

이진 위상 홀로그램과 광학적 간섭계를 이용한 디지털 워터마킹

김병열 · 서동환[†] · 조규보 · 신창목 · 김수중

경북대학교 전자전기컴퓨터학부

☎ 701-702 대구광역시 북구 산격동 1370

김철수

경주대학교 컴퓨터전자공학부

☎ 780-712 경북 경주시 효현동 산 42-1

(2003년 4월 2일 받음, 2003년 6월 12일 수정본 받음)

본 논문에서는 이진 위상 홀로그램과 간섭계를 이용하여 디지털 데이터의 저작권을 보호할 수 있는 새로운 워터마킹 방법을 제안하였다. 먼저, SA 알고리즘을 이용하여 숨겨질 마크영상의 이진 위상 홀로그램을 설계하였다. 이를 원 영상에 선형중첩 시킴으로써 워터마킹된 영상을 얻었다. 워터마킹된 영상에서 마크영상을 추출하기 위한 복호화 과정은 경로차가 갈수록 구성된 마흐-젠더 간섭계를 이용하여 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 위상변조된 원 영상과의 간섭세기를 역푸리에 변환함으로써 얻었다. 제안된 방법은 임의의 절단된 영상에 대해서 강인함을 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였으며, 위상 변조 특성이 있는 LCD를 사용하여 광학적으로 구현하였다.

주제어 : watermarking, hologram, interferometer.

I. 서 론

최근 인터넷의 눈부신 발전으로 문서, 영상, 음성 등이 디지털화 되면서 누구나 쉽게 그 매체들에 접근하고 복사할 수 있게 되었다.^[1] 이러한 이유로 인해 저작권자의 동의 없이 디지털 데이터의 불법복제가 무방비로 행해지고 있으므로 디지털 데이터의 저작권 보호와 인증(authentication)은 반드시 필요하게 되었다. 이러한 불법복제를 막기 위한 방법으로 디지털 워터마킹(watermarking) 기술이 활발히 연구되고 있다.^[2-3] 워터마킹 기술은 저작권 보호를 위해 원 영상(original image)에 마크영상(mark image)을 삽입함으로써 소유권을 확인할 수 있어 영상의 불법 사용을 막을 수 있는 방법이다. 기존의 신호처리에 의한 디지털 워터마킹 방법들은 여러 가지 공격(attack)에서는 좋은 결과를 보이거나 절단(cropping)에서는 마크영상의 추출이 어렵다는 단점을 가지고 있으므로 이를 보완하기 위해 서 홀로그램 방법이 제안되었다.^[4-5]

본 논문에서는 이진위상 홀로그램(binary phase hologram)^[6-7]을 이용하여 디지털 워터마킹을 구현하였으며 마흐-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)를 사용하여 마크영상을 추출함으로써 원 영상의 진위여부를 검증하고 확인하였다. 먼저, 원 영상에 숨기기 위한 정보로 사용될 마크영상은 전 영역에 걸쳐 확산형태(diffuse type)로 랜덤 위상변조를 수행하게 되고 그 결과의 푸리에 변환하여 얻은 결과와 참조파(reference beam)를 중첩시켜 홀로그램의 세기를 얻는다. 생성된 홀로그램은 사람의 눈으로는 식별할 수 없기 때문에 원 영상에 선형

중첩시켜 워터마킹된 영상을 얻는다. 이렇게 얻어진 영상의 복호화 과정은 경로차가 갈수록 구성된 마흐-젠더 간섭계를 이용하여 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 위상변조된 원 영상을 간섭시킨 후, 그 세기를 역푸리에 변환하여 마크영상을 얻음으로써 영상의 진위여부를 검증하였다. 또한, 영상의 차이를 확인할 수 있는 PSNR(peak signal to noise ratio)을 이용하여 임의의 절단된 영상에서도 마크영상이 재생됨을 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였고 위상변조 특성이 있는 LCD(liquid crystal display)를 사용하여 제안한 복호화 시스템을 광학적으로 구현하였다.

