

論文99-36D-10-8

홀로그래픽 메모리시스템에서 위상 다중화 인코딩에 관한 연구

(A Study on a Phase-encoded Multiplexing Method in Holographic Memory System)

趙 炳 澈 *, 金 奎 兌 *, 吉 相 瑾 **, 金 恩 洙 *

(Byung-Chul Cho, Kyu-Tae Kim, Sang-Keun Gil, and Eun-Soo Kim)

요 약

본 논문에서는 홀로그래픽 메모리 시스템에서 효율적인 위상다중화를 위하여 기준빔으로 구현되는 네가지 형태의 위상코드를 생성시켰다. 프로그램적으로 32×32 의 동일한 픽셀수로 발생된 위상코드에 대하여 어드레스빔의 개수를 계산하였고, 실제 광시스템에서 SLM의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%의 에러율을 갖는 위상값을 의도적으로 부가하여 네 가지 형태의 위상코드들에 대한 각각 자기상관성분 및 상호상관성분을 시뮬레이션을 통해 계산함으로써 위상코드간의 cross talk 및 신호대 잡음비를 비교, 분석하였다. 그 결과 32×32 의 픽셀수에 대해서는 의사랜덤 위상코드의 상호상관에 의한 평균값이 0.067로 다른 형태의 랜덤위상코드들의 신호대 잡음비와 비교하여 가장 작게 나타났으며, 임의의 어드레스빔에 의한 순간적인 영상누화를 나타내는 표준편차값도 의사랜덤 위상코드가 0.0113으로 가장 작게 나타났다. 또한, 픽셀수에 따른 영향을 분석하기 위해 32×32 , 64×64 , 128×128 , 256×256 과 같이 어드레스의 빔 크기에 해당하는 픽셀수를 증가하여 같은 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Abstract

For an effective phase-multiplexing in holographic memory system, four types of phase code used as reference beam are generated. In case of 32×32 address beam, a phase error with 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% error rate, is purposely added to the real phase values in order to consider the practical SLM's nonlinear characteristics of phase modulation in computer simulation. cross talks and SNRs are comparatively analysed for these phase codes by the auto and cross-correlation. Pseudo-Random(PSR) Phase Code has the lowest cross-correlation mean value of 0.067 among four types of Phase Code, which means the SNR of the PSR is higher than other Phase Codes. Also, the standard deviation of the PSR phase code indicating the degree of recalled data degradation is the lowest value of 0.0113.

I. 서 론

* 正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

** 正會員, 水原大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng., Suwon Univ.)

※ 본 논문은 한국과학재단 특정기초(97-0101-0301-3)
연구비 지원에 의해 이루어짐.

接受日字: 1999年5月12日, 수정완료일: 1999年9月27日

홀로그래픽 메모리(holographic memory) 기술은 광 굴절매질의 굴절율이 광의 세기에 반응하는 광굴절 효과(photorefractive effect)를 이용하여 매질 내에 정보를 저장할 수 있다는 사실이 발표된 이후 매질 내에 보다 많은 정보를 저장하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다.^[1] 홀로그래픽 메모리의 저장용량은 다중화 기술에 의해 결정되는데 지금까지 연구된 다중화 방법에

는 어드레스의 각도가 저장된 영상의 입력된 주소가 되는 각 다중화(angular multiplexing)^[2], 가변되는 파장의 광원을 이용하는 파장 다중화(wavelength multiplexing)^[3], 서로 직교하는 위상을 이용하는 위상코드 다중화(phase-code multiplexing)^[4] 등이 연구되고 있다.

각 다중화 방법은 AOD(acousto-optic deflector)나 스텝모터 혹은 움직이는 창^[5]을 이용하여 브래그 각(Bragg angle)을 만족할 수 있도록 어드레스빔을 제어하게된다. 이러한 각 다중화 방법 중에서 스텝모터를 이용하는 경우 기계적인 오차로 복원 영상의 누화가 생기는 단점이 있으며, AOD는 전자적으로 어드레스빔을 정확하게 제어할 수 있고 매우 빠른 랜덤 액세스가 가능한 장점이 있는 반면 고가의 복잡한 광학 및 시스템이 요구된다는 단점이 있다. 또한, 움직이는 창을 이용하는 방법은 앞의 두 가지 방법들의 단점을 보완할 수 있는 새로운 기법이지만 창을 통과하는 빛만을 이용하기 때문에 빛의 이용효율이 떨어진다는 단점이 있다. 파장 다중화 방법 역시 정확하면서 높은 분해능의 파장 선택도를 갖는 고가의 가변 가능한 코히어런트 광원이 요구된다.

한편, 위상코드 다중화 방법은 비교적 간단한 구조의 시스템으로 기계적인 움직임 없이 정확하면서 고속의 랜덤 액세스에 의한 다중화가 가능하다는 장점등으로 사람들에게 의해 연구되어 왔다. 1977년 T. Krile와 Morozov^[6]에 의해 각선택도를 갖지 않은 평면홀로그래프에서 기준빔을 코드화하여 cross talk을 최소화할 수 있는 조건을 발표한 이후, 1982년에는 E. Kral^[7]이 랜덤확산기(random diffuser)를 이용하여 불륨 홀로그래프를 위한 직교코드의 사용을 실험을 통해 제안하였고, 1991년에는 C. Denz^[8]와 Y. Taketomi에 의해 직교성을 갖는 Hadamard 행렬을 위상형 공간광변조기(SLM:spatial light modulator)를 이용하여 홀로그래픽 메모리 다중화 실험을 수행하였다.

