 6. (a) 원점위치에서 단일 결 때 홀로그램의 실수부분, (b) 원점 위치에서 단일 결 때 홀로그램의 허수부분.

그림 7. (a) 앞의 슬라이드에 초점을 맞추어 복원한 영상, (b) 뒤의 슬라이드에 초점을 맞추어 복원한 영상.

부터 물체의 깊이위치는 임을 알 수 있다. 마지막으로 식 10에 따라 원점위치에서 물체의 홀로그램을 복원해내면 그림 6a,b와 같다. 원점위치에서의 홀로그램을 이용하여 각각의 슬라이드 위치에서 영상을 복원하면 그림 7a,b가 된다. 앞의 슬라이드에 초점을 맞추어 복원한 경우 뒤의 슬라이드는 초점이 흐리게되고 뒤의 슬라이드에 초점을 맞추는 경우에는 그 반대가 된다. 이로부터 원점위치의 홀로그램에는 물체의 3차원 정보가 홀로그램 정보 형태로 인코딩 되어있음을 알 수 있다.

### V. 결 론

가우시안 저-대역 필터링을 도입함으로써 물체의 깊이 분포에 대한 홀로그램정보를 포함하는 단일 결미 홀로그램으로부터 물체의 깊이위치를 추출하는 방법을 제안하였다. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 물체를 스캐닝 하여 단일 결미 홀로그램을 전기신호 형태로 추출하고 추출된 홀로그램 신호를 가우시안 저-대역 필터링 해 물체의 홀로그램으로부터 물체의 깊이분포에 따른 홀로그램정보를 제거한다. 가우시안 저-대역 필터링 된 홀로그램으로부터 실수-유일 스펙트럼 홀로그램을 합성하고 그를 수치적 방법으로 해석해 물체의 깊이위치를 추출해 낸다. 추출된 깊이위치를 이용하여 원점위치에서 물체의 홀로그램을 복원해 낸다. 제안한 수치적 방법의 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 제시했다. 제안된 방법의 즉각적인 응용은 3차원 공간에서 대상 물체의 회전이나 변형에 무관하게 3차원 영상을 인식하는 광 영상인식이다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음(KRF-2001-003-E00145).

### 참고문헌

[1] A. B. VanderLugt, "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Trans. Info. Theory*, IT-10, pp. 139-145 (1964).

[2] E. C. Tam, F. T. S. Yu, D. A. Gregory, and R. D. Juday, "Autonomous real-time object tracking with an adaptive joint transform correlator," *Opt. Eng.* vol. 29, pp. 314-320 (1990).

[3] C. S. Weaver and J. W. Goodman, "A technique for optically convolving two functions," *Appl. Opt.* vol. 5, pp. 1248-1249 (1966).

[4] Neil Collings, *Optical pattern Recognition using Holographic Techniques* (Addison-Wesley, 1988, Great Britain).

[5] G. I. Vasilenko and L. M. Tsibul'kin, "Image recognition by holography" (Plenum Publishing Corporation, 1989 New York).

[6] T.-C. Poon and T.G. Kim, "Optical image recognition of three-dimensional objects," *Appl. Opt.* vol. 38, pp. 370-381 (1999).

[7] T.G. 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.* vol. 38, pp. 2176-2183 (1999).

[8] T.G. Kim, T.-C. Poon, M. H. Wu, Kazunori Shinoda and Yoshiji Suzuki, "Three-dimensional image matching using two-dimensional optical heterodyne scanning," *Optical Memory and Neural Networks*, vol. 8, no. 3, pp. 139-145.

[9] T.G. Kim and T.-C. Poon, "Three-dimensional matching using phase-only holographic information and Wigner Distribution," *J. Opt. Soc. Am. A* 17, pp. 2520-2528 (2000).

[10] T.-C. Poon, "Scanning Holography and Two-Dimensional Image Processing by Acousto-Optic Two-Pupil Synthesis," *J. Opt. Soc. Am. A*, 2, pp. 621-627 (1985).

[11] T.G. Kim, T.-C. Poon, G. Indebetouw, "Depth detection and image recovery in remote sensing by optical scanning holography," *Opt. Eng.* vol. 41, no. 6, pp. 1331-1338 (2002)

[12] T.-C. Poon and P. P. Banerjee, *Contemporary Optical Image Processing with MATLAB*, Elsevier, 2001.

[13] X. W. Chen, Mohammad A. Karim and M. S. Alam, "Distortion-invariant fractional power fringe adjusted joint transform correlation," *Opt. Eng.* vol. 37, pp. 138-143, 1998.

[14] M. S. Alam, X.-W. Chen, and M. A. Karim, "Distortion-invariant fringe-adjusted joint transform correlation," *Appl. Opt.* vol. 36, pp. 7422-7427, 1997.

## Depth location extraction and three-dimensional image recognition by use of holographic information of an object

Taegeun Kim<sup>†</sup>

Dept. of Optical Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: takim@sejong.ac.kr

(Received August 20, 2002, Revised manuscript January 8, 2003)

The hologram of an object contains the information of the object's depth distribution as well as the depth location of the object. However these pieces of information are blended together as a form of fringe pattern. This makes it hard to extract the depth location of the object directly from the hologram. In this paper, I propose a numerical method which separates the depth location information from the single-sideband hologram by gaussian low-pass filtering. The depth location of the object is extracted by numerical analysis of the filtered hologram. The hologram at the object's depth location is recovered by the extracted depth location.

Classification codes : IP.010, DI.010, DI.020.