Journal of Korea Multimedia Society Vol. 25, No. 8, August 2022(pp. 983-990)
https://doi.org/10.9717/kmms.2022.25.8.983

XOR 및 스크램블 연산 기반 2단계 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술을 이용한 계층적 암호화 시스템

김 철 수†

Hierarchial Encryption System Using Two-Step Phase-Shifting Digital Holography Technology Based on XOR and Scramble Operations

Cheolsu Kim†

ABSTRACT

In this paper, we implemented a hierarchical encryption system using two-step phase-shifting digital holography(PSDH) technology based on XOR and scramble operations. The proposed encryption system is a system that authenticates access through the issuance of an encryption key for access to individual laboratories, department offices, and universities. In the encryption process, we proposed a double encryption method using XOR and scramble operation with digital technology and two-step phase-shifting digital holography with optical technology. In the two-step PSDH process, an new method of determining the reference wave intensity without measuring it by using random common object image gererated from digital encryption process was also proposed. In the decryption process, the process is performed in the reverse order of encryption process. And only when the various key information used in the encryption process is correct, the encrypted information can be decrypted, so that the user can access the desired place. That is, there is a feature that can hierarchically control the space that can be accessed according to the type of key issued in the proposed encryption system. Through the computer simulation, the feasibility of the proposed hierarchical encryption system was confirmed.

Key words: Scramble Operation, Phase-Shifting Digital Holography(PSDH), Encryption, Hierarchial Encryption System

1. 서 론

디지털 홀로그래피는 기준파와 물체파의 간섭세기 정보를 CCD 카메라를 통해 획득하고, 이를 디지털적으로 프레즈넬 변환함으로써 3차원 영상을 재생할 수 있는 기술로서 계측분야, 암호화, 3차원 디스플레이 및 홀로그래픽 현미경 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. 단일 간섭세기 정보만을 이용했을 때에는 재생 영상에 0차 항 및 역 영상(inverse image)이 존재하기 때문에 이를 제거하기 위해 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술을 사용한다.

위상 천이 디지털 홀로그래피(phase-shifting digital holography; PSDH)는 기준파의 경로에 위상 천이기를 설치하고, 기준파의 위상 값을 제어하면서 2~4개의 간섭세기를 구한 후, 그 세기 값들을 이용해서 0차 및 역 영상이 없는 재생 영상을 복원하는 기술이다. 이때 기준파의 위상 제어를 통해 구한 간섭세기의 수에 따라 4단계, 3단계 및 2단계 PSDH로 나뉜다[1-6]. 이때 간섭무늬는 기준파와 물체파의 세기비가 적절하여야 하고, 진동에 민감하기 때문에 가급

※ Corresponding Author : Cheolsu Kim, Address: (38065) Taejong-ro 188, Gyeongju-City, Kyungpook, Korea, TEL : +82-54-770-5178, FAX : +82-54-748-5364, E-mail : kcs6694@hanmail.net

Receipt date : Aug. 11, 2022, Approval date : Aug. 19, 2022
† School of Convergence of ICT, Gyeongju University

적 적은 수의 간섭세기 정보로 완벽한 재생 영상을 얻는 방법이 좋다. Ichiro Yamaguchi 등[1]은 4단계 PSDH를 이용하여 3차원 영상 재구성하는 방법은 제안한 이후, 간섭세기의 수를 줄이는 방향으로 연구가 진행되어 현재까지 2개의 간섭세기로 영상을 재구성하거나 암호화하는 연구들이 진행되어 왔다[2-7]. 3단계 및 4단계 PSDH 방법은 기준파와 물체파의 세기 비에 상관없이 간섭세기의 조합을 통해 원래의 물체파를 복원할 수 있지만, 2단계 PSDH를 이용하면 복원되는 물체파가 기준파와 물체파 사이의 세기 비로 인한 간섭무늬의 시각성(visibility)에 영향을 받게 된다[7].

