

위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템을 위한 CPC 위상코드의 성능 분석

정희원 조병철*, 김정진*, 김은수*

Performance Analysis of Complex Phase-code for Phase Multiplexed Holographic Memory System

Byung Chul Cho*, Jung Jin Kim*, Eun-Soo Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 최근 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 실질적인 구현을 위해 새로이 제시된 CPC(complex phase code)의 성능을 기존의 위상코드인 PR, RCE 및 WHM 등과 비교 분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 어드레스빔은 32×32의 픽셀크기로 고정하였고, 위상코드를 표현하는 상용 공간광변조기의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0~25%의 에러율을 갖는 위상 코드값을 의도적으로 부과하여 실험을 수행하였다. 또한, CPC 및 PR, RCE, WHM으로 코딩된 각 어드레스빔에 대한 자기상관 및 상호상관 값을 계산함으로써 위상코드간의 영상누화(crosstalk) 및 신호대 잡음비(SNR) 특성을 비교 분석하였다. 실험결과, CPC의 상호상관 결과의 평균값이 0.021, 표준편차값이 0.0113으로 다른 위상코드에 비하여 가장 작게 나타났으며, 신호대 잡음비는 27.4로 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, 32×32의 빔크기를 기준으로 할 때 CPC의 어드레스빔의 개수는 6.344×10⁴⁹으로 나타나 기존의 위상 코드에 비해 상대적으로 큰 것으로 분석되었다.

ABSTRACT

In this paper, performance of the CPC(complex phase code) which is recently proposed as a practical phase encoding method for phase-code multiplexed holographic memory system is comparatively analyzed with those of the conventional phase codes such as PR(pure random code), RCE(random code with equality), WHM(Walsh Hadamard Matrix). In computer simulation, the size of an address beam is fixed at 32×32 pixels and 0%-25% phase-error ratio in a pixel are intentionally added to the real phase values to consider the nonlinear phase-modulation characteristics of the practical spatial light modulator. From comparative analysis of crosstalks and signal-to-noise ratios for these phase codes by calculating auto-correlation and cross-correlation, it is found that the CPC have the lowest cross-correlation mean value of 0.021, the lowest standard deviation of 0.0113 and the highest signal-to-noise ratio(SNR) of 27.4 among the four types of phase code. In addition, from the calculation of the number of all possible address beams for these four types of phase code as the size of the address beam is fixed to 3232 pixels, the CPC is found to have 6.334×10⁴⁹ address beams, which are relatively higher number than that of the conventional phase codes.

* 광운대학교 전자공학과 국가지정 3차원 영상 미디어 연구실(iron@explore.kwangwoon.ac.kr, eskim@daisy.kwangwoon.ac.kr)

논문번호: 020417-1001, 접수일자: 2002년 10월 1일

※ 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원아래 수행되었습니다.

I. 서론

최근, 홀로그래픽 메모리 시스템에서 저장용량의 극대화를 위한 고밀도 다중화 기록방법으로 활발히 연구되고 있는 위상코드 다중화 기법은 물체빔과 어드레스빔을 고정시킨 후, 어드레스빔의 위상코드를 변화시켜 저장매질 내에 많은 양의 정보를 다중화 기록하는 방법으로 기준파의 기계적 움직임이 필요 없고, 높은 광효율 특성 및 고속 액세스의 정보저장이 가능하다는 등의 특징을 가지고 있다^[1].

일반적으로 위상코드 다중화 기법을 적용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 구현을 위해서는 위상 코드의 랜덤성과 코드 간의 직교성이 유지될 수 있는 효과적인 위상코드의 생성이 무엇보다 중요하다^[2]. 즉, 어드레스빔을 구성하는 픽셀들의 정확한 위상변조와 어드레스빔간의 상호상관값이 영으로 유지되어야 영상누화(crosstalk)가 없는 고밀도 다중화 기록이 가능하다.

위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템에서 대표적으로 사용되어온 위상코드에는 이론적으로 완전한 직교특성을 갖는 WHM(Walsh Hadamard matrix)이 있다. 이러한 WHM은 기본적으로 Walsh-Hadamard 변환 알고리즘으로 구성되는 정방형의 벡터로 직교특성을 갖는다^[3]. 그러나, 기존의 WHM 알고리즘으로 생성되는 위상코드 패턴은 $N=2^n$ 형태로 주어지기 때문에 공간광변조기(SLM: spatial light modulator)의 픽셀단위의 기준빔을 만들지 못하므로 SLM의 활용도가 크게 떨어지고 어드레스빔의 갯수도 크게 제한됨으로 많은 연구자들에 의해 $N \neq 2^n$ 인 경우의 WHM 구성 방법들이 제안되었다.