II. 디지털 워터마킹

2.1. 워터마킹의 기본구조

디지털 워터마킹이란 디지털 콘텐츠의 저작권 보호를 목적으로 삽입할 정보를 사람의 눈으로 쉽게 감지할 수 없도록 디지털 이미지나 오디오, 그리고 비디오 신호에 마크영상을 삽입(embedding)하는 기술을 말한다. 데이터의 형태를 완전히 바꾸는 암호법(cryptography)과는 달리 원 신호의 형태를 유지한다. 워터마킹의 기본구조는 그림 1에 나타내었다. 숨기기 위한 마크영상 M 과 마크영상이 삽입될 원 영상 V 가 서로 선형중첩 되어 생성된 영상은

$$V' = V + \alpha M \tag{1}$$

와 같이 표현되고 여기서 α 는 워터마킹의 세기이다. 이렇게 생성된 워터마크 영상 V' 는 인간 시각 시스템(human visual system; HVS)에서 감지할 수 없고 원 영상과 차이가 없도록

[†]E-mail: dhseo@palgong.knu.ac.kr

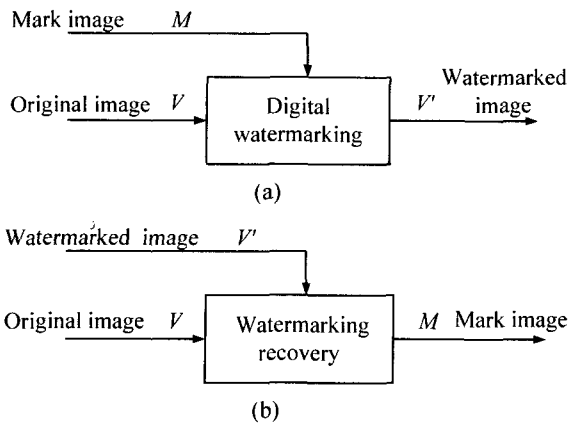


그림 1. 일반적인 워터마킹의 (a) 삽입 구조, (b) 추출 구조.

구성해야하며 사용자에게 배포되면 무분별한 복제에 대해서 마크영상을 추출할 수 있어야 한다. 워터마크된 영상 V' 는 그림 1(b)와 같이 마크영상을 추출함으로써 영상의 진위를 판별한다.

2.2. 워터마크 생성 방법

본 논문에서 제안한 워터마크 생성을 위한 블록도는 그림 2와 같다. 디지털 홀로그램을 원 영상에 삽입할 정보로 사용하기 위해서 이진 마크영상 $m(x, y)$ 를 홀로그램 전체에 걸쳐 확산시키는 랜덤 위상변조를 수행하게 되고 그 결과 위상 변조된 영상 $f(x, y)$ 는

$$f(x, y) = m(x, y) \exp[j\Phi(x, y)] \tag{2}$$

이고, 위상 변조된 영상을 푸리에 변환하여 얻은 결과는

$$F(u, v) = \iint f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \tag{3}$$

와 같다. 여기에 참조파 $R(u, v)$ 를 선형중첩시켜 홀로그램의 세기를 얻는다.

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

여기서, *는 복소공액(complex conjugate)을 나타내고 $R(u, v)$ 는 진폭 R_i 와 위상 $\exp[-j2\pi(au + bv)]$ 을 가지는 평면파(plane wave)이다. 여기서 참조파의 위상성분인 a, b 는 물체에 조사하는 각도(wave front inclination)로써 이 성분에 따라서 홀로그램의 재생 위치가 달라지게 된다. 그리고 식 (4)에서 첫 번째, 두 번째 항은 단지 각 파의 세기에 의존하지만 세 번째 항은 서로간의 상대적인 위상에 의존하므로 두 항을 디지털 적으로 제거 해줌으로써 두 파 사이의 간섭무늬를 홀로그램으로 볼 수 있다. 따라서, 원하는 최종 홀로그램 $H(u, v)$ 는

$$H(u, v) = F^*(u, v)R(u, v) + F(u, v)R^*(u, v) \tag{5}$$

와 같다. 식 (5)의 홀로그램은 인간시각 시스템에서 분별이 불가능하며 그 크기를 적당히 감쇄시켜서 원 영상에 숨기기 위한 정보로 사용된다. 본 논문에서는 식 (5)의 홀로그램 대신 SA