본 논문에서는 2단계 PSDH의 이러한 문제점을 해결하고, 이를 이진 입력 영상에 적용하여 XOR 및 스크램블 연산과 2단계 PSDH를 이용한 계층적 암호화 시스템을 구현하고자 한다[8]. 암호화 과정은 다음과 같다. 먼저 암호화 하고자 하는 다수의 이진 입력 영상들이 정해지면, 이들을 위상 변조하고, 랜덤하게 발생 시킨 이진 위상 입력영상을 공통 물체영상으로 정한다. 그리고 공통 물체영상과 암호화하고자 하는 이진 입력 영상들 간의 XOR연산을 통해 각 이진 입력 영상에 대한 키 정보를 구한다. 그리고 랜덤하게 발생시킨 공통 물체영상을 행과 열에 대해 스크램블 연산을 수행함으로써 디지털적인 암호화 과정을 1차적으로 완수한다. 랜덤하게 발생시킨 공통 물체영상은 원래의 이진 입력영상 형태와 상관없이 항상 일정한 형태의 물체파를 생성하므로 기준파와의 세기 비를 일정하게 유지할 수 있고, 간섭무늬의 시각성도 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다. 디지털 적으로 1차 암호화된 공통 물체영상은 2단계 PSDH 방법을 적용하여 광학적으로 2개의 2차 암호화된 간섭 영상 정보를 최종 얻게 된다.

복호화 과정은 암호화 과정의 역순으로 진행된다. 먼저 2단계 PSDH 기법에 의해 암호화된 두 간섭세기 정보를 이용하여 디지털 계산과 역 프레즈넬 변환을 통해 1차 복호화 하고, 디스크램블, XOR 연산 및 위상 복조를 통해 원래의 이진 입력영상 정보를 복원하게 된다.

복원 시에는 암호화 과정에서 구한 키 정보의 종류에 따라 서로 다른 이진 입력 영상을 복원할 수 있는데, 만약 이러한 기능을 복원 영상에 따라 출입할 수 있는 공간을 제어하는데 활용한다면 계층적 암호화 시스템을 구현할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 디지털 홀로그래피 기술의 이론적인 설명을 하고, 3장에서는 제안된 암호화 및 복호화 방법에 대해 설명하며, 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 방법의 검증 및 구현 가능성을 설명한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺도록 한다.

2. 이론적 설명

2.1 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피와 관련된 파면 해석을 이론적으로 설명하기 위한 좌표계는 Fig. 1과 같다[1].

Fig. 1에서 (x,y) 평면의 임의의 물체로부터 반사된 물체파 함수를 소문자 $o(x,y)$라 하면, 물체로부터 d만큼 떨어진 위치에서의 물체파는 프레즈넬(Fresnel) 변환에 의해 대문자 $O(u,v)$로 표현되며 다음 식과 같다.

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

여기서 $i=\sqrt{-1}$이고, λ는 사용된 광원의 파장이며, k는 파수(wave number)를 의미하며, d는 프레즈넬 변환 거리이다.

홀로그램 평면에서의 물체파 함수 $O(u,v)$와 기준파 함수 $R(u,v)$는 복소함수 형태인 다음 식으로 표현된다.

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

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

홀로그램 평면에서 물체파와 기준파가 서로 간섭

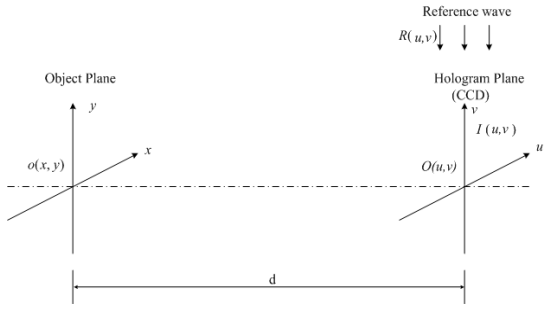


Fig. 1. The coordinate system of digital holography.

을 일으키고, 그 간섭세기는 CCD 카메라에 기록되며, 다음 식과 같이 복소함수의 곱으로 표현된다.

$$\begin{aligned} I(u,v) &= |O(u,v)+R(u,v)|\times|O(u,v)+R(u,v)|^{*} \\ &= |O(u,v)|^{2}+|R(u,v)|^{2}+O(u,v)R(u,v)^{*} \\ &\quad +O(u,v)^{*}R(u,v) \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 위첨자(*)는 복소공액 연산자이다. 첫째 및 둘째 항은 재생 시 0차 항이고, 넷째 항은 재생 시 역 영상으로 나타나므로, 모두 제거되어야 된다. 이를 해결하기 위해 PSDH 기술이 사용되었다.