일반적으로 위상코드 다중화방법은 물체빔과 어드레스빔을 고정시킨 후, 어드레스빔의 위상코드를 변화시켜 광굴절매질 내에 많은 양의 정보를 다중화하는 방법으로 위상코드 간의 직교성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 이때 0과 π 의 정확한 위상변조 및 어드레스빔들 간의 직교성이 보장되고 동시에 높은 저장 밀도를 갖기 위해서는 많은 수의 어드레스를 갖어야 한다. 이러한 관점에서 앞에서 언급한 방법들의 특징을 살펴보면 랜덤 확산기를 이용한 순수한 위상코드 방법의

경우 많은 수의 어드레스를 생성할 수는 있으나 완전한 직교성이 보장되지 않아 높은 cross talk이 발생하고, 어드레스의 정확한 제어가 어려운 단점을 갖고 있어서 위상코드 다중화 방법으로 사용하기에는 많은 문제가 있다. 또한, SLM을 이용한 Hadamard Code(HC)의 위상코드 다중화의 경우, HC가 갖는 직교특성과 광학적 구현이 용이하다는 장점이 있지만 위상변조시 사용되는 기존의 SLM의 전자적 및 물리적 특성으로 위상변조에러가 발생하여 많은 영상의 기록과 복원시 영상누화(cross talk)가 발생할 수 있다. 그리고 HC는 2의 거듭제곱으로만 구현하기 때문에 SLM의 픽셀 이용효율이 낮기 때문에 많은 수의 어드레스를 갖지 못한다는 단점을 갖고 있다.^[9]

따라서 본 논문에서는 위상코드로 사용될 수 있는 여러 가지 코드들을 프로그램적으로 랜덤하게 생성한 후 SLM의 비선형적 위상변조특성을 고려하여 모든 위상코드에 0~25%의 랜덤하게 발생된 위상변조 에러값을 의도적으로 부가하여 에러값에 따른 각각의 위상코드들에 대한 어드레스의 갯수 및 자기상관값과 상호상관값들을 구하고 이것을 이용하여 영상누화의 영향을 알기 위한 신호대 잡음비(SNR)를 비교 분석함으로써 실제 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상코드 다중화에 적용하기 위한 효율적인 위상인코딩 방법을 제시하고자 한다.

II. 위상코드 다중화 방법의 특성분석

위상코드를 이용하여 광굴절매질에 여러 개의 영상을 다중화할 경우 복원영상의 누화를 방지하기 위해서는 cross talk을 최소화 해야한다. 이를 위해서는 어드레스빔들의 자기상관성분이 거의 임펄스 함수와 같은 형태를 갖추고 동시에 상호상관성분들은 존재하지 않아야 한다. 즉, 다중화에 사용되는 복소함수의 어드레스빔들은 cross talk을 최소화하기 위해 직교성이 요구되며, 복원영상의 누화를 방지하기 위해서는 SLM의 위상과 진폭변조의 정확한 제어가 필요하다.

그림 1은 간단한 위상코드 다중화 방법을 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템을 나타낸 것으로 일반적으로 위상코드 다중화 방법은 다른 다중화 방법들과 비교할 때, 어드레스빔의 기계적 움직임이 필요하지 않을 뿐만 아니라 빠른 액세스, 높은 광효율 및 광원의 파장 변화가 필요 없다는 등의 장점을 갖고 있다.

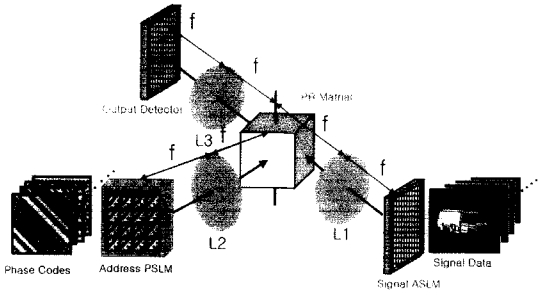


그림 1. 위상코드 다중화를 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템

Fig 1. Hologram memory system using phase code multiplexing.

위상코드 다중화 방법에서 각각의 어드레스빔들은 균일한 위상분포를 갖는 평면파의 집합으로 구성되며, 어드레스빔으로 사용될 위상코드는 영상의 정확한 기록과 복원에 사용된다. 따라서 N 개의 영상을 저장하기 위해서는 N 개의 위상코드가 필요하다. 기존의 대표적인 위상코드 다중화 방법에는 랜덤 확산기나 광섬유의 스펙클 패턴^[10]을 이용하는 방법과 “+1”과 “-1”의 두 가지 값을 갖는 HC를 이용하는 방법^[8] 등이 있다. 랜덤 확산기나 광섬유의 스펙클 패턴을 이용할 경우 어느 정도의 어드레스빔 사이에 상호상관 성분이 존재하기 때문에 완전한 직교성을 갖는 어드레스빔을 만들 수 없다. 복원영상 간의 cross talk이 발생하여 SNR이 저하되는 원인으로 작용한다. 또한, HC를 구성하는 픽셀수가 2^n 형태로 존재하기 때문에 SLM의 픽셀 이용 효율이 낮아진다. 예를 들어, $100(10 \times 10)$ 개의 픽셀로 구성된 SLM을 이용하여 HC를 광학적으로 구현할 때, 이용 가능한 SLM의 픽셀수는 2^6 개로 한정되어, 거의 절반 정도의 픽셀을 사용하지 못한다. 따라서 SLM의 픽셀 이용효율이 낮을 뿐만 아니라 어드레스의 수가 크게 제한된다.