즉, 1933년 Paley^[4]는 정수 n 을 가진 $N=4n$ 의 WHM 구성에 대한 다양한 방법을 제시하였고, 최근 Z. Wen과 Y. Tao^[5] 등은 기존의 방법들의 단점을 극복하기 위해 $N=4p$ (p =홀수, M =기본 WHM의 갯수)의 WHM를 이용해 반복분해 알고리즘을 제안하였다. 또한, 홀로그래픽 메모리 시스템에 적용하기 위해 대역확산 통신시스템에서 동일한 대역폭에서 최소의 간섭을 갖는 PRC(pseudo random code)를 2차원적으로 확장한 알고리즘^[6]이 제안된 바 있다.

그러나, WHM 위상코드를 홀로그래픽 메모리 시스템에 적용하기 위해서는 정확한 위상변조가 요구되는데 상용 SLM의 비선형적 위상특성 등으로 위상에러가 발생함으로 실질적 응용이 어렵다^{[7][8]}. 따라서, 위상 다중화 기법을 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 효과적인 구현을 위해서는 픽셀간의

위상이 랜덤한 분포를 갖고면서도 완벽한 직교성이 보장될 수 있는 실질적인 위상코드의 개발이 요구되고 있다.

최근, 픽셀 간에 랜덤한 위상분포 및 코드간 직교성이 보장되는 새로운 위상코드로 CPC(complex phase code)가 제시됨으로써 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 실질적인 구현의 가능성을 제시하고 있다^[9].

따라서, 본 논문에서는 최근 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 실질적인 구현을 위해 새로이 제시된 CPC의 성능을 기존의 위상코드인 PR, RCE 및 WHM등과 비교 분석하고자 한다. 즉, 어드레스빔은 32×32 픽셀크기로 고정하고, 위상코드를 표현하는 상용 공간광변조기의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0~25%의 에러율을 갖는 위상코드값을 의도적으로 부과하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, CPC 및 PR(pure random code), RCE(random code with equality), WHM(Walsh Hadamard Matrix)으로 코딩된 각 어드레스빔에 대한 자기상관 및 상호상관 값을 계산함으로써 위상코드간의 영상누화(crosstalk) 및 신호대 잡음비(SNR) 특성을 각각 비교 분석하고자 한다. 또한, 각 위상코드를 사용하여 생성 가능한 어드레스빔의 갯수를 비교 분석함으로써 홀로그래픽 메모리 시스템에 적용 가능한 효율적인 위상코드으로써의 CPC의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

II. CPC 생성 알고리즘의 분석

1. 위상코드 다중화 기법의 특성

위상코드 다중화 기록방법은 그림 1과 같이 어드레스빔을 구성하는 평면파들 간에 직교특성을 갖도록 위상을 변조하여 기하구조적 변화없이 신호빔과의 간섭을 통해 고밀도로 정보를 저장기법이다^[10]. 여기서, 직교성이 보장되는 어드레스빔들은 독립적으로 작용하여 특정 데이터 페이지를 결정하는 주소가 됨으로^[11] 실질적인 어드레스빔을 구현을 위해서는 위상변조에 적합한 효율적인 위상코드의 생성이 요구된다.

일반적으로, 위상코드 다중화 기법에 사용되는 위상코드를 설계하기 위해서는 식 (1), (2)와 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\langle C_i, C_j \rangle = \sum_{x=1}^N C_j(x, y) \cdot C_i^*(x, y) \quad (1)$$

$$\langle C_i, C_j \rangle = \sum_{k=1}^N e^{i(\phi_k - \phi_k)} = N \cdot \delta_{ij} \quad (2)$$

(1)식에서, 위상 ϕ_{kj} 은 j 번째 저장하고자 영상에 대응하는 어드레스빔에 해당되고 ϕ_{ki} 은 i 번째 저장된 영상을 복원하기 위한 어드레스빔에 해당된다. 또한, N 은 픽셀수를 나타내며 C_i 과 C_j (* = 공액복소항)는 상관될 코드를 각각 나타낸다. 여기서, 어드레스빔에 의한 재생시 누화가 없는 영상을 복원하기 위해서는 어드레스빔의 자기상관성분($j=1$ 인 경우)은 델타함수로 상호상관성분($j \neq 1$ 인 경우)은 0으로 근사화 되어야 한다.