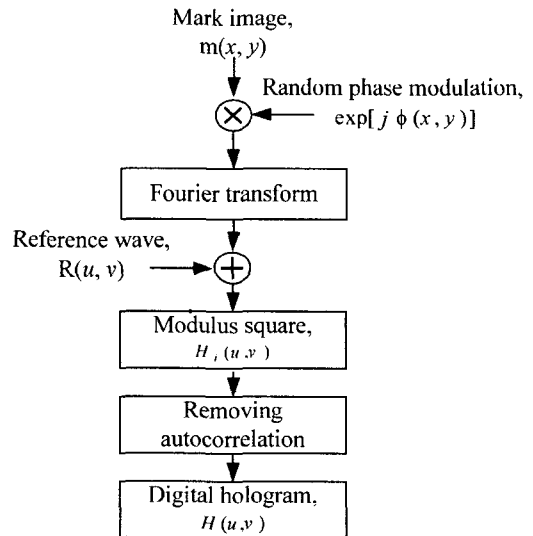


그림 2. 제안한 워터마크 생성 블록 다이어그램.

(simulated annealing) 알고리즘¹⁸⁻⁹⁾을 이용하여 설계한 이진 위상 홀로그램을 이용하여 원 영상을 워터마킹 하였다.

그러므로 디지털 워터마킹은 원 영상에 일정한 세기의 이진 위상 홀로그램을 선형중첩 시킴으로써

$$W(\xi, \eta) = Q(\xi, \eta) + \alpha H(\xi, \eta) \tag{6}$$

와 같이 생성된다. 여기서 ξ 와 η 는 원 영상의 좌표 (x, y) 와 홀로그램의 좌표 (u, v) 를 동일좌표에서 나타내기 위해 도입된 새로운 좌표이다. $Q(\xi, \eta)$ 는 원 영상을 나타내며, $H(\xi, \eta)$ 는 이진 위상 홀로그램을 나타낸다. $H(\xi, \eta)$ 를 구성하는 각 화소의 값들은 원래 '1' [$\exp(j0)$]과 '-1' [$\exp(j\pi)$]를 갖지만 위상 변조될 것을 고려하여 '1'과 '0'의 값을 갖도록 하였다. α 는 워터마크의 세기이며, 일반적으로 α 를 증가시킬 경우 일반적인 신호처리에는 강하지만 영상의 질을 저하시키는 단점이 있고, 반대로 감소하면 영상의 질은 보장되지만 각종 신호처리에 약한 단점을 가지고 있다. 그러므로 삽입되는 워터마크의 세기는 워터마크의 강인성(robustness)과 영상의 질을 저하시키지 않는 범위 내에서 적절하게 선택되어야 하며 이는 영상의 선택에 따라 달라지게 된다.

2.3. 마흐-젠더 간섭계를 이용한 마크영상 복호화

마흐-젠더 간섭계를 이용한 복호화 과정은 그림 3과 같으며, 광학적 시스템은 그림 4와 같이 경로차가 같도록 구성하고 두 경로상에 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 위상변조된 원 영상을 위치시켜 광학적인 간섭의 합에 의해 마크영상을 얻음으로써 영상의 진위여부를 검증하였다. 먼저, 워터마킹된 영상 $W(\xi, \eta)$ 와 원 영상 $Q(\xi, \eta)$ 의 위상 변조된 결과는

$$W_p(\xi, \eta) = \exp\{j\pi[Q(\xi, \eta) + \alpha H(\xi, \eta)]\} \tag{7}$$

와 같고 두 함수는 각각 마흐-젠더 간섭계의 두 입력평면에 놓이게 되고 출력평면에 나타나는 광 분포함수는

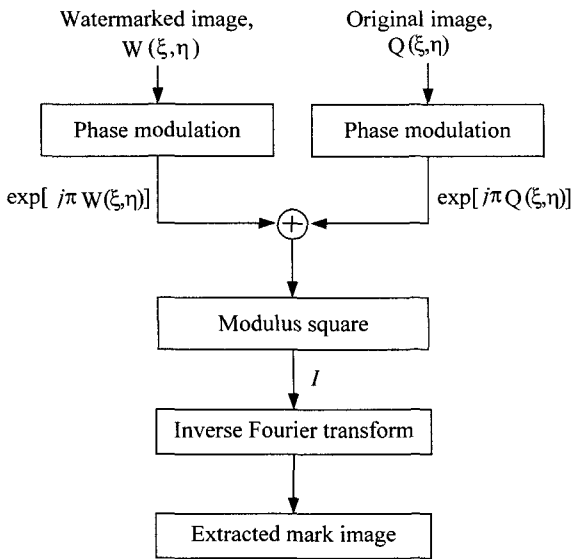


그림 3. 제한한 워터마크 추출 블록 다이어그램.

