

위상 천이 디지털 홀로그래피 및 디지털 워터마킹 기반 디지털 홀로그램의 이중 암호화

(Double Encryption of Digital Hologram Based on Phase-Shifting
Digital Holography and Digital Watermarking)

김철수¹⁾
(Kim Cheol-Su)

요약 본 논문에서는 위상 천이 디지털 홀로그래피(PSDH; Phase-Shifting Digital Holography) 및 디지털 워터마킹(Digital Watermarking) 기반 디지털 홀로그램의 이중 암호화 기술을 제안한다. 이를 위해 먼저 디지털 워터마크에 사용할 로고 영상을 정하고, 이 영상에 대한 이진 위상 컴퓨터형성 홀로그램(CGH; Computer Generated Hologram)을 반복 알고리즘을 이용하여 설계한다. 그리고 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크를 워터마크로 정하고, 설계된 이진 위상 CGH와 XOR 논리연산을 통해 워터마크 정보에 대한 키 영상을 생성한다. 그리고 물체 영상을 위상 변조하여 세기가 일정한 함수로 만든 후, 워터마크인 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크를 곱하여 물체파를 생성한다. 이 물체파는 워터마크 정보가 포함된 잡음과 유사한 패턴을 가지는 1차 암호화된 영상이라고 할 수 있다. 이를 2-단계 PSDH기술을 적용하여 기준파와 간섭을 시키면 가시성이 향상된 최종 간섭무늬를 얻는다. 이 간섭패턴이 최종적으로 구하고자 하는 물체 영상의 2차 암호화된 영상이 된다. 암호화된 영상의 복호화는 2-단계 PSDH기술을 통한 암호화된 영상들을 이용하여 적절한 산술연산 처리한 후, 프레즈넬 변환 및 1차 암호화 과정의 역순으로 진행하면 된다. 제안된 방법의 암호화 및 복호화 기술은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증된다.

핵심주제어 : 위상 천이 디지털 홀로그래피, 디지털 워터마킹, 이진 위상 컴퓨터형성홀로그램, 이중 암호화 기술

Abstract In this Paper, Double Encryption Technology Based on Phase-Shifting Digital Holography and Digital Watermarking is Proposed. For the Purpose, we First Set a Logo Image to be used for Digital Watermark and Design a Binary Phase Computer Generated Hologram for this Logo Image using an Iterative Algorithm. And Random Generated Binary Phase Mask to be set as a Watermark and Key Image is Obtained through XOR Operation between Binary Phase CGH and Random Binary Phase Mask. Object Image is Phase Modulated to be a Constant Amplitude and Multiplied with Binary Phase Mask to Generate Object Wave. This Object Wave can be said to be a First Encrypted Image Having a Pattern Similar to the Noise Including the Watermark

* Corresponding Author : kcs6694@hanmail.net

Manuscript received July 5, 2017 / revised Aug 8, 2017 /
accepted Aug 29, 2017

1) 경주대학교 전기에너지컴퓨터공학과, 제1저자 및 교신저자

Information. Finally, we Interfere the First Encrypted Image with Reference Wave using 2-step PSDH and get a Good Visible Interference Pattern to be Called Second Encrypted Image. The Decryption Process is Proceeded with Fresnel Transform and Inverse Process of First Encryption Process After Appropriate Arithmetic Operation with Two Encrypted Images. The Proposed Encryption and Decryption Process is Confirmed through the Computer Simulations.

Key Words : Phase-Shifting Digital Holography, Digital Watermarking, Binary Phase Computer Generated Hologram, Double Encryption Technology.

1. 서 론

디지털 홀로그래피는 기준파와 물체파의 간섭패턴을 기존의 아날로그 필름이 아닌 CCD(charged coupled device) 카메라와 같은 장비를 활용하여 디지털 적으로 기록한 데이터를 말하며, 이를 디지털 처리를 하면 원래의 물체파를 복원할 수 있다. 디지털 홀로그래피 기술은 저작권 보호 등 [1-2] 정보보호 분야뿐만 아니라 반도체 웨이퍼 표면의 변형 측정, 3차원 영상 디스플레이 및 디지털 홀로그래픽 현미경 등에서 다양한 산업 분야에서 핵심기술로 활용될 수 있다[3-5].