위상코드를 이용한 효과적인 홀로그래픽 메모리 시스템을 구성하기 위해 요구되는 조건은 많은 어드레스를 갖으면서 인접 영상간의 cross talk에 의한 영상누화를 최소화할 수 있음과 동시에 이와 같은 위상코드를 실제 시스템에 적용할 경우 발생할 수 있는 위상변조 에러에도 강인해야 한다. 실제적으로 SLM을 이용하여 위상코드를 변조할 경우 실험 상황에 따른 전기적 및 물리적인 영향으로 인한 비선형적인 특성으로 인해 정확하게 SLM의 모든 픽셀을 0과 π 로 변조하는 것이

어렵다.

본 논문에서는 위상코드 다중화에 이용된 여러 가지 방법들에 대하여 홀로그래픽 메모리 시스템에 많은 어드레스 개수를 갖음과 동시에 cross talk에 의한 영상누화를 방지할 수 있는 효율적인 위상코드를 구현하기 위해서 그림 2와 같은 네가지 위상코드를 프로그램적으로 생성하였다.

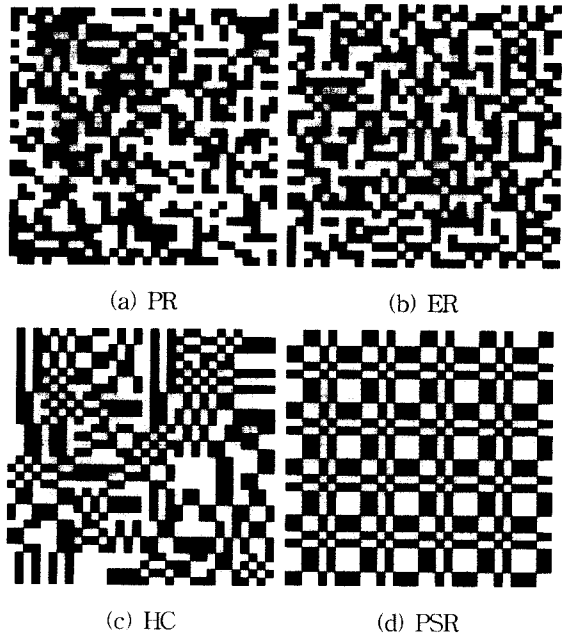


그림 2. 네가지 형태의 위상코드 (32×32)
Fig. 2. An four types of phase codes (32×32).

그림 2의 (a)는 Pure Random Code(PR)로서 랜덤 확산기나 광섬유의 스펙클 패턴 등에 의해 간단하게 생성될 수 있지만 특정한 영역에 “-1”과 “+1”의 위상값이 각각 집중될 가능성으로 인하여 높은 상호상관값을 갖을 수 있다. 또한, 여러 개의 위상코드를 이용하여 상호상관값을 구할 경우 “-1”과 “+1”의 위상값의 집중도가 랜덤한 분포를 갖기 때문에 불규칙적인 상호상관값을 갖게 된다. 순수한 랜덤 위상코드의 어드레스 개수, M_{PR} 은 어드레스빔의 픽셀수가 $n \times n$ 일 때, 하나의 픽셀이 “-1”과 “+1”의 두 가지 발생 가능한 위상값을 갖기 때문에 순열의 수 ${}_n P_r$ 에 의해 식 (1)과 같이 나타난다.

$$M_{PR} = (2!)^n \quad (1)$$

그림 2(b)는 PR의 단점을 보완하기 위해 생성된 Random Code with Equality(ER)로서 전체 영역을 임의의 블록단위($2 \times 2, 4 \times 4, \dots, m \times m$)로 구별하여 “1”과 “-1”의 위상값을 프로그램적으로 동일한 확률로 발생시킴으로서 상호상관성분의 발생원인인 특정한 영역에 동일한 위상값이 집중되는 것을 제한하였다. 그 결과 그림 2의 (b)에서와 같이 PR에 비하여 부분적으로 같은 코드가 집중되는 것이 덜하다. 또한, ER의 경우 블록단위의 레벨에 따라 나타나는 상호상관성분과 어드레스빔의 개수가 다르게 나타난다. ER의 어드레스빔 개수를 구하기 위해 임의의 한 블록을 $m \times m$ (m -level)이라 하면 이 블록에서 발생될 수 있는 조합의 수에 의해 독립적으로 발생되는 경우의 수는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$M_{B-ER} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right) \quad (2)$$

여기서, 어드레스빔의 픽셀수를 $n \times n$ 라고 하면, 블록단위가 m -level일 경우 조합의 수 nC_r 에 의해 ER의 어드레스 개수, M_{ER} 은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$M_{ER} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right)^{\left(\frac{n}{m}\right)^2} \quad (3)$$

그림 2의 (c)는 직교코드인 HC을 나타낸 것으로 SLM을 통한 광학적 구현이 용이하지만 일반적으로 2의 정수제곱 형태로 구현되므로 어드레스의 개수가 크게 제한된다. 즉, $10 \times 10(100)$ 의 픽셀수를 갖는 SLM을 사용할 경우, 이용할 수 있는 픽셀의 개수는 $23 \times 23(64)$ 으로 약 56%정도의 이용효율로 떨어지게 된다.^[8] 또한, 상용 SLM의 비선형성과 액정을 감싸고 있는 유리의 박두께의 비균일성 등으로 인하여 구성성분들의 정확한 위상변조가 요구되는 HC 방법은 구성성분들이 랜덤한 분포를 갖는 다른 세 가지 위상코드 방법에 비하여 SLM을 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템에 적용하기에는 제한이 있다. 식 (4)는 HC의 어드레스 개수, M_{HC} 을 나타낸 것이다.

$$M_{HC} = 2^n \quad (4)$$

그림 2의 (d)는 PSR로서 대역확산 통신시스템에서

동일한 대역폭에서 최소의 간섭을 갖도록 정보를 코드화 하는데 사용되는 것으로서, 가장 일반적이고 간단한 1차원적인 PSR 발생기는 그림 3과 같이 구성된 궤환 쉬프트 레지스터(feedback shifter register)에 의해 얻을 수 있다.

