

論文2003-40SD-1-4

간섭의 원리를 이용한 이진 위상의 광학적 암호화 시스템

(Binary Phase-based Optical Encryption System Using the Principle of Interference)

徐東煥*, 申昌睦*, 金秀重*

(Dong-Hoan Seo, Chang-Mok Shin, and Soo-Joong Kim)

요약

본 논문에서는 위상 변조된 영상과 간섭의 원리를 이용한 영상 복호화 수준을 향상시키는 방법을 제안하였다. 원 영상과 무작위 영상은 이진 데이터 값을 가지고 위상 변조된 원 영상은 무작위 위상 변조된 키와 곱함으로써 이진 위상 영상으로 암호화하였다. 이때 각각의 위상 변조된 영상들의 위상값은 0과 π 이다. 제안한 복호화 과정은 암호화에 사용된 동일한 무작위 위상 변조된 키와 암호화된 영상을 정합시킨 영상과 기준파의 간섭에 의해서 간단히 복원될 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션과 광 실험을 통하여 제안한 방법이 광 암호화 시스템에 적합함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose an improved image decryption system using a phase-encoded image and the principle of interference. An original image and a random image consist of only binary values. The phase-encoded original image is encrypted into a binary phase-only image by multiplying with a phase encoded random key. Therefore the phase-encoded images have two phase values 0 or π . The proposed decryption technique is simply performed by interfering between a reference wave and a direct pixel-to-pixel mapping of the encrypted image with a decrypting key. Optical experiments confirmed that the proposed technique is a simple and robust architecture for optical encryption.

Keyword : optical security, interferometer, random phase mask

I. 서론

최근 광학 기술을 이용한 보안 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이는 광의 고속성과 병렬성을 이용할 수 있어서 고속으로 대용량의 정보를 처리할 수 있는 특성에 기인한다. 특히 광학적 보안 시스템 및 광 영상 암호화에서는 세기정보와 투명한 광학

매질에 두께로 기록되는 위상정보를 동시에 광학매질에 기록할 수 있어 사람의 눈이나 기존의 세기검출기로는 암호화된 패턴을 추출하거나 복제할 가능성이 더욱 줄어들어간다. 따라서 광 암호화 시스템은 무작위 위상 마스크를 키 코드로 사용하여 원 영상을 암호화하며 이렇게 암호화된 영상은 세기검출기로는 추출이 불가능하고 무작위 특성에 의해서 원래의 패턴을 역추적하기가 어렵다는 특성을 가진다. 광학적으로 암호화된 영상은 전통적인 상관 시스템^{1,2)}이나 간섭계 시스템을 이용하여 원 영상을 재생하게 되는데, 이때 암호화에 사용된 무작위 위상마스크에 의해서 진위 여부를 판정하게 된다. 이를 이용한 광학적 암호화 시스템에는 XOR 연산³⁾, 위상 세기(phase-contrast) 방법⁴⁾, 위상 컴퓨터

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터學部
(School of Electrical Engineering & Computer Science, Kyungpook Nat'l Univ.)

接受日字:2002年8月21日, 수정완료일:2003年1月9日

형성 홀로그램(phase computer generated hologram)^[5], 이중 무작위 위상 부호화(double random phase encoding)^[6~9], 결합 변환 상관기(joint transform correlator; JTC)^[10,11], 또는 반복 알고리즘을 이용한 방법^[12] 등이 있다.