2.2 2단계 PSDH

PSDH는 기준파의 경로에 위상 제어기를 두어 기준파의 위상 값을 제어하면서 간섭세기를 구한다. 위상 천이기를 통과한 기준파 함수 $R(u,v)\exp(i\theta)$과 물체파 함수 $O(u,v)$사이의 간섭세기는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} I(u,v;\theta) &= |O+R\exp(i\theta)|\,|O+R\exp(i\theta)|^{*} \\ &= I_O+I_R+R\exp(i\theta)O^{*}+R^{*}\exp(-i\theta)O \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $I_O(u,v)=|O(u,v)|^2$이고, $I_R(u,v)=|R(u,v)|^2$이다. 그리고 I_O, I_R, O및 R에서 좌표 (u,v)는 생략되었다. 위상 천이 값 $\theta=0,\frac{\pi}{2}$ 에 따른 간섭세기를 간략히 표현하면 다음과 같다[3].

$$I_1 = I(u,v;0) = I_{DC}+2\mathrm{Re}(O)R \tag{6}$$

$$I_2 = I(u,v;\frac{\pi}{2}) = I_{DC}+2\mathrm{Im}(O)R \tag{7}$$

여기서 $I_{DC}=I_O+I_R$로 0차 항을 뜻한다.

두 개의 간섭세기 식 (6)과 (7)을 적절히 사용하여 물체파 함수 $O(u,v)$를 구하면

$$O(u,v) = \frac{1}{2R(u,v)}[(I_1-I_{DC})+j(I_2-I_{DC})] \tag{8}$$

와 같이 된다. 그리고 식 (6) 및 (7)로부터 다음과 같은 복소 홀로그램을 구성하면

$$\begin{aligned} I_C &= I_1+jI_2 = I_{DC}+jI_{DC}+2R[\mathrm{Re}(O)+j\mathrm{Im}(O)] \\ &= I_{DC}+jI_{DC}+2RO \end{aligned} \tag{9}$$

와 같고, 식 (9)를 정리한 후, 양변을 절대치 제곱을 취하면 다음과 같이 I_{DC}에 대한 2차 방정식을 얻을 수 있다.

$$2I_{DC}^2-(4I_R+2I_1+2I_2)I_{DC}+(I_1^2+I_2^2+4I_R^2)=0 \tag{10}$$

위 방정식의 해는

$$I_{DC}=\frac{2I_R+I_1+I_2}{2}\pm\frac{\sqrt{(2I_R+I_1+I_2)^2-2(I_1^2+I_2^2+4I_R^2)}}{2} \tag{11}$$

와 같이 구해진다.

그리고 식 (6)과 (7)을 더하고, 양변에 다시 $2R^2$을 더한 후, I_{DC}에 대해 정리하면

$$I_{DC}=\frac{2I_R+I_1+I_2}{2}-[R+\mathrm{Re}(O)+\mathrm{Im}(O)]R \tag{12}$$

와 같고, 식 (11)과 (12)은 같은 결과이어야 한다. 두 식을 비교해 보면 기준파의 크기를 물체파 보다 크게 하여 $R+\mathrm{Re}(O)+\mathrm{Im}(O)>0$을 만족시키고, 식 (11)의 결과에서 ± 부호가 - 로 바꾸면 같은 결과가 됨을 알 수 있고, 0차 항 I_{DC}는 두 간섭세기 I_1과 I_2 그리고 물체파 세기보다 큰 기준파 I_R를 사용하면 I_{DC}를 구할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (8)로부터 두 간섭세기 정보를 알고 기준파의 크기를 물체파의 크기보다 더 크게 설정하면 0차 항 및 역 영상 잡음이 없는 원래의 물체파를 재생할 수 있다. 그러나 기준파의 세기가 물체파에 의해 결정되므로, 물체 영상의 형태가 달라지면 기준파의 세기도 그에 따라 달라져야 하는 문제점이 있다.

만약 물체파의 형태를 일정하게 설정할 수 있으면 두 간섭세기의 정보만으로 원래의 물체 영상을 복원할 수 있음을 추론할 수 있다.

3. 제안한 암호화 및 복호화 방법

본 문에서 제안하는 암호화 과정 및 복호화 과정은 Fig. 2와 같다.

암호화 과정은 Fig. 2(a)와 같이 서로 다른 형태의

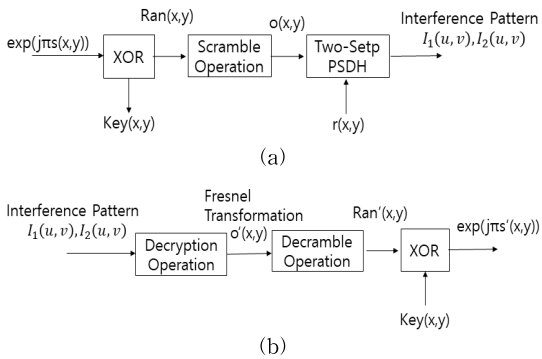


Fig. 2. Schematic diagram of (a) encryption and (b) decryption processes.