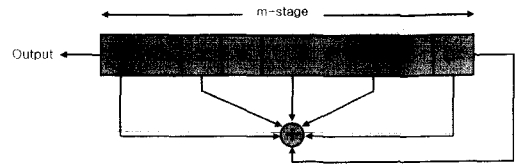


그림 3. 궤환 쉬프트 레지스터

Fig 3. Feedback shifter register.

쉬프트 레지스터는 초기화된 레지스터의 임의의 n 번째 값과 마지막 m 번째 값을 XOR한 후, 여기서 얻어진 결과값을 다시 입력하는 형태로 구성된다. 레지스터의 각 코드(bit)값, 즉, “1”과 “0”에 따라 정의되는 출력값은 결국 m 개의 레지스터의 경우 최대 2^m 을 주기로 반복된다. 그러나 모든 상태가 0인 경우에는 XOR의 출력이 0이 되므로 실제 주기는 $2^m - 1$ 이 된다. 여기서 $2^m - 1$ 의 크기를 가진 1차원 PSR를 이용하여 2차원으로 확장할 경우 1차원으로 생성된 PSR의 코드값들을 순서적으로 추출한 후, 코드값이 “1”이면 1차원 PSR를 그대로 사용하고, “0”이면 코드값들을 반전한 1차원 PSR를 처음 생성된 1차원 의사 랜덤코드열의 순서대로 확장시키면 2차원 의사 랜덤코드를 얻을 수 있다. 이러한 방법에 의해 $n \times n$ 의 픽셀수를 갖는 어드레스빔에서 생성될 수 있는 PSR의 어드레스빔의 개수 M_{PSR} 은 m 개의 레지스터를 사용한 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{PSR} = 2(2^m - 1)^2(m - 1)(n - 1) \quad (5)$$

식(5)와 같은 어드레스를 갖는 2차원 PSR을 위상형으로 이용하기 위해서 “0”으로 된 코드를 “-1”로 변환시켜 최종적인 2차원 위상형 PSR을 생성한다. 그림 4는 2차원 PSR의 발생과정을 나타낸 것이다.

표 1은 픽셀수 32×32 를 기준으로 한 2차원적인 위상코드의 어드레스의 개수를 식 (1),(2),(4),(5)에 의하여 구한 결과값이다. 이러한 수치는 발생가능한 경우의 수를 종합한 결과값으로 PR이 2.77×10^7 으로 가장 많

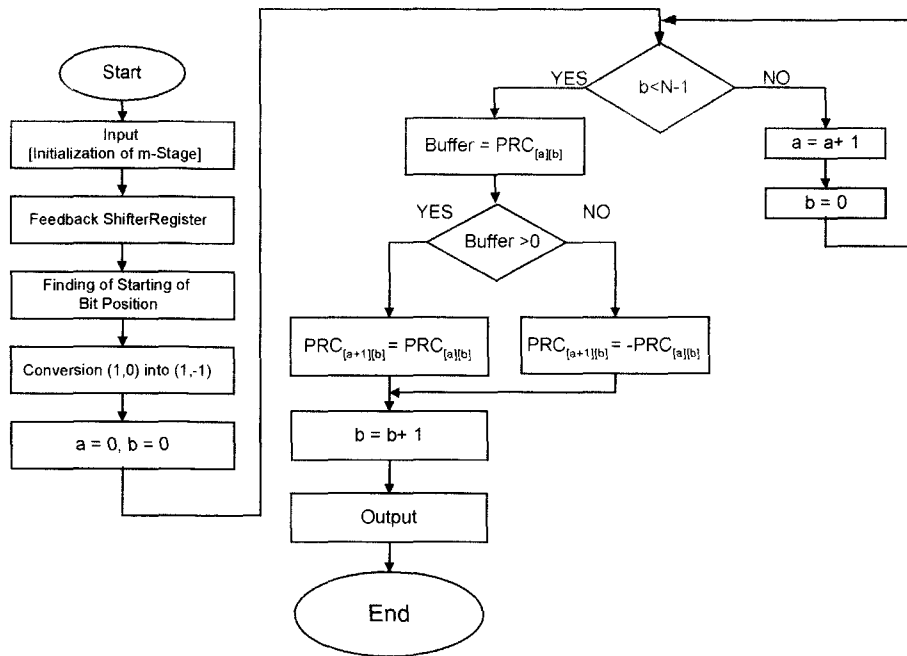


그림 4. 2차원 PSR의 흐름도
Fig. 4. Flow chart of the 2D PSR.

표 1. 기준빔에서의 어드레스의 갯수(32×32)
Table 1. The number of address in a reference beam(32×32)

구 분	Phase Code (32 × 32)				
	PR	RE(2level)	RE(4level)	HC	PSR
어드레스 갯수	2.77×10^{71}	1.609×10^{123}	1.03×10^{263}	4.295×10^9	1.8447×10^{19}

은 어드레스빔을 갖으며, HC의 경우 가장 작은 어드레스의 개수를 가짐을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과값은 전체 발생가능한 경우의 수를 나타낸 것이므로 모든 경우의 수를 실제 홀로그래픽 메모리시스템에 활용하기에는 한계가 있다.

