

論文2002-39SD-3-4

세기검출기를 이용한 광 영상 암호화

(Optical Image Encryption Based on Characteristics of Square Law Detector)

李應大*, 朴世駿**, 李河運***, 金秀重**

(Eung-Dae Lee, Se-Joon Park, Ha-Woon Lee, and Soo-Joong Kim)

요약

본 논문에서 위상변조와 푸리에 변환을 이용하여 이진 영상을 위한 새로운 암호화 방법을 제안한다. 복호를 위해서 제곱적 특성을 이용한다. 키 영상은 랜덤 패턴의 위상변조와 그의 푸리에 변환으로 구해지며 입력 영상은 위상 변조된 랜덤 패턴과 위상 변조된 입력의 곱을 푸리에 변환함으로써 암호화된다. 암호화된 영상과 키 영상은 위상 정보만을 가지므로 일반 세기 검출기로는 복사나 위조가 불가능하며 복호는 키 영상에 의해서만 가능하다. 원 영상을 재생하기 위해, 키 영상과 암호화된 영상의 위상 마스크는 푸리에 변환 렌즈와 함께 각각 마호-젠더 간섭계 경로에 따로 두며 출력 영상은 CCD 카메라에 세기 형태로 나타난다. 제안한 방법은 위상 변조기로 LCD를 사용하고 CCD 카메라의 특성을 이용하여 재생하므로 실시간 처리가 가능하다. 제안된 방법이 컴퓨터 모의 실험과 광학적 실험 결과 암호화 구조로서 우수한 성능을 갖음을 보여준다.

Abstract

In this paper, a new encryption method for a binary image using phase modulation and Fourier transform is proposed. For decryption we use the characteristics of square law detector. In encryption process, a key image is obtained by phase modulation of 256 level random pattern and its Fourier transformation, and input image is encrypted by Fourier transforming the multiplication of the phase modulated random pattern and phase modulated input image. The encrypted image and key image have only phase information, so they can not be copied or counterfeited and the original image can not be decrypted without the key image. To reconstruct the original image, each phase mask of the key image and the encrypted image must be placed on each path of the Mach-Zehnder interferometry with Fourier transform lens and the output image is obtained in the form of intensity in the CCD(Charge Coupled Device) camera. The real-time decryption is possible in the proposed system by use of a LCD as a phase modulator and a CCD camera as an intensity detector. The proposed method shows a good performance in the computer simulation and optical experiment as an encryption scheme.

Key words : encryption, decryption, random pattern, phase modulation, Mach-Zehnder interferometry

* 正會員, 國立科學搜查研究所

(National Institute of Scientific Investigation)

** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部

(Kyungpook Nat'l University, School of Computer and Electronics Eng.)

*** 正會員, 東洋大學校 情報通信工學部

(Dongyang University, School of Information & Communication)

接受日字:2001年8月31日, 수정완료일:2002년1월17일

I. 서론

정보화 진전에 따라 개인의 정보와 신용이 중요시되고 있으나 스캐너, 복사기, 컴퓨터 관련 장비들과 각종 소프트웨어 기술의 발달로 복제 기술이 높아져 정보 보호 측면에서 새로운 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 디지털 및 광학 기술들을 이용하여 위조 방지 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있지만 아직까지

는 위조 및 복제 방지를 위한 완벽한 보안 시스템은 개발되지 않고 있어 위조나 복제에 대한 방지 기술이 절실히 요구되고 있다.

최근에는 광학적으로 영상을 암호화하는 기술에 관심이 고조되고 있는데 광학적인 영상 암호화 방법에는 Han^[1]에 의한 XOR연산을 이용한 방법과 Refregier^[2] 등에 의한 푸리에 영역에서 랜덤 위상 마스크를 곱한 후 다시 역 푸리에 변환하여 암호화된 영상을 얻는 방법, 그리고 Kim^[3] 등에 의한 광학적 간섭 현상을 이용한 방법 등이 있다. Han^[1] 등의 방법은 원 영상을 bit-plane 으로 각각 나누어 암호화 키와 XOR 연산을 수행함으로써 영상을 암호화하고 원 영상은 암호시 사용한 키와 암호화된 영상과의 XOR연산으로 복원이 된다. 이 방법은 기존의 디지털 암호화 방법을 광학 시스템에 적용한 것으로 암호화 방법은 간단하지만 광학적 구현시 시스템이 복잡해진다. Refregier^[2] 등이 제안한 방법은 4f 광 상관기를 이용하여 입력 평면과 푸리에 평면에 랜덤 위상 마스크를 사용하여 영상을 암호화하는 것으로 두 개의 랜덤 위상 마스크에 의해서 원 영상이 백색잡음으로 변환되며, 복원시에는 암호 키로 영상 암호화시 사용한 푸리에 영역에서의 랜덤 위상 마스크의 복소 공액 값을 가진 마스크를 푸리에 평면에 놓으면 푸리에 변환된 암호 영상과의 곱에 의해 랜덤 위상 성분은 상쇄되어 원 영상이 광 세기 검출기에 의해 복원된다. 이 방법은 키로서 암호화시 사용한 랜덤 위상 마스크와 복소 공액의 위상 마스크를 제작해야 하므로 정밀한 마스크 제작이 요구된다.