XOR 연산 방법은 256 그레이 레벨을 가지는 원 영상을 각 비트 평면으로 나누어 8개의 이진 영상들을 얻은 후 이들을 각각 암호화키와 XOR 연산을 수행함으로써 영상을 암호화하는데 이 방법은 영상을 이진 비트 평면 영상으로 변환하기 위해 디지털적인 처리가 필요하므로 시스템이 복잡하다는 단점이 있다. 위상 세기 방법은 원 영상을 진폭 값에 비례하는 위상 값으로 바꾸어 랜덤 위상 마스크와 함께 암호화하므로 세기에 비례하는 위상값의 근사식에 대한 에러가 복원영상의 왜곡으로 나타나게 된다. 이를 해결하기 위하여 위상 세기 필터(phase contrast filter; PCF)를 이용한 방법^[13]이 제안되었다. 위상 컴퓨터 형성 홀로그램을 이용한 방법은 영상을 CGH로 변환시킬 때의 샘플링 오차 등에 의해 영상의 왜곡이 생기고 반복 알고리즘에 의한 시간 소모가 많다. 이중 무작위 위상 부호화 방법은 4-f 광 상관기를 이용하여 입력 평면과 푸리에 평면에 두개의 랜덤 위상 마스크를 두어 영상을 암호화하고, 영상의 복원은 랜덤 위상의 복소 공액값을 가진 마스크를 푸리에 평면에 놓아 동일한 시스템을 이용하여 원 영상을 복원하게 된다. 이 방법은 정확한 복소 공액값을 가지는 위상 카드제작의 어려움과 광축 정렬의 문제점이 있고 이를 해결하기 위해 광 굴절 매질(photorefractive material)을 이용해서 공액 복소빔을 이용하는 방법이 제안되었다. 최근 결합 변환 상관기를 이용한 방법은 결합 파워 스펙트럼(joint power spectrum; JPS)을 암호화된 영상으로 기록하여 사용하고, 4-f 광 상관기를 이용하여 원 영상을 재생한다. 그러나 이 방법은 기록된 JPS이 실수함수이므로 세기검출기로 복사가 가능하고, 복호 시 출력평면에 나타나는 자기상관 성분 때문에 JTC를 이용하기 어려우므로 4-f 광 상관기를 이용해야 함으로써 여전히 광축 정렬의 어려움을 가진다.

본 논문에서는 이진 위상 영상과 기준빔을 이용한 새로운 광학적 복호화 시스템을 제안하였다. 제안한 방법은 먼저 암호화 할 이진영상을 위상변조하고, 랜덤 이진패턴을 컴퓨터로 발생시켜 위상 변조한 후 두 위상 변조된 영상을 공간영역에서 곱해서 순수한 위상

값만 가지는 패턴으로 만들어 암호화된 영상으로 사용하였다. 이 때 암호화에 사용된 랜덤 위상 패턴은 진위 여부를 판별하는 키 코드(key code)로 사용된다. 이렇게 암호화된 영상은 암호화에 사용된 키 코드 없이는 원 영상을 복원할 수 없으며 순수한 위상함수의 세기는 '1'이므로 세기검출기로는 복사가 불가능하다는 광 보안 시스템의 장점을 그대로 이용할 수 있다. 또한 공간영역에서 암호화 및 복호화함으로써 기존의 주파수 영역에서의 암호화 방법이 가지는 이진위상 CGH로 양자화하는 과정에 따른 영상의 정보손실이 없고 복소 공액값을 가지는 위상 카드의 제작이 불필요하다. 또한 광 실험에서 마흐-젠더 간섭계의 한 쪽 경로에 두 위상카드를 위치시킨 후 기준빔과 간섭시킴으로써 광축 정렬 문제와 픽셀 대 픽셀 대응이 용이하여 복원영상의 해상도를 향상시킬 수 있다. 컴퓨터 모의 실험 및 광 실험을 통하여 제안한 암호화 방법이 광 암호화 시스템에 적용 가능성을 확인하였다.

II. 간섭계를 이용한 영상의 암호화와 복호화

1. 광학적 간섭 현상

x축 방향으로 선형 편광된 빔의 초기 위상이 ϕ , 주파수가 ω , 전파 상수가 k , 파의 진폭이 E_0 이고 z축 방향으로 진행되는 평면파는

$$\vec{E} = E_0 \cos(kz - \omega t + \phi) \vec{x} \quad (1)$$

로 표현하고, 여기서 \vec{x} 는 x축 방향의 단위 벡터이다. x축 방향으로 동일 선형 편광이고 같은 방향(z)으로 진행하는 두 파를 각각 \vec{E}_1 , \vec{E}_2 라 하면, 두 파의 합성은

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \\ &= E_{01} \cos(kz_1 - \omega t + \phi_1) \vec{x} + E_{02} \cos(kz_2 - \omega t + \phi_2) \vec{x} \end{aligned} \quad (2)$$