III. 위상에러를 갖는 위상코드의 cross talk 영향 분석

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 모든 위상코드들은 실제적인 광학적 구현시 위상코드를 표현하는 SLM의 광학적 특성으로 인한 위상변조 에러를 고려하여 프로그램적으로 구현된 네 가지 위상코드들에 각각 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%씩의 오차율을 갖는 위상에

러를 의도적으로 부가하였다. $f(x, y)$ 와 $g(x, y)$ 를 각각 위상에러가 삽입되기 전과 후의 어드레스빔이라고 한다면, 식 (6)와 같이 위상에러가 부과된 위상코드 어드레스빔을 나타낼 수 있다.

$$g(x, y) = f(x, y) + e(x, y) \tag{6}$$

여기서, $e(x, y)$ 는 위상코드에 의도적으로 부과된 위상에러 함수로 위상코드 -1과 +1에 대하여 위상오차를 갖으며, 위상코드의 전체 크기에 부분적으로 랜덤하게 삽입된다. 이러한 방법에 의해 SLM에 의한 위상코드와 유사하게 표현된다고 가정하면, 위상코드들은 그림 1에서와 같이 렌즈에 의해 복소함수 형태로 광굴절 매질에 전파되어 위상코드 다중화 방법의 어드레스로 동작하게 된다. 이러한 어드레스들에 의한 cross talk

영향을 분석하기 위해 식 (7)과 같이 어드레스들에 대한 상관관계를 조사하였다. 이때 $G(f_x, f_y)$ 를 어드레스 벡 $g(x, y)$ 에 대한 푸리에 변환이라고 한다면 광굴절매질에 전파되는 어드레스벡들 간의 상관성분은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FT\{|g(x, y)|^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_i(f_x, f_y) G_j^*(\xi - f_x, \eta - f_y) d\xi d\eta \quad (7)$$

여기서 G_i 와 G_j 는 i 와 j 번째의 어드레스벡을 각각 나타내며, FT 는 푸리에 변환을 의미한다. 홀로그래픽 메모리 시스템에서 cross talk의 발생을 최소로 제한하기 위해서는 식 (8)과 같은 조건을 만족해야 한다. 즉, 어드레스벡의 자기상관성분은 델타함수로 근사화되고 동시에 상호상관성분은 제거되어야 한다.

$$FT\{|g(x, y)|^2\} \approx \begin{cases} 1 & \text{if } i=j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

식 (9)는 1로 정규화된 자기상관성분값에 대한 상호상관값의 비를 이용하여 위상코드의 SNR을 나타낸 것으로 상호상관성분은 식 (9)에 나타난 바와 같이 SNR과 반비례하므로 상호상관성분의 발생을 최소화하면 SNR이 향상된다.

$$SNR[dB] = 10 \log_{10} \frac{A_i}{C_i} \quad (9)$$

여기서, A_i 와 C_i 는 각각 정규화된 자기상관값과 상호상관성분값을 나타낸다. 또한, 다중화 방법에 의해 여러 개의 저장된 영상을 복원할 경우, 상호상관성분의 크기뿐만 아니라 전체적인 크기가 균일하지 않고 불규칙적인 값을 갖으면 연속적인 영상의 복원에 있어서 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 상호상관성분의 평균값 및 표준편차의 값이 낮게 유지되어야 한다. 일반적으로 랜덤 신호에 대한 평균값은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$E(x) \equiv m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad (10)$$

여기서, $E(x)$ 와 m_x 는 x 에 대한 평균값을 나타내고, $p(x)$ 는 x 의 확률밀도함수로 x 가 발생될 확률값을 의미한다. 따라서, x 의 변화율과 표준편차는 각각 식

(11)와 식 (12)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E[(x - m_x)^2] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 p(x) dx \\ &= E[x^2 - 2xm_x + m_x^2] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_x = \sqrt{E[x^2 - 2xm_x + m_x^2]} \quad (12)$$

식 (9)와 (10) 및 식 (12)에 의하여 얻어진 상관관계에 대한 평균값과 표준편차값을 이용하여 시뮬레이션에 사용된 각각의 위상코드에 대한 cross talk의 영향 및 어드레스들의 안정적인 동작율을 분석하여 홀로그래픽 메모리 시스템의 어드레스벡에 안정적으로 사용될 수 있는 보다 효율적인 위상코드를 제시할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 결과분석

그림 5는 위상변조시 비선형적인 특성으로 인한 SLM의 위상에러를 고려하여 각각의 위상코드들에 0%에서 25%로 위상에러를 변화시키면서 얻은 SNR을 나타낸 결과이다. 이때 얻어진 각각의 위상코드들에 대한 SNR은 통계적인 근사값을 얻기 위해 32×32의 동일한 픽셀수를 갖는 프로그램적으로 랜덤하게 발생된 501개의 다른 위상코드에 대한 자기상관성분과 상호상관성분의 평균값을 이용하였다.

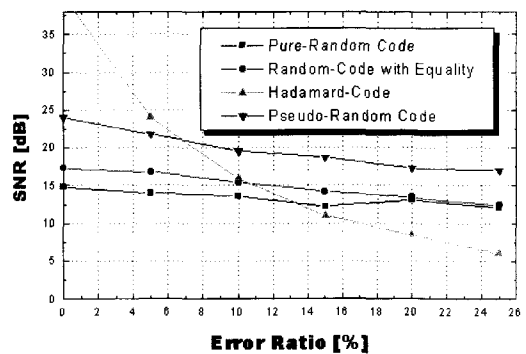


그림 5. 위상에러에 따른 SNR
Fig 5. SNR according to phase error.