본 논문에서는 암호화 방법 중 백색 잡음으로 암호화 할 경우 암호화 효과가 최대로 되는 점^[2]과 위상 성분은 눈으로 확인이 되지 않는다는 점^[3]을 이용한 암호화 방법을 제안한다. 제안한 방법은 위상 변조와 푸리에 변환을 이용하여 원 영상을 백색잡음으로 암호화하고, 세기 검출기의 특성을 이용하여 원 영상을 복원하는 것이다. 영상 암호화를 위해서 랜덤함수를 크기에 비례하는 위상형태로 만든 후 푸리에 변환하여 키 영상을 얻는다. 원영상은 위상 변조된 후 위상 변조된 랜덤패턴과 곱해져 푸리에 변환하여 암호화되므로 이중 암호화 효과를 가진다. 키 영상과 암호화된 영상의 광학적 구현은 홀로그램 형태로 기록할 수도 있고, 공간 광 변조기를 이용하여 실시간으로도 구현할 수 있다. 영상 복원 시에는 마호-젠더 간섭계를 이용해서 원 영상을 재생한다. 키와 암호화된 영상을 각각 간섭계 경

로상에 두고 가간섭성의 레이저를 입사시키면 렌즈의 푸리에 변환특성에 의해서 간섭평면에서는 각각의 역 푸리에 변환된 신호의 합이 기록되고 세기 검출기의 특성에 의해서 입력영상이 세기 형태로 재생된다. 제안한 방법은 CCD 카메라의 특성에 의해서 재생되므로 컴퓨터나 통신 선로 등 실시간 데이터 전송에도 적합할 것이다. 컴퓨터 모의실험 및 광 실험을 통하여 제안한 시스템의 타당성을 확인하였다.

II. 제안한 암호화 및 복호 방법

1. 암호화 방법

암호화 과정은 키 영상을 얻는 경우와 암호화된 영상을 얻는 경우로 나눌 수가 있는데 키 영상을 얻는 경우는 다음과 같다. 우선 랜덤 함수를 얻기 위하여 컴퓨터의 랜덤 발생기를 이용하여 일정한 확률 분포를 가지는 랜덤 함수를 얻었다. 컴퓨터에서 발생시키는 랜덤 함수는 어느 정도의 상관성을 가지기 때문에 상관성이 0인 패턴을 얻는 것은 불가능하다. 최근에 광시스템을 이용하여 상관성이 0인 랜덤 패턴을 얻기 위한 많은 방법이 연구되고 있다.^[4] 키 영상은 랜덤 함수를 크기에 비례하는 위상 형태로 변조하여 푸리에 변환하여 만들어지며 다음 수식과 같다.

$$\mathcal{F}[e^{j\pi r(x,y)}] = F(u, v) \tag{1}$$

여기서, $r(x,y)$ 는 랜덤 함수를 나타내고, \mathcal{F} 는 푸리에 변환을 나타낸다. 식 (1)에서 $F(u, v)$ 는 일반적으로 복소값을 가지지만 랜덤 함수 $r(x,y)$ 의 상관성이 0이 되면 $F(u, v)$ 는 크기는 1로서 일정하고 위상성분만을 정보로서 가지는 함수가 된다. 우선 수식전개의 편의를 위하여 위상 변조된 랜덤 함수 $f(x, y)$ 와 위상 변조된 원 영상 $g(x, y)$, 그리고 그것의 곱을 각각 다음과 같이 둔다.