Table 1. The XOR-operation relationship for phase values between binary input image function $s(x,y)$, common object image function $Ran(x,y)$, and key image function $Key(x,y)$.

$\exp(j\pi s(x,y))$	$Ran(x,y)$	$Key(x,y)$
$\pi(-1)$	0(1)	$\pi(-1)$
	$\pi(-1)$	0(1)
0(1)	0(1)	0(1)
	$\pi(-1)$	$\pi(-1)$

이진 영상 함수인 $s(x,y)$를 각각 위상 변조한 후, 랜덤하게 방생 시킨 공통 물체 영상 함수 $Ran(x,y)$과 XOR 연산을 통해 여러 개의 키 영상 $Key(x,y)$을 각각 생성한다. 즉 이진 영상마다 키 영상은 다르고, 랜덤하게 생성된 공통 물체 영상은 동일하게 된다.

Table 1은 0과 1로 구성된 이진 영상 함수 $s(x,y)$의 위상 변조된 값이 공통 물체 영상 함수 $Ran(x,y)$ 및 키 영상 함수 $Key(x,y)$의 위상 값과의 XOR 연산을 통해 구해짐을 보여준다.

그리고 공통 물체 영상을 행과 열에 대해 스크램블 연산을 하여 1차 디지털 암호화된 영상 $o(x,y)$를 얻는다.

Fig. 3은 사용된 스크램블 연산의 한 예를 보여준다[7].

XOR 연산 및 스크램블 연산을 통해 디지털 적으로 1차 암호화된 영상은 여전히 랜덤한 패턴 형태를 가지며, 이 영상의 프레즈넬 변환된 물체파와 기준파 및 $\pi/2$ 위상 천이된 기준파와의 간섭을 통해 광학적으로 2차 암호화 영상 두 개를 얻는다.

암호화 과정에서 사용된 인자는 스크램블 연산에서 사용된 가로 및 세로 키 정보뿐만 아니라, 간섭무늬 획득 과정에서 사용된 프레즈넬 거리, 광원의 종류 및 CCD 카메라의 화소 크기 등의 사양을 알지 못하면 원래의 영상을 복원할 수 없다.

복호화 과정은 암호화 과정의 역순으로서, 식 (8)과 같은 복호화 연산과 프레즈넬 역변환 그리고 디스크램블 및 키 영상 함수와의 XOR연산을 통해 원래의 위상 영상을 재생하고, 위상 복조과정을 통해 최종 이진 입력 영상 함수를 복원한다.

Fig. 4는 2단계 PSDH를 이용하여 광학적으로 암호화하는 시스템을 보여준다[6].

Fig. 4에서 기준파의 세기는 ND(Neutral Density)를 이용하여 제어하고, 위상은 PZT (piezoelectric transducer) mirror에 의해 제어된다. 최종 2차 암호화된 영상 $I_1(u,v)$와 $I_2(u,v)$는 CCD 카메라에 의해 디지털적으로 획득된다.

4. 컴퓨터 모의 실험 결과 및 고찰

컴퓨터 모의실험에 사용된 조건은 광원으로 514 nm의 파장을 갖는 Ar레이저이며, 간섭세기를 획득하는 CCD 카메라의 화소 크기는 15.6 μm × 15.6 μm 이며, Fig. 4의 입력영상과 CCD 카메라 사이의 거리 (d)는 300 mm로 하였다. 입력영상에는 디지털적으로 1차 암호화된 영상이 표현된다.

계층적 암호화 시스템의 검증을 위해 실험에 사용된 3개의 이진 입력 영상은 256 × 256크기의 영문 성명, 학과 및 대학명이며, Fig. 5와 같다.

암호화 과정을 위해 먼저 랜덤하게 발생시킨 공통 물체 영상은 Fig. 6(a)와 같고, 각 이진 입력 영상들과 공통 물체 영상과의 XOR 연산을 통해 구한 키 영상들은 Fig. 6(b)-(d)와 같다.