그림 5에서 보여진 바와 같이 위상에러에 대한 변화는 7%까지는 HC가 가장 좋은 신호대 잡음비를 나타내고 있으나 10%이후에는 위상에러에 따른 영향이 비교적 심함을 알 수 있다. 이것은 HC의 경우 위상에러가

존재하지 않는 경우 완전한 직교코드로 사용될 수 있지만 SLM을 이용하여 많은 양의 영상을 저장할 경우 SLM의 비선형적인 위상특성 및 광학시스템 상에서 발생될 수 있는 위상에러로 인하여 복원영상이 cross talk의 영향을 받을 가능성이 많아진다는 것을 의미한다. 그러나 랜덤한 위상특성을 갖는 다른 위상코드들의 경우 비선형적으로 랜덤한 위상에러에도 고유의 랜덤한 특성으로 인하여 비교적 영향을 덜 받는다. 특히, 그림 5에서와 같이 프로그램적으로 직교성을 갖도록 설계된 PSR의 경우 다른 랜덤 위상코드들에 비해 위상에러의 영향을 가장 최소화시킬 수 있다.

그림 6, 7, 8, 9는 PR, ER, HC 및 PSR의 방법으로 생성된 32×32의 픽셀수를 갖는 501개의 위상코드들 중에서 임의로 선택한 두 개의 어드레스빔을 상관시켜 얻은 자기상관성분과 상호상관성분을 1로 정규화하여 각각 나타낸 것으로서, 자기상관성분들은 전체적으로 델타함수로 근사화되지만 cross talk에 비교적 많은 영향을 미치는 상호상관성분의 경우 위상코드에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다. 위상코드에 대한 500번의 상호상관결과의 최대값은 0.16, 0.11, 0.14, 0.054으로 각각 나타났다.

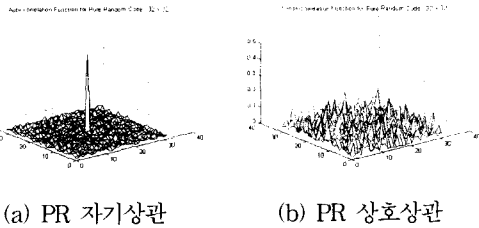


그림 6. PR의 (a)자기상관과 (b) 상호상관
Fig 6. (a)Auto-correlation & (b)Cross-correlation of PR.

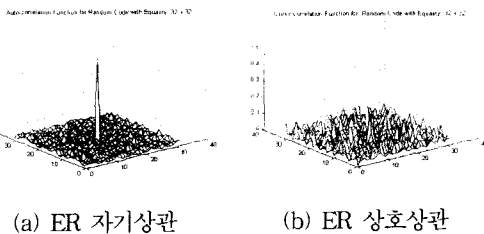


그림 7. ER의 자기상관성분과 상호상관성분
Fig. 7. (a)Auto-correlation & (b)Cross-correlation of ER.

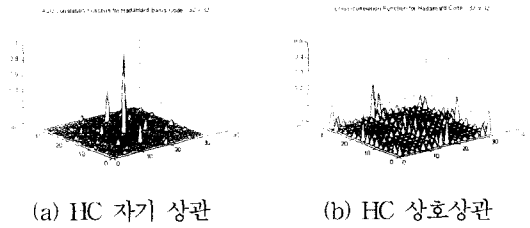


그림 8. HC의 (a)자기상관과 (b) 상호상관
Fig 8. (a)Auto-correlation & (b)Cross-correlation of HC.

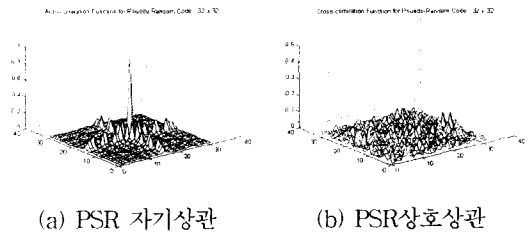


그림 9. PSR의 (a)자기상관과 (b) 상호상관
Fig. 9. (a)Auto-correlation & (b)Cross-correlation of PSR.

그림 10, 11, 12, 13은 임의로 선택된 하나의 어드레스빔을 다른 500개의 어드레스빔과 각각 상호상관시킨 결과를 나타낸 것이다. 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상코드 다중화에서는 어드레스빔간의 상호상관값이 낮아야 하고, 동시에 모든 어드레스빔들의 상호상관값이 거의 일정해야 연속적인 복원영상을 관측시 임의의 복원영상에 의한 이미지의 질 저하를 방지할 수 있다. 또한, 서로 직교성을 갖는 많은 어드레스빔을 갖고 있어야 보다 높은 저장밀도를 갖을 수 있다.

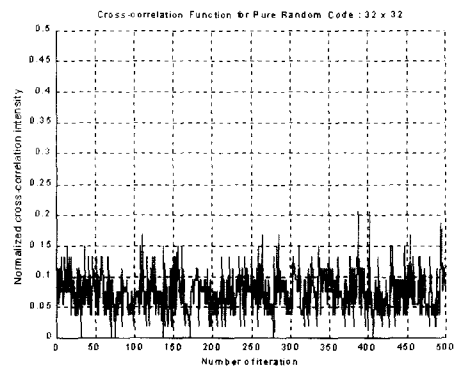


그림 10. PR을 500번 상호상관 시킨 결과
Fig 10. Cross-correlation result of PR. (iteration : 500)

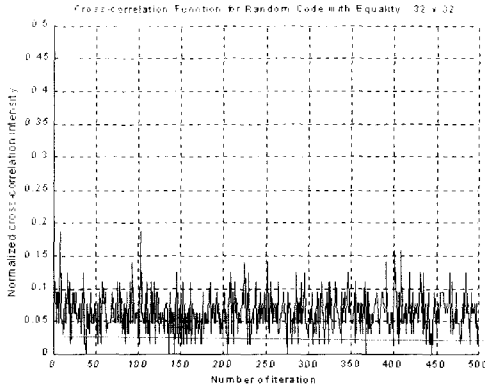


그림 11. ER을 500번 상호상관시킨 결과
Fig. 11. Cross-correlation result of ER.
(iteration : 500)

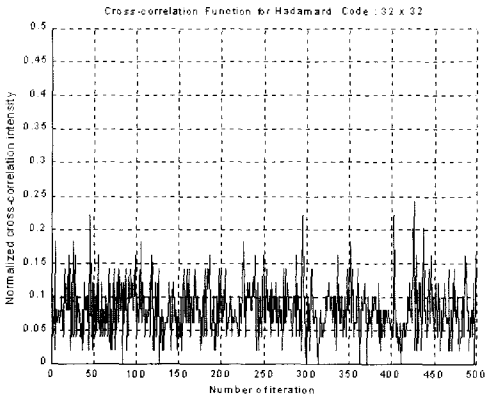


그림 12. HC를 500번 상호상관시킨 결과
Fig. 12. Cross-correlation result of HC.