$$f(x, y) = e^{j\pi r(x,y)} \tag{2}$$

$$g(x, y) = e^{j\pi b(x,y)} \tag{3}$$

$$h(x, y) = f(x, y)g(x, y) \tag{4}$$

단 여기서, $b(x,y)$ 는 0 또는 1의 값을 가지는 원 이진 영상을 나타낸다. 그리고 $f(x, y)$ 의 확률 분포 함수를 $P(x, y)$ 라고 하면

$$\int \int_R P(x, y) dx dy = 1 \quad (5)$$

$P(x, y) = \text{일정}$

이 성립하고 적분 영역 R 은 $R = R_1 + R_2$ 와 같다. 여기서, 부분 영역 R_1 과 R_2 는 각각

$$R_1 = \{ (x, y) \mid f(x, y) = 1 \}$$

$$R_2 = \{ (x, y) \mid f(x, y) = -1 \}$$

을 나타낸다.

위상 변조된 랜덤 함수의 평균과 분산을 구하면 각각

$$E[f(X, Y)] = \int \int_R f(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$= \int \int_{R_1} f(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$+ \int \int_{R_2} f(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$= 0 \quad (6)$$

$$E[f^2(X, Y)] = \int \int_R f^2(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$= \int \int_{R_1} f^2(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$+ \int \int_{R_2} f^2(x, y) P(x, y) dx dy$$

$$= 1 \quad (7)$$

와 같다.

식 (6)과 식 (7)에서 $f(x, y)$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 랜덤 함수이므로 다음 식이 성립한다.

$$f(x, y) \star f(x, y) = \sigma_f^2 \cdot \delta(x, y)$$

$$= \delta(x, y) \quad (8)$$

여기서 \star 는 상관 연산자를 나타내고, σ_f^2 은 $f(x, y)$ 의 분산을 나타낸다.

식 (8)의 양변에 푸리에 변환을 취하면

$$\mathcal{F}[f(x, y) \star f(x, y)] = |F(u, v)|^2 = 1 \quad (9)$$

이 되므로 키 영상 $F(u, v)$ 는 크기는 1이고 위상 성분만을 정보로 갖는 백색잡음인 것을 알 수 있고 키 영상 $F(u, v)$ 의 생성 과정을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 1과 같다.

암호화된 영상은 키 영상을 얻을 때와 마찬가지로 원 영상을 위상 변조 한 후 위상 변조된 랜덤 함수와 곱한 후 푸리에 변환을 해서 얻는다. 따라서 이중 암호화 효과를 가질 수 있고 이것을 수식으로 나타내면 다

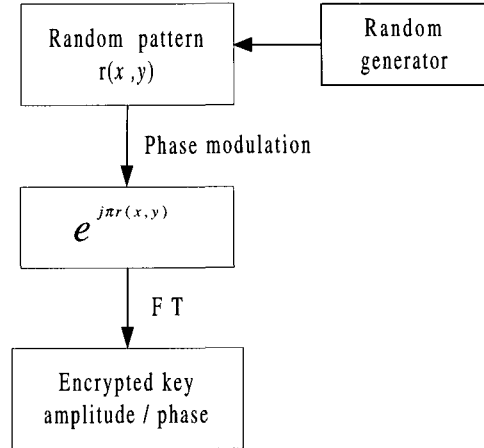


그림 1. 키 영상 생성 과정

Fig. 1. The process to generate the key image.

음과 같다.

$$\mathcal{F}[e^{j\pi r(x, y)} e^{j\pi b(x, y)}] = H(u, v) \quad (10)$$

여기서, \mathcal{F} 는 푸리에 변환을 나타낸다. 암호화된 영상 $H(u, v)$ 의 생성 과정을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 2와 같다.

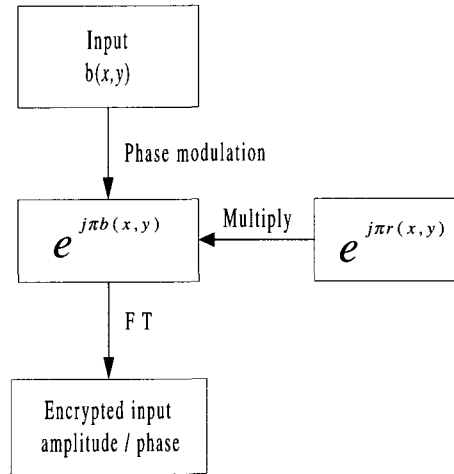


그림 2. 영상 암호화 과정

Fig. 2. The process to generate encrypted image.