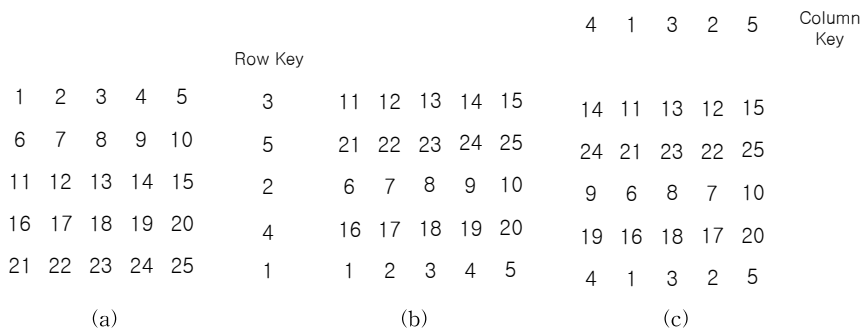


Fig. 3. Example of scramble operation process. (a) Test image, (b) Row-wise scrambled image, and (c) Row and column scrambled image.

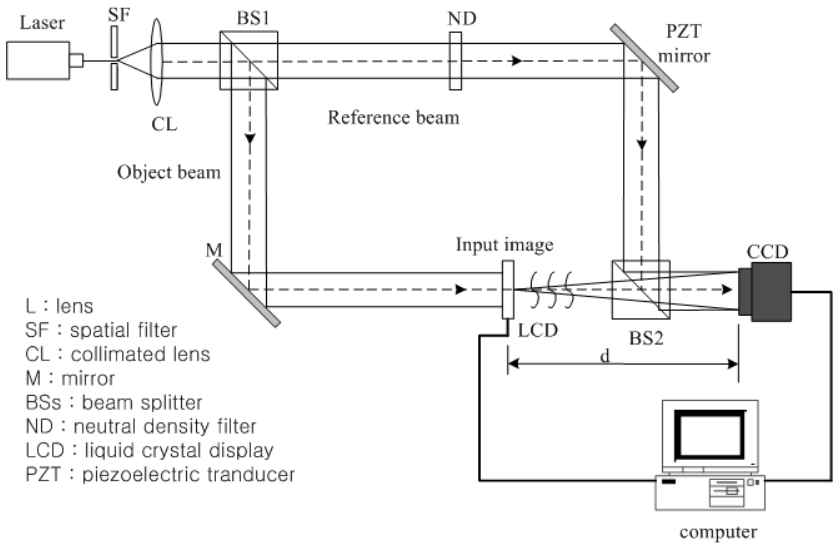


Fig. 4. Optical schematic diagram for two-step PSDH implementation.

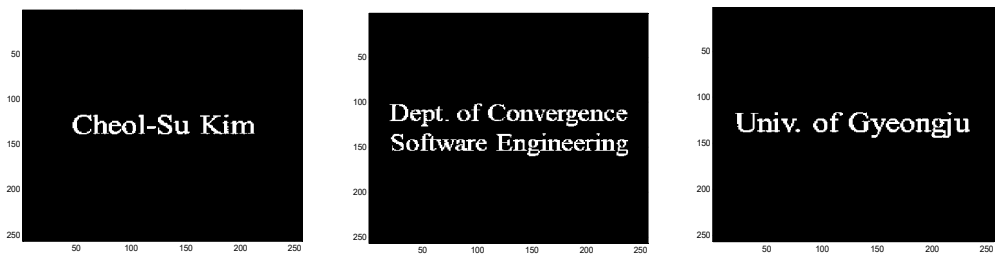


Fig. 5. Binary input images.

XOR 연산을 통해 얻은 Fig. 6(a)의 공통 물체 영상을 다시 행과 열 방향으로 스크램블 연산을 통해 디지털 적으로 얻은 1차 암호화된 영상은 Fig. 7과 같다. 디지털 암호화를 위해 랜덤하게 각각 발생시킨 32개의 행과 열 키를 이용하여 스크램블 연산을 수행하였다.