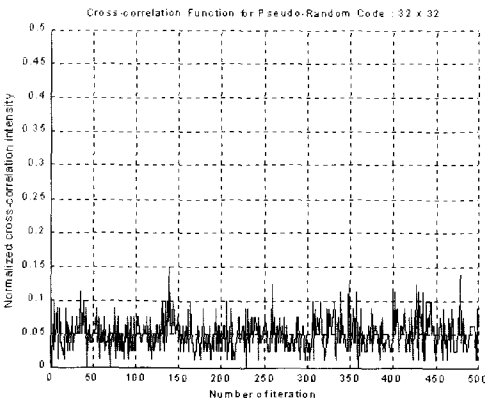


그림 13. PSR을 500번 상호상관시킨 결과
Fig. 13. Cross-correlation result of PSR.
(iteration : 500)

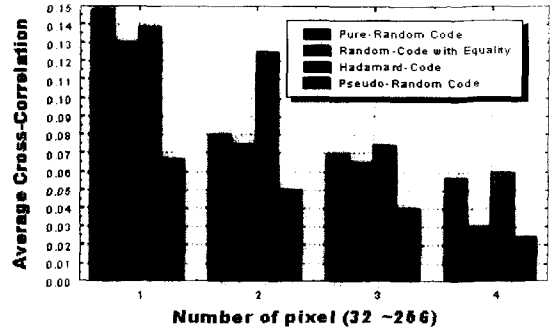


그림 14. 픽셀수에 따라 500번 상호상관의 평균값
Fig. 14. Average on cross-correlation dependence on number of pixel (iteration : 500).

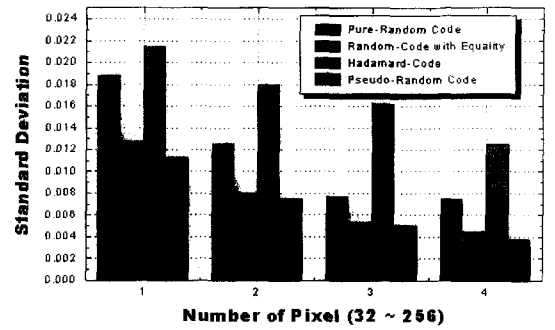


그림 15. 픽셀수에 따라 500번 상호상관의 표준편차
Fig. 15. Standard deviation on cross-correlation dependence on number of pixel (iteration : 500).

그림 14와 15는 각각의 위상코드를 이용하여 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차를 어드레스의 픽셀 수를 32×32 , 64×64 , 128×128 , 그리고 256×256 으로 변화시키면서 구한 것이다. 그림 14의 세로축은 픽셀 수를 차례로 표현한 것으로 픽셀의 수가 증가할수록 전체적인 상호상관에 의한 평균값이 감소함을 알 수 있다. 표준편차에 의한 상호상관값의 변화를 분석에서도 마찬가지로 어드레스의 픽셀 수가 증가할수록 작아짐을 볼 수 있다. 그림 14와 15에서처럼 cross talk에 영향을 주는 상호상관성분의 평균값과 표준편차값의 분포로 보아 PSR이 전체적으로 가장 나쁜 특성을 갖는 PR보다는 평균값에 있어서 픽셀수에 따라 약 2~3배 정도 낮게 나타나며, HC에 비해서도 약 1.5~2배 정도 낮게 나타났다. 또한, 표준편차값에 있어서도 변동폭이 가장 심하게 나타나는 HC에 비하여 약 2~3배 정도 차이가 남을 알 수 있다. 그림 16은 픽셀 수가 32×32 인 500개의 어드레스를 이용한 네 가지 위상코드들에 대한 SNR을 나타낸 것이며, 그림 17은

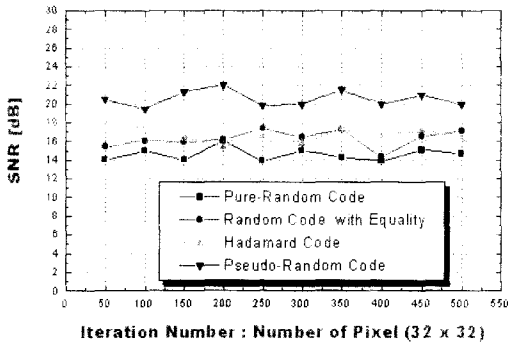


그림 16. 위상코드 방법에 따른 SNR
Fig. 16. SNR dependence on phase coding schemes.

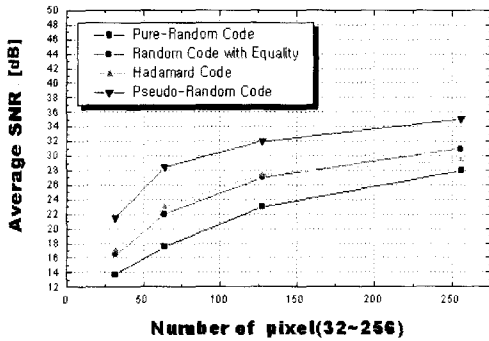


그림 17. 픽셀 수에 따른 SNR의 변화
Fig. 17. SNR dependence on number of pixel.