디지털 홀로그래피에서 단일 노출(single-shot) on-axis 간섭무늬는 DC성분 및 물체파의 복소공액 정보가 항상 존재하므로 디지털적으로 재생하게 되면 잡음이 섞인 물체파가 재생되어 영상의 질이 떨어지게 된다. 단일 노출에서 이들 잡음을 제거하기 위한 연구들이 진행되고 있지만[6-7], 완벽하게 제거하는 것은 어렵다. 이들 잡음을 완벽하게 제거하기 위해서 기준파의 경로에 PZT (piezoelectric transducer)와 같은 위상 제어 소자를 배치하여 기준파의 위상을 천이시켜가면서 여러 개의 간섭패턴을 얻고, 이들을 이용하여 물체파를 얻는 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술이 제안되었다. 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술에서는 3개 이상의 간섭 패턴을 이용해야만 완벽한 물체파를 복원할 수 있다고 알려져 있다[4]. 2개의 간섭 패턴을 이용하는 2-단계 PSDH 기술의 경우 재생되는 물체파의 질(quality)은 물체파와 기준파 사이의 가시성(visibility)과 세기 비(intensity ratio)에 의해 결정되고, 이들 두 인자는 입력영상의 형태에 따라 달라지는 문제점을

지니고 있다. 최근에는 물체파의 실시간 복원을 위해 단일 노출 및 병렬처리 위상천이 디지털 홀로그래피 기술을 이용하는 연구도 활발하게 진행되고 있다[8-10]. 이와 같은 연구들은 여러 개의 간섭무늬를 한 번에 얻을 수 있는 장점이 있지만, 시스템이 더 정밀해야 하고 복잡하다.

본 논문에서는 2개의 간섭 패턴으로 물체파를 복원할 수 있는 2-단계 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술과 디지털 워터마킹 기술을 기반으로 하는 새로운(novel) 디지털 홀로그래피의 이중 암호화 방법을 제안하고자 한다.

PSDH 기술 적용 시 CCD 카메라로 획득한 간섭패턴 정보인 디지털 홀로그래피에 워터마킹 [11-13] 을 삽입하는 이중 암호화 기술을 통해 물체 영상에 대한 보안 기능을 강화하고자 한다. 이를 위해 먼저 디지털 워터마크 생성에 활용할 로고영상 정보를 정하고, 이 영상에 대한 이진 위상 CGH를 반복 알고리즘인 SA(simulated annealing) 알고리즘으로 설계한다[14]. 그리고 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크 정보를 워터마크로 정하고, 이 워터마크와 SA 알고리즘으로 설계된 이진 위상 CGH와의 XOR 연산을 통해 워터마크 정보에 대한 키 영상을 생성한다. 그리고 물체 영상을 위상 변조하여 세기가 일정한 함수로 만든 후, 디지털 워터마크로 사용될 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크를 곱하여 물체파를 생성한다. 이 물체파는 워터마크 정보가 포함된 잡음과 유사한 패턴을 가지는 1차 암호화된 영상이라고 할 수 있다. 이를 2-단계 PSDH기술[15-16]을 적용하여 기준파와 간섭을 시키면 가시성이 향상된 최종 두 개의 간섭무늬를 얻는다. 이 간섭패턴들이 최종적으로 구하고

자 하는 물체 영상의 2차 암호화된 영상이 된다. 암호화된 영상의 복호화는 2-단계 PSDH 기술을 통한 적절한 산술연산 처리 후, 역프레즈넬 변환 및 1차 암호화 과정의 역순으로 진행하면 된다. 이때 암호화 과정에서 사용된 디지털 워터마크 영상과 복호화 과정에서 사용된 키 영상 정보를 활용하면 최종 출력 위상 정보에서 원래의 물체 영상의 복원뿐만 아니라 이진 위상 CGH 정보를 얻을 수 있으므로 사용된 로고영상도 복원할 수 있다. 제안된 방법의 암호화 및 복호화 기술을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위상 천이 디지털 홀로그래피의 개념을 설명하고, 3장에서는 제안한 이중 암호화 기술과 광학적 구성도에 대해 설명한다. 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 방법의 성능을 검증하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺도록 한다.

2. 위상 천이 디지털 홀로그래피

PSDH 기술은 위상 제어가 가능한 기준파와 물체파의 간섭패턴 3개 이상을 CCD 카메라로 획득하고, 이들의 적절한 조합을 통해 산술연산 후, 디지털 역프레즈넬 변환을 통해 원래의 물체 영상을 복원할 수 있는 기술이다. PSDH 기술에 대한 지금까지의 연구는 가급적 적은 수의 간섭패턴을 이용하여 물체 영상을 완벽하게 복원하는 방법을 찾는 방향으로 진행되어 오고 있다. 간섭패턴을 3개와 4개를 이용하는 3-단계 및 4-단계 PSDH를 이용하게 되면 기준파와 물체파 사이의 세기 비에 상관없이 원래의 물체 영상을 완벽하게 복원할 수 있지만, 2-단계 PSDH를 이용하게 되면 복원되는 물체 영상의 질(quality)이 기준파와 물체파 사이의 세기 비에 영향을 받게 된다. 즉 기준파의 세기를 물체파의 세기의 최대값보다 훨씬 크게 하면 이론적으로는 에러가 최소가 되는 물체 영상을 복원할 수 있겠지만 기준파와 물체파 사이의 간섭패턴의 가시성이 떨어져서 CCD 카메라로 간섭패턴을 정확하게 얻기 힘든 문제점을 가진다. 기존의 방법에서는 물체 영상의 형태가 정해지면 그에 따라 기준

파의 세기를 적절히 조정하여 간섭패턴을 얻어왔으며, 이와 같은 방법은 물체 영상의 형태에 따라 기준파의 세기를 달리 설정해야 하는 번거움이 있다. 그러므로 입력되는 물체 영상의 형태에 상관없이 일정한 물체파 세기를 얻을 수 있는 방법이 필요하며, 물체파 세기가 항상 일정하면 기준파와의 세기 비도 항상 일정하게 할 수 있어, 두 개의 간섭패턴 정보만으로도 원래의 물체 영상을 완벽하게 복원할 수 있게 된다.