이 된다. 여기서, E_{01} 과 E_{02} 는 각각 \vec{E}_1 , \vec{E}_2 의 진폭이다. 이 합성파가 가지는 세기 I 는

$$I = \epsilon v \langle |\vec{E}|^2 \rangle \quad (3)$$

이고, ϵ 은 매질의 전기 유전율(electric permittivity)이고 v 는 파의 전파 속도이다. 그리고 $\langle |\vec{E}|^2 \rangle$ 는 파의

세기 제곱의 시간평균값이다. 합성과 \vec{E} 가 주기함수이므로 $\langle |\vec{E}|^2 \rangle$ 는 $|\vec{E}|^2$ 의 주기 적분값이다. 그리고 $|\vec{E}|^2$ 는

$$\begin{aligned} |\vec{E}|^2 &= (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \\ &= |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2|\vec{E}_1||\vec{E}_2| \end{aligned} \quad (4)$$

이고, ϵ_0 가 상수이므로 균일한 매질내에서 밝기만을 비교하면 I는

$$\begin{aligned} I &= \langle |\vec{E}|^2 \rangle \\ &= \langle E_{01}^2 \rangle + \langle E_{02}^2 \rangle + 2\langle E_{01}E_{02} \rangle \\ &= \frac{E_{01}^2}{2} + \frac{E_{02}^2}{2} + E_{01}E_{02}\cos\delta \\ &= I_1 + I_2 + I_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 I_{12} 는 두 파의 간섭 때문에 생기는 간섭항이고 이를 구해보면

$$I_{12} = E_{01}E_{02}\cos[k(z_1 - z_2) - (\phi_1 - \phi_2)] \quad (6)$$

이 된다. 따라서 식 (5)는

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos[k(z_1 - z_2) - (\phi_1 - \phi_2)] \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\delta \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 된다. 여기서 $\delta = k(z_1 - z_2) - (\phi_1 - \phi_2)$ 와 같으며, 이것은 두 파의 위상차이다. 이러한 위상차(δ)에 따른 두 파의 간섭 세기는 <그림 1>과 같고, 두 빛을 간섭시킨 결과는 각 빛의 밝기를 더한 밝기 ($I_1 + I_2$)와 다름을 알 수 있다. 간섭 무늬의 밝기는 δ 값에 따라 결정되며, 최대값은 여현(cosine) 값이 최대가 되는

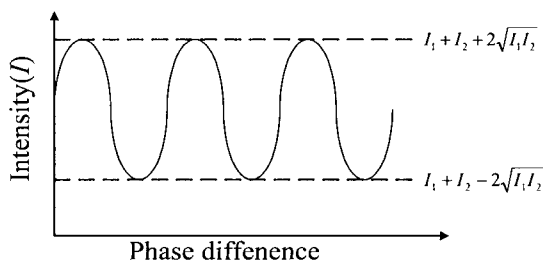


그림 1. 위상차에 따른 두 파의 간섭 세기
Fig. 1. The interference of two waves by the phase difference.

$\delta = \pm 2n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$)일 때 얻어지고, 최소값은 $\delta_{\min} = +(2n+1)\pi$ ($n=0,1,2,\dots$)의 경우에 얻어짐을 볼 수 있다. 최대값 ($I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}$)은 각각의 밝기를 더한 값보다 큰 값으로, 최소값 ($I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}$)은 두 밝기를 더한 값보다 작은 값으로 구해진다. 최대값이 가장 크고, 최소값이 가장 작아지는 것은 두 빛의 밝기가 같은 때로, 이 때 각 빛의 밝기를 I_0 라 하면 위 식은

$$I = 2I_0(1 + \cos\delta) = 4I_0\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (8)$$

로 표현되어진다. 따라서 최대값은 각 빛의 밝기의 4배가 되며, 최소값은 0이 된다. 간섭계에서 광 경로차가 동일한 위치에 같은 위상값을 가지는 두 픽셀에 대응하는 간섭 영상의 세기는 최대값을 가지고 다른 위상값을 가지는 두 픽셀에 대응하는 간섭 세기 영상은 최소값을 가진다. 각 경우에 대한 간섭 결과는 <그림 2>에서와 같은데 이 결과는 일반적인 디지털 XOR 연산과 유사한 결과임을 알 수 있다. 이렇게 두 빛의 간섭이 일어나기 위해서는 두 빛의 편광 방향이 동일해야 하고 위상차가 일정하게 유지되는 가간섭 광원이어야 한다. 본 논문에서는 수평 편광된 가간섭 광원으로 He-Ne 레이저를 사용하고 마흐-젠더 간섭계를 구성하여 두 빛의 간섭 현상을 통해 암호화된 영상을 복원시켰다.