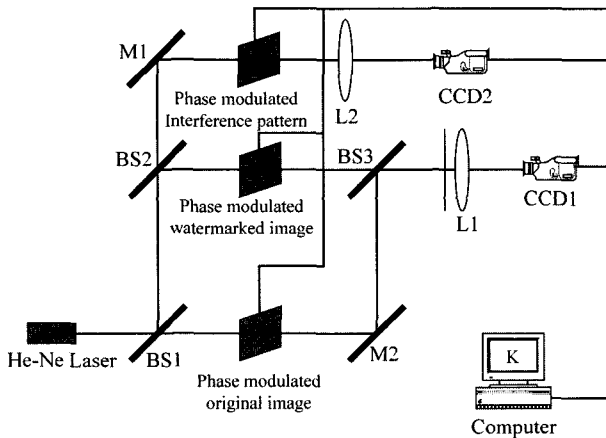


그림 4. 마크영상 추출을 위한 마흐-젠더 간섭계.

$$\begin{aligned}
 I &= |W_p(\xi, \eta) + O_p(\xi, \eta)|^2 \\
 &= |\exp[j\pi Q(\xi, \eta)] + \exp[j\pi\alpha H(\xi, \eta)]|^2 \\
 &= |1 + \exp[j\pi\alpha H(\xi, \eta)]|^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

와 같이된다. 여기서 I 로 두면 광 분포함수는 홀로그램 함수가 '0'과 '1'의 값을 가질 때, '4'와 '0'의 값을 가지게 되어의 음의 값이 된다. 이를 정규화하면

$$I_{normal}(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & \text{if } H(\xi, \eta) = 0 \\ 0, & \text{if } H(\xi, \eta) = 1 \end{cases} \tag{9}$$

와 같고, LCD를 이용하여 위상 변조하여 역푸리에 변환하면

$$\begin{aligned}
 g(x, y) &= F^{-1}\{I_{normal}(\xi, \eta)\} \\
 &= \frac{1}{2}\{|m^*(x-a, y-b)|^2 + |m(x-a, y-b)|^2\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

와 같이 마크영상이 원점에 대칭적으로 재생되게 된다.

III. 컴퓨터 모의 실험과 광 실험

3.1. 컴퓨터 모의 실험

제한한 워터마킹 시스템의 성능을 알아보기 위해 이진 영상을 마크영상으로 하여 컴퓨터 모의 실험을 하였다. 원 영상인 그림 5(a)는 64×64 크기를 가지는 그레이 영상(gray image)이고, 그림 5(b)는 원 영상에 삽입하기 위한 마크영상이다. 그림 5(c)와 (d)는 마크영상을 이용하여 생성된 수치적 홀로그램과 SA알고리즘을 이용하여 설계된 이진 위상 홀로그램을 나타낸다. 이 홀로그램을 구성하는 모든 화소는 원 영상 정보를 포함하고 있으므로 일부가 훼손되더라도 이로 인해 발생하는 오차를 최소로 줄일 수 있다. 그림 5(e)는 홀로그램 영상을 원 영상에 선형 중첩시켜 생성된 워터마킹된 영상을 나타낸다. 그리고 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 원 영상의 위상변조 성분의 간섭을 통해 추출된 영상은 그림 5(f)와 같다. 추출된 영상은 간섭정보를 위상변조하여 얻은 이진 위상 홀로그램을 역푸리에 변환함으로써 얻은 결과이므로 원점에 대칭적으로 재생됨을 알 수 있다.