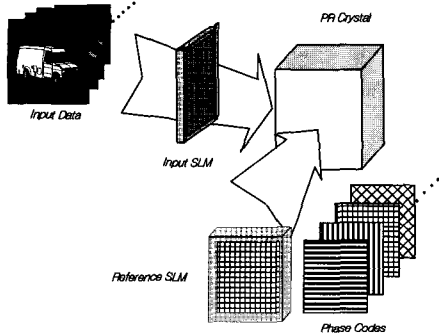


그림 1. 위상코드 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 개념도

2. ECPC/ C-ECPC 쌍을 이용한 CPC의 직교성 분석

새로이 제안된 CPC에서는 기존 위상코드에서 사용되고 있는 위상구간인 $(0, \pi)$ 에 $(-\pi/2, \pi/2)$ 의 위상구간을 추가함으로써 코드의 랜덤성과 직교성을 보장할 수 있는 새로운 위상코드이다. 일반적으로 어드레스빔의 위상성분은 복소수의 형식으로 표현되며 식 (3)과 같이 존스 벡터(Jones vector)로 나타낼 수 있다.

$$E = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\theta_x} \\ E_{0y} e^{i\theta_y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서, CPC를 구성할 4개의 위상구간을 존스 벡터로 표현하면 식 (4)와 같이 주어진다.

$$E(R, I) = \begin{cases} \exp(i2\pi) & = 1 = R_1 \\ \exp(i\pi) & = -1 = R_2 \\ \exp(i\pi/2) & = i = I_1 \\ \exp(-i\pi/2) & = -i = I_2 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, R_t 와 I_t ($t = 1, 2$)는 서로 동일한 발생 확률을 만족해야 함으로 R_t 와 I_t 의 확률밀도함수 $P_{X_t}(R_t)$, $P_{Y_t}(I_t)$ 에 대하여 통계적으로 독립의 조건을 만족하면 X_t 와 Y_t 에 대해 식(5)와 같이 동일한 발생확률을 만족함을 증명할 수 있다.

$$P_{X_t, Y_t}(R_t, I_t) = P_{X_t}(R_t) P_{Y_t}(I_t) \\ P(R_t) = P(I_t) = 0.5 \quad (5)$$

즉, 랜덤한 위상 원소 R_t 와 I_t 에 대해 동일한 발생확률을 갖고 상호 독립의 조건들을 만족해야 한다. 이것은 내적(inner product) 공간상 $-\pi/2$ 와 $\pi/2$ 그리고 $0, \pi$ 간에 상호상관성분이 없다는 것을 의미한다. 따라서, 홀로그래픽 메모리시스템에서 벡터 성분을 포함하는 기준빔의 내적상에 상관이 억제되기 위해서는 복소위상간에 상호적으로 완전히 상쇄되어야 한다.

여기서, CPC 상호간에 랜덤성과 직교성을 보장하기 위해 CPC를 구성하는 기본단위의 위상코드 행렬로써 2×2 행렬의 ECPC (elementary complex phase code)를 정의하게 된다. 따라서, 2×2 행렬에서 각 R_t 와 I_t 의 조합에 의해 생성될 수 있는 ECPC의 경우의 수는 식 (6)과 같이 ${}^4C_2 \times 24$ 로 주어지게 된다.

$$ECPC_1 = \begin{bmatrix} R_1 & I_1 \\ R_1 & I_1 \end{bmatrix}, ECPC_2 = \begin{bmatrix} I_1 & R_1 \\ I_1 & R_1 \end{bmatrix}, \\ ECPC_3 = \begin{bmatrix} R_1 & R_1 \\ I_1 & I_1 \end{bmatrix}, ECPC_4 = \begin{bmatrix} I_1 & I_1 \\ R_1 & R_1 \end{bmatrix}, \\ ECPC_5 = \begin{bmatrix} R_1 & I_1 \\ I_1 & R_1 \end{bmatrix}, ECPC_6 = \begin{bmatrix} I_1 & R_1 \\ R_1 & I_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

또한, CPC를 효과적으로 생성하기 위하여 각 ECPC에 대응되는 C-ECPC(Counterpart ECPC)를 정의하고 ECPC와 함께 사용함으로써 어드레스빔 상호간에 이론적으로 완벽한 직교성을 보장하게 된다. 즉, 특정 ECPC가 주어지면 복소내적 공간상에서 직교성을 만족하기 위해 그 ECPC에 대응되는 C-ECPC를 표 1과 같이 프로그램적으로 생성하여 함께 쌍으로 사용하게 된다. 표 1은 식 (6)의 ECPC1과 ECPC2에 대응되는 C-ECPC1과 C-ECPC2를 각각 나타낸 것이다.