(x, y) 평면의 임의의 물체로부터 반사된 물체파 함수를 $o(x, y)$ 라 하면, 물체로부터 d 만큼 떨어진 위치에서의 물체파는 프레즈넬 변환에 의해 $O(u, v)$ 로 표현되며 다음 식과 같다.

$$O(u, v) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \iint o(x, y) \times \exp[i\pi \frac{(x-u)^2 + (y-v)^2}{d\lambda}] dx dy \quad (1)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이고, λ 는 사용된 광원의 파장이며, k 는 파수(wave number)를 의미하며, d 는 프레즈넬 변환 거리이다. 또한 (u, v) 는 프레즈넬 변환 영역의 좌표를 의미한다.

$$O(u, v) = |O(u, v)| \exp[i\phi_O(u, v)] \quad (2)$$

$$R(u, v) = |R(u, v)| \exp[i\phi_R(u, v)] \quad (3)$$

On-axis 디지털 홀로그래피 시스템에서 기준파의 경로에 위상 지연기(phase retarder)나 위상 제어기를 설치하여 기준파의 위상 값($\theta=0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$)을 제어하면서 간섭 세기를 구하고, 이들 세기 값을 이용하여 정리하면 홀로그램 평면에서의 물체파 함수 $O(u, v)$ 만을 얻을 수 있다. 이 방법을 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술이라고 한다.

위상 천이기를 통과한 기준파 $R(u, v)\exp(i\theta)$ 과 물체파 $O(u, v)$ 사이의 간섭 세기는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I(u,v;\theta) &= |O(u,v)+R(u,v)\exp(i\theta)| \times & (4) \\
 &= |O(u,v)+R(u,v)\exp(i\theta)|^* \\
 &= I_O(u,v) + I_R(u,v) + 2|O(u,v)R(u,v)| \times \\
 &\quad \cos[\phi_O(u,v) - \phi_R(u,v) - \theta]
 \end{aligned}$$

여기서 $I_O(u,v) = |O(u,v)|^2$ 이고, $I_R(u,v) = |R(u,v)|^2$ 이다. 위상 차이가 값 θ 의 변화에 따른 2-단계 PSDH 기술의 간섭세기를 간략히 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_1 = I(u,v;0) \quad (5)$$

$$I_2 = I(u,v;\frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

간섭세기 I_1 과 I_2 에서 좌표 (u,v) 는 모두 생략되었다. 위의 식들로부터 복소값을 갖는 물체파 함수 $O(u,v)$ 를 구할 수 있는데, 2개의 간섭세기를 이용하면 2-단계 PSDH라 부르며, 다음 식과 같다.

$$O(u,v) = \frac{1}{2R(u,v)^*} [(I_1 - I_O - I_R) + j(I_2 - I_O - I_R)] \quad (7)$$

여기서 0차 항인 $I_O + I_R$ 은 식 (4), (5), 그리고 (6)을 이용하여 식 (6)에 i 를 곱하고, 이를 식 (5)와 더하면

$$I_1 + iI_2 = (I_O + I_R) + i(I_O + I_R) + 2|R(u,v)O(u,v) \quad (8)$$

이 되고, 양변의 절대값을 제곱한 후, 정리하면 $I_O + I_R$ 에 대한 2차 방정식인

$$2(I_O + I_R)^2 - (2I_R + I_1 + I_2)(I_O + I_R) + (I_1^2 + I_2^2 + 4I_R^2) = 0 \quad (9)$$

을 얻을 수 있다. 이 방정식의 해 중 음의 부호를 갖는 것이 $I_O + I_R$ 의 최종 해가 된다.

$$\begin{aligned}
 I_O + I_R &= \frac{2I_R + I_1 + I_2}{2} - \\
 &\quad \frac{\sqrt{(2I_R + I_1 + I_2)^2 - 2(I_1^2 + I_2^2 + 4I_R^2)}}{2}
 \end{aligned} \quad (10)$$

이렇게 구해진 복소함수 $O(u,v)$ 는 컴퓨터를 이용하여 디지털적으로 역프레즈넬 변환하면 물체파 함수의 복원 영상 $o'(x,y)$ 가 구해진다.

$$\begin{aligned}
 o'(x,y) &= \frac{\exp(ik(-d))}{i\lambda(-d)} \times & (11) \\
 &\iint O(u,v) \exp[i\pi \frac{(u-x)^2 + (v-y)^2}{d\lambda}] du dv \\
 &= \frac{\exp(ik(-d))}{i\lambda(-d)} \exp[\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)] \times \\
 &\quad FFT2D \left\{ O(u,v) \exp[\frac{ik}{2(-d)}(u^2 + v^2)] \right\}
 \end{aligned}$$

여기서 FFT2D는 2차원 푸리에 변환 연산을 의미한다.