2. 마흐-젠더 간섭계와 세기검출기를 이용한 복호화 방법

(1) 복호화 방법

영상 복원 시에는 간섭계와 광 세기 검출기를 이용

하여 원 영상을 세기 형태로 복원하는 방법을 제안하였다. 우선, 푸리에 변환된 키 영상 $F(u, v)$ 과 암호화된 영상 $H(u, v)$ 으로부터 원 영상 복원 과정을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathcal{F}^{-1} [F(u, v)] = e^{j\pi r(x, y)} \quad (11)$$

$$\mathcal{F}^{-1} [H(u, v)] = e^{j\pi r(x, y)} e^{j\pi b(x, y)} \quad (12)$$

여기서, \mathcal{F}^{-1} 는 역 푸리에 변환을 나타낸다.

식 (11)과 식 (12)을 더해서 절대치 제곱을 하면

$$\begin{aligned} I(x, y) &= | e^{j\pi r(x, y)} (1 + e^{j\pi b(x, y)}) |^2 \\ &= | 1 + e^{j\pi b(x, y)} |^2 \\ &= \begin{cases} 4, & b(x, y) = 0 \\ 0, & b(x, y) = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

로 주어진다. 식 (13)에서 세기 함수 $I(x, y)$ 는 랜덤함수 $r(x, y)$ 의 값에는 무관하며 원 영상 값에만 의존하여 명암이 반전된 형태로 복원되는 것을 알 수 있다. 이러한 과정을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 3과 같으며 광학적 시스템으로 구현하면 그림 4와 같다. 그림 4에 나타난 영상 복원 시스템은 광학적 간섭계로 널리 쓰이는 마흐-젠더 간섭계를 이용하였으며, 간섭계 두 경로의 광학적 거리를 일치시킨 후 한쪽 경로상의 가간섭성의 레이저를 입사시키면 렌즈의 푸리에 변환 특성에 의해 각각의 입력 영상은 역 푸리에 변환되며

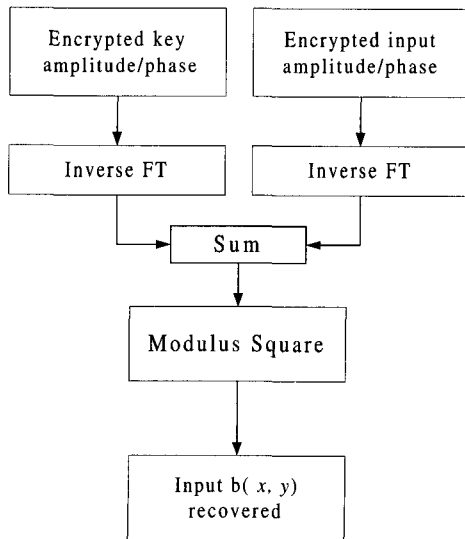
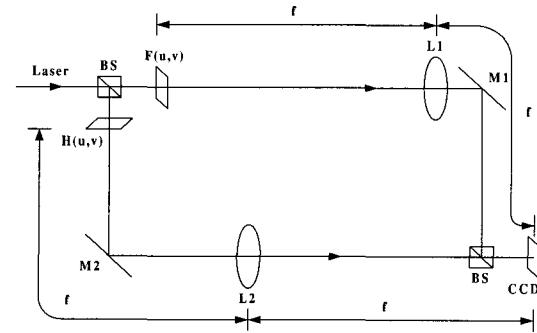


그림 3. 영상 복호화 과정
Fig. 3. The process to decrypt the encrypted image.

입력 평면에 키 영상 $F(u, v)$ 을 두고 다른 경로상의 입력 평면에는 암호화된 영상 $H(u, v)$ 을 위치시킨다. 이때 이들은 BS(Beam Splitter)에서 간섭된 후 CCD 카메라에 의해 입력 영상이 세기 형태로써 재생된다.



M1, M2 : Mirror
BS1, BS2 : Beam Splitter
L1, L2 : Fourier Transform lens

그림 4. 제안한 원 영상 복원 시스템
Fig. 4. The proposed system to recover the original image.