3. RCE를 이용한 CPC의 위상 랜덤성 분석 ECPC/ C-ECPC 쌍을 이용한 CPC의 생성시 각

표 1. ECPC1 및 ECPC2에 대해 발생 가능한 C-ECPC의 예

		발생 가능한 ECPC 쌍 (ECPC 및 C-ECPC)					
C A S E	(1)	ECPC1		ECPC1		ECPC1	
		1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>
		1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>
		C-ECPC(1)		C-ECPC(2)		C-ECPC(3)	
		<i>i</i>	1	- <i>i</i>	-1	- <i>i</i>	1
		- <i>i</i>	-1	<i>i</i>	1	- <i>i</i>	1
	ECPC1		ECPC1		ECPC1		
	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	
	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	
	C-ECPC(4)		C-ECPC(5)		C-ECPC(6)		
<i>i</i>	-1	- <i>i</i>	1	<i>i</i>	-1		
<i>i</i>	-1	<i>i</i>	-1	- <i>i</i>	1		
C A S E	(2)	ECPC2		ECPC2		ECPC2	
		<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1
		<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1
		C-ECPC(1)		C-ECPC(2)		C-ECPC(3)	
		-1	- <i>i</i>	1	<i>i</i>	-1	<i>i</i>
		1	<i>i</i>	-1	- <i>i</i>	-1	<i>i</i>
	ECPC2		ECPC2		ECPC2		
	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	
	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	<i>i</i>	1	
	C-ECPC(4)		C-ECPC(5)		C-ECPC(6)		
1	- <i>i</i>	-1	<i>i</i>	1	- <i>i</i>		
1	- <i>i</i>	1	- <i>i</i>	-1	<i>i</i>		

각의 ECPC 및 C-ECPC는 서로 다른 코드로 간주하여 랜덤성이 보장되도록 분포되어야 하는데 본 논문에서는 식 (5)의 조건을 만족하는 RCE(Random Code with Equality) 알고리즘을 사용하여 배열하였다.

RCE는 “-1”과 “+1”의 위상값을 동일한 확률로 발생시킴으로서 상호상관 성분의 발생원인이 되고 있는 특정영역에 동일한 위상값의 집중을 제한할 수 있는 랜덤코드이다.

즉, CPC의 각 좌표별로 생성된 ECPC/ C-ECPC 쌍은 그림 2에서와 같이 $N/2 \times N/2$ 의 크기를 갖는 RCE의 위상원소인 1과 -1의 값에 각각 대응되어 매핑됨으로써 CPC를 생성하게 된다. 즉, 그림 2는 $N/2 \times N/2$ 의 크기를 갖는 RCE를 이용하여 2×2 행렬의 ECPC/ C-ECPC 쌍으로 구성되는 $N \times N$ 크기의 CPC의 생성과정을 나타낸 것이다.

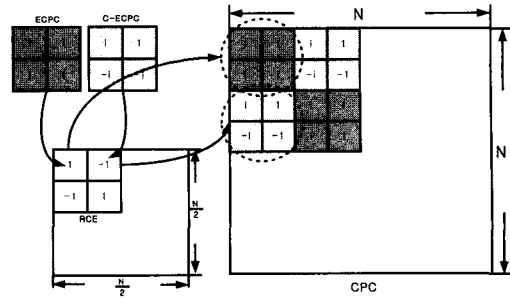


그림 2. RCE를 이용한 CPC 생성 개념도

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

1. 위상코드의 영상누화 모델링

위상코드로 다중화된 홀로그래픽 메모리 시스템에서 재생된 영상에는 위상코드들 간의 상호상관으로 다른 영상의 일부가 섞여서 나타나게 되는데 이를 영상누화(crosstalk)라 한다. 이러한 영상누화는 위상코드를 표현하는 상용 공간광변조기의 비선형적 위상 특성에 기인한다. 따라서, 본 논문에서는 영상누화를 야기하는 위상변조 에러를 고려하여 저장 및 재생시의 어드레스맵 사이의 위상 불일치를 식 (7)과 같이 모델링하여 분석하였다.

$$\Delta e = \varphi_{ik} - \varphi_{jk} \quad (7)$$

여기서, φ_{jk} 는 j 번째 저장하고자 영상에 대응하는 어드레스맵의 k 번째 위상성분에 해당되며 φ_{ik} 는 i 번째 저장된 영상을 복원하기 위한 어드레스맵의 k 번째 위상성분에 해당된다. 위상코드 생성 알고리즘으로 구현된 세 가지 위상코드들에 위상불일치에 해당되는 오차율 -1, +1, - j 와 j 에 대해 각각 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%씩을 갖는 위상에러 $\Delta e(x, y)$ 를 의도적으로 부가하였다. 즉, $c_j(f_x, f_y)$ 와 $c'_j(f_x, f_y)$ 를 각각 위상에러가 삽입되기 전과 후의 2차원 위상코드라고 표현 한다면, 식 (8)과 같이 위상에러가 부과된 위상코드를 모델링할 수 있다.

$$c'_j(f_x, f_y) = c_j(f_x, f_y) + \Delta e(x, y) \quad (8)$$

여기서, $\Delta e(x, y)$ 는 위상코드에 의도적으로 부과된 위상에러 함수로 위상코드 각각의 벡터원소에 대한 위상 오차율을 갖는다. 위상코드 다중화 방법에 의해 여러 개의 저장된 영상을 복원할 경우, 각각의 상호상관성분이 균일하지 않고 불규칙적인 값을 갖으면 연속적인 영상의 복원에 있어서 문제가

발생할 수도 있다. 따라서 상호상관성분의 평균값 및 표준편차의 값이 낮게 유지되어야 한다.