3. 제안한 이중 암호화 방법

3.1 디지털 워터마크 설계

디지털 워터마킹 기술은 디지털 콘텐츠의 저작권 보호를 목적으로 사람의 시청각을 통해 쉽게 감지하기 어렵게 디지털 문서, 이미지, 오디오, 비디오 등의 신호에 저작권 보호를 삽입하여 멀티미디어 저작물의 저작권 보호를 위해 사용되고 있다. 일반적으로 디지털 워터마크 정보는 임의의 로고 영상 또는 랜덤 잡음 등을 주로 사용하고 있다. 본 논문에서는 임의의 로고 영상 대신 그 영상에 대한 이진 위상 CGH를 반복 알고리즘으로 설계하여 활용하고자 한다. 대표적인 반복 알고리즘인 SA 알고리즘을 통해 로고 영상에 대한 최적의 이진 위상 CGH를 설계한 후, 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크를 디지털 워터마크로 정하고, 워터마크 정보와 설계된 이진 위상 CGH와의 XOR연산을 취해서 워터마크 정보에 대한 키 영상 정보를 생성한다. 여기서 선정된 디지털 워터마크 정보는 2-단계 PSDH 기술을 적용하여 물체 영상을 암호화 하는데 활용된

다. 그림 1은 시물레이션에 사용되는 워터마크 및 키 영상을 생성하는 과정을 보여준다. 그림 1(a)는 워터마크로 활용할 로고 영상을 나타내고, 1(b)는 로고 영상에 대해 SA 알고리즘으로 설계한 이진 위상 CGH를 나타내고, 1(c)는 디지털 워터마크인 랜덤 이진 위상 마스크를 나타내며, 1(d)는 이진 위상 CGH와 워터마크와의 XOR연산을 통해 얻은 워터마크의 키 영상 정보를 나타낸다.

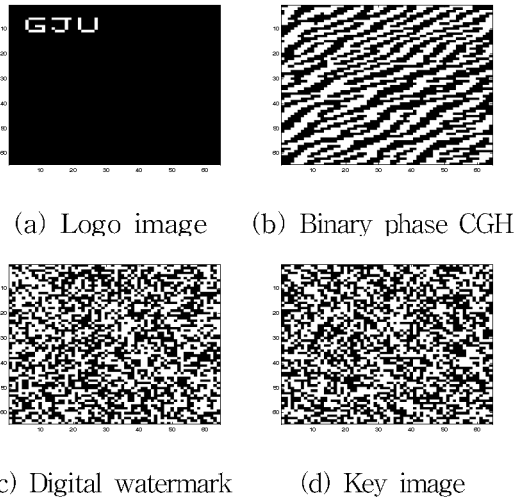


Fig. 1 The generation processing of digital watermark and key image

3.2 디지털 워터마킹 기반의 이중 암호화

디지털 워터마크 기반 2-단계 PSDH기술을 적용한 물체 영상의 이중 암호화 과정은 다음과 같다. 먼저 물체 영상인 명암도 영상 함수 $o(x,y)$ 을 정규화시킨 함수 $s(x,y)$ 을 구한 후, 이를 위상 정보 함수 $\exp(j\pi s(x,y))$ 로 표현한다. 그리고 로고 영상의 이진 위상 CGH인 그림 1(b)의 $Holo(x,y)$ 를 설계하고, $Holo(x,y)$ 에 기반하여 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 마스크를 디지털 워터마크 $W(x,y)$ 로 간주하며(그림 1(c)), $Holo(x,y)$ 와 $W(x,y)$ 의 XOR연산을 통해 키 영상 정보인 $Key(x,y)$ (그림 1(d))를 구한다. 그 다음 순서로 위상 정보로 표현된 물체 영상 함수 $\exp(j\pi s(x,y))$ 에 디지털 워터마크 함수 $W(x,y)$ 를

곱하여 물체파 함수 $e(x,y)$ 를 생성하며, 1차 암호화 영상이라 부른다.

$$e(x,y) = \exp(j\pi s(x,y)) \times W(x,y) \quad (12)$$

마지막으로 $e(x,y)$ 를 기준파인 $r(x,y)$ 와 간섭을 시켜 가시성이 향상된 최종 간섭무늬를 얻는다. 이렇게 하면 물체파 함수의 분포가 랜덤 잡음과 같은 형태를 가지므로 기준파와의 간섭무늬도 잡음과 유사한 형태로 나타나게 된다. 여기서 구해진 두 개의 간섭패턴 함수 $I_1(u,v)$ 와 $I_2(u,v)$ 를 물체파 함수의 암호화 영상으로 간주되며, 2차 암호화 영상이라 한다.