제한한 방법이 임의의 절단에서도 영상의 강인함을 보이기

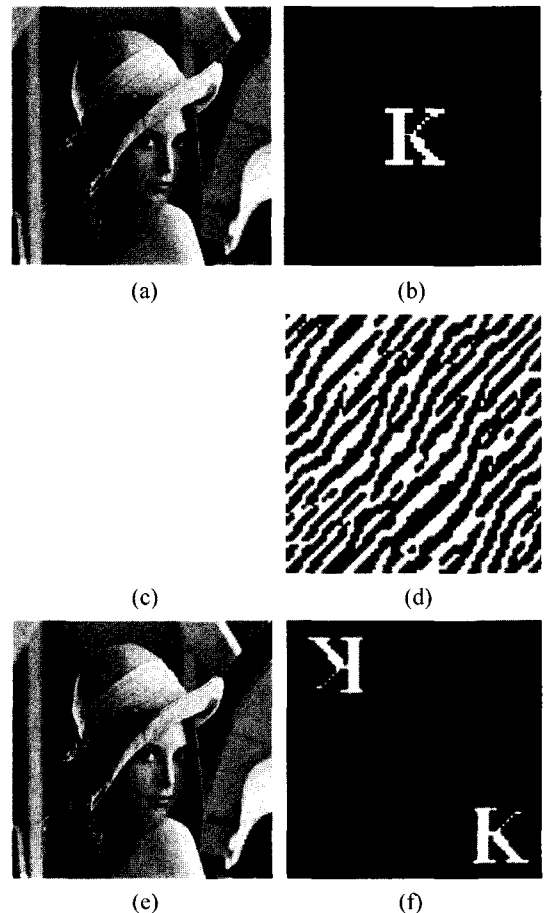


그림 5. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 입력 영상 및 결과 영상. (a) 원 영상, (b) 마크영상, (c) (b)의 수치적 홀로그램, (d) (b)의 이진 위상 홀로그램, (e) 워터마킹된 영상, (f) 추출된 마크영상.