식 (12)는 정규화된 자기상관성분값에 대한 상호상관값의 비를 이용하여 위상코드의 SNR을 나타낸 것으로 상호상관성분은 SNR과 반비례하므로 상호상관성분의 발생을 최소화하면 SNR이 증가하게 된다.

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

식 (9)에서 A_i 와 C_i 는 정규화된 자기상관 및 상호상관 값을 각각 나타낸다. 따라서, 식 (8)과 (9)에 의해 얻어진 상관관계에 대한 평균값 및 표준편차값과 SNR을 이용하여 각각의 위상코드에 대한 영상누화 특성을 분석함으로써 홀로그래픽 메모리 시스템에서 사용될 수 있는 보다 효율적인 위상코드를 제시할 수 있다.

2. CPC의 영상누화 특성분석

일반적으로, 위상코드 다중화 기법을 이용한 홀로그래픽 메모리 시스템의 실질적 구현을 위해서는 상용 SLM에서 발생하는 위상변조 에러에 강인하면서 직교 및 랜덤 특성이 보장되는 효과적인 위상코드가 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 새로이 제시된 CPC와 기존의 PR, WHM, RCE코드에 대한 자기상관 및 상호상관 값을 계산함으로써 각 위상코드의 영상누화 특성을 비교 분석하였다. 그림 3은 상용 SLM의 위상에러를 고려하여 각각의 위상코드에 0%에서 25%사이의 위상에러를 부가적으로 추가시키면서 구한 SNR 결과를 나타낸 것이다. 여기서, 어드레스빔의 크기를 32x32 픽셀로 고정하여 각 코드에 대해 500개의 서로 다른 위상패턴을 랜덤하게 생성하였다. 그리고, 각각의 SNR은 500개의 어드레스빔 간의 자기상관 및 상호상관의 평균값으로 계산하였다.

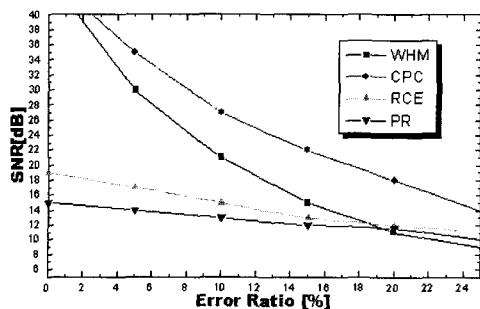


그림 3. 위상에러에 따른 각 위상코드의 SNR 변화

그림 3에서 위상에러에 대한 SNR 변화를 살펴보면 먼저, 위상에러 2%까지는 WHM 과 CPC는 비슷한 SNR 변화를 나타내고 있으나 6%이후에는 WHM의 경우 위상에러에 따른 영향이 비교적 심하게 나타남을 알 수 있다. 특히, WHM의 경우 19%의 위상에러 까지는 PR과 RCE에 비해 상대적으로 높은 SNR을 가지지만 20% 이후 부터는 PR과 RCE에 비해서도 SNR이 저하되는 것을 알 수 있다.

즉, WHM는 위상에러가 존재하지 않는 경우에 이상적인 직교코드이지만 상용 SLM의 비선형적인 위상변조에 의한 위상에러가 발생됨에 따라 SNR이 크게 감소하게 됨을 알 수 있다. 이는 복원된 영상에 영상누화의 발생 가능성이 많다는 것을 의미한다. 또한, PR 및 RCE 경우, 영상누화 및 SNR에 대한 위상에러의 영향이 비교적 WHM 보다 적음을 알 수 있다. 이는 PR 및 RCE가 기본적으로 랜덤한 특성을 가지고 있기 때문에 나타난 현상이다. 그러나 CPC의 경우는 고유한 직교 및 랜덤 특성을 갖도록 설계됐기 때문에 위상에러에 매우 강건함을 알 수 있다.

즉, 그림 3을 통해 보면 CPC는 4개의 위상코드 중 위상에러의 영향을 가장 적게 받으며 가장 큰 SNR 값을 갖음을 알 수 있다. 따라서, 새로이 제시된 CPC는 기존의 위상코드에 비교 상용 시스템의 위상에러 영향을 가장 최소화시킬 수 있는 위상코드로 사용이 가능함을 알 수 있다.