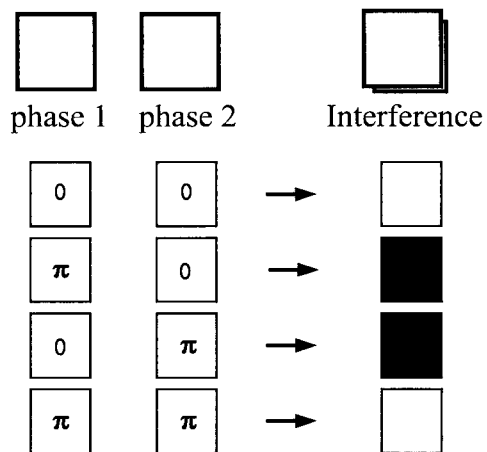


그림 2. 두 빛의 위상차가 0 혹은 π 인 경우의 간섭 패턴
Fig. 2. Interference pattern by two lights with phase difference of 0 or π .

2. 이진영상 암호화

암호화할 이진영상 $f(x, y)$ 를 위상변조하고 컴퓨터에서 발생한 이진 무작위영상 $r(x, y)$ 을 위상 변조한다. 위상 변조된 각각의 영상 $f_p(x, y)$, $r_p(x, y)$ 는

$$f_p(x, y) = \exp[j\pi f(x, y)], r_p(x, y) = \exp[j\pi r(x, y)] \quad (9)$$

와 같이 표현되며 여기서 위상 변조된 영상의 세기는 '1'이므로 $|f_p(x, y)|^2 = |r_p(x, y)|^2 = 1$ 로 주어진다. 두 위상 변조된 영상을 곱한 암호화된 영상을 $E(x, y)$ 라 두면

$$E(x, y) = f_p(x, y) r_p(x, y) = \exp[j\pi(f(x, y) + r(x, y))] \quad (10)$$

과 같이 암호화된 영상도 순수한 위상함수이므로 그 세기는 '1'이 된다. 또한 암호화된 영상 $E(x, y)$ 의 위상값은 원 영상과 무작위 영상의 선형적인 합임을 알 수 있다. 이 암호화 방법의 과정을 <그림 3>에 블록 다이어그램으로 나타내었다. 이 방법은 공간 영역에서 원 영상을 위상 변조한 후 위상 변조된 무작위 영상과 곱해져 암호화하므로 기존의 푸리에 영역에서 암호화하는 방법에서 영상을 CGH로 변환시킬 때의 샘플링 오차로 인한 영상의 왜곡이 생기는 문제를 해결하고 영상의 복원 시 암호화에 사용된 무작위 영상을 복호화 키로 사용함으로써 기존의 반복 알고리즘을 이용한 암호화 시스템이 가지는 정확한 복호키를 재생하기 위한 시간소모를 줄일 수 있고 또한 복호키 없이는 원 영상

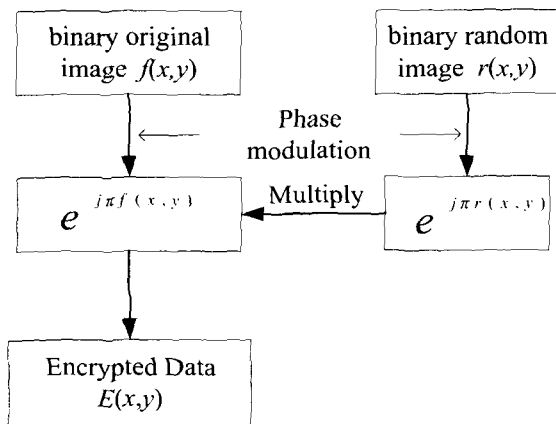


그림 3. 제안한 암호화 방법의 블록 다이어그램
Fig. 3. The block diagram of proposed encryption method.