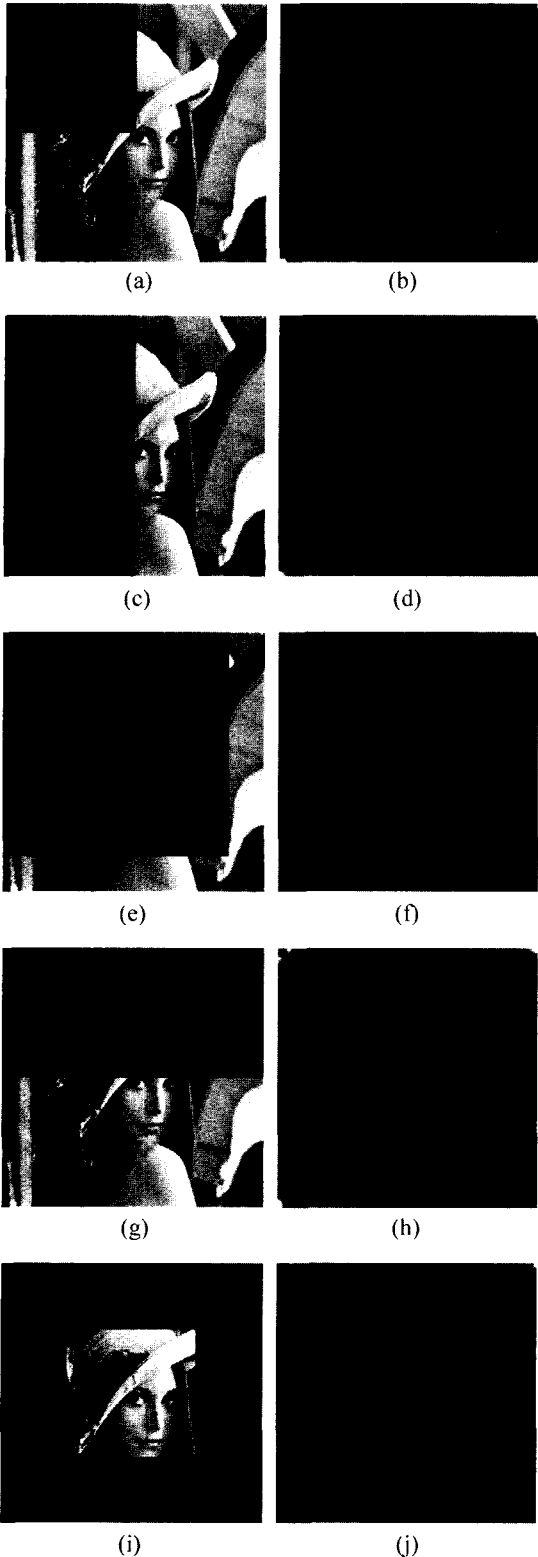


그림 6. 워터마킹된 영상의 절단에 따른 추출된 마크영상. (a) 25% 절단된 워터마크된 영상, (b) (a)에 의한 마크영상, (c) 수직으로 50% 절단된 워터마크된 영상, (d) (c)에 의한 마크영상, (e) 75% 절단된 워터마크된 영상, (f) (e)에 의한 마크영상, (g) 수평으로 50% 절단된 워터마크된 영상, (h) (g)에 의한 마크영상, (i) 중심의 25% 영상, (j) (i)에 의한 마크영상.

위해서 워터마킹된 영상을 적당한 비율로 절단하면서 마크영상을 추출하는 실험을 하였다. 그림 6(a), (c), (e)는 워터마킹된 영상 그림 5(e)를 25%, 50%, 75% 절단했을 때 영상이고 그림 6(g)는 수평으로 50% 절단한 영상이다. 이들 절단된 영상에 대해 추출된 마크영상은 그림 6(b), (d), (f), (h)와 같다. 그리고 그림 6(i)는 영상의 중심부분만 선택했을 때의 영상을 나타내고 추출된 마크영상은 그림 6(j)와 같다. 원래의 재생된 영상 그림 5(f)에 비해 잡음이 가해졌으나 마크영상의 식별 가능성이 있음을 알 수 있다.

그리고 워터마킹된 영상과 추출된 마크영상의 절단에 대한 식별 가능정도를 알아보기 위해서 신호대 잡음비를 조사해 보았다. 절단 전의 영상인 $I(x, y)$ 와 임의로 절단된 후의 영상인 $I'(x, y)$ 의 비교하기 위해 칩두치 대 실효치(root-mean-square; rms)의 비를 나타내는 PSNR을 사용하였으며, 그 수식은

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{y_{rms}} \right) [dB] \quad (11)$$

와 같다. 여기서는

$$y_{rms} = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y) - I'(x, y)]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

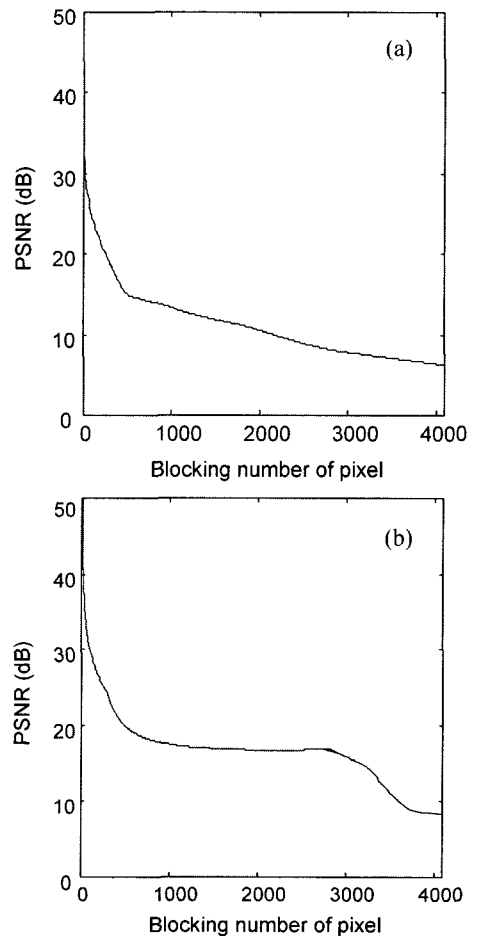


그림 7. 화소의 차단에 따른 신호 대 잡음비. (a) 워터마킹된 영상의 PSNR, (b) 추출된 마크영상의 PSNR.