3. 위상코드간 상호상관 특성분석

위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템에서는 어드레스빔간의 상호상관값이 낮고, 서로 직교성을 갖는 많은 어드레스빔을 갖고 있어야 저장밀도를 높일 수 있다. 또한, 복원시 인접한 영상에 대한 누화를 최소화시키기 위해서 상용 공간광변조기의 위상 에러에 강건해야 한다.

그림 4, 5는 10% 위상에러에 대해 구한 각 위상코드에 대한 평균 상호상관 값 및 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 실험에서 어드레스빔의 크기는 32 x 32로 고정하고 위상코드간에 500번의 상호상관을 계산하여 평균값을 구하였다. 그림 4를 보면 CPC, PR, RCE 및 WHM의 평균 상호상관값이 0.021, 0.081, 0.057 및 0.027로 각각 나타나 CPC가 가장 작게 나타났으며 다른 코드에 비해 평균적으로 1.5-4 배정도 낮음을 알 수 있다. 그리고, 그림 5의 평균 표준편차 결과를 보면, CPC, PR, RCE 및 WHM가 0.0113, 0.031, 0.027 및 0.023로 각각 나

타나 역시 CPC가 가장 작게 나타났으며 다른 코드에 비해 평균적으로 2.3배 정도 낮음을 알 수 있다.

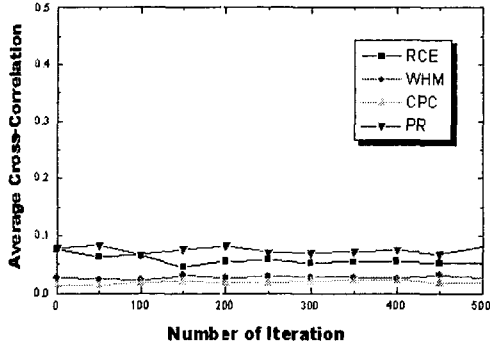


그림 4. 500번 상호상관시킨 각 위상코드의 평균 상호상관값

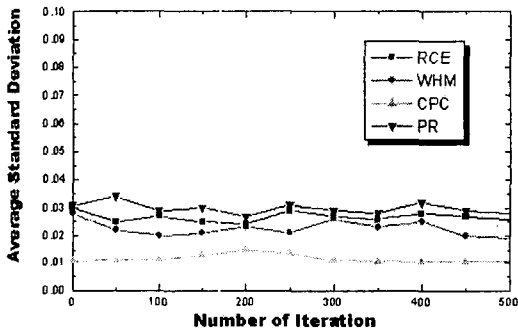


그림 5. 500번 상호상관시킨 각 위상코드의 평균 표준편차

그림 6은 식 (9)를 이용하여 각 코드에 대해 계산된 SNR 값을 나타낸 것으로 CPC가 27.4dB, PR이 13.9dB, RCE가 15.6dB 그리고 WHM이 21.2dB로 각각 나타나 CPC가 기존의 위상코드에 비해 가장 큰 SNR 값을 갖음을 알 수 있다.

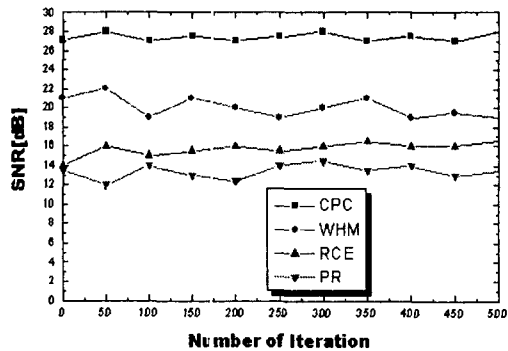


그림 6. 각 위상코드의 SNR 의존성 (빔크기: 32 x 32, 위상에러율: 10%)

표 2는 이상에서 분석한 각 위상코드에 대한 평균 상호상관값, 표준편차 및 SNR 값을 요약하여 나타낸 것이다. 표에서 보면 CPC가 가장 작은 상호상관치 및 표준편차를 갖으며 가장 큰 SNR 값을 갖는데 이는 CPC가 고유한 랜덤특성을 가지면서 완벽한 직교성이 보장되도록 설계됐기 때문에 다른 코드에 비해 복원된 재생영상에 영상누화가 가장 적게 나타난다는 것을 의미한다.

따라서, 상용 SLM의 위상변조 에러를 고려한 실질적인 홀로그래픽 메모리 시스템의 위상 다중화 코드로 CPC를 사용할 경우 다른 방법들에 비하여 상대적으로 높은 복원 능력과 안정적인 위상코드 어드레스빔의 구현이 가능함을 알 수 있다.