2차 암호화된 영상의 복호화 과정은 2-단계 PSDH기술과 암호화 과정의 역순으로 진행하면 된다. 2-단계 PSDH기술에 의해 2차 암호화된 두 영상 $I_1(u,v)$ 와 $I_2(u,v)$ 를 이용하고, 간섭세기의 0차 항인 $I_E + I_R$ 를 구한 후, 적절한 산술연산 처리를 하면 식 (7)과 유사한 형태의 $H(u,v)$ 를 구할 수 있다.

$$H(u,v) = \frac{1}{2R(u,v)^*} [(I_1 - I_E - I_R) + j(I_2 - I_E - I_R)] = E'(u,v) \quad (13)$$

여기서 $I_E(u,v) = |E(u,v)|^2$ 이고, $I_R(u,v) = |R(u,v)|^2$ 이다. $E(u,v)$ 와 $R(u,v)$ 는 각각 $e(x,y)$ 와 $r(x,y)$ 의 프레즈넬 변환 함수이다. 그러나 기준파 함수는 평행광이므로 $R(u,v)$ 는 상수 값을 갖는다.

그리고 $H(u,v)$ 를 식 (11)을 이용하여 역프레즈넬 변환하면 $e'(x,y)$ 를 구할 수 있고, 암호화 과정에서 생성된 키 영상인 $-Key(x,y)$ 를 곱하면 $W(x,y)$ 와 $Key(x,y)$ 사이의 XOR 연산과 같은 효과를 나타내므로 $\exp(j\pi s'(x,y)) \times Holo(x,y)$ 를 얻을 수 있으며, 이를 $Holo(x,y)$ 로 나눈 후, 위상 복조 과정을 거치면 원래의 정규화된 물체 영상 $s'(x,y)$ 를 복원할 수 있다. 마지막으로 256 gray-level 명암도 영상으로 변환하면 복원된 물체 영상 $o'(x,y)$ 를 얻을 수 있다. 또한 그림 5(b)의 복호화 과정에서 구한 결과를 이전에서 구한 $\exp(j\pi s'(x,y))$ 로 나누면, $Holo(x,y)$ 를 얻을 수 있으며, 이를 역푸리에 변환하면 로고 영상도 구할

수 있다. 그러므로 복호화 과정에서 구한 $Holo(x,y)$ 는 암호화 영상의 저작권 권리보호에 활용할 수 있다.

그림 2는 제안된 방법의 암호화 및 복호화 과정을 보여주는 개략도이다. 그리고 이진 위상 함수인 $Holo(x,y)$, $W(x,y)$ 및 $Key(x,y)$ 사이의 XOR 연산과 곱(multiplication) 연산 사이의 비교 결과는 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서 \odot 는 XOR 연산자이며, 검은 화소(dark pixel)는 위상 성분이 '0'이므로 오일러공식에 의해 '1'이 되고, 흰 화소(white pixel)는 위상 성분이 ' π '를 나타내므로 오일러공식에 의해 '-1'값을 가진다.

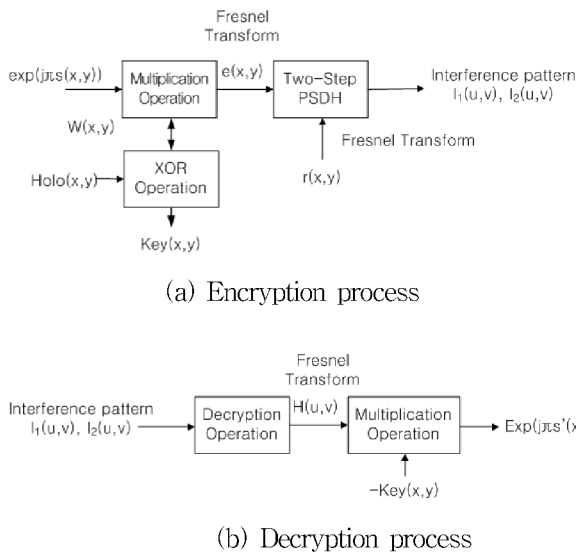


Fig. 2 Encryption and decryption process of proposed method.

'1'과 '-1'로만 구성된 이진 위상 함수의 XOR 및 곱 연산 결과를 $Key(x,y)$ 를 통해 비교해 보면 서로 반전이 되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 복호화 과정에서는 이들 연산의 결과를 참고하여 $-K(x,y)$ 를 곱한 후, $Holo(x,y)$ 라 나누어 주어야 한다.

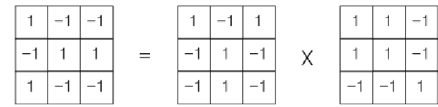
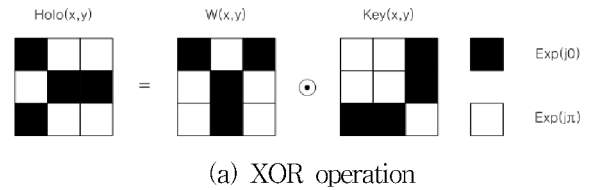


Fig. 3 The comparison of the XOR and multiplication operation.