이다. 그림 7(a)는 워터마킹된 영상인 그림 5(e)를 왼쪽부터 한 화소씩 절단했을 때의 PSNR을 나타낸다. PSNR은 50 dB를 기준으로 하여 두 영상을 비교하였다. 화소의 절단율이 25%, 50%, 75%일 때의 PSNR은 13.31, 10.39, 7.69의 값을 가지며 서서히 감소함을 알 수 있다. 그리고 그림 7(b)는 워터마킹된 영상 그림 5(e)를 한 화소씩 절단했을 때 추출된 마크영상의 PSNR이다. 절단율이 25%, 50%, 75%일 때의 PSNR은 15.62, 14.41, 14.28로 조금씩 감소하지만 절단에 강인함을 보여준다.

3.2. 광 실험

제안된 방법의 광학적 구현을 위해 마흐-젠더 간섭계를 구성한 후, Lena 영상을 원 영상으로 하고, 이진 영문자 'K'의 이진 위상 홀로그램을 마크영상으로 하여 광 실험을 하였다. 즉, 그림 4와 같은 마흐-젠더 간섭실험 구성도에서 마크영상을 원 영상에 중첩시킨 워터마킹된 영상의 위상변조 성분과 원 영상의 위상변조된 성분을 간섭계의 각 경로에 위치한 LCD에 올려서 실험하였다. 마크영상 추출 실험에 앞서, LCD의 위상변조 실험을 하였다. 두 경로상에 위상지연이 없으면 그림 8(a)와 같은 간섭무늬가 나타나고, 한 쪽 경로의 LCD에

막대 모양의 입력을 가하여 위상을 'π만큼 변조시키면 그림 8(b)와 같이 막대 모양의 간섭무늬가 위상 값만큼 어긋나게 된다. 이를 통해 LCD가 위상 변조 능력이 있음을 확인할 수 있었다. 실험에 사용된 광원은 파장이 632.8 mm이고 선형편광된 He-Ne 레이저이고, 위상변조 특성이 있는 LCD는 EPSON사의 P13SMO15 LCD pannel과 BE13S010 driver를 사용하였으며, PULNiX사의 TM-1320-15CL CCD를 사용하여 추출된 마크영상을 기록하였다. 제안한 복호화 시스템에서 사용된 원 영상과 마크영상은 그림 9(a)와 (b)이고, 워터마킹된 영상은 그림 9(c)이며, 여기서 추출된 마크영상은 그림 9(d)와 같다. 추출된 마크영상은 컴퓨터 모의실험 결과처럼 원점에 대칭적으로 재생됨을 확인할 수 있다.

제안한 시스템의 광 실험에서는 간섭계의 두 경로상에 위치하는 영상 정보들 사이의 정확한 매핑(mapping)이 상당히 어려우며, 이로 인해 재생되는 마크영상에 상당한 왜곡이 발생한다. 또한 실험에 사용되는 LCD의 위상변조특성의 비선형성도 재생되는 마크영상의 왜곡을 발생시킨다. 이러한 문제점들이 보완된다면 더 좋은 실험 결과가 얻어질 것으로 예상되며, 실제적 응용도 가능하리라 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이진위상 홀로그램과 마흐-젠더 간섭계를 이용하여 워터마킹 시스템을 구현하였다. 마크영상의 이진 위상 홀로그램 정보를 원 영상에 적절히 삽입함으로써 사람의 눈으로는 원 영상과의 차이를 구분할 수 없게 하였다. 삽입된 홀로그램은 각각을 구성하는 모든 화소값이 마크영상의 정보를 포함하고 있으므로 임의적인 절단에서도 강인함을 PSNR을 이용하여 분석하였다. 또한 광학적 실험을 통하여 시스템의 구현 가능성을 확인하였다.

제안한 복호화 시스템은 원 영상을 가지고 있는 사람만이 영상의 진위여부를 판별할 수 있으므로 무분별한 복제로부터 저작권을 보호할 수 있으며, 광의 고속성, 병렬성 및 실시간 처리가 가능하다는 장점이 있다. 이와 같은 복호화 시스템은 인증 시스템과 정보 보안 시스템에 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2002-000-01188-0(2002)) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] J. J. K O Ruanidh, W. J. Dowling, and F. M. Boland, "Watermarking digital images for copyright protection," *IEEE Proc. Vis. Image Signal Processing*, vol. 143, no 4, pp. 250-256, 1996.
 [2] N. Towghi, B. Javidi, and Z. Lou, "Fully phase encrypted imageprocessor," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, pp. 1915-1927, 1999.
 [3] E. Koch, J. Rindfrey, and J. Zhao, "Copyright protection for