디지털적으로 1차 암호화된 Fig. 7의 영상을 Fig. 4의 2단계 PSDH방법을 이용하여 광학적으로 2차 암호화를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 최종적으로 암호화된 영상은 잡음 형태를 보이며, 광학적 암호화 과정에서 입력영상과 CCD 카메라 사이의 거리, 광원의 파장 및 CCD카메라의 화소 크

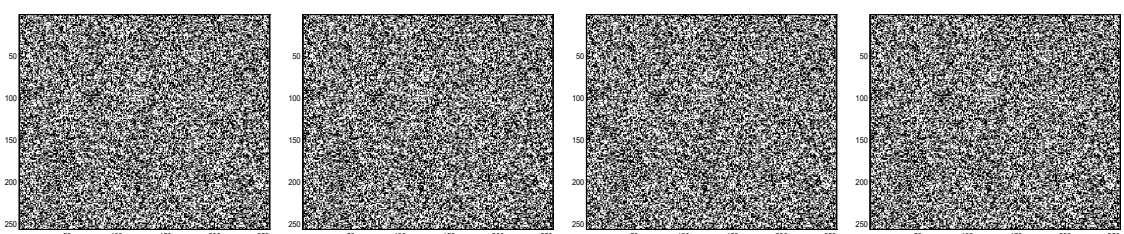


Fig. 6. Common object image and three key images. (a) Common object image, (b) Key image for the Fig. 5(a), (c) Key image for the Fig. 5(b), and (d) Key image for the Fig. 5(c)

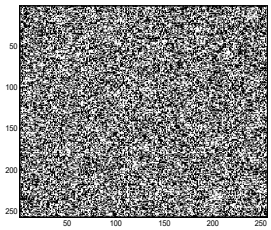
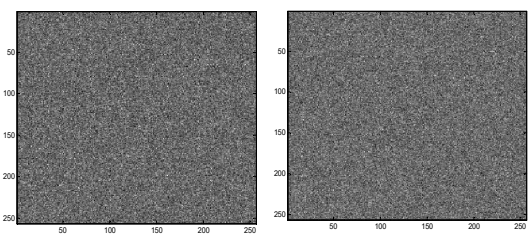


Fig. 7. The 1st encrypted image digitally obtained through the XOR and scramble operations

기 등 많은 보안 요소들이 사용되었다.

2차 암호화 과정에서 적용한 2단계 PSDH 기술은 물체파와 기준파 사이의 세기 비에 따라 간섭 패턴의 시각성(visibility)이 달라지므로 CCD 카메라로 정확하게 간섭 패턴 정보를 디지털로 변환할 수 없는 상황이 발생할 수 있어 최종적으로 복원되는 물체 영상의 성능에 영향을 미치는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 1차 디지털 암호화 시에 Fig. 5와 같은 이진 입력 영상 대신 랜덤하게 발생시킨 Fig. 6(a)와 같은 공통 물체 영상 정보를 위상 변조하여 사용함으로써, 이진 입력 영상의 형태에 상관없이 항상 일정한 패턴을 갖는 물체파를 생성할 수 있게 되었다.

그리고 시각성이 좋은 간섭패턴을 구하기 위한 최적의 기준파의 세기를 결정하기 위해 물체파와 기준파의 세기 비 변화에 따른 복원되는 영상의 성능 평가하기 위해 식 (8)과 (11)을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 성능평가에 사용된 비용함수(cost function)는 1차 암호화된 Fig. 7의 영상 함수 $o(x,y)$와 2단계 PSDH 기술로 2차 암호화된 간섭무늬 정보로부터 복원된 함수 $o'(x,y)$ 사이의 RMSE(root mean square error)이며 다음과 같이 표현된다[7].



(a) (b)

Fig. 8. Secondary encrypted image of common object image. (a) The phase of the reference wave is 0° and (b) The phase of the reference wave is 90 degrees.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}[o(m,n)-o'(m,n)]^2} \qquad (13)$$

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 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 심벌(∗)는 본 논문에서 사용한 랜덤하게 발생시킨 공통 물체 영상을 입력으로 사용하였을 때의 결과이고, 나머지 심벌들은 랜덤하게 발생시킨 이진 영상들을 입력으로 사용했을 때의 복원 결과이며, 이들의 결과가 거의 유사함을 알 수 있다. 이로부터 제안된 암호화 방법은 이진 입력 영상의 형태와 상관없이 랜덤하게 발생시킨 공통 물체 영상을 입력 영상으로 사용하여 물체파를 생성할 수 있으므로, 기준파의 세기를 직접 측정하지 않고, 물체파의 세기 정보로부터 기준파의 세기를 쉽게 결정할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 이진 입력 영상의 형태와 상관없이 랜덤하게 발생시킨 공통 물체 영상으로부터 기준파의 세기를 결정할 수 있다는 것이다. Fig. 9의 그래프에서 기준파의 세기가 물체파 세기의 최대값보다 1.1배 이상 정도 되면 복원 영상에 에러가 거의 없는 것을 확인할 수 있는데, 본 논문에서는 랜덤하게 발생 시킨 이진 영상 최대 세기 값보다 1.3배인 값을 기준파의 세기로 결정하여 광학적 2차 암호화하는데 사용하였다.