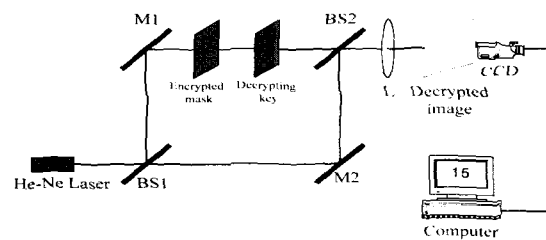
을 복원할 수 없으므로 광 보안 시스템의 장점을 그대로 이용할 수 있다. 또한 이 암호화 영상은 복소 함수값을 가지므로 세기검출기로 복사되지 않는 광 보안 시스템의 장점을 그대로 가지게 된다.

3. 제안한 영상 복호화

마흐-젠더 간섭계를 이용한 영상의 복원 시스템 구성도는 <그림 4>와 같다. 암호화된 영상 $E(x, y)$ 와 암호화시 사용한 동일한 키 코드 $r_p(x, y)$ 를 마흐-젠더 간섭계의 한 경로에 위치시키고 다른 한 경로에는 광 경로가 동일한 기준빔을 그대로 입사한다. 이는 기존의 두 경로를 이용한 간섭계에서 나타나는 픽셀 대 픽셀의 정합 문제를 해결함으로써 보다 향상된 복원 영상을 얻을 수 있다. 두 위상카드가 위치한 경로의 정합된 영상 $M(x, y)$ 는

$$M(x, y) = E(x, y) D(x, y) = f_p(x, y) * r_p(x, y) * r_p(x, y) = \exp[j\pi(f(x, y) + r(x, y) + r(x, y))] = \exp[j\pi f(x, y)] \quad (11)$$

이고 정합된 영상 $M(x, y)$ 의 위상값은 원 영상과 두 개의 무작위 영상의 선형적인 합임을 알 수 있고 이때 각각의 영상들은 0과 1의 값을 가지고 그에 따른 각각의 위상 변조된 영상들의 위상값은 0과 π 가 되므로 암호화키와 복호화키를 동일한 위상 변조된 랜덤 영상을 사용함으로써 $r_p(x, y) * r_p(x, y) = \exp[j2\pi r(x, y)] = 1$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 간섭영상의 세기는



M1, M2: Mirror
BS1, BS2: Beam splitter
L: Imaging lens

그림 4. 영상 복원을 위한 마흐-젠더 간섭계
Fig. 4. Mach-Zehnder interferometer for image decryption system.

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |R(x, y) + R(x, y)M(x, y)|^2 \\
 &= |R(x, y)|^2 |1 + \exp[j\pi f(x, y)]|^2 \quad (12) \\
 &= |E|^2 \begin{cases} 4 & f(x, y) = 0 \\ 0 & f(x, y) = 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

이다. 여기서 기준빔 $R(x, y) = E \exp(j\phi)$ 이고 E 는 파의 크기이고 ϕ 는 초기 위상이다. 따라서 $|R(x, y)|^2 = |E \exp(j\phi)|^2 = |E|^2$ 이다. 식 (12)에서 원 영상의 값이 '0'이면 간섭세기는 밝게 나타나고 '1'이면 어둡게 나타남으로 명암이 반전된 복원 영상이 CCD 평면에 나타나게 된다. 만약 암호화할 때 원 영상의 명암을 반전시켜 위상 변조한 후 암호화한다면 간섭된 출력평면에 원 영상이 재생된다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 컴퓨터 모의 실험