(2) 위상 지연에 의한 영향

마흐젠더 간섭계는 진동이나 공기의 흐름, 온도 변화 등에 의해서 위상 지연이 발생할 수 있으므로 복호화 시 제안한 암호화 방법이 위상지연에 의해 받는 영향을 조사하였다. 원래 키 영상 $F(u, v)$ 가 ϕ 만큼의 위상 지연이 발생했다면 식 (11)은 다음과 같다.

$$\mathcal{F}^{-1} [F(u, v) e^{j\phi}] = e^{j\pi r(x, y)} e^{j\phi} \quad (14)$$

$$\mathcal{F}^{-1} [H(u, v)] = e^{j\pi r(x, y)} e^{j\pi b(x, y)} \quad (15)$$

식 (14)과 식 (15)를 더해서 절대치 제곱을 하면

$$\begin{aligned} I(x, y) &= | e^{j\pi r(x, y)} (e^{j\phi} + e^{j\pi b(x, y)}) |^2 \\ &= | e^{j\phi} + e^{j\pi b(x, y)} |^2 \\ &= \begin{cases} | e^{j\phi} + 1 |^2, & b(x, y) = 0 \\ | e^{j\phi} - 1 |^2, & b(x, y) = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

이므로 $\phi = 90^\circ$ 인 경우는 입력 영상의 크기에 관계 없이 일정한 값이 되어서 원 영상 복원이 되지 않지만 ϕ 가 90° 가 아닌 경우에는 원 영상 복원이 가능하므로 원 영상 복원 시 위상 지연에 의한 효과에는 둔감한 것을 알 수 있다.

IV. 컴퓨터 모의 실험 및 광 실험

1. 컴퓨터 모의 실험

본 논문에서는 이진 영상과 랜덤 패턴을 256×256 화소 해상도로 하였으며 랜덤 패턴은 256 그레이 레벨로 크기를 표현하였다. 모의 실험에서 사용한 랜덤 패턴은 컴퓨터 프로그램에서 제공하는 랜덤 발생기를 이용하였고 간섭계에서 각 경로의 광학적인 길이가 일정하다는 가정에서 모의 실험을 하였으며 원 영상과 랜덤 패턴은 그림 5와 같다.



그림 5. (a) 원 영상과 (b) 랜덤 패턴
Fig. 5. (a) Original image and (b) random pattern.

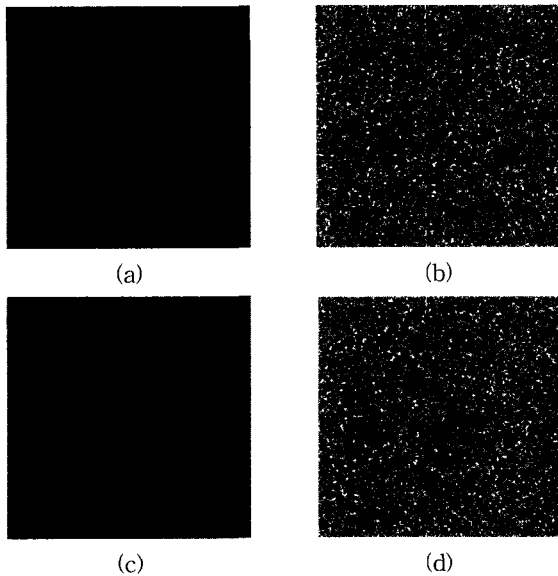


그림 6. 키 영상과 암호화된 영상
(a) 키 영상의 크기패턴. (b) 키 영상의 위상 패턴. (c) 암호영상의 크기패턴. (d) 암호영상의 위상패턴
Fig. 6. Key image and encrypted image.
(a) Amplitude of key image. (b) Phase of key image. (c) Amplitude of encrypted image. (d) Phase of encrypted image.

그림 6은 키 영상과 암호화된 영상을 나타낸다. 그림 6의 (a)와 (c)는 각각 키 영상과 암호 영상의 크기 패턴을 나타내는데 랜덤함수의 상관성이 0이 아니고 영상 자체의 대역폭의 제한으로 일정한 크기가 되지 않는 것을 보여준다. 그리고 (b)와 (d)는 0에서 2π까지 위상 성분을 정규화해서 그레이 레벨로 나타내었고 복원된 영상은 그림 7과 같다.



그림 7. 재생된 영상
(a) 복소값으로 재생한 경우
(b) 위상만으로 재생한 경우
Fig. 7. The reconstructed image.
(a) recovered using complex value
(b) recovered using only phase

그림 7에서 (a)의 경우는 크기와 위상을 모두 홀로그래램에 기록하여 재생한 경우이고 (b)는 위상 마스크를 사용해서 위상 정보만으로 재생한 경우를 나타낸다.