복호화 과정은 암호화 과정의 역순으로 진행된다.

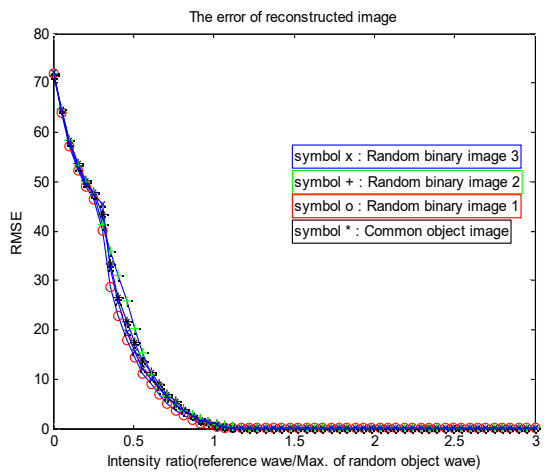


Fig. 9. RMSE performance of reconstructed images according to the intensity ratio variation between reference wave and maximum of phase modulated object wave in 2-step PSDH technology.

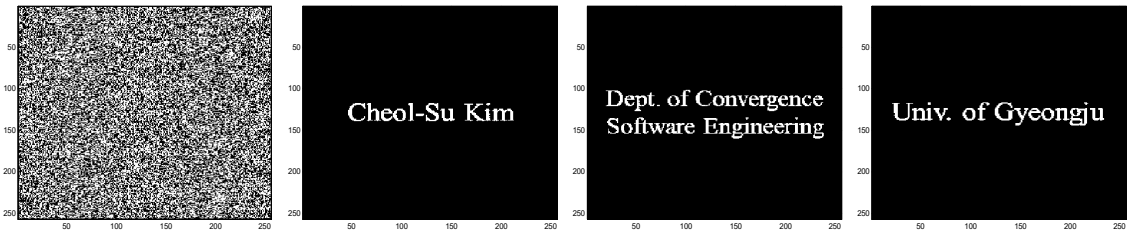


Fig. 10. Reconstructed common object image and binary input images. (a) Common object image and (b)–(d) Binary input images.

먼저 2차 암호화된 영상 정보 2개와 시뮬레이션을 통해 사전에 결정된 기준파 세기를 이용하여 식 (8), (11) 및 프레즈넬 역변환을 통해 Fig. 2(b)의 $o'(x,y)$를 구하였고, 이를 다시 디스크램블 연산 과정을 거쳐 최종적으로 원래의 공통 물체 영상 $Ran'(x,y)$을 1차적으로 복원하였다. 복원된 공통 물체 영상은 키 영상과의 XOR 연산 및 위상 복조를 통해 2차 복원과정을 수행하여 최종적인 이진 입력 영상인 $s'(x,y)$를 복원하게 된다. 이때 사용한 키 영상에 따라 세 종류의 서로 다른 이진 입력 영상들이 최종적으로 복원된다. 1차 복원된 공통 물체 영상 $Ran'(x,y)$ 및 2차 복원된 이진 입력영상 3개를 Fig. 10에 나타내었다.

복원된 공통 물체 영상인 Fig. 10(a)와 Fig. 6(b)-(d)의 키 영상들과의 XOR 연산을 통해 최종 복원된 Fig. 10(b)-(d)의 이진 입력 영상들은 Fig. 5의 원래의 이진 입력 영상들과 같은 결과를 보임을 확인할 수 있다.

그리고 이진 입력 영상들에 대한 키 영상 정보(Fig. 6(b)-(d))가 아닌 틀린 키 영상정보를 사용하였을 때에는 입력 영상정보들과는 전혀 다른 잡음과 같은 영상 정보가 복원되었으며, 이를 Fig. 11에 나타내었다.