제안한 암호화 방법을 구현하기 위한 광학적 실험 구성도는 그림 4와 같은 Mach-Zehnder 간섭계 구조이다.

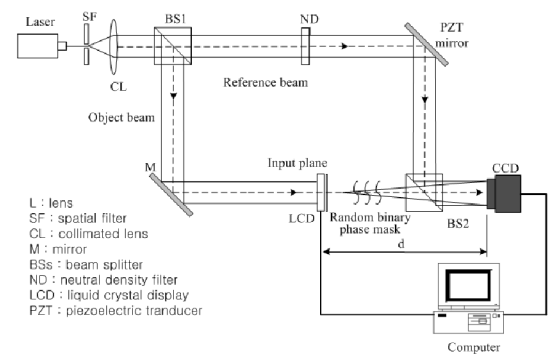


Fig. 4 Optical scheme for the implementation of the proposed 2-step PSDH.

기준파의 세기는 ND(neutral density) 필터에 의해 세기가 제어되며, 위상은 PZT(piezoelectric transducer) mirror에 의해서 제어된다. 그리고 물체 영상과 CCD 카메라 사이의 프레즈넬 변환 거리(d)는 200mm이다.

위의 암호화 방법에 사용된 랜덤 이진 위상 마스크 정보는 물체와 함수 뒤에 위치하여 곱해지며, 워터 마크로 사용되었을 뿐만 아니라 물체와 함수 및 간섭패턴의 가시성을 높여주는 역할도 동시에 하도록 하였다. 최종 암호화 영상은 CCD 카메라를 통해 얻어지며, 암호화 과정에서 실험에 사용된 광원 및 CCD 카메라 등의 스펙(specifications)들과 키 영상 정보 및 프레즈넬 거리 등이 보안요

소가 되며, 이러한 보안요소 정보들을 모두 알아야만 복호화 과정에서 정확한 물체파 함수를 복원할 수 있다.

4. 컴퓨터 모의실험 결과 및 고찰

제안한 암호화 방법의 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 조건은 다음과 같다. 광원은 514nm의 파장의 Ar 레이저이고, 간섭계 획득에 사용되는 CCD 카메라의 화소 크기는 15.6 μm X 15.6 μm 이며, 물체 영상과 CCD 카메라 사이의 거리(d)는 200mm로 하였다. 2-단계 PSDH 기술은 두 개의 간섭 패턴만으로도 원래의 물체 영상을 복원할 수 있는데, 물체파와 기준파 사이의 세기 비에 따라 복원되는 물체 영상의 성능이 달라진다. 이를 확인하기 위해 2-단계 PSDH 기술에서 기준파와 물체파 사이의 세기 비 변화에 따라 복원되는 영상의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 성능평가에 사용된 비용함수는 원래의 물체파 함수 $o(x,y)$ 와 복원된 물체파 함수 $o'(x,y)$ 사이의 RMSE(root mean square error)이며, 다음 식으로 표현된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [o(m,n) - o'(m,n)]^2} \quad (14)$$

여기서 $o(m,n)$ 과 $o'(m,n)$ 은 $o(x,y)$ 와 $o'(x,y)$ 를 이산적으로 표현한 함수이다. 기준파와 물체파 사이의 세기 비 변화에 따른 RMSE 성능을 그림 5에 나타내었다. 사용된 물체 영상 함수는 64x64 크기의 Car 명암도 영상(256 gray-level)이다. 시뮬레이션 결과에서 Car 영상의 경우 기준파와 물체파의 최대치 비가 1.1 이상일 경우에 완벽한 물체 영상이 복원됨을 알 수 있다. 즉 2-단계 PSDH 기술에서 물체파의 세기는 물체 영상의 형태에 따라 결정이 되므로 실험을 수행할 때 마다 기준파의 세기를 조정해야 하는 문제점이 있다. 그러므로 입력되는 물체 영상의 형태에 상관

없이 항상 일정한 물체파를 얻기 위해 물체 영상을 위상 변조한 후, 랜덤하게 발생시킨 이진 위상 정보인 디지털 워터마크와의 곱을 통해 1차 암호화 하였고, 2-단계 PSDH 기술을 적용하여 2 개의 2차 암호화 영상을 얻었다. 시뮬레이션에 사용된 물체 영상 및 간섭계 구조를 이용하여 얻은 2차 암호화된 영상을 그림 6에 나타내었다.