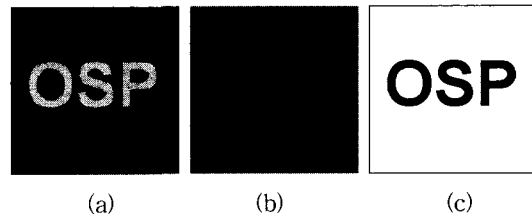


그림 8. 위상 지연 효과를 고려해서 복원된 영상
(a) 45°의 위상 지연 (b) 90°의 위상 지연
(c) 180°의 위상 지연
Fig. 8. The recovered image considering the phase delay effect.
(a) 45° phase delay (b) 90° phase delay
(c) 180° phase delay

위상지연효과를 고려하여 컴퓨터 모의실험한 결과는 그림 8과 같다. 그림 8(a)는 45도의 위상 지연이 생긴 경우의 복원 영상으로 영상 대비가 떨어진 것을 알 수 있고 그림 8(b)는 90도의 위상 지연이 생길 경우에는 영상 복원이 되지 않으며 180도의 위상 지연이 생길 경우는 영상 반전이 되는 것을 알 수 있다.

2. 광 실험 및 결과 고찰

본 논문에서 제안한 방법은 위상만으로 원 영상을 재생하는 것으로 기본적인 마흐-젠더 간섭계를 구성한 후 간섭계의 광학적 경로 길이가 일정하도록 조정한다. 다음 LCD를 위상 변조기로 사용하여 키 영상의 위상과 암호화된 영상의 위상을 각 경로 상의 입력 평면에 실시간으로 올린 후 출력 평면의 CCD 카메라에 의해 원 영상이 세기 형태로 복원하는 것으로 그림 4와 같다. 실험에서 사용한 He-Ne 레이저는 파장이 632.8nm 인 선형 편광의 평면파이고 푸리에 렌즈는 초점 거리가 600mm인 것을 사용하였고 마흐-젠더 간섭계에서 경로 차를 없앤 후 출력 평면에서 얻은 간섭 패턴은 그림 9와 같다.

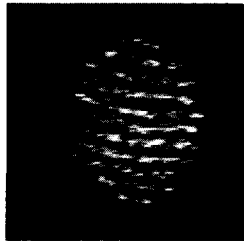


그림 9. 동일한 편광 방향과 경로 길이가 일정한 경우의 간섭 패턴
 Fig. 9. Interference pattern of two beams with same polarization and equal path length.

그림 9와 같이 선형 편광의 평면파에 의한 간섭 무늬가 존재하는데 실험을 용이하게 하기 위하여 진동이나 공기의 흐름 등에 의한 간섭 패턴의 흔들림을 최소로 하는 것이 중요하다. 제안한 광 실험에서 사용한 LCD모델은 Epson사의 P13SM015로서 원래의 목적은 데이터 투사기로 제작되었으므로 한쪽 면에만 자체 편광기가 부착되어 있다. LCD를 위상 변조기로 사용하는 경우에는 미리 위상 변조 특성을 정밀하게 조사한 후 입력 전압을 인가해야 하지만 본 실험에서는 대략적인 실험 결과로서 인가 전압을 결정하였고 제안한 시스템을 사용하여 재생한 영상은 다음과 같다.

그림 10은 T자 모양의 원 영상에 대해서 디지털 처리로서 구현한 키 영상의 위상과 암호화된 영상의 위상을 간섭계 경로 상의 LCD에 각각 올린 후 출력 평면의 CCD 카메라로 받아서 컴퓨터로 이미지 처리한 결과이다. 광 실험을 용이하게 하기 위해 컴퓨터 모의 실험과는 다른 간단한 T자 모양의 영상을 사용하였

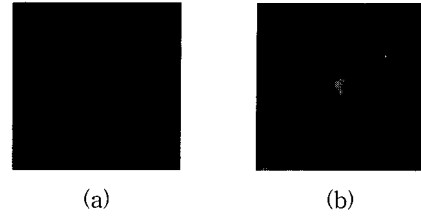


그림 10. 제안한 시스템에서 복원한 영상
 Fig. 10. The decrypted image in the proposed system.