제안한 암호화 시스템에서 복원된 공통 물체 영상은 암호화 과정에서 생성된 키 영상 정보에 따라 다른 이진 영상을 각각 복원하므로 복원 영상에 따라 출입 공간을 제어하는 계층적 암호화 시스템 구현에 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한 암호화 과정에서 생성되지 않은 틀린 키 정보를 사용하게 되면 원하는 이진 영상을 복원할 수 없음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

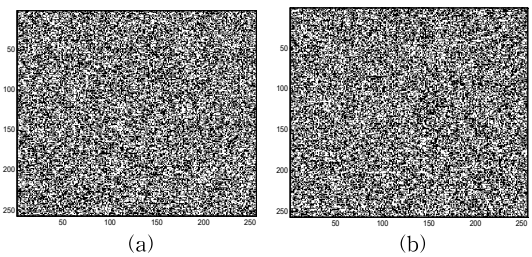


Fig. 11. Reconstructed binary image when using wrong key image. (a) Reconstructed binary image, and (b) Wrong key image.

5. 결 론

본 논문에서는 XOR 및 스크램블 연산을 기반으로 하고 2단계 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술을 이용하여 계층적 암호 시스템을 구현하였으며, 컴퓨터 모의실험을 통해 그 구현 가능성을 확인하였다.

제안한 방법은 XOR 및 스크램블 연산을 통해 1차 디지털적으로 암호화한 후, 2단계 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술을 통해 2차 광학적인 암호화를 수행함으로써 암호화를 강화하였으며, 2차 광학적인 암호화 시 문제가 되는 물체파의 세기에 의존하는 기준파의 세기를 결정함에 있어 기존의 이진 입력 영상을 물체파로 사용하는 대신 랜덤하게 발생시킨 공통 물체 영상을 입력 영상으로 사용함으로써, 이진 입력 영상의 형태와는 상관없는 항상 일정한 물체파를 생성할 수 있으므로, 기준파의 세기를 직접 측정하지 않고, 물체파의 세기 정보로부터 쉽게 사전 결정할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 시스템에서는 키 정보만 달리하면 복원 되는 영상이 달라지므로, 복원 영상에 따라 출입 공간을 제어하는 계층적 암호화 시스템 구현에도 이용할 수 있다.

추후에는 제안된 계층적 암호화 시스템을 요즘 화두가 되고 있는 제로 트러스트 암호화 구현에 적용할 수 있는지를 모색해보고자 한다.

REFERENCE

[1] I. Yamaguchi, "Phase-Shifting Digital Holography," *Optic Letters,* Vol. 22, No. 16, pp. 1268-1270, 1997.

[2] X.F. Meng, L.Z. Cai, X.F. Xu, X.L. Yang, X.X. Shen, G.Y. Dong, and Y.R. Wang, "Two-Step Phase-Shifting Interferometry and Its Application in Image Encryption," *Optic Letters*, Vol. 31, No. 10, pp. 1414-1416, 2006.

[3] J.P. Liu and T.C. Poon, "Two-Step-Only Quadrature Phase-Shifting Digital Holography," *Optic Letters*, Vol. 34, No. 3, pp. 250-252, 2009.

[4] J.P. Liu, T.C. Poon, G.S. Jhou, and P.J. Chen, "Comparison of Two-, Three-, and Four-Exposure Quadrature Phase-Shifting Holography," *Applied Optics*, Vol. 50, No. 16, pp. 2443-2450, 2011.

[5] S. Zhang and J. Zhou, "A New Estimation Method for Two-Step-Only Quadrature Phase-Shifting Digital Holography," *Optics Communications*, Vol. 335, pp. 183-188, 2015.

[6] C.S. Kim, "Double Encryption of Binary Image Using a Random Phase Mansk and Two-Step Phase-Shifting Digital Holo-graphy," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 19. No. 6, pp. 1403-1501, 2016.

[7] C.S. Kim, "Double Encryption of Image Based on Scramble Operation and Phase-Shifting Digital Holography" *Journal of the Korea Society of Industrial Information Systems*, Vol. 23, No. 4, pp. 13-22, 2018.

[8] C.S. Kim, "Hierarchial Encryption System Using Two-Step Phase-Shifting Digital Holography Based on XOR and Scramble Operations," *Proceeding of the Spring Conference of the Korea Society of Industrial Information Systems*, pp. 129-134, 2022.

김 철 수

1985년 2월~1989년 2월 경북대학교 전자공학과 공학사
1989년 3월~1991년 2월 경북대학교 전자공학과 공학석사
1991년 3월~1997년 2월 경북대학교 전자공학과 공학박사
1995년 3월~1998년 2월 김천대학교 전자통신과 전임강사
2008년 2월~2009년 1월 미국 Univ. of Connecticut 방문연구교수
1998년 3월~현재 경주대학교 ICT융합학부 교수
관심분야 : 디지털홀로그래피, 3D 디스플레이, 광암호화, 워터마킹 등