<그림 5>는 제안한 암호화 방법을 컴퓨터 모의실험을 위하여 제작된 영상들로 그 화소수는 128×128 이다. <그림 5(a)>는 암호화될 원 영상이며, <그림 5(b)>는 컴퓨터로 발생된 무작위 영상이며 이를 위상 변조하여 암호화 및 복호화 키 코드로 사용된다. <그림 5(c)>는 <그림 5(a)>와 <그림 5(b)>를 각각 위상 변조시켜 서로 곱한 암호화 영상으로 0과 π 의 위상값을 백과 흑의 화소에 각각 대응시켜 표현했으며 원래의 영상과는 전혀 관계없는 무작위 패턴으로 나타남을 확인할 수 있다. <그림 5(d)>는 거짓 키 코드로 사용되는 무작위 영상이며 이는 암호화에 사용된 키 코드와는 다른 키 코드를 사용하였을 때 영상이 재생되지 않음을 확인하기 위해서 사용하였다. <그림 6>은 <그림 4>의 영상 복원 시스템 구성도에 따라 복원한 영상이다. <그림 6(a)>는 정확한 복호키 코드를 사용하여 복원한 영상으로 명암이 반전된 원 영상이 재생됨을 확인할 수 있다. <그림 6(b)>는 <그림 5(d)>의 거짓 키 코드를 사용하여 복원한 영상으로 원래의 영상을 복원할 수 없음을 확인할 수 있다. 또한 <그림 6(c)>와 <그림 6(d)>는 위상 마스크 제작 시 발생하는 위상 지연과 간섭계 경로상의 위상 지연에 의한 영향을 나타낸 것으로 각각 90° 와 180° 의 위상 지연이 생길 때 복원 영상이다. 컴퓨터 모의실험을 통해 위상 지연이 180° 의 $2k+1$ 배인 경우는 영상을 식별할 수 없음을 알 수

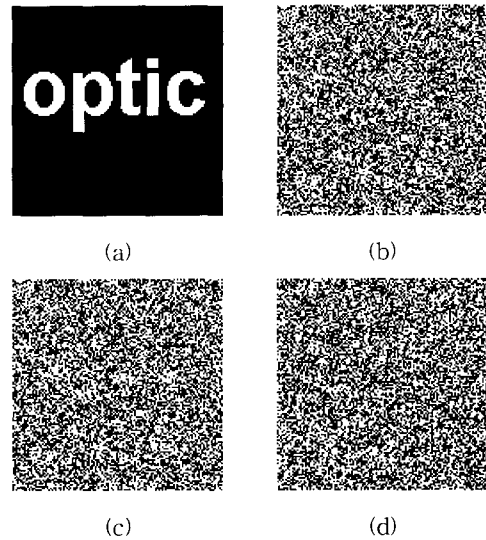


그림 5. 컴퓨터 모의실험에 사용된 영상: (a) 원 영상, (b) 랜덤 영상, (c) 암호화된 영상, (d) 거짓 키 코드

Fig. 5. Used images for computer simulations: (a) original image, (b) random image, (c) encrypted image, (d) false key code.

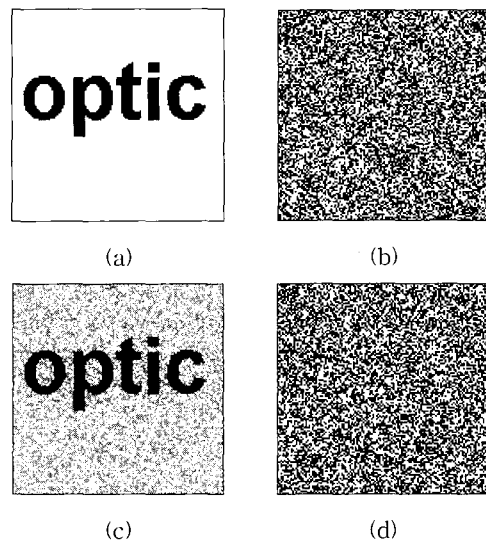


그림 6. 컴퓨터 모의실험 결과: (a) 키 코드를 이용하여 재생된 영상, (b) 거짓 키 코드를 이용하여 재생된 영상, (c) 90° 의 위상 지연, (d) 180° 의 위상 지연

Fig. 6. Computer simulation results: (a) reconstructed image with correct key code, (b) reconstructed image with correct key code, (c) phase delay of 90° , (d) phase delay of 180° .

있고 여기서 k 는 정수이다. 이는 위상 지연이 특별한 경우를 제외하고는 영상의 복원이 가능함으로 위상 지연에 의한 효과에는 둔감함을 알 수 있다.