표 2. 각 위상코드에 대한 상호상관 평균, 표준편차 및 SNR값

상호상관	위상 코드(32 x 32)			
	PR	RCE	WHM	CPC
평균값	0.081	0.057	0.027	0.021
표준편차	0.031	0.027	0.023	0.0113
SNR	13.9	15.6	21.2	27.4

IV. CPC의 어드레스빔 갯수 분석

본 연구에서는 $n \times n$ 크기의 어드레스빔을 기준으로 새로이 제안된 CPC 및 기존 위상코드로 생성 가능한 어드레스빔 개수를 비교 분석하고자 한다.

먼저, 기존의 PR코드는 랜덤하게 "-1"과 "+1"의 두 가지 발생 가능한 위상값으로 분포되기 때문에 가능한 어드레스빔의 갯수는 순열의 수, nP ,에 의해 표현될 수 있다. 따라서, 픽셀수가 $n \times n$ 일 때 PR코드의 어드레스빔 갯수, M_{PR} 은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$M_{PR} = (2!)^n \tag{10}$$

그리고, RCE는 본 논문에서 CPC를 구현하기 위해 사용된 코드로서 어드레스빔의 픽셀수가 $n \times n$ 이고 블록크기가 $m \times m$ 인 경우, RCE의 어드레스빔 갯수, M_{RCE} 는 조합의 수 nC_m 에 의해 식 (11)과 같이 주어진다.

$$M_{RCE} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right)^{\left(\frac{n}{m}\right)^2} \tag{11}$$

또한, 기존의 일반적인 위상 다중화 방법으로 사용되고 있는 WHM의 패턴은 2^n 픽셀 형태로 주어지기 때문에 WHM의 어드레스빔 갯수, M_{WHM} 은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$M_{WHM} = 2^n \quad (12)$$

한편, $L \times L$ 블록크기를 갖는 ECPC와 C-ECPC 쌍이 픽셀수 $n \times n$ 에 해당되는 CPC의 어드레스빔으로 배열되는 경우 PR에 의해 구성될 수 있으며 발생 가능한 어드레스빔 갯수, M_{CPC-PR} 은 식(13)과 같이 주어진다.

$$M_{CPC-PR} = (2!)^{\binom{n}{L}} \quad (13)$$

그리고, $L \times L$ 블록크기를 갖는 ECPC와 C-ECPC 쌍을 $m \times m$ 픽셀로 구성된 RCE의 +1과 -1에 매핑함으로써 얻을 수 있는 $n \times n$ 픽셀의 CPC 갯수, $M_{CPC(B-RCE)}$ 는 식 (14)와 같이 주어진다.

$$M_{CPC(B-RCE)} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right) \quad (14)$$

따라서, $L \times L$ 블록크기를 갖는 ECPC가 픽셀수 $n \times n$ 에 해당되는 CPC로 배열될 경우 발생 가능한 어드레스빔 갯수는 $Lm \times Lm$ 이 되므로 CPC의 총 어드레스빔의 갯수, $M_{CPC-RCE}$ 은 식 (14)를 사용하여 식 (15)와 같이 주어진다. 식 (15)를 보면 CPC의 어드레스빔 갯수는 주로 RCE 갯수에 의존함을 알 수 있다.

$$M_{CPC-RCE} = \left(\frac{(m^2)!}{\left(\frac{m^2}{2}\right)! \left(\frac{m^2}{2}\right)!} \right)^{\binom{n}{LM}} \quad (15)$$

표 3은 어드레스빔의 크기를 32×32 픽셀로 고정하고 식 (10), (11), (12), (15)에 의해 구한 각 위상 코드의 생성가능한 어드레스빔의 갯수를 나타낸 것이다. 즉, 표에서 보면 RCE가 1.6096×10^{199} 으로 가장 많은 어드레스빔을 갖고, WHM의 경우 2^n 이므로 가장 작은 어드레스의 갯수를 가짐을 알 수 있다. 그러나, 이러한 결과값은 이론적으로 발생 가능한 모든 경우의 수를 나타낸 것으로 실제 응용에서는 WHM과 RCE는 모든 경우를 실제 홀로그래픽 메모리 시스템에 적용하기에는 한계가 있는 반면, CPC_{RCE} 은 직교성과 랜덤성이 보장되므로 모든

경우의 수의 어드레스빔 적용이 가능하다. 또한, CPC_{RCE} 는 RCE의 초기조건에 따라 상대적으로 많은 개수의 어드레스빔의 생성도 가능함으로 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 구현을 위한 실질적인 위상코드으로써의 활용이 가능하다.