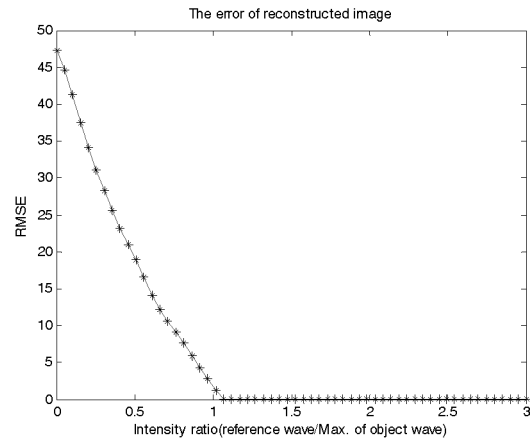


Fig. 5. RMSE performance of reconstructed image according to the intensity ratio variation between reference beam and maximum of object beam in 2-step PSDH.

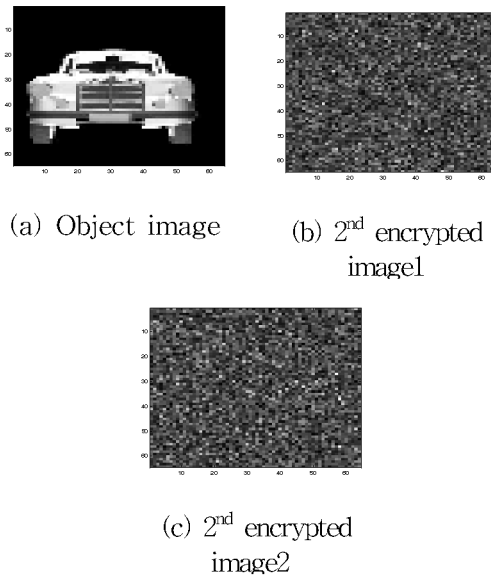


Fig. 6 Object image and 2nd encrypted images

복호화 과정은 2-단계 PSDH 기술과 암호화 과정의 역순으로 진행되며, 복호화 과정을 거쳐 복원된 영상들을 그림 7에 나타내었다. 실험에서 기준파와 물체파의 최대치 비가 1.1로 두었다. 암호화 과정에서 사용된 여러 요소들이 있지만 본 논문에서는 보안요소로 키 영상 정보와 프레즈넬 거리 정보만을 고려하였다.

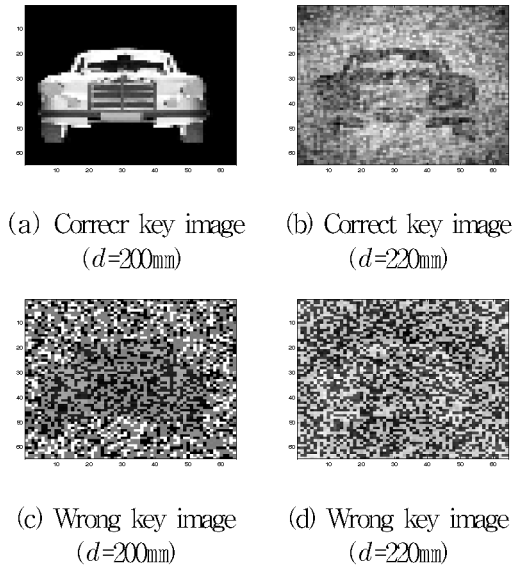


Fig. 7 Decrypted images

그림 7(a)는 키 영상 정보 및 프레즈넬 변환의 거리 정보가 정확할 때 얻어진 복원영상이고, 7(b)는 키 영상 정보는 같지만, 거리 정보가 다를 경우의 복원영상이며, 7(c)는 키 영상 정보는 다르고, 거리 정보가 같을 경우 얻어진 복원영상이며, 마지막으로 7(d)는 키 영상 정보 및 거리 정보 모두 다를 경우의 복원영상 결과이다. 실험 결과를 비교해 보면 키 영상 정보와 거리 정보가 모두 같을 때에만 물체 영상이 완벽하게 복원되고, 두 정보 중 하나만 정확하지 않더라도 원하는 결과를 얻을 수 없음을 알 수 있다. 또한 복원된 결과들의 비교를 통해 키 영상 정보가 거리 정보보다 좀 더 중요함을 알 수 있다. 그림 7(a)-7(d)에서 복호화된 영상의 정량적인 비교를 위해 식 (11)의 RMSE를 각각 구하여 표 1에 나타내었다. 표 1의 결과는 20회의 실험결과를 평균한 값이며, 그림 7(b)의 RMSE 값이 가장

높게 나타났다. 이는 초점이 맞지 않음으로 해서 영상 주변은 밝고, 영상 자체는 어둡게 나와서 나온 결과로 추측된다.

Table 1 RMSE comparison of reconstructed images(average of 20 times simulation results).