2. 광 실험

<그림 7>은 광학적 실험 패턴과 결과를 나타낸다. <그림 7(a)>는 원 영상으로 숫자 '15'를 나타내었고 <그림 7(b)>와 <그림 7(c)>는 각각 랜덤 잡음 발생기를 이용하여 만든 키와 암호화 영상이다. <그림 7(c)>와 <그림 7(d)>는 <그림 7(b)>와 <그림 7(c)>의 백과 흑의 화소에 대해 각각 0과 π 의 위상을 대응시킨 위상 카드이다. 이 두개의 위상 마스크를 컴퓨터와 광학적 리소그래피를 이용하여 유리판을 식각하여 제작하였다. 마스크로 사용된 유리판의 시간당 식각율을 계산하여 원하는 두께가 될 때까지 식각 용액 속에 넣어 두는데 이때 필요한 두께를 계산하는 식은

$$D = \frac{\lambda \phi}{2\pi(n-1)} \tag{13}$$

와 같고 여기서 D 는 식각하고자 하는 유리판의 두께, λ 는 영상 복원시 사용할 레이저의 파장, n 은 유리판의 굴절률, ϕ 는 제어하고자 하는 위상을 나타낸다. 유리판의 식각을 위하여 사용한 용액은 BHF(buffered hydrofluoric acid)로써 이에 의한 유리판의 식각률은 분당 약 $0.15 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 여러 번의 실험을 통해 박막두께 측정기(α -step)로 식각 두께를 점검하면서 오차를 줄여나가도록 하였다. 제작한 7×7 위상마스크의 전체 크기는 $1.4 \times 1.4 \text{cm}^2$ 이고 한 화소의 크기는 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 이다. 본 실험에서는 λ 는 632.8nm , n 은 1.52, ϕ 의 값은 식각 과정에서 PR(photoresistor)이 용액에 견디는 시간을 고려하여 π 로 선택하여 식 10에 대입하였을 때 식각두께 D 의 값은

$$D = \frac{632.8 \times 10^{-9} \times \pi}{2\pi(1.52-1)} \cong 0.608 \mu\text{m} \tag{14}$$

가 된다. 그림 7(f)는 그림 4에서와 같은 제안한 광학적 시스템을 이용하여 CCD 카메라로 받은 복원된 영상이다. 컴퓨터 시뮬레이션과 광 실험 결과의 해상도 오차는 위상 마스크 제작 시 두께와 간섭계의 떨림으로 인한 오차라고 사료된다. 하지만 기존의 간섭계를 이용한 영상 복원 시스템과 비교할 때 복원된 영상의 해상도 수준이 향상됨을 확인할 수 있었다.

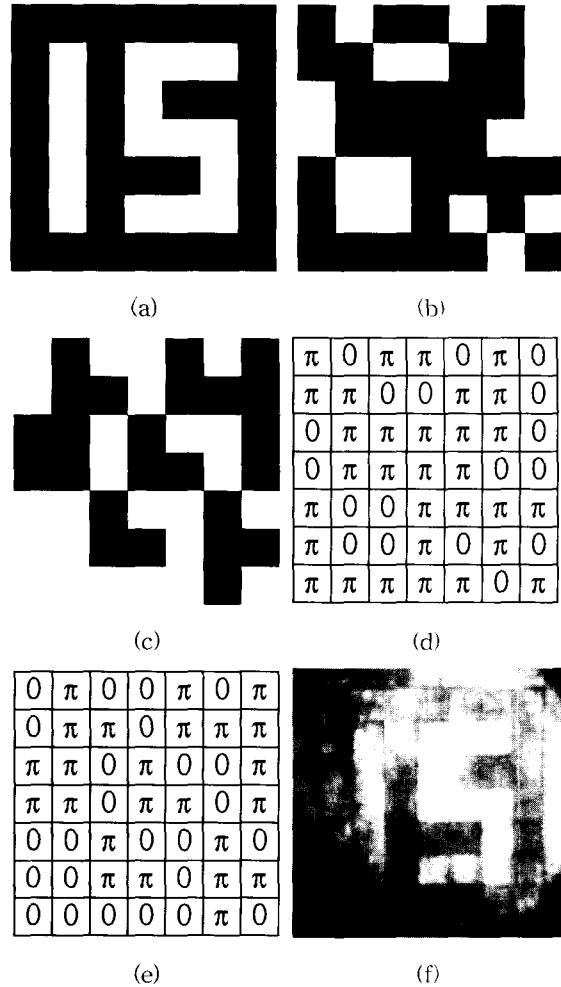


그림 7. 광 실험: (a) 원 영상, (b) 랜덤 영상, (c) 암호화된 영상, (d) (b)의 위상값, (e) (c)의 위상값, (f) 반전된 복원 영상

Fig. 7. Images and phase patterns for experiment: (a) original image, (b) random key, (c) encrypted image, (d) phase-valued image of (b), (e) phase-valued image of (c), (f) the inversion of reconstructed image.