표 3. 각 코드의 생성 가능한 어드레스빔의 개수(32×32)

구 분	위상 코드(32×32)			
	PR	RCE	WHM	CPC_{RCE}
어드레스빔 개수	6.334 $\times 10^{49}$	1.6096 $\times 10^{199}$	4.295 $\times 10^9$	2.77 $\times 10^{711}$

V. 결론

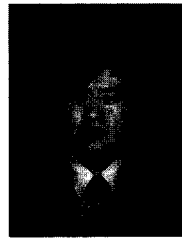
본 논문에서는 최근 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 실질적인 구현을 위해 CPC를 새로이 제시하였으며 CPC의 성능을 분석하기 위해 기존의 위상코드인 PR, RCE 및 WHM 등과 비교 분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 어드레스빔은 32×32 의 픽셀크기로 고정하였고, 위상코드를 표현하는 상용 공간광변조기의 비선형적 위상변조 특성을 고려하여 0~25%의 에러율을 갖는 위상 코드값을 의도적으로 부과하여 실험을 수행하였다. 또한, CPC 및 PR, RCE, WHM으로 코딩된 각 어드레스빔에 대한 자기상관 및 상호상관 값을 계산함으로써 위상코드간의 영상누화 및 SNR 특성을 비교 분석하였다. 실험결과, CPC의 상호상관 결과의 평균값이 0.021, 표준편차값이 0.0113으로 다른 위상코드에 비하여 가장 작게 나타났으며, SNR은 27.4로 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, 32×32 의 빔크기를 기준으로 할 때 CPC의 어드레스빔의 개수는 6.344×10^{49} 으로 나타나 기존의 위상 코드에 비해 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 따라서, 랜덤성과 직교성을 유지되도록 설계된 CPC는 위상에러가 존재하는 경우에서도 기존 위상코드와 비교하여 가장 작은 상호상관값과 가장 큰 SNR값을 갖고, 결과적으로 영상복원시 영상누화가 가장 작은 것으로 분석됨으로써 향후, 위상 다중화 홀로그래픽 메모리 시스템의 구현을 위한 실질적인 위상코드으로써 CPC의 응용 가능성이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Bashaw, J. F. Heanue, A. Aharoni, J. F. Walkup, L. Hesselink, "Cross-talk considerations for angular and phase-encoded multiplexing in volume holography," *Journal of Optical Society of America. B*, vol.11, no.10, p.1820, 1994
- [2] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Optics Communication.*, vol.85, pp.171-176, 1991
- [3] M. Harwit, N. Sloane, "*Hadamard Transform Optics*," Academic Press (1979)
- [4] X. Yang, Z. Wen, "Hadamard codes of $m \neq 2$ " in phase-code-multiplexed holographic memories," *Optical Engineering*, vol. 35, no. 12, pp. 3639-3641, 1996
- [5] Z. Wen, Y. Tao "Orthogonal codes and cross-talk in phase-code multiplexed volume holographic data storage," *Optics communications*, vol. 148, pp. 11-17, 1997
- [6] K. T. Kim, B. C. Cho, S. K. Gil, E. S. Kim, "Performance analysis of phase codes multiplexed holographic memory", *Applied Optics.*, vol.39, no.23, 2000
- [7] C. Zhou, S. Stankovic, C. Denz, and T. Tschudi, "Phase-codes of Talbot array illumination for encoding holographic multiplexing storage", *Optics Communication*, vol.161, pp.209-211, 1999
- [8] K. Curtis, D. Psaltis, "Crosstalk in phase-coded holographic memories", *Journal of Optical Society of America. A*, vol.2547-2550, vol.10, no.12, 1993
- [9] B. C. Cho, E. S. Kim, "Complex phase encoding method for phase-code multiplexed holographic memory", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.40, no.10, pp.1110-1112, 2001
- [10] C. Denz, K. Muller, T. Heimann, and T. Tschudi, "Volume holographic storage demonstrator based on phase-coded multiplexing," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.4, no.5 pp. 822-839, 1998
- [11] C. Denz, T. Dellwig, J. Lembcke, and T. Tschudi, "Parallel optical image addition and subtraction in a dynamic photorefractive memory by phase-code multiplexing", *Optics Letter.*, vol.21, no.4, pp.278-280, 1996

조 병 철(Byung-Chul Cho)

정회원



1998년 2월 : 관동대학교
전자공학과 공학사
2000년 2월 : 광운대학교
전자공학과 공학석사
2000년 3월~2002년 2월 :
광운대학교 전자
공학과 박사과정수료

<주관심 분야> 홀로그래픽 메모리, 3차원 영상 디스플레이

김 정 진(Jung Jin Kim)

정회원



2002년 2월 : 광운대학교 전자
공학과 박사과정수료
2002년 3월~현재 : (주)
맥스소프트기술연구소
선임연구원

<주관심 분야> 정보보호, 워터마킹, 암호화, 컴퓨터 비전

김 은 수(Eun-Soo Kim)

정회원

한국통신학회지 Vol.24, No. 9A 참조