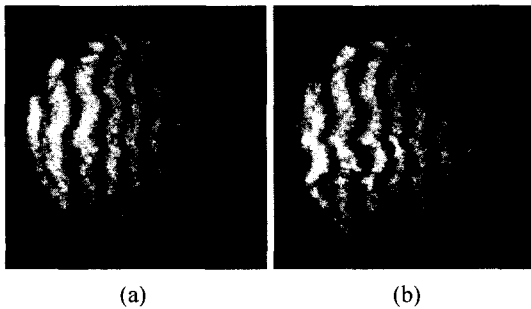


그림 8. 마흐-젠더 간섭 실험을 통해 얻은 간섭무늬. (a) LCD의 간섭무늬, (b) LCD의 위상변조된 간섭무늬.

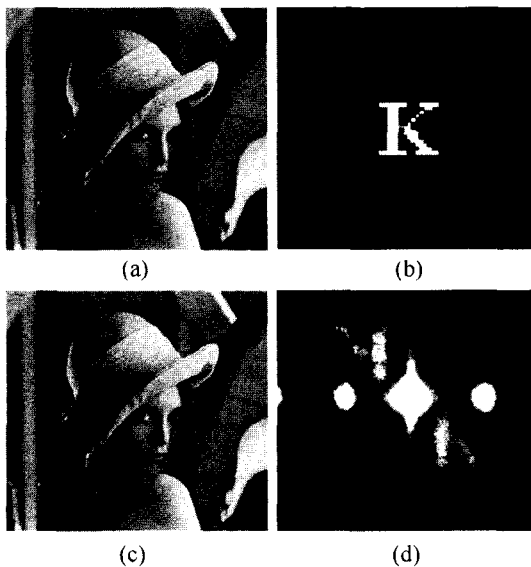


그림 9. 실험에 사용된 입력 영상 및 결과 영상: (a) 원 영상, (b) 마크영상, (c) 워터마킹된 영상, (d) 추출된 마크영상.

- multimediate data," in digital Media and Electronic Publishing. New York. Academic, 1996, pp. 203-213.
- [4] N. Takai and Y. Mifune, "Digital watermarking by a holography technique," *Appl. Opt.*, vol. 41, pp. 865-373, 2002.
- [5] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 1268-1270, 1997.
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, chap. 9, pp. 259-392 (McGraw-Hill, San Francisco), 1968.
- [7] J. Y. Kim, S. J. Park, S. J. Kim, J. K. Bae, Y. H. Doh, and C. S. Kim, "Optical encryption system using a computer generated hologram," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 4, no. 1, pp. 19-22, 2000.
- [8] 박세준, "결합변환 상관기의 여현 위상특성을 이용한 광 암호화 방법," 경북대학교 박사 학위 논문, 2001.
- [9] M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, "Optimum encoding of binary phase-only filters with a simulated annealing algorithm," *Optics Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 545-547, 1989.

Digital watermarking using binary phase hologram and optical interferometer

Byung-Yeol Kim, Dong-Hoan Seo[†], Kyu-Bo Cho, Chang-Mok Shin, and Soo-Joong Kim

School of Electrical Engineering & Computer Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, KOREA

[†]E-mail: dhseo@palgong.knu.ac.kr

Cheol-Su Kim

School of Computer and Electronic Engineering, Gyeongju University, Kyungpook 780-712, KOREA

(Received April 2, 2003, Revised manuscript June 12, 2003)

We propose a new optical watermarking method, which can protect the copyright of digital data, using a binary phase hologram and a Mach-Zehnder interferometer. Using a simulated annealing algorithm, the binary phase hologram of the mark image to be hidden is designed. We obtained a watermarked image by linearly superposing the hologram, which is the watermark, in the original image. The extraction processing of the mark image from the watermarked image is achieved by placing the phase-modulated watermarked image on a LCD in one path and the phase-modulated original image on another LCD in the other path in the Mach-Zehnder interferometer. The mark image was obtained by inverse Fourier transforming the phase modulated interference intensity. We confirmed that the proposed method is robust for the cropped images through computer simulation, and we implemented it optically using LCDs which are phase modulation devices.

OCIS Codes : 090.2880, 100.0100.