VI. 결 론

본 논문에서는 공간영역에서 간섭계의 원리와 위상 변조된 영상들의 XOR연산을 수행하여 새로운 영상 복호화 방법을 제안하였다. 원 영상을 0과 π 의 값으로 위상 변조시켜 위상 변조된 랜덤 키와 곱함으로써 XOR연산과 동일한 형태로 암호화하였고 이 암호화된 영상과 암호화에 사용한 동일한 키를 복호키로 사용하여 이를 픽셀 대 픽셀로 대응시켜 얻어지는 영상과 기

준빔이 광학적 간섭현상에 의해 반전된 원 영상으로 복원된다. 기존의 간섭계를 이용한 암호화 시스템에서 각 경로의 영상들이 화소 단위로 대응이 되어야 하지만 제안한 방법은 기준빔을 사용함으로써 이러한 오차를 확연히 줄일 수 있었고 또한 공간 영역에서 시스템을 구현함으로써 주파수영역에서 암호화시 가지는 CGH 제작시 양자화 과정에서의 정보손실이 없으므로 더 나은 해상도로 복원할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. Javidi and J. L. Horner, "Optical pattern recognition for validation and security verification," *Optical Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 1752-1756, 1994.
- [2] R. K. Wang, I. A. Watson, and C. Chatwin, "Random phase encoding for optical security," *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 2464-2469, 1996.
- [3] J. W. Han, C. S. Park, D. H. Ryu, and E. S. Kim, "Optical image encryption based on XOR operations," *Optical Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 47-54, 1999.
- [4] L. G. Neto, "Implementation of image encryption using the phase-contrast technique," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3386, pp. 284-290, 1998.
- [5] P. Stepien, R. Gajda, and T. Szoplik, "Distributed kinoforms in optical security applications," *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 2453-2458, 1996.
- [6] P. Refregier and B. Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," *Optics Letter*, Vol. 20, No. 7, pp. 767-769, 1995.
- [7] B. Javidi, G. Zhang, and Jian Li, "Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification," *Optical Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 2506-2512, 1996.
- [8] B. Javidi and E. Ahouzi, "Optical security system with Fourier plane encoding," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 26, pp. 6247-6255, 1998.
- [9] G. Unnikrishnan, J. Joseph, and K. Singh, "Optical encryption system that uses phase conjugation in a photorefractive crystal," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 35, pp. 8181-8186, 1998.
- [10] T. Nomura and B. Javidi, "Optical encryption using a joint transform correlator architecture," *Optical Engineering*, Vol. 39, No. 8, pp. 2031-2035, 2000.
- [11] M. Yamaszki and J. Ohtsubo, "Optimization of encrypted holograms in optical security systems," *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 132-137, 2001.
- [12] T. Sasaki, H. Togo, J. Trida, and Y. Ichioka, "Stream cipher based on pseudorandom number generation with optical affine transformation," *Applied Optics*, Vol. 39, No. 14, pp. 2340-2346, 2000.
- [13] P. C. Mogenssen and J. Gluckstad, "Phase-only optical encryption," *Optics Letter*, Vol. 25, No. 8, pp. 566-568, 2000.

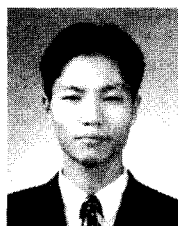
저 자 소 개

徐 東 煥(正會員) 第 38 卷 SD編 第 11 號 參照

현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중

金 秀 重(正會員) 第 33 卷 B編 第 7 號 參照

현재 : 경북대학교 전자전기공학부 정교수



申 昌 睦 (正會員)

1974년 12월 17일생. 1997년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. <주관심분야 : 광 컴퓨팅, 광 패턴인식, 광 보안, 홀로그램 및 광 메모리>