Reconstructed images	Fig. 7(a)	Fig. 7(b)	Fig. 7(c)	Fig. 7(d)
RMSE	0.61	490.00	160.68	192.99

5. 결론

본 논문에서는 2-단계 위상 천이 디지털 홀로그래피 및 디지털 워터마킹 기반 디지털 홀로그램의 이중 암호화 기술을 제안하였으며, 이를 위해서 입력 형태에 상관없이 항상 일정한 물체파를 얻을 수 있는 위상 변조방법과 랜덤 이진 위상 마스크를 디지털 워터마크로 이용하여 곱함으로써 잡음과 유사한 형태를 갖는 1차 암호화된 영상을 구하였고, 이를 PSDH 기술을 적용하여 다시 기준파와 간섭시킨 후, CCD 카메라로 획득함으로써 2차 암호화된 두 개의 간섭무늬 패턴을 얻었다. 제안된 암호화 기술은 워터마킹 기술과 암호화 기술을 동시에 적용하여 보안이 한층 강화된 방법이라고 할 수 있다. 제안된 방법은 이진 영상은 물론 명암도 영상까지 적용할 수 있는 보안기술이며, 제안된 방법의 보안성 검증은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

References

[1] Kim, T. H., Shin, H. D., and Park, S. H., "Software Protection Strategy through Digital Rights Management: Two cases of Korean Firms", Journal of Internet Electronic Commerce Research, Vol. 9, No. 1, pp. 359-379, 2009.

[2] Han, H. H., and Chang H. S., "The Behavioral Model of Digital Music Piracy

- on the Web”, Journal of information systems, Vol. 16, No. 1, pp. 135-158, 2007.
- [3] Yamaguchi, I, “Phase-Shifting Digital Holography”, Opt. Lett., Vol. 22, No. 16, pp. 1268-1270, 1997.
- [4] Liu, J. P., Poon, T. C., Jhou, G. S., and Chen, P. J., “Comparison of Two-, Three-, and Four-Exposure Quadrature Phase-Shifting Holography”, Appl. Opt., Vol. 50, No. 16, pp. 2443-2450, 2011.
- [5] Liu, J. P. and Poon, T. C., “Two-Step-Only Quadrature Phase-Shifting Digital Holography”, Opt. Lett., Vol. 34, No. 3, pp. 250-252, 2009.
- [6] Kreis, T. M. and Juptner, W. P. O., “Suppression of the dc Term in Digital Holography”, Opt. Eng., Vol. 36, No. 8, pp. 2357-2360, 1997.
- [7] Javidi, B. and Kim, D., “Three-Dimensional Object Recognition by use of Single-Exposure On-Axis-Digital Holography”, Opt. Lett., Vol. 30, No. 3, pp. 238-238, 2005.
- [8] Tahara, T., Ito K., Kakue, T., Fujii, M., Shimozato, Y., Awatsuji, Y., Nishio, K., Ura, S., Kubota, T., and Matoba, O., “Parallel Phase-Shifting Digital Holographic Microscopy”, Biomedical Optics Express, Vol. 1, No. 2, pp. 610-616, 2010.
- [9] Kakue, T., Itoh, S., Xia, P., Tahara, T., Awatsuji, Y., Nishio, K., Ura, S., Kubota, T., and Matoba, O., “Single-Shot Femtosecond-Pulsed Phase-Shifting Digital Holography”, Optics Express, Vol. 20, No. 18, pp. 20286-20291, 2012.
- [10] Yang, T. D., Kim, H. J., Lee, K. J., Kim, B. M., and Choi, Y., “Single-Shot and Phase-Shifting Digital Holography Microscopy using a 2-D Grating”, Optics Express, Vol. 24, No. 9, pp. 9480-9488, 2016.
- [11] Cox, I. J., Kilian, J., Leighton, T., and Shamoon, T., “Secure Spread Spectrum Watermarking for Images, Audio, and Video,” Proc. of the IEEE. Int. Conf. Image Processing, Vol 3, pp. 243-246, 1996.
- [12] Petitcolas, F. A. P., “Watermarking Schemes Evaluation,” IEEE Signal Processing Magazine, pp. 58-64, 2000.
- [13] Lai, C. C., “Digital Image Watermarking Using Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition, IEEE Transactions on Instrumentation. & Measurement, Vol. 59, No. 11, pp. 3060-3063, 2010.
- [14] Kim, C. S., “An Improvement of Image Encryption using Binary Phase Computer Generated Hologram and Multi XOR Operations”, Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 13, No. 3, pp. 110-116, 2008.
- [15] Zhang, S., and Zhou, J., “A New Estimation Method for Two-Step-Only Quadrature Phase-Shifting Digital Holography”, Opt. Commu., Vol. 335, No. 1, pp. 183-188, 2015.
- [16] Sun, P., Zhong, L., Luo, C., Niu, W., and Lu, X., “Visual Measurement of the Evaporation Process of a Sessile Droplet by Dual-Channel Simultaneous Phase-Shifting Interferometry”, www.nature.com/scientificreports, July, 2015.



김철수 (Kim Chole-Su)

- 정회원
- 경북대 전자공학과 공학사
- 경북대 전자공학과 공학석사
- 경북대 전자공학과 공학박사
- 경주대학교 전기에너지컴퓨터공학과 교수
- 관심분야 : 광신호처리, 3D 디스플레이, 광암호화, 워터마킹, 뇌-컴퓨터인터페이스 등