다. 같은 모델의 LCD일지라도 위상 변조 특성이 각각 다르기 때문에 사전에 각각의 LCD에 대해서 동일한 위상 특성을 갖도록 조정하는 것과 화소 단위로 매핑이 되어야하기 때문에 정확한 광축 정렬이 필요하며 암호화된 영상의 위상과 키 영상의 위상이 이산 푸리에 변환된 위상이므로 실험에서 재생된 원 영상은 그림 10 (a)의 주기적인 배열로 나타난다. 그리고 LCD의 격자 구조도 마찬가지로 푸리에 변환되어서 점 배열로 나타나기 때문에 공간 필터를 제작하여 점 배열들을 제거한 후 결과 영상 중에서 최상의 하나의 영상만을 획득하였다. 광축 정렬 문제와 현재의 LCD 기술로는 다중위상을 정확하게 구현하기 어렵기 때문에 원 영상이 완전히 재생되지는 않았지만 컴퓨터로 후처리를 해서 개선하였다. 그림 10 (b)의 영상은 암호화에 사용된 키 영상이 아닌 다른 임의의 키 영상을 이용하여 재생한 결과이며 원래의 영상을 복원할 수 없음을 확인하였다. 더욱 좋은 결과를 얻기 위해서는 LCD의 위상 변조 특성을 정밀히 조사해서 두 개의 LCD의 특성을 동일하게 조정하거나, 정밀한 식각기술(lithography)을 이용하여 다중위상을 정확히 표현할 수 있는 위상마스크로 암호화된 영상을 제작한다면 실험 결과가 더욱 향상될 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에서는 위상 변조와 푸리에 변환을 이용하여 이진 영상을 암호화하고 간섭계와 세기 검출기를 이용하여 원 영상을 재생하는 방법을 제안하였다. 컴퓨터의 랜덤 발생기로부터 얻은 랜덤 함수를 위상 변조 후 푸리에 변환을 해서 복호시 사용할 키 영상을 얻고 암호화 하고자 하는 이진 영상도 마찬가지로 위상 변조 후 위상 변조된 랜덤 함수와 곱한 후 푸리에 변환을 하므로 이중 암호화 효과를 가지는 암호화된 영상을 얻었

다. 키 영상과 암호화된 영상이 대부분의 정보를 위상으로 가지므로 위상만으로도 복호가 가능한 것을 수식적으로 전개하여 컴퓨터 모의 실험으로 확인하였다. 영상 복원 시 위상 지연으로 인한 영향에는 둔감한 것을 모의 실험으로 확인하였다. 또한 세기 검출기에 의해 영상이 재생되므로 실시간 데이터 전송에 이용할 수 있음을 알 수 있다. 광 실험에서는 LCD를 위상 변조기로 사용하여 위상만으로 원 영상을 재생하였고 LCD의 위상 변조 특성이 동일한 경우에는 더 좋은 결과가 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Han, C. S. Park, D. H. Ryu, and E. S. Kim, "Optical image encryption based on XOR operations," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 47~54, 1999.
- [2] P. Refregier and B. Javidi, "Optical image encryption based on input and Fourier plane random encoding," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 7, pp. 767~769, 1995.
- [3] J. Y. Kim, and S. J. Park, "Optical image encryption using interferometry-based phase masks," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 10, pp. 874~875, 2000.
- [4] T. Sasaki, "Stream cipher based on pseudo-random number generation with optical affine transformation," *Applied Optics*, vol. 39, no. 14, pp. 2340~2346, 2000.
- [5] B. Javidi, "Noise performance of double-phase encryption compared to XOR encryption," *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 9~19, 1999.
- [6] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, 1997.
- [7] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, 1996.

저 자 소 개

李 應 大(正會員)

1972년 5월 15일생, 1999년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 현재 국립과학수사연구소 연구원, <주관심분야 : 광 보안, 광 패턴인식>

朴 世 駿(正會員) 第 36 卷 T 編 第 1 號 參照

경북대학교 대학원 전자공학과 졸업예정 (공학박사)

李 河 運(正會員)

1982년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사). 1984년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1996년 2월 경북대학교 전자공학과(공학박사). 1984년~1992년 삼성전자 정보통신부문(과장). 1997년 1월~1998년 8월 카네기 멜론 대학교 객원연구원. 1994년 3월~현재 동양대학교 정보통신공학부 교수. 연구분야: 광 신호처리, 패턴인식, 영상신호처리

金 秀 重(正會員) 第 37 卷 SD 編 第 8 號 參照

현재 경북대학교 전자전기공학부 정교수