같은 방법으로 픽셀수를 64×64, 128×128, 그리고 256×256으로 점차적으로 증가시킬 경우 얻어지는 각각의 위상코드에 대한 SNR을 나타낸 것이다. 그림 16과 17에서 보는 바와 같이 픽셀 수에 비례하여 전체적인 SNR이 증가하지만 PSR이 다른 위상코드들에 비하여 SNR이 약 1.5배 정도 높게 나타남을 알 수 있다.

표 2는 앞에서 언급한 네 가지 방법에 의해 생성된 32×32의 크기를 갖는 위상코드를 이용하여 500번의 상호상관시킨 결과에 대한 평균값과 표준편차값을 비교하여 나타낸 것이다. PSR에 의한 상호상관 결과가 다른 방법들에 비하여 평균값이 거의 두 배정도 낮게 나타났으며 이 결과값은 SNR과 반비례하기 때문에 SNR도 상대적으로 높은 결과값을 얻을 수 있었다. 또한, 상호상관성분의 변화정도를 측정할 수 있는 표준편차값도 가장 낮은 값을 갖기 때문에 거의 일정한 상호상관성분을 갖음을 알 수 있다.

표 2. 500번 상호상관시킨 결과에 대한 평균값, 표준편차와 신호대 잡음비

Table 2. Mean, standard deviation & SNR for cross correlation (iteration : 500).

상호상관	Phase Code (32 × 32)				
	PR	RE(2level)	RE(4level)	HC	PSR
평균값	0.148	0.13	0.134	0.139	0.067
표준편차	0.0188	0.0128	0.0131	0.0215	0.0113
SNR	13.7	16.8	15.9	16.5	21.5

V. 결론

본 논문에서는 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상코드 다중화에 사용될 가장 효율적인 위상코드를 구현하기 위해 기존에 위상코드 다중화에 많이 사용되고 있는 HC를 비롯하여 PR, ER 및 PSR에 대한 상호상관값과 어드레스 갯수를 비교 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 각각의 방법들은 실제적인 광시스템에서 위상코드를 표현하는 SLM의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%씩 에러율을 갖는 위상값을 의도적으로 부과하여 시뮬레이션을 하였으며 사용된 샘플은 각각 프로그램적으로 생성된 501개의 위상코드 어드레스를 사용하였다. 또한, 어드레스 빔의 크기변화에 대한 영향을 분석하기 위해 픽셀수를 32×32, 64×64, 256×256, 그리고 512×512 하여 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, 32×32의 빔크기를 기준으로 할 때 상호상관의 특성은 PSR에 의하여 구현된 위상코드의 평균값이 0.067로 cross talk에 의한 영향이 평균적으로 다른 방법들에 비하여 거의 2배정도 낮기 때문에 상대적으로 높은 SNR을 갖음을 알 수 있다. 또한, PSR의 표준편차값이 0.0113으로 가장 낮게 나타나기 때문에 특정한 어드레스빔에 의한 영상누화에 미칠 확률이 가장 낮은 것으로 나타났다. 그리고 어드레스빔의 픽셀수가 증가함에 따라 PSR을 비롯한 모든 위상코드들이 거의 선형적으로 SNR이 향상되었다. 따라서, 위상변조 에러를 고려한 실제적인 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상 다중화 방법으로 PSR을 사용할 경우 다른 방법들에 비하여 상대적으로 높은 SNR과 안정적인 위상코드 어드레스빔의 구현이 가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] P. J. Van Heerden, "Theory of optical information storage in solids," *Appl. Opt.* vol.2, pp. 393-400, 1963.

[2] F. H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.* vol. 18, no.11, pp. 915-917, 1993.

[3] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by orthogonal wavelength multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.* vol. 17, no. 20, pp. 1471-1473, 1992.

[4] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Comm.* vol. 85, pp. 171-176, 1991.

[5] S. G. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, "Non-Mechanical Angular Multiplexed Holographic Memory System using Moving Window on Liquid Crystal Display," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 1A/13, 1999.

[6] T. F. Krile, M. O. Hagler, W. D. Redus, and J. F. Walkup, "Multiplex holography with chirp-modulated binary phase-coded reference beam masks," *Appl. Opt.* 16, 3131-3135, 1977.

[7] E. L. Kral, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Correlation properties of random phase diffusers for multiplex holography," *Appl. Opt.* 21, 1281-1290, 1982.

[8] Z. Wen, and Y. Tao, "Orthogonal codes and cross talk in phase-code multiplexed volume holographic data storage," *Opt. Com.* 148, 1998.

[9] M. C. Bashaw, J. F. Hearne, A. Aharoni, J. F. Walkup, L. Hesselink, "Cross-talk considerations for angular and phase-encoded multiplexing in volume holography," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, No. 10 p.1820 (1994).

[10] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Angular and speckle multiplexing of photorefractive holograms by use of fiber speckle patterns," *Appl. Opt.* vol. 37, no. 29, pp. 6969-6972, 1998.

저 자 소 개



趙炳澈(正會員)
 1972년 2월 8일생. 1998년 관동대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년~현재 광운대학교 전자공학과 석사과정. 주관심 분야는 홀로그래픽 메모리, 광신호처리, 스테레오스코픽,

3차원 디스플레이

吉相瑾(正會員) 第35卷D編第12號參照
 현재 수원대학교 전자공학과 교수

金奎兌(正會員) 第36卷D編第8號參照
 현재 광운대학교 전자공학부 대학원 박사과정

金恩洙(正會員) 第36卷D編第8號參照
 현재 광운대학교 전자공학과 교수